

بررسی آزمایشگاهی مشخصات مهندسی بتن حاوی پوزولان معدنی محلی

براساس آزمون XRD و SEM

مجتبی رنگرزبان

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

رحمت مدن دوست

استاد، استاد مدعو گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

استاد، هیئت علمی گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

رضا محجوب*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

مهدی رفتاری

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد خرم‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، خرم‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

r_mahjoob@yahoo.com

چکیده

گرمایش کره زمین و تاثیرات ناشی از آن در محیط زیست، از بحرانهای پیش روی انسان است. یافتن راهی جهت کاهش عوامل تشدید کننده این گرمایش، در مدیریت و کنترل این بحران تاثیرگذار می‌باشد. از مهم‌ترین عوامل افزایش درجه حرارت اتمسفر، گازهای گلخانه‌ای هستند. کارخانجات تولید سیمان با انتشار مقادیر عمده CO₂ نقش ویژه‌ای در افزودن این گاز در جو دارند. یافتن راهی جهت کاهش مصرف سیمان، می‌تواند گامی موثر در کنترل افزایش سالیانه دمای کره زمین باشد. در این مطالعه بمنظور یافتن طرح بهینه جایگزینی پوزولان معدنی محلی با بخشی از سیمان، دو طرح اختلاط با چهار گونه ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی جایگزین بخشی از سیمان بتن گردید و آزمونهای مقاومت فشاری و کیفیت بتن در آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. عناصر تشکیل دهنده بتن و تاثیر افزودن پوزولان معدنی محلی، توسط آزمون XRD و همچنین ریخت شناسی و رفتار ریزساختاری بتن توسط آزمایش SEM بررسی شد. نتایج نشان داد که بهترین میزان جایگزینی این پوزولان به سیمان در بتن، معادل ۱۵ درصد وزنی سیمان است و باعث افزایش ۲۴ درصدی مقاومت فشاری نسبت به بتن سیمانی معمولی می‌شود. واکنش پوزولانی مطلوب باعث کاهش میزان Ca(OH)₂ و CaCO₃ در بتن شد. همچنین این پوزولان باعث کاهش منافذ، افزایش بهبود و یکپارچگی ناحیه انتقال سطحی (ITZ) در بتن در مقایسه با بتن سیمانی معمولی گردید. با توجه به اثرات این پوزولان در تقویت ساختار و کاهش مصرف سیمان در بتن، پوزولان معدنی محلی مورد مطالعه را می‌توان به عنوان ماده‌ی کاهنده سیمان با افزایش مقاومت در بتن و دوستدار محیط‌زیست معرفی کرد.

کلید واژگان: پوزولان معدنی محلی، بتن پوزولانی، آزمون مقاومت فشاری، تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)،

میکروسکوپ الکترونیک روبشی (SEM).

۱- مقدمه

دمای کره زمین در طول قرن گذشته به طور متوسط ۰/۶ درجه سانتیگراد افزایش یافته است و پیش بینی می‌شود که در قرن جاری بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتیگراد افزایش یابد. بسیاری از محققین علت افزایش دما در صد سال اخیر و شتاب آن در دو دهه اخیر را انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه‌ی فعالیت‌های انسانی می‌دانند [۳، ۴]. وجود بیش از مقدار متناسب برخی گازها در جو زمین مانند تله عمل می‌کنند، بدین صورت که انرژی را به دام انداخته و زمین را گرم می‌کنند. به عبارت دیگر در این فرآیند، گازهای گلخانه‌ای جذب می‌شوند به طوری که عملکرد آنها مانند سطح گلخانه شده و به جای انتقال بخشی از انرژی به خارج از جو، برعکس عمل می‌کنند و انرژی را به جو زمین بر می‌گردانند. به همین دلیل به آنها گازهای گلخانه‌ای می‌گویند. اثر گلخانه‌ای مفید است زیرا مقداری از انرژی تابشی خورشید را به دام می‌اندازد و دمای سطح زمین را برای زندگی تنظیم می‌کند. بدون اتمسفر و اثر گلخانه‌ای، میانگین دمای زمین صفر درجه فارنهایت (حدود منفی ۱۸ درجه سانتیگراد) خواهد بود. با این حال، مقدار بیش از حد گازهای گلخانه‌ای می‌تواند باعث شود دما از کنترل خارج شده و عواقب ناخوشایندی به همراه داشته باشد. در ۱۵۰ سال گذشته، تقریباً تمام عواقب ناخوشایند افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو، ناشی از فعالیت‌های انسانی بوده است [۵]. گازهای گلخانه‌ای معمولی در اتمسفر عبارتند از بخار آب، کلروفلوروکربن‌ها (CFC)، هیدروفلوروکربن‌ها (HFCs)، دی‌اکسید کربن (CO₂)، متان (CH₄)، اکسیدهای نیتروژن (N₂O) و ازن (O₃). با این حال، تحقیقات نشان داده است که CO₂، SO₂، CH₄ و N₂O چهار گاز گلخانه‌ای اصلی در جو هستند. بر اساس مطالعات انجام شده، بخار آب موجود در هوا، طبق زیست‌بوم مرتبط، بیشترین گاز گلخانه‌ای است که به طور طبیعی وجود دارد، اما CO₂ بیشترین گاز گلخانه‌ای است که توسط انسان منتشر می‌شود [۶-۸].

شواهد علمی بر این واقعیت استوار است که گرم شدن کره زمین به دلیل افزایش CO₂ اتمسفر است. علاوه بر این، افزایش غلظت CO₂ به دلیل فعالیت‌های انسانی است. به جرات می‌توان گفت که انجمن‌های علمی و سازمان‌های تحقیقاتی در مورد تغییرات آب و هوایی اذعان کرده اند که سطح دی‌اکسید کربن از ۲۸۰ ppm^{۱۴} قبل از انقلاب صنعتی به ۴۱۵ ppm در حال حاضر افزایش یافته است.

فرآیند تولید سیمان به برق یا سوخت نیاز دارد. مرحله پردازش و پیمایش به انرژی زیادی نیاز دارد و آلاینده‌های زیادی را منتشر می‌کند. یک کوره با پیش گرم کردن حدود ۵ گیگاژول انرژی به ازای

هر تن مواد اولیه تولید سیمان، مصرف می‌کند. از طرفی اگر کوره با مصرف سوخت (پیش گرمایش) گرم شود، این میزان به ۳،۳ گیگاژول در هر تن مواد اولیه تولید سیمان، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر می‌توان گفت که تولید هر تن مواد اولیه تولید سیمان به ۵،۶۱ کیلووات ساعت برق نیاز دارد. میزان تولید CO₂ در هر تن سیمان به کلینکر سیمان بستگی دارد. این نسبت معمولاً از ۰،۵ تا ۰،۹۵ متغیر است. برای فرآیند انتشار CO₂ ناشی از تولید سیمان (فرآیند تولید کلینکر) برای اجرای فرآیند تکلیس یا کشته سازی (کلسینه کردن) مواد در هر تن تولید کلینکر ۰/۱۳۶ مگاتن کربن تولید می‌شود [۹].

یکی از راههای کاهش مصرف سیمان در بتن، افزودن پرکننده‌های سیمانی مانند پوزولان‌های طبیعی [۱۱] یا افزودن بقایای پرسلان [۱۲] است. همچنین پرکننده‌های غیر سیمانی مانند پودرهای آهکی [۱۳] یا جایگزینی جزئی ضایعات کشاورزی با خاصیت سیمانی (SCM) [۱۴]، خاکستر پوسته برنج (RHA) [۱۵]، خاکستر خاک اره یا خاکستر چوب (SDA) [۱۶]، خاکستر روغن نخل (POFA) [۱۷] پرکننده‌های دیگری هستند که می‌توانند جایگزین بخشی از سیمان در بتن شوند. نتایج مطالعات رنجبر و مدندوست در خصوص افزودن ژئولیت طبیعی^{۱۵} (NZ) به مخلوط بتن، افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی را به همراه داشت [۱۸]. نی و همکاران همچنین بیان داشتند که استفاده از خاکستر بادی^{۱۶} (FA) به طور قابل توجهی مقاومت بتن در برابر حمله سولفات را بدون کاهش مقاومت بهبود بخشیده است [۱۹]. گوکچه و همکاران بیان کردند که سیلیکا فوم^{۱۷} (SF) توانایی پرکردن ذرات بین سیمان پرتلند معمولی را دارد و این کار را بهتر از مواد ریزدانه در بتن انجام می‌دهد. SF آب کمتری مصرف می‌کند و استحکام بهتری دارد، بنابراین جایگزین مناسبی برای بخشی از سیمان در بتن می‌تواند باشند [۲۰]. سونگ و همکاران نیز مطالعات مشابهی بر روی که بتن‌های حاوی سرباره کوره‌های فولاد (Slag) - سرباره کوره آهن گدازی

(GGBFS)^{۱۸} - داشتند و دریافتند که در دراز مدت دوام بهتری داشته و همچنین مقاومت نسبت به خوردگی بالاتری از خود نشان می‌دهند [۲۱]. در بسیاری از موارد، افزودن جایگزین‌های سیمان موفقیت آمیز بوده است که

بسیار زیاد به واکنش شیمیایی ماده جایگزین سیمان بستگی دارد.

¹⁵ Natural Zeolite

¹⁶ Fly Ash

¹⁷ Silica Fume

¹⁸ Ground granulated blast-furnace slag

¹⁴ Part Per Million

حداقل ترکیب قابل قبول $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ طبق استاندارد ASTM C618 برای پوزولان‌های طبیعی ۷۰ درصد از کل است که پوزولان معدنی محلی آسیابر مقداری معادل ۸۵/۸۳ درصد را داراست و قابل قبول می‌باشد [۲۳].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان و پوزولان آسیابر،

سیلیکا فوم (SF)، خاکستر بادی (FA) و زئولیت نرم (SFZ)

ترکیبات شیمیایی (%)	سیمان	پوزولان معدنی محلی	SF[۲۴] سیلیکا فوم	FA[۲۵] خاکستر بادی	SFZ[۲۶] زئولیت فوق نرم
SiO ₂	۲۲/۹۲	۶۸/۹۸	۹۶/۸۵	۵۶/۷۳	۶۲/۸۷
Al ₂ O ₃	۷/۴۱	۱۴/۹۲	۱/۸۸	۱۹/۳۰	۱۳/۴۶
Fe ₂ O ₃	۳/۰۸	۱/۹۳	۰/۵	۶/۵۸	۱/۳۵
CaO	۵۷/۵۱	۳/۳۴	۰/۲۵	۵/۵۴	۲/۷۱
MgO	۴/۱۳	۲/۸۲	۰	۲/۹۸	۲/۳۸
SO ₃	۱/۷۷	۰/۵۷	۰	۱/۱۲	۰/۴۵
K ₂ O	۰/۶۲	۱/۰۷	۲/۴۱	۱/۸۴	۱/۳
Na ₂ O	۰/۳۱	۲/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۱	۲/۲
مشخصات فیزیکی					
وزن مخصوص	۳/۱۲	۲/۲۴	۲/۲۷	۲/۵۰	۲/۲۴
سطح ویژه (m ² /g)	۰/۳۷	۱/۲۳	۱۶/۴۶	۰/۳۹	۰/۳۱
اندازه دانه (μm)	۹/۳۴	۳/۳۰	۰/۱۴	۸/۷۲	۳/۵۵

با توجه به توانایی پوزولان در جایگزینی بخشی از سیمان در بتن، پوزولان معدنی محلی جدید شناسایی و خواص مهندسی آن مورد مطالعه قرار گرفت. پوزولان طبیعی مورد استفاده در آزمایش از ایران، دامنه‌های کوهستان آسیابر در استان گیلان، برداشت شده است. این پوزولان خاکستر آتشفشانی ریزدانه بوده و پُرکننده و چسباننده مناسبی برای جایگزینی بخشی از سیمان خواهد بود. برای تولید بتن دوستدار طبیعت با هدف کاهش انتشار CO₂ و همچنین با کاهش مصرف سیمان در بتن و جایگزینی بخشی از سیمان با ماده معدنی با خواص سیمانی، پوزولان طبیعی آسیابر گزینه مناسبی است. سختی آن کم است و به راحتی می‌توان آن را آسیاب کرد. برنامه‌های آزمایشگاهی این تحقیق با آزمایش بر روی دو نوع طرح اختلاط و چهار مقدار مختلف پوزولان آغاز شد. از چهار مقدار پوزولان به مقدار ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی به جای سیمان در بتن با دو طرح اختلاط بصورت آزمایشی استفاده شد. دو نمونه از بتن سیمانی معمولی^{۱۹} (PCC) ساخته و در مجموع از ۱۰ نمونه برای آزمایش استفاده شد. ابتدا مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت سپس کیفیت بتن طرح، با آزمایش اولتراسونیک ارزیابی شد. نمونه با مقاومت فشاری بالاتر شناسایی و به عنوان طرح اختلاط بهینه پذیرفته شد. سپس مطالعات پراش اشعه ایکس (XRD) جهت نوع و مقدار عناصر موجود در بتن و سپس تحلیل ریخت شناسی (مورفولوژی) ریزساختارها (نانو) و شناسایی ترکیبات شیمیایی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی (SEM) انجام شد.

۲- طرح آزمایش

۱-۲- مصالح

سیمان پرتلند معمولی که در این مطالعه استفاده شده، مطابق استاندارد BS EN197-1:2011 است؛ و دارای کلاس مقاومتی ۴۲.۵ نیوتن می‌باشد [۲۲]. پوزولان معدنی مورد آزمایش حاوی مقادیر قابل توجهی SiO₂ و Al₂O₃ است که می‌تواند هیدرات سیلیکات کلسیم و هیدرات آلومینات کلسیم را از طریق ترکیبی از هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراتاسیون سیمان تشکیل دهد. نباید فراموش کرد که استفاده بیش از حد از پوزولان آسیابر به جای بخشی از سیمان، مانند سایر پوزولان‌های طبیعی به مقاومت نهایی بتن آسیب می‌رساند و این جایگزینی باید بهینه باشد. جدول ۱ ترکیبات شیمیایی رایج سیمان پرتلند مورد استفاده و پوزولان طبیعی منطقه آسیابر را به همراه سه پوزولان پُر کاربرد دیگر فهرست می‌کند.

¹⁹ Plain Cement Concrete (PCC)

جدول ۲. طرح اختلاط

نام گروه	نام مخلوط	سیمان (Kg/m ³)	پوزولان معدنی محلی		آب (Kg/m ³)	فوق روان کننده (Kg/m ³)	W/B	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)
			(%)	(Kg)					
G1	PCC	۴۲۹,۶	-	-	۲۱۵	-	۰,۵	۷۲۸,۴	۵۸۲,۷
G1	G1APoz 0.5	۴۰۸,۱	۵	۲۱,۴۸	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۵۸۲,۷
G1	G1APoz 1.0	۳۸۶,۶	۱۰	۴۲,۹۶	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۵۸۲,۷
G1	G1APoz 1.5	۳۶۵,۲	۱۵	۶۴,۴۴	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۵۸۲,۷
G1	G1APoz 2.0	۳۴۳,۷	۲۰	۸۵,۹۲	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۵۸۲,۷
G2	PCC	۴۲۹,۶	-	-	۲۱۵	-	۰,۵	۷۲۸,۴	۷۲۸,۴
G2	G2APoz 0.5	۴۰۸,۱	۵	۲۱,۴۸	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۷۲۸,۴
G2	G2APoz 1.0	۳۸۶,۶	۱۰	۴۲,۹۶	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۷۲۸,۴
G2	G2APoz 1.5	۳۶۵,۲	۱۵	۶۴,۴۴	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۷۲۸,۴
G2	G2APoz 2.0	۳۴۳,۷	۲۰	۸۵,۹۲	۲۱۵	۴,۳	۰,۵	۷۲۸,۴	۷۲۸,۴

ترتیب ۹,۳۴ میکرومتر و ۳,۵۵ میکرومتر است. طبق گزارش آزمایشگاهی، اندازه پوزولان طبیعی ذرات، بهتر از سیمان پرتلند معمولی است. مقداری فوق روان کننده (کربوکسیلیک M۱۱۰) با چگالی ۱,۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب (در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد) برای افزایش جریان پذیری مخلوط و کمک به پراکندگی ذرات در هر مخلوط ملات اضافه می شود.

۲-۲- طرح و نسبت مخلوط

در مجموع ده مخلوط در دو گروه G1 و G2 با دو نوع طرح اختلاط و نسبت آب به سیمان ۰,۵ طراحی شد. در هر گروه، بتن سیمانی معمولی فقط توسط سیمان پرتلند به عنوان چسباننده ساخته شد. در مخلوط‌های باقی مانده، پوزولان آسیاب در چهار مقدار تعیین شده ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد بر اساس تحقیقات تجربی جایگزین سیمان در بتن شدند. طرح اختلاط در جدول ۲ خلاصه شده است.

در این طرح اختلاط برای اطمینان از اینکه ماتریس به درستی ایفای نقش کند، باید چگالی و توزیع مناسب ذرات کنترل شود. نباید فراموش کرد که ذرات کوچکتر در حین ساخت ماتریس نزدیک هم

در ساخت بتن از ماسه معمولی استفاده می شود که با توجه به تعریف مدول نرمی آن، ماسه مورد استفاده ریزدانه بوده و در محدوده (مدول ریزدانه ۲,۲ تا ۲,۶) خواهد بود [۲۷]. شن خرد شده با حداکثر اندازه اسمی ۱۳ میلی متر به عنوان سنگدانه درشت استفاده شد. طبق گزارشات آزمایشگاهی، شن و ماسه ۰/۲۷ درصد رطوبت و ۱/۰۲ درصد جذب آب دارند.

چگالی نسبی سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیاب طبیعی نیز مطابق با EN1097: قسمت ۳-۱۹۹۸ آزمایش شد که برای سیمان ۳,۱۲ و برای پوزولان طبیعی ۲,۲۴ بود [۲۸]. توزیع اندازه ذرات یک تابع ریاضی است که معمولاً جرم ذره‌ها را بر حسب اندازه آنها بیان می کند. پوزولان آسیاب یک پوزولان نرم است که می تواند به صورت فیزیکی حفره‌های بین دانه‌های سیمان را پر کند تا چگالی نسبی بالاتری برای بتن ایجاد کند. بر اساس نتایج اندازه گیری شده، سطح ویژه^{۲۰} سیمان پرتلند معمولی و پوزولان طبیعی آسیاب به ترتیب ۰,۳۵ و ۱,۲۳ متر مربع بر گرم است.

میانگین اندازه ذرات سیمان پرتلند معمولی و پوزولان‌های آسیاب به

²⁰ Specific surface

جدول ۳- مشخصات نمونه‌ها آزمایش

مرجع تست	تعداد روز عمل آوری	ابعاد (میلی‌متر)	شکل	نام آزمون	بخش
[۱]	۲۸	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعبی	مقاومت فشاری	۱,۳
[۲]	۲۸	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعبی	سرعت امواج اولتراسونیک	۲,۳
-	۲۸	پودر	-	تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس	۳,۳
-	۲۸	۸×۸×۴	-	میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)	۴,۳

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقاومت فشاری

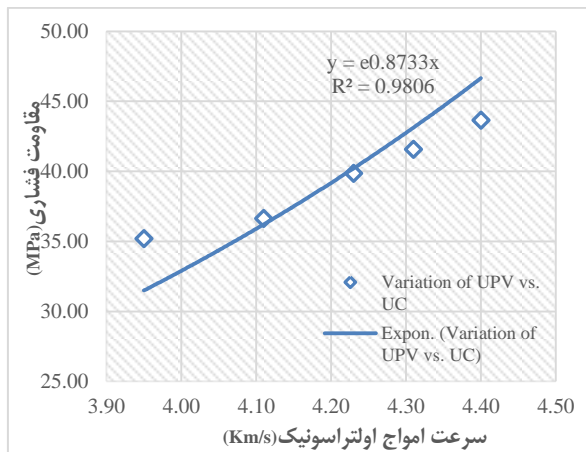
نتایج انجام تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها توسط نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، طرح اختلاط G2 در مجموع دارای مقاومت فشاری بالاتری بوده است. هر دو طرح اختلاط با نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد وزنی پوزولان جایگزین سیمان، نتایج موفق‌تری داشتند و مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه‌های دیگر نشان داده‌اند. مقاومت فشاری نمونه حاوی ۱۵ درصد وزنی پوزولان آسیاب جایگزین سیمان، در طرح اختلاط G2، افزایش مقاومت ۲۴ درصدی نسبت به نمونه سیمانی معمولی دارد. حسین و همکاران در مطالعه خاکستر بادی به نتایج مشابهی دست یافت [۳۰]. با توجه به خواص پوزولان آسیاب در جدول ۱، اندازه ذرات پوزولان آسیاب کوچکتر از اندازه ذرات سیمان است. بنابراین این راحت تر و بهتر از ذرات سیمان بین سنگدانه‌ها قرار می‌گیرند. با پرکردن فضای بین سنگدانه‌ها، آب موینگی را از بین سنگدانه‌ها خارج می‌کنند. به این ترتیب نمونه‌های منسجم بیشتری تولید می‌کنند و تخلخل را کاهش می‌دهند. کومار و همکاران نتایج مشابهی با پوزولانهای خاکستر بادی و سیلیکا فوم داشته‌اند [۳۱]. همچنین با آزاد شدن آب موینگی بین سنگدانه‌ها، این آب در عملیات هیدراتاسیون شرکت می‌کند. به این ترتیب می‌تواند از انقباض جلوگیری کرده و مقاومت فشاری بهتری به‌وجود آورد.

جمع می‌شوند (وجود حجم زیادتر مواد و تمرکز آن در یک نقطه) که شکستن قطعات را پس از عمل آوری را آسان تر می‌کند. این موضوع در مطالعات علوی نیا و همکاران تذکر داده شده است [۲۹]. ابتدا سنگدانه‌های ریز و درشت ۳۰ ثانیه با سرعت اختلاط معمولی همگن شدند. پس از آن نیمی از مقدار آب طرح اختلاط را به آن اضافه کردیم و به مدت ۱ دقیقه مخلوط کردن را ادامه دادیم. به مخلوط ۱ دقیقه استراحت دادیم تا سنگدانه‌ها، آب داخل دستگاه اختلاط بتن را تا حدودی جذب نمایند. سپس سیمان و پوزولان آسیاب را در مقدارهای از پیش تعریف شده مطابق جدول ۲ در حالی که قبلاً بصورت خشک و به مدت دو دقیقه با یکدیگر مخلوط کرده بودیم، به مخلوط داخل دستگاه طرح اختلاط بتن اضافه کرده و یک دقیقه دیگر آن را مخلوط می‌کنیم. آب باقی مانده را به‌مراه فوق روان کننده درحالی که مخلوط در دستگاه در حال اختلاط است، اضافه نموده و آن را یک دقیقه مخلوط می‌نماییم، به مخلوط دو دقیقه استراحت داده و مجدداً دو دقیقه دیگر اختلاط را ادامه می‌دهیم. این دو دقیقه برای پخش شدن کامل فوق روان کننده در مخلوط ضروری است.

۳-۲- روش آزمایش

برای هر ۵ آزمایش انجام شده، استانداردهای بین المللی استفاده شده، نام دستگاه، شکل، ابعاد و تعداد نمونه‌ها مطابق جدول ۳ انجام شد. آزمایش‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

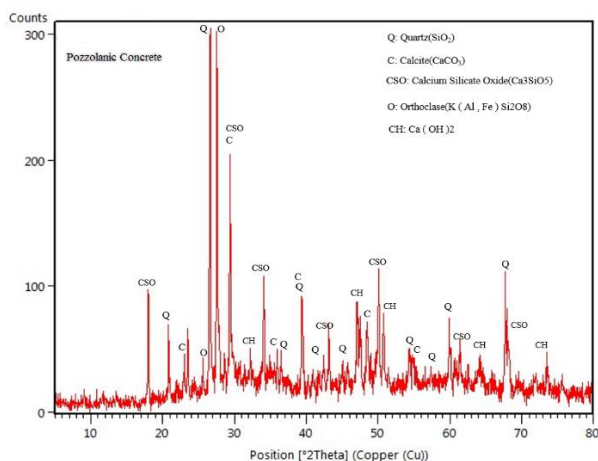
طبق طبقه بندی Whitehurst، کیفیت تمام بتن ها در محدوده خوب قرار داشت. بتن های ساخته شده با ۱۵ درصد وزنی پوزولان آسیاب جابجین سیمان، نزدیک به کیفیت عالی قرار گرفتند. با افزایش پوزولان آسیاب بیش از ۱۵ درصد وزنی کیفیت بتن از نظر آزمایش



شکل ۳- تغییر سرعت امواج اولتراسونیک در مقابل مقاومت فشاری

سرعت پالس اولتراسونیک کاهش یافته است.

مقاومت بتن را می توان با آزمایش غیر مخرب سرعت پالس اولتراسونیک و با استفاده از منحنی کالیبراسیون بررسی کرد [۳۴]. اثر پوزولان آسیاب در رابطه با مقاومت فشاری از طریق یک نمودار مقایسه ای بررسی شده و در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۵]. یافته های این مطالعه نشان داد که آزمایش های اولتراسونیک برای نمونه های مورد مطالعه، پیش بینی درستی از مقاومت آنها داشت. همبستگی مطلوبی بین سرعت امواج اولتراسونیک و نتایج آزمون مقاومت فشاری وجود دارد. این موضوع را می توان از مقدار ضریب



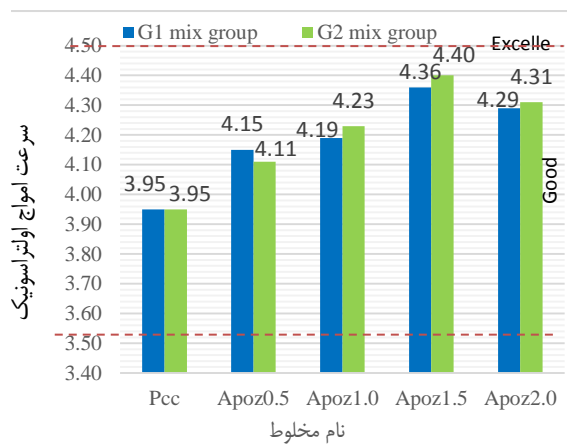
شکل ۴- بتن پوزولانی

تعیین R^2 در نمودار مشاهده کرد که 0.98 برآورد شده است. با بررسی و مقایسه دو تست سرعت امواج اولتراسونیک و تست مقاومت

ما و همکاران نتایج مشابهی از مطالعات منتشر نمودند [۳۲]. همچنین نباید فراموش کرد که پوزولان آسیاب که دارای سه برابر SiO_2 بیشتر در مقایسه با سیمان معمولی است، که این برتری، باعث افزایش خاصیت چسبندگی بین ذرات سنگدانه می شود. موارد در نتایج قابل مشاهده است.

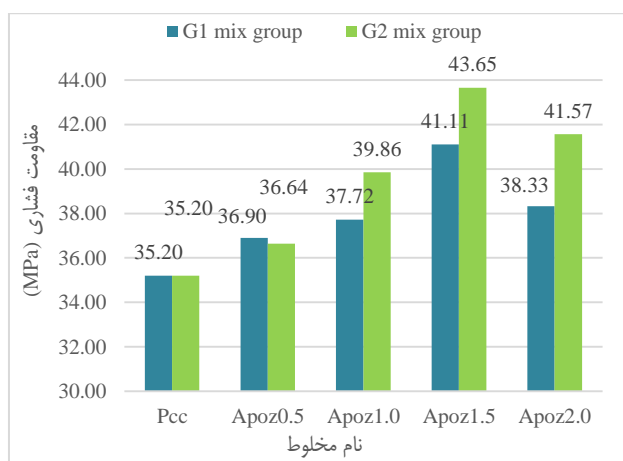
۲-۳- سرعت امواج اولتراسونیک

تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک با سن عمل آوری نمونه های بتن



شکل ۲- سرعت پالس اولتراسونیک

سیمانی معمولی در مقادیر مختلف ترکیب پوزولان آسیاب در شکل ۲ نشان داده شده است. از دستگاه PUNDIT با فرکانس ۵۴ کیلوهرتز برای آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک استفاده شد. کیفیت بتن توسط Whitehurst [۳۳] به این شرح پیشنهاد شده است: ۴٫۵ کیلوهرتز در ثانیه و بالاتر به عنوان عالی، ۳٫۵-۴٫۵ کیلوهرتز در ثانیه خوب، ۳-۳٫۵ کیلوهرتز بر ثانیه مشکوک، ۲-۳ کیلوهرتز بر ثانیه ضعیف،



شکل ۱- مقاومت فشاری (MPa) در ۲۸ روز

و ۲ کیلوهرتز بر ثانیه و کمتر بسیار ضعیف است.

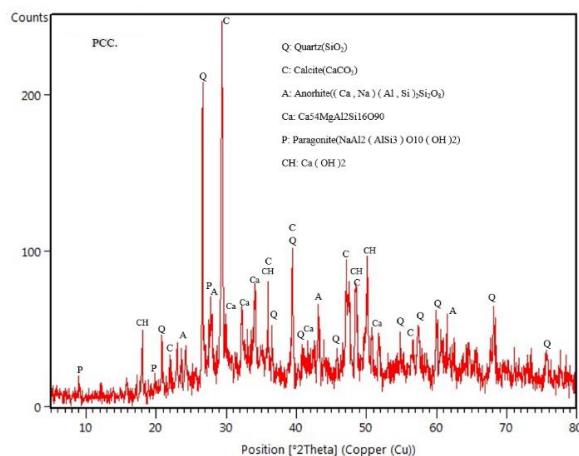
همانطور که در مقایسه با نمونه‌های بتنی با ۱۵ درصد وزنی پوزولان جایگزین سیمان مشاهده می‌شود، علاوه بر ارتقاء عالی SiO_2 که باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود، باعث کاهش CaCO_3 بتن و

فشاری می‌توان نتیجه گرفت که پوزولان آسیاب تاثیر مستقیم بر نتایج اولتراسونیک ندارد اما این پوزولان با کمک به افزایش مقاومت نمونه‌ها، کیفیت بهتری در تست امواج اولتراسونیک نشان می‌دهد.

۳-۳- تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)

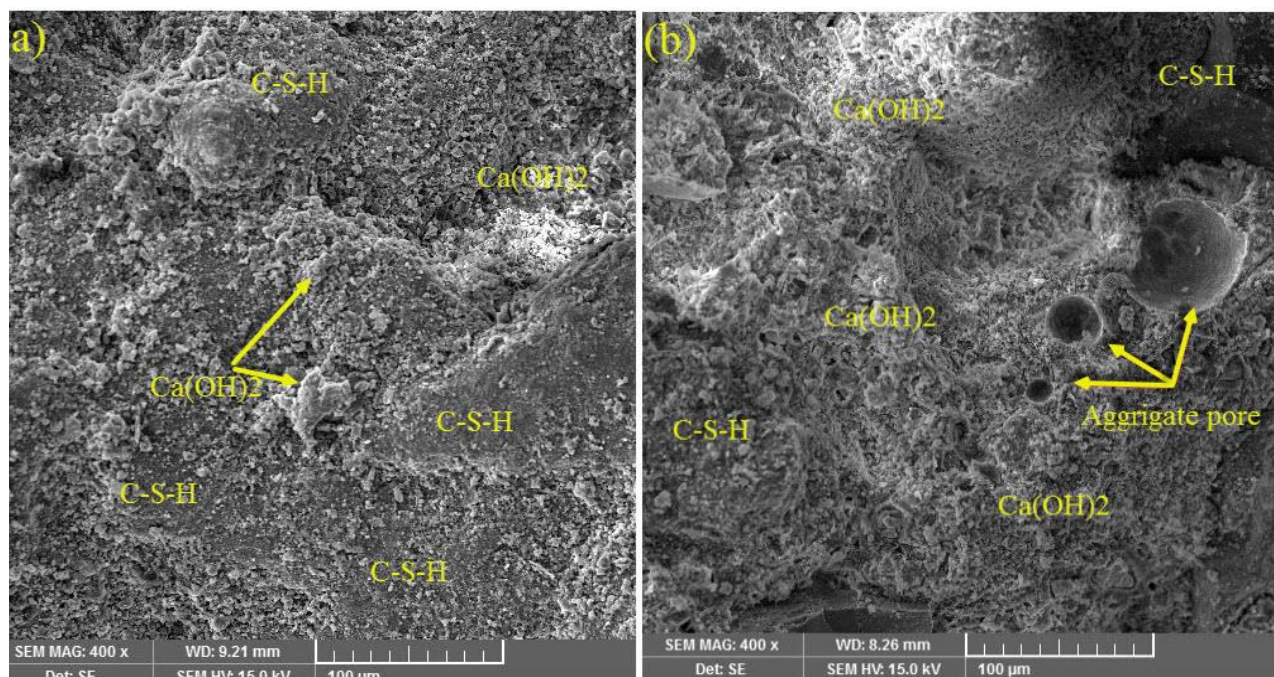
برای بررسی عناصر موجود در نمونه‌ها از آنالیز پراش اشعه ایکس که یک آزمایش غیر مخرب است، استفاده شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه Rigaku Ultima IV انجام شد. محدوده 2θ تجزیه و تحلیل شده در حالت پیوسته ۵-۸۵ درجه با اندازه گام 0.02° درجه بود. تمامی نمونه‌ها در اندازه و مقدار مورد نیاز در شرایط کاری ۴۰ کیلو ولت و ۳۰ میلی آمپر با تابش $\text{Cu } k\alpha$ تهیه و از پرکننده نیکل استفاده شد. برای تهیه تصویر قابل استفاده و کمی‌سازی نتایج از نرم افزار Profile Fit استفاده شده است.

به منظور بررسی تأثیر افزودن پوزولان و همچنین ویژگی‌ها و محتوای حجمی هر فاز، نمونه‌ها در سن ۲۸ روزگی با استفاده از XRD مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. قله‌های اصلی در شکل ۴ و ۵ فاز کریستالی هستند. فازهای اصلی مورد مطالعه عبارتند از SiO_2 ، پورتلندیت Ca(OH)_2 ، کلسیت CaCO_3 . در شکل ۴، نمونه بتن ساخته شده با ۱۵ درصد وزنی پوزولان جایگزین شده با سیمان، به ترتیب دارای SiO_2 ، CaCO_3 و Ca(OH)_2 با



شکل ۵- بتن سیمانی معمولی

Ca(OH)_2 نیز می‌شود که همگی تأثیر مثبتی بر مقاومت بتن دارند. همچنین مشاهده می‌شود که وجود پوزولان طبیعی باعث ایجاد واکنش پوزولانی این ماده با هیدروکسید کلسیم در بتن می‌شود. پوزولان با استفاده از این ماده میزان هیدروکسید کلسیم بتن را کاهش داده و در عوض میزان ژل سیلیکات کلسیم هیدراته C-S-H را افزایش



شکل ۶- بزرگنمایی SEM 400X، a: بتن پوزولانی b: بتن ساده

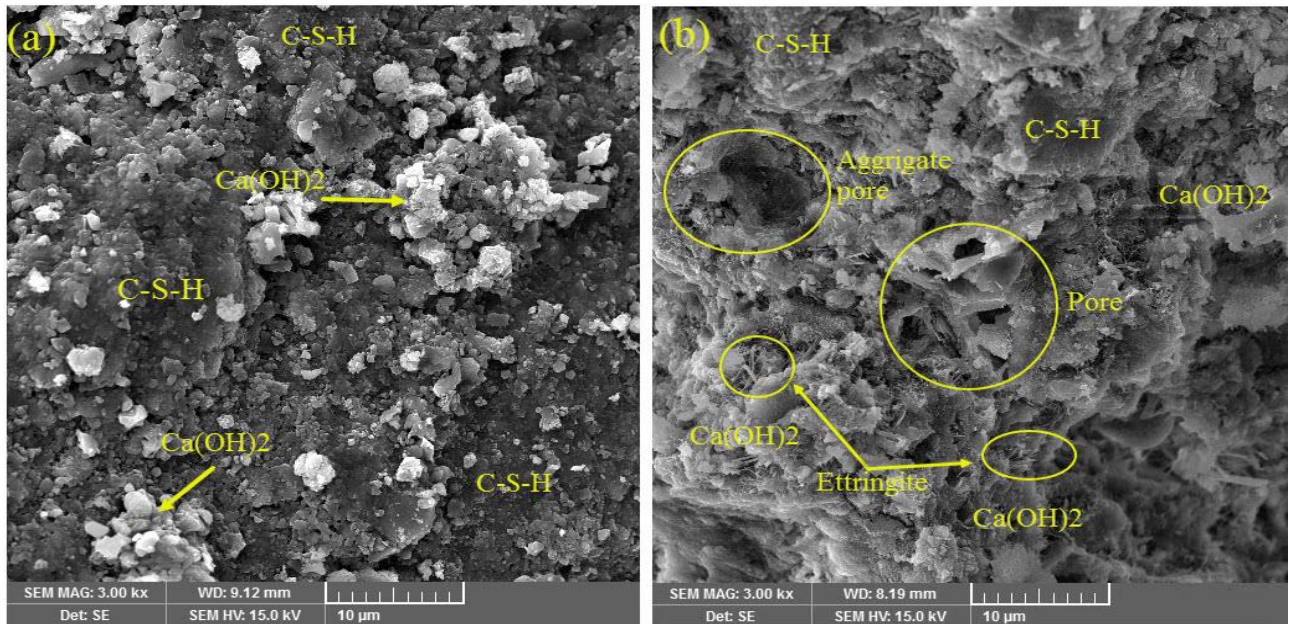
داده است که به انسجام و سختی بتن کمک می‌نماید.

۳-۴- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

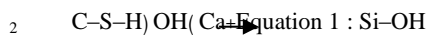
حداکثر مقادیر ۲۰۰، ۳۱۰ و ۱۰۰ واحد بود. در شکل ۵، مقادیر

عناصر مذکور در بتن سیمانی معمولی، به ترتیب ۱۸۰، ۲۵۰ و ۸۰ واحد بوده است.

شکل ۷- بزرگنمایی SEM 3.00kx، a: بتن پوزولانی، b: بتن ساده



ماده جدید به نام ژل C-S-H تولید می‌شود که بسیار منسجم و یکپارچه بوده و تخلخل کمی دارند.



همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در شکل a بتن پوزولانی، مقدار ناحیه C-S-H بیشتر از بتن سیمانی معمولی در شکل b می‌باشد.

شکل ۷ بخش a، مشاهده می‌شود تشکیل ژل C-S-H به طور قابل توجهی پورتلندیت را در بتن پوزولانی کاهش داد. سطح مخصوص به دلیل ریز بودن ذرات پوزولان برای این واکنش مناسب تر است. شکل ۷ بخش b مقدار زیادی پورتلندیت را نشان می‌دهد که اثر نامطلوبی بر مقاومت بتن دارد. همچنین مشاهده می‌شود که به دلیل سایز بزرگتر ذرات سیمان، واکنش پذیری ضعیف و کندتری با سایر ذرات دارد و این امر باعث ایجاد منافذ و حفره در بتن سیمانی معمولی می‌شود.

پوزولان معدنی با ایجاد واکنش پوزولانی با پورتلندیت، از افزایش اندازه پورتلندیت در نزدیکی سنگدانه‌ها جلوگیری می‌کند. این واکنش، یکپارچگی بهتری نسبت به بتن سیمانی معمولی در ماتریس و منطقه سنگدانه معروف به منطقه انتقال سطحی (ITZ) ارائه می‌دهد. همانطور که در شکل‌های ۶ بخش b و ۷ بخش b مشاهده می‌شود، به دلیل وجود لایه آب مویرگی در اطراف سنگدانه، ذرات پورتلندیت در اطراف سنگدانه رشد کرده اند. حجم و اندازه زیاد پورتلندیت در اطراف سنگدانه‌ها باعث می‌شود که در هنگام اعمال بار فشاری سنگدانه از ماتریس جدا شود. افزودن پوزولان‌های معدنی به مخلوط بتن در اثر

بررسی ریزساختارهای بین ماتریس‌های سیمانی و سنگدانه و همچنین اثر پوزولان‌ها بر ساختار خمیر سیمان، تأثیر آنها در حذف حفره‌ها و نتایج فعالیت‌های شیمیایی انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پس از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌های بتن سیمانی معمولی و نمونه‌های حاوی پوزولان آسیابر، ابتدا نمونه‌ها به قطعات کوچک حدود ۸×۸×۴ میلی‌متر تبدیل و سپس نمونه‌ها با طلا-پالادیوم پوشش داده شدند. مطالعات (SEM) توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی HRSEM: TESCAN MIRA3 انجام شده است.

تقریباً در تمام میکروگراف‌های SEM، ژل‌های کلسیم سیلیس هیدرات (C-S-H) معمولاً به رنگ روشن‌تر به نظر می‌رسند، $\text{Ca}(\text{OH})_2$ دارای رنگ روشن نزدیک به سفید و معمولاً شش ضلعی یا مثلثی است. در این تصاویر، رنگ سنگدانه‌ها تیره تر به نظر می‌رسند، ذرات شن نیز به صورت نیمه تیره می‌باشند.

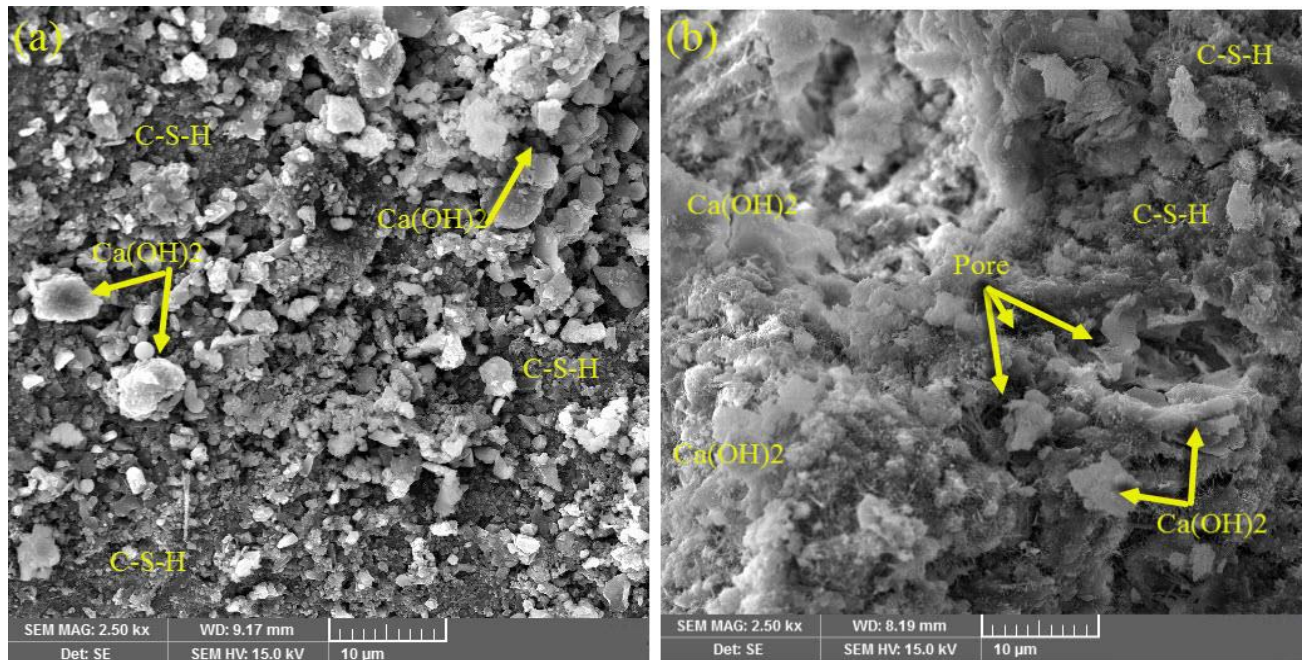
ذرات بسیار کوچک (میکرو متر) دارای سطح ویژه بالاتر و اتم‌های بیشتری در سطح هستند. به دلیل عدم پیوند اتم‌ها در سطح ذرات بسیار کوچک (در محدوده میکرومتری) با سایر ذرات اتمی، پیوندها، نیروها و ظرفیت باقیمانده در سطح ذرات وجود دارد که مستعد پیوند با ذرات دیگر هستند. همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، اندازه ذرات پوزولان معدنی مورد مطالعه تقریباً سه برابر کوچکتر از اندازه ذرات سیمان است. بنابراین همانطور که گفته شد می‌تواند به سرعت به $\text{Ca}(\text{OH})_2$ متصل شود. طبق رابطه ۱، با اتصال آن دو،

C3S موثر در سختی اولیه بتن در ۲۸ روز اول عمل آوری و اثر C2S در سختی پس از ۲۸ روز اول عمل آوری و کاهش حرارت هیدراتاسیون بتن می‌باشد، ترکیب این دو با آب، مطابق با معادله ۴، ژل سیلیکات کلسیم هیدرات کلسیم با پورتلندیت تولید می‌کند. با شروع واکنش پوزولانی، سیلیکات موجود در پوزولان معدنی با پورتلندیت تشکیل شده در رابطه ۴ واکنش داده و با مصرف این ماده مضر برای بتن، مطابق با معادله ۵، ژل CSH تولید می‌شود که باعث

واکنش با پرتلندیت، علاوه بر حذف حفره ها و ایجاد ژل C-S-H، منطقه انتقال سطحی قوی تری (ITZ) را ایجاد کرده است. لی و همکاران و حوسن و همکاران به

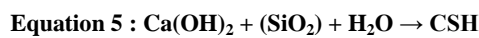
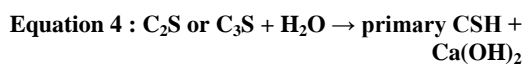
نتایج مشابهی دست یافته اند [۳۶، ۳۷]. این موضوع در نتایج مقاومت فشاری نیز قابل توجه است.

قسمتهایی از سیمان هیدراته حاوی کلسیم و هیدروکسید آلومینا است که آسیب پذیری بتن و سیمان را در برابر حملات یون سولفات

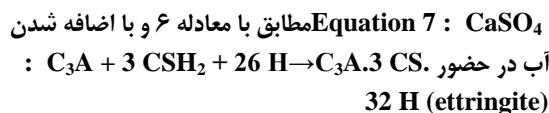
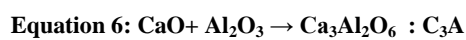


شکل ۸ بزرگنمایی SEM 2.5kx، a: بتن پوزولانی، b: بتن ساده

جامد شدن بتن می‌شود ژو و همکاران نتایج تحقیقاتی مشابهی دارند [۳۸].



همچنین پوزولان معدنی آسیابدار دارای مقدار نسبتاً کمی Al_2O_3 است که منجر به تولید کمتر اترینگیت در بتن های ساخته شده با این پوزولان می‌شود. معادلات ۶ و ۷ به وضوح توضیح می‌دهند. تقریباً این پوزولان معدنی دارای مقدار کمی Na_2O و K_2O است، بنابراین قلیائیت بتن ساخته شده با پوزولان معدنی کمتر بوده و احتمال واکنش، انبساط و تخریب بتن نیز کمتر خواهد بود. گوپتا و همکاران به نتایج مشابهی دست یافت [۳۹].



افزایش می‌دهد. در واقع حملات مخرب سولفات مربوط به اترینگیت است. فشار اعمال شده توسط بلورهای در حال رشد اترینگیت و تورم ناشی از جذب آب در محیط قلیایی توسط اترینگیت عواملی هستند که می‌توانند به بتن آسیب وارد کنند. نقش موثر پوزولان معدنی همانطور که گفته شد کاهش پرتلندیت و کاهش نفوذپذیری و در نتیجه کاهش تولید اترینگیت می‌باشد. شکل های ۷ بخش b و ۷ بخش a کاهش میزان اترینگیت در بتن پوزولانی را نسبت به بتن سیمانی معمولی نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول ۱ اشاره شد، پوزولان معدنی آسیابدار بعد از دوده سیلیس بیشترین میزان سیلیس را دارد. این مقدار سیلیس باعث ایجاد ماده ای با چسبندگی بالا می‌شود. این مقدار SiO_2 واکنش های شیمیایی با CaO را انجام می‌دهد و طبق رابطه ۲ و ۳ C_3S و C_2S تولید می‌کند:



مخلوط شده و ساختار و ساختار مواد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به شرح زیر است:

- آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های ساخته شده نشان داد که ۱۵ درصد وزنی پوزولان به جای سیمان در بتن بهترین نتیجه را می‌دهد. این جایگزینی مقاومت فشاری را حدود ۲۴ درصد نسبت به نمونه سیمانی معمولی افزایش داد. این مقدار پوزولان حالت بهینه بود و بیشتر از آن مقاومت فشاری را کاهش داد. آزمایش سرعت موج اولتراسونیک نیز بهترین کیفیت نمونه را در مقایسه با بقیه تایید کرد.
- با بررسی نمونه‌ها در آزمایش XRD مشخص شد که با افزودن ۱۵ درصد وزنی پوزولان به جای سیمان در بتن، میزان پرتلندیت و کلسیت کاهش و میزان سیلیکات افزایش یافت که همگی اثرات مطلوبی برای بتن بود.
- واکنش تدریجی پوزولان معدنی با هیدروکسید کلسیم منجر به محتوای ژل مستحکم (C-S-H) و بسته شدن حفره‌ها و افزایش انسجام شد.
- واکنش پوزولان با پرتلندیت و تولید C-S-H، ریزساختار بتن را بهبود بخشید و با کاهش منافذ و یکپارچگی بیشتر بتن، مقاومت فشاری را افزایش داد.
- پوزولان معدنی با ایجاد واکنش مطلوب پوزولانی با پرتلندیت، از افزایش اندازه مقدار پرتلندیت در نزدیکی سنگدانه‌ها جلوگیری کرد. به این ترتیب ناحیه انتقال مرزی (ITZ) را تقویت کرد و پیوند بین کل و ماتریس را بهبود بخشید.

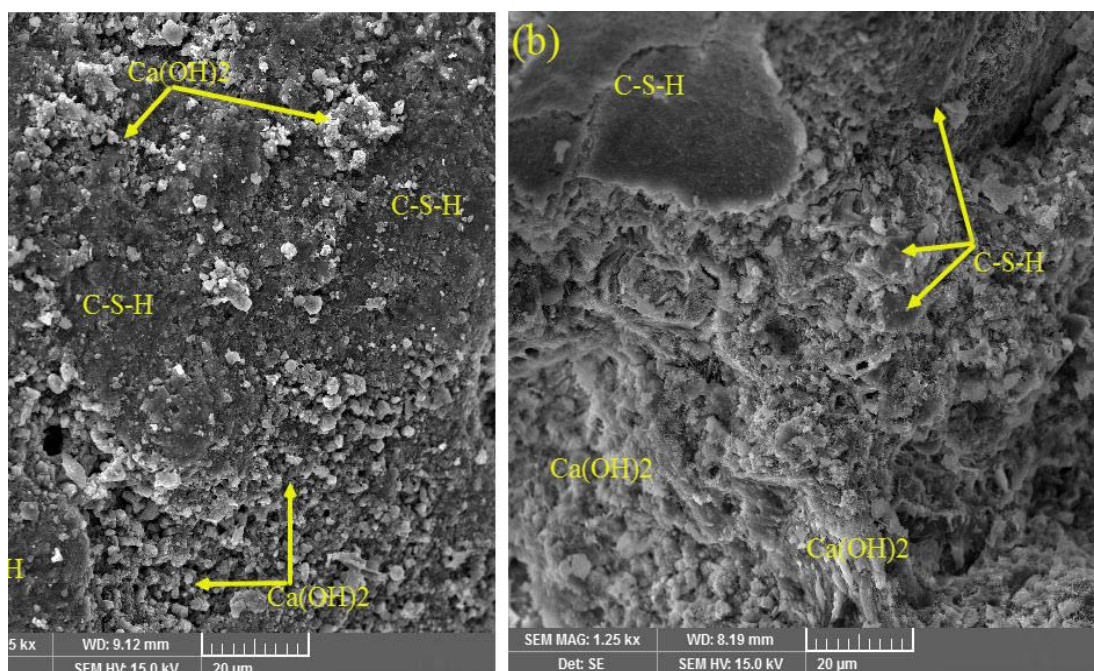
دوره ۱۹، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، ساختار محصولات هیدراتاسیون پوزولان و هیدروکسید کلسیم (C-S-H) در بتن حاوی پوزولان معدنی بسیار متراکم تر و فشرده تر است. با حضور پوزولان‌های معدنی در طرح‌های اختلاط، کریستال‌های سوزنی شکل اترینگیت و بلورهای بزرگ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ناپدید شده و با ژل متراکم C-S-H جایگزین شده اند. ژل C-S-H فضای خالی ناحیه گذار بین سنگدانه و ماتریس سیمان را پر می‌کند. این یافته با نظرات لی و چینگ و ژانگ مطابقت دارد [۴۰-۴۲].

می‌توان پیش بینی کرد که افزودن پوزولان‌های معدنی در کاهش نفوذپذیری موثر بوده و با افزایش مقدار آن در طرح اختلاط، کاهش بیشتر نفوذپذیری مشاهده می‌شود. این بهبود را می‌توان به فعالیت پوزولانی بالا و تولید ژل، C-S-H و خواص پرکننده منافذ بتن و حذف حفره‌های کوچک در ساختار ژل سیلیکات نسبت داد. با بررسی شکل ۹ بخش a و بخش b مشاهده می‌شود که وجود پوزولان معدنی باعث واکنش (واکنش پوزولانیک) این ماده با هیدروکسید کلسیم در بتن می‌شود و با مصرف هیدروکسید کلسیم میزان این ماده در بتن کاهش می‌یابد. در عوض، مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته را در ژل C-S-H افزایش می‌دهد که منجر به ساختار بتن همگن تر می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق پوزولان‌های معدنی محلی آسیاب با مقدارهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی با دو طرح اختلاط و آزمایش کیفیت بتن



شکل ۹. بزرگنمایی SEM 1.25kx، a: بتن پوزولانی b: بتن ساده

14- Thomas B.S. YJ, Hung Mo K., Abdalla J., Hawileh R., Ariyachandra E. Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*. 2021;40.

15- Christopher F. BA, Ahmed S. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*. 2017;6(2):675-92.

16- Hamid Z. RS. An experimental study on behavior of wood ash in concrete as partial replacement of cement. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46:3426-9.

17- Nwankwo Ch BG, E.E.Davies I, Michaels T. High volume Portland cement replacement: A review. *Construction and Building Materials*. 2020;260.

18- Ranjbar M.K. MR, Mousavi Y., Yosefi S. Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete. *Construction and Building Materials*. 2013;47:806-13.

19- Nie CZ. Q. ZC, Shu X., He Q., Huang B. Chemical, Mechanical, and Durability Properties of Concrete with Local Mineral Admixtures under Sulfate Environment in Northwest China. *materials*. 2021;14(5):914.

20- Gökçe H. HD, Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2019;194:1-11.

21- Song H. SV. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of Hazardous Materials*. 2006;138(2):226-33.

22- BS. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. *Cement Part 1: BSI Standards Publication; EN 197-1:2011*.

23- ASTM. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. C618 2014.

24- Venkat G.N. CK, Ahmed E., NagendraBabu V. Comparative study on mechanical properties and quality of concrete by part replacement of cement with silica fume, metakaolin and GGBS by using M-Sand as fine aggregate. *Materials Today: Proceedings*. 2021;43.

25- Liu G. FMVA, Brouwers H. J. H. . Waste glass as binder in alkali activated slag-fly ash mortars. *Materials and Structures*. 2019;52.

26- Chen J.J. NPL ,Kwan A.K.H., Li L.G. Lowering cement content in mortar by adding superfine zeolite as cement replacement and optimizing mixture proportions. *Cleaner production*. 2019;210:66-76.

27- Koirala M. RJB. CONSTRUCTION SAND, QUALITY AND SUPPLY MANAGEMENT IN INFRASTRUCTURE PROJECT. *International Journal of Advances in Engineering & Scientific Research*., 2017;14.(4)

28- BS. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 3: Determination of loose bulk density and voids. *BSI Standards Publication EN 1097-3:1998*.

ذرات پوزولان معدنی در میان مواد هیدراتاسیون قرار گرفت و از رشد و بزرگ شدن بلورهای اترینگیت و هیدروکسید کلسیم جلوگیری کرد.

این پوزولان اثرات خوبی در تقویت نمونه های بتنی و کاهش مصرف سیمان در بتن داشت و می توان آن را به عنوان ماده ای کاهنده آلودگی و دوستدار محیط زیست معرفی کرد.

۵- مراجع

1- BS. Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens. UK.: BSI; EN 12390-3:2009.

2- ASTM. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. United States C597 2010.

3- Rahmstorf S. A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise. *SCIENCE*. 2006;315(5810):368-70.

4- Root T. L TPJ, Hall K, Schneider S, Rosenzweig C, Pounds A., Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *nature*. 2003;421:57-60.

5- Stocker T.F. QD, Plattner G., Tignor M., Allen S .The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *The Physical Science Basis*. 2013(Cambridge University Press):1535PP.

6- Johansson R MS, Whistance J,Thompson W, Debnath D. Greenhouse gas emission reduction and cost from the United States biofuels mandate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;119.

7- Olaniyi O OI, Funmilayo O. Review of climate change and its effect on Nigeria ecosystem. *Int J Rural Dev Environ Health* 2019; Res. 3 (3) 92-100.

8- Berrou A RM, Godard A, Lefebvre M. High-resolution photoacoustic and direct absorption spectroscopy of main greenhouse gases by use of a pulsed entangled cavity doubly resonant OPO. *Appl Phys B Lasers Opt*. 2009;98.۳۰-۲۱۷:

9- Worrell E. PL, Martin N., Hendriks C., Meida L. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annu Rev Energy Environ*. 2001;26:303-29.

10- Princiotta F. *Global Climate Change , The Technology Challenge*. Springer Dordrecht Heidelberg . ۳۸،۲۰۱۱

11- Cobîrzan N. BAA, Moşonyi E. Investigation of the natural pozzolans for usage in cement industry. *Procedia Technol*. 2015;19:506-11.

12- De Matos P JD, Roberti F, Pelisser F, Gleize Ph. Rheological and hydration behaviour of cement pastes containing porcelain polishing residue and different water-reducing admixtures. *Construction and Building Materials*. 2020;262.

13- Fares G AMH, Iqbal Khan M. Fine limestone dust from ornamental stone factories: a potential filler in the production of High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;262.

- 29- Alavi Nia A. HM, Nili M., Afrough Sabet V. An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2012;46:62-73.
- 30- Fahim Huseien Gh. JZH, Memon R.P., Mohd Sam A.R. Compressive strength and microstructure properties of modified concrete incorporated effective microorganism and fly ash. *Materials Today: Proceedings*. 2021;46(5):2036-44.
- 31- Kumar A. BN, Ahmed I, Rizvi S.H., Kumar R., Jhatial A.A. Effect of silica fume and fly ash as cementitious material on hardened properties and embodied carbon of roller compacted concrete. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29:1210–22.
- 32- Ma X. HT, Xu Y., Yang R., Sun Y. Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;16:e00989.
- 33- Whitehurst E.A. Soniscope tests concrete structures. *Journal, American Concrete Institute*. 1951;47:443-4.
- 34- Bungey J MS, Grantham M. *Testing of Concrete in Structures: 4th Edition*. U.K.: CRC Press; 4th edition (March 6, 2006); 2006. 352 p.
- 35- Madandoust R MSY. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin
Construction and Building Materials. 2012;35:752-60.
- 36- Hosan A ASF, Sarker P, Aslani F. Nano- and micro-scale characterisation of interfacial transition zone (ITZ) of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano SiO₂ and nano CaCO₃. *Construction and Building Materials*. 2021;269.
- 37- T. J. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*. 2005;35.(۱۰)
- 38- Zhou Zh. SM, Liu J., Li Sh., Zhong A., Mendis P. Nano-CSH modified high volume fly ash concrete: Early-age properties and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2021;286.
- 39- Gupta J. JAS, Raman P.V. Evaluating long term properties of concrete using waste beverage glass. *Materials Today: Proceedings*. 2021; Available online.
- 40- Li H, Xiano H.G, Yuan J, Ou J. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*. 2004;35(2):185-9.
- 41- Qing Y ZZ, Deyv K, Rongshen Ch. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*. 2007;21(3):539-45.
- 42- Zhang J PG, Zheng X, Chen Ch. Preparation and characterization of ultra-lightweight fly ash-based cement foams incorporating ethylene-vinyl acetate emulsion and waste-derived C-S-H seeds. *Construction and Building Materials*. 2020;274.

Experimental Study of Engineering Specifications of Concrete Containing Local Mineral Pozzolan based on XRD and SEM Analyses

Mojtaba Rangrazian

PhD candidate in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Rahmat Madandoust

Visiting Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

- Professor, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Reza Mahjoub*

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

Mehdi Raftari

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Khorramabad Branch, Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

R_mahjoob@yahoo.com

Abstract

Global warming and its effects on the environment can be considered as the important crises facing humans. Finding a method to reduce cement consumption can be an effective step in controlling the annual increase in global temperature. In this research, in order to find the optimal mixing design for replacing local mineral pozzolan instead of a part of cement, two mixing projects with four types of 5, 10, 15 and 20 percent by weight replaced a part of concrete cement. The compressive strength and concrete quality tests were evaluated in the specimens. The constituent elements of concrete and the effect of adding local mineral pozzolan were investigated using the XRD analysis, as well as the morphology and microstructural behavior of concrete with the SEM test. The results exhibited that the best replacement value of cement by pozzolan in concrete is equivalent to 15 percent by weight of cement. Pozzolanic samples increase the strength by 24% compared to plain cement concrete (PCC) samples. Optimal pozzolanic reaction reduced the amount of portlandite and calcite in concrete. Also, this pozzolan reduced the pores, increased the improvement and integrity of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete in comparison with plain cement concrete. Considering the effects of this pozzolan on strengthening the structure and reducing the consumption of cement in concrete, the studied local mineral pozzolan can be introduced as a green material that reduces cement by increasing the strength of concrete and is environmentally friendly.

Keywords: Local mineral pozzolan, pozzolanic concrete, compressive strength test, X-ray diffraction (XRD) analysis, scanning electron microscopy (SEM).



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)