

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع‌السیر بدون بالاست

حمید جهان‌بخش*، استاد مدعو، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

محمد حسین مبینی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران

صادق قوامی جمال، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

ایران، تهران

فریدون مقدس‌نژاد، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

Email: h.jahanbakhsh@lecturer.usc.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۰۲ - پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۵

چکیده

خصوصیات میرایی و ترک‌خوردگی ملات قیر امولسیون- سیمان به عنوان یک لایه‌ی حیاتی در راه آهن بدون بالاست، جهت تحمل لرزش‌ها و تغییر شکل‌های حاصل از بارگذاری قطار، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. به دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایند تولید سیمان، در سال‌های اخیر، محققین به دنبال مصالح جایگزین سیمان با آلودگی کمتر و صرفه‌ی اقتصادی بوده‌اند. در این پژوهش، تأثیر استفاده از دو ماده جایگزین سیمان در ملات قیر امولسیون- سیمان شامل خاکستر بادی و نیز سرباره کوره آهن‌گدازی، در کنار غبار کوره سیمان، بر خصوصیات عملکردی و ترک‌خوردگی ملات ارزیابی شده است. آزمون‌های استقامت فشاری، استقامت کششی غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و نیز خمش نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان داد که جایگزینی ۳۰٪ از سیمان با خاکستر بادی، به صورت قابل توجهی استقامت فشاری و نیز استقامت کششی غیرمستقیم ملات را بهبود می‌بخشد. مطابق نتایج آزمون حساسیت رطوبتی، تمام ملات‌های ساخته شده نسبت استقامت کششی غیرمستقیم بیش از ۸۰٪ داشتند که معیار آئین‌نامه را تأیید نموده است. نتایج آزمون ترک‌خوردگی نیز نشان داد که جایگزینی ۳۰٪ از سیمان با سرباره کوره آهن‌گدازی توانایی مقاومت ملات در برابر ترک‌خوردگی را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود داده است. همچنین، جایگزینی ۵۰٪ سیمان با ۳۰٪ مواد جایگزین سیمان و نیز ۲۰٪ ماده فعال کننده نشان از این داشت که ملات‌های حاصل استقامت فشاری مناسب، قابلیت مقابله با شروع و نیز رشد ترک در دمای میانی و نیز استقامت مناسبی در برابر خرابی رطوبتی در مقایسه با ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی ۱۰۰٪ سیمان از خود نشان داده‌اند. در نهایت، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ملات‌های معرفی شده در این پژوهش می‌توانند به عنوان ملات قیر امولسیون- سیمان دوست‌دار محیط‌زیست، توانایی کافی در تحمل بارهای وارده از قطار و شرایط آب‌وهوایی را داشته باشند.

واژه‌های کلیدی: ملات قیر امولسیون- سیمان، غبار کوره سیمان، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، ترک‌خوردگی

۱. مقدمه

لایه‌های معمول در مسیر راه‌آهن‌های پُرسرعت شامل یک دال بتنی قرار گرفته در بالای یک بستر بتنی، با یک لایه ملات بین آن‌ها، برای کمک به میرایی سیستم است. ملاتی که مابین بستر و دال بتنی فوقانی مورد استفاده قرار می‌گیرد ملات قیر امولسیون- سیمان^۱ نام دارد. این ملات جزء کلیدی سیستم خطوط ریلی پُرسرعت بدون بالاست راه‌آهن می‌باشد و خواص مکانیکی آن (مانند مقاومت، سختی و میرایی) نقش مهمی در یک سواری نرم و ایمن دارند. ملات قیر امولسیون- سیمان متشکل از اجزای کلی نظیر سیمان پرتلند، قیر امولسیون، آب، ماسه و افزودنی‌های شیمیایی است (پنگ و همکاران، ۲۰۱۵). این ملات، به دلیل نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری، ضخامت سازه‌ای کمتر، کاهش بار مرده، کاهش ابعاد سازه و نیز ضریب اطمینان بیشتر، به صورت گسترده‌ای در لایه‌های راه‌آهن سریع‌السیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه در صورت استفاده از لایه ملات قیر امولسیون- سیمان هزینه اولیه ساخت افزایش می‌یابد، اما با استفاده از آن هزینه چرخه عمر زیرسازی راه‌آهن سریع‌السیر نسبت به لایه سنتی دارای بالاست به صورت قابل توجهی کمتر خواهد بود (شی و همکاران، ۲۰۱۴). تمام موارد ذکر شده باعث شده که خصوصیات عملکردی این لایه و بهبود آن مورد توجه محققین بسیاری قرار گیرد.

ملات قیر امولسیون- سیمان هم از استقامت سیمان پرتلند و هم از شکل‌پذیری قیر بهره می‌برد که منجر می‌شود خصوصیات عملکردی آن با مواد سیمانی و قیری متفاوت بوده و می‌بایست به صورت مجزا مورد ارزیابی قرار گیرد (لیو و لیانگ، ۲۰۱۷). همان‌طور که گفته شد، ملات قیر امولسیون- سیمان، متشکل از مواد مختلفی می‌باشد و طبیعتاً نسبت‌های مختلف این مواد مورد استفاده در این ملات و یا استفاده از مواد جایگزین در

آن‌ها می‌تواند تأثیرات بسیار زیادی بر عملکرد آن داشته باشد. (لیبن و همکاران، ۲۰۱۸). در این زمینه، ونگ و همکاران (۲۰۱۱) مطالعاتی را روی روند توسعه مقاومت فشاری تک‌محوره ملات قیر امولسیون- سیمان انجام دادند. همچنین، رابطه مقاومت فشاری مخلوط و روانی آن نیز در این مطالعه مشخص شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که روانی ملات قیر امولسیون- سیمان با افزایش مقدار فوق‌روان‌کننده، افزایش یافته و مقاومت فشاری تک‌محوره آن نیز به تدریج با روانی آن افزایش می‌یابد؛ تا اینکه قطر انتشار آزمایش جریان اسلامپ به حد مشخصی برسد. پدیده مشابهی نیز برای ملات قیر امولسیون- سیمان با تغییرات نسبت آب به سیمان وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار بهینه‌ای برای قطر انتشار ملات قیر امولسیون- سیمان وجود دارد. روانی ملات قیر امولسیون- سیمان تأثیر زیادی بر مقاومت آن دارد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱). پارامتر حائز اهمیت دیگر در عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان، نسبت قیر به سیمان در آن می‌باشد. در این مورد، نتایج پژوهش‌های گذشته نشان داده که تغییرات نسبت قیر به سیمان، درصد هوا و توزیع آن در ملات (لیو و لیانگ، ۲۰۱۷)، کارایی ملات (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵)، حساسیت دمایی ملات قیر امولسیون- سیمان را به صورت قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد (رادرفورد و همکاران، ۲۰۱۴). در مقابل، افزایش نسبت قیر به سیمان در ملات می‌تواند به سیالیت کمتر (ونگ و همکاران، ۲۰۱۵؛ لیو و لیانگ، ۲۰۱۷) و نیز شکل‌پذیری کمتر ملات قیر امولسیون منجر گردد (لیبن و همکاران، ۲۰۱۸). در ادامه، می‌بایست به این نکته مهم نیز توجه داشت که مطالعات گذشته نشان داده که حضور قیر در ملات قیر امولسیون- سیمان می‌تواند به صورت معکوس بر فرایند هیدراسیون سیمان اثرگذار باشد (لیبن و همکاران، ۲۰۱۸). همه موارد ذکر شده مشخص می‌کند که به منظور ارزیابی خصوصیات

متفاوت از تنش موجود در محل اجرا خواهد نمود (جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۹). در نتیجه، به منظور ارزیابی دقیق‌تر خرابی ترک‌خوردگی در دمای میانی می‌بایست روش‌های آزمون بر پایه مکانیک شکست مورد توجه قرار گیرد زیرا خرابی ترک‌خوردگی عموماً به صورت خرابی شکست رخ داده و می‌بایست از قوانین مکانیک شکست تبعیت نماید (جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹). به همین منظور، روش‌های مختلف آزمون توسعه داده شده است که در بین این موارد آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای، به دلیل سادگی انجام، هزینه کم، درجه بالای تکرارپذیری و در نهایت تأثیر اندک وزن نمونه بر نتایج آزمون‌های شکست، بیشتر از بقیه آزمون‌ها مورد توجه محققین عرصه روسازی قرار گرفته است (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷؛ جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹). می‌توان از موارد ذکر شده این گونه نتیجه‌گیری نمود که به منظور ارزیابی خصوصیات لایه قیر امولسیون-سیمان، بررسی توانایی مقابله با ترک‌خوردگی این لایه بر مبنای روابط و آزمون‌های مکانیک شکست اجتناب‌ناپذیر است.

سیمان یکی از اجزای اصلی در ساختار ملات قیر امولسیون-سیمان است و اصلی‌ترین عامل در به‌دست آوردن مقاومت این لایه به شمار می‌رود. اما علی‌رغم استفاده فراگیر از سیمان در صنعت ساخت زیرساخت‌های عمرانی، به‌کارگیری این ماده به واسطه استفاده بیش از حد از منابع، مصرف قابل ملاحظه انرژی و نیز انتشار چشمگیر گازهای گلخانه‌ای، به‌خصوص دی‌اکسید کربن، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مورد اثرات مخرب زیست‌محیطی سیمان می‌توان به تولید یک تن گاز دی‌اکسید کربن، استفاده از ۶۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم سوخت فسیلی و ۵۰۰۰ مگاژول انرژی در ازای تولید یک تن سیمان اشاره نمود (ال عطار و همکاران، ۲۰۱۷؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۷؛ ناصری و همکاران، ۲۰۱۹؛ قوامی و همکاران، ۲۰۱۸a). همه موارد ذکر شده منجر به این گردیده که صنایع تولید سیمان در جهان به

عملکردی ملات قیر امولسیون-سیمان می‌بایست در ابتدا نسبت به طرح اختلاط و میزان بهره بردن از هر یک از اجزای آن دقت لازم در نظر گرفته شود.

همان طور که ذکر گردید، یکی از اصلی‌ترین نقش‌های لایه قیر امولسیون-سیمان در لایه‌های راه‌آهن سریع‌السیر، کمک به میرایی سیستم می‌باشد. خصوصیات میرایی مواد سیمانی با تغییرات استقامت فشاری آن تغییر می‌نماید که می‌بایست مورد بررسی قرار گیرد (رادرفورد و همکاران، ۲۰۱۴). در همین زمینه، در مورد استقامت فشاری ملات قیر امولسیون-سیمان، نتایج نشان داده که در ۵۶ روز اول، مقاومت فشاری تک‌محوره ملات قیر امولسیون-سیمان نرخ رشد نسبتاً زیادی داشته، ولی پس از آن با سرعت کمتری افزایش یافته است. این امر مشخص می‌نماید که مقاومت فشاری تک‌محوره در روز ۵۶م باید مبنای طراحی سازه‌ای برای این لایه قرار گیرد (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱).

چون سیستم زیرسازی راه‌آهن سریع‌السیر تحت بارگذاری ترکیبی حاصل از قطار و شرایط آب‌وهوایی قرار دارد، می‌توان انتظار داشت که یکی از خرابی‌های شایع در این لایه، ترک‌های خستگی و ترک‌خوردگی در دمای میانی باشد (جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۹). رادرفورد و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که تغییرات نسبت قیر به سیمان می‌تواند بر خصوصیات خستگی این لایه اثر بگذارد و با افزایش این نسبت، استقامت کششی غیرمستقیم آن کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که آزمون استقامت کششی غیرمستقیم، علی‌رغم استفاده روزافزون و فراگیر، عموماً جهت ارزیابی شروع ترک‌خوردگی در دمای میانی در مخلوط آسفالتی مورد بررسی قرار می‌گیرد و این آزمون نمی‌تواند به خوبی خصوصیات ترک‌خوردگی مواد مورد آزمون قرار گرفته را نشان دهد (جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، به دلیل اعمال بار در بالا و پایین نمونه، تمرکز تنش در این نقاط بالا بوده که این امر توزیع تنش در قطر نمونه را متغیر خواهد کرد. همین امر، تنش اعمالی به نمونه را بسیار

قرار می‌گیرد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۵). در مورد استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی به عنوان جایگزین ۳۰٪ سیمان در ملات قیر امولسیون- سیمان، نتایج پژوهش صورت گرفته توسط مقدس‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) قابلیت این جایگزینی را به خوبی نمایان ساخت.

هدف اصلی پژوهش حاضر، معرفی ملات قیر امولسیون- سیمان دوست‌دار محیط‌زیست می‌باشد که بخشی از سیمان آن به وسیله مواد جایگزین سیمان جایگزین شده است. اما خصوصیات عملکردی و نیز مکانیکی آن بدون تغییر باقی مانده است. در جهت نیل به اهداف پژوهش، به بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با مواد زائد صنعتی همچون سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی، در کنار عامل فعال کننده (غبار کوره سیمان)، بر خصوصیات عملکردی ملات قیر امولسیون- سیمان پرداخته شده است. علاوه بر این، تأثیر این جایگزینی بر حساسیت رطوبتی و نیز خرابی ترک‌خوردگی در دمای میانی به وسیله آزمون‌های بر پایه مکانیک شکست مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مصالح و ساخت نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند نوع ۲، مطابق با معیارهای ASTM C150، جهت ساخت نمونه‌های ملات قیر امولسیون- سیمان مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. سیمان استفاده شده دارای وزن مخصوص ۳/۱۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ریزی بلین برابر ۳۰۳۲ سانتی‌متر مربع بر گرم بود، ۸۷٪ سیمان از الک ۴۵ میکرون عبور کرده، گیرایش اولیه آن ۱۴۳ دقیقه و نیز گیرایش نهایی آن در ۱۸۰ دقیقه رخ داد. به منظور ارزیابی ملات سیمان، در پژوهش حاضر، با سیمان مصرفی ذکر شده، ملات استاندارد مطابق طرح اختلاط اولیه صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول ۲ بیان

عنوان دومین منبع آلاینده‌گی زیست‌محیطی با تولید در حدود ۷٪ از گاز دی‌اکسید کربن دنیا به حساب آیند (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷؛ قوامی و همکاران، ۲۰۱۸b؛ قوامی و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، اتخاذ راهکارهایی به منظور کاهش مصرف سیمان و در نتیجه مواد خام و به دنبال آن مصرف انرژی و آلودگی ناشی از تولید سیمان از جنبه‌ی زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت است.

بر مبنای موارد ذکر شده، به‌کارگیری مواد جایگزین سیمان به صورت وسیعی به منظور افزایش مقاومت و نیز دوام مخلوط‌های ساخته شده با سیمان مورد توجه قرار گرفته است. از این طریق، علاوه بر صرفه اقتصادی در جایگزینی سیمان با مواد جایگزین سیمان، می‌توان از تخریب محیط‌زیست نیز جلوگیری نمود (لوتنباخ و همکاران، ۲۰۱۱). مواد جایگزین سیمان به عنوان مواد دوست‌دار محیط‌زیست به حساب می‌آیند، زیرا با استفاده از این مواد به عنوان جایگزینی برای بخشی و یا همه سیمان مصرفی، انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (ناصری و همکاران، ۲۰۱۹؛ قوامی و همکاران، ۲۰۱۹). به عنوان مثال، می‌توان از خاکستر بادی به عنوان ارزشمندترین ماده جایگزین سیمان نام برد که در حدود ۵۰٪ سیمان می‌تواند با این ماده جایگزین گردد و همچنین ماده‌ای کاملاً مناسب به عنوان جایگزین سیمان در ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته می‌باشد. همچنین، بهره‌گیری از این ماده به عنوان جایگزین سیمان می‌تواند منجر به افزایش استقامت لایه‌های بتنی در طولانی‌مدت شده و نیز می‌تواند عمر خدمت‌رسانی سازه‌های تحت تأثیر کلراید را افزایش دهد (شهاتا و توماس، ۲۰۰۰؛ صدیق، ۲۰۰۴). علاوه بر خاکستر بادی، خاکستر کوره آهن‌گدازی به عنوان محصول جانبی تولید آهن (۳۰۰ کیلو در ازای تولید هر تن آهن) که تولید هر تن آن در حدود ۲۶/۵ کیلوگرم گاز دی‌اکسید کربن تولید می‌کند نیز به عنوان ماده جایگزین سیمان مورد استفاده

جایگزینی ۳۰٪ سیمان جایگزین گردید. در نهایت، ۷ طرح مطابق جدول ۴ مهیا گردید. در این پژوهش، پودر سرباره کوره آهن گدازی سرد شده به وسیله آب پس از مذاب شدن^۱، با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده گردیده است. این ماده ضایعاتی دارای وزن مخصوص ۲/۸۷ بوده و مدول نرمی آن ۳۸۵ متر مربع بر کیلوگرم است که توسط روش بلین تهیه گردیده و خاصیت سیمان شدن داشته و بدون بلور می‌باشد. از خاکستر بادی با ترکیبات شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ به عنوان جایگزین سیمان استفاده شده است. خاکستر بادی عموماً از اکسید سیلیسیم، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم تشکیل شده است. ماده دیگر موجود در خاکستر بادی، کلسیم است. در صورتی که خاکستر بادی حاوی کلسیم بیش از ۲۰٪ باشد با نوع C و در صورتی که حاوی کلسیم کمتر از ۱۰٪ باشد با عنوان نوع F شناخته می‌شود. مطابق نتایج جدول ۱ می‌توان نتیجه‌گیری نمود که خاکستر بادی استفاده شده در این پژوهش از نوع F است. غبار کوره سیمان یک محصول جانبی تولید سیمان پرتلند می‌باشد که توسط فیلتر موجود در محل خروجی گازهای کوره سیمان جمع‌آوری می‌گردد. در این پژوهش، از غبار کوره سیمان تولیدی کارخانه سیمان شاهرود با ترکیبات شیمیایی موجود در جدول ۱ استفاده گردیده است.

گردیده است. مقاومت فشاری ملات پس از ۲۸ روز عمل‌آوری به مقدار ۴۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع رسید. به منظور ساخت ملات قیر امولسیون-سیمان، از ماسه سیلیسی استفاده گردید که از معدن پاکدشت تهیه شده است. آنالیز شیمیایی صورت گرفته روی ماسه نشان می‌دهد که بیش از ۶۰٪ ماسه از سیلیس تشکیل شده است. علاوه بر این، دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. قیر امولسیون به عنوان یک بخش اساسی دیگر در ملات قیر امولسیون-سیمان مطرح است که وظیفه‌ی تأمین چقرمگی در ملات را عهده‌دار است. در این مطالعه، از قیر امولسیون کاتیونی دیرشکن استفاده شده، که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. قیر امولسیون مورد استفاده حاوی ۶۰٪ قیر بوده و وزن مخصوص آن برابر ۱/۰۱ به دست آمده است.

با توجه به هدف پژوهش پیش رو، بخشی از سیمان موجود در ملات قیر امولسیون-سیمان با مواد زائد صنایع دیگر جایگزین گردید. این مواد شامل سرباره کوره آهن گدازی، خاکستر بادی و غبار کوره سیمان بودند که تصاویر آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. در ابتدا، ۳۰٪ سیمان با خاکستر بادی و سرباره کوره آهن گدازی جایگزین گردید. سپس، دو درصد مختلف غبار کوره سیمان شامل ۱۰ و ۲۰ درصد نیز در نمونه‌های با

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی مصالح مصرفی در پژوهش

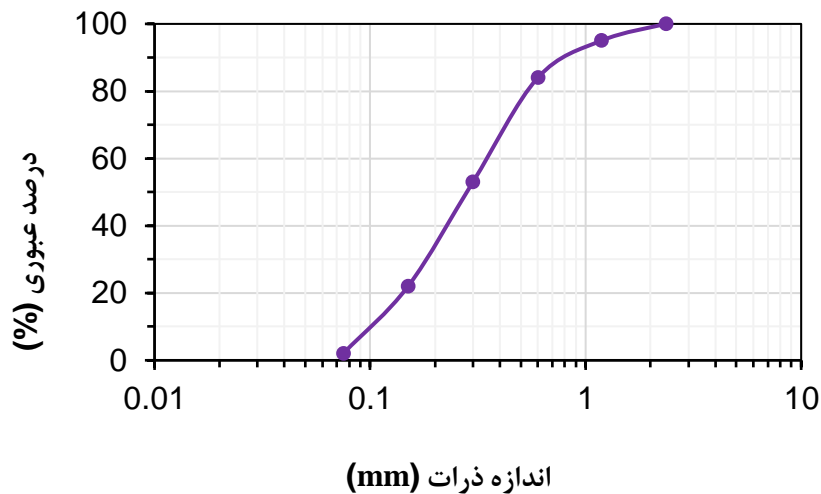
ترکیب	سیمان پرتلند	خاکستر بادی	سرباره کوره آهن گدازی	غبار کوره سیمان
SiO ₂	۲۱/۱۱	۵۳/۵	۳۶	۶/۷
Al ₂ O ₃	۴/۴۲	۲۷/۳	۸	۱/۳
Fe ₂ O ₃	۳/۹۶	۷/۲	۰/۵	۲/۲
CaO	۶۳/۳۶	۵/۵	۳۸	۶۷/۹
MgO	۱/۵۱	۰/۵	۸/۲	۱/۱
SO ₃	۲/۶۱	۰/۹	۰/۳	۱/۶
K ₂ O	۰/۵۱	۱	۱	۴/۴
Na ₂ O	۰/۳۸	۰/۴	۰/۵	۰/۴۸
ترکیبات دیگر	۰/۱۲	۰/۵	۰/۶	۳/۰۲
افت ناشی از حرارت (%)	۲/۰۲	۰/۸	۶/۹	۱۱/۳

^۱- Granulated blast furnace slag

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع السیر بدون بالاست

جدول ۲. خصوصیات ملات استاندارد طبق طرح اولیه

اجزا	سیمان	ماسه	آب
وزن (گرم)	۶/۹	۰/۸	۲/۰۲



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در پژوهش



شکل ۲. الف) سرباره کوره آهن‌گدازی، ب) خاکستر بادی و ج) غبار کوره سیمان

جدول ۳. مشخصات قیر امولسیون کاتیونی مورد استفاده

آزمون	استاندارد	نتیجه	بازه مجاز
کندروانی سی بولت فیورول در ۲۵ °C (ثانیه)	ASTM D244	۲۸	۲۰-۱۰۰
درصد وزنی قیر در آزمایش تقطیر	ASTM D6997	۶۰	>۵۰
بار ذره‌ای دانه‌های قیر	ASTM D244	مثبت	مثبت
پایداری در برابر نشست بعد از ۲۴ ساعت نگهداری در انبار (%)	ASTM D 6930	۰/۳	۱>
آزمایش دانه‌بندی (%)	ASTM D6935	۰/۰۲	۰/۱>
درصد قیر شکسته شده در آزمایش اختلاط با سیمان	ASTM D6935	۱/۹	۲>

جدول ۴. مشخصات طرح اختلاط نمونه کنترل و سایر نمونه‌های ساخته شده

نمونه	سیمان پرتلند (%)	سرباره کوره آهن گدازی (%)	خاکستر بادی (%)	غبار کوره سیمان
OCEAM	۱۰۰	-	-	-
CKD 20	۸۰	-	-	۲۰
BFS30	۷۰	۳۰	-	-
FA30	۷۰	-	۳۰	-
CKD10+BFS30	۶۰	۳۰	-	۱۰
CKD20+BFS30	۵۰	۳۰	-	۲۰
CKD10+FA30	۶۰	-	۳۰	۱۰
CKD20+FA30	۵۰	-	۳۰	۲۰

طرح اختلاط نمونه‌ها به صورت جدول ۴ می‌باشد. به منظور این که بتوان تأثیر مواد جایگزین سیمان در خصوصیات عملکردی ملات قیر امولسیون- سیمان را ارزیابی نمود، نیاز بود ملاتی با تخلخل کم و مقاومت فشاری بیشتر در نظر گرفته می‌شد. به همین منظور، ملات با نسبت قیر به سیمان نسبتاً کم (در حدود ۰/۴) انتخاب گردید. علاوه بر این، نسبت آب به سیمان نیز باید مورد توجه قرار می‌گرفت، که در این پژوهش این مقدار برابر ۰/۵ انتخاب شده است. البته میزان آب موجود در قیر امولسیون نیز در محاسبات وارد شده است. در نهایت، نسبت ماسه به سیمان ۱/۹۹ انتخاب و عیار سیمان برابر ۵۰۰ گرم در یک لیتر انتخاب شد. طرح اختلاط اولیه ملات قیر امولسیون- سیمان مطابق جدول ۵ می‌باشد که بر پایه نتایج پژوهش‌های قبلی انتخاب گردیده است (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۷؛ جهان بخش و همکاران، ۲۰۱۹).

جهت آماده سازی ملات قیر امولسیون- سیمان، ابتدا قیر امولسیون به همراه آب مصرفی و نیز ماده کف‌زدا به مخلوط‌کن اضافه گردیدند. این مواد در همزن با دور ۱۴۰ دور در دقیقه برای مدت زمان یک دقیقه با هم مخلوط گردیدند. سپس، ماسه مورد نظر مطابق طرح اختلاط به این ترکیب اضافه شد. در گام بعدی، سیمان مصرفی و یا مواد جایگزین سیمان به صورت تدریجی به مخلوط‌کن در حال هم‌زدن مصالح اضافه شد. ماده فوق‌روان‌کننده به ترکیب مواد در حال هم‌خوردن افزوده گردید. پس از همگن شدن مواد موجود در مخلوط‌کن، اختلاط با سرعت ۲۸۵ دور در دقیقه برای ۱۵۰ ثانیه ادامه یافت. جهت ناپدید شدن حباب‌های به وجود آمده در حین اختلاط، ۳۰ ثانیه دیگر نیز اختلاط ادامه یافت. نمونه ساخته شده در نهایت در داخل قالب ریخته شده و جهت عمل‌آوری در محل مناسب قرار گرفت. با توجه به این که در این پژوهش جایگزینی تانیمی از سیمان در ملات قیر امولسیون- سیمان مد نظر است،

جدول ۵. مشخصات طرح اولیه ملات قیر امولسیون- سیمان

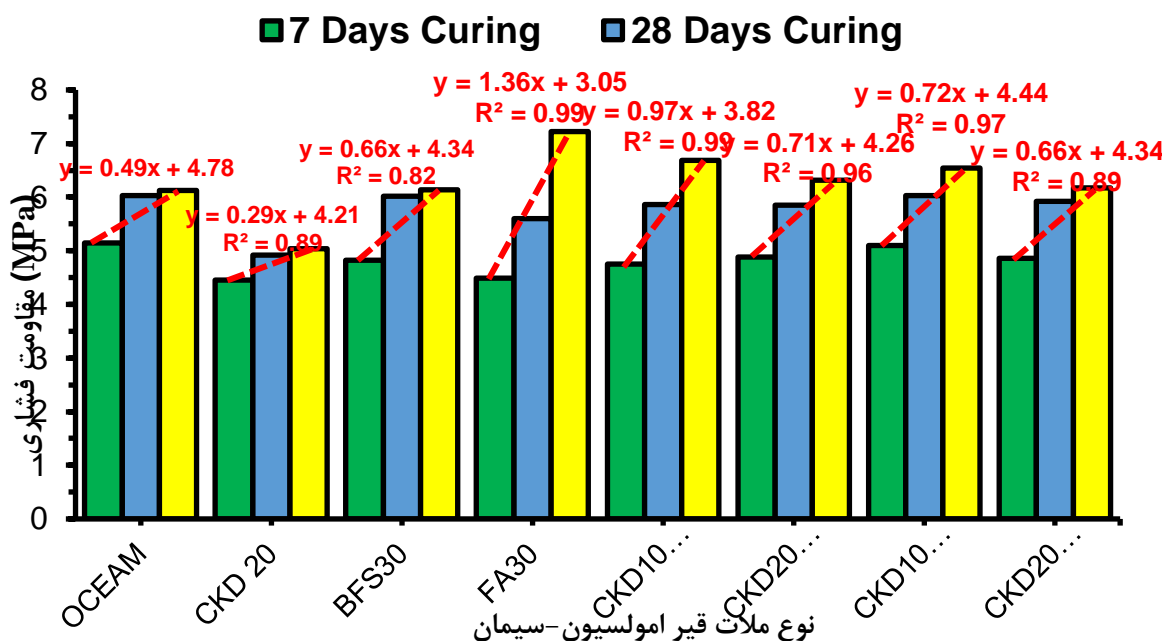
اجزا	قیر امولسیون	سیمان	ماسه	آب	ماده کف‌زا	فوق‌روان‌کننده
وزن (گرم بر لیتر)	۳۴۰	۵۰۰	۹۹۶	۱۱۱	۰/۳۵	۵

۳. نتایج و تحلیل

۳-۱. مقاومت فشاری

به منظور ارزیابی قابلیت میرایی ملات‌های قیر امولسیون- سیمان می‌بایست استقامت فشاری تک‌محوره آن مورد ارزیابی قرار گیرد. از همین رو، استقامت فشاری ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد ارزیابی در این پژوهش مطابق استاندارد ASTM C 109 مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که ونگ و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند، به منظور ارزیابی استقامت فشاری ملات‌های قیر امولسیون- سیمان می‌بایست ملات مهیا شده برای مدت ۵۶ روز عمل‌آوری گردد و نتیجه استقامت فشاری در این عمر مبنای ارزیابی قرار گیرد. در نتیجه، در این پژوهش، استقامت فشاری ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد ارزیابی در عمرهای ۷، ۲۸ و ۵۶ روز مورد آزمون قرار گرفته و نتایج حاصل از میانگین‌گیری برای سه تکرار در هر نمونه در شکل ۳ ارائه گردیده است. علاوه بر نتایج آزمون، نتیجه برازش خطی به‌دست آوردن استقامت فشاری در طول عمر عمل‌آوری نیز در این شکل برای هر نمونه ملات نمایش داده شده است.

در پژوهش حاضر، به جهت ارزیابی معنادار بودن جایگزین کردن بخشی از سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با مواد جایگزین سیمان مورد استفاده در این پژوهش آنالیز آماری انجام گرفت. به همین منظور، آنالیز واریانس چندگانه به همراه تکرار مورد استفاده قرار گرفت. به منظور انجام این مهم، بسته نرم‌افزاری Minitab نسخه سال ۲۰۱۸ استفاده شد. مقاومت فشاری محصور نشده در سن عمل‌آوری ۵۶ روزه به عنوان متغیر پاسخ مورد استفاده قرار گرفت. سطح اطمینان 0.05 ($\alpha = 0.05$) به منظور بررسی قضیه صفر (تمام نمونه‌ها از نظر آماری یکسان هستند) انتخاب گردید. مقدار p-value کمتر از 0.05 فرضیه صفر را نقض کرده و از لحاظ آماری این معنی را دارد که پارامتر مورد نظر تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. اگر آزمون نشان دهد که میان ملات‌ها تفاوت وجود دارد، روش Tukey-Kramer به منظور مقایسه تمام جفت‌های ممکن استفاده گردید. جدول ۵، نتایج آنالیز آماری صورت گرفته بر نتایج آزمون مقاومت فشاری محصور نشده را نشان می‌دهد. برای هر نمونه ۳ تکرار به‌کار رفته در آنالیز مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۳. مقاومت فشاری ملات‌های قیر امولسیون- سیمان در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روز

جدول ۵. آنالیز آماری بر نتایج آزمون استقامت فشاری در عمر عمل‌آوری ۵۶ روزه

آزمون	نتایج آزمون مقایسه گروهی Tukey-Kramer
مقاومت فشاری ۵۶ روزه	FA30 A
	CKD10+FA30 B
	CKD10+BFS30 C
	CKD20+FA30 D
	CKD20+BFS30 E
	BFS30 E
	OCEAM E
	CKD 20 F

باعث می‌شود فرایند افزایش استقامت ملات قیر امولوسیون-سیمان اندکی با تأخیر رخ دهد. این بازه زمانی افزایش مقاومت به عنوان دوره القا در میان محققین شناخته شده است. به همین سبب است که با گذر عمر از ملات قیر امولوسیون-سیمان همچنان روند افزایش استقامت فشاری ادامه‌دار خواهد بود. شیب مثبت برآزش خطی نشان داده شده در شکل ۳ نیز مؤید همین ادعا است.

همان‌طور که از نتایج نشان داده در شکل ۳ پیداست، استقامت فشاری ملات قیر امولوسیون-سیمان حاوی غبار کوره سیمان در تمامی سنین عمل‌آوری از نمونه ملات حاوی ۱۰۰٪ سیمان کمتر به‌دست آمده است که در نتایج آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۵ نیز عملکرد ضعیف‌تر معنادار این ملات مشخص گردیده است. این مشاهدات می‌تواند به این دلیل رخ داده باشد که کربنات کلسیم موجود در ساختار غبار کوره سیمان، واکنش‌های پوزلانی را به صورت منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، مطابق نتایج حاصل از آنالیز XRF^۴ ارائه شده در جدول ۱، میزان سیلیکا (SiO₂) در غبار کوره سیمان از سیمان مصرفی کمتر بوده و این امر موجب

مطابق نتایج ارائه گردیده در شکل ۳ می‌توان عوامل به‌دست آوردن استقامت فشاری در ملات قیر امولوسیون-سیمان را به واکنش آب با بخش‌های اصلی تشکیل‌دهنده سیمان که منجر به فرایند سخت‌شدگی حاصل از هیدراسیون می‌گردد نسبت داد. فرایند سخت‌شدگی شامل چهار واکنش می‌باشد که منجر به شکل‌گیری ژل کلسیم سیلیکات هیدرات^۱، مونو سولفو آمینات هیدرات^۲ و اترینگایت^۳ می‌گردد. این محصولات واکنش‌های پوزلانی منجر به افزایش استقامت شده و تولید هیدروکسید کلسیم را نیز با شکل‌گیری خود به همراه دارند. این میزان کلسیم هیدروکسید رها شده طی فرایند هیدراسیون سیمان می‌تواند منجر به شکل‌گیری ترک‌های ریز و نیز منافذ و حفراتی در ملات حاصل گردد و از این طریق دوام ملات قیر امولوسیون-سیمان را تحت‌الشعاع قرار دهد. علاوه بر این، در شکل ۳، تغییرات افزایش استقامت فشاری نیز ارائه شده است. همان‌طور که ذکر گردید، ژل کلسیم سیلیکات هیدرات محصول فرایند هیدراسیون سیمان است که به صورت ناپایدار در سطح سیمان شکل می‌گیرد. ژل کلسیم سیلیکات هیدرات لایه‌ای نفوذناپذیر در سطوح سیمان ایجاد می‌کند که

۲- Mono-Sulphoaluminate Hydrate

۳- Ettringite

۴- X-ray fluorescence

۱ - Calcium Silicate Hydrate (C-S-H)

فشاری بیشتری در طی فرایند عمل‌آوری به‌دست آورده و در عمر ۵۶ روزه به استقامت فشاری بیشتر از ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل دست یافته است. نتایج ارائه شده در جدول ۵ نیز مشخصاً نمایان ساخت که این ملات به صورت قابل ملاحظه‌ای استقامت فشاری ۵۶ روزه بیشتری نسبت به بقیه ملات‌های مورد ارزیابی در پژوهش داشت. همین نتیجه کاملاً از شیب نمودار افزایش استقامت فشاری این نمونه در برابر عمر عمل‌آوری قابل رؤیت می‌باشد که ملات قیر امولسیون- سیمان با جایگزینی ۳۰٪ سیمان آن با خاکستر بادی بیشترین شیب افزایش استقامت فشاری در میان همه نمونه‌ها را دارا بود. دلیل رویداد چنین مشاهده‌ای می‌توان به این مرتبط باشد که خاکستر بادی حاوی سیلیس، آلومین و اکسیدهای کلسیم و آهن می‌باشد و به عنوان ماده‌ای پوزولانی با قابلیت خودسیمانته شدن شناخته می‌گردد. سیلیکات‌های موجود در ساختار خاکستر بادی در حضور آب و یون‌های کلسیم منجر به شکل‌گیری کلسیم آلومینات سیلیکات می‌گردند. به دلیل قابلیت کمتر واکنش این ماده و به تأخیر افتادن برخی واکنش‌های پوزولانی در سنین اولیه، مقاومت فشاری ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی کمتر از ملات با ۱۰۰٪ سیمان می‌باشد؛ ولی در سنین بعدی بهبود مقاومت رخ می‌دهد. همین شکل‌گیری کلسیم آلومینات سیلیکات حاصل واکنش خاکستر بادی و آب و نیز کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراسیون سیمان موجب می‌گردد که نمونه حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی در سن ۵۶ روز حتی مقاومت فشاری به مراتب بهتری از نمونه کنترل را از خود نشان دهد.

میزان سولفات کم و خاصیت قلیایی زیاد موجود در غبار کوره سیمان موجب می‌گردد که این ماده به عنوان یک فعال‌کننده برای مواد پوزولانی، همچون خاکستر کوره آهن‌گدازی و نیز خاکستر بادی، مطرح باشد. همان‌طور

می‌گردد که غبار کوره سیمان مصرفی در این پژوهش قابلیت خودسیمانته شدن^۱ نداشته باشد. با توجه به نقش محدود کننده غبار کوره سیمان در رویداد واکنش‌های پوزولانی، با افزایش درصد این ماده نیز انتظار می‌رود استقامت فشاری کاهش یابد که نتایج شکل ۳ نیز همین نتیجه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، کاهش شیب افزایش استقامت در برابر عمر عمل‌آوری در نمونه با ۲۰٪ جایگزینی غبار کوره سیمان نسبت به ملات کنترل کاهش یافته است که نشان دهنده نقش محدود کننده غبار کوره سیمان در فرایند هیدراسیون سیمان می‌باشد.

نتایج جایگزینی ۳۰٪ سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی نشان داد که این ملات اندکی مقاومت فشاری را کاهش داده ولی این امر می‌تواند به واکنش‌های کندتر این ماده با آب مربوط باشد. گرچه قابل ذکر است که حضور خاکستر کوره آهن‌گدازی، مقدار کلسیم هیدروکسید موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان را کاهش می‌دهد، بنابراین ملات حاصل از این ترکیب متراکم‌تر بوده و همین امر منجر به اثر اندک بر مقاومت فشاری می‌گردد. همان‌طور که نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد، نمونه حاوی ۳۰٪ خاکستر کوره آهن‌گدازی در عمر عمل‌آوری ۵۶ روزه تقریباً استقامت فشاری برابر با ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل دارد که نتایج آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۵ نیز این نتیجه‌گیری را تأیید می‌نماید. همچنین، شیب افزایش مقاومت فشاری در عمرهای ۷، ۲۸ و ۵۶ روز در ملات حاوی خاکستر کوره آهن‌گدازی، ۵۰٪ از ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل بیشتر بود که اثر کندتر جایگزینی سیمان با این ماده می‌باشد.

در مورد جایگزینی ۳۰٪ از سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با خاکستر بادی، مطابق نتایج شکل ۳ می‌توان نتیجه‌گیری کرد که این جایگزینی در عمر اولیه استقامت فشاری را کاهش داده ولی به مرور استقامت

امولسیون- سیمان می‌بایست این استقامت در عمر عمل‌آوری ۵۶ مورد ارزیابی قرار گیرد. مطابق نتایج شکل ۳، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که ترکیبات مواد پوزلانی به‌کار رفته در این پژوهش در ملات قیر امولسیون- سیمان، پس از ۵۶ روز عمل‌آوری، موجب بهبود استقامت فشاری شده‌اند که نتایج مقایسه زوجی ارائه شده در جدول ۵ نیز تفاوت معنادار ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد بررسی در این پژوهش نسبت به ملات کنترل را نشان می‌دهد. نمونه خاکستر بادی ۱۷٪ و حاوی فعال کننده ۳/۹ درصد استقامت فشاری را بهبود داده است. در مورد خاکستر کوره آهن گدازی اما این اثر به نسبت کمتر بود. ولی باز هم نمونه‌ها استقامت فشاری در حدود برابر با ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل در عمر ۵۶ روز از خود نشان دادند.

۲-۳. استقامت کششی غیرمستقیم

در این پژوهش، به منظور ارزیابی قابلیت ملات قیر امولسیون- سیمان با عمل‌آوری ۲۸ روزه در مقابله با شروع ترک‌خوردگی، آزمون استقامت کششی غیرمستقیم مطابق استاندارد AASHTO T-322 برای مخلوط آسفالتی صورت پذیرفت. بدین منظور، برای هر ملات قیر امولسیون- سیمان سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر ساخته شده و به صورت قطری با نرخ ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت بارگذاری قرار گرفت که نمونه مهیا شده به همراه نحوه بارگذاری در شکل ۴- الف به تصویر کشیده شده است. برای هر نمونه، استقامت کششی غیرمستقیم برای سه تکرار آزمون به‌دست آمده و پس از متوسط‌گیری در شکل ۴- ب به نمایش گذاشته شده است. علاوه بر این، به منظور مقایسه زوجی میان پارامتر استقامت کششی غیرمستقیم ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مطابق بخش قبلی روی نتایج تکرارهای به‌دست آمده از این آزمون نیز آنالیز آماری صورت گرفت و نتیجه مقایسه زوجی کرامر در جدول ۶ ارائه گردید.

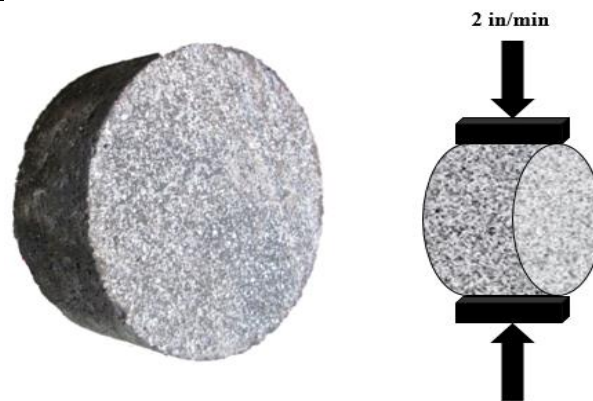
که از نتایج شکل ۳ مشخص است، افزودن غبار کوره سیمان نقش مؤثری در بهبود استقامت فشاری در نمونه‌های حاوی خاکستر کوره آهن گدازی و نیز خاکستر بادی، به‌خصوص در سنین اولیه، ایفا نموده است. وجود Ca^{2+} موجود در ترکیبات غبار کوره سیمان باعث می‌شود که خاکستر بادی جهت تشکیل کلسیم آلومینات سیلیکات منتظر کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراسیون سیمان نمانده و با کلسیم آزاد غبار کوره سیمان این واکنش را کامل نماید. همچنین، افزودن غبار کوره سیمان به ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی خاکستر کوره آهن گدازی باعث می‌شود که یون‌های سولفات موجود در غبار کوره سیمان در حضور SO_4^{2-} و نیز $Al(OH)_4^-$ با خاکستر کوره آهن گدازی واکنش داده و اترینگایت حاصل از این واکنش افزایش استقامت فشاری را نتیجه دهد که در عمرهای کوتاه‌تر نیز پررنگ‌تر خواهد بود. در ملات‌های قیر امولسیون- سیمان که از غبار کوره سیمان به عنوان ماده فعال کننده استفاده گردید، وجود کلسیم و سولفات‌ها در این ماده منجر به این شد که واکنش‌های پوزلانی در سنین اولیه تسریع گردیده و ملات‌ها در عمر ۷ روزه نسبت به ملات بدون فعال کننده مقاومت فشاری بیشتری به‌دست آورند. ضمناً، به دلیل شکل‌گیری اترینگایت به عنوان محصول واکنش‌های پوزلانی، اندکی از شکل‌گیری ژل کلسیم سیلیکات هیدرات در عمرهای بیشتر کاسته می‌گردد که این امر منجر به کاهش شیب افزایش استقامت فشاری نسبت به عمر می‌گردد. این کاهش شیب با افزایش درصد جایگزینی سیمان با غبار کوره سیمان به عنوان ماده فعال کننده نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه، ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی کوره آهن گدازی و نیز خاکستر بادی در حضور غبار کوره سیمان به عنوان فعال کننده، به زمان گیرایش بیشتری جهت به‌دست آوردن استقامت نیاز دارند.

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان گردید، به منظور مقایسه استقامت فشاری در ملات‌های قیر

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع السیر بدون بالاست

جدول ۶. آنالیز آماری بر نتایج آزمون استقامت کششی غیرمستقیم در عمر عمل‌آوری ۲۸ روزه

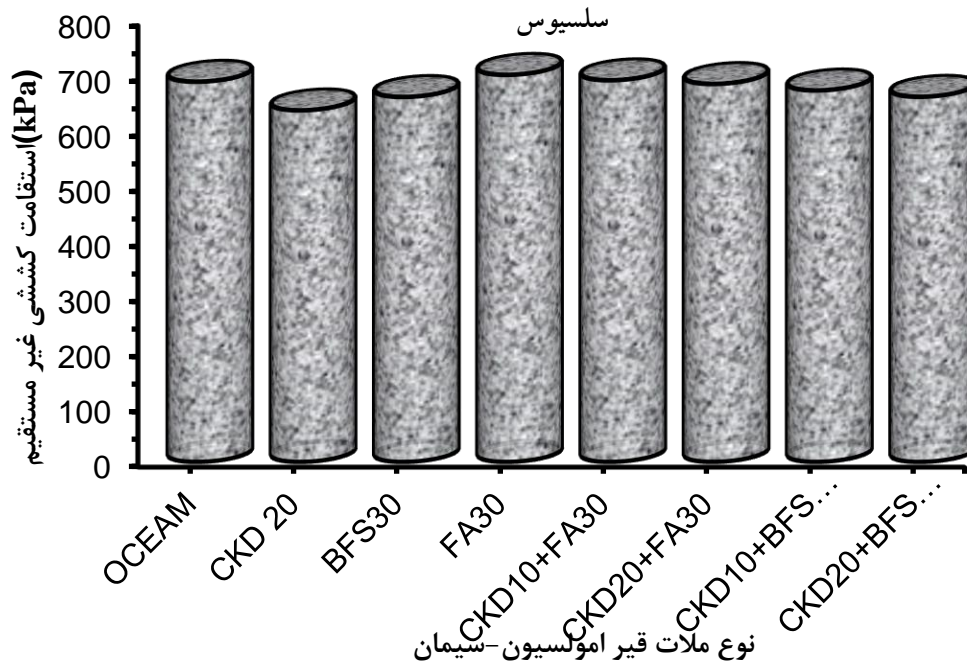
آزمون	نتایج آزمون مقایسه گروهی Tukey-Kramer
استقامت کششی غیرمستقیم ۲۸ روزه	FA30 A
	CKD10+FA30 A B
	OCEAM B
	CKD20+FA30 B C
	CKD10+BFS30 C D
	CKD20+BFS30 D
	BFS30 D
	CKD 20 E



(الف)

استقامت کششی غیر مستقیم

در دمای ۲۵ درجه



(ب) شکل ۴. استقامت کششی غیرمستقیم ملات‌های قیر امولسیون- سیمان: (الف) نمونه آزمون و (ب) نتیجه آزمون

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع السیر بدون بالاست

اول، قابل ذکر است که خاکستر بادی به عنوان یک ماده پوزولانی شناخته می‌شود در واکنش سیلیس مواد پوزولانی با کلسیم هیدروکسید تولید شده در هیدراسیون سیمان می‌تواند استقامت از دست رفته حاصل از کمبود سیمان را با تشکیل ژل کلسیم سیلیکات هیدرات ثانویه جبران نماید. در ضمن، سختی نمونه در آزمون استقامت کششی غیرمستقیم بر نتیجه آزمون خیلی مؤثر است. در این زمینه می‌توان گفت که وجود خاکستر بادی در ملات قیر امولسیون- سیمان منجر به افزایش شکل‌گیری ساختار میسل^۱ در قیر می‌گردد (واکنش خاکستر بادی با قیر) که نتیجه آن افزایش استقامت کششی غیرمستقیم خواهد بود که حاصل سختی رویداده در قیر می‌باشد.

نتایج استقامت کششی غیرمستقیم ملات‌های قیر امولسیون- سیمان با ۳۰٪ خاکستر بادی یا خاکستر کوره آهن‌گدازی که ۱۰ یا ۲۰ درصد غبار کوره سیمان به عنوان ماده فعال کننده در آن‌ها به کار رفته است نشان داد که افزودن غبار کوره سیمان بر نتایج خاکستر کوره آهن‌گدازی اثری مثبت گذاشته که این امر به دلیل کمک به فرایند هیدراسیون خاکستر کوره آهن‌گدازی می‌باشد که از طریق شکل‌گیری اترینگایت رخ داده است و همین مهم در نتایج آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۶ کاملاً مشهود است. در مورد خاکستر بادی، وجود غبار کوره سیمان و آهک موجود در آن شکل‌گیری ژل ثانویه کلسیم سیلیکات هیدرات را تسریع می‌کند و برخی واکنش‌ها نیز به شکل اترینگایت و C-A-S-H رخ می‌دهد که می‌تواند باعث شود کلسیم هیدروکسید حاصل از واکنش هیدراسیون سیمان بیشتر در ملات باقی بماند و منجر به شکل‌گیری منافذ بیشتر در ملات قیر امولسیون- سیمان گردد. لذا، نمونه حاوی ۲۰٪ غبار کوره سیمان و ۳۰٪ خاکستر بادی از ملات کنترل نیز استقامت کششی غیرمستقیم کمتری را نتیجه داده است.

مطابق نتایج ارائه شده در این شکل، پس از جایگزینی ۲۰٪ از سیمان با غبار کوره سیمان، استقامت کششی غیرمستقیم ملات در حدود ۸٪ کاهش پیدا می‌کند که نتایج آنالیز آماری به نمایش گذاشته شده در جدول ۶ این کاهش معنادار نسبت به ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل را نشان داده است. این نتیجه می‌تواند به این دلیل رخ داده باشد که وجود آهک زیاد در غبار کوره سیمان واکنش‌های پوزولانی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، کلراید موجود در غبار کوره سیمان و واکنش آن با یون‌های سولفات منجر به شکل‌گیری سولفو آلومینیوم هیدرات می‌گردد که منجر به شکل‌گیری غیرهمگن ژل کلسیم سیلیکات هیدرات می‌گردد. لذا، استقامت کششی ملات قیر امولسیون- سیمان را به صورت معکوس تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در مورد جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی، نتایج نشان داد که این جایگزینی در حدود ۴٪ استقامت کششی غیرمستقیم را کاهش داده است. این امر به این دلیل رخ داده که خاکستر کوره آهن‌گدازی واکنش‌پذیری کمتری از سیمان داشته و عمل‌آوری ۲۸ روزه برای شکل‌گیری کامل واکنش‌های پوزولانی ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی این ماده کافی نبوده و در نتیجه استقامت کششی کاهش یافته است. نتایج آنالیز آماری ارائه شده در جدول ۶ نیز استقامت کششی غیرمستقیم این ملات را به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل نشان داده است.

اما نمونه ملات قیر امولسیون- سیمان که در آن ۳۰٪ سیمان با خاکستر بادی جایگزین شده نتیجه‌ای معادل کنترل در آزمون استقامت کششی غیرمستقیم از خود نشان داد. در نتایج نشان داده شده در جدول ۶ این نمونه به صورت قابل ملاحظه‌ای استقامت کششی غیرمستقیم بیشتری نسبت به دیگر ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد ارزیابی در این پژوهش از خود نشان داد. در وهله

^۱- Micelle

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع السیر بدون بالاست

۳-۳. حساسیت رطوبتی

یکی از موارد حائز اهمیت در عملکرد مناسب سازه راه آهن سریع السیر دوام مناسب لایه‌های زیرسازی به کار رفته در زیرساخت راه آهن سریع السیر است. رطوبت، یک عامل تأثیرگذار بر خرابی مرتبط با دوام در ملات‌های سیمان و نیز مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در نتیجه، در این پژوهش، حساسیت رطوبتی ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد بررسی مطابق استاندارد AASHTO T283 مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی قرار گرفت. از آنجایی که تأثیر رطوبت بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های قیری نسبت به ملات‌های سیمانی قابل ملاحظه‌تر می‌باشد، در این پژوهش، پارامتر نسبت استقامت کششی غیرمستقیم مطابق روش استاندارد بیان شده مورد استفاده قرار گرفت که در مطالعات پیشین نیز قابلیت و توانایی این پارامتر در تمیز دادن حساسیت رطوبتی ملات‌های قیر امولسیون حاوی مواد جایگزین سیمان نشان داده شده است (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷). بدین منظور، دو دسته نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و ارتفاع ۶۳/۵ میلی‌متر مهیا گردید. دسته اول، بدون قرارگیری در شرایط ذوب و یخ تحت بارگذاری قرار گرفتند. اما دسته دوم پس از قرارگیری در چرخه ذوب و یخ مطابق استاندارد ASHTO T283 تحت بارگذاری قطری با نرخ ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفت. استقامت کششی غیرمستقیم برای ملات قیر امولسیون- سیمان در حالت تر و خشک متوسط گرفته شده از نتایج سه تکرار در شکل ۵ نمایش داده شده است. مطابق استاندارد ASHTO T283، به جهت دوام مناسب مخلوط، نسبت استقامت کششی در حالت تر به خشک می‌بایست حداقل ۸۰٪ باشد که مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۵ برای همه نمونه‌های ملات قیر امولسیون- سیمان این مقدار بیشتر از ۸۰٪ به دست آمده است. نتایج ارائه گردیده در شکل ۵ مربوط به زمان

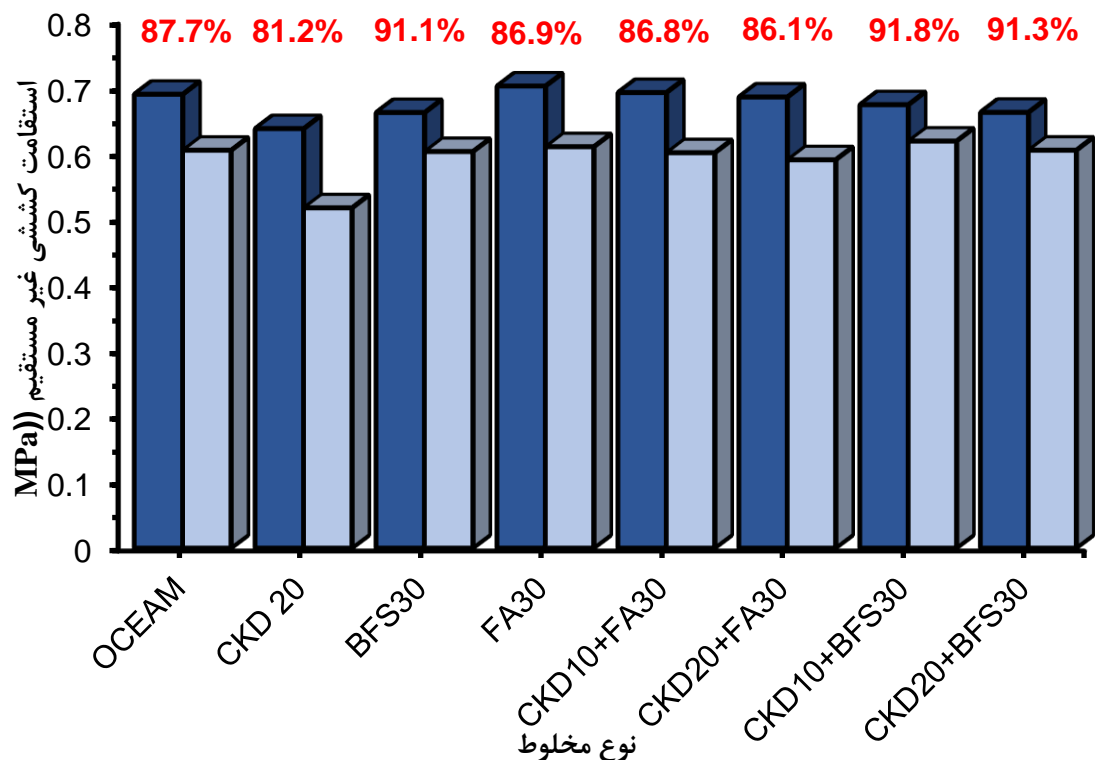
عمل‌آوری ۲۸ روزه می‌باشد و مطابق آنچه قبلاً بیان گردید در این عمر هنوز واکنش‌های خاکستر بادی کامل نشده که این امر باعث می‌شود اندکی حفرات بیشتر در ملات حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی موجود باشد و در نتیجه استقامت کششی غیرمستقیم نمونه قرار گرفته تحت شرایط ذوب و یخ را بیشتر تحت تأثیر قرار خواهد داد. در مورد غبار کوره سیمان، به دلیل وجود رس در ترکیبات این ماده و اینکه کانی رس (ایلیت) جذب آب داشته و اثری مخرب بر حساسیت رطوبتی خواهد گذاشت، کمترین نسبت استقامت کششی غیرمستقیم مربوط به این ملات به دست آمده است. همچنین، با جایگزینی وزنی غبار کوره سیمان با سیمان، با توجه وزن مخصوص کمتر این ماده، منافذ بیشتری نیز در ملات قیر امولسیون- سیمان شکل خواهد گرفت چون از لحاظ حجمی در یک لیتر ملات میزان مواد سیمانی کمتر وجود خواهد داشت. در نهایت نیز SO_3 زیاد موجود در غبار کوره سیمان به افزایش تخلخل ملات قیر امولسیون- سیمان دامن خواهد زد و به صورت معکوس بر حساسیت رطوبتی اثر خواهد گذاشت.

علی‌رغم نتایج حاصله در ملات‌های قیر امولسیون- سیمان دیگر، در مورد جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این ملات نسبت استقامت کششی غیرمستقیم را افزایش داده و حساسیت رطوبتی ملات را کاهش داده است. این امر می‌تواند بدین دلیل رخ داده باشد که این ترکیب کریستال‌های کلسیم هیدروکسید را کاهش داده که منجر به شکل‌گیری ملاتی متراکم‌تر خواهد گردید. همچنین، این جایگزینی منجر به این می‌گردد که کربوناسیون با نرخ بیشتری رخ دهد و کاهش $Ca(OH)_2$ بیشتر پُرکنندگی بیشتر حفرات را نیز نتیجه دهد. لذا، این ملات حدود ۹۲٪ نسبت استقامت کششی غیرمستقیم را نتیجه دهد.

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع‌السیر بدون بالاست

■ Dry

نسبت استقامت کششی غیر مستقیم در حالت تر به خشک



شکل ۵. استقامت کششی غیرمستقیم ملات‌های قیر امولسیون- سیمان در حالت تر و خشک

سیمان با خاکستر بادی و غبار کوره سیمان منجر به وجود Ca(OH)_2 بیشتر در ملات شده و در نتیجه حفرات افزایش خواهد یافت. اندرکنش اتفاقات ذکر شده با هم منجر به کاهش نسبت استقامت کششی غیرمستقیم می‌گردد. البته قابل ذکر است که این نسبت در همه نمونه‌ها بیشتر از ۸۰٪ بوده و همه ملات‌های قیر امولسیون- سیمان معرفی شده در این پژوهش استقامت مناسبی در برابر خرابی رطوبتی از خود نشان دادند.

۳-۴. ترک‌خوردگی در دمای میانی

خرابی ترک‌خوردگی در دمای میانی شامل هم شروع ترک‌خوردگی و هم رشد ترک‌خوردگی می‌باشد. به منظور ارزیابی توانایی مقابله ملات قیر امولسیون- سیمان در برابر رشد ترک در دمای میانی، پژوهش‌های قبلی

در مورد نمونه‌های ملات حاوی غبار کوره سیمان به عنوان فعال‌کننده ترکیب این ماده با خاکستر کوره آهن‌گدازی و انجام فرایند هیدراسیون و شکل‌گیری اترینگایت موجب می‌گردد Ca(OH)_2 خاصی پس از ۷ روز در مخلوط ملات باقی نماند و ملات حالت یکپارچه‌تری پیدا کند. البته با افزایش درصد غبار کوره سیمان اندکی این اتفاق کمرنگ شده و نسبت استقامت کششی غیرمستقیم به میزان ناچیزی کاهش یافته است. در ترکیبات خاکستر بادی و غبار کوره سیمان، ماهیت پوزولانی خاکستر بادی وجود Ca^{2+} در ترکیبات غبار کوره سیمان به همراه SO_3 منجر به شکل‌گیری ژل ثانویه کلسیم سیلیکات هیدرات و نیز پُر شدن بیشتر حفرات و به‌دست آمدن استقامت بیشتر می‌گردد. اما شکل‌گیری اترینگایت در این ملات‌ها، به‌خصوص ملات قیر امولسیون- سیمان، با جایگزینی به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درصد

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع‌السیر بدون بالاست

ضخامت ۵۷ میلی‌متر پس از عمل‌آوری در ۲۸ روز و برش توسط دستگاه برش مطابق شکل ۶ آماده گردید. در مرکز بخش نیم‌دایره، شکاف‌هایی با عمق ۲۵، ۳۱٫۸ و ۳۸ میلی‌متر در نمونه‌ها تعبیه گردید. سپس، این نمونه‌ها از بالای شکاف با نرخ ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری قرار گرفتند.

صورت گرفته، مطابق آنچه در بخش مقدمه ارائه گردید، مشخص نمود که آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای و پارامتر J-integral در این آزمون به خوبی قابلیت ارزیابی خصوصیات ترک‌خوردگی ملات قیر امولسیون- سیمان را دارا می‌باشند (جهان‌بخش و همکاران، ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹). از همین رو، نمونه‌های نیم‌دایره‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و



شکل ۶. نمونه آماده شده جهت انجام آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای در دمای ۲۵ درجه سلسیوس

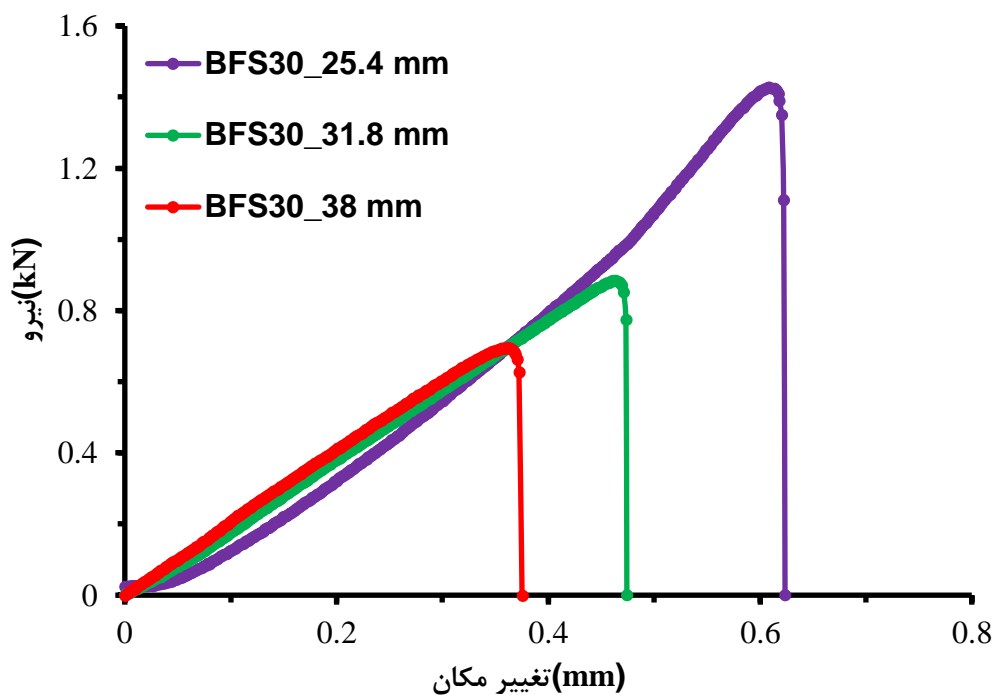
ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد مطالعه در این پژوهش ترسیم گردید. علاوه بر این، مطابق روش ارائه شده در بخش ۳-۱، روی نتایج پارامتر انتگرال J در آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای نیز آنالیز آماری و مقایسه زوجی کرامر صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول ۷ به نمایش گذاشته شده است.

$$J_c = - \left(\frac{1}{b} \right) \times \frac{dU}{da} \quad (1)$$

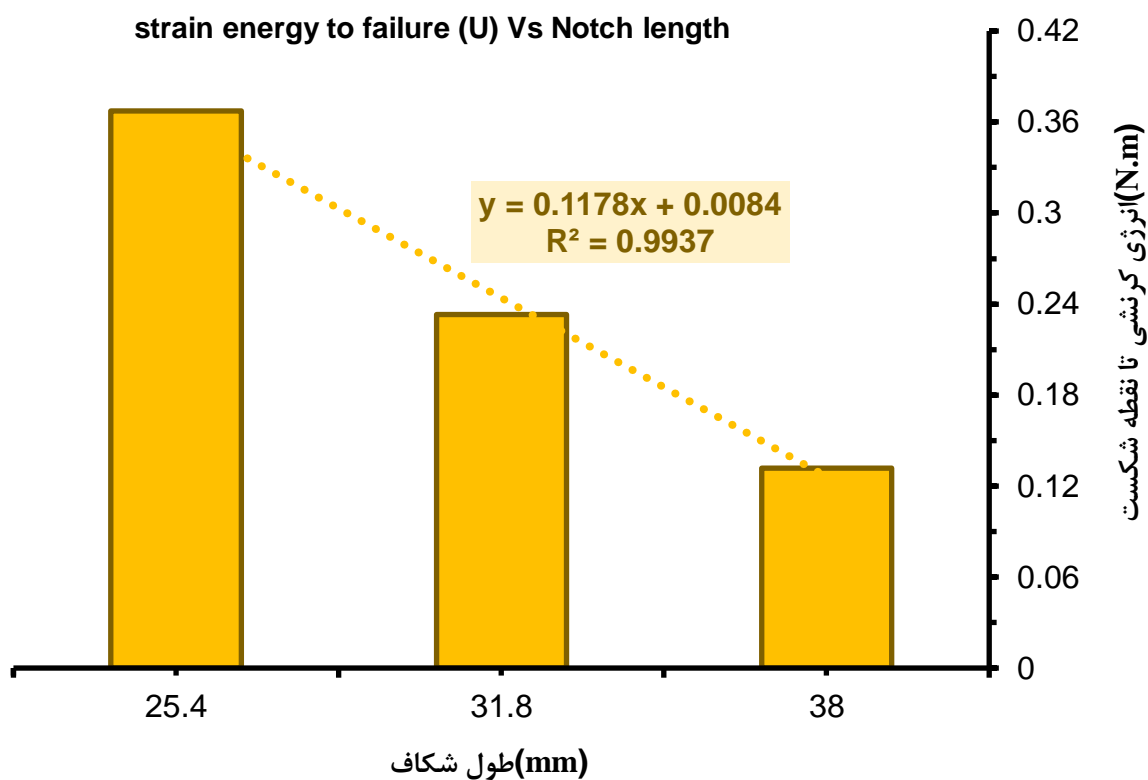
که در آن، b ضخامت نمونه است که مطابق استاندارد ۵۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده و $\frac{dU}{da}$ شیب تغییرات انرژی کرنشی تا نقطه شکست در برابر طول شکاف است که نحوه محاسبه آن در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است.

شکل ۷، نتیجه نیرو- تغییر مکان در هر طول شکاف را در آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای برای ملات قیر امولسیون- سیمان با جایگزینی ۳۰٪ سیمان به وسیله خاکستر کوره آهن‌گدازی نمایش می‌دهد. با محاسبه سطح زیر نمودار نیرو- تغییر مکان تا نقطه شکست (انرژی کرنشی تا نقطه شکست) توسط نرم‌افزار متلب، این مقدار مطابق آنچه در شکل ۸ به نمایش گذاشته شده است در برابر طول شکاف رسم گردید و با برازش خطی، شیب تغییرات انرژی کرنشی تا نقطه شکست در برابر طول شکاف به دست آمد. در انتها نیز مطابق استاندارد ASTM D8044-16، مقدار انتگرال J بر اساس فرمول (۱) برای سه تکرار محاسبه و پس از متوسط‌گیری در شکل ۹ برای

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع‌السیر بدون بالاست



شکل ۷. نمودار نیرو- تغییر مکان برای طول شکاف‌های مختلف در نمونه با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی

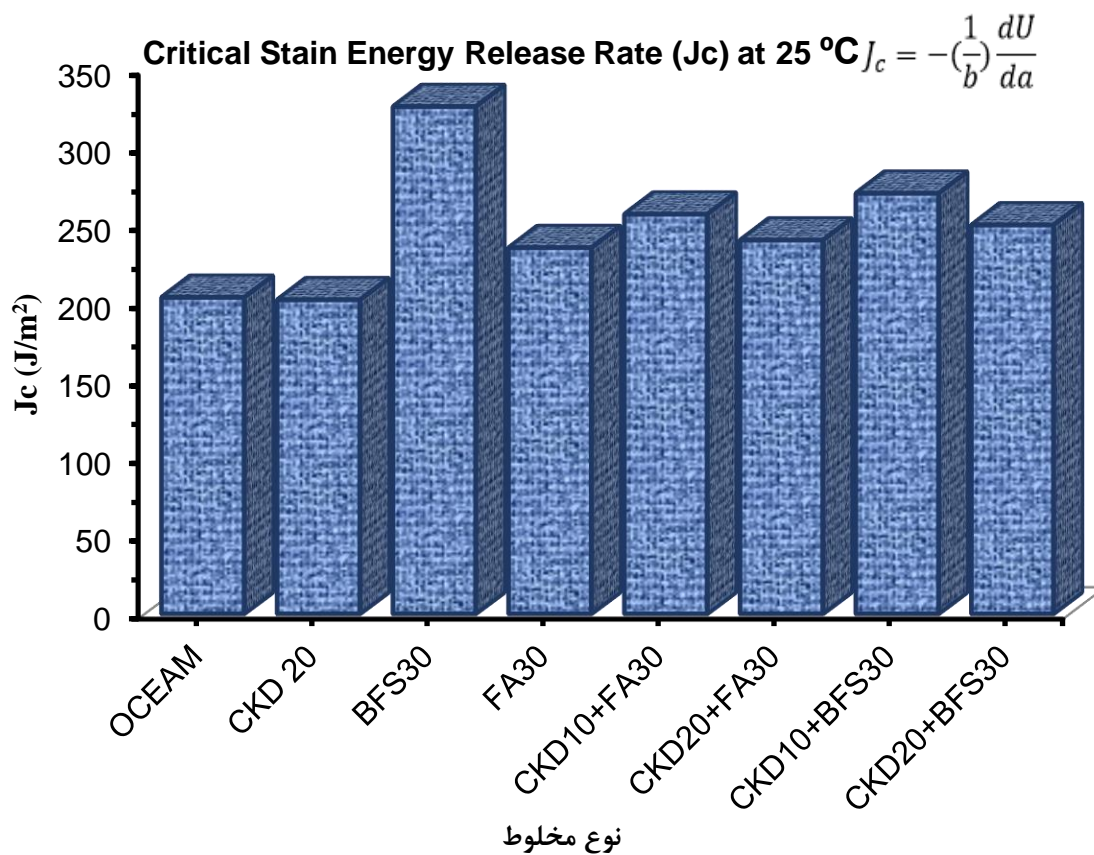


شکل ۸. نمودار انرژی کرنشی در برابر طول شکاف ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی ۳۰٪ سرباره کوره آهن‌گدازی

تأثیر غبار کوره سیمان بر عملکرد ملات قیر امولسیون- سیمان حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی و خاکستر بادی برای زیرسازی راه آهن سریع السیر بدون بالاست

جدول ۷. آنالیز آماری بر نتایج آزمون خمش نمونه نیم‌دایره‌ای در عمر عمل‌آوری ۲۸ روزه

آزمون	نتایج آزمون مقایسه گروهی Tukey-Kramer
انتگرال J ۲۸ روزه	BFS30 A
	CKD10+BFS30 B
	CKD20+BFS30 B C
	CKD10+FA30 C D
	CKD20+FA30 C D
	FA30 D E
	OCEAM E
	CKD 20 E



شکل ۹. مقادیر انتگرال Jc برای ملات‌های قیر امولسیون- سیمان مورد ارزیابی در پژوهش

در این ملات و ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل با هم تفاوت معناداری نداشته است. این امر می‌تواند بدین دلیل رخ داده باشد که غبار کوره سیمان به دلیل نداشتن قابلیت پوزولانی از سختی ملات حاصل می‌کاهد که در نتیجه به

مطابق نتایج ارائه شده در شکل ۹، جایگزینی ۲۰٪ سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با غبار کوره سیمان تأثیر قابل ملاحظه‌ای در انتگرال Jc نداشته که نتایج جدول ۷ نیز نشان از این دارد که مقدار این پارامتر

یافت. در نتیجه، همه این عوامل بهبود عملکرد ترک‌خوردگی در دمای میانی را نتیجه خواهد داد. در مورد نمونه‌های ملات قیر امولسیون-سیمان حاوی غبار کوره سیمان به عنوان فعال کننده، نتایج جدول ۷ مؤید این مهم بود که به‌کارگیری این ماده به عنوان فعال کننده توانسته پارامتر انتگرال J در نمونه با جایگزینی ۳۰٪ سیمان به وسیله خاکستر بادی را به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. این اتفاق به دلیل شکل‌گیری اترینگایت در سنین اولیه و نیز وجود CaO بیشتر در ملات که منجر افزایش قابلیت قلیایی ملات و بهبود چسبندگی میان ملات و قیر و سنگ‌دانه می‌گردد رخ داده است. اما افزایش درصد فعال کننده به دلیل وجود CaO بیشتر منافذ بیشتر در ملات را نتیجه خواهد داد. این امر، کاهش انتگرال J از ۲۷۱ به ۲۵۱ ژول بر متر مربع را با افزایش درصد غبار کوره سیمان از ۱۰ به ۲۰ درصد نتیجه خواهد داد. در مورد ملات قیر امولسیون-سیمان حاوی ۳۰٪ خاکستر کوره آهن‌گدازی، با افزودن غبار کوره سیمان به ملات، واکنش‌های پوزولانی خاکستر کوره آهن‌گدازی از طریق اترینگایت بهبود می‌یابد. ولی چون خاکستر کوره آهن‌گدازی حدود ۴۰٪ و غبار کوره سیمان حدود ۶۰٪ CaO دارد، وجود این آهک زیاد در ملات می‌تواند منافذ بیشتری در ملات ایجاد کند. ولی چسبندگی بهتر به قیر و سنگ‌دانه سیلیسی را نیز نتیجه دهد که در مجموع، ملات قیر امولسیون-سیمان با جایگزینی ۳۰٪ سیمان به وسیله خاکستر کوره آهن‌گدازی و ۱۰ و ۲۰ درصد سیمان با غبار کوره سیمان به ترتیب ۳۲ و ۲۳ درصد قابلیت مقابله ملات در برابر ترک‌خوردگی در دمای میانی را بهبود داده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

صنعت سیمان به عنوان دومین صنعت آلاینده در جهان امروز محسوب می‌گردد که کاهش مصرف این ماده در کنار استفاده از مواد جایگزین سیمان را در جهت حفظ محیط‌زیست دارای اهمیتی دوچندان نموده است. در این

افزایش چقرمگی ملات منجر خواهد گردید. اما وجود منافذ بیشتر در این ملات قیر امولسیون-سیمان به دلیل وجود آهک بیشتر می‌تواند بر خصوصیات مقاومت در برابر رشد ترک اثری منفی بگذارد. در نتیجه، اندرکنش اتفاقات ذکر شده در مجموع موجب گردید این ملات انتگرال J برابر با ملات کنترل از خود نشان دهد.

جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی در حدود ۶۰٪ انتگرال J را نسبت به ملات قیر امولسیون-سیمان کنترل بهبود داده است. طبق نتایج ارائه شده در جدول ۷ نیز این ملات به تنهایی به صورت قابل ملاحظه‌ای مقاومت بهتری در برابر ترک‌خوردگی در دمای میانی نسبت به ملات‌های قیر امولسیون-سیمان مورد ارزیابی در این مطالعه داشته است. این عملکرد بهتر می‌تواند به خاصیت پُرکنندگی مناسب خاکستر کوره آهن‌گدازی برگردد که منجر به آماده شدن ملاتی متراکم به همراه منافذ کمتر می‌گردد. همچنین، قابلیت پوزولانی کمتر خاکستر کوره آهن‌گدازی از افزایش بیشتر سختی می‌کاهد و به چقرمگی ملات حاصل خواهد افزود. دلیل سوم این اتفاق نیز درصد بیشتر CaO در خاکستر کوره آهن‌گدازی نسبت به سیمان است که منجر به چسبندگی بهتر با قیر و مصالح سنگی می‌گردد که همه این موارد دست‌به‌دست هم داد تا عملکرد فوق‌العاده این ملات در مقابله با ترک‌خوردگی دمای میانی اتفاق بیافتد.

نمونه ملات قیر امولسیون-سیمان با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر بادی در حدود ۱۵٪ انتگرال J را نسبت به ملات کنترل بهبود داده است. خاکستر بادی با $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراسیون سیمان که منجر به بروز ترک ریز و منافذ در ملات می‌گردد واکنش داده و ژل کلسیم سیلیکات هیدرات ثانویه را شکل می‌دهد و ملات حاصل متراکم‌تر خواهد بود. اما چون قابلیت هیدراتاسیون خاکستر بادی کمتر از سیمان است از سختی ملات نیز کاسته خواهد شد. در ادامه، با وجود نیکل و وانادیم در ساختار خاکستر بادی، میزان رزین در ساختار قیر افزایش یافته و قابلیت چسبندگی آن بهبود خواهد

- نتایج جایگزینی ۳۰٪ از سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با خاکستر بادی مشخص نمود که در عمر ۵۶ روزه، این ملات بیشترین استقامت فشاری را در میان ملات‌های مورد ارزیابی از خود نشان داده است. علاوه بر این، ملات حاصل از این جایگزینی نتیجه‌ای معادل ملات کنترل در آزمون استقامت کششی غیرمستقیم از خود نشان داد. همچنین، این ملات مقدار مجاز نسبت استقامت کششی غیرمستقیم را نیز تأیید نموده و حساسیت رطوبتی مناسبی از خود نشان داده است. در مورد توانایی مقابله با ترک‌خوردگی در دمای میانی، این ملات در حدود ۱۵٪ انتگرال J بیشتر نسبت به ملات کنترل از خود نشان داده است.
- جایگزین نمودن ۳۰٪ سیمان موجود در ملات قیر امولسیون- سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی منجر به کاهش اندک استقامت فشاری ملات در عمر عمل‌آوری ۵۶ روزه، ولی در عمر عمل‌آوری ۵۶ روزه، این ملات تقریباً استقامت فشاری برابر با ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل از خود نشان داد. علاوه بر این، نتایج آزمون استقامت کششی غیرمستقیم نشان داد که این جایگزینی در حدود ۴٪ استقامت کششی را کاهش داده است. اما این ملات نسبت استقامت کششی غیرمستقیم را از ۸۷/۷ درصد در ملات کنترل به ۹۲٪ افزایش داده و حساسیت رطوبتی ملات را کاهش داده است. در نهایت نیز ملات قیر امولسیون- سیمان با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با خاکستر کوره آهن‌گدازی در حدود ۶۰٪ انتگرال J را نسبت به ملات قیر امولسیون- سیمان کنترل بهبود داده است.

- El-Attar, M. M., Sadek, D. M. and Salah, A. M. 2017. "Recycling of high volumes of cement kiln dust in bricks industry". *J. Clean. Prod.*, 143: 506-515.
- Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H. and Moghadas Nejad, F. 2018a. "Effects of silica fume and nano-silica on the engineering properties of kaolinite clay". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, 2(2): 135-142.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H. and Moghadasnezhad, F. 2018b. "Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and cement kiln dust". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, Doi: 10.22060/ceej.2018.15100.5829.
- Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., Saeedi Azizkandi, A. and Moghadas Nejad, F. 2020. "Influence of sodium chloride on cement kiln dust-treated clayey soil: Strength properties, cost analysis, and environmental impact". *Environ., Dev. Sustain.*, Doi: 10.1007/s10668-020-00603-6.
- Ghavami, S., Nematpour, H., Rajabi, M. and Mobini, M. H. 2019. "Evaluation of the strength characteristics of clayey soils stabilized with rice husk ash and cement". *The 4th Iranian Conference on Geotechnical Engineering*.
- Jahanbakhsh, H., Hosseini, P., Moghadas Nejad, F. and Habibi, M. 2019. "Intermediate temperature fracture resistance evaluation of cement emulsified asphalt mortar". *Constr. Build. Mater.*, 197: 1-11.
- Jahanbakhsh, H., Karimi, M. M., Jahangiri, B. and Moghadas Nejad, F. 2018. "Induction heating and healing of carbon black modified asphalt concrete under microwave radiation". *Constr. Build. Mater.*, 174: 656-666.
- Leiben, Z., Wang, X., Wang, Z., Yang, B., Tian, Y. and He, R. 2018. "Damping characteristics of cement asphalt emulsion mortars". *Constr. Build. Mater.*, 173: 201-208.
- Liu, B. and Liang, D. 2017. "Effect of mass ratio of asphalt to cement on the properties of cement modified asphalt emulsion mortar". *Constr. Build. Mater.*, 134: 39-43.
- Lothenbach, K., Scrivener, K. and Hooton, R. D. 2011. "Supplementary cementitious materials". *Cement Concrete Res.*, 41(12): 1244-1256.
- Moghadas Nejad, F., Habibi, M., Hosseini, P. and Jahanbakhsh, H. 2017. "Investigating the mechanical and fatigue properties of sustainable cement emulsified asphalt mortar". *J. Clean. Prod.*, 156: 717-728.
- Naseri, H., Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F. and Golroo, A. 2019. "Developing a novel machine learning method to predict the compressive strength of fly ash concrete in different ages". *Amirkabir J. Civ. Eng.*, Doi: 10.22060/ajce.2019.16124.5569.
- Peng, J., Deng, D., Huang, H., Yuan, Q. and Peng, J. 2015. "Influence of superplasticizer on the rheology of fresh cement asphalt paste". *Case Stud. Constr. Mater.*, 3: 9-18.
- Rutherford, T., Wang, Z., Shu, X., Huang, B. and Clarke, D. 2014. "Laboratory investigation into mechanical properties of cement emulsified asphalt mortar". *Constr. Build. Mater.*, 65: 76-83.
- Shehata, M. H. and Thomas, M. D. 2000. "The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction". *Cement Concrete Res.*, 30(7): 1063-1072.
- Siddique, R. 2004. "Performance characteristics of high-volume Class F fly ash concrete". *Cement Concrete Res.*, 34(3): 487-493.
- Wang, Q., Yan, P., Kong, X. and Yang, J. 2011. "Compressive strength development and microstructure of cement-asphalt mortar". *J. Wuhan Univ. Technol.-Mater. Sci. Ed.*, 26(5): 998-1003.
- Wang, Z., Shu, X., Rutherford, T., Huang, B. and Clarke, D. 2015. "Effects of asphalt emulsion on properties of fresh cement emulsified asphalt mortar". *Constr. Build. Mater.*, 75, 25-30.
- Xie, Y. J., Fu, Q., Long, G. C., Zheng, K. R. and Song, H. 2014. "Creep properties of cement and asphalt mortar". *Constr. Build. Mater.*, 70: 9-16.
- Yang, K. H., Jung, Y. B., Cho, M. S. and Tae, S. H. 2015. "Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete". *J. Clean. Prod.*, 103: 774-783.
- Zhang, T., Cai, G. and Liu, S. 2017. "Application of lignin-based by-product stabilized silty soil in highway subgrade: A field investigation". *J. Clean. Prod.*, 142: 4243-4257.