مروری بر خواص سیمان‌های آمیخته میکروسیلیسی

علی‌اکبر رمضانیانپور[1]، آرش ذوالفقارنسب[2]

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

Arash.zolfagharnasab@gmail.com

چکیده

امروزه بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی جز جدایی ناپذیر صنعت ساخت و ساز شهری و زیر بنایی می‌باشد. از این رو بهبود خواص مکانیکی و دوام آن در محیط‌های آسیب‌رسان در کنار کاهش اثرات زیست محیطی تولید سیمان و مصالح پایه سیمانی از اهمیت زیادی برخوردار است. استفاده از دوده سیلیس در مصالح پایه سیمانی و بتن به عنوان یک ماده افزودنی معدنی و جایگزین سیمان سبب بهبود خواص مکانیکی و ارتقای پایایی این مصالح در برابر اکثر پدیده‌های مخرب بتن شده و امکان دستیابی به سازه‌هایی با عمر مفید بالا را فراهم می‌سازد. در این مقاله به بررسی خواص دوده سیلیس و بتن‌های ساخته شده با این ماده پوزولانی پرداخته شده است. بهبود خواص مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و ارتقای سطح دوام بتن‌ها در اکثر محیط‌های آسیب‌رسان از مزایای بکارگیری دوده سیلیس به عنوان ماده جایگزین سیمان پرتلند می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیمان آمیخته، دوده سیلیس، خواص بتن تازه، مشخصات مکانیکی، دوام بتن.

۱. مقدمه

فرآیند تولید سیمان پرتلند بعنوان یکی از صنایع آلاینده محیط زیست شناخته می‌شود. منشا آلایندگی در تولید سیمان پرتلند به استفاده از سوخت‌های فسیلی و تجزیه کلسیم کربنات (یکی از اجزای اصلی در تولید کلینکر) باز می‌گردد. استفاده از مواد افزودنی معدنی بعنوان یکی از راهکارهای کاهش آلایندگی‌های صنعت سیمان علاوه بر کاهش میزان آزاد شدن گاز کربن دی‌اکسید، موجب بهبود دوام سازه‌های بتنی در بیشتر شرایط محیطی آسیب رسان می‌گردد. طی سالیان گذشته تحقیقات متعددی در جهت شناسایی و بکارگیری مواد افزودنی معدنی در سیمان‌های آمیخته انجام شده که در این میان دوده سیلیس بعنوان یکی از فعال‌ترین انواع مواد جایگزین سیمان معرفی شده‌است. در این مقاله به مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌های اثرات زیست محیطی و اقتصادی استفاده از سیمان‌های آمیخته و خواص بتن‌های حاوی دوده سیلیس پرداخته شده‌است.

۲. سیمان‌های آمیخته

فرآیند تولید یک تن سیمان پرتلند در حدود ۱/۵۵ تن مواد اولیه نیاز داشته که در این میان حدود ۰/۵۱ تن گاز کربن دی‌اکسید (ناشی از تجزیه کربنات کلسیم) آزاد خواهد شد. با در نظر گرفتن فرآیند پخت سیمان و استفاده از سوخت‌های فسیلی مقدار گاز کربن دی‌اکسید ناشی از تولید سیمان در حدود ۰/۸ تا ۱ تن به ازای هر تن سیمان پرتلند خواهد بود. این فرآیند نزدیک به ۵٪ میزان کل گاز کربن دی‌اکسید تولیدی در جهان را شامل می‌شود [۱]. بر اساس تحقیقات انجام شده، نقش سیمان در تولید گاز کربن دی‌اکسید در میان مصالح مورد نیاز برای ساخت ۱ متر مربع ساختمان شهری، حدود ۳۰٪ بوده که در مقایسه با سایر مصالح بیشترین مقدار است [۲].

پوزولان‌ها (یا مواد جایگزین سیمان) مواد معدنی سیلیسی یا سیلیسی - آلومینی خوب تفکیک‌شده‌ای هستند که خود یا خاصیت سیمانی نداشته و یا خاصیت سیمانی کمی نشان می‌دهند. این مواد در حضور رطوبت با کلسیم هیدروکسید واکنش داده و مواد سیمانی پدید می‌آورند. لازم به ذکر است هر ماده سیلیسی مناسب دسته‌بندی در دسته مواد پوزولانی نیست؛ زیرا سیلیس مورد نیاز فعالیت‌های پوزولانی باید از نوع غیر کریستاله (آمورف) باشد. بطور معمول پوزولان‌ها در دو دسته طبیعی و صنعتی دسته بندی می‌گردند. پوزولان‌های طبیعی نظیر توف‌های آتشفشانی، زئولیت‌های طبیعی، رس‌های کلسینه شده از جمله موادی هستند که به خاطر تولید پوزولان، فرآوری شده‌اند. این فرآوری معمولاً شامل خردکردن، آسیاب کردن و جداسازی اندازه‌ها می‌گردد که در بعضی از موارد ممکن است شامل فعال‌سازی حرارتی نیز شود. مواد جایگزین سیمان صنعتی موادی هستند که محصولات اصلی صنعت تولیدشان نمی‌باشند. این محصولات ممکن است به فرآوری (مثل خشک و پودرکردن)، قبل از استفاده آنها به‌عنوان مواد افزودنی معدنی، نیاز داشته باشند. مانند: خاکستر بادی ، سرباره کوره آهن گدازی، دوده سیلیس و غیره [۳].

استفاده از مواد افزودنی معدنی در تولید سیمان‌های آمیخته علاوه بر کاهش میزان کلینکر مورد نیاز برای تولید سیمان و میزان گاز کربن دی‌اکسید ناشی از تجزیه کلسیم کربنات، به دلیل عدم نیاز به فرآوری‌هایی نظیر پخت سیمان پرتلند، موجب کمتر شدن آلایندگی ناشی از سوخت‌های فسیلی نیز می‌گردند. برای مثال جدول ۱ نشان دهنده میزان کلینکر مصرفی و گاز کربن دی‌اکسید آزاد شده در فرآیند تولید چند نوع سیمان آمیخته در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی است [۱]. همچنین استفاده از دوده سیلیسبه میزان ۱۰٪ در سیمان آمیخته میزان اثرات گرمایش زمین، اسیدی شدن اتمسفر و استفاده از سوخت‌های فسیلی را تا میزان ۱۰ درصد کاهش خواهد داد [۴].

جدول ۱- مقایسه میزان گاز کربن دی اکسید در تولید سیمان‌های مختلف [۱].

نوع سیمان	میزان کلینکر برای تولید ۱ تن سیمان (٪)	میزان گاز کربن دی‌اکسید آزاد شده برای تولید ۱ تن سیمان (تن)
سیمان پرتلند معمولی	۹۵	۰/۷۶
سیمان آمیخته حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی	۶۵	۰/۵۲
سیمان آمیخته حاوی ۶۰٪ سرباره	۳۵	۰/۲۸

مطالعه اقتصادی استفاده از مصالح جایگزین سیمان نیازمند در نظر گرفتن مواردی همچون هزینه‌های تولید کلینکر، ماهیت ماده افزودنی معدنی (مواد زائد یا محصول اولیه تولیدی)، هزینه‌های حمل، بکارگیری و نگهداری و نیز هزینه‌های عمر مفید سازه بتن مسلح می‌باشد. استفاده از مصالح جایگزین سیمان علاوه بر کاهش نیاز به مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با فرآیند تولید سیمان پرتلند اثر مهمی بر عملکرد سازه‌های بتن مسلح می‌گذارند. سازه‌های بتنی در محیط‌های مختلف دچار خرابی‌هایی با منشا فیزیکی و یا شیمیایی می‌گردند. از این رو در نظر گرفتن مشخصات مناسب برای بتن با توجه به شرایط قرارگیری محیطی در راستای ارتقای میزان کارایی سازه، کاهش میزان تعمیرات و افزایش عمر مفید سازه امری الزامی به شمار می‌رود. با در نظر گرفتن دوام سازه‌ها، علاوه بر کاهش هزینه‌های دوره بهره برداری، عمر مفید نیز افزایش قابل توجهی خواهد یافت.

۳. دوده سیلیس

دوده سیلیس (میکروسیلیس) محصول جانبی کارخانه‌های تولید سیلیسیم و آلیاژهای این عنصر بوده و عموماً از سیلیس غیربلوری تشکیل شده است. این ماده با داشتن ذرات با اندازه عمومی کوچکتر از ۱ میکرون دارای سطح مخصوص بسیار بالایی در حدود ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ مترمربع بر کیلوگرم بوده که این خاصیت در کنار مقدار بالای سیلیس غیربلوری بیانگر فعالیت پوزولانی بالای آن می‌باشند [۳].

واکنش پوزولانی دوده سیلیس باعث مصرف سریع آهک آزاد شده (ناشی از فعالیت‌های هیدراتاسیون سیمان) در سنین اولیه بتن گشته و سبب بهبود تخلخل و نفوذپذیری خمیر سیمان می‌گردد [۵]. از این رو افزایش سریع مقاومت فشاری در سنین اولیه و کاهش قابل توجه نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس از جمله مشخصات مثبتی بوده که این ماده جایگزین سیمان را تحت عنوان " آبَر پوزولان " در جامعه مهندسی شناسانده است.

علاوه بر مشخصات فنی و مهندسی مطلوب بتن‌های حاوی دوده سیلیس، بطور کل، استفاده از مواد پوزولانی سبب کاهش مقدار استفاده از سیمان پرتلند در ساخت بتن شده و اثرات زیست محیطی ناشی از تولید فرآیند تولید سیمان پرتلند را کاسته و با افزایش عمر مفید سازه‌ها باعث استفاده بهینه از ابنیه بتنی و در نتیجه عدم نیاز به ساخت و سازهای مجدد و تعمیرات گسترده در آن‌ها می‌گردد. بدین سبب می‌توان بکارگیری دوده سیلیس به‌عنوان یک ماده جایگزین سیمان را اقدامی در راستای توسعه پایدار صنعت ساخت و ساز شهری و زیربنایی برشمرد [۶].

در ادامه این مقاله به بررسی اثر استفاده از دوده سیلیس در بتن بر روی خواص بتن تازه، مشخصات مکانیکی و دوام در محیط‌های مختلف آسیب‌رسان پرداخته می‌گردد.

۴. اثر دوده سیلیس بر خواص بتن

خاصیت پوزولانی قابل توجه و واکنش‌پذیری سریع دوده سیلیس خواص بتن در زمینه‌های کارایی بتن تازه، مشخصات مکانیکی و مهندسی و نیز دوام بتن را دستخوش تغییرات محسوسی می‌نماید. از این رو در این بخش به بررسی تحقیقات انجام شده در راستای بررسی این خواص پرداخته شده‌است.

۱,۴. خواص بتن تازه

با افزودن مقادیر کم دوده سیلیس به بتن (حدود ۳ الی ۴ درصد وزن مواد سیمانی) به دلیل شکل کروی ذرات این ماده پوزولانی و نیز بهبود تراکم ذرات با توجه به اندازه ریز ذرات دوده سیلیس، مقدار آب مورد نیاز جهت دستیابی به کارایی مورد نظر بتن تازه کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش مقدار بکارگیری دوده سیلیس اثر ریزی این ماده و افزایش سطح مخصوص مواد پودری بر کارایی بتن تعیین کننده شده و سبب افزایش نیاز به آب در بتن تازه می¬شود. این افزایش نیاز به آب عموماً با بکارگیری مواد افزودنی کاهنده آب قابل جبران است [۷].

تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند که استفاده از دوده سیلیس در مقادیر کمتر از ۱۰ درصد وزن کل مواد سیمانی اثر کمی بر زمان گیرش بتن داشته و یا بی‌اثر می‌باشد. از سوی دیگر کاهش میزان آب انداختگی نیاز به عمل‌آوری مرطوب سریع در بتن‌های حاوی دوده سیلیس را الزامی کرده و جداشدگی کمتر در این بتن‌ها قابلیت پمپ‌پذیری و استفاده در بتن‌پاشی را فراهم آورده‌است ([۶] و [۸]).

۱،۴. مشخصات مکانیکی

استفاده از دوده سیلیس به عنوان یک ماده پوزولانی با کاهش تخلخل خمیر سیمان و بهبود خواص ناحیه انتقال سنگدانه و خمیر، افزایش مقاومت فشاری را به همراه دارد. با توجه به ریزی بالا و فعالیت سریع این ماده جایگزین سیمان، روند افزایش مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس در مقایسه با بتن معمولی و بتن-های حاوی سایر مواد پوزولانی (نظیر سرباره کوره آهن‌گدازی، خاکستر بادی و ...) سریع‌تر می‌باشد. این پدیده سبب افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه شده که تا سن ۹۰ روز این افزایش مشهود است. مقاومت بلند مدت بتن‌های حاوی دوده سیلیس به بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی نزدیک بوده و کاهش روند افزایش مقاومت در این نوع بتن‌ها از سن ۹۰ روز مشاهده شده‌است ([۶-۹]).

در اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی بتن‌های حاوی دوده سیلیس در مقادیر متعارف (تا حدود ۱۵٪)، افزایش مدول الاستیسیته سکانت گزارش شده-است [۶]. همچنین در صورت استفاده از مقادیر زیاد دوده سیلیس در ساخت بتن، مقدار مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد (جدول ۲) [۹].

جدول ۲- مدول الاستیسیته بتن‌های حاوی دوده سیلیس [۷].

مشخصات بتن	سن آزمایش	مدول الاستیسیته (GPa)
OPC	۷ روز	۲۸/۸۱
	۲۸ روز	۳۴/۳۵
SF۶	۷ روز	۳۱
	۲۸ روز	۳۵/۵
SF۸	۷ روز	۳۱/۲۴
	۲۸ روز	۳۷/۲۵
SF۱۰	۷ روز	۳۱/۱
	۲۸ روز	۳۷
SF۱۵	۷ روز	۳۱/۵
	۲۸ روز	۳۸/۱۱

۲،۴. پایداری ابعادی

کاهش آب در اثر تبخیر، واکنش‌های هیدراتاسیون، کربناسیون و یا سایر عوامل سبب جمع‌شدگی بتن می‌گردند. پس از گیرش بتن و عمل آوری آن، به طور معمول، جمع‌شدگی بتن به دو بخش جمع‌شدگی خودزا و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن تقسیم می‌شود. جمع شدگی خودزا ناشی از واکنش‌های هیدراتاسیون و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن به دلیل قرارگیری بتن در محیطی غیر اشباع رخ می‌دهند. خزش به صورت افزایش در کرنش تحت تنش ثابت و ماندگار، بعد از به حساب آوردن دیگر تغییر شکل‌های وابسته به زمان قابل تعریف می‌باشد [۱۰].

رمضانیانپور و همکاران [۹] در تحقیقی میزان جمع‌شدگی و خزش در بتن‌های حاوی دوده سیلیس را با بتن معمولی و مدل‌های ارائه شده توسط انجمن بتن آمریکا و انجمن بتن اروپا مورد مقایسه قرار داده‌اند. در نتیجه این تحقیق با افزایش میزان بکارگیری دوده سیلیس در بتن، میزان جمع‌شدگی خودزا افزایش و جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن کاهش یافته است. لازم به ذکر است در میزان کل جمع‌شدگی بتن‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به بتن معمولی کاهش اندکی گزارش شده‌است. خزش نمونه‌های حاوی دوده سیلیس نیز کمتر از نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند معمولی مشاهده شده‌اند.

همچنین در این تحقیق با توجه به تفاوت معنادار نتایج بدست‌آمده از میزان جمع‌شدگی و خزش بتن‌های حاوی دوده سیلیس با نتایج مدل‌های ارائه شده توسط موسسه‌های مذکور، روابطی پیشنهادی جهت تخمین میزان جمع‌شدگی و خزش این نوع بتن‌ها ارائه شده‌اند [۹].

۳،۴. دوام

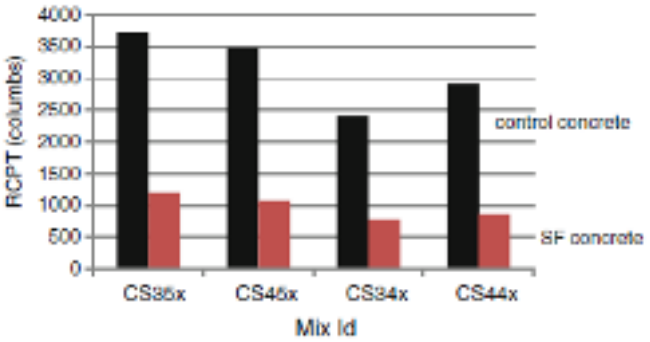
نفوذپذیری به عنوان یک شاخص بسیار تاثیرگذار در اکثر پدیده‌های مخرب بتن شناخته می‌شود. در بتن‌های حاوی دوده سیلیس به دلیل واکنش‌های پوزولانی و اثر پرکنندگی ذرات این ماده، خمیر سیمان نفوذپذیری کمتری در مقایسه با خمیر سیمان پرتلند معمولی دارد [۶-۸] . نفوذپذیری کم بتن سبب

ورود کمتر عوامل مخرب به داخل آن شده و در نتیجه در بیشتر موارد دوام بالاتر بتن‌های نفوذناپذیر در محیط‌های آسیب رسان گزارش شده‌اند. نتایج دوام بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس در محیط‌های مختلف در ادامه این مقاله مورد بحث قرار گرفته‌اند.

۱،۳،۴. نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی آرماتور

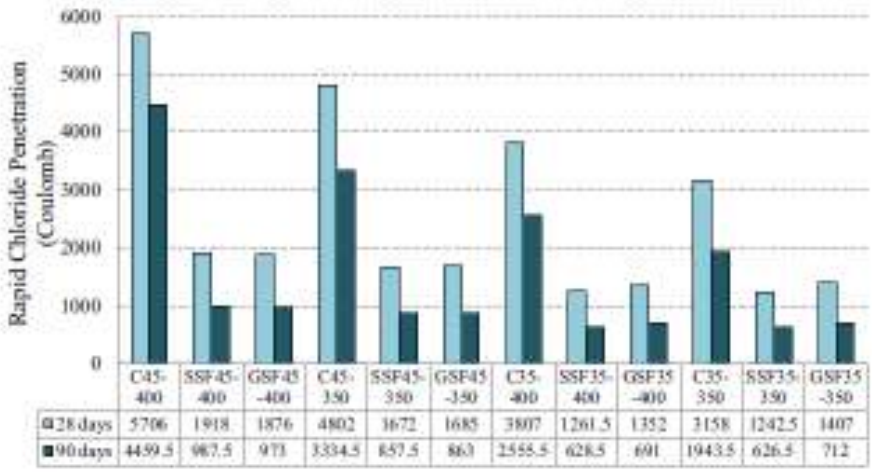
پدیده خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در مقوله دوام و عمرمفید سازه‌ها به شمار می‌رود. این نوع خرابی عمدتاً در سازه‌های دریایی و سازه‌های بتن مسلح در معرض نمک‌های یخزدا بر اثر نفوذ یون‌های کلراید به داخل بتن و از بین رفتن ناحیه انفعالی و محافظ آرماتور رخ می‌دهد. در این میان نفوذپذیری بتن به عنوان مولفه اصلی در پدیده‌های انتقال یون‌های کلراید در بتن شناخته می‌شود.

رمضانیانپور و همکاران در تحقیقی به بررسی اثر استفاده از دوده سیلیس بر نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید[1]مطابق آزمایش ASTM C۱۲۰۲ [۱۱] پرداخته‌اند. در این تحقیق مطابق نتایج مندرج در شکل ۱، اثر مثبت استفاده از دوده سیلیس در کاهش میزان نفوذ یون‌های کلراید گزارش شده‌است [۱۲].



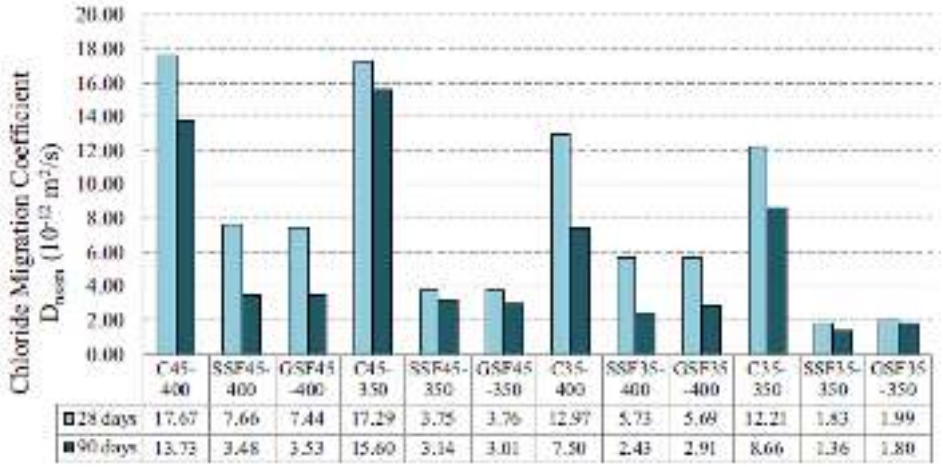
شکل ۱- نتایج نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید [۱۲].

در تحقیقی دیگر رمضانیانپور و همکاران به بررسی اثر بکارگیری و شیوه بکاربردن دوده سیلیس در بتن بر میزان ضریب مهاجرت یون‌های کلراید، بر اساس آزمایش مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید[2]مطابق آزمایش NT Build ۴۹۲ [۱۳] و نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید پرداخته‌اند [۸]. نتایج هر دو آزمایش بیانگر افزایش مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر ورود یون‌های کلراید از طریق پدیده‌های نفوذ و انتشار می‌باشد (شکل‌های ۲ و ۳). در این تحقیق نام گذاری طرح‌های بررسی شده بر اساس ماده بکار برده شده، نسبت آب به مواد سیمانی و عیار مواد سیمانی است.



شکل ۲- نتایج نفوذ تسریع یافته یون‌های کلراید؛ بکارگیری دوده سیلیس بصورت لجن (SSF) و گرانول (GSF) [۸].

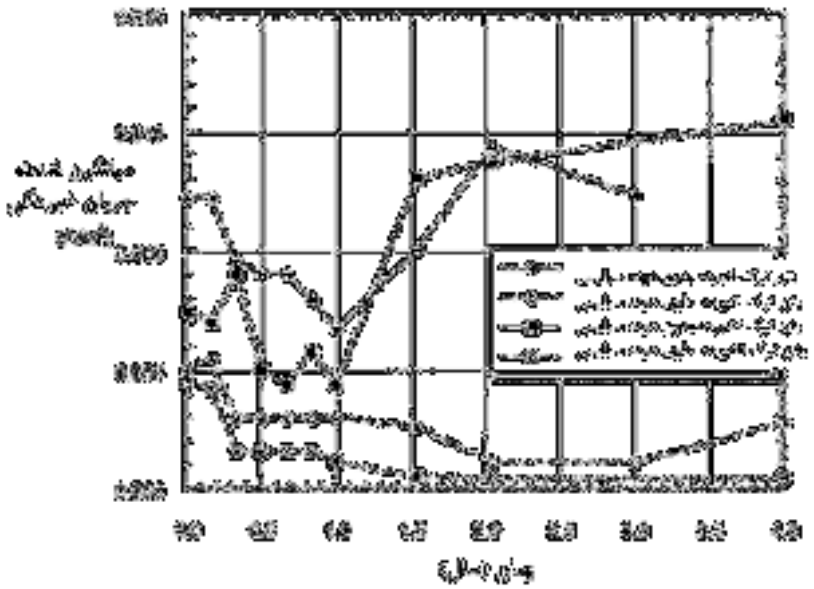
[1] - Rapid Chloride Penetration Test (RCPT)
[2] - Rapid Chloride Migration Test (RCMT)



	C45-400	SSF45-400	GSF45-400	C45-350	SSF45-350	GSF45-350	C35-400	SSF35-400	GSF35-400	C35-350	SSF35-350	GSF35-350
28 days	17.67	7.66	7.44	17.29	3.75	3.76	12.97	5.73	5.69	12.21	1.83	1.99
90 days	13.73	3.48	3.53	15.60	3.14	3.01	7.50	2.43	2.91	8.66	1.36	1.80

شکل۳- نتایج ضریب مهاجرت تسریع یافته یون‌های کلراید؛ بکارگیری دوده سیلیس بصورت لجن (SSF) و گرانول (GSF) [۸].

استفاده از دوده سیلیس اثر مثبت بر کاهش میزان و به تعویق انداختن زمان آغاز خوردگی داشته و مقاومت بتن در برابر نفوذ خارجی یون‌های کلراید را افزایش می‌دهد[۶]. در این رابطه، تحقیقات مارکوت و هانسون[۱] بر روی بتن توانمند حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیس و مقایسه آن با بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی نشان دهنده کاهش نرخ خوردگی در بتن‌های ترک نخورده حاوی دوده سیلیس در مقایسه با بتن معمولی است (شکل ۴) [۱۴].



شکل ۴- نتایج شدت جریان خوردگی در بتن‌های حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس و بتن‌های سیمان پرتلند معمولی [۱۴].

از سوی دیگر به دلیل کاهش قلیاییت خمیر سیمان و تضعیف ناحیه انفعالی محافظ آرماتور، حد آستانه غلظت یون‌های کلراید برای شروع خوردگی در بتن مسلح حاوی دوده سیلیس کاهش یافته و در صورت استفاده از مصالح بتنی حاوی کلراید درونی، میزان خوردگی در بتن مسلح حاوی دوده سیلیس بیش از بتن معمولی گزارش شده‌است [۱۵].

[۱]- Marcotte and Hansson

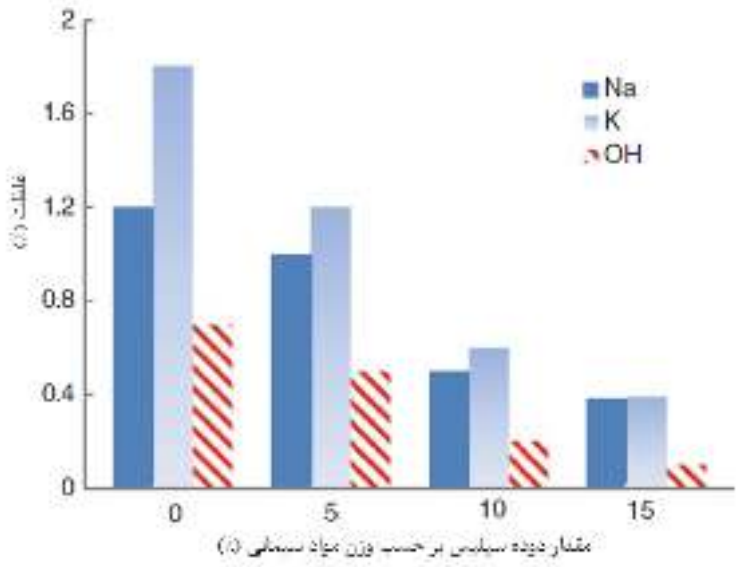
۲،۳،۴. حمله سولفات‌ها

حمله سولفات‌ها به بتن به عوامل زیادی از جمله نفوذپذیری بتن، نوع و میزان بکارگیری مواد جایگزین سیمان، نوع کاتیون نمک سولفاتی و غلظت یون‌های سولفات در آب مهاجم بستگی دارد. در رابطه با حمله سدیم سولفات به بتن استفاده از دوده سیلیس موجب بهبود عملکرد شده است[۱۶-۱۸]. دلیل اصلی بهبود دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر حمله سدیم سولفات به آن، کاهش نفوذپذیری بتن قلمداد می‌گردد [۶].

از سوی دیگر، در صورت وجود نمک منیزیم سولفات در محلول مهاجم، به دلیل مصرف مقدار زیاد آهک خمیر هیدراته شده طی واکنش‌های پوزولانی در بتن‌های حاوی مقادیر بالا (بیش از ۱۰ درصد وزن سیمان) دوده سیلیس، حمله سولفاتی مستقیماً وارد مرحله تجزیه سیلیکات‌های کلسیم هیدراته شده (خمیر سیمان) شده و واکنش با تخریت خمیر سخت شده ادامه می‌یابد ([۱۹] و [۲۰]). در صورت استفاده از مقادیر کم دوده سیلیس (کمتر از ۱۰ درصد)، مقدار آهک مصرفی در واکنش‌های پوزولانی کمتر بوده و کاهش نفوذپذیری بتن‌های ساخته شده با این ماده جایگزین سیمان، سبب بهبود دوام در برابر حمله منیزیم سولفات می‌گردد ([۲۱] و [۲۲]).

۳،۳،۴. واکنش قلیایی سنگدانه‌ها

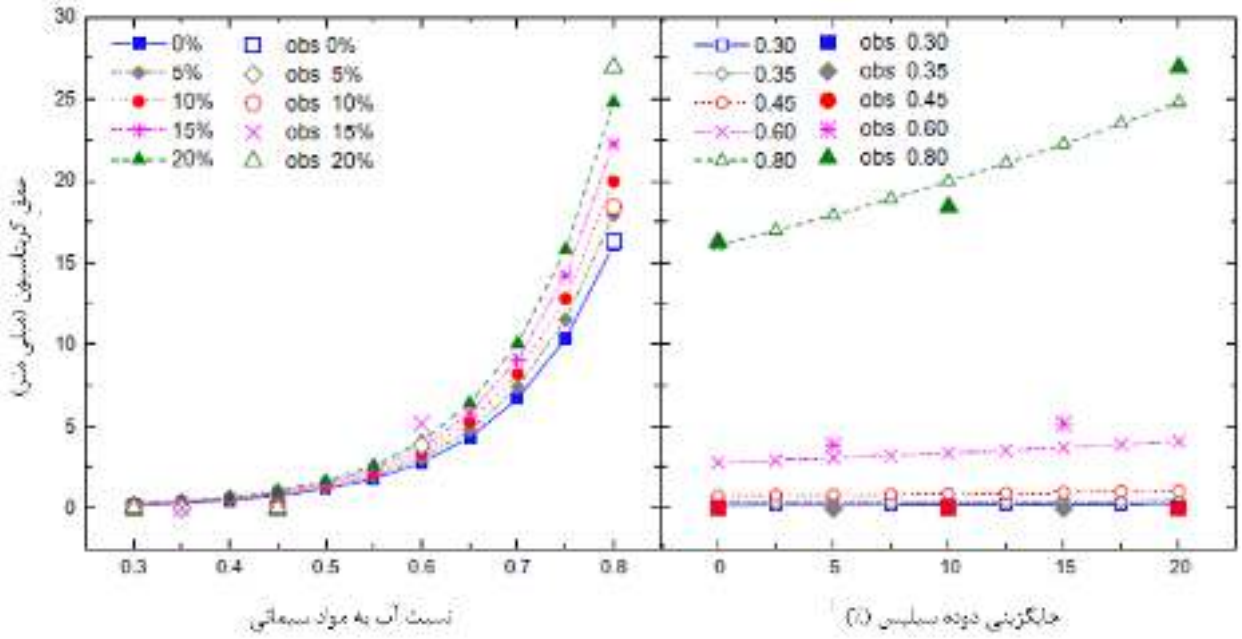
استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر دوده سیلیس از یک سو سبب کاهش نفوذپذیری آب مورد نیاز واکنش قلیایی سنگدانه‌ها شده و از سوی دیگر ذرات آلومینا سیلیسی مواد پوزولانی طی واکنش با ذرات قلیایی سیمان (Na_2O و K_2O) سبب کاهش قلیاییت خمیر سیمان و در نتیجه کاهش شدت واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها می‌گردند (شکل ۵) [۲۳]. در تحقیقات مختلف دوام در برابر اثر مخرب واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها طی آزمایش‌های تسریع شده، اثر دوده سیلیس بر کاهش میزان انبساط ناشی از این واکنش مثبت گزارش شده و با افزایش بکارگیری این پوزولان کنترل واکنش قلیایی بیشتر می‌گردد ([۶] و [۲۴-۲۶]).



شکل ۵- غلظت یون‌های قلیایی در محلول حفره‌ای پس از ۶ ماه [۲۳].

۴،۳،۴. کربناسیون

همانند سایر پوزولان‌ها، واکنش پوزولانی دوده سیلیس در بتن با مصرف مقدار زیادی از آهک خمیر سیمان هیدراته شده همراه است. بدین سبب استفاده از دوده سیلیس می‌تواند موجب افزایش احتمال و شدت واکنش کربناسیون در بتن گردد [۲۷]. شکل ۶ نشان دهنده افزایش عمق کربناسیون در صورت استفاده از دوده سیلیس بوده و جایگزینی بیشتر این پوزولان با سیمان پرتلند، شدت این واکنش را افزایش می‌دهد [۲۸].



شکل ۶- عمق کربناسیون پس از ۹۸ روز قرارگیری در معرض گاز کربن دی اکسید [۲۸].

از سوی دیگر درصورت استفاده از دوده سیلیس در بتن، کاهش نفوذپذیری آب و گاز کربن دی‌اکسید از شدت پدیده کربناسیون می‌کاهد [۶]. لذا عملکرد نهایی بتن در برابر کربناسیون بر اساس نسبت آب به مواد سیمانی، مقدار بکارگیری دوده سیلیس و نحوه عمل‌آوری تعیین می‌گردد. بر اساس برخی تحقیقات انجام گرفته، در بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالا و مقاومت فشاری کمتر از ۴۰ مگاپاسکال عمق کربناسیون بتن‌های حاوی دوده سیلیس بیش از بتن‌های معمولی بوده و در بتن‌های با نسبت آب به سیمان کم و مقاومت فشاری بیش از ۴۰ مگاپاسکال، نتایج بیانگر دوام بهتر بتن‌های ساخته‌شده با دوده سیلیس می‌باشند ([۱۴] و [۲۹]).

۵،۳،۴. حمله اسیدها

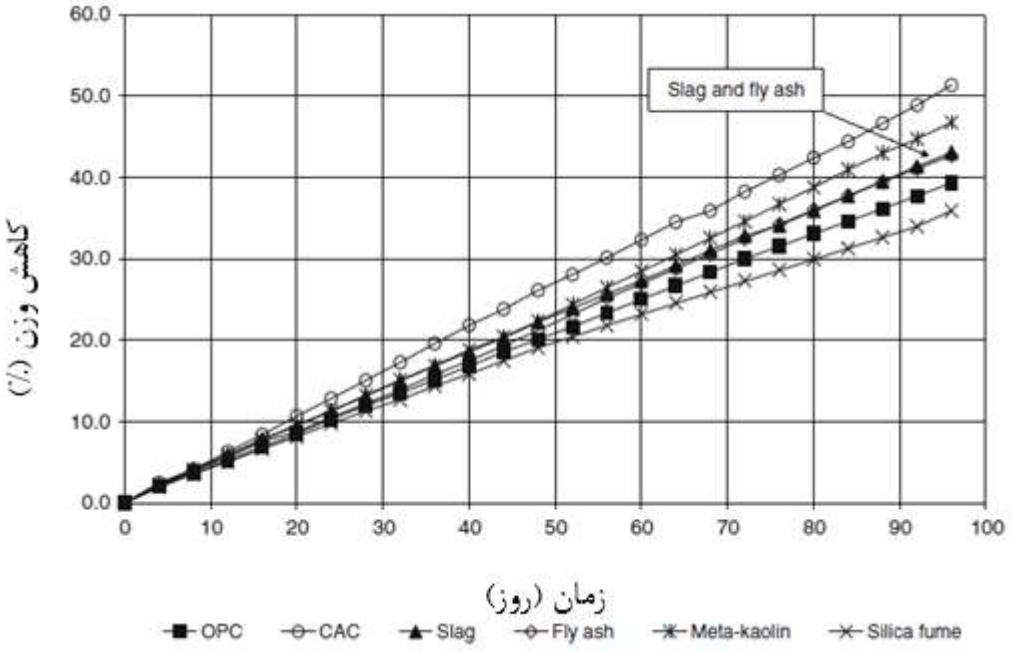
اثر استفاده از مواد جایگزین سیمان در دوام برابر حمله اسیدها همانند واکنش کربناسیون تحت تاثیر مصرف آهک طی واکنش پوزولانی و کاهش نفوذپذیری ناشی از بکارگیری پوزولان می‌باشد. بدین سبب بررسی عملکرد انواع مختلف مواد جایگزین سیمان در برابر حمله اسیدهای گوناگون الزامی بوده و بعضاً نظر جامعی در مورد دوام بتن‌های حاوی مواد افزودنی معدنی وجود ندارد. برای نمونه، محققین در مورد استفاده از دوده سیلیس جهت بهبود عملکرد بتن در برابر حمله سولفوریک اسید نظر واحدی ندارند. درنینگ و همکاران[۱] با بررسی عملکرد بتن حاوی دوده سیلیس در محلول ۱ ٪ سولفوریک اسید، اثر این ماده بر مقاومت در برابر حمله این اسید را مثبت ارزیابی کرده‌اند [۳۰]. همچنین مهتا[۲] با جایگزینی ۱۵٪ سیمان توسط دوده سیلیس و قرار دادن نمونه‌ها در برابر سولفوریک اسید با غلظت ۱٪ ، بهبود رفتار بتن حاوی دوده سیلیس را گزارش کرده‌است [۳۱]. تحقیقات الکساندر[۳] نیز نشان‌دهنده کاهش وزن کمتر

[۱]- Durning et al.

[2] - Mehta

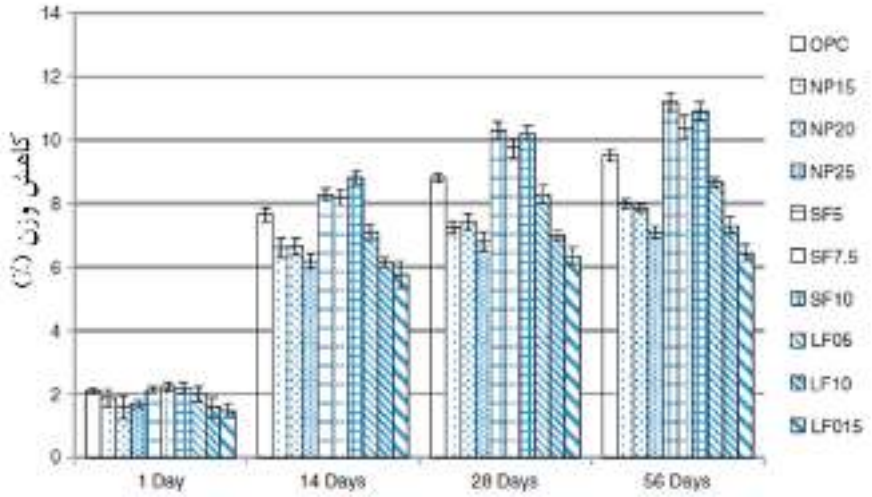
[3] - Alexander

نمونه‌های حاوی دوده سیلیس نسبت به نمونه‌های ساخته شده با سایر پوزولان‌ها، بتن سیمان پرتلند معمولی و بتن ساخته‌شده با سیمان پرآلومین درمحلول با pH برابر یک از سولفوریک اسید می‌باشد (شکل ۷) [۳۲].



شکل ۷- کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاوی مواد جایگزین سیمان در برابر حمله سولفوریک اسید [۳۲].

برخلاف نتایج فوق، تحقیقات سنهاجی و همکاران[1] نشان‌دهنده عدم بهبود عملکرد بتن با استفاده از دوده سیلیس در بتن است. شکل ۸ کاهش وزن نمونه‌های حاوی مواد جایگزین سیمان مختلف را با یکدیگر مقایسه کرده و نتایج آن بیانگر اثر نامطلوب دوده سیلیس بر مقاومت بتن در برابر حمله سولفوریک اسید می‌باشد [۳۳].

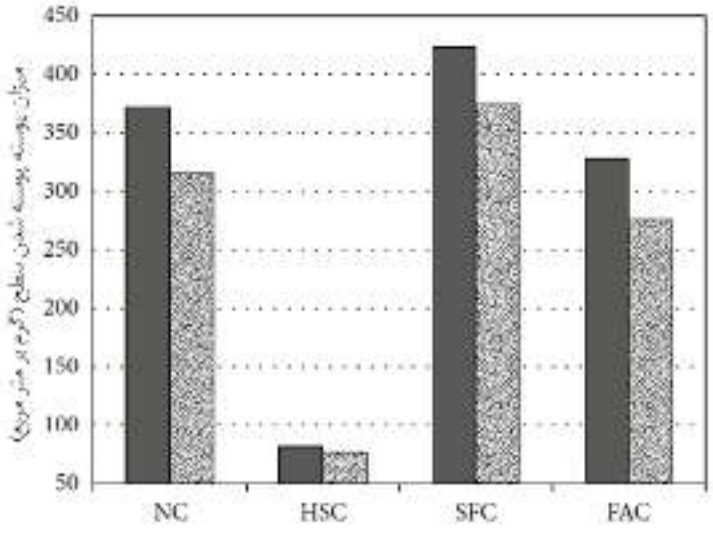


شکل ۸- کاهش وزن نمونه‌های بتنی حاوی مواد جایگزین سیمان در برابر حمله سولفوریک اسید [۳۳].

[1] - Senhadji et al.

۶،۳،۴. چرخه‌های ذوب و یخبندان

دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان وابسته به عواملی چون نفوذپذیری بتن و استفاده از مواد افزودنی حباب هواساز می‌باشد. لذا نتایج گزارش شده بعضاً ضد و نقیض می‌باشند [۶]. برخی محققین عملکرد بتن‌های حاوی دوده سیلیس ساخته شده با مواد افزودنی حباب هواساز در برابر چرخه‌های ذوب و یخ را مثبت گزارش کرده اند [۳۴]. بعضی دیگر از مطالعات، همانند تحقیق کاراکورت و بایزیت[1] نشان دهنده عملکرد ضعیف‌تر بتن-های حاوی دوده سیلیس بدون مواد حباب هواساز و عملکرد مشابه بتن معمولی در صورت استفاده از مواد حباب هواساز است (شکل ۹). در این تحقیق عملکرد بتن پرمقاومت ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۳ و ۲۰ درصد دوده سیلیس جایگزین سیمان بسیار مناسب ارزیابی شده است [۳۵].

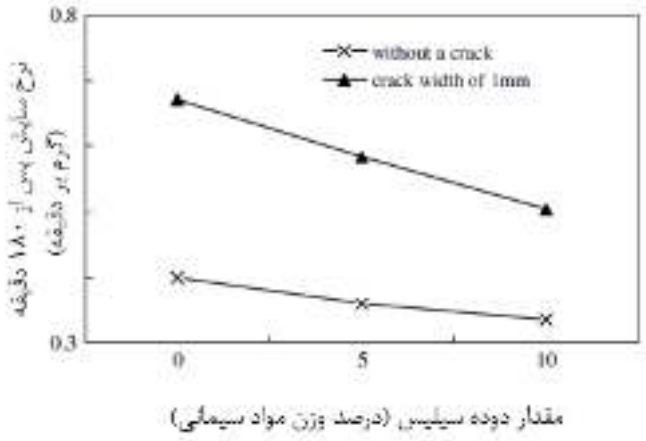


شکل ۹- پوسته پوسته شدن سطح بر اثر ۲۸ چرخه یخ زدن و آب شدن [۳۵].

۷،۳،۴. سایش و فرسایش سطح

تحقیقات نشان‌دهنده بهبود عملکرد بتن‌های ساخته شده با دوده سیلیس در برابر سایش سطحی بر اثر عبور وسایل نقلیه و یا جریان سیال‌های ساینده می‌باشند ([۲] و [۴]). برای نمونه لیو[2] در تحقیقی اثر مثبت افزودن دوده سیلیس بر روی میزان سایش بر اثر جریان عبوری از سطح ترک خورده و سالم بتن را گزارش داده است (شکل ۱۰) [۳۶].

[1] - Karakurt and Bayazit
[2] - Liu



شکل ۱۰- نرخ سایش در بتن‌های حاوی دوده سیلیس [۳۶].

۵. نتیجه‌گیری

استفاده از دوده سیلیس به عنوان یک ماده افزودنی معدنی و جایگزین سیمان علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی بکارگیری سیمان پرتلند، موجب بهبود خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن می‌گردد. عملکرد بتن در محیط‌های آسیب رسان با توجه به کاهش نفوذپذیری و تغییرات در میزان آهک ناشی از هیدراتاسیون سیمان پرتلند تعیین می‌شود. در اکثر موارد نظیر مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و خوردگی آرماتور، واکنش قلیایی سنگدانه‌ها و حمله سدیم سولفات به بتن اثر کاهش نفوذپذیری باعث بهبود دوام گشته و در سایر پدیده‌ها نظیر کربناسیون، چرخه‌های ذوب و یخ و مقاومت در برابر حمله منیزیم سولفات موجب دوام نامناسب بتن‌های حاوی دوده سیلیس گزارش شده‌است. بدین دلیل، مطالعه و تحقیق رفتار بتن‌های حاوی دوده سیلیس در محیط‌های آسیب رسان با توجه به ماهیت مواد مورد استفاده در ساخت بتن و شرایط محیطی امری اجتناب ناپذیر به شمار می‌رود.

۶. تشکر و قدردانی

این مقاله به اهتمام شرکت صنایع فروآلیاژ ایران تهیه و نگارش شده است. بدین وسیله از این شرکت در راستای حمایت از نگارش این مقاله قدردانی به‌عمل می‌آید.

۶. مراجع

[۱] Deolalkar, S.P., Shah, A. and Davergave, N. (2015). "Designing green cement plants.", Butterworth-Heinmann.

[۲] Bribián, I.Z., Capilla, A.V. & Usón, A.A., (۲۰۱۱). "Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.", Building and environment, ۴۶(۵), pp.۱۱۳۳-1140.

[۳] مهتا، ک.، مونته ئیرو، پ.، ترجمه رمضانیانپور، ع.ا.، قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، (۱۳۹۴). " ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)". چاپ ششم، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۴] Khodabakhshian, A., De Brito, J., Ghalehnovi, M., & Shamsabadi, E. A. (۲۰۱۸). "Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.", Construction and Building Materials, ۱۶۹, ۲۳۷-۲۵۱.

[۵] هلند، ت.سی.، ترجمه رمضانیانپور، ع.ا.، اعرابی، ن.، "راهنمای مصرف میکروسیلیس در بتن"، انتشارات نگارنده دانش، تهران، ایران.

[۶] رمضانیانپور، ع.ا. (۱۳۹۵)، "مواد جایگزین سیمان (پوزولان‌ها) ، خواص، دوام و توسعه پایدار"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[۷] Thomas, M. (۲۰۱۳) “Supplementary cementing materials in concrete.” CRC press.

[۸] Ramezanianpour, A.A., Karein, S.M.M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S. & Moodi, F., (۲۰۱۴). "Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete.“, Construction and Building Materials, ۶۶, pp.۲۲۲-۲28.

[۹] Mazloom, M., Ramezanianpour, A.A. & Brooks, J.J., (۲۰۰۴). “Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete.”, Cement and Concrete Composites, ۲۶(۴), pp.۳۴۷-۳۵۷.

[۱۰] رمضانیانپور، ع.ا.، پیدایش، م.، (۱۳۸۹) "شناخت بتن (مصالح، خواص، تکنولوژی)" ، انتشارات جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر) ، تهران، ایرانپپ.

[۱۱] ASTM C۱۲۰۲, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, ASTM International, West Conshohocken, PA.

[۱۲] Ramezanianpour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M. & Moodi, F., (۲۰۱۱). “Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength.”, Construction and Building Materials, ۲۵(۵), pp.۲۴۷۲-۲479.

[۱۳] NT Build ۴۹۲, “chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments,”, Nordic Council of Ministers.

[۱۴] Marcotte, T.D. & Hansson, C.M., (۲۰۰۳), “The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water.”, Journal of Materials Science, ۳۸(۲۳), pp.۴۷۶۵-۴۷۷۶.

[۱۵] Manera, M., Vennesland, Ø. & Bertolini, L., (۲۰۰۸), “Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume.”, Corrosion Science, ۵۰(۲), pp.۵۵۴-۵60.

[۱۶] Hooton, R.D., (۱۹۹۳), “Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity.”, Materials Journal, 90(2), pp.143-151.

[۱۷] Brown, P.W., (۱۹۸۱), “An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment.”, Cement and Concrete Research, ۱۱(۵-۶), pp.۷۱۹-۷۲۷.

[۱۸] Nasser, K.W. & Ghosh, S., (۱۹۹۴), “Durability properties of high strength concrete containing silica fume and lignite fly ash.”, Special Publication, ۱۴۵, pp.۱۹۱-۲14.

[۱۹] Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M. & Saadi, M.M., (۱۹۹۵), “Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements”, ACI Materials Journal, ۹۲(۱), pp.۱۵-۲۴.

[۲۰] Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., De Brito, J., & Shamsabadi, E. A. (۲۰۱۸). “Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder.”, Journal of cleaner production, ۱۷۰, ۴۲-۶۰.

[۲۱] Roy, D.M., Arjunan, P. & Silsbee, M.R., (۲۰۰۱). “Effect of silica fume, metakaolin, and low-calcium fly ash on chemical resistance of concrete.”, Cement and Concrete Research, ۳۱(۱۲), pp.۱۸۰۹-۱۸۱۳.

[۲۲] Alexander, M., Bertron, A. & De Belie, N., (۲۰۱۳). “Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments”, New York, Springer.

[۲۳] Durand, B., Bérand, J., Roux, R. & Soles, J.A., (۱۹۹۰). “Alkali-silica reaction: the relation between pore solution characteristics and expansion test results.”, Cement and Concrete Research, ۲۰(۳), pp.۴۱۹-۴۲۸.

[۲۴] Shehata, M. H., & Thomas, M. D. (۲۰۰۲). “Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali–silica reaction in concrete.”, Cement and Concrete Research, ۳۲(۳), ۳۴۱-۳۴۹.

[۲۵] Bleszynski, R. F. (۲۰۰۳). “The performance and durability of concrete with ternary blends of silica fume and blast-furnace slag.”, Ph.D. thesis, University of Toronto, Canada.

[۲۶] Fournier, B., Nkinamubanzi, P. C., & Chevrier, R. (۲۰۰۴). “Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete.” In Proceedings of the Twelfth International Conference Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Vol. ۱, pp. ۵۲۸-۵۳۷).

[۲۷] Khan, M.I. & Siddique, R., (۲۰۱۱). “Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties.”, Resources, Conservation and Recycling, ۵۷, pp.۳۰-۳5.

[۲۸] Kulakowski, M.P., Pereira, F.M. & Dal Molin, D.C., (۲۰۰۹). “Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete.”, Construction and Building Materials, ۲۳(۳), pp.۱۱۸۹-۱195.

[۲۹] Gjorv, O.E., (۱۹۸۳) “Silica concrete-protection against corrosion of embedded steel.”, Special Publication, ۷۹, pp.۷۱۹-۷۳۰.

[۳۰] Durning, T.A. & Hicks, M.C., (۱۹۹۱). “Using microsilica to increase concrete's resistance to aggressive chemicals.”, Concrete international, ۱۳(۳), pp.۴۲-۴۸.

[۳۱] Mehta, P.K., (۱۹۸۵). “Studies on chemical resistance of low water/cement ratio concretes.”, Cement and Concrete Research, ۱۵(۶), pp.۹۶۹-۹۷۸.

[۳۲] Alexander, M.G. & Fourie, C., (۲۰۱۱), “Performance of sewer pipe concrete mixtures with portland and calcium aluminate cements subject to mineral and biogenic acid attack.”, Materials and structures, ۴۴(۱), pp.۳۱۳-۳۳۰.

[۳۳] Senhadji, Y., Escadeillas, G., Mouli, M. & Khelafi, H., (۲۰۱۴). “Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar.”, Powder technology, ۲۵۴, pp.۳۱۴-۳۲۳.

[۳۴] Maage, M., Vennesland, Ø. & Gautefall, O., (۱۹۸۵). “Modifisert Portlandsement.” In Delrapport ۳. Fasthetsutvikling og E-modul. FCB/SINTEF. Norwegian Institute of Technology Trondheim.

[۳۵] Karakurt, C. & Bayazıt, Y., (۲۰۱۵). “Freeze-thaw resistance of normal and high strength concretes produced with fly ash and silica fume.”, Advances in Materials Science and Engineering.

[۳۶] Liu, Y.W., (۲۰۰۷). “Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume.”, Construction and Building Materials, ۲۱(۵), pp.۹۷۲-۹77.