

بررسی خاصیت پوزولانی مواد مختلف و تاثیر آنها بر خصوصیات بتن فوق توانمند

امین پورجهان شاهی، سیدحسام مدنی*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ خرداد ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۰ تیر ۱۳۹۶
پذیرش: ۱ آبان ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۷ آبان ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

خاصیت پوزولانی
خواص مکانیکی
دوام
مواد جایگزین سیمان
عمل آوری تسریع شده
بتن فوق توانمند

چکیده: جایگزینی بخشی از سیمان با مواد زائد صنعتی به خصوص در بتن‌های با حجم بالای مواد سیمانی همچون بتن‌های فوق توانمند می‌تواند اثرات مثبتی از لحاظ زیست محیطی و بهبود خواص به ارمغان آورد. لیکن تاثیر برخی از این مواد همچون پسماند باطله زغال سنگ و سرباره مس بر خواص بتن‌های فوق توانمند مورد بررسی جدی قرار نگرفته است. مطالعه حاضر به بررسی تاثیر چندین ماده جایگزین سیمان با عملکرد پوزولانی کاملاً متفاوت از رده بسیار فعال (همچون دوده سیلیسی) تا تقریباً غیرفعال (همچون پودر سنگ سیلیس) بر خواص بتن‌های فوق توانمند پرداخته است. دمای عمل آوری ۷۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد احتمال تشکیل دیر هنگام اترینگایت را تشدید می‌کند، لذا دماهای عمل آوری ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد به عنوان دماهای عمل آوری با احتمال خطر پایین و بالا از لحاظ احتمال تشکیل دیر هنگام اترینگایت در مقایسه با دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتیگراد انتخاب شده‌اند. برای مقایسه نرخ واکنش پوزولانی مواد از روش رسانایی الکتریکی استفاده شده است. نتایج این مطالعه در خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مدول گسیختگی، مشخصات دوام شامل انتشار تسریع شده یون کلرید و بررسی ریزساختاری با عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از حرارت برای تمام مواد جایگزین سیمانی مذکور به جز دوده سیلیسی می‌تواند سبب کاهش مقاومت و افزایش نفوذ یون کلرید بتن‌های فوق توانمند شود. مقاومت‌های بدست آمده از عمل آوری تسریع شده ۶۰ و ۹۰ تغییرات چندانی نسبت به یکدیگر نداشته است در حالی که استفاده از عمل آوری تسریع شده ۹۰، انرژی بیشتری نسبت به عمل آوری تسریع شده ۶۰ احتیاج دارد و خطر دیر هنگام اترینگایت را تشدید می‌کند.

۱- مقدمه

شدن عمل آوری با بخار، عمل آوری تسریع شده و استفاده از افزودنی‌های معدنی می‌باشد [۴ و ۵] از این میان استفاده از مواد پوزولانی یکی از موثرترین و اقتصادی‌ترین روش‌ها به دلیل کاهش حجم سیمان مصرفی می‌باشد [۶]. شایان ذکر است که مواد پوزولانی در محیط بتن دو نقش عمده را بر عهده خواهند داشت، اول اینکه در صورت داشتن مقادیر بالایی از مواد سیلیسی یا آلومینی خاصیت پوزولانی خواهند داشت یا اینکه به واسطه ریزی ذرات خاصیت پرکنندگی دارند و به دلیل کاهش تخلخل و پرکردن منافذ خالی سبب افزایش تراکم دانه بندی می‌گردند. نکته مهم در مورد پوزولان‌ها این است که واکنش پوزولانی کند می‌باشد و توسعه مقاومت متعاقباً کند خواهد بود در نتیجه استفاده از عمل آوری تسریع شده می‌تواند تاثیرات مثبتی بر افزایش عملکرد پوزولانی مواد داشته باشد. همچنین این واکنش بجای تولید آهک، آهک مصرف می‌کند که تاثیر مهمی بر روی دوام خمیر هیدراته در برابر محیط‌های مخرب دارد [۵].

در مطالعه حاضر تاثیر چندین ماده مکمل سیمانی با عملکرد پوزولانی مختلف بر دوام و خواص مقاومتی بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار گرفته است. این مواد شامل دوده سیلیسی، پودر شیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس می‌باشند. شایان ذکر است که برخی از این مواد

افزایش مصرف انرژی و تولید حجم بالایی از زباله‌های شهری و صنعتی تاثیرات منفی گسترده‌ای بر روی محیط زیست دارد که از جمله آنها می‌توان به اثرات مخرب بر لایه اوزون، تاثیرات گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های آب اشاره کرد. از طرف دیگر تولید گسترده زباله در فرآیندهای صنعتی و گازهای آلاینده همچون تولید حجم بالای دی‌اکسید کربن حاصل از تولید سیمان اثرات مخرب زیادی بر محیط زیست و کیفیت زندگی بشر دارد. یکی از چالش‌های چند دهه اخیر تولید بتن با میزان کلینکر کمتر و با همان خواص مکانیکی و دوام می‌باشد [۱]. بنابراین فعالیت‌های تحقیقاتی متعددی با هدف استفاده از زباله‌ها به عنوان مواد جایگزین سیمان انجام گرفته است [۲]. از سوی دیگر ضخامت ناحیه انتقالی در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر است، که شامل کریستال‌های پرتلندیت و تخلخل بالا می‌شود و معمولاً ضعیف ترین ناحیه بتن شناخته شده است [۳].

استراتژی‌های متفاوتی به منظور بهبود خواص بتن‌های فوق توانمند پیشنهاد شده است که شامل کاهش نسبت آب به مواد پایه سیمانی، طولانی

* نویسنده عهده دار مکاتبات: H.madani@kgut.ac.ir

که سیلیکات سدیم موثرترین فعال کننده است [۱۵]. تحقیقات نشان می‌دهند ذرات بزرگ شیشه (بزرگتر از ۰/۲ میلی متر) می‌توانند سبب واکنش قلیایی سیلیسی شود که برای کنترل آن می‌توان از سایر مواد پوزولانی استفاده کرد. اما پودر شیشه در سایز حدود $100 \mu\text{M}$ می‌تواند به عنوان ماده با عملکرد پوزولانی تلقی شود [۱۶].

پودر سیلیس^۴ از آسیاب کردن سنگ کوارتز بدست می‌آید. نتایج نشان می‌دهند در دمای ۲۵۰ درجه سیلیسیوس ذرات ریز پودر سیلیس در حدود ۱۰ میکرومتر با محصولات حاصل از هیدراسیون سیمان واکنش داده و تولید کریستال‌های هیدراته مانند زنونتالیت^۵ می‌نماید [۱۷]. ذرات پودر سیلیس در دمای محیط غیر فعال بوده و فقط از لحاظ فیزیکی سبب بهبود دانه‌بندی می‌شوند و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد [۱۸]. در اکثر مطالعات پودر سیلیس به عنوان ماده معدنی جایگزین سیمان می‌باشد یا اینکه به عنوان بخشی از سنگدانه جایگزین می‌شود نتایج نشان می‌دهند این ذرات ریز سیلیس نرخ هیدراسیون سیمان را بهبود می‌بخشد و سبب افزایش مقاومت در سنین اولیه می‌گردد [۹].

سه نمونه از فلزات مهم جهان آهن، آلومینیوم و مس می‌باشد. فعالیت‌های تولید مس در جهت تولید مواد خام مقدار قابل توجهی سرباره تولید می‌کند. سالانه ۱۳ میلیون تن در جهان سرباره مس^۶ تولید می‌شود که احتیاج به فضای مورد استفاده زیادی برای دفن مواد، مورد احتیاج می‌باشد. جایگزین کردن این مواد در صنعت ساخت و ساز روش مناسبی در به حداقل رساندن این معضل است. برخی از تحقیقات سرباره مس را به عنوان مواد جایگزین سنگدانه بکار برده‌اند و برخی دیگر پودر سرباره مس را جایگزین سیمان نموده‌اند. نتایج بیانگر این است که پودر سرباره مس مقاومت فشاری و کششی را افزایش داده و دوام بتن را بهبود می‌بخشد [۲]. روند تولید زغال‌سنگ^۷ به دلیل تولید ۱۵-۲۰ درصد باطله زغال سنگ تهدید جدی برای طبیعت محسوب می‌گردد [۱۹]. ضایعات زغال سنگ جامد که اکثراً در اطراف معادن زغال سنگ و کارخانجات زغال‌شویی یافت می‌شود و می‌تواند نوعی ماده مکمل سیمانی باشد [۲۰]. در مطالعات اخیر اثر استفاده از این مواد در بتن‌های غلتکی به عنوان جایگزین سیمان بررسی شده است و افت خواص چندانی تا ۱۰-۱۵ درصد جایگزینی سیمان مشاهده نشده است [۲۱]. زمان و حرارت می‌توانند تاثیرات زیادی بر خاصیت پوزولانی مواد داشته باشند در نتیجه به منظور شناسایی بهتر رفتار این مواد در محیط بتن، از عمل‌آوری استاندارد و تسریع شده بهره گرفته شده است، همچنین به منظور بررسی تاثیر زمان بر خاصیت پوزولانی مواد و مشخصات بتن فوق‌توانمند، آزمایش‌های انجام گرفته در سنین ۳ تا ۱۲۰ روز انجام شده‌اند. در این تحقیق ابتدا با استفاده از روش رسانایی الکتریکی به بررسی خاصیت پوزولانی مواد پرداخته شده سپس عملکرد این مواد را بر خصوصیات مکانیکی، دوام

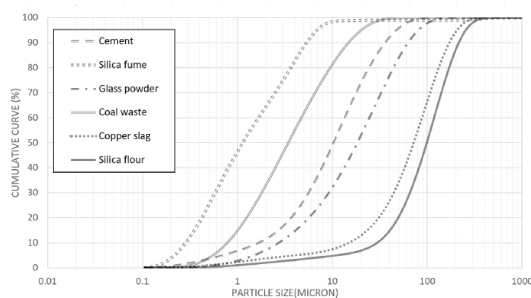
همچون باطله زغال سنگ و سرباره مس در مطالعات بتن فوق‌توانمند مورد توجه واقع نشده‌اند و مطالعه حاضر از این لحاظ نوآوری قابل توجهی دارد. در حال حاضر چندین میلیون تن از باطله زغال سنگ در مناطق مختلف کشور به خصوص مازندران و کرمان انباشته شده‌اند که اثرات مخرب زیست محیطی همچون آلودگی آب‌های زیرزمینی و محصولات کشاورزی به بار می‌آورند [۷] همچنین تاثیر سه نوع عمل‌آوری مختلف شامل عمل‌آوری مرطوب با دماهای ۲۵، ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد مورد بررسی قرار گرفته است. دماهای ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد به این علت انتخاب شده‌اند که دمای بحرانی تشکیل اترینگایت دیرهنگام ۶۵-۱۰۰ درجه سانتیگراد عنوان شده است [۸]. بنابراین دمای ۹۰ درجه سانتیگراد دمای بحرانی و دمای ۶۰ درجه سانتیگراد دمای غیرحساس برای این منظور است. در ادامه مشخصات مواد استفاده شده ارائه شده است.

دوده سیلیسی^۱ محصول فرعی حاصل از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس می‌باشد، که دارای بیش از ۸۵ درصد سیلیس آمورف بوده و قطر متوسط ذرات آن در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ میکرومتر است. خاصیت پرکنندگی و پوزولانی دوده سیلیسی باعث بهبود ریزساختار می‌شود [۹]. همچنین زمانی که مخلوط‌های سیمانی در دمای ۹۰ درجه سیلیسیوس عمل‌آوری شوند واکنش پوزولانی دوده سیلیسی افزایش می‌یابد [۱۰]. تحقیقات نشان می‌دهند که افزودن درصد‌های مختلف دوده سیلیسی تاثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری و خمشی از سن ۷ روز به بعد دارد. با افزایش دوده سیلیسی تا ۲۰٪ تاثیرات چشمگیری در مقاومت مشاهده می‌شود و بعد از آن مقاومت کاهش خواهد یافت. همچنین دوده سیلیسی به سبب خاصیت پرکنندگی و پوزولانی بالا، تخلخل را نیز کاهش می‌دهد [۱۱].

پودر شیشه^۲ از انواع بطری‌های بازیافتی تولید می‌شود که بطور کلی شامل سیلیس آمورف، اکسیدسدیم، اکسیدکلسیم و سایر ترکیبات دیگر می‌شود [۱۲]. پودر شیشه‌های تولید شده دارای بیش از ۷۰ درصد سیلیس آمورف، ۱۲ درصد اکسیدسدیم و ۵ درصد اکسیدکلسیم می‌باشد [۱۳]. به واسطه آمورف بودن و داشتن مقادیر بالا از سیلیس، پودر شیشه می‌تواند یکی از بهترین مواد پوزولانی در صنعت بتن باشد. موجود بودن اکسیدکلسیم ناشی از واکنش سیمان و واکنش آن با سیلیس حاصل از پودر شیشه تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته می‌دهد. به هر حال شیشه دارای مقادیر بالایی از اکسیدسدیم می‌باشد که یکی از منابع واکنش قلیایی سیلیسی به شمار می‌رود. مطابق تحقیقات انجام گرفته سه عامل نقش اصلی را در واکنش قلیایی سیلیسی دارند: مقدار کافی از قلیا، واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها و مقادیر کافی رطوبت [۱۴] یعنی نسبت آب به سیمان، میزان نفوذپذیری، رطوبت، انحلال مواد قلیایی، سایز و نوع سنگدانه تاثیر بالایی در واکنش قلیایی سیلیسی دارند. آزمایشات شی^۳ با فعال کننده‌های قلیایی متفاوت (هیدروکسیدسدیم و پتاسیم، سیلیکات‌ها، کربنات‌ها و سولفات‌ها) دریافت

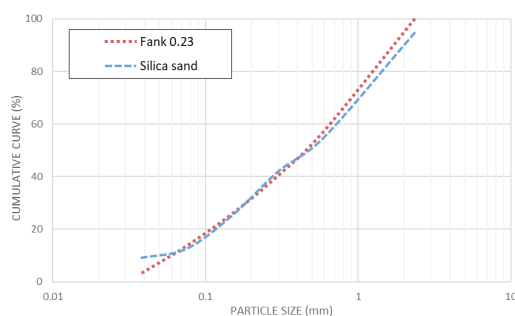
4 Silica powder
5 Xonotlite
6 Copper slag
7 Coal waste

1 Silica fume
2 Glass powder
3 Shi



شکل ۱: دانه‌بندی سیمان و مصالح مصرفی

Fig. 1. Particle size distribution of cement and used materials



شکل ۲: منحنی دانه بندی سنگدانه مورد استفاده

Fig. 2. Particle size distribution of used aggregate

جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی

Table 1. physical properties of used aggregate

جنس	رطوبت در حالت SSD (%)	عبوری از الک شماره ۸ (%)	عبوری از الک شماره ۲۰۰ (%)	وزن مخصوص (kg/m ³)
سیلیسی	۰/۸	۱۰۰	۷/۶۵	۲/۵۶

۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- طرح مخلوط

به منظور بررسی خاصیت پوزولانی و خصوصیات مکانیکی ودوام بتن فوق توانمند شامل مواد مذکور (دوده سیلیسی، پودر شیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس) شش طرح مخلوط مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۳). در تمامی طرح مخلوطها نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است. نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲ به این دلیل انتخاب شده است که در این نسبت مقاومت فشاری قابل توجهی را می توان از بتن انتظار داشت همچنین در نسبت های پایین تر مقدار استفاده از روان ساز به شدت افزایش می یابد که در این مطالعه از آن احتراز شده است.

و ریزساختار بتن فوق توانمند تحت آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، انتشار تسریع شده یون کلرید و تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی در میزان جایگزینی ۱۰ درصدی بجای سیمان مصرفی بررسی شده است. با توجه تحقیقات انجام شده عملکرد مواد انتخابی مانند باطله زغال سنگ، سرباره مس و غیره تحت شرایط استاندارد و تسریع شده بر مشخصات بتن های فوق توانمند بر محققین این امر پوشیده بوده که در این مقاله به این موارد پرداخته شده است.

در دهه های اخیر محققان با استفاده از ایده های مختلفی همچون کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش سیمان مصرفی و استفاده از منحنی دانه بندی مناسب توانستند خواص مقاومتی و دوام بتن ها تا حد مطلوبی گسترش دهند به نحوی که مفهوم بتن های توانمند شکل گرفت. بتن های توانمند به عنوان بتنی که از دوام بسیار مناسبی در برابر محیط های مخرب برخوردار است و مقاومت بالایی نسبت به بتن معمولی دارد، شناخته می شود. دلرادی در تحقیقات خود بتن توانمند را به عنوان بتنی که دارای حداقل مقاومت ۶۰ مگاپاسکال باشد معرفی می کند که برای ساخت آن از نسبت آب به مواد پایه سیمانی کمتر از ۰/۴ استفاده شده باشد [۲۲]. با گسترش علم محققان توانستند با بکارگیری موارد مختلفی همچون کاهش سائز سنگدانه، استفاده از مواد ریز و فعال و افزایش خلوص مصالح، خواص بتن های توانمند را ارتقاء داده و نسل جدیدی از بتن ها را تحت عنوان بتن فوق توانمند شکل دهند. بر پایه تحقیقات روز^۲ و کنفرانس های صورت گرفته، بتن فوق توانمند به عنوان بتنی که دارای مقاومت حدود ۱۵۰ مگاپاسکال، دوام و شکل پذیری خاصی می باشد تعریف می گردد [۲۳].

۲- مصالح ، آزمایش ها و روش ها

۲-۱- مواد و مصالح

در ساخت مخلوطها از سیمان سفید تیپ I-۵/۵۲ و همچنین به منظور روانی مخلوط از یک روانساز بر پایه پلی کربوکسیلات اتر استفاده شده است. مطابق تحقیقات انجام گرفته توسط یو^۳ بهترین منحنی دانه بندی برای طراحی بتن های فوق توانمند، منحنی فانک و دینگر با توان کوچکتر از ۰/۲۵ می باشد [۲۴]. بدین منظور برای کاهش تخلخل و افزایش تراکم دانه بندی از منحنی دانه بندی فانک و دینگر با توان ۰/۲۳ استفاده شده است و مشخصات فیزیکی سنگدانه مورد استفاده در جدول شماره ۱ و منحنی دانه بندی آن در شکل ۲ آورده شده است. منحنی دانه بندی و مشخصات فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیسی، پودر شیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۲ قابل مشاهده می باشد.

1 De Larrard

2 Rossi

3 Yu

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد

Table 2. Chemical composition and physical properties of materials

آنالیز شیمیایی	مقادیر (%)				
	دوده سیلیسی	پودر شیشه	باطله زغال سنگ	سرباره مس	پودر سیلیس
L.O.I	۱/۷	۰/۱	۴۰/۹۶	۰/۱	۰/۳
SiO ₂	۹۳	۶۶/۵	۳۴/۸	۳۴	۹۸
Al ₂ O ₃	۰/۹	۰/۶۴	۱۴/۵۳	۲	۰/۲
Fe ₂ O ₃	۰/۸	۰/۴۴	۳/۸۹	۴۷	۰/۳۲
CAO	۱	۱۱/۵	۰/۵۱۳	۶/۵	۰/۰۶
MGO	۱/۲۵	۴/۴	۰/۸۶۸	-	۰/۰۱
K ₂ O	۰/۳	۰/۳۹	۲/۳۹	-	۰/۰۵
Na ₂ O	۰/۴	۱۵/۸	۰/۲۷	-	۰/۰۵
MNO	۰/۵	-	۰/۰۲	۳	۰/۰۰۵
آنالیز فیزیکی					
Specific surface area (m ² /g)	۲۱	۰/۳۴	۰/۸۴	-	۰/۹۱
SPECIFIC WEIGHT (g/cm ³)	۲/۲	۲/۵۲	۲/۱۵	۳/۴	۲/۶۵

جدول ۳: طرح مخلوط‌های بتن فوق توانمند ساخته شده در این تحقیق (kg/m³)

Table 3. Mix designs of ultra-high performance concrete made in this research

نام طرح	C	SF	GP	SP	CS	CW
سیمان	۹۶۰	۸۶۴	۸۶۴	۸۶۴	۸۶۴	۸۶۴
روان ساز	۸/۷۳	۸/۶۴	۱۰/۵۶	۱۰/۱۸	۸/۸۳	۹/۶۰
آب	۱۹۲	۱۹۲	۱۹۲	۱۹۲	۱۹۲	۱۹۲
افزودنی	-	دوده سیلیسی	پودر شیشه	پودر سیلیس	سرباره مس	باطله زغال سنگ
	۰	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶	۹۶
ماسه	۱۲۰۴/۴	۱۱۷۵/۲۴	۱۱۸۹/۴	۱۱۹۴/۲	۱۲۱۴/۶۶	۱۱۷۲/۶۴

آب حل و به مخلوط اضافه گردیده (حدود ۰/۷ درصد مواد پایه سیمانی) و اجازه داده شده است تا شکل‌گیری مخلوط بتن تازه، مواد مخلوط شوند. در صورت نرسیدن به روانی مورد نظر (میزان پخش شدگی مخلوط در آزمایش میز روانی در حدود ۲۱ تا ۲۳ سانتیمتر تنظیم شده است) در حین

۲-۲-۲- نحوه ساخت و عمل‌آوری

در ساخت بتن فوق توانمند ابتدا تمامی مواد خشک از قبیل سنگدانه، پوزولان و سیمان با یکدیگر به مدت ۵ دقیقه در داخل یک مخلوط‌کن بتن با ظرفیت ۱۰۰ لیتر مخلوط شده‌اند. بخشی از فوق‌روان‌ساز را در داخل

در زمان‌های مختلف تا مدت ۱۲۰ دقیقه ثبت می‌گردد. به دلیل وجود یک سری ناخالصی‌ها در مواد پوزولانی (مانند نمک سدیم، نمک پتاسیم و سایر نمک‌ها) که سبب افزایش رسانایی می‌شوند روند بالا را برای یک محلول حاوی ۵ گرم ماده پوزولانی و ۲۵۰ میلی لیتر آب مقطر به منظور دستیابی به منحنی رسانایی صحیح آن ماده تکرار می‌شود.

انحلال هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)_2$ در آب سبب آزادسازی مقادیر بسیار زیادی از یون‌های Ca^{2+} و OH^- در محیط محلول می‌گردد، در نتیجه رسانایی محلول در طول فرایند انحلال کامل هیدروکسید کلسیم افزایش می‌یابد و افزودن مواد پوزولانی به این محلول و واکنش دادن آنها با هیدروکسید کلسیم سبب تثبیت شدن یون‌ها و کاهش رسانایی الکتریکی می‌شود.



شکل ۳: همزن مغناطیسی و دستگاه رسانایی سنج مورد استفاده در آزمایش تعیین خاصیت پوزولانی مواد

Fig. 3. Magnitude stirrer and electrical conductivity apparatus used in the pozzolanic reactivity test of materials

در شکل شماره ۴ نحوه انجام آزمایش برای دوده‌سیلیسی توضیح داده شده است. B_t منحنی مربوط به تغییرات رسانایی دوده‌سیلیسی در محلول آب مقطر و هیدروکسید کلسیم می‌باشد که پس از انحلال ۱۲۰ میلی‌گرم هیدروکسید کلسیم در ۱۵۰ میلی لیتر آب مقطر در یک ظرف ۲۵۰ میلی لیتری صورت می‌گیرد و پس از آن ۵ گرم پوزولان (دوده‌سیلیسی) به این محلول اضافه شده و تغییرات رسانایی تا ۱۲۰ دقیقه ثبت گردیده است. منحنی A_t که تغییرات رسانایی آن ماده در یک محلول حاوی ۲۵۰ میلی لیتر آب مقطر و ۵ گرم ماده پوزولانی که به مدت ۱۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شده است می‌باشد. منحنی $(Ca)_t$ تغییرات رسانایی اصلاح شده در زمان‌های مختلف نام دارد که از تفریق منحنی B_t از منحنی A_t حاصل می‌گردد (رابطه ۳).

$$(Ca)_t = B_t - A_t \quad (3)$$

پارامتر LC^۲ پتانسیل واکنشی یک ماده را با هیدروکسید کلسیم نشان می‌دهد هرچه عدد پارامتر LC (رابطه ۴) بیشتر باشد نشان از خاصیت پوزولانی بالای آن ماده است.

$$LC(\%) = \frac{(Ca)_0 - (Ca)_t}{(Ca)_0} \quad (4)$$

اختلاط به مخلوط روانساز اضافه گردیده است. به منظور بررسی اثر حرارت بر واکنش‌زایی مواد مورد استفاده از سه نوع عمل‌آوری استفاده شده است، که شامل عمل‌آوری استاندارد، تسریع شده ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

در عمل‌آوری استاندارد نمونه‌های بتنی تا سن مورد نظر مطابق استاندارد ASTM C ۱۹۲ [۲۵] درون آب با دمای 23 ± 2 درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند اما در عمل‌آوری تسریع شده بعد از قرار دادن نمونه‌ها در محلول آب آهک به مدت ۴۸ ساعت داخل اون قرار می‌گیرند. (نحوه تنظیم دمای اون به صورتی می‌باشد که حرارت محلول آب آهک به دمای مورد نظر یعنی ۶۰ درجه سانتیگراد یا ۹۰ درجه سانتیگراد رسیده باشد) پس از رسیدن دمای آب آهک به دمای محیط (حدود ۲۳ درجه سانتیگراد) نمونه‌ها تا سن آزمایش تحت عمل‌آوری استاندارد قرار خواهند گرفت. اما با توجه به اینکه دمای عمل‌آوری تسریع‌شده کمتر از دمای تبخیر آب بوده و با استفاده از پوشش‌هایی در سطح ظرف تحت عمل‌آوری تسریع شده، از تبخیر آب آهک و تغییر غلظت آهک در محلول عمل‌آوری جلوگیری شده است. از طرفی سعی بر آن بوده که شرایط عمل‌آوری برای تمامی نمونه‌های ساخته شده یکسان باشد.

۲-۲-۳- بررسی خاصیت پوزولانی مواد

چندین تکنیک برای بررسی خاصیت پوزولانی مواد شناسایی شده است. بطور کلی تکنیک‌های بررسی واکنش پوزولانی را می‌توان به چهار گروه اصلی طبقه‌بندی نمود: رسانایی الکتریکی، آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD)، آزمایش آنالیز حرارتی (TGA) و تجزیه شیمیایی.

روش رسانایی الکتریکی سریع‌ترین روش بررسی واکنش پوزولانی مواد می‌باشد. لاکسان^۱ یک روش سریع را برای بررسی شاخص پوزولانی بر پایه اندازه‌گیری تغییرات بین رسانایی الکتریکی اولیه و نهایی در محلول‌های حاوی هیدروکسید کلسیم با پوزولان پیشنهاد کرد. واکنش بین هیدروکسید کلسیم با مواد پوزولانی سبب کاهش رسانایی الکتریکی محلول می‌گردد که این عمل به تثبیت محلول هیدروکسید کلسیم توسط ذرات مواد پوزولانی نسبت داده می‌شود [۲۶]. اخیراً پایا^۲ و همکاران یک روش برپایه رسانایی الکتریکی برای بررسی خاصیت پوزولانی خاکستر بادی پیشنهاد نمودند که تغییرات رسانایی را در زمان‌های مختلف مورد اندازه‌گیری قرار دادند [۲۷]. در مطالعه حاضر روشی شبیه به این روش برای بررسی خاصیت پوزولانی بکارگرفته شده است.

در این راستا ابتدا یک محلول از انحلال ۱۲۰ میلی‌گرم هیدروکسید کلسیم در ۱۵۰ میلی لیتر آب مقطر در یک ظرف ۲۵۰ میلی لیتری تهیه می‌گردد. پس از آن ۵ گرم از ماده مورد نظر را در حین همزدن دائم محلول توسط یک همزن مغناطیسی به آن اضافه و از یک دستگاه رسانایی سنج شکل ۳ برای ثبت تغییرات رسانایی نسبت به زمان استفاده می‌شود و تغییرات رسانایی

1 Luxan

2 Paya

3 Loss in conductivity

۲-۵- آزمایش انتشار تسریع شده یون کلرید

یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی سریع نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید روش انتشار تسریع شده یون کلرید می‌باشد. در این تحقیق از آزمایش انتشار تسریع شده یون کلرید مطابق با استاندارد [۳۰] NT BUILD492 استفاده شده است. در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای 50×100 میلی‌متر بکار برده شده و وسایل مورد نیاز این آزمایش شامل پمپ و محفظه خلا، غلاف لاستیکی، بست‌های فولادی و ورق‌های فولادی ضدزنگ می‌باشد (شکل ۶) و مواد لازم شامل آب مقطر، کلرید سدیم، هیدروکسید سدیم و نیترات نقره می‌شود.

در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها را کامل شسته به نحوی که هیچ‌گونه آلودگی بر روی آن‌ها باقی نماند. هنگامی که سطح نمونه‌ها کاملاً خشک شد، بگونه‌ای درون محفظه خلا قرار می‌گیرند تا هر دو سطح نمونه‌ها در معرض خلا قرار گیرد. پمپ خلا را روشن نموده و فشار را در عرض چند دقیقه بین ۱۰ تا ۵۰ میلی بار تنظیم می‌کنیم. خلا را به مدت ۳ ساعت ادامه داده و درحالی‌که این حالت همچنان ادامه دارد، درون محفظه را تا زمانی که نمونه‌ها به طور کامل غوطه‌ور شوند، با آب پر می‌کنیم. سپس حالت خلا را به مدت یک ساعت دیگر ادامه می‌دهیم. پس از آن نمونه‌ها را به مدت ± 2 ساعت در آب نگه می‌داریم.



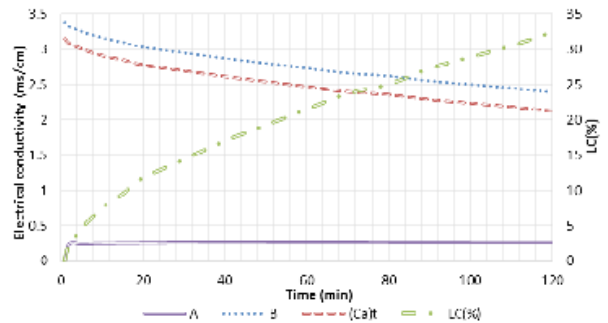
شکل ۶: وسایل مورد نیاز آزمایش تسریع شده یون کلرید
Fig. 6. The required equipment for rapid chloride migration test

نمونه‌ها پس از اشباع با آب، داخل غلاف لاستیکی قرار داده شده و سطح پیرامونی آن‌ها ایزوله می‌شود، سپس محلول سود (هیدروکسید سدیم) با غلظت $0/3$ نرمال، داخل غلاف لاستیکی ریخته شده و مجموعه آماده شده را داخل ظرف حاوی محلول نمک (کلرید سدیم) با غلظت ۱۰ درصد قرار داده، به نحوی که وجه پایینی نمونه در تماس با محلول نمک باشد. در شکل ۷ به صورت شماتیک نحوه قرارگیری نمونه و غلاف لاستیکی دور آن، داخل ظرف حاوی نمک در آزمایش انتشار تسریع شده یون کلرید ارائه شده است.

$(Ca)_0$: رسانایی اصلاح شده در زمان صفر دقیقه

$(Ca)_t$: رسانایی اصلاح شده در زمان دلخواه (در طول ۱۲۰ دقیقه)

LC (%): درصد کاهش رسانایی الکتریکی

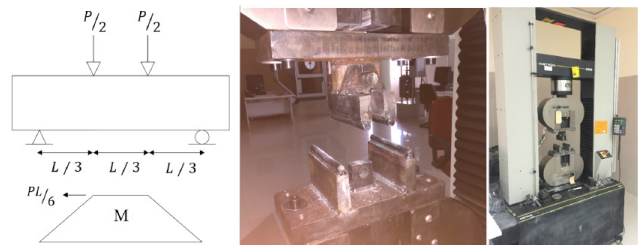


شکل ۴: منحنی تغییرات رسانایی دوده سیلیسی: A) در محلول پوزولان و آب مقطر. B) در محلول پوزولان، آب مقطر و هیدروکسید کلسیم. $(Ca)_t$ تغییرات رسانایی اصلاح شده. LC) درصد کاهش رسانایی الکتریکی

Fig. 4. The curve of conductivity changes of silica fume A) pozzolan and water solution. B) pozzolan, water and calcium hydroxide solution. $(Ca)_t$ reformed conductivity changes. LC) percentage decrease in electrical conductivity

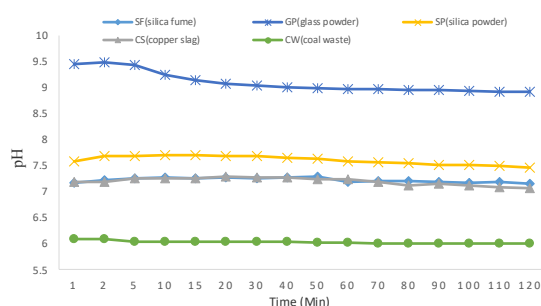
۲-۲-۴- آزمایش مقاومت فشاری و خمشی

به منظور ارزیابی مقاومت فشاری مخلوط‌های ساخته شده از قالب‌های مکعبی $50 \times 50 \times 50$ میلی‌متری مطابق با آیین‌نامه [۲۸] BS1881-116 استفاده شده است همچنین آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های $160 \times 40 \times 40$ میلی‌متر مطابق با آیین‌نامه [۲۹] EN196-1 و با استفاده از یک جک ۳۰ تنی صورت پذیرفته است (شکل ۵). نمونه‌های خمشی در سن مورد نظر تحت آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای (نمونه‌ها در دو نقطه روی تکیه‌گاه قرار دارند و نیرو نیز در دو نقطه به نمونه اعمال می‌شود) قرار گرفته‌اند.



شکل ۵: دستگاه آزمایش مقاومت خمشی و شکل شماتیک نحوه انجام آزمایش

Fig. 5. The machine of flexural strength test and schematic figure of the test



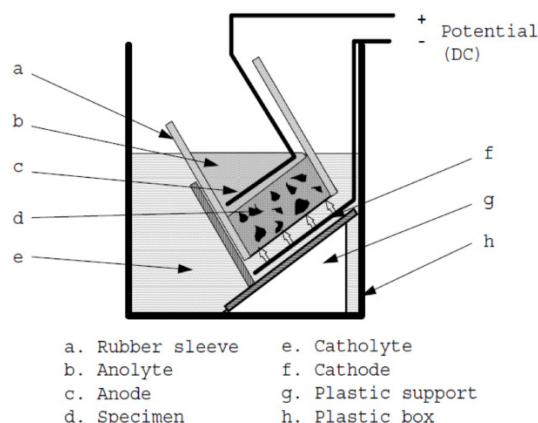
شکل ۸: منحنی تغییرات PH مواد مورد استفاده شامل دوده سیلیسی، پودر شیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس

Fig. 8. The curve of pH changes of used materials, including silica fume, glass powder, copper slag, coal waste and silica flour

انحلال پودر شیشه میزان زیادی یون‌های قلیا آزاد می‌کند که به عنوان یک کاتالیزور برای واکنش سیمان پرتلند عمل می‌نماید. برای پودر سنگ سیلیس، سرباره مس و دوده سیلیسی pH در محدوده ۷/۲ تا ۷/۶ می‌باشد. نکته قابل توجه میزان pH پودر باطله زغال سنگ است که در محدوده اسیدی قرار دارد در نتیجه این امکان وجود دارد تاثیرات منفی بر روی خواص بتن داشته باشد.

افزایش قلیائیت محیط سبب افزایش واکنش‌پذیری مواد می‌شود در نتیجه استفاده از موادی که انحلال آنها دارای pH بالایی باشند تاثیرات مثبتی بر این موضوع می‌گذارد چرا که به محض قرارگیری در محیط بتن تاثیر کمتری بر کاهش قلیائیت محلول فضای منفذی می‌گذارد و به تبع آن درجه هیدراسیون سیمان افزایش می‌دهد.

پارامتر LC که در بخش ۲-۲-۳ توضیح داده شده است پتانسیل واکنشی یک ماده را با هیدروکسید کلسیم نشان می‌دهد که این موضوع همان تعریف خاصیت پوزولانی یک ماده می‌باشد (پوزولانها مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که به خودی خود قابلیت واکنش‌زایی ندارند، اما در حضور آهک با آب واکنش داده و تولید محصولات C-S-H و سایر ترکیبات مقاوم‌زا را می‌کند). در نتیجه از نظر خاصیت پوزولانی پنج ماده بررسی شده که در شکل شماره ۹ نشان داده شده است، پودر شیشه بیشترین میزان واکنش‌زایی را داشته بنحوی که پس از گذشت ۱۲۰ دقیقه پارامتر درصد کاهش رسانایی الکتریکی به مقدار ۴۸ درصد رسیده است و پس از آن دوده سیلیسی و پودر باطله زغال سنگ به ترتیب دارای مقادیر ۳۳ و ۲۶ درصد می‌باشد. کمترین میزان LC با مقدار ۱۵ درصد مربوط به سرباره مس و پودر سنگ سیلیس است. با توجه به بالا بودن pH پودر شیشه این امکان وجود دارد که به دلیل قلیائیت بالای محیط بوجود آمده در محلول حاوی آب، هیدروکسید کلسیم و پودر شیشه یون‌های بیشتری توسط این ماده تثبیت شده باشد و عدد پارامتر LC آن افزایش زیادی داشته باشد.



شکل ۷: شکل شماتیک از انجام آزمایش انتشار سریع شده یون کلرید

Fig. 7. Schematic figure of rapid chloride migration test

آزمایش انتشار سریع شده یون کلرید از طریق شکستن نمونه‌ها بعد از اعمال اختلاف پتانسیل به مدت لازم و پاشش محلول ۰/۱ مولار نیترات نقره، بر روی سطح شکسته شده، انجام می‌گردد. پس از گذشت حدود ۱۵ دقیقه به وسیله کولیس عمق نفوذ از وسط نمونه تا لبه‌ها قرائت می‌شود سپس ضریب انتشار یون کلرید از رابطه زیر محاسبه خواهد شد.

$$D_{nsm} = \frac{0.0239(273+T) \times L}{(U-2) \times t} \times (X_d - 0.0238) \times \sqrt{\frac{(273+T) \times L \times X_d}{U-2}} \quad (4)$$

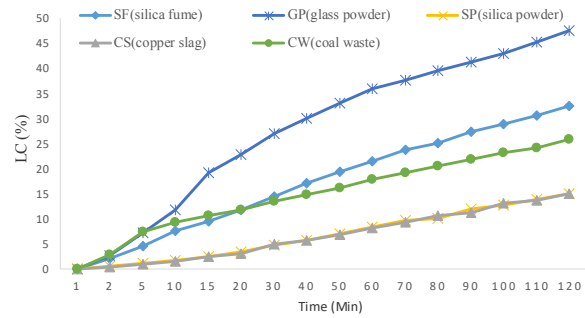
- D_{nsm} : ضریب انتشار یون کلرید $m^2/s \times 10^{-12}$
- U : مقدار ولتاژ اعمالی
- T : میانگین دمای اولیه و ثانویه در محلول آب نمک
- L : ضخامت نمونه بر حسب میلی‌متر
- X_d : میانگین مقادیر عمق نفوذ
- t : مدت زمان آزمایش، بر حسب ساعت

۲- نتایج

۳-۱- خاصیت پوزولانی

هر چه میزان قلیائیت محلول فضای منفذی بیشتر باشد میزان انحلال به سرعت افزایش می‌یابد. شکل شماره ۸ نمودار pH بر حسب زمان برای پوزولان‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پودر شیشه بیشترین میزان قلیائیت را دارد در نتیجه سرعت انحلال پودر شیشه که یک فرایند گرماگیر است به سرعت در محیط بتن افزایش می‌یابد.

کنترلی خود افزایش مقاومت ۷ درصدی را دارا می‌باشد. در واقع در این سن عملکرد پوزولانی دوده سیلیسی نمود پیدا کرده و سبب رشد مقاومت شده است. برای سایر پوزولان‌ها به جز باطله زغال سنگ مقاومت در حد یکسانی بوده و نسبت به طرح کنترلی به میزان حدود ۱۰٪ کمتر می‌باشند. تحت عمل‌آوری تسریع شده ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد نیز دوده سیلیسی بیشترین مقاومت را داشته که این افزایش نسبت به طرح کنترلی خود به ترتیب برابر با ۱۲٪ و ۱۷٪ می‌باشد. مخلوط‌های حاوی پودر شیشه، پودر سیلیس و سرباره مس رشد مقاومتی نسبت به نمونه کنترلی خود در آن دما (۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد) نداشته‌اند. مقاومت مخلوط‌های حاوی باطله زغال سنگ با افزایش دمای عمل‌آوری روند نزولی داشته است. کمترین مقاومت را نیز در این نوع عمل‌آوری‌ها متعلق به باطله زغال سنگ است که بیش از ۳۵٪ نسبت به مخلوط کنترلی کمتر می‌باشد.



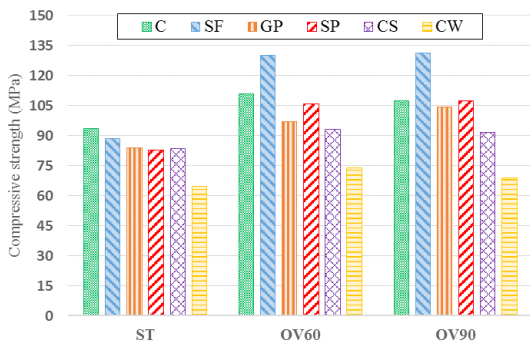
شکل ۹: درصد کاهش رسانایی (LC) برای مواد بکارگرفته شده در این تحقیق

Fig. 9. Percentage decrease in electrical conductivity for used materials in this research

۳-۲- مقاومت فشاری

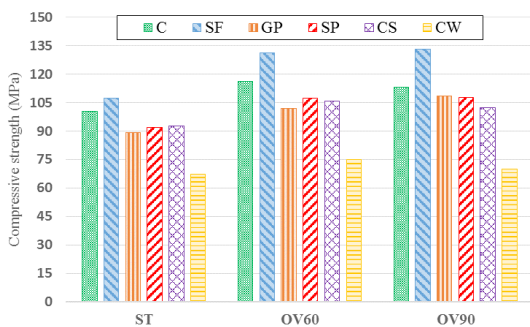
شکل شماره ۱۰ نتایج مقاومت فشاری در سن ۳ روز را تحت عمل‌آوری‌های استاندارد (ST)، تسریع شده ۶۰ (۶۰ °V) و ۹۰ (۹۰ °V) نشان می‌دهد. تحت عمل‌آوری استاندارد بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه کنترلی می‌باشد. از آنجا که مخلوط کنترلی از سیمان بیشتری برخوردار است حجم بیشتری از محصولات هیدراسیون را به خود اختصاص داده در نتیجه افزایش مقاومت بیشتری در این سن داشته است. بعد از آن دوده سیلیسی بیشترین مقاومت را کسب کرده و به مقاومتی در حدود ۸۸ مگاپاسکال رسیده است. در واقع دوده سیلیسی که یک پوزولان قوی معرفی می‌شود تا این سن خاصیت پوزولانی خاصی از خود نشان نداده است. سایر مواد که از آنها انتظار خاصیت پوزولانی ضعیف‌تر و پرکنندگی بیشتری می‌رفت مقاومت خاصی از خود نشان نداده و در حدود مقاومتی ۸۳ مگاپاسکال می‌باشند. کمترین مقاومت نیز مربوط به طرح حاوی باطله زغال سنگ می‌باشد که به مقاومت ۶۴ مگاپاسکال رسیده است. تحت عمل‌آوری ۶۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد مقاومت‌های بدست آمده در مخلوط‌های کنترل، دوده سیلیسی، پودر سیلیس و سرباره مس مقاومت در هر دو عمل‌آوری یکسان بوده که در این بین مخلوط حاوی دوده سیلیسی افزایش مقاومت چشمگیری به دلیل افزایش واکنش‌پذیری در حالت عمل‌آوری تسریع شده نسبت به استاندارد داشته و به مقاومت ۱۳۱ مگاپاسکال رسیده که می‌توان نتیجه گرفت حرارت بر افزایش واکنش پوزولانی دوده سیلیسی تاثیر مثبتی داشته است. در مخلوط حاوی پودر شیشه با افزایش دمای عمل‌آوری از استاندارد به ۶۰ و از ۶۰ به ۹۰ درجه سانتیگراد مقاومت به ترتیب به مقدار ۱۷٪ و ۷٪ افزایش داشته است. شایان ذکر است که در مخلوط حاوی باطله زغال سنگ شاهد افزایش چندان مقاومت تحت عمل‌آوری تسریع شده نیستیم و مقاومت‌ها حداکثر به ۷۵ مگاپاسکال در دمای عمل‌آوری ۶۰ درجه سانتیگراد رسیده‌اند.

در سن ۷ روزه تحت عمل‌آوری استاندارد دوده سیلیسی بیشترین مقاومت را داشته است و به مقاومت ۱۰۷ مگاپاسکال رسیده که نسبت به طرح



شکل ۱۰: مقاومت فشاری ۳ روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 10. Compressive strength of mixtures under different curing regimes at 3 days



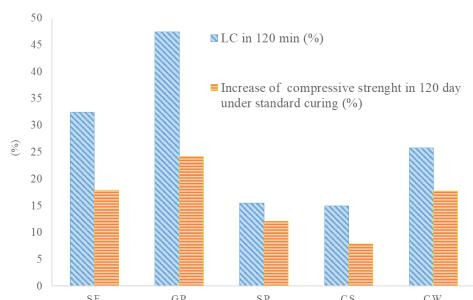
شکل ۱۱: مقاومت فشاری ۷ روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 11. Compressive strength of mixtures under different curing regimes at 7 days

کاهش مقاومت نسبت به مقاومت‌های بدست آمده از عمل‌آوری استاندارد نیز شده است همچنین ملاحظه می‌گردد مقاومت‌های بدست آمده از عمل‌آوری تسریع شده 60° و 90° تغییرات چندانی نسبت به یکدیگر نداشته است در حالی که استفاده از عمل‌آوری تسریع شده 90° ، 50% درصد انرژی بیشتری نسبت به عمل‌آوری تسریع شده 60° احتیاج دارد و خطر تشکیل دیر هنگام اترینگایت را تشدید می‌کند.

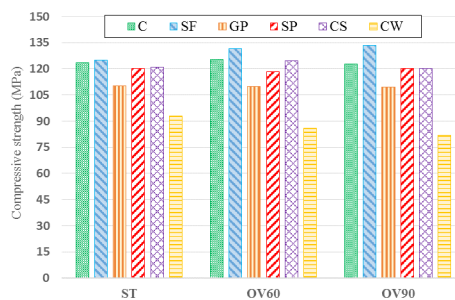
استفاده از عمل‌آوری تسریع شده سبب افزایش درجه هیدراسیون سیمان در سنین اولیه نسبت به عمل‌آوری استاندارد می‌شود در نتیجه مقاومت‌های کسب شده در این سن تحت عمل‌آوری تسریع شده بیشتر خواهد بود، لیکن استفاده از عمل‌آوری استاندارد سبب افزایش درجه هیدراسیون می‌شود در حالی که درجه هیدراسیون نمونه‌هایی که عمل‌آوری تسریع شده شده‌اند ثابت خواهد ماند در نتیجه در سنین بالاتر مقاومت‌های کسب شده از نمونه‌هایی که تحت عمل‌آوری استاندارد قرار گرفته‌اند بیشتر خواهد بود. بخشی از افت عملکرد در عمل‌آوری تسریع شده به دلیل تخریب ریزساختار بتن به لحاظ شکل‌گیری سریع آن می‌باشد.

۳-۲-۱- بررسی همبستگی بین روند افزایش مقاومت تحت عمل‌آوری استاندارد با خاصیت پوزولانی مواد (مقادیر پارامتر LC) شکل ۱۴ نمودار درصد بهبود مقاومت 120° روز را نسبت به 28° روز تحت عمل‌آوری استاندارد برای طرح‌های مختلف به همراه نمودار خاصیت پوزولانی (LC) مواد مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد روند هر دو نمودار یکی می‌باشد به این معنا که خاصیت پوزولانی که برای مواد مختلف در آزمایش تعیین خاصیت پوزولانی تعیین شده است در آزمایش مقاومت فشاری در سنین بالا نیز دیده می‌شود. مطابق شکل شماره ۱۵ مشاهده می‌گردد ضریب همبستگی بین مقادیر بدست آمده از روند بهبود مقاومت فشاری در 120° روز نسبت به پارامتر LC در دقیقه $9/0$ می‌باشد که نشان از همبستگی بالا بین این دو آزمایش بوده است.



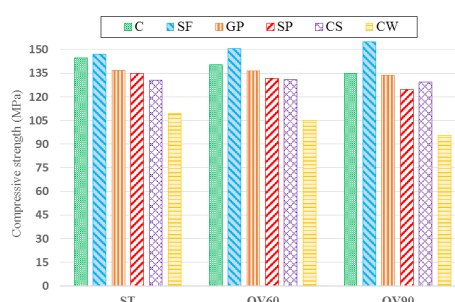
شکل ۱۴: درصد بهبود مقاومت فشاری در 120° روز نسبت به 28° روز و عدد پارامتر LC در زمان 120° دقیقه برای طرح اختلاط‌ها و مواد مختلف

Fig. 14. Percentage of compressive strength improvement at 120 days compared to 28 days and quantity of LC parameter at 120 min for mixtures and different materials



شکل ۱۲: مقاومت فشاری 28° روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 12. Compressive strength of mixtures under different curing regimes at 28 days



شکل ۱۳: مقاومت فشاری 120° روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 13. Compressive strength of mixtures under different curing regimes at 120 days

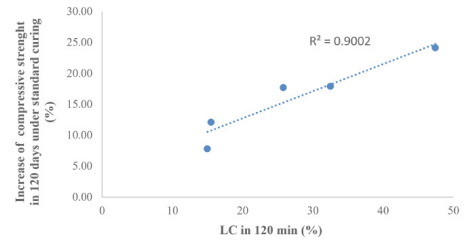
همان‌طور که در شکل شماره ۱۲ ملاحظه می‌گردد در سن 28° روز تفاوت چندانی بین عمل‌آوری‌های مختلف وجود ندارد. اما در هر سه نوع عمل‌آوری طرح حاوی دوده سیلیسی بیشترین مقاومت را کسب کرده است که این افزایش مقاومت نسبت به طرح کنترلی در عمل‌آوری تسریع شده 90° بیشترین نمود را داشته است. پس از آن طرح‌های حاوی پودر سیلیس و سرباره مس مقاومتی در حدود طرح کنترلی (C) دارند. طرح‌های حاوی پودر شیشه و باطله زغال سنگ نسبت به نمونه کنترلی با کاهش مقاومت همراه بوده که این کاهش برای باطله زغال سنگ بیشتر می‌باشد.

نتایج 120° روزه بدست آمده (شکل شماره ۱۳) نشان می‌دهد که عمل‌آوری تسریع شده نمی‌تواند تا این سن، تاثیرات مثبت را بر روی مقاومت فشاری حفظ کند به جز برای طرح حاوی دوده سیلیسی که افزایش مقاومت را با دمای عمل‌آوری دارد. برای سایر طرح‌ها مقاومت بدست آمده کمتر از طرح کنترلی می‌باشد که این کاهش مقاومت بجز برای طرح حاوی باطله زغال سنگ قابل توجه نیست.

مشاهده می‌گردد که عمل‌آوری تسریع شده تاثیرات مثبتی را بر مقاومت فشاری فقط در سنین اولیه داشته است و با افزایش سن تاثیر عمل‌آوری تسریع شده به شدت کاهش پیدا کرده به نحوی که در سن 120° روز سبب

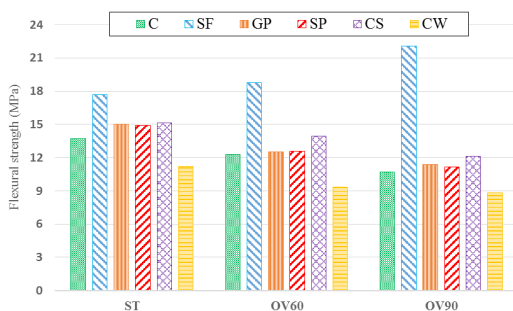
دوده سیلیسی با افزایش دمای عمل‌آوری رشد مقاومت خمشی بیشتری داشته است و کمترین مقاومت بدست آمده مربوط به طرح حاوی باطله زغال سنگ می‌باشد.

مشخص می‌گردد مواد مورد بررسی شامل پودرشیشه، سرباره مس و پودرسیلیس تاثیر مثبت بر افزایش مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز داشته‌اند لیکن در ۱۲۰ روز این تاثیر مشاهده نمی‌گردد. همچنین طرح حاوی دوده سیلیسی به دلیل خاصیت پوزولانی بالا و یا اندازه بسیار ریز ذرات (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر) سبب بهبود قابل توجه ریزساختار شده است در نتیجه مقاومت خمشی افزایش چشمگیری می‌یابد. ظاهراً همچون نتایج مقاومت فشاری اثر واکنش پوزولانی بر روی بهبود مقاومت خمشی با افزایش سن مشاهده نمی‌گردد.



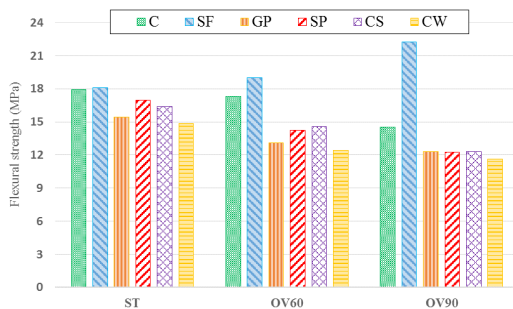
شکل ۱۵: همبستگی بین درصد بهبود مقاومت فشاری در ۱۲۰ روز نسبت به ۲۸ روز و عدد پارامتر LC در زمان ۱۲۰ دقیقه برای طرح اختلاطها و مواد مختلف

Fig. 15. Correlation between Percentage of compressive strength improvement at 120 days compared to 28 days and quantity of LC parameter at 120 min for mixtures and different materials



شکل ۱۶: مقاومت خمشی ۲۸ روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 16. Flexural strength of mixtures under different curing regimes at 28 Days



شکل ۱۷: مقاومت خمشی ۱۲۰ روزه طرح‌های ساخته شده تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 17. Flexural strength of mixtures under different curing regimes at 120 Days

مطابق اشکال شماره ۱۸ و ۱۹ عمل‌آوری تسریع شده تاثیرات مخربی بر مدول گسیختگی مخلوط‌های ساخته شده بجز طرح حاوی دوده سیلیسی دارد به نحوی که با افزایش دمای عمل‌آوری از ۶۰ به ۹۰ مدول گسیختگی

اگر به مقاومت‌های بدست آمده در سن ۱۲۰ روز تحت عمل‌آوری استاندارد نگاهی بیندازیم متوجه می‌شویم که مقاومت‌های کسب شده بجز طرح دارای باطله زغال سنگ بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشد در نتیجه با توجه به درصد بهبود مقاومت طرح‌ها در این سن انتظار می‌رود که در سنین بالاتر روند کسب مقاومت مشابه روند بدست آمده در آزمایش خاصیت پوزولانی بین مواد مختلف باشد. در واقع زمان عامل بسیار مهمی در فعال شدن خاصیت پوزولانی مواد می‌باشد.

۳-۳- مدول گسیختگی

در اشکال شماره ۱۶ و ۱۷ مدول گسیختگی (مقاومت خمشی) مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روز تحت عمل‌آوری‌های استاندارد (ST)، تسریع شده (۶۰ °V) و (۹۰ °V) مشاهده می‌گردد. مطابق نتایج مدول گسیختگی در سن ۲۸ روز تحت عمل‌آوری استاندارد مشاهده می‌شود تمامی مخلوط‌ها بجز طرح دارای باطله زغال سنگ مدول گسیختگی بیشتری نسبت به طرح کنترلی خود دارند که این امر می‌تواند به دلیل افزایش تراکم دانه‌بندی طرح‌های حاوی این مواد به واسطه ریزی ذرات آنها باشد. همچنین مشخص می‌گردد با افزایش دمای عمل‌آوری از ۶۰ به ۹۰ مقاومت‌های خمشی تمامی طرح اختلاطها بجز طرح حاوی دوده سیلیسی کاهش می‌یابند. در طرح حاوی دوده سیلیسی با افزایش دمای عمل‌آوری مدول گسیختگی افزایش می‌یابد، دما تاثیر بسیار خوبی در مدول گسیختگی طرح حاوی دوده سیلیسی دارد به نحوی که در دمای عمل‌آوری ۹۰ مدول گسیختگی به میزان حدود ۳۰٪ نسبت به عمل‌آوری استاندارد افزایش می‌دهد. در این سن بر خلاف نتایج مقاومت فشاری، مدول گسیختگی مخلوط حاوی باطله زغال سنگ نسبت به بقیه مخلوط‌ها افت چندانی نداشته است.

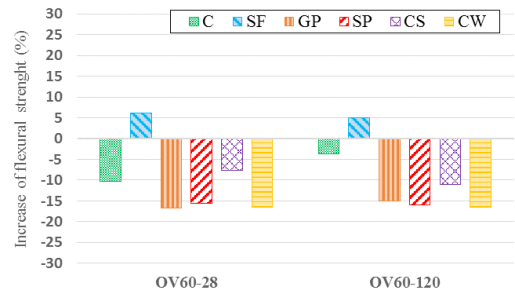
در سن ۱۲۰ روز مقاومت خمشی تمامی مخلوط‌ها بجز دوده سیلیسی تحت هر سه نوع عمل‌آوری کمتر از نمونه کنترلی بوده است اما این درصد کاهش برای عمل‌آوری استاندارد کمتر از تسریع شده می‌باشد. در این سن

از سوی دیگر استفاده از عمل‌آوری تسریع‌شده سبب تشکیل ریزترک در نمونه‌بتنی به دلیل تنش‌های حرارتی ایجاد شده خواهد شد. ریزترک‌ها نیز تاثیر بسیار زیادی در کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی خواهند داشت. اینگونه به نظر می‌رسد که استفاده از دوده‌سیلیسی به سبب خاصیت پوزولانی بالایی که تحت عمل‌آوری تسریع‌شده پیدا می‌کند، توانایی بسیار زیادی در بهسازی ترک‌های ایجاد شده دارد همینطور سبب افزایش درجه پلیمریزاسیون شده که به دنبال آن افزایش مقاومت خمشی را در پی خواهد داشت. سایر مواد مورد استفاده به دلیل اینکه حرارت نتوانسته است تاثیری در واکنش‌زایی پوزولانی آنها داشته باشد تنها ایجاد ریزترک کرده و در نتیجه سبب کاهش مقاومت خمشی شده است.

مطابق تحقیقات توتنجی^۱ استفاده از دوده‌سیلیسی بیش از ۱۰ درصد وزنی سیمان سبب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی تحت عمل‌آوری تسریع شده نسبت به عمل‌آوری استاندارد می‌شود در غیر این صورت مقاومت‌های کسب شده تحت عمل‌آوری استاندارد بیشتر خواهند بود [۳۱]. تفرویی^۲ نیز نشان دارد که استفاده از عمل‌آوری تسریع‌شده در دمای ۹۰ و ۱۵۰ درجه‌سانتیگراد به ترتیب سبب کاهش ۶۴ و ۱۷ درصدی مقاومت خمشی در طرح‌های حاوی دوده‌سیلیسی می‌شود [۳۲]. این امر در تحقیقات یازجی^۳ نیز دیده می‌شود چرا که با جایگزین کردن ۲۵ درصدی دوده‌سیلیسی و استفاده از عمل‌آوری تسریع شده در دمای ۱۰۰ درجه‌سانتیگراد مقاومت خمشی ۱۸ درصد نسبت به عمل‌آوری استاندارد کاهش یافت [۳۳]. از سوی دیگر پاره‌ای از تحقیقات بیانگر افزایش مقاومت خمشی تحت عمل‌آوری تسریع‌شده نسبت به حالت استاندارد هستند بطور مثال لی^۴ نشان داد در صورت استفاده از عمل‌آوری تسریع شده ۹۰ درجه سیلیسیوس مقاومت خمشی در طرح کنترل افزایش مقاومت ۲۳ درصدی و در طرح حاوی نانوسیلیس افزایش ۵ درصدی را خواهند داشت [۳۴]. با توجه به نتایج ضد و نقیضی که مشاهده می‌گردد می‌توان نتیجه گرفت که عوامل زیادی بر نتایج مقاومت خمشی تحت عمل‌آوری تسریع‌شده می‌توانند تاثیر داشته باشند که از جمله آنها می‌توان به نوع، حجم و خلوص ماده مورد استفاده و همچنین مشخصات طرح اختلاط اشاره کرد.

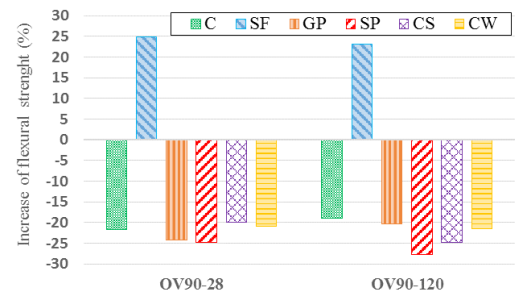
۳-۴- بررسی تغییرات مقاومت فشاری و مدول گسیختگی طرح‌های ساخته شده نسبت به طرح شاهد تحت عمل‌آوری و سنین مختلف مطابق با شکل ۲۰ مشاهده می‌گردد استفاده از دوده‌سیلیسی سبب افزایش مقاومت نسبت به نمونه کنترل شده است و همچنین با افزایش دمای عمل‌آوری، عملکرد دوده سیلیسی چشمگیر بوده به نحوی که تحت عمل‌آوری تسریع شده ۹۰^۰ رشد مقاومت ۱۵ درصدی را نسبت به نمونه کنترل داشته است و با افزایش سن تحت هر سه نوع عمل‌آوری مقاومت

به شدت افت پیدا می‌کند. اما در طرح حاوی دوده سیلیسی نسبت به مخلوط کنترل با افزایش دمای عمل‌آوری تسریع شده مدول گسیختگی از ۵ درصد در دمای ۶۰^۰ به بیش از ۲۰ درصد در دمای ۹۰^۰ بهبود می‌یابد. تحت این آزمایش نیز مشخص می‌گردد عمل‌آوری تسریع شده ۶۰ تاثیر مخرب کمتری نسبت به تسریع شده ۹۰^۰ برای اغلب مخلوط‌های حاوی مواد مکمل سیمانی به جز دوده سیلیسی دارد.



شکل ۱۸: درصد بهبود مقاومت خمشی در عمل‌آوری تسریع شده ۶۰ نسبت به حالت استاندارد در سنین مختلف

Fig. 18. Percentage of flexural strength improvement under thermal curing at 60 degrees centigrade compared to standard curing at different ages



شکل ۱۹: درصد بهبود مقاومت خمشی در عمل‌آوری تسریع شده ۹۰ نسبت به حالت استاندارد در سنین مختلف

Fig. 19. Percentage of flexural strength improvement under thermal curing at 90 degrees centigrade compared to standard curing at different ages

همانطور که در بخش ۲-۳ مشاهده گردید، استفاده از عمل‌آوری تسریع‌شده در سنین پایین نیز (۳روز) تاثیر چشمگیری در ارتقاء مقاومت‌های فشاری کسب شده در طرح حاوی دوده‌سیلیسی داشته است به نحوی ۱۷ تا ۲۰ درصد بیشتر از طرح کنترل می‌باشد اما برای سایر طرح‌ها که حاوی موادی همچون پودرشیشه، سرباره‌مس، پودرسیلیس و باطله زغال‌سنگ می‌باشند، عمل‌آوری تسریع‌شده تاثیری بر کسب مقاومت‌آنها نداشته است و همواره مقاومت‌هایی کمتر از طرح کنترل داشته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت استفاده از حرارت تنها سبب افزایش خاصیت پوزولانی دوده‌سیلیسی می‌شود و تاثیر چندانی بر سایر مواد مورد استفاده مخصوصا در سنین اولیه ندارد.

1 Toutanji

2 Tafraoui

3 Yazici

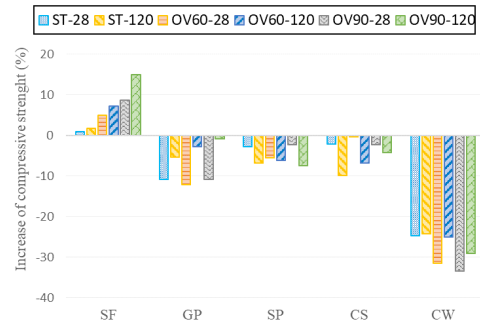
4 Li

مطابق شکل ۲۱ مشاهده می‌گردد که طرح حاوی باطله زغال سنگ در تمامی سنین و شرایط عمل‌آوری سبب کاهش مدول گسیختگی (حدود ۲۰ درصد) نسبت به طرح کنترل شده است. اما سایر پوزولان‌ها تأثیرات مثبتی در سن ۲۸ روز داشته‌اند که این امر برای طرح‌های حاوی سرباره مس، پودرسیلیس و پودر شیشه به حدود ۱۰ درصد می‌رسد اما برای طرح حاوی دوده‌سیلیسی بسیار قابل توجه می‌باشد به نحوی که این افزایش مقاومت در عمل‌آوری‌های استاندارد، تسریع شده 60° و 90° به ترتیب برابر با ۳۰، ۵۲ و ۱۰۶ درصد می‌باشد. با افزایش سن تا ۱۲۰ روز تغییرات مقاومتی کاهش چشمگیری نسبت به ۲۸ روز در تمامی نمونه‌ها بجز برای طرح حاوی باطله زغال سنگ دارند به نحوی که در طرح‌های حاوی پودر شیشه، سرباره مس و پودرسیلیس مقاومت‌های کسب شده کمتر از نمونه کنترلی بوده است اما طرح حاوی دوده‌سیلیسی همچنان دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه کنترلی می‌باشد. برای مثال در طرح حاوی پودر شیشه تحت عمل‌آوری استاندارد تغییرات مقاومتی از ۱۰+ درصد در ۲۸ روز به ۱۴- درصد در ۱۲۰ روز می‌رسد. دلیل این امر نیز می‌تواند تغییرات میزان سیمان مصرفی در طرح کنترل نسبت به سایر طرح‌ها باشد.

۳-۵- انتشار تسریع شده یون کلرید

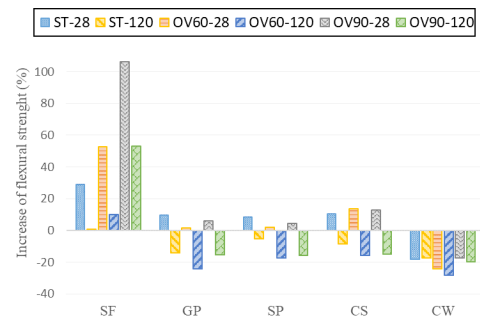
آزمایش انتشار تسریع شده یون کلرید در سنین ۲۸ و ۱۲۰ روز بر روی نمونه‌های ساخته شده انجام گرفته است. در تصاویر شماره ۲۲ و ۲۳ ضریب انتشار یون کلرید در مخلوط‌های ساخته شده و تحت عمل‌آوری‌های مختلف نشان داده شده است. در میان طرح‌های ساخته شده دوده‌سیلیسی بهترین عملکرد را در تمامی عمل‌آوری‌ها داشته به نحوی که نسبت به طرح شاهد میزان ضریب انتشار یون کلرید در عمل‌آوری‌های استاندارد، تسریع شده 60° و تسریع شده 90° به ترتیب برابر 78% ، 85% و 93% کاهش داشته است. بطور کلی با جایگزینی ۱۰ درصدی مواد مختلف بجز دوده‌سیلیسی به جای سیمان مصرفی ضریب انتشار یون کلرید در تمامی عمل‌آوری‌ها با افزایش همراه خواهد بود به این معنا که استفاده از این مواد در سن ۲۸ روز تأثیرات مخربی بر دوام دارد. البته با توجه به این موضوع که طرح کنترل میزان سیمان بیشتری نسبت به سایر طرح‌ها دارد، حجم بیشتری از محصولات هیدراسیون را خواهد داشت و از آنجا که این مواد پوزولانی (بجز دوده‌سیلیسی) در سنین بالا واکنش پوزولانی از خود نشان می‌دهند تا سن ۲۸ روز تأثیر مثبتی بر میزان ضریب انتشار یون کلرید ندارند. در این سن طرح حاوی باطله زغال سنگ و سرباره مس عملکرد مناسبی نداشته و ضریب انتشار یون کلرید را تا حد زیادی افزایش داده‌اند. به عنوان مثال تحت عمل‌آوری استاندارد ضریب انتشار طرح‌های حاوی باطله زغال سنگ و سرباره مس نسبت به طرح شاهد به میزان 84% و 98% افزایش داشته است.

فشاری افزایش می‌یابد. سایر مواد پوزولانی سبب کاهش مقاوت فشاری شده‌اند که در این بین طرح حاوی باطله زغال سنگ بیشترین کاهش را داشته است (۲۵ تا ۳۰ درصد) در حالی که کاهش مقاوت طرح‌های حاوی پودر شیشه، سرباره مس و پودر سیلیس کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد.



شکل ۲۰: تغییرات مقاومت فشاری در سن ۲۸ و ۱۲۰ روز تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 20. Compressive strength changes at 28 and 120 days under different curing regimes

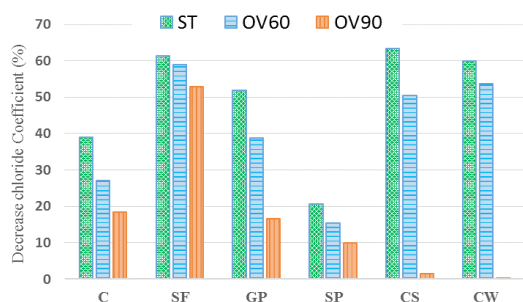


شکل ۲۱: تغییرات مدول گسیختگی در سن ۲۸ و ۱۲۰ روز تحت عمل‌آوری‌های مختلف

Fig. 21. Modulus of rupture changes at 28 and 120 days under different curing regimes

نکته قابل توجه کاهش مقاوت طرح‌های حاوی سرباره مس و پودر سیلیسی می‌باشد به نحوی که با افزایش سن مقاومت نسبت به طرح کنترل کاهش می‌یابد، درحالی که طرح حاوی پودر شیشه با افزایش سن تغییرات مقاومتی ناچیزی با طرح کنترل پیدا می‌کند. برای مثال در نمونه عمل‌آوری شده تحت دمای 90° مشاهده می‌گردد که تغییرات مقاومتی به کمتر از ۱ درصد رسیده است همچنین مشاهده می‌گردد افزایش دمای عمل‌آوری سبب کاهش تغییرات مقاومتی در سنین بالا برای موادی همچون دوده‌سیلیسی، پودر شیشه و سرباره مس شده است در حالی که برای طرح‌های حاوی پودرسیلیس و باطله زغال سنگ متفاوت می‌باشد، دلیل این امر می‌تواند خاصیت پوزولانی این مواد باشد که در بخش ۱-۳ بررسی شده بود.

تسریع شده یون کلرید در سن ۲۸ روز نسبت به سن ۱۲۰ روز بجز طرح حاوی دوده سیلیسی از مواد مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۲۴: درصد کاهش ضریب انتشار یون کلرید در سن ۱۲۰ روز نسبت به سن ۲۸ روز

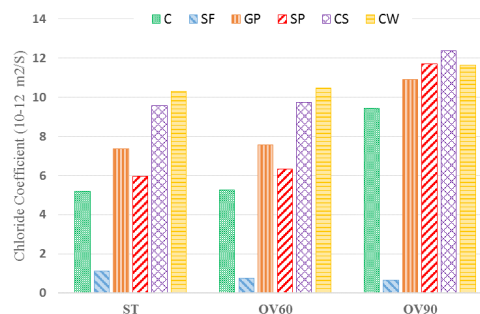
Fig. 24. Percentage decrease in diffusion rate of chloride ion at the age of 120 days compared to 28 days

شکل شماره ۲۴ درصد کاهش ضریب انتشار یون کلرید را در سن ۱۲۰ روز نسبت به ۲۸ روز نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که استفاده از عمل‌آوری استاندارد تأثیرات بسیار زیادی در بهبود ریزساختار و کاهش ضریب انتشار نسبت به عمل‌آوری تسریع شده داشته است. در طرح حاوی سرباره مس ضریب انتشار به میزان ۶۳ درصد تحت عمل‌آوری استاندارد و ۱ درصد تحت عمل‌آوری تسریع شده ۹۰° کاهش داشته است اما در طرح حاوی دوده سیلیسی میزان کاهش ضریب انتشار در سه عمل‌آوری انجام شده تغییرات چندانی ندارد و در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد می‌باشد.

می‌توان گفت استفاده از عمل‌آوری تسریع شده سبب افزایش درجه هیدراسیون در سنین اولیه می‌گردد به نحوی که با افزایش دما درجه هیدراسیون نیز افزایش می‌یابد اما با افزایش سن درجه هیدراسیون تغییرات چندانی نمی‌یابد در نتیجه بهبود چندانی در مشخصات دوام و مکانیکی بتن مشاهده نمی‌گردد. درجه هیدراسیون سیمان تحت عمل‌آوری استاندارد به آهستگی افزایش می‌یابد و تا سنین بالا ادامه خواهد داشت. همانگونه که در نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و نفوذ تسریع شده یون کلرید در سن ۱۲۰ روز مشاهده گردید نمونه‌های عمل‌آوری شده تحت شرایط استاندارد بهترین عملکرد را داشته‌اند.

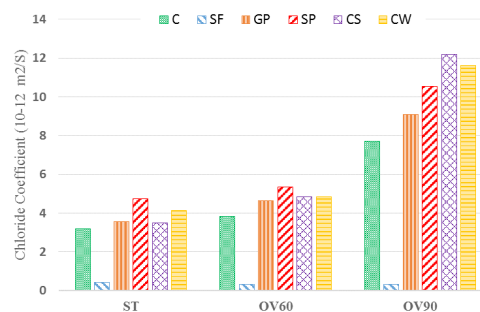
با توجه به نتایج بدست آمده در صورت نیاز به استفاده از عمل‌آوری تسریع شده، عمل‌آوری در دمای ۶۰° پیشنهاد می‌گردد به دلیل آنکه علاوه بر کسب مقاومت فشاری در سنین اولیه تأثیرات بسیار کمی در افت مقاومت خمشی و دوام بتن‌های فوق‌توانمند در سنین بالا خواهد داشت.

جدول شماره ۴ نتایج نفوذ یون کلرید در تحقیق حاضر با نتایج سایر پژوهش‌های مشابه را در سن ۲۸ روز تحت عمل‌آوری استاندارد نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که ضریب انتشار یون کلرید وابسته به پارامترهای مختلفی می‌باشد که از جمله مهمترین آنها می‌توان به نسبت آب به مواد



شکل ۲۲: میزان انتشار یون کلرید تحت عمل‌آوری‌های مختلف در سن ۲۸ روز

Fig. 22. Diffusion rate of chloride ion under different curing regimes at 28 days



شکل ۲۳: میزان انتشار یون کلرید تحت عمل‌آوری‌های مختلف در سن ۱۲۰ روز

Fig. 23. Diffusion rate of chloride ion under different curing regimes at 120 days

در سن ۱۲۰ روز ضریب انتشار یون کلرید تغییرات محسوسی یافته است شکل شماره ۲۳، در این سن ضریب انتشار در طرح‌های حاوی باطله زغال سنگ و سرباره مس کاهش چشمگیری داشته و تفاوت آنها نسبت به نمونه شاهد تحت عمل‌آوری‌های استاندارد و تسریع شده ۶۰° بسیار اندک شده است، این موضوع می‌تواند بیانگر عملکرد پوزولانی این مواد در سنین بالا باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد طرح حاوی پودر سیلیس بیشترین میزان نفوذ یون کلرید را در سن ۱۲۰ روز تحت عمل‌آوری استاندارد و تسریع شده ۶۰° داشته است، در نتیجه می‌توان گفت پودر سیلیس خاصیت پوزولانی بسیار کمی دارد همانند آنچه که در آزمایش خاصیت پوزولانی مواد مشخص شده بود اما شاید بتواند به عنوان یک پرکننده مناسب معرفی شود. همچنین میزان انتشار برای عمل‌آوری‌ها تسریع شده ۶۰° به نحوی است که نسبت به طرح کنترلی خود در دمای استاندارد تغییرات چندانی نداشته است. اما در عمل‌آوری تسریع شده ۹۰° به دلیل آنکه ریزساختار به سرعت در همان سنین اولیه شکل گرفته است، در سنین بلند مدت ریزساختار بهبود چندانی نمی‌یابد در نتیجه بهبودی در دوام بتن تحت آزمایش انتشار

با نتایج سایر محققین می‌باشد که این امر می‌تواند به دلیل نسبت پایین آب به مواد پایه سیمانی در این تحقیق باشد همچنین مشخص می‌گردد از میان مواد بررسی شده در این تحقیق فقط دوده‌سیلیسی در پژوهش‌های مشابه مورد بررسی قرار گرفته است و عملکرد سایر مواد تحت آزمایش انتشار تسریع شده‌ی یون کلرید بر محققین این امر پوشده بوده است.

پایه سیمانی و نوع پوزولان اشاره کرد. مطابق نتایج نشان داده شده، استفاده از دوده‌سیلیسی عملکرد بسیار چشمگیری نسبت به سایر مواد پوزولانی در کاهش ضریب یون کلرید داشته است، همانطور که در نتایج این تحقیق نیز دیده شد. ضریب انتشار یون کلرید در این پژوهش به مراتب کمتر از مقادیر متناظر

جدول ۴: مقایسه ضریب انتشار یون کلرید در این تحقیق با سایر تحقیقات انجام شده در سن ۲۸ روز

Table 4. Comparing the chloride ion coefficient in this research with other researches at 28 days

نام محقق	نسبت آب به مواد پایه سیمانی	نوع پوزولان	درصد مورد استفاده پوزولان (%)	ضریب نفوذ $\times 10^{-12}$ m ² /s	درصد بهبود نسبت به طرح کنترل (%)
	۰/۲	*	*	۵/۲۰	*
Pourjhanshahi And Madani	۰/۲	دوده‌سیلیسی	۱۰	۱/۱۱	+۷۸
	۰/۲	پودر شیشه	۱۰	۷/۳۶	-۴۱
	۰/۲	پودر سیلیس	۱۰	۵/۹۶	-۱۴
	۰/۲	سرباره مس	۱۰	۹/۵۶	-۸۳
	۰/۲	باطله زغال سنگ	۱۰	۱۰/۳۰	-۹۸
V.Elmarkova[35]	۰/۴	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۰	۵/۱۲	+۴۰
	۰/۴	خاکستر بادی	۱۵	۱۱/۱۵	-۳۰
	۰/۴	دوده‌سیلیسی	۱۰	۲/۴۹	+۷۰
	۰/۴	*	*	۸/۵۶	*
	۰/۳۵	*	*	۱۰/۶۱	*
Susanto Teng[36]	۰/۳۵	پودر سرباره کوره آهن‌گدازی	۳۰	۷/۹۲	+۲۵
	۰/۲۸	*	*	۷/۹۱	*
	۰/۲۸	پودر سرباره کوره آهن‌گدازی	۳۰	۰/۹۵	+۸۷
Meilun Shi[37]	۰/۳	*	*	۱۰/۵	*
	۰/۳	دوده‌سیلیسی	۱۳	۲/۳	+۷۸
Min-Hong Zhang[38]	۰/۳۲	*	*	*	*
	۰/۳۲	*	*	*	*
	۰/۳۲	دوده‌سیلیسی	۱۰	*	+۸۳
	۰/۳۲	سرباره کوره آهن‌گدازی	۵۵	*	+۵۳
	۰/۳۲	خاکستر بادی	۵۸	*	-۲

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر پنج ماده زائد صنعتی و معدنی از قبیل دوده سیلیسی، پودرشیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس بر خصوصیات مقاومتی و دوام بتن فوق توانمند مورد بررسی قرار گرفته است که در ذیل به نتایج بدست آمده در هر بخش اشاره می شود.

- مطابق با آزمایش رسانایی الکتریکی مشخص گردید که خاصیت پوزولانی پودر شیشه بیشتر از دوده سیلیسی می باشد اما احتیاج به زمان بیشتری نسبت به دوده سیلیسی برای ارتقاء خاصیت پوزولانی خود دارد. در نتیجه بیشترین عملکرد پوزولانی به ترتیب مربوط به پودر شیشه، دوده سیلیسی، پودر باطله زغال سنگ، پودر سرباره مس و پودر سنگ سیلیس می باشد. این احتمال نیز وجود دارد که خاصیت پوزولانی بالای پودر شیشه به دلیل pH بالای این ماده بوده چرا که محیط های قلیایی سبب افزایش واکنش ها می گردد در نتیجه یون های بیشتری محدود شده و کاهش رسانایی بیشتری صورت گرفته است.

- جایگزینی ۱۰ درصدی مواد مختلف از قبیل پودرشیشه، سرباره مس و پودر سیلیس سبب کاهش ناچیز مقاومت فشاری در سنین اولیه می شود اما با افزایش زمان تا ۱۲۰ روز مقاومت های کسب شده با طرح تفاوت چندانی ندارد (مواد مذکور بیشتر خاصیت پرکنندگی داشته اند تا پوزولانی). استفاده از دوده سیلیسی مقاومت را پس از سن ۷ روز افزایش می دهد و این روند را تا سن ۱۲۰ حفظ می شود. باطله زغال سنگ همواره سبب کاهش مقاومت فشاری می شود.

- مشخص گردید زمان و حرارت دو عامل بسیار مهم برای افزایش خاصیت پوزولانی مواد می باشد بنحوی که دما تاثیر بسیار زیادی بر طرح حاوی دوده سیلیسی دارد اما زمان تاثیر بیشتری برای طرح های حاوی سایر مواد (پودرشیشه، سرباره مس، باطله زغال سنگ و پودر سیلیس) می باشد یا اینکه فعال سازی این مواد نیاز به حرارت بالاتری دارد.

- استفاده از عمل آوری تسریع شده سبب افزایش مقاومت فشاری در سنین اولیه می گردد اما تاثیرات مخربی بر مقاومت خمشی و دوام بتن فوق توانمند بجز برای طرح حاوی دوده سیلیسی دارد. حرارت برای طرح حاوی دوده سیلیسی همواره تاثیرات مثبت داشته است.

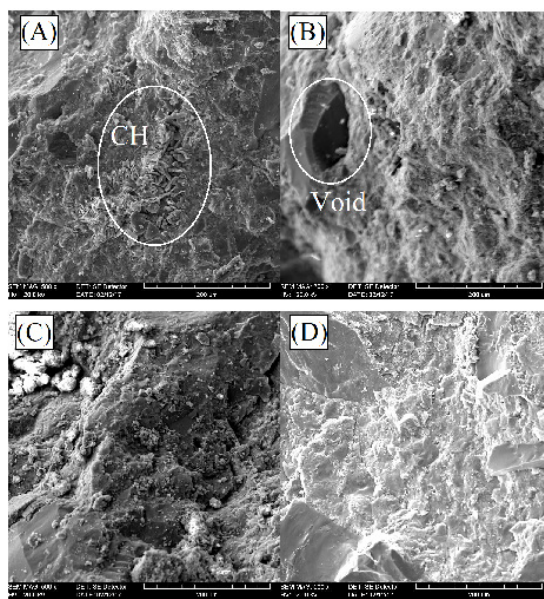
- عمل آوری تسریع شده 60° تا حد بسیار مطلوبی سبب افزایش مقاومت فشاری می شود و تاثیرات مخرب ناچیزی بر دوام و مقاومت خمشی نمونه های بتن فوق توانمند نسبت به عمل آوری استاندارد می گذارد و با توجه به اینکه عمل آوری تسریع شده 60° انرژی کمتری نسبت به تسریع شده 90° درجه دارد، دمایی مناسب برای عمل آوری تسریع شده می باشد.

- در میان پوزولان های بررسی شده دوده سیلیسی تاثیر بسیار چشمگیری بر دوام سازه های بتنی دارد به نحوی که تحت آزمایش انتشار تسریع شده یون کلرید میزان نفوذ در سن ۲۸ روز تحت عمل آوری استاندارد ۷۸ درصد و تحت عمل آوری تسریع شده 90° به میزان ۹۳ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش می یابد و نمونه های ساخته شده حاوی این ماده دارای ساختاری بسیار

۳-۶- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش های فوق مشخص گردید دوده سیلیسی بهترین عملکرد را دارا می باشد، در حالی که استفاده از باطله زغال سنگ تاثیر مخرب زیادی بر خصوصیات این بتن می گذارد. بدین منظور تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه های حاوی دوده سیلیسی و باطله زغال سنگ تحت عمل آوری استاندارد و تسریع شده مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل شماره ۲۵-A و B مشخص می شود، باطله زغال سنگ تاثیر مثبتی بر تراکم ریزساختار نداشته است به نحوی که نمایی از کریستال های پرتلندیت نیز مشاهده می گردد همچنین در دمای 90° درجه سانتیگراد ناحیه انتقالی بین خمیر سیمان و سنگدانه به حدی ضعیف بوده که سبب جدا شدن سنگدانه از درون خمیر سیمان شده است.

شکل شماره ۲۵-C و D تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی از طرح حاوی دوده سیلیسی با باطله زغال سنگ مشخص می گردد دوده سیلیسی تاثیرات چشمگیری بر تراکم ریزساختار داشته است و اثری از کریستال های پرتلندیت و اترینگایت مشاهده نمی شود همچنین مشخص می گردد استفاده از عمل آوری تسریع شده 90° شکل ۲۵-D ساختار بسیار متراکم تری نسبت به نمونه عمل آوری شده تحت شرایط استاندارد شکل ۲۵-C دارد.



شکل ۲۵: تصاویر میکروسکوپ الکترونی از (A) طرح حاوی باطله زغال سنگ تحت عمل آوری استاندارد. (B) طرح حاوی باطله زغال سنگ تحت عمل آوری تسریع شده 90° . (C) طرح حاوی دوده سیلیسی تحت عمل آوری استاندارد. (D) طرح حاوی دوده سیلیسی تحت عمل آوری تسریع شده 90°

Fig. 25. Scanning electron microscopy images of A) Coal waste mixture under standard curing. B) Coal waste mixture under thermal curing at 90° . C) Silica fume mixture under standard curing. D) Silica fume mixture under thermal curing at 90°

temperature curing, *Construction and Building Materials*, 100 (2015) 225-233.

- [10] P. Richard, M. Cheyrezy, Reactive Powder Concrete with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, Metha, PK (edition) *Concrete Technology Past Present and Future*, in, SP.
- [11] H. Vikan, H. Justnes, Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone, *Cement and Concrete Research*, 37(11) (2007) 1512-1517.
- [12] J. Khatib, E. Negim, H. Sohl, N. Chileshe, Glass powder utilisation in concrete production, *European Journal of Applied Sciences*, 4(4) (2012) 173-176.
- [13] F. Pigeonneau, S. Muller, The impact of iron content in oxidation front in soda-lime silicate glasses: An experimental and comparative study, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 380 (2013) 86-94.
- [14] R. Pignatelli, C. Comi, P.J. Monteiro, A coupled mechanical and chemical damage model for concrete affected by alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 53 (2013) 196-210.
- [15] C. Shi, K. Zheng, A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2) (2007) 234-247.
- [16] T. Ichikawa, Alkali-silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect, *Cement and Concrete Research*, 39(8) (2009) 716-726.
- [17] E. Grabowski, J. Gillott, Effect of replacement of silica flour with silica fume on engineering properties of oilwell cements at normal and elevated temperatures and pressures, *Cement and Concrete Research*, 19(3) (1989) 333-344.
- [18] P. Lawrence, M. Cyr, E. Ringot, Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement and concrete research*, 35(6) (2005) 1092-1105.
- [19] Y. Zhang, J. Nakano, L. Liu, X. Wang, Z. Zhang, Co-combustion and emission characteristics of coal gangue and low-quality coal, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 120(3) (2015) 1883-1892.
- [20] M. Frías, M.S. De Rojas, R. García, A.J. Valdés, C. Medina, Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement, *Cement and Concrete Composites*, 34(5) (2012) 678-683.
- [21] S. Hesami, A. Modarres, M. Soltaninejad, H. Madani, Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement, *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 625-636.
- [22] F. De Larrard, T. Sedran, Mixture-proportioning of high-

مترکم و منسجم بوده است. سایر مواد مکمل سیمانی اثر چندانی بر بهبود نفوذ یون کلرید نداشته‌اند.

- با توجه به نتایج آزمایش خاصیت پوزولانی مشخص گردید که پودر شیشه ظاهراً نسبت به سایر مواد واکنش‌پذیری خوبی دارد که می‌تواند به دلیل تاثیر آن بر افزایش قلیائیت محیط باشد. ولی با توجه به عدم تاثیر آن در بهبود نفوذ یون کلرید، توصیه می‌شود عملکرد ترکیبی آن با سایر پوزولان‌ها به ویژه دوده سیلیسی مورد توجه قرار گیرد. همچنین با توجه به عملکرد بسیار مثبت دوده سیلیسی در آزمایش‌های انجام شده، استفاده از دوده سیلیسی در ساخت بتن فوق توانمند پیشنهاد می‌گردد. در میان پوزولان‌های بررسی شده استفاده از باطله زغال سنگ توصیه نمی‌گردد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی اثر حالت سوخته آن بررسی گردد.

مراجع

- [1] P.R. Rangaraju, J. Olek, S. Diamond, An investigation into the influence of inter-aggregate spacing and the extent of the ITZ on properties of Portland cement concretes, *Cement and Concrete Research*, 40(11) (2010) 1601-1608.
- [2] W.A. Moura, J.P. Gonçalves, M.B.L. Lima, Copper slag waste as a supplementary cementing material to concrete, *Journal of Materials Science*, 42(7) (2007) 2226.
- [3] K.L. Scrivener, K.M. Nemati, The percolation of pore space in the cement paste/aggregate interfacial zone of concrete, *Cement and concrete research*, 26(1) (1996) 35-40.
- [4] X.H. Wang, S. Jacobsen, S.F. Lee, J.Y. He, Z.L. Zhang, Effect of silica fume, steel fiber and ITZ on the strength and fracture behavior of mortar, *Materials and structures*, 43(1-2) (2010) 125.
- [5] P.K. Mehta, *Concrete. Structure, properties and materials*, (1986).
- [6] Z. Wu, C. Shi, K. Khayat, Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC), *Cement and Concrete Composites*, 71 (2016) 97-109.
- [7] A. Modarres, S. Hesami, M. Soltaninejad, H. Madani, Application of coal waste in sustainable roller compacted concrete pavement-environmental and technical assessment, *International Journal of Pavement Engineering*, 19(8) (2018) 748-761.
- [8] P. Barnes, J. Bensted, *Structure and performance of cements*, CRC Press, 2014.
- [9] Z. Li, H.K. Venkata, P.R. Rangaraju, Influence of silica flour-silica fume combination on the properties of high performance cementitious mixtures at ambient

- [32] A. Tafrroui, G. Escadeillas, S. Lebaili, T. Vidal, Metakaolin in the formulation of UHPC, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 669-674.
- [33] H. Yazıcı, M.Y. Yardımcı, S. Aydın, A.Ş. Karabulut, Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and building materials*, 23(3) (2009) 1223-1231.
- [34] W. Li, Z. Huang, F. Cao, Z. Sun, S.P. Shah, Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix, *Construction and Building Materials*, 95 (2015) 366-374.
- [35] V. Elfmarkova, P. Spiesz, H. Brouwers, Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars, *Cement and concrete Research*, 78 (2015) 190-199.
- [36] S. Teng, T.Y.D. Lim, B.S. Divsholi, Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine ground granulated blast-furnace slag, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 875-881.
- [37] X. Shi, N. Xie, K. Fortune, J. Gong, Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview, *Construction and Building Materials*, 30 (2012) 125-138.
- [38] M.-H. Zhang, A. Bilodeau, V.M. Malhotra, K.S. Kim, J.-C. Kim, Concrete incorporating supplementary cementing materials: effect of curing on compressive strength and resistance to chloride-ion penetration, *Materials Journal*, 96(2) (1999) 181-189.
- performance concrete, *Cement and concrete research*, 32(11) (2002) 1699-1704.
- [23] P. Rossi, Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPRFC): an overview, in: *Fifth RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, 2000, pp. 87-100.
- [24] R. Yu, P. Spiesz, H. Brouwers, Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC), *Cement and concrete research*, 56 (2014) 29-39.
- [25] A. Standard, C192 "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," *Annual Book of ASTM Standards*, 4 (2004).
- [26] M.d. Luxán, F. Madruga, J. Saavedra, Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement, *Cement and concrete research*, 19(1) (1989) 63-68.
- [27] J. Paya, M. Borrachero, J. Monzo, E. Peris-Mora, F. Amahjour, Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity, *Cement and Concrete Research*, 31(1) (2001) 41-49.
- [28] B.S. Institution, *Testing Concrete: Method for Determination of Compressive Strength Using Portions of Beams Broken in Flexure (equivalent Cube Method)*, British Standards Institution, 1983.
- [29] BSI, *Methods of testing cement. Determination of strength*, (2005).
- [30] N. Build, 492, Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest method, (1999).
- [31] H.A. Toutanji, Z. Bayasi, Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete, *Cement and Concrete research*, 29(4) (1999) 497-501.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Pourjhan Shahi, H. Madani, An investigation on the pozzolanic reactivity of different materials and their effects on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 707-724.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12909.5291



