



تثبیت پسماند خاک سنگ آهک در بتن خودتراکم و اثر آن بر خواص کارایی، مکانیکی و دوام

محمدامین حامدی راد^۱، سیدسجاد میروند^{۲*}، مسعود عطاریان^۳، محمدابراهیم کیانی فر^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
^۳ کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک دانشگاه سمنان، مسئول آزمایشگاه دوام بتن شرکت ژیکاوا
^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد محیط زیست دانشگاه خاوران، مسئول آزمایشگاه بتن شرکت ژیکاوا

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۰۱
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۱۱
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۳-۲۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۳-۲۷

کلمات کلیدی:

خاک سنگ آهک
پسماند
بتن خودتراکم
دوام
توسعه پایدار

خلاصه: خاک سنگ آهک پسماندی است که در نتیجه خرد کردن سنگ‌های آهکی جهت تولید سنگدانه مصرفی در بتن بوجود می‌آید. وجود این ماده زائد در طبیعت موجب به وجود آمدن مشکلات گوناگون زیست محیطی می‌گردد. پژوهش حاضر به منظور تثبیت این پسماند در بتن خودتراکم و بررسی اثر آن بر خواص کارایی، مکانیکی و دوام صورت پذیرفته است. بدین منظور ۹ طرح مخلوط حاوی درصدهای جایگزینی مختلفی از خاک سنگ آهک و بدون آن در انواع مواد سیمانی حاوی و فاقد میکروسیلیس مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته اند. برای بررسی خواص مکانیکی از آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم و برای بررسی خواص دوام، آزمایش‌های نفوذ یون کلراید (RCPT) و تخلخل باز بر روی نمونه‌های حاوی خاک سنگ آهک و همچنین نمونه شاهد فاقد آن انجام شد. خواص کارایی بتن‌های خودتراکم نیز با انجام آزمایش‌های جعبه (L-Box) و جریان اسلامپ (Slump Flow) سنجیده شدند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی درصد بهینه ای (حدوداً ۱۰) از خاک سنگ آهک دارای خواص کارایی، مکانیکی و دوامی بهتری نسبت به نمونه شاهد می‌باشند. در نتیجه با مصرف خاک سنگ آهک به عنوان یک نوع ماده پسماند در بتن‌های خودتراکم، علاوه بر بهبود خواص کارایی، مکانیکی و دوام، می‌توان در راستای تأمین اهداف توسعه پایدار و حفظ محیط زیست گام برداشت.

۱- مقدمه و تاریخچه پژوهش

۱-۱- مقدمه

هم شناخته می‌شود [۷]. بتن، یک نوع مصالح ساختمانی متشکل از سنگدانه طبیعی، آب، سیمان و مواد افزودنی می‌باشد. سنگدانه‌های طبیعی از استخراج معادن و رودخانه‌های طبیعی بدست می‌آیند. افزایش استخراج مصالح طبیعی از رودخانه‌ها افزایش مشکلات زیست محیطی را به دنبال خواهد داشت. از جمله این مشکلات می‌توان به از دست رفتن لایه نگهدارنده آب در رودخانه‌ها، افزایش عمق رودخانه‌ها و لغزش کناره‌های رودخانه، از بین رفتن پوشش گیاهی رودخانه، مشکلات طرح‌های آبرسانی به جهت کاهش سطح آب زیر زمینی و به مخاطره انداختن زندگی در مناطق ساحلی اشاره نمود [۸]. تولید سیمان نیز نیازمند مصرف انرژی زیادی است که با تولید

امروزه یکی از مهمترین چالش‌ها در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، بحث محیط زیست و دفع مواد پسماند می‌باشد و این مسئله همواره یکی از نگرانی‌ها برای دولت‌ها بوده و برای این منظور قوانین مختلفی مصوب گردیده است چرا که دفع مستقیم این مواد در طبیعت، بر روی محیط زیست اثرات منفی خواهد گذاشت [۱-۶]. یکی از راه‌های دفع این مواد پسماند، استفاده از آن‌ها در تولید محصولات دیگر است که در ادبیات پژوهشی به عنوان تثبیت مواد زائد

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mirvalad@iust.ac.ir



باشد [۱۸]. برخی از محققین عملکرد پودر سنگ آهک^۳ (با حداکثر اندازه اسمی ۰/۰۷۵ میلیمتر) را به عنوان مواد جایگزین سیمان در بتن بررسی کرده اند، حال آن که ماده پسماند خاک سنگ آهک دارای حداکثر اندازه اسمی بیش از این مقدار بوده و باتوجه به اندازه بزرگتر آن نسبت به مواد جایگزین سیمان همانند خاکستر بادی^۴ نمیتوان آن را یک ماده جایگزین مواد سیمانی دانست، بلکه بایستی آن را جایگزین مصالح سنگی ریزدانه نظیر ماسه در نظر گرفت [۹]. بنابر این وجه تمایز پودر سنگ آهک و خاک سنگ آهک در حداکثر اندازه اسمی دانه های آن ها است.

۱-۲- مرور پژوهش های پیشین

پژوهش های مختلفی به منظور بررسی اثر خاک سنگ آهک بر بتن انجام شده است. در پژوهشی که توسط مالپهترا^۵ و کاراتی^۶ در سال ۱۹۸۵ [۲] انجام شد، به بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن های معمولی حاوی خاک سنگ پرداخته شده است. در این پژوهش سه سری از انواع مخلوطها حاوی درصدهای مختلفی از خاک سنگ، از ۵ الی ۲۰ درصد به صورت جایگزین ریزدانه و با نسبت های آب به سیمان ۰/۴، ۰/۵۳ و ۰/۷ ساخته شدند. اسلامپ تمامی مخلوط های ساخته شده در محدوده ۶۰ الی ۹۰ میلی متر بوده است. بتن سخت شده حاصل از این مخلوطها تحت آزمایش های مقاومت فشاری و آزمایش چرخه ذوب و یخبندان برای سنجش خواص دوامی بتن و همچنین آزمایش انقباض برای سنجش خواص پایداری ابعادی قرار گرفت. در نتیجه این آزمایش ها مشاهده شد که با افزایش مقدار خاک سنگ، میزان جمع شدگی افزایش یافت. همچنین، این گونه نتیجه شد که افزایش خاک سنگ تا ۱۰ درصد حجمی برای نسبت آب به سیمان ۰/۷ و همچنین افزایش تا ۵ درصد حجمی برای نسبت آب به سیمان ۰/۵۳ اثر قابل توجهی بر خواص بتن تازه و سخت شده نداشت. در مجموع این گونه نتیجه گیری شد که استفاده از خاک سنگ منجر به بهبود همگنی در بتن تازه گردیده است.

در پژوهش دبگری که توسط شین و همکاران^۷ در سال ۲۰۰۲ [۱] انجام شد، به بررسی اثر خاک سنگ بر خواص کارائی بتن خودتراکم

حجم زیادی گاز دی اکسید کربن همراه می باشد. از آنجا که توسعه صنعت ساخت و ساز به دلیل افزایش جمعیت هر روز در حال افزایش است، استفاده از مصالح پسماند بجای مصالح سنگی طبیعی و سیمان در بتن می تواند منجر به کاهش تقاضای مصالح طبیعی و سیمان و دفع مواد و مصالح پسماند شده و در نتیجه موجب کاهش تخریب محیط زیست گردد [۶]. یکی از محصولات پسماند ناشی از خرد کردن سنگ های آهکی در معادن سنگ جهت تولید سنگدانه مصرفی در بتن، خاک سنگ آهک^۱ می باشد [۹]. میزان این ماده پسماند معمولاً کمتر از ۱ درصد جرم کل شن و ماسه تولیدی در معادن است ولی این ماده پسماند به دلیل ریزدانه بودن، می تواند با وقوع بادهای شدید و طوفان در هوا پخش شده و منجر به آلودگی محیط زیست شود [۹] و به علاوه، تنفس هوای حاوی این گرد و غبار می تواند سرطان زا باشد [۱۰]. همچنین، در فرآیند فرآوری سنگ های آهکی، عملیات فرآوری سنگ آهک منجر به تولید خاک سنگ آهک می گردد که میزان این ماده پسماند را بیشتر می کند. میزان خاک سنگ آهک در کشور انگلیس ۲۱/۲ میلیون تن، یونان ۱۸ میلیون تن و ترکیه حدود ۳۰ میلیون تن برآورد گردیده است که میزان قابل توجهی می باشد [۱۱]. دفع این میزان مواد پسماند در طبیعت مشکلات زیست محیطی را در بر خواهد داشت و لذا استفاده از آن در بتن می تواند راهکاری در راستای توسعه پایدار باشد [۱۲، ۱۳]. با در نظر گرفتن کاهش هزینه های دفع مواد پسماند، استفاده از این مواد علاوه بر توجیه زیست محیطی، توجیه اقتصادی نیز خواهد داشت [۱۴، ۱۵]. بنابر این مصرف مصالح پسماند خاک سنگ آهک به صورت جایگزین سنگدانه در بتن منجر به کاهش تقاضا برای تولید و استخراج مصالح طبیعی شده و در نتیجه منجر به کاهش مصرف انرژی، کاهش تولید آلاینده های زیست محیطی و کاهش خسارات وارده به محیط زیست می شود [۱۶]. همچنین استفاده از مواد پوزولانی نظیر میکروسیلیس، بجای سیمان در بتن، می تواند منجر به کاهش تقاضای مصرف سیمان و در نتیجه منجر به کاهش تولید دی اکسید کربن گردد [۱۷].

گزارش نهایی موسسه رایلم^۲ در مورد دوام بتن های خود تراکم به این موضوع اشاره دارد که پودر یا فیلر به سیمان و مواد جایگزین آن گفته می شود که حداکثر اندازه آنها به ۰/۰۷۵ میلیمتر محدود شده

3 Limestone Powder
4 Fly Ash
5 Malhotra
6 Carette
7 Sheinn Et Al.

1 Limestone Dust
2 RILEM

در پژوهش دیگری که توسط ناگپال و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۳ [۸] انجام شد، به بررسی اثر خاک سنگ آهک بر خواص مکانیکی و دوام بتن و همچنین خواص پایداری ابعادی پرداخته شد. بدین منظور مخلوط‌هایی حاوی درصد‌های مختلف جایگزینی خاک سنگ ساخته شدند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت کششی به منظور ارزیابی خواص مکانیکی و آزمایش مقاومت در برابر سولفات و اسید برای ارزیابی خواص دوام بر روی این مخلوط‌ها انجام شد. همچنین، میزان جمع شدگی این بتن‌ها اندازه‌گیری شد. مقایسه نتایج این آزمایش‌ها با بتن معمولی فاقد خاک سنگ، حاکی از بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن و افزایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن در کوتاه مدت در اثر استفاده از خاک سنگ آهک بوده است.

تاکنون به پژوهش‌های مرتبط با اثر خاک سنگ بر بتن‌ها پرداخته شده است. خاک سنگ همچنین می‌تواند در تولید کامپوزیت‌های سیمانی دیگر استفاده شود. در پژوهشی، به بررسی پتانسیل استفاده از ضایعات خاک سنگ و پودر خاک اره چوب در تولید کامپوزیت‌های سیمانی با چگالی کم پرداخته شده است. بدین منظور مخلوط‌های سیمانی حاوی درصد‌های مختلفی از خاک سنگ و پودر خاک اره چوب با میزان آب یکسان ساخته شد. پس از مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف خواص مکانیکی، مشاهده شد که استفاده از این دو ماده پسماند می‌تواند منجر به تولید یک کامپوزیت سبک وزن گردد [۳،۴].

علاوه بر پسماند سنگ آهک، پرداخت و شکستن سنگ‌های دیگر نظیر مرمر و گرانیت نیز مواد پسماندی تولید می‌کند که می‌توانند همانند پسماند سنگ آهک یا همان خاک سنگ آهک در بتن مورد استفاده قرار گیرد. در همین رابطه در پژوهشی که در سال ۲۰۱۵ توسط محسن تنیک و همکاران^۵ انجام شد [۱۹] به بررسی و مقایسه اثر استفاده از مواد پسماند کارخانه‌های سنگ آهک، مرمر و کاشی به عنوان مواد جایگزین مصالح سنگی بر خواص کارایی و خواص مکانیکی پرداخته شد. برای این منظور مخلوط‌های بتن خودتراکمی حاوی مقادیر مختلفی از این مواد پسماند به صورت تک یا گروهی ساخته شد و مورد انجام آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده قرار گرفت. در این پژوهش برای سنجش خواص کارایی از آزمایش‌های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L و آزمایش سنجش پایداری بتن با الک

پرداخته شده است. هدف این پژوهش بررسی و ارزیابی اثر استفاده از خاک سنگ آهکی به عنوان یک ماده پسماند بر خواص کارایی بتن‌های خودتراکم بوده است. به همین منظور مخلوط‌های مختلف بتن حاوی درصد‌های مختلف خاک سنگ ساخته شد. بر روی هر یک از این مخلوط‌های بتن خودتراکم، آزمایش‌های خواص کارایی شامل جریان اسلامپ^۱، نرخ جریان، جعبه L^۲ و همچنین خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه، انجام شد. با مقایسه نتایج آزمایش‌ها بر روی مخلوط‌های تولید شده، این گونه دریافت شد که با افزایش میزان درصد حجمی خاک سنگ جایگزین ریز دانه، میزان مواد افزودنی فوق‌روان کننده برای رسیدن به یک جریان اسلامپ ثابت افزایش خواهد یافت. در این پژوهش، به بررسی خواص دوام بتن‌های خودتراکم حاوی خاک سنگ پرداخته نشده است.

در مقاله دیگری در همین راستا که توسط بینیسی و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۷ [۶] منتشر گردیده، به بررسی اثر خاک سنگ آهک و مرمر به عنوان مصالح جایگزین ریزدانه در بتن، بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداخته شده است. برای این منظور ۷ طرح مخلوط حاوی درصد‌های مختلفی از خاک سنگ ساخته شد. خاک سنگ آهک و مرمر در سه میزان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی ریزدانه در بتن حاوی ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب استفاده شدند. برای سنجش خواص مکانیکی این مخلوط‌ها آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۰ روز و مقاومت در برابر سایش انجام شد. همچنین برای ارزیابی دوام مخلوط‌های بتنی، مقاومت فشاری نمونه‌هایی که به مدت ۱۲ ماه در محلول سولفات سدیم قرار گرفته بودند، اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن برای ارزیابی بیشتر دوام این مخلوط‌های حاوی خاک سنگ، آزمایش عمق نفوذ آب انجام گردید. نتایج این پژوهش نشان داد در مخلوط‌های حاوی خاک سنگ خواص کارایی، مکانیکی و دوام بهبود یافته است. بکارگیری خاک سنگ موجب افزایش مقاومت فشاری در سنین بیش از ۲۸ روز شد و مقاومت سایشی و مقاومت در برابر محلول حاوی سولفات سدیم نیز افزایش یافت. همچنین میزان عمق نفوذ آب در مخلوط‌های حاوی خاک سنگ کاهش یافت. در این پژوهش نتایج حاکی از اثر بیشتر خاک سنگ مرمر بر بهبود خواص مکانیکی و دوام نسبت به خاک سنگ آهک بوده است.

4 Nagpal Et Al.

5 Mohsen Tennich Et Al.

1 Slump Flow

2 L-Box

3 Binici Et Al.

و ۴/۳ درصد بهبود یافته است.

۱-۳- اهمیت موضوع

مطابق آنچه گفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که مصالح ریز دانه نقش مهمی در خواص کارایی، مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی دارند و استفاده از خاک سنگ آهک، به عنوان یک ماده پسماند جایگزین مصالح سنگی ریزدانه منجر به تغییر خواص کارایی، مکانیکی و دوام در آن‌ها می‌گردد. باتوجه به مرور تحقیقات پیشین، اگرچه اثر پسماند خاک سنگ آهک بر خواص دوام بتن‌های معمولی سنجیده شده ولی تاکنون پژوهشی به منظور بررسی اثر این ماده بر خواص دوام بتن‌های خودتراکم انجام نشده است. از آن جا که کاربرد این ماده در بتن خودتراکم منجر به تغییر رفتار رئولوژیکی و در نتیجه تغییر خواص مکانیکی گردیده است [۱]، اثر این ماده بر روی خواص دوامی بتن خودتراکم نیز لازم است که بررسی شود. از طرفی باتوجه به این که خاک سنگ آهک از اکسید کلسیم (CaO) تشکیل شده و پس از ترکیب با آب در بتن، تشکیل کلسیم هیدروکسید $(Ca(OH)_2)$ یا همان آهک آزاد را خواهد داد، ممکن است در فرآیند واکنش مواد پوزولانی با آهک آزاد حاصل از هیدراسیون سیمان بهبودی حاصل شده و خواص مکانیکی و دوام بتن حاوی پوزولان باتوجه به افزایش آهک آزاد ناشی از کاربرد خاک سنگ آهک در بتن تغییر یابد. بنابر این، در این پژوهش خواص کارایی، مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراکم حاوی درصد‌های مختلف خاک سنگ آهک جایگزین مصالح سنگی ریزدانه در ۳ نوع ترکیب مواد سیمانی حاوی درصد‌های مختلف جایگزینی میکروسیلیس بجای سیمان سنجیده خواهد شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

جهت بررسی و مقایسه اثر خاک سنگ آهک جایگزین مصالح سنگی ریزدانه و میکروسیلیس جایگزین سیمان، در تمامی طرح‌های مخلوط از یک نوع مواد سیمانی و مصالح سنگی استفاده شده است. مجموع مواد سیمانی در تمامی طرح‌های مخلوط ثابت و معادل ۴۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب بوده که شامل سیمان پرتلند معمولی تیپ ۴۲۵-۱ کارخانه سیمان بجنورد ایران و میکروسیلیس شرکت

استفاده شده است و برای سنجش خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز از آزمایش غیر مخرب اولتراسونیک بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده استفاده شده است. نتایج این پژوهش حاکی از بهبود خواص کارایی بتن‌های خودتراکم در اثر استفاده از پسماند‌های مختلف بوده است. این نتایج همچنین نشان داد، اگرچه استفاده از پسماند‌های سنگ مرمر و گرانیت منجر به بهبود خواص مکانیکی در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی شده است، این اثر همچنان کمتر از میزان بهبود ایجاد شده توسط پسماند پودر سنگ آهک بوده است و این به دلیل ریز تر بودن پودر سنگ آهک نسبت به پسماند‌های دیگر عنوان شده است. در پژوهش دیگری که توسط همین فرد و همکاران در سال ۲۰۱۷ برای بررسی و مقایسه اثر استفاده از همین مواد پسماند بر خواص دوام بتن‌های خودتراکم در محیط‌های مهاجم سولفاتی پرداخته شد [۲۰]، نمونه‌های بتنی حاوی درصد‌های مختلفی از مواد پسماند، در محلول‌های سولفاتی مختلف قرار داده شدند. نمونه‌ها در محلول‌های سولفاتی آب دریا، سولفات سدیم و محلول شاهد آب شرب به مدت ۲۰ ماه قرار داده شده و مدول دینامیکی الاستیک آن‌ها در فواصل زمانی هر ۲ ماه به وسیله دستگاه اولتراسونیک مورد سنجش قرار گرفته است. علاوه بر آن تغییرات جرمی آن‌ها نیز ثبت شده است. نتایج این پژوهش حاکی از بهبود خواص دوامی مخلوط‌های حاوی پسماند‌های مختلف در مقایسه با بتن معمولی بوده است و بیشترین مقاومت در مخلوط حاوی پسماند سنگ مرمر مشاهده شده است. علت این امر پر شدن حفرات بتن توسط این پسماند‌ها و کاهش نفوذ پذیری آن اشاره شده است.

در پژوهش دیگری که توسط بیسمارک مسیح و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۸ انجام شد [۲۱]، به بررسی اثر جایگزینی خاک سنگ گرانیت بجای سنگدانه ریز بر مقاومت خمشی بتن پرداخته شده است. برای این منظور از مخلوط‌های حاوی ۰، ۲۵ و ۱۰۰ درصد جایگزینی پسماند سنگ گرانیت بجای ریزدانه، نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۰۰ در ۱۰۰ در ۵۰۰ میلی‌متر گرفته شده و در سن ۲۸ روزه مورد انجام آزمایش مقاومت خمشی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش حاکی از آن بوده است که در درصد‌های جایگزینی ۲۵ و ۱۰۰ درصد خاک سنگ گرانیت بجای ماسه در بتن، مقاومت خمشی به ترتیب ۲

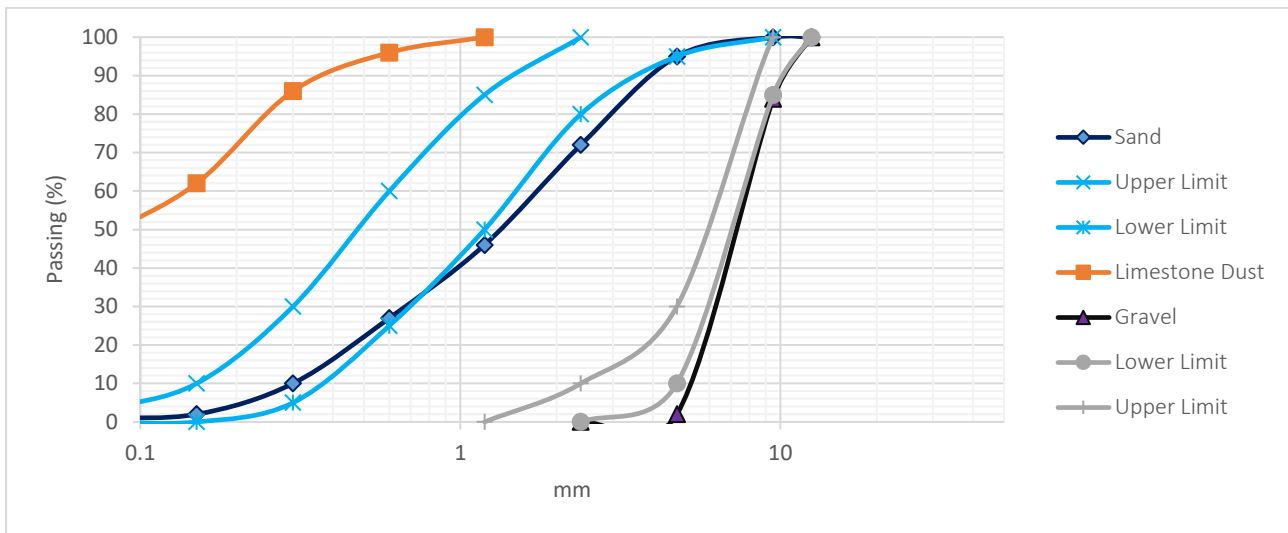
1 Bismark K. Meisuh Et Al.

جدول ۱. اجزای شیمیایی و خصوصیات فیزیکی مواد سیمانی و خاک سنگ آهک
Table 1. Chemical composition and physical properties of cementitious materials and CLSD.

ترکیبات شیمیایی (%)	سیمان	میکروسیلیس	خاک سنگ آهک
SiO_2	۲۱/۶۴	۹۱/۷	۱/۸۱
Al_2O_3	۴/۵۴	۱	۰/۳۱
Fe_2O_3	۳/۷۱	۰/۹	۰/۵۴
MgO	۱/۹۴	۱/۸	۰/۱
CaO	۱۹/۶۴	۱/۶۸	۹۵/۱۳
Na_2O	۰/۳۳	-	۱/۱۲
SO_3	۲/۲	۰/۸۷	۰/۰۲
K_2O	۰/۶۳	-	۰/۲۱
LOI	۱	۲	۰
چگالی	۳/۱۵	۲/۱۶	-
SSA(m^2/kg)	۳۱۵	۱۴۰۰	-

جدول ۲. دانه بندی مصالح و محدوده مجاز، چگالی و جذب آب مصالح سنگی
Table 2. Sieve analysis, allowable range, density, and water absorption of aggregates.

اندازه (میلیمتر)	درصد عبوری مصالح سنگی			حد مجاز دانه بندی ماسه		حد مجاز دانه بندی شن	
	ماسه	شن	خاک سنگ آهک	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا
۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲.۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۹.۵	۱۰۰	۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۸۵	۱۰۰
۴.۷۵	۹۵	۲	۱۰۰	۹۵	۱۰۰	۱۰	۳۰
۲.۳۸	۷۲	۰	۱۰۰	۸۰	۱۰۰	۰	۱۰
۱.۱۹	۴۶	۰	۱۰۰	۵۰	۸۵	۰	۰
۰.۶	۲۷	۰	۹۶	۲۵	۶۰	۰	۰
۰.۳	۱۰	۰	۸۶	۵	۳۰	۰	۰
۰.۱۵	۲	۰	۶۲	۰	۱۰	۰	۰
۰.۰۷۵	۱	۰	۴۸	۰	۳	۰	۰
مدول نرمی	۳/۴۸	۶/۱۴	۰/۵۶	۳/۴۵	۲/۱۵	۶/۰۵	۵/۶
چگالی	۲/۶۲	۲/۶۸	۲/۷	-	-	-	-
جذب آب (%)	۲	۱	۷	-	-	-	-



شکل ۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی و محدوده مجاز استاندارد
 Fig. 1. Sieve analysis graph of aggregates and the standard allowable range.

فوق‌روان کننده مطابق برگه راهنمای شرکت تولید کننده g/cm^3 ۱/۱۵ در نظر گرفته شده است. میزان استفاده از این فوق‌روان کننده به صورت درصدی از مجموع وزن مواد سیمانی بوده و در حدود 0.3 ± 0.5 و بر مبنای رسیدن به کارایی مطلوب در مخلوط‌های بتن خودتراکم استفاده شده است. pH این ماده افزودنی مطابق برگه مشخصات شیمیایی این محصول ۵/۵ و درصد مواد جامد آن ۴۵ درصد بوده است. برای ساخت مخلوط‌ها و عمل آوری آزمون‌ها از آب شرب با pH معادل 7.0 ± 0.5 استفاده شده است.

۲-۲- طرح‌های مخلوط و روش اختلاط

برای مقایسه و بررسی اثر خاک سنگ آهک بر خواص کارایی، مکانیکی و دوام بتن خودتراکم، ۹ طرح مخلوط حاوی درصد‌های مختلفی از خاک سنگ آهک به صورت جایگزین مصالح سنگی ریزدانه و درصد‌های مختلف جایگزینی میکروسیلیس بجای سیمان در سه گروه A و B و C طرح شده است. گروه A بدون جایگزینی میکروسیلیس (به عنوان شاهد)، گروه B با جایگزینی وزنی ۸ درصد میکروسیلیس و گروه C با جایگزینی وزنی ۱۵ درصد میکروسیلیس به جای سیمان طرح شده است. مجموع وزن مواد سیمانی در تمام مخلوط‌ها ثابت و معادل ۴۵۰ کیلوگرم در متر مکعب در نظر گرفته شده است. نسبت آب به مجموع مواد سیمانی در تمام مخلوط‌ها، یکسان و معادل ۰/۲۷ در نظر گرفته شده است. جزئیات طرح‌های

فروسیلیس ایران بوده است. در تمامی مخلوط‌ها از مصالح سنگی ریزدانه با حداکثر اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر و مصالح سنگی درشت دانه با حداکثر اندازه اسمی ۹/۵ میلی‌متر استفاده شده است. خاک سنگ آهک استفاده شده، پسماند عملیات فرآوری سنگ آهک بوده است. جزئیات مشخصات شیمیایی و فیزیکی مواد سیمانی و خاک سنگ آهک مورد استفاده، در جدول (۱) ارائه شده است. مشخصات دانه‌بندی مصالح سنگی و چگالی و جذب آب هر یک در جدول شماره (۲) و نمودار دانه‌بندی آن‌ها به همراه محدوده مجاز دانه بندی ماسه و شن (محدوده ۷ با حداکثر اندازه سنگدانه ۹/۵ میلی‌متر) بر اساس استاندارد ASTM C33 [۲۲] در شکل (۱) ارائه شده است. بر اساس این نمودار می‌توان دریافت که دانه بندی شن تقریباً منطبق با محدوده استاندارد بوده ولی دانه بندی ماسه در محدوده ۱ تا ۴ میلی‌متر کمی خارج از محدوده استاندارد می‌باشد. مطابق جدول (۱) مدول نرمی ماسه بایستی در محدوده ۲/۱۵ الی ۳/۴۵ باشد و باتوجه به این که مدول نرمی ماسه مورد استفاده کمی از این محدوده استاندارد بالاتر است، جایگزینی خاک سنگ آهک با مدول نرمی در مخلوط‌ها می‌تواند منجر به اصلاح دانه بندی مصالح سنگی ریزدانه در بتن شود.

برای بدست آوردن کارایی مطلوب، از کاهنده شدید آب بر پایه پلی‌کربسیلات (فوق‌روان کننده نوع F) مطابق استاندارد ASTM C494 با نام تجاری ZP استفاده شده است [۲۳]. چگالی این

جدول ۳. جزئیات طرح های مخلوط
Table 3. Details of evaluated mix designs.

گروه		A			B			C		
اجزا	مخلوط	LD0-SF0	LD10-SF0	LD20-SF0	LD0-SF8	LD10-SF8	LD20-SF8	LD0-SF15	LD10-SF15	LD20-SF15
	درصد مواد سیمانی	سیمان	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۲	۹۲	۹۲	۸۵	۸۵
میکروسیلیس		۰	۰	۰	۸	۸	۸	۱۵	۱۵	۱۵
درصد مصالح سنگی	ماسه	۶۰	۵۰	۴۰	۶۰	۵۰	۴۰	۶۰	۵۰	۴۰
	خاک سنگ	۰	۱۰	۲۰	۰	۱۰	۲۰	۰	۱۰	۲۰
	آهک	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	شن	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	۴۰
نسبت آب به مواد سیمانی		۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷
درصد فوق روان کننده		۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۷۲	۱/۸	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵

مراجعه مانند ASTM C33 محدودیتی برای حداکثر درصد عبوری مصالح سنگی از الک اندازه ۷۵ میکرون ذکر شده است [۲۲]. این محدودیت برای جلوگیری از استفاده از مصالح دارای رس زیاد و تأمین خواص پایداری ابعادی بتن بوده است، اما ذرات غیر رسی (مانند خاک سنگ آهک) در ابعاد کوچکتر از ۷۵ میکرون، می توانند در ناحیه انتقالی (ذرات ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر) و حفرات موئینه (۵۰ نانومتر تا ۱۰ میکرومتر) عملکرد پرکنندگی داشته و منجر به بهبود خواص مکانیکی، دوام و پایداری ابعادی بتن شوند [۲۴].

پس از ساخت مخلوط بتن تازه آزمایش های جریان اسلامپ، جعبه L و شاخص پایداری چشمی به ترتیب برای ارزیابی قابلیت پرکنندگی، قابلیت عبور پذیری و مقاومت در برابر جداسازی در بتن های خودتراکم انجام شد و در نهایت برای سنجش خواص مکانیکی و دوام بتن، از بتن تازه مطابق ASTM C39 آزمونه های مختلف گرفته شد [۲۵].

۳-۲- آزمایش های خواص کارایی

برای هر مخلوط، آزمایش های خواص کارائی، به منظور جلوگیری

مخلوط در جدول (۳) قابل مشاهده می باشد.

درصد حجمی سنگدانه درشت و ریز در تمام مخلوط ها ثابت و به ترتیب معادل ۴۰ و ۶۰ درصد حجم کل سنگدانه های مخلوط بوده است. خاک سنگ آهک به شکل جایگزین مصالح سنگی ریزدانه در مخلوط ها مورد استفاده قرار گرفته و در درصد های جایگزینی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد حجمی مصالح سنگی بجای مصالح ریزدانه استفاده شده است. به عنوان مثال، باتوجه به ثابت بودن میزان ۶۰ درصد حجم مصالح سنگی برای ریزدانه، در جایگزینی ۱۰ درصد خاک سنگ آهک، درصد حجمی ریزدانه ۵۰ درصد و درصد حجمی درشت دانه ۴۰ درصد بوده است. بدین ترتیب مدول نرمی مصالح ریزدانه ترکیبی ماسه و خاک سنگ برای درصد های جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد به ترتیب معادل ۳/۲ و ۲/۹ بدست خواهد آمد که در محدوده مجاز قرار خواهد گرفت. مطابق جدول (۳) در عناوین مخلوط ها عدد پس از LD نشان دهنده میزان درصد حجم خاک سنگ آهک در کل سنگدانه های بتن می باشد. همچنین، عدد پس از SF نشان دهنده میزان سهم میکروسیلیس از کل جرم مجموع مواد سیمانی می باشد. مصالح سنگی ریزدانه ممکن است، دارای رس باشند. در برخی

از کاهش کارایی مخلوط بتن تازه، در حدود ۱۵ دقیقه پس از آماده شدن مخلوط انجام شد. مطابق تعریف بتن خودتراکم در استاندارد BS EN 9-206، این بتن باید خواصی از جمله قابلیت جریان و قابلیت تراکم تحت اثر وزن خودش (پرکنندگی)، قابلیت عبور از تراکم میلگردها و قابلیت پایداری را داشته باشد [۲۶]. به همین منظور و برای ارزیابی خواص بتن خودتراکم، آزمایش های جریان اسلامپ برای سنجش خواص پرکنندگی و آزمایش جعبه L برای سنجش خواص عبورپذیری بتن خودتراکم بر اساس دستور العمل بتن خودتراکم اروپا^۱ انجام شد. همچنین برای سنجش قابلیت پایداری و خواص عدم جداشدگی، از آزمایش شاخص پایداری چشمی بتن تازه خودتراکم بر اساس استاندارد ASTM C1611 استفاده شد [۲۷]. برای انجام آزمایش جریان اسلامپ از قیف اسلامپ معمولی همراه با میز جریان اسلامپ استفاده شد. برای این منظور بتن خودتراکم به شکل پیوسته در قیف اسلامپ ریخته و پس از پر شدن، قیف به شکل عمودی جهت تخلیه بتن و اندازه‌گیری قطر جریان اسلامپ به سمت بالا به حرکت در آمد. در نهایت دو قطر عمود بر هم جریان اسلامپ اندازه‌گیری شده و میانگین آن به عنوان جریان اسلامپ بتن اعلام شد. بر اساس دستور العمل بتن خودتراکم اروپا، جریان اسلامپ مطلوب حدود ۶۵۰ الی ۸۰۰ میلی متر می‌باشد. انجام آزمایش جعبه L به منظور سنجش خاصیت عبورپذیری بتن خودتراکم می‌باشد که برای انجام این آزمایش، حدود ۱۴ لیتر بتن تازه در قسمت قائم جعبه L ریخته شده و پس از گذشت مدت زمان ۱ دقیقه، دریچه را به منظور حرکت بتن در قسمت افقی جعبه گشوده و پس از توقف بتن، ارتفاع قرارگیری بتن در دو قسمت ابتدا (h1) و انتها (h2) قسمت افقی جعبه L اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت نسبت جعبه L با تقسیم این دو عدد بر هم بدست خواهد آمد. هرچه این عدد به ۱ نزدیک شود، خواص عبورپذیری بتن خودتراکم بهتر خواهد بود و می‌توان قابلیت گرفتگی بتن خودتراکم در پشت میلگردها را بر این اساس سنجید. مقدار توصیه شده این نسبت برای بتن‌های خودتراکم، حدود ۰/۸ الی ۱ می‌باشد [۲۸].

۲-۴- آزمایش‌های خواص مکانیکی

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه، برای هر سن ۳ آزمون مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر، مطابق استاندارد BS

1 The European Guidelines for Self-Compacting Concrete (EFNARC)

EN 12390-1 تهیه شد [۲۹]. برای انجام آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن در سن ۲۸ روزه، از هر یک از مخلوط‌ها ۳ آزمون استوانه‌ای با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر مطابق استاندارد ASTM C496 تهیه شد [۳۰]. پس از پر کردن قالب آزمون‌ها با بتن تازه خودتراکم، سطح آزمون‌ها صاف شده و سپس برای حفظ رطوبت با یک پلاستیک پوشانیده شد. آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت مطابق شرایط استاندارد ASTM C192 در محیط آزمایشگاه نگه داری شدند و پس از خروج از قالب، مطابق همین استاندارد در آب آهک اشباع با دمای ۲۳±۲ درجه سانتی گراد تا رسیدن به سنین مورد نظر نگهداری شدند [۳۱]. آزمون‌های مقاومت فشاری پس از رسیدن به سن مورد نظر، به صورت اشباع با سطح خشک، مطابق شرایط استاندارد BS EN 3-12390 مورد آزمون مقاومت فشاری قرار گرفتند [۳۲]. آزمون‌های مقاومت کششی نیز پس از رسیدن به سن ۲۸ روز به صورت اشباع با سطح خشک مطابق شرایط استاندارد مورد آزمایش قرار گرفت [۳۰]. نرخ بارگذاری برای هر یک از آزمایش‌ها مطابق شرایط استاندارد و در محدوده آن در نظر گرفته شد. با توجه به این که نرخ بارگذاری استاندارد مذکور برای آزمایش مقاومت فشاری در محدوده ۰/۲ الی ۱/۰ مگاپاسکال بر ثانیه بوده، نرخ بارگذاری جک مقاومت فشاری هیدرولیکی بر روی عدد ثابت ۰/۵ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم شد. همچنین محدوده استاندارد نرخ بارگذاری برای آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم به میزان ۰/۷ الی ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه می‌باشد که در این پژوهش نرخ بارگذاری ثابت برای این آزمایش به میزان ۱/۰ مگاپاسکال بر دقیقه در نظر گرفته شد. نتایج ارائه شده در این پژوهش برای هر یک از خواص مکانیکی، به صورت میانگین نتایج سه آزمون آن می‌باشد.

۲-۵- آزمایش‌های خواص دوام

آزمایش تخلخل باز مطابق استاندارد ASTM C642 انجام شد [۳۳]. برای انجام این آزمایش تعداد ۳ قالب مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی متر از بتن تازه تهیه شد. آزمون‌های مکعبی در قالب به مدت ۲۴ ساعت مطابق شرایط استاندارد ASTM C192 در محیط آزمایشگاه نگه داری شده و پس از خروج بتن از قالب، مطابق همین استاندارد در آب آهک اشباع با دمای ۲۳±۲ درجه سانتی گراد تا رسیدن به سنین مورد نظر نگه داری شدند [۳۱]. پس از رسیدن سن آزمون‌ها به ۲۸



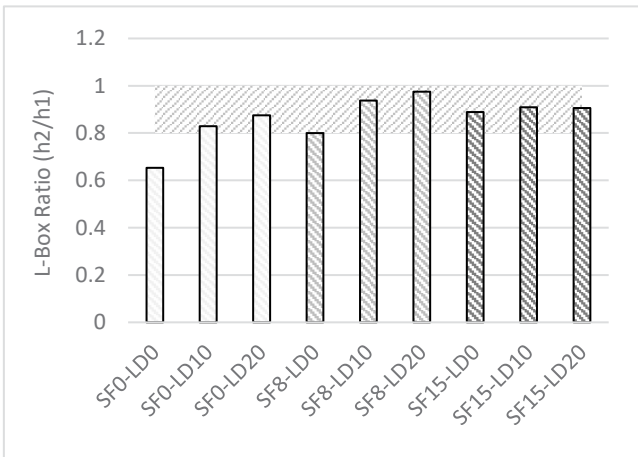
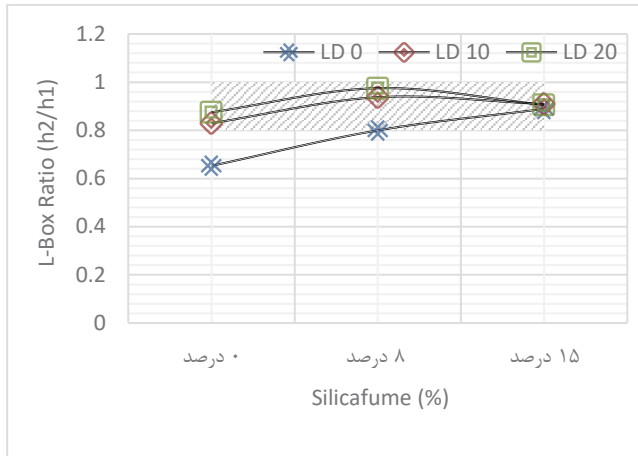
شکل ۲. تجهیزات آزمایش RCPT
Fig. 2. RCPT testing equipment

حفرات بیشتر در بتن منجر به کاهش دوام آن می‌شود لذا با توجه به اثر نفوذپذیری و حفرات در دوام بتن، در این پژوهش، نتیجه انجام این آزمایش به عنوان معیاری از دوام بتن در نظر گرفته شد. برای انجام این آزمایش، یک قالب استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر از بتن تازه گرفته شد تا در نهایت با انجام عملیات برش به سه دیسک بتنی تبدیل شود. آزمون استوانه‌ای در قالب به مدت ۲۴ ساعت مطابق شرایط استاندارد ASTM C192 در محیط آزمایشگاه نگه داری شده و پس از خروج بتن از قالب، مطابق همین استاندارد در آب آهک اشباع با دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به سنین مورد نظر نگه داری شدند [۳۱]. سپس جهت انجام آزمایش، پس از رسیدن سن بتن به ۲۸ روز، قطعه استوانه‌ای بتن با انجام عملیات برش به سه دیسک با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر تبدیل شد. پس از آن مراحل آماده‌سازی آزمون‌ها در خشکانه^۱ انجام شده و در نهایت آزمون‌ها در سلول‌های حاوی محلول‌های مختلف سدیم هیدروکسید (NaOH) و سدیم کلرید (NaCl) مورد انجام آزمایش قرار گرفتند. شکل (۲) نشان دهنده تجهیزات مورد استفاده برای انجام این آزمایش در این پژوهش می‌باشد:

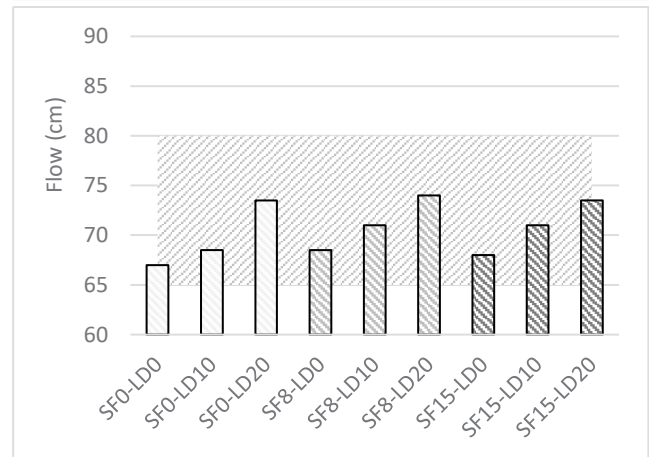
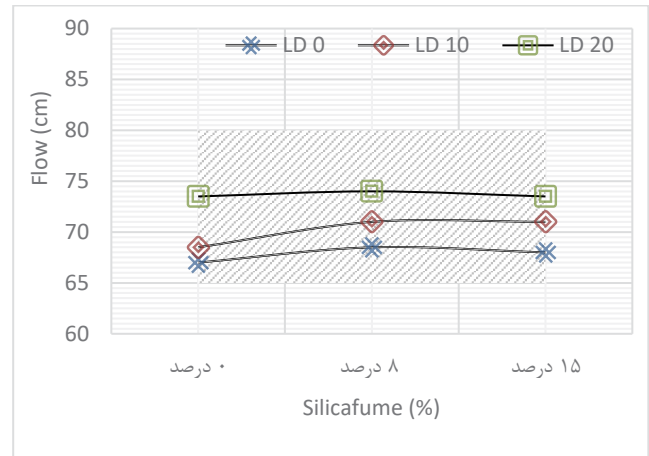
روز، آزمون‌ها از آب آهک اشباع خارج شده و در گرمچال با دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفت. پس از خروج آزمون‌ها از گرمچال، توزین آزمون‌ها انجام شده و در دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد) تا رسیدن به دمای محیط قرار گرفت. سپس آزمون‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب غوطه‌ور شده و پس از آن به مدت ۵ ساعت در آب جوشانیده شدند. سپس به آزمون‌ها اجازه داده شد تا مجدداً با کاهش دما مطابق با استاندارد به دمای محیط (۲۰ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد) برسند. در این مرحله سطح آزمون‌ها با حوله خشک شده و توزین آن‌ها مجدداً انجام شد. در نهایت آزمون‌ها در آب غوطه‌ور شدند و وزن غوطه‌وری آن‌ها اندازه‌گرفته شد. در نهایت با استفاده از روابط ذکر شده در استاندارد، چگالی، جذب آب و درصد حجمی حفرات آزمون‌های بتنی محاسبه شد که میانگین آن‌ها در این پژوهش ارائه شده است.

آزمایش مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید (RCPT) بر اساس استاندارد ASTM C1202 انجام شد [۳۴]. در این آزمایش برای بررسی میزان نفوذپذیری بتن در برابر نفوذ یون کلراید، میزان جریان عبوری حاصل از اختلاف پتانسیل دو سر آزمون در مدت ۶ ساعت بر مبنای کولمب اندازه‌گیری می‌شود. روشن است که، نفوذ پذیری و

1 Desiccator



شکل ۴. نتیجه آزمایش L-Box در مخلوط های مختلف (چپ) و به تفکیک درصد خاک سنگ (راست)
 Fig. 4. L-Box test results a) for different mixtures; b) for different CLSD percentages.



شکل ۳. نتیجه آزمایش اسلامپ در مخلوط های مختلف (چپ) و به تفکیک درصد خاک سنگ (راست)
 Fig. 3. Slump test results a) for different mixtures b) for different CLSD percentages.

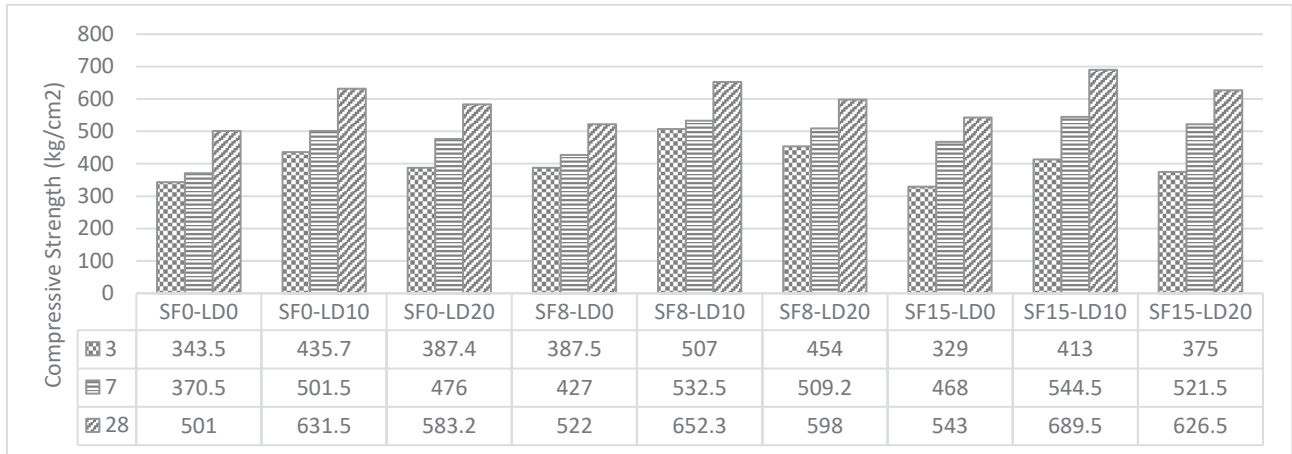
۳- نتایج و تفسیر آزمایش ها

۳-۱- خواص کارایی بتن تازه

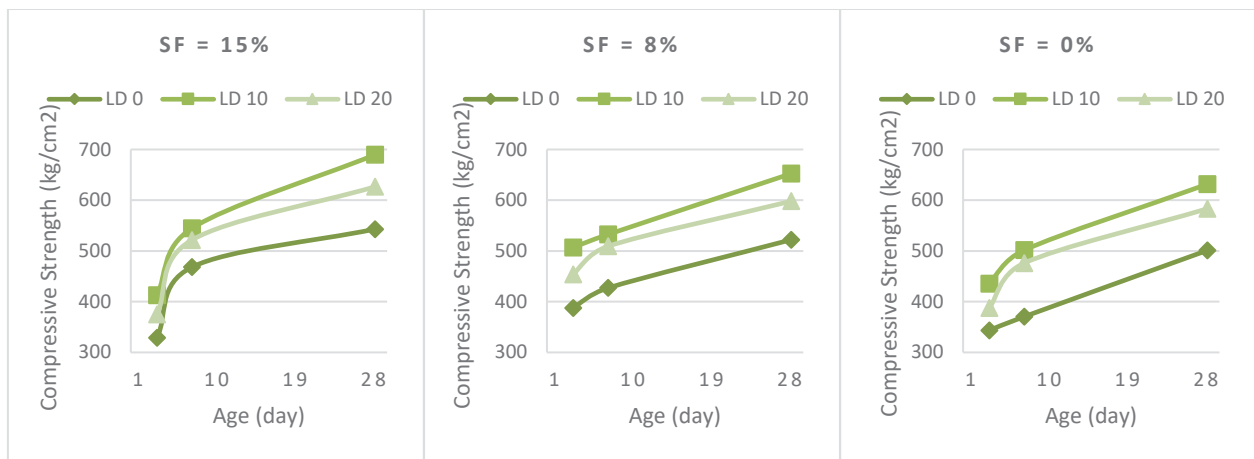
نمودار نتایج آزمایش جریان اسلامپ در شکل (۳) قابل مشاهده است. در هر سه دسته طرح های مخلوط یعنی A، B و C، مشاهده می گردد که با افزایش جایگزینی خاک سنگ آهک به جای ماسه، کارایی مخلوط افزایش یافته است. این نتیجه در هر سه نوع ماده سیمانی تکرار شده است. بنابراین، خاک سنگ به سبب دارا بودن فیلر و همچنین گرد گوشه بودن منجر به افزایش کارایی مخلوط شده است.

شکل (۴) نتایج آزمایش جعبه L را نشان می دهد که با افزایش درصد جایگزینی خاک سنگ آهک به جای ماسه، نسبت آن افزایش یافته و این موضوع نشان دهنده بهبود خاصیت عبور پذیری بتن خودتراکم در اثر استفاده از خاک سنگ آهک بجای ماسه می باشد. تمامی محدوده

های مطلوب ذکر شده در بخش ۲-۳، بر روی شکل ها به صورت خط چین نشان داده شده است. بر اساس نتایج کسب شده همان طور که در شکل (۳) می توان مشاهده کرد، نتیجه آزمایش جعبه L نمونه شاهد (LD0-SF0) خارج از محدوده قابل قبول بوده است. باتوجه به این که از آزمایش جعبه L برای سنجش قابلیت عبورپذیری بتن خودتراکم استفاده می شود، می توان دریافت که مخلوط فوق اگرچه دارای خواص پرکنندگی مناسب بر اساس آزمایش جریان اسلامپ بوده است و میتوان آن را خودتراکم در نظر گرفت، لکن باتوجه به نتیجه آزمایش جعبه L این مخلوط از خواص عبورپذیری مناسبی برخوردار نبوده است. با مشاهده این دو نمودار می توان دریافت با افزایش خاک سنگ آهک جایگزین ماسه در هر سه نوع مواد سیمانی مورد آزمایش، خاصیت عبور پذیری بتن خودتراکم افزایش محسوس یافته است. بررسی های وضعیت ظاهری تمامی مخلوط های بتنی حاکی از عدم وجود جداشدگی بود



شکل ۵: مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف در سنین مختلف
Fig. 5. Compressive strength graph of different mixtures



شکل ۶: تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف در اثر استفاده خاک سنگ آهک جایگزین در انواع مواد سیمانی
Fig. 6. Changes in compressive strength at different ages for various percentages due to the use of CLSD in different types of cementitious materials.

اسلامپ بتن خودتراکم و تراکم پذیری آن افزایش داشته است [۱۴].

۳-۲- خواص مکانیکی بتن سخت شده

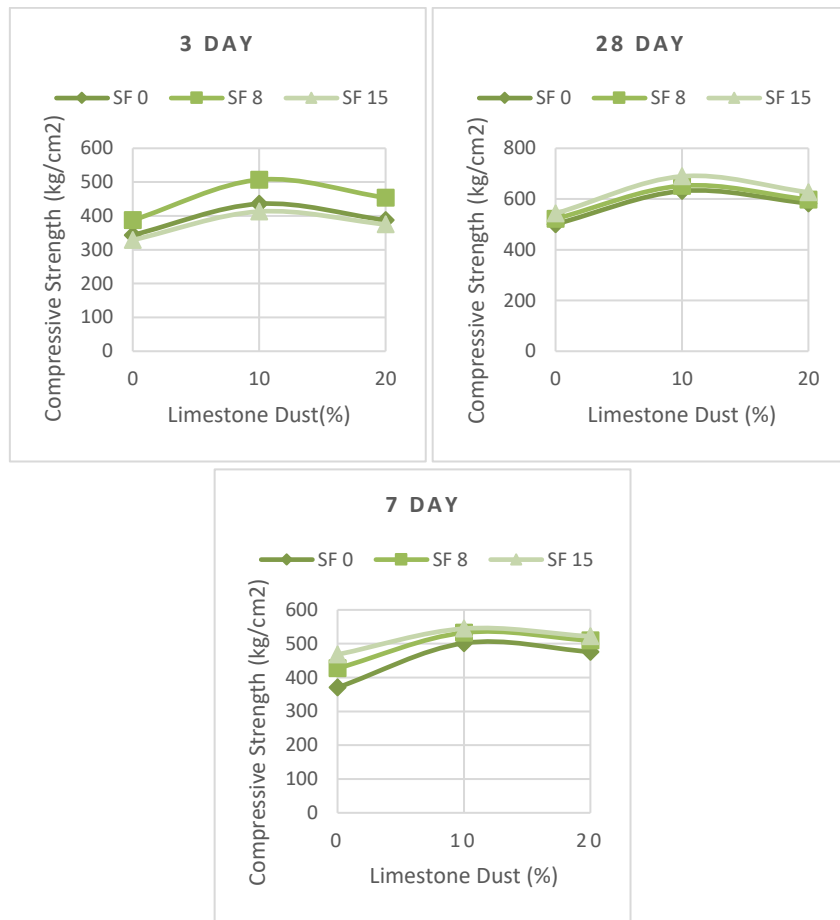
۳-۲-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل (۵) نشان داده شده است. بر اساس این نتایج می‌توان دریافت که افزایش خاک سنگ آهک جایگزین در هر سه نوع ماده سیمانی موجود، تا درصدی مشخص موجب بهبود مقاومت فشاری در تمام سنین شده است. با توجه به شکل (۶) دریافت می‌شود که در تمام انواع مواد سیمانی (شامل درصد‌های مختلف جایگزینی میکروسیلیس) مقاومت فشاری در تمامی سنین در درصد جایگزینی ۱۰ درصد بیش

و بنابر این شاخص پایداری چشمی همه بتن‌ها (VSI^۱) یکسان و معادل صفر سنجیده شد که نشان دهنده مقاومت خوب بتن‌ها در برابر جداسازی می‌باشد.

بنابر این آزمایش‌های انجام شده بر روی مخلوط تازه نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی خاک سنگ در بتن خودتراکم موجب بهبود وضعیت کارایی و خواص نظیر عبور پذیری و تراکم پذیری مخلوط بتنی شده است. در پژوهشی که توسط کاپگیت^۲ و ساتون^۳ در سال ۲۰۱۳ انجام شد، نتایج مشابهی با این نتیجه ارائه شده است به گونه‌ای که با افزایش درصد جایگزینی خاک سنگ بجای ماسه، میزان جریان

1 Visual Stability Index
2 Kapgate
3 Satone



شکل ۷. تغییرات مقاومت فشاری سنین مختلف برای درصد های جایگزینی مختلف خاک سنگ در انواع مواد سیمانی
 Fig. 7. Changes in compressive strength at different ages for various percentages of CLSD in different types of cementitious materials.

توسط طاهر سلیم^۳ و خالد مرار^۴ در سال ۱۹۹۵ انجام شد نیز عدد ۱۰ درصد به عنوان مقدار جایگزینی بهینه خاک سنگ بجای ماسه ارائه شده است [۳۵].

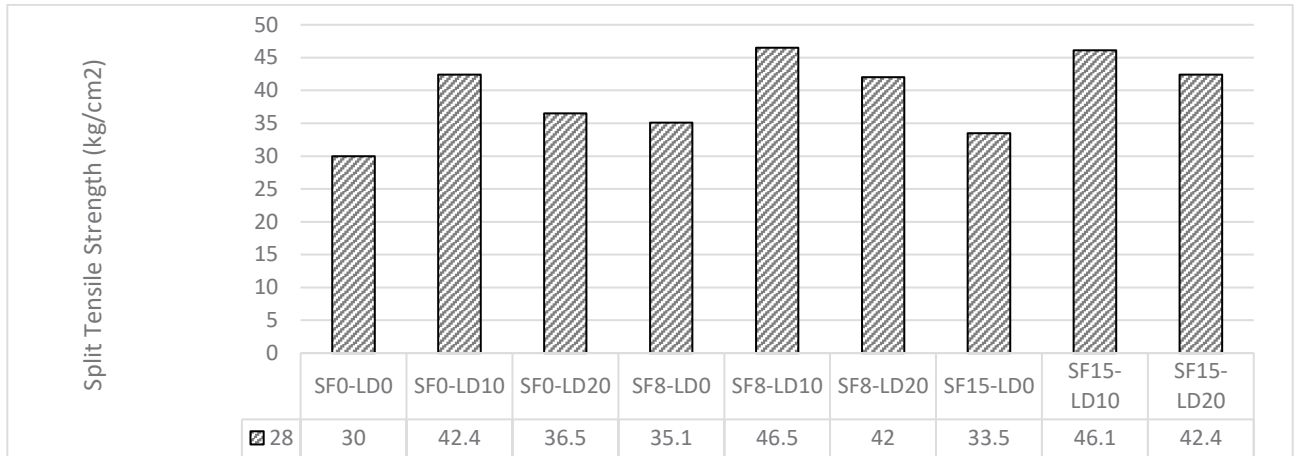
۳-۲-۲- مقاومت کششی غیر مستقیم

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی مخلوط های مختلف در سن ۲۸ روز در شرایط اشباع با سطح خشک انجام شد که نتایج آن در شکل (۸) نشان داده شده است. آن طور که از این نمودار می توان برداشت کرد، نتایج مقاومت کششی در نمونه های حاوی ۱۰ درصد جایگزینی خاک سنگ بجای ماسه، در بهترین حالت قرار داشته و بیشترین مقاومت کششی را ارائه داده اند. آنگونه که از شکل (۹) نیز می توان برداشت کرد، از نظر مقاومت کششی غیر مستقیم، خاک

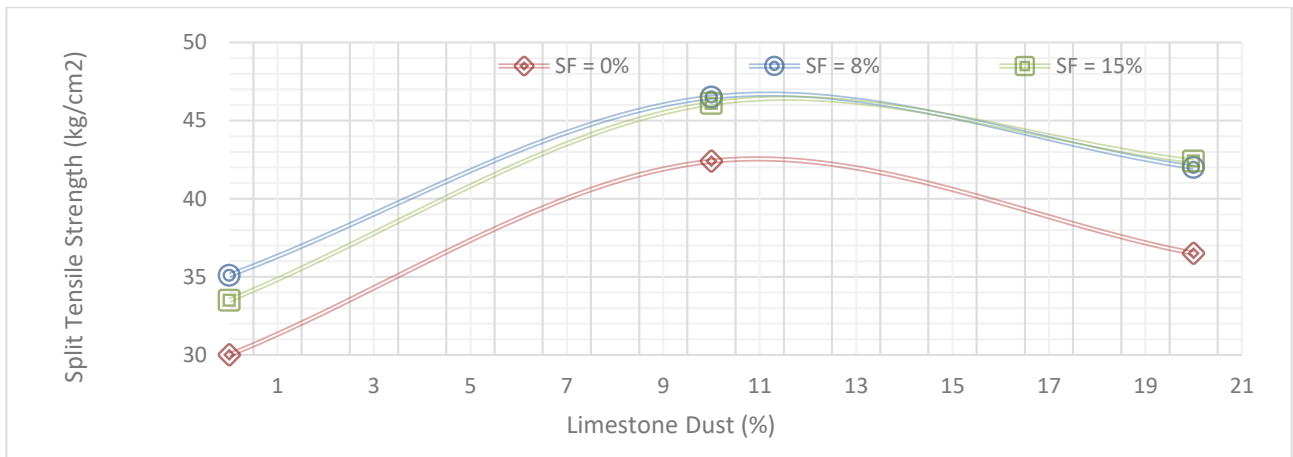
از مقدار ۲۰ درصد بوده است. این مورد را می توان در نمودار های شکل (۷) نیز ملاحظه نمود که درصد بهینه جایگزین خاک سنگ در بتن برای بهبود مقاومت فشاری، در حدود ۱۰ درصد برای انواع مواد سیمانی حاوی میکروسیلیس و فاقد آن، بدست آمده است. به نظر می رسد که درصد بهینه ای با توجه به نوع خاک سنگ آهک و دانه بندی آن و همچنین میزان حجم پرکننده موجود در آن (مواد ریزتر از ۰/۰۷۵ میلی متر) وجود دارد. این نتیجه همچنین در پژوهشی که توسط کاپگیت^۱ و ساتون^۲ در سال ۲۰۱۳ انجام شده، بدست آمده است که برای خاک سنگی که در آن پژوهش استفاده شده، درصد بهینه جایگزینی در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد تعیین شده است که در درصد های جایگزینی کمتر از این میزان و بیشتر از آن، مقدار مقاومت فشاری نسبتاً کاهش یافته است [۱۴]. در پژوهش دیگری که

3 Tahir Celik
 4 Khaled Marar

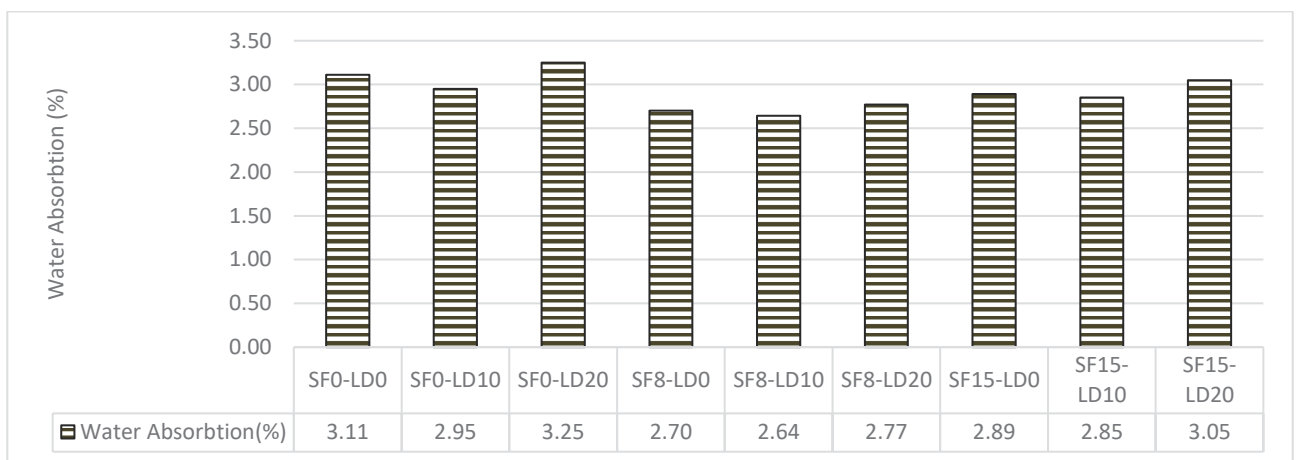
1 Kapgate
 2 Satone



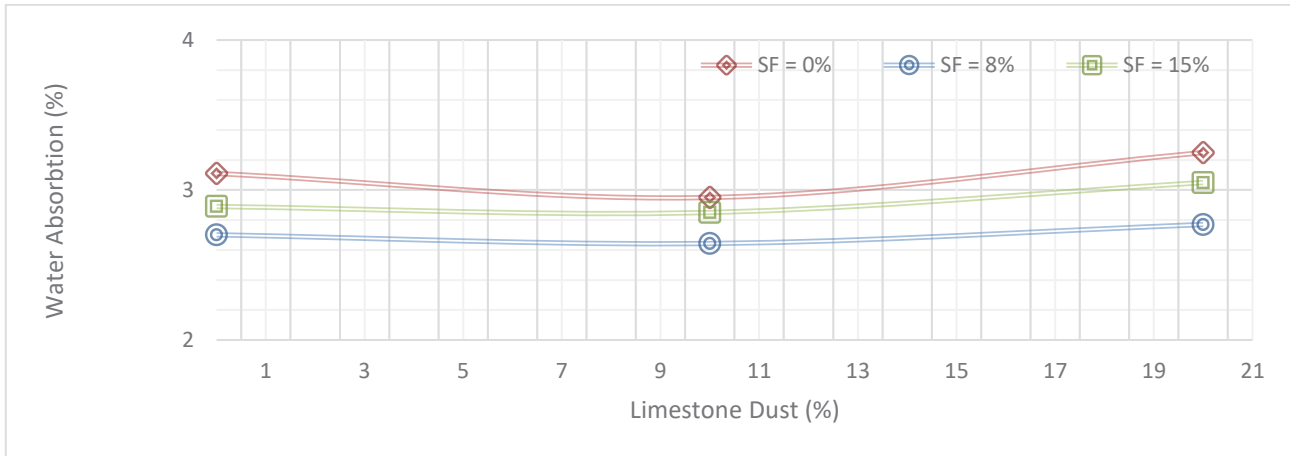
شکل ۸. نمودار مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌های مختلف در سن ۲۸ روز
 Fig. 8. Splitting tensile strength graph of different mixtures.



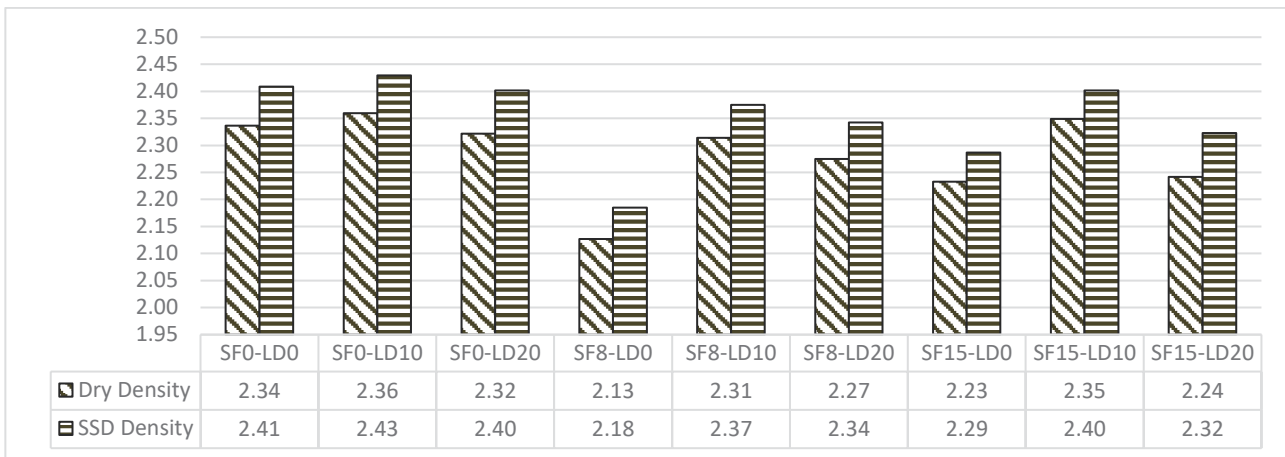
شکل ۹. تغییرات مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه در اثر استفاده از درصد‌های مختلف خاک سنگ در انواع سیمانی
 Fig. 9. Changes in 28-days splitting tensile strength due to the use of different percentages of CLSD in different types of cementitious materials.



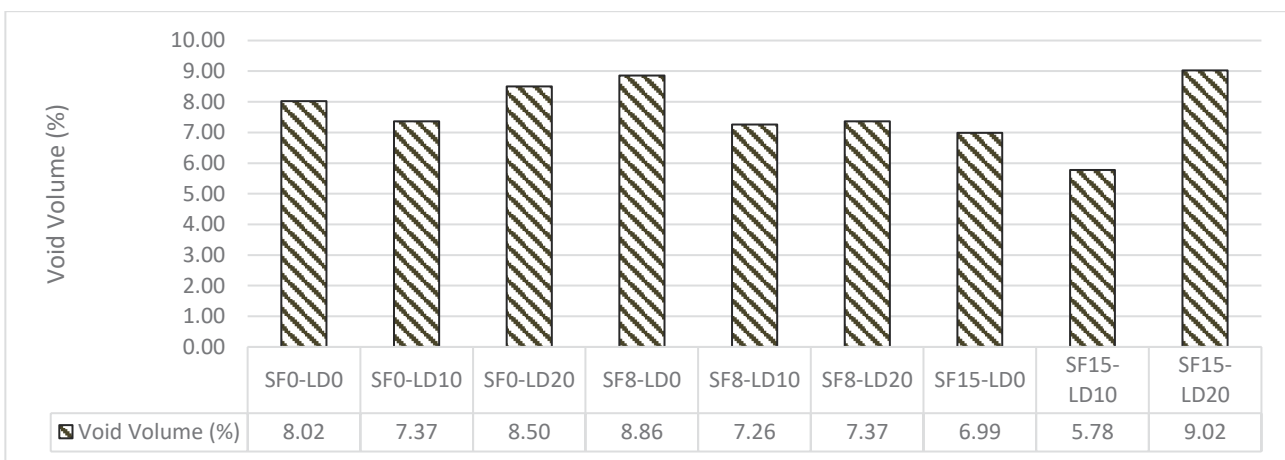
شکل ۱۰. نتایج جذب آب مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روزه
 Fig. 10. Changes in the water absorption of the specimens at the age of 28 days in different mix designs.



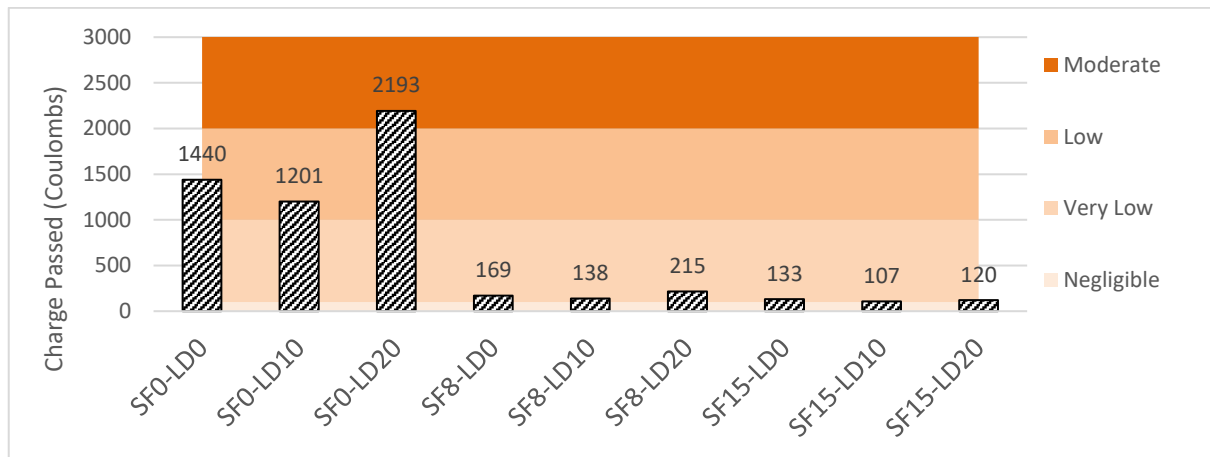
شکل ۱۱. تغییرات جذب آب آزمون‌ها در سن ۲۸ روزه، در اثر استفاده از درصد‌های مختلف خاک سنگ در انواع سیمانی
 Fig. 11. Changes in water absorption at the age of 28 days due to the use of different percentages of CLSD in various types of cementitious materials



شکل ۱۲. تغییرات چگالی بتن تازه و خشک شده، آزمون‌های ۲۸ روزه در طرح‌های مختلف
 Fig. 12. Changes in the density of fresh and dried concrete, 28-days specimens in different mix designs



شکل ۱۳. تغییرات حجم حفرات در طرح‌های مختلف
 Fig. 13. Changes in the volume of pores in different mix designs



شکل ۱۴. تغییرات شار عبوری آزمایش RCPT در طرح های مختلف
 Fig. 14. Changes in the charge passed in the RCPT in different mix designs

سلیک و آلومینا خالص برای بررسی اثر خاک سنگ بر خواص بتن تازه و سخت شده انجام شد نیز درصد بهینه جایگزینی خاک سنگ را برای رسیدن به کمترین نفوذ پذیری در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد را ارائه می دهد [۳۵].

۳-۳-۲- آزمایش نفوذ یون کلراید

مطابق نتایج حاصل شده این آزمایش که نمودار آن در شکل (۱۴) نشان داده شده است، این طور می توان دریافت که از دیدگاه این آزمایش باز هم خاک سنگ آهک دارای مقداری بهینه است اما تأثیر آن به اندازه میکروسیلیس نیست. در مخلوط سیمان فاقد میکروسیلیس، در میزان جایگزینی ۱۰ درصد خاک سنگ بجای ماسه، کمترین میزان عبور جریان وجود داشته و این روند در نمونه های حاوی میکروسیلیس ثابت با درصد های جایگزینی خاک سنگ متفاوت نیز قابل مشاهده است. شکل (۱۵) نشان می دهد که استفاده از میکروسیلیس بسیار بیشتر از خاک سنگ توانسته است شار عبوری را کاهش دهد و تقریباً می توان گفت تفاوت زیادی بین ۸ درصد و ۱۵ درصد جایگزینی میکروسیلیس وجود ندارد.

۴- نتیجه گیری

خاک سنگ آهک پسماندی است که در نتیجه خرد کردن سنگ های آهکی جهت تولید سنگدانه مصرفی در بتن بوجود می آید.

سنگ آهک در انواع مخلوط های مواد سیمانی حاوی میکروسیلیس دارای مقدار بهینه ای است که در حدود ۱۰ درصد می باشد. نتایج پژوهش ازگور ارن^۱ و خالد مرار^۲ در سال ۲۰۰۹ که برای بررسی اثر خاک سنگ آهک و الیاف فولادی بر خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت کششی انجام شده است، درصد بهینه ۱۰ درصد جایگزینی خاک سنگ بجای مصالح سنگی ریزدانه را برای دستیابی به بهترین نتیجه مقاومت کششی تأیید می کند [۱۲].

۳-۳-۳- خواص دوام بتن سخت شده

۳-۳-۱- آزمایش تخلخل باز

نتایج حاصل از انجام این آزمایش در شکل (۱۰) تا شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان گونه که از شکل (۱۱) می توان دریافت، مخلوط بتنی حاوی جایگزینی ۱۰ درصد خاک سنگ آهک بجای ماسه و ۸ درصد میکروسیلیس به جای سیمان، کمترین جذب آب را در تمام مخلوط های سیمانی به خود اختصاص داده است. مطابق شکل (۱۲) نتایج نشان می دهد که چگالی بتن سخت شده در اثر تغییر درصد جایگزینی خاک سنگ تغییر یافته و حداکثر آن در حدود ۱۰ درصد جایگزینی حاصل می شود. شکل (۱۳) نیز نشان دهنده این است که درصد هوای موجود در بتن سخت شده، تحت تأثیر میزان جایگزینی خاک سنگ قرار داشته و دارای مقداری بهینه است که حدود ۱۰ می باشد. نتایج پژوهشی که در سال ۱۹۹۶ توسط طاهر

3 Tahir Celik
 4 Khaled Marar

1 Özgür Eren
 2 Khaled Marar

• خواص کارائی

- استفاده از خاک سنگ تأثیر بسیار زیادی بر مشخصات بتن خودتراکم در حالت تازه داشت و به خوبی توانست کمبود فیلر (ریزدانه) موجود در سنگدانه‌ها را جبران نماید. مطابق نتایج این پژوهش، با افزایش مقدار خاک سنگ آهکی جایگزین ماسه در بتن خودتراکم، میزان جریان اسلامپ و همچنین نسبت آزمایش جعبه L افزایش محسوسی یافت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مطابق نتایج این آزمایشها به ترتیب خواص پرکنندگی و خواص عبور پذیری در بتن خودتراکم بهبود یافته‌اند.

• خواص مکانیکی

۱- با افزایش درصد جایگزینی خاک سنگ آهک بجای مصالح سنگی ریزدانه در مخلوط بتنی تا میزان ۱۰ درصد حجمی کل مصالح سنگی، مقاومت فشاری در تمامی مخلوط‌های بتنی حاوی و فاقد میکروسیلیس افزایش و سپس کاهش یافت.

۲- نتایج آزمایش مقاومت کششی بر نمونه‌های مخلوط‌های مختلف، حاکی از بهبود مقاومت کششی نمونه‌ها در درصد جایگزینی ۱۰ درصد خاک سنگ آهک بجای مصالح سنگی ریزدانه در تمام مخلوط‌های بتنی حاوی و فاقد میکروسیلیس جایگزین سیمان بود.

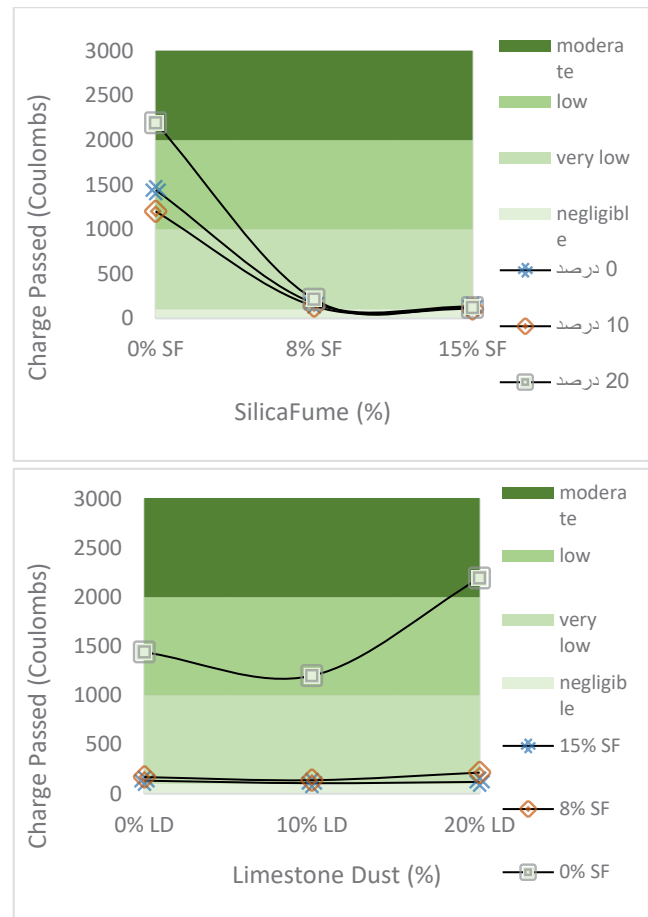
۳- در مجموع می‌توان بر اساس نتایج این پژوهش، اثر جایگزینی خاک سنگ آهک بجای مصالح سنگی ریزدانه را بر خواص مکانیکی بتن، مثبت ارزیابی نمود و مقدار بهینه آنها را در حدود ۱۰ درصد دانست.

• خواص دوام

۱- مطابق نتایج حاصل از آزمایش تخلخل باز در این پژوهش، افزایش میزان جایگزینی خاک سنگ بجای ماسه در بتن، تا ۱۰ درصد منجر به کاهش حفرات و جذب آب و همچنین افزایش چگالی خشک و اشباع مخلوط بتنی گردید. با افزایش میزان جایگزینی از میزان ۱۰ درصد، حجم حفرات و درصد جذب آب افزایش و چگالی خشک و اشباع آن کاهش یافتند.

۲- مطابق نتایج حاصل از آزمایش نفوذ سریع شده یون کلراید (RCPT)، استفاده از خاک سنگ آهک جایگزین مصالح سنگی ریزدانه در مخلوط بتنی نیز دارای مقدار بهینه‌ای است که در این پژوهش این مقدار برابر با ۱۰ درصد بدست آمد.

۳- در مجموع می‌توان اثر جایگزینی خاک سنگ بجای ماسه



شکل ۱۵. تغییرات شار عبوری آزمایش RCPT، در اثر استفاده از درصد‌های مختلف خاک سنگ و میکروسیلیس

Fig. 15. Changes in the charge passed in the RCPT due to the use of different percentages of CLSD and silica-fume

وجود این ماده زائد در طبیعت موجب مشکلات گوناگون زیست محیطی می‌گردد. در همین راستا پژوهش حاضر به منظور بررسی اثر خاک سنگ آهک بر خواص کارائی، مکانیکی و دوام بتن‌های خودتراکم انجام شده است. بدین منظور ۹ طرح مخلوط حاوی خاک سنگ و بدون آن مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. برای بررسی خواص مکانیکی این بتن‌ها از آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیر مستقیم و نیز برای بررسی خواص دوام آزمایش‌های تخلخل باز و نفوذ یون کلراید (RCPT) برای سنجش خواص دوام بر روی نمونه‌های حاوی خاک سنگ و همچنین نمونه شاهد فاقد آن انجام شدند. خواص کارائی بتن‌های خودتراکم نیز با انجام آزمایش‌های جعبه L و جریان اسلامپ مورد سنجش قرار گرفت. بر اساس آن چه در قسمت بحث و نتیجه گیری بیان شد، نتایج زیر از این پژوهش بدست آمده است:

- Minerals Engineering. 17 (2004) 355–357.
- [11] P. Turgut, Limestone dust and glass powder wastes as new brick material, *Materials and Structures*. 41 (2008) 805–813.
- [12] Ö. Eren, K. Marar, Effects of limestone crusher dust and steel fibers on concrete, *Construction and Building Materials*. 23 (2009) 981–988.
- [13] N. Almeida, F. Branco, J. de Brito, J.R. Santos, High-performance concrete with recycled stone slurry, *Cement and Concrete Research*. 37 (2007) 210–220.
- [14] A. Bishnoi, M. Bala, Effect of Quarry Dust as Partial Replacement of Sand in Concrete, *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*. 3 (2015) 2455–6211.
- [15] M. Galetakis, G. Alevizos, K. Leventakis, Evaluation of fine limestone quarry by-products, for the production of building elements - An experimental approach, *Construction and Building Materials*. 26 (2012) 122–130.
- [16] B. Demirel, The effect of the using waste marble dust as fine sand on the mechanical properties of the concrete, *International Journal of the Physical Sciences*. 5 (2010) 1372–1380.
- [17] S.N. Raman, T. Ngo, P. Mendis, H.B. Mahmud, High-strength rice husk ash concrete incorporating quarry dust as a partial substitute for sand, *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 3123–3130.
- [18] G. De Schutter, G. Ye, K. Audenaert, D. Bager, V. Baroghel-Bouny, F. Bellmann, V. Boel, D. Bonen, L. Boström, M. Corradi, E. Gartner, Y. Hama, S. Jacobsen, R. Jansson, H. Justnes, K. Khayat, M. Khrapko, A. Leemann, L.F. Luco, R. Magarotto, A.S. Nowak, B. Persson, A.M. Poppe, C. Qian, M.J. Setzer, K. Sideris, A. Skarendahl, M. Sonebi, J. Stark, L. Tang, J. Trägårdh, O. Wallevik, W. Zhu, I. Zverev, Final report of RILEM TC 205-DSC: Durability of self-compacting concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. (2008).
- [19] M. Tennich, A. Kallel, M. Ben Ouedzou, Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes, *Construction and Building Materials*. (2015).
- بر دوام بتن را مثبت ارزیابی نمود و مقدار بهینه خاک سنگ جایگزین مصالح سنگی ریزدانه را در حدود ۱۰ درصد دانست.
- مراجع**
- [1] D.W.S. Ho, A.M.M. Sheinn, C.C. Ng, C.T. Tam, The use of quarry dust for SCC applications, *Cement and Concrete Research*. 32 (2002) 505–511.
- [2] V. Malhotra, G. Carrette, Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as Partial Replacement for Sand, *ACI Materials Journal*. 82 (1985) 363–371.
- [3] P. Turgut, H. Murat Algin, Limestone dust and wood sawdust as brick material, *Building and Environment*. 42 (2007) 3399–3403.
- [4] P. Turgut, Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust, *Building and Environment*. 42 (2007) 3801–3807.
- [5] M. Karaşahin, S. Terzi, Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete, *Construction and Building Materials*. 21 (2007) 616–620.
- [6] H. Binici, H. Kaplan, S. Yilmaz, Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete, *Academic Journals*. 2 (9) (2007) 372–379.
- [7] A. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, V. Gorokhovskiy, D. Mescheryakov, Inorganic wastes in the manufacture of glass and glass-ceramics: Quartz-feldspar waste of ore refining, metallurgical slag, limestone dust, and phosphorus slurry, *Journal of the American Ceramic Society*. 85 (2002) 285–287.
- [8] E.L. Nagpal, A. Dewangan, E.S. Dhiman, E.S. Kumar, Evaluation of Strength Characteristics of Concrete Using Crushed Stone Dust as Fine Aggregate, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2 (2013) 102–104.
- [9] Y.W. C. Shi and C. Riefler, The Use of Crushed Limestone Dust in Production of Self-Consolidating Concrete (SCC), *Special Publication*. 219 (n.d.).
- [10] M. Galetakis, S. Raka, Utilization of limestone dust for artificial stone production: An experimental approach,

- Compacting Concrete, Report from EFNARC. 44 (2005) 32.
- [29] BSI, BS EN 12390-1:2000 - Testing hardened concrete. Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, (2000).
- [30] ASTM International, ASTM C496 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International. (2011) 5.
- [31] ASTM C192/C192M, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, American Society for Testing and Materials. (2016) 1-8.
- [32] BSI, BS EN 12390-3:2002 Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, (2002).
- [33] ASTM C 642-06, Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete, United States: American Society for Testing and Material. (2008) 11-13.
- [34] C.C. Test, T. Drilled, C. Concrete, B. Statements, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete ' s Ability to Resist Chloride, (2012) 1-8.
- [35] T. Celik, K. Marar, Effects of crushed stone dust on some properties of concrete, Cement and Concrete Research. 26 (1996) 1121-1130.
- [20] M. Tennich, M. Ben Oueddou, A. Kallel, Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack, Construction and Building Materials. (2017).
- [21] B.K. Meisuh, C.K. Kankam, T.K. Buabin, Effect of quarry rock dust on the flexural strength of concrete, Case Studies in Construction Materials. (2018).
- [22] ASTM Standard C33/C33M, Specification for Concrete Aggregates, ASTM International. (2016).
- [23] ASTM C494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, American Society for Testing and Materials. (2015) 1-9.
- [24] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concrete: microstructure, properties, and materials, 2006.
- [25] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials. (2016) 1-7.
- [26] BSI, BS EN 206-9:2010 Part 9: Additional Rules for Self-compacting Concrete (SCC), (2010).
- [27] ASTM C1611, Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02. (2009) 1-6.
- [28] EFNARC, Specification and Guidelines for Self-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.A. Hamedirad, S. Mirvalad, M. Attariyan, M.E. Kianifar, Stabilization of limestone dust in self-compacting concrete and its effect on workability, mechanical and durability properties , Amirkabir J. Civil Eng., 52(9) (2020) 2339-2356.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16143.6147](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16143.6147)

