بررسی تأثیر پرکننده‌های معدنی بر ویژگی‌های مکانیکی و گرانروی گوگرد اصلاح شده

نرمین بهرامی آده+، میترا مهتدی حقیقی، ناهید محمد حسینی، آزاده پاپن، فاطمه خرم‌جاه، هادی خانی*

کرج، پژوهشکده توسعه صنایع شیمیایی ایران (وابسته به جهاد دانشگاهی)

چکیده: *استفاده از پودر گوگرد به دلیل قیمت پایین و دارا بودن ویژگی‌های خاصی از جمله خاصیت چسبانندگی و ضد خوردگی ، به طور گسترده‌ای در صنایع ساختمانی توصیه شده است اما اصلاح گوگرد و بهبود ویژگی‌های شیمیایی و مکانیکی آن از روش واکنش با اصلاح کننده‌ها و اختلاط با پودرهای معدنی ضرورت دارد. در این پژوهش ابتدا، گوگرد اصلاح شده از واکنش گوگرد مذاب با افزودنی اولفینی تهیه شد. سپس از اختلاط آن با درصدهای گوناگون از پرکننده (فیلر) های سیلیس، میکا و تالک، نمونه‌های چندسازه (کامپوزیت) ساخته شد. نمونه‌ها تحت آزمون‌های مکانیکی کششی، خمشی و فشاری قرار گرفتند. بررسی نتیجه‌های آزمون‌ها نشان داد بیشترین مقاومت خمشی و فشاری با نمونه‌های چندسازه دارای ۱۰ درصد تالک و مقاومت کششی با نمونه‌های دارای ۱۲درصد میکا ایجاد می‌شود. همچنین مشخص شد افزودن پودر سیلیس باعث افزایش چشمگیر گرانروی گوگرد اصلاح شده می‌شود.*

واژه‌های کلیدی: *گوگرد، گوگرد اصلاح شده، پرکننده (فیلر) معدنی، ویژگی‌های مکانیکی، میکا، سیلیس، تالک.*

KEY WORDS: *Sulfur, Modified sulfur, Inorganic fillers, Mechanical properties, Mica, Silica, Talc.*

مقدمه

گوگرد در بیشتر کشورها به عنوان فراورده‌ی جانبی صنایع نفت و گاز در دسترس است. قیمت پایین و آسانی حمل و نقل و دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد گوگرد، موجب شده است تا از آن به عنوان یکی از مصالح ساختمانی جایگزین یا با هدف توسعه کاربرد در بتن استفاده شود. کاربرد گوگرد مذاب به عنوان عامل چسباننده در صنعت ساختمان از سالها پیش مطرح می‌باشد. نتیجه‌های پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد گوگرد مذاب پس از سرد شدن ابتدا دارای مقاومت بالایی بوده اما با گذشت زمان بخش چشمگیری از مقاومت خود را از دست می‌دهد. دانشمندان برای به تأخیر انداختن این کاهش مقاومت تلاش بسیاری کرده و روش‌های گوناگونی را برای اصلاح گوگرد ارایه داده‌اند. همزمان با اصلاح ویژگی‌های شیمیایی گوگرد، پژوهش‌ها در زمینه استفاده از پرکننده(۱) معدنی مناسب برای بهبود ویژگی‌های مکانیکی نیز صورت گرفته‌است.

در سال ۱۹۷۷ میلادی، *ویلیام مک‌بی* به همراه *توماس سولیوان* و همکاران مصالح ساختمانی گوگردی با مقاومت مکانیکی و خوردگی بالا تهیه کردند که از اختلاط گوگرد اصلاح شده، عامل مرطوب کننده(۲)، فیبر آزبست و نرمه سیلیس به دست آمد.

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: b_adeh@yahoo.com

(۱) Filler

(۲)Wetting agent

ویژگی‌های مکانیکی این فراورده با روش قالبگیری تحت فشار برای ساخت مواد ساختمانی مانند کاشی‌ها، آجرها، قطعه‌های لوله و ... افزایش داده شد و در ساخت مخزن‌های اسید، گودال‌های زباله یا لوله‌های انتقال پساب اسیدی یا مایع‌های صنعتی خورنده به‌کار رفت [۱].

آزبست استفاده شده در این ترکیب به صورت فیبرهای کوتاه بوده و نقش آن در ترکیب به عنوان عامل افزایش مقاومت برشی(۱) و خمشی بود. نرمه سیلیس پرکننده خنثی و با مش ۳۲۵ مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های تهیه شده تحت آزمون مقاومت خمشی قرار گرفتند. نتیجه‌های این آزمون در جدول ۱ آورده شده‌است.

در همین سال *میلوتین سیمیک* و *همکاران* در زمینه استفاده از میکا همراه با ترکیب گوگرد اصلاح شده پژوهش‌هایی را انجام دادند که در ساخت آبگیرها، کف‌های بتنی در معرض رفت و آمد زیاد عابران، پوشش کانال‌های آبیاری و مانند آن به‌کار می‌رفت. در بیشتر این کاربردها مقاومت ترکیب نقش مهمی داشت. براساس پژوهش‌ها سیمیک دریافت، استفاده از میکا نسبت به پرکننده‌های معدنی دیگر در مقایسه با فرمولاسیون ترکیب‌های گوگردی همانند، مقاومت ترکیب را ۲۵ تا ۲۰۰ درصد افزایش می‌دهد. افزون بر آن به این نتیجه رسید که فرمولاسیون گوگرد اصلاح شده با میکا، ویژگی‌های مقاومتی همانند فرمولاسیون دارای فیبر شیشه و میکا و همانند یا بهتر از ترکیب‌های دارای فیبر شیشه و تالک دارد. نتیجه‌های به‌دست آمده از آزمون‌های مکانیکی در جدول ۱ آورده شده است. نمونه‌های دارای ۱۷ درصد میکا و همچنین مخلوط ۱۰ درصد میکا و ۳ درصد فیبر شیشه، بالاترین مقاومت مکانیکی را داشتند. در این حال گرانروی نمونه‌های تهیه شده به نسبت همانند بود، به عبارت دیگر مخلوطی با گرانروی بالا که هم چنان قابلیت اسپری داشت [۲].

در سال ۱۹۷۸ میلادی، سیمیک پژوهش‌های دیگری را در زمینه تهیه فرمولاسیون دارای گوگرد اصلاح شده انجام داد که به عنوان پوشش بتن و همچنین در ساخت آسفالت گوگردی کاربرد داشت. این ترکیب توسط فیبرهای شیشه و آزبست مسلح شد و تالک به عنوان عامل پخش کننده مورد استفاده قرار گرفت، نمونه ها پس از ساخت تحت آزمون مقاومت مکانیکی قرار گرفتند[۳]. نتیجه‌ها در جدول ۱ نشان می‌دهد نمونه‌های دارای ۸ درصد تالک به همراه ۲ درصد آزبست دارای مقاومت کششی و فشاری بالا و نمونه‌های دارای ۷ درصد تالک و ۳ درصد فیبر شیشه دارای مقاومت خمشی بالاتری است.

در سال ۱۹۸۰ میلادی، *سیمیک* و *همکاران* در ادامه پژوهش‌های خود ترکیب‌های گوگردی تهیه کردند که در آن‌ها از کنسانتره گوگردی دارای گوگرد اصلاح شده و پرکننده میکا یا تالک و فیبر شیشه استفاده شده بود. به منظور ساخت نمونه ها کنسانتره دوباره ذوب شده و با گوگرد اضافی مخلوط می‌شد. این فراورده به عنوان پوشش قابل اسپری بر روی سطوح کاربرد داشت. از این‌رو کنترل گرانروی نمونه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود. ذوب دوباره گوگرد و کنسانتره در تهیه نمونه‌ها موجب کاهش گرانروی و در نتیجه تیکسوتروپی(۲) فراورده شده و هنگام پاشیدن بر روی سطوح عمودی ریزش می‌کرد. به همین دلیل، برای افزایش گرانروی هنگام ذوب دوباره کنسانتره گوگردی، پلی‌هیدریک الکل اشباع مانند سوربیتول یا گلیسرول را به آن افزودند (جدول ۲).

به منظور اندازه‌گیری گرانروی، ابتدا نمونه‌ای دارای گوگرد اصلاح شده، تالک و فیبر شیشه تهیه شد. سپس نمونه کنسانتره با همین ترکیب اما مقدار گوگرد کمتر تهیه شد و با گوگرد اضافی مخلوط شد سپس با درصدهای گوناگون سوربیتول و گلیسرول مخلوط و گرانروی آنها اندازه‌گیری شد. جدول ۲ نتیجه‌های این آزمون را نشان می‌دهد. افزودن سوربیتول موجب بالارفتن گرانروی نمونه‌های ساخته شده با کنسانتره گوگردی به اندازه گرانروی ترکیب گوگردی بدون کنسانتره شده است و افزودن گلیسرول موجب بالا رفتن گرانروی بیش از این مقدار شده است [۴].

در همان سال *سیمیک* و *همکاران* ترکیب‌های گوگردی با استفاده از گوگرد اصلاح شده و پرکننده‌های میکا، میکا ـ فیبر شیشه و تالک ـ آزبست نیز تهیه کردند که به عنوان پوشش بر روی سطوحی مانند دیوار که در معرض شرایط جوی ازجمله نوسان‌های دمایی قرار داشتند، اسپری می‌شد. این ترکیب‌ها در سیکل‌های گرمایی مورد آزمون قرارگرفتند. در بین آنها، از نمونه‌های تهیه شده با پرکننده میکا و میکا ـ فیبر شیشه نتیجه‌های مورد قبولی به‌دست آمد[۵].

در پژوهش حاضر، تأثیر ریز پرکننده‌های(۳) معدنی سیلیس، تالک و میکا، به طور جداگانه بر ویژگی‌های فیزیکی گوگرد اصلاح شده مورد آزمون قرار گرفت.

(۱) Shear strengthening agent

(۲) Thixotropy

(۳) Micro fillers

جدول ۱ـ نتیجه‌های مقاومت مکانیکی ترکیب‌های گوگردی.

شماره مرجع	مقاومت فشاری Mpa	مقاومت کششی Mpa	مقاومت خمشی Mpa	آزبست	فیبر شیشه	تالک	میکا	نرمه سیلیس	گوگرد اصلاح شده
[۱]	–	–	۱۷٫۳۴ فشار در طول قالبگیری= ۳٫۴۴	۸[۱]	–	–	–	۳۳	۵۸
	–	–	۸٫۵۱ فشار در طول قالبگیری= ۸٫۹۶	۱۰[۱]	–	–	–	۳۲	۵۷
	–	–	۲۲٫۳۴ فشار در طول قالبگیری= ۸٫۹۶	۸[۱]	–	–	–	۳۳	۵۸
[۲]	–	شکننده	۳٫۹۳	–	–	۱۰	–	–	۹۰
	–	۴٫۴۸	۱۰٫۲۰	–	۳	۱۰	–	–	۸۷
	–	۳٫۱۰	۲٫۰۷	–	–	۱۲	–	–	۸۸
	–	۹٫۶۶	۱۴٫۴۸	–	–	–	۱۷	–	۸۳
	–	۸٫۶۲	۱۳٫۱۰	–	–	–	۱۶	–	۸۴
	–	۵٫۵۲	۱۴٫۴۹	–	–	–	۱۲	–	۸۸
	–	۸٫۰۶۷	۱۴٫۱۳	–	۳	–	۱۰[۲]	–	۸۷
	–	۸٫۰۶۷	۱۴٫۴۸	–	۳	–	۱۰[۳]	–	۸۷
	۴٫۰۶	۰٫۶۹	۹٫۵۸	–	۲٫۶	–	۸٫۶[۲]	–	۸۸٫۸
	۴۷٫۶۱	۷٫۲۴	۹٫۳۸	–	۲٫۶	–	۸٫۶[۳]	–	۸۸٫۸
	۴۶٫۱۹	۸٫۶۹	۱۵٫۱۷	–	۳	–	۱۰[۴]	–	۸۷
	۲۷٫۶	۸٫۲۷	۱۱٫۳۸	۶	–	–	۲	–	۹۲
[۳]	۵۲٫۴۰	۶٫۴۱	۹٫۶۵	۲	–	۸	–	–	۹۰
	۴۶٫۱۹	۵٫۲۴	۸٫۷۶	۲٫۴	–	۹٫۶	–	–	۸۸
	۳۳٫۰۹	۴٫۸۳	۱۰٫۳۴	–	۳	۷	–	–	۹۰
	۳۴٫۴۷	۳٫۷۹	۶٫۴۱	–	۲	۸	–	–	۹۰

۱ـ آزبست مورد استفاده با ۱ درصد دی پنتن مرطوب شده است.

۲ـ میکا با دانه بندی ۳٪ > مش ۳۲۵

۳ـ میکا با دانه بندی ۴٪ > مش ۳۲۵

۴ـ میکا با دانه بندی ۴۰-۳۰٪ > مش ۳۲۵

جدول ۲ـ نتیجه‌های گرانروی ترکیب‌های گوگردی.

نمونه	افزودنی (٪)	گرانروی در ۱۴۵ °C (cp)			
		۶ rpm	۱۲ rpm	۳۰ rpm	۶۰ rpm
ترکیب گوگردی[1]	–	۳۲۰۰	۲۰۰۰	۱۲۰۰	۹۰۰
کنسانتره گوگردی+ گوگرد	–	۱۳۰۰	۸۵۰	۷۵۰	۴۵۰
کنسانتره گوگردی+ گوگرد	۰/۲ سوربیتول	۴۲۰۰	۲۶۰۰	۱۴۳۰	۹۵۰
کنسانتره گوگردی+ گوگرد	۰/۵ گلیسرول	۷۲۰۰	۴۳۰۰	۲۲۰۰	۱۳۵۰

همچنین در این پژوهش اندازه‌گیری گرانروی چندسازه گوگردی نیز انجام شد که تا کنون بی‌سابقه می‌باشد و قبلاً پژوهشی در این ارتباط انجام نشده است.

بخش تجربی

مواد

گوگرد با درصد خلوص تجاری که از فراورده‌های جانبی پتروشیمی است. استایرن صنعتی، پودر سیلیس، پودر میکا و پودر تالک در مقیاس میکرو.

تجهیزات

راکتور شیشه‌ای مجهز به سامانه رفلاکس، حمام روغن (دارای روغن سیلیکون با قابلیت تحمل گرمای بالای ۲۰۰ °C) قیف قطره‌ای، گرم‌کن دیجیتال و همزن مکانیکی (با قابلیت تنظیم دور همزن).

تهیه گوگرد اصلاح شده و چندسازه گوگردی

گوگرد اصلاح شده از واکنش گوگرد مذاب با افزودنی استایرن به نسبت ۴درصد گوگرد در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت در حالی‌که توسط همزن مکانیکی با دور ۲۵۰ rpm همزده می‌شد، تهیه شد [۷،۶]. مسیر تهیه در شکل ۱ و مجموعه واکنش در شکل ۲ نشان داده شده است. پس از اتمام زمان واکنش، پودر معدنی که پیش‌تر گرم شده بود کم‌کم به مخلوط فوق افزوده شده و به مدت یک ساعت توسط همزن مکانیکی با دور ۴۰۰ rpm همزده شد. سپس مخلوط مذاب تخلیه و در دمای اتاق سرد شد [۸]. سرد شدن در هوای آزاد و بدون عامل سرد کننده انجام شده و نمونه‌ها بعد از سرد شدن از قالب جدا می‌شد.

نتیجه‌ها و بحث

مطالعه مرفولوژی

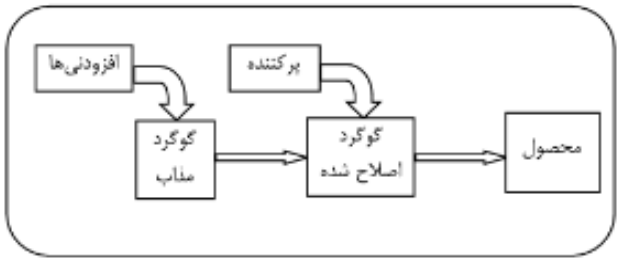
مطالعه‌ی ساختار نمونه‌های گوگرد و گوگرد اصلاح شده و چندسازه گوگردی با استفاده از روش میکروسکوب الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL 30 انجام گرفت.

شکل ۳ تصویر SEM گوگرد مذاب پس از سرد شدن را نشان می‌دهد. خلل و فرج به‌وجود آمده به دلیل تغییر شکل در تبدیل بلورهای گوگرد β به α می‌باشد. همین موضوع لزوم استفاده از اصلاح کننده را نشان می‌دهد. در واقع اصلاح کننده با بخشی از گوگرد واکنش داده و پلی سولفید پلیمری تولید می‌کند که هنگام سرد شدن گوگرد مذاب موجب تثبیت گوگرد واکنش نکرده می‌شود. در شکل ۴ تأثیر حضور اصلاح کننده قابل دیدن است و ماتریس پلیمر گوگرد اصلاح شده دیده می‌شود اما ذره‌های گوگرد واکنش نکرده و عدم یکنواختی فاز اصلاح شده و توزیع نامناسب ذره‌های سیلیس نیز به خوبی دیده می‌شود. ذره‌های سیلیس هیدروفیل (آب‌دوست) تمایل زیادی به فاز ماتریس پلیمر گوگرد اصلاح شده هیدروفوب (آب‌گریز) ندارد بنابراین سیلیس به خوبی در ماتریس پلیمر گوگردی پخش نشده است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب مربوط به تصویرهای SEM چندسازه گوگردی دارای تالک و میکا است که سطوح یکنواخت و پیوستگی ماتریس گوگرد اصلاح شده با پودرهای تالک و میکا را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها ذره‌های گوگرد واکنش نکرده بسیار کمتر دیده می‌شوند و ماتریس گوگردی با نفوذ به لابه‌لای پودرهای معدنی فاز همگنی را ایجاد کرده‌است.

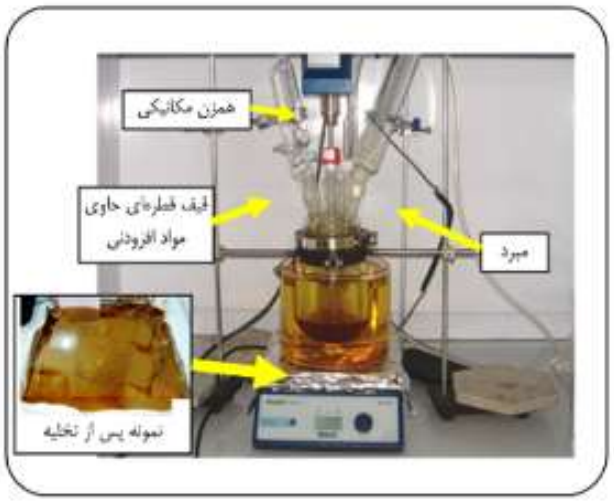
مطالعه گرانروی

به منظور اندازه‌گیری گرانروی نمونه‌های گوگرد و گوگرد اصلاح شده و چندسازه گوگردی، با توجه به روش آزمون

(۱) Sulfur composition



شکل ۱ـ فرایند تهیه چندسازه گوگردی.



شکل ۲ـ مجموعه آزمایشگاهی برای تهیه چندسازه گوگردی.

ASTM C1159، از ویسکومتر چرخشی بروکفیلد مدل LV II + Pro استفاده شد ونمودار چگونگی تغییرهای گرانروی بر حسب دما برای نمونه‌های مورد آزمون رسم شد.

همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود گرانروی گوگرد مذاب در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حدود ۱۷ سانتی پواز است و با افزایش دما تا ۱۵۸درجه سلسیوس تقریباً به مقدار ۴ سانتی پواز کاهش می‌یابد. از این نقطه‌ی دمایی گرانروی به سرعت بالا می‌رود که در نتیجه‌ی افزایش غلظت و طول مولکول‌های چند رشته‌ای در مایع مذاب است. از این‌رو بازه‌ی دمایی بهینه در استفاده از گوگرد و چندسازه گوگردی بین ۱۲۷ تا ۱۴۷ درجه سلسیوس می‌باشد افزایش شدید گرانروی در دماهای بالاتر تولید ماده‌ی چسبنده و ژله‌ای می‌کند که قابلیت روان شدن مناسبی ندارد [۹].

اصلاح گوگرد با مواد افزودنی اولفینی، گرانروی گوگرد را در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس از ۱۷ سانتی پواز تا حدود ۲۲۰ سانتی‌پواز افزایش می‌دهد. با بالا رفتن دما تا ۱۵۰ درجه سلسیوس همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، گرانروی با روند یکنواختی تا ۲۳۰ سانتی پواز افزایش می‌یابد. در شکل ۸ نمودار گرانروی چندسازه‌های گوگردی تهیه شده با پودرهای معدنی گوناگون در مقایسه با گوگرد اصلاح شده (بدون پرکننده) نشان داده شده است. افزودن پودرهای تالک و میکا به گوگرد اصلاح شده موجب شده است گرانروی به ۴۰۰ تا ۵۰۰ سانتی پواز افزایش یابد درحالی که چندسازه گوگردی تهیه شده با پودر سیلیس گرانروی بسیار بالاتری در حدود ۲۲۰۰ سانتی پواز دارد که از گرانروی دو چندسازه دیگر (تالک و میکا) حدود ۱/۵ برابر بیشتر است.

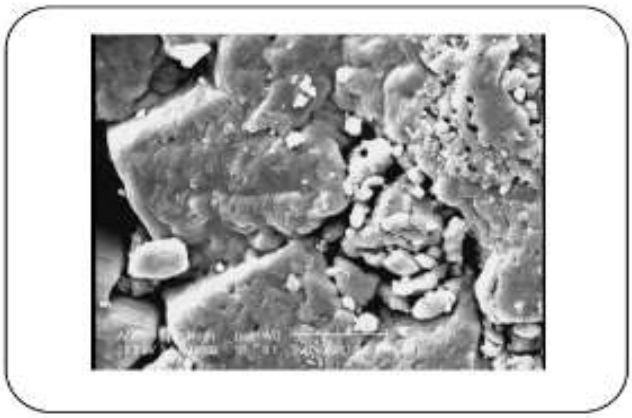
این امر به دلیل پخش شدن یکنواخت‌تر و بهتر تالک و میکا در ماتریس پلیمر گوگرد اصلاح شده می‌باشد. درحالی که ذره‌های میکروسیلیس به دلیل نداشتن ساختار لایه‌ای و داشتن سطوح هیدروفیل به خوبی در ماتریس پلیمر گوگردی با ماهیت هیدروفوب پخش نمی‌شود.

بررسی و تحلیل نتیجه‌های به دست آمده از اندازه‌گیری گرانروی چندسازه‌های گوگردی تهیه شده با پرکننده‌های گوناگون نشان داد عدم یکنواختی در توزیع انواع پرکننده، موجب تأثیر متفاوت در گرانروی چندسازه‌ها می‌شود که این موضوع یکی از عامل‌های تأثیر گذار بر تفاوت در مقاومت مکانیکی چندسازه‌های گوگردی نیز می‌باشد.

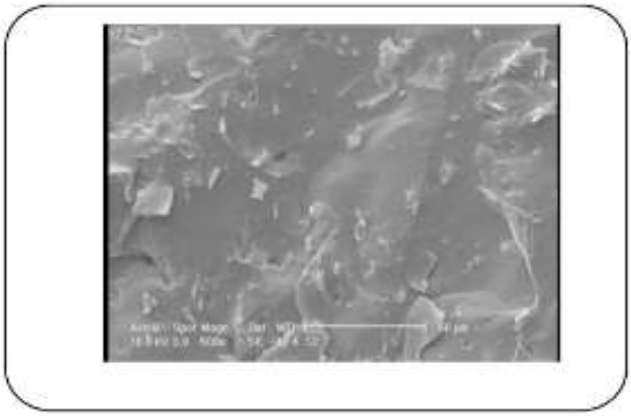
مطالعه ویژگی‌های مکانیکی (خمش، کشش و فشار)

اندازه‌گیری مقاومت خمشی، کششی و فشاری چندسازه‌های گوگردی بعد از ۷ روز از زمان ساخت، به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D790-07، ASTM D638-08 و ASTM D695-02a انجام شد.

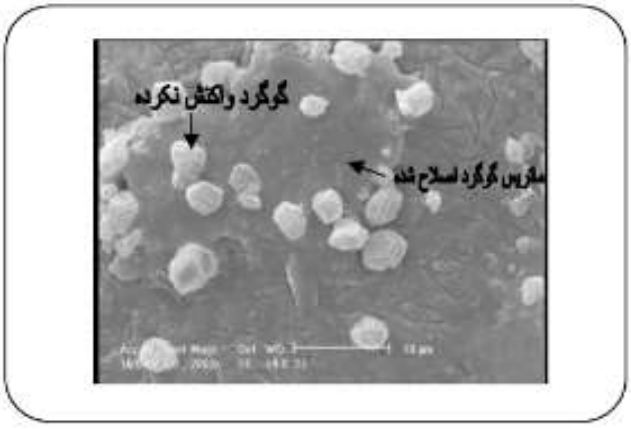
برای اندازه‌گیری، نیاز به قالب‌هایی با اندازه‌های ۲۰cm ×۲۰ به ضخامت ۳ تا ۴ میلی متر می‌باشد. به این منظور از یک قالب شیشه‌ای استفاده شد. برای ساخت این قالب شیشه‌ای، ابتدا یک شیشه به ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شد و سپس داخل آن مربعی با اندازه‌های ۲۰ ×۲۰ ایجاد شد. این قالب روی سطح صافی آغشته به روغن سیلیکون جامد، قرار گرفت و نمونه مذاب داخل قالب شیشه‌ای ریخته شد. پس از جامد شدن از داخل آن خارج شد که در شکل ۵ نشان داده شده است. برای انجام آزمون، نمونه‌های قالب ریزی شده توسط دستگاه برش به شکل مورد نظر بریده و نمونه‌ها مورد آزمون قرار گرفت



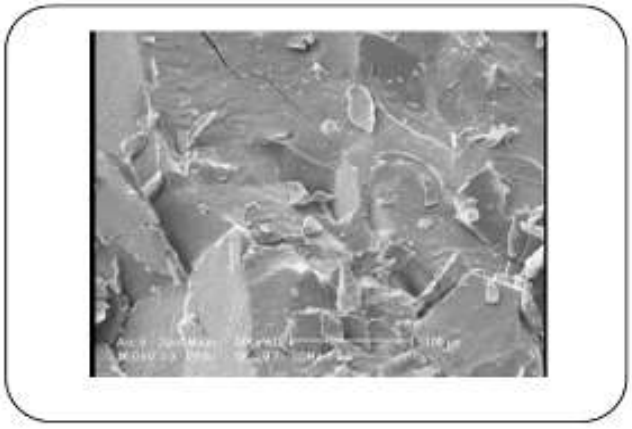
شکل ۳ـ تصویر SEM گوگرد.



شکل ۵ ـ تصویر SEM نمونه چندسازه گوگردی با پودر تالک.



شکل ۴ـ تصویر SEM نمونه چندسازه گوگردی با پودر سیلیس.

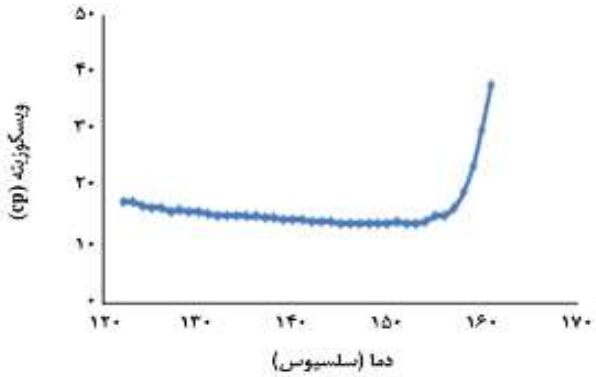


شکل ۶ ـ تصویر SEM نمونه چندسازه گوگردی با پودر میکا.

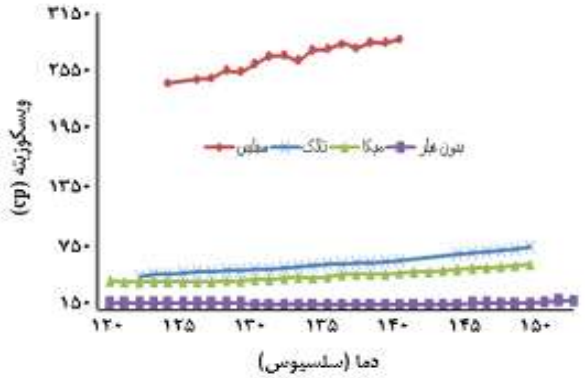
که در شکل ۹ (ب) نشان داده شده است. نتیجه‌های آزمون ویژگی‌های مکانیکی در جدول ۳ آورده شده است.

با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده (جدول ۳) مقاومت‌های مکانیکی با افزایش یا کاهش درصد پرکننده‌ها همان‌گونه که در جدول ۱ از منابع علمی نیز به دست آمده است، تغییرهای یکسانی ندارند. از این‌رو مقدارهای بهینه مقاومت مکانیکی در درصدهای همانند از پرکننده‌ها قابل بررسی نمی‌باشند. چندسازه‌های گوگردی تهیه شده با تالک و میکا در درصدهای گوناگون، مقاومت خمشی بسیار بالاتری تا حدود ۱۲ MPa نسبت به چندسازه‌های گوگردی دارای سیلیس دارند. درحالی که بالاترین مقاومت فشاری در بین نمونه‌ها با درصدهای گوناگون مربوط به چندسازه‌های تهیه شده با پودر تالک وحدود ۶۸ MPa می‌باشد. همچنین براساس داده‌ها می توان چنین دریافت که استفاده از پودر میکا مقاومت کششی را بسیار بیشتر از پودر تالک و سیلیس حتی تا مقدار ۵٫۸ MPa در چندسازه بالا می‌برد.

استفاده از درصدهای بالای ۶ درصد از پودر سیلیس در تهیه چندسازه‌های گوگردی بدون حضور عامل پخش کننده یا روان کننده با محدودیت همراه است زیرا توزیع ذره‌های سیلیس را دشوار کرده و به شدت موجب بالا رفتن گرانروی ترکیب می‌شود و زمان گیرش را تا اندازه‌ی کمتر از یک دقیقه پایین می آورد به طوری‌که هنگام تخلیه، ترکیب مذاب به سرعت جامد می‌شود. به همین دلیل در تهیه چندسازه‌های دارای سیلیس باید از درصدهای پایین‌تر از ۶ درصد استفاده کرد درحالی که با بررسی منابع علمی مطابق جدول ۱ دیده می‌شود ترکیب‌های گوگردی دارای ۳۳ درصد سیلیس تهیه شده و از مقاومت خمشی بالایی نیز برخوردارند که این به دلیل تفاوت در گرانروی ماتریس یا استفاده از عامل روان کننده می‌باشد.



شکل ۷ـ گرانروی گوگرد مذاب.



شکل ۸ ـ گرانروی نمونه های چندسازه گوگردی با پودرهای سیلیس، تالک و میکا

اندازه‌گیری گرانروی چندسازه‌های گوگردی با درصدهای یکسان از پودرهای میکا، تالک و سیلیس اختلاف چشمگیری را در نمونه‌های تهیه شده از سیلیس نسبت به نمونه‌های دیگر نشان می‌دهد.

با افزودن پرکننده به گوگرد مذاب، ذره‌های پودرهای معدنی در مخلوط توزیع می‌شوند. به‌طورکلی حضور ذره‌های جامد در مخلوط باعث ایجاد مزاحمت در جریان مذاب می‌شود و در نتیجه گرانروی افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود گرانروی ترکیب‌های گوگردی دارای پرکننده، بیشتر از گوگرد اصلاح شده می‌باشد. در این ترکیب‌ها گرانروی به عامل‌های بسیاری بستگی دارد از جمله، گرانروی گوگرد اصلاح شده مذاب، مقدار پودر معدنی در مخلوط، اثر متقابل بین پودر معدنی و گوگرد اصلاح شده و شکل و توزیع اندازه ذره‌ها در مخلوط، بارهای سطحی و ساختار پرکننده.

در تصویرهای SEM به‌دست آمده از نمونه‌های دارای پودر سیلیس در شکل ۴، ذره‌های گوگرد واکنش نکرده به طور کامل مشخص است. همچنین آبدوست بودن سطح سیلیس، مانع از انتشار یکنواخت آن در فاز پلیمری گوگرد اصلاح شده می‌شود و ترکیب همگنی به دست نیامده است ازاین‌رو استفاده از یک عامل روان کننده یا پخش کننده ضروری می‌باشد. شکل ۱۰ ساختار سیلیس را نشان می‌دهد.

درحالی که در نمونه‌های تهیه شده با پودر تالک و میکا به دلیل ساختار لایه‌ای و ورقه‌ای این مواد، ذره‌های گوگرد واکنش نداده در لایه‌ها نفوذ کرده و پودرهای معدنی به صورت کاملاً یکنواختی در ترکیب گوگردی پخش شده و فاز همگنی تشکیل داده‌اند. غیر یکنواختی در نمونه‌های تهیه شده با پودر سیلیس موجب می‌شود ذره‌ها در حالت مذاب به یکدیگر نزدیک شده و ایجاد توده و یا کلوخه در مخلوط شود. در این حالت گرانروی به شدت افزایش می‌یابد و مخلوط نمی‌تواند به جریان درآید.

یکنواختی ترکیب‌های تهیه شده با پودرهای میکا و تالک و همچنین ماهیت ورقه‌ای و لایه‌ای آنها باعث شده است که مقاومت مکانیکی ترکیب‌ها، به‌ویژه مقاومت کششی و خمشی آنها بالاتر از نمونه‌های تهیه شده با پودر سیلیس باشد. شکل ۱۱ ساختارهای لایه‌ای تالک و میکا را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

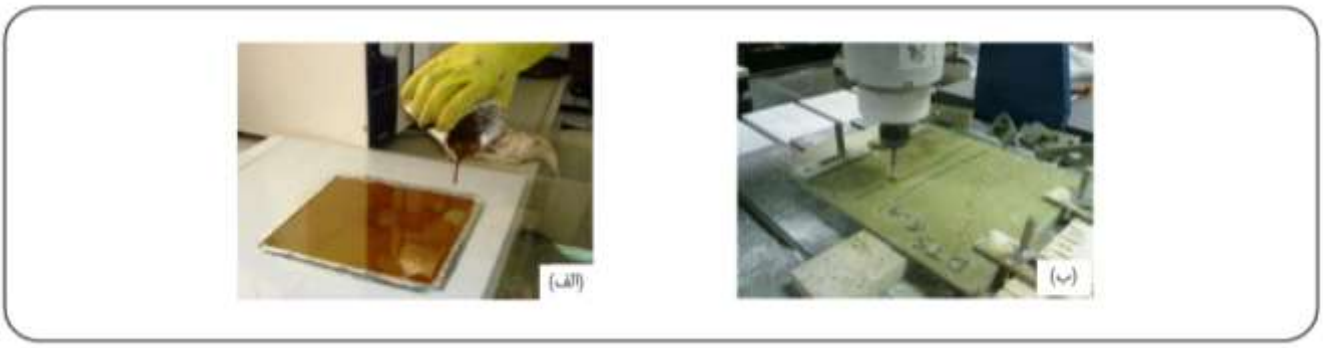
در این پژوهش ویژگی‌های گوگرد با استفاده از افزودنی شیمیایی استایرن اصلاح شد و سپس به منظور بررسی تأثیر انواع پرکننده‌های معدنی بر ویژگی‌های گوگرد اصلاح شده نمونه‌های چندسازه با پرکننده‌های میکا، تالک و سیلیس تهیه شده و آزمون مقاومت مکانیکی انجام گرفت.

ابتدا گوگرد با ترکیب درصد بهینه‌ای حدود ۴ درصد از یک افزودنی آلی(استایرن) [۶] اصلاح و سپس پرکننده به آن اضافه شد.

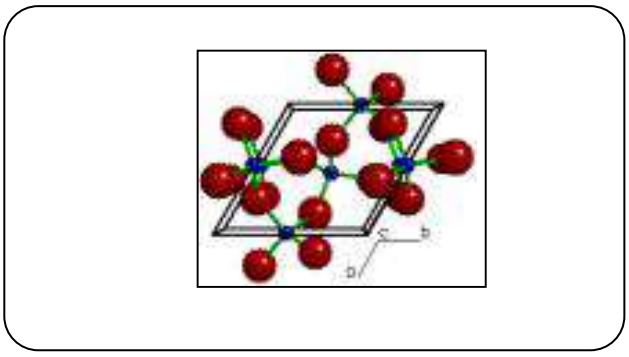
بررسی نتیجه‌ها نشان داد بیشترین مقاومت خمشی و فشاری برای نمونه چندسازه گوگردی دارای ۱۰درصد تالک به ترتیب به مقدار ۱۲٫۹ MPa و ۶۸٫۹ MPa و بیشترین مقاومت کششی در نمونه چندسازه دارای ۱۲ درصد میکا به مقدار ۵٫۸۹ MPa ایجاد می‌شود. افزودن ۱۰ درصد از پرکننده‌ی معدنی تالک مقاومت خمشی

جدول ۳ ـ مقاومت کششی، خمشی و فشاری نمونه‌های چندسازه گوگردی.

ردیف	درصد پرکننده (%)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
چندسازه دارای پودر تالک				
۲	۱۱	۲٫۷۷	۸٫۱۷	۶۸٫۰۵
۳	۱۰	۲٫۴۹	۱۲٫۹	۶۸٫۹۱
۴	۷	۱٫۴۹	۷٫۱۶	۴۴٫۴
چندسازه دارای پودر میکا				
۵	۱۲	۵٫۸۹	۱۱٫۱۸	۴۱٫۱۴
۶	۷	۴٫۳۴	۱۲٫۶۷	۴۷٫۲۶
۷	۶	۳٫۷۱	۹٫۲۹	۳۹٫۸۶
چندسازه دارای پودر سیلیس				
۸	۶	۱٫۲۸	۳٫۵۶	۴۶٫۰۶
۹	۲	۱٫۹۲	۷٫۰۹	۵۱٫۷۲

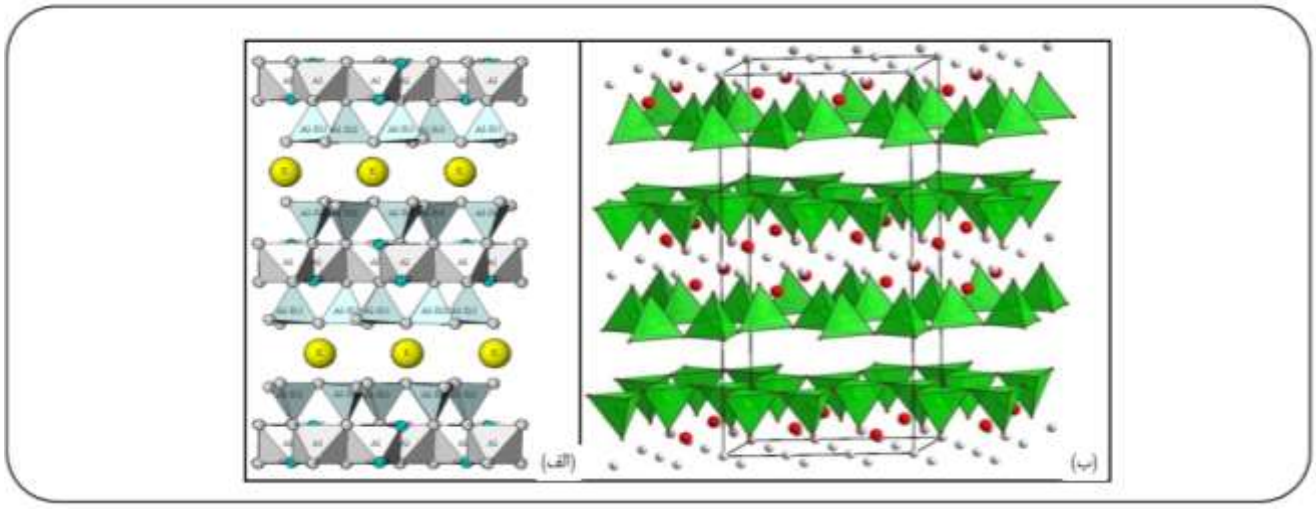


شکل ۹ـ قالب‌گیری پلیت (الف) و برش برای آماده سازی نمونه‌ها برای آزمون‌های مکانیکی (ب).



شکل ۱۰ـ ساختار سیلیس (SiO_2).

(۱۲٫۹ MPa) را تا سه برابر مقدار ذکر شده در مرجع(۳٫۹۳ MPa) [۲] افزایش داد اما با استفاده از مقدار ۱۲ درصد میکا مقاومت کششی (۵٫۸۹ MPa) به مقدار ناچیزی در مقایسه با داده‌های ارایه شده در مرجع [۶] (۵٫۵۲ MPa) بهبود یافت. شایان گفتن است این مرجع تنها موردی است که در آن از پرکننده‌های تالک و میکا به عنوان پرکننده برای تقویت ویژگی‌های مکانیکی گوگرد اصلاح شده استفاده شده است. با این تفاوت که برای اصلاح شیمیایی گوگرد به جای افزودنی استایرن که در این پژوهش به کار رفته است از افزودنی‌های دیگری مانند پلی سولفیدها



شکل ۱۱ـ ساختار میکا با فرمول $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ (a)، ساختار تالک با فرمول $Mg_3[Si_2O_5]_2(OH)_2$ (b).

یا DCPD استفاده شده است. تفاوت در ساختار پرکننده‌های تالک و میکا (ساختار لایه‌ای) در مقایسه با پودر سیلیس(ساختار ذره‌ای) و درنتیجه یکنواختی در پخش شدن پرکننده در ماتریس پلیمر گوگردی و نفوذ گوگرد در لایه‌های پرکننده موجب شده مقاومت مکانیکی بالاتری از چندسازه‌های تهیه شده با تالک و میکا در مقایسه با سیلیس به‌دست آید.

بررسی تغییرهای گرانروی در نمونه‌های تهیه شده از پرکننده‌های گوناگون با درصد یکسان نیز، توزیع یکنواخت پرکننده‌های تالک و میکا را در مقایسه با پودر سیلیس نشان می‌دهد. گرانروی چندسازه‌های گوگردی با مقدار پرکننده یکسان به مقدار ۶ درصد وزنی کل چندسازه، برای نمونه‌های تهیه شده با تالک، میکا و سیلیس در دمای حدود ۱۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب ۵۱۹، ۴۴۰ و ۲۴۵۵ سانتی پوآز و در دمای ۱۴۰ درجه سلسیوس به ترتیب ۶۵۰، ۵۲۳ و ۲۸۵۵ سانتی پوآز می‌باشد که در این بین، چندسازه‌های تهیه شده با سیلیس بالاترین گرانروی را دارا می‌باشند. اختلاف‌های دیده شده به دلیل تفاوت ساختار سیلیس، تالک و میکا است. تالک و میکا به دلیل ساختار لایه‌ای و امکان نفوذ ماتریس پلیمر گوگرد اصلاح شده در میان این لایه‌ها ویژگی‌های مکانیکی بهتری را نشان می‌دهند. درحالی که ذره‌های سیلیس به دلیل دارا بودن ماهیت هیدروفیلی تمایل زیادی به فاز ماتریس پلیمر گوگرد اصلاح شده هیدروفوب ندارد و این پخش نشدن به شدت گرانروی را افزایش می‌دهد و ویژگی‌های مکانیکی دلخواهی ایجاد نمی‌شود.

تصویرهای SEM ضمن تأکید بر ساختار یکنواخت‌تر برای چندسازه‌های دارای تالک و میکا، نبود توزیع یکنواخت ذره‌های سیلیس را در چندسازه گوگردی نشان می‌دهد. باید اذعان کرد درصد همانند از پرکننده‌های متفاوت، لزوماً تأثیر همانندی بر ویژگی‌های نمونه چندسازه ندارد و در تهیه چندسازه، هر پرکننده می‌تواند درصد بهینه مشخصی داشته باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۱۲ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۸

مراجع

[1] McBee William C., Sullivan Thomas A., "Structural Material", *U.S. Patent 4,022,626*, May, 10, (1977).

[2] Simic Milutin, "Sulfur Composition With Mica", *U.S. Patent 4,026,719*, May., 31, (1977).

[3] Simic Milutin,"Sulfur Composition", *U.S. Patent 4,129,453*, Dec., 12, (1978).

[4] Simic Milutin, "Plasticized Sulfur Improved Thixotropy", *U.S. Patent 4,210,458*, Jun.,1, (1980).

[5] Milutin Simic, Novato, Calif, "Plasticized Sulfur Coating Compositions", *U.S. Patent 4, 233,082*, Nov.11, (1980).

[۶] بهرامی آده، نرمین؛ مهتدی حقیقی، میترا؛ بهبود خواص گوگرد به منظور تهیهٔ سیمان گوگردی، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، (۲) **۲۲** : ۶۵–۷۶ (۱۳۸۲).

[7] Bahrami Adeh, N., Afghani T., Shamsipur M., Study of Morphology and Thermal Behavior of Newly Prepared Plasticized Sulfur, **8**(4):1063-1072 (2011).

[8] Bahrami Adeh N., Mohtadi Haghighi M., Mohammad Hosseini N., Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur, *Iran. J. Chem. Chem. Eng. (IJCCE)*, **27**(1): 123 (2008).

[9] Mohamed A.M.O., El Gamal M.M., "Sulfur Concrete For The Construction Industry", J. Ross Publishing ,(2010).