

تأثیر پودر پسماند زغالسنگ بر مشخصات مقاومتی روسازی بتن غلتکی

سعید حسامی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
امیر مدرس*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
مصطفی سلطانی نژاد، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

E-mail: amirmodarres2003@yahoo.com

دریافت: ۹۴/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۹۴/۰۶/۱۰

چکیده

نرخ بالای استفاده از زغالسنگ و پایین بودن راندمان کارخانه‌های زغالشویی در ایران، سبب شده حجم زیادی از زغالسنگ در فرایند تولید به عنوان پسماند، دپو شود. پسماند تخلیه شده در طبیعت آثار مخرب زیست محیطی را در پی دارد؛ در صورتیکه بتوان این پسماند را جایگزین بخشی ازسیمان مورد نیاز در تولید بتن کرد، می‌توان از آثار مخرب آن کاست. در این تحقیق پسماند زغالسنگ (کارخانه‌ی زغالشویی البرز مرکزی مازندران) پس از پودر کردن و رساندن ابعاد دانه‌ها به محدوده‌ی آیین نامه‌ای، جایگزین ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از وزن سیمان در مخلوط بتن غلتکی روسازی شد. مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی حاوی سیمان آمیخته (ترکیب سیمان و پودر پسماند زغالسنگ) مورد بررسی خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) در دوره‌های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که جایگزینی ۵ درصدی از پودر پسماند، سبب بهبود خواص مقاومتی مخلوط بتنی تا ۹۰ روز شده، ولی جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصدی از این پودر، مقاومت فشاری و کششی مخلوط بتن غلتکی روسازی را در سنین مختلف کاهش می‌دهد؛ همچنین با افزایش درصد جایگزینی پودر پسماند، زمان وی‌بی مخلوط نیز کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، پودر پسماند زغالسنگ، سیمان آمیخته، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

۱. مقدمه

نیاز به میلگرد گذاری، سرعت بالاتر اجرا و هزینه کمتر، سبب شده این مخلوط بتنی به عنوان روسازی مناسبی برای پارکینگ‌ها، بنادر، مناطق نظامی، شانه راه و بزرگراه‌ها به کار گرفته شود (ACI 325, 1995, National CP Tech Center, 2010). از پیدایش بتن غلتکی در دهه‌ی ۱۹۷۰ تا به امروز، کاربرد مناسب این نوع بتن در روسازی تحت

بتن غلتکی روسازی راه^۱ مخلوطی سفت و نسبتاً خشک از سنگدانه‌ها، مواد سیمانی و آب می‌باشد. نسبت به بتن معمولی، بتن غلتکی دارای تراکم بالاتر، دوام بیشتر، عدم

^۱ Roller Compacted Concrete Pavement

هایی که امروزه به عنوان مصالح جایگزین به کار برده می-شوند، شامل: خاکستر بادی، سرباره کوره آهنگدازی، سیلیکافوم و متاکائولن می‌باشند. سیمان‌های آمیخته شامل یک مخلوط سیمان پرتلند معمولی و مصالح جایگزینی که به طور طبیعی یا محصولی از مواد زائد غنی شده با سیلیکا می‌باشد و در واکنش با کلسیم هیدروکسید برای تبدیل به ژل کلسیم سیلیکات (C-S-H)، تعریف می‌شود (Activity Reports, 2010). سیمان‌های آمیخته دارای دمای هیدراتاسیون کم‌تر، کارایی بیشتر و مقاومت بالاتری نسبت به حملات شیمیایی در محیط‌های بازی هستند (Bhushan, 2010). به دلیل حجم زیاد انباشته شده- پسماند زغالسنگ در حاشیه کارخانه زغالشویی البرز مرکزی مازندران (شکل ۱)، مشکلات عدیده زیست محیطی برای محیط اطراف این کارخانه ایجاد کرده است. در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی استفاده از پودر خام پسماند زغالسنگ به عنوان جایگزین وزنی ۰، ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی سیمان در مخلوط بتن غلتکی پرداخته شده است. ابتدا رطوبت بهینه تعیین شد. دو مخلوط مینا با دو مقاومت طراحی ۲۸ روزه ۳۵ و ۴۵ مگاپاسکال (psi) ۵۰۰۰، ۶۰۰۰ (ACI 211, 2002)، انتخاب گردید. سپس، جهت بررسی تأثیر پودر پسماند در مخلوط‌های بتن غلتکی نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰*۱۵ سانتی متری (ASTM C1176, 1997) ساخته شد. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از زمان بتن‌ریزی در حمام آب با دمای ۲۵-۲۲ درجه سانتیگراد قرار داده شدند (شکل ۲). برای سنین مختلف عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، آزمایش-های مقاومت فشاری تک‌محوری (ASTM C39, 2004) و مقاومت کششی (ASTM C 496, 2004) تعیین شد.

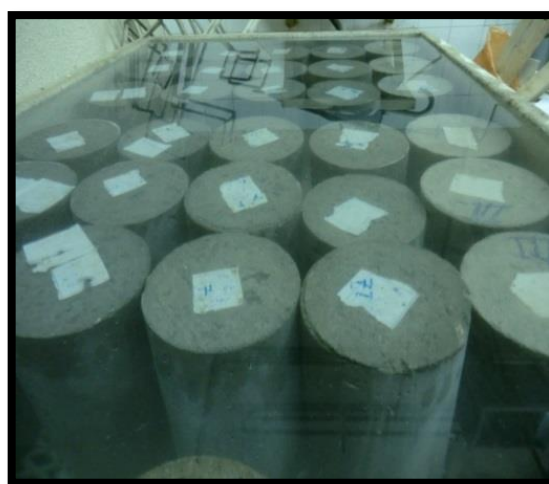
شرایط سخت آب و هوایی و بارگذاری سنگین به اثبات رسیده است (Indiana LTAP Center, 2010). بتن غلتکی را می‌توان به عنوان اساس رویه‌ی آسفالتی، مسیر عبور کامیون و لچکی بزرگراه‌ها به کار برد (PCA, 2005). با آغاز انقلاب صنعتی در سال ۱۷۵۰، استفاده از سوخت‌های فسیلی سبب شد تا غلظت گاز دی اکسید کربن در سال ۲۰۱۲ افزایش ۴۰ درصدی داشته باشد (Blasing, T.J., 2013; CO₂ concentration, 2013). تولید یک تن سیمان در حدود ۴ گیگا ژول انرژی مصرف می‌کند. هم چنین سبب آزاد سازی حدود یک تن دی‌اکسید کربن در اتمسفر زمین می‌گردد. پیش از سال ۲۰۰۰ به طور متوسط سالانه ۱/۶ میلیارد تن سیمان در دنیا تولید می‌شد که این میزان، باعث تولید حدود ۷٪ دی‌اکسید کربن موجود در اتمسفر گردید. (Malhotra, 1999, Mehta, 1999). طبق جدید ترین آمار، تولید جهانی سیمان پرتلند معمولی از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ میلادی رشد نسبی ۳۰ درصدی داشته و از ۲/۸۴ میلیارد-تن به رقم نگران‌کننده‌ی ۳/۷ میلیارد تن رسیده است (USGS, Mineral, 2010-2013). اگر این روند به همین شکل ادامه پیدا کند، در سال ۲۰۲۰ تولید جهانی به رقم ۵/۸ میلیارد تن خواهد رسید (USGS, 2009). استفاده از مواد سیمانی کمکی^۲، طراحی مخلوط‌های بتنی با درصد بهینه‌ی سیمان و ارتقای دوام پذیری بتن به عنوان موضوعات اصلی در راستای توسعه‌ی پایدار در صنعت بتن مطرح هستند (Mehta, 1999). استفاده از پوزولان‌ها، نیاز به عملیات حرارتی پر هزینه مشابه پخت کلینکر سیمان ندارد. همچنین سختی کمتر پوزولان‌ها سبب می‌شود انرژی کمتری صرف آسیاب نمودن مخلوط کلینکر با این مواد کمکی شود (Rafat, 2011). پوزولان-

² Supplementary Cementing Materials

دانه بندی خاکستر وجود دارد (Minnick, 1971). اتیس و همکاران مشخصات مقاومتی بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی غیر استاندارد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با جایگزینی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصدی این پوزولان با ۳ عیار سیمان (در دوره‌های عمل‌آوری ۱، ۳، ۲۸ روزه تا ۳ ماه) به این نتیجه رسیدند که عملکرد خاکستر بادی با جایگزینی ۱۵ درصدی سیمان، مشابه به مخلوط کنترلی در ۲۸ روزگی می‌باشد؛ حتی در بعضی موارد این عملکرد بهبود یافت. پس از ۹۰ روز از زمان عمل‌آوری، ۳۰ درصد جایگزینی این پسماند سبب کسب مقاومت بیشتر در مقایسه با مخلوط کنترلی شد (Atis, 2004). در سال ۲۰۱۴ چچی و همکاران، تأثیر استفاده از خاکستر حاصل از سوخت‌کک^۴ (به عنوان یک محصول ضایعاتی با نام اختصاری CFBC) بر مشخصات مقاومتی بتن غلتکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها CFBC را در ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی مصالح ریزدانه، تحت فشارهای مختلف ۲۵، ۵۰ و 75 g/cm^2 به کار بردند. CFBC در مخلوط بتن غلتکی جذب آب را افزایش داده و همچنین مقاومت فشاری، کششی و مقاومت در مقابل حمله‌ی سولفات‌ها را نیز بهبود بخشید. عکس‌های میکروسکوپی نمونه‌ها نشان داد که محصولات نهایی هیدراتاسیون، اترنژیت، ژل کلسیم‌سیلیکات و پرتلندایت می‌باشد. جایگزینی ۵۰ درصدی CFBC (با فشار 50 g/cm^2) به عنوان مصالح ریزدانه در بتن غلتکی، اثرات مثبتی در مقاومت فشاری، کششی و مقاومت در برابر حمله‌ی سولفات‌ها از خود نشان‌داد (Chi, 2014). حسامی و همکاران در سال ۲۰۱۴ خاکستر پوسته‌ی برنج را به عنوان پوزولان، در درصد‌های زوج ۱۲-۲، به عنوان جایگزین سیمان به کار گرفتند. آن-



شکل ۱. محل دپوی پسماند زغالسنگ کارخانه زغالشویی



شکل ۲. نمونه‌های بتن غلتکی در حوضچه آب

۲. مروری بر مراجع

نقش اساسی بتن در توسعه‌ی پایدار در از بین بردن پسماند تولید شده توسط بشر را در کمک به طبیعت و محیط زیست می‌توان جستجو کرد (Hailu, 2011). استفاده از مصالح پسماند همچون خاکستر بادی سبب کاهش جذب آب ملات و افزایش کارایی مخلوط بتنی می‌گردد (Stuart, 1980): البته هرچه ذرات خاکستر درشت‌تر باشند، اثر کاهش آب کمتر می‌گردد (Owens, 1979)؛ رابطه‌ی نزدیکی بین جذب آب مخلوط، LOI^3 و

^۴ Fluidized Bed Combustion Ash

^۳ Loss on Ignition

نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد پودر پسماند مقاومت فشاری، مقاومت در مقابل خوردگی و جذب آبی مشابه مخلوط کنترلی داشت. با جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصد زغالسنگ پسماند بجای ماسه، نتایج رضایت بخشی از نظر مقاومت مکانیکی حاصل شد (Cassiano, 2013). فریاس و همکاران در سال ۲۰۱۲ پسماند زغالسنگ را پس از پختن در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد طی ۲ ساعت فعال کردند و در ۱۰، ۲۰ درصد وزنی بعنوان بخشی از سیمان مورد استفاده قرار دادند. سیمان آمیخته حاصل از پسماند زغالسنگ فعال (ACW) سبب تغییر زمان عمل‌آوری نمی‌گردد؛ هرچندکه سبب کاهش مقاومت فشاری ملات می‌شود. علاوه بر بررسی خصوصیات سیمانی، سیمان آمیخته حاصله تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه برای بررسی مقاومت فشاری ملات انتخاب گردید. ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی سیمان توسط ACW، مقاومت فشاری ۷ روزه را افزایش، ولی مقاومت ۲۸ و ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد؛ این کاهش برای ۲۰ درصد جایگزینی، بیشتر گزارش شده است (Frías, 2012).

۳. مصالح

۳-۱. مصالح سنگی

مصالح سنگی در این تحقیق مطابق با محدوده‌ی دانه‌بندی پیشنهادی مؤسسه سیمان آمریکا (PCA, 2010) انتخاب شد (جدول ۱). مصالح درشت‌دانه طبق استاندارد ASTM C33 با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر، ملاک ارزیابی قرار گرفت. ماسه‌ی مصرفی گذرانده شده از الک ۴/۷۵ میلیمتر با ارزش ماسه‌ای ۸۰٪ به کار گرفته شد. حداکثر درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، به ۵ درصد محدود شده است (ASTM C33-03). تعیین نحوه توزیع دانه‌های سنگی بکار گرفته شده از طریق جدایش به کمک

ها همچنین جهت بررسی مشخصات مکانیکی در مخلوط بتن متخلخل، به صورت جداگانه مقداری الیاف شیشه‌ای، پروپیلنی و فلزی را به عنوان افزودنی مورد استفاده قرار دادند. نسبت‌های مختلف آب به سیمان، بررسی نفوذ پذیری، تخلخل، مقاومت فشاری، کششی و خمشی از دیگر ویژگی‌های این تحقیق می‌توان برشمرد (Hesami, 2014). مرنندی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش حداکثر تراکم در مخلوط بتن غلتکی، خاکستریادی را به عنوان جایگزین سیمان و مصالح سنگدانه‌ای در درصد‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ مورد استفاده قرار دادند. استفاده از خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان سبب تضعیف مقاومت در مقابل چرخه‌ی ذوب و یخبندان می‌شود؛ این در حالیست که جایگزینی آن به عنوان مصالح سنگدانه‌ای، این ویژگی را بهبود می‌بخشد (Mardani, 2013). از پسماند زغالسنگ در زمینه‌های مختلفی همچون ساخت مصالح ساختمانی (آجر)، جایگزینی به عنوان سیمان در تثبیت خاک، ساخت فندانسیون روسازی استفاده می‌شود. صنعت تولید زغال اثرات منفی زیست محیطی از جمله فرونشست زمین، آلودگی آب‌های جاری و آلودگی هوا را در پی دارد. تحقیقات نشان داده که با توجه به روند فعلی مصرف زغالسنگ، تمامی این ماده‌ی سوختی پرکاربرد، حداکثر تا ۵۰ سال آینده به اتمام می‌رسد؛ بنابراین در زمینه‌های معدنکاری و استخراج زغالسنگ بایستی از روش‌های سازگار با محیط زیست بهره‌جست (Zhengfu1, 2010). سال ۲۰۱۳ پسماند زغالسنگ بعنوان ریزدانه‌ی جایگزین ماسه در بتن بلوکی - روسازی مورد استفاده قرار گرفت. در نسبت آب به سیمان ۰/۳۹، پودر پسماند زغالسنگ به عنوان جایگزین ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصدی ماسه‌ی رودخانه‌ای طی ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد عمل‌آوری قرار گرفت. پس از ۲۸ روز،

استاندارد ASTM C127 برابر $2/51 \text{ gr/cm}^3$ محاسبه گردید. همچنین چگالی واقعی ریزدانه نیز طبق استاندارد ASTM C128 برابر $2/75 \text{ gr/cm}^3$ محاسبه شده است.

الک و بر اساس ACI 211 یا استاندارد ASTM C33 صورت گرفته شده است. مشخصات سنگ دانه‌های ریز و درشت طبق روش‌های تست C33، C127، C128، ASTM تعیین شده است. چگالی واقعی درشت‌دانه طبق

جدول ۱. درصد‌های عبوری از الک‌های استاندارد، برای دانه بندی استاندارد PCA و دانه بندی منتخب

اندازه چشمه یا شماره الک	۱in	۳/۴in	۱/۲in	۳/۸in	#۴	#۱۶	#۱۰۰	#۲۰۰
دانه بندی PCA	۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۷۰-۹۰	۷۰-۸۵	۴۰-۶۰	۲۰-۴۰	۶-۱۶	۲-۸
دانه بندی منتخب	۱۰۰	۹۸	۸۵	۷۵	۴۰	۲۰	۷	۲

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ و مقایسه با استاندارد ایران

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Blaine(cm ² /gr)
استاندارد ایران	>۲۰	>۶	<۶	۶۶-۶۲	<۵	<۳	۱-۰/۵	۲-۰/۴	-
سیمان نکا	۲۱/۹۰	۴/۸۶	۳/۳۰	۶۳/۳۳	۱/۱۵	۲/۱۰	۰/۵۶	۰/۳۶	۳۰۵۰

۲-۳. آب

در این تحقیق درصد رطوبت بهینه برای CW-I-0^۱ و برای CW-II-0، $4/8\%$ محاسبه شده است. ولیکن برای بررسی اثر مقدار مواد سیمانی، مشابه تحقیق سال ۲۰۱۰ واحدی فرد و همکاران (Vahedifard, 2010) با عنوان "ارزیابی تأثیرات مواد سیمانی بر روی عملکرد روسازی بتن غلتکی با سیمان کم"، درصد آب بهینه برای هر ۲ عیار سیمان به میزان $0/6$ درصد (یا w/c بهینه به علاوه $0/5$) افزایش داده شد. آب مصرفی در این تحقیق از آب شرب شهر بابل واقع در استان مازندران مورد استفاده قرار گرفت که فاقد هرگونه افزودنی و یا روان کننده‌ای است.

۳-۳. سیمان

سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان نکا (مازندران) بوده که با وزن مخصوص ویژه $3/14 \text{ gr/cm}^3$ و سطح ویژه (سطح بلین) $3050 \text{ cm}^2/\text{gr}$ می‌باشد. ترکیبات شیمیایی این سیمان در جدول ۲ آورده شده است. مقدار مواد سیمانی مصرفی در بتن غلتکی به صورت درصدی از وزن خشک مصالح تعریف می‌شود. در این تحقیق از ۲ درصد مواد سیمانی، 12% (264 Kg/m^3) و 14% (302 Kg/m^3) به کار برده شد که به ترتیب با علامتهای اختصاری CW-I-0 و CW-II-0 نامگذاری شدند.

۴-۳. پودر پسماند زغالسنگ

فرایند تولید زغالسنگ مشابه بسیاری از تولیدات صنعتی، کشاورزی و غیره، سبب تولید پسماند می‌گردد. با توجه به

^۱ CW-I-0: طرح اختلاط کنترلی ۱ با ۱۲٪ مواد سیمانی، که کلمه‌ی اول به معنی پودر پسماند، عدد لاتین I شماره‌ی طرح اختلاط و عدد دوم درصد جایگزینی وزنی پودر پسماند زغالسنگ می‌باشد. CW-II-0: طرح اختلاط کنترلی شماره ۲ با ۱۴٪ مواد سیمانی، که کلمه‌ی اول به معنی پودر پسماند، عدد لاتین II شماره‌ی طرح اختلاط و عدد دوم درصد جایگزینی وزنی پودر پسماند زغالسنگ می‌باشد.

می‌شوند (ادیبی، ۱۳۹۱). امروزه تحقیقات نشان داده که استفاده از این پسماند در لایه‌ی اساس و زیر اساس راه‌ها که به واکنش‌پذیری و مقاومت کمتری نسبت به لایه‌ی رویه نیازمند است؛ منطقی و اجرایی می‌باشد. (Kinuthia, 2009).
برای تحقیق حاضر پودر پسماند از نقاط مختلف محل دپو، جمع‌آوری شده و پس از خشک کردن و خردایش اولیه، پسماند زغالسنگ به ابعاد ریز تر از ۷۵ میکرون تبدیل شد (شکل ۳).

راندمان پایین کارخانجات زغالشویی (۵۵-۴۵٪) در ایران، ایجاد مقایر زیاد پسماند زغال دور از انتظار نیست. پسماند تولیدی در نزدیکی کارخانه دپو، و سبب ایجاد مشکلات عدیده‌ی زیست محیطی می‌گردد. تا به امروز مقدار دپو جمع‌آوری شده کارخانه البرز مرکزی، به رقم نگران‌کننده‌ی ۲ میلیون تن رسیده است (شکل ۱). دامپ-های باطله زغالسنگ معادن البرز مرکزی (که در جدول ۳ ترکیب شیمیایی آن آورده شده است). در اثر وقوع سیلاب و وجود محیط‌های بازی ایجاد شده، سبب ایجاد آلودگی‌های زمین‌های شالیزاری پایین دست محل دامپ

جدول ۳. آنالیز شیمیایی پودر پسماند زغالسنگ توسط آزمایش پراش اشعه ایکس (XRF^۱) طبق استاندارد ASTM-E1621-05

LOI	TiO ₂	MnO	k ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	AL ₂ O ₃	Sio ₂	ترکیب
۴۰/۹۶	۰/۹۸۳	۰/۰۲	۲/۳۹	۰/۲۷	۰/۵۱۳	۰/۸۶۸	۳/۸۹	۱۴/۵۳	۳۴/۸	درصد آنالیز



(ج) پس از خردایش ثانویه و پودر کردن



(ب) پس از خشک کردن و خردایش اولیه

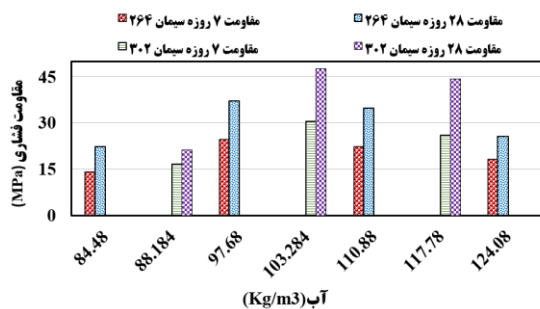


(الف) پیش از انتقال به محل دپو

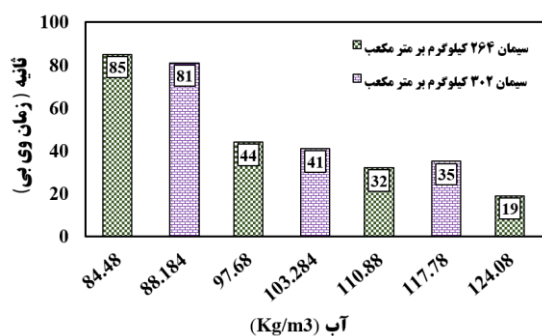
شکل ۳. پودر پسماند زغالسنگ

^۱ X-Ray Diffraction

های مواد سیمانی به کار گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. پس از ساخت نمونه‌ها، برای عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه در حمام آب قرار داده شدند. پس از ۷ و ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها جهت تعیین رطوبت بهینه‌ی مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند (شکل ۶). در جدول ۴ مشخصات مخلوط‌های مینا (با دانه بندی مشابه، ولی مقدار وزنی مواد سیمانی متفاوت) با درصد مواد سیمانی ۱۲٪ و ۱۴٪ مورد ارزیابی در این تحقیق و درصد-های جایگزینی پودر پسماند زغالسنگ با سیمان آورده شده است. در مجموع ۱۶۲ نمونه استوانه‌ای که شامل طرح‌های اختلاط کترلی CW-I-0 و CW-II-0، ۷ ترکیب جایگزینی پودر پسماند زغالسنگ با سیمان ساخته شد. از مجموع ۷ ترکیب، ۴ ترکیب (با درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰) مربوط به CW-I (۱۲٪ مواد سیمانی) و ۳ ترکیب (با درصدهای جایگزینی ۵، ۱۰ و ۲۰) مربوط به CW-II (۱۴٪ مواد سیمانی) می‌باشند.



شکل ۵. مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه (طرح اختلاط)



شکل ۶- زمان وی بی در مقادیر مختلف آب

۴. طرح اختلاط و نحوه ساخت نمونه‌های

بتن غلتکی

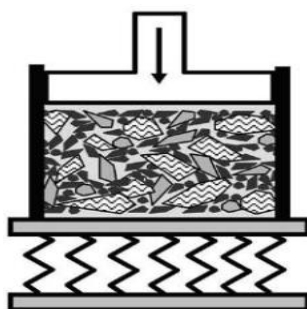
برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی دو روش طرح اختلاط وجود دارد. روش اول، وزن مخصوص حداکثر یا همان تراکم خاک، جهت رسیدن به رطوبت بهینه (ASTM D 558, 2003)، و روش دوم حداکثر-مقاومت مطلوب، ملات بهینه یا روانی مطلوب می‌باشد (ACI 207.5R, 1999). در این تحقیق از روش روانی-مطلوب برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی استفاده شده-است. ساخت نمونه‌ها با استوانه‌های ۳۰*۱۵ سانتیمتری در ۳ لایه، بر روی میز لرزان و با اعمال سربار ۹/۱ کیلوگرمی (شکل ۴-الف و ب) انجام شد (ASTM C1176, 1992) پس از انجام محاسبه‌های طرح اختلاط، برای هر ۲ درصد مواد سیمانی^۱ از چند مقدار آب برای تعیین رطوبت بهینه استفاده شد. تعداد ۸۴ نمونه‌ی استوانه‌ای ساخته شد. کارایی بتن غلتکی با انجام آزمایش وی بی توسط میز لرزان (شکل ۴-ج) تعیین شده است. مخلوط‌هایی که در محدوده‌ی زمان وی بی ۳۰ تا ۵۵ ثانیه-ای قرار داشتند؛ به عنوان مصالح مورد تأیید به کار گرفته شدند (ASTM C1176, 1998, ASTM C 1170, 1998). افزایش میزان آب مخلوط رابطه‌ی عکس با زمان وی بی مخلوط بتن غلتکی دارد. در بتن غلتکی حداکثر تراکم مخلوط، متناظر با پرشدن تمام فواصل بین سنگدانه‌ها است؛ که خروج شیره‌ی ملات به صورت رینگ یا حلقه‌ای در اطراف سربار نشان‌دهنده‌ی رسیدن به این تراکم است (ASTM C1176, 1992). شکل ۵ تأثیر افزایش آب مخلوط بر کاهش زمان وی بی برای درصد-

^۱ مواد سیمانی(٪) = {وزن مواد سیمانی ÷ (وزن مواد سیمانی +

وزن مصالح سنگدانه‌ای خشک شده)} * ۱۰۰



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۴. (الف) نحوه مهار قالب استوانه‌ای بر روی میز لرزان، (ب) مکانیزم ساخت نمونه بر روی میز لرزان، (ج) دستگاه آزمایش

وی-بی

جدول ۴. مشخصات نمونه‌های بتن غلتکی مورد استفاده در این تحقیق

مخلوط	مواد سیمانی (Kg/m^3)		آب (Kg/m^3)	w/cm	ماسه (Kg/m^3)	شن (Kg/m^3)
	پودر پسماند ^{۱۱}	سیمان پرتلند				
CW-I-0	۲۶۴	۰	۱۱۰/۸۸	۰/۴۲	۷۵۵	۱۱۳۲
CW-I-5	۲۵۰/۸	۱۳/۲	۱۱۰/۸۸	۰/۴۲	۷۵۵	۱۱۳۲
CW-I-10	۲۳۷/۶	۲۶/۴	۱۱۰/۸۸	۰/۴۲	۷۵۵	۱۱۳۲
CW-I-20	۲۱۱/۲	۵۲/۸	۱۱۰/۸۸	۰/۴۲	۷۵۵	۱۱۳۲
CW-I-30	۱۸۴/۸	۷۹/۲	۱۱۰/۸۸	۰/۴۲	۷۵۵	۱۱۳۲
CW-II-0	۳۰۲	۰	۱۱۷/۷۸	۰/۳۹	۷۳۶	۱۱۱۴
CW-II-5	۲۸۶/۹	۱۵/۱	۱۱۷/۷۸	۰/۳۹	۷۳۶	۱۱۱۴
CW-II-10	۲۷۱/۸	۳۰/۲	۱۱۷/۷۸	۰/۳۹	۷۳۶	۱۱۱۴
CW-II-20	۲۴۱/۶	۶۰/۴	۱۱۷/۷۸	۰/۳۹	۷۳۶	۱۱۱۴

۵. آزمایش‌ها و تفسیر نتایج

طبق استاندارد ASTM جهت تعیین مقاومت فشاری نیروی قائم بایستی با سرعت ۰/۱۵-۰/۳۵ مگاپاسکال بر ثانیه (۲۰-۵۰ psi/s) به نمونه‌ها اعمال شود (ASTM C 39, 2003) در تحقیق حاضر، از سرعت ۰/۳۰ مگا پاسکال بر ثانیه استفاده شد.

برای انجام آزمایش‌های فشاری و کششی، دستگاه Leighton Buzzard England LU7 4WG مورد استفاده قرار گرفت.

۵-۱. مقاومت فشاری

پس از عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، نمونه‌های بتنی جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری قرار داده شدند (شکل ۷).



شکل ۷. نمونه بتن غلتکی پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری

۲-۵. آزمایش کشش غیرمستقیم

جهت محاسبه‌ی مقاومت کششی نمونه استاندارد استوانه-ای، سرعت مجاز بارگذاری در محدوده‌ی $0.7-1/4 \text{ MPa/min}$ ($100-200 \text{ psi/min}$) قرار دارد (ASTM C 496, 2004). در تحقیق حاضر، از سرعت $1/0 \text{ MPa/min}$ استفاده شد.

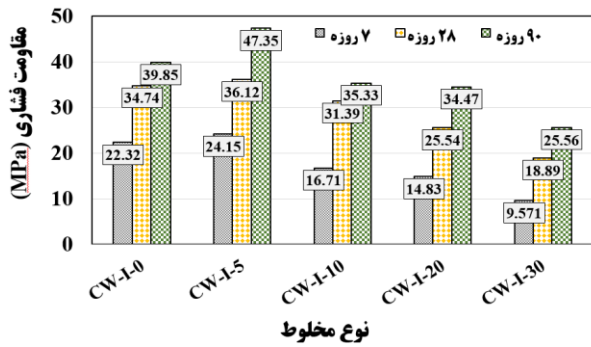
۳-۵. تفسیر نتایج

شکل های ۸ و ۹ روند تغییرات مقاومت فشاری مخلوط-های بتن غلتکی این تحقیق در دوره‌های عمل‌آوری مختلف را نشان می‌دهند. با توجه به این اشکال، جایگزینی ۵ درصدی پودر پسماند نه تنها کاهش مقاومت فشاری نسبت به مخلوط کنترلی مشاهده نشد، بلکه در دوره‌های عمل‌آوری مختلف این پارامتر در مخلوط-CW-I-5، از $7/86\%$ تا $12/15\%$ افزایش نسبی مقاومت فشاری هم حاصل شد.

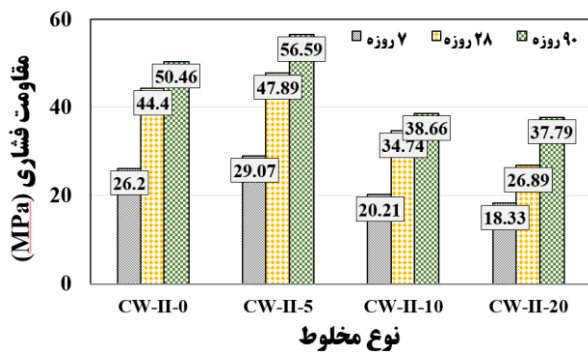
برای بررسی اثر پسماند زغالسنگ بر مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن غلتکی، تغییرات نسبی مخلوط‌های حاوی پودر پسماند زغالسنگ نسبت به مخلوط کنترلی محاسبه شد (شکل های ۱۰ و ۱۱).

با توجه به شکل ۵، مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی مخلوط بتن غلتکی طرح اختلاط در رطوبت بهینه‌ی^۱ خود برای CW-I برابر $24/77 \text{ MPa}$ و برای CW-II برابر $30/63 \text{ MPa}$ می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، پس از ۷ روز عمل‌آوری مقاومت فشاری بتن غلتکی برای نمونه-های حاوی ۵٪ پودر پسماند، برای مخلوط CW-I-5 برابر $24/15 \text{ MPa}$ و CW-II-5 برابر $29/07 \text{ MPa}$ می‌باشد. این مقادیر از نقطه‌ی پیک مخلوط کنترلی طرح اختلاط (شکل ۵) کمتر بوده که این میزان کاهش نسبی مقاومت برای مخلوط CW-I-5 نسبت به CW-I برابر $2/5\%$ و CW-II-5 نسبت به CW-II برابر $5/1\%$ می‌باشد. در ادامه فرایند هیدراتاسیون، پس از ۲۸ روز عمل‌آوری با توجه به شکل ۵ عدد مقاومت فشاری مخلوط بتن غلتکی طرح اختلاط در رطوبت بهینه، برای CW-I برابر $37/23 \text{ MPa}$ و برای CW-II برابر $47/54 \text{ MPa}$ مشاهده شد. این درحالیست که مقاومت فشاری مخلوط CW-I-5 برابر $40/12 \text{ MPa}$ و CW-II-5 برابر

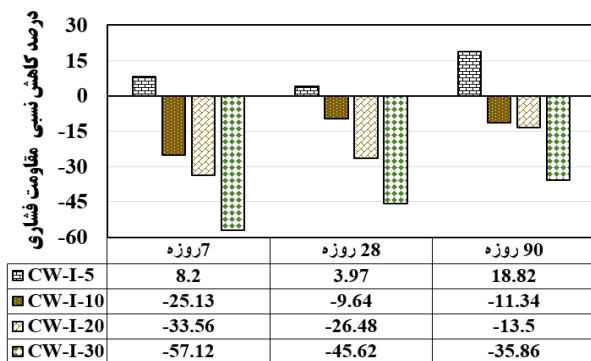
^۱ توجه به این نکته ضروری است که با توجه به بند ۳-۲ و شکل ۵، میزان رطوبت بهینه مخلوط کنترلی CW-I برابر $97/68 \text{ Kg/m}^3$ و CW-II برابر $103/284 \text{ Kg/m}^3$ است. این درحالیست که در مورد مخلوط های CW-I-0 و CW-II-0 و درصد‌های جایگزین پودر پسماند، میزان آب مخلوط $110/88 \text{ Kg/m}^3$ و $117/78 \text{ Kg/m}^3$ لحاظ شده است.



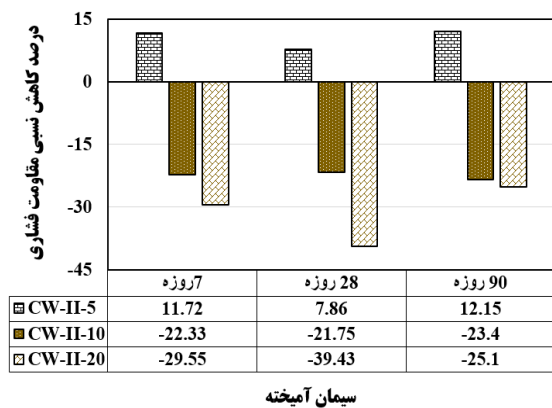
شکل ۸. تغییرات مقاومت فشاری (CW-I)



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری (CW-II)



شکل ۱۰. روند تغییرات نسبی مقاومت فشاری (CW-I)

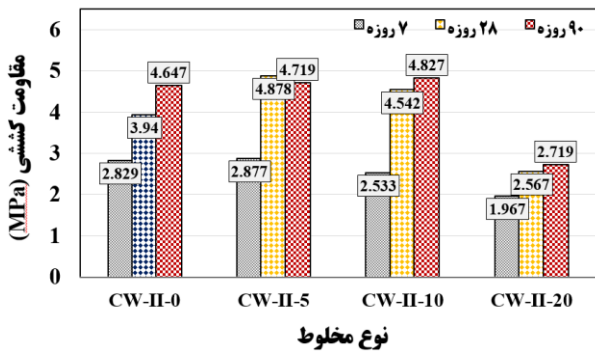


شکل ۱۱. روند تغییرات نسبی مقاومت فشاری (CW-II)

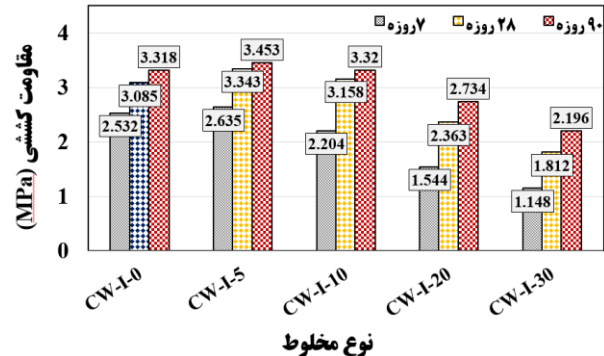
۴۹/۰۸۹ MPa می‌باشد (شکل‌های ۸ و ۹)، که این مقادیر از نقطه‌ی پیک مخلوط کنترلی طرح اختلاط (شکل ۵) بیشتر می‌باشند. لذا تنها پارامتری که در این میان نسبت به عمل‌آوری ۷ روزه تغییر کرده است فرایند هیدراتاسیونی بود که از ۷ تا ۲۸ روزگی توسط ۵ درصد پودر پسماند زغالسنگ انجام پذیرفت. در نتیجه کاهش نسبی به افزایش نسبی نسبت به مقدار پیک CW-I، ۷/۷۶٪ و CW-II، ۴/۹۴٪ تغییر یافت. لذا تنها توجیه افزایش مقاومت مخلوط حاوی ۵ درصد پودر با گذشت زمان پوزولانیسته یا فعالیت پوزولانی مخلوط می‌باشد. فعالیت پوزولانی ایجاد شده در مخلوط‌های بتنی حاوی سیمان‌های آمیخته‌ی این تحقیق را می‌توان در واکنش بین پودر پسماند با کلسیم هیدروکسید مازاد واکنش‌های هیدراتاسیون کلینگر سیمان دانست که این فعالیت در دراز مدت تکمیل می‌گردد. راه دیگر برای اثبات فعالیت پوزولانی مخلوط می‌تواند توجه به روند افزایش مقاومت ۲۸ تا ۹۰ روزه برای ۲ درصد سیمان موجود باشد. از آنجائیکه فعالیت پوزولانی فرایندی زمانبر است، کاهش شدید تفاوت مقاومت ۹۰ روزه در ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی با ۱۴٪ مواد سیمانی نسبت به مقاومت ۲۸ روزه آن دانست. با توجه به شکل ۹ تفاوت مقاومت مخلوط CW-II-20 و CW-II-10 پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ۷/۸۵ MPa است؛ این در حالیست که این تفاوت در عمر ۹۰ روزه‌ی عمل‌آوری به کمتر از ۱ مگا پاسکال کاهش می‌یابد (به طور مشابه برای شکل ۸). به عنوان توجیهی دیگر برای بهبود عملکرد مکانیکی (مقاومت فشاری و کششی) مخلوط‌های بتنی حاوی پسماند زغالسنگ، می‌توان به وجود فلزات سنگین چون کادمیم و نیکل در خاکستر زغال اشاره کرد (Haibin, 2010).

شکل های ۱۲-۱۵ روند تغییرات مقاومت کششی و کاهش نسبی مخلوط‌های حاوی پودر پسماند زغالسنگ نسبت به مخلوط کنترلی این تحقیق را در دوره‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهند. مقاومت کششی بسته به کیفیت دانه‌بندی، سن و مقدار سیمان عددی بین ۷٪ الی ۱۳٪ مقاومت فشاری می‌باشد. ولی برای بتن غلتکی مقاومت کششی معمولاً کمتر از بتن‌های معمولی است. این امر عموماً برای بتن‌هایی با کارایی پایین صادق است. مقاومت کششی برای ارزیابی جدایش دانه‌ها، یکنواختی سنگدانه‌ها و رفتار درزه‌ها در روسازی بتنی نیز کاربرد دارد (Amarnath, 2011). مقاومت کششی (شکل ۱۲) در ۵٪ جایگزینی پودر پسماند بهبود مقاومت کششی (شکل ۱۳) از ۱/۴٪ تا ۸/۳۶٪ برای CW-I-5 و از ۱/۵۵٪ تا ۲۳/۸۱٪ برای

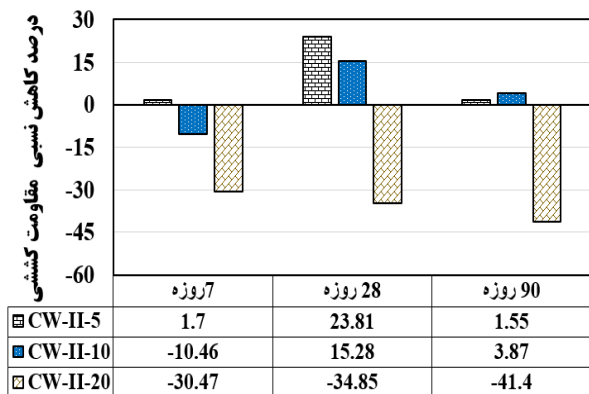
شکل های ۱۲-۱۵ روند تغییرات مقاومت کششی و کاهش نسبی مخلوط‌های حاوی پودر پسماند زغالسنگ نسبت به مخلوط کنترلی این تحقیق را در دوره‌های عمل‌آوری مختلف نشان می‌دهند. مقاومت کششی بسته به کیفیت دانه‌بندی، سن و مقدار سیمان عددی بین ۷٪ الی ۱۳٪ مقاومت فشاری می‌باشد. ولی برای بتن غلتکی مقاومت کششی معمولاً کمتر از بتن‌های معمولی است. این امر عموماً برای بتن‌هایی با کارایی پایین صادق است. مقاومت کششی برای ارزیابی جدایش دانه‌ها، یکنواختی سنگدانه‌ها و رفتار درزه‌ها در روسازی بتنی نیز کاربرد دارد (Amarnath, 2011). مقاومت کششی (شکل ۱۲) در ۵٪ جایگزینی پودر پسماند بهبود مقاومت کششی (شکل ۱۳) از ۱/۴٪ تا ۸/۳۶٪ برای CW-I-5 و از ۱/۵۵٪ تا ۲۳/۸۱٪ برای



شکل ۱۴. تغییرات مقاومت کششی (CW-II)

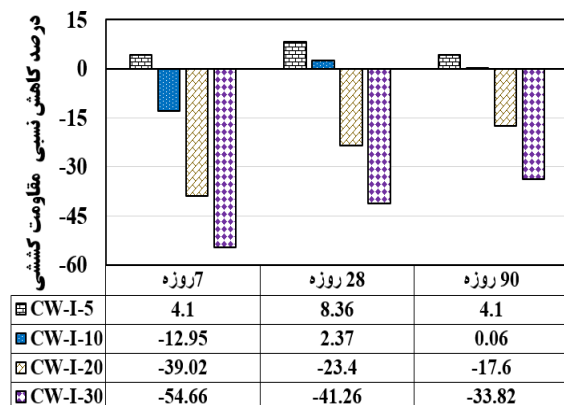


شکل ۱۲. تغییرات مقاومت کششی (CW-I)



سیمان آمیخته

شکل ۱۵. روند تغییرات نسبی مقاومت کششی (CW-II)



سیمان آمیخته

شکل ۱۳. روند تغییرات نسبی مقاومت کششی (CW-I)

۵-۳-۱. تعیین درصد مجاز

مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی راه عمدتاً در مشخصات فنی بیش از ۲۷/۶ مگا پاسکال در عمر ۲۸ روزهی بتن (۴۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) قید می‌گردد (ACI 325, 1995). با توجه به محدودیت مقاومت فشاری ۲۷/۶ مگاپاسکالی امکان استفاده از **CW-I-10** با مقاومت فشاری ۲۸ روزهی ۳۱/۳۹ مگاپاسکال، و **CW-II-20** با مقاومت ۲۸ روزهی ۳۴/۷۴ مگاپاسکالی وجود دارد. توجه به این نکته ضروری است که رسیدن به یک مقاومت خاص برای روسازی با استفاده از این مواد جایگزین سیمان سبب افزایش زمان عمل‌آوری و در نتیجه کاهش نسبی مقاومت فشاری و کششی در سنین عمل‌آوری کمتر از ۲۸ روزه، همچنین افزایش آن در سنین بالا می‌گردد.

۶. کاربرد محیط زیستی و جانبی پودر

پسماند زغالسنگ

به لحاظ عملی نه تنها با به کار بردن این پودر به عنوان جایگزین سیمان و ماسه، سبب حذف این پسماند از طبیعت شد، بلکه برای صنعت تولید سیمان به منظور کاهش میزان تولید سیمان ب لحاظ کاهش گاز CO₂ تولیدی هم می‌تواند حائز اهمیت باشد. برای ایجاد دمای ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد نه تنها به سوخت فسیلی و زغالسنگ زیادی نیاز است؛ بلکه کره‌ی زمین اگر با همین روند انتشار گاز CO₂ و دیگر گازهای گلخانه‌ای پیش برود، دمای سطحی زمین در سال ۲۰۴۷ بسیاری از اکوسیستم‌ها و روند زندگی ۳ میلیارد انسان در تمام دنیا را تحت تاثیر قرار خواهد داد (Mora, 2013). شکل ۱۶ سطح داخلی نمونه‌های شکسته شده‌ی آزمایش کشش مستقیم را نشان می‌دهد. تأثیر استفاده از پودر پسماند بر افزایش تیرگی مخلوط بتن غلتکی به دلیل تفکیک رنگ ایجاد شده، می‌توان برای مجزا کردن خطوط کمکی سبقت یا شانه‌ی راه از جسم اصلی راه مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱۶. افزایش تیرگی نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش میزان پودر پسماند زغالسنگ

۷. نتیجه گیری

- استفاده از پودر ضایعاتی زغالسنگ سبب کاهش کارایی بتن و افزایش زمان وی‌بی می‌گردد.
- درصد کاهش نسبی مقاومت فشاری بتن غلتکی با افزایش زمان عمل‌آوری (۹۰-۲۸) برای هر ۲ درصد مواد سیمانی کاهش می‌یابد. این روند کاهش درصد نسبی مقاومت فشاری و کششی را در فعالیت

- بررسی خاصیت پوزولانی و جذب آب مخلوط بتن غلتکی با سیمان آمیخته حاکی از رضایت‌بخش و عملی بودن استفاده از پودر پسماند به عنوان جایگزین کننده‌ی سیمان است.

- پوزولانی و پوزولانیسته‌ی پودر ضایعاتی می توان جستجو کرد.
- با توجه به محدودیت ۲۷/۶ مگاپاسکالی مقاومت، کاربرد پودر پسماند برای CW-I، تا ۱۰٪ و برای مخلوط‌های CW-II تا ۲۰٪ امکان پذیر است.
 - بیشترین کاهش نسبی مقاومت فشاری، پس از گذشت ۷ روز و کمترین کاهش پس از ۹۰ روز مشاهده شد.
 - بر خلاف مقاومت فشاری که روند کاهشی با ۱۰٪ جایگزینی پودر ضایعاتی شروع شد، روند کاهشی مقاومت کششی با جایگزینی ۲۰٪ گزارش شد.
 - در جایگزینی ۵ و ۱۰ درصدی پودر پسماند، تغییرات کاهش مقاومت کششی در عمل‌آوری ۷ تا ۲۸ روز (برای هر ۲ درصد مواد سیمانی) به صورت افزایشی و سپس کاهشی می‌باشد، ولی برای CW-I و در جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصدی، نرخ تغییرات کاهش مقاومت به صورت صعودی خواهد بود.
 - ۲۰٪ جایگزینی CW-II نرخ کاهش مقاومت به صورت نزولی خواهد بود.
 - کمترین کاهش نسبی مقاومت کششی، پس از گذشت ۹۰ روز (برای هر ۲ درصد سیمان)، و بیشترین کاهش نسبی مقاومت کششی پس از ۷ روز (برای CW-I در ۳۰ درصد جایگزینی) ۵۴/۶۶-٪ مشاهده شد.

۸. مراجع

- نبی اله ادیبی، مرتضی اصائلو، مهدی رحمانپور، بررسی اثرات زیست محیطی دامپ‌های باطله معادن زغال‌سنگ کارمزد، اولین کنگره ملی زغال‌سنگ، ۸-۱۰ شهریور ماه ۱۳۹۱، دانشگاه مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- ACI Committee 207.5R-99, (1999) "Roller-compacted mass concrete", American Concrete Institute.
- ACI Committee 211(2002) "Guide for selecting proportions for no-slump concrete", American Concrete Institute, January 11, ACI 211.3R-02.
- ACI Committee 325 (1995) "Report on roller compacted concrete pavement", American Concrete Institute, pp.3-15, ACI 325.10R-95.
- Activity Reports, Brussels: European Cement Association. Accessed August 15, 2010. <http://www.cembureau.be/activity-reports>.
- Ali Mardani-Aghabaglou, Özge Andıç-Çakir, Kambiz Ramyar, "Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method.", *Cement & Concrete Composites* 37, 259-266, 2013.
- Amarnath Yerramala, K. Ganesh Babu, 2011, "Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete", *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 1057-1062.
- ASTM C1176- 91 (1998) (Reapproved 1998) "Standard Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table". USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C1170- 91 (1998) (Reapproved 1998) "Standard test methods for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table". USA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C39. Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*; 2004.
- ASTM C496. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Annual Book of ASTM Standards*; 2004.
- ASTM D558-03,(2003) "Standard test method for moisture-density (Unit Weight) Relations of Soil-Cement Mixtures". USA: American Society for Testing and Materials.
- Bhushan, Chandra. 2010. *Challenge of the New Balance*. New Delhi: Center for Science and Environment.
- Biruk Hailu, 2011, "Bagasse ash as a cement replacing material." Master of science Thesis, Addis Ababa Institute of Thechnology Departement of Civil Engineering.
- Blasing, T.J. (February 2013), Current Greenhouse Gas Concentrations, doi:10.3334/CDIAC/atg.032, on CDIAC 2013, retrieved 2012-09-26, on CDIAC 2013.
- Cassiano Rossi dos Santos, Juarez Ramos do Amaral Filho, Rejane Maria Candiota Tubino, Ivo André Homrich Schneider, "Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Blocks for Paving", *Geomaterials*, 2013, 3, 54-59. <http://dx.doi.org/10.4236/gm.2013.32007> Published Online April 2013 (<http://www.scirp.org/journal/gm>)

- C.D. Atis, U.k. Sevim, F. Ozcan, C. Bilim, O. Karahan, A.H. Tanrikulu, A. Eksi , Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash, *Material Letters* 58, (2004), 1446-1450.
- Farshid Vahedifard, Mahmoud Nili, Christopher L. Meehan, "Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement.", *Construction and Building Materials* 24 (2010) 2528–2535.
- Haibin L, Zhening L. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China. *Res Con Rec* 2010;54:1331–40.
- Indiana LTAP Center, Author(s): Kyung-Joon Shin, PhD, Purdue University and Neal Carboneau, P.E., Purdue University, Indiana LTAP, "The Indiana Local Technical Assistance Program Roller Compacted Concrete Pavement Manual For Local Government Agencies." November 2010.
- Kinuthia J, Nidzam R. Effect of slag and siliceous additions on the performance of stabilized coal waste backfill. *World Coal Ash 2009 Conf.* Lexington, KY, USA., 2009.
- K.D. Stuart, D.A. Anderson, P.D. Cady, Compressive strength studies of Portland cement mortars containing fly ash and superplasticizers. *Cem. Concr. Res.* 10, 823–832 (1980).
- L.J. Minnick, W.C. Webster, E.J. Purdy, Predictions of the effect of fly ash in Portland cement mortar and concrete. *J. Mater.* 6, 163–187 (1971)
- M. Frías , M.I. Sanchez de Rojas, R. García, A. Juan Valdés, C. Medina, 2012, "Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement", *Cement & Concrete Composites* 34, p678-683.
- Malhotra, V. M., "Making Concrete Greener with Fly Ash," *Concrete International*, V. 21, No. 5, May 1999, pp. 61-66.
- Maochieh Chi, Ran Huang, "Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete.", *Cement & Concrete Composites* 45 (2014) 148–156.
- Mehta, P. K., "Concrete Technology for Sustainable Development," *Concrete International*, V. 21, No. 11, Nov. 1999, pp. 47-53.
- Mora, C (2013). "The projected timing of climate departure from recent variability". *Nature* 502: 183–187.
- National CP Tech Center, Author(s): Dale Harrington, P.E., Snyder and Associates, Inc. Fares Abdo, P.E., Portland Cement Association, Chetan Hazaree, Iowa State University, Manual, "Guide for Roller Compacted Concrete Pavements." August 2010.
- PCA (2005) Roller-Compacted Concrete Pavements for Highways and Streets, Skokie, Illinois.
- P.L. Owens, Fly ash and its usage in concrete, *Concr. J. Concr. Soc.* 13: 21–26 (1979).
- P.K.Mehta, "Concrete Technology for Sustainable Development", *Concrete International* Vol.21. 1999 ,pp 47-53.
- Rafat Siddique, Mohammad Iqbal Khan, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011, "Supplementary Cementing Materials", ISBN 978-3-642-17865-8.
- Saeid Hesami, Saeed Ahmadi, Mahdi Nematzadeh, "Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement.", *Construction and Building Materials* 53 (2014) 680–691.
- The most recent preliminary estimate of global monthly mean CO2 concentration (as of May 2013) is 396.71 ppm: (Ed Dlugokencky and Pieter Tans, NOAA/ESRL.
- U.S. Department of the Interior USGS. Mineral commodity summaries 2010. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey; 2010-2013.
- USGS 2009; CEMBUREAU 2009; CEMBUREAU 2008; Tongbo 2010; Confederation of Indian Industry 2010S.
- Zhengful B., Hilary I., John D., Frank O., Sue S., (2010), "Environmental issues from coal mining and their solutions", *Mining Science and Technology*, Vol. 20, pp 0215–0223.