

بررسی تاثیر ضایعات خاک کاشی به عنوان جایگزین سیمان بر خصوصیات بتن سازه‌ای

الهه موسوی

کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

رضا مرشد

دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

ابوالفضل اسلامی *

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد.

چکیده

زباله‌های سرامیکی از عوامل آلودگی محیط زیست هستند که در مقابل عوامل طبیعی و شیمیایی به سختی تجزیه می‌گردند. استفاده از خاک ریزدانه کاشی که ترکیب شیمیایی و نرمی مناسب برای جایگزینی سیمان پرتلند دارد، از یک سو باعث کاهش مصرف انرژی و آلودگی حاصله تولید سیمان می‌شود و از سوی دیگر، اثرات زیست‌محیطی ناشی از دپوی زباله‌های سرامیکی را کاهش می‌دهد. هدف این پژوهش بررسی تأثیر افزودن خاک کاشی، به بتن به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، روی خواص مکانیکی و دوام بتن می‌باشد. آزمایشات در مرحله اول روی نمونه‌های مکعبی کوچک ملات و پس از کسب نتایج مثبت، روی نمونه‌های بتن انجام گرفت. برای ساخت نمونه‌های بتنی از ۱۲ طرح مخلوط با جایگزینی درصدهای مختلف خاک کاشی با سیمان و نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ استفاده شد. نتایج نشان داد که برای نسبت آب به سیمان ۰/۵، کاهش در مقاومت فشاری و خمشی بتن تا ۴۰ درصد جایگزینی خاک کاشی مشاهده نشد و در تمام درصدهای جایگزینی، افت تخلخل، کاهش نفوذ یون کلر، کاهش جمع‌شدگی و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه شاهد مشاهده شد. برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، کاهش اندکی در مقاومت‌های مکانیکی نسبت به نمونه شاهد مشاهده گردید ولی پارامترهای دوام بهبود یافت.

واژه‌های کلیدی: بتن سبز، خاک کاشی، پوزولان، دوام، جایگزین سیمان.

* نویسنده مسئول: a.eslami@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

از این رو در مورد مواد شبه سیمانی، جایگزینی مقادیر زیاد (بیش از ۹۰ درصد) به جای سیمان مشاهده شد اما مواد پوزولانی معمولاً تا ۲۰ درصد وزن سیمان (حداکثر تا ۴۰ درصد) جایگزین سیمان می‌گردند [۴]. مواد شبه سیمانی دارای خاصیت پنهانی هیدرولیکی هستند و در صورتی که به گونه‌ای مناسب فعال شوند، خواص سیمانی پیدا می‌کنند. این مواد فقط در محیط قلبایی با آب واکنشی مشابه سیمان پرتلند نشان می‌دهند و ترکیبات شیمیایی آن‌ها در مقایسه با مواد پوزولانی، بیشتر شبیه سیمان‌های معمولی است. مشخصات مواد شبه سیمانی باید با استانداردهای ملی ایران از جمله استاندارد ملی ۳۵۱۷، و در صورت عدم وجود استاندارد ملی باید با یکی از استانداردهای معتبر بین‌المللی مطابقت داشته باشد. متداول‌ترین ماده شبه سیمانی، سرباره کوره آهن‌گدازی است. از جمله دیگر مواد شبه سیمانی می‌توان خاکسترهای بادی پر کلسیم را نام برد [۴].

پوزولانی که در صنایع سیمان و به‌عنوان یک افزودنی به کلینکر سیمان مطرح است عبارت است از یک ماده طبیعی یا مصنوعی که شامل سیلیس و یا سیلیس و آلومینای پخته شده می‌باشد. چنانچه این سیلیس و آلومینای پخته شده در هنگام سرد شدن بسیار سریع سرد شده باشند و فرصت کریستالیزه شدن (بلوری شدن) را نیافته باشند و به شکل غیر کریستالی و غیربلوری و در حقیقت بدون شکل (آمورف) و دارای فاز شیشه‌ای باشند پتانسیلی در آن‌ها ذخیره می‌باشد که این پتانسیل می‌تواند به وسیله محرکی مثل هیدروکسید کلسیم فعال شود و تشکیل فازی را دهد که دارای خاصیت چسبندگی و سیمانی است. این نوع پوزولان که دارای سیلیس و آلومینای آمورف و غیر بلوری است، پوزولانی است که می‌تواند به‌عنوان افزودنی به کلینکر سیمان افزوده شود و خواص مطلوبی را در آن ایجاد نماید [۵].

به کار بردن پوزولان در بتن باعث ایجاد یک جسم متراکم و کم تخلخل می‌گردد که ضمن افزایش مقاومت‌های مکانیکی، موجب بهبود دوام بتن، کاهش تمایل مخلوط به آب انداختن و پدیده جدایش‌دهی دانه‌ها و هم‌چنین بهبود مشخصات پرداخت پذیری سطح به واسطه کاهش ابعاد لوله‌های مومینه در بتن می‌شود. به‌طور کلی به کار بردن پوزولان‌ها در بتن باعث افزایش چسبندگی و کاهش کارایی می‌شود، به جز استثناهایی از جمله برخی از انواع خاکستر بادی با درصد کربن کم که کارایی بتن را افزایش می‌دهد.

تولید و مصرف بی‌رویه سیمان پرتلند در سراسر جهان یکی از چالش برانگیزترین مسائل زیست محیطی به حساب می‌آید. به‌طور معمول برای تولید یک تن سیمان به بیش از ۱/۵ تن مواد اولیه نیاز است که به ازای آن یک تن گاز گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن در محیط طبیعی منتشر می‌شود. کارخانه‌های تولید کننده سیمان حدود ۶ درصد از کل دی‌اکسید کربن تولید شده در جو را به خود اختصاص می‌دهند [۱]. از دیگر معایب تولید سیمان می‌توان به مصرف انرژی بالای این صنعت اشاره نمود. برای تولید هر تن سیمان به طور متوسط ۴ گیگاژول انرژی مورد نیاز است که در بخش‌های مختلف الکتریکی، گرم کردن و حمل و نقل مصرف شده و معادل مصرف ۱۳۱ متر مکعب گاز طبیعی است [۲]. تولید کنندگان سیمان در صدد هستند تا هم مقدار انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان و هم مقدار گاز انتشار یافته در روند سیمان را کاهش دهند و به فکر موادی برای جایگزینی سیمان هستند [۳]. ماده‌ای که برای جایگزینی سیمان (یا بخشی از آن) در نظر گرفته می‌شود، از یک طرف باید عوامل منفی مانند نیاز به سنگ آهک، تولید دی‌اکسید کربن، صرف انرژی و هزینه‌های زیاد را کاهش دهد و از طرفی، باید منجر به افزایش خصوصیات مثبت بتن شود. مواد جایگزین سیمان شامل مواد شبه سیمانی و پوزولان‌ها مطابق استانداردهای ملی ایران به شماره‌های ۶۱۷۱ و ۳۴۳۳ می‌باشند. این مواد که جزء گروه افزودنی‌های معدنی بتن محسوب می‌شوند، به منظور تأمین یک یا چند خاصیت بیان شده مورد استفاده قرار می‌گیرند: ۱- کاهش مصرف سیمان و در نتیجه صرفه‌جویی در انرژی و هزینه و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی. ۲- کاهش سرعت و میزان گرمای هیدراسیون و در نتیجه کاهش ترک خوردگی. ۳- افزایش مقاومت بتن. ۴- افزایش دوام بتن از طریق کاهش نفوذپذیری آن [۴].

ترکیبات شیمیایی مواد شبه سیمانی در مقایسه با مواد پوزولانی، بیشتر شبیه سیمان‌های معمولی است. به عبارت دیگر، مواد شبه سیمانی نسبت به مواد پوزولانی دارای میزان کلسیم بیشتری می‌باشند. به همین دلیل مواد شبه سیمانی به شرطی که میزان نرمی آنها نیز در حد مقبول باشد، ممکن است خاصیت سخت‌شوندگی بدون حضور سیمان را نیز داشته باشند، در صورتی که مواد پوزولانی حتماً باید در کنار سیمان وارد مخلوط بتن یا ملات شوند.

به دلیل کندی واکنش‌های اکثر پوزولان‌ها، ممکن است مقاومت بتن پوزولانی در سنین اولیه کمتر از مقاومت بتن معمولی باشد، اما عموماً از یک سن مشخصی (معمولاً در بازه ۹۰ تا ۱۸۰ روزه) مقاومت بتن پوزولانی از بتن معمولی پیشی می‌گیرد. همچنین باعث افزایش مدول الاستیسیته و کاهش خزش، بهبود دوام بتن در برابر شرایط جوی نامساعد مانند تر و خشک شدن‌های متناوب، حملات کلرایدها، سولفات‌ها، اسیدها و واکنش‌های قلیایی سنگ‌دانه‌ها می‌شود. از جمله پوزولان‌ها می‌توان زئولیت، متاکائولین، دیاتومه، تراس و پامیس، میکروسلیس، خاکستر بادی کم کلسیم (گروه F)، ضایعات کاشی، خاکستر پوسته برنج را نام برد. قبل از انجام آزمایش‌ها باید خصوصیات شیمیایی این ذرات مورد آزمایش قرار گیرند [4].

در صنعت سرامیک، حدود ۱۵ تا ۳۰ درصد زباله‌ها بازیافت نمی‌گردند. این زباله‌های سرامیکی سخت و با دوام هستند و در مقابل عوامل طبیعی و شیمیایی بسیار مقاوم بوده و به سختی تجزیه می‌گردند. این پدیده منجر به اشغال زمین‌های خالی و آلودگی محیط زیست می‌گردد [6]. بنابراین استفاده از آنها به عنوان بخشی از سیمان، می‌تواند از یک سو باعث کاهش انرژی مورد نیاز برای تولید سیمان و نیز مقدار گاز انتشار یافته در نتیجه آن شود و از سوی دیگر، اثرات زیست محیطی ناشی از دپوی زباله‌های کاشی و سرامیک را کاهش دهد. در این زمینه به تحقیقات زیر اشاره می‌گردد.

کنان^۱ و همکارانش (۲۰۱۷) نشان دادند که پودر سرامیک محیطی نسبتاً قوی را فراهم می‌کند که ممکن است بتواند کلسیم هیدروکسید را به کلسیم سیلیکات تبدیل کند [7]. همچنین کنان و همکارانش (۲۰۱۷)، بینیچی^۲ و همکارانش (۲۰۰۷) و هیگاشیاما^۳ و همکارانش نشان دادند که ترکیب ذرات پودری سرامیک^۴ ممکن است باعث ایجاد یک سیستم ذرات متراکم بسته‌بندی شود که همیشه به‌عنوان نیاز کلیدی برای بتن با عملکرد بالا و فوق‌العاده بالا گزارش شده است [7-9]. کنان و همکارانش (۲۰۱۸) در ادامه تحقیقات خود نشان دادند که، استفاده از پودر سرامیک مقاومت بتن در برابر یون کلر را به طرز چشم‌گیری افزایش می‌دهد [۱۰].

۲- برنامه آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در دو مرحله روی نمونه‌های ملات و نمونه‌های بتن برنامه‌ریزی و انجام گردید. مصالح مصرفی شامل سیمان پرتلند نوع ۲ نائین، ماسه سیلیسی استاندارد (برای نمونه‌های ملات)، شن شکسته با اندازه حداکثر ۲۰ میلی‌متر و ماسه شسته با دانه‌بندی استاندارد و آب شرب یزد و خاک کاشی مربوط به یکی از

¹ Kannan

² Binici

³ Higashiyama

⁴ cwp

⁵ Arora

⁶ Cheng

کارخانجات تولید سرامیک و کاشی در شهرستان میبد بودند. درصدهای جایگزینی خاک کاشی بجای سیمان پرتلند در مرحله اول آزمایش‌ها روی نمونه‌های مقاومت فشاری و خمشی ملات ۱۰ تا ۶۰ درصد انتخاب شد و بر اساس نتایج حاصل از مرحله اول آزمایش‌ها، ۶۰ درصد جایگزینی در مرحله دوم و ساخت نمونه‌های بتنی حذف گردید. برای نام‌گذاری نمونه‌های شاهد از حرف C و برای نام‌گذاری نمونه‌های با جایگزینی خاک کاشی از حرف T و درصد جایگزینی استفاده شده است. در ادامه آزمایش‌های انجام شده معرفی می‌گردد.

۲-۳- مقاومت فشاری ملات

برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ملات طبق استاندارد ASTM C109، ۹ نمونه مکعبی ۵۰*۵۰ میلی‌متری برای هر طرح مخلوط ملات ساخته شد. این نمونه‌ها پس از ۲۸ روز، ۵۶ روز و ۹۰ روز عمل‌آوری، آزمایش شدند [۱۴].

۲-۴- مقاومت خمشی ملات

تهیه ملات بر اساس ASTM C109 و مشابه با نمونه‌های فشاری انجام شد. سه نمونه منشوری به ابعاد ۴۰*۴۰*۱۶۰ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM C349 برای هر طرح ساخته و پس از ۹۰ روز عمل‌آوری آزمایش گردید [۱۵].

۲-۵- آزمایش فشاری

مقاومت فشاری ۲۸ و ۵۶ روزه نمونه‌های بتنی مطابق استاندارد ASTM C39 با استفاده از نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۵۰ میلی‌متر انجام شد [۱۶]. برای هر طرح مخلوط، ۶ نمونه مکعبی شامل سه نمونه برای مقاومت ۲۸ روزه و سه نمونه برای مقاومت ۵۶ روزه ساخته شد و در مجموع برای ۱۲ طرح مخلوط، ۷۲ نمونه مکعبی ساخته و پس از عمل‌آوری، آزمایش شدند.

۲-۶- آزمایش خمشی

این آزمایش تحت عنوان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۵۰*۱۵۰*۷۵۰ میلی‌متر و با استفاده از استاندارد ASTM C78 انجام گرفت [۱۷]. برای هر طرح مخلوط ۶ نمونه خمشی ساخته شد. نمونه‌ها پس از ۲۸ روز و ۵۶ روز عمل‌آوری داخل حوضچه آب مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۷- آزمایش جذب آب

برای اندازه‌گیری و بررسی میزان جذب آب در نمونه‌ها از استاندارد ASTM C642 استفاده شده است [۱۸]. نمونه‌های

۲-۱- بررسی خواص پوزولانی خاک کاشی

استاندارد ASTM C618 الزاماتی را برای پوزولان‌ها در نظر گرفته و هر ماده برای پوزولان بودن باید الزامات این استاندارد را ارضا نماید. در جدول ۱ مشخصات ضایعات خاک کاشی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است و در جدول ۲ این مشخصات با الزامات استاندارد به مقایسه گذاشته شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان گفت این ضایعات شرایط لازم برای پوزولان بودن را دارا می‌باشد [۱۳].

جدول ۱- آنالیز عناصر خاک کاشی مصرفی به روش XRF

درصد تشکیل دهنده	ترکیبات شیمیایی
59.90	SiO ₂
16.70	Al ₂ O ₃
5.74	Fe ₂ O ₃
2.70	CaO
2.64	MgO
0.21	SO ₃
3.67	K ₂ O
5.97	Na ₂ O

جدول ۲- مقایسه مشخصات خاک کاشی با استاندارد

مشخصات	مشخصات مورد نیاز	خواص
ضایعات	ASTM C618	
خاک کاشی		
82.34 %	70% حداقل	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃
0.21 %	4% حداکثر	SO ₃
0.10 %	3% حداکثر	میزان رطوبت

۲-۲- آزمایش میز جریان

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C1437 جهت اندازه‌گیری

روند ساخت و آماده سازی نمونه ها همانند آزمایش نفوذپذیری کلر است. در جدول ۳ به طور خلاصه لیست آزمایش های انجام شده، ابعاد نمونه ها و مدت زمان عمل آوری ارائه شده است.



شکل ۱- تجهیزات آزمایش نفوذ یون کلر

مکعبی شکل با ابعاد ۱۰۰ میلی متر پس از دوره عمل آوری مرطوب ۵۶ روزه، داخل آون به طور کامل خشک شدند و مطابق استاندارد پس از دوره های غوطه وری در آب و جوشاندن مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۸-۲- جمع شدگی ناشی از خشک شدن

مطابق با استاندارد ASTM C157، جمع شدگی ناشی از خشک شدن، توسط قالب های منشوری شکل ۷۵*۷۵*۲۸۵ میلی متری اندازه گیری و سنجیده شد [۱۹]. سه نمونه منشوری پس از ۲۸ روز عمل آوری داخل حوضچه آب، تحت شرایط خشک شدگی قرار گرفتند و تغییرات وزن و طول آنها طی ۶۰ روز مطابق استاندارد اندازه گیری شد.

۹-۲- آزمایش نفوذپذیری آب

آزمایش نفوذپذیری آب، طبق استاندارد EN12390/8 و با استفاده از دستگاه نفوذپذیری آب تحت فشار در بتن مدل CO950 ساخت شرکت آزمون ساز مینا انجام گردید [۲۰]. دستگاه نفوذپذیری آب برای سنجش مقدار عمق نفوذ آب در بتن بر اساس دو متغیر زمان و فشار می باشد. آزمایش روی نمونه های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی متری پس از ۵۶ روز عمل آوری و سپس خشک شدن در آون مطابق استاندارد انجام گرفت. نمونه ها پس از توزین، به مدت ۷۲ ساعت تحت فشار آب ثابت ۵ bar قرار گرفتند و میزان و عمق نفوذ آب اندازه گیری شد.

۱۰-۲- نفوذپذیری یون کلر

برای اندازه گیری مقاومت نمونه ها در برابر نفوذ یون کلر، از آزمایش RCPT طبق استاندارد ASTM C1202 استفاده شد [۲۱]. برای هر طرح ۲ نمونه استوانه ای به قطر ۱۰۰ و طول ۲۰۰ میلیمتر ساخته و به مدت ۵۶ روز عمل آوری گردید. پس از عمل آوری با کمک دستگاه برش، مغزه هایی به ضخامت ۵۰ میلیمتر از قسمت میانی نمونه ها تهیه و مطابق استاندارد مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۱).

۱۱-۲- هدایت الکتریکی

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C1760 انجام شد [۲۲].

۳- ارائه و بررسی نتایج

نتایج آزمایش های انجام شده در ذیل ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۳- مقاومت فشاری و خمشی ملات

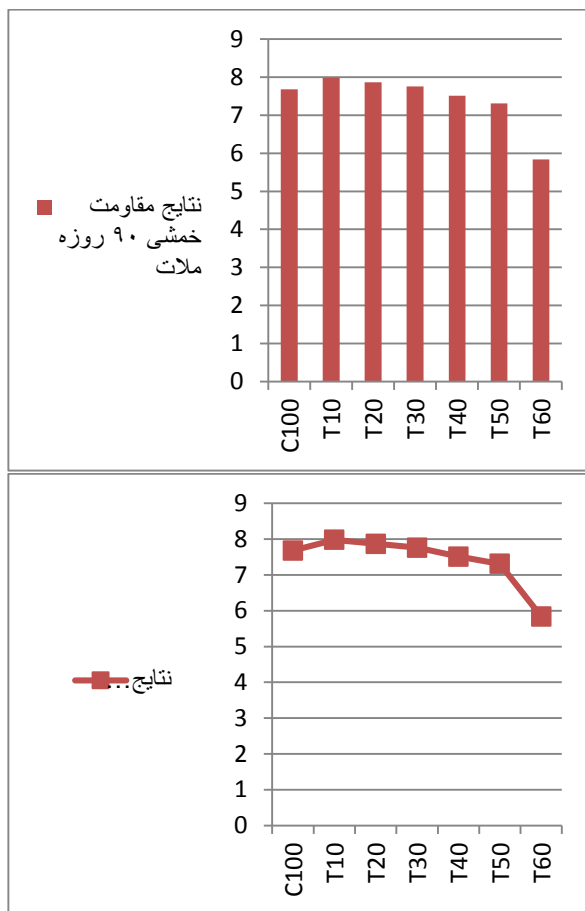
آزمایش فشاری ملات برای درصد های جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد با میزان روانی ثابت (بر اساس آزمایش میز جریان) و در بازه های ۲۸ روز، ۵۶ روز و ۹۰ روز عمل آوری، انجام شد. آزمایش خمشی نیز برای همین درصد های جایگزینی، با میزان

روانی ثابت و در بازه ۹۰ روز عمل آوری، انجام شد. در شکل ۲ نتایج آزمایش فشاری نمونه‌های ملات مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۳- خلاصه آزمایش‌های انجام شده

آزمایش	استاندارد	ابعاد نمونه (mm)	مدت زمان عمل آوری
فشاری ملات	ASTM C109	۵۰*۵۰	۲۸-۵۶-۹۰ روز
خمشی ملات	ASTM C349	۱۶۰*۴۰*۴۰	۹۰ روز
فشاری بتن	ASTM C39	۱۵۰*۱۵۰	۲۸-۵۶ روز
خمشی بتن	ASTM C78	۱۵۰*۱۵۰*۷۵	۲۸-۵۶ روز
جذب آب بتن	ASTM C642	۱۰۰*۱۰۰	۵۶ روزه
جمع شدگی بتن	ASTM C157	۲۸۵*۷۵*۷۵	۲۸ روز
نفوذ آب تحت فشار در بتن	EN12390/8	۱۵۰*۱۵۰	۵۶ روز
نفوذ کلر در بتن	ASTM C1202	۱۰۰*۲۰۰	۵۶ روز
هدایت الکتریکی	ASTM C1760	۱۰۰*۱۵۰	۵۶ روز

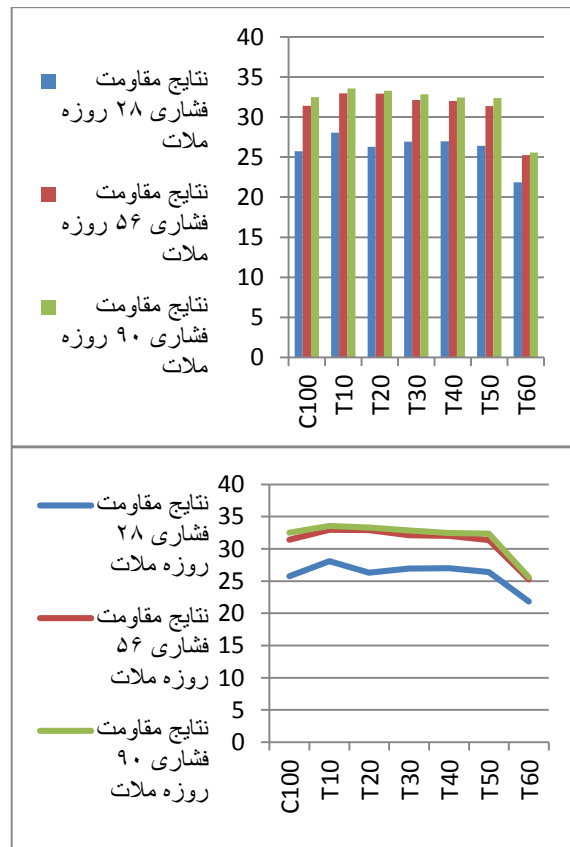
تنها در نمونه T۶۰ افت مقاومت نسبتاً قابل توجه نسبت به نمونه شاهد، مشاهده گردید و بر این اساس درصد جایگزینی ۶۰ درصد در نمونه‌های بتنی حذف گردید. ضمناً با توجه به اختلاف مقاومت ناچیز نمونه‌های ۹۰ روزه و ۵۶ روزه ملات، در ساخت نمونه‌های بتنی از نمونه‌های با عمل آوری ۹۰ روزه صرف نظر گردید. در شکل ۳ نتایج آزمایش نمونه‌های مقاومت خمشی ملات مقایسه شده است. مشابه نمونه‌های فشاری، افت قابل توجه مقاومت در نمونه با ۶۰ درصد جایگزینی خاک کاشی مشاهده می‌گردد که توجیه کننده حذف جایگزینی بالاتر از ۵۰ درصد در ساخت نمونه‌های بتنی است.



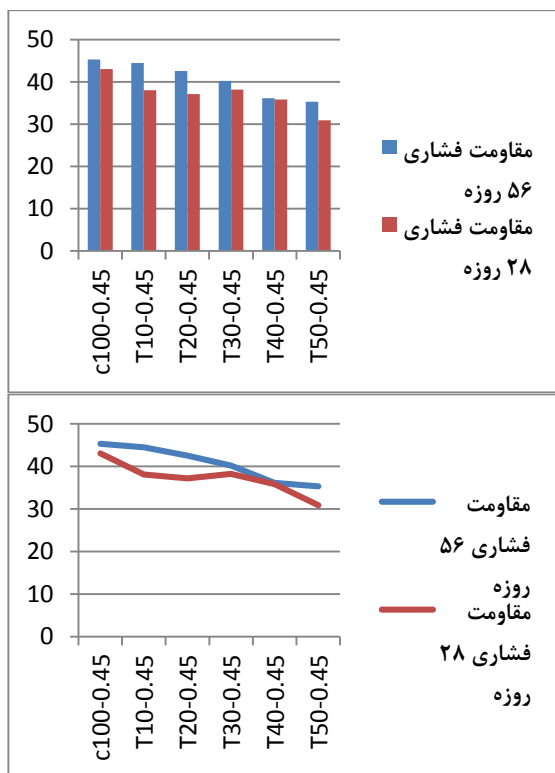
شکل ۳- نتایج آزمایش خمشی ملات (MPa)

۲-۳- مقاومت فشاری نمونه‌های بتن

آزمایش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر برای درصد‌های جایگزینی خاک کاشی به میزان ۱۰ درصد، ۲۰ درصد، ۳۰ درصد، ۴۰ درصد و ۵۰ درصد و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵ و در بازه‌های زمانی ۲۸ و ۵۶ روز



شکل ۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری ملات (MPa)



شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ (MPa)

این مسأله می تواند بیانگر آب طلبی بیشتر نمونه های حاوی خاک کاشی باشد. در ۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی بیشترین مقاومت فشاری در نمونه های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ به دست آمد و تا ۳۰ درصد جایگزینی هم افت مقاومت نسبت به نمونه شاهد مشاهده نگردید. در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ افت مقاومت برای درصد جایگزینی ۴۰ درصد و بالاتر قابل توجه بود. در مقایسه نمونه های ۲۸ روزه و ۵۶ روزه در مجموع مطابق انتظار افزایش مقاومت بیشتری در نمونه های حاوی خاک کاشی که دارای عملکرد پوزولانی هستند مشاهده گردید. در مجموع بر اساس نتایج آزمایش های مقاومت فشاری می توان درصد جایگزینی ۳۰ درصد خاک کاشی را به عنوان درصد حداکثر جایگزینی پیشنهاد نمود.

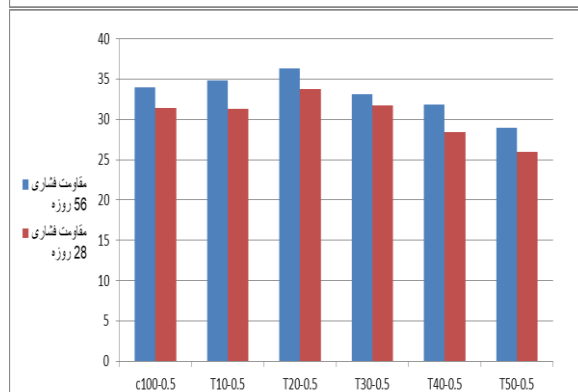
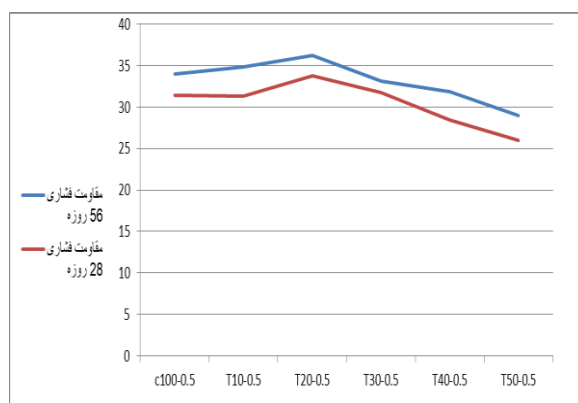
۳-۳- مقاومت خمشی نمونه های بتن

نتایج آزمایش خمش چهار نقطه ای نمونه ها در سن ۲۸ و ۵۶ روز برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ در شکل های ۶ و ۷ مورد مقایسه قرار گرفته است. هر نتیجه از میانگین گیری از سه نمونه منشوری به ابعاد ۱۰۰*۱۰۰*۵۰ میلی متر طبق استاندارد ASTM C78 به دست آمده است.

عمل آوری انجام گردید. هر نتیجه بر اساس میانگین ۳ نمونه به دست آمده است. نتایج مقاومت فشاری در جدول ۴ و شکل های ۴ و ۵ مقایسه شده اند.

جدول ۴- نتایج مقاومت فشاری

نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	مقاومت فشاری ۵۶ روزه (MPa)
C100-0.5	31.46	33.984
T10-0.5	31.33	34.846
T20-0.5	33.79	36.275
T30-0.5	31.76	33.155
T40-0.5	28.411	31.86
T50-0.5	25.968	28.967
C100-0.45	43.06	45.33
T10-0.45	38.075	44.514
T20-0.45	38.178	42.576
T30-0.45	38.233	40.23
T40-0.45	35.826	36.17
T50-0.45	30.901	35.35

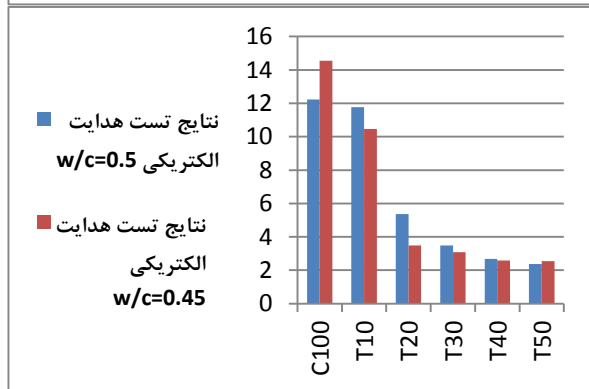
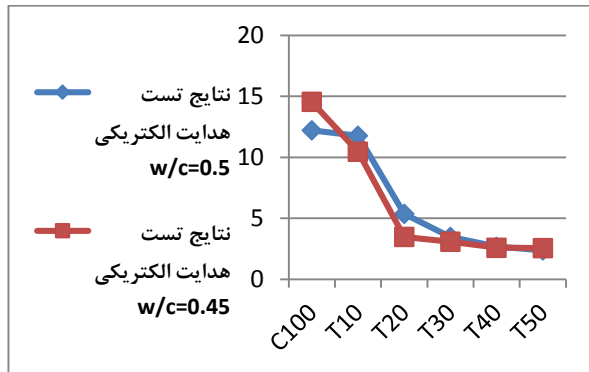


شکل ۴- نتایج مقاومت فشاری نسبت آب به سیمان ۰/۵ (MPa)

بررسی نتایج مقاومت فشاری نمونه های بتنی نشان می دهد در نسبت آب به سیمان متداول ۰/۵ تا ۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی نسبت به نمونه شاهد افزایش مقاومت مشاهده شده است، در حالی که در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در تمام نسبت های جایگزینی کاهش مقاومت مشاهده شده است.

۳-۴- هدایت الکتریکی نمونه‌های بتنی

نمونه‌های بتنی با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ در سن ۵۶ روزه و طبق استاندارد ASTM C1760 آزمایش شدند. میزان عبور جریان الکتریکی طی یک دقیقه در امتداد نمونه اشباع شده بتن با اختلاف پتانسیل اعمال شده ۶۰ ولت در دو سر نمونه اندازه گیری شد. نتایج در شکل ۸ مورد مقایسه قرار گرفته است (هر نتیجه از میانگین گیری ۲ نمونه به دست آمده است).

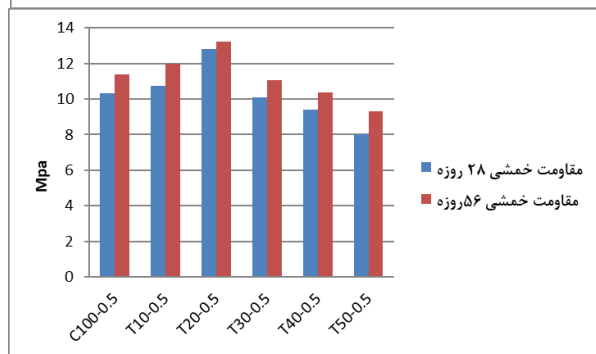
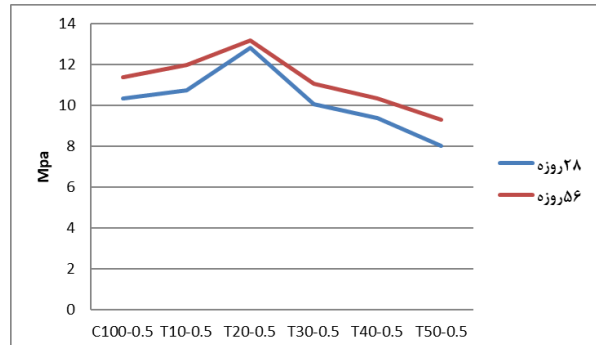


شکل ۸- نتایج آزمایش هدایت الکتریکی برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ (جریان عبوری بر حسب آمپر)

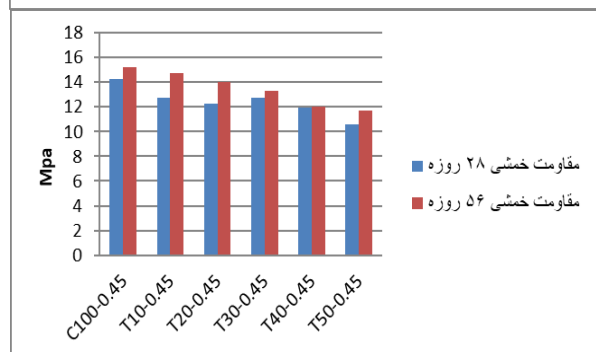
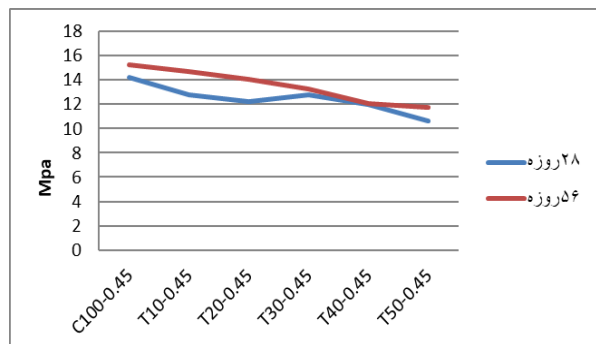
برای هر دو نسبت آب به سیمان در ۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی بیشترین افت در هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود و پس از آن هدایت الکتریکی کاهش قابل ملاحظه‌ای نداشته است. افت هدایت الکتریکی نمونه‌ها به حدود یک پنجم نمونه شاهد بیانگر تاثیر قابل توجه خاک کاشی می‌باشد.

۳-۵- جذب آب نمونه‌های بتنی

آزمایش جذب آب روی نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلیمتری برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ در سن ۵۶ روز و طبق استاندارد ASTM C642 انجام گردید. این آزمایش ۴ سیکل دارد؛ خشک کردن، اشباع در آب، جوشاندن، توزین در آب و پس از



شکل ۶- نتایج مقاومت خمشی برای نسبت آب به سیمان ۰/۵



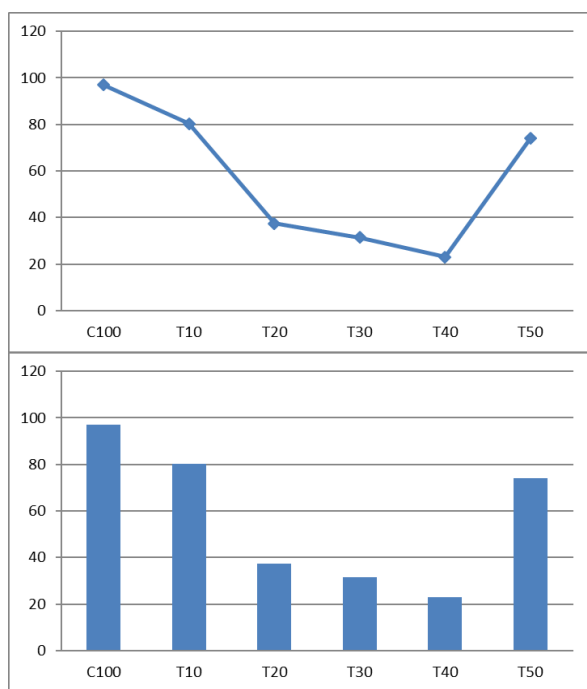
شکل ۷: نتایج مقاومت خمشی برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵

نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی تقریباً مشابه آزمایش‌های فشاری به دست آمده است. بر اساس نتایج، برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ حداکثر مقاومت خمشی در ۲۰ درصد جایگزینی به دست آمده است و تا حدود ۳۰ درصد جایگزینی افت مقاومت مشاهده نشده است. برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا درصد جایگزینی ۳۰ درصد افت مقاومت قابل توجه نبوده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که در نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۴۵ درصد جایگزینی خاک کاشی و در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی حجم حفرات نفوذپذیر کاهش داشته است. این کاهش تخلخل را می‌توان به خصوصیات پوزولانی قوی خاک کاشی نسبت داد. البته با کم شدن نسبت آب به سیمان و آب طلبی بالاتر خاک کاشی، احتمالاً عدم تراکم مناسب این روند را کند نموده است.

۳-۶- نفوذپذیری آب تحت فشار در نمونه‌های بتن

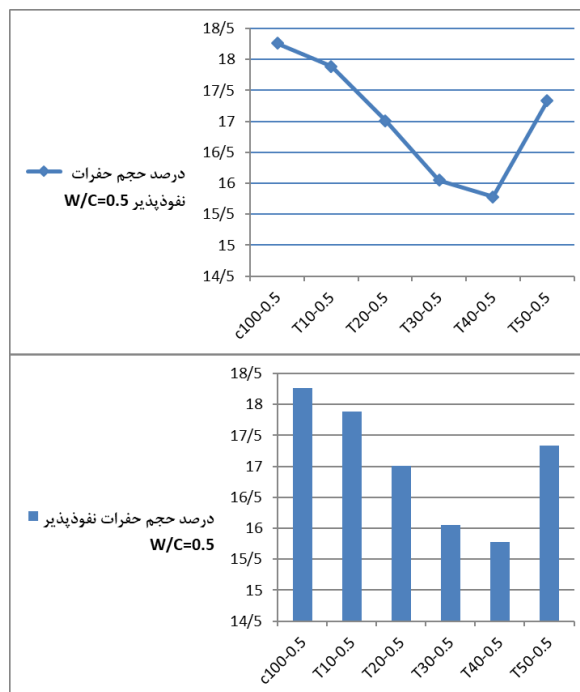
مقدار عمق نفوذ آب در بتن تحت فشار ۱۰ بار طی ۷۲ ساعت مطابق استاندارد BS EN 12390-8 برای دو نسبت آب سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر بعد از ۵۶ روز عمل‌آوری مرطوب اندازه‌گیری گردید. نتایج در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. هر نتیجه از میانگین دو نمونه به‌دست آمده است.



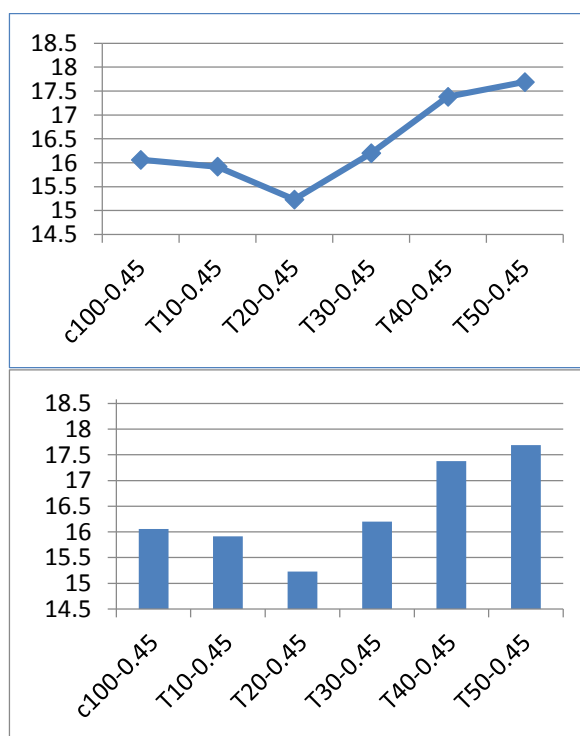
شکل ۱۱- عمق نفوذ آب تحت فشار نسبت آب به سیمان ۰/۵ (mm)

نتایج این آزمایش کاملاً با نتایج آزمایش جذب آب همخوانی دارد. برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۴۰ درصد جایگزینی و برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۰/۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی، عمق نفوذ آب کاهش یافته است. البته میزان کاهش مشاهده شده در عمق نفوذ آب نسبت به میزان کاهش درصد حفرات نفوذ پذیر

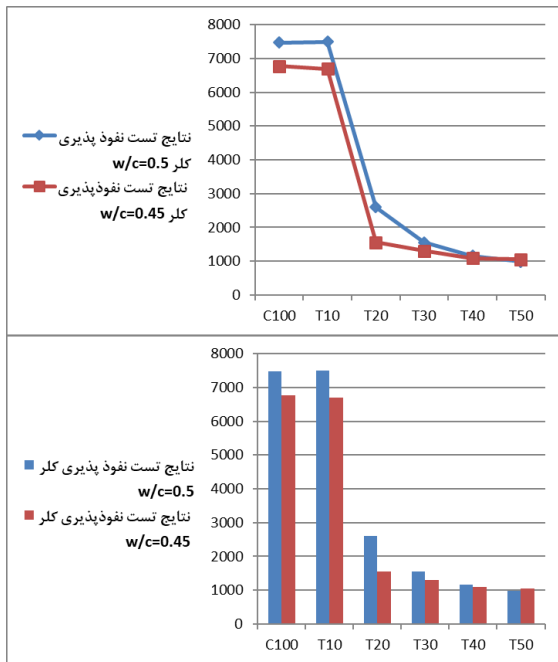
انجام این چهار سیکل، چگالی فضایی خشک، چگالی ظاهری و در نهایت درصد حفرات نفوذپذیر بتن به دست می‌آید. در شکل ۹ و ۱۰ درصد حفرات نفوذناپذیر نمونه‌های بتنی مورد مقایسه قرار گرفته است (هر نتیجه از میانگین ۲ نمونه به دست آمده است).



شکل ۹- درصد حفرات نفوذپذیر بتن نسبت آب به سیمان ۰/۵



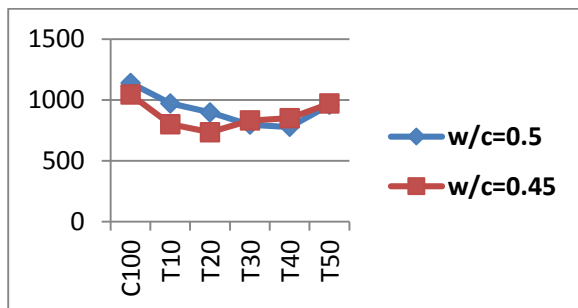
شکل ۱۰- درصد حجم حفرات نفوذپذیر بتن برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵



شکل ۱۳- نتایج آزمایش نفوذپذیری کلر برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ (بار الکتریکی عبور کرده بر حسب کولمب)

۳-۸- آزمایش جمع شدگی

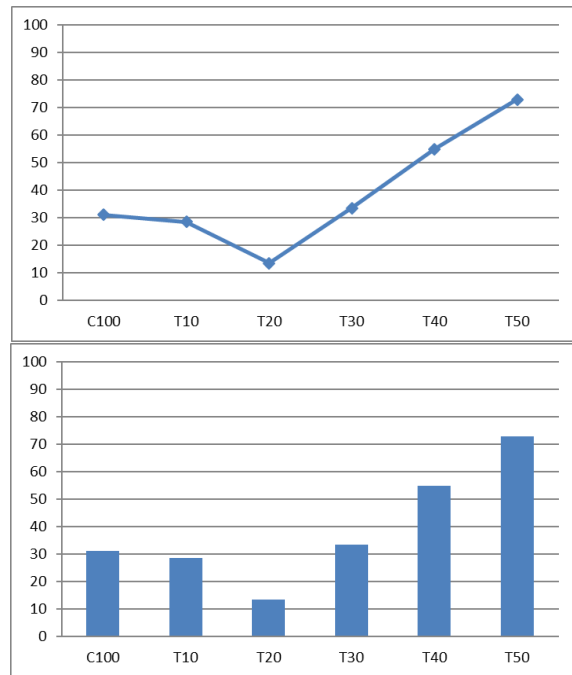
آزمایش جمع شدگی روی نمونه‌های بتنی به ابعاد ۲۸۵*۷۵*۷۵ میلی‌متر بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری مرطوب بر اساس استاندارد ASTM C157 به عمل آمد. نتایج برای نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ در شکل ۱۴ مورد مقایسه قرار گرفته است. هر نتیجه از میانگین دو نمونه به دست آمده است.



شکل ۱۴- نتایج آزمایش جمع شدگی ناشی از خشک شدن (میکرواسترین)

کم‌ترین میزان جمع شدگی در نسبت آب به سیمان ۰/۵ در درصد‌های جایگزینی ۳۰ تا ۴۰ درصد خاک کاشی و در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در درصد‌های جایگزینی ۱۰ تا ۲۰ درصد به دست آمده است. میزان جمع شدگی در هر دو نسبت آب به سیمان در درصد جایگزینی ۵۰ درصد با افزایش روبرو بوده است و لذا

در آزمایش قبلی بسیار بیشتر است و تا ۵ برابر کاهش عمق نفوذ مشاهده گردیده است. این کاهش پنج برابری عمق نفوذ آب در ۴۰ درصد جایگزینی خاک کاشی و نسبت آب به سیمان ۰/۵ معادل حدود ۳ درصد کاهش حجم حفرات نفوذپذیر در آزمایش جذب آب بوده است.



شکل ۱۲- عمق نفوذ آب تحت فشار برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ (mm)

۳-۷- نفوذ یون کلر

نفوذ پذیری یون کلر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتنی برش خورده به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلی‌متر که به مدت ۵۶ روز به صورت مرطوب عمل‌آوری شده بودند بر اساس استاندارد C1202 ASTM انجام گرفت. نتایج بار الکتریکی عبور کرده بر حسب کولمب که معرف میزان نفوذ یون کلر است برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۴۵ در شکل ۱۳ مورد مقایسه قرار گرفته است. هر نتیجه از میانگین دو نمونه به دست آمده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که از درصد جایگزینی ۲۰ درصد خاک کاشی کاهش قابل ملاحظه‌ای در نفوذ یون کلر رخ می‌دهد و بار الکتریکی به کمتر از حدود ۲۰۰۰ کولمب که معرف نفوذ پذیری کم یون کلر است کاهش می‌یابد. بنابر این برای حفاظت ایده‌آل میلگردهای فولادی در بتن حداقل درصد جایگزینی ۲۰ درصد خاک کاشی توصیه می‌گردد.

- جذب آب و درصد حفرات نفوذ پذیر نمونه‌های بتنی برای نسبت آب به سیمان ۰/۵ تا ۴۰ درصد جایگزینی خاک کاشی و برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۲۰ درصد جایگزینی روند نزولی داشته و بعد از آن روند افزایشی یافته است.

- روند تغییرات عمق نفوذ آب تحت فشار به بتن تقریباً مشابه با جذب آب ارزیابی گردید. البته میزان کاهش عمق نفوذ آب به بتن بسیار قابل ملاحظه و تا ۵ برابر نمونه شاهد مشاهده گردید.

- میزان بار الکتریکی عبور کرده از نمونه‌های بتنی از درصد جایگزینی ۲۰ درصد خاک کاشی افت قابل ملاحظه‌ای داشته و از حد نفوذپذیری زیاد در برابر یون کلر به محدوده نفوذپذیری کم تبدیل شده است.

- جمع شدگی نمونه‌های بتنی حاوی خاک کاشی کمتر از نمونه‌های شاهد بوده است. کاهش جمع شدگی در محدوده جایگزینی ۲۰ تا ۴۰ درصد خاک کاشی بیشتر بوده است.

- در مجموع به منظور کسب مقاومت مناسب در بتن‌های با نسبت آب به سیمان متداول ۰/۵ درصد جایگزینی ۲۰ درصد و به منظور بهبود دوام و نفوذپذیری بتن، درصد جایگزینی ۲۰ تا ۴۰ درصد خاک کاشی بجای سیمان پرتلند پیشنهاد می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] Valipour, Mahdi. Yekkalar, Mina. Panahi, Mohammad Shekarchi, S. Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments, Journal of Cleaner Production, 65 (2014) 418-423.
- [2] change, C.s.s.n.r.o.c, ctions to meet commitments under the United Nations Framework Convention on Climate Change., (1997).
- [3] M.C.G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis, J.H. Ideker, Advances in alternative cementitious binders, Cement and Concrete Research, 41(12) (2011) 1232-1243.
- [4] Hassanzade mohsen, K. Behfarnia, Advanced topics in cement technology and pozzolans, 2014.
- [5] P. Kumar Mehta, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, University of California, McGraw-Hill Education, 2006.
- [6] H. Patel, N.K. Arora, S.R. Vaniya, Use of Ceramic Waste Powder in Cement Concrete, International Journal for Innovative Research in Science & Technology, 2(1) (2015) 91-97.
- [7] D.M. Kannan, S.H. Aboubakr, A.S. El-Dieb,

این درصد جایگزینی توصیه نمی‌گردد. در مجموع با افزودن خاک کاشی بطور متوسط کاهش شدگی حدود ۳۰ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد در نسبت آب به سیمان ۰/۵ و کاهش حدود ۲۰ درصد در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مشاهده شده است.

۴- نتیجه گیری

برای بررسی امکان جایگزینی ضایعات خاک کاشی بجای بخشی از سیمان پرتلند، مجموعه آزمایشاتی در دانشگاه یزد انجام گرفت که نتایج حاصله به شرح ذیل است.

- طبق نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ملات با روانی استاندارد، در درصدهای ۱۰ تا ۵۰ درصد جایگزینی سیمان با خاک کاشی، مقاومت فشاری و خمشی نسبت به نمونه شاهد، افزایش داشته یا افت قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند اما در ۶۰ درصد جایگزینی سیمان با خاک کاشی، مقاومت‌ها به طور چشم‌گیری افت داشته است. لذا حداکثر ۵۰ درصد جایگزینی خاک کاشی پیشنهاد می‌گردد.

- افزایش مقاومت نمونه‌های ملات بعد از عمل‌آوری ۸ هفته‌ای (۵۶ روزه) قابل ملاحظه نبوده است. بر این اساس بنظر می‌رسد خاک کاشی را می‌توان در زمره پوزولان‌های فعال بدون نیاز به عمل‌آوری مرطوب درازمدت قرار داد.

- در نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان متداول ۰/۵، تا ۲۰ درصد جایگزینی خاک کاشی افزایش مقاومت فشاری قابل توجهی مشاهده شد و تا ۴۰ درصد جایگزینی نیز افت کمی در مقاومت بوجود آمد. در درصد بالاتر جایگزینی افت مقاومت قابل توجه بوده است.

- در نمونه‌های بتنی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد اندکی افت داشته است. به نظر می‌رسد آب‌طلبی خاک کاشی از سیمان پرتلند بیشتر است که می‌تواند کسب مقاومت را در نسبت‌های پایینتر آب به سیمان با مشکل مواجه کند.

- نتایج کسب مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی مشابه کسب مقاومت فشاری آن‌ها ارزیابی گردید.

- برای هر دو نسبت آب به سیمان، با جایگزینی خاک کاشی به میزان ۲۰ درصد و بیشتر کاهش هدایت الکتریکی قابل توجهی مشاهده گردید.

- [20] EN12390/8 S. E, Testing Hardened Concrete, Depth of Penetration of Water under Pressure., in.
- [21] ASTM C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, in, ASTM International, 2012.
- [22] ASTM C1760, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete, in, ASTM International, 2012.
- M.M. Reda Taha, High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement, *Construction and Building Materials*, 144 (2017) 35-41.
- [8] H. Binici, Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties, *Construction and Building Materials*, 21(6) (2007) 1191-1197.
- [9] Hiroshi Higashiyama, Fumio Yagishita, Masanori Sano, O. Takahashi, Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 26(1) (2012) 96-101.
- [10] Amr S. El-Dieb, D.M. Kanaan, eramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation, *Sustainable Materials and Technologies*, 17 (2018) e00063.
- [11] Yunhong Cheng, Fei Huang, Guang-lu Li, Longshuo Xu, J. Hou, Test research on effects of ceramic polishing powder on carbonation and sulphate-corrosion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 55 (2014) 440-446.
- [12] Ali Heidari, D. Tavakoli, A study of the mechanical properties of ground ceramic powder concrete incorporating nano-SiO₂ particles, *Construction and Building Materials*, 38 (2013) 255-264.
- [13] ASTM C618, A. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. in American society for testing and materials. 2003. ASTM international West Conshohocken, PA, USA.
- [14] ASTM C109. A.S, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), in, ASTM International, 2016.
- [15] ASTM C349, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure), in, ASTM International, 2014.
- [16] ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, ASTM International, 2016.
- [17] ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), in, ASTM International, 2016.
- [18] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, in, ASTM International, 2013.
- [19] ASTM C157, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, in, ASTM International, 2014.

Investigating the effect of ceramic waste powder as a substitute of cement on the properties of structural concrete

Elahe Mousavi

MSc, Dept of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Reza Morshed

Associate Prof., Dept. of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Abolfazl Eslami *

Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Abstract

Ceramic wastes are considered as a reason for environmental pollution that are hardly decompose against the natural and chemical factors. Substituting Portland cement with the ceramic waste powder which has a desirable chemical composition and fineness, not only can reduce energy consumption and pollution resulting from cement production, but also mitigate the environmental effects of ceramic waste in the landfills. This study investigates the effect of using ceramic waste as a substitute for cement on the mechanical properties and durability of the structural concrete. To this end, experimental tests were initially performed on small cubic samples of mortar and standard cylinders of concrete. 12 mixed designs were made by replacing different percentages of tile soil with cement possessing water to cement ratios of 0.45 and 0.5. The results confirmed that for water to cement ratio of 0.5, no reduction was observed in the compressive and flexural strength of concrete up to 40% of tile soil replacement. In addition, adding tile waste led to porosity loss, reduction of chlorine ion penetration, shrinkage reduction and improving the electrical resistance ratio. For water to cement ratio of 0.45, a slight decrease in the mechanical strength was observed compared after substituting cement with the ceramic waste compared to the control sample, while the durability parameters were improved.

Keywords: Green Concrete, Ceramic Waste Powder, Pozzolan, Durability, Cement Substitute.

* Corresponding Author: a.eslami@yazd.ac.ir

