تحقیقات بتن
سال یازدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۹۷
ص ۵۰ – ۳۵
تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۹۶/۶/۹

تاثیر ضایعات پودر سنگ مرمر و میکروسیلیس به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان بر دوام بتن

منصور قلعه‌نوی *
دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
علی خدابخشیان
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
الیاس اسدی‌شمس‌آبادی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده
ضایعات پودر مرمر، ماده‌ای بی‌اثر و غیرفعال است که بعنوان محصولی جانبی از فرآیند برش، شکل دادن و پرداخت سنگ مرمر بدست می‌آید و سبب مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. این پژوهش یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی خصوصیات دوام ۱۶ طرح اختلاط بتن حاوی پودر مرمر (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد) و میکروسیلیس (۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد) که جایگزین بخشی از سیمان شده‌اند، می‌باشد. نسبت آب به مواد سیمانی ثابت و برابر با ۰/۴۵ و اسلامپ مخلوط‌های بتن ۱۰±۸۰ میلی‌متر است. آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، مقاومت الکتریکی، دوام در برابر حمله‌ی سولفات‌های سدیم و منیزیم و سولفوریک اسید انجام شد. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن است که مقاومت و دوام بتن حاوی پودر مرمر، برای نسبت‌های جایگزینی بیش از ۱۰ درصد، کاهش می‌یابد. اما نتایج رضایت‌بخشی برای نسبت‌های جایگزینی پودر مرمر تا ۱۰ درصد بدست آمد. استفاده از میکروسیلیس نه‌تنها کاستی‌های بوجود آمده در دوام بتن حاوی پودر مرمر را رفع کرد بلکه سبب ارتقاء چشمگیر ویژگی‌های دوام این بتن‌ها شد.

واژه‌های کلیدی: **ضایعات سنگ مرمر، میکروسیلیس، جایگزینی سیمان، دوام، بتن.**

* نویسنده مسئول: Ghalehnovi@ferdowsi.um.ac.ir

۱- مقدمه

افزایش مصرف منابع طبیعی تجدیدناپذیر خطری اجتناب‌ناپذیر برای نسل‌های آینده می‌باشد. راه‌های مختلفی برای کاهش مصرف این منابع ارزشمند وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از ضایعات تولید شده در صنایع مختلف می‌باشد. استفاده از ضایعات در صنعت نه‌تنها سبب کاهش آلودگی در محیط زیست می‌شود، بلکه موجب کاهش مصرف منابع طبیعی، هزینه‌های دفع ضایعات و تولیدات صنعتی نیز می‌گردد. از طرفی دفع و به‌کارگیری صحیح ضایعات، به حفظ سلامت اجتماعی و بشری نیز کمک می‌کند.

تاکنون در صنایع مختلف از جمله صنعت ساختمان گام‌هایی در جهت استفاده از ضایعات برداشته شده است. برای تولید بتن که یکی از پرمصرف‌ترین مواد بر روی کره‌ی زمین است، منابع طبیعی زیادی آلوده و گازهای گلخانه‌ای زیادی به هوا منتشر می‌شود. ایران به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان سنگ در جهان، حجم قابل‌توجهی از ضایعات سنگ را تولید می‌کند. باتوجه به این‌که وجود این ضایعات در اطراف کارخانه‌های سنگ و محیط شهری سبب آلودگی زمین‌های اطراف می‌شوند و برای انسان نیز خطرآفرین می‌باشند، کارخانه‌ها موظف به دور نمودن این ضایعات از اطراف کارخانه و محیط شهری می‌باشند که این امر مستلزم صرف هزینه است. یکی از این معادن و کارخانه‌ها که حجم قابل‌توجهی از ضایعات را به‌صورت لاشه سنگ و پودر سنگ تولید می‌کنند، معادن و کارخانه‌های سنگ مرمر می‌باشند که باتوجه به این‌که پتانسیل مناسبی برای استفاده از پودر مرمر تولید شده وجود ندارد، این ضایعات پودری در فضاهای باز اطراف کارخانه‌ها و یا طبیعت پیرامون ما انباشته شده و سبب آلودگی محیط زیست می‌شوند. مقدار ضایعات سنگ مرمر به ۸۰ تا۹۰ درصد سنگ استخراج شده از معدن می‌رسد [۱]. بنابراین بسیار مهم است که راهی را برای مصرف این ضایعات و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی آن‌ها پیدا کنیم.

از نقطه‌نظر فیزیکی، حضور پودر مرمر در خمیر سیمان سخت شده نقش پرکننده را ایفا می‌کند و تخلخل خمیر را کاهش می‌دهد. پودر مرمر ماده‌ای خنثی یا شبه خنثی است. فعل و انفعالات شیمیایی پودر مرمر بین کربنات کلسیم (اصلی‌ترین ماده معدنی بلوری پودر مرمر) و خمیر سیمان رخ می‌دهد که با واکنش بین هیدرو آلومینات کلسیم و یون‌های کربناته منجر به تشکیل کربو آلومینات‌های کلسیم می‌شوند. هیدرات‌های کربوآلومینات‌های کلسیم سطح سنگدانه در ناحیه‌ی انتقالی را ناهموارتر کرده و پیوند خمیر سیمانی و سنگدانه را تقویت می‌کند. حضور کربنات کلسیم به هیدراتاسیون تری کلسیم سیلیکات شتاب می‌دهد [۲, ۳].

یکی از متداول‌ترین افزودنی‌ها، میکروسیلیس است که برای ساخت بتن مقاومت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. میکروسیلیس محصولی فرعی است که به‌عنوان پوزولان مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محصول فرعی نتیجهٔ احیاء کوارتز بسیار خالص با زغال سنگ کورهٔ قوس الکتریکی در ساخت آلیاژ فروسیلیسیم یا سیلیسیم است. حضور میکروسیلیس در بتن، ناحیه بین سطحی ضعیف را با تقویت پیوند خمیر سیمان و سنگ‌دانه و تشکیل یک ساختار میکرویی با تخلخل کمتر و همگن‌تر در منطقه بین سطحی از بین می‌برد [۴]. مقایسه بین خمیر سیمان بدون پودر و خمیرهای سیمانی حاوی پودر مرمر نشان داده است که تفاوتی میان این نمونه‌ها به‌ویژه از نظر محتوای هیدروکسید کلسیم وجود ندارد [۵]. سیلیکای موجود در میکروسیلیس می‌تواند با هیدروکسید کلسیم واکنش دهد و هیدرات‌های کلسیم سیلیکات را که مسئولیت افزایش مقاومت را دارند به‌وجود آورند [۳].

نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده است که استفاده از پودر مرمر به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان می‌تواند منجر به کاهش عملکرد بتن می‌شود. در این پژوهش به دو منظور از میکروسیلیس استفاده شده است: برطرف کردن معایب و کاستی‌های بوجود آمده در بتن حاوی پودر مرمر نسبت به بتن معمولی و افزایش میزان جای‌گزینی سیمان با ضایعات و میکروسیلیس تا جایی‌که عملکرد و خصوصیات بتن حفظ شود.

تاکنون پژوهشگران بسیاری از پودر مرمر و میکروسیلیس بعنوان مواد پرکننده خنثی و پوزولان در بتن استفاده کرده‌اند. اما بررسی دقیقی برای بهینه‌سازی استفادهٔ همزمان از این دو ماده به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان در تولید بتن با حفظ دوام آن انجام نشده است. در این تحقیق تاثیرات استفاده از درصدهای مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان بر خصوصیات دوام بتن بررسی شده است. بخشی از نوآوری این پژوهش در جامع بودن ترکیب‌های انتخاب شده جهت جای‌گزینی با سیمان مستتر است؛ چرا که باتوجه به تفاوت موجود در دانه‌بندی ذرات پودر مرمر، میکروسیلیس و سیمان، درصدهای مختلف

جای‌گزینی می‌توانند اثرات متفاوتی را در پر کردن خلل و فرج و ظرفیت دوام بتن داشته باشند.

پژوهش‌های گذشته نشان داده است که استفاده از ضایعات پودر مرمر به‌عنوان جای‌گزین بخشی از سیمان در تولید بتن امکان‌پذیر است. Ergun [۳] در سال ۲۰۱۱ نشان داد که می‌توان با حفظ خصوصیات مکانیکی بتن، پودر مرمر و دیاتومیت را به ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد به‌طور جداگانه و هم‌زمان جای‌گزین بخشی از سیمان نمود. Rodrigues و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۵، Rana و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۵، Aliabdo و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۴ تأثیر جای‌گزینی بخشی از سیمان با پودر مرمر بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بررسی کردند. آنها گزارش دادند که جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰ درصد تاثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ندارد؛ اما با افزایش درصدهای جایگزینی، بیشتر از ۱۰ درصد، خصوصیات مکانیکی و دوام بتن روندی کاهشی را دنبال می‌کنند. Sardinha و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۶ تاثیر فوق روان‌کننده‌ها بر بتن حاوی پودر مرمر را بررسی کردند و نشان دادند که می‌توان پودر مرمر را تا ۲۰ درصد جای‌گزین سیمان کرد و با کمک فوق روان‌کننده‌ها خصوصیات دوام بتن را حفظ کرد. Turker و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۲ تاثیر پودر مرمر بر ساختار و هیدراتاسیون سیمان را بررسی کردند و اعتقاد داشتند که کاهش مقاومت ایجاد شده در بتن حاوی پودر مرمر بعنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند به دلیل کاهش تری کلسیم سیلیکات و دی کلسیم سیلیکات باشد. مطابق با پژوهش‌های Arel [۹] در سال ۲۰۱۶، جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد پودر مرمر با سیمان علاوه بر این که خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد، از انتشار گاز کربن دی اکسید حاصل از تولید سیمان تا ۱۲ درصد می‌کاهد.

Dilbas و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۴ تاثیر استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتن به همراه میکروسیلیس را بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس عملکرد بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را بهبود می‌بخشد. Gupta و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۶ نشان دادند که جای‌گزینی ۱۰ درصد از سیمان با میکروسیلیس می‌تواند از کاهش خصوصیات مکانیکی و دوام بتن حاوی ۱۰ درصد ضایعات لاستیک، که جای‌گزین بخشی از ریزدانه شده است، جلوگیری کند. همچنین آن‌ها گزارش دادند که جای‌گزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس در بتن حاوی ۲۵ درصد ضایعات لاستیک می‌تواند نفوذ آب را تا ۱۲ درصد کاهش دهد. Onuaguluchi و Panesar [۱۲] در سال ۲۰۱۴ تأثیر خرده لاستیک و میکروسیلیس را بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که جای‌گزینی میکروسیلیس با سیمان، علاوه بر بهبود خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده لاستیک، مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر نفوذ کلرید را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد. در خصوص تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت الکتریکی بتن Bagheri و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۳ و Dotto و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۴ گزارش دادند که جای‌گزینی ۱۲ درصد سیمان با میکروسیلیس می‌تواند مقاومت الکتریکی را تا ۵ برابر افزایش دهد.

Wee و همکارانش [۱۵] در سال ۲۰۰۰ بر روی مقاومت بتن حاوی افزودنی‌های معدنی در برابر حملهٔ سولفات‌ها مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند که جای‌گزینی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس با سیمان نقش مهمی را برای مقاومت در برابر حملهٔ سولفات سدیم بازی می‌کند و حتی بعد از یک سال قرارگیری این نمونه‌ها در محلول سولفات سدیم ۵ درصد، هیچ اثری از پوسته پوسته شدن مشاهده نکردند. Cohen و Bentur [۱۶] در سال ۱۹۸۸ و Shannag و Shaia[۱۷] در سال ۲۰۰۳ گزارش دادند که جایگزینی میکروسیلیس با سیمان تا ۱۵ درصد، مقاومت بتن در برابر حملهٔ سولفات منیزیم را افزایش می‌دهد.

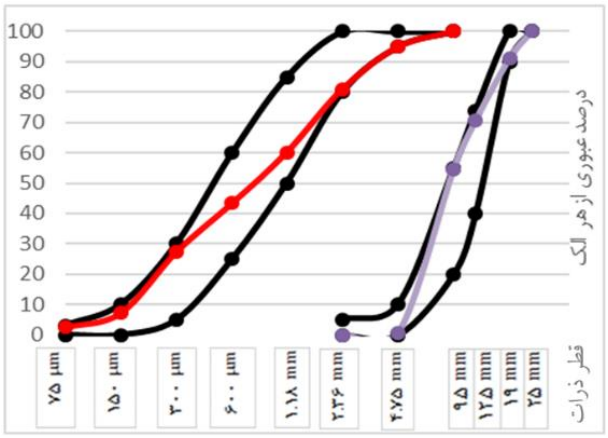
Shelke و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۲ تاثیر پودر مرمر (۰، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد) و میکروسیلیس (۰ و ۸ درصد) بعنوان جای‌گزین بخشی از سیمان را بر مقاومت فشاری بتن ۷ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مقاومت فشاری تمامی ترکیب‌های حاوی پودر مرمر را به‌طور قابل‌توجهی کمتر از بتن معمولی گزارش دادند؛ به‌جز نمونهٔ حاوی ۸ درصد میکروسیلیس و ۸ درصد پودر مرمر که افزایش مقاومتی در حدود ۳ درصد نسبت به بتن معمولی داشته است.

Amin و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۴ تأثیر جای‌گزینی سیمان با ۳۰ درصد پودر مرمر به همراه ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس را بررسی کردند؛ و این ترکیب‌های جای‌گزینی مقاومت بتن را به ترتیب تا ۶۰ و ۴۷ درصد در سن ۹۰ روز کاهش داده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

سنگ‌دانه‌های مصرف شده از نوع شکسته و از محل تأمین‌کنندگان مصالح سنگی جاده کلات (حومه شهر مشهد) تأمین شد. دانه‌بندی و مشخصات آن‌ها مطابق با استانداردهای ASTM C136 ، ASTM C128 و ASTM C127 به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ آمده است. حداکثر بعد درشت‌دانه مصرفی ۱۹ میلی‌متر است. سیمان پرتلند تیپ ۲ مصرفی از کارخانه سیمان مشهد، میکروسیلیس از شرکت ژیکاوا، و پودر مرمر از ضایعات سنگبری بهبودی واقع در ابتدای جاده شاندیز تهیه شد. از فوق روان‌کننده با نام تجاری P10-3R محصول شرکت ساختمان شیمی و آب شرب برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. مشخصات دانه‌بندی، شیمیایی و فیزیکی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر مورد استفاده در شکل‌های ۲ تا ۴ و جدول‌های ۲ و ۳ آمده است. همچنین نتایج آنالیز XRD پودر مرمر در شکل ۵ آورده شده است.



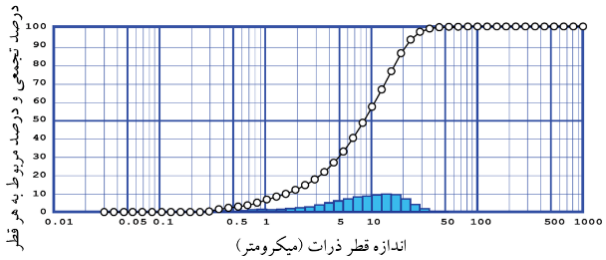
شکل ۱- نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی

جدول ۱- مشخصات درشت‌دانه و ریزدانه

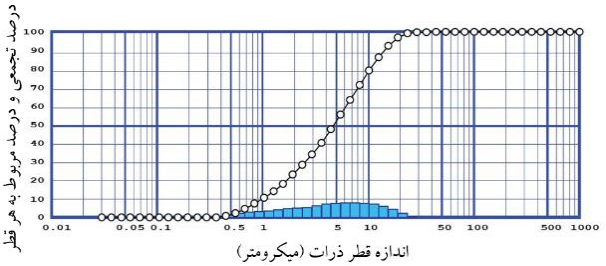
نوع سنگدانه	چگالی نسبی SSD	وزن مخصوص خشک (kg/m^3)	رطوبت نسبی (٪)	رطوبت SSD (٪)	مدول نرمی
درشت‌دانه	۲/۶۷۵	۱۶۲۰	≈۰	۰/۴۵	–
ریزدانه	۲/۶۴۵	۱۶۵۰	≈۰	۰/۵	۲/۸۶

۲-۲- مشخصات طرح‌های اختلاط

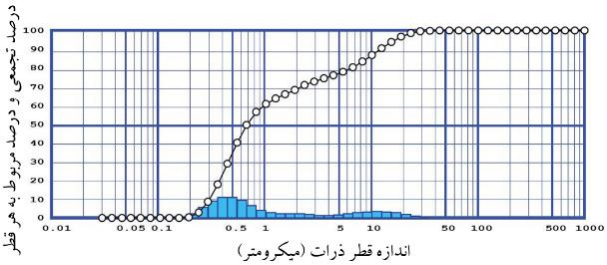
طراحی طرح اختلاط بتن در پژوهش حاضر با استفاده از روش حجمی استاندارد ACI-211-1 صورت‌پذیرفت. ترکیب مخلوط‌های ساخته شده در جدول ۴ آمده است. ساخت نمونه‌ها شامل ماتریسی از درصدهای مختلف وزنی ضایعات پودر مرمر (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد) و میکروسیلیس (۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد) می‌باشد که در هر سری درصدهای وزنی مختلف ضایعات پودر مرمر و میکروسیلیس جایگزین سیمان شده است. حجم تغییر یافته ناشی از جای‌گزینی وزنی پودر مرمر و میکروسیلیس به جای سیمان از طریق تغییر حجم ریزدانه و نسبت به طرح اختلاط شاهد جبران شده است. همچنین در تمامی طرح‌ها برای ثابت نگه داشتن اسلامپ در بازهٔ ۱۰±۸۰ میلی‌متر، مقدار فوق روان‌کننده تغییر داده شده است. در جدول ۵ توضیحات علائم اختصاری طرح‌های اختلاط بیان شده است.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی ذرات سیمان



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی ذرات پودر مرمر



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی ذرات میکروسیلیس

جدول ۲- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر

مشخصات فیزیکی و شیمیایی	سیمان	میکروسیلیس	پودر مرمر
SiO_2 (%)	۲۱/۶۳	۹۰-۹۵	۰/۱۲
Al_2O_3 (%)	۴/۲۷	۰/۶-۱/۲	۰/۰۹
Fe_2O_3(%)	۳/۴۵	۰/۳-۱/۳	۰/۲۱
TiO_2 (%)	-	-	ندارد
CaO (%)	۶۳/۲۵	۰/۵-۱/۵	۵۵/۶۴
MgO (%)	۲/۷۷	۰/۵-۲	۰/۰۸
Na_2O (%)	-	۰/۳-۰/۵	۰/۰۱
MnO (%)	-	۰/۰۲-۰/۰۷	-
K_2O (%)	-	۰/۲-۰/۵	ندارد
C (%)	-	۰/۲-۰/۴	-
C_3A (%)	۵/۴۸	-	-
SO_3 (%)	۲/۰۲	-	-
P_2O_5 (%)	-	۰/۰۴	-
LOI (%)	۱/۵	۰/۴-۳	۴۳/۷۶
رطوبت (%)	-	۰/۰۱-۰/۴	-
pH	-	۶/۸-۸	-
جرم مخصوص (gr/cm^3)	۳/۲	۱/۹	۲/۵
سطح مخصوص (m^2/gr)	-	۲۰-۲۵	-
جذب آب (%)	-	-	۰/۱۹
مقاومت فشاری (Kgf/Cm^2)	-	-	۵۵۰

جدول ۳- مشخصات دانه‌بندی سیمان، میکروسیلیس و پودر مرمر

مقدار ذرات	قطر ذرات (میکرومتر)		
	پودر مرمر	میکروسیلیس	سیمان
٪۱۰	۰/۹۹۱	۰/۳۰۵	۱/۵۸۳
٪۵۰	۴/۷۴۷	۰/۶۸۷	۸/۶۶۸
٪۸۷	۱۲/۸۶۶	۱۰/۲۶۲	۲۹/۸۵۰
میانگین	۴/۷۴۷	۰/۶۸۷	۸/۶۶۸

جدول ۴- طرح‌های اختلاط (کیلوگرم بر متر مکعب)

شماره	طرح اختلاط	سیمان	آب	فوق روان‌کننده	میکروسیلیس	پودر مرمر	درشت‌دانه	ریزدانه	اسلامپ (میلیمتر)
۱	O	۴۰۰	۱۸۰	۱/۳	۰	۰	۱۰۰۰	۷۹۳	۸۵
۲	M5	۳۸۰	۱۸۰	۱/۳	۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۸۶	۸۵
۳	M10	۳۶۰	۱۸۰	۱/۳۵	۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۹۰
۴	M20	۳۲۰	۱۸۰	۱/۳۵	۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۶۳	۷۵
۵	SF2.5	۳۹۰	۱۸۰	۱/۴۵	۱۰	۰	۱۰۰۰	۷۸۹	۸۰
۶	SF2.5M5	۳۷۰	۱۸۰	۱/۴۵	۱۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۸۲	۹۰
۷	SF2.5M10	۳۵۰	۱۸۰	۱/۴۲۵	۱۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۴	۹۰
۸	SF2.5M20	۳۱۰	۱۸۰	۱/۴۲۵	۱۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۵۹	۸۵
۹	SF5	۳۸۰	۱۸۰	۱/۴۵	۲۰	۰	۱۰۰۰	۷۸۶	۹۰
۱۰	SF5M5	۳۶۰	۱۸۰	۱/۴۵	۲۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۸۰
۱۱	SF5M10	۳۴۰	۱۸۰	۱/۴۷۵	۲۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۷۱	۹۰
۱۲	SF5M20	۳۰۰	۱۸۰	۱/۴۷۵	۲۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۵۶	۹۰
۱۳	SF10	۳۶۰	۱۸۰	۱/۶	۴۰	۰	۱۰۰۰	۷۷۸	۸۵
۱۴	SF10M5	۳۴۰	۱۸۰	۱/۷	۴۰	۲۰	۱۰۰۰	۷۷۱	۹۰
۱۵	SF10M10	۳۲۰	۱۸۰	۱/۷	۴۰	۴۰	۱۰۰۰	۷۶۳	۸۵
۱۶	SF10M20	۲۸۰	۱۸۰	۱/۸۲۵	۴۰	۸۰	۱۰۰۰	۷۴۸	۸۰

جدول ۵- توضیحات علائم اختصاری

علائم اختصاری در طرح‌های اختلاط	توضیحات	مثال
OC	طرح اختلاط شاهد	طرح اختلاط بدون میکروسیلیس و پودر سنگ مرمر
SF_X	طرح اختلاط حاوی X درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان	SF5 : طرح اختلاط حاوی ۵٪ میکروسیلیس جایگزین سیمان
M_Y	طرح اختلاط حاوی Y درصد پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان	M5 : طرح اختلاط حاوی ۵٪ پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان
SF_XM_Y	طرح اختلاط حاوی X درصد میکروسیلیس و Y درصد پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان	SF5M10 : طرح اختلاط حاوی ۵٪ میکروسیلیس و ۱۰٪ پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان

۲-۳- آزمایش‌های انجام شده

اکثر آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای BS و ASTM انجام شد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود. در تمامی موارد نمونه‌گیری‌ها بر طبق استاندارد ASTM C172 و BS EN 12390 انجام شد و در تمامی آزمایش‌ها، نتایج بر اساس میانگین نتیجه آزمایش برروی سه آزمونه گزارش شده است. استانداردهای استفاده شده برای انجام آزمایش‌ها در زیر مشخص شده است:

۱- اسلامپ: ASTM C143.

۲- وزن مخصوص بتن تازه: ASTM C138.

۳- مقاومت فشاری: BS EN 12390-1 – 2 & 3.

۴- مقاومت الکتریکی ویژه:

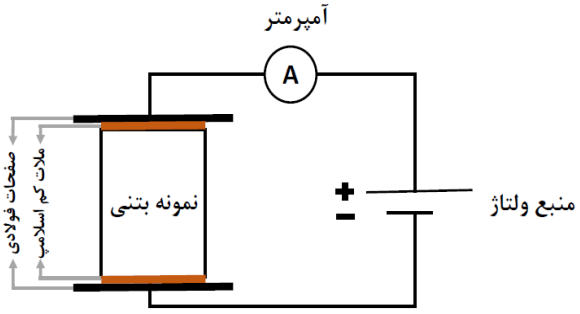
برای انجام این آزمایش مطابق با مدار شکل ۵ از جریان مستقیم استفاده شد. دو صفحه فولادی توسط خمیر سیمان کم اسلامپ به دو طرف نمونه متصل شد و سپس نمونه در مدار قرار گرفت. قرائت

میزان جریان و ولتاژ برای هر نمونه در ۷ ولتاژ متفاوت از از ۲ تا ۱۴ ولت با اختلاف ۲ ولت ثبت گردید. پس از ثابت شدن مقدار جریان، اعداد قرائت می‌شد. میانگین اعداد محاسبه شد و سپس با استفاده از رابطهٔ ۱ و ۲ مقاومت ویژه الکتریکی برای هر طرح بدست آمد.

$$R = V / I \quad (۱)$$

$$P = RA / L \quad (۲)$$

P= مقاومت ویژه الکتریکی، R= مقاومت الکتریکی، V= اختلاف پتانسیل دو سر مدار، I= شدت جریان عبوری از مدار، A= سطح مقطع نمونه ، L= طول نمونه.



شکل ۵- نمای شماتیک انجام آزمایش مقاومت الکتریکی

۵- دوام در برابر حمله سولفات‌ها

نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر، مطابق با استاندارد BS EN 12390-1 & 2 ساخته و به مدت ۲۸ روز در استخر آب قرار داده شد. پس از آن به استخرهای حاوی محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد و محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد منتقل گردید. با گذشت زمان میزان pH محلول‌های سولفات سدیم و سولفات منیزیم افزایش می‌یابد. برای کنترل pH محلول‌ها در محدودهٔ کمتر از ۹/۵ از محلول رقیق سولفوریک اسید استفاده شد تا میزان pH محلول‌ها در محدودهٔ ۷ قرار بگیرند. برای حفظ همگنی و یکنواختی محلول‌ها، هفته‌ای سه مرتبه محلول‌ها هم‌زده می‌شدند. از هر نمونه، ۳ آزمونه در محلول و ۳ آزمونه در آب قرار داده شد. پس از ۱۸۰ روز از زمان قرارگیری در محلول، مقاومت فشاری تمامی آزمونه‌ها مطابق با استاندارد BS EN 12390-3 مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از رابطه‌ی ۳ درصد کاهش مقاومت محاسبه گردید.

$$CSR\ (\%) = \frac{\sigma c - \sigma s}{\sigma c} \times 100 \quad (۳)$$

CSR (%) = درصد کاهش مقاومت بعد از حمله سولفات‌ها، σc = مقاومت نمونه عمل‌آوری شده در آب، σs = مقاومت نمونه پس از حمله سولفات‌ها.

۶- دوام در برابر حمله سولفوریک اسید:

آزمایش حمله سولفوریک اسید مطابق با استاندارد ASTM C267 انجام شد. برای بررسی دوام در برابر حمله سولفوریک اسید، نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر، مطابق با استاندارد BS EN 12390-1 & 2 ساخته و به مدت ۲۸ روز در استخر آب قرار داده شد. پس از آن به استخر حاوی محلول سولفوریک اسید ۵ درصد منتقل گردید. با گذشت زمان میزان pH محلول افزایش می‌یابد. برای شارژ و کنترل pH محلول در محدوده‌ی ۱ از محلول رقیق سولفوریک اسید استفاده شد. برای حفظ همگنی و یکنواختی محلول، هفته‌ای سه مرتبه محلول هم‌زده می‌شد. از هر نمونه، ۶ آزمونه در محلول سولفوریک اسید قرار داده شد. پس از ۲۸ و ۶۳ روز از زمان قرارگیری در محلول، مقاومت فشاری تمامی آزمونه‌ها مطابق با استاندارد BS EN 12390-3 مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از خروج از محلول ارزیابی شد که برای این منظور نمونه‌های خارج شده از محلول سه مرتبه با آب شسته شده و توسط دستمال نرم خشک شد تا تکه‌ها و ذره‌های سست و جداشدهٔ نمونه تحت واکنش در محلول، از نمونه زدوده شوند. در نهایت با استفاده از رابطه‌های ۴ و ۵، درصد کاهش مقاومت و درصد کاهش وزن نمونه‌ها محاسبه گردید.

$$CSR\ (\%) = \frac{\sigma c - \sigma a}{\sigma c} \times 100 \quad (۴)$$

CSR (%) = درصد کاهش مقاومت بعد از حمله سولفوریک اسید، σc = مقاومت نمونه عمل‌آوری شده در آب، σa= مقاومت نمونه پس از حمله سولفوریک اسید.

$$WL\ (\%) = \frac{W1 - W2}{W1} \times 100 \quad (۵)$$

WL(%) = درصد کاهش وزن نمونه بعد از حمله سولفوریک اسید، W1 = وزن نمونه قبل از قرارگیری در محلول سولفوریک اسید، W2 = وزن نمونه پس از خروج از محلول و تمیز شدن نمونه.

۳- تحلیل و بررسی نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- اسلامپ

نتایج آزمایش اسلامپ در جدول ۳ ارائه شده است. با افزایش میزان جایگزینی پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، اسلامپ بتن کاهش یافت. برای جبران این کاهش اسلامپ و حفظ اسلامپ مخلوط‌ها در بازه‌ی ۱۰±۸۰ مورد نظر، میزان فوق روان‌کننده به مقدار اندکی متناسب با میزان افزایش جای-گزینی، افزایش یافت. تاثیر میکروسیلیس در مقایسه با پودر مرمر بر کاهش اسلامپ بتن چشمگیرتر بوده است. این کاهش اسلامپ در مخلوط‌های حاوی پودر مرمر و میکروسیلیس به-دلیل ریزتر بودن ذرات پودر مرمر و میکروسیلیس در مقایسه با سیمان و کاهش فضاهای خالی در مخلوط‌های بتن می‌باشد. مساحت سطحی بزرگ پودر مرمر و میکروسیلیس کارایی بتن را کاهش می‌دهد. همانطور که آزمایش‌های دانه‌بندی نشان می‌دهند، بطور میانگین ذرات پودر مرمر و میکروسیلیس به ترتیب ۲ و ۱۱ برابر ریزتر از ذرات سیمان می‌باشند. بیشترین مقدار فوق روان‌کننده برای نمونه SF10M20 استفاده شد. پژوهشگرانی همچون Khayat و Aitcin [۲۰] در سال ۱۹۹۳، Mazloom و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۰۴ و Gesog˘lu و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۲ نیز نتایجی مشابه با نتایج این مطالعه در خصوص تأثیر میکروسیلیس و پودر مرمر بر روانی بتن را گزارش داده‌اند.

۳-۲- وزن مخصوص

همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است وزن مخصوص بتن تا ۵ درصد جای‌گزینی پودر مرمر با سیمان افزایش یافته است. علت این افزایش وزن مخصوص را می‌توان به پراکندگی بهتر ذرات ریز پودر مرمر و سیمان در مخلوط بتن و پر شدن خلل و فرج و متراکم‌تر شدن مخلوط نسبت داد. اما برای درصدهای جای‌گزینی پودر مرمر بیشتر از ۵ درصد این روند تغییر کرده و رو به کاهش است. علت این کاهش وزن مخصوص، وزن مخصوص کمتر پودر مرمر در مقایسه با سیمان می‌باشد.

افزایش جای‌گزینی میکروسیلیس با سیمان تغییر چشمگیری در وزن مخصوص مخلوط‌ها نسبت به بتن شاهد ایجاد نکرده است. میکروسیلیس نیز همانند پودر مرمر می‌تواند نقش یک پرکننده را در بتن ایفا نماید و خلل و فرج بسیار ریز بتن را که ذرات سیمان قادر به پر کردن آن‌ها نیستند، پر نماید.

به‌طورکلی جای‌گزینی‌های پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان تأثیر قابل‌توجهی بر وزن مخصوص بتن نداشته‌اند و حداکثر میزان اختلاف بین وزن مخصوص بتن شاهد و سایر مخلوط‌ها در حدود ۱/۵ درصد بوده است. Rodrigues و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۵ به نتایجی مشابه با نتایج این آزمایش در خصوص وزن مخصوص نمونه‌های بتنی حاوی پودر مرمر دست یافتند.

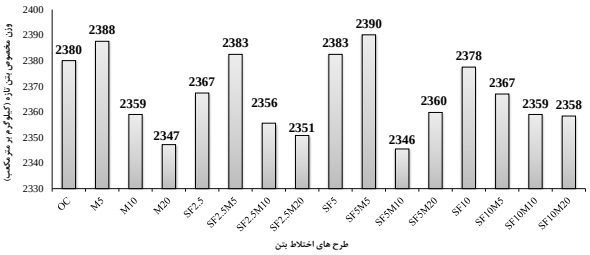
۳-۳- مقاومت فشاری

شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری را در سنین ۷، ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۸۰ روز نشان می‌دهد. از هر نمونه ۳ آزمونه در هر سن مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین آن‌ها ثبت شد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که با افزایش درصد جای‌گزینی پودر مرمر، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. جای‌گزینی ۵ درصد پودر مرمر، مقاومت فشاری را در حدود ۴ درصد افزایش داد. علت این افزایش مقاومت را می‌توان با خاصیت پرکنندگی پودر مرمر و ایجاد هسته‌ای مناسب برای تسریع هیدراتاسیون توضیح داد. مقاومت فشاری نمونه‌های M10 وM20 به ترتیب در حدود ۳ و ۱۳ درصد در مقایسه با بتن شاهد، به‌دلیل کاهش مواد سیمانی (تری کلسیم سیلیکات و دی کلسیم سیلیکات که عمدتا مسئول افزایش مقاومت بتن هستند)، کاهش یافت. Arel [۹] و Ergun [۳] نتایجی مشابه با نتایج این پژوهش را در خصوص تأثیر پودر مرمر بر مقاومت فشاری بتن گزارش دادند.

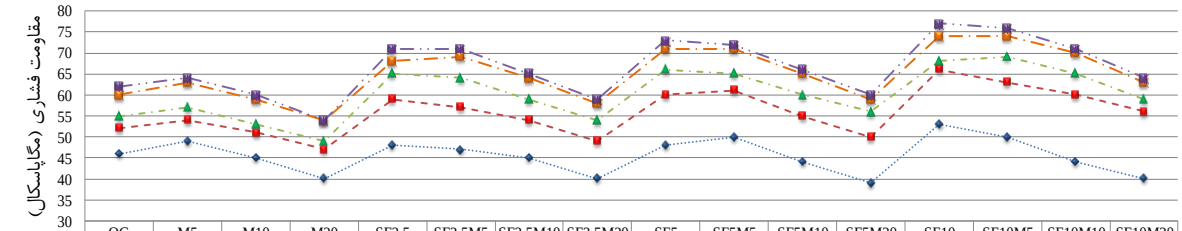
میزان افزایش مقاومت بتن حاوی میکروسیلیس به میزان جای-گزینی آن با سیمان و سن بتن بستگی دارد. مقاومت فشاری نمونه‌های SF2.5، SF5 و SF10 به ترتیب در حدود ۱۵، ۱۸ و ۲۴ درصد، به دلیل اثرات پوزولانی و پرکنندگی میکروسیلیس، افزایش یافت. مشابه چنین افزایش مقاومتی را Mazloom و همکاران [۲۱]، Dilbas و همکاران [۱۰]، Gupta و همکاران [۱۱] و Onuaguluchi و Panesar [۱۲] گزارش داده‌اند.

بطور کلی استفاده از میکروسیلیس در بتن حاوی پودر مرمر مقاومت بتن مرمری را افزایش داده است. در میان نمونه‌های حاوی پودر مرمر و میکروسیلیس، نمونه SF10M5 با ۲۳ رصد افزایش مقاومت، بیشترین مقاومت را کسب کرده است. نمونه‌های بتن

حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۵ تا ۲۰ درصد پودر مرمر بیشترین افزایش مقاومت را نشان دادند و نمونه‌های حاوی ۲/۵ تا ۵ درصد میکروسیلیس و ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر مرمر نیز مقاومت قابل قبولی را در مقایسه با بتن شاهد کسب کردند. در این حالت میزان افزایش مقاومت به میزان هیدراتاسیون کلینکر، فعالیت پوزولانی میکروسیلیس و پرکنندگی پودر مرمر و میکروسیلیس بستگی دارد.



شکل ۶- وزن مخصوص بتن تازه



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
۷ روز	46	49	45	40	48	47	45	40	48	50	44	39	53	50	44	40
۲۸ روز	52	54	51	47	59	57	54	49	60	61	55	50	66	63	60	56
۵۶ روز	55	57	53	49	65	64	59	54	66	65	60	56	68	69	65	59
۹۱ روز	60	63	59	54	68	69	64	58	71	71	65	59	74	74	70	63
۱۸۰ روز	62	64	60	54	71	71	65	59	73	72	66	60	77	76	71	64

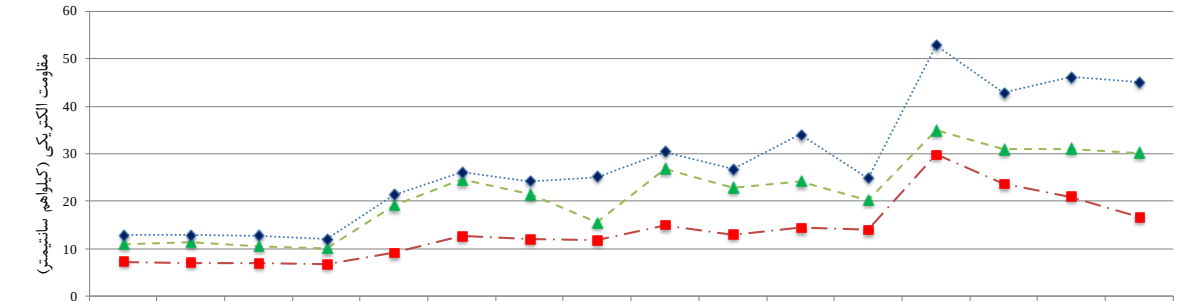
طرح های اختلاط بتن

شکل ۷- مقاومت فشاری

۳-٤- مقاومت الکتریکی

آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰×۲۰۰ میلیمتری اشباع با سطح خشک در سنین ۲۸، ۹۱ و ۱۸۰ روز انجام شد و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. بتن به‌عنوان ماده‌ای تقریبا غیررسانا در نظر گرفته می‌شود و رسانایی الکتریکی در نمونه‌ها به دلیل آب موجود در حفره‌ها می‌باشد. در نتیجه هرچه میزان حفرات نمونه کمتر باشد، رسانایی الکتریکی نیز کمتر و مقاومت الکتریکی بیشتر خواهد بود. میکروسیلیس می‌تواند با هیدروکسید کلسیم و آب واکنش دهد و با تولید کلسیم سیلیکات هیدراته نیز حفرات مویینه را پر می‌کند. در این پژوهش میزان افزایش مقاومت الکتریکی با میزان جایگزینی میکروسیلیس و سن نمونه رابطهٔ مستقیم دارد. مقاومت الکتریکی نمونه‌های SF2.5، SF5 و SF10 به ترتیب به میزان ۱/۶۵، ۲/۳۵ و ۴/۰۹ برابر مقاومت الکتریکی نمونه‌ی شاهد در سن ۱۸۰ روز رشد داشته‌اند. Bagheri و همکاران [۱۳] نیز به نتایجی مشابه با نتایج این پژوهش در خصوص روند و نسبت رشد مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نسبت به بتن شاهد دست یافتند.

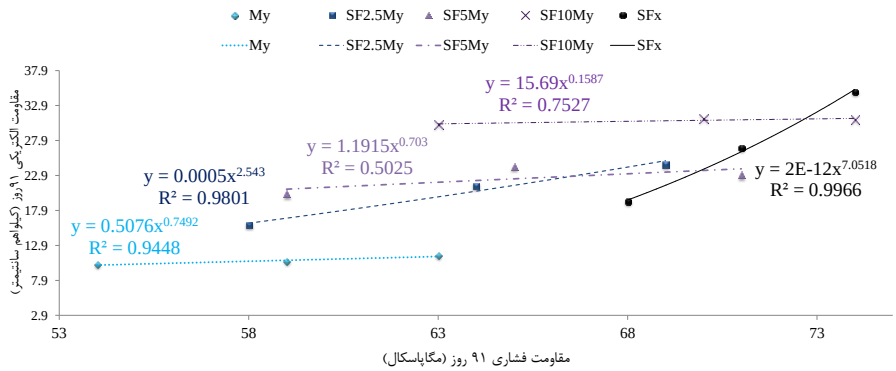
از آنجایی که ذرات پودر مرمر تقریبا دو برابر ریزتر از ذرات سیمان است، جایگزینی ۵ درصد پودر مرمر می‌تواند تا حدودی حفرات ریز موجود در بتن را پر کند و مخلوط بتن را متراکم‌تر نماید. این اثر را می‌توان در رشد اندک مقاومت الکتریکی نمونه حاوی ۵ درصد جایگزینی پودر مرمر در شکل ۸ مشاهده نمود. با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر مقاومت الکتریکی روندی کاهشی را پیش می‌گیرد که این کاهش مقاومت الکتریکی ناچیز است. درصدهای مختلف جایگزینی پودر مرمر تاثیرات متفاوتی بر نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف میکروسیلیس داشته‌اند؛ بگونه‌ای که ترکیب آن‌ها با نمونه‌های حاوی تنها ۲/۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس به ترتیب افزایشی و کاهشی و بر نمونه‌های حاوی ۵ درصد میکروسیلیس نیز تاثیر قابل توجهی نداشته‌اند. در شکل ۹ میزان همبستگی و ارتباط بین نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۹۱ روزه بررسی شده است. این میزان همبستگی هم برای تمامی نمونه‌ها و هم بطور جداگانه برای دسته‌های مختلف طرح‌های اختلاط با توجه به روند و ارتباط مشخص بین آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
۲۸ روز	7.3	7.02	6.91	6.76	9.16	12.65	12	11.74	14.93	12.97	14.38	14.03	29.88	23.66	20.95	16.63
۹۱ روز	11.01	11.42	10.6	10.15	19.2	24.5	21.42	15.48	26.83	22.94	24.16	20.21	34.84	30.89	31.05	30.19
۱۸۰ روز	12.93	12.84	12.76	11.96	21.34	26.1	24.16	25.06	30.4	26.74	34	24.86	52.82	42.8	46.12	45.02

طرح های اختلاط بتن

شکل ۸- مقاومت الکتریکی



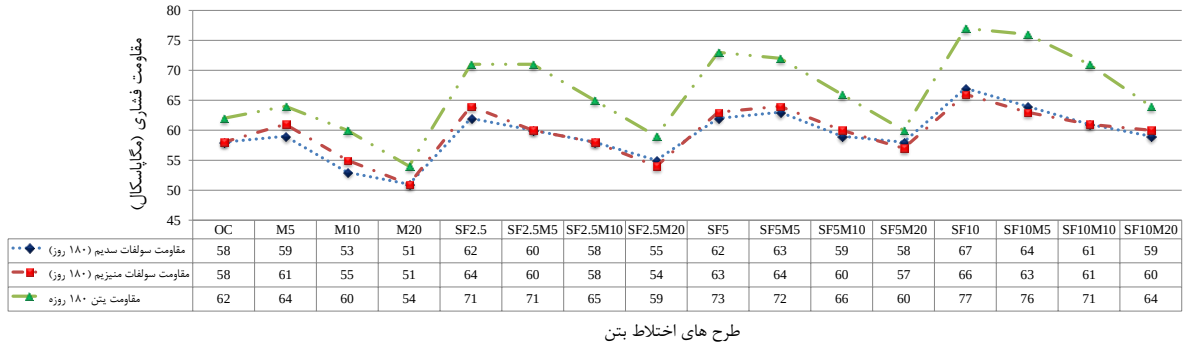
شکل ۹- همبستگی مقاومت الکتریکی و مقامت فشاری

۳-۵- دوام در برابر حمله سولفات‌ها

علت اصلی خرابی بتن بر اثر حمله‌ی سولفات، منابع سولفات خارجی می‌باشند، به‌خصوص در حالت محلول که نفوذ یون سولفات به نمونه‌های بتنی راحت‌تر انجام می‌پذیرد [۲۳]. ترکیبات مختلف توسط سولفات‌ها مورد حمله قرار می‌گیرند. حمله سولفات سدیم به هیدروکسید کلسیم و هیدرو آلومینات کلسیم سبب تشکیل ترکیباتی نظیر سولفات کلسیم (گچ) و اترینگایت می‌شود که با افزایش حجم همراه است [۲۴, ۲۵]. این افزایش حجم سبب ایجاد ترک و ریزش بتن و کاهش مقاومت آن در دراز مدت می‌شود [۲۵]. بر اثر حملهٔ سولفات منیزیم علاوه بر تشکیل ترکیباتی نظیر سولفات کلسیم (گچ) و اترینگایت، بروسیت $Mg(OH)_2$ که حلالیت پایینی دارد تولید می‌شود و فرض بر این است که ژل سیمان باقیمانده را احاطه کند و در مقابل خرابی بیشتر محافظت نماید. گرچه Turker و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۲ گزارش دادند که این فرایند در مراحل اولیه مؤثر است و در مراحل بعدی فرایند خرابی به سبب بروسیت غالب خواهد شد. واکنش دیگری که می‌تواند بر اثر حمله‌ی سولفات منیزیم انجام شود، تخریب و تجزیه ژل کلسیم سیلیکات هیدراته به ژل منیزیم سیلیکات هیدراته می‌باشد که واکنشی غیرسیمانی است و منجر به نرم‌تر شدن ماتریس سیمانی می‌شود. در کل می‌توان نتیجه گرفت که برای ساخت بتن با دوام و محافظت ژل کلسیم سیلیکات هیدراته در برابر نرم شدن و نفوذ یون‌ها، باید مقدار هیدروکسید کلسیم به حداقل محدود شود. سیلیکای موجود در میکروسیلیس با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهد و علاوه بر کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم، سبب ریزتر شدن ساختار منافذ نیز می‌شود [۲۴].

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود میزان تخریب محلول سولفات سدیم ۱۰ درصد و محلول سولفات منیزیم ۱۰ درصد تقریبا یکسان بوده است. جایگزینی میکروسیلیس با سیمان تاثیر قابل توجهی بر مقاومت بتن در برابر حمله‌ی سولفات‌ها داشت. میزان اثر ۲/۵ و ۵ درصد میکروسیلیس بر مقاومت بتن در برابر حملهٔ سولفات‌ها تقریبا یکسان بود و این مقاومت با ۱۰ درصد

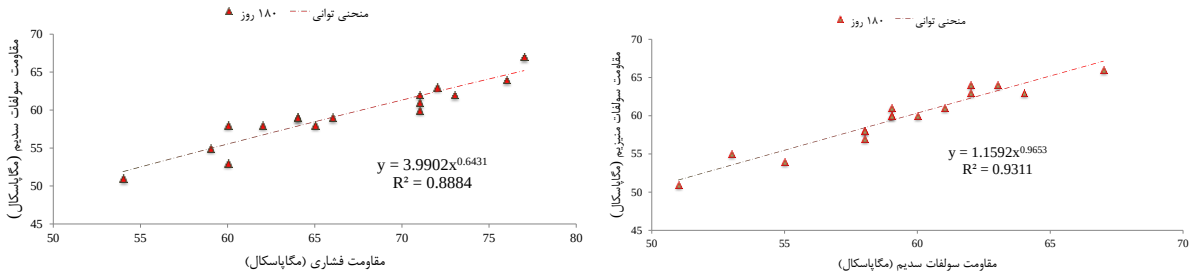
جایگزینی میکروسیلیس به بیشترین مقدار رسید. با افزایش درصد جای‌گزینی پودر مرمر با سیمان، درصد بیشتری از میزان کلینکر سیمان کاسته شده و از این رو با افزایش نسبت آب به سیمان، خصوصیات رفتاری سیمان تضعیف می‌شود. اما در خصوص مقاومت بیشتر نمونه حاوی جای‌گزینی ۵ درصد پودر مرمر در مقایسه با بتن شاهد می‌توان علت را به اثر پرکنندگی این مقدار از جایگزینی پودر مرمر نسبت داد که با پر کردن خلل و فرج بتن و بهبود رفتار سیمان منجر به افزایش مقاومت می‌شود. به عبارتی دیگر جای‌گزینی بهینهٔ پودر مرمر اثر منفی رقیق‌سازی کلینکر را با اثرات مثبت پرکنندگی جبران می‌کند. برای درصدهای بیشتر از ۵ درصد جای‌گزینی پودر مرمر با سیمان، مقاومت در برابر حملهٔ سولفات‌ها روندی نزولی یافت و ۲۰ درصد جای‌گزینی پودر مرمر کمترین مقاومت را نشان داد. افزودن میکروسیلیس به نمونه‌های حاوی پودر مرمر منجر به افزایش مقاومت آن‌ها در برابر حمله سولفات‌ها شد؛ به‌گونه‌ای که نمونهٔ SF10M20 باوجود ۳۰ درصد کاهش سیمان، مقاومتی در حدود مقاومت نمونه‌ی شاهد در مقابل حمله سولفات‌ها نشان داد. نمونه‌های SF2.5M10 و SF5M20 نیز مقاومتی در حدود مقاومت نمونه‌ی شاهد را کسب کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه‌هایSF2.5M5 ، SF5M10، SF10M5، SF10M10 مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونه‌ی شاهد در مقابل حمله سولفات‌ها نشان دادند. در شکل ۱۱ میزان همبستگی و ارتباط بین نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب ونمونه‌های قرارگرفته در معرض حمله‌ی سولفات‌ها در سن ۹۱ روز بررسی شده است.



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
مقاومت سولفات سدیم (۱۸۰ روز)	58	59	53	51	62	60	58	55	62	63	59	58	67	64	61	59
مقاومت سولفات منیزیم (۱۸۰ روز)	58	61	55	51	64	60	58	54	63	64	60	57	66	63	61	60
مقاومت بتن ۱۸۰ روزه	62	64	60	54	71	71	65	59	73	72	66	60	77	76	71	64

طرح های اختلاط بتن

شکل ۱۰- مقاومت در برابر حمله سولفات سدیم و سولفات منیزیم.



شکل ۱۱- همبستگی مقاومت سولفات‌ها و مقامت فشاری.

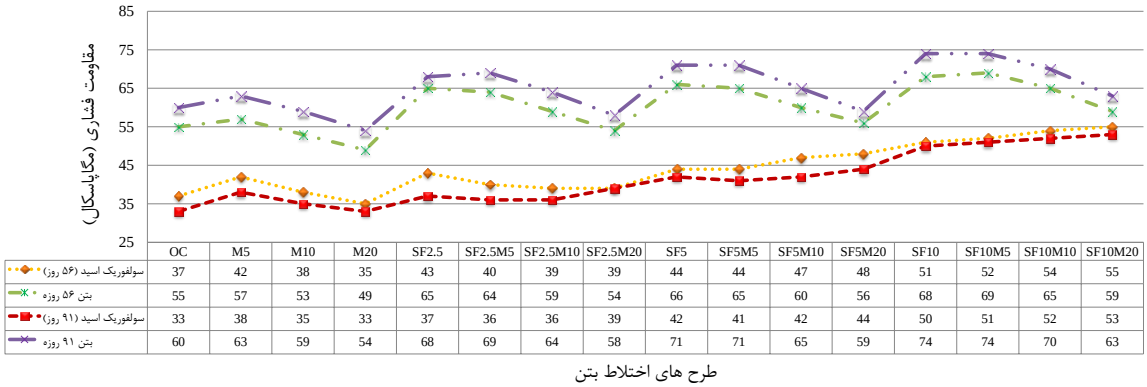
۳-۶- دوام در برابر حمله سولفوریک اسید

بتن‌های بکار رفته در تولید لوله‌ها و تاسیسات انتقال و تصفیه آب و فاضلاب، دامداری‌ها و کشتارگاه، به صورت مستمر تحت خوردگی ناشی از اسیدهای حاصل از فعالیت‌های بیولوژیکی قرار دارند. همچنین بتن‌های موجود در مناطق صنعتی و شهری تحت ریزش باران‌های اسیدی دچار حمله‌های اسیدی می‌شوند [۲۶].

تخریب بتن به وسیله سولفوریک اسید شامل دو مرحله است که در مرحله‌ی اول، سولفوریک اسید با محصولات هیدراتاسیون مانند هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته شده واکنش می‌دهد و سنگ گچ تولید می‌کند. در مرحله‌ی دوم، سنگ گچ با تری کلسیم آلومینات واکنش داده و اترینگایت را تشکیل می‌دهد. سنگ گچ و اترینگایت در مقایسه با محصولات اولیه حجم زیادی

را اشغال کرده که در نتیجه باعث انبساط شده و ترک‌هایی را در بتن ایجاد می‌کنند که به کاهش ظرفیت عضو منجر می‌شوند [۲۷]. همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش درصد جای‌گزینی میکروسیلیس با سیمان، مقاومت نمونه‌ها در برابر حملهٔ سولفوریک اسید افزایش یافته است. مقاومت نمونه‌های حاوی ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس در برابر حملهٔ سولفوریک اسید، در سن ۵۶ روز به ترتیب ۱/۱۶، ۱/۱۹ و ۱/۳۸ برابر و در سن ۹۱ روز به ترتیب ۱/۱۲، ۱/۲۷ و ۱/۵۲ برابر مقاومت نمونه‌ی شاهد بوده است. میزان کاهش در وزن و مقاومت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر از نمونهٔ شاهد است و با افزایش درصد جای‌گزینی میکروسیلیس نمونه‌ها وزن و مقاومت کمتری را از دست داده‌اند؛ به‌گونه‌ای که نمونهٔ حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس کمترین کاهش در وزن و مقاومت را داشته است. استفاده از پودر مرمر، تخلخل را در ماتریس فیزیکی بتن کاهش داده و یک خصوصیت اتصالی مهم دارد که با هیدراتاسیون کلسیت و تری کلسیم آلومینات به‌طور شیمیایی توسعه می‌یابد. میزان کاهش مقاومت در سن ۹۱ روز بیشتر از سن ۵۶ روز بود. با جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد پودر مرمر با سیمان، مقاومت نمونه‌ها در برابر حمله‌ی سولفوریک اسید به ترتیب تا ۱/۱۵ و ۱/۰۸ برابر نمونهٔ شاهد افزایش یافتند. نمونهٔ حاوی ۲۰ درصد جای‌گزینی پودر مرمر نیز مقاومتی در حدود مقاومت نمونهٔ شاهد در برابر حملهٔ سولفوریک اسید کسب کرد. میزان کاهش در وزن و مقاومت نمونه‌های حاوی پودر مرمر کمتر از نمونه‌ی شاهد است. اما این میزان کاهش در وزن و مقاومت نمونه‌های My تناسب و روند یکسانی ندارند. بگونه‌ای که می‌توان گفت با افزایش درصد جای‌گزینی پودر مرمر، میزان کاهش وزن نمونه‌ها روندی تقریبا نزولی و میزان کاهش مقاومت نمونه‌ها تقریبا روندی ثابت را طی می‌کنند.

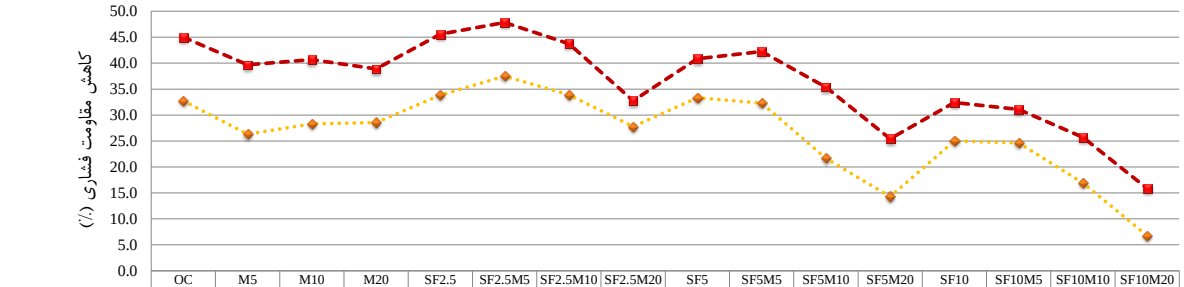
با افزایش میزان جای‌گزینی پودر مرمر و میکروسیلیس در نمونه‌های حاوی پودر مرمر میزان کاهش در مقاومت و وزن نمونه‌ها در برابر حمله سولفوریک اسید کاهش یافت. به‌عنوان مثال مقاومت نمونهٔ SF10M20 در برابر حمله سولفوریک اسید در حدود ۱/۶۱ برابر نمونهٔ شاهد در سن ۹۱ روز بود. جالب توجه است که نمونه‌های SF5M20 و SF10M20 افزایش وزن ناچیزی را در حدود ۰/۱۲ و ۰/۴۱ درصد در سن ۵۶ روز کسب کردند. این افزایش وزن در سنین اولیه می‌تواند به علت واکنش اسید با هیدروکسید کلسیم و تشکیل گچ باشد. اما با گذشت زمان، محلول سولفوریک اسید، لایه سطحی را در خود حل نموده و با تخریب این لایه و شسته شدن آن، وزن نمونه‌ها در هفته‌های بعد، با کاهش مواجه می‌شود. اما در این بین، هر چه لایه سطحی بتن، قوی‌تر و نفوذپذیری آن، کمتر باشد، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا لایه سطحی بتن، خورده شده و نمونه با کاهش وزن مواجه شود. میزان کاهش وزن نمونه‌های مذکور در سن ۹۱ روز در مقایسه با سن ۵۶ روز بیانگر این مطلب است. رحمانی و همکارانش [۲۸] در سال ۱۳۹۴ نتایج مشابهی را در خصوص افزایش وزن نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفوریک اسید در سنین اولیه گزارش دادند. با توجه به شکل ۱۳ و ۱۴ می‌توان مشاهده کرد که میزان کاهش مقاومت و کاهش وزن تمامی نمونه‌ها در سن ۹۱ روز بیشتر از سن ۵۶ روز بوده است. مقدار بالای ضریب همبستگی بدست آمده در شکل ۱۵ برای تغییرات وزن و مقاومت تمامی نمونه‌های غوطه‌ور در محلول سولفوریک اسید، بیان‌کننده‌ی تناسب بین این دو خصوصیت در تمامی نمونه‌ها است. به عبارتی دیگر، در هر دو سن آزمایش، نمونه‌هایی که وزن کمتری از دست داده‌اند، افت مقاومت کمتری داشته‌اند.



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
سولفوریک اسید (۵۶ روز)	37	42	38	35	43	40	39	39	44	44	47	48	51	52	54	55
بتن ۵۶ روزه	55	57	53	49	65	64	59	54	66	65	60	56	68	69	65	59
سولفوریک اسید (۹۱ روز)	33	38	35	33	37	36	36	39	42	41	42	44	50	51	52	53
بتن ۹۱ روزه	60	63	59	54	68	69	64	58	71	71	65	59	74	74	70	63

طرح های اختلاط بتن

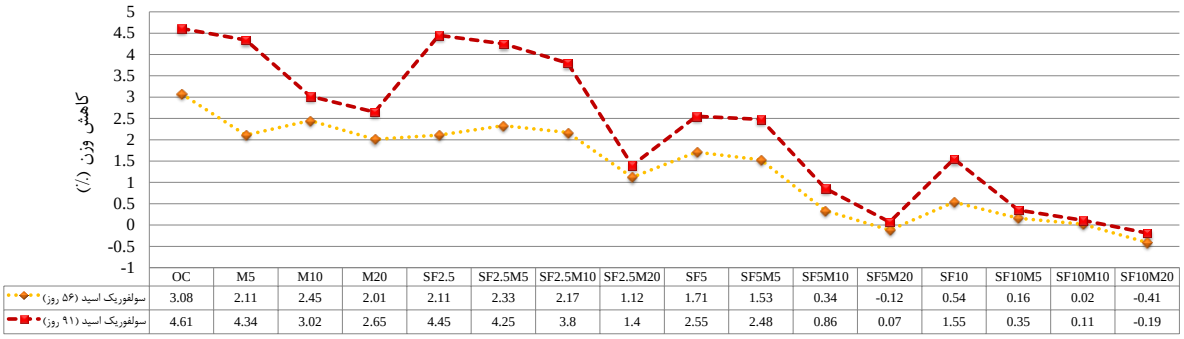
شکل ۱۲- مقاومت فشاری و مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید در سنین ۵۶ و ۹۱ روز



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
سولفوریک اسید (۵۶ روز)	32.7	26.3	28.3	28.6	33.8	37.5	33.9	27.8	33.3	32.3	21.7	14.3	25.0	24.6	16.9	6.8
سولفوریک اسید (۹۱ روز)	45	39.7	40.7	38.9	45.6	47.8	43.8	32.8	40.8	42.3	35.4	25.4	32.4	31.1	25.7	15.9

طرح های اختلاط بتن

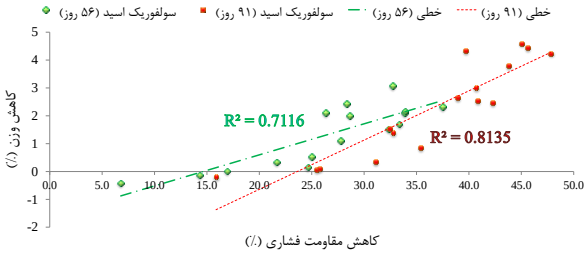
شکل ۱۳- کاهش مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید در سنین ۵۶ و ۹۱ روز



	OC	M5	M10	M20	SF2.5	SF2.5M5	SF2.5M10	SF2.5M20	SF5	SF5M5	SF5M10	SF5M20	SF10	SF10M5	SF10M10	SF10M20
سولفوریک اسید (۵۶ روز)	3.08	2.11	2.45	2.01	2.11	2.33	2.17	1.12	1.71	1.53	0.34	-0.12	0.54	0.16	0.02	-0.41
سولفوریک اسید (۹۱ روز)	4.61	4.34	3.02	2.65	4.45	4.25	3.8	1.4	2.55	2.48	0.86	0.07	1.55	0.35	0.11	-0.19

طرح های اختلاط بتن

شکل ۱۴- کاهش وزن در برابر حمله سولفوریک اسید در سنین ۵۶ و ۹۱ روز



شکل ۱۵- همبستگی کاهش وزن و کاهش مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید در سنین ۵۶ و ۹۱ روز

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از میکروسیلیس به‌عنوان یک مادهٔ افزودنی پوزولانی و از ضایعات پودر مرمر به‌عنوان ماده‌ای پرکننده در مخلوط بتن استفاده و در درصدهای مختلف جای‌گزین بخشی از سیمان شدند. باتوجه به آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده می‌توان به‌صورت خلاصه، نتایج زیر را بیان کرد.

۱- اسلامپ: برای حفظ اسلامپ و روانی طرح‌های اختلاط در بازه‌ی ۱۰±۸۰ از فوق روان‌کننده استفاده شد. با افزایش درصد جای‌گزینی پودر مرمر و میکروسیلیس اسلامپ بتن اندکی کاهش یافت که این کاهش اسلامپ با اندکی افزایش در مقدار فوق روان‌کننده جبران شد.

۲- وزن مخصوص: جای‌گزینی درصدهای مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان، تأثیر قابل‌توجهی بر وزن مخصوص نداشت. حداکثر میزان تغییرات ایجاد شده در وزن مخصوص طرح‌های اختلاط نسبت به بتن شاهد ۱/۵ درصد بود. جایگزینی ۵ درصد پودر مرمر با سیمان، وزن مخصوص بتن را به‌دلیل پراکندگی بهتر ذرات پودر مرمر و سیمان در خلل و فرج بتن، افزایش داد.

۳- مقاومت فشاری: جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس با سیمان مقاومت فشاری را تا ۲۴ درصد افزایش داد. جای‌گزینی پودر مرمر با سیمان تا ۵ درصد، مقاومت فشاری را ۴ درصد افزایش داد؛ اما درصدهای بالای جای‌گزینی پودر مرمر، مقاومت فشاری را تا ۱۳ درصد کاهش داده است. نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۱۰ درصد میکروسیلیس به همراه درصدهای مختلف پودر مرمر (SF10My) مقاومت فشاری بیشتری را در مقایسه با نمونهٔ شاهد، در تمامی سنین کسب کردند. نمونه‌های حاوی ترکیبی از ۲/۵ تا ۵ درصد میکروسیلیس به همراه ۱۰ تا ۲۰ درصد پودر مرمر، به مقاومت‌های قابل قبولی در سنین بالا رسیدند.

۴- مقاومت الکتریکی: در تمامی سنین، مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف پودر مرمر، اندکی کمتر از نمونهٔ شاهد بود. جای‌گزینی ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس با سیمان در نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف پودر مرمر (SF2.5My، SF5My و SF10My) به‌طور میانگین مقاومت الکتریکی را به ترتیب تا ۲/۲، ۲/۵ و ۴/۱ برابر نمونهٔ شاهد افزایش داد. دلیل این افزایش می‌تواند اصلاح ساختار تخلخل و عدم تحرک یون‌ها در چنین ماتریسی باشد.

۵- حملهٔ سولفات‌ها: میزان تغییرات مقاومت نمونه‌ها در برابر حملهٔ سولفات‌های سدیم و منیزیم تقریبا مشابه بود. با افزایش درصد جای‌گزینی پودر مرمر مقاومت نمونه‌ها در برابر حملهٔ سولفات‌ها تا ۱۲ درصد کاهش یافت؛ اما با افزایش درصد جای‌گزینی میکروسیلیس در نمونه‌های حاوی پودر مرمر، مقاومت نمونه‌ها در برابر حملهٔ سولفات‌ها تا ۱۰ درصد افزایش یافت. تقریبا تمامی نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، به‌جز نمونهٔ حاوی ۲/۵ درصد میکروسیلیس و ۲۰ درصد پودر مرمر (SF2.5M20)، مقاومت بیشتری را در مقایسه با نمونهٔ شاهد در برابر حمله سولفات‌ها نشان دادند.

۶- حملهٔ سولفوریک اسید: با افزایش درصدهای جای‌گزینی پودر مرمر و میکروسیلیس، میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت نمونه‌ها در برابر حملهٔ سولفوریک اسید کاهش یافت. بطور کلی می‌توان گفت که تمامی نمونه‌ها مقاومت و وزن کمتری را در مقایسه با نمونهٔ شاهد، در تمامی سنین آزمایش، از دست داده‌اند. نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد پودر مرمر، وزن و مقاومت کمتری را در مقایسه با سایر نمونه‌ها از دست دادند. برخی از نمونه‌ها مانند SF10M20، به‌میزان بسیار اندکی افزایش وزن داشته‌اند که یکی از علل این افزایش وزن می‌تواند واکنش اسید با هیدروکسید کلسیم و تشکیل گچ باشد.

باتوجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که تقریبا تمامی حالات ترکیبی درصدهای مختلف پودر مرمر و میکروسیلیس، عملکرد بهتری را در مقایسه با نمونهٔ شاهد نشان داده‌اند و با جای‌گزینی مناسب پودر مرمر و میکروسیلیس با سیمان می‌توان گامی مؤثر در راستای صنعت تولید بتن و توسعه پایدار برداشت.

۵- مراجع

[1] R. Rodrigues, J. de Brito, and M. Sardinha, "Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge," Construction and Building Materials, vol. 77, pp. 349-356, 2015.

[2] W. Kurdowski, Cement and concrete chemistry: Springer Science & Business, 2014.

[3] A. Ergün, "Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete," Construction and building materials, vol. 25, pp. 806-812 ,2011.

[4] R. Siddique, "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties," Resources, Conservation and Recycling, vol. 55, pp. 923-932, 2011.

[5] A. A. Aliabdo, A. E. M. A. Elmoaty, and E. M. Auda, "Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete," Construction and building materials, vol. 50, pp. 28-41, 2014.

[6] A. Rana, P. Kalla, and L. J. Csetenyi, "Sustainable use of marble slurry in concrete," Journal of Cleaner Production, vol. 94, pp. 304-311, 2015.

[7] M. Sardinha, J. de Brito, and R. Rodrigues, "Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge," Construction and Building Materials, vol. 119, pp. 45-52, 2016.

[8] P. Türker, B. Erdogan, and K. Erdogdu, "Influence of marble powder on microstructure and hydration of cements," Cem Concr World J TÇMB (TURKEY), vol. 7, pp. 38-89, 2002.

[9] H. Ş. Arel, "Recyclability of waste marble in concrete production," Journal of Cleaner Production, 2016.

[10] H. Dilbas, M. Şimşek, and Ö. Çakır, "An

investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume," Construction and Building Materials, vol. 61, pp. 50-59, 2014.
[11] T. Gupta, S. Chaudhary, and R. K. Sharma, "Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume," Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 702-711, 2016.
[12] O. Onuaguluchi and D. K. Panesar, "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume," Journal of Cleaner Production, vol. 82, pp. 125-131, 2014.
[13] A. Bagheri, H. Zanganeh, H. Alizadeh, M. Shakerinia, and M. A. S. Marian, "Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash," Construction and Building Materials, vol. 47, pp. 1402-1408, 2013.
[14] J. Dotto, A. De Abreu, D. Dal Molin, and I. Müller, "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars," cement and concrete composites, vol. 26, pp. 31-39, 2004.
[15] T. Wee, A. K. Suryavanshi, S. Wong, and A. A. Rahman, "Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures," Materials Journal, vol. 97, pp. 536-549, 2000.
[16] M. D. Cohen and A. Bentur, "Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium and sodium sulfate solutions," Materials Journal, vol. 85, pp. 148-157, 1988.
[17] M. Shannag and H. A. Shaia, "Sulfate resistance of high-performance concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 25, pp. 363-369, 2003.
[18] V. Shelke, P. Pawde, and R. Shrivastava, "Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete. GH Raisoni College of Engineering & Technology, India ",Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE), vol. 1, pp. 40-45, 2012.
[19] E. H. Amin, A. Khalid, and A. Alam, "Use of Silica Fume and Marble Dust as Partial Binding Material in Concrete," in 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering, Management and Sciences (ICETEMS-2014), Peshawar, Pakistan, 2014.
[20] K. Khayat and P. Aitcin" ,Silica fume: a unique supplementary cementitious material," Mineral admixtures in cement and concrete, vol. 4, pp. 227-265, 1993.
[21] M. Mazloom, A. Ramezanianpour, and J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete," Cement and Concrete Composites, vol. 26, pp. 347-357, 2004.
[22] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M. E. Kocabağ, V. Bayram, and K. Mermerdaş, "Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash," Construction and Building Materials, vol. 37, pp. 160-170, 2012.
[23] A. M. Moslemi, A. Khosravi, M. Izadinia, and M. Heydari, "Application of Nano Silica in Concrete for Enhanced Resistance against Sulfate Attack," in Advanced Materials Research, 2014, pp. 874-878..
[24] E. Ganjian and H. S. Pouya, "Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone," Cement and concrete research, vol. 35, pp. 1332-1343, 2005
[۲۵] م. مهدی خانی, ع. ا. رمضانیانپور, ا. قیاسوند, م. ا. کاملی, و م. احسان, "دوام بتن ها و ملات های حاوی پودر سنگ آهک در محیط‌های سولفاتی با غلظت بالا," تحقیقات بتن, ۱۳۸۹.
[۲۶] ع. رشیدی, س. م. ساداتیان, و ف. وزین رام, "افزایش دوام بتن در مقابل خوردگی اسیدی با استفاده از سنگدانهٔ آهکی," تحقیقات بتن, ۱۳۸۹.
[۲۷] ربیعی‌فر و فلاحی, "پیش‌بینی تأثیر میکروسیلیس، سرباره و خاکستر بادی بر مقاومت بتن در برابر سولفات با استفاده از نرم‌افزار LIFE365," فصلنامه پدافند غیرعامل, ۱۳۹۱.
[۲۸] ح. رحمانی, م. جوکار, و م. پروین نیا, "تأثیر توأم نانوسیلیس و میکروسیلیس بر دوام بتن‌های با مقاومت بالا در برابر تهاجم اسید سولفوریک," مهندسی عمران مدرس, ۱۳۹۴.

The effect of waste marble powder and silica fume as a partial replacement of cement on concrete durability

Mansour Ghalehnovi *
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Ali Khodabakhshian
M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
Elyas Asadi Shamsabadi
M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract
Waste marble powder (WMP) is an inert material which is obtained as an industrial by-product during sawing, shaping, and polishing of marble and causes a serious environmental problem. This research describes the procedures and results of a laboratory investigation of durability properties carried out on the sixteen concrete mixes containing waste marble powder (0, 5, 10, 20%) and silica fume (0, 2.5, 5, 10%) as partial replacement of portland cement. In all concrete mixtures, a constant water/binder ratio at 0.45 was used and concrete mixtures with a target initial slump of 80±10 were prepared. Workability, bulk density, compressive strength, electrical resistivity, durability to sodium sulfate, magnesium sulfate and sulfuric acid attack tests tests were performed. The results of tests indicate that the strength and durability of concrete containing WMP tend to decline for replacement ratios of more than 10%. Satisfactory results were obtained for replacement ratios of WMP up to 10%. Regarding the use of SF, it was observed that it improves the strength and durability of concrete with WMP by offsetting the decline of its properties relative to conventional concrete.

Keywords: Marble waste powder, Silica fume, Cement replacement, Durability, Concrete.

* Corresponding Author: Ghalehnovi@ferdowsi.um.ac.ir