

بررسی تأثیر نوع سیمان و افزودنی معدنی مصرفی بر نفوذپذیری بتن با روش «محفظه استوانه‌ای»

محمود نادری *

استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

علیرضا کیبودان

دکتری سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

محمد رضا عاکفی

کارشناس ارشد سازه، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تاکستان، ایران.

چکیده

از آنجا که بخشی از بتن از سیمان تشکیل شده است، تأثیرش بر نفوذپذیری بتن می‌تواند قابل ملاحظه باشد. به همین دلیل، در این مقاله، نفوذپذیری بتن‌های حاوی انواع مختلف سیمان‌ها (نوع ۱-۲۵، نوع ۲، نوع ۵، پوزولانی و سفید) و افزودنی‌های معدنی (میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک) با استفاده از نتایج به‌دست آمده از روش «محفظه استوانه‌ای» مطالعه شده است. مقادیر جایگزینی سیمان با افزودنی‌های معدنی ۰/۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بودند. با توجه به مشکلات دوامی سازه‌های بتنی در سواحل ایران، علاوه بر آب شرب، از آب دریا نیز برای ارزیابی نفوذپذیری بتن‌های دارای سیمان‌های مختلف استفاده گردید. نتایج حاصله نشان می‌دهند که جز نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۲۰٪، سایر نمونه‌های بتنی نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی معدنی دارند. ویژگی‌های ریزساختاری بتن‌های حاوی افزودنی‌های معدنی ذکر شده با مقادیر جایگزینی ۰٪ و ۵٪ که با بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دست آمدند نیز با نتایج به دست آمده سازگار بودند. علاوه، مشاهده شد که نوع آب تأثیر قابل توجهی بر نفوذپذیری بتن دارد. در این باره، نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های نوع ۱-۲۵ و پوزولانی کمترین نفوذپذیری را به ترتیب در برابر آب شرب و دریا داشتند. بر عکس، نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های پوزولانی و سفید بیشترین نفوذپذیری را به ترتیب در برابر آب شرب و دریا از خود نشان دادند. همچنین، دیده شد که همبستگی ضعیفی بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مورد مطالعه وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: بتن، محفظه استوانه‌ای، نفوذپذیری، سیمان، افزودنی معدنی.

* نویسنده مسئول: Profm Mahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

نیروگاه‌های حرارتی به دست می‌آید [۳]. از خاکستر بادی کم کلسیم، به طور وسیع در بتن‌های معمولی و دارای مقاومت زیاد به عنوان ماده جایگزین سیمان استفاده می‌شود. واکنش سیلیسی-آلومیناتی مواد پوزولانی با آهک تولید شده از واکنش هیدراسیون در حضور آب موجب تولید سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه شده که این مواد خاصیت پرکنندگی منافذ را دارند. همچنین، استفاده از پوزولان‌ها به عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن به کاهش مصرف سیمان، انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند [۴، ۵]. پودر سنگ آهک از جمله مواد دیگر جایگزین سیمان است که به دلیل فراوانی و ارزان بودنش کاربرد فراوانی در صنعت بتن دارد. شایان ذکر است که این ماده دارای خاصیت پوزولانی نیست و ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم تولید نمی‌کند. البته، طی هیدراسیون تری کلسیم سیلیکات، در اثر واکنش کلسیم کربنات پودر سنگ آهک با آلومینات‌های سیمان، کربوآلومینات تشکیل شده که سبب جلوگیری یا تأخیر در تبدیل اترینگایت-مونوسولفوآلومینات می‌شود و به این ترتیب روند هیدراسیون تغییر می‌کند. از طرفی، به دلیل دارا بودن ذرات ریز، پودر سنگ آهک خاصیت پرکنندگی زیادی نیز دارد [۶، ۷]. جایگزین کردن بخشی از سیمان با افزودنی‌های معدنی دارای محدودیت است و استفاده از آنها در مقادیری بیشتر از مقدار وزنی بهینه، نه تنها سبب بهبود مقاومت و مشخصات دوام بتن نمی‌شود، بلکه بر مشخصات بتن تأثیر منفی نیز خواهد گذاشت [۸، ۹]. بنابراین، تأثیر نوع سیمان مصرفی بر مشخصات بتن نیز باید ارزیابی شود. سیمان‌ها به دلیل دارا بودن ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی مختلف، پس از هیدراته شدن خواص متفاوتی از خود نشان می‌دهند. به همین دلیل، با بررسی تأثیر نوع سیمان مصرفی بر مشخصات بتن، می‌توان سیمان مناسب برای شرایط بهره‌برداری موردنظر را انتخاب نمود. با توجه به اهمیت نفوذپذیری و تأثیرش بر دوام بتن، در این مقاله، اثر افزودنی‌های معدنی میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک در مقادیر مختلف وزنی و همچنین سیمان‌های نوع ۴۲۵-۱، نوع ۲، نوع ۵، پوزولانی و سفید بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه با روش «محفظه استوانه‌ای» [۱۰] بررسی شده است. مطالعات متعددی با استفاده از این روش برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن انجام شده است [۱۱-۱۸]. هدف از این بررسی‌ها ارزیابی تأثیر نوع خمیر سیمان بر نفوذپذیری بتن است.

دوام و عملکرد مطلوب بتن تحت تأثیر عوامل مخرب مانند شستگی هیدروکسید کلسیم، کربناسیون، حملات سولفاتی، کلرایدی و خوردگی آرماتورهای فولادی کاهش می‌یابد. نفوذپذیری که به صورت حرکت سیال (گاز یا مایع) در جسم متخلخل تحت تغییرات فشار تعریف می‌شود، می‌تواند به عنوان عاملی برای نفوذ عوامل مخرب به بتن عمل کند و به همین دلیل است که از آن به عنوان شاخصی مهم برای ارزیابی دوام سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. عوامل مؤثر بر نفوذپذیری بتن هم به شرایط انجام آزمایش و هم به ساختار بتن بستگی دارند. اندازه نمونه، مقدار فشار وارده و سن نمونه از شرایط انجام آزمایش و اندازه منافذ و ترک‌ها، چگونگی توزیع و پیوستگی آنها، مقدار تخلخل و مشخصات ناحیه انتقال، نوع، اندازه و مقدار سنگدانه‌های مصرفی، عناصر تشکیل دهنده خمیر سیمان و نسبت آب به مواد سیمانی از عوامل ساختاری بتن محسوب می‌شوند. با توجه به نفوذپذیری کم سنگدانه‌ها و احاطه شدن آنها توسط خمیر سیمان، بررسی تأثیر عوامل تشکیل دهنده خمیر سیمان بر نفوذپذیری بتن توجه‌پذیری بیشتری دارد. باید توجه داشت که خمیر سیمان با نسبت حجمی قابل توجه خود و بسته به نوع عناصر تشکیل دهنده‌اش می‌تواند در نفوذپذیری ناحیه انتقال تأثیر قابل توجهی داشته باشد.

استفاده از مواد افزودنی معدنی و سیمان‌های مختلف از جمله راهکارهای موجود برای رسیدن به کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام بتن است. این مواد با تغییر ریزساختار، اندازه و توزیع منافذ می‌توانند باعث کاهش نفوذپذیری بتن شوند. از جمله مواد افزودنی معدنی جایگزین سیمان می‌توان به مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت اشاره کرد. میکروسیلیس یک ماده سیلیسی عمدتاً غیر بلوری کروی شکل است و از محصولات جانبی فرآیند تولید فلز سیلیسیم یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم به خصوص فروسیلیسیم می‌باشد و به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی، واکنش‌پذیری پوزولانی بسیار بالایی دارد [۱]. زئولیت یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیوم هیدراته از عناصر قلیایی و قلیایی-خاکی است. خواص پوزولانی زئولیت به علت وجود اکسیدهای سیلیسیم و آلومینیوم در ترکیب شیمیایی آن است [۲]. خاکستر بادی نیز ماده‌ای است با ذرات ریز کروی شکل که از پسماند حاصل از احتراق پودر ذغال سنگ در

۲- روش «محفظه استوانه‌ای»

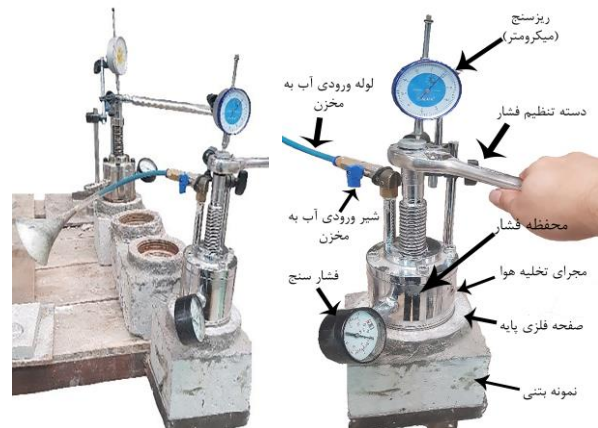
نفوذ آب اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا برای نمونه‌های بتنی با و بدون افزودنی‌ها با دقت بالایی با هم تطابق دارند که بیانگر اعتبار نتایج حاصله از روش «محفظه استوانه‌ای» است [۱۱، ۱۲].

در این پژوهش، روش «محفظه استوانه‌ای» برای اندازه‌گیری نفوذپذیری نمونه‌های بتنی به کار گرفته شده است. اجزای مختلف و نحوه اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از این روش در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، برای ارزیابی نفوذپذیری با استفاده از "روش محفظه استوانه‌ای"، به سطح مربعی شکل با ابعاد تقریبی ۱۵ سانتی‌متر نیاز است. این سطح باید پیش از شروع آزمایش تمیز گردد تا چسبندگی کافی بین چسب و صفحه فلزی برای اتصال دستگاه به نمونه بتنی ایجاد شود. برای اتصال صفحه فلزی به سطح نمونه از چسب اپوکسی استفاده می‌شود. پس از سخت شدن چسب، دستگاه آزمایش روی صفحه فلزی تثبیت شده و محفظه آن با مایع مورد نظر پر می‌شود. سپس، با بستن شیر ورودی مایع و چرخاندن دسته تنظیم فشار، فشار به مقدار مورد نظر تنظیم می‌گردد که مقدار آن با استفاده از فشارسنج تعبیه شده بر دستگاه قابل قرائت است (در این مقاله، فشار آبی برابر با ۵ بار به نمونه‌ها وارد شد). حفره‌ای نیز در محفظه فشار برای خروج هوای محبوس شده احتمالی در دستگاه تعبیه شده است. با چرخاندن دسته اعمال فشار، مقدار حرکت پیستون به سمت پایین در داخل محفظه فشار در زمان‌های دلخواه با استفاده از ریزسنج یا micrometer تعبیه شده قابل قرائت است. با سپری شدن زمان و نفوذ آب به داخل نمونه از فشار آب وارده کم می‌شود. بنابراین، باید با چرخاندن مجدد دسته تنظیم فشار، فشار آب در مقدار مورد نظر ثابت نگه داشته شود. این عمل تا پایان انجام آزمایش به طور پیوسته ادامه می‌یابد. با استفاده از قرائت‌های ریزسنج در زمان‌های ثبت شده و مساحت سطحی که آب از آن به داخل نمونه نفوذ می‌کند (سطح داخلی صفحه فلزی پایه)، مقدار حجم آب نفوذ کرده به نمونه بتنی و نرخ نفوذ آب در هر لحظه از زمان قابل محاسبه است.

۳- مراحل انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های بتنی مکعبی ۲۸ روزه با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر حاوی میکروسیلیس، خاکستر بادی، ژئولیت و پودر سنگ آهک و همچنین سیمان‌های نوع ۴۲۵-۱، نوع ۲، نوع ۵، پوزولانی و سفید استفاده شد. آزمایش نفوذپذیری برای بتن‌های حاوی سیمان‌ها و افزودنی‌های معدنی ذکر شده در درصدهای وزنی جایگزینی سیمان پرتلند نوع ۲ برابر با ۵، ۱۰، ۱۵



(الف) اجزای مختلف دستگاه (ب) نمونه‌های بتنی آماده شده برای انجام آزمایش «محفظه استوانه‌ای»

شکل ۱ - دستگاه و آزمایش «محفظه استوانه‌ای»

از "روش محفظه استوانه‌ای" می‌توان برای تعیین نفوذپذیری سایر مصالح ساختمانی مانند سنگ و آجر در برابر نفوذ مایعات مختلف مانند مشتقات نفتی نیز استفاده کرد. مهم‌ترین مزیت این روش بر سایر روش‌های موجود برای اندازه‌گیری نفوذپذیری بتن که تنها در آزمایشگاه قابل استفاده هستند، مانند روش ارائه شده در استاندارد بریتانیا [۱۹]، می‌توان به امکان انجام آزمایش نفوذپذیری در محل سازه، علاوه بر امکان انجام آزمایش در آزمایشگاه اشاره کرد. قابلیت انجام آزمایش در سطوح مختلف مانند سطوح قائم، افقی و شیب‌دار و محل‌هایی که نمونه‌گیری مشکل است، از مزایای این روش هستند. عدم وجود محدودیت برای ابعاد نمونه‌ای مورد آزمایش، قابل حمل بودن دستگاه آزمایش، امکان تکرار آزمایش، هزینه اندک دستگاه آزمایش از مزایای دیگر این روش هستند. همچنین، با محاسبه حجم مایع نفوذ کرده، نیازی به شکستن نمونه برای اندازه‌گیری عمق نفوذ نیست. این قابلیت در سایر روش‌های متداول، مانند استاندارد بریتانیا فراهم نشده است. شایان ذکر است که اعتبار و صحت نتایج به دست آمده از این روش در مقالاتی، ارزیابی شده است. بررسی این مقالات نشان می‌دهد که عمق‌های

و ۲۰ درصد با استفاده از آب شرب انجام پذیرفت. به دلیل امکان بروز مشکلات دوامی برای سازه‌های واقع در سواحل دریایی، نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف با استفاده از آب دریا نیز ارزیابی شد. میکروسیلیس از شرکت نامیکاران قزوین، خاکستر بادی از شرکت تجهیزات بتن خاورمیانه، زئولیت از شرکت نگین پودر سمنان، پودر سنگ آهک از شرکت مصالح ساختمانی فجر و چسب دو مؤلفه‌ای مورد استفاده از شرکت مقاوم تدبیر قشم تهیه شدند. سیمان‌های مورد استفاده نیز از شرکت‌های سیمان شمال، سیمان تهران، سیمان سپاهان و سیمان آبیگ تهیه شدند. از آب شهر قزوین جهت ساخت و انجام آزمایش نفوذپذیری با آب شرب و از آب سواحل جنوبی دریای خزر در شهرستان نور با شوری ۱۳ ppm سنگدانه‌های مصرفی در شکل ۲ رسم شده است.

جدول ۱ - طرح مخلوط نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف

نام نمونه*	نسبت آب به مجموع مواد سیمانی و افزودنی معدنی	سیمان پرتلند نوع ۲	آب	شن	ماسه	افزودنی معدنی	فوق روان‌کننده	مقاومت
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(درصد کل وزن مواد سیمانی)	(MPa) روزه
OPC	۰/۵	۳۵۰	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	-	-	۲۷/۲
SF5	۰/۵	۳۳۲/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۱۷/۵	۰/۶	۳۰/۴
SF10	۰/۵	۳۱۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۳۵	۰/۶۵	۳۵/۷
SF15	۰/۵	۲۹۷/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۵۲/۵	۰/۶۵	۳۲/۰
SF20	۰/۵	۲۸۰	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۷۰	۰/۷۰	۲۹/۷
FA5	۰/۵	۳۳۲/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۱۷/۵	-	۲۹/۵
FA10	۰/۵	۳۱۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۳۵	-	۲۷/۹
FA15	۰/۵	۲۹۷/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۵۲/۵	-	۲۵/۶
FA20	۰/۵	۲۸۰	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۷۰	-	۲۳/۶
ZE5	۰/۵	۳۳۲/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۱۷/۵	۰/۳۵	۲۸/۵
ZE10	۰/۵	۳۱۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۳۵	۰/۴	۲۹/۳
ZE15	۰/۵	۲۹۷/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۵۲/۵	۰/۴۵	۳۰/۳
ZE20	۰/۵	۲۸۰	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۷۰	۰/۴۵	۲۵/۸
LP5	۰/۵	۳۳۲/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۱۷/۵	-	۲۶/۴
LP10	۰/۵	۳۱۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۳۵	-	۲۴/۷
LP15	۰/۵	۲۹۷/۵	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۵۲/۵	-	۲۲/۲
LP20	۰/۵	۲۸۰	۱۷۵	۶۹۲	۹۹۸	۷۰	-	۲۰/۷

*OPC=سیمان پرتلند نوع ۲، SF=میکروسیلیس، FA=خاکستر بادی، ZE=زئولیت، LP=پودر سنگ آهک. اعداد ذکر شده در نام

نمونه‌ها نیز بیانگر درصد وزنی جایگزینی سیمان پرتلند نوع ۲ هستند

جدول ۲ - طرح مخلوط نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف

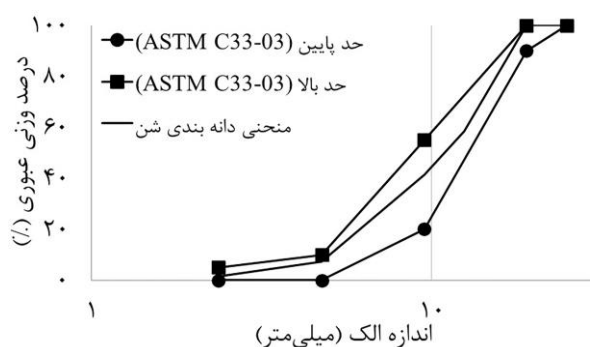
نوع سیمان	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)
سیمان نوع ۱-۴۲۵	۰/۵	۴۱۲	۱۹۳	۹۶۰	۸۱۵	۳۹/۱
سیمان نوع ۲	۰/۵	۴۱۲	۱۹۳	۹۶۰	۸۱۵	۴۲/۱
سیمان نوع ۵	۰/۵	۴۱۲	۱۹۳	۹۶۰	۸۱۵	۳۲/۱
سیمان پوزولانی	۰/۵	۴۱۲	۱۹۳	۹۶۰	۸۱۵	۳۹/۳
سیمان سفید	۰/۵	۴۱۲	۱۹۳	۹۶۰	۸۱۵	۳۳/۵

جدول ۳ - درصد یونهای موجود در آب منطقه نور

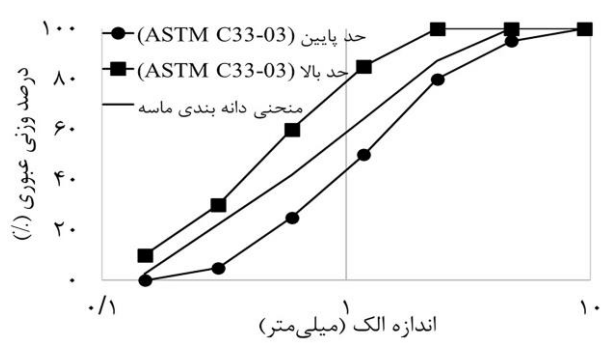
پتاسیم	کلسیم	منیزیم	سولفات	سدیم	کلراید	سایر
۱	۱	۴	۱۲	۳۴	۴۲	۶
درصد (%)						

جدول ۴ - ترکیب شیمیایی افزودنی‌های معدنی و سیمان‌های استفاده شده برای ساخت نمونه‌های بتنی (%)

سیمان	افت حرارتی	C	SiC	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
سیمان ۱-۴۲۵	۱/۹۰	-	-	۲/۲۳	-	-	۲/۲۱	۶۴/۰۰	۳/۴۵	۵/۰۰	۲۱/۲۴
سیمان نوع ۲	۱/۸۸	-	-	۱/۸۹	۰/۶۸	۰/۳۷	۳/۲۲	۶۲/۲۸	۳/۸۶	۴/۷۶	۲۰/۷۹
سیمان نوع ۵	۰/۸۰	-	-	۱/۹۰	-	-	۲/۱۶	۶۳/۹۰	۵/۲۱	۴/۲۲	۲۱/۷۰
سیمان پوزولانی	۱/۵۰	-	-	۲/۵۴	۰/۸۵	۰/۴۰	۱/۱۱	۶۰/۱۲	۳/۷۳	۵/۱۲	۲۵/۰۰
سیمان سفید	۱/۱۰	-	-	۱/۵۷	۰/۵۶	۰/۴۰	۲/۰۰	۶۵/۷۳	۰/۵۰	۴/۴۲	۲۳/۵۱
میکروسیلیس	-	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۱۰	۱/۰۱	۰/۳۱	۰/۹۷	۰/۴۹	۰/۳۷	۱/۳۲	۹۳/۶۰
خاکستر بادی	-	-	-	۰/۰۸	۱/۰۱	۰/۵۹	۱/۰۹	۴/۹۴	۴/۴۲	۲۵/۱۱	۶۱/۳۴
زئولیت	۱۰/۶۴	-	-	۰/۰۷	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۷۹	۴/۸۳	۰/۹۷	۱۱/۱۴	۶۸/۹۵
پودر سنگ آهک	۴۱/۷۶	-	-	۰/۰۵	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۴۰	۵۳/۱۶	۰/۱۲	۱/۰۳	۲/۵۵



(ب) منحنی دانه بندی درشت دانه‌ها

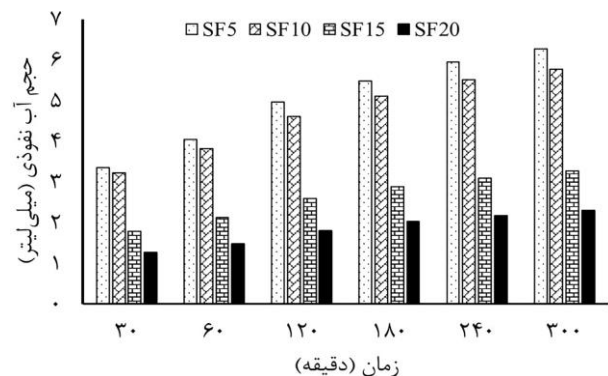


(الف) منحنی دانه بندی ریزدانه‌ها

شکل ۲ - منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها

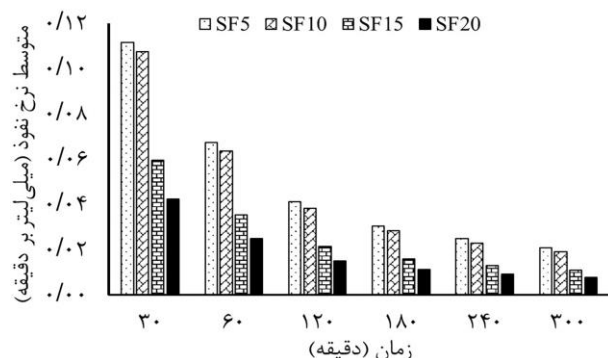
۴- تحلیل و بررسی نتایج

۴-۱- تأثیر نوع افزودنی معدنی مصرفی (میکروسیلیس، خاکستر بادی، ژئولیت و پودر سنگ) بر نفوذپذیری بتن در شکل ۳ نمودارهای حجم آب نفوذ کرده و متوسط نرخ نفوذ آب در زمان‌های مختلف برای نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس رسم شده‌اند.



(الف) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های

بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف میکروسیلیس



(ب) تغییرات متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های

بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف میکروسیلیس

شکل ۳- تغییرات حجم آب نفوذی و متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس

همانگونه که در شکل ۳- (الف) نشان داده شده است، با گذشت زمان، از سرعت نفوذ آب کاسته می‌شود. زیرا منافذ بیشتری از آب پر می‌شوند. نمودار رسم شده در شکل ۳- (ب) نیز کاهش نرخ نفوذ آب را با افزایش زمان نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳- (ب) دیده می‌شود، در انتهای آزمایش متوسط نرخ نفوذ به مقدار تقریباً ثابتی میل می‌کند. همچنین، در شکل ۳ دیده می‌شود که جایگزین کردن سیمان با میکروسیلیس در تمامی مقادیر وزنی مورد استفاده در این بررسی‌ها، سبب کاهش نفوذپذیری نمونه بتنی

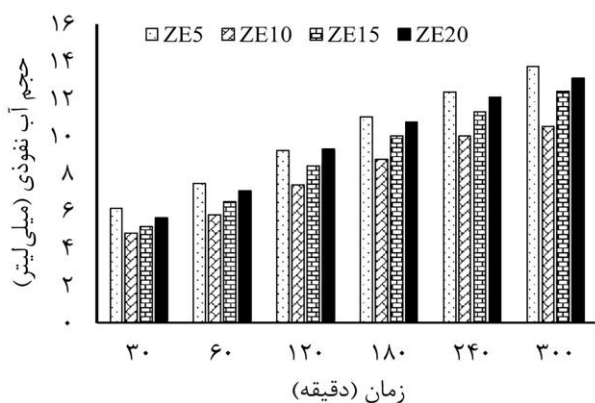
بدون افزودنی شده است. بعلاوه، در همین شکل دیده می‌شود که حجم آب نفوذ کرده برای مقادیر جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان به ترتیب برابر با ۶/۲۷، ۵/۷۷، ۳/۲۲ و ۲/۳۱ میلی‌لیتر است. این مقادیر به ترتیب معادل کاهش ۶۲/۵۴، ۶۵/۵۳، ۸۰/۴۷ و ۸۶/۲۰ درصدی حجم آب نفوذ کرده نسبت به نمونه OPC هستند. نمودار متوسط نرخ نفوذ آب در زمان‌های مختلف که در شکل ۳- (ب) رسم شده است نیز نشان می‌دهد که جایگزین کردن درصدی از وزن سیمان با میکروسیلیس سبب کاهش متوسط نرخ نفوذ آب شده و با افزایش مقدار میکروسیلیس، متوسط نرخ نفوذ آب کاهش می‌یابد.

نتایج منتشر شده در ارتباط با تأثیر میکروسیلیس بر نفوذپذیری بتن بیانگر آن هستند که جایگزین کردن ۵ و ۱۰ درصد وزن سیمان با میکروسیلیس، عمق نفوذ آب را از ۵۱/۹۲ میلی‌متر به ترتیب به ۱۳/۴۱ و ۹/۰۳ میلی‌متر کاهش می‌دهد [۲۰]. همچنین، ضرایب نفوذپذیری به دست آمده از معادله دارسی بیانگر کاهش ۲۸/۶ و ۶۸/۰ درصدی نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی برای مقادیر جایگزینی به ترتیب برابر با ۵ و ۱۰ درصد وزن سیمان هستند [۲۱]. نتایج ارائه شده توسط دیگر محققین در ارتباط با میزان نفوذ یون کلراید نیز کمتر بودن نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس را نسبت به نمونه OPC نشان می‌دهند [۲۲-۲۴]. بعلاوه، در نتایج منتشره، کاهش عمق نفوذ آب به داخل بتن حاوی میکروسیلیس برای مقادیر جایگزینی برابر با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان قابل رویت می‌باشد [۲۵].

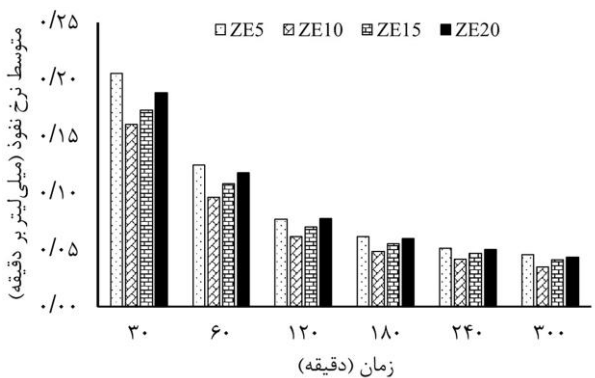
تغییرات حجم آب نفوذ کرده و متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای مقادیر مختلف وزنی خاکستر بادی در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، همانند میکروسیلیس، با افزایش مقدار خاکستر بادی در طرح مخلوط بتن نفوذپذیری نمونه‌های بتنی پیوسته کاهش می‌یابد. به طوری که برای مقادیر جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان به ترتیب حجم آب نفوذ کرده به داخل نمونه OPC از ۱۶/۷۴ میلی‌لیتر به ۷/۹۷، ۷/۲۴، ۶/۲۷ و ۴/۹۶ کاهش یافته است. با افزایش مقدار خاکستر بادی و افزایش زمان از متوسط نرخ نفوذ آب کاسته شده و تقریباً به مقدار ثابتی میل می‌کند که این رفتار در شکل ۴- (ب) قابل مشاهده است.

درصد وزن سیمان با این پوزولان سبب کاهش عمق نفوذ آب از ۲۷ میلی‌متر به ترتیب به ۲۳ و ۱۵ میلی‌متر می‌شود [۲۵]. نتایج حاصله از آزمایش نفوذپذیری یون کلراید نیز کاهش نفوذپذیری بتن را به دلیل استفاده از خاکستر بادی در طرح مخلوط بتن نشان می‌دهند [۲۸].

تغییرات حجم آب نفوذ کرده در برابر زمان انجام آزمایش برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر مختلف وزنی زئولیت در شکل ۵-الف) نشان داده شده است.



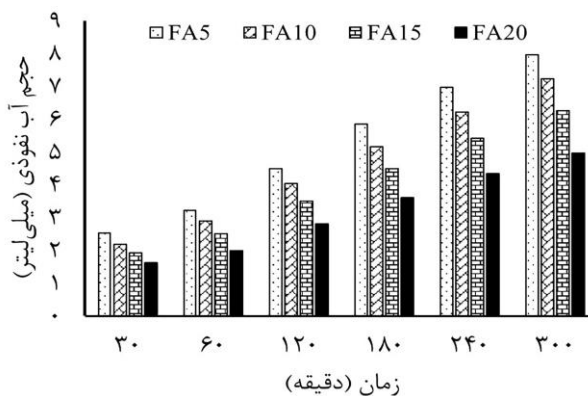
الف) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف زئولیت



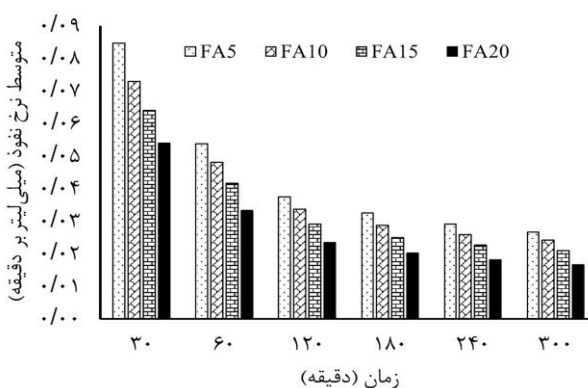
ب) تغییرات متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف زئولیت

شکل ۵- تغییرات حجم آب نفوذی و متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف زئولیت

همانگونه که از این شکل قابل استنباط است، مقدار جایگزینی بهینه‌ای برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان برای زئولیت وجود دارد که در این مقدار نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی زئولیت کمینه است و با افزایش وزن زئولیت نسبت به مقدار بهینه‌اش نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. همچنین، با بررسی شکل ۵-الف) دیده می‌شود



الف) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف خاکستر بادی

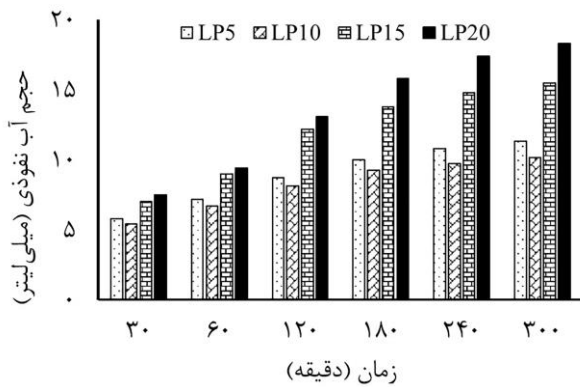


ب) تغییرات متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف خاکستر بادی

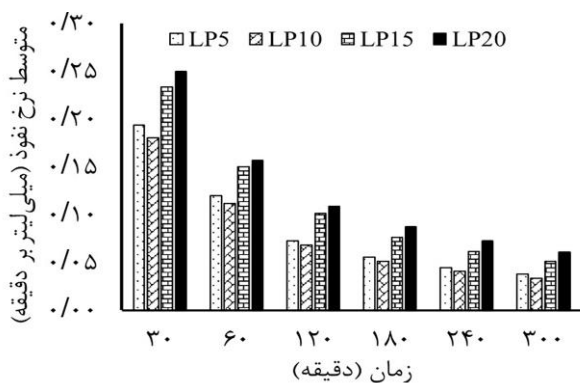
شکل ۴- تغییرات حجم آب نفوذی و متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف خاکستر بادی

نتایج منتشره توسط محققین نشان می‌دهند که جایگزین کردن ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزن سیمان با خاکستر بادی، به دلیل تولید ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم، با کاهش پیوسته تعداد منافذ نفوذپذیر و در نتیجه نفوذپذیری نمونه‌های بتنی همراه است [۲۶]. همچنین، محققین کاهش پیوسته نفوذپذیری را با افزایش مقدار خاکستر بادی برای مقادیر جایگزینی ۵ تا ۲۰ درصد وزن سیمان گزارش کرده‌اند، به طوری که عمق نفوذ آب در نمونه بتنی بدون خاکستر بادی و نمونه بتنی حاوی خاکستر بادی با مقدار جایگزینی ۲۰ درصد وزن سیمان، به ترتیب برابر با ۲۸ و ۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. این اعداد کاهش ۴۶ درصدی عمق نفوذ آب در بتن حاوی خاکستر بادی را نسبت به نمونه بتنی بدون خاکستر بادی نشان می‌دهند [۲۷]. همچنین، در ارتباط با تأثیر خاکستر بادی بر نفوذپذیری بتن گزارش شده است که جایگزین کردن ۱۰ و ۲۰

مقدار متوسط نرخ نفوذ آب متعلق به نمونه LP10 است. همچنین، در شکل ۶- (ب) مشاهده می‌شود که متوسط نرخ نفوذ آب در نمونه LP20 بیشتر از مقدار متناظر آن در نمونه OPC است. این رفتار بیانگر تأثیر نامطلوب پودر سنگ آهک بر دوام بتن، به دلیل جایگزینی بیش از حد سیمان با این ماده می‌باشد.



(الف) تغییرات حجم آب نفوذی در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف پودر سنگ آهک



(ب) تغییرات متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف پودر سنگ آهک

شکل ۶- تغییرات حجم آب نفوذی و متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک

در مقاله‌ای در ارتباط با اثر جایگزینی سیمان با پودر سنگ آهک گزارش شده است که با جایگزین کردن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان با پودر سنگ آهک، عمق نفوذ آب از ۱۱ میلی‌متر به ترتیب به ۹ و ۸ و ۱۰/۵ میلی‌متر کاهش می‌یابد. با توجه به این نتایج، مقدار بهینه پودر سنگ آهک برای افزایش دوام بتن باید در حدود ۱۰ درصد وزن سیمان انتخاب شود [۳۴]. نتایج منتشره توسط محققین نشان می‌دهند که عمق نفوذ آب در نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک برای مقدار جایگزینی برابر با ۲۰ درصد وزن سیمان ۱۲/۵

که نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در تمامی مقادیر وزنی زئولیت مورد بررسی نسبت به نمونه OPC کاهش یافته است. نمودار متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف زئولیت در شکل ۵- (ب) قابل مشاهده است. از این شکل چنین استنباط می‌شود که جریان ناپایداری در ابتدای آزمایش در نمونه‌های بتنی وجود دارد و با افزایش زمان انجام آزمایش، جریان نفوذ آب پایداری در نمونه‌های بتنی پدید می‌آید که به دلیل اشباع شدن تعداد بیشتری از منافذ بتن است. مقدار بهینه‌ای برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان که در شکل ۵- (الف) برای نمونه‌های زئولیتی دیده شد، در شکل ۵- (ب) نیز مشاهده می‌شود. با بیشتر شدن مقدار زئولیت نسبت به مقدار وزنی بهینه‌اش، متوسط نرخ نفوذ آب نیز افزایش می‌یابد.

بد نیست به این نکته اشاره شود که بر اساس نتایج گزارش شده در ارتباط با نفوذپذیری بتن در برابر گاز اکسیژن، مقدار بهینه‌ای برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان برای زئولیت اعلام شده است [۲۹].

همچنین، محققین مشاهده کردند که با جایگزین کردن ۱۰ درصد وزن سیمان با زئولیت، نفوذپذیری به میزان ۳۰ درصد کاهش می‌یابد [۳۰]. از طرفی، با جایگزین کردن ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان با زئولیت، عمق نفوذ آب از ۱۷ میلی‌متر به ترتیب به ۱۴/۳ و ۱۵/۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد [۳۱]. مقالات دیگری نیز منتشر شده‌اند که بیانگر کاهش عمق نفوذ آب در اثر جایگزینی بخشی از سیمان با زئولیت هستند [۳۲، ۳۳].

اثر جایگزینی درصدی از وزن سیمان با پودر سنگ آهک بر حجم آب نفوذ کرده و متوسط نرخ نفوذ آب در نمونه‌های بتنی در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶- (الف) دیده می‌شود که با جایگزین کردن ۱۰ درصد وزن سیمان با پودر سنگ آهک، کمترین میزان نفوذپذیری برای نمونه‌های بتنی حاوی این ماده حاصل شده است. با افزایش مقدار پودر سنگ آهک نسبت به مقدار وزنی بهینه‌اش، نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد و حتی ممکن است سبب کاهش دوام بتن شود. به طوری که حجم آب نفوذی به داخل نمونه LP20 به میزان ۹/۲۰ درصد نسبت به نمونه OPC افزایش یافته است.

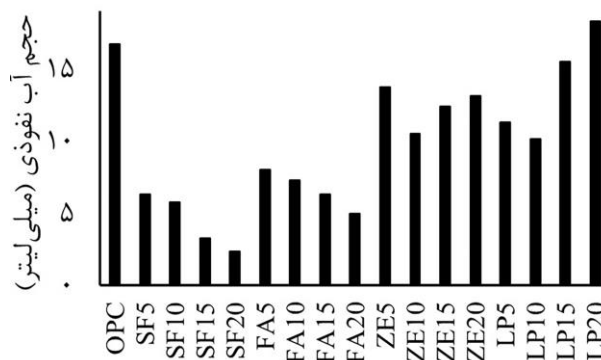
نمودار متوسط نرخ نفوذ آب در برابر زمان برای نمونه‌های بتنی حاوی مقادیر وزنی مختلف پودر سنگ آهک در شکل ۶- (ب) رسم شده است. با بررسی این شکل دیده می‌شود که کمترین

کوچک‌تر نسبت به ذرات سیمان، خاصیت پرکنندگی ذرات افزودنی‌های معدنی، جایگزین شدن بخشی از سیمان با ماده مورد نظر (اثر رقیق‌کنندگی) و اثر اصلاح اندازه ذرات در ساختار بتن است. برآیند این عوامل مشخص می‌کند که جایگزین کردن بخشی از سیمان با افزودنی‌های معدنی با کاهش نفوذپذیری بتن همراه است یا افزایش آن [۴۲]. با جایگزین کردن بخشی از سیمان با افزودنی‌های معدنی، به دلیل کاهش مقدار سیمان، نفوذپذیری افزایش می‌یابد. سایر خواص فیزیکی و شیمیایی ذکر شده در جهت مخالف با اثر رقیق‌کنندگی سیمان عمل می‌کنند و نفوذپذیری را کاهش می‌دهند. در مورد نمونه‌های بتنی حاوی میکروسلیس و خاکستر بادی با افزایش درصد وزنی این مواد، عوامل مؤثر بر کاهش نفوذپذیری بر اثر رقیق‌کنندگی سیمان که نفوذپذیری را افزایش می‌دهد، چیره می‌شوند و در نتیجه، با جایگزینی بیشتر سیمان با این مواد نفوذپذیری کاهش می‌یابد. در ارتباط با نمونه‌های بتنی حاوی ژئولیت و پودر سنگ آهک، دیده شد که تا مقدار جایگزینی برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان نفوذپذیری کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر مقدار جایگزینی، تأثیر عامل رقیق‌کنندگی سیمان نسبت به تأثیر سایر عوامل ذکر شده در کاهش نفوذپذیری بیشتر می‌شود. در نتیجه، نفوذپذیری افزایش می‌یابد و حتی ممکن است از نفوذپذیری بتن بدون افزودنی معدنی بیشتر شود. این رفتار سبب افزایش نفوذپذیری نمونه LP20 نسبت به نمونه OPC شده بود.

برای بررسی دقیق‌تر، تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی مورد مطالعه با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. شکل‌های ۸-الف) تا (ث) به ترتیب مربوط به نمونه بتنی بدون افزودنی معدنی و بتن‌های حاوی پودر سنگ آهک، ژئولیت، خاکستر بادی و میکروسلیس با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان هستند. در شکل‌های ۸-پ)، (ت) و (ث) با مصرف هیدروکسید کلسیم طی واکنش پوزولانی، ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم بیشتری نسبت به نمونه بتنی بدون افزودنی (شکل ۸-الف)) تولید شده که نتیجه آن تشکیل ساختاری متراکم‌تری برای بتن است. مقدار هیدرات‌ها، به ویژه ژل هیدرات سیلیکات کلسیم با پیشرفت هیدراسیون افزایش می‌یابد و سوزن‌های اترینگایت در هیدرات‌های سیلیکات کلسیم نفوذ می‌کنند و یک شبکه جامد را تشکیل می‌دهند.

میلی‌متر می‌باشد که تقریباً ۱۴ درصد بیشتر از عمق نفوذ آب در نمونه بدون پودر سنگ است و با نتایج گزارش شده در این مقاله مطابقت دارد. در مقالاتی نیز برای بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر دوام بتن از نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذپذیری یون کلراید استفاده شده است [۳۷-۳۵]. باید به این نکته توجه شود که رابطه مستقیمی بین نفوذپذیری آب و نفوذپذیری یون کلراید وجود دارد و با بررسی نفوذپذیری یون کلراید در نمونه‌های بتنی، می‌توان مقاومت آنها در برابر نفوذ آب را نیز ارزیابی کرد [۳۸].

برای مقایسه تأثیر افزودنی‌های معدنی مورد بررسی، مقادیر حجم‌های آب نفوذ کرده به نمونه‌های بتنی در انتهای آزمایش‌ها محاسبه و در شکل ۷ رسم شده‌اند. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، میکروسلیس به عنوان مؤثرترین افزودنی معدنی در کاهش نفوذپذیری نسبت به سایر افزودنی‌های معدنی مورد بررسی در این مقاله عمل کرده است. همچنین، در این شکل مشاهده می‌شود که جز نمونه LP20، نفوذپذیری سایر نمونه‌ها کمتر از نفوذپذیری نمونه OPC است.

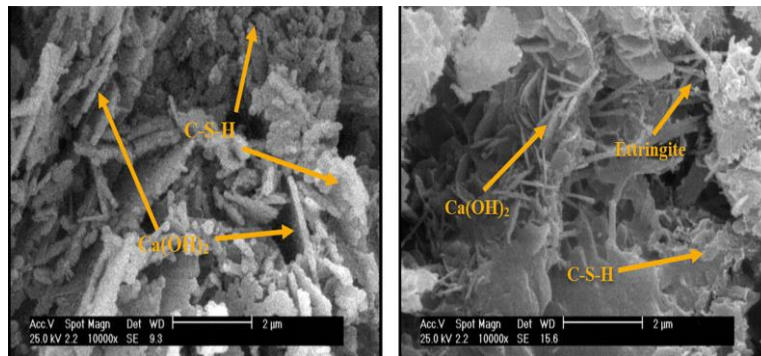


شکل ۷ - حجم آب نفوذ کرده به نمونه‌های بتنی حاوی میکروسلیس، خاکستر بادی، ژئولیت و پودر سنگ آهک

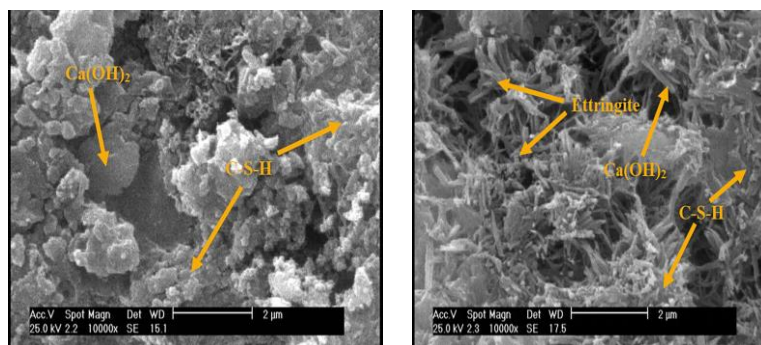
جایگزین کردن درصدی از وزن سیمان با افزودنی‌های معدنی سبب تغییر در روند هیدراسیون سیمان می‌شود که این رفتار به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی افزودنی‌های معدنی است [۳۹]. خاصیت شیمیایی مربوط به واکنش پوزولانی است که در آن ماده دارای خاصیت پوزولانی با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش داده که نتیجه این واکنش پر شدن منافذ بتن به دلیل تولید ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم و کاهش نفوذپذیری بتن است [۴۰، ۴۱]. خواص فیزیکی نیز شامل خاصیت پراکنده کردن ذرات سیمان به دلیل حضور ذرات افزودنی‌های معدنی با اندازه

هیدراسیون سیمان، در اثر واکنش کلسیم کربنات موجود در پودر سنگ آهک با آلومینات‌های سیمان، کربوآلومینات تشکیل می‌شود. این امر با تأخیر در تبدیل اترینگایت-مونوسولفوآلومینات همراه بوده و در نتیجه سبب تغییر شیمیایی در روند هیدراسیون می‌شود. البته، به دلیل سطح مخصوص بالای ذرات پودر سنگ آهک، این ماده عمدتاً با پر کردن منافذ بین ذرات سیمان، سبب کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. [۶، ۷].

سپس، با افزایش محصولات هیدراسیون سوزن‌های اترینگایت کوتاه شده و در دیگر محصولات هیدراسیون نفوذ کرده و یک شبکه منسجم شکل می‌گیرد (شکل ۸-ا). بعلاوه، برای نمونه بتنی بدون افزودنی، تراکم بلورهای هیدروکسید کلسیم به وضوح مشخص است. همچنین، به دلیل وجود کربنات کلسیم در ساختار پودر سنگ آهک، اترینگایت‌های سوزنی شکل پایدارتری در نمونه بتنی حاوی این ماده نسبت به سایر بتن‌ها دیده می‌شود. طی

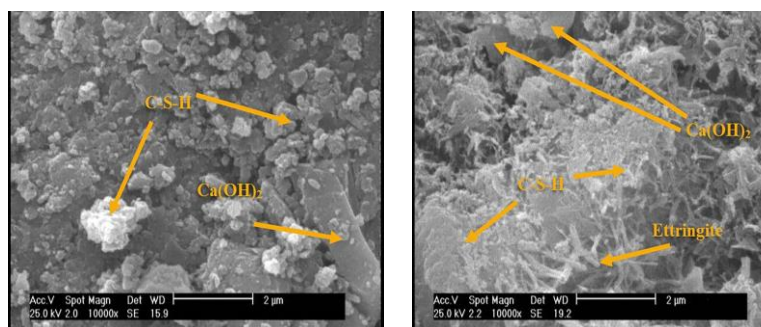


(الف) بتن بدون افزودنی



(پ) بتن حاوی زئولیت

(ب) بتن حاوی پودر سنگ آهک



(ث) بتن حاوی میکروسیلیس

(ت) بتن حاوی خاکستر بادی

شکل ۸ - تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های بتنی بدون افزودنی معدنی و حاوی افزودنی‌های معدنی دوده سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان

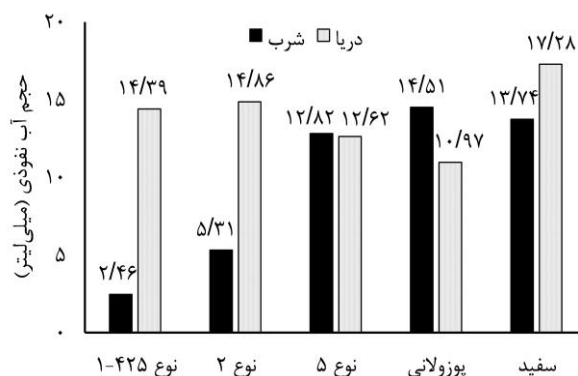
مختلف با نمودارهای متناظر در بخش ۴-۱، برای انجام بررسی‌ها تنها حجم‌های آب نفوذی در انتهای آزمایش‌ها محاسبه شده و مقادیر به دست آمده در شکل ۹ رسم شده‌اند. لازم به ذکر است

۴-۲- تأثیر نوع سیمان مصرفی بر نفوذپذیری بتن
به دلیل تشابه روند تغییرات حجم آب نفوذ کرده و متوسط نرخ نفوذ آب با افزایش زمان برای نمونه‌های بتنی دارای سیمان‌های

سیلیکات ترکیب شده، ماده‌ای به نام سولفوآلومینات کلسیم (اترینگایت) به وجود می‌آورند. این ماده در اثر جذب آب متورم و باعث ایجاد ترک در بتن می‌شود که به این روند حمله سولفاتی می‌گویند. با توجه به این مطلب، کاهش میزان تری کلسیم سیلیکات در سیمان و تولید سیمان‌هایی چون سیمان پرتلند نوع ۵ به عنوان راه حلی برای مقابله با حملات سولفات‌ها ارائه شده است. در روند حملات سولفات‌ها، نکته مهم آن است که تخریب بتن در اثر پدیده شیمیایی ترکیب سولفات تری کلسیم سیلیکات نیست، بلکه عامل تخریب پدیده فیزیکی انبساط اترینگایت در اثر جذب آب است. سولفات‌ها علاوه بر ترکیب با تری کلسیم سیلیکات، به هیدروکسید کلسیم نیز حمله کرده، در اثر ترکیب با آن تولید سولفات کلسیم (گچ) می‌کنند که این محصول هم در مجاورت آب و با جذب رطوبت، منبسط شده و در بتن ایجاد ترک می‌کند. یکی از مهم‌ترین خواص سیمان‌های پوزولانی مقاومتشان در برابر حمله سولفات‌ها است. پودر سیمان پرتلند در مجاورت آب، ژل سیمان را به وجود می‌آورد. هیدروکسید کلسیم ماده‌ای است که در ژل سیمان یافت می‌شود و معیایی را به همراه دارد. آب هنگام خروج از لوله‌های مویین بتن، مقداری هیدروکسید کلسیم را در خود حل کرده و به خارج منتقل می‌کند. هیدروکسید کلسیم در مجاورت هوا با دی اکسید کربن ترکیب می‌شود و کربنات کلسیم + آب (گچ) را به وجود می‌آورد که پس از تبخیر آب آن به صورت سفیدک‌هایی بر سطح بتن ظاهر می‌شود. محل هیدروکسید کلسیم‌هایی که به صورت فوق از بتن خارج می‌شوند، خالی می‌ماند که این خود عاملی برای افزایش نفوذپذیری بتن است. بنابراین، هیدروکسید کلسیم بستر مناسبی برای حمله سولفات‌ها به وجود می‌آورد. زیرا سولفات‌ها به هیدروکسید کلسیم حمله کرده و گچ را به وجود می‌آورند. این گچ در اثر جذب رطوبت متورم می‌شود و همان مسأله حمله سولفات‌ها به وقوع می‌پیوندد. پوزولان‌ها با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان ترکیب می‌شوند و سیلیکات کلسیم به وجود می‌آورند که ماده‌ای با خاصیت چسبندگی بالا است. در حقیقت پوزولانها یک ماده مضر در سیمان را به ماده‌ای مفید تبدیل می‌کنند و این گونه دوام بتن را افزایش می‌دهند.

نتایج گزارش شده در مقاله‌ای در ارتباط با اثر آب شرب و آب دریا بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در دو رده مقاومتی حاوی سیمان

که در این مقاله، اثر سیمان‌های مختلف بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در برابر آب شرب و آب دریا بررسی شده است.

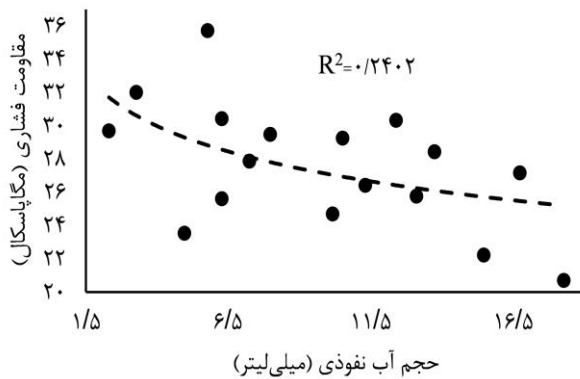


شکل ۹ - حجم آب شرب و آب دریا نفوذ کرده به نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان‌های مختلف

همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود، کمترین و بیشترین حجم آب شرب نفوذ کرده به نمونه‌های بتنی به ترتیب متعلق به بتن حاوی سیمان نوع ۱-۴۲۵ و سیمان پوزولانی هستند. نسبت حجم آب شرب نفوذ کرده برای این دو نمونه بتنی برابر با ۵/۹۰ است که بیانگر تأثیر بالای نوع سیمان مصرفی بر نفوذپذیری بتن در برابر آب شرب است. همچنین، با بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری در برابر آب دریا دیده می‌شود که کمترین و بیشترین مقدار حجم آب نفوذ کرده به نمونه‌های بتنی به ترتیب متعلق به بتن‌های حاوی سیمان پوزولانی و سیمان سفید هستند. نسبت حجم آب نفوذ کرده برای این بتن‌ها برابر با ۱/۵۸ است. با بررسی مقادیر حجم آب نفوذ کرده در نمونه‌های بتنی چنین نتیجه گرفته می‌شود که آب دریا نسبت به آب شرب به میزان بیشتری در بتن‌های حاوی سیمان‌های نوع ۱-۴۲۵، نوع ۲ و سفید نفوذ کرده است. البته، این افزایش نفوذ آب در مورد سیمان سفید چشمگیر نیست. این درحالی است که بتن‌های حاوی سیمان پوزولانی و سیمان نوع ۵ نفوذپذیری کمتری از خود در برابر آب دریا نسبت به آب شرب نشان داده‌اند که این رفتار بیانگر مقاومت بالای این نوع سیمان‌ها در برابر نمک‌های موجود در آب دریا است (با وجود زمان بسیار کم آزمایش‌های نفوذپذیری در این مقاله در برابر عمر واقعی یک سازه بتنی، تأثیر استفاده از این نوع سیمان‌ها بر نتایج به دست آمده محسوس است). این موضوع به این صورت توجیه می‌شود:

در مناطق سولفاتی، سولفات‌ها پس از نفوذ به بتن با تری کلسیم

در شکل ۱۰ و با توجه به مقادیر محاسبه شده برای ضرایب تعیین در جدول ۵ چنین نتیجه گرفته می‌شود که تابعی با دقت مناسب برای تقریب رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی وجود ندارد.



شکل ۱۰ - تقریب رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های مختلف با استفاده از تابع لگاریتمی

جدول ۵ - ضرایب تعیین به دست آمده با استفاده از توابع مختلف برای تقریب رابطه حجم آب نفوذی با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف

تابع خطی	تابع توانی	تابع نمایی
۰/۲۹۴۵	۰/۲۴۱۲	۰/۳۰۲۵

در شکل ۱۱ رابطه بین حجم آب نفوذ کرده و مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که ضرایب تعیینی برابر با ۰/۴۷۴۲ و ۰/۵۲۹۲ به ترتیب برای آزمایش‌های نفوذپذیری در برابر آب شرب و آب دریا به دست آمده‌اند که دقت نامناسب تابع لگاریتمی برای تقریب رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری این نمونه‌های بتنی را نشان می‌دهند. پراکندگی زیادی برای مقادیر حجم آب نفوذ کرده و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف در شکل ۱۱ دیده می‌شود. بنابراین، وجود املاح و نمک‌ها در آب بر نتایج نفوذپذیری تأثیر بسزایی دارد.

در جدول ۶ ضرایب تعیین محاسبه شده با استفاده از توابع خطی، توانی و نمایی برای تقریب رابطه بین مقاومت فشاری و حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های آورده شده‌اند. در جدول ۶ بزرگ‌ترین مقدار ضریب تعیین محاسبه شده برابر با ۰/۵۸۷۱ است که نشان دهنده همبستگی نه چندان قوی بین مقاومت

پرتلند معمولی، بیانگر آن هستند که ضریب نفوذپذیری محاسبه شده توسط معادله دارسی در آزمایش نفوذپذیری در برابر آب دریا در حدود ۷ تا ۱۴ برابر مقدار متناظر آن در آزمایش نفوذپذیری در برابر آب شرب است [۴۳]. نتایج مشابهی توسط محققین گزارش شده است که با نتایج مقاله کنونی مطابقت دارند [۴۴]. همچنین، محققینی کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های پوزولانی را نسبت به نمونه کنترل گزارش داده‌اند و این کاهش را با وجود پوزولان در این نوع سیمان‌ها مرتبط دانستند. بعلاوه، مقاومت نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های پوزولانی در محیط‌های خورنده بیشتر است [۴۵]. از طرفی، در محیط‌های دریایی، بتن حاوی سیمان پوزولانی بادوام‌تر از بتن حاوی سیمان نوع ۵ است [۴۶]. محققینی با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، میزان حجم آب دریای نفوذ کرده به داخل بتن‌های حاوی سیمان‌های پوزولانی و نوع ۵ را به ترتیب برابر با ۱۰/۹۷ و ۱۲/۶۲ میلی‌لیتر اندازه‌گیری کردند که نشان دهنده دوام بیشتر بتن حاوی سیمان پوزولانی نسبت به بتن حاوی سیمان نوع ۵ است. به نظر می‌رسد که واکنش پوزولانی نقش مؤثری در افزایش دوام نمونه‌های بتنی حاوی سیمان پوزولانی دارد.

۴-۳- رابطه نفوذپذیری با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

در شکل ۱۰ رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با و بدون افزودنی‌های معدنی مورد مطالعه که با استفاده از تابع لگاریتمی تقریب زده شده، نشان داده شده است. در این شکل دیده می‌شود که ضریب تعیینی برابر با ۰/۲۴۰۲ برای تقریب این رابطه با استفاده از تابع لگاریتمی محاسبه شده است که بیانگر دقت نه چندان مطلوب تابع لگاریتمی برای تقریب رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف است.

برای بررسی دقیق‌تر، در جدول ۵ ضرایب تعیین به دست آمده با استفاده از توابع خطی، توانی و نمایی برای تقریب رابطه حجم آب نفوذی با مقاومت فشاری آورده شده‌اند. در این جدول مشاهده می‌شود که بزرگ‌ترین ضریب تعیین برابر با ۰/۳۰۲۵ با استفاده از تابع نمایی محاسبه شده است که همچنان بیانگر همبستگی ضعیف بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های معدنی مختلف است. به دلیل پراکندگی بالای داده‌ها

۲۸ روزه با استفاده از روش «محفظه استوانه‌ای» ارائه گردیده است. برای این منظور، دو گروه نمونه‌های بتنی حاوی افزودنی‌های معدنی ذکر شده با مقادیر جایگزینی برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان و نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های نوع ۴۲۵-۱، نوع ۲، نوع ۵، پوزولانی و سفید مد نظر قرار گرفتند. همچنین، از تصاویر ریزساختار نمونه‌های بتنی با و بدون افزودنی‌های معدنی نامبرده در مقادیر جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان برای تحلیل دقیق‌تر نتایج نفوذپذیری استفاده شد. با توجه به مباحث مطرح شده، یافته‌های زیر حاصل شدند:

- جایگزین کردن درصدی از وزن سیمان با میکروسیلیس سبب کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ می‌شود و با افزایش مقدار وزنی میکروسیلیس، نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

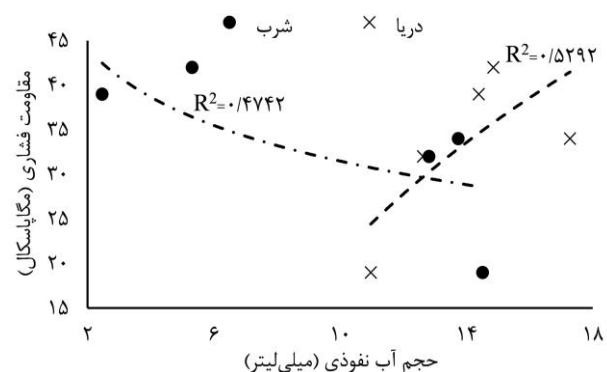
- همانند میکروسیلیس، استفاده از خاکستر بادی در مقادیر وزنی مختلف سبب کاهش نفوذپذیری نمونه‌های بتنی نسبت به نمونه بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ می‌شود. همچنین، رابطه معکوسی بین مقادیر وزنی خاکستر بادی و نفوذپذیری نمونه‌های بتنی مشاهده شد.

- نمونه‌های بتنی حاوی زئولیت نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه‌های بتنی حاوی سیمان پرتلند نوع ۲ دارند. مشاهده شد که مقدار بهینه زئولیت برای کمینه کردن نفوذپذیری برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان است و با افزایش بیشتر مقدار زئولیت نسبت به مقدار بهینه، نفوذپذیری بتن نیز افزایش می‌یابد.

- جایگزین کردن ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان با پودر سنگ آهک نفوذپذیری نمونه بتنی بدون افزودنی‌های معدنی را کاهش می‌دهد. با بررسی مقادیر حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی حاوی پودر سنگ آهک مشاهده شد که مقدار بهینه این ماده برابر با ۱۰ درصد وزن سیمان است. جایگزین کردن سیمان با پودر سنگ آهک در مقادیر بیشتر از این مقدار بهینه، سبب افزایش نفوذپذیری می‌شود. به طوری که نفوذپذیری نمونه بتنی حاوی پودر سنگ آهک با مقدار جایگزینی برابر با ۲۰ درصد وزن سیمان تقریباً ۱۰ درصد بیشتر از نفوذپذیری نمونه بتنی بدون افزودنی معدنی بود.

- در مقادیر وزنی جایگزینی یکسان برای افزودنی‌های معدنی

فشاری و حجم آب نفوذی به داخل نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف است.



شکل ۱۱ - تقریب رابطه بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف با استفاده از تابع لگاریتمی

جدول ۶ - ضرایب تعیین به دست آمده با استفاده از توابع مختلف برای تقریب رابطه حجم آب نفوذی با مقاومت فشاری

نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های مختلف			
	تابع خطی	تابع توانی	تابع نمایی
آب شرب	۰/۵۸۷۱	۰/۴۱۰۸	۰/۵۰۹۲
آب دریا	۰/۴۵۶۳	۰/۵۶۸۵	۰/۴۹۴۵

از آنجا که استفاده از افزودنی‌های معدنی و سیمان‌های مختلف در طرح مخلوط بتن سبب تغییر در تعداد، اندازه و ارتباط منافذ در بتن می‌شود، در بررسی‌های صورت گرفته در این مقاله، رابطه‌ای با دقت مناسب بین حجم آب نفوذی و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی مشاهده نگردید. باید به این نکته توجه داشت که نفوذپذیری تابعی از ارتباط و پیوستگی منافذ است که این موضوع عاملی برای نفوذپذیری کمتر نمونه‌های بتنی دارای مقاومت فشاری کمتر (مانند نمونه FA20) نسبت به نمونه‌های بتنی با مقاومت فشاری بیشتر (مانند نمونه OPC) است. شایان ذکر است که عدم وجود رابطه‌ای معکوس بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نیز توسط دیگر محققین گزارش شده است [۴۷، ۴۸].

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت، پودر سنگ آهک و سیمان‌های مختلف بر نفوذپذیری نمونه‌های بتنی

apparent activation energy function" *Cement and Concrete Research*. 33, 7 (2003), 965-971.

[4] Srivastava, V., Atul, I.A., Mehta, P. and Satyendranath, M. "Supplementary cementitious materials in construction - an attempt to reduce CO₂ emission" *Journal of Environmental Nanotechnology*. 7, (2018), 31-36.

[5] Abdollahi, S. and Zarei, Z. "Reduction of CO₂ emission and production costs by using pozzolans in Lamerd cement factory" *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 37, 1 (2018), 223-230.

[6] Menéndez, G., Bonavetti, V. and Irassar, E. "Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag" *Cement and Concrete Composites*. 25, 1 (2003), 61-67.

[7] Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., Sinthupinyo, S. and Chaipanich, A. "Effect of limestone powders on compressive strength and setting time of Portland-limestone cement pastes" *TICHe International Conference*. Songkhla, Thailand (2011), 322-326.

[8] Htwe, K.S.S. and Mon, Y.P.P. "Effect of natural pozzolan on carbonation and chloride penetration in sustainable concrete" *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 8, 4 (2018), 1049-1054.

[9] Abbas, Y. "Simplex-lattice strength and permeability optimization of concrete incorporating silica fume and natural pozzolan" *Construction and Building Materials*. 168, (2018), 199-208.

[10] Naderi, M. "Determination of the permeability of concrete, stone, mortar, brick and other building construction materials using cylindrical chamber method" *Intellectual Property Office (IRIPO)*. Patent Number 67726, (2010).

[11] Naderi, M. and Kaboudan, A. "Cylindrical chamber: A new in situ method for measuring permeability of concrete with and without admixtures" *Journal of Testing and Evaluation*. 48, 3 (2020), 2225-2241.

[12] Naderi, M., Kaboudan, A. and Akhavan Sadighi, A. "Comparative study on water permeability of concrete using cylindrical chamber method and British standard and its relation with compressive strength" *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*. 6, 1 (2018), 116-131.

[13] Naderi, M. and Kaboudan, A. "Experimental study of the effect of aggregate type on concrete strength and permeability" *Journal of Building Engineering*. 37, (2021), 101928.

[14] Kaboudan, A., Naderi, M. and Afshar, M.A. "The efficiency of Darcy and two-dimensional diffusion flow models to estimate water penetration into concrete" *Journal of Building Engineering*. 34,

میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک، میکروسیلیس بیشترین تأثیر را در کاهش نفوذپذیری بتن از خود نشان می‌دهد.

- تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌های بتنی با و بدون افزودنی‌های معدنی مورد مطالعه در مقادیر جایگزینی برابر با ۵ درصد وزن سیمان نشان دادند که نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک ساختار متراکم‌تری نسبت به نمونه بتنی بدون این افزودنی‌های معدنی دارند. این رفتار عمدتاً به دلیل خاصیت پرکنندگی و پوزولانی میکروسیلیس، خاکستر بادی و زئولیت است که با مصرف هیدروکسید کلسیم و تولید ژل ثانویه هیدرات سیلیکات کلسیم، سبب قطع ارتباط و پیوستگی منافذ بتن می‌شوند. پودر سنگ آهک نیز عمدتاً با خاصیت پرکنندگی ذرات خود به کاهش نفوذپذیری کمک می‌کند.

- در آزمایش نفوذپذیری در برابر آب شرب و آب دریا، کمترین نفوذپذیری به ترتیب برای نمونه‌های بتنی حاوی سیمان‌های نوع ۱-۴۲۵ و پوزولانی مشاهده شد. سیمان‌های پوزولانی و سفید نیز بیشترین میزان نفوذپذیری را به ترتیب در برابر آب شرب و آب دریا داشتند.

- به دلیل پراکندگی بالای نتایج به دست آمده، ضرایب همبستگی نسبتاً کوچکی برای تقریب رابطه حجم آب نفوذی با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با استفاده از توابع مختلف به دست آمد. وجود نمک‌ها و املاح در آب (شرایط محیطی‌ای که بتن در آن قرار دارد) منجر به تغییرات محسوس در میزان نفوذپذیری بتن می‌شود.

۶- مراجع

[1] Diab, A.M., Awad, A.E.M., Elyamany, H.E. and Elmoaty, A.E.M.A. "Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack" *Construction and Building Materials*. 36, (2012), 311-318.

[2] Liguori, B., Caputo, D., Marroccoli, M. and Colella, C. "Evaluation of zeolite-bearing tuffs as pozzolanic addition for blended cements" *ACI Symposium Publication*. 221, (2004), 319-334.

[3] Han, S.H., Kim, J.K. and Park, Y.D. "Prediction of compressive strength of fly ash concrete by new

- Journal of Civil Engineering. 5, 2 (2011), 245-257.
- [26] Saha, A.K. "Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete" Sustainable environment research. 28, 1 (2018), 25-31.
- [27] Muhit, I., Ahmed, S., Amin, M. and Raihan, M. "Effects of silica fume and fly ash as partial replacement of cement on water permeability and strength of high performance concrete" Proceeding of International Conference on Advances in Civil Engineering, New Delhi, India (2013), 109-115.
- [28] Nath, P. and Sarker, P. "Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete" Procedia Engineering. 14, (2011), 1149-1156.
- [29] Ahmadi, B. and Shekarchi, M. "Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material" Cement and Concrete Composites. 32, 2 (2010), 134-141.
- [30] Ahmadi, B., Sobhani, J., Shekarchi, M. and Najimi, M. "Transport properties of ternary concrete mixtures containing natural zeolite with silica fume or fly ash" Magazine of concrete research. 66, 3 (2014), 150-158.
- [31] Ramezaniapour, A.A., Mousavi, R. and Kalhori, M. "Influence of zeolite additive on chloride durability and carbonation of concretes" International Journal of Civil Engineering and Geo-Environment. 5, (2014), 1-13.
- [32] Markiv, T., Sobol, K., Franus, M. and Franus, W. "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite" Archives of Civil and Mechanical Engineering. 16, 4 (2016), 554-562.
- [33] Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan" Construction and Building Materials. 35, (2012), 1023-1033.
- [34] Ramezaniapour, A.A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M. and Moodi, F. "Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes" Cement and Concrete Composites. 31, 10 (2009), 715-720.
- [35] Fagerlund, G. "Imaginable effects of limestone filler on chloride transport" Lund Institute of Technology. Report TVBM-7187 (2005).
- [36] González, M., Rahhal, V., Bonavetti, V., Donza, H. and Irassar, E., "Effect of curing on early chloride diffusion of filler cement concrete" Conference on Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction: a vision for the next millennium. Sheffield, United Kingdom (1999), 137-148.
- [37] Persson, B. "Assessment of the chloride (2021), 102012.
- [۱۵] نادری، م. و کبودان، ع. "بررسی اثر مقاومت، زمان و مقدار فشار آب و جهت بتن‌ریزی بر نفوذپذیری بتن" نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۲، ۹ (۱۳۹۹)، ۱۷.
- [۱۶] نادری، م. و کبودان، ع. "ارزیابی معادله نفوذ آب در بتن با بکارگیری نتایج حاصل از روش «محفظه استوانه‌ای»" نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۵۳، ۵ (۱۴۰۰)، ۲۵.
- [۱۷] نادری، م.، کبودان، ع. و امین افشار، م. "مطالعه‌ی مقاومت و ضرایب انتشار و نفوذپذیری بتنی‌های حاوی دوده‌ی سیلیسی، خاکستر بادی، زئولیت و پودر سنگ آهک" نشریه مهندسی عمران شریف. ۳۶، ۲، ۲، ۲ (۱۴۰۰)، ۲۵-۱۳.
- [۱۸] نادری، م.، کبودان، ع. و کشتکار، م. "مطالعه نفوذپذیری و مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیسی، زئولیت و خاکستر بادی با استفاده از روش «محفظه استوانه‌ای» و استاندارد بریتانیا" نشریه مهندسی سازه و ساخت ۷، ۳ (۱۳۹۹)، ۱۱۳-۹۲.
- [19] BS EN:12390-8. "Testing hardened concrete – part 8: Depth of penetration of water under pressure" British Standard Institution, London, (2009),
- [20] Villavicencio, A., Torre, A. and Arrieta, J. "Comparative analysis of the permeability evaluated in the simple concrete and concrete with addition of microsilica" Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Albufeira, Portugal (2017), 11-15.
- [21] Elawady, E., Hefnawy, A.A.E and Ibrahim, R.A.F "Comparative study on strength, permeability and sorptivity of concrete and their relation with Concrete durability" International Journal of Engineering and Innovative Technology. 4, 4 (2014), 132-139.
- [22] Perraton, D., Aiticin, P. and Vezina, D. "Permeabilities of silica fume concrete" ACI Symposium Publication. 108, (1988), 63-84.
- [23] Hooton, R. "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 (1993), 143-151.
- [24] Soroushian, P., Mirza, F. and Alhozaimy, A. "Permeability characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete" Materials Journal. 92, 3 (1995), 291-295.
- [25] Elsayed, A.A. "Influence of silica fume, fly ash, super pozz and high slag cement on water permeability and strength of concrete" Jordan

Materials. 25, 5 (2011), 2472-2479.

[48] López, M. and Castro, J.T. "Effect of natural pozzolans on porosity and pore connectivity of concrete with time" *Revista Ingeniería de Construcción*. 25, 3 (2011), 419-432.

migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete: with some interrelated properties" Lund Institute of Technology. Report TVBM-3100 (2001).

[38] Ahmad, S., Al-Kutti, W.A., Al-Amoudi, O.S.B. and Maslehuddin, M. "Correlations between depth of water penetration, chloride permeability, and coefficient of chloride diffusion in plain, silica fume, and fly ash cement concretes" *Journal of Testing and Evaluation*. 36, 2 (2008), 136-139.

[39] Tokyay, M. *Cement and Concrete Mineral Admixtures*. Boca Raton: CRC Press (2016).

[40] Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P. and Elsen, J. "Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity" *Cement and Concrete Research*. 39, 3 (2009), 233-240.

[41] Zeng, Q., Li, K., Fen-chong, T. and Dangla, P. "Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for fly-ash cement pastes" *Construction and Building Materials*. 27, 1 (2012), 560-569.

[42] Parande, A.K., Babu, B.R., Karthik, M.A., Kumar, K.D. and Palaniswamy, N. "Study on strength and corrosion performance for steel embedded in metakaolin blended concrete/mortar" *Construction and Building Materials*. 22, 3 (2008), 127-134.

[43] Islam, M.S., Kaushik, S. and Islam, M.M. "Physical and mechanical behavior of concrete in seawater under high hydrostatic pressure" *Journal of the Institution of Engineers, Malaysia*. 66, 2 (2005), 46-52.

[44] Ramachandran, D., George, R., Vishwakarma, V. and Mudali, U.K. "Strength and durability studies of fly ash concrete in sea water environments compared with normal and superplasticizer concrete" *KSCE Journal of Civil Engineering*. 21, (2017), 1282-1290.

[45] Seleem, H.H, Rashad, A.M and El-Sabbagh, B.A. "Performance of blended cement concrete against Seawater Attack" *Advances in Science and Technology*. 64, (2010), 19-24.

[46] Bai, J., Wild, S. and Sabir, B. "Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC-PFA-MK binder compositions exposed to synthetic seawater" *Cement and Concrete Research*. 33, 3 (2003), 353-362.

[47] Ramezani-pour, A.A., Pilvar, A., Mahdikhani, M. and Moodi, F. "Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength" *Construction and Building*

Investigation of the effect of the used cement and mineral admixture type on concrete permeability using “Cylindrical chamber” method

Mahmood Naderi *

Professor, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Alireza Kaboudan

PhD in structural engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

mohammadreza akefi

MS in structural engineering, Islamic Azad University-Takestan Branch, Takestan, Iran.

Abstract

Since a portion of concrete is made of the cement paste, its impact on the concrete permeability can be considerable. For this reason, in this paper, permeability of the concretes containing different types of cements (type 1-425, type 2, type 5, pozzolanic and white cements) and mineral admixtures (microsilica, fly ash, zeolite and limestone powder) was studied, using the results obtained from “Cylindrical chamber” method. Cement replacement levels with mineral admixtures were 5%, 10%, 15 and 20%. Considering the durability problems of the concrete structures located in Iran’s seashores, in addition to the tap water, seawater was used for the permeability assessment of the concrete specimens containing different types of cements. The results tend to show that, except the concrete specimen containing limestone powder with a replacement level of 20%, other concrete specimens have lower permeability than the concrete specimen without any mineral admixtures. Microstructural properties of the concretes containing the mentioned mineral admixtures with replacement levels of 0% and 5%, obtained from analyzing scanning electron microscope images were also consistent with the results obtained. Furthermore, it was observed that water type has great impact on concrete permeability. In this regard, concrete specimens containing type 1-425 and pozzolanic cements had the lowest permeability when exposed to potable water and seawater, respectively. On the contrary, concrete specimens containing pozzolanic and white cements showed the highest permeability against potable water and sea water, respectively. Weak correlation was also seen to exist between permeability and compressive strength of the studied concrete specimens.

Keywords: Concrete, Cylindrical chamber, Permeability, Cement, Mineral admixture.

* Corresponding Author: Profmahmoodnaderi@eng.ikiu.ac.ir

