



# پژوهشگاه نیرو

برونداد تخصصی گروه پژوهشی مواد غیر فلزی

پاییز ۱۳۹۸

- ❖ اخبار آزمایشگاه
- ❖ برگزاری پنل‌های خبرگی
- ❖ پروژه‌های خاتمه یافته
- ❖ کارگاه‌های آموزشی
- ❖ جشنواره پژوهش
- ❖ بازدیدها
- ❖ مقالات منتشر شده

## اهداف و رویکرد

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

صاحب امتیاز: پژوهشگاه نیرو
مدیر مسئول: دکتر نسترن ریاحی نوری
مدیران اجرایی: مهندس حسین کوهانی، مهندس نازنین عبدی
همکاران این شماره: دکتر نرجس باقری، مهندس بهنام علم دوست، مهندس علی مهدیخانی، مهندس عباس فیضی نیا، دکتر سارا محسنی، دکتر فاطمه دبیر، دکتر اشکان ذوالریاستین، دکتر مجید رضایی آبادچی، دکتر حسام فلاح آرانی
ناشر: گروه پژوهشی غیرفلزی پژوهشگاه نیرو نشانی الکترونیکی: <a href="mailto:nonmetal@nri.ac.ir">nonmetal@nri.ac.ir</a>
نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای پونک باختری، پژوهشگاه نیرو، گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

## Table of Contents

۱	..... اخبار آزمایشگاه‌های گروه مواد غیرفلزی
۱	..... برگزاری همایش‌ها، سمینارها و کنفرانس‌ها
۱	..... هفتمین کنگره ملی تازه یافته‌های مهندسی برق ایران
۲	..... ۲۸امین کنفرانس مهندسی برق ایران ۶-۸ خرداد ۱۳۹۹ دانشگاه تبریز
۳	..... برنامه‌های اجراشده در هفته پژوهش
۴	..... برنامه میز دستاوردها
۵	..... تور علمی بازدید از آزمایشگاه‌های پژوهشگاه نیرو
۶	..... کریدور خدمات ایده تا بازار پژوهشگاه نیرو
۸	..... مستندسازی شرکت‌های حاضر در جشنواره پژوهش و فناوری وزارت نیرو
۱۰	..... برگزاری پنل‌های خبرگی گروه مواد غیرفلزی
۱۰	..... پروژه‌های اتمام یافته گروه مواد غیرفلزی
۱۲	..... تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیت‌ها در صنعت برق
۱۳	..... تدوین سند راهبردی و نقشه راه روش‌های نوین ذخیره‌سازی و انتقال سوخت هیدروژن

- ۱۴..... ساخت ابرخازن بر پایه نانو الیاف کربنی تهیه شده به روش الکتروریسی
- بررسی پایداری محیطی پوشش‌های سوپرآبگریز پلی‌یورتانی جهت پایه‌های بتونی شبکه برق و
- ۱۵..... تولید نیمه صنعتی پوشش‌های مذکور
- ۱۷..... گزارش جلسات
- ۱۸..... آینده‌نگاری و سیاست‌گذاری علم و فناوری
- ۱۹..... اخلاق علمی و حرفه‌ای، اخلاق مهندسی
- کارگاه دانش‌افزایی و توانمندسازی اعضای هیات علمی پژوهشگاه نیرو با موضوع «سبک
- ۱۹..... زندگی»
- ۲۰..... مقالات منتشر شده

## اخبار آزمایشگاه‌های گروه مواد غیرفلزی

### ۱- آزمایشگاه سرامیک و پلیمر

آزمایشگاه سرامیک و پلیمر پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه از جمله پروژه مرتبط با پوشش نانو RTV مقره، در شش ماه نخست سال ۱۳۹۸، تعداد ۳۰ گزارش آزمون، عمدتاً مربوط به مقره‌های خطوط نیرو (آزمون‌های غیرالکتریکی مقره) با هماهنگی آزمایشگاه فشار قوی پژوهشگاه، به متقاضیان شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق و شرکت‌های تولیدکننده مقره ارائه نموده است. همچنین این آزمایشگاه، ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه، در پاییز ۱۳۹۸، تعداد ۲۲ گزارش آزمون، عمدتاً مربوط به مقره‌های خطوط نیرو (آزمون‌های غیر الکتریکی مقره) با هماهنگی آزمایشگاه فشار قوی پژوهشگاه، به متقاضیان، شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق و شرکت‌های تولیدکننده مقره ارائه نموده است.

### ۲- آزمایشگاه سیم و کابل

آزمایشگاه سیم و کابل پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه از جمله پروژه مرتبط با پوشش نانو RTV مقره، در شش ماه نخست سال ۱۳۹۸، تعداد ۶۵ گزارش

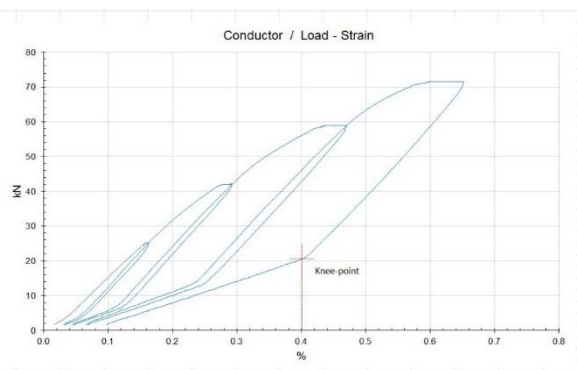
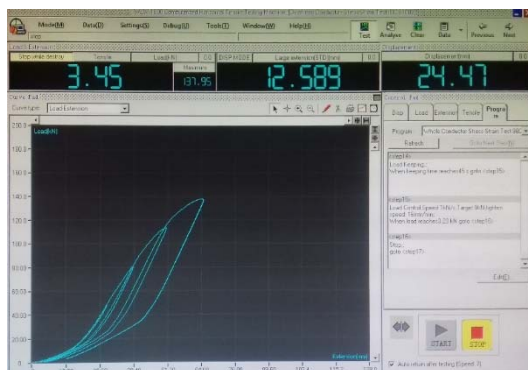
آزمون، مربوط به انواع کابل قدرت و هادی هوایی به متقاضیان شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق، شرکت‌های تولید کننده سیم و کابل و صنایع مصرف کننده این اقلام ارائه نموده است.

همچنین با ساخت یک اتاقک برای دستگاه کشش افقی 1000 kN آزمایشگاه یراق‌آلات، امکان کنترل دمای محیط آزمون فراهم گردیده و پس از انجام مطالعات و تهیه نرم افزار مورد نیاز، آزمون Stress-Strain هادی‌های هوایی که از مهمترین آزمون‌های نوعی این محصول بوده و سابق بر این عمدتاً در آزمایشگاه‌های خارجی (در کشورهای کانادا و مجارستان) انجام می‌شد، برای نخستین بار در کشور راه‌اندازی گردید. طی ماه‌های تیر و مرداد، آزمون مذکور در حضور ناظرین شرکت‌های مشانیر و قدس نیرو و نمایندگان کارفرمایان پروژه‌های مربوطه، توسط آزمایشگاه سیم و کابل روی پنج نمونه هادی هوایی پر ظرفیت محصول یکی از شرکت‌های داخلی انجام گردیده و گزارش‌های آزمون ارائه شده به متقاضی، مورد تایید مشاورین پروژه‌ها قرار گرفت. داده‌های حاصل از این آزمون در نرم افزارهای طراحی خطوط هوایی نیرو در محاسبات کشش فلشخط، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

آزمایشگاه سیم و کابل پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه، در پاییز ۱۳۹۸، تعداد ۸۲ گزارش آزمون، مربوط به انواع کابل قدرت و هادی هوایی به متقاضیان، شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق، شرکت‌های تولید کننده سیم و کابل و صنایع مصرف کننده این اقلام ارائه نموده است.

همچنین، مسئول آزمایشگاه سیم و کابل، در تهیه دستورالعمل و مشخصات فنی کابل فاصله دار و هادی هوایی با روکش ضخیم که توسط دفتر مهندسی توزیع شرکت توانیر در دست تدوین است، مشارکت فعال داشته است.

پیرو راه اندازی آزمون Stress-Strain هادی‌های هوایی در تیر ماه، این آزمون در پاییز سال جاری در حضور ناظرین شرکت‌های مشانیر و منیران و نمایندگان کارفرمایان پروژه‌های مربوطه، توسط آزمایشگاه سیم و کابل با استفاده از دستگاه کشش افقی آزمایشگاه یراق‌آلات، روی سه نمونه هادی هوایی خطوط انتقال، انجام گردیده و گزارش‌های آزمون به متقاضیان تحویل گردیده است.





آزمایشگاه سیم و کابل پژوهشگاه نیرو ضمن ارائه خدمات آزمایشگاهی به پروژه‌های پژوهشی پژوهشگاه، در پاییز ۱۳۹۸، تعداد ۸۲ گزارش آزمون، مربوط به انواع کابل قدرت و هادی هوایی به متقاضیان، شامل شرکت توانیر، شرکت‌های برق، شرکت‌های تولیدکننده سیم و کابل و صنایع مصرف‌کننده این اقلام ارائه نموده است.



## برگزاری همایش‌ها، سمینارها و کنفرانس‌ها



### هفتمین کنگره ملی تازه یافته‌های مهندسی برق ایران

مرکز همایش‌های بین‌المللی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران - اسفند ماه ۱۳۹۸

هفتمین کنگره ملی تازه یافته‌های مهندسی برق ایران در اسفندماه امسال، در دانشگاه شهید بهشتی

برگزار می‌شود. محورهای کنگره شامل موارد زیر است.

#### محورهای کنگره

تولید علم در مهندسی برق

الکترونیک

مخابرات

کنترل

قدرت

مهندسی پزشکی

مهندسی کامپیوتر

نرم افزار

هوش مصنوعی

معماری کامپیوتر و

فن آوری اطلاعات و ارتباطات



## ۲۸امین کنفرانس مهندسی برق ایران ۶-۸ خرداد ۱۳۹۹ دانشگاه تبریز

دانشگاه تبریز میزبانی بیست و هشتمین کنفرانس مهندسی برق ایران را با همکاری دبیرخانه دائمی کنفرانس در تاریخ ۶ الی ۸ خرداد ماه ۱۳۹۹ در شهر تبریز، شهر اولین‌ها به عهده خواهد داشت. این کنفرانس در صدد است همزمان با گسترش دانش فنی، محیطی پویا جهت تبادل نظر علمی و فنی، ارائه آخرین یافته‌های پژوهشی و همچنین تشویق مشارکت محققان بوجود آورد. کمیته برگزاری کنفرانس از کلیه پژوهشگران، صاحب‌نظران، متخصصان و علاقمندان در زمینه‌های مختلف مهندسی برق، کامپیوتر و مهندسی پزشکی دعوت می‌نماید مقالات خود را که حاوی آخرین یافته‌های علمی در زمینه‌های موضوعی کنفرانس هستند، از طریق سامانه اینترنتی مربوطه، به دبیرخانه کنفرانس ارسال نمایند. همزمان با برگزاری کنفرانس، کارگاه‌های آموزشی و نمایشگاه‌های تخصصی نیز با حضور صاحب‌نظران دانشگاهی و صنعتی و سازمان‌های مرتبط برگزار خواهد شد.

## برنامه های اجرا شده در هفته پژوهش

جشنواره هفته پژوهش با مشارکت وزارت نیرو و شرکت های تابعه و مراکز پژوهشی وزارت نیرو و با حضور حداکثری تمام ذی نفعان صنعت آب و برق اعم از حوزه های دولتی و خصوصی ، شرکت های دانش بنیان، دانشگاه ها و شرکت های فناوری نوپا در آذرماه برگزار گردید. بخشهایی از این جشنواره که با همت اعضا هیئت علمی و کارشناسان گروه غیرفلزی برگزار گردید، به شرح زیر می باشد:

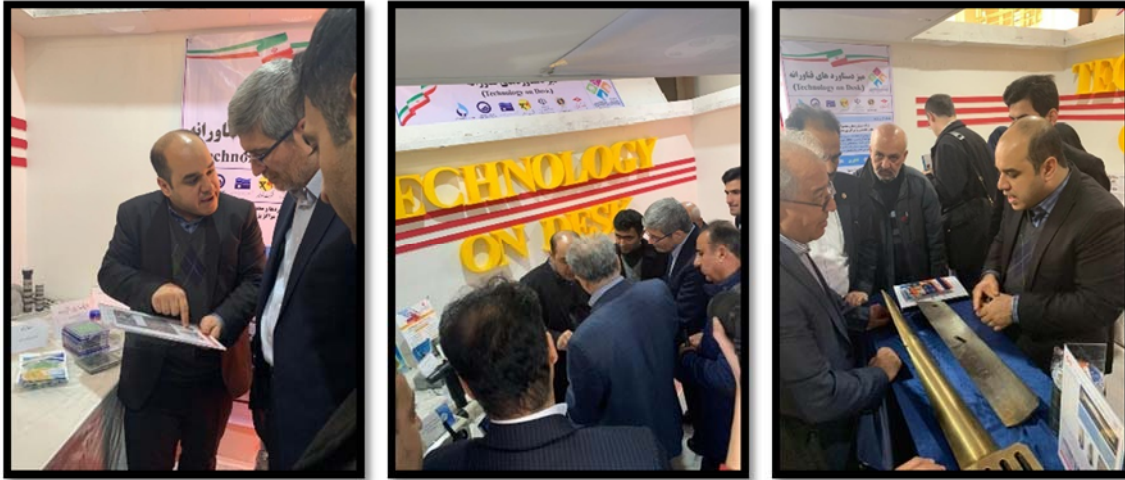


## برنامه میز دستاوردها



در این برنامه هدف ارائه و رونمایی از محصولات بدست آمده طی پروژه‌های تحقیقاتی بود که دارای نمونه اولیه قابل ارائه در سطح آمادگی فناوری (TRL) پنج یا شش هستند یعنی دارای نمونه آزمایشگاهی به عنوان نمونه رومیزی کارآمد در محیط آزمایشگاهی و یا محیطی نزدیک به محیط عملکرد واقعی باشند که در آستانه مرحله آمادگی برای ورود به بازار قرار دارند. هدف از اجرای برنامه ارائه این محصولات و توانمندی‌ها برای جلب نظر سایر ذی‌فعالان برای تکمیل مسیر تجاری‌سازی محصول می‌باشد. این برنامه مورد استقبال شدید بخش‌های مختلف شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، شرکت مدیریت منابع آب ایران، موسسه تحقیقات آب، پژوهشگاه نیرو، برق حرارتی، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و شرکت توانیر قرار گرفت. این بخش همچنین مورد استقبال بازدید کنندگان نیز قرار گرفت.





### تور علمی بازدید از آزمایشگاه‌های پژوهشگاه نیرو

به همت اعضا گروه غیر فلزی، یکی از برنامه‌های پر استقبال جشنواره، تور بازدید از آزمایشگاه‌های پژوهشگاه نیرو بود. در این بازدید، ۳۴ نفر از مهمانان جشنواره، از هفت آزمایشگاه، فشار قوی، رله و حفاظت، سنجش کیفیت، سیم و کابل، آب و بخار، سوخت و روغن و یراق آلات بازدید نمودند و کارشناسان تخصصی آزمایشگاه‌ها، توضیحات کاملی در مورد آزمایشگاه‌ها ارائه نمودند و به سئوالات بازدیدکنندگان پاسخ دادند.





### کریدور خدمات ایده تا بازار پژوهشگاه نیرو

کریدورهای خدمات ایده تا بازار به عنوان یکی از ارکان توسعه اقتصاد دانش بنیان، زیر ساخت‌های لازم برای تبدیل ایده‌ها و استعدادها به یک نوآوری (که قابلیت تجاری‌سازی دارد) را فراهم می‌سازند. این زیر ساخت‌ها شامل ارزیابی قابلیت تجاری سازی طرح‌ها، ارزش‌گذاری فناوری‌ها و یافته‌های پژوهشی، ارائه خدمات حقوقی، بیمه‌ای، اعتباری، بازاریابی و بهره‌مندی از خدمات مشاوره‌ای به منظور توسعه فناوری است که در مراحل پنج گانه توسعه ایده، توسعه فناوری، توسعه محصول، توسعه تولید و توسعه بازار به شرح ذیل تبلور یافته است.



با پیچیدگی و تخصصی شدن فضای کسب و کار جهانی، شرکت‌های امروزی نمی‌توانند به تنهایی در کلیه زمینه‌های فوق موفق عمل کنند. بنابراین کریدورها با تسهیل در ارائه خدمات به شرکت‌های دانش بنیان در یک مجموعه متمرکز و گسترش مراکز خدماتی فعال در زمینه ارائه خدمات و مشاوره‌های تخصصی می‌توانند زمینه ساز تحول سریع در عرصه فناوری برای تضمین رشد پایدار اقتصادی و حفظ برتری اقتصادی باشند.

- توسعه ایده: در این مرحله ایده نوآورانه باید بصورت ایده‌های کاربردی، ارزش آفرین و با دامنه گسترده در جهت افزایش بهره‌وری و رشد اقتصادی توسعه یابد.
- توسعه فناوری: در این عرصه یک محصول نوآورانه تحت مالکیت مشخص باید به صورت یک دستاورد قابل نمایش، کارآمد و قابل انتقال بر اساس یک نگاه مبتنی بر بازار عرضه گردد.
- توسعه محصول: در این مرحله بایستی تسلط بر فناوری در قالب یک محصول مشخص، افزایش یابد و با ایجاد و تقویت زیرساخت‌های لازم جهت تولید با ثبات، آمادگی ارائه محصول به مشتریان پیشرو و حضور در بازار هدف اولیه حاصل شود
- توسعه تولید: در این مرحله بایستی سناریوهای تولید، مدل کسب و کار و ساختار سازمانی نهایی شده باشد و شرکت با تقویت زیرساخت‌های تولید در مقیاس صنعتی، آماده فروش محصول در بازار هدف شود.

- توسعه بازار: در این مرحله تولید کننده بایستی طی یک برنامه مشخص بازاریابی، محصول خود را به مشتریان ارائه داده و برنامه های مدون برای توسعه بازار و ارتقاء محصولات را در دستور کار خود داشته باشد.

### مستندسازی شرکت های حاضر در جشنواره پژوهش و فناوری وزارت نیرو

در جشنواره پژوهش و فناوری وزارت نیرو که در تاریخ ۲۴ و ۲۵ آذر ماه سال ۱۳۹۸ در پژوهشگاه نیرو برگزار گردید، نزدیک به ۶۰ شرکت فعال و دانش بنیان از مناطق مختلف کشور در حوزه صنعت برق و آب حضور داشتند. اکثر شرکت های شرکت کننده در این جشنواره محصول محور بودند و آخرین دستاوردهای خود را در این حوزه ارائه دادند. به منظور آشنایی با محصولات فناورانه شرکت ها، با هریک از مسئولین غرفه ها مصاحبه ای انجام شد و از هریک از آنها درخواست گردید که فرم های مربوطه را تکمیل کنند. در این فرم ها اطلاعاتی مبنی بر مشخصات شرکت شامل نام شرکت، زمینه فعالیت و محل و شماره تماس ذکر شده است. بنابراین از شرکت کننده ها درخواست گردید ضمن درج اطلاعات شرکت، در خصوص نوع و مشخصات فنی محصولات ارائه شده توضیحاتی ذکر نمایند. همچنین در مورد نیازمندی ها و درخواست های حمایتی آنها از وزارت نیرو گفتگوهایی انجام شد که در فرم های مربوطه درج شده است. در پایان فرم های تکمیل شده جهت مستندسازی جمع آوری گردید. هدف از انجام این فعالیت آشنایی و تعاملات بیشتر با شرکت های ارائه دهنده محصولات فناورانه در حوزه برق و آب در جهت پیشبرد و ترقی آنها می باشد.





## برگزاری پنل‌های خبرگی گروه مواد غیرفلزی

### پروژه‌های اتمام یافته گروه مواد غیرفلزی

#### دستورالعمل استفاده از مقره بتن پلیمری در صنعت برق

مدیر پروژه: دکتر حسام فلاح آرائی

#### خلاصه پروژه:

در بحث شبکه‌های قدرت و خطوط توزیع و انتقال، مقره‌های کی از اجزا مهم به شمار می‌روند. فراوانی چشمگیر کاربرد مقره‌ها در تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نشان‌دهنده اهمیت این تجهیزات در شبکه برق است. این تجهیز علیرغم سهم قیمتی پایین‌تر نسبت به سایر تجهیزات در هزینه احداث خط و به دلیل نقش حساس در پایداری خط و تعداد زیاد همواره مورد توجه بوده است. مقره‌های بیرونی عموماً از نوع شیشه‌ای، پرسیلانی و کامپوزیتی هستند. نوع دیگری از مقره‌ها که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته، مقره بتن پلیمری است. بتن پلیمری در واقع کامپوزیتی است که هزینه تولید پایین داشته و بر خلاف شیشه و پرسیلان، برای تولید به دمای بالا نیاز نداشته و در دمای محیط فرآیند می‌شود. امروزه مواد بتن پلیمری بطور موفقیت‌آمیزی برای استفاده در ساخت مقره‌های الکتریکی توسعه پیدا کرده است و کار انجام شده در موسسه تحقیقات الکتریکی در آمریکا باعث توسعه فرمولاسیون و تکنیک‌های تولید این محصول به عنوان جانشین پرسیلان شده است. در پروژه حاضر، پس از بررسی دقیق فرمولاسیون و شناخت ماهیت ساختاری مقره بتن پلیمری، آزمون‌های فیزیکی، مکانیکی و الکتریکی لازم الاجرا جهت بهره‌برداری از این محصول ارائه گردید. نتایج هریک از این آزمون‌ها بر روی مقره بتن پلیمری ساخته شده در پژوهشگاه نیرو گزارش شد. همچنین در

انتهای، دستورالعملی تحت عنوان "دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای مقرر بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط" جهت ثبت در شرکت توانیر تدوین شد. نظر به اهمیت موضوع تعیین مشخصات فنی و کنترل کیفیت تجهیزات و توجه به معیارهای فنی موثر بر عملکرد آنها، این سند تنظیم و در کمیته تخصصی متشکل از کارشناسان پژوهشگاه نیرو، شرکتهای توزیع نیروی برق، سازندگان و مشاورین طرح شده است. گیرندگان سند موظفند در هنگام خرید مقررهای بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط مورد استفاده در شبکههای هوایی توزیع برق، آن را در پیوست اسناد منظور نموده و هنگام انجام مراحل بررسی و ارزیابی، بر اساس این دستورالعمل و با توجه به مدارک و مستندات ارائه شده، نسبت به ارزیابی پیشنهادات اقدام کنند.


## چکیده نتایج

- ۱- تدوین دستورالعمل "دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای مقرر بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط"
- ۲- مطالعه و بررسی استانداردهای مقررهای سرامیکی، کامپوزیتی و پلیمری
- ۳- مطالعه و بررسی انواع و مزایای استفاده از مقرر بتن پلیمری
- ۴- مطالعه و بررسی آزمونهای موادی، الکتریکی مورد استفاده در مقرر بتن پلیمری
- ۵- مطالعه و بررسی معیارهای پذیرش آزمونهای مورد استفاده برای مقرر بتن پلیمری

## مستندات پروژه:

■ گزارش فاز اول؛ کد گزارش: PTPN37/T01

- گزارش فاز دوم ؛ کد گزارش: PTPN37/T02
- گزارش فاز دوم ؛ کد گزارش: PTPN37/T03
- "دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای مقرر بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط "

	عنوان: الزامات و معیارهای ارزیابی فنی طرحهای بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط	شماره تهیه/بازنگری: * تاریخ تهیه/بازنگری: ۹۷۱۸			
<p><b>مستند</b></p> <p>"دستورالعمل تعیین الزامات، معیارهای ارزیابی فنی و آزمونهای مقرر بتن پلیمری ۲۰ و ۳۳ کیلوولت اتکایی خط"</p> <p><b>کارفرما: پژوهشگاه نیرو</b></p> <p>مقام تصویب کننده:</p> <p>دریافت کنندگان سند:</p> <p style="text-align: center;">□ - □ - □ -</p> <p>تهیه کننده: گروه مواد غیر فلزی - گروه مطالعات فشار قوی</p> <p>تاریخ تهیه: مهرماه ۱۳۹۷</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 33%; text-align: center;">تهیه کننده: امضاء</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">تایید کننده: امضاء</td> <td style="width: 33%; text-align: center;">تصویب کننده: امضاء</td> </tr> </table>			تهیه کننده: امضاء	تایید کننده: امضاء	تصویب کننده: امضاء
تهیه کننده: امضاء	تایید کننده: امضاء	تصویب کننده: امضاء			

## تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیت ها در صنعت برق

مدیر پروژه: دکتر فاطمه دبیر

صنعت برق پتانسیل اینرا دارد که یکی از مصرف کنندگان عمده مواد کامپوزیتی باشد. تولید قطعات

کامپوزیتی بسیار سبک، با سختی و استحکام بالا برای تحمل بار ناشی از خطوط انتقال فشار قوی از جمله

موارد بسیار موفق در صنعت برق بوده است. امروزه تیرها و بازوهای عرضی کامپوزیتی در بسیاری از نقاط دنیا در خط و توزیع و انتقال کاربرد پیدا کرده و نتایج خوبی را نیز نشان داده اند. توسعه استفاده از کامپوزیت‌ها در تجهیزات به کار رفته در بخش‌های مختلف صنعت برق کشور می‌تواند منجر به ارتقاء کیفیت تجهیزات و کاهش هزینه‌های نصب، بهره‌برداری، نگهداری و تعمیرات آن‌ها شود.

در این راستا و به منظور توسعه استفاده کامپوزیت‌ها در صنعت برق، پروژه‌ای با عنوان "تدوین سند راهبردی و نقشه راه توسعه استفاده کامپوزیت‌ها در صنعت برق" تعریف شده بود که در تاریخ ۹۸/۴/۱۷ کمیسیون فنی فاز آخر آن نیز برگزار شد و مورد تایید کارفرما قرار گرفت. تدوین سند راهبردی و نقشه راه امری ضروری بود تا بتوان آن دسته از تجهیزاتی را که کامپوزیت کردن آن‌ها سبب بهبود کارایی شبکه برق می‌شود، شناسایی کرده و آن‌ها را به صورت منطقی دسته‌بندی کرد و نیز بتوان روش اکتساب دانش و فناوری این تجهیزات کامپوزیتی را به همراه ملزومات و نیازمندی‌های فنی و تکنیکی با توجه به معیارها تعیین کرد.

## تدوین سند راهبردی و نقشه راه روش‌های نوین ذخیره‌سازی و انتقال سوخت

### هیدروژن

مدیر پروژه: دکتر فاطمه دبیر

ذخیره‌سازی سوخت پاک هیدروژن یکی از مسائل پراهمیت محسوب می‌شود که می‌تواند به سه طریق

گاز فشرده، مایع و یا حالت جامد انجام گیرد. ذخیره‌سازی به کمک گاز فشرده با مشکلاتی همچون محدود

بودن چگالی حجمی و خطر ترکیدن مخزن روبه‌رو خواهد بود. همچنین ذخیره‌سازی به صورت مایع نیازمند مصرف بالای انرژی برای سرد کردن بوده و نیز بر اثر تبخیر میزان ۲ الی ۳ درصد اتلاف روزانه وجود خواهد داشت. لذا استفاده از حالت جامد که شامل مواد نانو ساختار سبک به خصوص هیدریدهای فلزی می‌شود، توصیه گردیده است. در این راستا پروژه ای با عنوان " تدوین سند راهبردی و نقشه راه روش‌های نوین ذخیره‌سازی و انتقال سوخت هیدروژن " تعریف شده بود که در تاریخ ۹۸/۵/۲۰ کمیسیون فنی فاز آخر آن نیز برگزار گردید و مورد تایید کافرما قرار گرفت. هدف اصلی از تدوین سند راهبردی و نقشه راه روش‌های نوین ذخیره‌سازی و انتقال سوخت هیدروژنی به عنوان یک حامل انرژی و با هویتی مستقل از پیل سوختی، گردآوری حوزه‌های مختلف فناوری، راهبردهای توسعه فناوری، روش‌های اکتساب پیشنهادی، اقدامات و سیاست‌های توسعه فناوری شامل اقدامات فنی در زمینه‌ی دانش فنی طراحی و ساخت تجهیزات آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی و همچنین از دیدگاه غیرفنی در زمینه گردآوری شبکه خبرگان و بانک اطلاعاتی در این حوزه در داخل و خارج از کشور می‌باشد.

### ساخت ابرخازن بر پایه نانو الیاف کربنی تهیه شده به روش الکتروریسی

پروژه ای با عنوان "ساخت ابرخازن بر پایه نانو الیاف کربنی تهیه شده به روش الکتروریسی" که به تایید مرکز نخبگان و استعدادهای برتر نیروهای مسلح رسیده بود، توسط آقای دانش امیری و به مدیریت خانم دکتر ریاحی با موفقیت به پایان رسید.

هدف از انجام این طرح، ساخت ابرخازن برپایه الکتروود نانو الیاف کربنی بوده و مقرر شده بود کامپوزیت سازی این الیاف با اکسید فلزی نیکل مولیبدات نیز توسط روش الکترورسی صورت گیرد. کاهش هزینه های ساخت و امکان تولید انبوه الکتروودهای بر پایه نانو الیاف کربنی، مشخصه یابی الکتروود و ابرخازن مورد نظر و افزایش ظرفیت ویژه و چگالی انرژی الکتروود نیز از جمله اهداف این پژوهش بود.

### بررسی پایداری محیطی پوشش های سوپرآبگریز پلی یورتانی جهت پایه های بتونی شبکه برق و تولید نیمه صنعتی پوشش های مذکور

پروژه پسادکتری: امیرحسین سیدمهدی دارای دکتری مهندسی پلیمر از دانشگاه وسترن انتاریو کانادا

خطوط شبکه توزیع برق یکی از مراحل رسیدن برق از تولید کننده به مصرف کننده است و یکی از پرکاربردترین اجزاء شبکه توزیع برق، پایه های بتنی است که عملکرد مطلوب سازهای آنها از اهمیت ویژه ای برخوردارند. یکی از عوامل عدم پایداری بتون شرایط پیرامونی نامناسب مانند وجود سولفات ها و نمک ها در پیرامون سازه بتنی و خوردگی فولاد به سبب نفوذ مواد شیمیایی مضر و رطوبت در سازه های بتن فولادی می باشد. خوردگی آرماتورها در بسیاری از تیرهای بتونی در خطوط توزیع نیروی برق بعد از گذشت چند سال باعث خم شدن و سقوط تیر برق می شود که مشکلات زیادی را در شبکه ایجاد می کند. استفاده از پوشش های فوق آبگریز به خاطر خاصیت راحت تمیز شوندگی می تواند این مشکل را حل کند. این پوشش ها به خاطر خاصیت فوق آبگریزی به راحتی قابل شستشو با باران یا جریان باد هستند و مانع از تجمع آلودگی ها بر روی

سطح می‌شوند و آب را به طور کامل از سطح خود دور می‌کنند. برای تهیه این پوشش‌ها باید از ترکیب ماده با کشش سطحی کم مثل تفلون و مواد نانو جهت ایجاد زبری در سطح استفاده نمود. پوشش‌های نانوپلی‌یورتانی دارای خاصیت سوپراآبگریزی بوده و مقاومت آب و هوایی مناسبی از خود نشان دادند. هدف از این پروژه اعمال پوشش مذکور بر روی صفحات بتنی و انجام آزمایشات زاویه تماس قطره آب با سطح، مقاومت در برابر نور ماورا بنفش و اندازه‌گیری میزان جذب آب به بتن می‌باشد. در نهایت بعد از انجام آزمایشات مذکور، پوشش سوپراآبگریز بر روی پایه‌های بتونی در یک پست برق (قسمتی از پست به صورت پایلوت انتخاب می‌شود) اعمال می‌گردد و به مدت ۲ تا ۳ ماه در شرایط طبیعی آزمایش می‌شود. هدف نهایی این تحقیق، تولید نیمه صنعتی این پوشش‌ها و ایجاد شرکت فناور است.



## گزارش جلسات

دومین جلسه شورای راهبری حوزه شیمی و مواد در مرداد ماه با حضور متخصصان داخل و خارج

پژوهشگاه برگزار گردید. در این جلسه مسائل زیر به بحث و تبادل نظر پرداخته شد:

- ۱) لزوم تشکیل شورای راهبری و وظایف شورا
- ۲) لزوم انتخاب محورهای تخصصی گروه ها به منظور تعیین برنامه ۵ ساله
- ۳) بررسی محورهای تخصصی گروه پژوهشی متالورژی
- ۴) بررسی محورهای تخصصی گروه پژوهشی مواد غیر فلزی
- ۵) بررسی محورهای تخصصی گروه پژوهشی شیمی و فرآیند

## کارگاه آموزشی



### آینده‌نگاری و سیاست‌گذاری علم و فناوری

شرکت اعضای هیات علمی گروه مواد غیرفلزی به مدت ۱۶ ساعت در کارگاه توانمندسازی با عنوان "آینده‌نگاری و سیاست‌گذاری علم و فناوری" شرکت نمودند. این دوره با توجه به ماموریت پژوهشگاه در خصوص انجام مطالعات و اجرای پروژه های آینده نگاری و سیاست پژوهی صنعت برق و انرژی و جهت توانمندسازی پژوهشگران در این حوزه برگزار شد و برنامه آن به شرح زیر بود:

در این دوره سخنرانان به ضرورت آینده نگری و توانمند سازی اعضا، تاریخچه و مدل اجرایی آینده نگری، روشهای آن، تجارب داخلی آینده نگاری و مدل‌های پایش، ارزیابی و بازنگری سند نانو پرداختند.

## اخلاق علمی و حرفه ای، اخلاق مهندسی

اعضای هیات علمی گروه مواد غیرفلزی به مدت ۱۶ ساعت در شهریور ماه در کارگاه دانش افزایی با عنوان "اخلاق علمی و حرفه ای، اخلاق مهندسی" با حضور دکتر توانائیشرکت نمودند. این دوره ها از طرف نهاد مقام معظم رهبری و در جهت توانمندسازی و دانش افزایی اعضای هیات علمی برگزار می شود. با توجه به تخصص مهندسی اعضای شرکت کننده در این دوره در داخل پژوهشگاه نیرو، بحث و تبادل نظر راجع به اخلاق مهندسی صورت گرفت.

## کارگاه دانش افزایی و توانمندسازی اعضای هیات علمی پژوهشگاه نیرو با موضوع

### «سبک زندگی»

کارگاه دانش افزایی با موضوع «سبک زندگی» با حضور جمعی از اعضای هیات علمی پژوهشگاه نیرو در تاریخ ۱۰ و ۱۲ آذرماه برگزار شد. این کارگاه دو روزه به همت دفتر امور هیات علمی پژوهشگاه نیرو و با همکاری مرکز هم اندیشی استادان نهاد نمایندگی مقام معظم رهبری در دانشگاهها، با حضور جناب آقای دکتر عبدالعظیم کریمی عضو هیات علمی پژوهشگاه تعلیم و تربیت به عنوان مدرس دوره، برگزار گردید. در این کارگاه که با مشارکت گسترده اعضای هیات علمی برگزار شد مباحث مختلفی همچون آسیب شناسی سبک زندگی، تربیت و سبک زندگی اسلامی، سبک فرزند پروری و مهارت های مرتبط با تفکر نقاد مورد بحث و تبادل نظر قرار گرفت.

مقالات منتشر شده



## بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌های ریخته‌گری ژلی کاربرد سیلیسیم و تاثیر آن بر خواص

### مکانیکی بدنه‌های کاربرد سیلیسیم

حسام فلاح آرانی<sup>۱</sup>، صلاح الدین ایصافی<sup>۱</sup>، پریناز تبریزیان<sup>۱</sup>، سعید باغشاهی<sup>۲\*</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۴، ش.ص: ۷۷-۸۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۲)

#### چکیده

در این پژوهش رفتار رئولوژی دوغاب‌های کاربرد سیلیسیم تهیه شده به روش ریخته‌گری ژلی و تاثیر این رفتار بر خواص مکانیکی نمونه‌های سینتر شده بررسی شد. بهینه‌سازی رفتار رئولوژی دوغاب کاربرد سیلیسیم، موجب تهیه دوغاب پایدار و شکل‌گیری هرچه بهتر بدنه‌های کاربرد سیلیسیم شد. برای رسیدن به این هدف از تترامتیل آمونیوم هیدروکسید به عنوان پراکنده‌ساز، آکریلامید به عنوان مونومر، متیلن بیس اکریلامید به عنوان اتصال دهنده عرضی، پرسولفات آمونیوم به عنوان آغازگر و تترامتیل اتیلن دی آمین به عنوان کاتالیست استفاده شد. به منظور کنترل pH نیز از سود سوزآور استفاده شد. برای این کار دوغاب‌هایی از محلول مونومر آکریلامید و ۴۵ درصد حجمی جامد پودر کاربرد سیلیسیم با مقادیر مختلف پراکنده‌ساز (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ درصد وزنی بر اساس وزن کاربرد سیلیسیم) تهیه شد. نتایج نشان داد که برای رسیدن به یک دوغاب با گرانروی مناسب به ۰/۴ درصد وزنی پراکنده ساز تترامتیل آمونیوم هیدروکسید، pH برابر ۱۰/۵ و ۲۴ ساعت زمان برای مخلوط‌سازی نیاز است. در این دوغاب‌ها سازوکار دافعه الکترواستریکی، باعث پایداری دوغاب‌ها شده و اضافه کردن مونومر اکریلامید، باعث کاهش گرانروی شد. نتایج نشان داد که در نسبت بهینه اتصال دهنده متیلن بیس اکریلامید به مونومر اکریلامید برابر ۱ به ۱۷/۵ بیش‌ترین استحکام خام حاصل می‌شود. بدنه‌های ریخته‌گری ژل شده دارای استحکام خمشی ۲۳۱MPa بودند.

**واژه‌های کلیدی:** کاربرد سیلیسیم، ریخته‌گری ژلی، رفتار رئولوژی، استحکام خمشی.

<sup>۱</sup> - گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

<sup>۲</sup> - گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

\*-نویسنده مسئول مقاله: baghshahi@eng.ikiu.ac.ir

### پیشگفتار

سرامیک کاربرد سیلیسیم به علت دارا بودن خواص مطلوبی نظیر چگالی پایین، استحکام زیاد، مقاومت به سایش بالا، مقاومت به اکسیداسیون بالا و حفظ استحکام مکانیکی در دماهای زیاد از اهمیت تکنولوژیکی بسیاری برخوردار است. از این ماده به عنوان یک سرامیک ساختاری در موتورهای دیزلی، توربین‌های گازی، مبدل‌های حرارتی، آب بندها، سایندها و قطعات تلسکوپ‌های فضایی استفاده می‌شود [۱-۲]. این کاربردهای گسترده بدلیل اطمینان‌پذیری کم، ماشین‌کاری سخت و هزینه بالای ساخت به‌ویژه در قطعات بزرگ و پیچیده محدودیت‌های بسیاری همراه شده است [۳].

برای سالیان متمادی از روش‌های ریخته‌گری دوغابی و قالب‌گیری تزریقی برای شکل‌دهی قطعات کاربرد سیلیسیم با اشکال پیچیده استفاده می‌شد؛ ولی در سال‌های اخیر با استفاده از روش ریخته‌گری ژلی عیوب شکل‌دهی کاهش یافته و قابلیت اطمینان این قطعات بیش‌تر شده است. همچنین استحکام خام قطعات ساخته شده با این روش بسیار بیش‌تر از سایر روش‌های مرسوم است [۴]. ریخته‌گری ژلی یکی از روش‌های شکل‌دهی کلوئیدی است که در آن ابتدا پودرهای سرامیکی درون محلول مونومری حاوی مونومرهای آلی و حلال پراکنده می‌شود. بنابراین، ریخته‌گری ژلی بر اساس معلق نگه داشتن ذرات سرامیکی توسط پلیمری شدن درجای مونومرها است. [۵-۷].

در این روش برای دستیابی به قطعه‌ای مناسب، تهیه دوغابی با گرانش کم، سیالیت مناسب و پایداری بالا لازم است. انجام عملیات هوازدایی نیز ضروری است [۸-۹]. بعد از تهیه دوغاب مناسب و هواگیری، آغازگر و کاتالیزور به سیستم اضافه می‌شود و دوغاب بلافاصله به درون قالب ریخته می‌شود. پس از افزودن آغازگر و ریختن دوغاب درون قالب معمولاً یک زمان توقف برای ژل شدن وجود دارد. در این مدت زنجیره‌های پلیمری به اندازه بحرانی نرسیده‌اند تا اتصالات عرضی ایجاد کنند و ژل شدن آغاز شود، به همین دلیل در این فاصله زمانی می‌توان ریخته‌گری دوغاب به درون قالب و کارهای جانبی دیگر

مثل هوازدایی مجدد دوغاب را انجام داد [۱۰]. عملیات گیرش همراه با واکنش‌های گرمازاست که باعث می‌شود، دمای دوغاب بالا برود. در واقع از طریق تغییرات دمای دوغاب و یا افزایش ناگهانی گرانش می‌توان زمان شروع گیرش را تخمین زد. بسته به غلظت مونومرها، آغازگر، کاتالیزور، همچنین دما و کسر حجمی بار جامد زمان توقف تغییر می‌کند. زمان توقف و زمان انتشار (از لحظه شروع افزایش ناگهانی گرانش تا تکمیل تشکیل شبکه ژلی و رسیدن به گرانش بی‌نهایت) عوامل تاثیرگذاری بر روی استحکام قطعات خام و پخت شده هستند [۱۲].

بعد از اینکه واکنش‌های پلیمری شدن تکمیل شد و قطعه شکل قالب را به خود گرفت، قطعه از قالب خارج و در دمای مناسب خشک می‌شود. مرحله خشک کردن یکی از مراحل حساس در این روش است، لذا باید این مرحله به آرامی انجام شود [۱۳]. از مزایای ریخته‌گری ژلی می‌توان به قابلیت ماشین‌کاری بدنه خام شکل داده شده، اشاره کرد. این مزیت نسبت به روش‌های دیگر موجب می‌شود که برای تولید قطعات از این روش به ماشین‌کاری پس از مرحله پخت که بسیار پر هزینه است کم‌تر نیاز باشد یا اصلاً نیازی نباشد [۱۴]. در مرحله بعد مواد آلی موجود در قطعه سوزانده می‌شود. سپس عملیات پخت صورت می‌گیرد. انقباض ایجاد شده در هنگام پخت همسانگرد است.

روش‌های شکل‌دهی دوغابی به عنوان روش‌هایی شناخته می‌شوند که دارای مزایایی مانند بدنه متراکم بدون آگلومره همراه با چگالی خام بالا و چیدمان یکنواخت ذرات است که باعث می‌شود، ریز ساختار بدنه سینتر شده همگن باشد. این مزیت‌ها از آنجا ناشی می‌شود که می‌توان به وسیله پراکنده کردن مناسب ذرات، دوغابی با درصد بالای بارگذاری ماده جامد و گرانش پایین تهیه نمود. آگلومراسیون ذرات به عنوان مهم‌ترین دلیل ایجاد عیوب در قطعات سینتر شده شناخته می‌شود. حضور آگلومرها منجر به کاهش دانسیته خام و اختلاف در انقباض خشک شده که منجر به وجود آمدن ترک بعد از سینتر می‌شود. بنابراین شکستن آگلومرها یکی از پیش شرط‌های مهم برای تهیه یک دوغاب مناسب و یک بدنه بدون عیب است. یکی از مهم‌ترین روش‌های شکستن آگلومرها آسیا کردن

ابتدا با بررسی رفتار جریان یابی دوغاب، دوغابی پایدار و قابل ریخته‌گری تهیه می‌شود و با بهینه کردن زمان آسیا دوغابی با حداکثر میزان بارگذاری جامد، بیش‌ترین پایداری و حداقل گرانروی تهیه شد. در ادامه پارامترهای ریخته‌گری ژلی و تاثیر آن بر استحکام قطعات بررسی خواهد شد.

### مواد و روش‌ها

#### مواد مصرفی

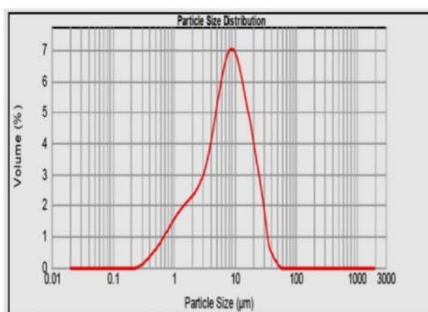
در این پژوهش از پودر کربید سیلیسیم ساخت شرکت (Zhengzhou Qijun) با خلوص ۹۹ درصد استفاده شد. از تترامتیل آمونیوم هیدروکسید (Sigma Aldrich 75592, TMAH) به عنوان پراکنده‌ساز، آکریلامید (Merck 79061, AM) به عنوان مونومر، متیلن بیس اکریلامید (Merck 110269, MBAM) به عنوان اتصال دهنده عرضی، پرسولفات آمونیوم (Merck 7727540, APS) به عنوان آغازگر و همچنین از تترامتیل اتیلن دی آمین (Merck 8920, TEMED) به عنوان کاتالیست استفاده شد. به منظور کنترل pH نیز از NaOH استفاده شد.

توزیع اندازه ذرات پودر کربید سیلیسیم در شکل ۱ - جدول ۱ نشان داده شده است.

است. بسته به اندازه اولیه پودرهای سرامیکی زمان آسیا یک میزان بهینه دارد تا به یک دوغاب عاری از آگلومرها و گرانروی حداقلی دست یافت. همچنین از نقطه نظر صنعتی بهینه کردن زمان آسیا برای کاهش مصرف انرژی و زمان مفید است [۱۵].

تحقیقات در حوزه ریخته‌گری ژلی سرامیک‌ها بیش‌تر به مواد سرامیکی اکسیدی نظیر آلومینا اختصاص پیدا کرده است و در منابع مختلف، مطالعات کمی درباره کاربرد سیلیسیم موجود است. هانگ و همکارانش در تحقیقی اثر عامل دار کردن ذرات بر خواص رئولوژی دوغاب کاربرد سیلیسیم را بررسی کردند [۱۶]. در تحقیقی دیگر توسط ژو و همکارانش اثر عامل پراکنده ساز پلی اتیلن ایمین (PEI) بر خواص رئولوژی دوغاب کاربرد سیلیسیم بررسی شد [۱۷] و در ادامه سان و همکارانش اثر pH را بر بهبود اثر این پراکنده ساز گزارش دادند [۱۸]. با این حال، در منابع مختلف اثر پارامترهای ریخته‌گری ژلی نظیر میزان مونومرها، نسبت مونومر به اتصال دهنده عرضی، نسبت پراکنده ساز و زمان اختلاط بر خواص رئولوژی و استحکام بدنه کاربرد سیلیسیم نهایی به صورت جامع بررسی نشده است.

در این تحقیق به بررسی رفتار رئولوژی و پارامترهای ریخته‌گری ژلی کاربرد سیلیسیم پرداخته شده است. در



شکل ۱- توزیع اندازه ذرات پودر کربید سیلیسیم

جدول ۱- مشخصات پودر کربید سیلیسیم مصرفی

متوسط اندازه ذرات (µm)	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /g)	توزیع اندازه ذرات (µm)		
		D10	D50	D90
۷/۳۸	۱/۶۹	۱/۴۲	۷/۳۸	۲۰/۳۱

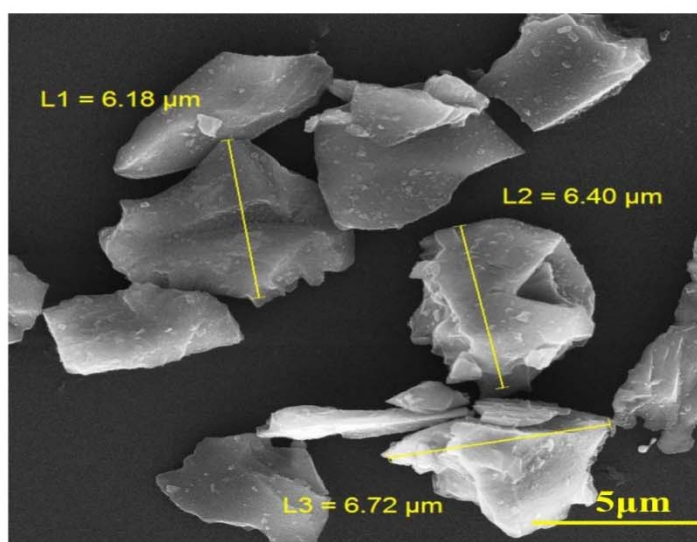
۰/۸ و ۱ درصد وزنی بر اساس وزن کاربرد سیلیسیم) تهیه شد. در مرحله بعدی برای تعیین بهترین زمان آسیاب ۴ دوغاب با ۵۰ درصد حجمی کاربرد سیلیسیم تهیه شد و توسط جارمیل به مدت ۸، ۱۶، ۲۴ و ۳۲ ساعت آسیاب و مخلوط شد. در فرآیند جارمیل از گلوله‌های کاربرد سیلیسیم با اندازه ۱ سانتی‌متر استفاده شد. ۵۰ درصد حجم جارمیل را دوغاب، ۲۵ درصد را گلوله و ۲۵ درصد را فضای خالی تشکیل داد. برای بررسی رفتار دوغاب در حضور مونومر، دوغابی از محلول مونومری اولیه و ۴۵ درصد حجمی بارگذاری جامد و درصد بهینه پراکنده‌ساز و همچنین دوغابی بدون محلول مونومر تهیه و رفتار رئولوژی آن‌ها بررسی شد.

در نهایت دوغاب بهینه تهیه شده به مدت ۵ دقیقه هواگیری و گیرش با افزودن آغازگر و کاتالیست (به میزان ۰/۲ میلی‌لیتر به ازای هر گرم وزن دوغاب از محلول آبی ۱۰ درصد وزنی APS و TEMED) حاصل شد. بعد از انجام فرآیند ژل شدن، بدنه از قالب خارج و فرآیند خشک کردن انجام شد. سپس در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت در اتمسفر اکسیدی نگهداری شد تا مواد آلی خارج شود. در نهایت نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۲۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در اتمسفر آرگون پخت شد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پودر اولیه دارای توزیع اندازه ذرات تک مد و گسترده‌ای است و سهم ذرات ریزتر بیش‌تر است. این امر باعث می‌شود تا فشردگی و چگالی خام مناسبی حاصل شود. همچنین بیش از ۵۰٪ ذرات کاربرد سیلیسیم اندازه‌ای کم‌تر از ۷/۳۸ میکرون دارد. این موضوع بیانگر آن است که علی‌رغم توزیع گسترده پودر مورد استفاده ریز دانه بوده و رفتار تف‌جوشی مناسبی خواهد داشت. همچنین سطح ویژه این پودر  $1/69 \text{ m}^2/\text{g}$  است که با توجه به مطالب ذکر شده دارای مشخصات مناسبی در راستای هدف مدنظر این پژوهش است. شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) پودر اولیه را نشان می‌دهد که به خوبی تایید کننده اطلاعات شکل ۱ و جدول ۱ است. در تصویر FESEM حضور ذرات کاربرد سیلیسیم با شکل نامنظم (irregular shape) و اندازه کم‌تر از ۷ میکرومتر مشاهده می‌شود.

### فرآیند ریخته‌گری ژلی و ساخت نمونه‌ها

در ابتدا یک محلول اولیه از مونومرها و پراکنده‌ساز تهیه شد. میزان مونومر در محلول آبی اولیه ۱۵ درصد وزنی و نسبت اتصال دهنده عرضی به مونومر برابر ۱ به ۱۷/۵ بود. برای تهیه دوغاب پایدار، در ابتدا میزان پراکنده‌ساز تعیین شد. برای این کار دوغاب‌هایی از محلول مونومر فوق و ۴۵ درصد حجمی جامد پودر کاربرد سیلیسیم با مقادیر مختلف پراکنده‌ساز (۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶،



شکل ۲- تصویر FESEM پودر کاربرد سیلیسیم



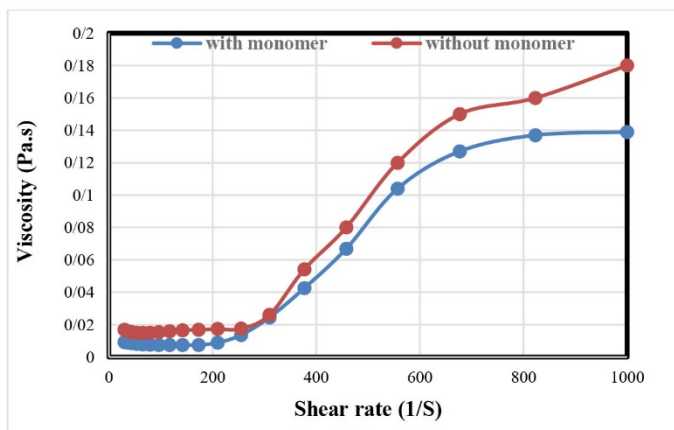
### آزمون‌ها و روش‌های مشخصه‌یابی

به‌منظور تعیین توزیع اندازه ذرات پودر SiC مصرفی، از Particle size analyzer (MAL100229, Malvem, England) استفاده شد. رفتار رئولوژی دوغاب‌ها به کمک رئومتر چرخشی (MCR300, Physica, Germany) در محدوده تنش برشی  $0.01-1000 \text{ s}^{-1}$  بررسی شد. همچنین دوغاب‌های حاصل شده در لوله آزمایش ریخته شد. بعد از ۲۴ ساعت ارتفاع ته‌نشینی دوغاب‌ها اندازه‌گیری شد. استحکام خمشی خام بدنه‌های خام و پخت شده با کمک دستگاه استحکام سنج سه نقطه‌ای (Digital bending strength tester MR-1) بررسی و بهینه شد. بر اساس استاندارد برای انجام هر آزمون استحکام ۵ نمونه با مشخصات یکسان اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی ریز ساختار نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به تفنگ الکترونی گسیل‌میدانی (FESEM) در این پژوهش استفاده شد.

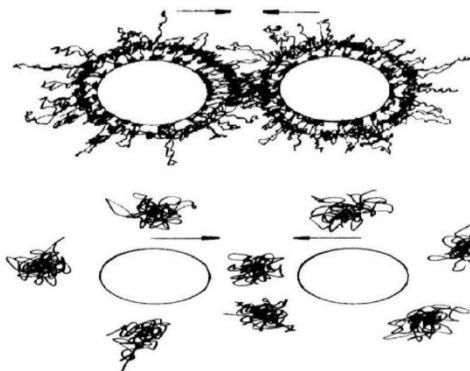
### نتایج و بحث

#### تأثیر استفاده از مونومر

در شکل ۳ تأثیر حضور مونومرهای آلی بر گرانیروی دوغاب نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، گرانیروی در دوغاب حاوی مونومر به میزان اندکی کم‌تر است. این کاهش گرانیروی را می‌توان به اثر دپلشن نسبت داد. دپلشن توسط ماکرومولکول‌هایی که در محلول آزاد هستند ایجاد می‌گردد. در اینجا می‌توان گفت که این مولکول‌ها همان مونومرهای محلول هستند که در دوغاب وجود دارند. در شکل ۴ تفاوت دپلشن با پایداری استریک به صورت شماتیک نشان داده شده است [۱۹]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در دوغاب‌های ریخته‌گری ژلی می‌توان به درصد‌های بالاتر بارگذاری دست یافت.



شکل ۳- تأثیر حضور مونومر بر رفتار رئولوژی دوغاب‌ها



شکل ۴- شماتیک پایداری استریک (بالا) و دپلشن (پایین) [۱۹]

### تأثیر نسبت اتصال دهنده عرضی به مونومر

با افزایش میزان پراکنده‌ساز افزایش گرانروی مشاهده شد.

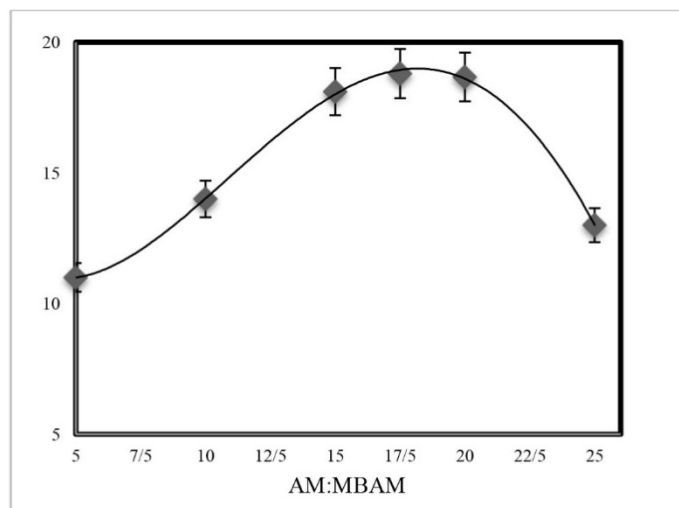
مواد پراکنده‌ساز برای غلبه بر نیروی واندروالس بین ذرات و جلوگیری از آگلومره شدن ذرات از دو سازوکار استفاده می‌کنند: پایداری الکترواستاتیکی و پایداری استریکی. در بعضی از مواد پراکنده‌ساز از یکی از این ساز و کارها و در برخی دیگر از هر دو سازوکار برای پایداری ذرات سرامیکی در محلول استفاده می‌شود. در پایداری الکترواستاتیکی بر روی ذرات باردار یک لایه با بار مخالف جذب می‌شود. نیروی دافعه بین این لایه‌های جذب شده باعث می‌شود، ذرات از هم فاصله بگیرند. در پایداری استریک بنیان‌های پلیمری بر روی ذرات سرامیکی جذب می‌شوند و تداخل این بنیان‌های پلیمری باعث می‌شود تا ذرات بهم نزدیک نشده و سیستم پایدار شود. اگر این پلیمرها پلی الکتروولیت باشند، در pH خاصی هم پایداری الکترواستاتیکی وجود دارد هم پایداری استریک که به پایداری الکترواستریک معروف است TMAH از هر دو ساز و کار الکترواستاتیک و استریک استفاده می‌کند [۲۱]. ذرات کاربرد سیلیسیم بر روی سطح خود حاوی یک فیلم اکسیدی است و مهم‌ترین گروه بر روی سطح ذرات کاربرد سیلیسیم گروه‌های سیلانول است. در داخل آب این گروه‌های سیلانول واکنش می‌دهند [۲۲].

نتایج استحکام خمشی خام در نمونه‌های با نسبت‌های مختلف اتصال دهنده عرضی به مونومر در شکل ۵ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشخص است در نسبت مونومر به اتصال دهنده عرضی ۱۷/۵ به ۱ بیش‌ترین استحکام خام به دست آمد. در مقادیر بسیار زیاد نسبت AM به MBAM شبکه ژلی حاوی میزان ناچیزی اتصال دهنده عرضی است در نتیجه ساختار ژلی باز و ضعیفی تشکیل شده که این امر موجب کاهش استحکام بدنه می‌شود.

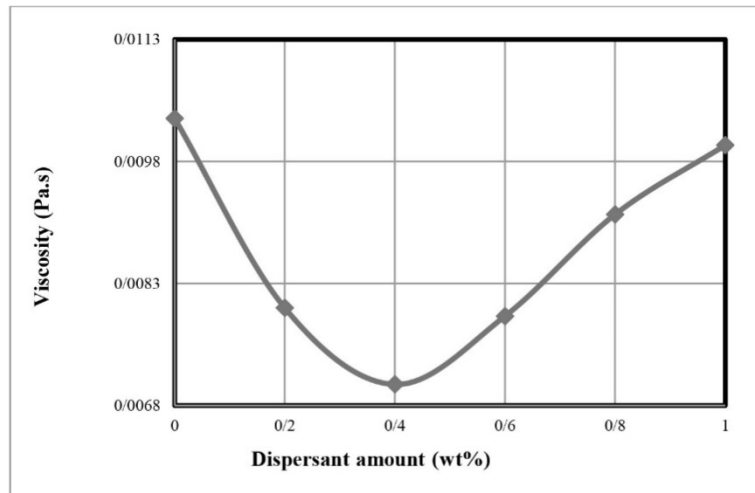
از سوی دیگر، در مقادیر کم نسبت AM به MBAM، به دلیل پلیمریزه شدن رشته‌های MBAM به یکدیگر، موجب افزایش طول پل‌های اتصال دهنده می‌شود که باز موجب ایجاد یک ساختار ژلی باز شده و استحکام بدنه کاهش می‌یابد [۲۰].

### تأثیر میزان پراکنده‌ساز

شکل ۶ نشان‌دهنده نتایج به دست آمده از بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌ها با مقادیر مختلف پراکنده‌ساز است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان پراکنده‌ساز به مقدار ۰/۴ درصد وزنی میزان گرانروی در تنش برشی ثابت ۲۰ 1/S به میزان چشم‌گیری کاهش یافت و در ادامه



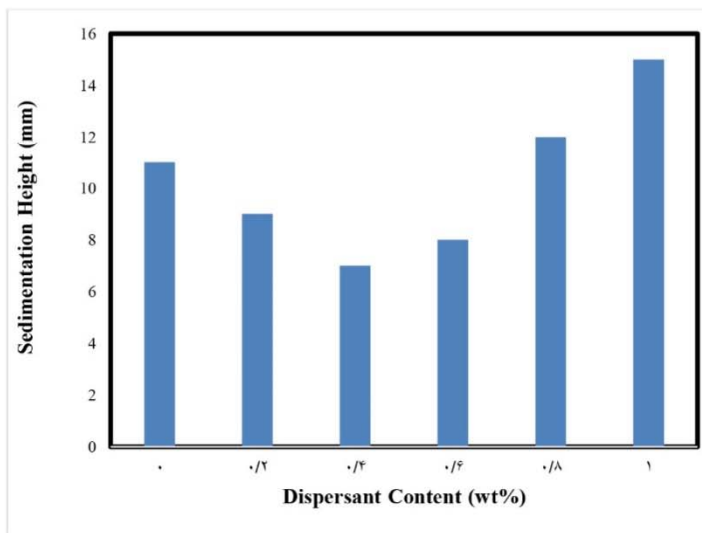
شکل ۵- استحکام خمشی خام در نمونه‌ها با نسبت مختلف اتصال دهنده عرضی به مونومر



شکل ۶- گرانروی دوغاب SiC با ۵۰vol% بار جامد در مقادیر مختلف پراکنده ساز در نرخ تنش برشی ۲۰ 1/S

نزدیک می شوند. در شکل ۷ ارتفاع رسوب برای دوغاب‌های حاوی درصد‌های مختلف پراکنده ساز نشان داده شده است. نتایج این آزمایش نیز در موافقت کامل با نتایج اندازه‌گیری گرانروی (شکل ۶) است و نشان می‌دهد که با اضافه کردن ۰/۴ درصد وزنی TMAH کم‌ترین میزان رسوب مشاهده می‌شود که نشان دهنده بیش‌ترین پایداری است.

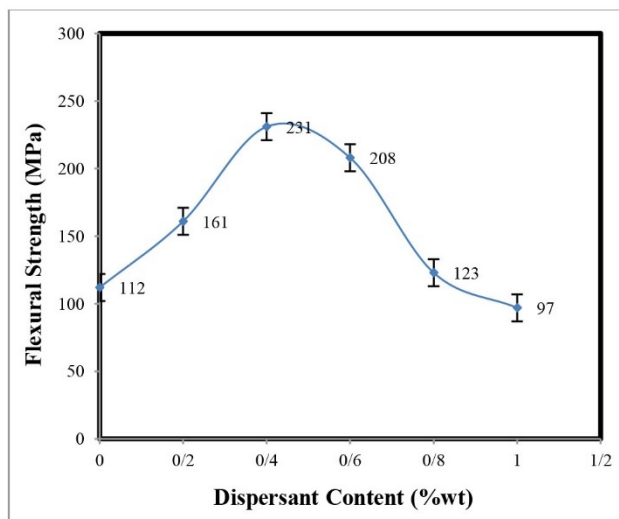
با اضافه کردن TMAH که یک باز آلی قوی است، تجزیه گروه‌های سیلانول و در نتیجه بار منفی سطح ذرات کاربید سیلیسیم افزایش می‌یابد. بنابراین پایداری الکترواستاتیکی، باعث پایداری ذرات کاربید سیلیسیم می‌شود. از طرف دیگر TMAH به صورت استریک نیز باعث پایداری می‌شود. دلیل اینکه با افزایش TMAH بیش‌تر از ۰/۴ درصد وزنی، گرانروی دوباره افزایش می‌یابد این است که لایه الکتریکی مضاعف روی سطح ذرات به علت بار منفی اضافی بهم فشرده شده و ذرات دوباره بهم



شکل ۷- ارتفاع ته‌نشینی بعد از ۲۴ ساعت در درصد‌های مختلف پراکنده ساز

شکل ۹ تصویر FESEM سطح شکست نمونه‌های کاربرد سیلیسیم شکل‌دهی شده توسط ریخته‌گری ژلی و سینتر شده در دمای  $2000^{\circ}\text{C}$  برای درصدهای مختلف پراکنده ساز را نشان می‌دهد. تصاویر نشان می‌دهند که مقداری تخلخل در بدنه سینتر شده وجود دارد و ریز ساختار بدست آمده یکنواخت است. مقایسه تصاویر شکل ۹ نیز نشان می‌دهد که بدنه شامل ۰/۴ درصد وزنی TMAH (شکل ب) دارای ساختار یکنواخت‌تری از نظر توزیع ذرات کاربرد سیلیسیم است و دارای فشردگی قابل قبولی است. استحکام بعد از پخت بدنه شامل ۰/۴ درصد وزنی TMAH به یکنواختی و چگالی بالاتر این بدنه نسبت داده می‌شود. همچنین مطابقت خوبی بین تصاویر FESEM با نتایج چگالی نسبی جدول ۲ و نتایج استحکام شکل ۸ وجود دارد.

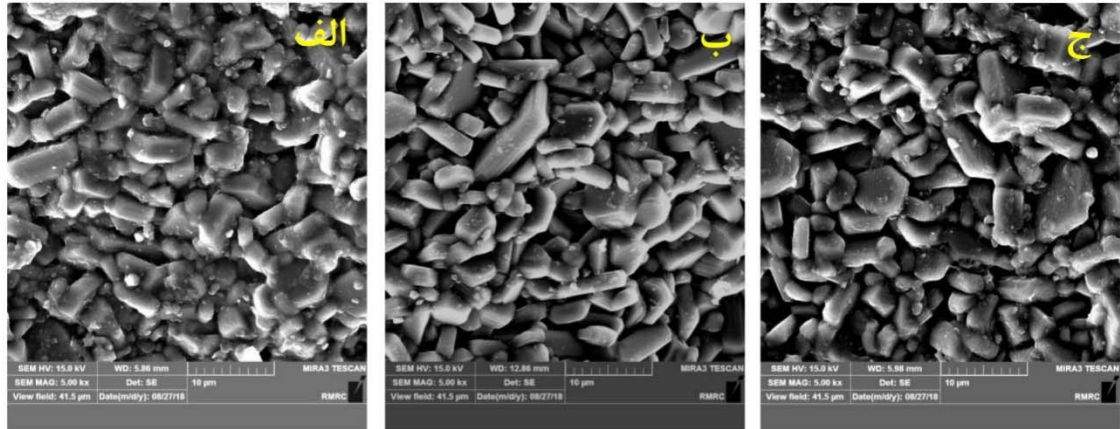
استحکام نمونه‌های پخته شده برای مقادیر مختلف پراکنده‌ساز در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان درصد پراکنده‌ساز تا ۰/۴ درصد وزنی استحکام افزایش و سپس کاهش یافت. همچنین در جدول ۲ نتایج چگالی بعد از پخت گردآوری شده است. نتایج چگالی‌ها نیز در تطابق کامل با نتایج استحکام است و بیش‌ترین چگالی در نمونه پایدار شده با ۰/۴ درصد وزنی TMAH حاصل شده است که می‌توان گفت در نمونه‌ای با بیش‌ترین پایداری کم‌ترین میزان آگلومره وجود دارد که از یک طرف، باعث کاهش ترک‌های میکرونی خواهد شد و از طرف دیگر، به زینتر شدن یکنواخت نمونه‌ها کمک خواهد نمود و باعث بهبود رفتار زینتر شدن خواهد شد که همه این عوامل، باعث افزایش چگالی می‌شود.



شکل ۸- استحکام بعد از پخت بر حسب درصدهای مختلف پراکنده‌ساز

جدول ۲- چگالی نسبی بعد از پخت بر حسب درصد پراکنده ساز

پراکنده ساز (درصد وزنی)	دانسیته نسبی (درصد)
۰	۸۷
۰/۲	۸۹
۰/۴	۹۳
۰/۶	۹۰
۰/۸	۸۷
۱	۸۷



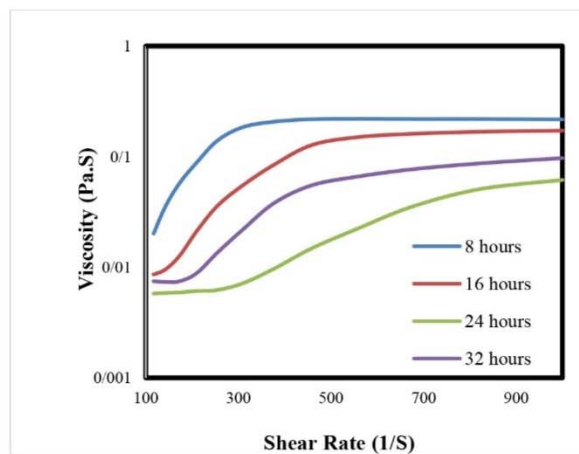
شکل ۹- تصویر FESEM سطح شکست نمونه‌های کاربید سیلیسیم شکل‌دهی شده توسط ریخته گری ژلی و سینتر شده در دمای  $2000^{\circ}\text{C}$  برای درصدهای مختلف پراکنده ساز: الف) ۰/۲ (ب) ۰/۴ (ج) ۰/۸

گرانروی دوغاب کاهش می‌یابد. با افزایش زمان آسیا گرانروی به میزان خیلی ناچیزی افزایش می‌یابد. کاهش گرانروی را می‌توان به عواملی مانند شکسته شدن آگلومرها و افزایش بار سطحی ذرات نسبت داد. افزایش گرانروی با افزایش زمان آسیا تا ۳۲ ساعت می‌تواند عوامل مختلفی داشته باشد. با افزایش زمان آسیا تا ۳۲ ساعت به علت تردی کاربید سیلیسیم امکان دارد متوسط اندازه ذرات کاهش و سطح ویژه افزایش می‌یابد. با کاهش اندازه ذرات درصد بارگذاری کاهش خواهد یافت؛ ولی در درصد بارگذاری ثابت باعث افزایش گرانروی خواهد شد. البته یک احتمال دیگر وجود دارد و آن فلوکولاسیون مجدد ذرات کاربید سیلیسیم به علت آسیاب بیش از اندازه است.

### تأثیر زمان اختلاط

زمان اختلاط و آسیا دوغاب از عوامل مؤثر بر تهیه دوغاب پایدار با خواص جریان‌یابی مناسب است. علت این امر آن است که در زمان آسیا اتفاقاتی مانند شکست آگلومرها و تبدیل به ذرات منفرد، تر شدن سطح ذرات توسط حلال (در اینجا آب)، تشکیل یک لایه هیدراته شده بر سطح ذرات و تغییر بار سطحی ذرات است [۲۲].

شکل ۱۰ نشان دهنده تغییرات گرانروی بر حسب زمان‌های مختلف آسیا است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زمان مخلوط‌سازی تا ۲۴ ساعت

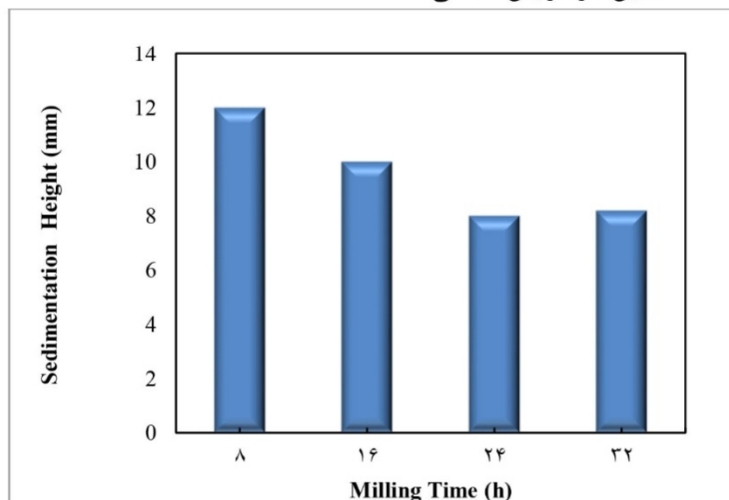


شکل ۱۰- تغییرات گرانروی بر حسب نرخ تنش برای زمان‌های مختلف آسیاب

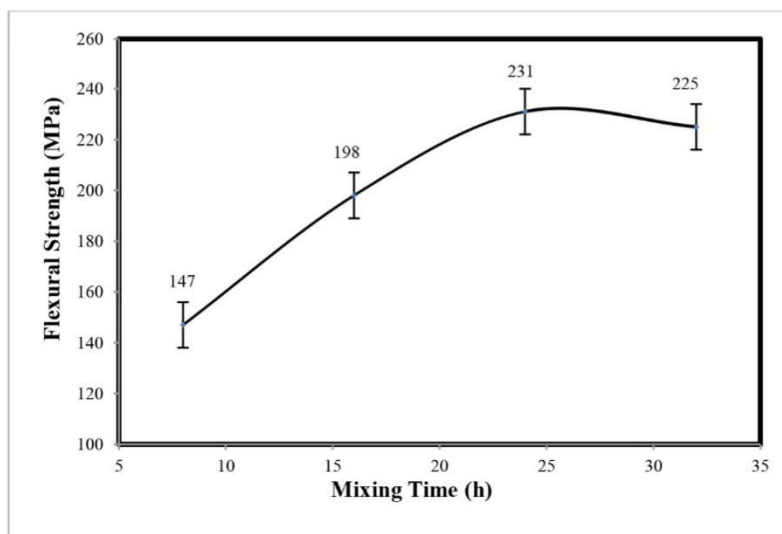
و عدم وجود آگلومره‌ها است که در این زمان اختلاط حاصل می‌شود؛ زیرا اگر دوغاب همگن نباشد و یا حاوی ذرات آگلومره شده باشد، این عدم همگنی در بدنه‌های ژل شده نیز به وجود خواهد آمد که در هنگام خشک شدن باعث اعوجاج و پیدایش ترک‌های میکرونی می‌شود. این ریزترک‌ها در هنگام پخت کاملاً اثر خود را نشان داده و باعث کاهش استحکام خواهند شد.

ارتفاع رسوب برای زمان‌های مختلف آسیا در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تا ۲۴ ساعت ارتفاع رسوب کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش زمان آسیا تا ۳۲ ساعت ارتفاع رسوب تقریباً ثابت مانده است و این نشان دهنده آن است که علی‌رغم افزایش ناچیز گرانروی دوغاب تغییری در پایداری آن حاصل نشده است.

در شکل ۱۲ اثر زمان اختلاط بر استحکام پخت نمونه‌ها نشان داده شده است. همان‌گونه که نشان داده شده است، بیشینه استحکام در نمونه‌های با زمان اختلاط ۲۴ ساعت حاصل شده است. علت این امر افزایش همگنی



شکل ۱۱- ارتفاع رسوب بر حسب زمان‌های مختلف آسیا



شکل ۱۲- استحکام بعد از پخت بر حسب زمان‌های مختلف آسیا

## نتیجه‌گیری

نسبت MBAM به AM برابر ۱ به ۱۷/۵ بیش‌ترین استحکام خام حاصل می‌شود. میزان بهینه پراکنده‌ساز برای تهیه دوغابی با کم‌ترین گرانش و بیش‌ترین پایداری همچنین بیش‌ترین استحکام بعد از پخت برابر ۰/۴ درصد وزنی بر اساس وزن خشک پودر کاربید سیلیسیم تعیین شد. میزان بهینه زمان آسیا برای تهیه دوغابی با کم‌ترین گرانش و بیش‌ترین پایداری همچنین بیش‌ترین استحکام بعد از پخت برابر ۲۴ ساعت انتخاب شد.

در این پژوهش رفتار رئولوژی دوغاب‌های کاربید سیلیسیم تهیه شده به روش ریخته‌گری ژلی و بهینه‌سازی پارامترهای موثر بر این رفتار بررسی شد. نتایج نشان داد که دوغاب‌های حاوی سیستم‌های مونومر آلی دارای گرانش و پایداری بوده در نتیجه در این روش امکان بارگذاری درصد‌های بیش‌تر ماده جامد وجود دارد. نتایج بهینه‌سازی نسبت اتصال دهنده به مونومر نشان داد که در

## References:

1- I. Ganesh, D. C. Jana, S. Shaik, N. Thiyagarajan, An aqueous gelcasting process for sintered silicon carbide ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*, 89(10)(2006), 3056-3064.

۲- ج. پوراسد، ن. احسانی، ع. خلیفه سلطانی، "بررسی مسیر واکنشی تشکیل پوشش تدریجی SiC بر گرافیت با روش سماتاسیون بسته‌ای و تاثیر نوع مواد اولیه" مجله علمی پژوهشی مواد نوین، جلد ۷، شماره ۴، تابستان ۹۶، ص ۳۹-۴۶.

3-

4- D. Jiang, "Gelcasting of carbide ceramics", *J Ceram Soc JPN*, 116.1354 (2008), 694-699.

5- D. C. Jana, G. Sundararajan and K. Chattopadhyay, "Effect of monomers content in enhancing solid-state densification of silicon carbide ceramics by aqueous gelcasting and pressureless sintering", *Ceram. Int* 43 (2017), 4852-4857.

6- Y. Huang and J. Yang, "Novel Colloidal Forming of Ceramics". Springer, New York, 2010.

7- M. A. Janney, O. O. Omatete, C. A. Walls, S. D. Nunn, R. J. Ogle, G. Westmoreland, "Development of low-toxicity

gelcasting systems". *J. Am. Ceram. Soc.*, 81(3)(1998), 581-591.

8- N. O. Shanti, D. B. Hovis, M. E. Seitz, J. K. Montgomery, D. M. Baskin, K. T. Faber, Ceramic laminates by gelcasting. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 6(5)(2009), 593-606.

9- Q. Zhang and M. Gu, "Rheological properties and gel casting of concentrated aqueous silicon suspension", *Mater. Sci. Eng.*, 399 (2005) 351-357.

10- A. C. Young, O. O. Omatete, M. A. Janney, and P. A. Menchhofe, "Gelcasting of Alumina", *J. Am. Ceram. Soc.*, 74 (1991) 612-618.

11- M. Janney, C. Walls, O. O. Omatete, and R. Ogle, Gel casting, 1998.

12- M. Potoczek and E. Zawadzak, "Initiator effect on the gelcasting properties of alumina in a system involving low-toxic monomers", *Ceram. Int.*, 30 (2004) 793-799.

13- A. Barati, M. Kokabi, and M. H. N. Famili, "Drying of gelcast ceramic parts via the liquid desiccant method", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 23(2003) 2265-2272.

14- R. Gilissen, J. Erauw, A. Smolders, E. Vanswijghoven, and J. Luyten, "Gelcasting, a near net shape technique", *Mater. Des.*, 2(2000) 251-257.

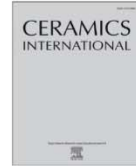
- 15- P. Tabrizian, F. Golestanifard, A. Alem, and E. Ghassemi, "The influence of gelcasting parameters on the preparation of Si porous bodies", *Mater. Lett.*, 183(2016), 19-22.
- 16- K. Mohanta and P. Bhargava, "Effect of Milling Time on the Rheology of Highly Loaded Aqueous-Fused Silica Slurry" *J. Am. Ceram. Soc.*, 91(2) 640-643 (2008).
- 17- Q. Huang, P. Chen, M. Gu, Y. Jin, K. Sun, "Effect of surface modification on the rheological behavior of concentrated aqueous SiC suspensions" *Mater Lett*, 56(4) (2002), 546-553.
- 18- X. Zhu, F. Tang, T. S. Suzuki, and Y. Sakka, "Role of the initial degree of ionization of polyethylenimine in the dispersion of silicon-carbide nano particles". *J. Am. Ceram. Soc.* 2003, 86(1), 189-
- 19- J. Sun, L. Gao, "Dispersing SiC powder and improving its rheological behavior". *J. Eur. Ceram. Soc.*, 21(13) (2001) 2447-2451.
- 20- J. Shi, "Steric Stabilization", Ohio State University, Columbus, 2002.
- 21- A. Alem, "A novel method to fabricate opencell silicon nitride foams with a high and controlled level of porosity," Ph.D thesis, Concordia University, 2014.
- 22- F. Boschini, A. Rulmont, R. Cloots and R. Moreno, "Colloidal stability of aqueous suspensions of barium zirconate", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 25 (2005) 3195–3201.
- 23- W. Li, P. Chen, M. Gu and Y. Jin, "Effect of TMAH on rheological behavior of SiC aqueous suspension", *J. Eur. Ceram. Soc.*, 24 (2004) 3679–3684.





Contents lists available at ScienceDirect

Ceramics International

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ceramint](http://www.elsevier.com/locate/ceramint)

## A novel gel-cast SiC with potential application in turbine hot section: Investigation of the rheological behavior and mechanical properties

Hesam Fallah-Arani<sup>a,\*</sup>, Salah Isafi<sup>a</sup>, Parinaz Tabrizian<sup>a</sup>, Roozbeh Siavash Moakhar<sup>a</sup>,  
Saeid Baghshahi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Non-Metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

<sup>b</sup> Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Silicon carbide  
Gel-casting  
Rheological behavior  
Mechanical property

### ABSTRACT

Using a gel-cast technique, SiC bodies were fabricated and their mechanical properties were thoroughly studied. The main goal of this study is improvement of SiC green body features by the adjustment of slurry composition or processing parameters. The influences of gel-casting parameters such as the monomer acrylamide (AM) content, tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) content as a dispersant, the ratio of the monomer to crosslinking agent AM/MBAM content and the ammonium persulfate (APS) as an initiator on the properties of the samples were investigated. Based on the viscosity measurement and sedimentation tests, TMAH exhibited great electrostatic stability at the pH of 10–11. After the gel-cast process, the relative density of sintered body can be enhanced to 93% and its flexural strength can reach 293 MPa at the optimized gel-casting process that has an AM content 15%, a TMAH content of 0.4 wt%, an AM:MBAM ratio of 17.5:1, an APS 10% and a solid content of 50 vol%, comparable to the best results reported in the other works for SiC bodies.

### 1. Introduction

Ceramic materials have attracted considerable attention in turbine production because of their excellent properties, such as low density, high-temperature performance and cost-effective. The introduction of ceramic materials as a turbine blade, combustor liner and airfoil components offer significant reduction of fuel consumption, pollutant emission and required air cooling [1–4]. Consequently, all these properties result in higher thrust and efficiency of turbines with ceramic materials in comparison with superalloy components [5,6]. The wide range of features in ceramics results in usage of these materials for a multitude of applications. The features of ceramic materials are dictated by the way the atoms are packed together and the types of bonding between the atoms [7,8]. The two most common chemical bonds for ceramic materials are covalent and ionic [9]. As a highly-covalent ceramic material, silicon carbide (SiC) is especially promising for high temperature applications, owing to the superior properties such as thermal stability (high conductivity low coefficient of expansion), mechanical (hardness and flexural strength), chemical (corrosion, oxidation and erosion resistance), relatively lightweight and melting point. It should be noted that the reliability and performance improvement of SiC for hightemperature application depends on homogenous

microstructure and good packing of SiC powders at the consolidation stage of the green body [10–13]. In recent years, the colloidal forming techniques have been applied to obtain dense ceramic materials with complex shape and improved uniformity, i.e. slip casting, tape casting and gel casting [14–18]. Compared to other colloidal methods, a gel casting method has significant benefits, including a near net shape and rapid forming process, high dried strength, easy operation, good wet, excellent machinability of parts before firing, cost-effective, high relative green density, low processing temperature, the wide variety of mold materials, and the capability to fabricate complex shape with thick and thin parts [19,20].

It should be noted that the drying rate considerably affects crack appearance in green gel-cast bodies. The selection of unsuitable drying condition leads to the formation of large cracks across the green body. If the rate of water loss is high or non-uniform, drying stresses will extend and lead to the formation of cracks and warping [21–23]. It is well known that polyethylene glycol (PEG) as a synthetic polymer with different molecular weights is soluble in water and organic solvent, which seems to be the most convenient liquid desiccant for drying of gel-cast bodies. The drying method via PEG1000 has been proposed in several studies to obtain bodies with the minimum defect and residual stress [24].

\* Corresponding author.

E-mail address: [hfallah@nri.ac.ir](mailto:hfallah@nri.ac.ir) (H. Fallah-Arani).

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.110>

Received 6 April 2019; Received in revised form 5 May 2019; Accepted 11 May 2019  
0272-8842/ © 2019 Published by Elsevier Ltd.

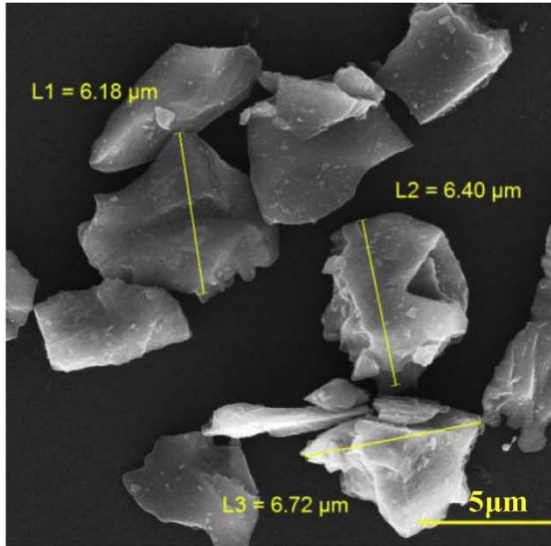


Fig. 1. FESEM micrograph of SiC powder.

To date, few reports have studied the formation of dense SiC ceramic by the gel-casting method. Through the gel-cast route, it is difficult to obtain homogeneous green bodies [25,26]. For solving the mentioned problem in gel-casting, a selection and optimization of gel-casting parameters are critical to be controlled at the desired level.

Here, we thoroughly optimized the gel-casting parameters for the successful fabrication of SiC bodies used in the turbine hot section. To do so, SiC suspension was prepared and influence of each of the mentioned variable on the rheological behavior, linear shrinkage and flexural strength investigated. Then, the mechanical and microstructural properties of the SiC body were fully characterized. Ultimately, this study will pave the way towards vast industrial applications of ceramic materials.

## 2. Experimental procedure

### 2.1. Materials

SiC powders with a purity of 99.9%, manufactured by Zhengzhou Qijun Trading company (China), were employed in the study. As shown in Fig. 1, SiC particles have an irregular shape and the average size of these particles are lower than 7 μm. Acrylamide (AM, C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>CONH<sub>2</sub>, Merck), N,N'-methylene bisacrylamide (MBAM, (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>CONH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>, Merck), were applied in the gel cast process as the monomer and crosslinker for polymerization, respectively. Ammonium persulfate (APS, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, Sigma-Aldrich) was used as initiator and N,N,N',N'-tetramethylethylenediamine (TEMED, C<sub>6</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>, Sigma-Aldrich) was applied as a catalyst. Then Dispersion was promoted by adding a tetramethylammonium hydroxide water solution 25 wt% (TMAH, Sigma Aldrich). NaOH solution was used to adjust the pH to desired values.

### 2.2. Gel-casting process

To prepare the gel-casting body, initially, the premix solution of the monomer and cross-linker dissolved in water was prepared. Then, suspensions by adding 50 vol% solid loaded SiC powder and the TMAH (in the range of 0.2–1) the premix was prepared. Prior to casting, the proper volumes of APS (APS: monomer solution is 1:20) and, eventually, TEMED (TEMED:monomer solution is 1:40) have to be added to

the suspension. After ball milling, the suspension was de-aired under vacuum to remove air bubbles introduced during milling. Finally, the suspensions were cast in silicon rubber molds and drying of the samples was performed in 60% polyethylene glycol (PEG1000) aqueous solution for 2 h, at room temperature followed by two days with 5% humidity and 5 h at 120 °C. The polymer burn-out step was carried out at 600 °C for 2 h with the heating rate of 1 °C/min. Subsequent sintering was carried at 2000 °C for 2 h in the furnace with 0.1 MPa nitrogen and then cooled down at a rate of 5 °C/min to room temperature.

### 2.3. Characterization

The viscosity was measured with a rotational rheometer (Pro2+, Brookfield). Sedimentation tests were also performed for 24 h to determine the sediment height. During this test, the suspensions were poured into the test tube to a height of 2 cm, and after 24 h the height of sediment was measured. Three-point bending tests (Digital bending strength tester MR-1) were performed on green samples. Five specimens were tested for each specific condition. The microstructure of the sintered bodies was inspected using a field-emission scanning electron microscope (FESEM, TESCAN-MIRA3).

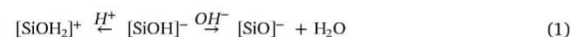
## 3. Results and discussion

### 3.1. Rheology

Since SiC particles are at the maximum level of repulsion in basic pH, TMAH can be an appropriate dispersant to prepare stable and fluid [27,28]. Fig. 2a shows the effect of TMAH on the viscosity of the SiC suspensions. As shown, viscosity initially decreased by increasing the amount of dispersant and minimum viscosity was achieved when TMAH concentration equals 0.4 wt% of SiC powders, after which viscosity increased. The main reason of decrement of viscosity is due to the development of electron cloud surrounding SiC particles, creating electrostatic repulsion forces. It is worth noting, by increasing the concentration of TMAH, the performance of the electrical double layer was influenced by excessive dispersed ions and viscosity increased due to the increment of free ions.

The result was in agreement with the sedimentation test results. Fig. 2b illustrates the result of sedimentation tests of the same suspensions. The dispersant content changed the stability and the height of the sedimentation. The suspension with 0.4 wt% TMAH showed the lowest sedimentation height of about 7 mm out of 2 cm of the suspension height. It seems that TMAH affects the stability of the suspension not only by affecting pH but also by adsorption on the surface of the SiC particles, resulting in repulsion between them.

Fig. 3 depicts the schematic of the repulsion between the two particles of SiC in the presence of TMAH. It is known that the silanol group is the main functional groups on the surface of SiC particles and dissociation of silanol results in surface charge of SiC (Equ. 1). Therefore, the presence of TMAH surfactant leads to enhancement dissociation of silanol and further negatives on the surface of SiC. Inasmuch as the molecular weight of TMAH is low, steric stabilization of SiC suspension is negligible. Hence, the SiC suspension with 0.4 wt% TMAH at the pH of 10–11 is electro sterically stable [29].



It is worth noting that the Stern layer thickness can vary within bulky TMA<sup>+</sup> absorption, leading to an increase of electrostatic interactions and therefore desirable reduction of viscosity. Decrease of suspension viscosity by the addition of TMAH results in the preparation of dispersed state with weakly flocculated powders. Therefore, higher particle packing densities are obtained.

Fig. 4 shows the effect of monomer on the viscosity of the SiC suspensions. As shown, the viscosity of the suspension with monomer is

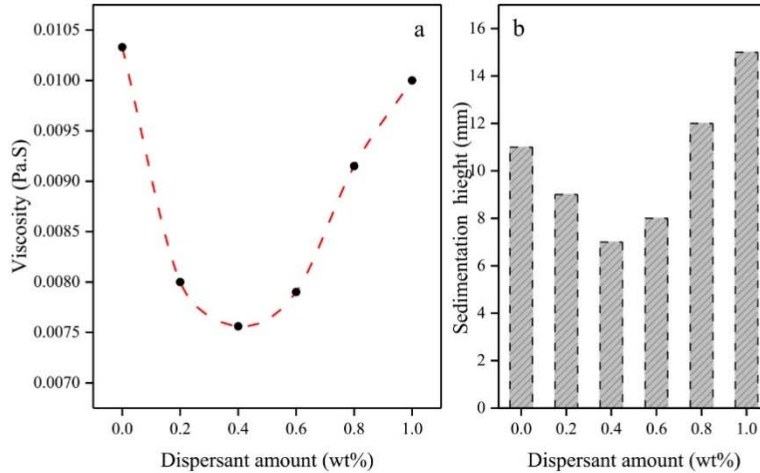


Fig. 2. The SiC suspension with 50 vol% solid content a) The effect of TMAH content on the viscosity at  $20 \text{ s}^{-1}$  shear rate. b) The sedimentation height of the SiC suspensions based on the rate of dispersant.

slightly lower. The main reason of the reduction of viscosity in the suspension containing monomer is due to the depletion effect. Depletion stabilization of colloidal particles is created by macromolecules that are free in solution. This suggests that depletion force can be generated by soluble monomers in the SiC suspensions. Therefore, it can be concluded that higher solid loading can be achieved in a suspension containing monomer.

### 3.2. Optimization of AM content and AM:MBAM ratio

The monomer content and monomer to crosslinking agent (AM:MBAM) ratio play a significant role in the gel-casting process. Fig. 5 demonstrates the effects of AM content and AM:MBAM ratio on the linear shrinkage and flexural strength of the green body. It can be seen from Fig. 5a, with the increase of the AM content, the linear shrinkage firstly decreases to the critical point of 15 wt% of the AM and then increases. In addition, with the increase of the AM content, flexural strength (Fig. 5c) is continuously increasing slowly. Therefore, 15 wt% of the AM content was the optimum amount for obtaining the best properties. As a matter of fact, Three main reasons for optimum selection were suggested in the present study. When the AM content is low, the AM cannot form a complete 3D structure. Thus, incomplete networks are not potent enough to withstand the capillary force performed during the drying process. Therefore, the shrinkage increases whilst the flexural strength decreases. In addition, for the AM content below and around 15 wt%, although the AM amount isn't enough to create a complete 3D network, the strength enhances continuously,

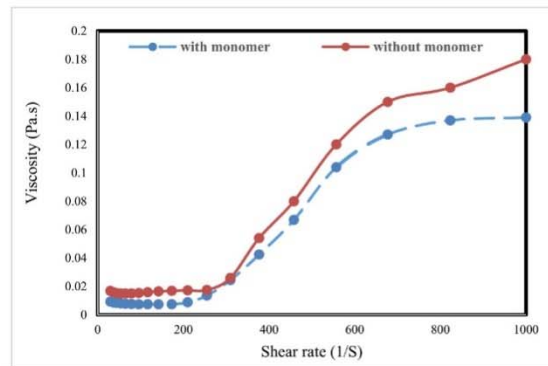


Fig. 4. The effect of monomer content on the viscosity of the SiC suspension.

indicating the AM itself possesses some strength. Finally, at 15 wt% of AM content, it seems that AM is adequate enough to generate the complete network. Upon the addition of the critical point, the incomplete network structure might be formed, which restricts the ceramic powders load in the original network.

As shown in Fig. 5b, with the increase in AM/MBAM ratio up to 17.5, the shrinkage of the green body reaches the lowest value. Fig. 5d shows that initially the increase in the AM/MBAM ratio will lead to an

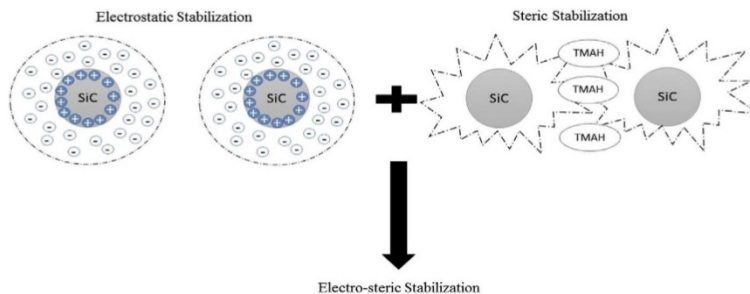


Fig. 3. The schematic of the steric stabilization occurred among SiC particles in the presence of TMAH.

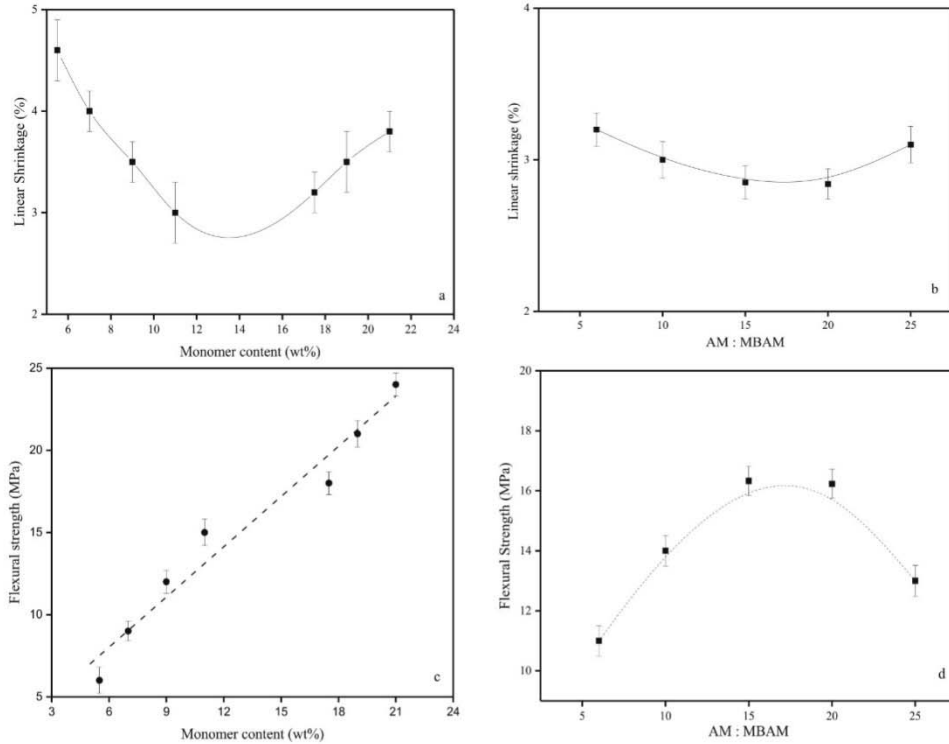


Fig. 5. Effects of AM content (a and c) and AM/MBAM ratio (b and d) on the linear shrinkage and flexural strength of green body.

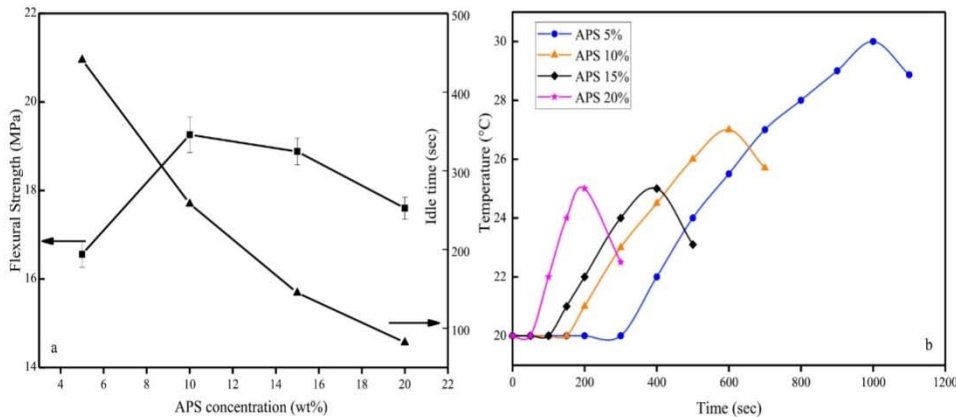


Fig. 6. a) Gelation time & Flexural strength versus initiator content for a suspension with 50 vol% solid made out of a premix solution with 19 wt% monomer content. b) Setting time of the suspensions based on APS concentration.

increase in flexural strength of green bodies. Networks can be formed at the AM/MBAM ratio of 17.5, while decreasing slightly thereafter. Consequently, 17.5 is optimal AM/MBAM ratio. At the small amount of MBAM (high AM/MBAM ratio), the crosslinking rate in some parts of the AM was decreased, leading to the formation of an incomplete network and a consequent increase in linear shrinkage. As a result, the 3D network structure of the polymer gel becomes so fine; therefore, the green strength declines. On the contrary, when the AM/MBAM ratio is low, the crosslinking rate enhances and, resulting in segregation and brittleness of the network, thus causing a decrease in flexural strength.

In other hand, when the amount of MBAM is high, crosslinkers may be distributed heterogeneously during polymerization and ineffective branches can be formed.

### 3.3. Gelation time

Gelation time is a critical parameter in gel-casting, which is dependent on the amounts and concentration of APS and TEMED. Fig. 6a shows the effects of the APS concentration in aqueous solution on the idle time and flexural strength. It should be noted that the idle time can



Fig. 7. FESEM images of samples with different amount of TMAH (wt%) a) 0.2 and b) 0.4 and c) 0.8.

be determined by the variation in the thermal behavior of reaction. In idle time thermal behavior changes from endothermic to exothermic and terminates when the temperature rising is stopped. It can be seen that doubling the APS concentration results in a five-fold decrease of the Idle time.

When the initiator APS concentration isn't adequate, the content of radicals produced isn't sufficient for the complete polymerization in AM-MBAM system and thus reactors cannot contribute in the polymerization reaction.

By increasing the concentration of APS up to 10% the flexural strength reaches the maximum level. As it is seen, enhancement of APS has reduced flexural strength. Increasing the APS leads to the fast polymerization in AM-MBAM and the enhancement in the active sites for chain propagation. Consequently, the length of chains decline and copolymerization of AM as chain former and MBAM increases. As a result, coarse 3D structure forms and formation of microcrack in the green body develops; thus causing a decrease in flexural strength. The obtained results are in good agreement with the previous theoretical work.

Fig. 6b shows the setting time and the temperature of the gel-cast body prepared by various concentrations of the APS. The setting time has a direct influence on the sedimentation and segregation phenomena which can be occurred even in the stabilized suspensions. Therefore, the time of gelation indirectly affected the homogeneity of the gel-cast [30,31]. The setting time must be adjusted in a way that deairing can be possible before casting and on the other hand, the particle sedimentation and segregation do not occur.

### 3.4. Microstructural analysis

Fig. 7 shows the microstructure of the 50 vol% solid content with the different amount of TMAH (0.2, 0.4 and 0.8 wt%) sintered at 2000 °C. The FESEM micrographs of fracture surfaces of the final product, confirming that these samples made from such optimized conditions are rather dense and homogeneous microstructure in which the SiC particles were surrounded by open porosity. It can be seen from the micrographs that better packing of the powders was achieved in the sample with 0.4 wt% TMAH compared to other samples. As can be observed, excessive addition of TMAH dispersant results in the formation of pores and reduction of relative density caused by non-uniform distribution of SiC. Due to the increment of viscosity after 0.4 wt% TMAH (Fig. 2a). In addition, the calculated flexure strength and relative density of this sample are 295 MPa and 93%, respectively. This observation is in good agreement with the rheology behavior explained previously.

### 4. Conclusion

SiC bodies with high performance were successfully fabricated by means of an aqueous gel-casting technique and an optimal condition for processing parameters has been achieved. According to the optimization process, the amount of TMAH, AM, AM: MBAM ratio and APS were the main factors for obtaining homogeneous slurry and consequently the higher green strength. The sintered samples were obtained by pressureless sintering at 2000 °C for 1 h in Ar atmosphere. At this optimized condition, the relative density and flexural strength of the SiC sintered body are 93% and 295 MPa, respectively.

### References

- [1] C. Liu, J. Sun, Effect of load on friction and wear behaviors of alumina matrix ceramic guideway materials, *J. Alloy. Comp.* 743 (2018) 268–273, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.395>.
- [2] S. Zhou, Z. Wang, W. Zhang, Effect of graphite flake orientation on microstructure and mechanical properties of ZrB<sub>2</sub>-SiC-graphite composite, *J. Alloy. Comp.* 485 (2009) 181–185, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.05.126>.
- [3] K. Wei, R. He, X. Cheng, R. Zhang, Y. Pei, D. Fang, A lightweight, high compression strength ultra high temperature ceramic corrugated panel with potential for thermal protection system applications, *Mater. Des.* 66 (2015) 552–556, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.024>.
- [4] J. Sun, L. Gao, Dispersing SiC powder and improving its rheological behaviour, *J. Eur. Ceram. Soc.* 21 (2001) 2447–2451, [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00196-0](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00196-0).
- [5] M. Gromada, A.-wieca, M. Kostecki, A. Olszyna, R. Cygan, Ceramic cores for turbine blades via injection moulding, *J. Mater. Process. Technol.* 220 (2015) 107–112, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.010>.
- [6] M. Shahedi Asl, M.J. Zamharir, Z. Ahmadi, S. Parvizi, Effects of nano-graphite content on the characteristics of spark plasma sintered ZrB<sub>2</sub>-SiC composites, *Mater. Sci. Eng. A* 716 (2018) 99–106, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.038>.
- [7] H.F. Arani, A. Mirhabibi, Effect of nano carbon additives on the microstructure of polyvinyl chloride heated up to 2000°C, Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostruct. 24 (2016) 34–42, <https://doi.org/10.1080/1536383X.2015.1110696>.
- [8] H. Fallah-Arani, S. Baghshahi, A. Sedghi, D. Stornaiuolo, F. Tafuri, N. Riahi-Noori, Enhancement in superconducting properties of Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> (Bi-2212) by means of boron oxide additive, *Phys. C Supercond. Its Appl.* 548 (2018) 31–39, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.01.012>.
- [9] H.F. Arani, A.R. Mirhabibi, S. Collins, R. Daroughegi, A. Khalife Soltani, R. Naghizadeh, N. Riahi-Noori, R. Aghababazadeh, A. Westwood, Enhancement in graphitization of coal tar pitch by functionalized carbon nanotubes, *RSC Adv.* 7 (2017) 5533–5540, <https://doi.org/10.1039/C6RA25441A>.
- [10] J. Yoo, J.W. Ko, Y.K. Kim, K.C. Chung, Synthesis and characterization of fine and homogeneous BSCCO-2223 precursor powder by spray pyrolysis process for PIT process, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 15 (2005) 2474–2477, <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.847489>.
- [11] Q. Huang, M. Gu, K. Sun, Y. Jin, Effect of pretreatment on rheological properties of silicon carbide aqueous suspension, *Ceram. Int.* 28 (2002) 747–754, [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(02\)00038-X](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(02)00038-X).
- [12] Y. Zhang, Z. Yuan, Y. Zhou, Gelcasting of silicon carbide ceramics using phenolic resin and furfuryl alcohol as the gel former, *Ceram. Int.* 40 (2014) 7873–7878, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.134>.
- [13] V.M. Candelario, R. Moreno, Z. Shen, A.L. Ortiz, Aqueous colloidal processing of nano-SiC and its nano-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> liquid-phase sintering additives with carbon nanotubes, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 3363–3368, <https://doi.org/10.1016/j.j>

## ARTICLE IN PRESS

H. Fallah-Arani, et al.

Ceramics International xxx (xxxx) xxx-xxxx

- jeurceramsoc.2015.05.015.
- [14] L. Kheyrinia, H.R. Baharvandi, N. Ehsani, O. Yaghoobzadeh, Fabrication of SiC bodies by optimized gel-casting method, *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* 81 (2019) 225–232, <https://doi.org/10.1016/j.IJRMHM.2019.02.012>.
- [15] M. Khodaei, O. Yaghoobzadeh, N. Ehsani, H.R. Baharvandi, The effect of TiO<sub>2</sub> additive on the electrical resistivity and mechanical properties of pressureless sintered SiC ceramics with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* 76 (2018) 141–148, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2018.06.005>.
- [16] R. Mouazer, I. Thijs, S. Mullens, J. Luyten, SiC foams produced by gel casting: synthesis and characterization, *Adv. Eng. Mater.* 6 (2004) 340–343, <https://doi.org/10.1002/adem.200400009>.
- [17] H. Li, H.Z. Xu, C.L. Zhou, Y.Y. Wang, Study on the gel casting process of silicon carbide, *Key Eng. Mater.* 697 (2016) 138–142 <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.697.138>.
- [18] W. Zhang, H. Wang, Z. Jin, Gel casting and properties of porous silicon carbide/silicon nitride composite ceramics, *Mater. Lett.* 59 (2005) 250–256, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.07.059>.
- [19] H. Wu, D. Li, Y. Tang, B. Sun, D. Xu, Rapid fabrication of alumina-based ceramic cores for gas turbine blades by stereolithography and gelcasting, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 5886–5891, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.07.002>.
- [20] N.O. Shanti, D.B. Hovis, M.E. Seitz, J.K. Montgomery, D.M. Baskin, K.T. Faber, Ceramic laminates by gelcasting, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 6 (2009) 593–606, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2008.02312.x>.
- [21] Z. Fu, U. Eckstein, A. Dellert, A. Roosen, In situ study of mass loss, shrinkage and stress development during drying of cast colloidal films, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 2883–2893, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.03.029>.
- [22] P. Wicinska, T. Graule, M. Bachonko, Organic additives in gel-tape casting of ceramic powders - a novel approach to the problem of elasticity and cracking of thin tapes, *J. Eur. Ceram. Soc.* 35 (2015) 3949–3957, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.05.028>.
- [23] D. Kong, H. Yang, S. Wei, D. Li, J. Wang, Gel-casting without de-airing process using silica sol as a binder, *Ceram. Int.* 33 (2007) 133–139, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.08.006>.
- [24] M. Trunec, Osmotic drying of gelcast bodies in liquid desiccant, *J. Eur. Ceram. Soc.* 31 (2011) 2519–2524, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.02.015>.
- [25] W. Li, P. Chen, M. Gu, Y. Jin, Effect of TMAH on rheological behavior of SiC aqueous suspension, *J. Eur. Ceram. Soc.* 24 (2004) 3679–3684, <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.023>.
- [26] D. Jiang, Gelcasting of carbide ceramics, *J. Ceram. Soc. Japan.* 116 (2008) 694–699, <https://doi.org/10.2109/jcersj2.116.694>.
- [27] R. He, X. Zhang, P. Hu, W. Han, C. Hong, Preparation of YAG gel coated ZrB<sub>2</sub>-SiC composite prepared by gelcasting and pressureless sintering, *Compos. B Eng.* 54 (2013) 307–312, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.039>.
- [28] T. Zhang, Z. Zhang, J. Zhang, D. Jiang, Q. Lin, Preparation of SiC ceramics by aqueous gelcasting and pressureless sintering, *Mater. Sci. Eng. A* 443 (2007) 257–261, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.047>.
- [29] Q. Huang, P. Chen, M. Gu, Y. Jin, K. Sun, Effect of surface modification on the rheological behavior of concentrated, aqueous SiC suspensions, *Mater. Lett.* 56 (2002) 546–553, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00550-5](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00550-5).
- [30] M. Potoczek, E. Zawadzak, Initiator effect on the gelcasting properties of alumina in a system involving low-toxic monomers, *Ceram. Int.* 30 (2004) 793–799, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.09.014>.
- [31] F. Yongbao, G. Jian, Q. Tai, Z. Wenpeng, G. Tianhao, Z. Chao, Y. Jian, Process dependant setting behavior of aqueous gelcast AlN slurries, *Ceram. Int.* 38 (2011) 2905–2911, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.11.066>.