تحقیقات بتن
سال یازدهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۹۷
ص ۱۴۳ – ۱۳۳
تاریخ دریافت: ۹۷/۲/۱
تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۲۶

یادداشت پژوهشی

امکان سنجی کاربرد پودر بازیافتی بتنی به عنوان جایگزین سیمان و فیلر در ملات بنایی

میلاد عقیلی لطف
کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
امیرمحمد رمضانیان پور *
استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران
علیرضا حبیبی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده
در سال‌های اخیر، استفاده از پودر بازیافتی بتنی (پودر حاصل از بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب) به عنوان جایگزین سیمان و فیلر در ساخت ملات بنایی و سایر کاربردهای سیمانی رواج فراوانی یافته است. در این پژوهش مجموعاً ۸ طرح اختلاط ملات بنایی در سه گروه با هدف کاربرد پودر بازیافتی بتنی در نظر گرفته شد؛ در گروه اول پودر بازیافتی بتنی در نسبت‌های جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ جایگزین سیمان شد. در گروه دوم میکروسیلیس در نسبت‌های جایگزینی ۱۰ و ۱۵٪ جایگزین سیمان شد و در گروه سوم نیز ۳۵٪ از سیمان پرتلند با ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی و ۱۰٪ میکروسیلیس و همچنین ٤۰٪ از سیمان پرتلند با ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی و ۱۵٪ میکروسیلیس جایگزین شدند. نتایج حاصل از انجام آزمایشات ملات تازه و سخت‌شده نشان داد که با جایگزینی ۳۵٪ از سیمان با ۱۰٪ میکروسیلیس و ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی می‌توان نتایج مشابهی با طرح شاهد اخذ نمود.

واژه‌های کلیدی: پودر بازیافتی بتنی، میکروسیلیس، ملات بنایی، سیمان پرتلند، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: ramezanian@ut.ac.ir

۱- مقدمه

سیمان یکی از اساسی‌ترین اجزای تشکیل دهنده بتن به‌شمار می‌رود و به همین دلیل حجم تولیدی قابل توجهی در سراسر دنیا دارد [۱]. در گزارشی که سازمان زمین شناسی امریکا[1] در سال ۲۰۱۰ منتشر کرد، بیان نمود که در سال ۲۰۱۰ حدوداً ۳۳۰۰ میلیون تن سیمان در دنیا تولید شده است [۲]. در گزارشی دیگر که سازمان حفاظت از محیط زیست امریکا[2] در سال ۲۰۱۲ منتشر کرد، عنوان گردید که سالانه حدود ۲ میلیارد تن سیمان پرتلند در دنیا تولید می‌شود که منجربه تولید ۱۴ الی ۱۶ میلیارد تن بتن و ملات بنایی می‌گردد [۳]. از سوی دیگر تولید سیمان معضلات زیست محیطی متعددی به همراه دارد. لذا ضروری است که به نحو مناسبی آن‌ها را مرتفع نمود تا از شدت تخریبات زیست‌محیطی ناشی از تولید بی‌رویه آن کاسته شود. فرآیند تولید سیمان انرژی بسیار زیادی مصرف می‌کند، تا آنجایی که تولید کلینکر سیمان در دمایی نزدیک به ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد [۱].

کارخانه‌های تولید سیمان بعداز نیروگاه‌های تولید برق، جایگاه دوم در تولید گازهای گلخانه‌ای مانند دی اکسید کربن را به‌خود اختصاص می‌دهند. به‌طورکلی تولید یک تن سیمان، تولید حدود یک تن دی اکسید کربن را به همراه دارد و مجموعاً صنعت تولید سیمان ۷٪ از کل گازهای دی اکسید کربن تولیدی در جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد [۱]. لذا بزرگ‌ترین دغدغه در خصوص رسیدگی به مسائل زیست‌محیطی در زمینه تولید سیمان، کاهش هرچه بیشتر گازهای گلخانه‌ای تولیدی در این فرآیند است.

یکی از تلاش‌های جهانی برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان، استفاده از مواد جایگزین سیمان است [۴-۷]. در این خصوص مواد شبه سیمانی شامل سرباره کوره‌های آهن‌گدازی، پوزولان‌های صنعتی (مانند میکروسیلیس، خاکستر بادی و ...) و پوزولان‌های طبیعی می‌شود. در صورت مصرف مواد جایگزین سیمان در نسبت‌های دقیق جایگزینی، تغییرات مثبت قابل ملاحظه‌ای در رفتار مکانیکی و دوام بتن ایجاد می‌گردد [۸].

در چند سال اخیر نسل جدیدی از مواد جایگزین سیمان به این صنعت راه یافته است. این مواد در انتهای فرآیند تولید سنگدانه بازیافتی حاصل از خردایش قطعات نخاله‌های ساخت و تخریب، به صورت پودر بازیافتی (عبوری از الک شماره ۲۰۰) در کارخانه تولید می‌شوند. در این فرآیند، تولید کنندگان به منظور تولید سنگدانه بازیافتی با کیفیت مطلوب‌تر، اقدام به جداسازی حداکثر ملات‌های چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود تا ملات‌های سیمانی به دلیل مقاومت مکانیکی و دوام کمتر نسبت به سنگدانه‌های طبیعی اولیه در فرایندهای خردایش یا فرآیندهای شیمیایی به پودر بازیافتی تبدیل شوند و سهمی حدود ۱۰ الی ۳۰٪ از کل منابع بازیافتی را تشکیل دهند [۹]. این پودرها باعث آلودگی هوا، خاک و آب‌های مصرفی در کارخانه می‌شوند و به علت ریزی زیاد نیز امکان دفن آن‌ها در خاکریزها با مشکلاتی همراه است [۹]. در سال‌های اخیر محققین راهکارهایی به منظور کاربرد و استفاده مجدد از پودرهای بازیافتی در صنعت ساخت و ساز ارائه کرده‌اند. از جمله این راهکارها می‌توان به استفاده از پودر بازیافتی به عنوان فیلر در بتن آسفالتی یا بتن خوداتراکم یا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند در تولید ملات بنایی یا بتن اشاره کرد [۵-۸ و ۱۰-۱۳]. اما در این بین کاربرد پودر بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند یا فیلر در ملات بنایی به دلیل دارا بودن مشخصات مکانیکی کمتر نسبت به بتن، بیشتر از کاربردهای دیگر مورد توجه پژوهشگران قرار دارد. در این زمینه پودرهای بازیافتی حاصل از بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب به پودر بازیافتی بتنی، پودر بازیافتی سرامیکی، پودر شیشه، پودر بازیافتی آجری و پودر بازیافتی مختلط تقسیم‌بندی می‌شود. هریک از پودرهای نامبرده تأثیرات متفاوتی بر عملکرد مکانیکی و دوامی محصولات سیمانی می‌گذارند. اما ویژگی مشترک بین همه پودرهای مذکور، درصد قابل ملاحظه SiO_2 در ترکیب آن‌هاست که منجربه بروز رفتار پوزولانی در آن‌ها می‌شود [۱۰].

در این راستا کیم و چوی[3] [۱۱] در پژوهش خود با استفاده از دو نوع پودر بازیافتی بتنی ملات بنایی ساختند. این دو نوع پودر در خواص شیمیایی کاملاً یکسان بودند اما در خصوص مقدار نرمی[4]، پودر بازیافتی نوع یک دارای نرمی بیشتری نسبت به پودر بازیافتی نوع دو بود. در این پژوهش سیمان پرتلند در نسبت‌های جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۵٪ با پودرهای بازیافتی جایگزین شد. آن‌ها در این پژوهش

[1] US Geological Survey
[2] Environmental protection Agency (EPA)
[3] Kim, Y. J., & Choi, Y. W
[4] Blaine fineness

دریافتند که لزجت خمیر سیمان با کاربرد پودر بازیافتی بتنی کاهش می‌یابد. آن‌ها علت کاهش لزجت را کاهش در مقدار نرمی عنوان کردند. در خصوص مقاومت فشاری نیز با افزایش نسبت جایگزینی، افت در مقاومت فشاری مشاهده شد. به‌طوری که در نسبت جایگزینی ۴۵٪ ملات ساخته شده با پودر بازیافتی نوع یک حدوداً ۷۳٪ و ملات ساخته شده با پودر بازیافتی نوع دو حدوداً ۶۳٪ افت مقاومت فشاری نسبت به ملات معمولی داشتند. آن‌ها از این موضوع نتیجه گرفتند که پودر بازیافتی فاقد واکنش سیمانی است و حداکثر مقدار استفاده از پودر بازیافتی را ۱۵٪ توصیه کردند.

موون و همکاران[1] [۱۲] در پژوهش خود ۳ نوع پودر بازیافتی با مقاومت فشاری بتن اولیه متفاوت (۲۸/۳، ۴۹ و ۶۰/۷ مگاپاسکال) را مورد بررسی قرار دادند و در نسبت‌های جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ بتن و ملات بازیافتی ساختند. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه نشان داد که بتن‌های ساخته شده از پودر بازیافتی با مقاومت فشاری بتن اولیه ۶۰/۷ مگاپاسکال در هر سه نسبت جایگزینی از مقاومت فشاری بتن معمولی بیشتر است. اما کاربرد دو نوع پودر دیگر منجربه افت شدید مقاومت فشاری در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه شد. همچنین نتایج مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های منشوری ملات بنایی نیز حکایت از کاهش مقاومت با افزایش نسبت جایگزینی داشت. آن‌ها در مجموع نیز استفاده از پودر بازیافتی بتنی را تا نسبت ۳۰٪ برای تولید بتن روسازی، بتن غلتکی و بتن خودتراکم توصیه کردند.

ما و وانگ[2] [۱۳] در پژوهش خود سیمان پرتلند را در نسبت‌های جایگزینی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰٪ با پودر بازیافتی بتنی جایگزین کردند. نتایج مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های منشوری ملات بنایی نشان داد که با افزایش نسبت جایگزینی مقاومت مکانیکی کاهش می یابد. اگرچه به ازای نسبت‌های جایگزینی کمتر از ۲۰٪ نرخ کاهش مقاومت کندتر است. اما در پژوهشی دیگر ژئو و همکاران[3] [۵] تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ساخته شده با پودر بازیافتی تا نسبت جایگزینی ۳۰٪ و بتن طرح شاهد مشاهده نکردند.

باتوجه به اهمیت موضوع و همچنین حجم تولید و مصرف سیمان پرتلند در کشور به نظر می‌رسد انجام پژوهش‌هایی در این زمینه به‌منظور همراستا سازی تکنولوژی‌های ساخت با توسعه پایدار ضروری است. در این پژوهش امکان‌سنجی کاربرد پودر بازیافتی بتنی به عنوان جایگزین سیمان پرتلند در ساخت و تولید ملات بنایی بررسی خواهد شد. باتوجه به‌بررسی ادبیات فنی در این زمینه و خواص سیمانی کمتر پودر بازیافتی نسبت به سیمان پرتلند (که نتیجتاً تأثیر منفی برروی عملکرد مکانیکی و دوام خواهد داشت)، به‌منظور بهبود عملکرد در خواص ملات بنایی از مواد جایگزین سیمان مانند میکروسیلیس نیز استفاده شده است. در این پژوهش سیمان پرتلند در ملات بنایی در نسبت‌های جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ با پودر بازیافتی بتنی جایگزین شده است. همچنین در طرح‌های دارای ۲۵٪ پودر بازیافتی، در گروه دیگری از طرح‌های اختلاط، ۱۰ و ۱۵٪ از سیمان پرتلند با میکروسیلیس نیز جایگزین شد. مجموعاً ۸ طرح اختلاط کلیت این پژوهش را شکل می‌دهد. آزمایش‌های تعیین چگالی ملات تازه و سخت شده، درصد جذب آب ملات سخت‌شده، تعیین عمر کارایی ملات تازه و مقاومت فشاری در این فاز به‌منظور تعیین عملکرد ملات‌های دارای پودر بازیافتی بتنی ارزیابی شده‌است. نوآوری این پژوهش عملاً دستیابی به نوعی از ترکیبات سیمانی پایدار (سیمان پرتلند، میکروسیلیس و پودر بازیافتی بتنی) است که در صورت استفاده در ملات بنایی، عملکرد مشابهی با ملات بنایی ساخته شده با سیمان پرتلند داشته باشد. این مهم باتوجه به کاهش مصرف سیمان و همچنین مصرف مواد زائد (پودر بازیافتی) می‌تواند ارزش زیست‌میحطی قابل ملاحظه‌ای داشته باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

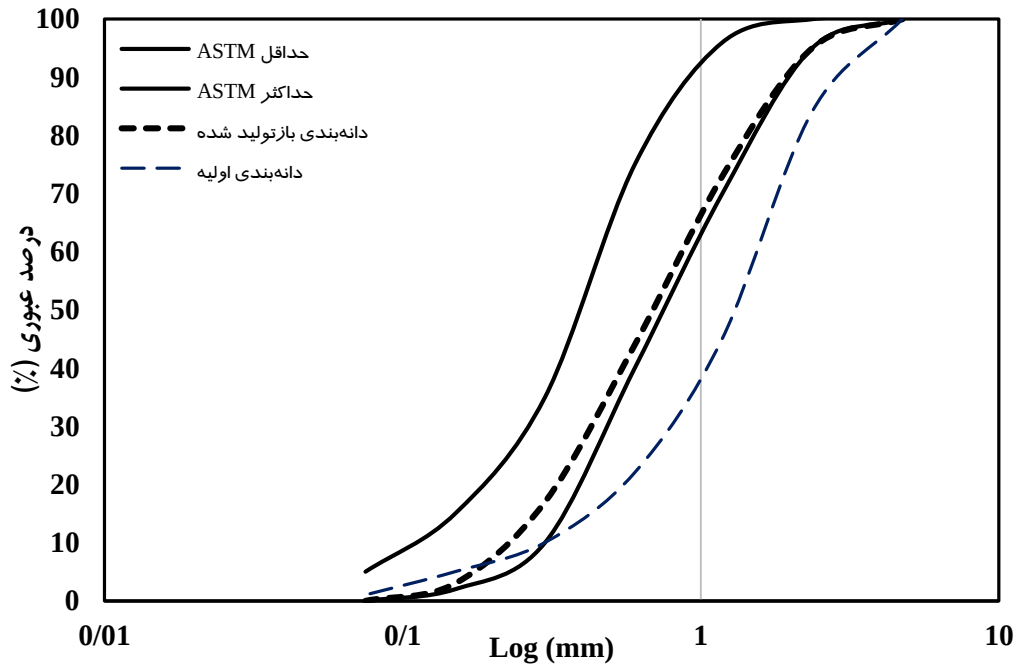
در این پژوهش یک نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ از کارخانه سیمان ساوه تهیه شد. پودر بازیافتی بتنی نیز در اثر خردایش نمونه‌ها و نخاله‌های بتنی و با الک کردن محصول حاصل برروی الک شماره ۱۰۰ در محیط آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران تولید شد. میکرو سیلیس نیز از دپوهای موجود در داخل آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران مصرف شد. در جدول۱ نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند، پودر بازیافتی بتنی و میکروسیلیس ارائه شده است.

[1] Moon et al
[2] Ma & Wang
[3] Xue et al

جدول ۱- ترکیبات تشکیل دهنده سیمان پرتلند، پودر بازیافتی بتنی و میکروسیلیس

ترکیب شیمیایی (٪)	سیمان	پودر بازیافتی بتنی	میکروسیلیس
SiO_2 (%)	۲۲/۷	۲۴/۷۸	۸۶/۱۸
Al_2O_3 (%)	۴/۸۰	۵/۳۲	۱/۴۴
Fe_2O_3 (%)	۳/۸۰	۲/۶۰	۰/۲۰
CaO (%)	۶۴/۲۰	۲۴/۲۲	۳/۰۶
MgO (%)	۱/۸۰	۱/۲۸	۱/۳۲
SO_3 (%)	۱/۶۵	۰/۹۱	۰/۳۳۷
Na_2O (%)	۰/۲۷	۰/۰۸	–
K_2O (%)	۰/۸۱	۰/۵۸	–
Equivalent alkali (%)	۰/۸۰	۰/۴۶	–
LOI (%)	۰/۷۰	۳۹/۷۷	۴/۱۵

ماسه طبیعی مصرفی در این پروژه از کارخانه صحرای شن و ماسه تهیه شد اما به دلیل عدم انطباق منحنی دانه‌بندی آن با الزامات مندرج در استاندارد ASTM C 144 [۱۴] که مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در تولید ملات بنایی را قید نموده است، منحنی دانه‌بندی به صورت دستی و با عمل سرند کردن تغییر داده شد. برای این منظور ماسه مذکور به شش بازه ۰/۰۷۵-۰/۱۵۰، ۰/۱۵۰-۰/۳۰۰، ۰/۳۰۰-۰/۶۳، ۰/۶۳-۱/۱۸، ۱/۱۸-۲/۳۶ و ۲/۳۶-۴/۷۵ تفکیک شده و به صورت وزنی در درصدهای مورد نیاز بایکدیگر ترکیب شدند. در نهایت ماسه بازتولید شده دارای چگالی ۲/۵۶ Ton/m^3، درصد جذب آب ٪۳/۸۴ و مدول نرمی ۲/۶۸ شد. در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی قبل و بعداز بازتولید و همچنین محدوده‌های استاندارد ASTM C 144 نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است ماسه بازتولید شده نسبت به ماسه اولیه ریزتر شده است. اگرچه همچنان به حد درشت‌تر استاندارد ASTM C 144 نزدیک‌تر است.



شکل ۱- نمودار دانه‌بندی ماسه طبیعی قبل و بعداز بازتولید به همراه محدوده‌های مجاز استاندارد ASTM C 144

۲-۲- طرح‌های اختلاط

در این پروژه مجموعاً ۸ طرح اختلاط ملات بنایی در سه گروه در نظر گرفته شد؛ در گروه اول پودر بازیافتی بتنی در نسبت‌های جایگزینی ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ جایگزین سیمان پرتلند شد. در گروه دوم میکروسیلیس در نسبت‌های جایگزینی ۱۰ و ۱۵٪ جایگزین سیمان پرتلند شد و در گروه سوم نیز ۳۵٪ از سیمان پرتلند با ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی و ۱۰٪ میکروسیلیس و همچنین ۴۰٪ از سیمان پرتلند با ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی و ۱۵٪ میکروسیلیس جایگزین شدند.

همه نسبت‌ها به صورت وزنی محاسبه شدند. نسبت آب به سیمان طرح شاهد برای رسیدن به معیار روانی ۱۷۵±۵ mm و نسبت سیمان به سنگدانه ۱ به ۳، مقدار ۰/۵۵ محاسبه شد. اما در طرح‌های دارای مواد جایگزین سیمان به منظور کنترل کارایی بدون تغییر نسبت آب به سیمان، از یک نوع افزودنی شیمیایی روان‌کننده برپایه لیگنوسولفونات[1] استفاده شد. نسبت‌های مورد استفاده در طرح اختلاط ملات بنایی به‌گونه‌ای تعیین گردید تا مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های مکعبی ۴۰*۴۰*۴۰ mm ملات طرح شاهد به حد بالای مقاومتی ملات (۳۰ MPa) نزدیک‌تر باشد [۱۵]. این تصمیم به دلیل کیفیت به مراتب کمتر پودر بازیافتی بتنی نسبت به سیمان پرتلند و همچنین با هدف مشاهده نرخ کاهش مقاومت فشاری ملات بنایی حاوی نسبت‌های مختلف پودر بازیافتی بتنی نسبت به طرح شاهد اتخاذ گردید. در جدول ۲ مشخصات طرح مخلوط‌های این پژوهش نشان داده شده است. فرآیند اختلاط اجزای ملات بنایی مطابق با دستورالعمل EN 196-1 [۱۶] انجام شد. البته به‌منظور اختلاط کامل اجزای سیمانی، میکروسیلیس و پودر بازیافتی بتنی قبل از اختلاط با اجزای ملات بنایی با آب مخلوط شده و تشکیل ژل سیمانی داده و سپس در فرآیند اختلاط مشارکت کردند.

۲-۳- طراحی آزمایش‌ها

به منظور ارزیابی رفتار ملات تازه و سخت شده آزمایشات چگالی ملات تازه و سخت شده، آنالیز ریزساختار با استفاده از آزمایش SEM، جذب آب کل، عمر کارایی و مقاومت فشاری تعیین شدند. روانی و کارایی ملات تازه با استفاده از آزمایش میز روانی[2] مطابق با استاندارد BS EN 1015-3 [۱۷] تعیین شد. برای تعیین عمر کارایی ملات تازه از استاندارد BS EN 1015-9 [۱۸] استفاده شد. این استاندارد عمر کارایی را زمان مورد نیاز برای کاهش ۳۰ mm روانی ملات تازه عنوان می‌کند. برای این منظور روانی ملات تازه در زمان‌های ۱۰، ۲۵ و ۴۰ دقیقه بعداز اتمام اختلاط محاسبه شده و سپس با درون‌یابی زمان مورد نیاز برای افت روانی به مقدار ۳۰ mm نسبت به روانی اولیه تعیین شده و به عنوان عمر کارایی ارائه می‌گردد. چگالی ملات تازه نیز مطابق با دستورالعمل BS EN 1015-6 [۱۹] و چگالی ملات سخت شده نیز با استفاده از استاندارد BS EN 1015-10 [۲۰] تعیین شد. درصد جذب آب نمونه‌های ملات سخت شده نیز نمونه‌های ملات به مدت ۲۴±۰/۵ ساعت در آب با دمای $25\pm2\ ^{\circ}C$ مستغرق شدند. سپس وزن اشباع با سطح خشک و نیز وزن خشک نمونه‌ها بعداز خشک شدن در گرمخانه با دمای $110\pm2\ ^{\circ}C$ (تا رسیدن به وزن ثابت) تعیین می‌گردد. تفاضل بین وزن اشباع با سطح خشک و وزن خشک محاسبه شده بر وزن خشک تقسیم می‌گردد. مقدار به دست آمده با ضرب شدن در عدد ۱۰۰ به عنوان درصد جذب آب نمونه ارائه می‌گردد. برای تعیین چگالی و درصد جذب آب ملات سخت شده از ۳ نمونه منشوری ۴۰*۴۰*۱۶۰ mm استفاده شده است. در پایان نیز مقاومت فشاری نمونه‌های ملات سخت شده در سن ۷ و ۲۸ روزه مطابق با استاندارد BS EN 1015-11 [۲۱] تعیین شد. برای تعیین مقاومت فشاری از ۳ نمونه منشوری ۴۰*۴۰*۴۰ mm استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات طرح اختلاط ملات‌های بنایی دارای مواد جایگزین سیمان

عنوان طرح	سیمان (kg/m^3)	پودر بازیافتی بتنی (kg/m^3)	میکروسیلیس (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	W/b	ماسه طبیعی (kg/m^3)	روان کننده (gr/m^3)	میز روانی (mm)
NM	۴۵۰	–	–	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	0	۱۷۶
25RCM	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	–	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۱۰۱۳	۱۷۳
50RCM	۲۲۵	۲۲۵	–	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۳۵۱۹	۱۷۳
75RCM	۱۱۲/۵	۳۳۷/۵	–	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۵۷۴۱	۱۷۲
10SFM	۴۰۵	–	۴۵	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۳۴۲۰	۱۷۵
15SFM	۳۸۲/۵	–	۶۷/۵	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۲۹۲۵	۱۷۴
10SF25RCM	۲۹۲/۵	۱۱۲/۵	۴۵	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۳۲۸۵	۱۷۲
15SF25RCM	۲۷۰	۱۱۲/۵	۶۷/۵	۱۷۵	۰/۵۵	۱۳۵۰	۳۸۴۱	۱۷۶

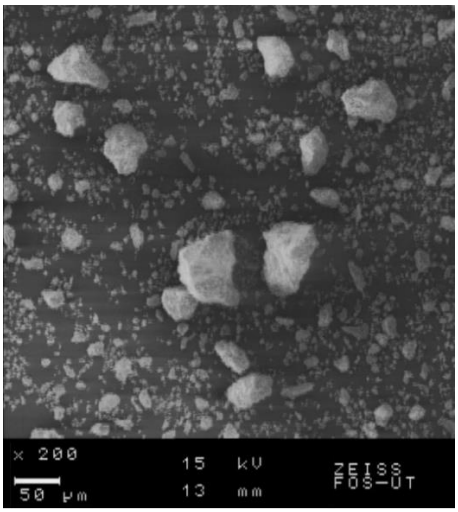
[1] lignosulphonate-based plasticizer

[2] Flow table

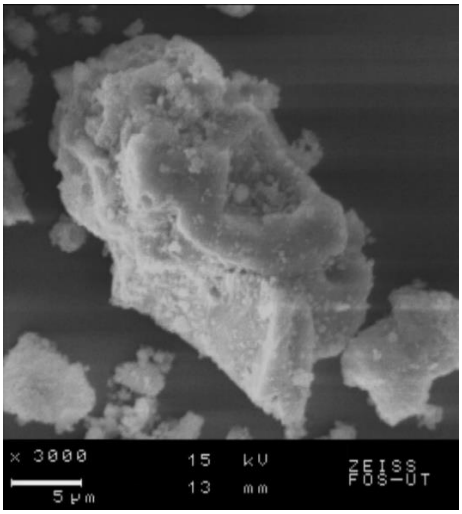
۳- نتایج و بررسی

۳-۱- نتایج حاصل از آنالیز SEM پودر بازیافتی بتنی

در شکل ۲ تصویر پودر بازیافتی بتنی در بزرگنمایی ۲۰۰ و ۳۰۰۰ برابر نشان داده‌شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود مقدار غالبی از پودر بازیافتی بتنی عملاً هیدراته‌شده و فاقد رفتار سیمانی خواهد بود. اما در خصوص میزان تأثیر منفی پودر حاصل برروی رفتار ملات تازه و سخت‌شده را باید در قالب نتایج اخذشده تحلیل و بررسی نمود.



(الف)



(ب)

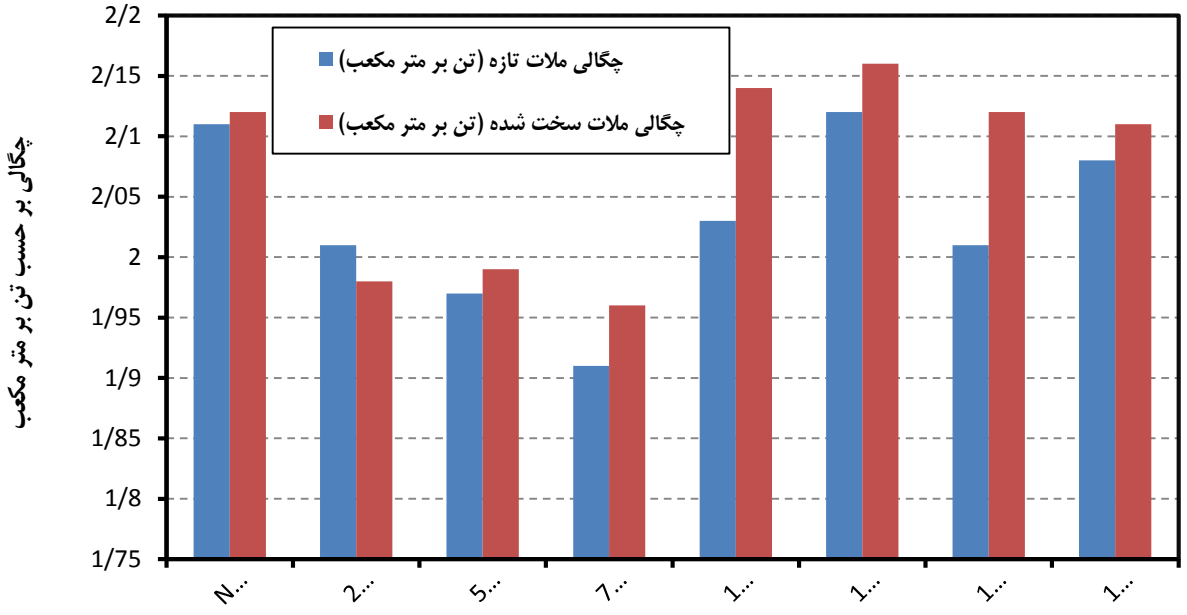
شکل ۲- نتایج حاصل از انجام آنالیز SEM برروی پودر بازیافتی بتنی با بزرگ‌نمایی الف) ۲۰۰ برابر و ب) ۳۰۰۰ برابر

۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های چگالی ملات تازه و سخت شده

نتایج حاصل از آزمایش‌های چگالی تازه و سخت‌شده در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده‌شده است. همانطور که مشاهده می‌شود درحالت کلی همه طرح‌ها چگالی بزرگتری درحالت سخت‌شده نسبت به حالت تازه دارند (به غیر از طرح 25RCM). در طرح‌های دارای پودر بازیافتی مشاهده می‌شود که عموماً چگالی (در هر دو حالت تازه و سخت‌شده) با افزایش نسبت جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی کاهش می‌یابد. یکی از دلایل این اتفاق را می‌توان به تخلخل بیشتر پودر بازیافتی بتنی نسبت به سیمان پرتلند نسبت داد. در خصوص طرح‌های دارای میکروسیلیس نیز می‌توان دریافت که با افزایش نسبت جایگزینی سیمان پرتلند با میکروسیلیس، چگالی ملات تازه افزایش می‌یابد اما در خصوص ملات سخت‌شده رفتار مشخصی مشاهده نمی‌شود.

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برروی طرح‌های ملات بنایی

عنوان طرح	چگالی ملات تازه (Ton/m^3)	چگالی ملات سخت شده(Ton/m^3)	جذب آب (٪)	عمر کارایی (min)	مقاومت فشاری (MPa)	
					۷ روزه	۲۸ روزه
NM	۲/۱۱	۲/۱۲	۶/۹۶	۲۹/۱۴	۱۸/۲۴	۲۸/۸۳
25RCM	۲/۰۱	۱/۹۸	۸/۳۴	۲۱/۵۴	۱۵/۲۵	۲۳/۳۶
50RCM	۱/۹۷	۱/۹۹	۹/۸۴	۱۸/۲۹	۸/۹۵	۱۴/۴۳
75RCM	۱/۹۱	۱/۹۶	۱۱/۱۹	۱۷/۱۰	۲/۴۰	۶/۷۱
10SFM	۲/۰۳	۲/۱۴	۵/۶۸	۳۵/۴۵	۲۵/۸۶	۴۰/۷۷
15SFM	۲/۱۲	۲/۱۶	۵/۸۴	۴۱/۴۸	۲۳/۳۳	۴۳/۷۹
10SF25RCM	۲/۰۱	۲/۱۲	۷/۲۱	۲۶/۷۴	۱۷/۰۶	۳۰/۶۶
15SF25RCM	۲/۰۸	۲/۱۱	۶/۸۵	۳۰/۶۰	۲۳/۹۸	۳۷/۷۶



شکل ۳- نتایج حاصل از انجام آزمایش چگالی ملات تازه و سخت شده بر حسب Ton/m^3

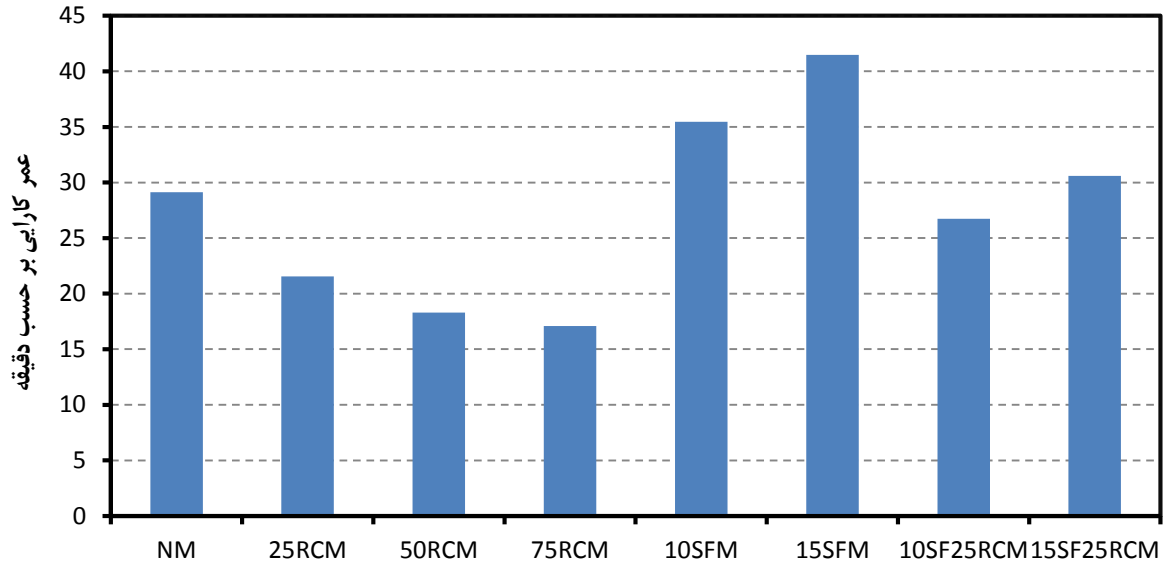
۳-۳- نتایج حاصل از آزمایش تعیین درصد جذب آب

نتایج حاصل از تعیین درصد جذب آب ملات سخت‌شده در جدول ۳ نشان داده‌شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود در گروه طرح‌های دارای پودر بازیافتی بتنی با افزایش درصد جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی، درصد جذب آب افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که طرح 75RCM به ترتیب ۱/۱۳، ۱/۳۴ و ۱/۶۱ برابر درصد جذب آب بیشتری نسبت به طرح‌های 50RCM، 25RCM و NM دارد. به عبارت دیگر جایگزینی ۷۵٪ از سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی، بیش‌از ۶۰٪ درصد جذب آب را افزایش داده است که این پدیده به‌شدت می‌تواند برروی عملکرد دوامی نمونه‌های ملات تأثیر منفی بگذارد. از سوی دیگر در طرح‌های دارای میکروسیلیس به وضوح مشخص است که جایگزینی سیمان پرتلند با میکروسیلیس تاحد قابل ملاحظه‌ای درصد جذب آب را کاهش می‌دهد اما با افزایش نسبت جایگزینی رفتار مشخصی مشاهده نمی‌شود (در طرح‌های دارای میکروسیلیس با افزایش نسبت جایگزینی درصد جذب آب افزایش می‌یابد اما در طرح‌های دارای میکروسیلیس و پودر بازیافتی بتنی، با افزایش نسبت جایگزینی درصد جذب آب کاهش می‌یابد). به‌طوریکه درصد جذب آب در طرح 15SF25RCM عملاً از درصد جذب آب طرح شاهد نیز کمتر شده است (علیرغم آن‌که ۴۰٪ از سیمان پرتلند با مواد جایگزین سیمان جایگزین شده است). کاهش درصد جذب آب در طرح‌های دارای میکروسیلیس به دلیل بهبود در ریزساختار و کاهش نفوذپذیری ملات رخ می‌دهد که این موضوع برروی مسئله مقاومت نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد.

۴-۳- نتایج حاصل از آزمایش تعیین عمر کارایی

نتایج حاصل از تعیین عمر کارایی در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده‌شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در طرح‌های دارای پودر بازیافتی بتنی با افزایش نسبت درصد جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی عمر کارایی کاهش می‌یابد. به‌طوری که عمرکارایی در طرح 75RCM حدود ۱۰ دقیقه (۴۱٪) نسبت به طرح NM کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که در صورت استفاده از پودر بازیافتی بتنی در کارهای بنایی باید به مسئله گیرش نهایی ملات توجه جدی نمود. ازسوی دیگر می‌توان مشاهده نمود که جایگزینی میکروسیلیس به‌جای سیمان پرتلند در طرح‌های ملات بنایی به‌طور قابل ملاحظه‌ای کارایی را بهبود می‌بخشد و با افزایش نسبت جایگزینی سیمان پرتلند با میکروسیلیس این مقدار افزایش بیشتری می‌یابد. به‌طوری که ۱۵٪ میکروسیلیس در طرح‌های NM و 25RCM

به‌ترتیب بیش از ۹ و ۱۲ دقیقه عمرکارایی را افزایش می‌دهد (به‌ترتیب ٪۴۲/۳ و ٪۴۲/۱). اگرچه لازم به ذکر است که استفاده از افزودنی‌های شیمیایی کندگیرکننده می‌تواند به‌عنوان یک راه‌حل دائمی به‌منظور بهبود عمر کارایی مورد استفاده قرار گیرد که البته انجام تحقیقات در این زمینه به‌نظر الزامی می‌نماید.

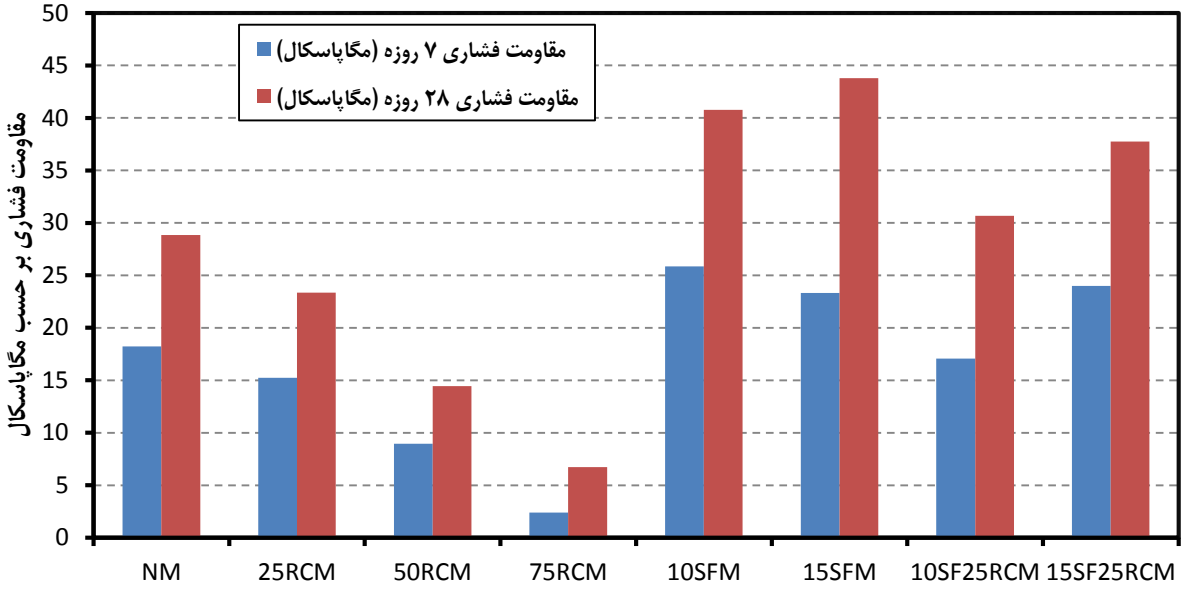


شکل ۴- نتایج حاصل از انجام آزمایش تعیین عمر کارایی بر حسب دقیقه

۳-۵- نتایج حاصل از آزمایش تعیین مقاومت فشاری

نتایج حاصل از تعیین مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۳ و شکل ۵ نشان داده‌شده است. به‌وضوح مشاهده می‌گردد که در طرح‌های دارای پودر بازیافتی بتنی، با افزایش نسبت جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه به‌شدت کاهش می‌یابد. به‌طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه در طرح NM به‌ترتیب ۱/۲۳ برابر طرح 25RCM، ۱/۹۹ برابر طرح 50RCM و ۴/۲۹ برابر طرح 75RCM است. این مقادیر برای سن ۷ روزه به‌ترتیب برابر با ۱/۱۹، ۲/۰۳ و ۷/۶۰ است.

عملاً با جایگزینی ٪۲۵ از سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ٪۱۹ و با جایگزینی ٪۵۰ مقاومت فشاری ۲۸ روزه ٪۵۰ کاهش مقاومت ایجاد خواهد شد. اما در سن ۷ روزه با جایگزینی ٪۲۵ از سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی مقاومت فشاری ٪۱۶ و برای نسبت جایگزینی ٪۵۰ مقاومت فشاری ٪۵۱ کاهش مقاومت خواهد داشت. از نتایج چنین برمی‌آید که جایگزینی ٪۲۵ از سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی کمتر از ٪۲۵ مقاومت فشاری (در هر دو سن) را کاهش می‌دهد و این موضوع دلیلی بر اثبات خاصیت سیمانی پودر بازیافتی بتنی است. اگرچه با افزایش نسبت جایگزینی از ٪۲۵ به ۵۰ و ٪۷۵ روند افت مقاومت نسبت به طرح شاهد فزونی می‌یابد که این موضوع نیز نشان می‌دهد که درصد قابل توجهی از SiO_2 و CaO موجود در پودر بازیافتی بتنی فاقد واکنش سیمانی هستند و به‌صورت غیر فعال در ملات مشارکت می‌کنند. همچنین مشاهده می‌شود که در سن ۷ روزه روند افت مقاومت به‌ازای نسبت جایگزینی بیشتر از روند افت مقاومت در سن ۲۸ روزه است. این موضوع ممکن است به‌علت عمل‌آوری و هیدراتاسیون داخلی رخ داده باشد. ما و وانگ [۱۳] در پژوهش خود مشاهده کردند که تا ٪۴۰ جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی منجربه ٪۲۵ افت در مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌گردد. کیم و چوی [۱۱] نیز روند افت مقاومتی مشابهی را تا ٪۴۵ جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی مشاهده کردند. موون و همکاران [۱۲] نیز در پژوهش خود بیش‌از ٪۳۰ افت مقاومت فشاری به‌ازای ٪۳۰ جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی مشاهده کردند.



شکل ۵- نتایج حاصل از انجام آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بر حسب مگاپاسکال

٤- نتیجه گیری

برمبنای نتایج اخذ شده در این پژوهش موارد زیر نتیجه گیری می گردد:

- استفاده از پودر بازیافتی بتنی به عنوان جایگزین قسمتی از سیمان پرتلند تا نسبت جایگزینی ۷۵٪ منجربه افت کارایی و مقاومت‌های مکانیکی گردید. اگرچه در طرح‌های مذکور جایگزینی ۱۰ الی ۱۵٪ از سیمان پرتلند با میکروسیلیس تا حد بسیار خوبی اثر منفی استفاده از پودر بازیافتی بتنی را برروی کارایی جبران نمود.
- به دلیل ساختار بسیار متخلخل پودر بازیافتی بتنی، ملات های ساخته شده با پودر بازیافتی بتنی دارای چگالی کمتر و درصد جذب آب بیشتری نسبت به طرح شاهد دارند.
- جایگزینی ۱۰ و یا ۱۵٪ از سیمان با میکروسیلیس مجربه کاهش درصد جذب آب ملات‌های بنایی می‌شود. به طوری که در نسبت جایگزینی ۱۰٪ مقدار درصد جذب آب بیش از ۱/۲٪ نسبت به طرح شاهد کاهش یافت.
- با افزایش نسبت جایگزینی سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی، مقاومت‌های فشاری ۷ و ۲۸ روزه کاهش می‌یابند. برمبنای این نتایج، جایگزینی بیش از ۲۵٪ از سیمان پرتلند با پودر بازیافتی بتنی توصیه نمی‌شود.
- با جایگزینی ۱۰ یا ۱۵٪ از سیمان پرتلند با میکروسیلیس در طرح‌های حاوی ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی نتایج قابل مقایسه‌ای نسبت به طرح شاهد اخذ شد. به‌طوری که در طرح دارای ۲۵٪ پودر بازیافتی بتنی و ۱۵٪ میکروسیلیس عملاً ۹٪ افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد مشاهده شد. به عبارت دیگر ۳۵٪ از سیمان پرتلند در تولید ملات بنایی را می‌توان با ۱۵٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ پودر بازیافتی بتنی جایگزین نمود. این نتیجه‌گیری از نقطه نظر مسائل زیست محیطی بسیار حائز اهمیت است و به نظر می‌رسد ترکیب حاصل می‌تواند راهکار مناسبی به منظور کاهش مصرف سیمان پرتلند باشد. اگرچه باتوجه به گستره پژوهش، انجام آزمایش‌های مرتبط با دوام ملات بنایی و همچنین سایر فاکتورهای عملکردی مانند مقاومت چسبندگی ملات بنایی در پژوهشی دیگر ضروری به‌نظر می‌رسد.

٥- مراجع

[1] De Brito, J., & Saikia, N. (2012). Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. Springer Science & Business Media.
[2] US Geological Survey (2011) USGS mineral program cement report, United States Geological Survey.

[3] EPA (2004) Overview of Portland cement and concrete, EPA report, environmental protection agency, USA. http://www.epa.gov/osw/conserve/tools/cpg/pdf/rtc/app-a.pdf. Accessed 2017.
[4] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., & Khani, S. (2013). Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. Construction and Building Materials, 41, 879-888. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat201211054.
[5] Xue, C., Shen, A., Guo, Y., & He, T. (2016). Utilization of Construction Waste Composite Powder Materials as Cementitious Materials in Small-Scale Prefabricated Concrete. Advances in Materials Science and Engineering, 2016. http://dx.doi.org/10.1155/2016/8947935
[6] Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. Construction and Building Materials, 83, 174-180. http://dx.doi.org/101016/j.conbuildmat.201502086.
[7] Liu, Q., Tong, T., Liu, S., Yang, D., & Yu, Q. (2014). Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement. Construction and Building Materials, 73, 754-763.
http://dx.doi.org/101016/j.conbuildmat.201409066.
[8] Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., & Zhang, L. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. Construction and Building Materials, 35, 718-729.
[9] Shima, H., Tateyashiki, H., Matsuhashi, R., & Yoshida, Y. (2005). An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. Journal of advanced concrete technology, 3(1), 53-67.
[۱۰] عقیلی لطف، میلاد. (۱۳۹۶). ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام سنگدانه بازیافتی و استفاده از آن در مخلوط های بتنی. پایان نامه کارشناسی ارشد در گرایش مهندسی عمران-راه و ترابری. دانشکده مهندسی عمران-دانشگاه تهران. تحت راهنمایی دکترمسعود پلاسی و دکتر امیرمحمد رمضانیان پور.
[11] Kim, Y. J., & Choi, Y. W. (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. Construction and building materials, 30, 500-504. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2011.11.042
[12] Moon, D. J., Kim, Y. B., & Ryou, J. S. (2008). An approach for the recycling of waste concrete powder as cementitious materials. Journal of Ceramic Processing Research, 9(3), 278-281
[13] Ma, X., & Wang, Z. (2013). Effect of ground waste concrete powder on cement properties. Advances in Materials Science and Engineering, 2013. http://dx.doi.org/10.1155/2013/918294
[14] ASTM C 144. (2004). Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar.
[15] Manso, J. M., Rodriguez, Á, Aragón, Á, & Gonzalez, J. J. (2011). The durability of masonry mortars made with ladle furnace slag. Construction and Building Materials, 25(8), 3508-3519.
[16] EN 196-1. (2005). Methods of testing cement–Part 1: Determination of strength. European Committee for standardization, 26.
[17] BS EN. 1015-3 (1999). Methods of test for mortar for masonry part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
[18] BS EN 1015-9. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar.
[19] BS EN 1015-6. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.
[20] BS EN 1015-10. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar.
[21] BS EN 1015-11. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.

Utilization of Recycled Concrete Powder as Cement Replacement or Filler in Masonry Mortar

Milad Aghili Lotf
MSc. graduated, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Amir Mohammad Ramezanianpour *
Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran,
Alireza Habibi
MSc. candidate, Faculty of environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Portland cement is the most energetically demanding component among all cement-based materials. It not only consumes high levels of energy, but also is one of the important CO_2 emission sources in the world. So any efforts to reduce the consumption of cement can lead to lower environmental pollution. One way to handle this problem is using recycled powders (remained at construction and demolition waste recycling sites) as a partial replacement of cement. According to the literature, recycled concrete powders can be successfully used as cement replacement or filler in cement-based products. This strategy can lead to consumption of construction waste recycling products as well as reduction in the greenhouse emissions. However, due to lower hydration activity of recycled concrete powder compared to cement, utilization of it in masonry mortars seems more practical as opposed to concrete. In this research three different groups of mortar mixes were designed. The first group consisted of mixes in which 25%, 50% and 75% of the total ordinary Portland cement were replaced with recycled concrete powder. In the second group, 10% and 15% silica fume were replaced with ordinary Portland cement, and finally in the third one, both 10% and 15% silica fume was used in mixes containing 25% recycled concrete powder. The results of physical (both fresh and hardened states) and mechanical tests showed that utilizing 10% or 15% silica fume in mortar containing 25% recycled concrete powder can lead to a similar or even better physical and mechanical performance compared to reference mix.

Keywords: Recycled concrete powder; Silica fume; Ordinary Portland cement; Masonry mortar; compressive strength.

* Corresponding Author: ramezanian@ut.ac.ir