

هیات تحریریه:

دکتر رحیم نقی‌زاده	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر پروین علیزاده	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر رسول صراف ماموری	دانشگاه تربیت مدرس
علی محمد هادیان	دانشگاه تهران
دکتر مه‌ری مشهدی	دانشگاه مالک اشتر
دکتر علیرضا آقایی	پژوهشگاه مواد و انرژی
دکتر محمد رضوانی	دانشگاه تبریز
دکتر ابراهیم قاسمی	پژوهشگاه رنگ
دکتر سیروس جوادپور	دانشگاه شیراز

گروه مشاوران:

دکتر علی اصغر بهنام قادر	پژوهشگاه مواد و انرژی
مهندس نادر خلیلی	فرآورده‌های دیرگداز مهر آریان فارس
مهندس سیروس روشنفکر فلاح	شرکت تجهیز مواد پیشگام
مهندس محمد روشنفکر فلاح	انجمن تولید کنندگان کاشی و سرامیک کشور
مهندس میر حسام‌الدین داعی نیاکی	شرکت گل سرخ گستر آمل
مهندس علی زاویه	انجمن صنفی کارفرمایی صنعت مواد نسوز
مهندس حسین زجاجی	انجمن صنفی صنعت شیشه
مهندس محمود سالاریه	شرکت آرمتاز
دکتر آرمان صدقی	دانشگاه بین الملل امام خمینی
دکتر احمد صفری	دانشگاه ایالتی نیوجرسی
مهندس حسین عزیزیان	صنعت سیمان
دکتر مهران غفاری	شرکت اشکان پارت آفرین
دکتر عباس فاضلی	سازمان زمین شناسی کشور
دکتر کاووس فلامکی	دانشگاه امیرکبیر
مهندس عباسعلی قصابی	شرکت چینی زرین ایران
مهندس حسین قصابی	دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر ابراهیم قاسمی	پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ
دکتر کاظم قنبری	دانشگاه شفیلد انگلستان
دکتر مهرداد کشمیری	دانشگاه بریتیش کلمبیا
دکتر علیرضا گنجی	شرکت معدنی و صنعتی سوراوچین عقیق
دکتر حمیدرضا نعمتی	شرکت لعابیران
دکتر امیر عباس نوربخش	دانشگاه آزاد

سال یازدهم، شماره شصت و چهارم

زمستان ۱۳۹۹

ISSN: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

« با درجه علمی »

صاحب امتیاز: انجمن سرامیک ایران

مدیر مسئول: دکتر مسعود محبی

سردبیر: دکتر سعید باغشاهی

مدیر اجرایی: سعیده علیشاهی

گردآوری مطالب: محبوبه پیریایی

نشانی: تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده

مهندسی مواد و متالورژی، دفتر انجمن سرامیک ایران

صندوق پستی: تهران، ۱۱۱-۱۶۸۴۵

تلفن: ۷۷۸۹۹۳۹۹

دورنگار: ۷۷۸۹۹۳۹۹

پست الکترونیکی: info@jjicers.ir

نشانی سایت اینترنتی: www.jjicers.ir

طراحی، گرافیک و صفحه‌آرایی: تمام طرح ۷۷۲۰۹۲۲۸

اصلاح و خلاصه کردن مطالب با نظر مترجمان و نویسندگان انجام می‌شود. مسئولیت محتوای مقالات به عهده نویسندگان و مترجمان است. مطالب ارسالی برگردانده نمی‌شود.

فهرست مطالب:

۱	اخبار و تازه‌ها
۱	اخبار انجمن سرامیک ایران
۱	کارگاه طیف‌سنجی رامان
۱	نخستین کنفرانس ملی مواد نوین
۴	اخبار شرکت‌ها و مراکز پژوهشی
۴	فعالیت ۸۶ کارخانه بزرگ کاشی و سرامیک در یزد
۴	فعالیت ۱۰۰ واحد تولیدی مازاد در صنعت کاشی و سرامیک کشور
۵	اخباری از احداث کارخانه کاشی و سرامیک چینی‌ها در کرمانشاه
۶	پوشش نانو سرامیک خودرو چیست؟
۸	اخبار علمی
۸	عرضه پوشش‌های سرامیکی تقویت شده با گرافن
۸	توسعه‌ی تصفیه‌خانه‌های مبتنی بر فناوری غشاء سرامیکی
۹	محصولات جدید سیلیکونی پزشکی
۹	مبدل‌های انرژی غیرسمی و انعطاف‌پذیر می‌توانند ...
۱۰	پژوهشگران پودر زغال سنگ را در اجاق میکروویو به گرافیت تبدیل می‌کنند.
۱۱	آیا هوش مصنوعی ترکیبات سرامیکی بهتری خلق می‌کند؟
۱۳	مقالات پژوهشی
۱۳	آشنایی با روش سنتز سیمان ژئوپلیمری و ویژگی‌های آن
۲۵	ساخت سرامیک آلومینا و کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا به روش ...
۳۲	بررسی اثر غلظت نانو ذرات اکسید آهن بر شاخص‌های رشد گیاه آبی علف مویی
۴۲	بررسی خواص ریزساختاری ماده کاتدی $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده
۵۱	مروری بر تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت‌های دی‌بورید تیتانیومی
۵۹	تاثیر اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO ₂ و اعمال ...
۷۶	لیست اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران
۸۴	تقویم رویدادهای سرامیک

اخبار انجمن سرامیک ایران

کارگاه طیف‌سنجی رامان

کارگاه طیف‌سنجی رامان با سخنرانی دکتر Benjamin J A Moulton از کشور برزیل و همکاری انجمن سرامیک ایران در روز سه

Iranian Ceramic Society & GlassyAge Research Group
invite you to attend

A WORKSHOP on Raman Spectroscopy: Investigating Silicate Glasses & Glass-ceramics

SPEAKER

Dr. Benjamin J A Moulton
Postdoctoral Fellow, CeRTEV, UFSCar, Brazil

22nd December 2020
15:00 -17:00 GMT

Registration on www.GlassyAge.com/Raman

شنبه مورخ ۲ دی ماه ۱۳۹۹ با موضوع "طیف‌سنجی رامان: بررسی شیشه‌های سیلیکاتی و شیشه سرامیک‌ها" به صورت برخط برگزار شد. شرکت در این وبینار برای عموم رایگان بود و اکثر شرکت‌کنندگان در این کارگاه اساتید دانشگاه، مهمان‌های خارجی، دانشجویان دکتری و دانشجویان رشته‌ی مهندسی مواد با گرایش سرامیک بودند.

نخستین کنفرانس ملی مواد نوین

نخستین کنفرانس ملی مواد نوین به همت پژوهشکده مواد نوین سرامیکی با حمایت انجمن سرامیک ایران و همکاری دانشگاه یزد در تاریخ ۱۲ و ۱۳ اسفند ماه ۱۳۹۹ به مدت ۲ روز به صورت مجازی از طریق پلتفرم اسکای روم برگزار شد. از جمله محورهای این کنفرانس می‌توان به سرامیک‌های مهندسی، دیرگدازهای پیشرفته، کاربردهای نوین مهندسی مواد، مهندسی سطوح و پوشش‌های نوین، نانوپودر، نانوکامپوزیت، نانوکاتالیست، نانویومود، نانوبیوتکنولوژی، جوشکاری و اتصال‌دهی نانو و میکرو، آلیاژهای شیشه‌ای، فولادهای پیشرفته و مواد و آلیاژهای هوشمند اشاره کرد.

در روز نخست پس از برنامه افتتاحیه، سخنرانی کلیدی آقای دکتر جواد مشایخ، معاون محترم امور انرژی و مواد مرکز همکاری‌های تحول و پیشرفت ریاست جمهوری تحت عنوان "اهمیت و نقش کلیدی فناوری‌های مواد پیشرفته در تقویت بنیان‌های فناورانه و اقتصادی کشورها" ارائه شد. در ادامه کنفرانس، با ارائه ۳ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۱ (مواد پیشرفته - سرامیک‌های مهندسی) و ارائه ۳ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۲ (نانومواد - نانوپودر، نانوکاتالیست، نانوسرامیک) با حضور برخط پژوهشگران و اعضای محترم هیات رییسه به همراه بخش پرسش و پاسخ برگزار شد. پس از برگزاری پانل‌های

بسمه تعالی
برنامه زمان‌بندی نخستین کنفرانس ملی مواد نوین - ۱۲ اسفند ۱۳۹۹

برنامه	ساعت
افتتاحیه	۸:۳۰ - ۹:۰۰
سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر جواد مشایخ	۹:۰۰ - ۱۰:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۱)	۱۰:۰۰ - ۱۱:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۲)	۱۱:۰۰ - ۱۲:۰۰
سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر علی نعمتی	۱۲:۰۰ - ۱۳:۰۰
نماز و استراحت	۱۳:۰۰ - ۱۴:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۳)	۱۴:۰۰ - ۱۵:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۴)	۱۵:۰۰ - ۱۶:۱۵
انتهای برنامه - روز اول	

برنامه زمان‌بندی نخستین کنفرانس ملی مواد نوین - ۱۳ اسفند ۱۳۹۹

برنامه	ساعت
سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر مهدی کلانتر	۸:۳۰ - ۹:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۵)	۹:۰۰ - ۱۰:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۶)	۱۰:۰۰ - ۱۱:۰۰
سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر مسعود حافظی	۱۱:۰۰ - ۱۱:۳۰
کارگاه علمی جناب آقای مهندس محمدحسین بصیری	۱۱:۳۰ - ۱۳:۰۰
نماز و استراحت	۱۳:۰۰ - ۱۴:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۷)	۱۴:۰۰ - ۱۵:۰۰
پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی (پانل شماره ۸)	۱۵:۰۰ - ۱۶:۱۵
اختتامیه	۱۶:۱۵ - ۱۷:۰۰
انتهای کنفرانس	

تخصصی، سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر علی نعمتی، هیات علمی محترم دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف تحت عنوان "نانوکامپوزیت‌های گرافن و مشتقات آن با اکسیدهای سرامیکی - ریزساختار و خواص و کاربردها" به صورت برخط ارائه شد.

در ادامه روز نخست برگزاری کنفرانس پس از نماز و استراحت، با ارائه ۳ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۳ (مواد

پیشرفته- کاربردهای نوین مهندسی مواد) و ارائه ۴ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۴ (بیومواد- نانوبیومواد، نانوبیوتکنولوژی، دارورسانی) با حضور برخط پژوهشگران و اعضای محترم هیات ریسه به همراه بخش پرسش و پاسخ، ادامه یافت. نخستین کنفرانس ملی مواد نوین در روز نخست با تقدیر و تشکر از شرکت کنندگان و حامیان محترم کنفرانس و اعلام برنامه روز دوم به کار خود خاتمه داد.

برنامه روز دوم کنفرانس با سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر مهدی کلانتر، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد تحت عنوان "بیومواد- داربست‌های استخوانی" آغاز شد. کنفرانس با ارائه ۳ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۵ (مواد پیشرفته- دیرگدازهای پیشرفته، فولادهای پیشرفته) و ارائه ۳ مقاله در پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۶ (بیومواد- مواد دندان، نانوبیومواد، نانوبیوتکنولوژی) با حضور برخط پژوهشگران و اعضای محترم هیات ریسه به همراه بخش پرسش و پاسخ ادامه یافت. پس از برگزاری پانل‌های تخصصی، سخنرانی کلیدی جناب آقای دکتر مسعود حافظی، مدیر عامل محترم شرکت پردیس پژوهش فناوران یزد تحت عنوان "کاربرد کلسیم فسفات در مواد آرایشی، بهداشتی و پزشکی با نگاه بازار" ارائه شد.

در ادامه روز دوم برگزاری کنفرانس پس از نماز و استراحت، پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۷ (مواد پیشرفته- مهندسی سطوح و پوشش‌های نوین، الکتروسرامیک، مواد مغناطیسی) با ارائه ۳ مقاله و پانل تخصصی ارائه مقالات سخنرانی ۸ (نانومواد- نانوپودر، نانوکاتالیست، نانسرامیک) با ارائه ۴ مقاله و حضور برخط پژوهشگران و اعضای محترم هیات ریسه به همراه بخش پرسش و پاسخ، اجرا شد. نخستین کنفرانس ملی مواد نوین با اجرای مراسم اختتامیه به همراه معرفی مقالات برتر در دو بخش سخنرانی و پوستری به شرح ذیل به کار خود پایان داد.

رونمایی از سایت نمایشگاه مجازی مواد و فناوری‌های نوین و پخش کلیپ معرفی، از دیگر برنامه‌های روز دوم کنفرانس بود. لازم به ذکر است مقالات پذیرفته شده به صورت پوستر در روزهای برگزاری کنفرانس، جهت مشاهده اساتید، دانشجویان، صنعت‌گران و شرکت کنندگان محترم در فضای تارنمای نخستین کنفرانس ملی مواد نوین به نمایش گذاشته شد.



کارگاه‌های آموزشی

کارگاه علمی تحت عنوان "فرآیندهای تولید پوشش‌های سطحی مقاوم به سایش" توسط جناب آقای مهندس محمدحسین بصیری رییس محترم هیات مدیره شرکت بهبود صنعت مهان، در روز دوم کنفرانس برگزار شد. در این کارگاه آموزشی، مطالبی در رابطه با موضوعات فرآیندهای تولید پوشش‌های سطحی، پوشش‌های ایجاد شده از طریق شرکت زیرلایه در واکنش، انواع

پوشش‌های رسوبی بر روی زیرلایه، پوشش‌های رسوبی از فاز بخار، احیای یون‌ها از یک محلول، پوشش‌های رسوبی در حالت مایع، جامد یا جامد-مایع آرایه شد که با استقبال شرکت‌کنندگان مواجه گشت.



نخستین کنفرانس ملی مواد نوین



۱۲ و ۱۳ اسفند ۱۳۹۹

برگزاری کارگاه علمی آنلاین

فرآیندهای تولید پوشش‌های سطحی مقاوم به سایش



ارائه دهنده:

جناب آقای مهندس محمدحسین بصیری
رییس هیات مدیره شرکت بهبود صنعت مهان

- فرآیندهای تولید پوشش‌های سطحی
- پوشش‌های ایجاد شده از طریق شرکت زیرلایه در واکنش
- انواع پوشش‌های رسوبی بر روی زیرلایه
- پوشش‌های رسوبی از فاز بخار
- پوشش‌های رسوبی از طریق احیای یون‌ها از یک محلول
- پوشش‌های رسوبی در حالت مایع یا جامد-مایع
- پوشش‌های رسوبی در حالت جامد

لازم به ذکر است ثبت نام و شرکت در این کارگاه برای اساتید، پژوهشگران و صنعتگران گرامی که فرآیند ثبت نام خود را در سایت کنفرانس کامل کرده اند، رایگان است. به شرکت‌کنندگان در کارگاه‌های آموزشی نخستین کنفرانس ملی مواد نوین، گواهینامه شرکت در کارگاه با مهر کنفرانس و امضای رییس کنفرانس اعطا خواهد شد. فرم ثبت نام در کارگاه آموزشی را از قسمت فایل‌ها در بخش اطلاع‌رسانی سایت، دانلود کرده و پس از تکمیل به آدرس پست الکترونیکی دبیرخانه کنفرانس info.mcmi@acecr.ac.ir ارسال کنید.



برای کسب اطلاعات بیشتر به سایت کنفرانس www.mcmi-mmc.ir مراجعه فرمایید.

اخبار شرکت‌ها و مراکز پژوهشی

فعالیت ۸۶ کارخانه بزرگ کاشی و سرامیک در یزد

گروه استان‌ها- مدیرکل صمت استان یزد با اشاره به صدور مجوز ۲۰ کارخانه "پرس به بعد" کاشی و سرامیک در یزد گفت: ۸۶ کارخانه بزرگ کاشی و سرامیک در یزد فعال است. به گزارش خبرگزاری تسنیم از یزد، محمدرضا علمدار یزدی دقایقی قبل در آیین افتتاح یک واحد صنعتی در شهرستان میبد اظهار داشت: یزد دومین استان معدنی، چهارمین استان صنعتی و هشتمین استان برتر صادر کننده غیرنفتی کشور است. وی با بیان اینکه در استان یزد ظرفیت‌های متعددی در حوزه صنعت وجود دارد تصریح کرد: در حال حاضر سه هزار واحد صنعتی دارای پروانه بهره‌برداری در استان مشغول به فعالیت هستند. مدیرکل صنعت، معدن و تجارت استان یزد به وجود دو هزار پروانه صنعتی کاغذی در استان اشاره کرد و گفت: اگر این پروانه‌های کاغذی که کارخانه آن وجود خارجی نداشت را از سیستم باطل نکرده بودیم الان تعداد پروانه‌های ما بیش از ۵ هزار مورد بود.



علمدار یزدی ادامه داد: حذف این پروانه‌های کاغذی سبب شد ما به سه هزار واحد فعال برسیم که ماحصل آن فعالیت در پنج گروه صنعتی است که زمینه اشتغال ۱۰۰ هزار نفر را در استان یزد فراهم کرده‌اند.

وی افزود: مجموع این واحدهای صنعتی استان یزد بالغ بر ۸۰۰ نوع کالا در یزد تولید می‌کنند که ۴۰۷ قلم آن به بیش از ۹۰ کشور دنیا تاکنون صادر شده است.

مدیرکل صنعت، معدن و تجارت استان یزد با

بیان اینکه یزد در سه صنعت قطب کشور محسوب می‌شود ادامه داد: یکی از این صنایع کاشی و سرامیک است که ۶۰ درصد از کل محصول تولیدی کشور را با ۸۶ کارخانه فعال به خود اختصاص داده‌ایم.

علمدار یزدی بیان کرد: با توجه به محدودیت‌های زیست محیطی، در برخی نقاط امکان صدور پروانه تولید کاشی به صورت کامل وجود ندارد و تاکنون به همین دلیل ۲۰ مجوز کارخانه پرس به بعد کاشی و سرامیک در محور عقدا به مه‌ریز صادر شده است.

منبع: <https://tn.ai/2456341>

فعالیت ۱۰۰ واحد تولیدی مازاد در صنعت کاشی و سرامیک کشور

عضو انجمن کاشی و سرامیک با بیان این که ۱۰۰ واحد تولیدی مازاد در بخش کاشی و سرامیک کشور وجود دارد گفت: امروز رویکرد تامین نیاز بازار داخلی توسط واحدهای کاشی و سرامیک بیش از هر زمان مورد توجه قرار گرفته است.

به گزارش خبرنگار اقتصادی خبرگزاری تسنیم، مهدی فکری امروز در نشست خبری با اشاره به اینکه از مجموع ۱۴۷ واحد تولید کاشی و سرامیک در سطح کشور، تعداد یکصد واحد مازاد محسوب می‌شوند، اظهار داشت: کاشی و سرامیک ایران از نظر کیفی اندکی پایین تر از ایتالیا و اسپانیا ارزیابی می‌شود، اما از لحاظ قیمت ارزان تر است و از همین رو آن‌ها توان رقابت با نرخ‌های ایران را ندارند.

این عضو انجمن کاشی و سرامیک گفت: امروز رویکرد تامین نیاز بازار داخلی توسط واحدهای کاشی و سرامیک بیش از هر زمان



مورد توجه قرار گرفته است به گونه‌ای که اکنون یکی از سه برند برتر این بخش بالغ بر ۹۵ درصد خرید مورد نیاز خود را از بازار داخلی تامین می‌کند که ۵۰۰ هزار دلار صرفه جویی ارزی به همراه داشته است.

فکری با بیان اینکه سال گذشته ارزش صادرات یک میلیون و ۴۰۰ هزار دلاری به اروپا توسط واحد تولیدی وی انجام شد، اضافه کرد: امروز تولیدات این مجموعه مورد استقبال کشورهای چین، هند، اسپانیا، ایتالیا، آلمان و روسیه قرار دارد.

وی از امضای قرار داد صادرات ۵۰۰ هزار متر مربع کاشی و سرامیک در ظرف ۱۰ روز گذشته خبر داد و افزود: صادرات به عراق دارای پیچیدگی زیادی است که شرکت‌های ایرانی توسط واسطه‌ها به شکل ریالی اقدام می‌کنند که دلان ریالی خرید می‌کنند و به طرف عراقی ارزی به شیوه‌های خاص می‌فروشند که بهره زیادی از این محل بدست می‌آورند.

مدیرعامل صنایع کاشی و سرامیک الوند تصریح کرد: اکنون ایران ۱۴۷ شرکت فعال کاشی و سرامیک دارد که باید با رویکرد صادراتی به فعالیت بپردازند و این رمز بقا در این صنعت محسوب می‌شود.

فکری تصریح کرد: رشد صنعت ساختمان، پیامد ارتقای فعالیت در صنعت کاشی و سرامیک را به دنبال دارد و انتظار می‌رود با برطرف شدن موانع در عرصه صادرات، تولیدات کشورمان بخوبی در بازارهای هدف قابلیت‌های خود را بروز دهند.

این تولیدکننده کاشی و سرامیک گفت: ظرفیت این واحد تولیدی امروز به رقم هفت میلیون و ۲۰۰ هزار متر مربع کاشی، سرامیک و پرسلان (کاشی‌های پرسلان با استفاده از خاک رس بسیار خاص به علاوه ماسه ریزدانه و فلدسپات ساخته می‌شود) رسیده و انتظار می‌رود به میزان عملکرد سال گذشته تولید انجام شود.

فکری اظهار داشت: امروز تحولات اقتصادی در کشور پیامد صعود و رشد برخی از بنگاه‌های تولیدی را فراهم کرده که از جمله آن‌ها صنعت مس و فولاد، اما صنعت کاشی و سرامیک بر بستر عرضه و تقاضا و صادرات به فعالیت خود ادامه می‌دهد و انتظار می‌رود با خوداتکایی بیشتر، حرف‌های زیادی در این عرصه داشته باشیم.

وی یادآور شد: برخی از صنایع با بهره مندی از افزایش نرخ ارز، از سوددهی بالایی برخوردار شدند، ضمن اینکه بعضی از صنایع تولیدات خاص به بازار عرضه کردند و یا رقیبی ندارند و نیز مشتریان‌شان در صف خرید قرار گرفته‌اند.

این عضو انجمن کاشی و سرامیک با بیان اینکه امروز بازارهای جهانی تنوع‌طلبی دارد و تولیدات به روز را خواستار است، گفت: تولیدکنندگان ایرانی به این خواسته بازار باید توجه لازم را داشته باشد و بر همین اساس این واحد تولیدی در نیمه نخست امسال نسبت به مدت مشابه سال قبل ۴۴۹ درصد رشد سود داشت و از هفت میلیارد و ۳۰۰ میلیون تومان به ۳۳ میلیارد و ۷۸ میلیون تومان رسید.

منبع: <https://tn.ai/2425994>

اخباری از احداث کارخانه کاشی و سرامیک چینی‌ها در کرمانشاه

ایسنا/کرمانشاه: مدیر مرکز خدمات سرمایه‌گذاری استان کرمانشاه ابراز امیدواری کرد، هرچه زودتر عملیات اجرایی کارخانه کاشی و سرامیک چینی‌ها از سر گرفته شود.

فرید خلیلی در گفت‌وگو با ایسنا، با اشاره به آخرین وضعیت کارخانه کاشی و سرامیک که سرمایه‌گذاران چینی در کرمانشاه استارت آن را زده‌اند، گفت: این پروژه به دلیل مشکلات ناشی از بیماری کرونا و محدودیت‌هایی که برای تردد سرمایه‌گذاران چینی ایجاد شد، اکنون متوقف است.

وی ادامه داد: این موضوع باعث شد مهلت مجوز سرمایه‌گذاری پروژه در سال گذشته به اتمام برسد، اما با پیگیری‌هایی که انجام دادیم و هماهنگی با سرمایه‌گذاران و همچنین سازمان سرمایه‌گذاری، مجوز آن تا پایان اسفند سال قبل تمدید و قرار شد از نیمه اسفند کار از سر گرفته شود، اما دوباره به پیک کرونا برخوردیم و در نهایت مهلت مجوز دوباره به اتمام رسید.

مدیر مرکز خدمات سرمایه‌گذاری استان کرمانشاه با بیان اینکه دوباره رایزنی‌هایی با نماینده حقوقی چینی‌ها انجام شد، تاکید کرد: در این رایزنی هم تمدید مجوز سرمایه‌گذاری در دستور کار قرار گرفت و با سرمایه‌گذاران اتمام حجت کردیم که اگر تا دو ماه آینده کار خود را از سر نگیرند تعهدات و خدماتی که برای آن‌ها در نظر گرفتیم منتفی خواهد شد و شش ماه بعد از تاریخ جلسه نیز زمین از آنها پس گرفته و به سرمایه‌گذار دیگری داده می‌شود.

خلیلی تاکید کرد: آنچه که مشخص است، سرمایه‌گذار برای اجرای پروژه و ادامه آن تمایل دارد و امیدواریم روند کار هرچه زودتر از سر گرفته شود.

وی با بیان اینکه محدودیت اصلی که اکنون وجود دارد لزوم حضور پیمانکاران ناظر چینی برای نصب ماشین آلات و تجهیزات است و محدودیت‌های بیماری کرونا حضور این پیمانکاران را با چالش مواجه کرده، خاطرنشان کرد: قرار است فعلا کارهای سازه‌ای مانند دیوارکشی، ساختمان اداری، انبار و ... اجرایی شود و پس از بهبود شرایط کارهای ماشین آلات نیز انجام بگیرد.

معاون اقتصادی اداره کل اقتصاد و دارایی استان کرمانشاه میزان پیشرفت کنونی این طرح را نزدیک به ۲۰ درصد اعلام کرد. خلیلی از اعتبار ۱۱۰ میلیون دلاری این سرمایه‌گذاری یاد کرد و افزود: کارخانه کاشی و سرامیک چینی‌ها در صورت بهره‌برداری برای ۱۵۰۰ نفر به صورت مستقیم و سه هزار نفر به صورت غیرمستقیم اشتغال‌زایی به همراه دارد.

این پروژه اواخر سال ۱۳۹۸ در زمین ۲۲ هکتاری در شهرک صنعتی زاگرس استارت خورد و روند کار نیز برای مدتی خوب پیش رفت تا اینکه شیوع بیماری کرونا کار را به رکود کشاند.

منبع: <https://www.isna.ir/news/1400031007384>

پوشش نانو سرامیک خودرو چیست؟

مراقبت و نگهداری از بدنه خودرو دارای اهمیت بسزایی می‌باشد، زیرا بدنه خودرو اولین چیزی است که به چشم می‌آید. به گزارش ایسنا، بنابر اعلام فروشگاه گنجی پخش، عوامل زیادی می‌تواند به بدنه خودرو آسیب بزند. برای جلوگیری از آسیب عوامل محیطی همچون باران اسیدی، صمغ درختان، فضولات پرندگان، اثرات حشرات، مواد شیمیایی، اکسیداسیون، اشعه فرا بنفش، لنت ترمز و ... باید از پوشش محافظ استفاده نمود. پوشش‌های بدنه خودرو در انواع واکس، سیلنت، سرامیک واکس و نانو سرامیک به بازار ارائه می‌شوند. اما بهترین و مقاوم‌ترین نوع آنها، پوشش محافظ نانو سرامیک است.

پوشش نانو سرامیک از یک نوع مایع پلیمری از رزین سخت و سیلیکون دی‌اکسید (SiO₂) تشکیل شده است. "نانو" به ذراتی گفته می‌شود که حداقل یک بعد آن بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (۱۰^{-۹} m) باشد.

برخلاف تصور عموم سطح بدنه خودرو آنقدرها هم که فکر می‌کنید، صاف نیست و دارای شکاف‌هایی است که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده نمی‌باشد. مولکول‌های نانو سرامیک به داخل این شکاف‌ها نفوذ کرده و سطحی صاف بجا می‌گذارند، در نتیجه آلاینده‌ها و آب از روی بدنه خودرو سر می‌خورند.



یکی از دلایلی که نانو سرامیک را بهترین نوع پوشش کرده است، میزان مقاومت بالای آن در برابر اکسیداسیون و اشعه فرا بنفش است. اکسیداسیون سبب مات شدن رنگ بدنه و اشعه فرا بنفش سبب تخریب رنگ و به اصطلاح رنگ پریدگی می‌شود. بعضی از انواع سرامیک‌ها دارای مقاومت در برابر خراش و دمای



بالا آتش سوزی را نیز دارند که ویژگی بسیار منحصر به فردی است.

نانو سرامیک‌ها دارای میزان مقاومت و ماندگاری متفاوت هستند. میزان مقاومت آنها با علامت H بر روی کالا مشخص می‌شود. مقاوم‌ترین نوع پوشش نانو دارای مقاومت H10 است. ماندگاری پوشش نانو اغلب ۱ تا ۸ سال است. البته ماندگاری کمتر از ۱۲ ماه نیز وجود دارد که بیش‌تر به عنوان پوشش بالایی بر روی سایر سرامیک‌ها، جهت بهبود تاثیر گذاری و آبریزی استفاده می‌شود.

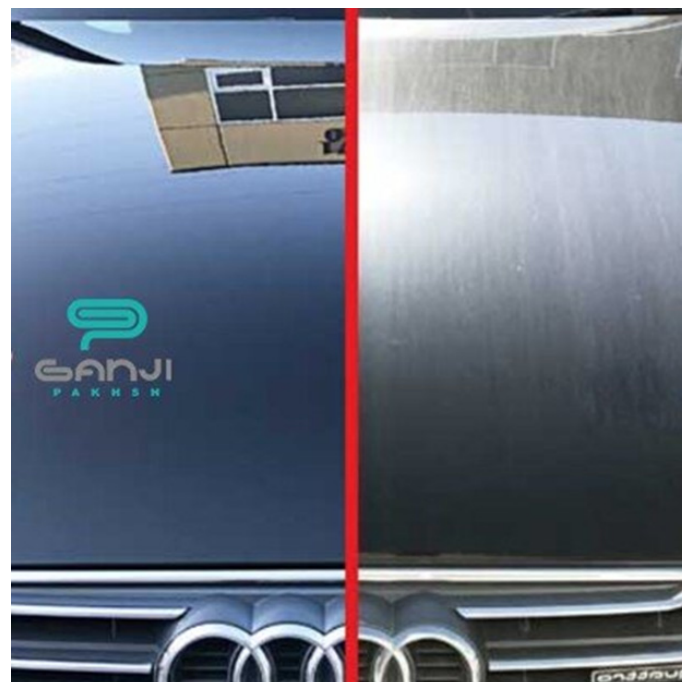
از دیگر مزایای سرامیک می‌توان به خاصیت خود تمیز کنندگی، دافع آلودگی و آبریزی اشاره نمود. به طور کلی به علت ایجاد خاصیت دافعه، اتومبیل شما دیرتر کثیف می‌شود. در نتیجه، دیرتر نیاز به شستشو و نظافت دارد. با استفاده

پوشش سرامیک دیگر بدنه خودرویتان در برابر آسیب عوامل محیطی در امان خواهد بود.

همانطور که هر کالایی مزایایی دارد، معایبی نیز دارد. نکته منفی در استفاده از نانو سرامیک، قیمت بالا و نیاز به آماده سازی سطح می‌باشد. برای برقراری پیوند بین مولکول‌های سرامیک و رنگ بدنه، نیاز است که مراحل آماده سازی طی شود. ابتدا باید سطح بدنه خودرو پولیش شود تا خط و خش و هولوگرام روی سطح از بین برود. زیرا براقیت بسیار زیاد حاصل از سرامیک، عیب و ایرادهای رنگ را بیشتر نمایان می‌کند. اما فقط پولیشکاری به تنهایی سطح را آماده نمی‌کند، بلکه نیاز به شستشوی خودرو و سپس استفاده از آماده ساز رنگ، خمیر کلی، پاک کننده براده آهن و گرد لنت و پاک کننده قیر با توجه به نوع آلودگی روی سطح می‌باشد. بعد از اتمام این پروسه، سطح آماده اجرای سرامیک می‌باشد. اگر سرامیک، بدون آماده سازی روی سطح استفاده شود، میزان تاثیر گذاری اش کمتر خواهد بود.

پوشش‌های سرامیک خودرو در انواع مات و براق هستند و فقط برای رنگ بدنه خودرو عرضه نشده‌اند، بلکه برای سطوح شیشه، پلاستیک، لاستیک و ... نیز ارائه می‌شوند و فقط تفاوت کمی در نحوه اجرا با یکدیگر دارند.

منبع: <https://www.isna.ir/news/1400030302248>



اخبار علمی

عرضه پوشش‌های سرامیکی تقویت شده با گرافن

یک شرکت توسعه دهنده پوشش، به تازگی پوشش‌های سرامیکی تقویت شده با گرافن به بازار عرضه کرده است که علاوه بر ظاهر جذاب، از مقاومت بالایی نیز برخوردار است.

شرکت آی‌جی‌ال کوتینگ (IGL Coatings) پوشش‌های سرامیکی تقویت شده دو گانه با گرافن را با نام تجاری Ecocoat Quartz + به بازار عرضه کرد. Ecocoat Quartz یک پوشش سرامیکی با سیستم دوگانه دارای امتیاز H۹ هیبریدی بوده که ترکیبی از دو پوشش سرامیکی با ویژگی‌های مختلف است تا لایه نهایی محافظت عالی و ظاهری مناسب برای انواع سطوح رنگی را فراهم کند.

مشابه Ecocoat Kenzo تقویت شده با گرافن، فرمول بهبود یافته Ecocoat Quartz+ با نانو ورق‌های گرافن برای دوام بیش از ۴ سال طراحی شده تا خواصی نظیر آبگریزی ارتقا یافته، افزایش مقاومت در برابر لکه‌های آب و مقاومت شیمیایی را نیز برای محصول به ارمغان آورد.

آی‌جی‌ال کوتینگ سرمایه‌گذاری گسترده‌ای در زمینه نوآوری پایدار و سازگار با محیط‌زیست انجام می‌دهد. Ecocoat Quartz + تقویت شده با گرافن نیز محصول این نوآوری و سیاست‌های شرکت آی‌جی‌ال کوتینگ است. افزودن نانوپلاکت‌های گرافن باعث افزایش آبگریزی و مقاومت در برابر مواد شیمیایی می‌شود بدون آنکه سختی یا شفافیت و برایت سطح دستخوش تغییری شود. کتونگ چون چیه، مدیرعامل آی‌جی‌ال کوتینگ می‌گوید: «در آمریکای شمالی، تقاضا برای '۲K' بسیار شگفت‌انگیز بوده و با استقبال قابل توجهی در سراسر جهان نیز مواجه شده است. ما از پشتیبانی نمایندگان فروش خود سپاسگزاریم. Ecocoat Kenzo مختص نمایندگی‌های مجاز ما است. با این حال، ما می‌خواستیم که تمام علاقه‌مندان بتوانند از یک پوشش تقویت شده با گرافن استفاده کنند؛ بنابراین، Ecocoat Quartz + جدید را به بازار عرضه کردیم که موجب بهبود ویژگی‌هایی نظیر روانکاری و صافی و افزایش آبگریزی می‌شود.»

نسخه اصلی Ecocoat Quartz + دارای ماندگاری ۳ ساله است. اما نسخه تقویت شده با گرافن، درجه ماندگاری بالاتری داشته و در حال حاضر ۴ سال است.

مدیرعامل آی‌جی‌ال کوتینگ می‌افزاید: «ما از مفهوم پلاکت در بدن انسان الهام گرفتیم. نانوپلاکت‌های گرافنی از چندین لایه ورق گرافنی تشکیل شده است. نانوپلاکت‌ها شکل منحصر به فرد با سطح وسیع ایجاد می‌کنند و به ما امکان می‌دهند از نانوپلاکت‌های گرافن برای تولید بهینه محصولات استفاده کنیم. این فرمولاسیون جدید به دلیل بهبود ۱۵ درصد مقاومت در برابر خراش، دارای دوام بهبود یافته تا ۴ سال است.»

منبع: www.coatingsworld.com

توسعه تصفیه‌خانه‌های مبتنی بر فناوری غشاء سرامیکی

محققان در یک شرکت دانش بنیان در حال توسعه تصفیه‌خانه‌های مبتنی بر فناوری غشاء سرامیکی هستند تا در زمینه پالایش آب گام بردارند.

به گزارش خبرگزاری مهر به نقل از معاونت علمی و فناوری، با حمایت کارگروه تخصصی توسعه فناوری‌های آب، خشکسالی، فرسایش و محیط زیست معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری تصفیه آب به کمک فناوری غشاء سرامیکی میسر می‌شود. این کار با ساخت و بومی‌سازی قطعات سرعت می‌گیرد تا گامی جدید در فرآیند تصفیه آب برداشته شود.

جداسازی املاح در فرآیندهای تصفیه آب به صورت فیزیکی، شیمیایی، بیوشیمیایی، میکروبی و غیره انجام می‌گیرد. با توجه به توصیه‌های زیادی که در حال حاضر روی کاهش استفاده از افزودن مواد شیمیایی مثل کلرزن برای تصفیه آب می‌شود، کاربرد و ترویج روش‌های جداسازی فیزیکی ذرات و آلاینده‌ها توسط غشاها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. غشاها در واقع، لایه‌های



نازک از جنس نیمه تراوا هستند که قادرند ذرات معلق را از مایع، زمانی که با فشار از آن می‌گذرند، جدا کنند. غشاهای از نظر جنس به دو دسته پلیمری و سرامیکی تقسیم بندی می‌شوند. هدف از ساخت این غشاهای، کاهش یا حذف برخی محدودیت‌های انواع پلیمری آن مانند مقاومت کم در دماهای بالا، استحکام مکانیکی کم، تجزیه زیستی و طول عمر پایین است. امروزه غشاهای سرامیکی در شرایط سخت بویژه زمانی که غشاهای پلیمری عملکرد مطلوبی ندارند یا قادر به انجام فرآیند نیستند، به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

«نصب و اجرای آسان»، «انعطاف‌پذیر بودن با میزان دبی و اندازه‌های مختلف جای تعبیه شده برای فیلتراسیون»، «قابل ارائه بودن به صورت ماژول و پکیج»، «مصرف انرژی پایین»، «کدر فشارهای بسیار پایین»، «طول عمر بالا»، «هزینه‌های نگهداری پایین»، «مقاومت در برابر دما»، «فشار و مواد شیمیایی متنوع» و «شستشوی آسان» از مزایای فناوری غشای سرامیکی است. در حال حاضر شرکتی دانش بنیان داخلی طراحی و ساخت این نوع غشا را در دستور کار قرار داده است و انتظار می‌رود با بومی سازی این فناوری و توسعه آن گامی جدید در فرآیند تصفیه آب برداشته شود.

منبع: <https://www.mehrnews.com/news/5223589>



محصولات جدید سیلیکونی پزشکی

شرکت سرامیکی SINTX Technologies خط جدیدی از محصولات نیتريد سیلیکونی را برای کاربردهای ضد بیماری و زیست پزشکی توسعه داده است.

برند Flex SN شامل:

- Flex SN-MC2، یک سرامیک نیتريد سیلیکونی بسیار متراکم در ایمپلنت‌های پزشکی FDA است.
- Flex SN-CSC، دارای یک معماری ترکیبی است که می‌تواند ساختار قشر مغز استخوان را در ایمپلنت‌های پزشکی FDA تقلید کند.
- Flex SN-PEEK، دارای زیست فعالی نیتريد سیلیکون با خواص پلیمر معمولی پلی‌اتر اتر کتون (PEEK) است.
- Flex SN-AP، یک پودر نیتريد سیلیکون ضد بیماری است و در برابر ویروس‌هایی مانند SARS-CoV-2 (COVID-19) با سازگاری سلول پستانداران اثبات شده موثر است.

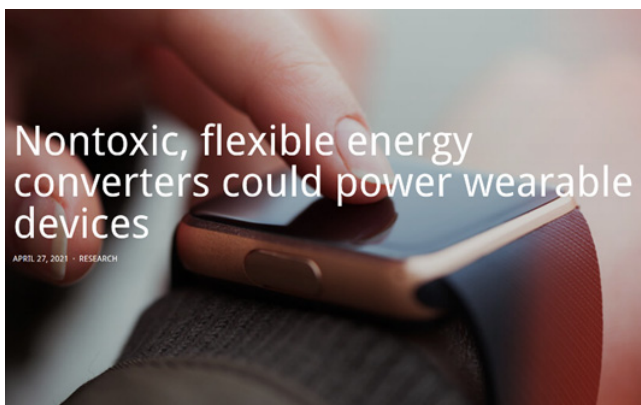
دکتر Sonny Bal، مدیر عامل و رئیس، می‌گوید: ما همچنان بر توسعه‌ی خواص مواد نیتريد سیلیکونی، طراحی محصول و برنامه‌های جدید در فضای پزشکی تمرکز می‌کنیم. علاوه بر این، ما تمرکز خود را در بازار گسترش داده‌ایم تا کاربردهای ضد بیماری را بزرگ‌تر و صنعتی بیشتری را برای نیتريد سیلیکون شناسایی کنیم.

منبع: <https://www.materialstoday.com/hardmetals-and-ceramics/news/new-biomedical-silicon-products>

ترجمه توسط انجمن سرامیک ایران (www.icers.ir)

مبدل‌های انرژی غیرسمی و انعطاف‌پذیر می‌توانند برق دستگاه‌های پوشیدنی را تأمین کنند.

طیف گسترده‌ای از وسایل الکترونیکی قابل حمل و پوشیدنی، به قسمت عمده‌ای از زندگی روزمره‌ی ما تبدیل شده است؛ بنابراین گروهی از پژوهشگران دانشگاه استنفورد به برداشتن الکتریسیته از گرمای هدررفته موجود در اطراف ما، برای تأمین این انرژی فکر کردند.



این الهام، از تمایل به ساختن دستگاه‌های تبدیل کننده انرژی از همان مواد موجود در دستگاه‌های فعال نشئت گرفته است؛ بنابراین آن‌ها می‌توانند به عنوان بخشی جدایی ناپذیر از کل سیستم قرار گیرند. امروزه منابع تغذیه بسیاری از نانودستگاه‌های پزشکی از چندین نوع باتری تأمین می‌شود که باید از قسمت فعال سیستم‌ها جدا شوند که ایده آل نیست. در Applied Physics Letters، پژوهشگران از طراحی و ساخت دستگاه‌های ترموالکتریک نانولوله‌ای کربنی تک دیواره بر روی زیرلایه‌ی پلی‌آمید انعطاف پذیر به عنوان مبنای مبدل‌های انرژی پوشیدنی خبر داده‌اند.

Eric Pop، استاد مهندسی برق و علم مواد گفت: "نانولوله‌های کربنی مواد تک بعدی هستند که به دلیل ویژگی‌های خوب ترموالکتریکی شناخته شده‌اند و این به معنای ایجاد ولتاژ روی آن‌ها در یک گرادیان دمایی است. چالش این است که نانولوله‌های کربنی از هدایت حرارتی بالایی نیز برخوردار هستند، به این معنی که نگه‌داشتن یک شیب حرارتی در سراسر آن‌ها دشوار است و مونتاژ آن‌ها در ژنراتورهای ترموالکتریک با هزینه‌ی کم سخت بوده است." این گروه برای مقابله با هر دو چالش از شبکه‌های نانولوله‌ی کربنی چاپ شده استفاده می‌کنند.

Pop گفت: "به عنوان مثال، شبکه‌های اسپانگتی نانولوله‌های کربنی به دلیل وجود اتصالات در شبکه‌ها که جریان گرما را مسدود می‌کنند، هدایت گرمایی بسیار کمتری نسبت به نانولوله‌های کربنی به تنهایی دارند. همچنین، چاپ مستقیم چنین شبکه‌های نانولوله‌ی کربنی در صورت مقیاس بندی، می‌تواند هزینه‌ی آن‌ها را به طور قابل توجهی کاهش دهد."

Hye Ryoung Lee، پژوهشگر و رهبر نویسندگان، گفت: "دستگاه‌های ترموالکتریک با استفاده‌ی مجدد از گرمای هدررفته که از وسایل شخصی، لوازم خانگی، وسایل نقلیه، فرآیندهای تجاری و صنعتی، سرورهای رایانه‌ای، روشنایی خورشیدی متغییر با زمان و حتی بدن انسان تولید می‌شود، برق تولید می‌کنند. برای از بین بردن موانع استفاده در مقیاس گسترده از مواد ترموالکتریک-سمیت، کمبود مواد، تردی مکانیکی- نانولوله‌های کربنی جایگزینی عالی در مقایسه با سایر مواد متداول هستند."

رویکرد این گروه، راهی را برای استفاده از نانولوله‌های کربنی با الکترودهای قابل چاپ بر روی لایه‌های پلیمری انعطاف پذیر در فرآیندی پیش‌بینی می‌کند که برای تولید با حجم زیاد مقرون به صرفه باشد. همچنین با محیط‌زیست سازگارتر از سایر فرآیندهاست؛ زیرا از آب به عنوان حلال استفاده و از دوپانت‌های اضافی جلوگیری می‌شود. برداشت‌کننده‌های انرژی انعطاف پذیر و پوشیدنی را می‌توان در پارچه‌ها یا لباس‌ها و یا به شکل‌ها و فاکتورهای غیرمعمول جایگذاری کرد.

Pop گفت: در مقابل، ترموالکتریک‌های سنتی بر پایه‌ی تلوراید بیسموت تلوراید، شکننده و سفت هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. ترموالکتریک‌های مبتنی بر کربن با محیط‌زیست سازگارتر از آن‌هایی هستند که بر اساس مواد نادر یا سمی مانند بیسموت و تلوریوم ساخته شده‌اند."

Yoshio Nishi، استاد مهندسی برق گفت: "مهمترین مفهوم در کار گروه، بازیافت انرژی تا آنجا که می‌توانیم و تبدیل توزیع ناهموار گرما به انرژی الکتریکی برای استفاده برای چرخه بعدی عملکرد بود که ما با استفاده از نسل ترموالکتریک مبتنی بر نانولوله غیرسمی آن را نشان دادیم. این مفهوم با هدف جهان در کاهش مصرف کل انرژی، در اتحاد کامل است."

منبع:

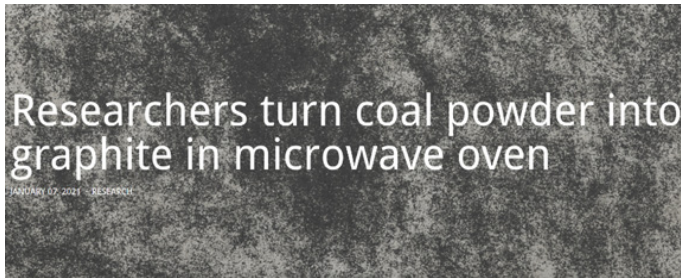
<https://nano-magazine.com/news/2021/4/27/nontoxic-flexible-energy-converters-could-power-wearable-devices>

ترجمه توسط انجمن سرامیک ایران (www.icers.ir)

پژوهشگران پودر زغال سنگ را در اجاق مایکروویو به گرافیت تبدیل می‌کنند.

پژوهشگران دانشگاه Wyoming (UW) نشان داده‌اند که با استفاده از فویل مسی، ظروف شیشه‌ای و اجاق مایکروویو خانگی

معمولی می‌توان پودر زغال سنگ پودر شده را به نانوگرافیت با ارزش تبدیل کرد. این کشف گام دیگری به جلو در تلاش برای یافتن کاربردهای جایگزین برای پودر زغال سنگ حوزه‌ی رودخانه Wyoming است، در زمانی که تقاضا برای تولید زغال سنگ برای تولید برق به دلیل نگرانی در مورد تغییر آب و هوا در حال کاهش است.



در مقاله‌ای که در مجله‌ی Nano-Structures & Nano-Objects منتشر شد، پژوهشگران UW گزارش دادند که آن‌ها محیطی را در یک مایکروفر ایجاد کردند تا پودر زغال سنگ خام را به نانوگرافیت تبدیل کنند که به عنوان روان کننده و در موارد مختلفی از کپسول‌های آتش نشانی تا باتری‌های یون لیتیوم استفاده می‌شوند. این "روش یک مرحله‌ای با فرآیند

مایکروویو به کمک فلز" رویکرد جدیدی است که می‌تواند یک فناوری تبدیل زغال سنگ ساده و نسبتاً ارزان را نشان دهد. تیم تحقیق به سرپرستی دانشیار TeYu Chien در گروه فیزیک و نجوم UW نوشت: "این روش مسیر جدیدی را برای تبدیل منابع کربن فراوان به مواد با ارزش بالا با مزایای اکولوژیکی و اقتصادی فراهم می‌کند." از دیگر افراد درگیر این پروژه، پروفیسور Jinke Tang، در بخش فیزیک و نجوم؛ دانشیار Brian Leonard، در گروه شیمی؛ پروفیسور Maohong Fan، در گروه مهندسی نفت و دانشکده منابع انرژی؛ دانشجویان فارغ التحصیل Rabindra Dulal از نپال، Joann Hilman از لارامیه، Chris Masi از سیراکوس، N.Y. و Teneil Schumacher از بوفالو و محققان فوق دکتر Gaurab Rimal، از نپال و Bang Xu، از چین بودند.

با اینکه تحقیقات پیشین نشان داده است که می‌توان از مایکروویو برای کاهش رطوبت زغال سنگ و حذف گوگرد و سایر مواد معدنی استفاده کرد، اما بیشتر این روش‌ها نیاز به پیش تصفیه شیمیایی خاص زغال سنگ دارند. پژوهشگران UW در آزمایش خود به سادگی زغال سنگ حوزه‌ی رودخانه را به صورت پودر آسیاب کرده‌اند.

سپس این پودر را قبل از اینکه در اجاق مایکروویو قرار گیرد، روی ورق مس قرار داده و در ظروف شیشه‌ای با مخلوط گاز آرگون و هیدروژن مهر و موم کرد. یک اجاق مایکروویو معمولی به دلیل راحتی و قابلیت تأمین میزان اشعه مورد نظر انتخاب شد. Masi، نویسنده اصلی مقاله، می‌گوید: "با برش ورق مس به شکل چنگال، جرقه‌ها توسط اشعه مایکروویو القا می‌شوند و در عرض چند ثانیه درجه حرارت بسیار بالای بیش از ۱۸۰۰ درجه فارنهایت ایجاد می‌کنند. به همین دلیل است که شما نباید یک چنگال فلزی را درون اجاق مایکروویو قرار دهید."

جرقه‌های ناشی از مایکروویو دمای بالایی را که برای تبدیل پودر زغال سنگ به گرافیت چند بلوری لازم است را تولید می‌کنند، همچنین فویل مس و گاز هیدروژن نیز به این فرآیند کمک می‌کنند. در حالی که این آزمایش شامل مدت زمان مایکروویو از ۳ تا ۴۵ دقیقه بود، مدت زمان بهینه ۱۵ دقیقه بود.

پژوهشگران می‌گویند این روش جدید تبدیل زغال سنگ می‌تواند بهبود یابد و در مقیاس بزرگتری انجام شود تا هم کیفیت و هم مقدار بیشتری از مواد نانوگرافیت بدست آید. دانشمندان نوشتند: "ذخایر گرافیت محدود و نگرانی‌های زیست محیطی در مورد روش‌های استخراج گرافیت، این روش تبدیل زغال سنگ به گرافیت را به عنوان منبع جایگزین عالی تولید گرافیت تبدیل می‌کند."

منبع: <https://nano-magazine.com/news/2021/1/7/researchers-turn-coal-powder-into-graphite-in-microwave-oven>

ترجمه توسط انجمن سرامیک ایران (www.icers.ir)

آیا هوش مصنوعی ترکیبات سرامیکی بهتری خلق می‌کند؟

سرامیک‌ها در همه چیز از کاشی‌های دیواری و ظروف شیشه‌ای گرفته تا مفصل ران مصنوعی، موشک‌های کروز و کاشی‌های حرارتی شاتل فضایی ناسا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جای تعجب نخواهد بود، زیرا مزایای بسیار زیاد از جمله رسانایی الکتریکی

کم، نقاط ذوب زیاد و مقاومت استثنایی در برابر مواد شیمیایی باعث می‌شود که مواد سرامیکی به طور ایده آل برای همه‌ی این کاربردها مناسب باشند.

با اینکه نوآوری‌ها در سرامیک‌های پیشرفته طی چند دهه‌ی گذشته پیشرفت کرده است؛ بسیاری از نکات منفی سنتی آن همچنان باقی مانده است. به عنوان مثال، وزن سبک و مقاومت در برابر درجه حرارت بالا که سرامیک‌های پیشرفته امروزی را برای توربین‌های هواپیما ایده آل می‌کند، همچنان به قیمت یک فرآیند تولید دشوار و پرهزینه به دست می‌آید. علاوه‌براین، در کنار مقاومت و سختی ذاتی سرامیک‌ها، در شرایط شدید گرما، بخار و نیروهایی که تحت آن توربین‌های هواپیما به طور منظم کار می‌کنند، مستعد شکست کامل هستند.

پیشگیری از این شکست در قلب آخرین پژوهش‌های استادیار دکتر Amanda Krause از گروه علوم و مهندسی مواد UF و تیم وی متشکل از همکار UF MSE، Michael Tonks، دکتر Joel Harley از گروه مهندسی برق و کامپیوتر UF و دکتر Michael Kesler از آزمایشگاه ملی Oak Ridge است. با حمایت یک جایزه ۱/۲۶ میلیون دلاری دپارتمان انرژی (DOE) از برنامه علوم پایه انرژی (BES)، دکتر Krause احساس می‌کند که هوش مصنوعی (AI)، به ویژه یادگیری ماشین، می‌تواند کلید پیش‌بینی این باشد که چرا یک دانه خاص انبساط غیر طبیعی دارد، درحالی‌که دانه‌ی کناری آن به سرعت تسلیم می‌شود. دکتر Krause می‌گوید: "DOE علاقمند بود رفتار مواد را در محیط‌هایی با شرایط سخت مانند دما یا میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی بررسی کند. پروژه ما هم با دمای بالا و هم با میدان‌های مغناطیسی سروکار دارد."

در حالت ایده آل، دانه‌های میکروسکوپی که ساختار هر ماده‌ای را تشکیل می‌دهند، از نظر اندازه در یک نمونه معین نسبتاً یکنواخت هستند، که معمولاً در دماهای طبیعی نیز چنین است. این مشکل وقتی به وجود می‌آید که ماده‌ای مانند آلومینا در دمای شدید گرم شود یا تحت فشارهای ناخواسته دیگری قرار گیرد. وقتی این اتفاق می‌افتد، این دانه‌های میکروسکوپی شروع به انبساط در اندازه می‌کنند. با اینکه این رشد پیش‌بینی می‌شود، آنچه قابل پیش‌بینی نیست این است که کدام دانه‌ها، در صورت وجود، از یک مزیت ویژه برخوردار می‌شوند که باعث می‌شود همسایگان خود را با سرعت تسریع شده جذب کنند. این رشد غیر طبیعی دانه می‌تواند منجر به ضعف یا عدم ثبات در ساختار ماده شود.

دکتر Michele Manuel، رئیس گروه علوم و مهندسی مواد UF، از پیشرفت‌های بالقوه‌ای که می‌تواند با استفاده از قابلیت‌های تجزیه و تحلیل داده‌های قدرتمند AI کشف کند، هیجان زده است. دکتر Manuel گفت: "اصطلاح تغییر بازی به ذهن خطور می‌کند، زیرا این دقیقاً همان چیزی است که این تحقیق قادر به انجام آن است. باز کردن اسرار رشد غیر طبیعی دانه، در هر ماده‌ای، منجر به پیشرفت‌های باورنکردنی در علم و مهندسی مواد می‌شود که ما فقط تا این لحظه آرزو داشته‌ایم." دکتر Krause موافق است و می‌گوید: "اگر یادگیری ماشین در نهایت بتواند رشد غیرطبیعی دانه را تشخیص و پیش‌بینی کند، قدم بعدی از آنجا کنترل نهایی رفتار دانه، نه تنها در طی فرآیند تولید بلکه در طول اجرای ماده است. در آن مرحله، ما می‌توانیم اجزای جدیدتر و یا حتی بهتر با استحکام و چقرمگی شکست بسیار برتر را از آنچه که از پیشرفته‌ترین مواد سرامیکی امروز مشاهده می‌کنیم، مهندسی کنیم."

منبع: <https://mse.ufl.edu/ai-better-ceramics>

ترجمه توسط انجمن سرامیک ایران (www.icers.ir)



مهندس علیرضا اسپرهم،
نویسنده اول مقاله دانشگاه
تهران

آشنایی با روش سنتز سیمان ژئوپلیمری و ویژگی‌های آن

علیرضا اسپرهم^{۱*}، امیربهادر مرادی‌خو^۲، ناصر ماهدادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی - انرژی و محیط زیست، گروه مهندسی محیط

زیست، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت

ساخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

^۳ استاد گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: تولید سیمان پرتلند معایب عمده محیط زیستی به دنبال دارد که این مورد ۸ درصد از انتشار CO₂ جهانی (۴ میلیارد تن در سال) را تشکیل می‌دهد. از این رو نیاز به استفاده از یک جایگزین برای سیمان‌های رایج (پرتلند) ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر ژئوپلیمر به عنوان یک عامل سیمانی جدید و دوستدار محیط زیست، جهت جایگزینی برای سیمان پرتلند مطرح شده است. ژئوپلیمرها، پلیمرهای معدنی سرامیک ماندنی هستند که در دمای پایین عموماً زیر ۱۰۰°C، تولید می‌شوند. ژئوپلیمرها، زنجیره‌ها یا شبکه‌هایی از مولکول‌های معدنی هستند که با پیوندهای کووالانسی اتصال یافته‌اند. مواد خام بکار رفته در فرایند پلیمری شدن، به طور عمده منشاء زمین‌شناسی دارند و به خاطر همین ژئوپلیمر نامیده می‌شوند. دو روش سنتز ژئوپلیمرها بین روش‌های ایجاد شده رایج‌تر است؛ سنتز توسط محیط قلیایی (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Cs⁺ و غیره) و دیگری در محیط اسیدی (فسفریک اسید، کربوکسیلیک اسیدهای آلی)، است. تاکنون مسیر قلیایی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده است. طیف سنجی NMR اطلاعاتی در مورد ساختار مولکولی و خصوصیت‌های پلیمری فراهم می‌کند. مشاهدات علمی نشان می‌دهد که فرایند پلیمری شدن، با چندتراکمی اولیگومرها آغاز شده و در نهایت تبدیل به ساختار پلی سیلات ۶ شامل نانوذرات منحصر به فردی (که به خوبی فرایند پلیمری شدن را طی کردند و اندازه ۵ تا ۴۰ نانومتر دارند) می‌شوند. در این مقاله تلاش شده است تا فرایند پلیمری شدن، تولیدسیمان ژئوپلیمر، مقایسه سیمان ژئوپلیمری با سیمان رایج پرتلند و در نهایت کاربردها و ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، فعال‌کننده قلیایی، منبع آلومیناسیلیکاتی، پلیمرهای معدنی.

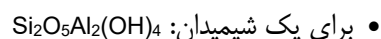
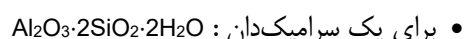
۱- مقدمه

نیاز روز افزون به استفاده از بتن به معنی نیاز به استفاده از سیمان پرتلند و نیاز به تولید بیشتر این ماده است. تولید سیمان پرتلند مستلزم مصرف منابع طبیعی و رهاسازی حجم کثیری از دی‌اکسید کربن به محیط زیست است [۱]. همچنین تولید سیمان پرتلند بعد از فولاد و آلومینیوم بیشترین مصرف انرژی را دارد و نیز وجود محدودیت‌های تولیدی خصوصاً در کشور ما، پروسه پیچیده خط تولید سیمان، احجام وسیع کارخانه‌ها و هزینه‌های هنگفت ساخت آنها، از جمله معایب سیمان پرتلند معمولی هستند. دو عیب فنی در فرایند تولید سیمان پرتلند عبارتند از:

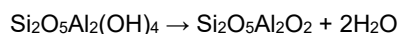
- تقریباً ۱/۵ تن مواد اولیه جهت تولید یک تن سیمان پرتلند لازم است و در این حالت تقریباً یک تن دی‌اکسید کربن در هنگام تولید، وارد محیط زیست می‌شود. بنابر این تولید سیمان پرتلند معمولی مستلزم مصرف انرژی بالا می‌باشد همچنین باعث آلودگی محیط زیست می‌شود.
- بتن ساخته شده از سیمان پرتلند در شرایط مختلف محیطی حتی شرایط نرمال و یا تحت اثر عوامل دیگر تخریب می‌گردد. ترک خوردگی و فرسایش عوامل موثر در رفتار بتن و بهره‌برداری از آن در خلال عمر بتن می‌باشند.

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی ناشی از پدیده گرمایش جهانی به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های محیط زیستی در سراسر جهان تبدیل شده است. علت اصلی پدیده گرمایش جهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای

است و در میان گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن با میزان انتشار ۶۵ درصد، بیشترین نقش را در پدیده گرمایش جهانی دارد [۲]. همچنین فرآیند تولید سیمان پرتلند عامل تولید ۵ تا ۷ درصد از کل میزان انتشار جهانی گاز دی‌اکسید کربن است [۳]. طبق آمار موجود سالانه تا ۴ میلیارد تن دی‌اکسید کربن در سراسر دنیا توسط کارخانه‌های تولید سیمان تولید و به جو وارد می‌شود [۴]. بنابراین با توجه به مشکلات مطرح شده می‌توان به دنبال ماده‌ای دیگر جهت جایگزین نمودن سیمان پرتلند در بتن گشت. به همین جهت، تحقیق و توسعه در زمینه‌ی ژئوپلیمرها در حال حاضر تولد دوباره‌ای را تجربه می‌کند. ژئوپلیمرها، پلیمرهای معدنی سرامیک مانندی هستند که در دمای پایین عموماً زیر 100°C تولید می‌شوند. ژئوپلیمرها، زنجیره‌ها یا شبکه‌هایی از مولکول‌های معدنی هستند که با پیوندهای کووالانسی اتصال یافته‌اند. از آنجایی که این‌ها پلیمر هستند، باید توسط اصطلاحات پلیمری ارجاع داده شوند، که بسیار متفاوت با اصطلاحات مرسوم است که توسط سرامیکدان‌ها به کار می‌روند. به عنوان مثال، فرمول یک ماده معدنی عمده در خاک رس یعنی کائولینیت^۱ به صورت زیر است:



از نقطه نظر ژئوپلیمر، $[\text{Si-O-Al}(\text{OH})_2]_n$ را به صورت گروه‌های جانبی هیدروکسیل آلومینیوم کووالانسی که از ماکرومولکول پلی(سیلوکسو) هگزآگونال $[\text{Si-O}]_n$ منشعب شده است، نوشت. این رویکرد پلیمری پیامدهای عمیقی با در نظر گرفتن درک بهتری از روندهای ژئوپلیمریزه شدن، دارد. به طور خاص، متاکائولن^۲ در نتیجه هیدروکسیل زدایی^۳ گروه‌های OH در کائولینیت مطابق واکنش زیر حاصل می‌شود:



مولکول واکنش پذیر شامل دو اکسید آلومینو-سیلیکات ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2\text{O}_2$) است که عبارتند از: $[\text{Si-O-Al=O}]_n$ و $[\text{Si-O-Al-O}]_n$. این اشاره به واکنش پذیری قوی دارد، که برخلاف روش نوشتاری مرسوم به صورت $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ است. برای سنتز سیمان ژئوپلیمری نیاز به مواد خام اولیه به عنوان منبع آلومیناسیلیکاتی^۴ می‌باشد که این مواد اولیه عبارتند از: مواد معدنی تشکیل دهنده سنگ‌ها (آلومینو-سیلیکات‌ها)، سیلیس آمورف (بی‌شکل) و محصولات جانبی صنعتی (آلومینو-سیلیکات‌ها) مانند خاکستر بادی ذغال سنگ^۵، خاکستر کوره انفجار^۶. این مواد خام اولیه به صورت شیمیایی از طریق دو روش سنتزی متفاوت واکنش می‌دهند: در محیط قلیایی با هیدروکسیدهای (Na,K) و سیلیکات‌های قلیایی محلول که انواع پلی (سیلیکات‌ها)، پلی (سیلوکسو)، پلی (سیلیکو-آلومینات‌ها) و پلی (سیلات) را حاصل می‌کند، و دیگری در محیط اسیدی (با فسفریک اسید) که انواع پلی (آلومینو-فسفو) را تولید می‌کند [۵، ۶].

۲- پیشینه تاریخی

در سال ۱۹۷۲، تیم سرامیک‌دان فرانسوی Jean Paul Latapie و Michel Davidovics که در تولیدکننده کاشی‌های سرامیکی Cerabati کار می‌کردند، تایید کردند که کاشی‌های سرامیکی مقاوم به آب می‌توانند در دمای پایین‌تر از 450°C یعنی بدون حریق ساخته شوند. آنها این اطلاعات تکنیکی را در یک مقاله که توسط یک موسسه سرامیکی فرانسوی Soci'et'e Fran,caise de C'eramique انجام شده بود، یافتند. یکی از اجزاء خاک رس یعنی کائولینیت، با سود سوزآور در دمای 150°C واکنش می‌دهد. در حقیقت، کاربرد صنعتی این واکنش کائولینیت با قلیا در صنعت سرامیک در سال ۱۹۳۴۱ توسط Niels Olsen [۷] آغاز شد و بعداً در سال ۱۹۶۴ توسط Berg و همکارانش در سال ۱۹۷۰ [۸] که یک تیم روسی بودند، دوباره اختراع شد، اما بدون اجرای موفق صنعتی. پیشتر، Flint و همکاران در سال ۱۹۴۶ [۹]، فرآیندهای مختلفی را که برای استخراج آلومینا از خاک رس و بوکسیت‌های (هیدروکسید آلومینیوم آهن‌دار) با میزان سیلیس بالا شروع کردند، توسعه دادند. یک مرحله میانی در فرآیند

¹ Kaolinite

² Metakaolin

³ Dehydroxylation

⁴ Aluminosilicate

⁵ Fly Ash

⁶ Blast Furnace Slag

استخراج شامل رسوب یک ترکیب سودالیت مانند بود. Borchert و همکاران در سال ۱۹۴۹ [۱۰] هیدروسودالیت ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Na}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$) را از طریق واکنش کائولینیت در محلول غلیظ NaOH در دمای 100°C تهیه کردند. Howell در سال ۱۹۶۳ [۱۱] زئولیت نوع A را با استفاده از کائولین کلسینه شده (متاکائولن) به جای کائولینیت که باعث جلوگیری از تشکیل هیدرو سودالیت می‌شود، به دست آورد. با مطالعه مقالات علمی و ثبت اختراع که شامل سنتز زئولیت‌ها و غربال‌های مولکولی - اساسا در قالب پودر - که در دهه ۱۹۴۰ و ۱۹۵۰ توسعه یافت (جدول ۱)، منجر به توسعه سیلیکو-آلومینات آمورف تا نیمه بلورین و سه بعدی، (پلیمرهای معدنی که ناشی از ژئوشیمی یا ژئوسنتز است) شد. ژئوپلیمر برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ میلادی توسط Davidovits شیمیدان برجسته فرانسوی، به عنوان بایندهای جدیدی از خانواده پلیمرهای معدنی معرفی شد. واژه ژئوپلیمر از دو بخش ژئو به معنی وابسته به زمین و معدنی و پلیمر که به نوع واکنش این نوع سیمان اشاره دارد، تشکیل شده است. وی همچنین استفاده از نام poly(sialate) را برای شناسایی شیمیایی ژئو پلیمرها پیشنهاد کرد که poly پیشوند نشان دهنده پلیمر است و sialate نیز عبارت اختصاری برای زنجیره silicon-oxo-aluminate است [۱۲-۱۵].

جدول ۱- نقاط عطف در شیمی آلومیناسیلیکات (ژئوپلیمرها)

	Zeolite molecular sieve	Alkali-activation (slag)	Hydrosolidate (kaolin)	Geopolymer
1930			1934: Olsen (Netherland)	
1940	1945: Barrer (UK)	1940: Purdon (Belgium)	1945: US Bureau of Standard (USA) 1949: Borchert, Keidel (Germany)	
1950	1953: Barrer, White (UK) 1956: Milton (USA)	1953: Trief Cement (USA) 1957: Glukovsky (Ukraine) soil-silicate concrete		
1960			1963: Howell (USA) 1964: Berg et al. (USSR) 1969: Besson et al. (France)	
1970			1972: Davidovits (France) Siliface Process	1976: Davidovits (IUPAC terminology) 1979: Davidovits (France) Geopolymer

۳- روند گیرش و سخت شدن ژئوپلیمرها:

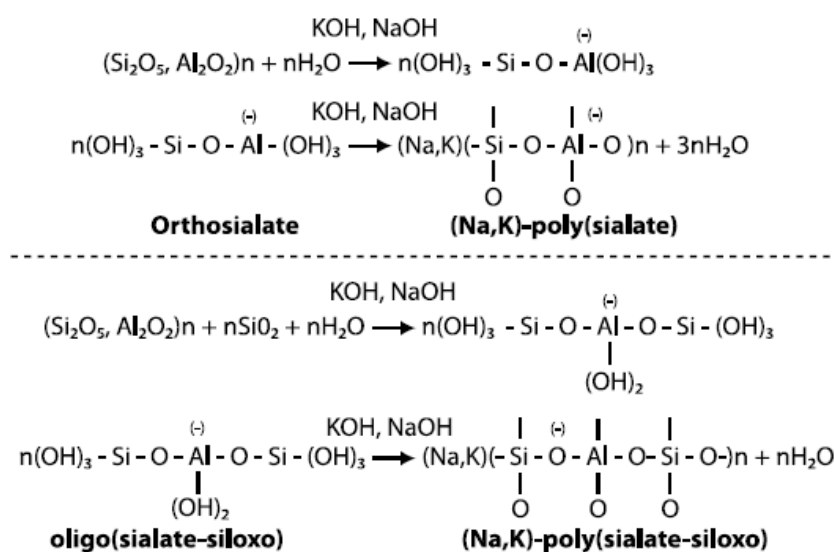
وقتی منبع آلومینوسیلیکاتی در تماس با محلول قلیایی قرار می‌گیرد، حل شده و ایجاد کمپلکس‌های Al و Si شروع می‌شود. مقدار حل شدن به غلظت محلول قلیایی، کاتیونی فلز قلیایی، سرعت هم‌زدن، مدت زمان حل شدن، ساختار و آنالیز شیمیایی منبع آلومیناسیلیکاتی بستگی دارد. در میان این عوامل ویژگی‌های منبع آلومیناسیلیکاتی و غلظت محلول قلیایی اهمیت بیشتری دارد. بعد از حل شدن ذرات آلومیناسیلیکاتی از سطح‌شان، جوانه‌زنی ژل آغاز می‌شود و کمپلکس‌های Al و Si به داخل فاز ژل نفوذ می‌کنند. به این ترتیب غلظت کمپلکس‌های Al و Si در سطح ذرات آلومینوسیلیکاتی کاهش یافته و بنابراین حل شدن Al و Si بیشتر می‌شود. حین مرحله نفوذ، زمان و شدت هم‌زدن از عوامل تاثیرگذار می‌باشند. به طوری که هر قدر زمان حل شدن طولانی تر و هم‌زدن شدیدتر باشد حل شدن کمپلکس‌های Al و Si از سطح شکست سد کینتیکی میان ذرات ماده اولیه و فاز ژل بیشتر شده و نفوذ کمپلکس‌های Al و Si نسبت به پلیمریزاسیون کمپلکس‌های Si ارجحیت پیدا می‌کند. بنابراین چگالش کمپلکس‌های Al و Si و حل شدن و نفوذ این کمپلکس‌ها از منبع آلومیناسیلیکاتی به صورت هم‌زمان صورت می‌گیرد. عوامل موثر بر مرحله چگالش دما، pH و اندازه کاتیون می‌باشند. دمای بالاتر، pH بالاتر یا غلظت بیشتر محلول قلیایی و کاتیون فلز قلیایی با اندازه اتمی بزرگتر چگالش را سریع‌تر می‌کند. در مرحله سخت شدن با وجود اینکه هیچ نوع تحرکی بین ذرات صورت نمی‌گیرد ولی حل شدن و نفوذ میان سطح ذرات و فاز ژل می‌تواند رخ دهد. ژئوپلیمرها بعد از روند گیرش، واحدهای مولکولی (یا گروه‌های شیمیایی) زیر راتشکیل می‌دهند که در حال حاضر در تحولات صنعتی بیشماری مورد مطالعه و اجرا قرار گرفته‌اند:

- Si-O-Si-O (سیلوکسو)^۱
- Si-O-Al-O سیلات، پلی سیلات^۲
- Si-O-Al-O-Si-O سیلات-سیلوکسو، پلی (سیلات-سیلوکسو)^۳
- Si-O-Al-O-Si-O-Si-O سیلات-دی سیلوکسو، پلی (سیلات-دی سیلوکسو)^۴
- (R)-Si-O-Si-O-(R) آلی-سیلوکسو، پلی سیلیکون^۵
- Al-O-P-O آلومینو-فسفو، پلی (آلومینو-فسفو)^۶
- Fe-O-Si-O-Al-O-Si-O فرو-سیلات، (پلی فرو-سیلات)^۷

ژئوپلیمرها معمولاً در دمای محیط یا بالاتر و از راه پلیمری شدن مونمرها و الیگومرهای آلومیناتی و سیلیکاتی و رسوب ژل در محلول‌های قلیایی فوق اشباع تولید می‌شوند. این رسوب در مقیاس 10^{-1} نانومتر بوده که تخلخل‌های میکرو و مزو آنها را احاطه کرده‌اند [۱۶]. ماهیت ژئوپلیمر سخت شده (در برابر اشعه ایکس^۸)، در دمای محیطی و معتدل آمورف است و در دمای بالاتر از 500°C برای گونه‌هایی که Na دارند، و بالاتر از 1000°C برای گونه‌هایی که پتاسیم دارند، بلورین می‌باشد [۱۷-۱۹].

۳-۱- سنتز ژئوپلیمر معدنی در محیط قلیایی مبتنی بر سیلات

یک مسئله مهم در پلیمری شدن مبتنی بر سیلات (sialate)، مربوط به فرایند واکنش آن است. در ابتدای تحقیقات ژئوپلیمر و پس از آن، برای حداقل ۲۵ سال، فرض بر این بود که سنتزهای ژئوشیمیایی از طریق اولیگومرهای فرضی (دایمر^۹، تری مر^{۱۰}) اتفاق می‌افتد. متراکم شدن بعدی این واحدهای فرضی، ساختارهای واقعی از ماکرومولکول سه بعدی را فراهم می‌کند (شکل ۱ را ببینید).



شکل ۱- مکانیسم واکنش برای گونه‌های سیلات و سیلات-سیلوکسو، که در سال ۱۹۸۸ توسط Davidovits به عنوان فرضیه توصیف شده است [۲۰].

¹ Siloxo, poly(siloxo)

² Sialate, poly(sialate)

³ Sialate-siloxo, poly(sialate-siloxo)

⁴ Sialate-disiloxo, poly(sialatedisiloxo)

⁵ Organo-siloxo, poly-silicone

⁶ Alumino-phospho, poly(alumino-phospho)

⁷ Ferro-sialate, poly(ferro-sialate)

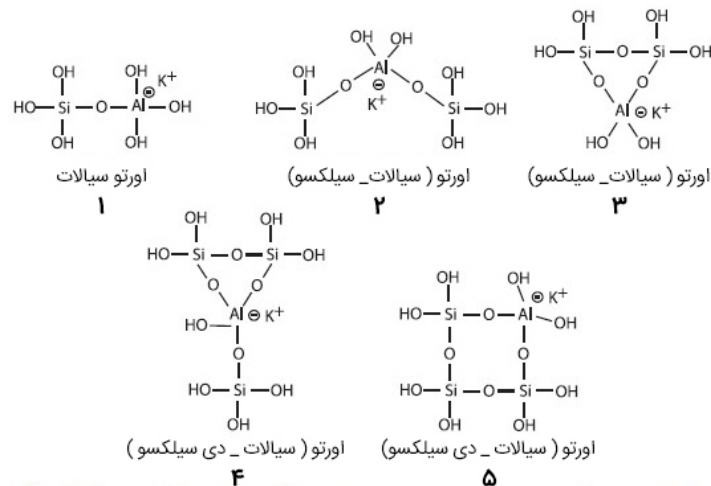
⁸ X-ray

⁹ Dimer

¹⁰ Trimer

مهمترین مشارکت در رابطه با این مسئله، مقاله نوشته شده توسط North و همکاران در سال ۲۰۰۰ است [۲۱]. با استفاده از طیف سنجی ^1NMR مربوط به Si و Al، آنها به حضور گروه‌های حل شونده با اتصال دهنده‌های سیلات Si-O-Al در محلول‌های غلیظ مشکوک شدند. یک پیشرفت عمده در تحقیقات آنها بود که مطالعه آنها در دمای پایین، 5°C و پایین‌تر، صورت می‌گرفت. در حقیقت، کشف شد که پلیمری شدن اولیگو-سیلات‌ها در مقیاس زمانی حدوداً ۱۰۰ میلی ثانیه، یعنی ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر سریع‌تر از پلیمری شدن اورتوسیلیکات صورت می‌گیرد. در دمای اتاق یا بالاتر، واکنش خیلی سریع است که با تجهیزات معمولی قابل شناسایی نیست. آنها KOH را انتخاب کردند در حالی که در مطالعات قبلی خود از NaOH استفاده کرده بودند، زیرا محلول غلیظ KOH آلومینو-سیلیکات مقاومت طولانی‌تری در مقابل انعقاد (ژله‌ای شدن) نسبت به هم‌تای NaOH خود دارد. به دلیل سیگنال بسیار ضعیف Si، آزمایشات NMR می‌بایست تا سه روز اجرا شود تا طیف‌های دقیق مشخصی به دست آید. آنها با موفقیت پنج گونه حل شونده را شناسایی کردند که در شکل ۲ نشان داده شده است، یعنی دو مولکول خطی و سه حلقه:

- یک اورتو-سیلات $(\text{OH})_3\text{-Si-O-Al}(\text{OH})_3$ برای نسبت Si به Al برابر با یک
- یک اورتو (سیلات-سیلوکسو) خطی $(\text{OH})_3\text{-Si-O-Si}(\text{OH})_2\text{-O-Al}(\text{OH})_3$ ، یک اورتو (سیلات-سیلوکسو) حلقوی برای نسبت Si به Al برابر با دو
- دو اورتو(سیلات-دی سیلوکسو) حلقوی برای نسبت Si به Al برابر با سه



۲-۳- چارچوب‌های سه بعدی ژئوپلیمر، میکروساختار، نانوذرات

پلیمر یک ماکرومولکول با ابعاد و وزن مولکولی مشخص است. این دو مقدار کلیدی از طریق چندین روش فیزیکی مکمل که یا در حالت جامد (میکروسکوپ الکترونی^۱) و یا در محلول (پراکندگی نور^۲) کار می‌کنند، تعیین می‌شوند. از سوی دیگر، ژل، یک ترکیب آمورف را بیان می‌کند. Kriven در سال ۲۰۰۳ [۲۲]، از TEM^۳ (میکروسکوپ الکترونی عبوری) استفاده کرد تا میکروساختار ژئوپلیمرهای از نوع پتاسیم-پلی(سیلات-سیلوکسو) کاملاً واکنش داده را بررسی کند. که این شامل نانوذرات با ابعاد ۵-۱۵ نانومتر (۵-۱۵۰ Å) است که توسط نانو حفرات جدا شده‌اند، ویژگی که دامنه نظم آن ۱۰-۳ نانومتر است (شکل ۳). تیم Kriven به خصوصیات نانومتخلخل و میکروساختار اسفنج مانند یک ناحیه‌ای از ژئوپلیمر کاملاً واکنش داده، دست یافتند. آنالیزهای EDS^۴ و TEM از این نواحی کاملاً واکنش داده نشان داد که میکروشیمی مربوط به نسبت Si/Al برابر با ۲ که مربوط به پلی (سیلات-سیلوکسو) می باشد، به طور مرتب مشاهده می‌شود.

¹ Nuclear Magnetic Resonance

² Electron Microscopy

³ Light-Scattering

⁴ Transmission Electron Microscopy

⁵ Energy Dispersive X-ray Spectroscopy



شکل ۳- مایسل^۱ نانو ذره‌ای یا ژئوپلیمری، (نقطه‌ای) که توسط پیکان مشخص گردیده [۲۲].

سپس نمونه‌های در دمای اتاق به آرامی به مدت ۴ ساعت تا دمای ۱۰۰۰°C گرم شدند. میکروساختار در سایز نانو بعد از رسیدن به دمای ۱۰۰۰°C و تثبیت بعدی در کوره تقریباً تا دمای ۹۹۰°C همچنان پایدار بود. پراکندگی ناحیه انتخاب شده، نشان داد که نواحی کاملاً واکنش داده همچنان آمورف هستند. هیچ شاهدهی مبنی بر سخت شدن (رسوب دادن) و "رشد دانه‌ای"^۲ مشاهده نشد. نانوذرات، یک ویژگی خاصی از ماتریس ژئوپلیمر را نشان می‌دهند و ابعاد آنها، حضور ماکرومولکول با اندازه مشخص و بنابراین با وزن مولکولی مشخص را پیشنهاد می‌دهد. Sindhunata و همکارانش در سال ۲۰۰۶ [۲۳] میکروساختار ماتریس ژئوپلیمر مبتنی بر خاکستر بادی را بررسی کردند و دریافتند که ساختار آن مشابه نانوذرات آلومینوسیلیکات با ابعاد ۲۰-۵ نانومتر است، که به هم متصل شده‌اند و حفرات و کانال‌هایی در سایز نانو تشکیل می‌دهند، همان گونه که Kriven و همکارانش در سال ۲۰۰۳ برای ژئوپلیمر پتاسیم-پلی (سیلات-سیلوکسو) گزارش دادند. تجمع این نانوذرات یا ذرات منفرد، ماتریس ژئوپلیمر را تشکیل می‌دهد که گاهی اوقات تحت عنوان ذرات رسوب داده شده نامیده می‌شوند و ابعاد آنها مشابه آن مایسل‌هایی است که از مولکول‌های سورفکتانت^۳ تشکیل شده‌اند، که از خودتجمعی مولکول‌های سورفکتانت کوچک در آب ناشی می‌شوند. با این حال، پایداری دمایی نانوذرات ژئوپلیمر به شدت از حضور ابر مولکول‌ها پشتیبانی می‌کند. به عبارت دیگر، این به نفع مدل پلیمری است.

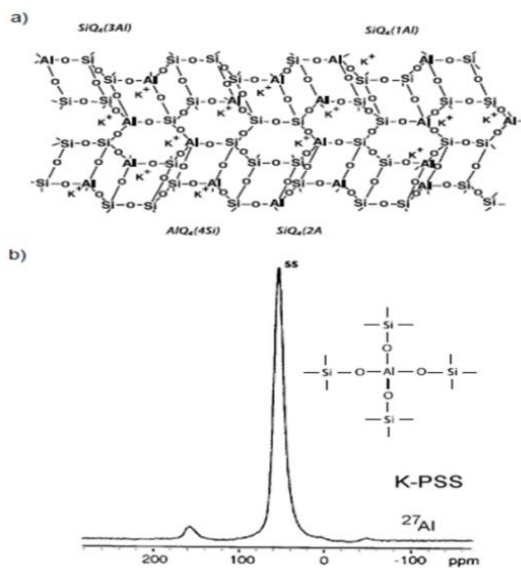
هسته این ژئوپلیمرهای نانوذره‌ای، از چارچوب‌های آلومینوسیلیکات ساخته شده است که مشابه همان مواد معدنی تشکیل دهنده سنگ است. با این حال، تفاوت‌های عمده‌ای وجود دارد. Davidovits در سال ۱۹۹۴، یک مدل ساختار نظری برای پتاسیم-پلی (سیلات-سیلوکسو)، (K)-(Si-O-Al-O-Si-O)، شبیه‌سازی کرد که با طیف NMR سازگار بود (شکل ۴a). در شکل ۴a علاوه بر اینکه حضور آب را در ساختار نمایش نمی‌دهد، نشان دهنده این واقعیت است که طیف سنجی-30 AL-MAS NMR از کل سدیم، پتاسیم-پلی (سیلات-سیلوکسو)، مربوط به تغییرات شیمیایی $Al([Al(H_2O)_6]^{3+})$ ، در محدوده ۵۵ ppm بوده و از طرف دیگر برابر با طیف نمایش داده شده در شکل 5 b می‌باشد. این موضوع بیانگر این است که آلومینیوم از نوع (4Si) AlQ_4 می‌باشد و به صورت تتراهدرال کوئوردینه شده، یا بطور دقیقتر، چهار ظرفیتی است. عدم وجود هرگونه رزونانس دیگر و پیک بسیار باریک در ۵۵ppm، وجود هر واحد ساختمانی منفرد باقی مانده با جرم مولکولی پایین، مانند دیمرها و تری‌مرها را رد می‌کند [۲۴].

سدیم، پتاسیم-پلی (سیلات-سیلوکسو)، سیلیکوات‌آلومینات‌هایی با چارچوب‌های سه بعدی واقعی با واحدهای ساختاری پلیمری هستند. آب تنها در دمای زیر ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد حضور دارد، که اساساً به شکل گروه‌های OH- مرتبط با گونه‌های $SiQ_2(2Si, 2OH)$ و $SiQ_3(3Si, 1OH)$ می‌باشند (شکل ۵) [۲۰].

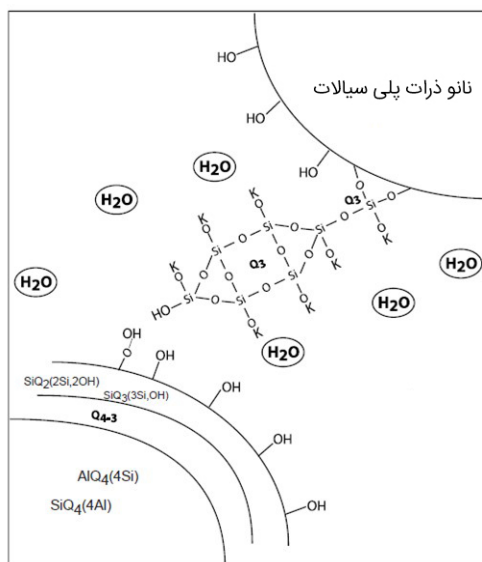
¹ Micelle

² Grain growth

³ Surfactant

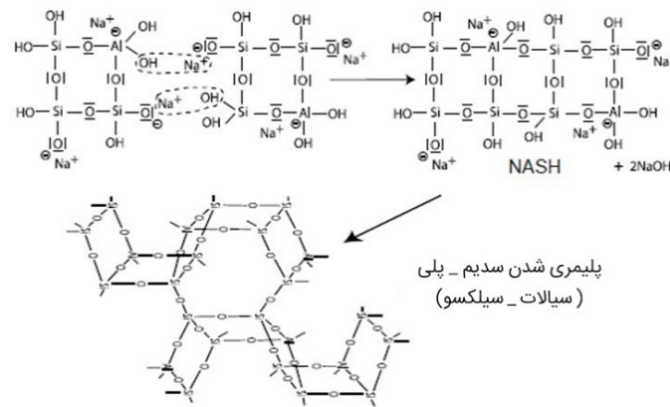


شکل ۴- (a) چپ. مدل ساختاری سه بعدی برای پتاسیم-پلی(سیلات-سیلوکسو) کاملاً واکنش داده. [۲۴].
 (b) راست. طیف ^{27}Al MAS-NMR [۱۴] Al برای پتاسیم-پلی (سیلات-سیلوکسو) K-PSS [۲۰].



شکل ۵- ساختار ساده شده‌ای از ذرات پتاسیم-نانو-پلی(سیلات) با مولکول سیلوکسونات بین ذرات [۲۰].

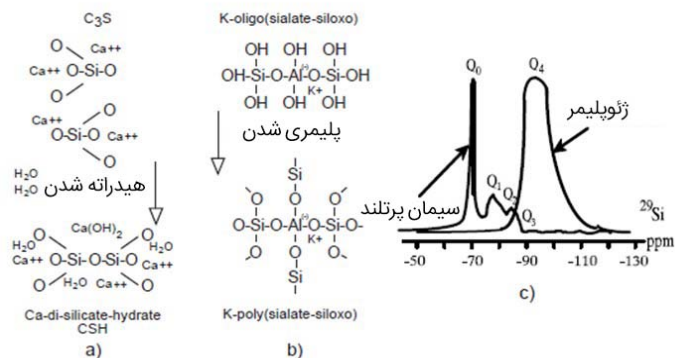
این گروه‌های OH- اساساً بر روی سطح نانوذرات واقع شده‌اند، و هر ذره با تعدادی آب پیوند داده شده به صورت فیزیکی و تعدادی مولکول‌های هیدراته سیلوکسونات احاطه شده است. با این وجود، دانشمندی که روی کاربردهای دما-پایین مانند سیمان‌ها و مدیریت زباله کار می‌کنند، سعی می‌کنند به طور دقیق هیدراتاسیون، کاتیون و مولکول‌های آب را مانند سیمان پورتلند مشخص کنند. یک مدلی که ابتدا توسط Barbosa و همکارانش در سال ۲۰۰۰ [۲۵] و Rowles در سال ۲۰۰۴ [۲۶] پیشنهاد شد، فقط ژئوپلیمری که به صورت ناقص واکنش داده است را نشان می‌دهد. فرایند ژئوپلیمریزه شدن که در شکل ۶ نشان داده شده است. با تراکم اولیگومر به مولکول کوچک روبان مانند آغاز می‌شود. این مرحله حد واسط، چندین گروه Si-OH را با یکدیگر با مولکول H_2O و همچنین با NaOH آزاد درگیر می‌کند که در نتیجه ژئوپلیمریزه شدن، می‌باشد. NASH (سدیم-آلومینو-سیلیکات-هیدرات) یا KASH (پتاسیم-آلومینو-سیلیکات-هیدرات) از سوی برخی از دانشمندان سیمان ابداع شده و به ساختار نهایی ژئوپلیمر تعمیم یافته است. NaOH آزاد به طور کامل در حین مرحله پلی متراکم شدن به شبکه سه بعدی مصرف می‌شود.



شکل ۶- پلیمری شدن با تشکیل اولیگو-سیالات-هیدرات واسطه، سمت راست بالا، این مولکول هیدراته، به یک شبکه ژئوپلیمر سه بعدی کاملاً واکنش داده پلی متراکم می شود [۲۶].

۴- مقایسه ساختار شیمیایی سیمان پرتلند و سیمان ژئوپلیمری

یک جنبه مهم در طول پلیمری شدن که تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی بتن ساخته شده از ژئوپلیمر دارد، آب است. آب کارائی خمیر اولیه ژئوپلیمر را تسهیل می کند ولی در ساختار ژئوپلیمر حاصل گنجانده نشده است. بنابراین، آب در واکنش های اصلی شیمیایی نقش ندارد اما در عوض، در طی عمل آوری به وسیله حرارت و خشک شدن پس از آن، دفع می شود. این در تضاد با واکنش های هیدراتاسیون است. زمانی که سیمان پرتلند با آب مخلوط می شود، فرایند هیدراتاسیون رخ داده و در نهایت منجر به تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته و هیدروکسید کلسیم می شود [۲۷]. تفاوت عمده بین ژئوپلیمرها و سیمان پرتلند این است که مکانیسم سخت شدن آن از طریق هیدراتاسیون صورت نمی گیرد، بلکه با واکنش پلیمریزاسیون در یک زمان کوتاه اتفاق می افتد، در حالی که هیدراتاسیون سیمان اصولاً تا یک ماه ادامه دارد و تا یک سال کامل می شود. ژئوپلیمریزاسیون واکنشی بین کاتیون های شیمیایی جهت تشکیل سیلیکات آلومینیم است. اتم های سیلیسیم و آلومینیم با یکدیگر واکنش داده و مولکول هایی را تشکیل می دهند که از لحاظ شیمیایی و ساختاری مشابه مواد چسبنده در سنگ می باشند. بنابراین تکنولوژی تولید سیمانی را در نظر بگیرید که در آن سنگ آهک به کار نرفته است و در عوض سیلیکات آلومینیم به کار می رود [۲۸]. شکل ۷ دو سیستم (سخت شدن سیمان پرتلند و ژئوپلیمر) را به لحاظ ساختار شیمیایی مقایسه می کند و نیز، در سمت چپ، سخت شدن سیمان پورتلند از طریق هیدراتاسیون ساده و در مرکز، سخت شدن (تنظیم) سیمان ژئوپلیمری از طریق پلی تراکمی و در طرف راست، طیف های Si NMR متناظر نمایش داده شده است.



شکل ۷- شیمی سیمان پرتلند در مقایسه با شیمی سیمان ژئوپلیمری. (a) سخت شدن سیمان پرتلند از طریق هیدراتاسیون ساده و تبدیل کلسیم سیلیکات به کلسیم دی سیلیکات هیدرات (CSH) و آهک $Ca(OH)_2$ ؛ (b) سخت شدن سیمان ژئوپلیمری از طریق پلی تراکمی پتاسیم الیگو-سیالات-سیلوکسو) به شبکه اتصال یافته پتاسیم پلی (سیالات-سیلوکسو)؛ (c) طیف های Si NMR [۲۹].

طیف Si NMR به طور واضح نشان دهنده تفاوت در ساختار مولکولی است. برای پرتلند، در سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH)، واحد سیلیکون برای مونومرهای کلسیم سیلیکات از نوع $Si(Q_0)$ و همچنین مقدار کمی از اولیگومر کلسیم سیلیکات از انواع $Si(Q_1)$ و $Si(Q_2)$ هستند. در مقابل، برای ژئوپلیمر، ساختار به یک سیلیکو-آلومینات (یک شبکه‌ی سه بعدی از نوع پتاسیم-پلی(سیلات-سیلوکسو) که در آن واحد سیلیکون از نوع $Si(Q_4)$ می‌باشد، پلیمریزه می‌شود [۲۹، ۳۰].

۵- کاربردها و خواص ژئوپلیمرها

هر منبع سیلیس و آلومینا که بتواند در یک محلول قلیایی حل شود، می‌تواند به عنوان پیش ماده ژئوپلیمر و پلیمری شدن، عمل کند. متاکائولن، تولید شده توسط کلسیون کائولن در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد، اغلب برای تولید ژئوپلیمرها استفاده می‌شود [۳۱]. Xu و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۳۲]، ۱۶ ماده معدنی طبیعی آلومیناسیلیکاتی را به عنوان مواد منبع بالقوه برای تولید ژئوپلیمرها مورد مطالعه قرار دادند. از جمله خواص این مواد مقاومت حرارتی بالا و مواد اولیه فراوان در طبیعت نسبت به سیمان های معدنی می‌باشد. مزیت مهم ژئوپلیمرها نسبت به پلیمرهای آلی مقاومت بالاتر در برابر حرارت و آتش می‌باشد. بنابراین می‌توان از آنها به عنوان جایگزین پلیمرهای آلی در مواردی که نیاز به مقاومت بالا در برابر آتش و حرارت باشد استفاده کرد [۳۳-۳۵].



شکل ۸- استفاده از ژئوپلیمر در ساخت پانل‌های مقاوم در برابر حریق [۳۴].

جدول ۲- کاربردهای ژئوپلیمر برای نسبت های مختلف Si/Al [۳۶].

کاربرد	Si/Al
آجرها، سرامیک‌ها، مواد ضد آتش	۱
سیمان‌های دی‌اکسید کربن پایین، نگهدارنده‌های باطله‌های سمی و مواد رادیواکتیو	۲
کامپوزیت‌های مقاوم در مقابل حرارت، تجهیزات ریختگری، کامپوزیت‌های فایبرگلاس	۳
آب بندهای صنعتی	>۳

در سال‌های اخیر، مواد ژئوپلیمری به دلیل چگالی پایین، هزینه کم، سنتز آسان و سازگاری با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته اند. این مواد جهت سنتز به دمای نسبتاً پایینی نیاز داشته و به همین خاطر گاز دی‌اکسید کربن کمتری آزاد می‌کنند، به عبارتی

با تولید سیمان ژئوپلیمری می‌توان میزان گاز CO₂، 60 الی 80 درصد کاهش داد. ویژگی‌های ذکر شده باعث می‌شود که این مواد جایگزین مناسبی برای سیمان پرتلند معمولی در شاخه‌های مختلف مهندسی عمران نظیر پل سازی، هیدرولیک، نظامی و شبکه های زیرزمینی باشد [37-40]. ژئوپلیمرها حتی می‌توانند کاربردهایی را به عنوان مواد زیستی داشته باشند. از آنها برای کاربردهای ایمپلنت استفاده شده است، از خصوصیات آنها می‌توان به تمایل کم انتقال یونی اشاره کرد [41]. ژئوپلیمرها با مخلوط کردن یک ماده اولیه پودر شده با محلولهای قلیایی (KOH یا NaOH) و سیلیکات سدیم تولید می‌شوند. به عنوان مثال، زمانی که سرباره فرونیکل به عنوان ماده خام استفاده می‌شود، ترکیب سرباره 82٪، آب 6٪، 3٪ KOH و 9٪ Na₂SiO₃ برای تولید ملات همگن پیشنهاد می‌شود. سپس خمیر همگن بدست آمده را در قالب ریخته می‌شود. در بیشتر موارد نمونه‌ها را مدت کوتاهی در دمای اتاق، قبل از پخت قرار می‌دهند و در صورت لزوم، تا دمای حداکثر 80 درجه سانتیگراد به مدت 1 یا 2 روز عمل آوری حرارتی می‌شوند. سپس نمونه‌ها به مدت 7 یا 28 روز در قالب می‌مانند، تا شاهد توسعه و افزایش پیوندهای ساختاری باشیم. ژئوپلیمرها به سرعت سخت می‌شوند و مقاومت اولیه بالایی دارند در حالی که مقاومت فشاری 28 روزه نهایی ممکن است به 100 مگاپاسکال برسد و یا از آن فراتر رود. تخلخل آنها می‌تواند از سیمان‌ها یا ملات‌ها کمتر باشد و بنابراین خصوصیات مکانیکی برتری رادار می‌باشند. ساختار نهایی و خصوصیات فیزیکی آنها به چندین پارامتر، مانند محتوای آب، اندازه ذرات، تاریخچه حرارتی، محتوای فلزات قلیایی و درجه شکل گیری بستگی دارد. ژئوپلیمرها نفوذپذیری مشابه سیمان پرتلند 9-10 سانتی متر بر ثانیه، انبساط کم مواد قلیایی، انقباض کم، مقاومت عالی در برابر اسیدها، سولفات‌ها، خوردگی و سیکل های ذوب و یخ‌زدگی را نشان می‌دهند [42-47].

6- نتیجه گیری

ژئوپلیمریک ماکرومولکول معدنی با اندازه و ساختار مولکولی مشخصی می‌باشد. ژئوپلیمرهای نوع (سدیم، پتاسیم)-پلی (سیلات) و (سدیم، پتاسیم)-پلی (سیلات-سیلوکسو)، شامل نانوذرات ابتدایی منحصر به فردی با ابعاد 5 تا 40 نانومتر (50 تا 400 آنگستروم) می‌باشند که توسط نانو حفراتی در محدوده 3 تا 10 نانومتر جدا شده‌اند. ساختار این نانوذرات نتیجه یک مکانیسم شیمیایی بسیار دقیق است که شامل پیوند کووالانسی، ترویج و تولید مواد سرامیک مانند می‌باشند. با این حال، ترتیب این نانوذرات که ماتریس ژئوپلیمر را تشکیل می‌دهند، خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی مواد سرامیک مانند را که در انواع مختلف استفاده می‌شوند، کنترل می‌کنند. برخی از کاربردهای ژئوپلیمر همچنان در حال گسترش هستند، در حالی که برخی دیگر در حال حاضر صنعتی و به بازار عرضه می‌شوند. از سیمان و بتن‌های ژئوپلیمری می‌توان بعنوان یک جایگزین مناسب برای مصالح ساختمانی و بتن مصرفی نام برد. خواص فیزیکی و شیمیایی بتن‌های ساخته شده از فناوری ژئوپلیمریزاسیون برتری مناسبی نسبت به سایر بتن‌های ساخته شده از سیمان پرتلند دارند. در مقابل سیمان پرتلند، اکثر سیستم‌های ژئوپلیمر، به مواد معدنی طبیعی پردازش شده و پسماندها و محصولات جانبی صنعتی تکیه می‌کنند، تا عوامل اتصال دهنده را فراهم کنند. بنابراین باعث کاهش قابل توجه انرژی و CO₂ در بخش صنعت ساخت و ساز می‌شوند. برای بهبود فناوری و تقویت پتانسیل آن در کاربردهای تجاری به مطالعات بیشتری نیاز است.

مراجع

- [1] Davidovits, J. "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries," World Resource Review, Vol. 6(2), (1994), 263-278.
- [2] McCaffrey, R. "Climate Change and the Cement Industry," Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue), (2002), 15-19.
- [3] Alzeer, M., and MacKenzie, K. "Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax)," Applied Clay Science, Vol. 75, (2013), 148-152 .
- [4] Yusuf, M.O., Johari, M.A M., Ahmad, Z.A., and Maslehuddin, M. "Strength and microstructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oil fuel ash and ground blast-furnace slag," Construction

- and Building Materials, Vol. 52, (2014), 504-510.
- [5] Davidovits, J. "Geopolymers based on natural and synthetic metakaolin: A critical review of published scientific papers," In: 41st Int'l Conf & Expo on Advanced Ceramics & Composites (ICACC 2017), Daytona Beach, Florida, USA.
- [6] Temujin, J., Rickard, W., Lee, M. and van Riessen, A. "Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings," J Non-Cryst Solids, Vol. 357, (2011), 1399-1404.
- [7] Olsen, N., "Process for hardening clay at low temperature, in German," German Patent 600, 1934; 327.
- [8] Berg, L.G., Demidenko, B.A., Remiznikova, V.A. and Nizamov, M.S., "Unfired finishing building materials based on kaolin," Stroitel'nye Materialy, Vol. 10, (1970) 22.
- [9] EP, F. and WF, C., "Extraction of alumina from clays and high-silica bauxites," Journal of research of the National Bureau of Standards, Vol. 36, (1964), 63-106.
- [10] Borchert, W., Keidel, J., Heidelb. Beitr. Z., Min. U. Petr., (1949), Vol.1, 2.
- [11] Howell P.A., US Patent 3, 1963; 114, 603.
- [12] Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S. and Lukey, G.C., "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash-and kaolinite-based geopolymers," Chemical Engineering Journal, Vol. 89(1-3), (2002), 63-73.
- [13] Davidovits, J., "Soft Mineralurgy and Geopolymers. In proceeding of Geopolymer 88 International Conference," the Université de Technologie. Compiègne, France, 1988.
- [14] Davidovits, J., "Geopolymer Chemistry and Properties," Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France, 1988.
- [15] Davidovits, J., "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," Journal of Thermal Analysis and calorimetry, Vol. 37(8), (1991), 1633-1656.

[۱۶] شوش، م و عقاب، ف.، سیمان ژئوپلیمر، چهل و هفتمین کنفرانس مدیران تولید و بهینه سازی کارخانجات سیمان کشور، یزد، ایران، ۱۳۸۸.

- [17] Davidovits, J., "Geopolymer chemistry and sustainable development. The Poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry," In: Davidovits J, ed. Proc. of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, 2005.
- [18] Sakulich, A.R., Sean Miller, S. and Barsoum, M.W., "Chemical and microstructural characterization of 20-month-old alkali-activated slag cements," J Am Ceram Soc, Vol. 93, (2010) , 1741-1748 .
- [19] Vickers, L., van Riessen, A. and Rickard, W.D.A., "Fire-Resistant Geopolymers", (Springer, 2015).
- [20] Davidovits, J., "Geopolymer chemistry and properties. In: Geopolymer '88 Proceedings," 1998, 25-48.
- [21] [North, M.R. and Swaddle, T.W., "Kinetics of silicate exchange in alkaline aluminosilicate solutions," Inorg. Chem, Vol. 39, (2000), 266-2665.
- [22] Kriven, W.M., Bell, J. and Gordon, M., "Microstructure and microchemistry of fully-reacted geopolymers and geopolymer matrix composites," Ceram. Trans, Vol. 153, (2003), 227-250.
- [23] Sindhunata, van Deventer, J.S.J., Lukey, G.C. and Xu, H., "Effect of curing temperature and silicate concentration on flyash- based geopolymerization," Ind. Eng. Chem. Res, Vol. 45, (2006), 3559-3568.
- [24] Davidovits, J., "Properties of geopolymer cements," In: proceedings of 1st Int. Nat. conference on alkaline cements and concretes. SRIBM, kiev (Ukraine), 1994, 131 - 149 .
- [25] Barbosa, V.F.F, MacKenzie, K.J.D. and Thaumaturgo, C., "Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica. sodium polysialate polymers," Int.J. Inorg. Mater, Vol. 2, (2000), 309- 17 .
- [26] Rowles, M.R., "The structural nature of aluminosilicate inorganic polymers: A macro to nanoscale study," PhD Thesis, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2004.
- [27] Davidovits J., "Geopolymer chemistry and applications," 2nd ed. Institut Géopolymère, Saint-Quentin, France; 2008.

[۲۸] بحرینی، و، و ضیغمی، ا.، بتن‌های ژئوپلیمری خواص و کاربردها، اولین کنفرانس ملی مصالح و سازه‌های نوین در

- مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ایران، ۱۳۹۱.
- [29] Lippmaa, E., Magi, M., Samoson, A., Engelhardt, G. and Grimmer, A.R., "Structural studies of silicates by solid-state highresolution ^{29}Si NMR," J. Am. Chem. Soc, Vol. 102, (1980), 4889-4893 .
- [30] Davidovits, J., "Geopolymer Chemistry and Applications," 2nd, 3rd and 4th edition, Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France, 2008 .
- [31] Kamseu, E., Rizzuti, A., Leonelli, C. and Perera, D., "Enhanced thermal stability in K_2O -metakaolin-based geopolymer concretes by Al_2O_3 and SiO_2 fillers addition," J Mater Sci, Vol. 45, (2010), 1715-1724.
- [32] Xu, H. and van Deventer, J.S.J., "The geopolymerisation of aluminosilicate minerals," Int J Miner Process, Vol. 59, (2000), 247-266.
- [33] Lyon, R., "Fire resistant aluminosilicate composites," Fire and Materials, Vol. 21, (1997), 67-73.
- [34] Van Jaarsveld, J.G.S. and Van Deventer J.S.J., "The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals," Minerals Engineering, Vol. 10, (1996), 659-669.
- [35] Moradikhou A B, Hosseini M H, Mousavi Kashi A, Emami F, Esparham A., "Effect of Simple and Hybrid Polymer Fibers on Mechanical Strengths and High-temperature Resistance of Metakaolin-based Geopolymer Concrete," IQBQ, Vol. 20(2), (2020), 147-161.
- [36] Davidovits, J., Davidovits, M. and Davidovits, N. (1994a), "Process for Obtaining a Geopolymeric Alumino-silicate and Products thus Obtain," US Patent, USA. 5,342,595, 1994.
- [37] Drechsler, M., "Geopolymer: A new technology for sustainability in mining construction and hazardous waste," PB Network, 2006.
- [۳۸] مرادی خو، ا. و اسپرهم، ع.، مطالعه آزمایشگاهی نقش محلول‌های قلیایی مختلف و کیورینگ بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری برپایه سرباره کوره آهن‌گدازی، کنفرانس ملی تحقیقات بنیادین در عمران، معماری و شهر سازی. تهران، ایران، ۱۳۹۷.
- [۳۹] مرادی خو، س.، سخائی نیا، ح. و علی حسینی، ا.، اثر پارامترهای محلول قلیایی بر مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دمای محیط، دومین کنفرانس بین المللی فناوری های جدید در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، تهران، ایران، ۱۳۹۹.
- [40] Van Jaarsveld, J.G.S, Lucky, G.C. and Van Deventer, J.S.J., "The stabilisation of mine tailings by reactive geopolymerisation," In: Griffiths P, Spry A, editors. Proc. MINPREX 2000 International Congress on Mineral and Processing and Extractive Metallurgy; The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Melbourne, Australia, 2000, 363-371 .
- [41] Catauro, M., Bollino, F., Lancellotti, I., Kamseu, E. and Leonelli, C., "Chemical and biological characterization of geopolymers for potential application as hard tissue prostheses," Adv Sci Technol.
- [42] Esparham, A. and Moradikhou, A.B., "A Novel Type of Alkaline Activator for Geopolymer Concrete Based on Class C Fly Ash," Advance Researches in Civil Engineering, Vol. 3(1), (2021), 1-13.
- [43] Esparham A, Moradikhou A.B., Andalib F.K. and Avanaki M.J., "Strength characteristics of granulated ground blast furnace slag-based geopolymer concrete," Advances in concrete construction, Vol. 11(3), (2021), pp. 219-229.
- [44] Esparham, A., Moradikhou, A.B. and Jamshidi Avanaki, M., "Effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," Journal of civil Engineering and Materials Application, Vol. 4(2), (2020), 115-123.
- [45] Moradikhou, A.B., Esparham, A. and Jamshidi Avanaki, M., "Effect of Hybrid Fibers on Water absorption and Mechanical Strengths of Geopolymer Concrete based on Blast Furnace Slag," Journal of civil Engineering and Materials Application, Vol. 3(4), (2019), 193-201.
- [46] Esparham, A. and Moradikhou, A.B., "Factors Influencing Compressive Strength of Fly Ash-based Geopolymer Concrete," Amirkabir Journal of Civil Engineering, Vol. 53(3), (2021), 21-21.
- [۴۷] اسپرهم، ع و مرادی خو، ا.، فاکتورهای تاثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری بر پایه متاکائولن، مهندسی عمران مدرس، ۲۰ (۱)، ۱۳۹۸، ۵۳-۶۶.



دکتر سید عیسی کرانیان،
نویسنده اول مقاله، دانشگاه امام
علی (ع)

ساخت سرامیک آلومینا و کامپوزیت آلومینا - زیر کونیا به روش ریخته‌گری ژله‌ای با استفاده از زیر کونیای پایدار شده با ایتریا

سید عیسی کرانیان^۱، مسعود گوهرگرانبها^۲، حسن توکلی^{۳*}

^۱ عضو هیئت علمی دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک و شیمی، دانشگاه امام علی (ع)

^۲ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک و شیمی، دانشگاه امام علی (ع)

^۳ عضو هیئت علمی دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک و شیمی، دانشگاه امام علی (ع)

چکیده: ریخته‌گری ژله‌ای به عنوان روشی نوین و بهینه و آسان در ساخت سرامیک، با قابلیت شکل‌دهی سرامیک به اشکال پیچیده در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این روش ترکیبی از شیمی پلیمر و فرآیند ریخته‌گری دوغابی است که در آن دوغاب غلیظی از پودر سرامیک و مونومرهای آلی داخل قالب ریخته شده و با گرفتن شکل قالب به خود، درجا به پلیمر تبدیل می‌شود. پژوهش‌های زیادی در رابطه با رئولوژی دوغاب‌های استفاده شده در روش ریخته‌گری ژله‌ای انجام یافته است اما نتایج چندانی در رابطه با خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های آلومینا-زیر کونیای ساخته شده با این روش وجود ندارد. در این پژوهش نمونه سرامیک آلومینا (A100) با میزان ۴۵٪ حجمی پودر آلومینا در دوغاب و نمونه کامپوزیت آلومینا - زیر کونیا (A90-Z10) با میزان ۴۵٪ حجمی از مخلوط پودرهای سرامیکی در دوغاب، که این میزان پودر مخلوط شامل ۹۰٪ حجمی آلومینا و ۱۰٪ حجمی زیر کونیای پایدار شده با ایتریا است، با استفاده از روش ریخته‌گری ژله‌ای ساخته شدند و نهایتاً قطعات در دمای ۱۶۵۰°C تف‌جوشی شدند. نتایج حاصل از پراش اشعه ایکس حضور فاز تتراگونال زیر کونیا را در کامپوزیت آلومینا - زیر کونیا تایید کرده است. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی ساختار یکنواختی را برای دو نمونه ساخته شده A100 و A90-Z10 نشان می‌دهد و برای نمونه A90-Z10 بیانگر توزیع نسبتاً یکنواخت ذرات زیر کونیا در زمینه آلومینا است. نتایج حاصل از خواص فیزیکی نشان داد که می‌توان با روش ریخته‌گری ژله‌ای به میزان چگالی نسبی مطلوبی برای ساخت کامپوزیت آلومینا - زیر کونیا (۸۹/۷٪) دست یافت. نتایج حاصل از خواص مکانیکی نشان داد که با افزودن تقویت‌کننده زیر کونیا به قطعات آلومینایی، استحکام خمشی و چقرمگی قطعه کامپوزیت (A90-Z10) در برابر قطعه آلومینای خالص (A100) به ترتیب در حدود ۱۳/۲۷٪ و ۲۸/۹۴٪ افزایش داشته است. از طرفی سختی قطعه کامپوزیت نسبت به قطعه آلومینای خالص به میزان ۹/۷٪ کاهش داشته است.

کلمات کلیدی: ریخته‌گری ژله‌ای، سرامیک، کامپوزیت، آلومینا - زیر کونیا

۱- مقدمه

سرامیک‌های پیشرفته دارای خصوصیات منحصربه‌فردی از جمله نقطه ذوب بالا، مقاومت در برابر اکسید شدن، سختی بالا، غیر مغناطیس بودن، پایداری شیمیایی و وزن پایین هستند و در کاربردهای مختلف صنعتی نسبت به فلز سطحی صافتر، سخت‌تر و دقت ابعادی بالاتری دارند. آلومینا از دسته سرامیک‌های پیشرفته است که در بسیاری از کاربردهای نوین از جمله استخوان‌های مصنوعی، پرها و دیگر قطعات موتورها، عایق‌های حرارتی و الکتریکی، ابزارهای برش و تراشکاری صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. برای افزایش چقرمگی و استحکام سرامیک‌های آلومینا از افزودن ذرات زیر کونیا در ساختار آلومینا استفاده می‌شود که به آن کامپوزیت آلومینای چقرمه‌شده با زیر کونیا (ZTA) گفته می‌شود.

¹ Zirconia Toughened Alumina

در این نوع کامپوزیت‌ها بر حسب کاربرد آن، میزان زیرکونیای موجود در ساختار آلومینا بین ۱۰٪ الی ۲۰٪ حجمی متغیر است. وجود زیرکونیا در ساختار سرامیک آلومینا از رشد بیش از اندازه ذرات آلومینا ممانعت کرده و باعث افزایش چقرمگی و استحکام خمشی آن می‌شود [۲].

از طرفی در فرآیند ساخت سرامیک‌های آلومینای چقرمه‌شده با زیرکونیا، در هنگام خنک‌سازی سرامیک ساخته شده، بعد از مرحله تف‌جوشی، زیرکونیا می‌تواند دچار تغییر فاز از حالت تتراگونال به مونوکلینیک شود که این تغییر فاز با افزایش حجم همراه است. این تغییر حجم می‌تواند باعث ایجاد ترک و غیر یکنواختی در ساختار سرامیک شود و در نهایت موجب شکست قطعه شود [۳]. به همین منظور برای جلوگیری از این تغییر فاز از افزودنی‌هایی مانند اکسید ایتیریم (Y_2O_3) و اکسید سربیم (Ge_2O_3) استفاده می‌شود تا زیرکونیای موجود در ساختار سرامیک در حالت فاز تتراگونال باقی بماند [۴]. ریخته‌گری ژله‌ای یکی از روش‌های شکل‌دهی سرامیک است که در اوایل سال ۱۹۹۰ ابداع شد [۵]. این روش برای فایق آمدن بر برخی از محدودیت‌های موجود در روش‌های شکل‌دهی اشکال پیچیده مانند ریخته‌گری تزریقی و ریخته‌گری دوغابی، توسط آزمایشگاه تحقیقاتی ORNL^۱ توسعه داده شد [۶]. در این روش دوغاب غلیظی از پودر سرامیک و مونومرهای آلی داخل قالب ریخته شده و با گرفتن شکل قالب به خود، درجا به پلیمر تبدیل می‌شود. این شبکه ماکرومولکولی پلیمری برای نگه‌داشتن ذرات سرامیک در کنار یکدیگر است که این روش ترکیبی از شیمی پلیمر با فرآیند ریخته‌گری دوغابی است. سادگی این روش در ساخت قطعات در اشکال پیچیده، عدم نیاز به تجهیزات گران قیمت، مقاومت بالای قطعه قبل از فرآیند سینترینگ و قابلیت ماشین‌کاری راحت‌تر آن نسبت به روش‌های دیگر و همگنی بالای چگالی در کل قطعه سرامیکی از مزیت‌های این روش است [۷]. در پژوهش‌های قبلی مرتبط با فرآیند ریخته‌گری ژله‌ای پارامترهای تاثیرگذار مرتبط با رئولوژی دوغاب، مانند تاثیر میزان پایدارکننده و میزان pH محلول اولیه بر روی ویسکوزیته دوغاب بررسی شده است [۸، ۶]. همچنین پارامترهای کنترل‌کننده فرآیند ریخته‌گری ژله‌ای مانند میزان مونومر، کاتالیزور و آغازکننده فرآیند ژل شدن نیز برای سرامیک آلومینا بررسی شده است [۹]. اما نتایجی در رابطه با ریزساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی سرامیک‌های ساخته شده با این روش برای کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا وجود ندارد. در این تحقیق به ساخت و بررسی ریز ساختاری نمونه سرامیک‌های آلومینا و آلومینا - زیرکونیا به روش ریخته‌گری ژله‌ای و مقایسه برخی از خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها از جمله چگالی نسبی، سختی، استحکام خمشی و چقرمگی پرداخته شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد اولیه

در این پژوهش از پودر آلومینای تجاری شرکت هندی ایندال^۲ با میزان متوسط توزیع اندازه ذرات ۳ میکرون و پودر زیرکونیای پایدارشده با ایتیریای ۴ درصد مولی از شرکت ایرانی رایکا صنعت افرند با میزان توزیع اندازه ذرات ۳۰۰ نانومتر استفاده شد. مواد شیمیایی مورد استفاده برای فرآیند ریخته‌گری ژله‌ای، شامل دو مونومر آلی واکنش‌دهنده به نام‌های مونومر تک عاملی اکریل آمید^۳ و مونومر دو عاملی (پیونددهنده عرضی) متیلن بیس آکریل‌آمید^۴ است. این دو مونومر برای ساخت محلول آبی اولیه در داخل آب یون‌زدایی شده حل می‌شوند. این محلول اولیه در حضور ماده آغازگر واکنش به نام آمونیم پرسولفات فرآیند پلیمریزاسیون وینیلی رادیکال آزاد را طی می‌نماید که سرعت واکنش با افزودن کاتالیزور تترامتیل اتیلن دی‌آمین^۵ و افزایش دما در حالت بهینه تنظیم می‌شود. برای پایدارسازی پودرهای سرامیکی در محلول آبی اولیه از پایدارکننده محلول ۴۰٪ وزنی آمونیم پلی‌آکریلات با نام تجاری داروان^۶ A-۸۲۱ ساخت شرکت واندربیل^۷ استفاده شد. همچنین برای تنظیم pH محلول اولیه از محلول آبی ۰/۱

¹ Oak Ridge National Laboratory

² Indal Co.

³ Acrylamide (AM)

⁴ Methylenebisacrylamide (MBAA)

⁵ Tetramethylethylenediamine (TEMED)

⁶ DARVAN 821-A

⁷ Vanderbilt Co

مولار سدیم هیدروکسید استفاده شد.

۲-۲- روش ساخت قطعات سرامیکی

در ابتدا مونومرهای آکریل آمید و متیلن بیس آکریل آمید در داخل آب یون زدایی شده توسط میکسر مکانیکی حل شدند. میزان مجموع دو مونومر حل شده در محلول آبی اولیه برابر ۱۵٪ وزنی کل محلول است که نسبت مونومر تک عاملی به مونومر دو عاملی در آن ۲۴ به ۱ است. پس از حل شدن مونومرها در آب pH محلول توسط محلول سدیم هیدروکسید در ۱۰ تنظیم شد. سپس پایدارکننده پودرهای سرامیکی (داروان A-۸۲۱) به میزان ۱٪ وزنی از کل پودر مورد استفاده به داخل محلول اولیه اضافه شد. سپس پودرهای سرامیکی مورد نظر به داخل محلول اولیه به صورت تدریجی اضافه شدند. در این پژوهش دو نوع دوغاب از جنس آلومینا و آلومینا - زیرکونیا ساخته شد که میزان پودرهای سرامیکی موجود در هر دو دوغاب ۴۵٪ حجمی می باشد. دوغاب اول تنها حاوی پودر سرامیکی آلومینا است و در دوغاب دوم از کل میزان پودرهای استفاده شده، ۹۰٪ حجمی آن را آلومینا و ۱۰٪ حجمی آن را زیرکونیای پایدار شده با ایتریا تشکیل می دهند. در ساخت کامپوزیت های آلومینای چقرمه شده با زیرکونیا به روش های مختلف، عموماً بر حسب کاربرد آن میزان زیرکونیای موجود در ساختار آلومینا بین ۱۰٪ الی ۲۰٪ حجمی متغیر است [۲]. در روش ریخته گری ژله ای، دوغابها رفتار سیال غیر نیوتونی از نوع سیال روان برشی را از خود نشان می دهند. در این روش باید گرانروی دوغاب در حدی باشد که بتوان آن را به راحتی داخل قالب مورد نظر، قالب ریزی کرد و در صورتی که به دلیل بالا بودن میزان جامد در دوغاب و یا بالا بودن نسبت زیرکونیا به آلومینا در آن، گرانروی دوغاب بالا باشد، در حدی که دوغاب به صورت خمیری شکل شود، دیگر قابلیت قالب ریزی را نخواهد داشت و قطعه نهایی بدست آمده استحکام مناسب را نخواهد داشت [۶، ۷]. در این پژوهش با وجود افزایش میزان پایدارکننده، با افزایش میزان ذرات جامد در دوغاب به بیش از ۴۵٪ حجمی و همچنین با افزایش میزان زیرکونیا به بیش از ۱۰٪ حجمی، گرانروی دوغابهای ساخته شده افزایش پیدا کرد و دوغابها قابلیت قالب ریزی را از دست داد، به همین منظور افزایش میزان ذرات جامد در دوغابها به بیش از ۴۵٪ حجمی و همچنین افزایش میزان زیرکونیا به بیش از ۱۰٪ حجمی امکان پذیر نشد. دلیل این امر می تواند درشت بودن ذرات آلومینای استفاده شده در این تحقیق و برهم کنش ذرات آلومینا و زیرکونیا باشد.

پس از اضافه شدن پودرهای سرامیکی، هر دو دوغاب به مدت ۱۲ ساعت در حالت چرخش توسط میکسر مکانیکی باقی ماندند. در مرحله بعد تترامتیل اتیلن دی آمین به عنوان عامل تسریع کننده واکنش ژل شدن به دوغابها اضافه شد. میزان عامل تسریع کننده برابر ۵ میلی لیتر در هر ۱ لیتر از محلول اولیه است. این ماده علاوه بر نقش کاتالیزور به پایدارسازی و روان سازی دوغاب نیز کمک می کند [۶]. سپس ماده آمونیم پرسولفات که نقش آغازگر واکنش ژل شدن را دارد به میزان ۰/۳ گرم به ازای هر ۱ لیتر از محلول اولیه به داخل دوغابها اضافه شد. سپس دوغابها با استفاده از دستگاه تبخیرکننده چرخان گاززدایی شدند و پس از آن دوغابها به داخل قالبهای مورد نظر در ابعاد ۱۲۰ میلی متر در ۱۲۰ میلی متر و به ارتفاع ۱۵ میلی متر ریخته شدند. پس از انجام فرآیند ریخته گری، قالبهای حاوی دوغاب به داخل خشک کن گرمایشی انتقال یافتند، تا در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد واکنش ژل شدن در مدت زمان حدودی یک ساعته انجام شود. پس از اتمام فرآیند ژل شدن، قطعات ژل شده از داخل قالبها خارج شدند و به داخل خشک کن انتقال داده شدند تا فرآیند خشک شدن بر روی آنها انجام شود. پس از خشک شدن، قطعات خام^۱ حاصل شده در یک کوره حرارتی الکتریکی شامل اتمسفر هوا مرحله تفجوشی را در دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی گراد با ماندگاری ۵ ساعت طی کردند. قطعات سرامیکی ساخته شده از جنس آلومینا و آلومینا - زیرکونیا به ترتیب به نامهای A100 و A90-Z10 کدگذاری شدند که ابعاد قطعات نهایی در حدود ۱۰۰ میلی متر در ۱۰۰ میلی متر و به ارتفاع ۱۰ میلی متر هستند.

۲-۳- روش های تعیین مشخصات

در این تحقیق برای تایید جنس قطعات ساخته شده از آلومینا و آلومینا - زیرکونیا و همچنین تشخیص فازهای آنها، از آنالیز پراش اشعه ایکس استفاده شد. برای بررسی ریزساختاری و مورفولوژی سرامیک های ساخته شده از میکروسکوپ الکترونی

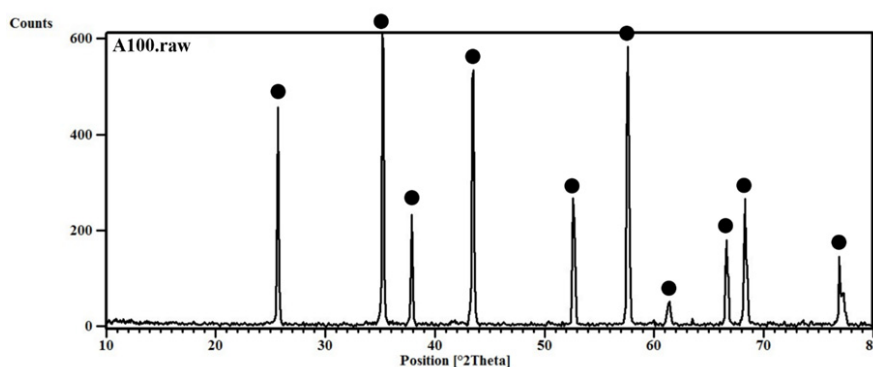
^۱ Green Body

روشنی با آشکارساز الکترون‌های برگشتی استفاده شد. برای تعیین میزان چگالی نسبی نمونه‌های ساخته شده از اصل ارشمیدس توسط آب خالص استفاده شد. برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌ها، برای تعیین میزان سختی از سختی سنج ویکرز، برای تعیین میزان استحکام خمشی از آزمون استحکام خمشی به صورت بارگذاری سه نقطه‌ای و برای تعیین چقرمگی نمونه‌ها از آزمون چقرمگی شکست (KIC) با استفاده از نمونه خمشی دارای تک شیار لبه‌ای^۱ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

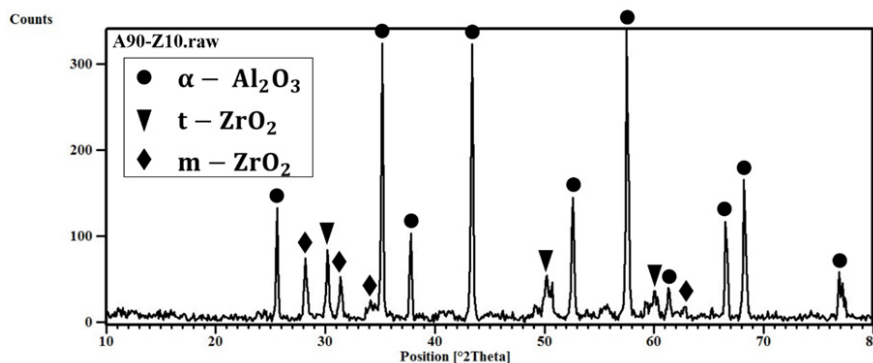
۳-۱- بررسی فازی و ریزساختاری

شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به سرامیک آلومینای خالص ساخته شده (A100) را نشان می‌دهد. با توجه به این الگو تمامی پیک‌های مربوط به فاز آلفا (α) آلومینا کاملاً مشخص است و شدت بالای پیک‌های ظاهر شده بلورینگی مناسب آلومینا را نشان می‌دهد.



شکل ۱- الگوی XRD نمونه سرامیک آلومینای خالص ساخته شده (A100)، پیک‌های شاخص آلفا آلومینا با علامت (●) مشخص شده است.

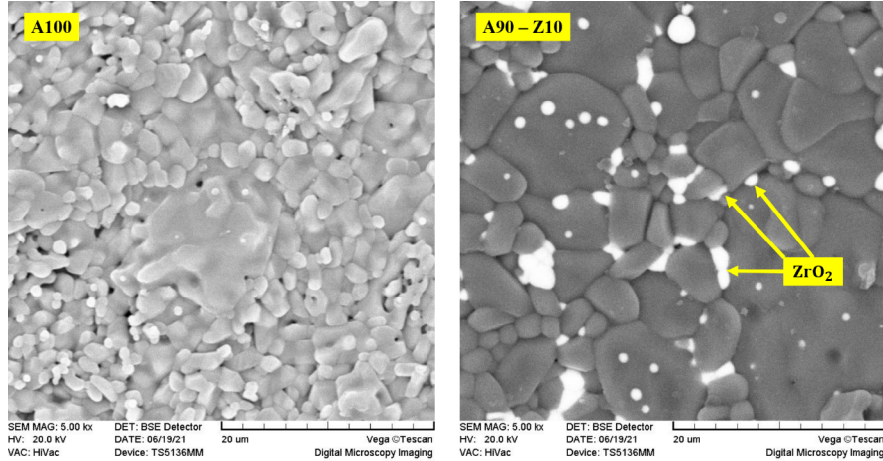
شکل ۲ الگوی XRD مربوط به کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10) را نشان می‌دهد. با توجه به این الگو فازهای مربوط به آلفا آلومینا و زیرکونیا مونوکلینیک و زیرکونیا تترائگونال قابل مشاهده هستند. دلیل کم بودن شدت پیک‌های زیرکونیا نسبت به آلومینا، کم بودن میزان حجمی آن در قطعه سرامیکی نسبت به آلومینا است. دلیل ظهور پیک‌های مربوط به فاز مونوکلینیک عملیات تفجوشی بدون فشار است که در آن احتمال رشد بیش از حد دانه‌های زیرکونیا وجود دارد و این رشد شرایط وقوع استحاله تترائگونال به مونوکلینیک را تا حدی امکان‌پذیر می‌سازد اما بیشتر بودن شدت پیک‌های مربوط به فاز تترائگونال زیرکونیا نسبت به فاز مونوکلینیک آن، نشان‌دهنده پایداری نسبتاً مناسب زیرکونیا در فاز تترائگونال است.



شکل ۲- الگوی XRD نمونه کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10)

¹ Single Edge Notch Beam (SENB)

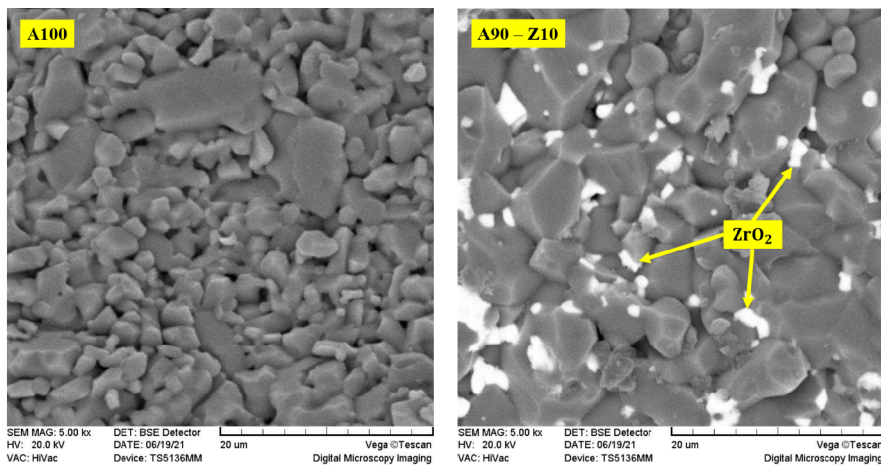
شکل ۳ تصاویر SEM مربوط به سطح قطعات سرامیکی آلومینا (A100) و کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10) را نشان می دهد. همانطور که در این دو تصویر مشاهده می شود هر دو نمونه دارای ریزساختار یکنواخت در سطح قطعات هستند. در تصویر SEM مربوط به نمونه A100 مشاهده می شود به دلیل اینکه سرامیک از جنس آلومینای خالص است رشد بی رویه دانه های آلومینا در فرآیند تفجوشی اتفاق افتاده است که این امر به بالا بودن سختی و پایین بودن چقرمگی سرامیک آلومینا منجر می شود.



شکل ۳- تصاویر SEM از سطح سرامیک های ساخته شده آلومینا (A100) و آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10)

با استفاده از آشکارساز الکترون های برگشتی در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ذرات حاوی عناصر با عدد اتمی کوچک تر تیره و ذرات حاوی عناصر با عدد اتمی بزرگ تر روشن تر دیده می شوند. با توجه به اینکه عنصر Zr دارای عدد اتمی بالاتری نسبت به عنصر Al است، بنابراین در تصاویر SEM مربوط به A90-Z10، مناطق روشن مربوط به ذرات زیرکونیا هستند و مناطق خاکستری رنگ مربوط به ذرات آلومینا هستند. در شکل ۳ در تصویر SEM مربوط به سطح نمونه A90-Z10 مشاهده می شود که حضور زیرکونیای پایدار شده تا حدود زیادی از رشد بی رویه دانه های آلومینا جلوگیری کرده است که این امر می تواند سبب افزایش چقرمگی سرامیک شود. همچنین مشاهده می شود که رشد دانه های آلومینا در برخی نقاط تا حدودی بیش از اندازه است و بزرگی ذرات آلومینا به ۲۰ میکرون نزدیک شده است، که دلیل آن می تواند کم بودن میزان زیرکونیا در داخل دوغاب و یا خوب پخش نشدن کامل دانه های زیرکونیا در تمام نقاط دوغاب در هنگام ساخت قطعه باشد.

شکل ۴ تصاویر SEM مربوط به سطح شکست قطعات A100 و A90-Z10 است. با توجه به تصاویر در هر دو نمونه تعداد کمی تخلخل در بدنه سینتر شده مشاهده می شود و ریز ساختارهای بدست آمده از یکنواختی مطلوبی برخوردار هستند.



شکل ۴- تصاویر SEM از سطح شکست سرامیک های ساخته شده آلومینا (A100) و آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10)

۳-۲- بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی

خصوصیات فیزیکی و مکانیکی برای هر دو قطعه سرامیکی آلومینا (A100) و آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10) در جدول ۱ مشاهده می‌شود. با توجه به چگالی نسبی گزارش شده برای نمونه‌ها، پایین بودن چگالی نسبی به دلیل بزرگ بودن سایز دانه‌های آلومینای استفاده شده در این کار است. پارامتر چگالی نسبی یکی از مهمترین پارامترها در کنترل میزان سختی و استحکام قطعات سرامیکی است و با افزایش میزان چگالی نسبی، میزان سختی و استحکام قطعات نیز افزایش می‌یابد [۲]. همچنین با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزودن زیرکونیا به ساختار آلومینا میزان چگالی نسبی و به تبعیت از آن میزان سختی قطعه در مقایسه با قطعه آلومینای خالص، کاهش و میزان استحکام خمشی و چقرمگی آن افزایش پیدا کرده است. این نتایج با نتایج حاصل از تصاویر SEM مربوط به این دو نمونه هم‌خوانی دارد و می‌تواند توجیهی بر ممانعت رشد بیش از اندازه دانه‌های آلومینا بر اثر وجود زیرکونیای پایدار شده در ساختار قطعه سرامیکی باشد که این امر باعث افزایش میزان چقرمگی و استحکام خمشی در قطعه سرامیکی می‌شود. علاوه بر تاثیر پارامتر چگالی نسبی در میزان سختی قطعات، با توجه بر اینکه سختی زیرکونیا نسبت به آلومینا کمتر است، می‌تواند دلیل دیگری بر کاهش میزان سختی نمونه A90-Z10 نسبت به A100 باشد.

جدول ۱- چگالی نسبی، سختی، استحکام خمشی و چقرمگی سرامیک‌های ساخته شده آلومینا (A100) و آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10)

نام نمونه	چگالی نسبی (%)	سختی (GPa)	استحکام خمشی (MPa)	چقرمگی (Kic) (MPa.m ^{1/2})
A100	۹۰/۱	۱۳/۸۱	۳۲۴±۳۳	۳/۸
A90-Z10	۸۹/۷	۱۲/۴۷	۳۶۷±۴۶	۴/۹

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نمونه سرامیک آلومینا (A100) با میزان ۴۵٪ حجمی پودر آلومینا در دوغاب و نمونه کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10) با میزان ۴۵٪ حجمی از مخلوط پودرهای سرامیکی در دوغاب، که این میزان پودر مخلوط شامل ۹۰٪ حجمی آلومینا و ۱۰٪ حجمی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا است، با استفاده از روش نوین ریخته‌گری ژله‌ای ساخته شدند. قطعات سرامیکی حاصل از این روش دارای سطحی صاف و یکنواخت و بدون اعوجاج پس از گذراندن فرآیند تف‌جوشی هستند و با استفاده از این روش می‌توان به آسانی اشکال پیچیده مورد نیاز را قالب‌ریزی و تهیه کرد. نتایج حاصل از الگوی XRD حضور فازهای آلفا آلومینا و زیرکونیای تتراگونال را در نمونه کامپوزیتی (A90-Z10) تایید می‌نماید. همچنین حضور اندکی زیرکونیای مونوکلینیک به دلیل رشد دانه‌های زیرکونیا در فرآیند تف‌جوشی را توجیح می‌نماید. نتایج حاصل از تصاویر SEM یکنواختی مناسب ریزساختار در هر دو نمونه آلومینا (A100) و آلومینا-زیرکونیا (A90-Z10) را نشان می‌دهد. همچنین تصاویر SEM حاصل از کامپوزیت آلومینا - زیرکونیا (A90-Z10) نشان دهنده توزیع مناسب ذرات تقویت کننده زیرکونیا در بین ذرات آلومینا است که این امر از رشد ذرات آلومینا ممانعت کرده است، اما در برخی نقاط عدم حضور زیرکونیا باعث رشد بیش از اندازه ذرات آلومینا شده است و می‌توان این انتظار را داشت که افزایش میزان زیرکونیا در داخل دوغاب در فرآیند ریخته‌گری ژله‌ای از رشد بیش از اندازه ذرات آلومینا جلوگیری نماید. نتایج حاصل از چگالی نسبی نشان داد با استفاده از روش ریخته‌گری ژله‌ای می‌توان به میزان چگالی‌های بالا در ساخت قطعات سرامیکی دست یافت و می‌توان این انتظار را داشت که با استفاده از پودرهای سرامیکی با اندازه ذرات ریزتر به دوغاب یکنواخت‌تر و در نتیجه به قطعات سرامیکی چگال‌تر دست پیدا کرد. نتایج حاصل از خواص مکانیکی نمونه‌ها نشان داد که با این روش می‌توان به قطعات سرامیکی و کامپوزیتی با میزان خواص مکانیکی مطلوب دست یافت. از طرفی این نتایج نشان داد که با افزودن تقویت کننده زیرکونیا به داخل ذرات آلومینا استحکام خمشی و چقرمگی قطعه کامپوزیتی (A90-Z10) در برابر قطعه سرامیک آلومینای خالص (A100) به ترتیب به میزان ۱۳/۲۷٪ و ۲۸/۹۴٪ افزایش یافته است اما از طرفی به دلیل سختی پایین این تقویت کننده نسبت به آلومینا، سختی نهایی قطعه کامپوزیتی (A90-Z10) در مقایسه با نمونه آلومینای خالص (A100) به میزان ۹/۷٪ کاهش یافته است.

مراجع

- [1] R. B. Heimann, "Classic and advanced ceramics: from fundamentals to applications". John Wiley & Sons, 2010 .
- [2] H. Tuan, R. Z. Chen, T. C. Wang, C. H. Cheng, and P. S. Kuo, "Mechanical properties of Al_2O_3/ZrO_2 composites", Journal of the European Ceramic Society, vol. 22, no. 16, pp. 2827-2833, 2002 .
- [3] P. Platt, P. Frankel, M. Gass, R. Howells, M. Preuss, "Finite element analysis of the tetragonal to monoclinic phase transformation during oxidation of zirconium alloys", Journal of Nuclear Materials, vol. 454, issues 1-3, pp. 290-297, 2014 .
- [4] J. Wang, R. Stevens, "Zirconia-toughened alumina (ZTA) ceramics", Journal of Material Science, vol. 24, pp. 3421-3440, 1989 .
- [5] K. T. Faber, N. O. Shanti, "Gelcasting of ceramic bodies", in: The American Ceramic Society, John Wiley & Sons, Inc., Eds., pp. 199-234, 2012 .
- [6] C. Young, O. O. Omatete, M. A. Janney, P. A. Menchhofer, "Gelcasting of alumina", Journal of the American Ceramic Society, vol. 74, no. 3, pp. 612-618, 1991 .
- [7] O. O. Omatete, M. A. Janney, S. D. Nunn, "Gelcasting: from laboratory development toward industrial production", Journal of the European Ceramic Society, vol. 17, pp. 407-413, 1997 .
- [8] Barati, M. Kokabi, M. H. N. Famili, "Forming alumina parts using acrylamide gels", Iranian Polymer Journal, vol. 12, no. 2, pp. 127-138, 2003 .
- [9] Babaluo, M. Kokabi, A. Barati, "Chemorheology of alumina-aqueous acrylamide gelcasting systems", Journal of the European Ceramic Society, vol. 24, pp. 635-644, 2004.



مهندس مهدی رستمی، نویسنده
اول، مقاله دانشگاه علم و صنعت
ایران

بررسی خواص ریزساختاری ماده‌ی کاتدی

$\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده‌شده با لیتیم زیر کونات

مهدی رستمی*، علیرضا ذاکری

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده: با اینکه ماده کاتدی لایه‌ای LiNiCoMnO_2 موسوم به NCM به دلیل دارا بودن ظرفیت نسبتاً بالا و برگشت‌پذیر و همچنین هزینه و سمیت پایین به عنوان ماده کاتدی اصلی برای باتری‌های لیتیم-یون قابل شارژ شناخته شده است، اما چرخه کاری این ماده در سرعت‌های شارژ-دشارژ بالا ناپایدار است و در دماهای بالا نیز عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهد. روش پوشش‌دهی سطحی به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود عملکرد ماده کاتدی NCM شناخته شده است. با توجه به این که خصوصیات ریزساختاری ماده کاتدی تأثیر مستقیمی بر عملکرد الکتروشیمیایی آن دارد، بررسی تغییرات ریزساختاری حاصل از فرآیند پوشش‌دهی از اهمیت خاصی برخوردار است. در تحقیق حاضر ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ با ماده لیتیم زیر کونات (Li_2ZrO_3) در مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی پوشش داده شد. برای این منظور برای اولین بار از پیش‌ماده نسبتاً ارزان زیر کونیم اکسی کلراید ۸ آبه ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) و روش سل-ژل در محیط آبی استفاده شد. سپس از لحاظ ریزساختاری مورد مشخصه‌یابی قرار گرفت. مطابق با نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویی، نمونه با ۱٪ وزنی از ماده پوشش بالاترین میزان یکنواختی ماده پوشش روی ذرات ماده کاتدی را نشان داد. برای نمونه مذکور، بر اساس نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس و استفاده از روش کوهن برای محاسبه ثوابت شبکه، برای نمونه با ۱٪ وزنی ماده پوشش، شاخص نسبت ثوابت شبکه a/b بالاتر از عدد $4/9$ به دست آمد که دلالت بر منظم بودن ساختار ماده کاتدی است. همچنین، اختلاف ثوابت شبکه ماده کاتدی با ۱٪ وزنی ماده پوشش با میانگین ثوابت شبکه گزارش شده برای ماده کاتدی بدون پوشش برای ثوابت a و c به ترتیب 0.015 و 0.0456 آنگستروم به دست آمد و مشخص شد که کمترین تغییر را نسبت به مقادیر ۳٪ و ۵٪ وزنی در ساختار ماده کاتدی ایجاد کرده است. همچنین مطابق با نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری، در نمونه با ۱٪ وزنی ماده پوشش، حضور لایه پوشش به ضخامت حدود ۱۵ تا ۲۰ نانومتر با یک مرز قابل رؤیت بین هسته از جنس ماده کاتدی و پوسته از جنس ماده لیتیم زیر کونات اثبات شد. در مجموع نتایج تحقیق نشان داد که لایه پوشش لیتیم زیر کونات به مقدار ۱٪ وزنی کمترین تغییر در ساختار بلوری ماده کاتدی را ایجاد می‌کند و از این رو، این مقدار ماده پوشش را می‌توان به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفت.

کلمات کلیدی: باتری لیتیم-یون، پوشش‌دهی سطحی، ماده کاتدی لیتیم نیکل کبالت منگنز اکسید، لیتیم زیر کونات

۱- مقدمه

باتری‌های قابل شارژ لیتیم-یون به طور گسترده‌ای به عنوان یک منبع انرژی کارآمد برای تجهیزات الکتریکی قابل حمل استفاده شده‌اند و این روزها کاربردهای بسیار گسترده‌تری در وسایل نقلیه الکتریکی، وسایل نقلیه الکتریکی هیبریدی و سیستم‌های ذخیره انرژی بزرگ مقیاس دارند [۱]. ماده کاتدی LiCoO_2 در حال حاضر به عنوان ماده کاتدی اصلی در باتری‌های لیتیم-یون تجاری به دلیل عملکرد چرخه کاری عالی و همچنین پایین بودن کاهش ظرفیت برگشت‌پذیر، در طی انجام چرخه کاری باتری استفاده شده است. با این وجود، این ماده کاتدی از سمیت، هزینه‌های تولید بالا و همچنین ناپایداری در ولتاژهای بالا (بیش از $4/3$ ولت) رنج می‌برد که این محدودیت‌ها به عنوان محرکی برای مطالعه روی دیگر مواد کاتدی برای باتری‌های لیتیم-یون در نظر گرفته شده است [۲]. ماده کاتدی غنی از نیکل با ترکیب $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ ($0 < x+y < 0.5$) موسوم به NCM به دلیل ظرفیت بالاتر آن، هزینه کمتر و ولتاژ کاری بالاتر در مقایسه با ماده کاتدی LiCoO_2 به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد کاتدی برای نسل جدید باتری‌های لیتیم-یون انتخاب شده است [۳]. اگرچه با استفاده از این ماده کاتدی ظرفیت دشارژ بیش از ۲۰۰ میلی‌آمپر ساعت بر گرم به دست آمده است،

اما به دلیل حضور یون‌های فعال و ناپایدار Ni^{4+} در حالتی که مقدار زیادی لیتیم از ساختار خارج شده است، این ماده با مشکل افت توانایی چرخه کاری رو به رو است [۴]. به منظور به دست آوردن ظرفیت‌های بالا از ماده کاتدی NCM انجام عملیات در ولتاژ قطع بالا (بیش از ۴/۳ ولت) روشی به طور معمول پذیرفته شده است، اما ولتاژ قطع بالا معمولاً به دلیل پایداری ضعیف فصل مشترک بین الکتروود و الکترولیت، منجر به عملکرد چرخه کاری ناپایدار می‌شود [۵]. به طور کلی دو عیب برای ماده کاتدی NCM وجود دارد که کاربرد آن را در باتری‌های لیتیم-یون توان بالا محدود کرده است. یکی از آنها واکنش جانبی در فصل مشترک بین الکتروود NCM و الکترولیت است که باعث از بین رفتن ظرفیت و عملکرد ضعیف در سرعت شارژ و دشارژ بالا می‌شود. دیگری عملکرد ضعیف آن هنگامی است که در دمای بالا تحت عملیات شارژ و دشارژ قرار می‌گیرد. این پدیده به آسیب تشدید شده در سطح ماده کاتدی نسبت داده شده است که منجر به واکنش‌های جانبی شدید در طی فرآیند شارژ و دشارژ در دمای بالا شده است [۶].

به منظور غلبه بر موانع طبیعی ذکر شده در بالا، بهبوددهی سطحی به عنوان یک روش سریع و موثر برای بهبود عملکرد الکتروشیمیایی ماده کاتدی NCM معرفی شده است. برای مواد کاتدی با ساختارهای بلوری مختلف، سازوکارهای بسیار متفاوتی برای بهبود عملکرد الکتروشیمیایی وجود دارد و لذا انجام مطالعات موردی ضروری است. برای مثال، برای مواد کاتدی لایه‌ای از قبیل $LiCoO_2$ و $LiNi_{0.5}Co_{0.2}Mn_{0.3}O_2$ ، لایه پوشش می‌تواند واکنش نامطلوب بین ماده کاتدی و الکترولیت را کاهش دهد و از اعوجاج شبکه از طریق حل شدن یون‌های فلزی انتقالی در داخل الکترولیت در طی فرآیند شارژ ممانعت کند [۷]. به طور کلی حضور پوشش می‌تواند توده ماده را از الکترولیت جدا و در نتیجه سطح ماده کاتدی را از حمله الکترولیت در طی فرآیند شارژ و دشارژ مصون نگه دارد [۸]. پوشش‌دهی ماده کاتدی همچنین تجزیه الکترولیت را کاهش می‌دهد و پایداری مواد الکتروودی را در طی فرآیندهای شارژ و دشارژ در دماهای نسبتاً بالا بهبود می‌بخشد. گزارش شده است که پوشش‌دهی مقدار اندکی از اکسیدهای فلزی خنثی از قبیل ZrO_2 ، TiO_2 ، ZnO ، Al_2O_3 و غیره بر روی سطح ماده کاتدی می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد چرخه کاری را از طریق جلوگیری از واکنش‌های ناخواسته در طی فرآیندهای شارژ/دشارژ بهبود ببخشد [۹].

اکسیدهای فلزات انتقالی به عنوان مواد پوشش‌دهی به طور موثری از سایش مواد کاتدی توسط الکترولیت جلوگیری می‌کنند، اما اغلب هادی‌های یونی و الکترونیکی ضعیفی هستند که به کاهش ظرفیت برگشت ناپذیر و عملکرد ضعیف در سرعت‌های شارژ/دشارژ بالا منجر می‌شوند. اخیراً تعدادی از اکسیدهای حاوی لیتیم از قبیل $LiAlO_2$ و $Li_{3-x}La_{2/3-x}TiO_3$ که هدایت خوبی دارند، عملکرد الکتروشیمیایی بهتری را نشان داده‌اند. این اکسیدهای حاوی لیتیم همچنین به عنوان تونلی برای انتقال یون لیتیم (Li^+) در طی فرآیندهای شارژ/دشارژ عمل می‌کنند. لیتیم زیرکونات (Li_2ZrO_3) به عنوان یک نمونه الکترولیت حالت جامد هدایت یونی بالایی دارد، زیرا یون‌های لیتیم در میان لایه‌های ZrO_3^{2-} قرار می‌گیرد و یک تونل سه بعدی برای نفوذ یون لیتیم (Li^+) فراهم می‌آورد. علاوه بر این، پایداری ساختاری ذاتی ماده پوشش لیتیم زیرکونات در الکترولیت آلی قادر به خنثی کردن و از بین بردن آنیون‌های فلوریدی است که از تجزیه الکترولیت نشأت گرفته‌اند [۱۰].

در اکثر مطالعات تحقیقاتی انجام شده به منظور بهبود عملکرد مواد کاتدی NCM به کمک پوشش‌دهی با لیتیم زیرکونات با روش‌های شیمیایی‌تر، از اتانول به عنوان حلال و از نمک نیتراتی به عنوان پیش‌ماده زیرکونیم برای سنتز ماده پوشش استفاده شده است. در مطالعه تحقیقاتی حاضر این حلال با آب جایگزین شده و فرآیند پوشش‌دهی به روش سل-ژل و در محیط آبی انجام گرفته است. همچنین از یک ماده اولیه ارزان‌تر و قابل انحلال در آب یعنی زیرکونیم اکسی کلراید ۸ آبه ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) استفاده شده است. هدف مقاله حاضر بررسی تأثیرات ریزساختاری پوشش لیتیم زیرکونات بر ماده کاتدی تجاری و تعیین مقدار بهینه ماده پوشش است.

۲- فعالیت‌های تجربی

در مطالعه تحقیقاتی حاضر به منظور سنتز ماده پوشش لیتیم زیرکونات از ماده اولیه لیتیم استات ۲ آبه ($CH_3COOLi \cdot 2H_2O$, Sisco Research Laboratories, India, min 99%) و زیرکونیم اکسی کلراید ۸ آبه ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, Sisco Research Laboratories, India, min 99.5%) و همچنین نمونه ماده کاتدی تجاری NCM523 استفاده

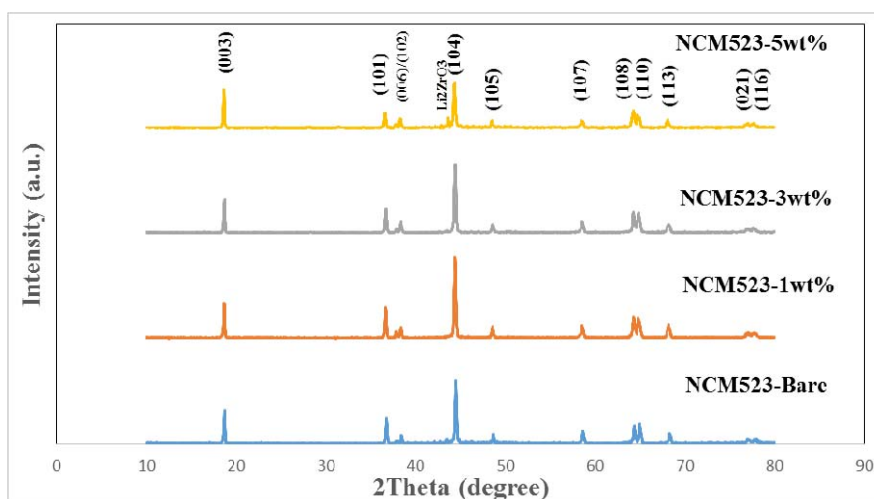
شد. همچنین برای بررسی ساختار بلوری نمونه‌های مورد آزمایش، از دستگاه آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس DRON-8 ساخت کشور روسیه (با استفاده از اشعه $\text{Cu-K}\alpha$ ، طول موج $1/54$ آنگستروم) مجهز به تک‌فام‌ساز گرافیتی و برای بررسی ریخت‌شناسی ذرات نمونه‌های مورد آزمایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA-TESCAN با ولتاژ 5 کیلوولت و نیز میکروسکوپ الکترونی عبوری Philips EM 208S با ولتاژ شتاب‌دهنده 100 کیلوولت استفاده شد.

برای پوشش‌دهی ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ با لیتیم زیرکونات، ابتدا با توجه به فرمول شیمیایی ماده پوشش یعنی Li_2ZrO_3 و همچنین با توجه به این که ماده پوشش از 2 مول لیتیم و 1 مول زیرکونیم تشکیل شده است، مقادیر استوکیومتری از پیش‌ماده لیتیم استات 2 آبه و پیش‌ماده زیرکونیم اکسی کلراید 8 آبه به ترتیب در 100 و 50 میلی‌لیتر آب مقطر در دمای اتاق حل شدند. سپس ماده کاتدی به مدت زمان 1 ساعت در محلول حاوی لیتیم استات در حمام فراصوت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. سپس محلول حاوی ماده کاتدی بر روی هم‌زن مغناطیسی قرار داده شد و محلول حاوی زیرکونیم اکسی کلراید به صورت قطره‌ای به محلول حاوی ماده کاتدی و لیتیم استات اضافه شد. پس از اتمام این عمل، محلول حاصل به مدت زمان 3 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس دما افزایش داده شد. پس از تبخیر کامل حلال، ژل به دست آمده در دمای 110 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 2 ساعت برای خشک شدن کامل در آون قرار داده شد و سپس پودر به دست آمده با آب مقطر شست‌وشو داده شد. پس از شست و شوی کامل، مجدد پودر حاصل در آون به مدت زمان 2 ساعت قرار داده شد و در نهایت به مدت زمان 5 ساعت در دمای 650 درجه سانتی‌گراد تحت فرآیند کلسیناسیون قرار گرفت. نمونه کلسینه شده پس از اینکه در کوره سرد شد، به منظور جلوگیری از جذب رطوبت در دسیکاتور قرار داده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی فازی

در شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده نشده و پوشش داده شده با مقادیر 1 ، 3 و 5 درصد وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات برای مقایسه نشان داده شده است.



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش، و پوشش داده شده با 1 ، 3 و 5 درصد وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات.

پیک‌های مربوط به این نمونه‌ها به شکل منظمی بر پایه ساختار هگزگونال $\alpha\text{-NaFeO}_2$ با گروه فضایی $R\text{-}3m$ قرار گرفته‌اند. حضور پیک‌های دوتایی جدا از هم مربوط به صفحات $(102)/(104)$ و $(108)/(110)$ در حدود زوایای 38 درجه و 65 درجه نشان دهنده یک ساختار لایه‌ای کاملاً بلورین است [۱۱]. پیک‌های مربوط به ماده پوشش لیتیم زیرکونات در الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های با 1 و 3 درصد وزنی شناسایی نشده‌اند و این احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که مقدار ماده پوشش لیتیم

زیرکونات کمتر از حد تشخیص دستگاه بوده است [۱۲]. در الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه ماده کاتدی با ۵ درصد وزنی از ماده پوشش، پیک واقع در زاویه $43/6^\circ$ درجه مربوط به ماده لیتیم زیرکونات است [۱۳]. وجود این پیک دلالت بر این دارد که ماده حاوی زیرکونیم به صورت لیتیم زیرکونات روی سطح ماده کاتدی است. فرض بر این است که ماده کاتدی در جریان فرآیند پوشش دهی به صورت خنثی عمل می کند و با ماده پوشش لیتیم زیرکونات وارد واکنش نمی شود و تنها به عنوان سطح انجام واکنش عمل می کند، در نتیجه به دلیل دارا بودن اندازه ذرات با مقیاس میکرومتری، می تواند سرعت فرآیند پوشش دهی را افزایش دهد.

۳-۲- محاسبه ثوابت شبکه

به منظور بررسی کمی نتایج حاصل از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس و به طور خاص، محاسبه ثوابت شبکه نمونه های مورد آزمایش از روش کوهن استفاده شده است. روش کوهن^۱ به منظور تعیین ثوابت شبکه مواد با ساختار غیرمکعبی که بیش از یک ثابت شبکه دارند بسیار مفید است. اگرچه معادلات مورد استفاده برای تعیین ثوابت شبکه در مواد با ساختارهای غیر مکعبی پیچیده تر از معادلات مورد استفاده برای تعیین ثابت شبکه در مواد با ساختار مکعبی است، اما روش کوهن مسیر مستقیمی را برای تعیین ثوابت شبکه در این ساختارها فراهم می کند [۱۴]. لازم به ذکر است که به منظور تعیین موقعیت پیک در الگوی پراش اشعه ایکس برای نمونه های مورد آزمایش از شدت بیشینه (I_{max}) استفاده شده است. معادلات مورد استفاده جهت محاسبه ثوابت شبکه با استفاده از روش کوهن به شرح زیر می باشند:

$$\sum \alpha \sin^2 \theta = C \sum \alpha^2 + B \sum \alpha \gamma + A \sum \alpha \delta \quad \text{معادله ۳-۱- [۱۴]}$$

$$\sum \gamma \sin^2 \theta = C \sum \alpha \gamma + B \sum \gamma^2 + A \sum \gamma \delta \quad \text{معادله ۳-۲- [۱۴]}$$

$$\sum \delta \sin^2 \theta = C \sum \alpha \delta + B \sum \delta \gamma + A \sum \delta^2 \quad \text{معادله ۳-۳- [۱۴]}$$

متغیرهای موجود در معادلات بالا دارای مقادیر زیر می باشند:

$$C = \frac{\lambda^2}{3a_0^2} \quad \alpha = (h^2 + hk + k^2) \quad B = \frac{\lambda^2}{4c_0^2} \quad \gamma = l^2 \quad A = \frac{D}{10} \quad \delta = 10 \sin^2 \theta$$

در معادلات نوشته شده به منظور محاسبه ثوابت شبکه در مواد با ساختار هگزاگونال منظور از k ، h و l اندیس میلر صفحات کریستالی، منظور از λ طول موج اشعه ایکس، منظور از D مقدار تغییر مکان نمونه مورد آنالیز و منظور از a_0 و c_0 ثوابت شبکه یک ماده با ساختار هگزاگونال می باشد [۱۴].

در جدول ۱ ثوابت شبکه مربوط به نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش و پوشش داده شده با مقادیر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات محاسبه شده به روش کوهن و همچنین نسبت c/a ارائه شده است. نسبت c/a شاخصی شناخته شده برای ساختار لایه ای منظم است. چنانچه این نسبت بالاتر از $4/9$ باشد، نشان دهنده این است که ساختار اکسیدهای لایه ای به شکل خوبی نظم یافته اند [۱۵]. همچنین بالا بودن این نسبت تلویحاً نشان دهنده اختلاط کاتیونی^۲ کم در ساختار لایه ای است. اختلاط کاتیونی اشاره به وضعیتی است که برخی از فلزات انتقالی (به ویژه Ni^{2+}) موقعیت $3b$ لیتیم را اشغال کرده باشند. حضور یون های Ni^{2+} در لایه Li نه تنها ظرفیت دشارژ را کاهش می دهد، بلکه مانع نفوذ یونی Li^+ می شود. چنین اختلالات ساختاری عامل اصلی برای عملکرد ضعیف الکتروشیمیایی است. هر چه نسبت c/a به عدد $4/96$ نزدیک باشد، میزان اختلاط کاتیونی کمتر است [۱۱] و این یعنی غلظت یون های Ni^{2+} در موقعیت های بین لایه ای $3b$ لیتیم بسیار پایین است و به

¹ Cohen method

² Cation mixing

توزیع یکنواخت کاتیون‌ها در میان ساختار دلالت دارد. بنابراین، با در نظر گرفتن مقادیر c/a در جدول ۱ برای نمونه‌های پوشش داده شده، معلوم می‌شود که پوشش‌دهی Li_2ZrO_3 بر روی ماده کاتدی به منظم‌تر شدن ساختار لایه‌ای کمک کرده است.

جدول ۱- مقادیر ثوابت شبکه مربوط به نمونه ماده کاتدی بدون پوشش و پوشش داده شده با مقادیر مختلف لیتیم زیرکونات در پژوهش حاضر

ماده کاتدی	a_0 (Å)	c_0 (Å)	c_0/a_0
بدون پوشش	۲/۸۷۶۱	۱۴/۲۷۴۵	۴/۹۶۳۱
با ۱ درصد وزنی ماده پوشش	۲/۸۶۳۲	۱۴/۱۹۰۰	۴/۹۵۶۰
با ۳ درصد وزنی ماده پوشش	۲/۸۹۰۱	۱۴/۳۵۶۵	۴/۹۶۷۵
با ۵ درصد وزنی ماده پوشش	۲/۸۵۳۴	۱۴/۱۴۴۰	۴/۹۵۶۹

به منظور مقایسه، مقادیر گزارش شده ثوابت شبکه برای ماده کاتدی $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش در پژوهش‌های پیشین [۱۶-۲۰] به همراه میانگین و انحراف معیار این مقادیر در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ اختلاف مقادیر ثوابت شبکه محاسبه شده با استفاده از روش کوهن برای نمونه ماده کاتدی بدون پوشش و پوشش داده شده با لیتیم زیرکونات مربوط به پژوهش حاضر، با مقادیر میانگین حاصل از پژوهش‌های پیشین ارائه شده است. چنانچه مقدار اختلاف محاسبه شده برای نمونه‌های پوشش داده شده از مقدار اختلاف به دست آمده برای نمونه ماده کاتدی بدون پوشش کمتر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که ثوابت شبکه نمونه مورد نظر در اثر پوشش‌دهی تغییری نکرده و در نتیجه ساختار ماده کاتدی دچار بی‌نظمی نشده است. با توجه به داده‌های موجود در جدول ۳، مقدار اختلاف در ثابت شبکه a برای نمونه با ۱٪ وزنی ماده پوشش از مقدار اختلاف محاسبه شده برای نمونه ماده کاتدی تجاری بدون پوشش کمتر است. همچنین مقدار اختلاف ثابت شبکه c برای این نمونه کوچک‌تر از نمونه‌های پوشش داده شده با ۳ و ۵ درصد وزنی است. این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که ساختار نمونه ماده کاتدی با حضور ۱٪ وزنی ماده پوشش دچار کمترین تغییر شده است. این در حالی است که برای نمونه‌های با ۳ و ۵ درصد وزنی ماده پوشش، اختلاف مقادیر ثوابت شبکه آن‌ها بیشتر از اختلاف محاسبه شده برای نمونه ماده کاتدی تجاری بدون پوشش است. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که ساختار این دو نمونه در اثر پوشش‌دهی دچار تغییر زیادی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل، نمونه ماده کاتدی با ۱٪ وزنی ماده پوشش به عنوان نمونه بهینه در بین نمونه‌های مورد بررسی انتخاب می‌شود.

جدول ۲- مقادیر ثوابت شبکه مربوط به ماده کاتدی بدون پوشش در پژوهش‌های پیشین

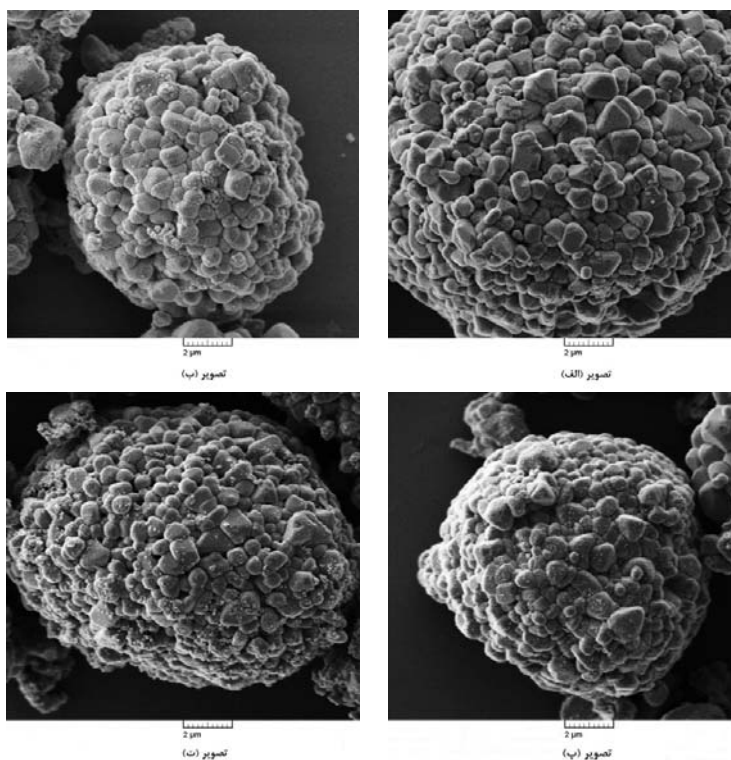
مرجع	a_0 (Å)	c_0 (Å)
He et al. [16]	۲/۸۶۸۷	۱۴/۲۶۰۰
Cao et al. [17]	۲/۸۶۹۸	۱۴/۲۳۹۱
Shi et al. [18]	۲/۸۶۸۹	۱۴/۲۴۰۶
Tao et al. [19]	۲/۸۴۹۷	۱۴/۲۰۷۹
Jia et al. [20]	۲/۸۶۶۴	۱۴/۲۳۰۶
میانگین	۲/۸۶۴۷	۱۴/۲۳۵۶
انحراف معیار	۰/۰۰۸۵	۰/۰۱۸۹

جدول ۳- اختلاف مقادیر ثوابت شبکه مربوط به نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده در پژوهش حاضر با میانگین مقادیر ثوابت شبکه ماده کاتدی بدون پوشش مستخرج از پژوهش‌های پیشین

ماده کاتدی	Δa_0 (Å)	Δc_0 (Å)
بدون پوشش	۰/۰۱۱۴	۰/۰۳۸۹
با ۱٪ وزنی پوشش	۰/۰۰۱۵	۰/۰۴۵۶
با ۳٪ وزنی پوشش	۰/۰۲۵۴	۰/۱۲۰۹
با ۵٪ وزنی پوشش	۰/۰۱۱۳	۰/۰۹۱۶

۳-۳- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور بررسی ریخت‌شناسی ذرات مربوط به نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش و پوشش داده شده با لیتیم زیرکونات، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر مربوط به نمونه ماده کاتدی بدون پوشش و پوشش داده شده با ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ریخت‌شناسی سطح نمونه ماده کاتدی بدون پوشش با نمونه‌های پوشش داده شده کاملاً متفاوت است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به (الف) ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش، (ب) ماده کاتدی با ۱٪ وزنی ماده پوشش، (پ) ماده کاتدی با ۳٪ وزنی ماده پوشش، (ت) ماده کاتدی با ۵٪ وزنی ماده پوشش.

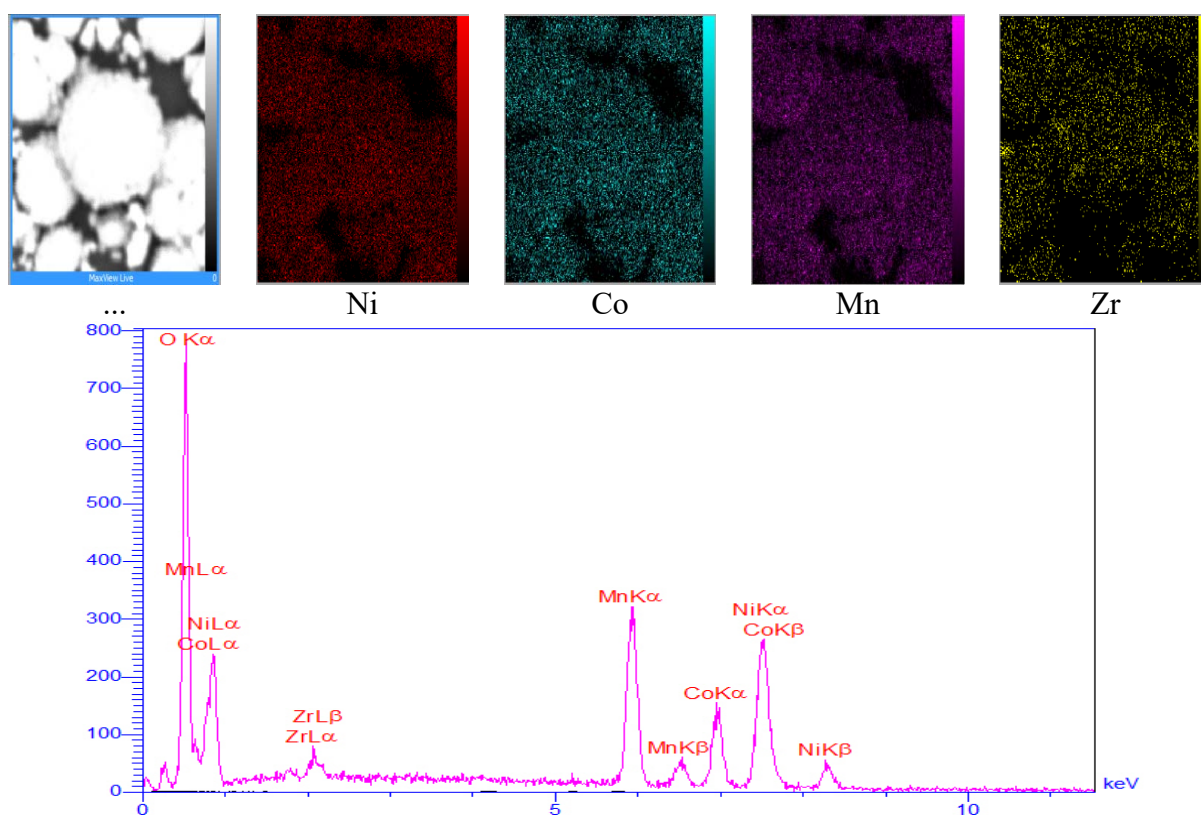
مطابق با شکل ۲-الف، ذرات ماده کاتدی بدون پوشش از ذرات اولیه چند سطحی تشکیل شده‌اند و این ذرات دارای سطوح صاف و بدون هیچ‌گونه ناخالصی بر روی سطح هستند. همچنین این ذرات اولیه هر کدام از تعداد زیادی ذرات ثانویه با اندازه‌ای در مقیاس کمتر از میکرومتر تشکیل شده‌اند و مرزهای مجزایی بین آنها به راحتی قابل مشاهده است. مطابق شکل ۲-ب، بر روی سطح ذره نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات، ذرات ماده پوشش تقریباً به صورت یکنواختی بر روی سطح ذره ماده کاتدی قرار گرفته‌اند و در مناطق محدودی تراکم ماده پوشش مشاهده می‌شود. البته میزان زبری در سطح ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش نسبت به ماده کاتدی بدون پوشش به میزان بیشتری مشاهده می‌شود که این میزان زبری افزوده به حضور ماده پوشش لیتیم زیرکونات نسبت داده می‌شود. همچنین در نمونه ماده کاتدی تجاری پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش شکاف‌های بین ذرات ثانویه در هر ذره اصلی به شکل واضحی قابل مشاهده هستند. در شکل ۲-پ، ذره مربوط به نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۳٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات نشان داده شده است. مطابق با شکل ۲-پ، با توجه به افزایش درصد وزنی ماده پوشش و همچنین ضخیم‌تر شدن لایه پوشش لیتیم زیرکونات میزان زبری سطح نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۳٪ وزنی ماده پوشش نسبت به نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی ماده پوشش بیشتر است و همچنین شکاف‌های بین ذرات ثانویه در نمونه پوشش داده شده با ۳٪ وزنی ماده پوشش نسبت به نمونه پوشش داده شده با ۱٪ وزنی ماده پوشش به میزان بیشتری توسط ماده پوشش پر شده است.

در شکل ۲-ت، ذره مربوط به نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۵٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات نشان داده شده است. مطابق شکل، با توجه به افزایش درصد وزنی ماده پوشش و همچنین ضخیم‌تر شدن لایه پوشش لیتیم زیرکونات، میزان زبری سطح نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۵ درصد وزنی ماده پوشش نسبت به نمونه‌های پوشش داده شده با ۱ و ۳ درصد وزنی ماده پوشش بیشتر است.

همچنین شکاف‌های بین ذرات ثانویه در نمونه پوشش داده شده با ۵٪ وزنی ماده پوشش نسبت به نمونه‌های پوشش داده شده با ۳٪ وزنی ماده پوشش و ۱٪ وزنی ماده پوشش به میزان بیشتری توسط ماده پوشش پر شده است. با توجه به این که وجود مقدار اضافی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات به علت عدم نفوذ الکترولیت به داخل فضاها بین ذره‌ای اصلی، مانع نفوذ یون لیتیم از درون ذرات ثانویه خواهد شد [۲۱]، انتظار می‌رود که در بین نمونه‌های مورد آزمایش نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از لیتیم زیرکونات عملکرد الکتروشیمیایی بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان دهد.

۳-۴- آنالیز عنصری پوشش

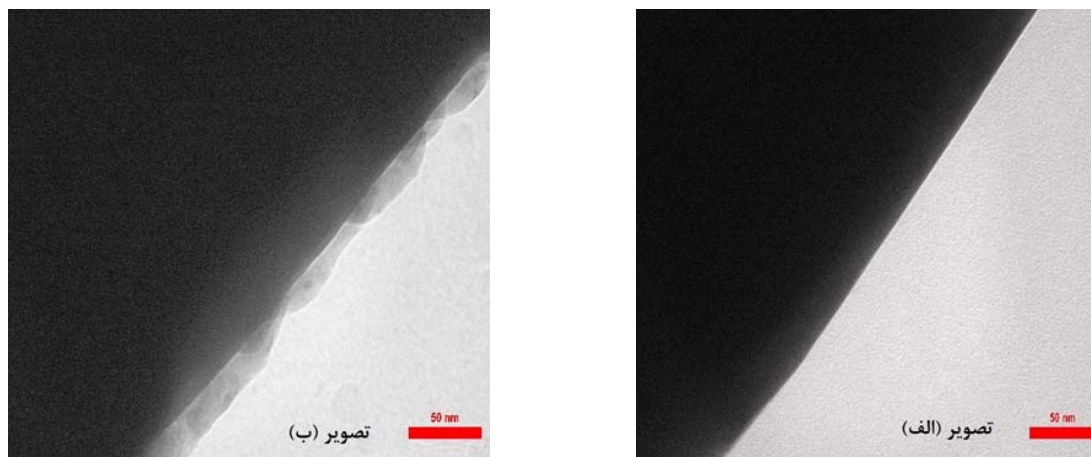
به منظور بررسی یکنواختی توزیع عناصر در نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده با ۱٪ وزنی لیتیم زیرکونات، آنالیز طیف‌سنجی اشعه ایکس انرژی متفرق بر روی این نمونه انجام گرفت. مطابق با شکل ۳، اتم‌های نیکل، کبالت، منگنز و زیرکونیم به صورت یکنواخت روی سطح ماده کاتدی توزیع شده‌اند. همچنین عنصر زیرکونیم به شکل واضحی در نقشه مربوط به نمونه با ۱٪ وزنی ماده پوشش قابل مشاهده است و این موضوع نشان می‌دهد که لایه پوشش لیتیم زیرکونات به شکل یکنواختی بر روی سطح ماده کاتدی قرار گرفته است. این توزیع یکنواخت به عنوان یک لایه محافظ عمل می‌کند، و نقش مهمی را در ارتقای عملکرد چرخه کاری و همچنین عملکرد باتری در سرعت‌های شارژ/دشارژ مختلف برای ماده کاتدی بازی خواهد کرد [۲۲].



شکل ۳- نتایج مربوط به نقشه عنصری حاصل از آنالیز طیف‌سنجی اشعه ایکس انرژی متفرق مربوط به عناصر نیکل، کبالت، منگنز و زیرکونیم برای نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده با ۱ درصد وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات.

۳-۵- بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری

برای بررسی دقیق تر ریخت‌شناسی نمونه پوشش داده شده، در شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری مربوط به ماده کاتدی $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش و پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات نشان داده شده است. ذرات ماده کاتدی بدون پوشش (شکل ۴-الف) لبه‌ای صاف و بدون حضور هیچ گونه ناهمگنی بر روی سطح دارند. لایه پوشش ایجاد شده بر روی سطح ذره ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از لیتیم زیرکونات (شکل ۴-ب) به صورت پیوسته و نسبتاً یکنواخت به ضخامت تقریبی ۱۵ تا ۲۰ نانومتر به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (الف) نمونه ماده کاتدی بدون پوشش، و (ب) نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی ماده پوشش.

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر بررسی ساختاری ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ در اثر پوشش‌دهی با ماده پوشش لیتیم زیرکونات مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله اول نمونه‌های ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ با حضور ۱٪، ۳٪ و ۵٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات با استفاده از روش سل-ژل و در محیط آبی آماده‌سازی شدند و سپس به منظور بررسی ساختاری تحت آنالیز قرار داده شدند. بررسی‌های ساختاری با استفاده از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری انجام شد.

۱- در بررسی کیفی نتایج به دست آمده از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های ماده کاتدی بدون پوشش و پوشش داده شده، پیک‌های مربوط به نمونه‌های مورد آزمایش به شکل منظمی بر پایه ساختار هگزاگونال $\alpha\text{-NaFeO}_2$ با گروه فضایی R-3m قرار گرفته بودند. همچنین حضور پیک‌های جدا از هم و مربوط به صفحات (۰۰۶)/(۱۰۲) و (۱۰۸)/(۱۱۰) نشان‌دهنده یک ساختار لایه‌ای منظم بوده است.

۲- در بررسی کمی نتایج به دست آمده از آنالیز الگوی پراش اشعه ایکس این نتیجه به دست آمد که در اثر انجام فرآیند پوشش‌دهی ماده پوشش به جای ایجاد یک فصل مشترک بر روی ماده کاتدی، به داخل ماده نفوذ کرده است و ساختار ماده کاتدی را دچار تغییر نموده است اما این تغییر برای مقدار ۱٪ وزنی از ماده پوشش در مقایسه با سایر نمونه‌ها کمتر بوده است.

۳- در بررسی ریخت‌شناسی ذرات نمونه‌های مورد آزمایش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ذرات ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش به صورت ذرات اولیه چند سطحی و با سطوح صاف و بدون حضور هیچ‌گونه ناخالصی بر روی سطح نشان داده شدند. همچنین بر روی سطح ذره نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات، ذرات ماده پوشش تقریباً به

صورت یکنواختی بر روی سطح ذره ماده کاتدی قرار گرفته بودند و در مناطق محدودی تراکم ماده پوشش مشاهده شد. همچنین در نمونه ماده کاتدی تجاری پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش شکاف های بین ذرات ثانویه در هر ذره اصلی به شکل واضحی قابل مشاهده بود. در نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۳٪ وزنی و ۵٪ وزنی ماده پوشش، میزان زبری سطح نمونه نسبت به نمونه ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی ماده پوشش بیشتر شد و همچنین شکاف های بین ذرات ثانویه در نمونه های پوشش داده شده با ۳٪ وزنی و ۵٪ وزنی ماده پوشش به میزان بیشتری توسط ماده پوشش اشغال شد.

۴- در بررسی دقیق ریخت شناسی ذرات ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ بدون پوشش و پوشش داده شده با ۱٪ وزنی ماده پوشش با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری، لایه پوشش ایجاد شده بر روی سطح ذره ماده کاتدی پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات به صورت همگن و با ضخامتی در حدود ۱۵ تا ۲۰ نانومتر و همچنین به وضوح قابل مشاهده بود.

۵- در بررسی نتایج حاصل از آنالیز طیف سنجی اشعه ایکس انرژی متفرق به منظور بررسی یکنواختی توزیع عناصر در نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات (Li_2ZrO_3) نشان داده شد که اتم های نیکل، کبالت، منگنز بعلاوه زیرکونیم به طور همگنی روی سطح نمونه ماده کاتدی تجاری $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ پوشش داده شده با ۱٪ وزنی از ماده پوشش لیتیم زیرکونات توزیع شده اند. در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده برای ماده کاتدی، مقدار ۱٪ وزنی ماده پوشش به دلیل تغییرات ساختاری اندک در حین فرآیند پوشش دهی و توزیع یکنواخت بر روی ماده کاتدی می تواند به عنوان مقدار بهینه انتخاب شود.

مراجع

- [1] Florian Strauss, Jun Hao Teo, Julia Maibach, A-Young Kim, Andrey Mazilkin, Jürgen Janek and Torsten Brezesinski, Li_2ZrO_3 -Coated NCM622 for Application in Inorganic Solid-State Batteries: Role of Surface Carbonates in the Cycling Performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12, 51, 57146 - 57154
- [2] Chao Chen, Tao Tao, Wen Qi, Hong Zeng, Ying Wu, Bo Liang, Yingbang Yao, Shengguo Lu and Ying Chen, High-performance lithium ion batteries using SiO_2 -coated $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ microspheres as cathodes. 2017. 709: p. 708-716.
- [3] Yongcong Huang, Qian Liu, Lan Chen, Jianming Tao, Guiying Zhao, Yue Chen, Jiabin Li, Yingbin Lin and Zhigao Huang, Pathways toward Improved Performance of NCM523 Pouch Cell via Incorporating Low-Cost Al_2O_3 and Graphene. *ACS Applied Energy Materials*, 2020. 3(11): p. 10920-10930.
- [4] Sven Klein, Peer Bärman, Thomas Beuse, Kristina Borzutzki, Joop Enno Frerichs, Johannes Kasnatscheew, Martin Winter, and Tobias Placke, Exploiting the Degradation Mechanism of NCM523|| Graphite Lithium-Ion Full Cells Operated at High Voltage. *ChemSusChem*, 2021. 14(2): p. 595-613.
- [5] Renheng Wang, Xiangyu Dai, Zhengfang Qian, Yiling Sun, Shuting Fan, Keyu Xiong, Han Zhang and Feixiang Wu, In situ surface protection for enhancing stability and performance of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ at 4.8 V: the working mechanisms. *ACS Materials Letters*, 2020. 2(4): p. 280-290.
- [6] Youming Zhang, Zilin Wang, Yunhui Zhong, Hao Wu, Shouding Li, Qi Cheng, Pingmei Guo, Coating for improving electrochemical performance of NCM523 cathode for lithium-ion batteries. *Ionics*, 2021. 27(1): p. 13-20.
- [7] Daxian Zuo, Guanglei Tian, Xiang Li, Da Chen and Kangying Shu, Recent progress in surface coating of cathode materials for lithium ion secondary batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017. 706: p. 24-40
- [8] Ding Wang, Xinhai Li, Wanlin Wang, Zhixing Wang, Huajun Guo and Juanjian Ru, Improvement of high voltage electrochemical performance of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode materials via Li_2ZrO_3 coating. *Ceramics International*, 2015. 41(5): p. 6663-6667.
- [9] Huixian Xie, Ziyang Liang, Dong Luo, Yaping Zhang, Xiaokai Ding, Jiayang Cui, Zuhao Zhang and Zhan Lin, A general route of fluoride coating on the cyclability regularity of high-voltage NCM cathodes. *Chemical Communications*, 2020. 56(80): p. 12009-12012.
- [10] Yue Xu, Yang Liu, Zhongpei Lu, Haiying Wang, Deqin Sun and Gang Yang, The preparation and role of

- Li_2ZrO_3 surface coating $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ as cathode for lithium-ion batteries. Applied Surface Science, 2016. 361: p. 150-156.
- [11] Yong Liu, Shiliang Shi, Geoff G.X.Wang, Yi Lu and Wangxin Gu, Improved electrochemical properties and thermal stability of $\text{Li}_{1.20}\text{Mn}_{0.54}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$ cathode material by Li_2ZrO_3 coating for Lithium-ion batteries. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2019. 30(20): p. 18471-18483.
- [12] Yue Xu, Yang Liu, Zhongpei Lu, Haiying Wang, Deqin Sun and Gang Yang, The preparation and role of Li_2ZrO_3 surface coating $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ as cathode for lithium-ion batteries. Applied Surface Science, 2016. 361: p. 150-156.
- [13] Young-Jin Kim, Rajesh Rajagopal, Sung Kang and Kwang-Sun Ryu, Novel dry deposition of LiNbO_3 or Li_2ZrO_3 on $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ for high performance all-solid-state lithium batteries. Chemical Engineering Journal, 2020. 386: p. 123975.
- [14] B.D Cullity and S.R. Stock, Elements of X-ray Diffraction. 2014: Pearson Education.
- [15] Jiwen Li, Yong Liu, Wenli Yao, Xianfa Rao, Shengwen Zhong and Liwu Qian, Li_2TiO_3 and Li_2ZrO_3 co-modification $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode material with improved high-voltage cycling performance for lithium-ion batteries. Solid State Ionics, 2020. 349: p. 115292.
- [16] Yulin He, Ying Li, Chaoxiang Xu, Mingyuan Zhu and Wenxian Li, Improvement in the cycling stability and rate capability of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode material via the use of a Ta_2O_5 coating. Ceramics International, 2020. 46(10): p. 14931-14939.
- [17] Guolin Cao, Zhuomin Jin, Jie Zhu, Yunjiao Li, Bin Xu, Yike Xiong and Jiachao Yang, A green Al_2O_3 metal oxide coating method for $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode material to improve the high voltage performance. Journal of Alloys and Compounds, 2020. 832: p. 153788.
- [18] Yang Shi, Minghao Zhang, Ying Shirley Meng and Zheng Chen, Ambient-pressure relithiation of degraded $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ ($0 < x < 1$) via eutectic solutions for direct regeneration of lithium-ion battery cathodes. Advanced Energy Materials, 2019. 9(20): p. 1900454.
- [19] Tao Tao, Chao Chen, Wen Qi, Bo Liang, Yingbang Yao and Sheng-Guo Lu, Antimony doped tin oxide-coated $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode materials with enhanced electrochemical performance for lithium-ion batteries. Journal of Alloys and Compounds, 2018. 765: p. 601-607.
- [20] Xiaobo Jia, Mo Yan, Ziyong Zhou, Xianglei Chen, Chao Yao, De Li, Daming Chen and Yong Chen, Nd-doped $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ as a cathode material for better rate capability in high voltage cycling of Li-ion batteries. Electrochimica Acta, 2017. 254: p. 50-58.
- [21] Ding Wang, Xinhai Li, Zhixing Wang, Huajun Guo, Zhenjun Huang, Lingkun Kong and Juanjian Ru, Improved high voltage electrochemical performance of Li_2ZrO_3 -coated $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode material. Journal of Alloys and Compounds, 2015. 647: p. 612-619.
- [22] Zhaoxin Guo, Tengfei Ma, Ting Ting Xu, Yan Chen, Gang Yang and Yuhong Li, Amorphous Li_2ZrO_3 nanoparticles coating $\text{Li}[\text{Li}_{0.17}\text{Mn}_{0.58}\text{Ni}_{0.25}] \text{O}_2$ cathode material for enhanced rate and cyclic performance in lithium ion storage. Materials Chemistry and Physics, 2020. 255: p. 123593.

بررسی اثر غلظت نانو ذرات اکسید آهن بر شاخص‌های رشد گیاه آبرزی علف مویی

سنا ربانی فرد^۱، فاطمه موسی‌خانی^۱، رضا احمدی^{*۱}

^۱ گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی،
دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده: در پژوهش حاضر اثر استفاده از نانوذرات مگنتیت بر رشد طول و افزایش وزن گیاه آبرزی علف مویی بررسی شده است. در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن به روش هم‌سوی تولید شدند و برای بررسی مشخصاتشان از آنالیزهای XRD و SEM استفاده شد. برای تولید نانوذرات مگنتیت از کلرید آهن دو ظرفیتی $FeCl_2$ و کلرید آهن سه ظرفیتی $FeCl_3$ به عنوان منبع آهن و محلول سود سوزآور NaOH به عنوان عامل احیایی استفاده شد. نتایج SEM نشان داد میانگین اندازه ذرات به دست آمده در شرایط مختلف تولید ۱۸/۴ تا ۲۴/۷ نانومتر است و ریخت‌شناسی ذرات کرووی و شبه کرووی است. داده‌های XRD تاییدکننده تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 با ساختار اسپینل معکوس است. با افزایش pH محلول، میانگین اندازه ذرات تولید شده کاهش یافت. برای بررسی اثر غلظت نانوذرات اکسید آهن بر رشد گیاه، نانوذرات در غلظت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm به محیط رشد گیاه اضافه شدند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش غلظت نانوذرات اکسید آهن تا ۹۰ ppm نه تنها اثر منفی بر رشد گیاه نداشته است، بلکه باعث افزایش رشد طول گیاه و افزایش وزن نمونه گردیده است. نانوذرات اکسید آهن در غلظت‌های بالا در حدود ۱۲۰ ppm اثر منفی بر پارامترهای پیش‌گفته داشته است. با کاهش میانگین اندازه نانوذرات تولید شده افزایش بیشتری در رشد طول گیاه و وزن نمونه‌های گیاه علف مویی مشاهده شد که به دلیل سطح تماس بیشتر نانوذرات اکسید آهن با سلول‌های گیاه و افزایش ریزمغذی‌های فراهم شده لازم برای رشد گیاه است.

کلمات کلیدی: نانوذرات، مگنتیت، علف مویی، هم‌سوی، ریزمغذی.

۱- مقدمه

فناوری نانو بر بهبود عملکرد گیاهان برای جذب مواد غذایی، بهبود جوانه زنی، تولید گیاه، دفع آفات و امراض گیاه، ایجاد بستر کاشت گیاه و غیره تاثیر دارد. میزان جذب نانوذرات توسط گیاهان متفاوت بوده و بستگی به نوع گیاه، ترکیب شیمیایی و اندازه این ذرات دارد [۱]. نتایج برخی از پژوهش‌ها حاکی از اثر مثبت استفاده از نانوذرات بر رشد گیاهان بوده و برخی نشانگر کاهش رشد گیاه در حضور نانوذرات است [۲-۴]. نانو ذرات مگنتیت به دلیل داشتن ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله خصوصیات مغناطیسی و واکنش پذیری بالا، دارو رسانی، سنجش پادتن و گرما درمانی کاربردهای گسترده‌ای دارند [۵-۷]. ذرات اکسید آهن حاصل از فوران آتش‌فشان، آتش سوزی‌ها و فعالیت‌های صنعتی همیشه در طبیعت و در تعادل با اکوسیستم‌های طبیعی وجود داشته اند. سمیت این ذرات در محیط‌های مختلف به ویژه محیط‌های آبی و تاثیرات منفی آن بر عملکرد موجودات زنده ثابت شده است [۸-۱۰]. بیشترین اثر سمی مشاهده شده در این نانوذرات شامل کاهش رشد گیاهچه و ایجاد لکه‌های قهوه‌ای بر روی برگ‌ها می‌باشد [۱۱، ۱۲].

محققان جذب، انتقال و تجمع نانوذرات Fe_3O_4 را در گیاهان مورد مطالعه قرار دادند و متوجه حرکت این نانوذرات در سلول‌های گیاهی شدند، همچنین مشاهده کردند حضور این نانوذره باعث کاهش محتوی کلروفیل می‌گردد [۱۳].

ورود نانوذرات مگنتیت به بافت‌های گیاهی در مطالعات مختلف مشاهده شده است. ژو و همکاران با مطالعه تاثیر نانوذرات مگنتیت بر بافت‌های گیاه کدو متوجه جذب و انتقال و تجمع این نانو ذره

در بافت‌های گیاه کدو شدند. نتایج تحقیق انجام شده نیز نشان دهنده تاثیر نانو اکسید آهن بر جوانه زنی و رشد اولیه گیاهان می باشد. بیشتر محققان بر این باورند تاثیر سمی قابل ملاحظه ای توسط این نانو ذره ایجاد می شود که شامل ایجاد تنش اکسایشی^۱، تاثیر بر فتوسنتز و کاهش سرعت فرآیند متابولیکی می باشد [۱۴].

سمیت نانوذرات مگنتیت به ویژه در غلظت‌های بالا در مطالعات مختلفی ثابت شده است، از جمله تاثیر نانوذرات مگنتیت با غلظت های صفر، ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ mg/ml بر گیاه آبی Lemnagibba مطالعه و کاهش محتوی کلروفیل، کاهش فتوسنتز، کاهش وزن تر گیاه (۵۲ تا ۵۹ درصد) و کاهش تعداد ساقه‌های جانبی (۳۲ تا ۴۹ درصد) مشاهده شده است. همچنین کاهش رشد و جوانه زنی گیاه خیار در محیط هیدروپونیک پس از ۶ روز مجاورت با نانوذرات Fe₃O₄ با غلظت ۵۰۰ و ۱۵۰۰ gr/mlit گزارش شده است. تیمار نانوذرات مگنتیت به ویژه در غلظت‌های بالا بر گیاهان ایجاد فشار اکسایشی می کند. این فشار اکسایشی بر عمل فتوسنتز تاثیر می گذارد و در نهایت کاهش سرعت فرآیندهای متابولیک را در گیاهان به دنبال دارد [۱۱]. پندی در آزمایشی بر روی نخود گزارش کرد که کاربرد اکسید روی به شکل نانو ذرات تاثیر بیشتری در افزایش رشد گیاه نسبت به شکل معمول آن داشته است که به دلیل سطح ویژه بالای نانوذرات است [۱۵].

اوکاروم و همکاران نشان دادند که نانوذرات نقره با اندازه میانگین حدود ۵۰ نانومتر می‌توانند به طور مستقیم بر روی رشد گیاه جلبک تاثیر گذارند. نانوذرات نقره ۵۰ نانومتری ممکن است نتواند وارد سلول گیاه شوند، اما می‌تواند به عنوان یک پل ارتباطی به سلول دیگر باشند که در نهایت باعث سرعت بخشیدن در تجمع سلولی و رشد بیشتر گیاه می‌شوند [۱۶، ۱۷]. همچنین تجمع نانوذرات اکسید روی و اکسید تیتانیوم باعث محصور شدن دریاچه های سلولی گیاه جلبک می‌شود [۱۷]. همچنین نانوذرات اکسید سلنیم توسط سطح جلبک جذب شده و این مسئله باعث کاهش رشد می‌شود [۱۸].

محیط زیست آبی مهم‌ترین و شاید آخرین مقصد انتشار نانومواد به محیط زیست است. گیاهان آبی نیز بخش عمده نخستین تولید کنندگان آبی را به خود اختصاص می‌دهند و اساس شبکه غذایی محیط‌های آبی هستند [۱۹]. عدسک‌ها در سرتاسر جهان از آب‌های شیرین، نهرهای آبیاری تا تالاب‌ها و باتلاق‌ها پراکنده شده‌اند و در سطح آب شناور می‌باشند. این گیاه به دلیل کشت آسان در آزمایشگاه مورد توجه می‌باشد [۲۰]. این گیاه در جهت حذف نیترات از محیط آبی که آثار نامطلوب دارد مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱].

به عنوان نمونه هی و همکاران نشان دادند که نانوذرات نقره در غلظت ۰/۲ mg/lit برای گیاه *chattonella marina* سمی می باشد [۲۲]. اوکاروم و همکاران به بررسی اثر نانوذرات نقره ۵۰nm به یک گونه ریز جلبک آب شیرین (*chlorella vulgaris*) و یک گونه ریز جلبک آب شور (*Dunaliellatertidecta*) پرداختند و نشان دادند که این نانوذرات باعث کاهش شدید محتوای کلروفیل و زنده مانی سلول‌ها و افزایش گونه‌های فعال اکسیژن و پرواکسیداسیون چربی‌ها می‌شوند. در مطالعه دیگر هزنی و همکاران به بررسی اثر نانوذرات نقره بر گونه آب شیرین *C.Vulgaris* و گونه آب شور *D.Tertideta* پرداختند و نشان دادند که غلظت‌های بالای ۱۰۰ و ۲۰۰ mg/lit نانوذرات نقره باعث مرگ سلولی و ایجاد استرس اکسیداتیو پلانکتون‌های مورد بررسی می‌شوند [۱۶، ۲۳]. بنابراین نانوذرات نقره حتی در کمترین غلظت مورد آزمون نیز باعث ایجاد سمیت در ریز جلبک دریایی *Nanochllopsis* گردیده‌اند و در واقع حضور این نانوذرات در محیط کشت جلبک مذکور مانع تقسیم سلولی و افزایش عادی تعداد سلول‌ها گردیده‌اند و همچنین با نتایج به‌دست آمده، با افزایش هرچه بیشتر غلظت نانوذرات نقره در محیط کشت، کاهش رشد جلبک‌ها نیز بیشتر قابل مشاهده بوده است که نشان می‌دهد تاثیر این نانو ذره بر ریز جلبک مورد مطالعه وابسته به غلظت است [۲۲، ۲۴، ۲۵].

گزارش تاثیر مثبت و منفی نانو ذرات بر گیاهان متداول است و پژوهشگران بررسی‌هایی در مورد تاثیر نانوذرات بر جوانه زنی گیاه و رشد آن با هدف ترویج نانوذرات برای استفاده در کاربردهای کشاورزی انجام داده‌اند. با این حال بررسی‌ها تایید کرده‌اند که نانوذرات می‌توانند در گیاهان سمیت ایجاد کنند و تاثیر منفی بر جوانه زنی بذر و رشد گیاه داشته باشند اما در عین حال ویژگی های انحصاری نانوذرات می‌توانند موجب بهبود جوانه زنی بذر و عملکرد محصول شوند [۲۶]. برای مثال نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید روی، اکسید تیتانیوم، مگنتیت و نانوذرات فلزی منگنز موجب بهبود رشد گیاهانی همچون گوجه فرنگی، تنباکو،

¹ Reactive Oxygen Speices, ROS

ارزن، لوبیا، نخود، سورگوم، اسفناج و گندم شده است [۲۷].

در مطالعه دیگری تاثیر نانوذرات اکسید آهن ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) و یون های آهن (Fe^{3+}) بر رشد گیاهان پومیلو یا دارابی (citrus Maxima) بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که غلظت 50 mg/lit نانو ذرات اکسید آهن سبب افزایش قابل توجه غلظت کلروفیل ($23/8\%$) و فعالیت آنزیم و هیدروژناز ($23/2\%$) نسبت به نمونه شاهد شده، اما در غلظت 100 mg/lit تولید مالون دی آلدید (Malondialdehyd =MDA) را افزایش داده که موجب کاهش غلظت کلروفیل و فعالیت آنزیم و هیدروژناز و نهایتاً کاهش رشد گیاه شده است. آنان دلیل این اثرهای منفی نانوذرات اکسید آهن را تجمع نانوذرات در سطح ریشه می دانند که از انتقال آب به برگ ها جلوگیری می کند. همچنین آسیب های اکسایشی که بر اثر حضور نانوذرات در سلول ایجاد می شود می تواند موجب تخریب کلروپلاست و کاهش غلظت کلروفیل در برگ ها شود [۲۸].

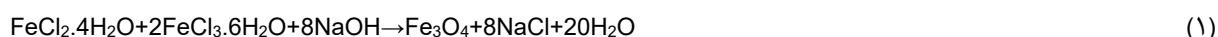
مکانیسم توانایی نانوذرات در جذب آب به درون بذر که منجر به اثرات مثبت پیش گفته در رشد گیاه می شود، هنوز کاملاً شناخته شده نیست. یک فرضیه پیشنهادی به توانایی نانوذرات برای ایجاد منافذ جدیدی بر می گردد که نفوذ آب و ریزمغذی ها در پوسته بذر را تسهیل می کنند و به این ترتیب سرعت جوانه زنی را افزایش می دهند. احتمال دیگر به توانایی نانوذرات اکسیدی و فلزی و نانولوله های کربنی در تنظیم کانال های آب موجود در پوسته بذر گیاه مرتبط است. به این ترتیب که نانوذرات با تأثیر بر ژن های تنظیم کننده کانال های پروتئینی یا با ممانعت از باز شدن کانال ها، انتقال آب به داخل پوسته بذر را کنترل کنند [۲۹].

یافته های محققان نشان می دهد که نانوذرات اثرات مثبت و منفی بر رشد و توسعه گیاهان دارند و تاثیرات نانوذرات به ترکیب، غلظت، اندازه و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن ها و نیز به گونه های گیاه بستگی دارد و از گیاهی به گیاه دیگر متفاوت است [۲]. تاکنون در مورد گیاهان آبی پژوهش های کمتری نسبت به گیاهان غیر آبی انجام شده است، همچنین در بسیاری از پژوهش ها غلظت بهینه تعیین نشده و تنها اثر مثبت یا منفی نانوذرات بر پارامترهای رشد گیاه آبی بررسی شده است [۲-۸، ۱۰، ۱۲، ۱۸-۲۱]. نکته بسیار مهم در این موارد، استفاده از کمترین دوز نانوذرات با بیشترین تاثیر مثبت بر رشد گیاه است تا اثرات سوء جانبی نانوذرات بر استفاده کننده محصولات گیاهی به حداقل برسد [۱، ۲]. به بیان دیگر، پارامترهای رشد گیاه با افزایش غلظت بسیاری از نانوذرات افزایش می یابد و با رسیدن به غلظت بهینه، روند کاهشی رشد گیاه آغاز می شود. بررسی و تعیین این غلظت بهینه، اهمیت بسیاری در سلامت محصولات گیاهی فرآوری شده با نانوذرات دارد. در پژوهش حاضر نانوذرات مگنتیت به روش همرسوبی در شرایط مختلف تولید و با روش های XRD و SEM مشخصه یابی شده اند. در ادامه، با توجه به خلاء های پیش گفته، اثر غلظت و اندازه نانوذرات مگنتیت بر رشد گیاه آبی علف مویی بررسی و شده است. همچنین تغییرات غلظت با هدف تعیین نقطه تغییر روند افزایشی به روند کاهشی رشد گیاه مورد توجه قرار گرفته تا محدوده غلظت بهینه مشخص شود.

۲- فعالیت های تجربی

۲-۱- مواد اولیه و تولید نانوذرات

در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن Fe_3O_4 با استفاده از مقادیر به ترتیب $0/464$ و $0/1708$ گرم مواد اولیه $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ و محلول NaOH برای تنظیم pH و آب مقطر به عنوان حلال به روش همرسوبی مطابق واکنش (۱) تولید شد. با توجه به حضور ۲ مول آهن سه ظرفیتی و ۱ مول آهن دوظرفیتی در ۱ مول مگنتیت، در بسیاری از فرآیندهای تولید نانوذرات مگنتیت بر مبنای روش همرسوبی، از نسبت استکیومتری ۲ به ۱ نمک آهن سه ظرفیتی به نمک آهن دو ظرفیتی استفاده شده است [۳۰-۳۲] و در پژوهش حاضر همین نسبت در نظر گرفته شده است:



ابتدا با استفاده از همزن مغناطیسی محلول $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ و $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ با حلال آب مقطر تهیه و سپس با افزودن قطره قطره محلول NaOH رسوبات سیاه رنگی ظاهر شد و این کار تا جایی ادامه داشت تا به $\text{pH}=11$ رسید (نمونه C1). این مراحل به طور مشابه برای دستیابی به $\text{pH}=11/5$ نیز صورت گرفت (نمونه C2). سپس پس از چند بار شستشو با آب مقطر و استون رسوبات حاصل توسط آهنربای قوی از آب مقطر حلال جدا شده و برای مدت ۲۴ ساعت در دمای 40°C درجه سانتیگراد آون قرار گرفت.

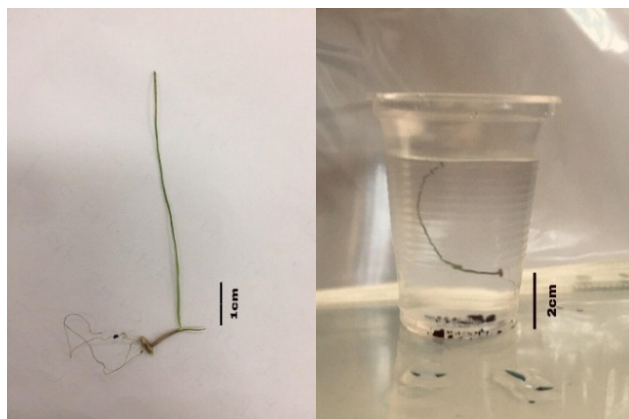
با استفاده از دستگاه XRD مدل Siemens D5000 مجهز به لامپ اشعه X با طول موج $1/5406$ آنگستروم ساختار کریستالوگرافی نانوذرات تولیدشده مورد بررسی قرار گرفته و به منظور بررسی شکل و اندازه نانوذرات با استفاده از دستگاه SEM مدل Philips XL 30، تصاویر میکروسکوپی از ذرات تهیه شد. بعد از مشخصه یابی به روش های فوق، سوسپانسیون هایی با غلظت ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm از نانوذرات سنتز شده در pH های ۱۱ و ۱۱/۵ برای نمونه های مختلف تهیه شد.

۲-۲- پرورش گیاه و تاثیر نانو ذره بر رشد آن

در این پژوهش هدف بررسی تاثیر نانو ذرات Fe_3O_4 بر برخی پارامترهای رشد گیاه علف مویی است. این گیاه گونه ای چند ساله آبی از جنس *Eleocharis* در خانواده جنگلیان بوده و به نام های دیگری همچون *spikerush*، چمن مویی و سوزنی موسوم است و برای رشد نیازمند نور متوسط، دما و pH مطلوب آب بوده و به بستری غنی از مواد مغذی نیازمند است. این گیاه رشد سریع دارد و رشد ساقه آن بیش از ۱۰ سانتی متر است.

در پژوهش حاضر برای بررسی اثر نانوذرات سنتز شده بر پارامترهای رشد گیاه، ابتدا ۲۷ گلدان برای نمونه های گیاه آبی علف مویی آماده و شرایط مناسب دما، نور، رطوبت و آب نیز مهیا شد؛ سپس بذرهای مشابه از این نوع گیاه آبی از لحاظ وزن و ظاهر انتخاب و برای جوانه زنی در محیطی با دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و نور متوسط قرار گرفت و پس از ۸ روز که جوانه های گیاه مشاهده و طول آن ثبت شد، جوانه های مشابه از نظر طول ریشه، طول گیاه و وزن جداسازی شده و در هر گلدان حاوی ۱۵۰ cc آب با pH=۷، یک نمونه از گیاه قرار گرفت.

گیاهان پس از قرارگیری در آب به صورت معلق در گلدان قرار گرفته و به تدریج ریشه گیاه با کف گلدان برخورد کرد و در ادامه فرآیند، سوسپانسیون ها در چهار غلظت مختلف به گلدان های حاوی جوانه گیاه و آب افزوده و تاثیرات آن بر پارامترهای رشد مشاهده شد. همچنین نمونه های شاهد بدون افزودن نانوذرات جهت مقایسه با نمونه های حاوی سوسپانسیون نیز در نظر گرفته شد. پس از ۱۰ روز طول ساقه گیاه اندازه گیری شده و میزان رشد نمونه ها محاسبه و نسبت به رشد نمونه های شاهد ثبت شد (شکل ۱).



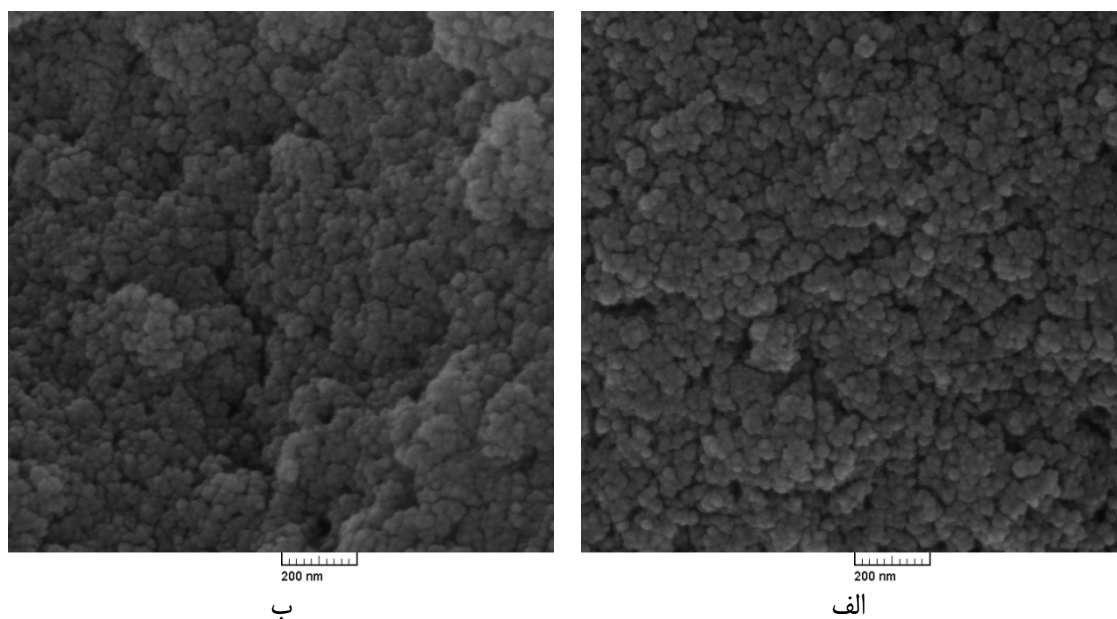
شکل ۱- نمونه خشک و تر گیاه آبی ۱۰ روز پس از جوانه زنی.

پس از این مرحله با خارج کردن گیاهان از آب رشد گیاه متوقف شده و وزن گیاه نیز اندازه گیری شد. میزان ارتفاع گلدان ها در این پژوهش پارامتر مهمی در رشد گیاه به شمار می رود، چرا که گیاه در صورت خروج از آب و رشد ساقه دچار خشک شدگی در قسمت بالایی می شود. این پژوهش ۳ مرتبه مشابه مراحل فوق تکرار شد تا میزان خطای حاصل به حداقل برسد.

۳-۳- نتایج و بحث

در شکل ۲ تصویر SEM نمونه های C1 و C2 نشان داده شده است. با استفاده از نتایج شکل ۲ و در نظر گرفتن ۵۰ ذره برای هر نمونه، میانگین اندازه ذرات نمونه C1 و C2 به ترتیب برابر $24/7$ و $18/4$ nm به دست آمد. دلیل کاهش اندازه ذرات با افزایش pH به افزایش تجمع آنیون های OH- بر سطح جوانه ها و ذرات اولیه مگنتیت برمی گردد. دافعه الکترواستاتیکی ناشی از بارهای

سطحی همنام مانع تجمع و به هم پیوستن جوانه‌ها و ذرات ریز اولیه شده و منجر به کاهش میانگین اندازه نانوذرات مگنتیت می‌شود که با مکانیزم جوانه زنی و رشد مطابق واکنش (۱) تولید می‌شوند. نتیجه مشابهی پیش از این توسط این گروه پژوهشی گزارش شده است [۳۰].

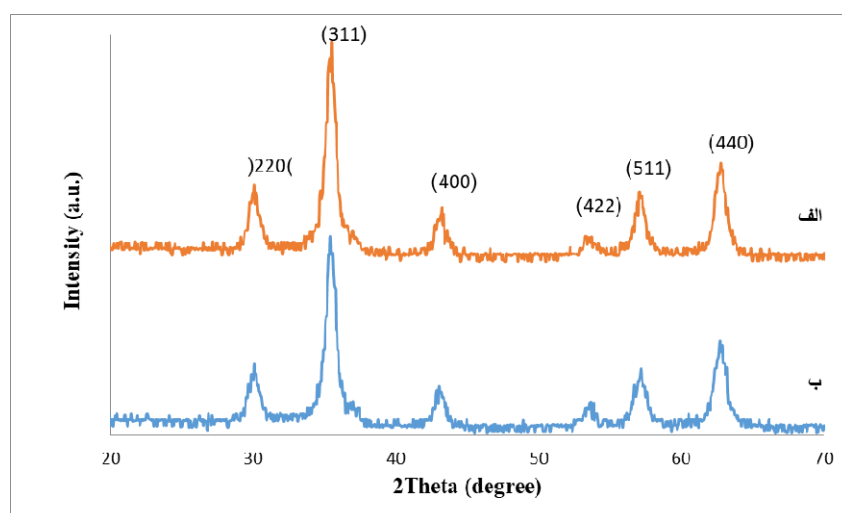


شکل ۲- تصویر SEM (الف) نمونه C1 و (ب) نمونه C2 به ترتیب با میانگین اندازه ذرات ۲۴/۷ و ۱۸/۴ نانومتر.

نمودار XRD نمونه C1 و C2 در شکل ۳ نشان داده شده است. پیک‌ها و اندیس‌های میلر مشخص شده مربوط به صفحات بلوری ساختار اسپینل معکوس مگنتیت منطبق با کارت JCPDS شماره 19-0629 و نشانگر تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 مطابق واکنش (۱) است. اندازه بلورک‌های نمونه C1 و C2 با استفاده از رابطه شرر^۱ محاسبه شد:

$$t = 0.9\lambda / \beta \cos\theta_B \quad (2)$$

که t اندازه بلورک، λ طول موج اشعه X ، β عرض پیک اصلی در نصف شدت بیشینه و θ_B زاویه براگ است. با در نظر گرفتن پیک اصلی (311) و $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ، اندازه بلورک محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است.



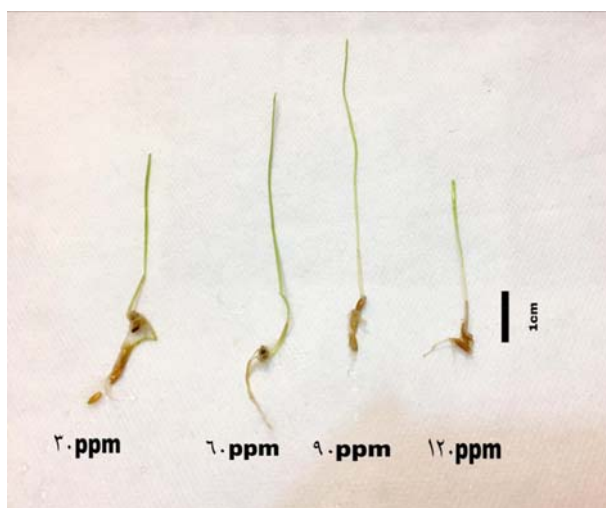
شکل ۳- طرح XRD (الف) نمونه C1 و (ب) نمونه C2.

¹ Scherrer equation

جدول ۱- اندازه بلورک و میانگین اندازه ذرات نمونه های C1 و C2

dSEM(nm) میانگین اندازه ذرات	tXRD(nm) اندازه بلورک	2θB (degree) برای صفحه (۳۱۱)	β (degree)	نمونه
24.7	11.6	35.52	0.72	C1
18.4	8.7	35.54	0.96	C2

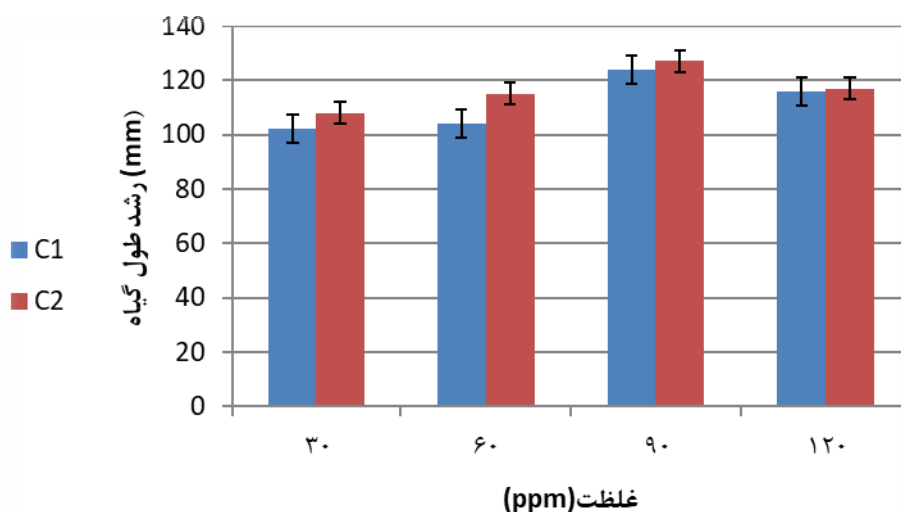
سوسپانسیون نانوذرات نمونه C1 و C2 با pH خنثی و غلظت‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ ppm به گلدان‌های حاوی آب و جوانه‌های گیاه آبی افزوده شد. پس از ۱۰ روز طول ساقه و وزن گیاه اندازه‌گیری و ثبت شد (شکل ۴).



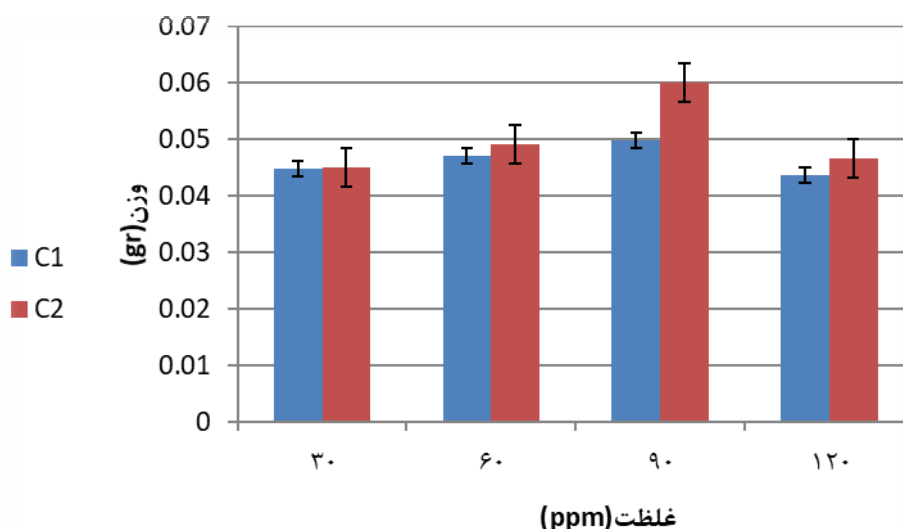
شکل ۴- مقایسه رشد ساقه نمونه در غلظت‌های ۳۰ تا ۱۲۰ ppm نانوذرات نمونه C2.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات نمونه C2 از ۳۰ تا ۹۰ ppm طول گیاه با رشد صعودی روبه رو بوده و در غلظت ۱۲۰ ppm رشد ساقه گیاه کاهش یافته است که احتمالاً به دلیل آسیب رسیدن به غشاء پلاسما و دیواره سلول گیاه در غلظت بالا بوده است. در غلظت پایین سطح تماس نانوذرات با خاک و بافت گیاه و دسترسی گیاه به ریزمغذی‌ها افزایش یافته و عبور نانوذرات از دیواره سلول ریشه گیاه آبی راحت‌تر شده است.

شکل ۵ و ۶ نمودار تغییرات وزن بر حسب غلظت و رشد طول گیاه بر حسب غلظت را در pHهای ۱۱ و ۱۱/۵ نشان می‌دهند.



شکل ۵- تغییرات طول گیاه آبی با غلظت نانوذرات نمونه C1 و C2.



شکل ۶- تغییرات وزن گیاه آبی با غلظت نانوذرات نمونه C2 و C1.

نتایج شکل ۵ و ۶ نشانگر آن است که طول ساقه و وزن گیاه در معرض نانوذرات نمونه C2 رشد بیشتری نسبت نمونه C1 دارد. نانوذرات نمونه C2 میانگین اندازه ذرات کمتری نسبت به نمونه C1 دارند (۱۸/۴ nm نسبت به ۲۴/۷ nm). بنابراین سطح تماس بیشتری با غشاء سلول‌های ساقه و ریشه گیاه و کانال‌های انتقال آب ایجاد می‌کند. این اثر به نوبه خود باعث فراهم شدن ریزمغذی‌های بیشتر و افزایش اثرات مثبت ROS و نهایتاً افزایش نرخ رشد گیاه می‌شود. با افزایش غلظت نانوذرات به دلیل اثرات پیش‌گفته وزن و طول گیاه افزایش بیشتری نشان می‌دهد. این روند افزایشی رشد طول گیاه و وزن با افزایش غلظت تنها تا غلظت ۹۰ ppm ادامه داشته و در غلظت ۱۲۰ ppm به دلیل احتمالی آسیب رسیدن به غشاء پلاسما و دیواره سلولی، کاهش رشد طول گیاه و وزن مشاهده می‌شود. اثر اخیر به خوبی در هماهنگی با داده‌های پژوهش‌های پیشین است که کاهش جوانه زنی و رشد در غلظت‌های بالای نانوذرات را نشان می‌دهد [۱-۴، ۲۸].

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نانوذرات مگنتیت به روش هم‌رسوبی تولید شدند. نتایج XRD و SEM نشانگر تشکیل نانوذرات Fe_3O_4 با میانگین اندازه حدود ۱۸ تا ۲۴ نانومتر است. با افزایش pH، میانگین اندازه ذرات به دلیل دافعه الکترواستاتیکی بارهای هم‌نام ناشی از افزایش غلظت آنیون هیدروکسید در سطح جوانه‌ها و نانوذرات اولیه کاهش یافت. افزایش وزن و طول ساقه گیاه علف مویی که نشانگر افزایش رشد گیاه است، با کاهش میانگین اندازه نانوذرات اکسید آهن در محیط آبی بیشتر شده که به دلیل افزایش سطح تماس نانوذرات با سلول‌های ریشه و ساقه گیاه و فراهم آوردن مسیرهای بهتر انتقال آب و ریزمغذی‌های مورد نیاز برای رشد گیاه است. با افزایش غلظت نانوذرات تا ۹۰ ppm به دلیل افزایش اثرات مثبت پیش‌گفته رشد گیاه افزایش یافت. در غلظت ۱۲۰ ppm به دلیل آسیب رسیدن به سلول‌های گیاهی و اثرات منفی ROS، رشد گیاه علف مویی کاهش یافت. به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد نانوذرات مگنتیت در غلظت‌های پایین باعث افزایش رشد گیاه علف مویی شده‌اند و با کاهش اندازه ذرات این اثر مثبت تشدید می‌شود.

مراجع

- [1] V. Ghormade, M.V. Deshpande, K.M. Paknikar, "Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants" *Biotechnology advances* 29 (2011) 792-803.
- [2] A. Rastogi et al., "Impact of metal and metal oxide nanoparticles on plant: a critical review" *Frontiers in chemistry* 5 (2017) 78-86.
- [3] S. Asli, Neumann P.M., "Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport" *Plant, cell & environment* 32 (2009) 577-584.

- [4] R. Raliya et al., "Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant" *Metallomics* 7 (2015) 1584-1594.
- [5] A. Besson-Bard et al., "Nitric oxide contributes to cadmium toxicity in Arabidopsis by promoting cadmium accumulation in roots and by up-regulating genes related to iron uptake" *Plant Physiology* 149 (2009) 1302-1315.
- [6] N. Singh et al., "Potential toxicity of superparamagnetic iron oxide nanoparticles (SPION)" *Nano reviews* 1 (2010) 5358-5369.
- [7] S.M. Kraemer, "Iron oxide dissolution and solubility in the presence of siderophores", *Aquatic sciences* 66 (2004) 3-18.
- [8] I. Bhatt, B.N. Tripathi, "Interaction of engineered nanoparticles with various components of the environment and possible strategies for their risk assessment", *Chemosphere* 82 (2011) 308-317.
- [9] S.J. Klaine et al., "Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects", *Environmental toxicology and chemistry* 27 (2008) 1825-1851.
- [10] J.R. Peralta-Videa et al., "Nanomaterials and the environment: a review for the biennium 2008-2010", *Journal of hazardous materials* 186 (2011) 1-15.
- [11] F. Aslani et al., "Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview" *The Scientific World Journal* 2014 (2014) 1-28.
- [12] W. Liu et al., "Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature riceplants (*Oryza sativa* L.)" *Environmental Science & Technology* 40 (2006) 5730-5736.
- [13] X. Chen et al., "Photosynthetic toxicity and oxidative damage induced by nano-Fe₃O₄ on *Chlorella vulgaris* in aquatic environment" *Open Journal of Ecology* 2 (2012) 21-28.
- [14] Y. Ma et al., "Effects of rare earth oxide nanoparticles on root elongation of plants" *Chemosphere* 78 (2010) 273-279.
- [15] A.C. Pandey, S. S. Sanjay, R. S. Yadav, "Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*" *Journal of Experimental nanoscience* 5 (2010) 488-497.
- [16] A. Oukarroum et al., "Inhibitory effects of silver nanoparticles in two green algae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta*", *Ecotoxicology and environmental safety* 78 (2012) 80-85.
- [17] J. Ji, Z. Long, D. Lin, "Toxicity of oxide nanoparticles to the green algae *Chlorella* sp." *Chemical Engineering Journal* 170 (2011) 525-530.
- [18] C. Wei et al., "Effects of silica nanoparticles on growth and photosynthetic pigment contents of *Scenedesmus obliquus*" *Journal of Environmental Sciences* 22 (2010) 155-160.
- [19] R. Liang et al., "Enhanced degradation of persistent pharmaceuticals found in wastewater treatment effluents using TiO₂ nanobelt photocatalysts" *Journal of nanoparticle research* 15 (2013) 1990-1998.
- [20] T. Perreault, "What kind of governance for what kind of equity? Towards a theorization of justice in water governance" *Water International* 32 (2014) 233-245.
- [21] Y.A. Wali, H.A. Okbi, R.A. Abri, "A comparison of two transfusion regimens in the perioperative management of children with sickle cell disease undergoing adenotonsillectomy" *Pediatric hematology and oncology* 20 (2003) 7-13.
- [22] D. He, J.J. Dorantes-Aranda, T.D. Waite, "Silver Nanoparticle-Algae Interactions: Oxidative Dissolution, Reactive Oxygen Species Generation and Synergistic Toxic Effects" *Environmental science & technology* 46 (2012) 8731-8738.
- [23] A.A. Hazani et al., "Ecotoxicity of Ag-nanoparticles on two microalgae, *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella tertiolecta*" *Archives of Biological Sciences* 65 (2013) 1447-1457.
- [24] E. Navarro et al., "Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*" *Environmental science & technology* 42 (2008) 8959-8964.
- [25] A.J. Miao et al., "The algal toxicity of silver engineered nanoparticles and detoxification by exopolymeric substances" *Environmental pollution* 157 (2009) 3034-3041.
- [26] L.R. Khot et al., "Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: a review" *Crop protection* 35 (2012) 64-70.
- [27] A. Servin, et al., "A review of the use of engineered nanomaterials to suppress plant disease and enhance crop yield" *Journal of Nanoparticle Research* 17 (2015) 92-101.
- [28] J. Yang, W. Cao, Y. Rui, "Interactions between nanoparticles and plants: phytotoxicity and defense mechanisms" *Journal of plant interactions* 12 (2017) 158-169.

- [29] M. Khodakovskaya et al., "Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth" ACS nano 3 (2009) 3221-3227.
- [30] R. Ahmadi et al., "Ultrasonic-assisted synthesis of magnetite based MRI contrast agent using cysteine as the biocapping coating" Materials Chemistry and Physics 131 (2011) 170-177.
- [31] I. Nkurikiyemfura, Y. Wang, B. Safari, E. Nshingabigwi, "Temperature-dependent magnetic properties of magnetite nanoparticles synthesized via coprecipitation method" Journal of Alloys and compounds 846 (2020) 156344.

[۳۲] اثنی عشری ح. و عربی ه.، سنتز نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن به روش هم‌رسوبی و بررسی تاثیر نسبت غلظت مواد واکنش دهنده بر اندازه و خواص مغناطیسی ذرات، مجله علم و مهندسی سرامیک، سال ۲، شماره ۱ ص ۷۷-۸۴ بهار ۱۳۹۲.



مهندس آرش فرجی، نویسنده
مسئول، پژوهشگاه مواد و
انرژی

مروری بر تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در کامپوزیت های دی‌بورید تیتانیومی

علی صداقت‌آهنگری حسین‌زاده، آرش فرجی، مسعود کاظمی

پژوهشگاه مواد و انرژی

چکیده: بدنه‌های سرامیکی بر پایه بوریدها، کاربیدها و نیتريد‌ها دارای ویژگی‌هایی نظیر سختی بالا، نقطه ذوب بالا و مقاومت به اکسیداسیون بالا هستند. از بین اصلی‌ترین ترکیبات آنها می‌توان به دی‌بورید زیرکونیوم، دی‌بورید هوافنیوم و دی‌بورید تیتانیوم اشاره کرد. پیوند اشتراکی قوی در بوریدها موجب افزایش نقطه ذوب، مدول کشسان و سختی در این گروه از سرامیک‌ها می‌شود. به دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی بوریدها می‌توان از آنها به عنوان مواد دیرگداز و قطعاتی نظیر پوشش‌های مقاوم به سایش و ابزار برشی استفاده کرد. همچنین به عنوان کاتد برای پیل الکتروشیمیایی در فرآیند تولید آلومینیم کاربرد دارند. به منظور استفاده بهینه از این ترکیبات و ساختن کامپوزیت‌هایی با خواص مورد نظر از تقویت‌کننده‌هایی (SiC، TiC، C و عناصر فلزی) استفاده می‌شود. در این مقاله کامپوزیت‌های تقویت شده با این ترکیبات بررسی شده‌اند. همچنین با توجه به بررسی‌های صورت گرفته معمولاً از افزودنی SiC برای بهبود ویژگی‌های حرارتی، مکانیکی و مقاومت به اکسیداسیون در اکثر محیط‌ها استفاده می‌شود.

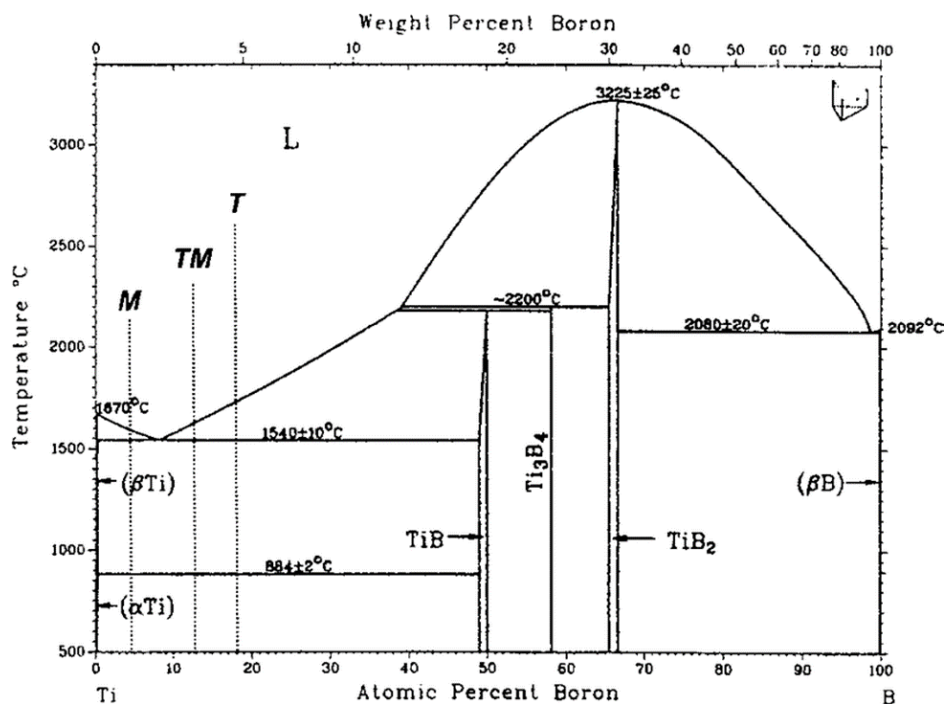
کلمات کلیدی: TiB_2 ، کامپوزیت، دی‌بورید تیتانیوم، SiC

۱- مقدمه

دی‌بوریدها در مقایسه با نیتريد‌ها و کاربیدها دارای ضریب انبساط حرارتی پایین‌تر و هدایت حرارتی بالاتر می‌باشند. این ویژگی موجب افزایش مقاومت به شوک حرارتی و استفاده از آنها برای کاربردهای دما بالا می‌شود. همچنین دلیل بالا بودن هدایت حرارتی و الکتریکی آنها مربوط به پیوندهای شیمیایی، سطوح انرژی ترازهای الکترونی و پیوندهای میان اتم‌های بور می‌باشد. بنابراین از آنها می‌توان به عنوان مواد دیرگداز و قطعاتی نظیر پوشش‌های مقاوم به سایش، ابزار برشی در صنایع نظامی و هوافضا و همچنین کاتد برای پیل الکتروشیمیایی هال-هرولت در فرآیند تولید آلومینیم و صنایع هسته‌ای استفاده نمود.

۲- مروری بر منابع مطالعاتی

سرامیک‌های کاربردی، نیتريدی و بوریدی به دلیل پیوند شیمیایی قوی دارای پایداری ساختاری در دمای بالا می‌باشند [۱-۲]. سیستم Ti-B دارای سه فاز با ساختار اورترومبیک است که فازهای TiB و Ti_3B_4 در اثر واکنش پریتکتیک به ترتیب در دمای ۲۲۰۰ و ۲۱۸۰ درجه سانتیگراد تجزیه می‌شوند [۳-۴]. در حالی که TiB_2 در دمای حدود ۳۲۲۵ درجه سانتیگراد به صورت ناگهانی ذوب می‌شود [۵]. فاز TiB دارای محدوده شکل‌گیری باریکی (۴۹-۵۰ درصد اتمی بور) می‌باشد و در ۷ درصد اتمی بور و دمای حدود ۱۵۵۰ درجه سانتی‌گراد با محلول جامد Ti واکنش یوتکتیک می‌دهد [۶]. همچنین واکنش پریتکتیک فاز TiB_2 و Ti_3B_4 و فاز مذاب در دمای ۲۰۲۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد [۷-۸]. همان‌طور که در شکل ۱ (دیاگرام فازی Ti-B) مشاهده می‌شود در دمای ۲۰۸۰ درجه سانتی‌گراد، TiB_2 با بور واکنش یوتکتیک می‌دهد [۸-۹].



شکل ۱- دیاگرام فازی تیتانیوم - بور [۸].

TiB₂ به دلیل اینکه دارای سختی حدود ۳۲ GPa، استحکام خمشی حدود ۱۰۰۰ MPa، مدول کشسان ۵۳۰ GPa، نقطه ذوب حدود ۳۲۲۵ درجه سانتی‌گراد، هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، پایداری شیمیایی بالا، مقاومت به شوک حرارتی بالا، مقاومت به سایش بالا می‌باشد در قطعات با کاربرد دما بالا به کار می‌رود. همچنین به دلیل داشتن پیوندهای کوالانسی در ترکیب و ضریب خودنفوذی پایین، دارای قابلیت تفجوشی پایینی است [۱۰-۱۶].

۳- فعالیت‌های تجربی صورت گرفته بر روی کامپوزیت‌های بر پایه TiB₂

به منظور بهبود قابلیت تفجوشی و خواص مکانیکی و فیزیکی سرامیک‌های از جنس TiB₂ از ترکیبات مختلفی مانند TiC استفاده شده است [۱۷-۲۲].

۳-۱- کامپوزیت TiB₂-SiC

SiC قطعه‌ای سرامیکی با سختی ۲۰ تا ۲۷ گیگا پاسکال، چقرمگی $2-5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ می‌باشد. هنگامی که SiC به صورت تقویت کننده افزوده می‌شود به دلیل بهبود چگالش و ممانعت از رشد دانه‌ها چقرمگی شکست را تا $6-9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ افزایش می‌دهد [۲۳]. بنابراین کامپوزیت‌های بر پایه TiB₂ به همراه تقویت کننده SiC دارای مقاومت به اکسایش بالا هستند [۲۴]. حضور ذرات SiC در زمینه، با ممانعت از رشد دانه‌ها و ایجاد مانع در برابر رشد ترک‌ها، خواص مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، جهت جلوگیری از کاهش بیش از حد سختی و دستیابی به خواص بهینه می‌توان از روش مناسب تفجوشی و چگالش برای این سرامیک‌ها استفاده کرد [۲۵-۲۶]. در جدول ۱ برخی از خواص TiB₂ و SiC نشان داده شده است.

با توجه به توضیحات بالا استفاده از تقویت کننده SiC به دلیل سازگاری شیمیایی و بهبود خواص مکانیکی برای ساخت کامپوزیت زمینه TiB₂ مناسب است. با استفاده از پرس گرم با فشار ۶۰-۲۰ MPa و محدوده دمایی ۲۱۰۰-۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان حدود ۳۰ تا ۶۰ دقیقه می‌توان به چگالی ۹۶ تا ۹۹٫۸٪ دست یافت [۲۳]. همچنین با توجه به گزارشات محققین مقدار بهینه مورد استفاده از ذرات SiC به عنوان تقویت کننده ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی بوده که استحکام خمشی ۷۱۰ مگاپاسکال و چقرمگی $5-7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ را نشان داده است [۲۷-۲۹]. همانطور که گفته شد SiC برای بهبود مقاومت در مقابل اکسایش و استحکام خمشی با کاهش رشد دانه‌ها در طول تفجوشی به سرامیک‌های بر پایه TiB₂ اضافه می‌شود [۳۰].

جدول ۱- ویژگی‌های SiC و TiB_2 [۲۳-۲۶].

α - SiC	TiB_2	ویژگی
۲۸۰۰	۳۳۲۵	نقطه ذوب ($^{\circ}\text{C}$)
۳/۲۱	۴/۵۲	چگالی (g/cm^3)
۳۲-۲۷	۳۵-۲۵	سختی (GPa)
۴۵۰	۳۷۰-۳۰۰	استحکام خمشی (MPa)
۳/۱ - ۴/۶	۳ - ۴/۵	چقرمگی ($\text{MPa.m}^{1/2}$)
۴۱۰	۵۴۰	مدول کشسان (GPa)
$۴/۱۶ \times ۱۰^{-۶}$ در جهت c	$۸/۶ \times ۱۰^{-۶}$ در جهت c	ضریب انبساط حرارتی ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
۰/۱۴	۰/۲۲	ضریب پواسون

کامپوزیت TiB_2 - SiC معمولاً با عملیات مخلوط کردن مکانیکی پودرهای SiC و TiB_2 و انجام فرایند پرس گرم بر روی آنها تولید می‌شوند [۳۱]. سازوکار بهبود چقرمگی در کامپوزیت به این صورت می‌باشد که زمانی که ترک به دانه‌های کشیده TiB_2 و ذرات SiC می‌رسد، ترک در امتداد مرز دانه‌های ضعیف رشد نموده و چقرمگی افزایش می‌یابد و علاوه بر این با افزایش درصد حجمی SiC میزان فازهای ناخالص توزیع شده در ماده نیز کاهش می‌یابد [۳۲-۳۴]. در شکل ۲ مسیر رشد ترک و تصویر میکروسکوپی سطح پرداخت شده کامپوزیت TiB_2 - SiC مشاهده می‌شود. همچنین جهت افزایش بیشتر چقرمگی شکست، خواص مکانیکی و چگالی از ویسکرهای SiC بجای ذرات SiC استفاده می‌شود. در جدول ۲ اثر افزودن ویسکر SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت مشاهده می‌شود [۳۳-۳۶].

شکل ۲- مسیر رشد ترک و تصویر میکروسکوپی سطح پرداخت شده کامپوزیت TiB_2 - SiC [۳۶].

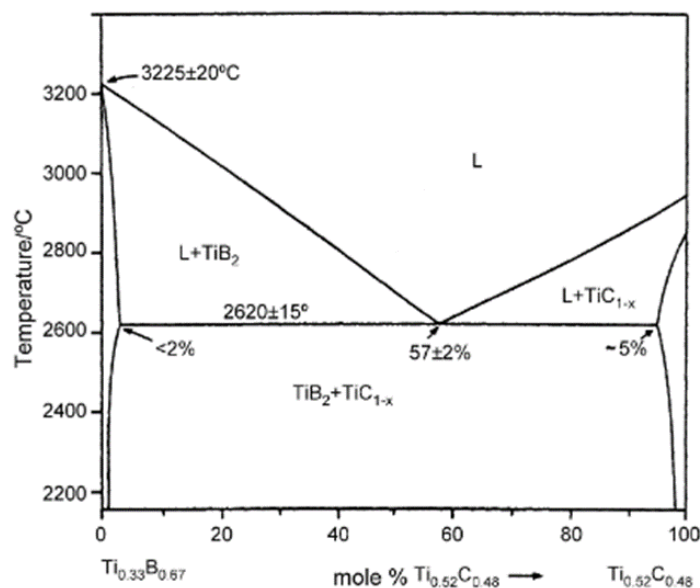
همچنین در پژوهشی مشاهده گردید که در کامپوزیت زمینه TiB_2 تقویت شده با SiC تهیه شده به روش SPS با افزودن ۳۰ درصد حجمی SiC چگالی کامپوزیت از ۹۲ درصد به ۹۹/۵ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، چقرمگی شکست کامپوزیت از $۳ \text{ MPa.m}^{1/2}$ به $۹/۴ \text{ MPa.m}^{1/2}$ به دلیل فعال کردن مکانیزم‌های افزایش چقرمگی و کنترل رشد دانه بهبود یافت [۳۷].

جدول ۲- اثر افزودن ویسکر SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت [۳۵].

مقدار SiCw	چقرمگی شکست	چگالی نسبی	استحکام خمشی	نمونه
درصد حجمی	MPa.m ^{1/2}	درصد	MPa	
۰	۳/±۴۰/۵	۹۸/۹	±۳۷۶ ۳۷	A
۱۰	۶/±۵۰/۴	۹۹/۳	±۶۷۸ ۳۰	B
۲۰	۷/±۳۰/۵	۹۸/۹	±۶۴۰ ۳۵	C
۳۰	۷/±۸۰/۴	۹۳/۴	±۴۶۹ ۳۸	D

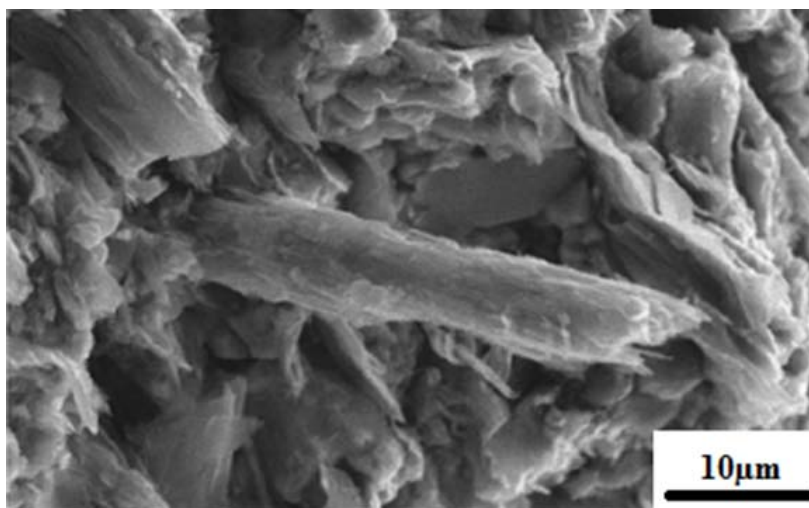
۲-۳- کامپوزیت TiB₂-TiC

TiC نیز برای بهبود خواص کامپوزیت بر پایه TiB₂ مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً در تحقیقاتی از ترکیب TiC و TiB₂ استفاده شد که بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده شد که این ترکیب تا دمای ۲۵۰۰ درجه از نظر ترمودینامیکی پایدار می‌باشد و در دمای ۲۶۰۰ درجه دچار استحاله یوتکتیک می‌شود (شکل ۳). همچنین سختی ویسکرز این کامپوزیت‌ها در دمای اتاق برابر با ۲۳ GPa می‌باشد که پایین‌تر از سختی هر کدام از ترکیبات TiC و TiB₂ به صورت خالص می‌باشد. به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی TiC و TiB₂ در دمای ۶۰۰ درجه شاهد ایجاد انحراف در مسیر پیشروی ترک یا ایجاد انحراف در مسیر رشد آن و در نتیجه افزایش چقرمگی می‌باشیم [۳۸، ۱۴] علاوه بر این پس از افزودن TiC مشاهده می‌شود که مرزدانه‌ها قفل شده و در سرعت رشد دانه‌ها تاخیر به وجود می‌آید که منجر به افزایش استحکام این کامپوزیت‌ها می‌گردد [۳۹-۴۰ و ۲۱].

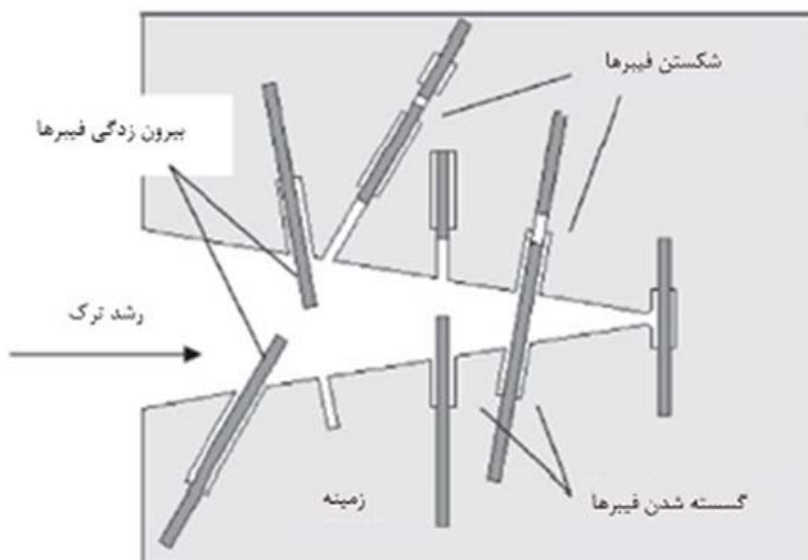
شکل ۳- دیاگرام فازی TiB₂-TiC_{1-x} [۱۴].

۳-۳- کامپوزیت TiB₂-C

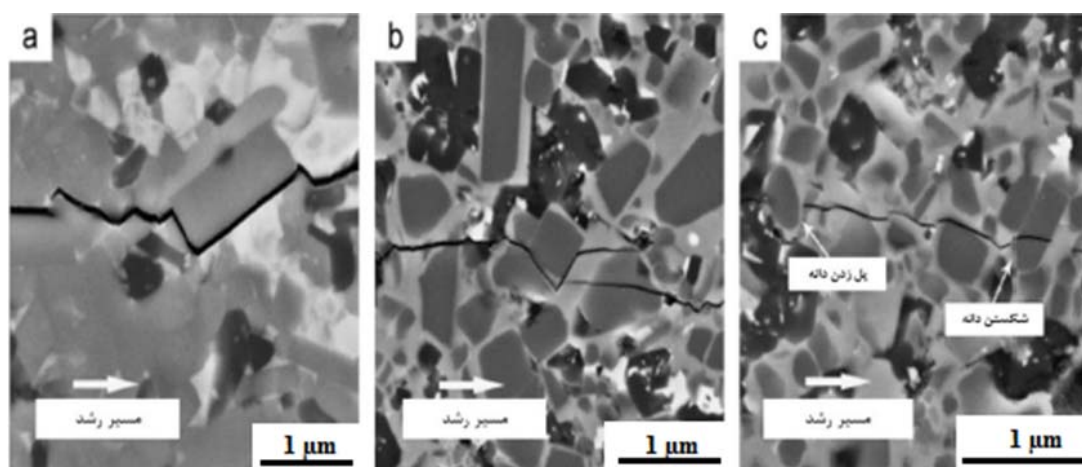
برای افزایش چقرمگی و استحکام در کامپوزیت‌های پایه TiB₂ در پژوهشی توسط یانگ مشاهده شد که با افزودن ۲ تا ۶ درصد وزنی فیبر کربن به کامپوزیت، چقرمگی و استحکام افزایش می‌یابد [۱۵]. این افزایش چقرمگی می‌تواند به دلیل پل زدن مسیر ترک و ایجاد سد انرژی برای پیشرفت ترک باشد که در شکل‌های ۴ و ۵ افزایش چقرمگی به دلیل ایجاد انحراف و پل زدن در مسیر ترک و همچنین تصاویر سطح مقطع شکست کامپوزیت TiB₂-C و فیبرهای کربن به صورت شماتیک نشان داده شده است [۳۴-۴۱]. در شکل ۶ تصویر ترک در دمای ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد و مدت زمان سینتر ۳۰ دقیقه در نمونه TiB₂-80%C مشاهده می‌شود [۳۶].



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی سطح شکست کامپوزیت TiB_2-C [۳۶].



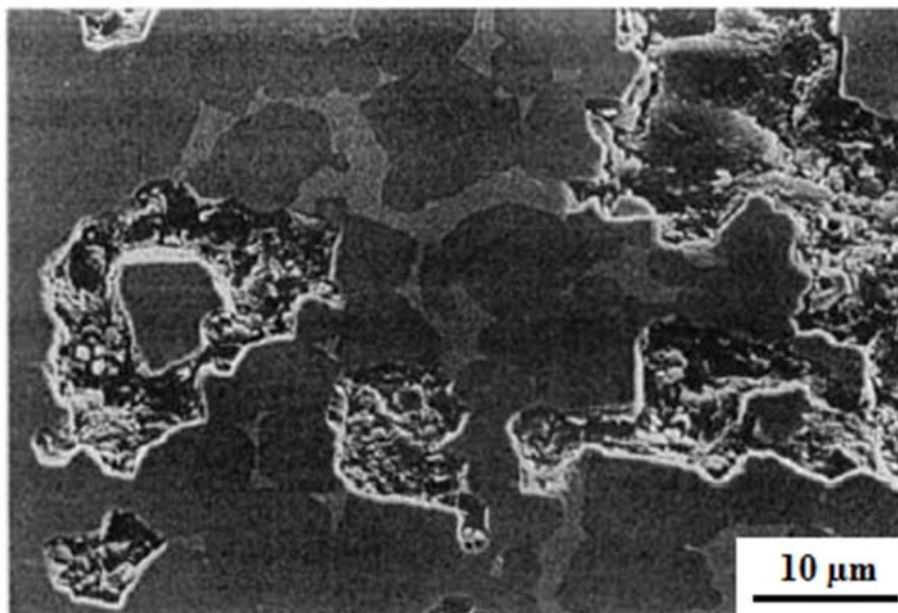
شکل ۵- سازوکارهای افزایش چقرمگی در نتیجه افزودن فیبرهای کوتاه کربنی [۴۱].



شکل ۶- تصاویر مسیر پیشروی ترک در نمونه $TiB_2-20\% Vol SiC$ بوسیله میکروسکوپ الکترونی [۳۶].

۳-۴- کامپوزیت بر پایه TiB_2 تقویت شده با عناصر فلزی

جهت افزایش نرخ چگالی از تقویت کننده‌های فلزی در کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 استفاده می‌شود. این تقویت کننده‌ها Fe, Ni, Co و ... می‌باشد. اما در فرآیند تفجوشی در فاز مایع باید به متغیرهای نظیر زمان، اتمسفر، دما و درصد خلوص دقت شود. مثلاً از عیب‌های کامپوزیت‌های TiB_2 -Fe حساس بودن فرآیند چگالش این کامپوزیت‌ها به ناخالصی‌هایی نظیر اکسید درون پودر می‌باشد. به عبارت دیگر، در دمای سالیدوس، ناخالصی‌های اکسیدی ذرات TiB_2 باعث افزایش میزان رشد دانه بدون پیشرفت چگالش می‌شود که این ساز و کار رشد دانه در نتیجه تبخیر اکسیدهای بور و واکنش‌های چگالش این بخارها هستند. رشد دانه‌ای که از طریق واکنش فاز بخار روی سطح ذرات TiB_2 ایجاد می‌شود موجب مصرف انرژی سطحی و افزایش اکتیویته در طول فرآیند تفجوشی می‌شود. در نتیجه جهت جلوگیری از رشد افراطی دانه در انجام واکنش تفجوشی در فاز مایع باید میزان اکسید موجود در پودرهای TiB_2 را در حد امکان کاهش داد. همچنین ناخالصی‌های اکسیژن و کربن موجود در پودر مسئول حل‌شوندگی فاز مذاب درون کامپوزیت است. در شکل ۷ ترشوندگی کامل و ناقص درون کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 ناشی از تقویت کننده آهن تحت فرآیند تفجوشی در فاز مایع نشان داده شده است. بنابراین با افزایش مقدار اکسیژن، پخش شدن مذاب آهن و ترشوندگی توسط آن کمتر می‌شود، در صورتیکه در پودرهای با اکسیژن کمتر از ۰.۲۶٪ زاویه ترشوندگی کوچکتر از ۵ درجه بعد از ۱۰ دقیقه تفجوشی به دست می‌آید [۳۹].



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی از سرمت 20 %Vol Fe TiB_2 - تفجوشی شده در دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد [۳۹].

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته مشاهده می‌شود که در کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 بر اساس کاربرد و خواص مدنظر می‌توان از تقویت کننده‌های مختلفی نظیر SiC، TiC، C و Fe استفاده نمود. تقویت کننده SiC سبب افزایش چقرمگی و مقاومت به اکسایش می‌گردد. تقویت کننده TiC سبب با توجه به اینکه سبب افزایش چقرمگی و بهبود خواص مکانیکی می‌گردد اما بر روی سختی در دمای اتاق اثر مطلوبی ندارد. تقویت کننده‌های فلزی نسبت به SiC و TiC با توجه حساسیت‌های بسیار در نحوه فرآیند و ترکیب شدن از کاربرد کمتری برخوردار می‌باشند. همچنین در جدول ۳ خلاصه اثر تقویت کننده‌های مختلف بر روی کامپوزیت‌های زمینه TiB_2 آورده شده است.

جدول ۳- اثر افزودن تقویت کننده‌های مختلف بر روی کامپوزیت های زمینه TiB_2 .

ردیف	تقویت کننده	خاصیت	توضیحات
۱	SiC	افزایش چقرمگی شکست - مقاومت به اکسایش بالا- بهبود خواص مکانیکی	به دلیل بهبود چگالش و ممانعت از رشد دانه‌ها
۲	TiC	پایداری ترمودینامیکی در دماهای بالا - سختی پایین- افزایش چقرمگی- افزایش استحکام	به دلیل ناسازگاری ضرایب انبساط حرارتی و دمای بالا
۳	C	افزایش چقرمگی و استحکام	به دلیل پل زدن مسیر ترک و ایجاد سد انرژی برای پیشرفت ترک
۴	عناصر فلزی	حساس بودن فرآیند چگالش	به دلیل وجود ناخالصی‌های اکسیدی

مراجع

- [1] Nekahi, Sahar, et al. "TiB₂-SiC-based ceramics as alternative efficient micro heat exchangers." *Ceramics International* 45.15 (2019): 19060-19067.
- [2] M.R. Salimpour, A.T. Al-Sammarraie, A. Forouzandeh, M. Farzaneh, Constructural design of circular multilayer microchannel heat sinks, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 11(2018) 011001
- [3] Namini, Abbas Sabahi, et al. "Microstructure-mechanical properties correlation in spark plasma sintered Ti-4.8 wt.% TiB₂ composites." *Materials Chemistry and Physics* 223 (2019): 789-796.
- [4] Kovalčíková, Alexandra, et al. "Mechanical and tribological properties of TiB₂-SiC and TiB₂-SiC-GNPs ceramic composites." *Journal of the European Ceramic Society* 40.14 (2020): 4860-4871.
- [5] Mohanavel, Vinayagam. "Mechanical and microstructural characterization of AA7178-TiB₂ composites." *Materials Testing* 62.2 (2020): 146-150.
- [6] E. Courtright, H. Graham, A. Katz, and R. Kerans, "Ultra High Temperature Assessment Study - Ceramic Matrix Composites," Wright Patterson Air Force Base, Ohio, 1992.
- [7] G. Grimvall, A. Guillermet, "Phase Stability Properties of Transition Metal Diborides," in *Am. Inst. Phys*, 1991.
- [8] C. Subramanian, T. Murthy, A. Suri, "Synthesis and consolidation of titanium diboride," *Int J Refract Met Hard Mater*, 25 (2007), 345-50.
- [9] L. Sigl, K. Schwetz, "TiB₂-based cemented borides: a new generation of hard metals," *Powder Metall Int*, 23(4) (1991), 221-3.
- [10] A. Mukhopadhyay, G. Raju, B. Basu, A. Suri, "Correlation between phase evolution, mechanical properties and instrumented indentation response of TiB₂-based ceramics," *J Eur C9eram Soc*, 29 (2009), 505-16.
- [11] M. Feber, P. Becher, C. Finch, "Effect of microstructure on the properties of TiB₂ ceramics," *J Am Ceram So*, 66 (1983), C2-4.
- [12] W. Huazhang, W. Huilin, L. Yexian, "TiB₂-based inter cathode in aluminum electrolysis," *J. Light Met*, 5 (1993), 26-31.
- [13] D. Yanling, W. Weimin, "Research development on TiB₂ material," *J. Foshan Ceram*, 14 (2004), 7-11.
- [14] D. Vallauri, I. Atlas, A. Chrysanthou, "TiC-TiB₂ composites: a review of phase relationships, processing and properties," *J Eur Ceram Soc*, 28 (2008), 1697-713.
- [15] X. Jilai, H. A. Oye, "Wetting of graphite and carbon/TiB₂ composites by liquid aluminum," *J. Light Met. TMS*, Warrendale PA, (1993), 631-637.
- [16] B. Basu, G. Raju, A. Suri, "Processing and properties of monolithic TiB₂-based materials," *Int. Mater*, 51 (2006), 352-374.
- [17] M. Shibuya, Y. Yamamoto, M. Ohyanagi, "Simultaneous densification and phase decomposition of TiB₂-WB₂ solid solutions activated by cobalt boride addition," *J Eur Ceram Soc*, 27 (2007), 307-12.

- [18] J. Park, Y. Koh, H. Kim, C. Hwang, E. Kong, "Densification and mechanical properties of titanium diboride with silicon nitride as sintering aid," *J Am Ceram Soc*, 82(11) (1999), 3037-42.
- [19] L. Qiu, B. Yao, Z. Ding, "Characterization of structure and properties of TiN-TiB₂ nano-composite prepared by ball milling and high pressure heat treatment," *J Alloys Compd*, 456 (2008), 436-40, 2008.
- [20] D. Green, "Microcracking mechanisms in ceramics," in *Fracture mechanics of ceramics*, 5 (1983), 457-78.
- [21] Z. Zhao, L. Zhang, W. Liu, Y. Yin, "Bulk ultrahard composites in the eutectic TiB₂-TiC system by SHS under high gravity," *Int J Self-Propag High-Temp Synth*, 18 (2009), 186-93.
- [22] S. Bhaumik, C. Divakar, A. Singh, G. Upadhyaya, "Synthesis and sintering of TiB₂ and TiB₂-TiC composite under high pressure," *Mater Sci Eng A*, 279 (2000), 275-81.
- [23] Y. Ohya, M. Homann, G. Petzow, "Sintering of in-situ synthesized SiC-TiB₂ composites with improved fracture toughness," *J. Am. Ceram. Soc*, 75(2) (1992), 2479-2783.
- [24] D. Kuo, W. Kriven, "Mechanical behavior and microstructure of SiC and SiC/TiB₂ ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc*, 18 (1998), 51-57.
- [25] M. Flinders, D. Ray, A. Anderson, R. Cutle, "High-toughness silicon carbide as armor," *J Am Ceram Soc*, 88(8) (2005), 2217-26.
- [26] P. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. Aghajanian, M. Sennett, "A review of ceramics for armor applications In: *Advances in ceramic armor IV*," in John Wiley & Son iNC, Hoboken, 2009.
- [27] D. Zhu, S. Liu, X. Yin, L. Yang, C. Xiao, H. Zhou, "In-situ HIP synthesis of TiB₂/SiC ceramic composites," *J Mater Proc Tech*, 187 (1999), 89-90.
- [28] S. Torizuka, K. Sato, H. Nishio, T. Kishi, "Effect of SiC on interfacial reaction and sintering mechanism of TiB₂," *J Am Ceram Soc*, 78 (1995), 1606-10.
- [29] J.S. LEE, K. Yoshida, T. Yano, "Influence of fiber volume fraction on the mechanical and thermal properties of unidirectionally aligned short-fiberreinforced SiC composites," *J. Foshan Ceram*, 24 (2004), 7-11.
- [30] W. Gu, K. Faber, "Steinbrech RW. Microcracking and R-curve behavior in SiC-TiB₂ composites," *Acta Metall Mater*, 40(11) (1992), 3121-8.
- [31] D. Magley, R. Winholtz, K. Faber, "Residual stress in a two-phase microcracking ceramic," *J Am Ceram Soc*, 73(6) (1990), 1641-4.
- [32] A. Evans, K. Faber, "Crack-growth resistance of microcracking brittle materials," *J Am Ceram Soc*, 67(4) (1984), 255-60.
- [33] G. Zhang, X. Yue, Z. Jin, J. Dai, "In situ synthesized TiB₂ toughened SiC," *J. Eur. Ceram. Soc*, 16 (1996), 409-412.
- [34] D. Bucevac, S. Boskovic, B. Matovic, V. Krstic, "Toughening of SiC matrix with in-situ created TiB₂ particles," *Ceram Int*, 36(7) (2010), 2181-8.
- [35] J. Deng, X. Ai, "Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Pressed TiB₂-SiCw Composites," *Materials Research Bulletin*, 33 (1998), 575-582.
- [36] H. Chen, Z Wang, Z. Wu, "Investigation and characterization of densification, processing and mechanical properties of TiB₂-SiC ceramics," *Materials and Design*, 64 (2014), 9-14.
- [۳۷] غفوری ف، احمدیان م، عمادی ر، ذاکری م، "بررسی تاثیر مقدار SiC بر خواص مکانیکی کامپوزیت TiB₂-SiC سینتر شده با روش سینتر جرقه پلاسما"، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی مواد و متالورژی و سیزدهمین کنفرانس مشترک انجمن متالورژی و مواد ایران و انجمن ریخته‌گری ایران، (۱۳۹۸)
- [۳۸] امینی کیاب، طیبی فرد س.ع، یوزباشی ا.ع، "سنتر ترکیب کامپوزیتی TiB₂-SiC به روش "MACS"، پنجمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی و جامعه علمی ریخته‌گری ایران، (۱۳۹۰)
- [39] C. Blanc, F. Thevenot, D. Goeuriot, "Microstructural and mechanical characterization of SiC-submicron TiB₂ composites," *J Eur Ceram Soc*, 19(5) (1999), 561-9.
- [40] R. Telle, L. S. Sigl, and K. Takagi, "Boride-Based Hard Materials," in *Handbook of Ceramic Hard Materials*, Wiley- VCH, (2000), 803-947.
- [41] M. Pan, P. Hoffman, D. Green, J. Hellmann, "Elastic properties and microcracking behavior of particulate titanium diboride-silicon carbide composites," *J Am Ceram Soc*, 80(3) (1997), 692-8.



دکتر نسیم نایب پاشایی،
نویسنده اول، پژوهشگاه
استاندارد

تأثیر اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO₂ و اعمال نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بر بهبود خواص مقره‌های سرامیکی

نسیم نایب پاشایی^{۱*}، منیره تقوایی^۲، مصطفی صدیقی زاده^۲

^۱پژوهشکده فناوری و مهندسی، پژوهشگاه استاندارد
^۲دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده: در سال‌های اخیر نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV که نسل جدیدی از پوشش‌های خود پالاینده و ابر آبرگیز هستند برای استفاده بر روی مقره‌ها معرفی شده‌اند. در این مطالعه، دو نوع نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano-RTV) شامل نانوذرات ZnO و SiO₂ مورد مطالعه قرار گرفتند. با هدف بهبود توزیع نانوذرات و جلوگیری از آگلومراسیون، ابتدا اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO₂ به ترتیب با استفاده از APTES و HDMS انجام شد. با استفاده از روش‌های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) اصلاح سطح نانوذرات بررسی شد. در مرحله بعد نانوذرات اصلاح شده به پایه RTV اضافه شدند و تأثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبود یافته، بر روی تست چسبندگی و تست آبرگری پوشش‌های مورد نظر به عنوان معیارهای بهبود عملکردی عایق بررسی شد. همچنین با استفاده از نتایج آزمایش‌های عملی، تأثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانوپوشش بهبود یافته، بر روی ولتاژ تخلیه الکتریکی به عنوان شاخص بهبود استقامت الکتریکی و در نتیجه قابلیت اطمینان مقره‌های پوشش داده شده و بدون پوشش مورد نظر در حضور درجات مختلف آلودگی مصنوعی مورد بررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بیشترین و مقره بدون پوشش کمترین ولتاژ تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقره حاوی نانوپوشش لاستیک سیلیکونی به ویژه در محیط‌های با آلودگی زیاد کاهش یافته و این امر قابلیت اطمینان بالاتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که چسبندگی پوشش در مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano-RTV) نسبت به نمونه حاوی پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV) افزایش یافته است. نتایج تست آبرگری نشان داد که زاویه تماس استاتیک $103.78 \pm 1.5^\circ$ بر روی سطح لاستیک سیلیکون RTV بدست آمد که برای پوشش ZnO / RTV به $114.1 \pm 1.6^\circ$ و برای پوشش ZnO-SiO₂ / RTV به $128.4 \pm 3.4^\circ$ افزایش یافت و مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی (Nano-RTV) حاوی SiO₂ بیشترین میزان آبرگری را نشان می‌دهد. کلمات کلیدی: مقره پرسیلانی، نانوذرات ZnO و SiO₂، پوشش لاستیک سیلیکونی Nano-RTV، آبرگری.

۱- مقدمه

برق تولیدی در نیروگاه‌ها توسط خطوط انتقال هوایی به مراکز پخش و مصرف‌کننده‌ها انتقال می‌یابد. برای این منظور خطوط انتقال باید از پایه‌ها و سایر خطوط جهت جلوگیری از اتصال کوتاه جدا گردند که اینکار با تعبیه مقره‌ها (عایق‌های الکتریکی) صورت می‌گیرد. به منظور ممانعت از هدایت جریان الکتریکی در مسیرهای ناخواسته در سیستم‌های قدرت از مقره‌های فشارقوی استفاده می‌شود. از آنجائیکه این مقره‌ها برای جداسازی سطوح ولتاژ فشار قوی بکار برده می‌شوند، باید دارای مقاومت سطحی بسیار بالایی باشند [۱-۳].

یکی از انواع مقره‌هایی که در صنعت برق استفاده زیادی می‌شوند، از جنس پرسیلانی هستند که از نظر خواص مکانیکی و الکتریکی خواص قابل قبولی دارند. با وجود مناسب بودن مقاومت سطحی مقره‌ها در حین طراحی و ساخت، پس از نصب در مناطق آلوده و با گذشت زمان، لایه آلودگی نشسته بر سطح آن‌ها با رطوبت هوا یا نزولات جوی تلفیق گشته و با حل شدن مواد محلول

آلودگی و پیدایش یک لایه سطحی الکترولیتی، مسیری مناسب جهت هدایت جریان بر سطح مقره‌ها ایجاد می‌شود. مقره‌های فشارقوی در معرض شرایط آب و هوایی سخت از قبیل درجه حرارت و رطوبت بالا و همچنین آلودگی‌های شدید ناشی از مناطق ساحلی، صنایع، کشاورزی و کویری قرار دارند. عوامل مذکور منجر به عبور جریان ناشی بالا بر روی سطح مقره‌ها و در نهایت وقوع قوس الکتریکی می‌شود. در حقیقت، مشکل این مقره‌ها آبدوست بودن سطح آنها است که در حضور آلاینده‌های محیطی مانند نمک‌های محلول در مناطق دریایی، ریزگردها و آلاینده‌های صنعتی، تجمع این آلاینده‌ها بر سطح مقره‌ها رخ داده و در مناطق مرطوب لایه ایجاد شده سبب ایجاد قوس و اتصال کوتاه و در نتیجه کاهش طول عمر مقره‌ها می‌شود [۱-۴].

یکی از مهمترین مشکلات و خطاهای ایجاد شده در پست‌های فشار قوی برق مستقر در مجاورت کارخانجات صنعتی و مناطق با شرایط آب و هوایی ساحلی که دارای آلودگی‌های سنگین صنعتی، گردوخاک و نمک‌های رسوبی می‌باشند، بوجود آمدن تخلیه الکتریکی جزئی^۱ بر روی مقره‌ها در زمان بارندگی و افزایش رطوبت (شرجی) می‌باشد. پدیده ریزگردها و گردوخاک شدید در استان خوزستان یک نمونه از این شرایط آب و هوایی می‌باشد. تخریب لعاب سطح ایزولاتورها در اثر آلودگی‌های ناشی از کارخانجات فولاد، آلومینیم، پتروشیمی و صنایع مشابه که بر روی سطح مقره‌ها رسوب می‌کنند، همچنین آلودگی‌های ناشی از مناطق ساحلی بصورت نمک و یک لایه گل (ناشی از گردوخاک محیط) بر روی سطح مقره‌ها تشکیل می‌گردند. این امر، در هنگام بارندگی یا افزایش رطوبت محیطی عامل کاهش سطح عایقی و ایجاد یک مسیر هادی برای تخلیه الکتریکی بروی مقره‌ها می‌گردد که این مسئله خسارات هنگفتی را بعلت تخریب تجهیزات سوئیچ‌گیر و اعمال خاموشی‌های ناخواسته به شبکه برق فشارقوی وارد می‌آورد [۲, ۵-۷].

به منظور مقابله با اثرات نامطلوب آلودگی در پست‌های فشار قوی مناطق آلوده، روش‌های مختلفی نظیر شستشوی دوره‌ای مقره‌ها و استفاده از گریس‌های سیلیکونی جهت نگهداری و ایزولاسیون بکار گرفته می‌شود. راه کار شستشوی دوره‌ای مقره‌ها به دلیل تعداد زیاد مقره‌ها و گرد و خاک ناشی از ریزگردها معمولاً در مناطق با آلودگی زیاد (که سطح آلودگی بیش از ۷۰ برابر حد مجاز است) بسیار زمانبر و پر هزینه است و با توجه به تعداد دفعات بالای تکرار سالیانه از لحاظ فنی و اقتصادی با محدودیت‌هایی روبرو است [۸]. راهکار دیگر استفاده از گریس‌ها روی مقره‌ها است که این گریس‌ها نیز عمری در حدود شش ماه دارند و پاکسازی دوره‌ای آنها و پوشش‌دهی مجدد مقره‌ها بسیار دشوار و از نظر اقتصادی نامناسب است. استفاده از گریس‌های سیلیکونی نیز هزینه اجرایی بالایی داشته و در مناطق دارای میزان آلودگی نامحلول بالا، کارایی ندارد [۳, ۸].

یک روش کارا برای بهبود عملکرد این مقره‌ها، اعمال پوشش لاستیک سیلیکونی ولکانیزه شده در دمای اتاق (RTV)^۲ بر روی سطح مقره می‌باشد. این پوشش‌ها به عنوان روشی جایگزین برای شستشوی مقره‌ها با آب و یا گریس کاری بر روی سطح مقره، که در عملیات نگهداری دوره‌ای انجام می‌گردند، طراحی شده‌اند. همچنین، استفاده از پوشش‌های لاستیک سیلیکونی RTV، بعنوان روشی جایگزین جهت تعمیر و نگهداری ایزولاسیون پست‌ها در مناطق آلوده معرفی شده است. این روش برای مقابله با آلودگی‌های آبی نیز مؤثر بوده و محدودیتی از نظر میزان آلودگی نامحلول محیط ندارد. علاوه بر دلایل فنی موجود، محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از این روش از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد [۹-۱۲]. با توجه به گسترده شدن پراکندگی ذرات گرد و خاک در سراسر کشور و همچنین ازدیاد نواحی صنعتی با هوای آلوده، پوشش‌های عایق سیلیکونی بر روی مقره‌های چینی و شیشه‌ای و سایر قطعات عایقی خطوط انتقال برق و ایستگاه‌های مربوطه اعمال می‌شوند تا با جلوگیری از ایجاد لایه‌ی رسانا بر روی سطح عایق‌ها باعث کاهش احتمال قطعی برق ناشی از جرقه و آسیب دیدن عایق‌ها شوند. جلوگیری از قطعی برق نه تنها باعث افزایش رضایتمندی مشتریان می‌شود بلکه در فصول گرم سال از رخ دادن عوارض جدی حاصل از افزایش دما بر سلامتی افراد به ویژه سالمندان و نوزادان در مناطق گرمسیری جلوگیری می‌کند [۱۳, ۱۴].

پوشش لاستیک سیلیکونی بدلیل تخریب بواسطه نور خورشید، گران بودن، مشکلات چسبندگی پوشش به زیرلایه و مقاومت به سایش ضعیف محدودیت‌هایی دارد. استفاده از نانوذرات برای ایجاد پوشش آبریز بر روی مقره‌های سرامیکی باعث پس‌زدن آب و روغن از روی آن، جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌ها روی سطح، خاصیت آسان تمیز شونده‌گی و مقاومت در برابر باران‌های

¹ Flash over

² Room Temperature Vulcanized

اسیدی، افزایش مقاومت به اشعه ماوراء بنفش، ممانعت از خوردگی و یخ زدگی، افزایش استحکام و خاصیت عایق سازی و هیدروفوبیک کردن سطح مفره و تمیز باقی ماندن تا مدت زمان طولانی می‌گردد. هزینه اعمال این پوشش‌ها نسبت به هزینه های شستشوی دوره‌ای بسیار کمتر بوده و صرفه اقتصادی بسیار بالائی دارند [۱۶, ۱۵, ۱۲]

در سال‌های اخیر نانو پوشش‌ها که نسل جدیدی از پوشش‌های آبریز و خود تمیز شونده هستند برای استفاده بر روی مفره‌ها مطرح شده‌اند. افزودن نانوذرات به رزین RTV برای ایجاد پوشش آبریز بر روی مفره‌های سرامیکی باعث پس‌زدن آب و روغن از روی آن، جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌ها روی سطح، خاصیت آسان تمیز شوندگی و مقاومت در برابر باران‌های اسیدی، افزایش مقاومت به اشعه ماوراء بنفش، ممانعت از خوردگی و یخ‌زدگی، افزایش استحکام و خاصیت عایق‌سازی و هیدروفوبیک کردن سطح مفره و تمیز باقی ماندن تا مدت زمان طولانی می‌گردد. روش‌های اعمال این پوشش‌ها لایه‌نشانی غوطه‌وری، اعمال با برس و اسپری بدون هوا می‌باشند. هزینه اعمال این نانو پوشش‌ها نسبت به هزینه‌های شستشوی دوره‌ای بسیار کمتر بوده و صرفه اقتصادی بسیار بالائی دارند [۱۵, ۹, ۵]. مطالعات زیادی در مورد مشخصات نانوذرات از جمله ثبات شیمیایی و الکتریکی و کاربرد آنها بعنوان تقویت کننده پوشش لاستیک سیلیکونی RTV وجود دارد. در میان انواع نانوذرات، نانوذرات ZnO و SiO₂ دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی برجسته‌ای هستند. نانو ذرات SiO₂ به طور گسترده‌ای برای تقویت پوشش RTV استفاده می‌شوند، زیرا توانائی بهبود هدایت حرارتی، توانائی تحمل تنش، تحمل گرما و قابلیت انتقال نوری پوشش را دارا می‌باشند [۱۷-۱۹]. نانوذرات ZnO به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی و شیمیایی برجسته از جمله پایداری شیمیایی بالا، ثابت دی الکتریک کم، فعالیت کاتالیزوری بالا، توأخاصیت ضد باکتریایی، جذب بالای اشعه ماورابنفش و مادون قرمز یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده به عنوان نانوذرات افزودنی برای تقویت RTV هستند [۲۰, ۲۱] با این حال، مطالعات کمی در مورد سیستم‌های نانو ZnO / RTV انجام شده است. علاوه بر این، استفاده همزمان از ZnO و SiO₂ ممکن است باعث بهبود خواص RTV در مقایسه با استفاده جداگانه از آنها شود.

نانوذرات به دلیل دارا بودن انرژی سطحی بالا، تمایل به آگلومراسیون دارند. آگلومراسیون، نسبت سطح به حجم نانوذرات را تا حد زیادی کاهش می‌دهد در نتیجه پراکندگی نانوذرات در زمینه را دشوار می‌کند. میزان آگلومراسیون، کیفیت پراکندگی نانوذرات را نشان می‌دهد. افزایش تعداد و اندازه آگلومراسیون‌ها، خواص ماده را تخریب می‌کند. همچنین، ناپایداری نانوذرات در زمینه به علت آگلومراسیون، کنترل اندازه نانوذرات را دشوار می‌سازد. روش‌های متعددی برای جلوگیری از آگلومراسیون پیشنهاد شده است که یکی از متداول ترین این روش‌ها، اصلاح سطحی نانوذرات با استفاده از اصلاح سازها است [۲۲, ۹, ۵]. کاربرد مواد اصلاح کننده سطحی (اصلاح سازها) موجب تغییر سطح آبدوست نانوذره به آبریز می‌شود. با تغییر شیمیایی در سطح نانوذرات میتوان از آگلومره شدن آنها جلوگیری کرده و خواص شیمیایی و فیزیکی متفاوتی را در سطح آنها ایجاد کرد ویژگی های آنها را بهبود بخشید. در جدول ۱، مروری بر مطالعات انجام شده پیرامون اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO₂ انجام شده است.

جدول ۱- مروری بر مطالعات انجام شده پیرامون اصلاح سطح نانوذرات ZnO و SiO₂

اصلاح کننده	نانوذره	محققین
titanate coupling agent (TCA)	ZnO	ونگ و همکاران [23]
aminopropyltriethoxysilane (APTES)	ZnO	گراست و همکاران [24]
3-aminopropyl trimethoxysilane (APTES), tetraethyl orthosilicate (TEOS), mercaptosuccinic acid (Ms), 3-mercaptopropyl trimethoxysilane (Mp) polyvinylpyrrolidone (Pv)	ZnO	وو و همکاران [25]
Polystyrene	ZnO	هونگ و همکاران [26]
aminopropyl triethoxysilane (APS) hexamethyldisilazane (HMDS)	SiO ₂	آرچه [27]
hexamethyldisilazane (HMDS)	SiO ₂	ایشاک [28]

در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه بهبود خواص مفره‌ها انجام شده است. مقالات متعددی در رابطه با عایق‌های بکار رفته در

صنعت برق و استفاده از علم و فناوری نانو به منظور بهبود خواص مورد انتظار از عایق‌ها به خصوص مقره‌ها وجود دارد [۵، ۹، ۲۲] با این وجود تعداد اندکی از مقالات به بررسی تاثیر این نانو ذرات بر روی آبگریزی و ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق مقایسه مقره سرامیکی با مقره سرامیکی پوشش داده شده و مقره سرامیکی نانو پوشش داده شده از نظر استقامت الکتریکی آنها در شرایط مختلف آلودگی مصنوعی می‌باشد. در این راستا از یک نوع نانو پوشش بر مبنای ماده لاستیک سیلیکونی و نانو ذره اکسیدروی اصلاح شده استفاده شده‌است. به منظور جلوگیری از آلودگی نانو ذرات در ماده سیلیکونی (RTV) از اصلاح کننده استفاده شده‌است. در مرحله بعد نانو ذرات اصلاح سطحی شده به پایه RTV اضافه شدند و تاثیر استفاده از پوشش پلیمری و دو نوع نانو پوشش بهبود یافته، بر روی تست چسبندگی و تست آبگریزی پوشش‌های مورد نظر به عنوان معیارهای بهبود عملکردی عایق بررسی شد. مقره‌های پوشش داده شده و بدون پوشش در سطوح مختلف آلوده شده و مورد آزمایش در اتاقک مه تمیز به منظور بررسی ولتاژ تخلیه الکتریکی جزئی قرار گرفته‌اند و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با استفاده از برازش منحنی رابطه‌ای به منظور توصیف نحوه تغییر مقادیر تنش الکتریکی به ازای سطوح مختلف آلودگی پیشنهاد شده‌است. در ادامه اطلاعات مربوط به نمونه‌ها نتایج آزمایشگاهی و تحلیل آنها در قسمت نتایج و نتیجه‌گیری آورده شده‌است.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

مواد به کار رفته در بخش تجربی این مطالعه، به منظور بدست آوردن نتایج عملیاتی و آزمایشگاهی عبارتند از: پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV) ساخت شرکت واکر آلمان، نانو ذرات ZnO با میانگین اندازه قطر ۵۰ نانومتر و نانو ذرات SiO₂ با میانگین اندازه قطر ۳۰ نانومتر محصول شرکت تاد کالا و دو اصلاح کننده APTES^۱ و HMDES^۲ به ترتیب به منظور متعادل سازی سطح نانو ذرات ZnO و SiO₂ تهیه شده از کمپانی مرک. به منظور ساخت نانو پوشش، از نانو ذرات ZnO و SiO₂ به منظور ارتقا ویژگی‌های پوشش RTV استفاده شده‌است. به منظور انتخاب نانو پوشش مناسب دو نوع نانو پوشش به شرح زیر سنتز شده و در پوشش دهی مقره‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌است:

- نانو پوشش ۱: نانو ذرات ZnO در در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۲ ساعت حرارت داده شده و با استفاده از اصلاح کننده APTES به نسبت ۱۰۰ به ۲ در محلول استون، اصلاح و متعادل می‌شود. ترکیب حاصل به وسیله همزن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شده و در نهایت فیلتر شده و نانو ذرات در کوره به مدت ۲۴ ساعت برای مدت زمان ۲۴ ساعت حرارت داده می‌شوند و خشک می‌شوند. نانو ذرات اصلاح شده در RTV با نسبت ۱/۵ درصد وزنی ترکیب شده و با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود و هموزن سازی می‌شود.
- نانو پوشش ۲: نانو ذرات SiO₂ در در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ۲ ساعت حرارت داده شده و با استفاده از اصلاح کننده HMDS به نسبت ۱۰۰ به ۱ در محلول استون، اصلاح و متعادل می‌شود. ترکیب حاصل به وسیله همزن مغناطیسی به مدت ۲۰ دقیقه مخلوط شده و در نهایت فیلتر شده و نانو ذرات در کوره به مدت ۲۴ ساعت برای مدت زمان ۲۴ ساعت حرارت داده می‌شوند و خشک می‌شوند. نانو ذرات اصلاح شده SiO₂ و ZnO اصلاح شده به روش قبل در RTV به ترتیب با نسبت ۱ و ۲ درصد وزنی ترکیب شده و با استفاده از همزن مغناطیسی مخلوط می‌شود و هموزن سازی می‌شود.

مشخصات مقره سرامیکی مورد استفاده بعنوان زیر لایه در جدول ۲ آمده است. به منظور مقایسه مقره‌های سرامیکی بدون پوشش و پوشش/نانو پوشش دار از منظر کارایی عایق، چهار نمونه به شرحی که در ادامه آورده شده‌است آماده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

- نمونه اول: مقره سرامیکی بدون پوشش است.

¹ (3-Aminopropyl) triethoxysilane (APTES)

² Hexamethyldisilazane (HMDS)

- نمونه دوم: مقره سرامیکی پوشش داده شده با پوشش لاستیک سیلیکونی (RTV)،
- نمونه سوم: مقره سرامیکی است که با نانوپوشش (۱) پوشش داده شده است. نانو پوشش (۱) شامل نانو ذرات اکسید روی (ZnO) بوده که دارای خواص ویژه‌ای از نظر عایقی و آبگریزی است.
- نمونه چهارم: مقره سرامیکی است که با نانوپوشش (۲) پوشش داده شده است. نانو پوشش (۲) شامل نانو ذرات هیبریدی اکسیدروی و اکسیدسیلیسیوم می‌باشد. شکل ۱ مقره‌های به کار رفته در مطالعات تجربی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات مقره سرامیکی

فاصله خزشی اسمی	بار مکانیکی ویژه	قطر مقره	وزن مقره
۱۹۰ mm	۴۰ KN	۱۷۵ mm	۲۴۰۰ gr



شکل ۱- مقره‌های به کار رفته در مطالعات تجربی

۲-۲- مطالعات ریزساختاری

به منظور بررسی پراکنده شدن کامل نانوذرات در بستر RTV و تایید درستی مراحل سنتز نانوپوشش، با استفاده از روش‌های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی FESEM، نانوذرات قبل و بعد از متعادل‌سازی بوسیله اصلاح کننده‌ها و همچنین بعد از اضافه کردن ذرات به RTV مورد مطالعه قرار گرفتند.

آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD): مطالعات پراش اشعه ایکس بمنظور مشاهده ساختار کریستالی ذرات قبل و بعد از اصلاح ذرات انجام شد. مطالعات XRD با استفاده از دستگاه مدل Philips PW1730 با اشعه مشخصه $\text{Cu K}\alpha$ (۰/۱۵۴۰۵۶ نانومتر) در فواصل ۰/۰۵ درجه و فواصل زمانی یک ثانیه به ازای زوایای ۲θ در محدوده ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد.

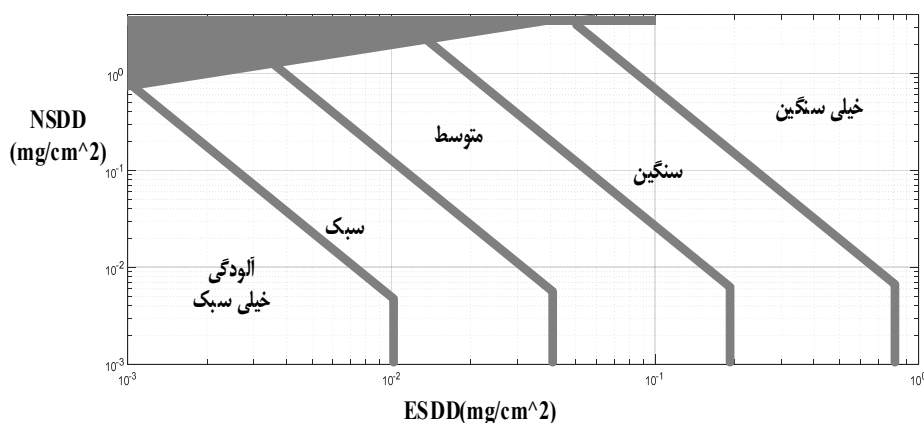
آنالیز BET: این آنالیز برای ارزیابی مساحت سطح نانوذرات با استفاده از تکنیک همدمای Brunauer-Emmett-Teller با جذب نیتروژن با استفاده از دستگاه BELSORB MINI II, BEL, JAPAN استفاده شد. مقایسه مساحت سطح نانوذرات قبل و بعد از اصلاح سطح نانوذرات، کیفیت اصلاح سطح ذرات را نشان می‌دهد.

مطالعات FESEM: مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی FESEM با استفاده از ابزار TESCANMIRA3 انجام شد. نمونه‌ها با استفاده از پوشش دهنده اسپاترینگ یونی IB-3، پوشش طلا داده شدند. تصاویر حاصل به درک بهتر توپوگرافی سطحی نمونه‌ها کمک می‌کند.

۲-۳- اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی

آلودگی‌های حل‌شونده و غیرحل‌شونده در آب که در سطح مقره‌ها جمع می‌شوند علت اصلی ایجاد تخلیه الکتریکی در این تجهیزات می‌باشند. میزان شدت آلودگی بر اساس دو فاکتور ESDD و NSDD مطابق شکل ۲ دسته بندی می‌شود. در این مطالعه تست عملکردی مقره‌ها در آلودگی‌های مختلف در اتاقک مه تمیز مصنوعی آزمایشگاه مه‌نمکی انجام شده است. شکل ۳ تصاویر

مربوط به انجام این آزمایش را نشان می‌دهد. به منظور ایجاد آلودگی مصنوعی بر روی سطح مقره‌ها روش توضیح داده شده در استاندارد ISO 8894-2 [۲۹] به کار گرفته شده‌است. ترکیب استفاده شده برای ایجاد آلودگی مصنوعی شامل ۴۰ گرم کائولین، ۱۰۰۰ گرم آب مقطر و مقداری نمک تجاری است. سطح مقره‌ها با استفاده از آب مقطر تمیز شده و بعد از آن مخلوط توصیف شده با روش اسپری کردن بر روی مقره‌ها نشانده می‌شود. با طولانی کردن مدت زمان اسپری مخلوط آلودگی بر روی مقره‌ها شدت‌های مختلفی از میزان آلودگی بر روی آنها قرار می‌گیرد. شاخص‌هایی که به منظور سنجش میزان آلودگی مجتمع شده بر روی نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند در اکثر مراجع شامل ESDD^۱ و NSDD^۲ می‌باشند و بر اساس این شاخص‌ها میزان آلودگی در زیرگروه‌های خیلی سبک، سبک، متوسط، سنگین و خیلی سنگین دسته‌بندی می‌شوند. مقره‌های آلوده شده بعد از خشک شدن آلودگی بر روی سطوح آنها به طور همزمان در محفظه مه تمیز که دارای سنسوری به منظور تنظیم میزان رطوبت است، قرار داده می‌شوند. بعد از گذشت مدت زمان ۱۵ تا ۲۰ دقیقه به منظور مرطوب شدن سطح مقره‌ها در اثر مه موجود در محیط میزان ولتاژ اعمالی با نرخ ۲/۵ کیلوولت بر ثانیه افزایش داده شده تا زمانی که تخلیه الکتریکی برای هر نمونه در سطح آلودگی مشخص رخ دهد. مقادیر ولتاژ مربوط به هر نمونه ثبت شده و آزمایش در سه مرحله با فواصل ۵ دقیقه به منظور جلوگیری از اثرگذاری احتمالی، برای هر سطح از آلودگی تکرار می‌شود و مقدار میانگین ولتاژهای ثبت شده به عنوان مقدار میانگین ولتاژ تخلیه الکتریکی گزارش می‌شود. در این مطالعه از شاخص ESDD به عنوان معیاری از شدت آلودگی استفاده شده است. رویه محاسبه میزان شدت آلودگی براساس آنچه در استاندارد توضیح داده شده انجام شده است.



شکل ۲- میزان ESDD و NSDD در شدت مختلف آلودگی [۳۰].



شکل ۳- مراحل مختلف آزمایش

^۱ equivalent salt deposit density

^۲ none soluble deposit density

۲-۴- اندازه‌گیری چسبندگی

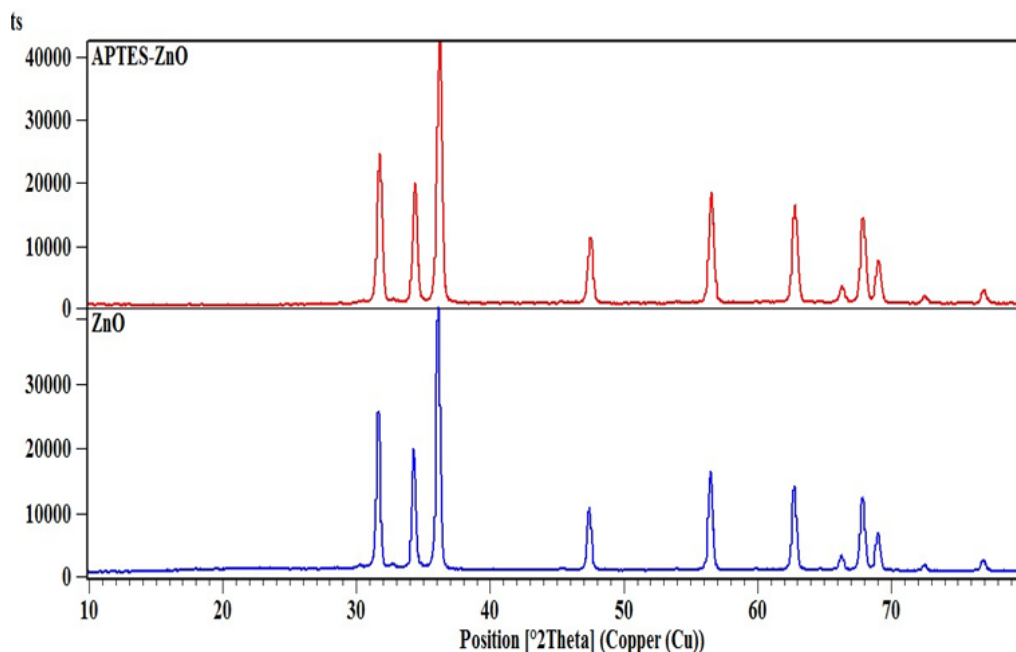
تست چسبندگی مطابق با استاندارد (2018) IEEE1523 [۳۱] انجام شد. در این آزمون مقره‌ها به مدت ۱۰۰ ساعت داخل یک ظرف فلزی محتوی آب جوشان غوطه‌ور است. هدایت آب داخل محفظه $50 \mu\text{s/cm} \pm 1650 \mu\text{s/cm}$ در دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتیگراد است.

۲-۵- اندازه‌گیری آبگریزی

توانایی یک سطح در دفع آب، آبگریزی نامیده می‌شود. این ویژگی به صورت شکل‌گیری قطرات قابل تشخیص و مجزای آب بر روی سطح مورد نظر نمود پیدا می‌کند. آبگریزی یکی از ویژگی‌های مهم سطوح عایقی است و به عنوان یک مشخصه در ارزیابی عملکرد عایق استفاده می‌شود. آلودگی‌های مختلف از جمله آلودگی نمکی هدایت الکتریکی کافی به منظور برقراری جریان نشتی در سطح عایق را دارا نمی‌باشند. مشکل زمانی شروع می‌شود که این آلودگی سطحی مجتمع شده بر روی عایق بوسیله بارندگی و در حضور قطرات آب مرطوب شده و باعث بروز تخلیه الکتریکی شود. به منظور مقابله با این مشکل استفاده از پوشش‌های لاستیک سیلیکونی RTV که سطوح عایقی را آبگریزی می‌کنند، به عنوان یکی از روش‌های رایج مورد کاربرد است. با توجه به اهمیت ارزیابی آبگریزی سطح یک عایق، تست زاویه تماس یک روش رایج و قابل اعتماد برای این منظور می‌باشد. روش انجام تست شامل قراردادن قطرات آب بر روی سطح مورد نظر و اندازه‌گیری زاویه تماس در نقطه تماس سه‌گانه هوا و قطره آب و سطح عایق است. اگر میزان زاویه تماس اندازه‌گیری شده کمتر از ۹۰ درجه باشد، سطح مورد نظر آبدوست و اگر بیش از این مقدار باشد آبگریز در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق اندازه‌گیری زاویه تماس برای نمونه‌های ذکر شده به منظور مقایسه آبگریزی نانوپوشش و پوشش سیلیکونی پیشنهادی انجام شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نخست نتایج مربوط به ارزیابی تاثیر اصلاح سطح نانو ذرات بوسیله مواد اصلاح‌کننده آورده می‌شود. مطالعات XRD اطلاعات ارزشمندی در رابطه با فاز و ساختار کریستالی مواد ارائه می‌دهند. به همین منظور آنالیز XRD در مورد نانوذرات ZnO قبل و بعد از متعادل‌سازی با APTES انجام شده‌است و نتایج در شکل ۴ آورده شده‌است.



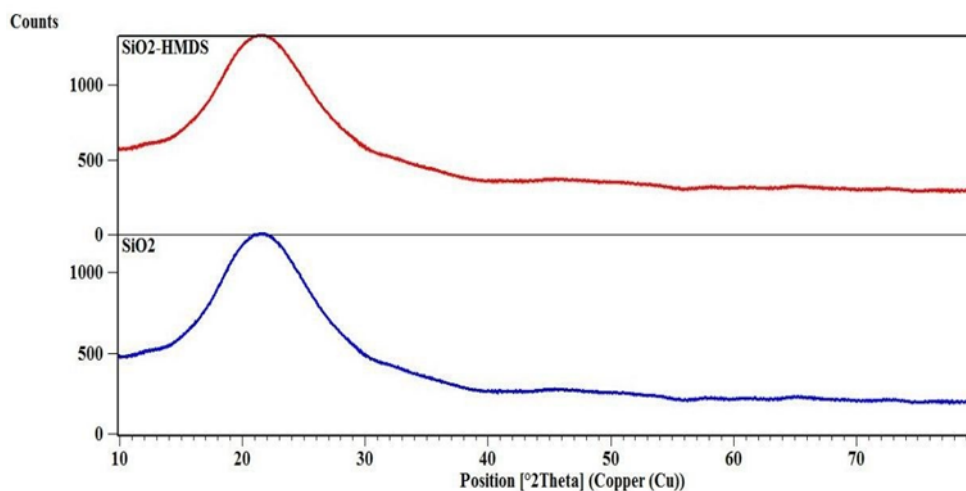
شکل ۴- نتایج آنالیز XRD مربوط به ZnO و APTES_ZnO

در نانوذرات ZnO اصلاح سطحی نشده، یازده پیک مربوط به 2θ در زوایای $31/7$ ، $34/5$ ، $36/3$ ، $47/6$ ، $56/5$ ، $62/7$ ، $66/3$ ، $69/1$ ، $75/5$ و $76/8$ درجه مشاهده شد که به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۰)، (۰۰۲)، (۱۰۱)، (۱۰۲)، (۱۱۰)، (۱۰۳)، (۲۰۰)، (۱۱۲)، (۲۰۱) و (۲۰۲) از ساختار زیرکونیای هگزاگونال است. با توجه به پیک‌های مشاهده شده در این الگو و مطابقت با نمونه استاندارد ZnO (ICSD, 01-089-7102) قابل نتیجه‌گیری است که ساختار نانوذرات قبل و بعد از اصلاح سطح تغییر نکرده است. اندازه نانوذرات ZnO با استفاده از رابطه دبای شرر قابل محاسبه است:

$$D = K\lambda / (\beta \cos\theta) \quad (1)$$

که در آن K ثابت شرر (برابر با $0/9$)، λ طول موج اشعه ایکس، β پهنای پیک در نصف ارتفاع بیشینه (FWHM) و θ زاویه پراش براگ است. با استفاده از این رابطه اندازه ذرات در نانوذرات ZnO و نانوذرات اصلاح سطحی شده به ترتیب برابر با ۵۲ و ۴۹/۲ نانومتر بدست آمد که باز هم موید این نکته است که ذرات ابعاد خود در محدوده نانو را حفظ کرده‌اند [۹].

شکل ۵ الگوی XRD مربوط به نانوذرات SiO_2 قبل و بعد از اصلاح توسط HMDS نشان می‌دهد و تاییدکننده حفظ ساختار آمورف این نوع نانو ذرات می‌باشد. الگوی XRD نانوذرات SiO_2 قبل از اصلاح سطحی یک قله پهن در محدوده ۱۵ تا ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. عدم وجود پیک‌های تیز نشان‌دهنده ساختار آمورف است. پس از اصلاح سطحی، الگوی XRD نانوذرات SiO_2 تغییری نکرده است.

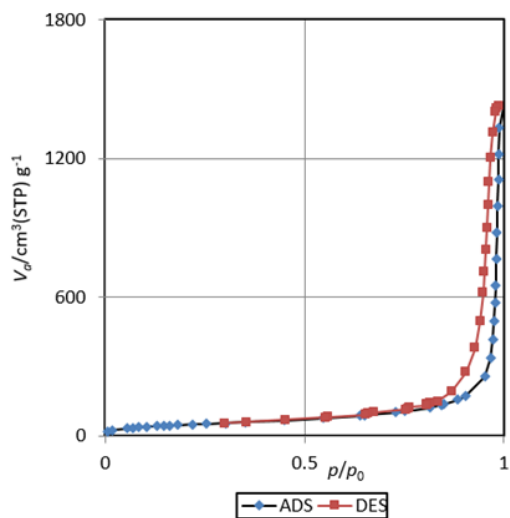


شکل ۵- نتایج آنالیز XRD مربوط به SiO_2 و SiO_2 -HMDS

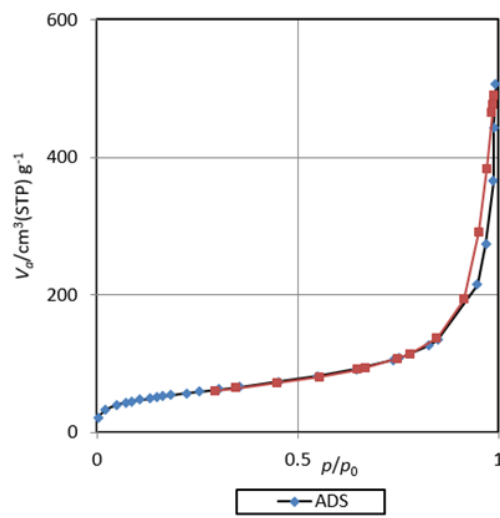
با استفاده از نتایج آنالیز BET، سطح ویژه^۱ نانوذرات قابل محاسبه است. این پارامتر از این جهت حائز اهمیت است که معیاری برای برآورد انرژی سطحی و اندازه ذرات و قابلیت پخش شدن نانوذرات در بستر مورد نظر به دست می‌دهد. شکل‌های ۶ و ۷ نمودارهای جذب و واجذب نانوذرات ZnO و SiO_2 را قبل و بعد از اصلاح سطحی نشان می‌دهد. نمودار ایزوترم جذب و واجذب نانوذرات ZnO و نانوذرات SiO_2 از نوع پنجم هستند. همانگونه که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود پس از اصلاح سطحی نانوذرات، هیستریز مشاهده شده محدود و نسبتاً مسطح شده است که نشان‌دهنده کاهش آگلومراسیون ذرات و کاهش حجم حفرات ایجاد شده مابین ذرات تجمع یافته است. نتایج محاسبات سطح ویژه نانوذرات ZnO و SiO_2 به ترتیب در جدول ۳ آورده شده است. با مقایسه مقادیر موجود در این جداول به می‌توان نتیجه گرفت که سطح ویژه هر دو نوع نانوذرات بعد از عملیات اصلاح سطح افزایش پیدا می‌کند که نشان‌دهنده کاهش میزان آگلومراسیون ذرات پس از اصلاح سطحی است. این امر حاکی از آن است که تمایل به به هم چسبیدگی نانوذرات کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از ویژگی نانو ذرات در جهت بهبود خاصیت مورد نظر می‌توان بهره برد. در مطالعه انجام شده توسط ونگ و همکاران [۲۳] مشخصه‌های حرارتی و فیزیکی نانوکامپوزیت RTV/ZnO بررسی شد. در این مطالعه نانو ذرات ZnO توسط TCA اصلاح سطحی شدند. بر مبنای نتایج گزارش شده سطح ویژه Nano ZnO-TCA و Nano ZnO به ترتیب $54/19 (m^2 g^{-1})$ و $28/73$ گزارش شده است و موید آن است که اصلاح سطح نانوذرات

^۱ specific surface area

موجب بهبود پراکندگی نانوذرات در زمینه خواهد شد.

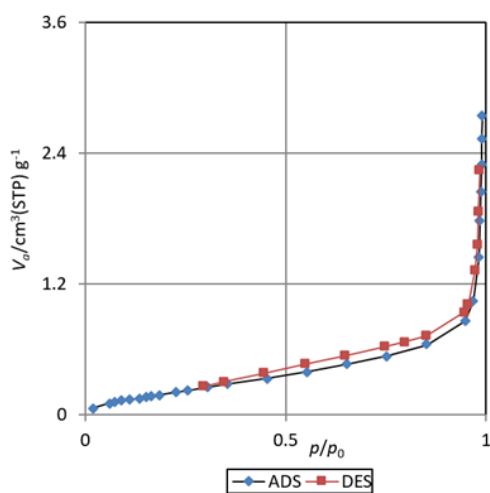


(ب)

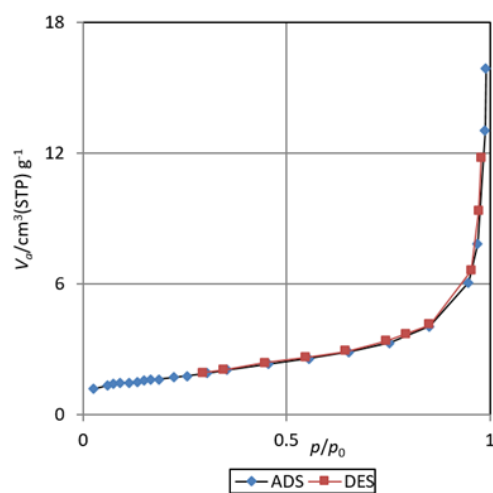


(الف)

شکل ۶- نمودارهای جذب و واجذب مربوط به الف) SiO_2 و ب) $\text{SiO}_2\text{-HMDS}$.



(ب)



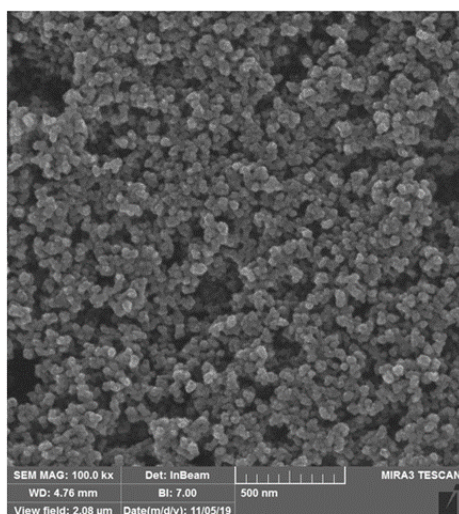
(الف)

شکل ۷- نمودارهای جذب و واجذب مربوط به الف) ZnO و ب) APTES_ZnO .

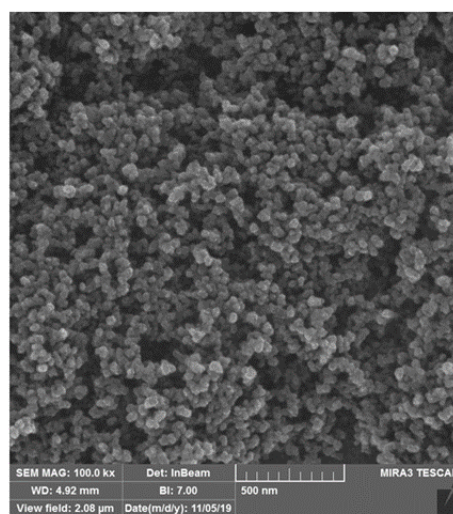
جدول ۳- نتایج محاسبات سطح ویژه نانوذرات ZnO و نانوذرات SiO_2

نمونه	میانگین قطر حفرات (nm)	سطح ویژه ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)
ZnO	۱۵/۴۸۸	۵/۸۶
APTES-ZnO	۱۱/۶۵	۱۳/۰۸۶
SO_2	۴۶/۹۵۸	۱۷۷/۶۸
HMDS- SO_2	۱۴/۶۵۷	۱۹۶/۴۳

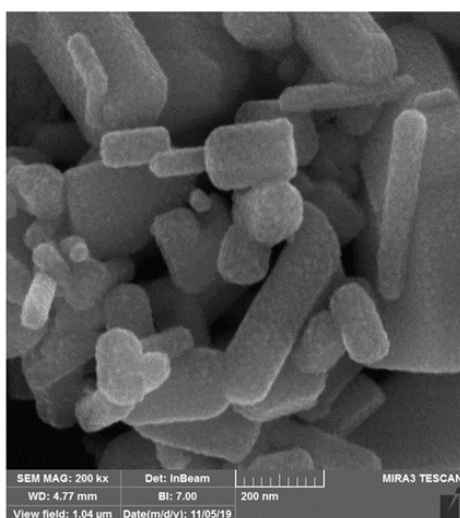
برای اطمینان حاصل کردن از این امر که اصلاح سطح نانوذرات بر شکل و ساختار نانوذرات تاثیر نگذاشته است، تصاویر FESEM مطابق شکل‌های ۸ و ۹ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به این تصاویر به روشنی قابل درک است ساختار نانوذرات در طول پروسه متعادل‌سازی دستخوش تغییر نشده و همچنین مشخصات مورفولوژی نانوذرات از قبیل شکل و اندازه از طریق این تصاویر قابل مقایسه و اندازه‌گیری است. به عبارت دیگر براساس این تصاویر سایز نانوذرات ZnO قبل و بعد از اصلاح، ۴۸ و ۵۴ نانومتر و دارای شکل شش‌گوش است. اندازه ذرات حاصل از تصاویر FESEM با اندازه ذرات محاسبه شده با استفاده از نتایج آنالیز پراش اشعه ایکس همخوانی دارد. پس از سنتز نانوپوشش و به منظور اطمینان از پخش شدن نانو ذرات در RTV مورد استفاده تصاویر FESEM مربوط به RTV و Nano-RTV در شکل ۱۰ آورده شده است که تایید کننده حضور پراکنده نانو ذرات در پوشش مورد استفاده است. این امر تایید می‌کند که اصلاح سطحی نانوذرات با موفقیت انجام شده است.



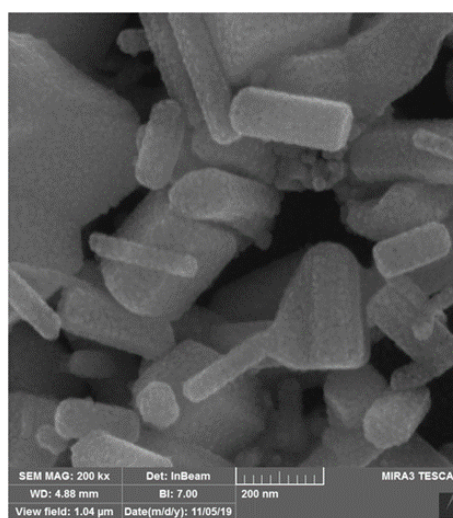
(ب)



(الف)

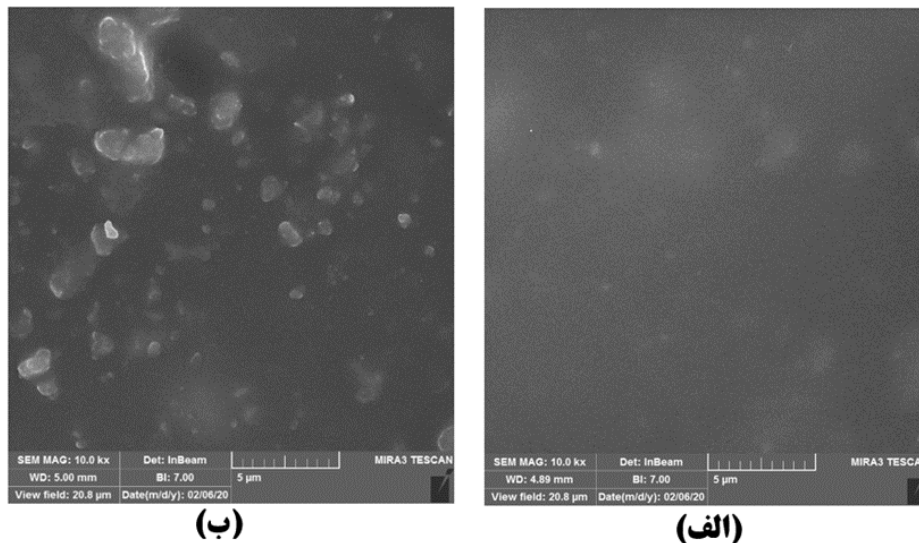
شکل ۸- تصاویر FESEM (الف) nano SiO₂ و (ب) SiO₂-HMDS

(ب)



(الف)

شکل ۹- تصاویر FESEM (الف) nano ZnO و (ب) ZnO-APTES



(ب)

(الف)

شکل ۱۰- تصاویر FESEM مربوط به الف) نانو RTV و ب) RTV

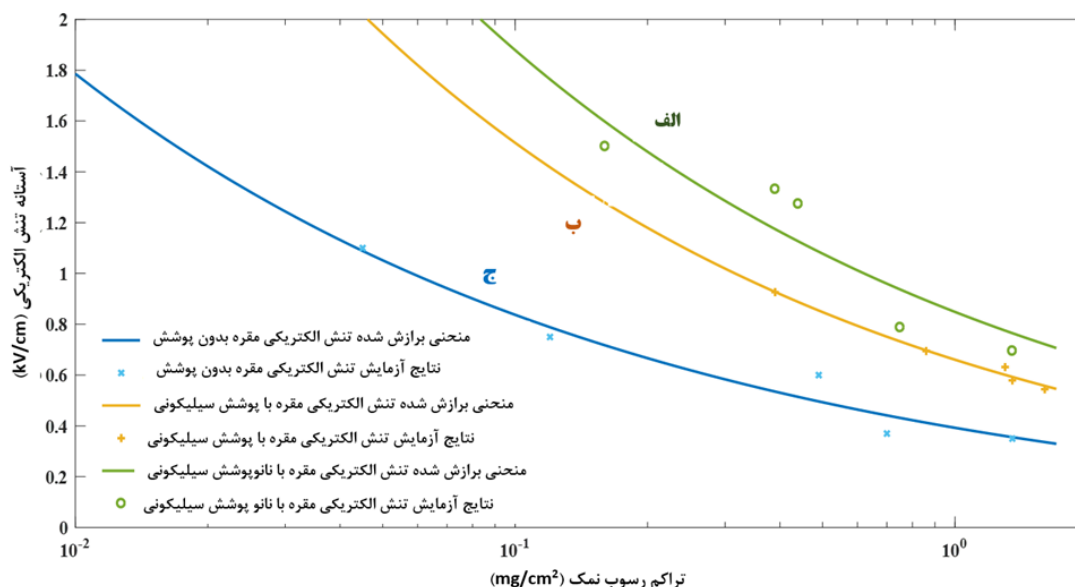
رابط بین مقادیر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی و مقادیر ESDD را با معادله (۲) می‌توان بیان کرد که مقادیر a و b در این رابطه براساس برآزش منحنی و اطلاعات آزمایش‌های عملی بدست‌آمده محاسبه شده است. به منظور مقایسه عملکرد مفره‌های مورد آزمایش در این مقاله، از طریق این معادله نیاز به محاسبه مقدار ESDD در پایان هر ۵ مرحله تکرار آزمایش می‌باشد. برای این منظور بعد از جمع‌آوری میزان آلودگی موجود بر روی سطح هر نمونه با استفاده از یک دستمال نخی تمیز و مقدار ۳۰۰ سی‌سی آب مقطر، مقدار هدایت الکتریکی محلول محاسبه شده است. شکل ۱ مقادیر مختلف ESDD و NSDD برای سطوح مختلف آلودگی را نشان می‌دهد. مقادیر هدایت الکتریکی به‌دست‌آمده در رابطه (۳) که مربوط به محاسبه ESDD است قرار داده شده و مقادیر شدت آلودگی متناظر با ولتاژهای آستانه تخلیه الکتریکی بدست می‌آیند.

$$E = a (ESDD)^b \quad (2)$$

$$ESDD = (5.7 \times \delta_0)^{1.03} \times V_{water} / S \quad (3)$$

که در (۲)، δ_0 مقدار هدایت الکتریکی محاسبه شده محلول آلودگی شسته شده، V_{water} حجم آب مقطر مصرفی و S سطح مفره مورد آزمایش می‌باشد. و با توجه به نتایج بدست آمده و روابط (۲) و (۳) برای سه مفره سرامیکی بدون پوشش و پوشش داده شده با RTV و نانو RTV، نتایج تست تخلیه الکتریکی جزئی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، منحنی (الف) مربوط به نانو پوشش، منحنی (ب) مربوط به پوشش و منحنی (ج) مربوط به مفره سرامیکی بدون پوشش است. هر نقطه از این منحنی نماینده‌ی میانگین اندازه‌گیری‌های مربوط به هر آزمایش در یک سطح آلودگی مشخص است. مقادیر مربوط به محور عمودی بر اساس مقادیر ولتاژ تخلیه الکتریکی در واحد فاصله نشتی مفره بیان شده است و مقادیر محور افقی میزان شدت آلودگی مصنوعی ایجاد شده (ESDD) را نشان می‌دهد. بر اساس این منحنی، می‌توان کاهش قابل توجه در مقادیر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی با افزایش میزان آلودگی را مشاهده کرد. علت این امر ایجاد رسانایی بیشتر سطح مفره مورد آزمایش در آلودگی‌های بیشتر و در نتیجه وقوع پدیده تخلیه الکتریکی جزئی در مقادیر ولتاژ پایین‌تر می‌باشد. مفره سرامیکی بدون پوشش در محیط‌هایی با آلودگی متوسط و زیاد و خیلی زیاد عملکرد مناسبی از نظر تخلیه الکتریکی نشان نداده است. منحنی (ب) در شکل ۱۱ مربوط به مفره پوشش داده شده با پوشش پلیمری RTV است. از نحوه تغییرات مقادیر ولتاژ در واحد فاصله خزشی در مقابل شدت آلودگی به راحتی قابل استنباط است که در این مورد هم با افزایش شدت آلودگی مقادیر آستانه ولتاژ برای بروز پدیده تخلیه الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. اما در مقایسه با منحنی (الف) نرخ این تغییرات با شیب کمتری صورت گرفته و به طور کلی مقادیر بدست آمده ولتاژ مربوط به نمونه پوشش داده شده در هر سطح آلودگی در مقایسه با مفره بدون پوشش بالاتر است که این نشان‌دهنده‌ی بهبود عملکردی حاصل از استفاده از پوشش‌های پلیمری RTV است. پوشش به کار رفته با بهبود خواصی از جمله آبگریزی و خواص عایقی، باعث می‌شود که تخلیه الکتریکی در ولتاژ بالاتری رخ دهد. در این مفره

شاهد افزایش کارایی به ویژه در محیط‌هایی با آلودگی متوسط و سنگین هستیم. منحنی (الف) در شکل ۱۱ مربوط به مفره نانو پوشش داده شده است. در این نمونه افزایش ولتاژ تخلیه الکتریکی در مقایسه با دو مفره دیگر دیده می‌شود. بهبود خاصیت الکتریکی عایق در این مفره به دلیل استفاده از نانو ذرات به کار رفته و در نتیجه عملکرد مناسب نمونه در محیط‌هایی حتی با آلودگی خیلی زیاد است. نتایج بدست آمده می‌توانند به عنوان معیاری از استقامت الکتریکی مفره‌ها در حضور و عدم حضور پوشش و نانوپوشش‌ها در مدل‌های عایقی استفاده شوند. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات مناسب می‌تواند باعث بهبود عملکرد الکتریکی مفره شده و در مواردی که نانو ذرات به درستی انتخاب و مورد استفاده قرار گیرند بهبود چشمگیری در خواص عایقی مفره رخ خواهد داد. از آنجا که تخمین طول عمر و نرخ خرابی تجهیزات الکتریکی بر اساس استقامت الکتریکی و مکانیکی و حرارتی و اطلاعات آماری بدست آمده از بهره‌برداری و رخدادهای خرابی آنها قابل استحصال است، انتظار می‌رود با استفاده از این نتایج که نشان دهنده‌ی ارتقا خاصیت عایقی تجهیز مورد نظر می‌باشند، قابلیت اطمینان بالاتری در شبکه قدرت در صورت استفاده از مواد با خاصیت بهتر حاصل شود. شکل ۵ نتایج تست اندازه‌گیری زاویه تماس را نشان می‌دهد. با مقایسه مقادیر مربوطه مشاهده می‌شود که عملکرد آبگریزی نانوپوشش در مقایسه با پوشش سیلیکونی RTV خالص بهبود پیدا کرده است. افزایش زاویه تماس تاییدکننده بهبود عملکردی مفره نانوپوشش داده شده در شرایط محیطی مرطوب و آلوده است.



شکل ۱۱- میزان تنش الکتریکی در آلودگی‌های مختلف برای مفره با (الف) نانو پوشش. (ب) پوشش. (ج) بدون پوشش

یکی از ویژگی‌های اصلی پوشش در نواحی اقلیمی خاص، اهمیت چسبندگی پوشش به سطح سرامیک است. روشن است که وزش باد همراه با مقادیر زیاد نمک، سبب فرسایش و پدیدگی پوشش می‌شود. پس از بلند شدن پوشش از روی سطح، نفوذ آلودگی اشباع از نمک به فصل مشترک پوشش و سطح سرامیک، سبب ایجاد شرایط ناخواسته برای کارایی پوشش می‌گردد. به همین دلایل، کاربرد موفق پوشش در محیط‌های بیابانی نیازمند چسبندگی خوب به سطح سرامیک می‌باشد [۱۰]. شکل ۱۲ تصویر نمونه‌ها قبل و بعد از ظاهر نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمون سنجش چسبندگی با آب جوش نشان می‌دهد. در تست چسبندگی ملاک قبولی آزمون، عدم نفوذ آب بین لایه RTV و سرامیک مفره و عدم ایجاد حباب زیر لایه RTV ملاک قبولی آزمون است. نتیجه آزمون با استاندارد مطابقت دارد. تخریب نمونه‌ها در نمونه مفره حاوی نانوپوشش ۲ کمتر از سایر نمونه‌ها بود.



نمونه قبل از قرار گرفتن در آب جوش



نمونه پس از قرار گرفتن در آب جوش

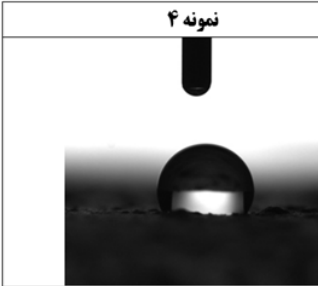
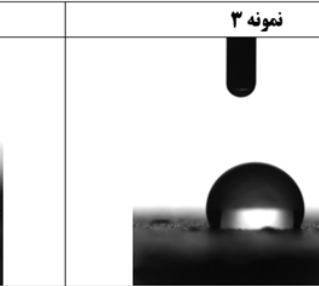
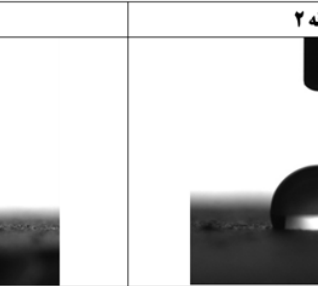
شکل ۱۲- ظاهر نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمون سنجش چسبندگی با آب جوش

پوشش‌های لاستیک سیلیکونی بر روی سطح مقره‌های سرامیکی از قبل نصب شده اعمال می‌شوند و باعث ایجاد خاصیت آبگریزی در سطح می‌شوند [۳۲]. تشکیل قطرات آب بر روی سطح سیلگارد شده ناشی از این خاصیت پوشش‌های عایقی سیلیکونی می‌باشد که مانع از تشکیل یک مسیر خطی از آب گردیده و بدینوسیله از کاهش سطح عایقی مقره و بروز تخلیه الکتریکی جلوگیری خواهد نمود [۲]. آب گریزی از خواص استثنائی این محصول می‌باشد که بعد از سال‌ها از بین نمی‌رود. RTV قادر است خاصیت آب گریزی خود را بعد از آلوده شدن احیاء نماید. خاصیت Hydrophobic از تشکیل یک نوار آب بر روی سطح سیلیکون جلوگیری می‌کند و آب بر روی آن به صورت قطره قطره باقی می‌ماند. به همین دلیل مقاومت سطحی آن کاهش پیدا نمی‌کند و احتمال ایجاد آرک در این نوع مقره‌ها به حداقل می‌رسد. [۳۳, ۳۴] پیوند قوی مولکولی سیلیکون باعث می‌شود که اگر لایه‌ای از آلودگی یا غبار بر روی سطح آن بنشیند مولکول‌های سیلیکون به سمت بالا حرکت کرده و لایه زاید را در برگیرند به خاطر همین طرح خارجی پوشش همواره سیلیکونی است به این عمل خاصیت بازیافت (RECOVERY) می‌گویند [۲]. شکل ۱۳ افزایش آبگریزی سطح مقره حاوی نانوپوشش ۱ را نشان می‌دهد. جهت اندازه‌گیری کاهش خاصیت آبگریزی معمولاً از اندازه گیری زاویه تماس (ترکندگی) استفاده می‌شود.



شکل ۱۳- خاصیت آبگریزی سطح مقره بعد از اعمال پوشش RTV

شکل ۱۴ نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس برای مفره‌های پوشش داده شده با RTV، نانوپوشش ۱ و نانوپوشش ۲ را نشان می‌دهد. مقادیر گزارش شده، متوسط مقدار چهار اندازه‌گیری انجام شده برای هر نمونه در نقاط مختلف سطح مورد بررسی با مقادیر به ترتیب ۱۰۳، ۱۲۸ و ۱۱۴ درجه می‌باشند. با توجه به این مقادیر، این نتیجه حاصل می‌شود که تمامی پوشش‌های استفاده شده خاصیت آبگریزی را دارند و در دسته‌بندی سطوح آبگریز قرار دارند. همچنین نمونه پوشش داده شده با نانوپوشش ۱ در مقایسه با نانوپوشش ۲، میزان آبگریزی بیشتری از خود نشان داده است. این در حالی است که نانوپوشش ۲ در مقایسه با پوشش RTV خالص عملکرد آبگریزی بهتری دارد. این نتایج با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی در تطابق است. به عبارت دیگر اگرچه افزایش آبگریزی یکی از موارد تاثیرگذار در عملکرد بهتر الکتریکی مفره در شرایط مرطوب و آلوده است اما رابطه مستقیمی بین بهبود سطح آبگریزی و عملکرد الکتریکی مفره‌های پوشش داده شده وجود ندارد و نوع نانو ذرات درصد انتخابی و ویژگی‌های نانوذرات، همگی در عملکرد نهایی آنها موثر است.

نمونه ۴	نمونه ۳	نمونه ۲
		
زاویه تماس: $128/4 \pm 3/4^\circ$	زاویه تماس: $114/1 \pm 1/6^\circ$	زاویه تماس: $103/8 \pm 1/5^\circ$

شکل ۱۴- نتایج حاصل از اندازه‌گیری زاویه تماس

در پژوهش انجام شده توسط مومن و فرزانه [۲۲]، یک پوشش پایدار نانوکامپوزیتی با خاصیت ابرآبگریزی بر پایه لاستیک سیلیکونی و حاوی نانوذرات ZnO و SiO₂ مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه حاکی از دستیابی به زاویه تماس 162° بود که در تطابق با نتایج پژوهش حاضر است.

در صورت رسوب ذرات آلودگی روی لایه پوشش‌دهنده، سیلیکون‌های با وزن مولکولی کم (LMW)^۱ از مواد بالک سیلیکون به لایه آلودگی گسترش یافته و در مدت زمان کوتاهی این ذرات را احاطه می‌کنند و در نتیجه سطح عایق دوباره آبگریز می‌شود (شکل ۱۴) [۳۵، ۳۶]. همچنین بعد از انجام عملیات پوشش‌دهی مفره‌ها، به علت چسبندگی بسیار قوی پوشش با سطح مفره، بخشی از مفره که دچار ترک مویی ترمیم می‌شود و از بروز مشکلات بعدی بطور کامل جلوگیری می‌نماید [۳۷].

۴- نتیجه‌گیری

امروزه خطوط انتقال با توجه به افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و تولید انرژی الکتریکی در شبکه قدرت از اهمیت بالایی برخوردار هستند. و در نتیجه مسائل مربوط به آن‌ها از جمله برنامه‌ریزی توسعه خطوط و همچنین ارزیابی قابلیت اطمینان و تعمیر و نگهداری اجزای آن می‌تواند کمک شایانی در راستای بهبود عملکرد سیستم قدرت باشد. در این مقاله ابتدا اصلاح سطحی نانوذرات ZnO و SiO₂ به ترتیب با استفاده از APTES و HDMS با هدف بهبود توزیع نانوذرات و جلوگیری از آگلومراسیون انجام شد. با استفاده از روش‌های آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آنالیز BET و میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) اصلاح سطح نانوذرات بررسی شد. در مرحله بعد نانوذرات اصلاح سطحی شده به پایه RTV اضافه شدند و تاثیر استفاده از پوشش‌های پلیمری RTV و نانو پوشش بهبودیافته بر ولتاژ آستانه تخلیه الکتریکی مفره‌های سرامیکی در حضور آلودگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و نتایج عملی بدست آمده از آزمایش‌های مربوطه با استفاده از تطابق دادن با منحنی مناسب مقایسه شد. برای این منظور آزمون تحقیقاتی مه تمیز در سطوح مختلف آلودگی بر روی سه مفره آماده شده

¹ low molecular weight

انجام شد و نتایج مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شد. نتایج نشان داد که مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV بیشترین و مقره بدون پوشش کمترین ولتاژ تخلیه الکتریکی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که خاصیت چسبندگی پوشش لاستیک سیلیکونی با افزودن نانوذرات بهبود یافته است. همچنین نتایج تست اندازه‌گیری زاویه تماس نشان داد که مقره دارای نانوپوشش کامپوزیتی لاستیک سیلیکونی RTV حاوی نانوذرات SiO_2 بیشترین آبگریزی را نشان می‌دهد. بر مبنای نتایج، با افزایش میزان آبگریزی جریان نشتی کاهش می‌یابد. بر مبنای نتایج، احتمال رخداد تخلیه الکتریکی در مقره حاوی نانوپوشش لاستیک سیلیکونی به ویژه در محیط‌های با آلودگی زیاد کاهش یافته و این امر قابلیت اطمینان بالاتری را در سطح شبکه قدرت ایجاد می‌کند.

منابع

- [1] P. Bala, R. Bose, and S. Chatterjee, "Electric stress analysis of a 11 kV RTV silicone rubber coated porcelain insulator," 2016 - Bienn. Int. Conf. Power Energy Syst. Towar. Sustain. Energy, PESTSE 2016, 2016, doi: 10.1109/PESTSE.2016.7516482.
- [2] Suwarno and A. B. Wibowo, "Increasing the performances of various types' outdoor insulators by using RTV silicone rubber coating," Int. J. Electr. Eng. Informatics, vol. 4, no. 4, pp. 608–619, 2012, doi: 10.15676/ijeei.2012.4.4.7.
- [3] S. Braini, "Coatings for Outdoor High Voltage Insulators," Thesis Submitt. to Cardiff Univ. candidature degree PhD, pp. 1–182, 2013.
- [4] A. Ibrahim, L. Nasrat, and H. Elassal, "Improvement of Electrical Performance for Porcelain Insulators Using Silicone Rubber Coating," Int. J. Innov. Res. Electr., vol. 2, no. 8, pp. 2321–5526, 2014, [Online]. Available: www.ijireice.com.
- [5] M. Taghvaei, M. Sedighzadeh, N. NayebPashae, and A. S. Fini, "Reliability assessment of RTV and nano-RTV-coated insulators concerning contamination severity," Electr. Power Syst. Res., vol. 191, no. June 2020, p. 106892, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106892.
- [6] S. Ansoerge, "Improvement of Silicone Rubber for High Voltage Applications by Addition of Fillers," no. 22763, p. 157, 2015, [Online]. Available: http://hdl.handle.net/20.500.11850/155372.
- [7] Rachmawati, D. Fauziah, H. Alfiadi, and Suwarno, "Leakage current characteristics study on electrical equivalent circuit of field-Aged rtv silicone rubber coated and noncoated insulators in a coastal area," Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. ICHVEPS 2017 - Proceeding, vol. 2017-Janua, pp. 455–459, 2017, doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225889.
- [8] E.A. Cherney; R. Hackam; S.H. Kim, "Porcelain insulator maintenance with RTV silicone rubber coatings", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, pp. 1177–1181, 1991.
- [9] M. Taghvaei, M. Sedighzadeh, N. NayebPashae, and A. Sheikhi Fini, "Thermal stability of nano RTV vs. RTV coatings in porcelain insulators," Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 20, no. May, p. 100696, 2020, doi: 10.1016/j.tsep.2020.100696.
- [10] C. Zhang, S. Wan, L. Wang, and Z. Guan, "Pollution flashover performance of 220 kV glass insulator strings covered with incomplete spraying PRTV coatings," Proc. 2012 IEEE Int. Power Modul. High Volt. Conf. IPMHVC 2012, pp. 443–445, 2012, doi: 10.1109/IPMHVC.2012.6518775.
- [11] S. Ilhan and E. A. Cherney, "Comparative tests on RTV silicone rubber coated porcelain suspension insulators in a salt-fog chamber," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 25, no. 3, pp. 947–953, 2018, doi: 10.1109/TDEI.2018.006968.
- [12] Wacker Chemie AG, "Room temperature vulcanizing (rtv) silicones," 2018.

[۱۳] غریبی، ع. وزیری، ه. و قاسمی، و.، "بررسی تاثیر شرایط جوی بر روی عملکرد مقره‌های فشارقوی در مناطق جنوبی استان بوشهر و ارائه راهکار مناسب جهت مقابله با آن"، دومین کنفرانس بین المللی مهندسی برق، ۱۳۹۶.

[۱۴] جزایری، ح. احسانی، م. و فرهنگ، ف. "بررسی نقش پوشش‌های سیلیکونی RTV در بهبود رفتار مقره‌های سرامیکی در

محیط‌های آلوده"، مجله علوم و فناوری رنگ، ۲(۱)، ۹-۲۲، ۱۳۸۷.

- [15] E. A. Cherney et al., "RTV silicone rubber pre-coated ceramic insulators for transmission lines," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 20, no. 1, pp. 237-244, 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6451363.
- [16] M. M. Hussain, S. Farokhi, S. G. McMeekin, and M. Farzaneh, "Effect of cold fog on leakage current characteristics of polluted insulators," 2015 Int. Conf. Cond. Assess. Tech. Electr. Syst. CATCON 2015 - Proc., pp. 163-167, 2016, doi: 10.1109/CATCON.2015.7449527.
- [17] Du, B. X., Tao Han, and J. G. Su. "Tree characteristics in silicone rubber/SiO₂ nanocomposites under low temperature." IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 21, no. 2, pp. 503-510, 2014.
- [18] Yang, Huan, Qun Gao, Yunting Xie, Qian Chen, Chunfa Ouyang, Yaomin Xu, and Xiaoting Ji. "Effect of SiO₂ and TiO₂ nanoparticle on the properties of phenyl silicone rubber." Journal of Applied Polymer Science 132, no. 46, 2015.
- [19] Wu, Lianfeng, Xianming Wang, Liang Ning, Jianjun Han, Zhong Wan, and Min Lu. "Improvement of silicone rubber properties by addition of nano-SiO₂ particles." Journal of applied biomaterials & functional materials 14, no. 1_suppl, pp. 11-14, 2016.
- [20] El-Naggar, Mehrez E., Ahmed G. Hassabo, Amina L. Mohamed, and Tharwat I. Shaheen. "Surface modification of SiO₂ coated ZnO nanoparticles for multifunctional cotton fabrics." Journal of colloid and interface science 498, pp. 413-422, 2017.
- [21] Li, Rui, Jianzhong Pei, and Changle Sun. "Effect of nano-ZnO with modified surface on properties of bitumen." Construction and Building Materials, no. 98, pp. 656-661, 2015.
- [22] G. Momen and M. Farzaneh, "A ZnO-based nanocomposite coating with ultra-water repellent properties," Appl. Surf. Sci., vol. 258, no. 15, pp. 5723-5728, 2012, doi: 10.1016/j.apsusc.2012.02.074.
- [23] Wang, Rui, Congzhen Xie, Leilei Zeng, and Huasong Xu. "Thermal decomposition behavior and kinetics of nanocomposites at low-modified ZnO content." RSC advances 9, no. 2, pp. 790-800, 2019.
- [24] Grasset, F., Saito, N., Li, D., Park, D., Sakaguchi, I., Ohashi, N., Haneda, H., Roisnel, T., Mornet, S. and Duguët, E., Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane. Journal of Alloys and Compounds, no. 360, vol. 1-2, pp.298-311, 2003.
- [25] Wu, Yongling Linda, A. I. Y. Tok, Freddy Yin Chiang Boey, Xian Ting Zeng, and Xin Hai Zhang. "Surface modification of ZnO nanocrystals." Applied Surface Science 253, no. 12, pp. 5473-5479, 2007.
- [26] Wu, Yongling Linda, A. I. Y. Tok, Freddy Yin Chiang Boey, Xian Ting Zeng, and Xin Hai Zhang. "Surface modification of ZnO nanocrystals." Applied Surface Science, no. 253, vol. 12, pp. 5473-5479, 2007.
- [27] Arreche, R.A., Blanco, M.N., Martínez, J.M. and Vázquez, P.G., Structural synthesis of hydrophilic and hydrophobic silica for its use in food packaging films. Procedia Materials Science, 1, pp.572-579, 2012.
- [28] Nurulizzah Ishak, N. "Synthesis and Characterization of Nano Silica from Local Siliceous Sand", (2010).
- [29] ISO 8894-2, International Standard International Standard, vol. 2006.
- [30] IEC TS 60815-4:2016, Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 4: Insulators for d.c. systems, pp. 1-8, 2016.
- [31] IEEE, "Guide for the Application, Maintenance, and Evaluation of Room Temperature Vulcanizing (RTV) Silicone Rubber Coatings for Outdoor Ceramic Insulators," no. April. p. 18, 2002.
- [32] K. Siderakis and D. Agoris, "Performance of RTV silicone rubber coatings installed in coastal systems," Electr. Power Syst. Res., vol. 78, no. 2, pp. 248-254, 2008, doi: 10.1016/j.epr.2007.02.013.
- [33] S. H. Kim, R. Hackam, and E. A. Cherney, "Suppression mechanism of leakage current on RTV coated porcelain and silicone rubber insulators," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 6, no. 4, pp. 1549-1556, 1991, doi: 10.1109/61.97691.
- [34] S. Huzaimah Kamal Hamadi, M. Isa, S. Nizam Md Arshad Hashim, and M. Othman, "Review on RTV Silicone Rubber Coatings Insulator for Transmission Lines," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 864,

- no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/864/1/012188.
- [35] A. Theodoridis, * -Michael G Danikas, and * -Johannes Soulis, "Room Temperature Vulcanized (Rtv) Silicone Rubber Coatings on Glass and Porcelain Insulators: an Effort To Model Their Behaviour Under Contaminated Conditions," J. Electr. Eng., vol. 52, no. 4, pp. 63–67, 2001.
- [36] Z. Jia, H. Gao, Z. Guan, L. Wang, and J. Yang, "Study on hydrophobicity transfer of RTV coatings based on a modification of absorption and cohesion theory," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 13, no. 6, pp. 1317–1324, 2006, doi: 10.1109/TDEI.2006.258203.
- [37] H. Deng and R. Hackam, "Electrical performance of RTV silicone rubber coating of different thicknesses on porcelain," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 12, no. 2, pp. 857–866, 1997, doi: 10.1109/61.584405.

اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران

اعضای حقوقی ویژه انجمن سرامیک ایران

<p>لعبیران مدیر عامل: مهندس نادر رضایی منش آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان گاندی شمالی، کوی شهید صانعی، شماره ۲۵ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۹۵۱۴۱-۲ نشانی سایت: www.loabiran.com</p> 	<p>روکا سرام یزد مدیر عامل: مهندس خیاط آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان شهید بهشتی، خیابان سرافراز، کوچه دوازدهم، پلاک ۱۶ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۴۱۰۵۱۰۰۰ نشانی سایت: www.rokaceram.com</p> 
<p>شرکت لیمون چینی آراد مدیر عامل: مهندس مسعود ایمانی آدرس کارخانه: مشهد، شهرک صنعتی توس، فاز یک، بلوار صنعت، نبش صنعت ۷ تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۵۴۱۲۴۲۴ نشانی سایت: www.lemonporcelainarad.ir</p> 	<p>شرکت سهامی شیشه قزوین (عام) مدیر عامل: مهندس محمدرضا علاقبندیان آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان استاد مطهری، خیابان شهید سرافراز، پلاک ۳۴ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۳۱۵۱۵ نشانی سایت: www.ghazvinglass.com</p>
<p>شرکت آسانسوز (آرمان صنعت آذر مهر) مدیر عامل: مهندس سرمد اسلامی آدرس دفتر مرکزی: تهران، شهرک غرب، خیابان زرافشان شمالی، کوچه دانشور، پلاک ۱۱، واحد ۷ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱۲۲۳۷۶۵۹۱-۳</p> 	<p>تهیه و تولید مواد نسوز کشور مدیر عامل: مهندس باقری آدرس دفتر مرکزی: تهران، یوسف آباد، خیابان ابن سینا، نبش خیابان ۳۱، شماره ۸۲ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۱۲۵۶۲ نشانی سایت: www.irrep.com</p> 
<p>شرکت پویا همراه سرام (بازرگانی و مهندسی مشاور) مدیر عامل: مهندس محسنی طارمسری آدرس دفتر مرکزی: تهران، تهرانپارس، خیابان رشید، نبش خیابان ۱۴۴ غربی، ساختمان امیرکبیر، طبقه ۲، واحد ۱۰ تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۷۷۲۹۵۴۹۸ نشانی سایت: www.phceram.com</p> 	<p>Glassworks Hounsell Ltd مدیر عامل: Mr. William Brinkman آدرس دفتر مرکزی: Glassworks Hounsell, Park Lane, Halesowen, West Midlands, United Kingdom تلفن دفتر مرکزی: ۴۴-(۰)-۱۳۸۴۵۶۰۶ فاکس: ۴۴-(۰)-۱۳۸۴۵۶۱۳۶ نشانی سایت: www.glassworkshounsell.co.uk</p> 
<p>مجتمع کارخانجات تولیدی توس چینی مدیر عامل: مهندس کامران نجار آدرس دفتر مرکزی: مشهد، ضلع غربی میدان احمدآباد، پلاک ۱۲ تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۸۴۱۶۸۸۰ نشانی سایت: www.toosporcelain.com</p> 	

اعضای حقوقی ممتاز انجمن سرمایه‌گذاران ایران

چینی بهداشتی آرمیتاژ

مدیرعامل: مهندس محمدحسین وکیلی مقدم

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان ونک، پاساژ تک، طبقه دوم، آپارتمان شماره ۷

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۹۰۲۲۷

نشانی سایت: www.armitagesw.com



دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

مدیریت: دکتر متین

آدرس: دزفول، کوی آزادگان،

دانشگاه آزاد اسلامی

تلفن دفتر مرکزی: ۰۶۴-۱۶۲۶۲۰۹۰

نشانی سایت: www.iaud.ac.ir



دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات خوزستان

مدیریت: دکتر لک

آدرس: اهواز، سه‌راه فرودگاه، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

تلفن دفتر مرکزی: ۰۶۱-۳۴۴۵۷۱۷۴

نشانی سایت: www.khouzestan.srbiau.ac.ir



شایراد تجارت پارس

مدیرعامل: مهندس اتحادی

آدرس: تهران، خیابان آفریقا، خیابان فرزاد

غربی، پلاک ۸۰، واحد ۱۱

تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۴۸۳۱۰

نشانی سایت: www.shyrad.com



شرکت دانش بنیان شیمیایی درفش کاویان راد

مدیرعامل: دکتر مهدی احمدی

آدرس دفتر مرکزی: کیلومتر ۴۰ جاده

مشهد، فریمان، شهرک صنعتی کاویان، فاز

یکم، خیابان صنعت ۱۳

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۴۶۹۳۵۸۴



شرکت آماد فیدار ونداد

مدیرعامل: مهندس فرشید رحمتی

آدرس: بخشی مرکزی شهر تهران،

محله ورد آورد، خیابان ۶۳، بن بست اول،

پلاک ۴، طبقه همکف

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱۴۴۹۸۸۹۹۰



کاشی کسری

مدیرعامل: مهندس روشنفکر

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقا، خیابان

ناهدید شرقی، پلاک ۱۲، طبقه ۳ و ۵

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۰۱۰۱۴۰

نشانی سایت: www.kasratileco.com



کاشی گرانیث و کاشی لعاب زهره

مدیرعامل: دکتر مجید

روستایی فیروزآباد

آدرس دفتر مرکزی: خراسان

رضوی، کاشمر، کیلومتر ۱۲ محور کاشمر به مشهد، جنب شهرک

صنعتی، شرکت کاشی زهره کاشمر

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۵۵۳۸۳۵۹۱

نشانی سایت: www.zohrehtile.com



فرآورده‌های نسوز آذر

مدیرعامل: مهندس سلیمانی فرد

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از پارک ساعی،

کوچه ساعی ۲، روبروی مدرسه پسرانه هاتف، پلاک ۳۱، واحد منفی ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۸۸۲۰۹۵

نشانی سایت: www.azarref.ir



فرآورده‌های نسوز ایران

مدیرعامل: مهندس تدین

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان بهار شیراز، خیابان

سلیمان خاطر، بعد از ملایری پور، پلاک ۵۱، واحد ۳

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۳۴۳۴۰۸

نشانی سایت: www.irefco.ir



شرکت سازه سرمایه‌گذار و مواد ایرانیان

مدیرعامل: مهندس بهزاد نصیری

آدرس: بخش مرکزی شهر تهران، محله وردآورد، خیابان ۶۳ بن بست

اول، پلاک ۴، طبقه اول

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱۴۴۹۸۸۹۹۰

شرکت صنایع یافته‌های سرمایه‌گذاری پیشرفته

مدیرعامل: مهندس امیراحسان ظهیری

آدرس: مشهد، خیابان جانباز، برج اداری پاژ شماره ۲، طبقه ۹، واحد

۹۰۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳۷۰۵۷۳۷۲

اعضای حقوقی انجمن سرامیک ایران

آپادانا سرام

مدیر عامل: مهندس بابایی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان

ملاصدرا، روبروی بیمارستان بقیه‌الله، کوچه

گلدشت، گلدشت یکم، پلاک ۸

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۴۳۱۰۰۰۰

نشانی سایت: www.apadanaceram.com



آریا تهران سرام

مدیر عامل: محمد علی سلیمانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیرازی

جنوبی، خیابان اتحاد، پلاک ۴، واحد ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۵۹۶۱۰



ایران ایمدی

مدیر عامل: مهندس مطلب لو

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان

شیراز شمالی، نبش کوچه شهریار،

ساختمان ۳۳، واحد ۱۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۴۷۰۷۱

نشانی سایت: www.imdco.net



اشکان پارت آفرین

مدیر عامل: دکتر غفاری

آدرس دفتر مرکزی:

کرج، گلشهر ویلا رودکی غربی، پلاک

۲۷۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۶-۳۶۶۷۰۸۳۶

پارس کائولن

مدیر عامل: مهندس صمدی

آدرس: طیس، نرسیده به جو خواه،

معدن کائولن پارس

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۵۵۷۳

نشانی سایت: www.parskaolin.com



پژوهشگاه علوم و فناوری رنگ

مدیریت: دکتر رنجبر

آدرس دفتر مرکزی: بزرگراه

صیاد شیرازی شمالی، خروجی لویزان، میدان حسین‌آباد، خیابان

وفامنش، نبش کوچه شمس، پلاک ۵۹

تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۴۴۱۸۴

نشانی سایت: www.icrc.ac.ir



پژوهشگاه مواد و انرژی

مدیریت: دکتر صالحی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان آرژانتین،

انتهای خیابان الوند، کوچه جویین، پلاک ۱۶

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۷۱۶۲۶-۲۷

نشانی سایت: www.merc.ac.ir



پیشرو ذوب اتور

مدیر عامل: مهندس ملایی داریانی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان احمد

قصیر، کوچه یکم، پلاک ۶، واحد ۱۰

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۵۴۹۸۸۴

نشانی سایت: www.pishrozob.com



پیشگامان سرامیک برسام

مدیر عامل: مهندس سرجهانی

آدرس دفتر مرکزی: شیراز، بلوار امیرکبیر برج صنعت

ورودی ۳، طبقه ۴، واحد ۴۱۷

تلفن دفتر مرکزی: ۰۷۱-۳۸۳۸۵۴۴۴

نشانی سایت: www.barsamceram.com



تولیدی و صنعتی سامان کاشی

مدیر عامل: مهندس سیدمحسنی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، بلوار میرداماد، بین

نفت و مدرس، شماره ۲۳۷، طبقه ۱

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۲۵۸۸۲۱

نشانی سایت: www.samantile.com



تولیدی و مهندسی نسوزین

مدیر عامل: مهندس زرعیان
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان
 آرژانتین، خیابان بیهقی، خیابان دوازدهم
 شرقی، پلاک ۲، طبقه ۳، شماره ۶
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۵۰۴۵۹۱
 نشانی سایت: www.nasoozin.com

تهیه و تولید خاک نسوز استقلال آباده

مدیر عامل: مهندس زارعی
 آدرس دفتر مرکزی:
 آباده، چهارراه جوادیه
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۷۱-۴۴۳۳۷۹۹۷

تهیه و تولید مواد اولیه آریاکانی اسپادانا

مدیر عامل: دکتر پویامهر
 آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان ملاصدرا، خیابان پانزدهم،
 پلاک ۳۴، واحد ۳
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱۳-۶۶۱۷۵۳۷-۸

تهیه و تولید مواد نسوز کشور

مدیر عامل: مهندس باقری
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، یوسف‌آباد، خیابان
 ابن سینا، نبش خیابان ۳۱،
 شماره ۸۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۱۲۵۶۲
 نشانی سایت: www.irrep.com

چینی اصفهان

مدیر عامل: مهندس جهانبانی
 آدرس: اصفهان، جاده دولت‌آباد،
 خیابان بهارستان، اولین فرعی سمت چپ، خیابان خوشانی
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱-۴۵۸۳۶۲۰۰

چینی بهداشتی ارس

مدیر عامل: مهندس حسین پور
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا،
 خیابان شیخ بهایی، میدان شیخ بهایی، برج صدف، طبقه ۴، واحد ۶۴
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۶۰۶۵۰۸
 نشانی سایت: www.arasind.com

چینی زرین ایران

مدیر عامل: مهندس قصاعی
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان
 ونک، ساختمان شماره ۲۵
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۷۰۰۴۴
 نشانی سایت: www.zariniran.com

خاک چینی ایران

شرکت صنایع
 خاک چینی ایران

مدیر عامل: دکتر رستمی
 آدرس دفتر مرکزی: خیابان ولیعصر، نرسیده به
 پل پارک وی، کوچه خاکزاد، پلاک ۲۱، طبقه اول
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۰۱۸۱۰۷

دانشگاه ملایر

مدیریت: دکتر علیرضا سوری
 آدرس: دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و
 مهندسی، گروه مهندسی مواد
 تلفن: ۰۸۱-۳۲۳۵۵۴۶۵
 نشانی سایت: www.malayeru.ac.ir

درسا سرام ایساتیس

مدیر عامل: مهندس ندافیان
 آدرس دفتر مرکزی: سعادت آباد، بلوار
 فرهنگ، نبش خیابان ۲۰ شرقی، پلاک ۲، طبقه ۴ شمالی
 تلفن: ۰۲۱-۲۲۳۸۳۱۶۰
 نشانی سایت: www.Doramic.com

رنگدانه‌های سرامیکی گهرفام

مدیر عامل: مهندس مهینی
 آدرس دفتر مرکزی: یزد، شهرک
 صنعتی خضرآباد، بلوار اقاچیا، خیابان زیتون
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵-۳۷۲۷۲۴۴۸

سارا کاشی سپاهان

مدیر عامل: مهندس باطنی
 آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان سجاده،
 ابتدای خیابان ارباب، جنب بانک صادرات، مجتمع
 کسری، واحد ۱
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱-۳۶۶۲۷۱۱۷
 نشانی سایت: www.saratile.com

سارا لعاب میبد

مدیرعامل: مهندس جعفری پور میبیدی
 آدرس دفتر مرکزی: میبد، شهرک صنعتی
 جهان آباد، بلوار نسترن شمالی صنعت ۵
 کدپستی: ۸۹۶۵۱۳۶۴۹۳
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵-۲۷۷۷۲۲۲۸
 نشانی سایت: www.saralaab.com

**ساگار و قطعات نسوز**

مدیرعامل: مهندس معرفتی
 آدرس: مرند، کیلومتر ۵ جاده قدیم جلفا، شهرک
 صنعتی سرامیکی
 تلفن: ۰۴۱-۴۲۲۲۲۳۸۲
 نشانی سایت: www.saggarmfg.com

**سرامیک‌های صنعتی اردکان**

مدیرعامل: مهندس برهانی
 آدرس دفتر مرکزی: اصفهان،
 میدان آزادی، ابتدای خیابان سعادت
 آباد، پلاک ۱، طبقه ۴، واحد ۸
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱-۳۶۶۸۷۷۷۲
 نشانی سایت: www.aic.ir

**شرکت ذوب و نسوز ایرانیان**

مدیرعامل: میثم محامی
 آدرس: تهران، خیابان شهید رجایی،
 نرسیده به ایستگاه مسجد مادر، نبش کوچه ۷۳، پلاک ۷۷
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۵۵۰۱۹۵۳۹
 نشانی سایت: www.zobiranco.com

**شرکت صنایع سرام آرا**

مدیرعامل: مهندس آهنی‌ها
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان
 شهید قرنی، بالاتر از چهارراه طالقانی،
 خیابان شاداب غربی، پلاک ۳۳، طبقه ۶
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۸۹۱۰۴۵
 نشانی سایت: www.ceramara.ir

**شرکت فیبرونا**

مدیرعامل: مهندس شاهپوری
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان
 میرزای شیرازی، نبش استاد مطهری، شماره
 ۲۱۱
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۲۳۳۵۵
 نشانی سایت: www.fiberona.com

**شرکت مهندسی بازرگانی درداران سریر**

مدیرعامل: مهندس طهماسبی
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان
 ولیعصر، خیابان فتحی شقاقی، میدان سلماس،
 پلاک ۳، طبقه ۳
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۳۳۷۳۶۶-۸
 نشانی سایت: www.sarirco.com

**صنایع کاشی زرین خراسان**

مدیرعامل: مهندس عمید متشعر
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا،
 خیابان شیراز جنوبی، پلاک ۹۹، طبقه اول
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۶۷۶۸۱
 نشانی سایت: www.zarrintile.com

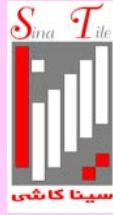
**صنایع کاشی نیلوفر**

مدیرعامل: مهندس نوربخش
 آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار فردوسی،
 مجتمع تجاری اسکان، طبقه ۱، واحد ۲
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۷۶۲۳۳۳۶
 نشانی سایت: www.niloofartile.com

**صنایع کاشی و سرامیک الوند**

مدیرعامل: مهندس هوشیاری
 آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان
 آفریقا، بالاتر از چهارراه اسفندیار، کوچه
 شهید سعیدی، پلاک ۲۳
 تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۰۵۷۸۱۱
 نشانی سایت: www.alvancer.com



صنایع کاشی و سرامیک سینا

مدیر عامل: مهندس عزیزیان
آدرس دفتر مرکزی: تهران، بلوار میرداماد، بعد از میدان مادر، پلاک ۲۳
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۲۷۲۳۰۱
نشانی سایت: www.sinatile.ir

صنعت سرام

مدیر عامل: مهندس غفاری
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان فرجام، بین چهارراه خاور و ولیعصر، پلاک ۶۲۰ واحد ۱۱
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۷۷۷۲۳۵۸۹

فرآورده‌های نسوز آذر شهاب تبریز

مدیر عامل: مهندس صدیقی
آدرس دفتر مرکزی: تبریز، خیابان راه آهن، ایستگاه سرچشمه، مجتمع تجاری میلاد، طبقه ۳، واحد ۳۰۵
تلفن دفتر مرکزی: ۰۴۱-۳۵۵۱۸۴۴۱
نشانی سایت: www.azarshahab.com

فرآورده‌های نسوز پارس

مدیر عامل: مهندس حیدرپور
آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان ونک، خیابان ونک، برج آیین ونک، طبقه ۷، واحد ۷۱
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۷۸۶۶۹۲
نشانی سایت: www.pars-ref.ir

کائولین و خاک‌های نسوز خراسان

مدیر عامل: مهندس زیارت نیا
آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار فلسطین، فلسطین ۱۴، پلاک ۲۸
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۷۶۷۳۰۳۴-۵
نشانی سایت: www.kaolin-co.com

کاشی تیما

مدیر عامل: دکتر ناصری
آدرس دفتر مرکزی: مشهد، شهرک صنعتی توس، فاز ۲، اندیشه ۲، انتهای دانش ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۵۴۱۳۹۹۰
نشانی سایت: www.tima-tile.com

کاشی ستاره میبد

مدیر عامل: مهندس خالقی
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، شیراز جنوبی، گرمسار غربی، کوچه بهار، پلاک ۲۶، طبقه ۴، واحد ۷
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۴۴۷۴۴
نشانی سایت: www.setarehtile.com

کاشی طوس

مدیر عامل: مهندس توکلی فرد
آدرس دفتر مرکزی: مشهد، خیابان سناباد، جنب داروخانه سناباد، ساختمان ۴۶۵، طبقه ۳
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۳۸۴۱۶۴۱۸
نشانی سایت: www.toostileco.com

کاشی کرد

مدیر عامل: مهندس چنگیزی
آدرس دفتر مرکزی: تهران، سهروردی شمالی، هویزه شرقی، پلاک ۳۴
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۳۵۲۳۳۳۳
نشانی سایت: www.cordgroup.com

کاشی مرجان

مدیر عامل: مهندس معصومی
آدرس دفتر مرکزی: اصفهان، خیابان چهار باغ بالا، کوچه کاویان، پلاک ۴۱
تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۱-۳۶۲۴۸۰۱۹
نشانی سایت: www.marjantileco.com

کاشی مسعود ایران

مدیر عامل: مهندس فرشادپور
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان آفریقای شمالی، ساختمان مرکز تجارت ایران، طبقه ۹، واحد ۶
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۶۲۱۲۶۳۵-۳۷
نشانی سایت: www.masoudtile.com

کاشی نوآوران

مدیر عامل: مهندس طباطبایی
آدرس دفتر مرکزی: یزد، میبد، شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار مریم
تلفن: ۰۳۵۳-۲۳۷۲۱۹۳
نشانی سایت: www.noavaranceramics.ir

کاشی فیروزه مشهد

مدیر عامل: مهندس مسعود فولادکار
آدرس دفتر مرکزی: مشهد، بلوار سجاده، خیابان بیستون ۲، مجتمع تجاری طوس، طبقه ۵ و ۶
صندوق پستی: ۹۱۳۷۵-۴۴۳۷
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱۳-۷۶۷۰۰۰۱
www.firoozeh.com

گلسار فارس

مدیر عامل: مهندس تیرانداز
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان کریم‌خان زند، خیابان سپهبد قرنی، خیابان برادران شاداب، پلاک ۳۳، طبقه ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۹۰۸۰۴۴
نشانی سایت: www.golsarfars.com

کسری لعاب میند

مدیر عامل: مهندس میرحسینی
آدرس: یزد، شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار مریم، فرعی سمت راست
تلفن: ۰۳۵۳-۲۳۷۲۹۳۱

لعاب یاس فارس

مدیر عامل: مهندس زارعی
آدرس: شیراز، کیلومتر ۳ جاده شیراز بوشهر، بعد از پل شهید علیپور، جاده ایستگاه شماره ۱ گاز
تلفکس: ۰۷۱۳-۸۳۰۱۹۹۰

گروه پاترون (پات روشن نیکتا)

مدیر عامل: مهندس عباس کلانتر
آدرس: تهران، خیابان ملاصدرا، پلاک ۱۶۲، طبقه چهارم
تلفن: ۰۲۱-۸۸۲۱۰۸۹۰
نشانی سایت: www.patron.group

لعاب مارال میند

مدیر عامل: دکتر داود قهرمانی
آدرس دفتر مرکزی: یزد، میند، شهرک صنعتی جهان آباد، بلوار نسترن شمالی، خیابان صنعت ۹
تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵-۳۲۳۷۴۰۹۶-۷
نشانی سایت: www.maralloob.ir

لعاب مشهد

مدیر عامل: دکتر یوسفی
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ملاصدرا، خیابان شیراز جنوبی، کوچه اتحاد، پلاک ۱۴، طبقه ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۰۴۳۶۹۶
نشانی سایت: http://www.mashhadglaze.com

مجتمع تولید چینی بهداشتی نوین سرام

مدیر عامل: مهندس حقی
آدرس دفتر مرکزی: مشهد، چهارراه ابوطالب، مجتمع برجیس، طبقه دوم، واحد ۳
تلفن دفتر مرکزی: ۰۵۱-۱۷۲۷۶۰۳۳
نشانی سایت: www.novinceram.com

مجتمع تولیدی چینی مقصود

مدیر عامل: مهندس ایمانی
آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان ولیعصر، بالاتر از پارک ساعی، نبش کوچه ۳۴، پلاک ۱۱۵۹، طبقه ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۸۶۹۸۵
نشانی سایت: www.maghsoudporcelain.com

مجتمع صنعتی اردکان (چینی رز)

مدیر عامل: مهندس ضرابیه
آدرس دفتر مرکزی: یزد، چهارراه یزد باف، ساختمان یزدباف، طبقه ۲
تلفن دفتر مرکزی: ۰۳۵۳-۵۲۲۹۷۶۰
نشانی سایت: www.chinirose.com



معدنی و صنعتی سوراوچین عقیق

مدیر عامل: مهندس معصومی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، سعادت آباد،

خیابان علامه شمالی، انتهای کوچه اقبال ملی، پلاک ۱، واحد ۲

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۲۲۰۸۱۳۷۳

نشانی سایت: www.iranclay.com

شرکت ذوب و نسوز ایرانیان

مدیر عامل: میثم

محامی

آدرس: تهران، خیابان

شهید رجایی، نرسیده به ایستگاه مسجد مادر، نیش کوچه ۷۳، پلاک ۷۷

تلفن: ۰۲۱-۵۵۰۱۹۵۳۹

نشانی سایت: <http://www.zobiranco.com/>



مقره سازی ایران

مدیر عامل: دکتر کورنگی

آدرس دفتر مرکزی: تهران،

خیابان بهار جنوبی، کوچه نیلوفر، شماره ۴

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۷۷۵۲۸۶۴۲

نشانی سایت: www.iraninsulator.com

مفید شیشه

مدیر عامل: مهندس موسوی کریمی

آدرس دفتر مرکزی: تهران، خیابان

ولیعصر، پایین تر از میدان ونک، شماره

۲۵۴۰، طبقه ۷

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۶۴۸۱۱

نشانی سایت: www.mofidglass.com



شرکت سرمایه‌گذار صنعت آفاق

مدیر عامل: حسین اسلامی شاهد

آدرس: البرز، کرج، چهار راه مصباح، به

سمت میدان استاندارد، ساختمان آرش، پلاک

۵۳۲ (طبقه ۳، واحد ۸)

تلفن: ۰۲۶-۳۲۷۳۶۸۲۲

نشانی سایت: <https://afaghceram.com>



میهن جام (سهامی خاص)

مدیر عامل: مهندس دهقان

آدرس دفتر مرکزی: تهران، میدان آرژانتین، خیابان احمد قسیر،

چهاردهم غربی، پلاک ۲۶، طبقه ۳

تلفن دفتر مرکزی: ۰۲۱-۸۸۵۱۵۰۱۵

تقویم رویدادهای سرامیک

چهارمین کنفرانس بین‌المللی توسعه فناوری مهندسی مواد، معدن و زمین‌شناسی

تهران

۳۰ تیر ۱۴۰۰

www.emg.bcnf.ir

اولین کنفرانس ملی کاربردهای نوین در حوزه الکترومغناطیس

دانشگاه صنعتی اراک

۱۰ و ۱۱ شهریور ۱۴۰۰

<https://www.emconf2021.com/>

کنفرانس سالانه مواد و ساختارهای هوشمند

دانشگاه صنعتی قم

۱۳ بهمن ۱۴۰۰

qut.ac.ir/acsms2022

ششمین نمایشگاه صنعت دیرگداز

هتل المپیک تهران

۲۲ الی ۲۴ شهریور

هشتمین کنفرانس بین‌المللی مواد فوق ریزدانه و نانوساختار

۱۶-۱۵ آبان ۱۴۰۰

تهران

[/https://ufgns2021.ut.ac.ir](https://ufgns2021.ut.ac.ir)

BIOCERAMICS 32

September 20-23, 2022

Italy

<https://bioceramics32.org/>

XVII ECerS Conference

29th August to 2nd September 2021

Germany

www.ecers2021.org

**14th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (PACRIM 14)
including Glass & Optical Materials Division 2021 Annual Meeting (GOMD 2021)**

December 12-17, 2021

Canada

Ceramics.org/pacrim14

GLASSTEC 2022
September 20-23
Germany Dusseldorf
www.glasstec-online.com

REFRA PRAGUE CONFERENCE 2022
May 18-20
Prague
<http://www.silikaty.cz/www-30-refra-prague-2022>