

Durability of self-compacting earth concrete in corrosive environments to reduce greenhouse gases caused by the construction industry

Mehrza azizi¹, Kianoosh Samimi² *

1- Master student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Assistance Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

The use of self-compacting earth concrete (SCEC) as a novel and sustainable approach in the construction industry has gained significant attention in recent years. However, the development of these concretes faces challenges. One of these challenges is the lack of sufficient information regarding the durability of SCEC under aggressive conditions. Given that earth concretes are widely used in coastal areas such as the Persian Gulf due to their favorable thermal properties, assessing the durability of these concretes against corrosive environments is of great importance. In this study, with the aim of improving the durability of SCEC, the effect of partial replacement of Portland cement with silica fume on the resistance of this concrete to chloride ion penetration and carbonation was investigated. The findings of the study indicate a positive effect of the partial replacement of Portland cement with 10% silica fume on improving resistance to corrosive and carbonated environments. In the concrete specimen containing 50% clay and 10% silica fume (C50S10), the results of chemo-mechanical tests showed an 18% improvement in compressive strength after 90 days of exposure to CO₂. Additionally, the depth of carbonation penetration in this specimen was reduced by 49.9% compared to a similar mixture without silica fume (C50) at the age of 90 days. Given the importance of increasing the durability and sustainability of concrete structures in the construction industry, the results of this research can be a significant step towards the development of high-performance and environmentally friendly concretes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 August 2024

Revise Date: 02 October 2024

Accept Date: 25 October 2024

Keywords:

Earth concrete;
Durability;
Silica fume;
Compressive strength;
Environment

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.474655.3502](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.474655.3502)

*Corresponding author: Kianoosh Samimi
Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

دوام بتن حاکی خودمتراکم در برابر محیط‌های خورنده در راستای کاهش گازهای گلخانه‌ای ناشی از صنعت ساختمان

مهرزاد عزیزی^۱، کیانوش صمیمی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

استفاده از بتن حاکی خودمتراکم به عنوان روشی نوین و پایدار در صنعت ساختمان، در سال‌های اخیر به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، توسعه این نوع بتن‌ها با چالش‌هایی روبرو است. یکی از این چالش‌ها، نبود اطلاعات کافی در مورد دوام بتن حاکی خود متراکم در شرایط مخرب است. از آنجایی که بتن‌های حاکی به دلیل خواص حرارتی مطلوب، به ویژه در مناطق ساحلی همچون حاشیه خلیج فارس، می‌توانند به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرند، لذا ارزیابی دوام این نوع بتن‌ها در برابر محیط‌های خورنده بسیار حائز اهمیت است. در این پژوهش، با هدف بهبود دوام بتن حاکی خودمتراکم، تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند با دوده سیلیس بر مقاومت این بتن در برابر نفوذ یون کلراید و کربناته شدن مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های مطالعه حاکی از اثر مثبت جایگزینی نسبی سیمان پرتلند با ۱۰٪ دوده سیلیس بر بهبود مقاومت در برابر محیط‌های خورنده و کربناته را نشان می‌دهد. در نمونه بتنی حاوی ۵۰ درصد خاک رس و ۱۰ درصد دوده سیلیس (C50S10)، تغییرات شیمی مکانیکی نشان داد که پس از ۹۰ روز قرارگیری در معرض CO₂ شاهد بهبود ۱۸ درصدی مقاومت فشاری هستیم. علاوه بر این، عمق نفوذ کربناته در این نمونه ۴۹/۹ درصد نسبت به مخلوط مشابه بدون دوده سیلیس (C50) در سن ۹۰ روزه کاهش یافت. با توجه به اهمیت افزایش دوام و پایداری سازه‌های بتنی در صنعت ساختمان، نتایج این پژوهش می‌تواند گامی مهم در جهت توسعه بتن‌های با عملکرد بالا و سازگار با محیط‌زیست باشد.

کلمات کلیدی: بتن حاکی؛ دوام؛ دوده سیلیس؛ مقاومت فشاری؛ محیط‌زیست.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
	10.22065/jsce.2024.474655.3502	۱۴۰۳/۰۶/۰۳	۱۴۰۳/۰۷/۱۱	۱۴۰۳/۰۸/۰۴	۱۴۰۳/۰۸/۰۴	۱۴۰۴/۰۳/۳۱

*نویسنده مسئول:

کیانوش صمیمی

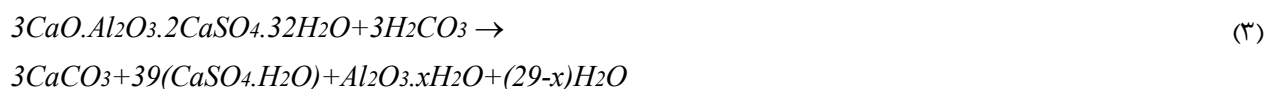
پست الکترونیکی:

k_samimi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

صنعت ساختمان به عنوان یکی از صنایع پر مصرف انرژی و مواد اولیه، سهم قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و تخریب محیط‌زیست دارد. بتن، به عنوان پرکاربردترین مصالح ساختمانی، نقش محوری در این مسئله ایفا می‌کند [۱، ۲]. بر اساس آخرین گزارش‌ها، تولید بتن تا سال ۲۰۵۰ به ۵/۵ میلیارد تن در سال خواهد رسید [۳]. طبق گزارش‌ها، حدود ۱/۷ تن منابع تجدید ناپذیر مانند سنگ آهک برای تولید ۱ تن سیمان پرتلند معمولی مورد نیاز است [۴]. علاوه بر این، در طول فرآیند تولید، در نتیجه کلسینه شدن در دمای بالا و متعاقب آن تجزیه کربنات کلسیم، تقریباً ۱ تن CO₂ در جو آزاد می‌شود که منجر به اثرات منفی زیست‌محیطی می‌شود [۵، ۶]. بر اساس مطالعه‌ای که توسط دانشگاه آکسفورد [۷] انجام شده است، پیش بینی می‌شود که انتشار کربن جهانی در طی ۵۰ سال آینده به ۲ تریلیون تن افزایش یابد. انتظار می‌رود که این افزایش قابل توجه در انتشار کربن منجر به افزایش ۴ درجه سانتی‌گراد دما شود که چالش‌های مهمی را از نظر تغییرات آب و هوایی و اثرات مرتبط با آن ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به هدف توافقنامه پاریس مبنی بر محدود کردن افزایش دمای جهانی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید بتن به یک ضرورت اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. اگر می‌خواهیم تا سال ۲۰۵۰ انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صفر برسانیم، باید از هم اکنون برای کنترل کربن تجسم شده اقدام کنیم. در این راستا ساخت‌وساز با مصالح خاکی به عنوان رویکردی جدید به تازگی توسط تعدادی از محققین پیشنهاد شده است [۸، ۹]. مزایای اصلی این سازه‌ها مصرف انرژی پایین آن‌ها برای تولید، در دسترس بودن در مقادیر زیاد، قابلیت بازیافت، ساخت کم هزینه و اجرای آسان است [۱۰]. استفاده از مصالح زمینی نه تنها مصرف انرژی برای ساخت‌وساز را کاهش می‌دهد، بلکه راندمان حرارتی را نیز بهبود می‌بخشد. این به معنای کاهش هزینه‌های انرژی مورد نیاز برای حفظ دمای مطلوب داخلی ساختمان است. استفاده از مصالح خاکی در دیوارها باعث ایجاد گرادیان دمایی ۱۲±۲ درجه سانتی‌گراد در طول روز و شب در ساختمان می‌شود [۱۱]. با این حال، این رویکرد دارای یک سری محدودیت‌ها، مانند نبود اطلاعات کافی در مورد دوام بتن خاکی و پایداری آن در شرایط مخرب است.

دوام در سازه‌های بتنی یکی از موضوعات پر اهمیت و تأثیرگذار بر عمر مفید این نوع سازه‌ها است. خرابی‌های ناشی از نفوذ یون کلرید و کربناته شدن بتن از جدی‌ترین مشکلاتی است که عمر مفید سازه‌ها را کاهش می‌دهد [۱۲]. یون‌های کلرید می‌توانند از طریق قرار گرفتن در معرض آب دریا، نمک‌های یخ‌زدا یا محیط‌های دریایی به بتن نفوذ کنند. هنگامی که یون‌های کلرید به آرماتور فولادی داخل بتن می‌رسند، می‌توانند واکنش‌های خوردگی را ایجاد کنند که منجر به تشکیل زنگ‌زدگی می‌شود. شکل دیگری از خوردگی بتن کربناته شدن است که باعث کاهش قلیائیت بتن می‌شود که متعاقباً می‌تواند منجر به خوردگی آرماتورهای فولادی تعبیه شده گردد. کربناته شدن ماتریس سیمانی را می‌توان با سه واکنش شیمیایی زیر، به روشی ساده توصیف کرد (معادلات زیر را ببینید) [۱۳].



محصول اصلی کربنات بتن، کربنات کلسیم (CaCO₃) است که در نتیجه برهمکنش هیدروکسید کلسیم (Ca(OH)₂) با دی‌اکسید کربن (CO₂) به وجود می‌آید (واکنش ۱). علاوه بر این، کربنات کلسیم به دلیل برهمکنش سایر فازهای هیدراته سیمان با دی‌اکسید کربن (به ویژه با هیدرات‌های سیلیکات کلسیم، C-S-H) در مقادیر کمتری تشکیل می‌شود. در طول عمر سازه‌های بتنی، فرآیند کربناسیون عمدتاً اثرات مخربی به همراه دارد. یکی از مهم‌ترین دلایل این امر، تغییر محیط قلیایی داخل بتن است. بتن به عنوان یک پوشش محافظ عمل می‌کند و از خوردگی میلگردهای فولادی درون خود جلوگیری می‌کند [۱۴]. این عملکرد به لطف لایه اکسیدی است که روی سطح میلگردها تشکیل می‌شود. اما کربناسیون با کاهش PH بتن به زیر ۹/۵، این لایه محافظ را از بین می‌برد و در نتیجه، میلگردها مستعد خوردگی شده و بتن نیز در معرض تخریب قرار می‌گیرد.

تثبیت خاک‌های رسی به منظور بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن‌ها، از دیرباز مورد توجه مهندسان عمران بوده است. سیمان و آهک به عنوان افزودنی‌های سنتی در این فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، این مواد به تنهایی قادر به افزایش قابل توجه مقاومت و دوام این خاک‌ها نیستند. به همین دلیل، پژوهشگران به دنبال مواد افزودنی جدیدی هستند که بتوانند به طور مؤثرتری خواص مکانیکی خاک‌های رسی را بهبود بخشند. یکی از این مواد، دوده سیلیس است. دوده سیلیس با داشتن ذرات بسیار ریز و سطح ویژه بالا، به عنوان یک افزودنی پوزولانی عمل کرده و با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن واکنش می‌دهد. این واکنش منجر به تشکیل محصولات هیدراتاسیون جدیدی می‌شود که باعث افزایش استحکام و دوام بتن می‌شوند [۱۵-۱۷]. مطالعات نشان داده‌اند که افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های سیمانی تأثیر قابل توجهی بر ساختار میکروسکوپی آن‌ها دارد [۱۸]. این ماده باعث تغییر در جهت‌گیری کریستال‌های هیدروکسید کلسیم (CH) و افزایش ضخامت ناحیه انتقال سطحی (ITZ^۱) می‌شود. این تغییرات ساختاری به نوبه خود منجر به بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن می‌شوند [۱۹، ۲۰]. تحقیقات عادل^۲ و همکاران [۲۱] نشان می‌دهد که جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس تا ۵ درصد، علاوه بر بهبود کارایی بتن، باعث افزایش مقاومت و دوام آن در برابر شرایط محیطی خورنده می‌شود. دوده سیلیس با پر کردن منافذ میکروسکوپی بتن، نفوذپذیری آن را کاهش داده و در نتیجه از نفوذ یون‌های مهاجم مانند کلر و سولفات جلوگیری می‌کند. در مطالعه دیگری اول حق^۳ و همکاران [۲۲] پتانسیل استفاده از خاک رس بنتونیت (BC) و دوده سیلیس را به عنوان جایگزینی ترکیبی برای سیمان بررسی کرده‌اند. آن‌ها گزارش کردند که هم‌افزایی بنتونیت و دوده سیلیس در مخلوط‌های بتن مقاومت فشاری، کششی و خمشی را افزایش داد. همچنین تحقیقات بر روی بتن حاوی متاکائولن (MK) و دوده سیلیس (SF) به عنوان افزودنی‌های پوزولانی نشان داده است که این مواد به ساختارهای منفذی متراکم‌تر و افزایش استحکام در محصولات مبتنی بر سیمان کمک می‌کنند. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که هر دو افزودنی عملکرد فوق‌العاده‌ای در افزایش دوام بتن از خود نشان می‌دهند [۲۳، ۲۴].

در حالی که نشان داده شده است که دوده سیلیس در افزایش استحکام و دوام کامپوزیت‌های سیمانی مفید است، با این حال، فقدان اطلاعات در مورد اثرات هم‌افزایی بین دوده سیلیس و خاک رس در بتن حاکی و دوام بتن حاکی در محیط‌های تهاجمی، نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه را نشان می‌دهد. از این رو، هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار دوامی بتن حاکی خود متراکم (SCEC^۴) حاوی دوده سیلیس است. در این پژوهش، با رویکردی نوآورانه به ارائه‌ی طرح اختلاط بتن حاکی خودتراکم پرداخته شده است. این طرح با تلفیق ویژگی‌های منحصر به فرد بتن‌های حاکی و بتن‌های خودتراکم، به دنبال رفع محدودیت‌های موجود در بتن‌های حاکی سنتی همچون نیاز به تراکم مکانیکی و سرعت اجرای پایین می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بتن حاکی خودتراکم پیشنهادی، توانایی پر کردن قالب‌ها را بدون نیاز به ویبره داشته و در نتیجه سرعت اجرای عملیات بتن‌ریزی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در این راستا، با هدف ارزیابی خواص تازه بتن و دوام بلندمدت مخلوط‌های بتن حاکی خودتراکم حاوی دوده سیلیس، آزمایش‌های جریان اسلامپ و جعبه L به عنوان شاخص‌های روانی بتن تازه و آزمایش‌های نفوذپذیری یون کلرید و کربناته شدن به عنوان شاخص‌های دوام انجام شد. همچنین، برای بررسی ریزساختار و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM^۵) همراه با تحلیل پراش انرژی پرتو ایکس (EDX^۶) استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن دوده سیلیس به مخلوط‌های بتنی، به دلیل واکنش پوزولانی و پرکننده بودن ذرات آن، باعث کاهش نفوذپذیری بتن نسبت به یون کلرید و دی‌اکسید کربن شده و در نتیجه دوام بتن را افزایش می‌دهد. این امر حاکی از آن است که استفاده از دوده سیلیس به عنوان یک افزودنی فعال در بتن، راهکاری مناسب برای تولید بتن‌های با دوام بالا و سازگار با محیط‌زیست می‌باشد.

^۱ Interfacial Transition Zone.

^۲ Adil et al.

^۳ Ul Haq et al.

^۴ Self Consolidating Earth Concrete.

^۵ Scanning electron microscopy.

^۶ Energy-Dispersive X-ray.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

خاک رس مورد استفاده در این مطالعه از معادن اطراف تهران تأمین شد. دوده سیلیس با وزن مخصوص $2/24 \text{ gr/cm}^3$ و سطح ویژه $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$ از کارخانه ژیکاوا مشهد تهیه شده است. سیمان پرتلند نوع II با وزن مخصوص $3/15 \text{ gr/cm}^3$ مطابق استاندارد ASTM-C150 [25] از کارخانه سیمان تهران تهیه شد. همچنین از شن و ماسه استخراج شده از معادن نزدیک سد هراز با وزن مخصوص $2/71 \text{ gr/cm}^3$ و $2/65 \text{ gr/cm}^3$ و میزان جذب آب $0/68$ و $1/8$ درصد استفاده شد. سنگدانه های درشت شامل مواد زاویه دار خرد شده در اندازه های ۶ تا ۱۲ میلی متر بودند و سنگدانه های ریز طبیعی حداکثر اندازه ۶ میلی متر داشتند. تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، خاک رس و دوده سیلیس در جدول ۱ ارائه شده است. در آماده سازی کلیه نمونه های بتنی نیز از آب آشامیدنی استفاده شد.

جدول ۱: تحلیل شیمیایی و فیزیکی سیمان، دوده سیلیس و خاک رس.

عناصر (/.)	سیمان پرتلند (نوع II)	خاک رس	دوده سیلیس
SiO ₂	۲۱/۴۲	۵۲/۹۸	۹۴/۱۷
Al ₂ O ₃	۴/۹	۱۴/۲۷	۰/۵۵
Fe ₂ O ₃	۳/۹۳	۴/۷۶	۱/۲۹
CaO	۶۳/۵۶	۱۰/۳۶	۱
MgO	۱/۶۸	۳/۴۹	۰/۳۱
SO ₃	۲/۱۳	۰/۱۱۸	۰/۴۵
TiO ₂	—	۰/۶۱۸	—
P ₂ O ₅	—	۰/۱۹۸	—
Na ₂ O	۰/۳۴	۱/۱۶	۰/۲۲
K ₂ O	۰/۵۳	۲/۵۶	۰/۸۱
C ₃ S	۵۱/۳۵	—	—
C ₂ S	۲۲/۷۱	—	—
C ₃ A	۶/۳۴	—	—
C ₄ AF	۸/۹۲	—	—
Attenberg limits:			
Liquid limit, %	—	۲۸	—
Plastic limit, %	—	۱۱	—
Plasticity index	—	۱۷	—
Physical characteristics:			
specific surface area (m ² /kg)	۲۹۰	۵۱۲	۲۰۰۰۰
specific gravity (gr/cm ³)	۳/۱۵	۲/۶۳	۲/۲۴

۲-۲- آماده سازی نمونه ها

۲-۲-۱- روند اختلاط بتن

برای تهیه مخلوط های SCEC از همزن ۱۵۰ لیتری استفاده شد. فرآیند پیمانه کردن با ترکیب یک سوم آب لازم با سنگدانه های ریز و درشت در داخل همزن برای یک دوره اختلاط اولیه سه دقیقه ای آغاز شد. پس از آن، مواد چسباننده شامل سیمان، خاک رس و دوده سیلیس به همزن اضافه شدند و به مدت یک دقیقه دیگر مخلوط ادامه یافت. در مرحله بعد، فوق روان کننده و دوسوم باقی مانده آب با هم ترکیب شدند و داخل همزن ریخته شدند. مرحله نهایی اختلاط به مدت دو دقیقه انجام شد تا اطمینان حاصل شود که تمام اجزا به

طور کامل و یکنواخت با هم مخلوط شده‌اند. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها بلافاصله با ورقه‌های پلاستیکی پوشانده شدند تا از تبخیر آب و ایجاد ترک‌های سطحی جلوگیری شود. سپس، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در اتاقی با دمای 22 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند [۲۶].

۲-۳- طرح اختلاط

این مطالعه بر روی نه طرح اختلاط بتن مختلف با نسبت ثابت آب به سیمان (W/Cm) برابر با ۰/۴ انجام شد. طرح اختلاط بتن شاهد (CC) که به عنوان مبنای مقایسه استفاده شد، شامل سیمان پرتلند معمولی بدون هیچ‌گونه افزودنی از دوده سیلیس یا خاک رس بود. برای بررسی تأثیر خاک رس و دوده سیلیس، چهار مخلوط اضافی به نام‌های C50، C60، C70 و C80 ساخته شد. در این مخلوط‌ها به ترتیب ۵۰ درصد، ۶۰ درصد، ۷۰ درصد و ۸۰ درصد از سیمان با خاک رس جایگزین شد. علاوه بر این، چهار مخلوط دیگر با افزودن دوده سیلیس (SF) به چهار طرح اختلاط قبلی ساخته شد. این مخلوط‌ها با نام‌های C50S10، C60S10، C70S10 و C80S10 شناخته شدند و در آن‌ها، دوده سیلیس معادل ۱۰ درصد جایگزین سیمان باقی در چهار طرح قبلی شد. برای استاندارد کردن کارایی تمام مخلوط‌های SCEC، قطر جریان اسلامپ با دقت به 700 ± 30 میلی‌متر تنظیم شد. جدول شماره ۲ طرح اختلاط نمونه‌های بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۲: طرح اختلاط نمونه‌های SCEC.

نام	سیمان (kg/m ³)	خاک رس (kg/m ³)	دوده سیلیس (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)	W/Cm
CC	۴۵۰	-	-	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۲/۵	۰/۴
C50	۲۲۵	۲۲۵	-	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۳	۰/۴
C60	۱۸۰	۲۷۰	-	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۱	۰/۴
C70	۱۳۶	۳۱۵	-	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۰	۰/۴
C80	۹۰	۳۶۰	-	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۴	۰/۴
C50S10	۲۰۲/۵	۲۲۵	۲۲/۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۸/۳	۰/۴
C60S10	۱۶۲	۲۷۰	۱۸	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۹/۱	۰/۴
C70S10	۱۲۱/۵	۳۱۵	۱۳/۵	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۰	۰/۴
C80S10	۸۱	۳۶۰	۹	۷۹۰	۷۹۰	۱۸۰	۱۴	۰/۴

۳- روش آزمایش

۳-۱- خواص تازه بتن خودتراکم

۳-۱-۱- آزمایش جریان اسلامپ

در این مطالعه، آزمایش جریان اسلامپ مطابق با استاندارد EFNARC [۲۷] انجام شد. مقدار فوق روان کننده با دقت تنظیم شد تا مخلوطی همگن با قطر جریان اسلامپ 25 ± 700 میلی‌متر حاصل شود. برای انجام آزمایش، مخروط اسلامپ در مرکز یک سطح صاف و مرطوب قرار گرفت. سپس با استفاده از کمچه ۶ لیتر بتن به داخل مخروط ریخته شده و سطح آن با دقت تسطیح و صاف می‌شود. لازم است از هرگونه تراکم داخلی یا خارجی بتن خودداری شود تا بتن به طور طبیعی داخل مخروط جریان یابد. هنگامی که مخروط به طور

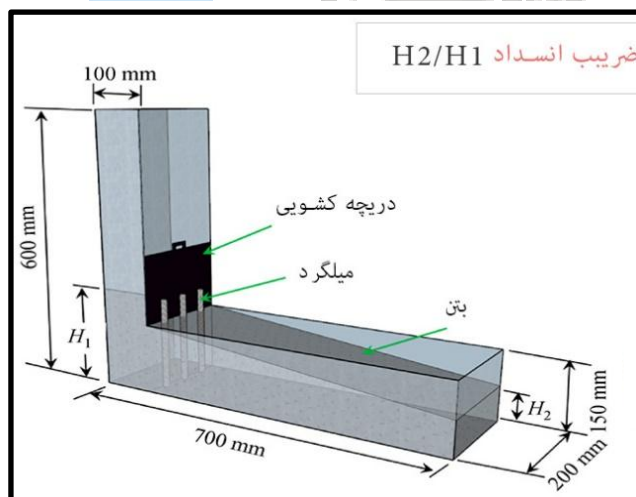
کامل پر شد، به آرامی با سرعت ثابت بلند می‌شود. آزمایش تا زمانی ادامه می‌یابد که جریان بتن متوقف شود و در این مرحله قطرهای عمود بر دایره حاصل اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها ثبت می‌شود. نحوه انجام آزمایش در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است.



شکل ۱: آزمایش جریان اسلامپ

۳-۱-۲- آزمایش جعبه L

عملکرد بتن خاکی خود تراکم (SCEC) در حضور انسداد میلگرد با استفاده از آزمون جعبه L، مطابق با استاندارد EFNARC [۲۷]، ارزیابی شد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، دستگاه جعبه L از دو بخش اصلی یعنی عمودی و افقی تشکیل شده است که توسط یک دروازه با سه میله به قطر ۱۲ میلی‌متر از هم جدا شده و به طور یکنواخت در عرض قسمت افقی توزیع شده است. ارتفاع بتن در قسمت‌های عمودی (H_1) و انتهای افقی (H_2) در این دستگاه اندازه‌گیری شد. نسبت H_2/H_1 به عنوان نشانه‌ای از جریان پذیری SCEC در حضور یک مانع در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲: آزمایش L-box برای اندازه‌گیری کارایی.

۳-۲- خواص دوام

۳-۲-۱- آزمایش تهاجم یون کلر در رژیم ناپایدار

در این پژوهش، تهاجم یون کلرید در شرایط ناپایدار برای تمامی مخلوط‌های بتنی بررسی شد. برای این منظور، آزمون نفوذ سریع کلرید (RCMT⁷) مطابق با استاندارد NT Build 492 [۲۸] پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری انجام شد. برای هر مخلوط، سه نمونه استوانه‌ای با ضخامت ۵۰ میلی‌متر از نمونه‌های استوانه‌ای بتنی ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متری برش داده شد. پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها در سلول‌های آزمایش قرار گرفتند و نمونه‌های بتنی از یک طرف در تماس با محلول ۱۰ درصد NaCl و از طرف دیگر با محلول ۰/۳ مولار NaOH قرار گرفتند (شکل ۳ را ببینید). با استفاده از الکترودهایی که در دو انتهای نمونه قرار داده شده‌اند، اختلاف پتانسیلی متناسب با جریان اولیه عبوری اعمال می‌شود که باعث نفوذ یون‌های کلرید به داخل نمونه می‌شود. برای تعیین دقیق عمق نفوذ یون‌های کلرید، پس از اتمام آزمایش، نمونه‌ها شکافته شده و سطح مقطع آن‌ها با محلول نیترات نقره ۰/۱ مولار اسپری شد. با این کار، محل نفوذ یون‌های کلرید به وضوح مشخص می‌شود. ضریب مهاجرت حالت ناپایدار (D_{nssm}) مطابق با معادله (۴) محاسبه شد.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+t)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (4)$$

D_{nssm} : ضریب تهاجم یون کلرید در شرایط ناپایدار ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

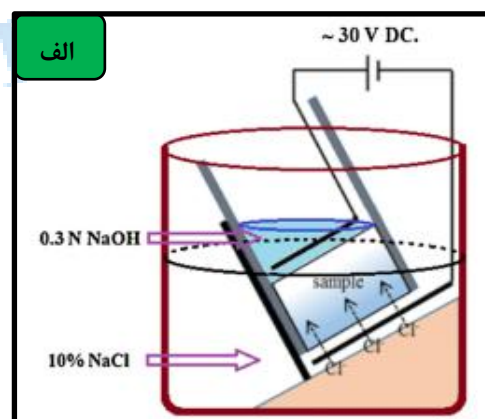
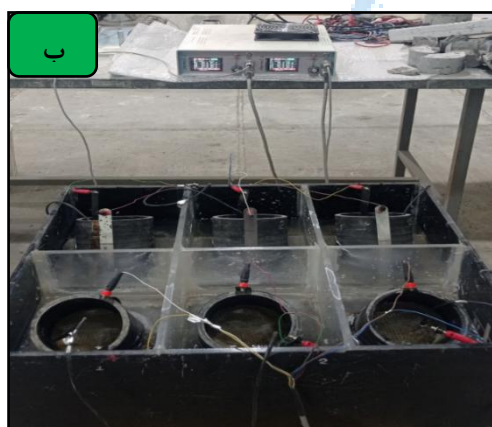
U : مقدار مطلق ولتاژ اعمال شده (ولت)

T : میانگین دمای اولیه و نهایی محلول آند (درجه سانتی‌گراد)

L : ضخامت نمونه (میلی‌متر)

x_d : میانگین عمق نفوذ (میلی‌متر)

t : مدت زمان آزمایش (ساعت)



شکل ۳: (الف): طرح کلی محفظه سلول دستگاه RCMT؛ (ب): دستگاه RCMT ساخته شده برای اندازه‌گیری ضریب مهاجرت

⁷ Rapid Chloride Migration Test.

کلرید.

۳-۲-۲- آزمایش کربناتاسیون تسریع شده

پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، آزمایش کربناتاسیون تسریع شده با قرار دادن نمونه‌های بتنی در معرض غلظت ۵ درصدی CO_2 و رطوبت نسبی 2 ± 65 درصد انجام شد. شکل ۴ دستگاه مورد استفاده برای شبیه‌سازی کربناتاسیون تسریع شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. غلظت CO_2 و رطوبت نسبی به صورت خودکار با استفاده از یک کنترل کننده منطقی قابل برنامه‌ریزی (PLC^8) کنترل شدند. برای انجام آزمایش در یک محیط ایزوله، تمام اتصالات عایق‌بندی شدند. برای انجام این آزمایش، سه نمونه استوانه‌ای با ضخامت ۵۰ میلی‌متر از یک نمونه بتنی استوانه‌ای با ابعاد 100×200 میلی‌متر برش داده شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها را به مدت ۱۴ روز در دمای (2 ± 40) درجه سانتی‌گراد در یک کوره پیش‌گرمایش کرده و سپس در محفظه کربناتاسیون قرار دادیم. سطح جانبی هر استوانه با رزین اپوکسی پوشش داده شد تا اطمینان حاصل شود که نفوذ دی‌اکسید کربن فقط از سطوح شکافته شده رخ می‌دهد و از این طریق یک نفوذ دو بعدی ایجاد شود. تغییرات وزن تمام نمونه‌ها تا پایان آزمایش (۹۰ روز نگهداری در محفظه) هر هفته اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، عمق نفوذ CO_2 در ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز آزمایش با استفاده از محلول فنول فتالین بر روی سطوح شکافته شده تعیین شد. محلول نشانگر فنول فتالین با حل کردن ۰/۱ گرم فنول فتالین در ۸۰ سی‌سی اتانول ۹۵ درصد و رقیق‌سازی آن تا ۱۰۰ سی‌سی با آب تهیه شد. پس از اسپری کردن محلول نشانگر، میانگین عمق ناحیه بی‌رنگ فنول فتالین از هشت نقطه عمود بر سطح شکافته شده اندازه‌گیری شد. این فرآیند آماده‌سازی طبق توصیه استاندارد آزمایشی XP P18-458 [29] انجام شد.



شکل ۴: طرح کلی آزمایش کربناتاسیون تسریع شده.

۳-۳- تحلیل ریزساختار

۳-۳-۱- تحلیل FESEM-EDX

بررسی دقیق ریزساختار و ترکیب شیمیایی نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FEI ESEM Quanta 200) مجهز به سنجشگر پراش انرژی پرتو ایکس (EDX-MAP) استفاده شد. پیش از انجام تحلیل، به منظور افزایش هدایت الکتریکی سطح نمونه‌ها و بهبود کیفیت تصویر، سطح نمونه‌ها با پوشش نازکی از طلا-پالادیوم پوشش دهی شد. سپس، تحلیل عنصری به روش EDX-MAP بر روی نمونه‌های آماده شده انجام گرفت تا ترکیب دقیق عناصر تشکیل‌دهنده آن‌ها مشخص شود.

⁸ Programmable Logic Controller.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- خواص تازه بتن خودمتراکم

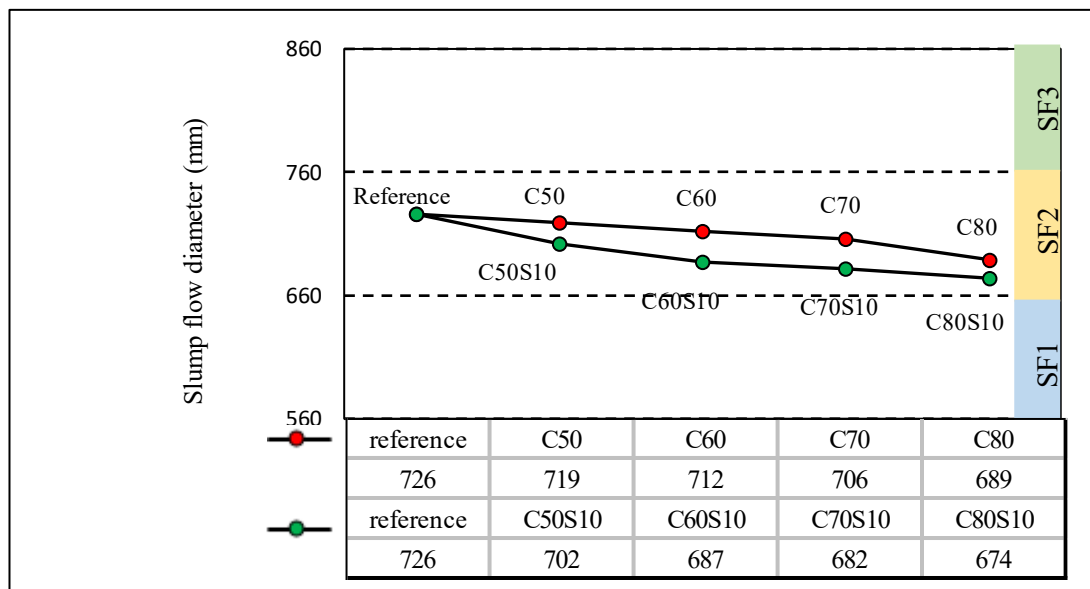
۴-۱-۱- جریان اسلامپ

مقادیر قطر جریان جریان اسلامپ و L-box بتن خاکی خودمتراکم تولید شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همچنین نمودار جریان اسلامپ مخلوط‌های SCEC در شکل ۵ ارائه گردیده است. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۵، مقادیر اسلامپ در محدوده ۶۶۰ تا ۷۶۰ میلی‌متر قرار دارند و با افزایش درصد جایگزینی خاک رس به ازای سیمان به طور سیستماتیک کاهش می‌یابند. مخلوط C50 و C80 مقدار جریان اسلامپ را در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب ۱٪ و ۵/۱٪ کاهش داد. از طرفی جایگزینی ۱۰ درصدی دوده سیلیس موجب کاهش قطر جریان جریان اسلامپ شد. در نمونه C50S10 مقدار جریان اسلامپ نسبت به نمونه شاهد ۳/۳ درصد کاهش یافت. از طرفی کمترین مقدار جریان اسلامپ به مخلوط C80S10 نسبت داده شد. دوده سیلیس به دلیل سطح ویژه بسیار بالا، آب اختلاط را به خود جذب کرده و باعث افزایش ویسکوزیته بتن می‌شود. افزایش ویسکوزیته باعث کاهش روانی بتن و در نتیجه کاهش جریان اسلامپ می‌شود. همچنین دوده سیلیس به دلیل ریز بودن ذرات، فضای خالی بین ذرات سیمان و سنگدانه‌ها را پر می‌کند. این امر باعث کاهش تخلخل بتن و در نتیجه افزایش مقاومت آن می‌شود. اما از طرفی، با پر شدن فضای خالی، آب کمتری برای روان‌سازی بتن در دسترس بوده و این نیز منجر به کاهش جریان اسلامپ می‌شود. بر اساس یافته‌های مستعلی و دالوند^۹ [۳۰] جایگزینی دوده سیلیس کارایی مخلوط‌ها را کاهش می‌دهد که این نتایج با یافته‌های تحقیقات ما مطابقت دارد.

جدول ۳: نتایج خواص تازه مخلوط‌های SCEC

Mix ID	جریان اسلامپ		L (h ₂ /h ₁)
	Dia (mm)	T ₅₀ (s)	
reference	۷۲۶	۲/۳۳	۰/۹۵
C50	۷۱۹	۲/۵۴	۰/۹۳
C60	۷۱۲	۲/۶۳	۰/۹۱
C70	۷۰۶	۲/۷۶	۰/۸۷
C80	۶۸۹	۲/۸۱	۰/۸۴
C50S10	۷۰۲	۲/۴۵	۰/۹۱
C60S10	۶۸۷	۲/۴۷	۰/۸۸
C70S10	۶۸۲	۲/۴۵	۰/۸۳
C80S10	۶۷۴	۲/۴۳	۰/۸۴

⁹ Mastali and Dalvand.

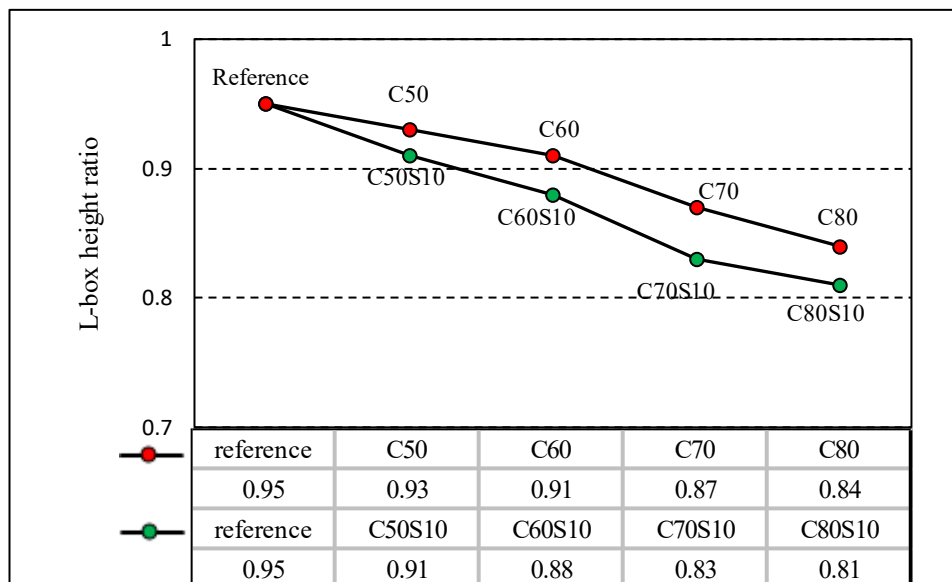


شکل ۵: مقادیر جریان اسلامپ مخلوط‌های آزمایش.

۴-۱-۲- جعبه L

شکل ۶ نتایج آزمایش L-box را ارائه می‌دهد. بر اساس این شکل، نسبت L-box مخلوط‌ها که نشان‌دهنده روانی بتن است، بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ نوسان داشته است. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش میزان جایگزینی خاک رس، نسبت L-box افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، مخلوط‌هایی که درصد جایگزینی خاک رس کمتری دارند، روانی بالاتری از خود نشان داده‌اند. برای مثال، مخلوط C50 نسبت به مخلوط شاهد، ۲/۱ درصد کاهش در نسبت L-box را تجربه کرده است. در صورتی که جایگزینی ۸۰ درصدی سیمان با خاک رس (C80) موجب کاهش ۱۱/۶ درصدی نسبت L-box شد.

از سوی دیگر، افزودن دوده سیلیس به میزان ۱۰ درصد نسبت L-box را کاهش داده که حاکی از کاهش روانی بتن است. این کاهش به سطح بالای ذرات دوده سیلیس در مقایسه با سیمان و خاک رس نسبت داده می‌شود. با توجه به شکل ۶، مخلوط‌های C50S10 و C50 در مقایسه با نمونه شاهد، کاهش به ترتیب ۲/۴٪ و ۱/۲٪ در نسبت L-box را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج آزمایش‌های Slump flow و L-box در شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد که این دو آزمایش نتایج مشابهی را ارائه داده‌اند. این روش‌ها برای ارزیابی برخی از خواص جریان بتن مانند قابلیت پر کردن، عبور از میان میلگردها و مقاومت در برابر جدایشگی به کار می‌روند.



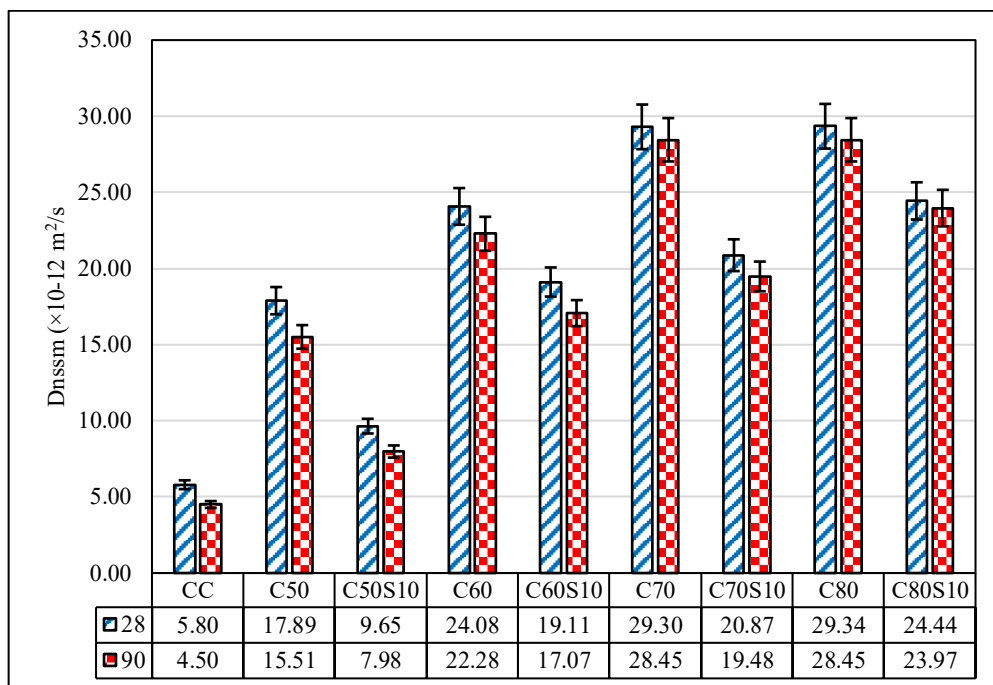
شکل ۶: نسبت ارتفاع L-box مخلوط‌های آزمایش.

۴-۲- خواص دوام

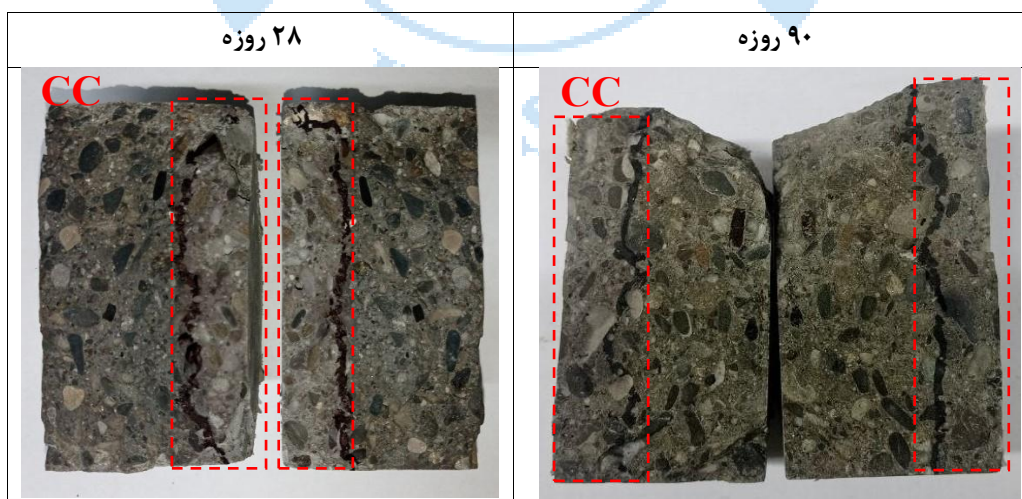
۴-۲-۱- مهاجم یون کلر در رژیم ناپایدار

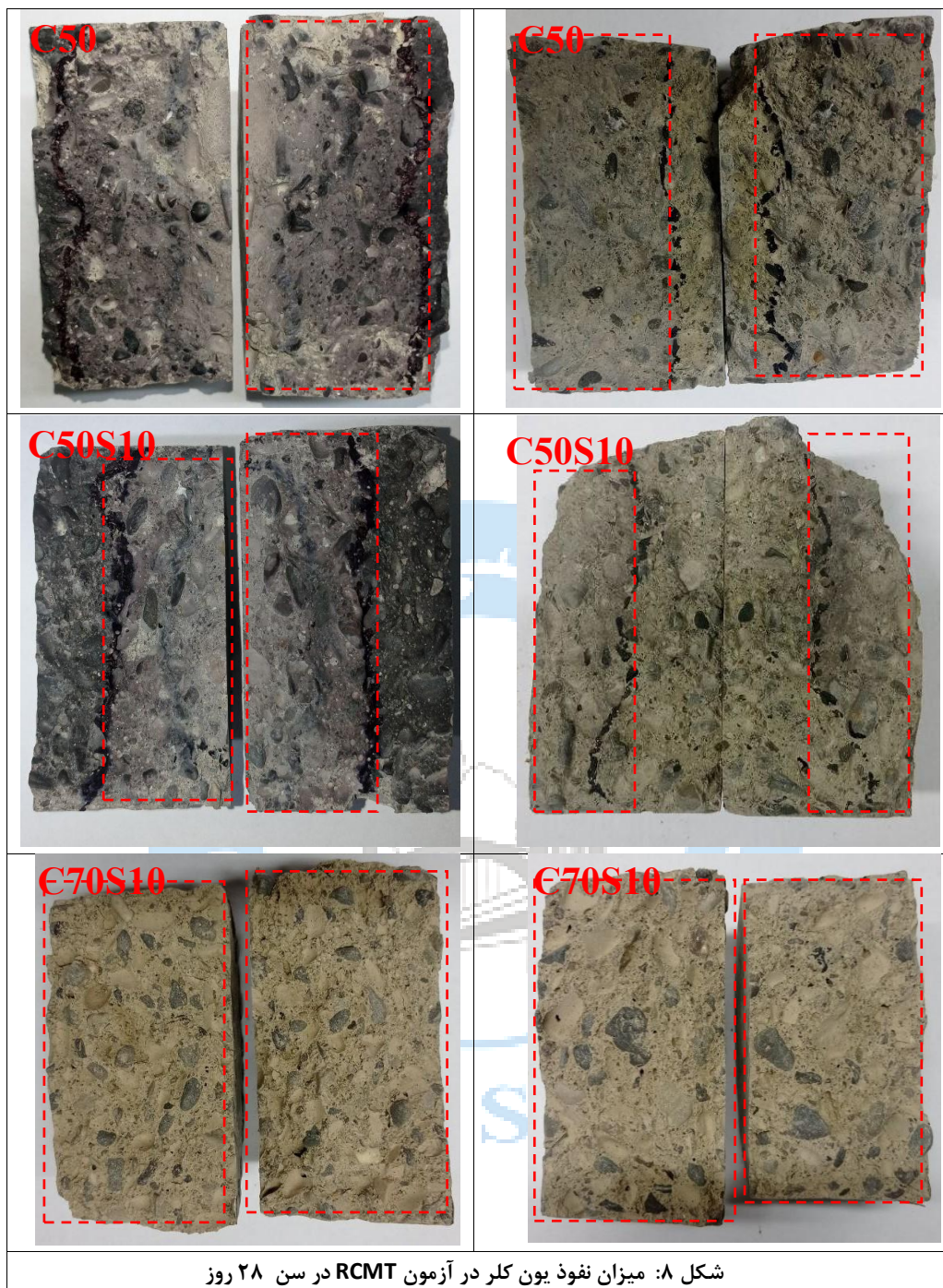
در این پژوهش، مقاومت بتن‌های حاوی خاک رس و دوده سیلیس در برابر نفوذ یون کلرید مورد بررسی قرار گرفته است. یون‌های کلرید یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب بتن در محیط‌های دریایی محسوب می‌شوند. برای ارزیابی نفوذپذیری کلرید در بتن، از آزمایش مهاجرت یون کلرید در حالت ناپایدار (RCMT) استفاده شده است. این آزمایش، یک روش تسریع شده برای تعیین مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید به شمار می‌آید. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، ضریب مهاجرت در حالت ناپایدار برای مخلوط‌های مورد مطالعه پس از ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که جایگزینی خاک رس با درصد بالاتر از ۵۰ درصد به جای سیمان منجر به افزایش قابل توجهی در مقادیر ضریب مهاجرت شد. مقایسه نتایج به دست آمده برای مخلوط‌های دوتایی (حاوی سیمان و خاک رس) و سه‌تایی (حاوی سیمان، خاک رس و دوده سیلیس) نشان می‌دهد که مخلوط‌های سه‌تایی مقاومت بسیار بالاتری در برابر نفوذ کلرید دارند. ضرایب مهاجرت یون کلرید مخلوط‌های C50 (مخلوط دوتایی) و C50S10 (مخلوط سه‌تایی) در سن ۲۸ روزگی به ترتیب ۲۰۸/۵٪ و ۶۶/۴٪ بیشتر از مخلوط کنترل بودند. از طرفی، با افزایش سن عمل‌آوری بتن، ضریب مهاجرت یون کلرید کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل پیشرفت هیدراتاسیون سیمان و کاهش تخلخل بتن رخ می‌دهد [۳۱]. در واقع، با گذشت زمان، بتن متراکم‌تر شده و در نتیجه مقاومت آن در برابر نفوذ یون‌های مهاجم مانند کلرید افزایش می‌یابد. شکل ۸ میزان عمق نفوذ نمونه‌ها پس از اسپری محلول نیترات نقره بر روی مخلوط‌ها به نمایش گذاشته شده است. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که در مخلوط‌های حاوی خاک رس مانند (C80)، به دلیل تخلخل بالای خاک رس، ضریب مهاجرت یون کلرید به طور قابل توجهی بالاتر از مخلوط کنترل است. برای مخلوط C80، ضریب مهاجرت یون کلرید به ترتیب ۴۰۵/۸٪ و ۵۳۲/۲٪ نسبت به مخلوط کنترل در ۲۸ و ۹۰ روز بالاتر بود. این مقدار برای مخلوط C80S10 (مخلوط حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس) در ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۳۲۱/۴٪ و ۴۳۲/۶٪ بیشتر از مخلوط کنترل بود. افزودن دوده سیلیس به این مخلوط‌ها، به دلیل واکنش پوزولانی و پر کردن ریز منافذ بتن، باعث کاهش قابل توجهی در ضریب مهاجرت یون کلرید می‌شود. این امر به

دلیل تولید ژل CSH اضافی در اثر واکنش پوزولانی و همچنین پر شدن ریز منافذ بتن توسط ذرات ریز دوده سیلیس است. ژل CSH تولید شده باعث ایجاد ساختاری متراکم تر و یکنواخت تر در بتن شده و در نتیجه مقاومت آن در برابر نفوذ یون های کلرید افزایش یافته است. این نتایج با نتایج قبلی مطابقت دارد [۳۲].



شکل ۷: ضریب مهاجرت مخلوط های مختلف در ۲۸ و ۹۰ روز عمل آوری.





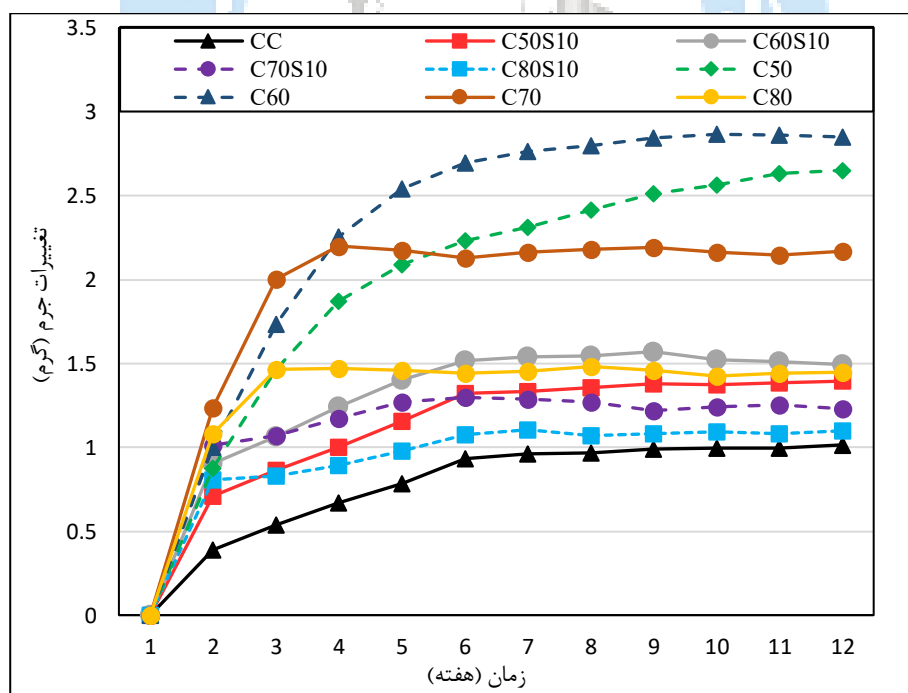
۴-۲-۲-کربناتاسیون

۴-۲-۲-۱-تغییرات جرم

شکل ۹ نتایج تغییرات جرم را به عنوان تابعی از زمان کربناتاسیون نشان می‌دهد. مخلوط‌های CC و C60 با افزایش جرم ۱/۰۲٪ و ۲/۸۵٪ پس از ۹۰ روز آزمایش، به ترتیب کمترین و بیشترین افزایش جرم را تحت یک آزمایش کربناتاسیون تسریع شده نشان می‌دهند. مکانیسم کربناته شدن در بتن تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله ساختار منافذ و واکنش‌های بین CO₂ و ترکیبات پورتلندیت و C-S-H قرار دارد. پس از کربناتاسیون، تخلخل ماتریس سخت شده و در نتیجه ویژگی‌های انتقال تغییر می‌کند که ممکن است مثبت یا منفی باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده، چندین بینش مهم در مورد تغییر جرم بتن در هنگام قرار گرفتن در معرض محیط کربناته ظاهر می‌شود. اولاً، نفوذ دی اکسید کربن به داخل بتن باعث افزایش تغییر جرم می‌شود. ثانیاً، نفوذ رطوبت از طریق ساختار متخلخل منجر به افزایش جرم بتن می‌شود. هر چه نفوذپذیری بالاتر باشد، سرعت کربناتاسیون در بتن بیشتر است. شکل ۹ افزایش قابل توجهی در افزایش جرم را در مخلوط‌های C70 و C80 در شروع آزمایش نشان می‌دهد. در حالی که، شیب تغییرات در افزایش جرم برای این مخلوط‌ها به ترتیب پس از هفته‌های چهارم و سوم آزمایش ثابت باقی ماند. به نظر می‌رسد به دلیل پایین بودن میزان CH و نفوذپذیری بالای نمونه‌های حاوی ۷۰ و ۸۰ درصد رس، پس از چند هفته، رطوبت محفظه باعث اشباع شدن نمونه‌ها می‌شود. بر اساس یافته‌های دانگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۳) [۳۳]، در رطوبت نسبی بسیار بالا، اشباع منافذ باعث کاهش انتشار CO₂ می‌شود. به این ترتیب رطوبت جذب نمی‌شود و همچنین دی اکسید کربن به داخل نمونه نفوذ نمی‌کند که منجر به کاهش تشکیل کربنات کلسیم می‌شود. بنابراین در نمونه‌های حاوی ۷۰٪ و ۸۰٪ خاک رس عامل دوم یعنی نفوذ رطوبت تأثیر بیشتری بر افزایش جرم دارد. از سوی دیگر، نمونه‌های حاوی ۵۰ و ۶۰ درصد خاک رس نسبت به نمونه‌های حاوی ۷۰ و ۸۰ درصد رس، محتوای CH بالاتر و نفوذپذیری کمتری دارند. این نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها کربنات کلسیم بیشتری نسبت به سایر مخلوط‌ها تولید می‌کنند.

از سوی دیگر، نمونه حاوی دوده سیلیس افزایش جرم کمتری در مقایسه با مخلوط بدون دوده سیلیس نشان داد. این می‌تواند مربوط به مصرف پرتلندیت از واکنش پوزولانی باشد. فلذا، پرتلندیت کمتری برای واکنش با CO₂ برای تولید کربنات کلسیم وجود خواهد داشت. علاوه بر این، ریزساختار بتن به دلیل هم‌افزایی بین دوده سیلیس و ماتریس سیمان، متراکم‌تر خواهد بود، که نتیجه خواص پرکننده دوده سیلیس است. با این حال، فرآیند اشباع همان‌طور که در بالا توضیح داده شد برای نمونه‌هایی که حاوی ۷۰ و ۸۰ درصد خاک رس با دود سیلیس هستند، به قوت خود باقی می‌ماند. بنابراین، افزایش جرم قابل توجهی از هفته ششم آزمایش، در مخلوط‌های C70S10 و C80S10 مشاهده نشد. یافته‌های تحقیقاتی ما در مورد اثرات دوده سیلیس بر بهبود مقاومت بتن در برابر پدیده کربناته شدن و افزایش عمر مفید و دوام آن با یافته‌های قبلی مطابقت دارد [۳۴، ۳۵].







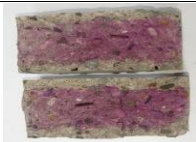

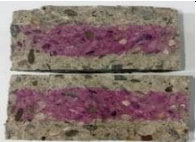





شکل ۹: افزایش جرم مخلوط‌های مورد مطالعه تحت کربناتاسیون تسریع شده.

¹⁰ Dong et al.

۴-۲-۲- عمق نفوذ کربناته

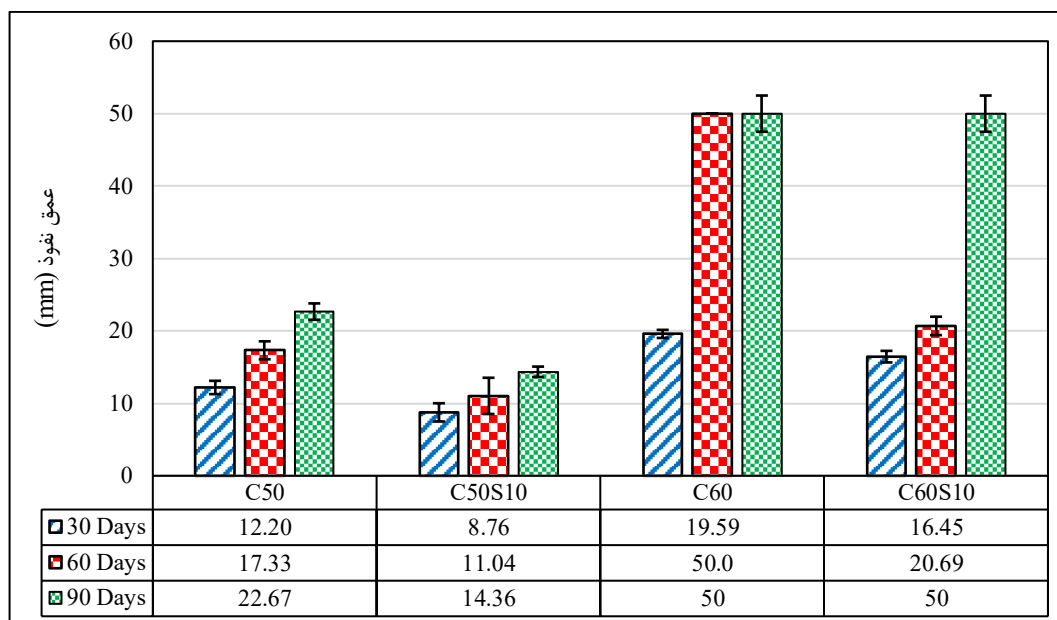
عمق کربناته شدن که به وسیله محلول فنل فتالین در ۳۰، ۶۰ و ۹۰ روز پس از قرارگیری در معرض دی‌اکسید کربن در یک محفظه کنترل شده تعیین شده است، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل ۱۱ میزان عمق نفوذ نمونه‌ها را ترسیم می‌کند. بیشترین عمق کربناته شدن در نمونه‌های حاوی ۷۰٪ و ۸۰٪ خاک مشاهده می‌شود. پس از ۳۰ روز نگهداری در محفظه، مخلوط‌های C70، C80، C70S10 و C80S10 به‌طور کامل کربناته شدند. در حالی که عمق نفوذ مخلوط C50S10 به ترتیب ۲۸/۲٪ و ۳۶/۳٪ کمتر از عمق نفوذ مخلوط C50 پس از ۳۰ و ۶۰ روز بود. علاوه بر این، پس از ۳۰ و ۶۰ روز، عمق نفوذ مخلوط C60S10 به ترتیب ۱۶٪ و ۵۸/۶٪ کمتر از عمق نفوذ مخلوط C60 بود. در واقع، پس از ۶۰ روز، نمونه C60 به نفوذ کامل دست یافت. در مقابل، نمونه C60S10 پس از ۹۰ روز به نفوذ کامل رسید. این عمدتاً به این دلیل است که مخلوط‌های سه‌جزئی (سیمان، خاک و دوده سیلیس) دارای نفوذپذیری کمتر و میکروساختار متراکم‌تری نسبت به مخلوط‌های دوجزئی (سیمان و خاک) هستند که نفوذ CO₂ را محدود می‌کند. در سن ۹۰ روز، عمق نفوذ مخلوط C50 برابر با ۲۲/۷ میلی‌متر بود. در مقابل، عمق کربناته شدن مخلوط C50S10 پس از ۹۰ روز برابر با ۱۴/۳۶ میلی‌متر بود که ۳۶/۷٪ کمتر از عمق نفوذ مخلوط C50 بود. این تغییرات می‌توانند به تغییرات در شیمی، مقادیر و ویژگی‌های تخلخل محصولات هیدراسیون قبل و بعد از کربناته شدن تسریع شده نسبت داده شوند. در واقع، تولید CaCO₃ در مخلوط حاوی دوده سیلیس فرآیند کربناته شدن را بیشتر از مخلوط‌های بدون SF کند کرده و به مسدود کردن منافذ کمک کرده است [۳۶]. مشابه با مطالعه حاضر، کولاووسکی^{۱۱} و همکاران [۳۷] دریافته‌اند که جایگزینی OPC با SF تا ۱۰٪ عمق کربناته شدن را کاهش می‌دهد. بنابراین، مشاهدات فوق نشان می‌دهد که استفاده از دوده سیلیس می‌تواند نفوذ کربناته شدن تسریع شده را به‌طور مؤثری کاهش دهد. طبق نتایج، باید ذکر کرد که اگرچه تغییرات جرم مخلوط‌های C70، C80، C70S10 و C80S10 پس از چند هفته کمتر از مخلوط‌های دیگر بود، اما مقدار عمق کربناتاسیون در این مخلوط‌ها پس از ۳۰ روز قرار گرفتن در معرض CO₂ به‌طور قابل توجهی بالاتر بود. زیرا در ابتدای فرآیند آزمایش، مقدار زیادی کربنات کلسیم تولید می‌شود و با ادامه فرآیند آزمایش، منافذ اشباع می‌شوند.

سن ID	۳۰	۶۰	۹۰
CC			
C50			
C50S10			
C80			

شکل ۱۰: میزان عمق نفوذ بهترین و بدترین مخلوط‌ها پس از اسپری فنل فتالین در سن ۳۰، ۶۰

¹¹ Kulakowski et al.

و ۹۰ روز.

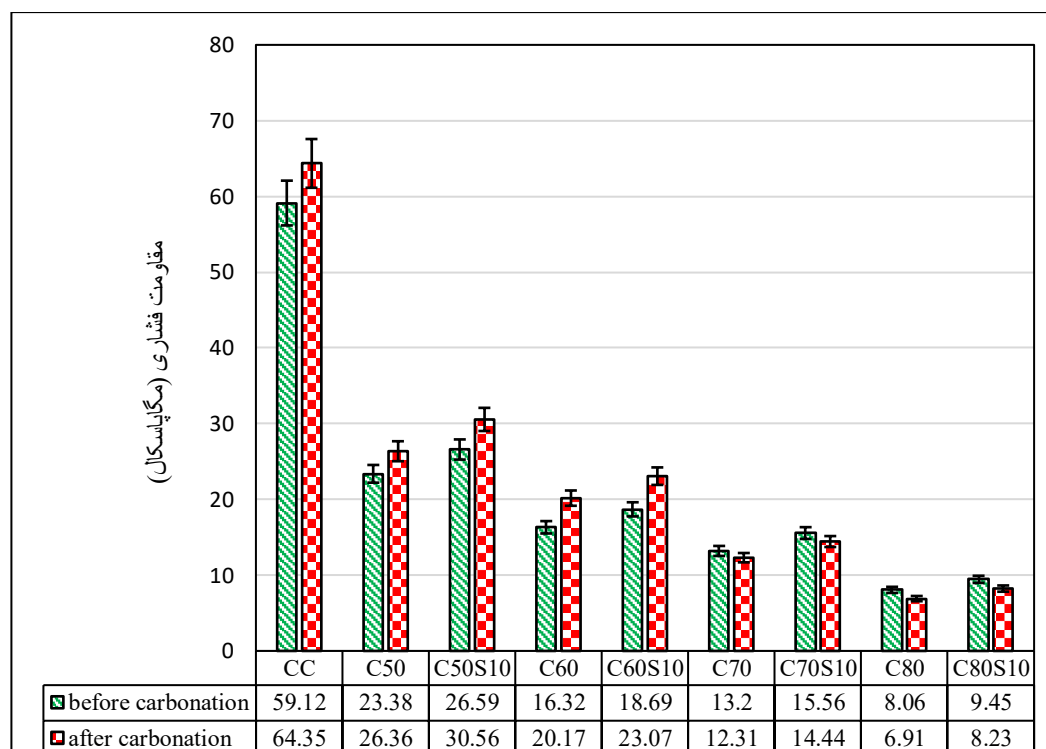


شکل ۱۱: مقادیر عمق نفوذ کربناتاسیون بر روی نمونه‌های SCEC.

۴-۲-۳- مقاومت فشاری پس از کربناته شدن

شکل ۱۲ نتایج مقایسه مقاومت فشاری همه مخلوط‌ها را قبل و بعد از ۹۰ روز قرارگیری در معرض کربناتاسیون تسریع شده نشان می‌دهد. به طور کلی، کربناتاسیون منجر به افزایش مقاومت فشاری در اکثر مخلوط‌ها شد. با این حال، در مخلوط‌هایی با بیش از ۶۰ درصد خاک رس، این روند معکوس شد و شاهد کاهش مقاومت بودیم. به عنوان مثال، مخلوط‌های C70 و C80 به ترتیب ۵/۵۲٪ و ۱۴/۲۶٪ افت مقاومت را تجربه کردند. علت اصلی کاهش مقاومت در بتن خود تراکم حاوی مقادیر بالای خاک رس، پس از کربناتاسیون، کمبود هیدروکسید کلسیم در ماتریکس است. در نتیجه، تولید کلسیت به میزان ناچیزی انجام می‌شود. همچنین، فازهای آلومینات و C-S-H به شدت تحت تأثیر کربناتاسیون قرار گرفته و خواص مکانیکی آن‌ها تضعیف شده است.

نتایج نشان می‌دهند که مقدار مشخصی از دوده سیلیس می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت فشاری بتن را افزایش دهد. دوده سیلیس با پر کردن فضاهای خالی بین ذرات سیمان و سنگدانه‌ها، ساختاری متراکم‌تر و یکپارچه‌تر ایجاد می‌کند که در نتیجه مقاومت بتن در برابر نیروهای فشاری را بهبود می‌بخشد [۳۸]. همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها در شکل ۱۲ نشان می‌دهد، بتن‌هایی که حاوی دوده سیلیس هستند، پس از فرآیند کربناتاسیون مقاومت فشاری بسیار بالاتری نسبت به بتن‌هایی که فاقد دوده سیلیس هستند، از خود نشان می‌دهند. برای مثال، نمونه بتنی C50S10 که حاوی دوده سیلیس است، پس از ۱۱۸ روز عمل‌آوری به مقاومت فشاری ۳۰/۵۶ مگاپاسکال رسیده است. جالب توجه است که این نمونه در طول ۹۰ روز قرارگیری در محیط کربناته، ۱۰/۵۳ درصد نیز افزایش مقاومت داشته است. برهمکنش هیدروکسید کلسیم $(CaOH)_2$ با دی اکسید کربن (CO_2) منجر به تشکیل کربنات کلسیم $(CaCO_3)$ به عنوان محصول اصلی کربناتاسیون بتن می‌شود. بر اساس نتایج مقاومت فشاری، برخلاف مخلوط‌های ۷۰ و ۸۰ درصد، مقاومت فشاری مخلوط‌های ۵۰ و ۶۰ درصد خاک رس پس از کربناتاسیون افزایش یافت. حجم مولی بالاتر $CaCO_3$ ($36/90 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) نسبت به $Ca(OH)_2$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$) [۳۹] دلیل این افزایش است.

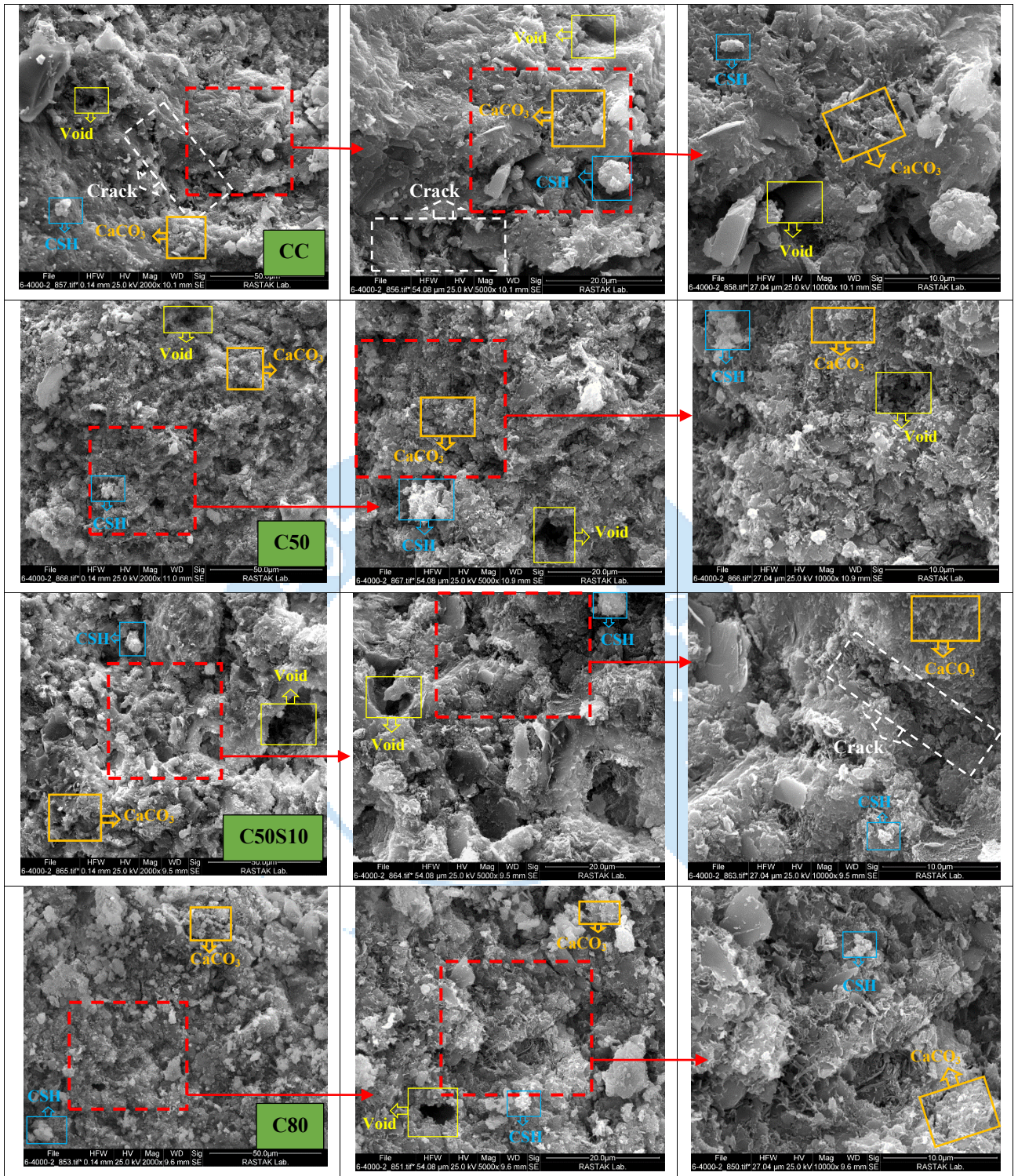


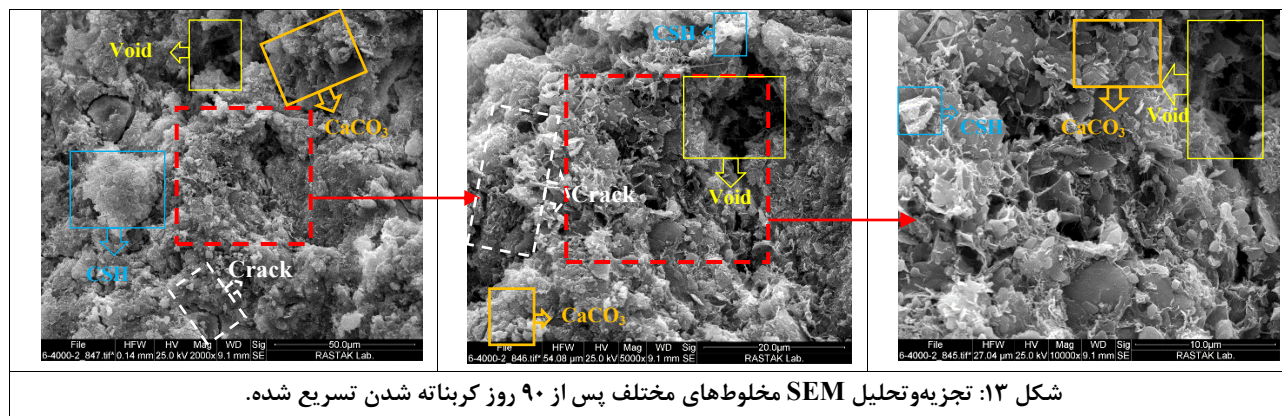
شکل ۱۲: ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های مختلف قبل و بعد از کربناتاسیون تسریع شده.

۴-۳- تحلیل ریزساختار

۴-۳-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه تحت کربناتاسیون

شکل ۱۳ ساختار میکروسکوپی نمونه‌های بتن خاکی را پس از ۹۰ روز قرار گرفتن در معرض کربناتاسیون نشان می‌دهد. با مقایسه میکروگراف‌های SEM نمونه بعد از کربناتاسیون، مشاهده می‌شود که فرآیند کربناتاسیون منجر به متراکم‌تر شدن ساختار بتن شده است. این تراکم به دلیل تشکیل بلورهای کلسیم کربنات (CaCO_3) به شکل پولک در حفرات بتن است. رسوب این بلورها مانع نفوذ آب به درون بتن شده و در نتیجه مقاومت آن در برابر نفوذ آب را افزایش می‌دهد. مطالعه تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که نمونه‌های بتن خاکی حاوی ۵۰ تا ۶۰ درصد خاک رس، به ویژه نمونه‌هایی که ۱۰ درصد دوده سیلیس به آن‌ها اضافه شده است، پس از فرآیند کربناتاسیون ساختاری متراکم‌تری پیدا می‌کنند. در واقع، منافذ موجود در این نمونه‌ها کوچک‌تر و فشرده‌تر شده است. این نمونه‌ها همچنین مقاومت فشاری بالاتری را پس از کربناتاسیون از خود نشان می‌دهند. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری که در بخش قبلی ارائه شده است، این موضوع را تأیید می‌کند. علت اصلی این بهبود عملکرد را می‌توان به فراوانی بیشتر هیدروکسید کلسیم (CH) در این مخلوط‌ها نسبت داد. هیدروکسید کلسیم یکی از اجزای اصلی بتن است که در طی فرآیند کربناتاسیون با دی‌اکسید کربن (CO_2) واکنش می‌دهد و کربنات کلسیم (CaCO_3) را تشکیل می‌دهد. کربنات کلسیم به عنوان یک چسبنده عمل کرده و باعث افزایش مقاومت و چگالی بتن می‌شود. درک تعامل بین فرآیند کربناتاسیون، میزان خاک رس و مقدار هیدروکسید کلسیم موجود در بتن، برای بهینه‌سازی عملکرد بتن خاکی بسیار حائز اهمیت است.

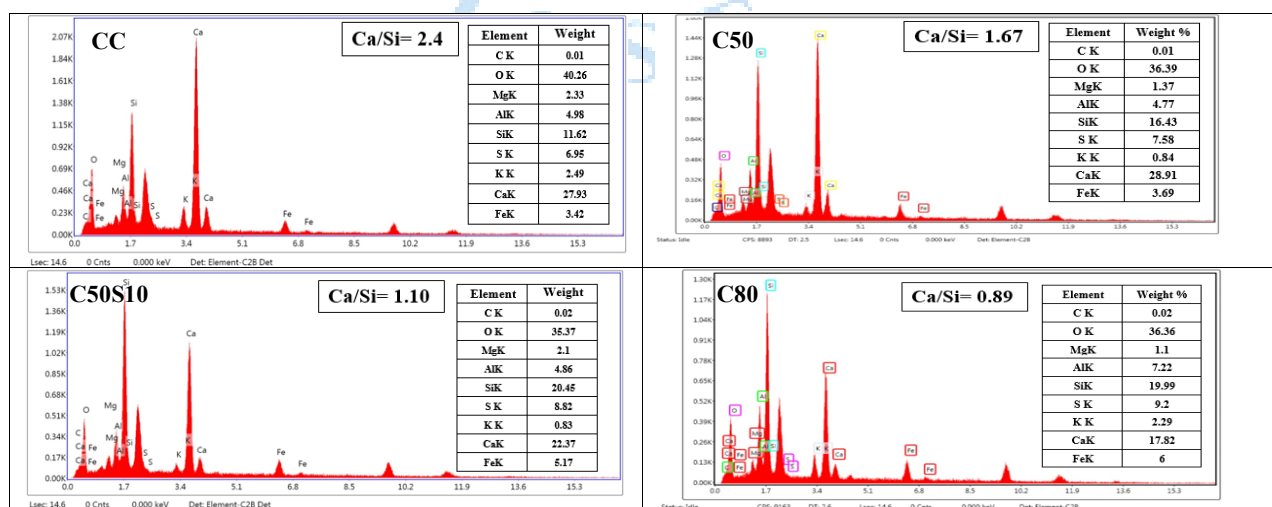




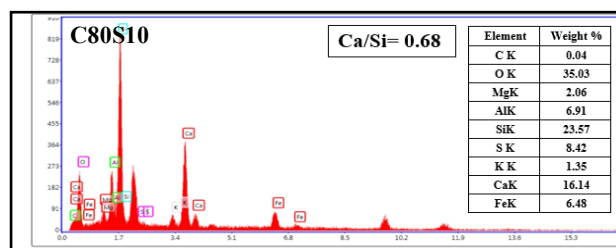
شکل ۱۳: تجزیه و تحلیل SEM مخلوط‌های مختلف پس از ۹۰ روز کربناته شدن تسریع شده.

در شکل ۱۴ تحلیل‌های EDX نمونه‌های مورد مطالعه به نمایش گذاشته شده است. تحلیل‌های EDX انجام شده بر روی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش جایگزینی خاک به جای سیمان، نسبت کلسیم به سیلیکون (Ca/Si) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با جایگزینی ۸۰ درصد خاک به جای سیمان، این نسبت حدود ۶۲/۹ درصد در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است. این کاهش نشان‌دهنده کاهش محتوای کلسیم در مخلوط‌ها و افزایش نسبی سیلیکون است که ناشی از جایگزینی سیمان با مواد سیلیسی مانند خاک می‌باشد. نتایج مشابهی نیز برای مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس مشاهده شد. در مقایسه با مخلوط C50، نسبت Ca/Si مخلوط C50S10 ۳۴/۱ درصد کاهش یافت. اثرات مواد جایگزین پوزولانی بر نسبت‌های Ca/Si با گزارش‌های ساریدمیر^{۱۲} و همکاران [۴۰] سازگار است.

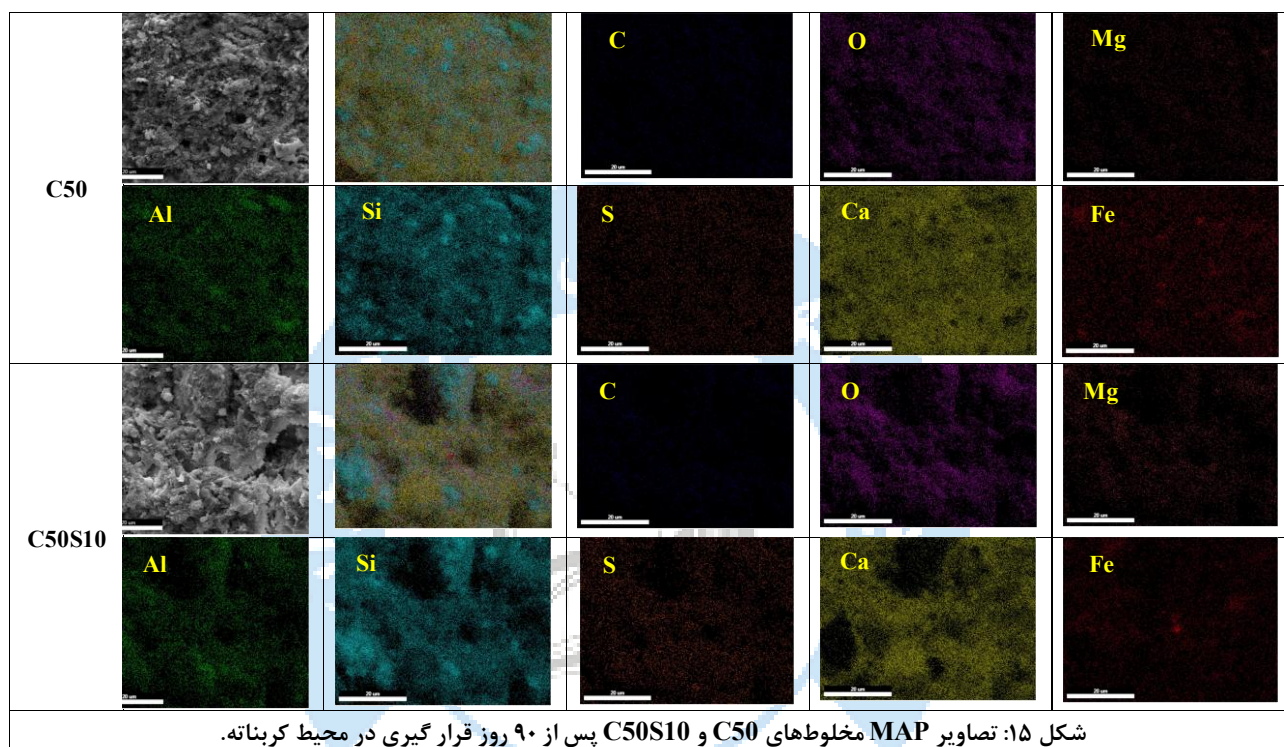
همچنین نتایج تحلیل MAP نمونه‌های P50 و P50S10 در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با استفاده از تحلیل MAP، عناصر اصلی ساختار نمونه‌ها ارزیابی شد. تحلیل MAP بر روی نمونه‌های P50 و P50S10 نشان داد که مقادیر قابل توجهی سیلیسیم، کلسیم و اکسیژن وجود دارد. این عناصر در مواد سیمانی به دلیل وجود هیدرات‌های سیلیکات کلسیم (C-S-H) که فازهای اصلی اتصال در بتن هستند، انتظار می‌رود [۴۱]. با این حال، نمونه P50S10 دارای درصد اتمی کربن به طور قابل توجهی بالاتر بود که به طور یکنواخت در سراسر مواد توزیع شده بود. توزیع یکنواخت کربن در P50S10 نشان می‌دهد که مواد مبتنی بر کربن به خوبی در داخل نمونه پراکنده شده‌اند که به طور بالقوه منجر به بهبود خواص یا برهمکنش با ماتریس سیمانی می‌شود.



¹² Saridemir et al.



شکل ۱۴: تجزیه و تحلیل EDX مرجع و همه مخلوط‌های SCEC پس از ۹۰ روز کربناته شدن تسریع شده.



شکل ۱۵: تصاویر MAP مخلوط‌های C50 و C50S10 پس از ۹۰ روز قرار گیری در محیط کربناته.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، پتانسیل استفاده از بتن حاکی خودتراکم حاوی دوده سیلیس به عنوان جایگزینی برای بتن‌های سنتی مورد ارزیابی قرار گرفت. عمده نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی خاک به جای سیمان، روانی بتن خودتراکم حاوی خاک رس کاهش می‌یابد که منجر به کاهش مقادیر قطر Slump flow و L-box می‌شود. همچنین، استفاده از دوده سیلیس به عنوان جایگزین سیمان، منجر به کاهش Slump flow و L-box می‌شود که نشان‌دهنده کاهش کارایی بتن است. این کاهش به دلیل سطح ویژه بالای دوده سیلیس است.
- بتن‌های خودتراکم حاوی دوده سیلیس به دلیل تشکیل C-S-H ثانویه حاصل از واکنش‌های پوزولانی و ایجاد ریزساختاری متراکم، مقاومت بسیار بالاتری در برابر نفوذ یون کلرید از خود نشان می‌دهند. این امر منجر به کاهش قابل توجه ضریب نفوذپذیری یون کلرید شده است. به طوری که در مخلوط C50S10، این ضریب در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب ۰.۳/۴۶٪ و ۰.۵۴/۴۸٪ نسبت به مخلوط C50 کاهش یافت.

۳. آزمایش کربناته شدن نشان داد که نمونه‌های با محتوای رس بالا (۰.۷٪ و ۰.۸٪) به دلیل نفوذپذیری بالا و اشباع سریع با رطوبت، کاهش سریع نرخ کربناته شدن را نشان دادند. برعکس، نمونه‌های با محتوای رس کمتر (۰.۵٪ و ۰.۶٪) افزایش تدریجی جرم را نشان دادند که نشان‌دهنده منافذ غیر اشباع است. این نشان می‌دهد که در نمونه‌های حاوی ۰.۷٪ و ۰.۸٪ خاک رس، اثر تخلخل بر کربناسیون بیشتر از محتوای پورتلندیت است.
۴. نمونه‌های SCEC با خاک رس بیشتر، پس از کربناسیون، افزایش مقاومت فشاری بیشتری را تجربه کردند. این به دلیل تشکیل بلورهای کربنات کلسیم در منافذ است. در نمونه‌های با خاک رس کمتر، به دلیل محتوای بیشتر هیدروکسید کلسیم، کربناسیون کامل‌تر انجام می‌شود و مقاومت فشاری بیشتری را مشاهده می‌کنیم.
۵. تصاویر SEM نشان می‌دهند که کربناسیون باعث بهبود یکپارچگی ساختاری بتن می‌شود. تشکیل بلورهای کربنات کلسیم منافذ را پر می‌کند و منجر به ساختاری متراکم‌تر می‌شود. این اثر به‌ویژه در نمونه‌هایی با ۰.۵-۰.۶٪ خاک رس و ۰.۱۰٪ دوده سیلیس برجسته است. افزایش تراکم منجر به کاهش نفوذپذیری و در نتیجه، مقاومت فشاری بالاتر می‌شود.

این پژوهش به بررسی خصوصیات دوام بتن خاکی خودتراکم حاوی دوده سیلیس پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از دوده سیلیس می‌تواند به بهبود دوام این نوع بتن کمک کند. با توجه به نتایج این مطالعه، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آینده بر روی کاربردهای عملی SCEC در ساختمان‌ها و بررسی امکان استفاده از میلگرد فولادی در این نوع بتن متمرکز شود.

قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت دانش‌بنیان توسعه فناوریان سبز کارا (کلینیک بتن سبز) که با ارائه امکانات آزمایشگاهی پیشرفته، نقش بسیار مهمی در انجام موفقیت آمیز این پژوهش ایفا نمود، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع:

- Samimi, K., et al., *Influence of pumice and metakaolin on compressive strength and durability of concrete in acidic media and on chloride resistance under immersion and tidal conditions*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022. **46**(2): p. 1153-1175.
- Samimi, K., et al., *Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect*. Construction and Building Materials, 2022. **349**: p. 128756.
- Munir, Q., et al., *A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolymer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete*. Science of The Total Environment, 2023. **865**: p. 161230.
- Aisheh, Y.I.A., et al., *Influence of polypropylene and steel fibers on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced geopolymer concrete*. Case Studies in Construction Materials, 2022. **17**: p. e01234.
- Gao, Z., et al., *Environmental, economic, and social sustainability assessment: A case of using contaminated tailings stabilized by waste-based geopolymer as road base*. Science of the Total Environment, 2023. **888**: p. 164092.
- Samimi, K., et al., *Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes*. Construction and building materials, 2017. **151**: p. 292-311.
- Pierrehumbert, R., *There is no Plan B for dealing with the climate crisis*. Bulletin of the Atomic Scientists, 2019. **75**(5): p. 215-221.

8. Fardoun, H., J. Saliba, and N. Saiyouri, *Evolution of acoustic emission activity throughout fine recycled aggregate earth concrete under compressive tests*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022. **119**: p. 103365.
9. Gourav, K., S. Ullas, and B.V. Reddy, *Studies on properties of Flowable Earth Mix concrete for monolithic load bearing walls*. Construction and Building Materials, 2020. **250**: p. 118876.
10. Imanzadeh, S., et al., *Formulating and optimizing the compressive strength of a raw earth concrete by mixture design*. Construction and building Materials, 2018. **163**: p. 149-159.
11. Kamaragi, R.D., *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique: histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances*. 2014, Université Paris Est.
12. Samimi, K., et al., *Resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes: pumice and zeolite effect*. Int J Civ Environ Eng, 2018. **12**(3): p. 250-259.
13. Samimi, K., S. Kamali-Bernard, and A.A. Maghsoudi, *Durability of self-compacting concrete containing pumice and zeolite against acid attack, carbonation and marine environment*. Construction and building materials, 2018. **165**: p. 247-263.
14. Ghane, N., S. Mazinani, and A. Gharehaghaji, *Comparing the performance of electrospun and cast nanocomposite film of polyamide-6 reinforced with multi-wall carbon nanotubes*. Journal of Plastic Film & Sheeting, 2019. **35**(1): p. 45-64.
15. Afshar, A., et al., *Corrosion resistance evaluation of rebars with various primers and coatings in concrete modified with different additives*. Construction and Building Materials, 2020. **262**: p. 120034.
16. Samimi, K., G.R. Dehghan Kamaragi, and R. Le Roy, *Microstructure, thermal analysis and chloride penetration of self-compacting concrete under different conditions*. Magazine of Concrete Research, 2019. **71**(3): p. 126-143.
17. Ghoddousi, P., A.A.S. Javid, and M. Zareechian, *Physical and chemical effects of siliceous particles at nano, micro, and macro scales on properties of self-consolidating mortar overlays*. Construction and Building Materials, 2018. **189**: p. 1140-1154.
18. Ghane, N., et al., *Antiepileptic drug-loaded and multifunctional iron oxide@ silica@ gelatin nanoparticles for acid-triggered drug delivery*. Scientific Reports, 2024. **14**(1): p. 11400.
19. Qing, Y., et al., *Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume*. Construction and building materials, 2007. **21**(3): p. 539-545.
20. Javid, A.A.S. and M.A.A. Nejad, *Packing density and surface finishing condition effects on the mechanical properties of various concrete pavements containing cement replacement admixtures*. Construction and Building Materials, 2017. **141**: p. 307-314.
21. Adil, G., J.T. Kevern, and D. Mann, *Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete*. Construction and Building Materials, 2020. **247**: p. 118453.
22. Haq, I.U., et al., *Mechanical and durability performance of concrete mixtures incorporating bentonite, silica fume, and polypropylene fibers*. Construction and Building Materials, 2022. **345**: p. 128223.
23. Chen, J., et al., *Ternary blending with metakaolin and silica fume to improve packing density and performance of binder paste*. Construction and Building Materials, 2020. **252**: p. 119031.
24. Shah, V. and A. Scott, *Hydration and microstructural characteristics of MgO in the presence of metakaolin and silica fume*. Cement and Concrete Composites, 2021. **121**: p. 104068.
25. *Astm, C150 / C150M-20, Standard Specification for Portland Cement, ASTM Int. (2020)*.
26. *Astm, C109 / C109M-21, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm], Cube Specimens), Annu. B ASTM Stand. 04 (2021)*.
27. *EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2002*.
28. *N.T. Build, 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nord. Method. (1999) 1-8*.
29. *XP P18-458, Essai pour béton durci - Essai de carbonatation accélérée - Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté 2008*.

30. Mastali, M. and A. Dalvand, *Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)*. Construction and Building Materials, 2016. **125**: p. 196-209.
31. Besheli, A.E., et al., *Improving concrete pavement performance in relation to combined effects of freeze-thaw cycles and de-icing salt*. Construction and Building Materials, 2021. **277**: p. 122273.
32. Pandey, A. and B. Kumar, *Evaluation of water absorption and chloride ion penetration of rice straw ash and microsilica admixed pavement quality concrete*. Heliyon, 2019. **5**(8).
33. Dong, Y., Y. Liu, and C. Hu, *Towards greener ultra-high performance concrete based on highly-efficient utilization of calcined clay and limestone powder*. Journal of Building Engineering, 2023. **66**: p. 105836.
34. Ashraf, W., *Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities*. Construction and Building Materials, 2016. **120**: p. 558-570.
35. Kazemian, M. and B. Shafei, *Carbon sequestration and storage in concrete: A state-of-the-art review of compositions, methods, and developments*. Journal of CO2 Utilization, 2023. **70**: p. 102443.
36. von Greve-Dierfeld, S., et al., *Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC*. Materials and Structures, 2020. **53**(6): p. 136.
37. Kulakowski, M.P., F.M. Pereira, and D.C. Dal Molin, *Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete*. Construction and building materials, 2009. **23**(3): p. 1189-1195.
38. Snehal, K., B. Das, and M. Akanksha, *Early age, hydration, mechanical and microstructure properties of nano-silica blended cementitious composites*. Construction and Building Materials, 2020. **233**: p. 117212.
39. Ruiz-Agudo, E., et al., *Dissolution and carbonation of portlandite [Ca (OH) 2] single crystals*. Environmental science & technology, 2013. **47**(19): p. 11342-11349.
40. Sarıdemir, M. and M. Bulut, *Effects of ground basaltic pumice and high temperatures on the properties of HSMS*. Journal of Building Engineering, 2021. **41**: p. 102772.
41. Samimi, K., M. Pakan, and J. Eslami, *Investigating the compressive strength and microstructural analysis of mortar containing synthesized graphene and natural pozzolan in the face of alkali-silica reactions*. Journal of Building Engineering, 2023. **68**: p. 106126.