



کارایی، مشخصات مکانیکی و دوام بتن خودتراکم حاوی گل قرمز و پودر سنگ مرمر و گرانیات

منصور قلعه‌نوی^{۱*}، نعیم روشن^۱، مهرالله رخشانی مهر^۲

۱-دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲-دانشکده مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

کلمات کلیدی:

گل قرمز

بتن خودتراکم

پودر سنگ مرمر

پودر سنگ گرانیات

درصد جایگزینی

خلاصه: نیاز به ویسکوزیته بالا در بتن خودتراکم به منظور حفظ یکنواختی و عدم جداشدگی ذرات، زمینه را برای کاربرد ماده پودری در طرح اختلاط این نوع بتن هموار ساخته است. تولید ضایعات پودری نزدیک به ۵۰ درصدی در مراحل مختلف سنگ‌بری و نیاز به دفن این ضایعات نگرانی‌هایی را از نظر زیست‌محیطی در پی دارد. از سوی دیگر، امروزه پژوهش‌گرانی با دغدغه‌های زیست‌محیطی و همچنین اقتصادی استفاده از مواد جایگزین سیمان در طرح اختلاط بتن و در نتیجه کاهش تولید گاز کربن‌دی‌اکسید ناشی از تولید سیمان را لازم می‌دانند. دفن گل قرمز خام که به عنوان ضایعات کارخانه آلومینیوم‌سازی شناخته می‌شود، با اثرات مخرب زیست‌محیطی برای خاک، آب و هوای اطراف سدهای باطله همراه است. در این طرح پژوهشی تاثیر استفاده از گل قرمز به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در طرح اختلاط بتن خودتراکم مورد پرسش قرار می‌گیرد. همچنین از ضایعات کارخانه‌های سنگ‌بری (پودر سنگ‌های مرمریت و گرانیات) به عنوان ماده پرکننده در بتن خودتراکم استفاده شده است. کارایی، مشخصات مکانیکی و دوام بتن خودتراکم با استفاده از آزمایش‌های مناسب سنجیده شد. هر چند گل قرمز خام خاصیت پوزلانی ندارد، ریزدانه بودن آن سبب متراکم شدن ماتریس بتن در درصد‌های جایگزینی کم (تا ۵ درصد) شده است. از سوی دیگر نشان داده می‌شود که استفاده از پودر سنگ‌های مرمریت و گرانیات به جای پودر سنگ آهک در بتن خودتراکم از نظر کارایی، مقاومتی و دوام مشکلی را در پی نخواهد داشت

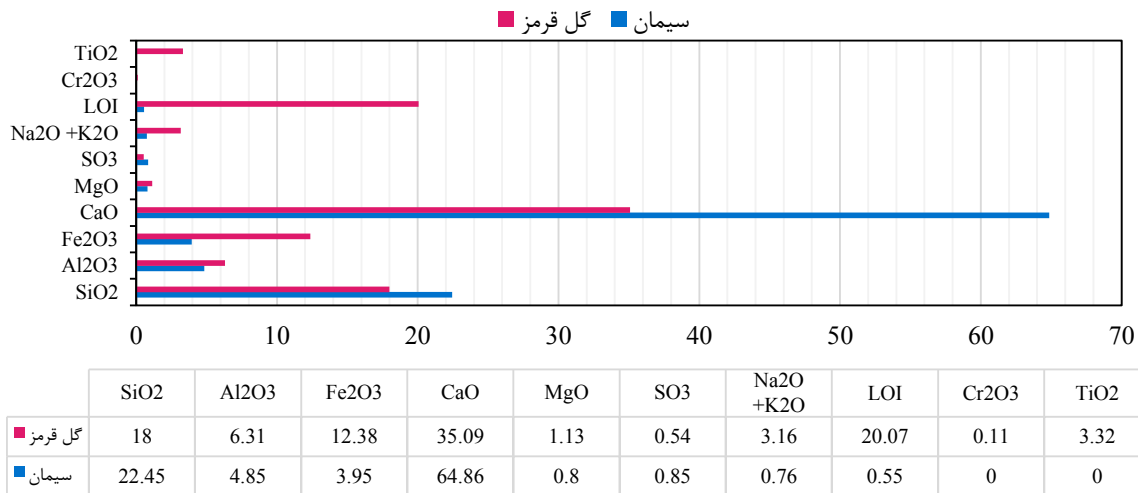
۱- مقدمه

طور جامع مورد پژوهش قرار گرفته است. همچنین در سال‌های اخیر پودر سنگ گرانیات و مرمریت به طور گسترده‌ای به عنوان مواد افزودنی یا جایگزین ریزدانه برای تولید بتن خودتراکم به کار گرفته شده‌اند. استفاده مجدد از این‌گونه فرآورده‌های فرعی و پسماندهای صنعتی در تولید بتن می‌تواند از نظر زیست‌محیطی حائز اهمیت تلقی گردد، زیرا کاهش مصرف سیمان و در نتیجه کاهش تولید CO_2 را در پی دارد. قابلیت عبور، قابلیت پر کردن و مقاومت در برابر جداشدگی، سه ویژگی اصلی بتن خودتراکم است. به منظور دستیابی به بتن خودتراکمی با قابلیت عبور مناسب مواردی از جمله کاهش نسبت و اندازه درشت‌دانه‌ها در بتن و افزایش حجم خمیر در بتن توسط محققان پیشنهاد شده است. از طرفی برای جلوگیری از جداشدگی سنگدانه‌ها و خمیر سیمان، می‌توان با افزایش ویسکوزیته بتن از طریق افزودن مواد پودری به این مهم دست یافت. در راهنمای اروپایی تولید بتن خودتراکم استفاده از پودر سنگ آهک، خاکستر بادی و سرباره کوره‌های آهن‌گدازی را به عنوان مواد پودری مناسب جهت استفاده در بتن خودتراکم پیشنهاد شده است [۵]. با توجه به نیاز جامعه امروز برای استفاده مجدد از

سیمان به عنوان ماده اصلی بتن از طریق روش‌هایی با صرف انرژی فراوان تولید می‌شود. صنعت سیمان با توجه به تولید حجم عظیمی از گازهای گل‌خانه‌ای سهم به‌سزایی در گرمایش زمین و آلودگی محیط‌زیست دارد. این صنعت با تولید ۵ تا ۷ درصد از کل دی‌اکسید کربن (CO_2)، دومین انتشار دهنده بزرگ دی‌اکسید کربن صنعتی در جهان است [۱]. امروزه، استفاده از مواد جایگزین سیمان روشی مناسب در جهت کاهش تولید CO_2 مورد توجه است. در همین راستا، در جوامع مدرن، بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی به عنوان ماده جایگزین سیمان در صنعت ساختمان رایج شده است [۲ و ۳]. برای تحقق مفهوم توسعه‌ی پایدار، ایده‌ی استفاده مجدد از پسماندها در تولید بتن رواج یافته است. چاندرو و همکاران [۴] ادعا کردند که افزودن مقادیر معینی از پسماندهای پودری در بتن باعث افزایش کارایی، مشخصات مکانیکی و دوام آن می‌شود. اخیراً تأثیر انواع پسماندهای صنعتی با خاصیت پوزلانی، مانند خاکستر کوره آهن و خاکستر بادی بر خواص انواع بتن به

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ghalehnovi@um.ac.ir





شکل ۱. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان و گل قرمز [۶]

Fig. 1. Chemical composition of cement and red mud

همچنین نابرابر شدن خاک منطقه از مشکلات بعدی ناشی از رهاسازی گل قرمز در محیطزیست است. همچنین این مواد پس از خشک شدن توسط باد حمل شده و به علت ریزدانه بودن باعث آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از ریزگردها در محیط می‌شوند. به طور مثال کانی هماتیت موجود در گل قرمز سبب کاهش دریافت فسفر توسط خاک می‌شود و در نتیجه حاصل‌خیزی خاک را با مشکل مواجه می‌کند [۸]. با توجه به رویکردهای توسعه‌ی پایدار و به منظور دفع و اجتناب از آلودگی محیطزیست، استفاده از محصولات فرعی نظیر گل قرمز در تولید انواع مصالح ساختمانی مانند آجر، سرامیک و بتن مورد توجه قرار گرفته است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی گل قرمز آن را به یک ماده‌ی موثر به عنوان جایگزین سیمان در بتن و استفاده در صنعت ساختمان تبدیل کرده است. برای نمونه pH بالای گل قرمز باعث افزایش سازگاری رابطه بین بتن و میلگردهای فولادی در سازه بتنی می‌شود [۹]. خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده بر روی کاربرد گل قرمز به عنوان ماده جایگزین بخشی از سیمان و تاثیر آن بر مشخصات بتن در جدول ۱ آمده است.

استفاده از مواد پودری مانند پودر سنگ آهک به عنوان پرکننده در طرح اختلاط بتن به سبب بهبود توزیع دانه‌بندی سنگدانه‌ها و در نتیجه افزایش ویسکوزیته بتن، سبب تولید بتن خودتراکم با قابلیت عبور مناسب و عدم جداشدگی می‌گردد. به تازگی، بر اساس یافته‌های محققان تاثیر مثبت استفاده از افزودنی‌های معدنی بر کارایی و مشخصات مکانیکی بتن روشن شده است. با توجه به نیاز بتن خودتراکم به مواد پودری با خاصیت

فرآورده‌های فرعی و پسماندهای صنعتی و عدم انباشت آن‌ها، می‌توان از این منابع به عنوان مواد پودری در بتن خودتراکم استفاده نمود.

گل قرمز، ماده‌ای با مشخصه ریزدانه بودن و قلیابیت بسیار بالا (pH حدود ۱۰ تا ۱۲) به عنوان محصول فرعی صنعت آلومینیوم شناخته می‌شود [۶]. بر اساس گزارش‌های اخیر، تولید جهانی گل قرمز به ۱۱۷ میلیون تن در سال می‌رسد. ترکیب شیمیایی مواد و کانی‌های موجود در گل قرمز بسته به معدن بوکسیت و همچنین فرآیند تولید آلومینیوم می‌تواند متفاوت باشد. در این پژوهش از گل قرمز تولیدی در کارخانه آلومینای جاجرم استفاده شده است. در نمونه خام این ماده، کانی‌های هماتیت (Fe_2O_3)، کلسیت ($CaCO_3$) و آناتاز (TiO_2) شناسایی شدند. همچنین درصد اکسیدهای موجود در گل قرمز بر اساس نتایج آنالیز XRF به ترتیب فراوانی عبارتند از: CaO ، SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 ، TiO_2 ، Na_2O ، MgO و K_2O . این ماده دارای وزن مخصوصی در حدود ۵۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و سطح مخصوص ذرات آن برابر با ۲۶/۷۵ متر مربع بر گرم است [۶].

پسماند حاصل از فرآیند استخراج آلومینا (اکسید آلومینیوم) از بوکسیت که با نام گل قرمز شناخته می‌شود، دوغابی تقریباً سمی با خواص رادیواکتیو است [۷]. خنثی‌سازی توسط آب ساده‌ترین روش خنثی‌سازی گل قرمز در جهان است، اما به دلیل کمبود منابع آبی در ایران این عمل بسیار پرهزینه خواهد بود. از همین‌رو، فرآورده تقریباً سمی گل قرمز در زمین‌های اطراف کارخانه‌های آلومینیوم دفن می‌شوند. علاوه بر هزینه‌های بالای دفن گل قرمز به این صورت، آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی از طریق نفوذ باران و

جدول ۱. خلاصه ای از پژوهش های انجام شده با موضوع جایگزینی سیمان با گل قرمز

Table 1. A summary of the researches on replacing cement with red mud

مرجع	نوع بتن	درصد جایگزینی سیمان	نسبت آب به سیمان	نتیجه
[۱۰]	بتن معمولی	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۲۵	۰/۳۶، ۰/۴، و ۰/۴۵	از نقطه نظر مقاومت فشاری و برتری اقتصادی طرح اختلاط با ۱۵ درصد جایگزینی گل قرمز بهینه است.
[۱۱]	ملات بتنی	۵، ۱۰، و ۱۵	۰/۳ و ۰/۵	استفاده از ۵ درصد گل قرمز حرارت دیده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد به عنوان جایگزین سیمان به طرح بهینه انجامید.
[۱۲]	ملات بتنی	۰، ۱۰، و ۲۰	۰/۴۷ و ۰/۵۸	تا ۲۰ درصد جانشینی گل قرمز اثر کمی بر نفوذپذیری ملات دارد و تاثیر نسبت آب به سیمان به مراتب بیشتر است.
[۱۳]	بتن معمولی	۵، ۱۰، ۱۵، و ۲۰	۰/۴۵	نتایج امکان جایگزینی سیمان را تا ۲۰ درصد با گل قرمز حرارت دیده تایید می کند.
[۱۴]	بتن معمولی	۰ تا ۱۴	۰/۳۳، ۰/۳۶، ۰/۳۸، و ۰/۴	بهترین درصد جایگزینی به منظور افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در همه نسبت های آب به سیمان مختلف، برابر ۴ درصد است.
[۱۵]	بتن معمولی	۰ تا ۱۵	۰/۳۸	درصد جذب آب نمونه بتنی با افزایش درصد گل قرمز، کاهش می یابد. و بیش از ۱۰ درصد جایگزینی سیمان با گل قرمز مقاومت فشاری نمونه بتنی را کاهش می دهد.
[۱۶]	بتن معمولی	۶، ۱۲، ۱۸، ۲۴، و ۳۰	۰/۴۵	در حضور سیلیکا فیوم گل قرمز می تواند تا ۱۸ درصد جایگزین سیمان شود بدون ایجاد کاهش در مقاومت فشاری نمونه.
[۱۷]	بتن معمولی	۰ تا ۲۴	۰/۴۲ و ۰/۴۵	۱۸ درصد جایگزینی سیمان با گل قرمز بالاترین نتایج مقاومت فشاری، کششی و خمشی را به دست می دهد.

جدول ۲. مشخصات طرح های اختلاط

Table 2. The specifications of SCC mixes

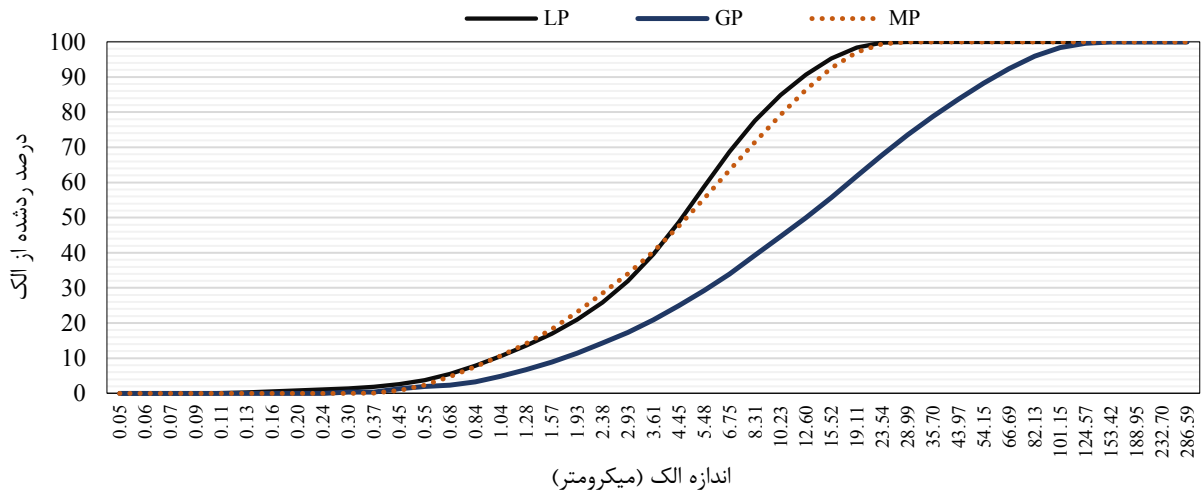
نام طرح اختلاط	آب	سیمان	پودر سنگ آهک	پودر سنگ گرانیت	پودر سنگ مرمریت	گل قرمز	ریزدانه	درشت دانه	فوق روان کننده
کنترلی	۱۸۳/۵	۴۰۰	۱۰۰	۰	۰	۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
A1	۱۸۳/۵	۳۹۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
A2	۱۸۳/۵	۳۸۰	۱۰۰	۰	۰	۲۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
A3	۱۸۳/۵	۳۷۰	۱۰۰	۰	۰	۳۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
A4	۱۸۳/۵	۳۶۰	۱۰۰	۰	۰	۴۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
B1	۱۸۳/۵	۳۹۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
B2	۱۸۳/۵	۳۸۰	۰	۱۰۰	۰	۲۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
B3	۱۸۳/۵	۳۷۰	۰	۱۰۰	۰	۳۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
B4	۱۸۳/۵	۳۶۰	۰	۱۰۰	۰	۴۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
C1	۱۸۳/۵	۳۹۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
C2	۱۸۳/۵	۳۸۰	۰	۰	۱۰۰	۲۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
C3	۱۸۳/۵	۳۷۰	۰	۰	۱۰۰	۳۰	۹۷۵	۵۲۵	۷
C4	۱۸۳/۵	۳۶۰	۰	۰	۱۰۰	۴۰	۹۷۵	۵۲۵	۷

عملکرد مکانیکی، اقتصادی و زیست محیطی، ترکیبی از میکروسیلیس و پودر سنگ گرانیت طرح اختلاط بهینه را به دست می دهد [۳]. در این پژوهش، از گل قرمز و پودر سنگ گرانیت و مرمریت به ترتیب به جای سیمان و ماده پرکننده در بتن خودتراکم استفاده شده است. انتظار می رود ریزدانه بودن گل قرمز به دوام بهتر بتن و متراکم تر شدن ماتریس ماده کمک می کند. از سویی پودر سنگ گرانیت و مرمریت نیز به عنوان فرآورده فرعی ضایعاتی تولید سنگ می تواند نقش ماده پرکننده را در بتن خودتراکم بر عهده داشته باشد.

۲- برنامه ای آزمایشگاهی

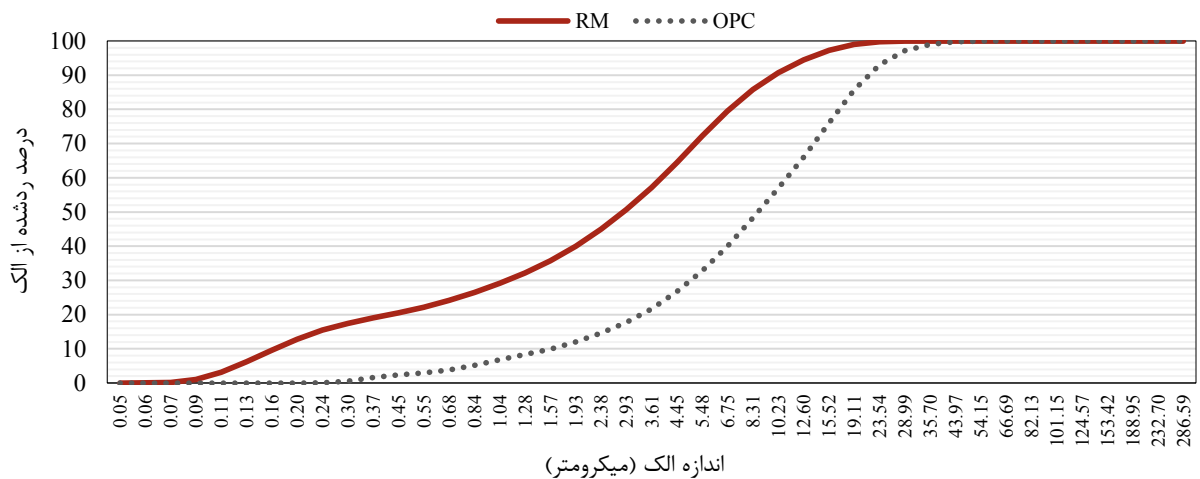
برای تولید بتن خودتراکم بر اساس استانداردهای ASTM و EFNARC از پسماند گل قرمز (RM) کارخانه ی آلومینای جاجرم به عنوان ماده جایگزین سیمان در درصدهای ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد استفاده شد. همچنین از پودر سنگ های آهک، مرمریت و گرانیت (به ترتیب LP، MP، و GP) نیز به عنوان ماده پرکننده بهره گیری شد. در طرح سری A پودر سنگ آهک به عنوان ماده پرکننده به همراه درصدهای مختلف گل قرمز به عنوان جایگزین سیمان استفاده می شود. در سری B و C به ترتیب پودر سنگ گرانیت و پودر سنگ مرمریت جایگزین پودر سنگ آهک (ماده پرکننده) شده است. در مجموع ۱۲ طرح اختلاط بتن خودتراکم در این بررسی مورد آزمایش قرار گرفت که مقادیر اجزای این طرح ها در جدول ۲ دیده می شود. قابل توجه

ریزدانه گی، کورینالدسی و همکاران [۱۸] پتانسیل استفاده از پودر سنگ مرمریت را به عنوان ماده پرکننده در بتن و ملات بتنی مورد پرسش قرار دادند [۱۹]. نتیجه بررسی محققان آثار مثبت استفاده از پودر سنگ مرمریت را به دلیل ریزدانه بودن و توزیع مناسب ذرات آن ها در تولید بتن و ملات بتنی آشکار ساخت [۲۰]. علاوه بر آن، در سال ۲۰۱۸، خدابخشیان و همکاران طی پژوهشی تاثیر جایگزینی پودر سنگ مرمریت به همراه میکروسیلیس را به جای سیمان در طرح اختلاط بتن مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با جایگزینی تا ۱۰ درصد وزنی سیمان با پودر سنگ مرمریت مشخصات مکانیکی بتن بهبود می یابد [۲۰]. در سال ۲۰۱۶، سینگ و همکاران [۲۱] نشان دادند استفاده از پودر سنگ گرانیت در تولید بتن به علت خاصیت پرکنندگی آن مشخصات بتن را بهبود می بخشد. همچنین در مورد بتن با مقاومت بالا، با ۲۵ درصد جایگزینی پودر سنگ گرانیت به جای شن در بتن تاثیرات مثبتی مشاهده شد [۲۲]. در پژوهشی دیگر، محققان به بررسی اثر جایگزینی ماسه و سیمان با پودر سنگ گرانیت پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان داد که هر چند جایگزینی ماسه با پودر سنگ گرانیت خواص ۲۸ روزه بتن را بهبود می بخشد، در مقابل اثر جایگزینی سیمان با پودر سنگ گرانیت تاثیر منفی بر خواص مکانیکی بتن خواهد داشت [۲۳]. در این مورد محققان استفاده از درصدهای جایگزینی محدود سیمان را برای دستیابی به مشخصات مطلوب بتن توصیه نمودند [۲۴]. همچنین با در نظر گرفتن



شکل ۲. توزیع دانه بندی پودر سنگ آهک، گرانیت و مرمریت

Fig. 2. Size distribution of limestone powder, waste granite and waste marble powder

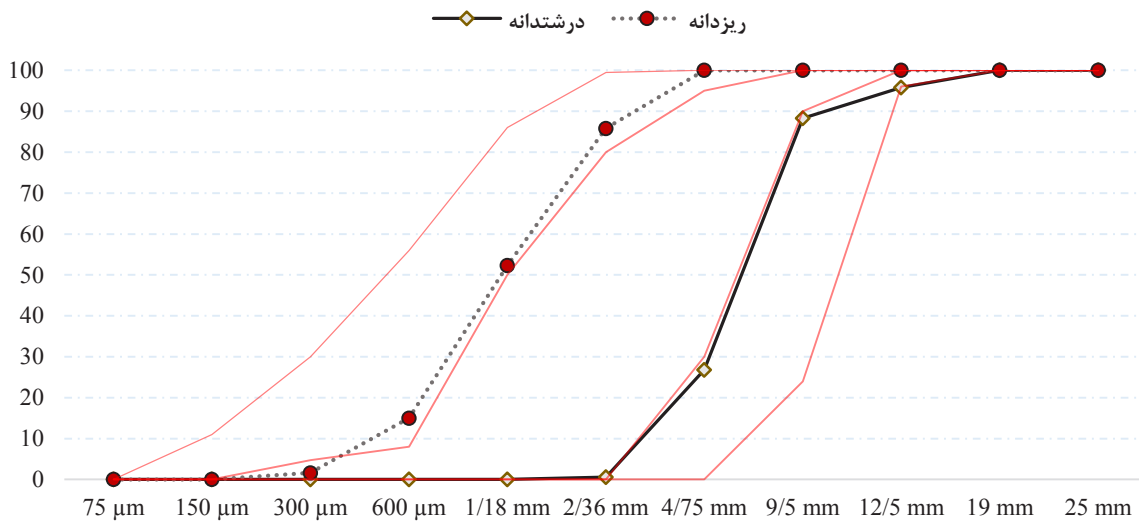


شکل ۳. توزیع دانه بندی گل قرمز و سیمان

Fig. 3. Size distribution of cement and red mud

منطقه‌ی تپه‌سلام واقع در جنوب شهر مشهد تهیه شده است. توزیع دانه‌بندی سیمان و گل قرمز در شکل ۳ قابل مشاهده است. همچنین، توزیع دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه به کار برده شده در این پژوهش در شکل ۴ آمده است. در این بررسی، کارایی، مشخصات مکانیکی و دوام بتن خودتراکم تولید شده با استفاده از آزمایش‌های گوناگون صورت گرفت. برای اندازه‌گیری

است که اعداد جدول بر اساس kg/m^3 آمده است. توزیع دانه‌بندی مواد پودری که به عنوان ماده پرکننده مورد استفاده قرار گرفت در شکل ۲ آمده است. همچنین در این پژوهش از سیمان تیپ (II) کارخانه سیمان زاوه با وزن مخصوص $300 kg/m^3$ استفاده شد. پودر سنگ مرمریت و گرانیت مورد استفاده در این پژوهش از پسماند حاصل از عملیات سنگ‌بری در



شکل ۴. توزیع دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه

Fig. 4. Size distribution of fine and coarse aggregates

داشته است. این نتایج با نتایج گزارش شده توسط تنگ و همکاران [۲۵] همسو است. یافته‌های یکسانی در مورد ملات بتنی حاوی مواد مشابه گل قرمز دارای ژئولیت نیز توسط محققین گزارش شده است [۲۶]. در واقع، این کاهش کارایی بتن به علت ریزی بیشتر و سطح مخصوص بزرگ‌تر ذرات گل قرمز در مقایسه با سیمان است. هنگامی که سطح مخصوص ذرات جایگزین سیمان بزرگ‌تر باشد، میزان تقاضای آب توسط مخلوط بتنی افزایش می‌یابد. با ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان، میزان آب آزاد بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها کاهش یافته و سبب عدم کارایی و جریان‌پذیری مناسب بتن خودتراکم می‌گردد [۱۲].

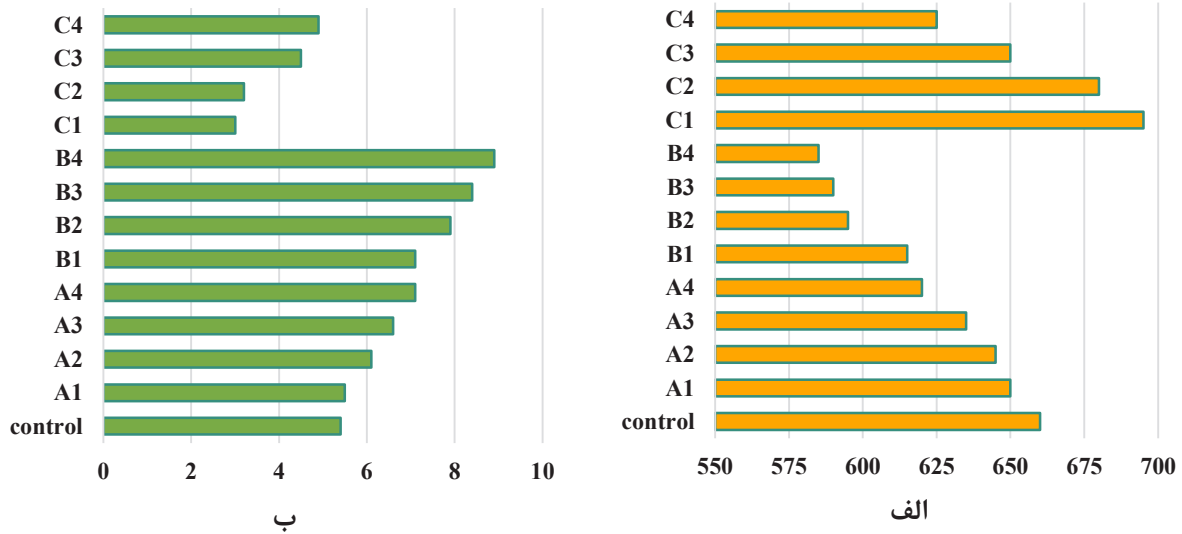
بیشینه جریان اسلامپ به دست آمده مربوط به طرح C۱ با ۲/۵ درصد گل قرمز و ماده پرکننده‌ی پودر سنگ مرمیت است که ۶۹/۵ سانتی‌متر گزارش شده است. همچنین نتیجه آزمون T_{50} برای این طرح دارای کمترین مقدار و در حدود ۳ ثانیه است. استفاده از پودر سنگ گرانیب به عنوان ماده پرکننده به همراه ۱۰ درصد جایگزینی سیمان با گل قرمز ضعیف‌ترین عملکرد را در بین طرح‌های اختلاط نشان می‌دهد. از مقایسه طرح‌های A۱، B۱ و C۱ می‌توان دریافت که استفاده از پودر سنگ مرمیت به عنوان فیلر در مقابل پودر سنگ آهک و گرانیب از نظر کارایی بتن نتایج بهتری را نشان

کارایی بتن خودتراکم از چهار آزمایش جریان اسلامپ، T_{50} ، قیف V شکل و جعبه‌ی L استفاده شد. در ادامه، مشخصات مکانیکی بتن به کمک آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دوام بتن با استفاده از آزمایش‌های جذب آب، موج فراصوت و مقاومت در برابر حمله سولفوریک اسید اندازه‌گیری شد.

۳- بررسی نتایج

۳-۱- کارایی بتن

در این پژوهش آزمایش‌های جریان اسلامپ و T_{50} به منظور ارزیابی فاکتور جریان‌پذیری و پیوستگی بتن تازه انجام شد. آزمون جریان اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM-C۱۶۱۱ برای هر ۱۲ طرح اختلاط بتن خودتراکم صورت گرفت. همچنین سرعت جریان و ویسکوزیته طرح‌ها نیز با کمک آزمون T_{50} بررسی شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمون جریان اسلامپ مشاهده می‌شود که مقادیر قطر دایره اسلامپ برای همه‌ی طرح‌ها بین ۵۸ تا ۷۰ سانتی‌متر گزارش شده است (شکل ۵-الف). نتایج آزمون T_{50} نیز در شکل ۵-ب مشخص شده است. با افزایش درصد جایگزینی گل قرمز در همه‌ی طرح‌ها مقادیر جریان اسلامپ و T_{50} به ترتیب کاهش و افزایش



شکل ۵. مقادیر جریان اسلامپ برحسب میلی‌متر (الف) و زمان T_{500} برحسب ثانیه (ب) برای بتن تازه

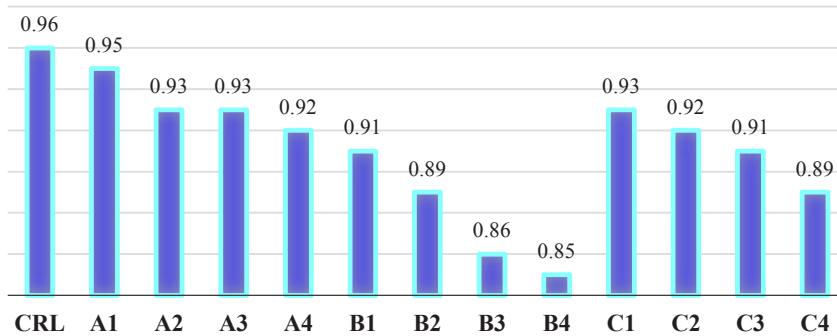
Fig. 5. Slump flow diameter (mm) and T_{500} time (sec) for different SCC mixes

پدیده جذب آب بیشتر توسط ذرات گل قرمز جایگزین شده نسبت به خاکستر بادی عنوان شد [۲۸]. در طرح‌های حاوی ۲/۵ درصد گل قرمز نسبت به طرح کنترلی، نسبت جعبه L به ترتیب ۱، ۵ و ۲ درصد برای طرح‌های A۱، B۱ و C۱ کاهش پیدا کرده است. همچنین طرح B۴ با نسبت h_p/h_c برابر با ۰/۸۵ و طرح کنترلی با نسبت ۰/۹۶ به ترتیب ضعیف‌ترین و بهترین عملکرد را در بین تمامی طرح‌ها داشتند. البته باید توجه داشت که مقادیر گزارش شده برای نسبت جعبه L در تمامی طرح‌ها در محدوده استاندارد اروپایی بتن خودتراکم قرار دارد [۵].

به منظور بررسی جریان‌پذیری و ویسکوزیته‌ی طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم با حداکثر اندازه دانه‌بندی ۲۰ میلی‌متر از آزمایش قیف V شکل که در دستورالعمل ارائه شده توسط اوزاوا و همکاران موجود است استفاده می‌شود [۲۹]. همچنین طبق راهنمای اروپایی برای تولید بتن خودتراکم، حداکثر زمان مورد قبول برای تخلیه کامل قیف V شکل برابر با ۱۲ ثانیه گزارش شده است. بر اساس نتایج گزارش شده در شکل ۷، زمان تخلیه برای همه نمونه‌ها بیش از ۱۲ ثانیه است که بیانگر ویسکوزیته خمیری زیاد بتن است. با توجه به روند غالب در نتایج، افزایش درصد گل قرمز سبب طولانی‌تر شدن زمان تخلیه قیف می‌گردد. در بررسی لیو و پوون نیز نتایج مشابهی

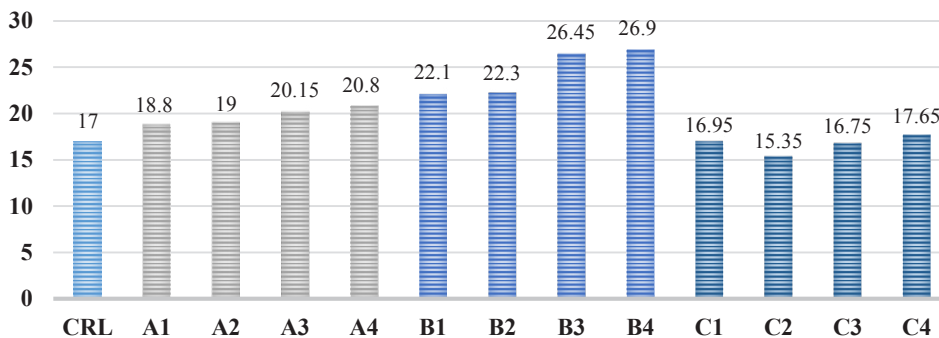
می‌دهد. گزولگو و همکاران [۲۷] نیز نشان دادند که استفاده از پودر سنگ آهک و گرانیته به علت کوچک بودن اندازه ذراتشان نیاز به فوق روان کننده را در بتن به منظور حفظ مقادیر ثابت اسلامپ بالا می‌برد. مشخصات فیزیکی مواد پودری مانند اندازه، شکل، بافت و نحوه توزیع‌شان بر کارایی و جریان‌پذیری بتن تاثیر می‌گذارد. پودرهای سنگ آهک و گرانیته به علت نامنظمی شکلی و ریزدانه بودن سبب افزایش تماس بین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان شده و در نتیجه ویسکوزیته را افزایش می‌دهند [۲۴].

آزمایش جعبه‌ی L برای ارزیابی رئولوژی بتن و ظرفیت حفظ پیوستگی جریان صورت می‌گیرد. معمولاً، نتیجه این آزمایش با نسبت h_p/h_c که همان نسبت ارتفاع بتن در انتهای جعبه به ابتدای آن است مشخص می‌گردد. هر چه این نسبت به عدد یک نزدیک‌تر باشد، رفتار بتن از نظر رئولوژیک و حفظ پیوستگی مطلوب‌تر تلقی می‌شود [۵]. نتایج به دست آمده از آزمایش بر روی طرح‌های مختلف در شکل ۶ قابل مشاهده است. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد گل قرمز در همه‌ی طرح‌ها سبب کاهش نسبت h_p/h_c می‌شود. لیو و پوون [۲۸] نیز در سال ۲۰۱۶ به نتایج یکسانی در رابطه با بتن خودتراکم دست یافتند. آن‌ها متوجه شدند که با افزایش درصد جایگزینی گل قرمز به جای خاکستر بادی نتایج آزمون جعبه L کاهش می‌یابد. دلیل این



شکل ۶. نسبت h_1/h_2 در جعبه L

Fig. 6. h_1/h_2 ratio of L-box test



شکل ۷. زمان تخلیه قیف V شکل (ثانیه)

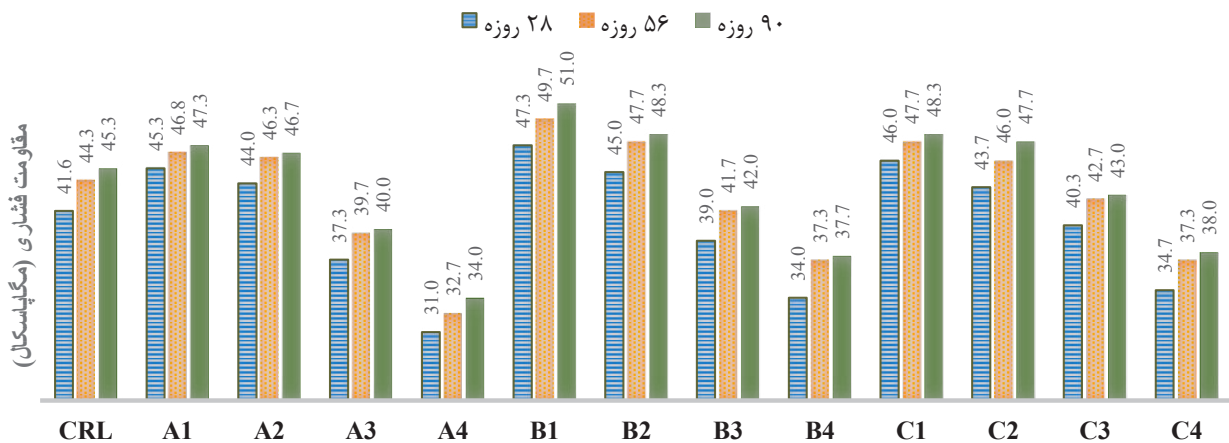
Fig. 7. V-funnel time (sec) for different SCC mixes

مدت زمان تخلیه قیف V شکل می‌گردد [۲۷]. در مقابل وجود ذرات زیر و گوشه‌دار در ترکیب پودر سنگ گرانیات باعث افزایش این زمان و کاهش کارایی بتن می‌گردد [۳۰ و ۱].

۳-۲- مشخصات مکانیکی بتن

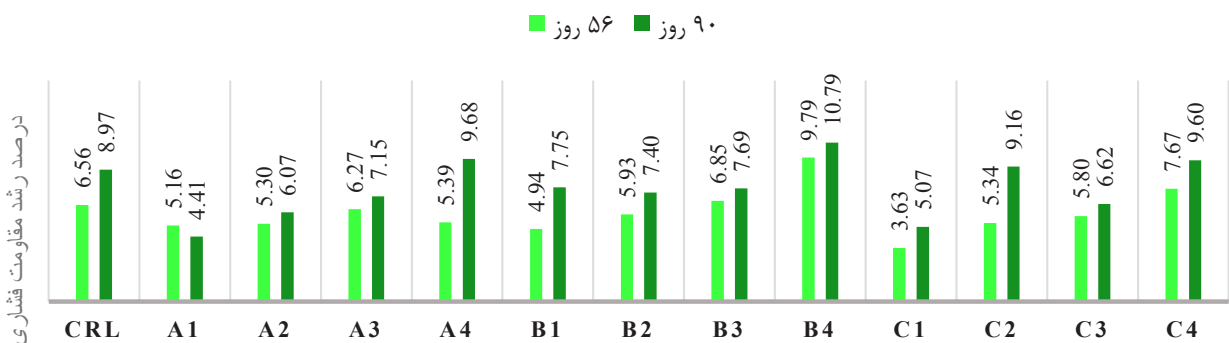
اندازه‌گیری مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم توسط دو آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی در این بررسی انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر طبق روش استاندارد BS EN 1۲۳۹۰-۴ صورت گرفته است. اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها در سه سن ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام گرفت و نتایج در شکل ۸ آمده است. با توجه به مقادیر مقاومت فشاری در همه سنین، رفتار مشابهی

دید می‌شود [۲۸]. دلیل اصلی چنین نتایجی ریزدانه بودن ذرات گل قرمز و افزایش سطح مخصوص مخلوط است. چنانچه نسبت آب به سیمان به منظور حفظ برخی مشخصات مکانیکی و دوام بتن ثابت نگه داشته شود، به علت بالا رفتن تقاضای آب، ویسکوزیته مخلوط افزایش پیدا کرده و سبب ایجاد اختلال در کارایی آن می‌شود [۲۸]. از طرفی در مقایسه با طرح A1، مدت زمان خالی شدن قیف V شکل برای طرح B1 در حدود ۱۷/۵ درصد افزایش یافته است. در حالی که این مدت زمان برای طرح C1 با کاهش حدود ۱۰ درصدی روبه‌رو شده است. در واقع این نتیجه بیان‌گر عملکرد مناسب پودر سنگ مرمریت نسبت به پودر سنگ گرانیات به عنوان ماده پرکننده در بتن خودتراکم است. با توجه به نتایج به دست آمده توسط سایر محققین توزیع مناسب دانه‌بندی ذرات پودر سنگ مرمریت سبب کاهش



شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز بر حسب مگاپاسکال

Fig. 8. Compressive strength (MPa) at different ages

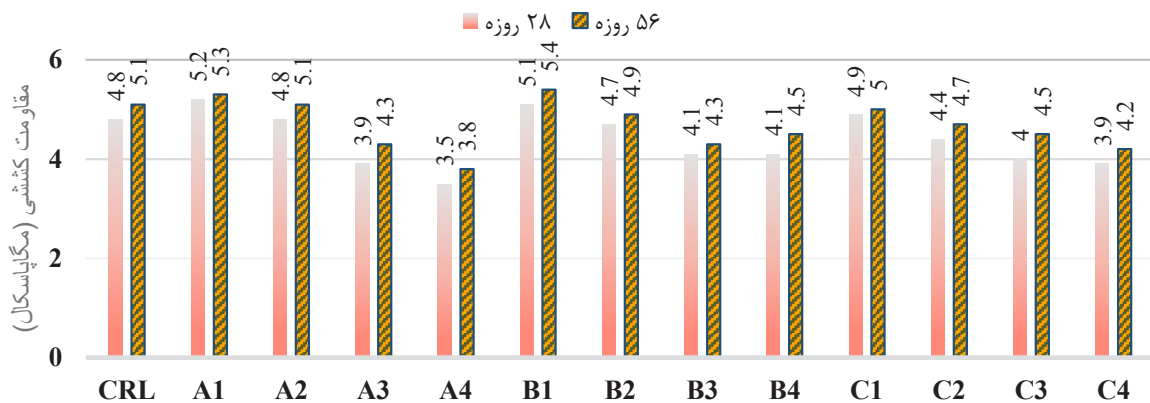


شکل ۹. درصد رشد مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه ۲۸ روز

Fig. 9. Enhancement of compressive strength at 56 and 90 days compared to that of 28 days

نتایج ارائه شده توسط تنگ و همکاران بر روی بتن خودتراکم همخوانی دارد و دلیل آن به قابلیت عمل‌آوری داخلی گل قرمز برمی‌گردد [۲۵]. در مقایسه فیلرهای متفاوت در همه نمونه‌های یک سری (شکل ۸)، نتایج اثر مطلوب‌تر پودر سنگ گرانیت و مرمیت را نسبت به پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی خودتراکم نشان می‌دهد. به طور مثال در نمونه‌های با حداقل درصد گل قرمز در سن ۹۰ روز، برای نمونه B1 و C1 به ترتیب عدد مقاومت فشاری ۵۱ و ۴۸ مگاپاسکال گزارش شده در حالی که برای نمونه A1 این عدد برابر با ۴۷ مگاپاسکال است. همچنین نمونه‌های پودر سنگ گرانیت و مرمیت با بیشینه مقدار گل قرمز (۱۰ درصد) نیز نتایج بهتری را در سن ۹۰ نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد گل قرمز

در همه‌ی نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی سیمان با گل قرمز مشاهده می‌شود. درصد جزیی این جایگزینی (۲/۵ درصد) باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده است. در واقع خاصیت پرکنندگی ذرات گل قرمز به خصوص در سنین پایین باعث متراکم‌تر شدن ماتریس نمونه بتنی شده است. در مقایسه با نتایج تحقیق سایرین نیز می‌توان ۲/۵ درصد جایگزینی سیمان با گل قرمز را به عنوان درصد بهینه جایگزینی در نظر گرفت [۳۱ و ۳۲]. در رابطه با رشد مقاومت نمونه‌ها در سنین بالاتر (۵۶ و ۹۰ روز) نیز می‌توان به شکل ۹ مراجعه نمود. در این شکل، درصد افزایش مقاومت نمونه‌ها در سنین ۵۶ و ۹۰ روز نسبت به ۲۸ روز گزارش شده است. با توجه به نتایج، با افزایش درصد گل قرمز، بر مقاومت نمونه‌ها در سنین بالاتر افزوده می‌شود. این نتیجه با



شکل ۱۰. مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال

Fig. 10. Splitting tensile strength (MPa) at different ages

کششی آن تاثیر می‌گذارند. به طور کلی، مقاومت کششی به یکپارچگی ماتریس مواد و چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه وابسته است. مقاومت پایین خمیر سیمان و اتصال ضعیف سنگدانه‌ها به خمیر سیمان در بتن سخت شده که به دلیل نسبت بالای آب به مواد سیمانی پدید می‌آیند، مقاومت کششی بتن را کاهش می‌دهند. به علاوه، تعداد فضاهای خالی و اندازه‌شان، هوای بین ذرات یا وجود ریزترک‌ها با نسبت آب به سیمان ارتباط دارند و بر مقاومت کششی بتن تاثیر می‌گذارند. معمولاً، نسبت بالای آب به سیمان به تولید بتنی متخلخل می‌انجامد. از سوی دیگر، تاثیر منفی کریستال‌های کلسیم هیدروکسید بر سطح سنگدانه‌ها از ایجاد پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها جلوگیری می‌کند [۳۵]. رشد مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم در سنین بالاتر (۵۶ روز) در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. رانا و همکاران اثر عمل‌آوری درونی گل قرمز را عامل این پدیده می‌دانند [۳۶]. پیش‌تر لاخانی و همکاران به این نتیجه رسیدند که اثر پرکنندگی فرآورده‌های فرعی تولید شده از سنگ‌ها در صورت جایگزینی درصدی از ریزدانه می‌تواند مقاومت کششی بتن را بهبود بخشد [۳۷].

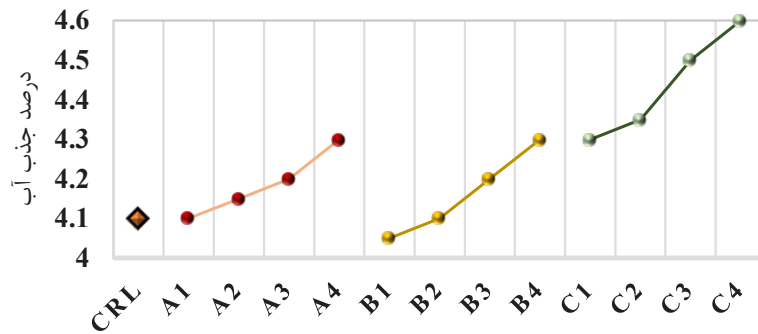
۳-۳- دوام بتن

چنانچه انتخاب مواد، نسبت آب به سیمان و نسبت آب به مواد پودری به گونه‌ای مناسب انجام شود، می‌توان انتظار دوام بهتری از بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی داشت [۵]. هر چند آزمایش‌های برای اندازه‌گیری دوام بتن بسیارند، در این پژوهش تنها به بررسی آزمایش‌های جذب آب، موج فراصوت و دوام در برابر حمله سولفوریک‌اسید پرداخته می‌شود.

و پودر سنگ آهک به عنوان ماده پرکننده از خود نشان دادند. در رابطه با عملکرد بهتر پودر سنگ گرانیت در سنین بالا می‌توان به مقادیر زیاد اکسید سیلیس (SiO_2)، آلومینیوم (Al_2O_3) و آهن (Fe_2O_3) موجود در آن اشاره کرد که باعث ایجاد محصولات هیدراسیون ثانویه می‌شود [۳۳].

مقاومت کششی نمونه‌های بتن خودتراکم در دو سن ۲۸ و ۵۶ روز اندازه‌گیری شد و نتایج در شکل ۱۰ آمده است. در درصد کم جایگزینی سیمان با گل قرمز (۲/۵ درصد) و استفاده از پودر سنگ آهک به عنوان ماده پرکننده، مقاومت کششی بتن نسبت به نمونه کنترلی به ترتیب در ۲۸ و ۵۶ روز با افزایش ۴ و ۸ درصدی مواجه شده است. با عوض کردن ماده پرکننده (پودر سنگ مرمریت و گرانیت) مقاومت کششی نسبت به نمونه کنترلی تقریباً تغییر نمی‌کند. در درصدهای بالاتر جایگزینی گل قرمز در همه‌ی نمونه‌ها مقاومت کششی با کاهش محسوسی روبه‌روست. در نمونه A۴ بیش‌ترین کاهش مقاومت کششی در سنین ۲۸ و ۵۶ روزه دیده می‌شود. در این پژوهش با جایگزینی ۲/۵ درصد گل قرمز به جای سیمان بهترین نتایج از نظر مقاومت کششی نمونه‌ها حاصل شد. همچنین افزایش این درصد جایگزینی تا ۵ درصد تغییری در مقاومت کششی نمونه‌ها ایجاد نمی‌کند. همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد در درصدهای کم جایگزینی گل قرمز، اثر پرکنندگی آن می‌تواند تاثیر مثبتی بر ویژگی مقاومت کششی نمونه‌ها داشته باشد [۳۴].

عوامل زیادی از جمله نوع سنگدانه و نحوه توزیع آن‌ها در بتن، نسبت آب به سیمان، تعداد فضاهای خالی و اندازه‌شان و همچنین پیوستگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها بر مشخصات مکانیکی بتن از جمله مقاومت



شکل ۱۱. مقاومت کششی نمونه‌ها بر حسب مگاپاسکال

Fig. 11. Splitting tensile strength (MPa) at different ages

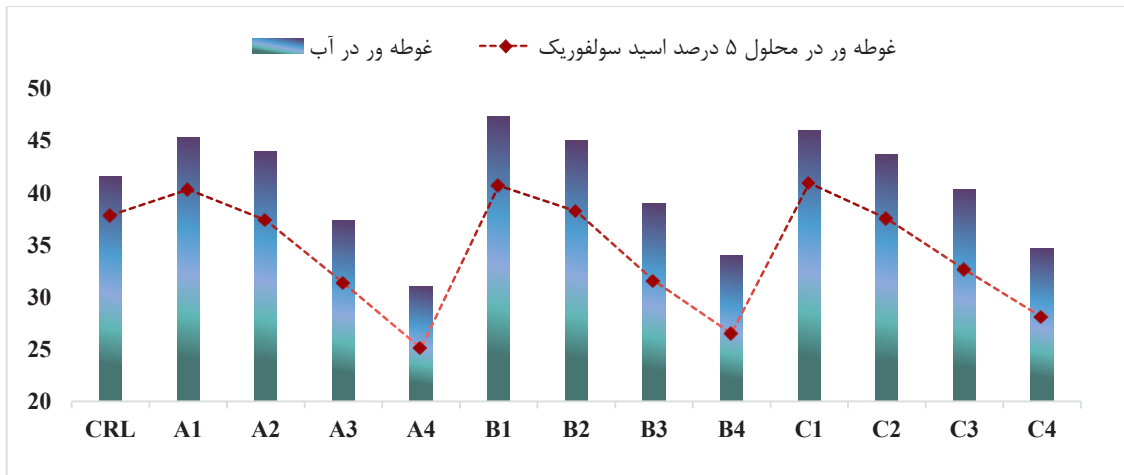
(سولفات کلسیم یا گچ) با اجزای آلومیناتی هیدراته نشده (C_pA) یا کلسیم آلومینوسولفات‌های هیدراته موجود در خمیر سخت شده بتن وارد واکنش شده و اترینگایت را تولید می‌کنند [۳۸]. واکنش‌های تولید گچ و اترینگایت در بتن با افزایش حجم همراه است و سبب ایجاد تنش داخلی در ماتریس بتن می‌شود.

بر اساس استاندارد ASTM-C۲۶۷-۱۲، به منظور ارزیابی نمونه بتنی در برابر حمله مواد شیمیایی می‌توان از تغییرات وزن، مقاومت فشاری و سیمای نمونه‌ها به عنوان معیار ارزیابی بهره برد. در این پژوهش، تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی بتنی پس از ۲۸ روز نگهداری در محیط حاوی ۵ درصد سولفوریک اسید اندازه گرفته شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های خورده شده در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. در بین تمام نمونه‌ها، نمونه کنترلی با ۹ درصد کاهش مقاومت فشاری بالاترین دوام را به خود اختصاص داده است. در حالی که نمونه حاوی ۱۰ درصد گل قرمز جایگزین سیمان و پودر سنگ گرانیته به عنوان ماده پرکننده کمترین مقاومت فشاری را پس از ۲۸ روز نگهداری در محیط سولفاتی از خود نشان می‌دهد. به طور کلی، خواص مواد جایگزین سیمان و پرکننده نظیر دانه‌بندی، شکل و بافت ذرات و همچنین ترکیب شیمیایی آن‌ها بر دوام بتن در برابر محیط‌های خورنده نظیر سولفوریک اسید تاثیر گذارند.

در مقایسه نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک به عنوان فیلر با سایر نمونه‌ها دو مزیت سبب کاهش کمتر مقاومت فشاری در برابر سولفوریک اسید می‌شود. اول وجود ذرات با دانه‌بندی ریزتر که سبب کاهش تخلخل و همچنین نفوذپذیری بتن خودتراکم می‌گردد و در نتیجه ماتریس متراکم‌تری

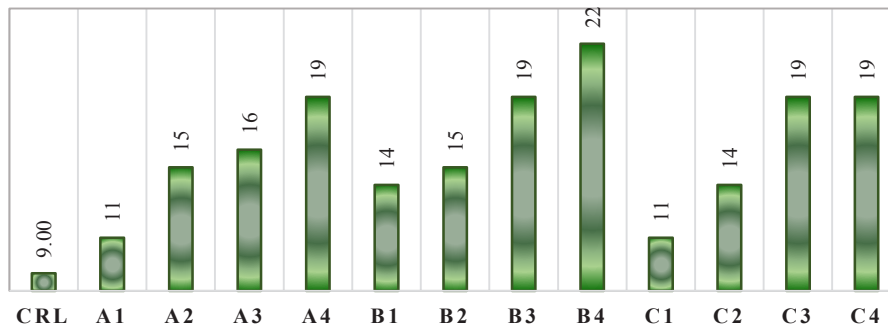
بر اساس استاندارد ASTM C۶۴۲-۱۳ آزمایش جذب آب بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه بدون ترک در لبه‌ها و گوشه‌های نمونه انجام گرفت. نتایج در شکل ۱۱ گزارش شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد استفاده از پودر سنگ گرانیته به جای پودر سنگ آهک به عنوان ماده پرکننده تأثیری بر جذب آب نمونه‌ها ندارد. در حالی که پودر سنگ مرمیت باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شود. از سوی دیگر افزایش درصد جایگزینی گل قرمز نیز باعث افزایش جذب آب نمونه‌ها می‌شود. این روند افزایشی در همه‌ی سری نمونه‌ها با ماده‌های پرکننده متفاوت دیده می‌شود. نمونه C^4 با ۱۰ درصد گل قرمز و پودر سنگ مرمیت به عنوان پرکننده بیش‌ترین میزان جذب آب را با ۴/۶٪ نشان می‌دهد. خاصیت جذب آب بالای در سطح ذرات گل قرمز به دلیل وجود خلل و فرج در سطح آن می‌تواند رابطه مستقیم درصد جذب آب با درصد جایگزینی گل قرمز را توضیح دهد [۲۸]. به طور کلی ریزدانه‌تر بودن گل قرمز نسبت به ذرات سیمان حجم خمیر سیمانی را افزایش داده و در نتیجه سبب ایجاد فاصله بیشتر بین سنگدانه‌ها می‌شود که این خود به تخلخل بیشتر و افزایش درصد جذب آب می‌انجامد. در نهایت، با توجه به نتایج می‌توان از ۲/۵ درصد گل قرمز به جای سیمان در بتن خودتراکم استفاده نمود در صورتی که هیچ تأثیر منفی بر درصد جذب آب نداشته باشد.

خورندگی محیط حاوی اسید سولفوریک (H_2SO_4) برای بتن با سیمان پرتلند معمولی به دلیل ماهیت قلیایی آن بسیار مشکل‌ساز است. اجزای خمیر سیمان هیدراته شده در اثر تماس با اسید سولفوریک شکسته شده و نمک‌های محلول کلسیم در بتن تولید می‌شوند. نمک حاصل از این واکنش



شکل ۱۲. مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه (بر حسب MPa) نمونه‌های غوطه ور در آب و در محلول ۵ درصد سولفوریک اسید

Fig. 12. Compressive strength (MPa) of samples after 28-days acid sulfuric exposure



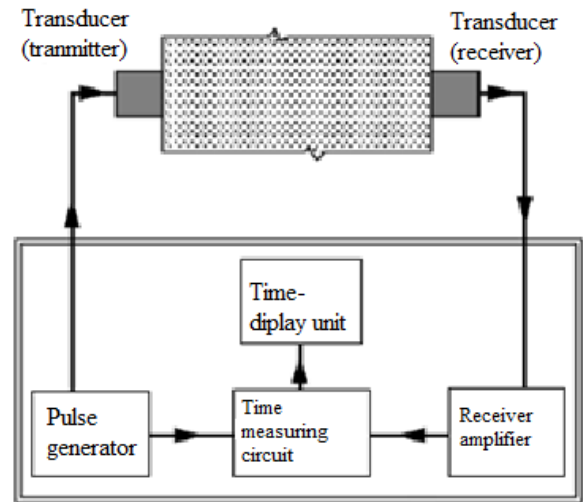
شکل ۱۳. درصد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه در محیط حاوی محلول ۵ درصد سولفوریک اسید

Fig. 13. Percentage of compressive strength reduction after 28-days acid sulfuric exposure

خودتراکم روند مشابه کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی گل قرمز به جای سیمان دیده می‌شود. به طور متوسط در همه طرح‌ها با مواد پرکننده متفاوت، به ازای هر ۲/۵ درصد افزایش جایگزینی گل قرمز، مقاومت فشاری نمونه خورده شده با ۳ تا ۴ درصد کاهش روبه‌رو می‌شود. این پدیده مربوط به ذات متخلخل و سطح مخصوص بزرگ ذرات گل قرمز است که سبب ایجاد فضای خالی در ماتریس بتن برای نفوذ یون‌های سولفور و اسیدها می‌گردد [۴۱].

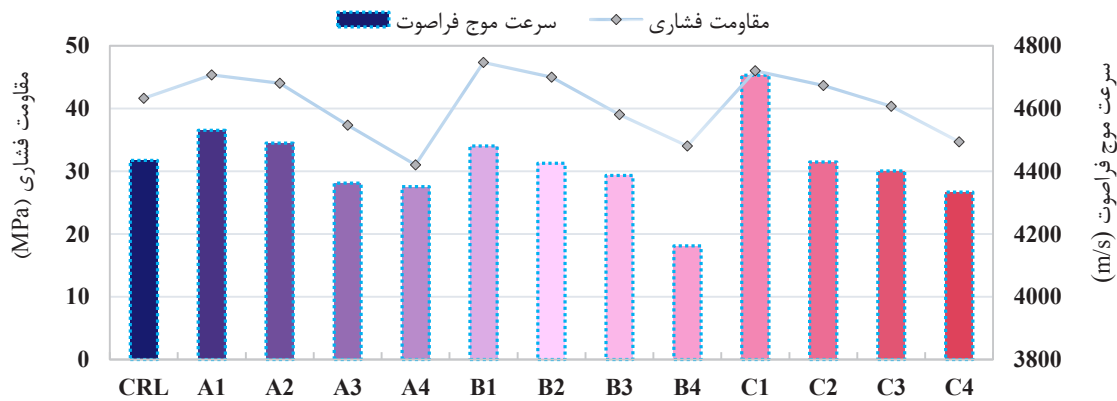
محققان به کمک آزمایش سرعت امواج فراصوت (UPV) می‌کوشند تا

را به وجود می‌آورد [۳۹]. و دوم ایجاد واکنش شیمیایی بین ذرات پودر سنگ آهک و اسید سولفوریک که تا حدی محیط اسیدی بتن را خنثی می‌سازد. مزیت دوم به دلیل وجود کلسیم کربنات در ترکیب پودر سنگ آهک است که سبب افزایش مقاومت بتن خودتراکم در محیط‌های خورنده می‌گردد [۴۰]. به طور مشابه وجود ذرات ریز پودر سنگ مرمر می‌تواند تا حدودی ماتریس بتن را متراکم سازد و دوام بتن در برابر حمله سولفوریک اسید را کنترل نماید. در شکل ۱۳ مشخص است با افزایش درصد به کار بردن گل قرمز، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. در همه طرح‌های اختلاط بتن



شکل ۱۴. آزمایش سرعت موج فراصوت نمونه بتنی

Fig. 14. Ultrasonic pulse velocity (UPV) test equipment



شکل ۱۵. سرعت موج فراصوت و مقاومت فشاری برای همه نمونه‌ها

Fig. 15. UPV and compressive strength of different SCC samples

پس از عبور امواج از نمونه بتنی، این امواج به انرژی الکتریکی تبدیل شده و توسط مبدل دریافت کننده در سر دیگر نمونه ثبت می‌شود. با داشتن زمان انتقال (T) و همچنین طول نمونه (L) استوانه‌ای می‌توان سرعت موج فراصوت (V) در نمونه بتنی را محاسبه نمود [۴۳]. نتایج آزمایش سرعت موج فراصوت به همراه مقاومت فشاری متناظر نمونه‌ها در شکل ۱۵ آمده است. هر چه میزان جایگزینی گل قرمز با سیمان افزایش می‌یابد، سرعت موج فراصوت کاهش می‌یابد. با توجه به پژوهش انجام شده توسط تورکمن، وجود زئولیت در طرح اختلاط بتن خودتراکم

مشخصات مکانیکی مواد با پایه سیمانی را از طریق ارزیابی همگنی ماتریس ماده و همچنین مشخص نمودن حفره‌ها، ترک‌ها و سایر ناهنجاری‌های نمونه اندازه‌گیری کنند. مطالعات نشان می‌دهد که سرعت موج فراصوت در نمونه بتنی به نوع و میزان مواد سیمانی و سنگدانه‌ها، میزان فوق روان کننده و نسبت آب به مواد سیمانی، رطوبت اولیه و سن نمونه وابسته است [۴۲]. بر اساس آنچه در استاندارد ASTM-C597-16 آمده است و در شکل ۱۴ مشخص است، در این آزمایش، موج طولی توسط مبدل الکترو-آکوستیک متصل به یک سر نمونه استوانه‌ای- تولید شده و در نمونه جریان می‌یابد.

کنترلی با کاهش محسوس همراه است. در ضمن باید به خاطر داشت که خاصیت عمل‌آوری درونی گل قرمز می‌تواند در سنین بالا سبب افزایش مقاومت نمونه شود.

۳- جایگزین نمودن پودر سنگ آهک با پودر سنگ گرانیت و مرمیت در خواص دوام بتن تغییر زیادی را ایجاد نمی‌کند. از نقطه نظر زیست‌محیطی می‌توان به جای دفن این ضایعات آن‌ها را به عنوان مواد پودری در بتن استفاده نمود. استفاده از ۱۰ درصد گل قرمز به جای سیمان درصد جذب آب را تا حدود ۰/۳ درصد افزایش می‌دهد و همچنین مقاومت فشاری بتن در محیط خورنده را تا ۱۰ درصد بیش از نمونه کنترلی کاهش می‌دهد. روند تغییرات سرعت موج فراصوت در نمونه بتن خودتراکم تقریباً مشابه روند تغییرات مقاومت فشاری است. اختلاف بین کمترین و بیش‌ترین سرعت موج فراصوت در نمونه‌های حاوی پودر سنگ مرمیت و گرانیت مشاهده می‌شود که حدود ۱۲ درصد است. در نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک این اختلاف به ۴ درصد می‌رسد.

منابع

- [1] M. Ghalehnovi, N. Roshan, E. Hakak, E.A. Shamsabadi, J. de Brito, Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers, *Journal of Cleaner Production*, 240 (2019) 118213.
- [2] J. Brito, R. Silva, Use of waste materials in the production of concrete, in: *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publ, 2015, pp. 85-96.
- [3] A. Khodabakhshian, J. De Brito, M. Ghalehnovi, E.A. Shamsabadi, Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder, *Construction and Building Materials*, 169 (2018) 237-251.
- [4] P. Chandru, C. Natarajan, J. Karthikeyan, Influence of sustainable materials in strength and durability of self-compacting concrete: a review, *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(1) (2018) 8.
- [5] C. BIBM, E. ERMCO, EFNARC (2005) *The European guidelines for self-compacting concrete, Specification, Production and Use*.
- [6] M. Ghalehnovi, E.A. Shamsabadi, A. Khodabakhshian,

سبب کاهش سرعت موج فراصوت می‌شود [۴۴]. این یافته با در نظر گرفتن مقادیر فراوان ژئولیت موجود در گل قرمز می‌تواند روند کاهش محسوس سرعت موج فراصوت را تبیین نماید [۲۸]. در واقع، ژئولیت با کاهش گرمای هیدراتاسیون بتن سبب کاهش سرعت موج فراصوت در نمونه بتنی حاوی گل قرمز می‌شود. با جایگزینی پودر سنگ مرمیت و گرانیت به جای ماده پرکننده تغییر قابل ملاحظه‌ای در سرعت موج فراصوت مشاهده نمی‌شود. در هر صورت اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار سرعت موج فراصوت حدود ۱۲ درصد است و نمونه C۱ با ۲/۵ درصد جایگزینی گل قرمز و پودر سنگ مرمیت به عنوان ماده پرکننده بیشینه سرعت موج فراصوت را با مقدار ۴۷۰۰ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در مقابل نمونه B۴ با ۱۰ درصد گل قرمز جایگزین سیمان و پودر سنگ گرانیت کمترین سرعت موج فراصوت را گزارش می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به منظور یافتن درصد بهینه جایگزینی سیمان با گل قرمز در طرح اختلاط بتن خودتراکم و همچنین بررسی امکان جایگزینی ماده پرکننده معمول (پودر سنگ آهک) با پودر سنگ مرمیت و گرانیت (حاصل از ضایعات کارخانجات سنگ‌بری) آزمایش‌های کارایی، مقاومت فشاری و کششی و دوام بتن انجام شد. استفاده از ضایعات پودری مانند پودر سنگ و همچنین گل قرمز، نیاز به فوق روان کننده را در ترکیب بتن خودتراکم افزایش می‌دهد. از سویی جایگزینی ۲/۵ درصد سیمان با گل قرمز مشخصات مکانیکی بتن را افزایش می‌دهد و تا ۵ درصد جایگزینی مقاومت فشاری و کششی برابر با طرح اختلاط کنترلی را به دست می‌دهد. دوام بتن نیز با جایگزینی محدود سیمان و ماده پرکننده دستخوش تغییر محسوس نمی‌شود. خلاصه‌ای از نتایج این پژوهش در ادامه می‌آید:

- ۱- در آزمایش‌های اسلامپ و T_{500} با افزایش درصد جایگزینی گل قرمز و ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان (۰/۴۶) و میزان فوق روان کننده (۷ کیلوگرم در هر متر مکعب)، به ترتیب کاهش و افزایش مشاهده می‌شود. در حالی که گردش‌کردن ذرات مرمیت سبب افزایش کارایی بتن می‌شوند، ذرات تیز گوشه و ناهموار پودر سنگ گرانیت کارایی را کاهش می‌دهند. نتایج آزمایش‌های جعبه L و قیف V شکل نیز روند مشابهی را گزارش می‌کنند.
- ۲- از نظر مشخصات مکانیکی، استفاده از گل قرمز خام به عنوان جایگزین سیمان بایستی محدود گردد، زیرا با افزایش این درصد جایگزینی (بیش از ۵ درصد) مقاومت فشاری و کششی بتن خودتراکم نسبت به طرح

- [16] B. Varun, B. Harish, Y.B. Etigi, K.K. HS, B. Hanumesh, Effect of Red Mud and Silica Fume on Cement Concrete in the Fresh and Hardened State.
- [17] S. Pateliya, C. Solanki, Experimental studies on concrete utilizing red mud as a partial Replacement of cement, International journal of advance research and Innovative Ideas in Education, 3 (2017) 5408-5415.
- [18] V. Corinaldesi, G. Moriconi, T.R. Naik, Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete, Construction and Building Materials, 24(1) (2010) 113-117.
- [19] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, H. Kaplan, Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, Journal of materials processing technology, 208(1) (2008) 299-308.
- [20] A. Khodabakhshian, M. Ghalehnovi, J. De Brito, E.A. Shamsabadi, Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder, Journal of cleaner production, 170 (2018) 42-60.
- [21] S. Singh, R. Nagar, V. Agrawal, A. Rana, A. Tiwari, Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete, Journal of Cleaner Production, 116 (2016) 223-235.
- [22] T. Felixkala, P. Partheeban, Granite powder concrete, Indian Journal of science and Technology, 3(3) (2010) 311-317.
- [23] M. Allam, E. Bakhom, G. Garas, Re-use of granite sludge in producing green concrete, ARPN J Eng Appl Sci, 9(12) (2014) 2731-2737.
- [24] S. Singh, S. Khan, R. Khandelwal, A. Chugh, R. Nagar, Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste, Journal of Cleaner Production, 119 (2016) 86-98.
- [25] W. Tang, Z. Wang, Y. Liu, H. Cui, Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete, Construction and Building Materials, 178 (2018) 288-300.
- [26] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, Cement and F. Sourmeh, J. de Brito, Self-compacting architectural concrete production using red mud, Construction and Building Materials, 226 (2019) 418-427.
- [7] M. Khairul, J. Zanganeh, B. Moghtaderi, The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud, Resources, Conservation and Recycling, 141 (2019) 483-498.
- [8] J. Maroušek, V. Stehel, M. Vochozka, L. Kolář, A. Maroušková, O. Strunecký, J. Peterka, M. Kopecký, S. Shreedhar, Ferrous sludge from water clarification: Changes in waste management practices advisable, Journal of Cleaner Production, 218 (2019) 459-464.
- [9] M. Abdel-Raheem, L.M.G. Santana, M.A.P. Cordava, B. Olazaran, Martínez, Uses of Red Mud as a Construction Material, in: AEI 2017, 2017, pp. 388-399.
- [10] A. Sawant, M. Kumthekar, V. Diwan, K. Hiraskar, Experimental study on Partial replacement of cement by neutralized red mud in concrete, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2(1) (2012) 282-286.
- [11] E.P. Manfroi, M. Cheriaf, J.C. Rocha, Pozzolanic Reaction Effects of Red Mud on Hygrothermal and Microstructural Properties of Cementitious Composites, in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 2014, pp. 319-328.
- [12] L. Senff, R. Modolo, A.S. Silva, V. Ferreira, D. Hotza, J. Labrincha, Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars, Construction and Building Materials, 65 (2014) 84-91.
- [13] P. Ashok, M. Sureshkumar, Experimental studies on concrete utilising red mud as a partial replacement of cement with hydrated lime, J. Mech. Civil Eng, (2014) 1-10.
- [14] R.R. Raja, E.P. Pillaib, A. Santhakumarc, Effective utilization of redmud bauxite waste as a re-placement of cement in concrete for environmental conservation.
- [15] C. Venkatesh, R. Nerella, M.S.R. Chand, Comparison of mechanical and durability properties of treated and untreated red mud concrete, Materials Today: Proceedings, (2019).

- marble slurry in concrete, *Journal of Cleaner Production*, 94 (2015) 304-311.
- [37] R. Lakhani, R. Kumar, P. Tomar, Utilization of Stone Waste in the Development of Value Added Products: A State of the Art Review, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 7(3) (2014) 180-187.
- [38] m. amiri, P. tanideh, Microstructural Assessment of the Effect of Sulfate Environments on the Mechanical Properties of Concrete, *Modares Civil Engineering journal*, 19(6) (2020) 0-0.
- [39] O. Cizer, J. Elsen, D. Feys, G. Heirman, L. Vandewalle, D. Van Gemert, G. De Schutter, B. Desmet, J. Vantomme, Microstructural changes in self-compacting concrete by sulphuric acid attack, in: *Proceeding of the 13th ICCI International Congress on the Chemistry of Cement*, 2011, pp. 1-7.
- [40] M. Bassuoni, M. Nehdi, M. Amin, Self-compacting concrete: using limestone to resist sulfuric acid, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Construction Materials*, 160(3) (2007) 113-123.
- [41] J. Choudhary, B. Kumar, A. Gupta, Application of waste materials as fillers in bituminous mixes, *Waste management*, 78 (2018) 417-425.
- [42] R. Kurda, J.d. Brito, J.D. Silvestre, Indirect evaluation of the compressive strength of recycled aggregate concrete with high fly ash ratios, *Magazine of Concrete Research*, 70(4) (2018) 204-216.
- [43] ASTM, ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, in: *ASTM international*, West Conshohocken, PA, 2016.
- [44] I. Türkmen, A. Öz, A.C. Aydin, Characteristics of workability, strength, and ultrasonic pulse velocity of SCC containing zeolite and slag, *Scientific Research and Essays*, 5(15) (2010) 2055-2064.
- Concrete Composites, 32(2) (2010) 134-141.
- [27] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M.E. Kocabağ, V. Bayram, 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*, 37 (2012) 160-170.
- [28] R.-X. Liu, C.-S. Poon, Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 384-391.
- [29] K. Ozawa, N. Sakata, H. Okamura, Evaluation of self-compactability of fresh concrete using the funnel test, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1994(490) (1994) 61-70.
- [30] D.M. Sadek, M.M. El-Attar, H.A. Ali, Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development, *Journal of Cleaner Production*, 121 (2016) 19-32.
- [31] M. Kushwaha, S. Akhtar, S. Rajout, Development of the Self Compacting Concrete By Industrial Waste (Red Mud), *Cement and Concrete*, 3 (2013) 539-542.
- [32] K.K. Shetty, G. Nayak, R. Shetty, Self compacting concrete using red mud and used foundry sand, *Int. J. Res. Eng. Tech.*, (2014) 708-711.
- [33] E. Asadi Shamsabadi, M. Ghalehnovi, J. De Brito, A. Khodabakhshian, Performance of Concrete with Waste Granite Powder: The Effect of Superplasticizers, *Applied Sciences*, 8(10) (2018) 1808.
- [34] A.A. Aliabdo, A.E.M.A. Elmoaty, E.M. Auda, Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete, *Construction and building materials*, 50 (2014) 28-41.
- [35] H. Reinhardt, Factors affecting the tensile properties of concrete, in: *Understanding the Tensile Properties of Concrete*, Elsevier, 2013, pp. 19-51.
- [36] A. Rana, P. Kalla, L.J. Csetenyi, Sustainable use of

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Ghalehnovi, N. Roshan, M. Rakhshani Mehr, *Workability, mechanical properties and durability of self-compacting concrete containing red mud, and granite and marble waste powder*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(2) (2022) 379-394.

DOI: 10.22060/ceej.2021.18802.6972

