استفاده از زباله‌های صنعتی و کشاورزی برای تولید مخلوط‌های روسازی بتن فشرده غلتکی پایدار حاوی سنگدانه‌های روسازی آسفالت بازیافتی

مقاله پژوهشی

امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج اللهی*، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ۹۹/۰۸/۱۸- پذیرش: ۹۹/۰۲/۰۵

صفحه ١٤-١

چکیده

بازیافت روسازی آسفالت در سرتاسر جهان به امری عادی تبدیل شده است و در ساخت روسازی های جدید با موفقیت به کار گرفته شده است. در حالی که چندین مطالعه در مورد استفاده از سنگدانه‌های روسازی آسفالت اصلاح شده (RAP) را برای سنگفرش های مقاوم و محکم انجام گرفته است، اما تنها تعداد کمی از پژوهشگران بر روی روسازی‌های بتونی فشرده غلتکی (RCCP) تحقیق و بررسی کرده اند. علاوه بر این، مطالعات بسیار ناچیزی در مورد افزایش مقدار RAP در ترکیب RCCP صورت گرفته است. مطالعه حاضر تلاشی برای افزایش پتانسیل مخلوط های RCCP حاوی ۵۰٪ RAP (روکش آسفالت سفت شده و الوده با گرد و غبار) می باشد. RAP۵۰ از طریق ضایعات مختلف صنعتی و کشاورزی مانند سیلیکا فوم، الودگی های معلق در هوا و خاکستر نیشکر به عنوان جایگزینی برای سیمان معمولی به دست امده است. یافته‌های این پژوهش نشان داد که اضافه کردن مواد افزودنی تاثیر قابل توجهی بر تراکم مخلوط‌های RCCP تازه ندارد، با این وجود میزان رطوبت موردنیاز در این ترکیب را به طور قابل ملاحظه ای افزایش می‌دهد. در حقیقت، نتایج به دست آمده با شواهد علمی ثابت کرد سیلیکا فوم برای مخلوط های RAP-RCCP یک ماده اولیه مناسب می باشد و نه تنها موجب افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی اسفالت تهیه شده از این روش می گردد، بلکه دوام مخلوط RCCP را نیز به میزان قابل توجهی بهبود می بخشد. همچنین از دوز بالاتر خاکستر معلق در هوا (30%) و خاکستر نیشکر (۱۰% و ۱۵%) می توان به عنوان ماده لایه پایه روسازی های بتونی معمولی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آسفالت بازیافتی، روسازی بتن غلتکی، ضایعات، مقاومت، دوام

۱- مقدمه

مواد روسازی آسفالت استخراج شده که معمولاً به عنوان روسازی آسفالت بازیافت شده (RAP[1]) شناخته می‌شوند، به طور گسترده‌ای برای کاربردهای مختلف روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بکار گیری آنها اکنون به یک روند جهانی تبدیل شده است (Su et al., 2009; Aurangzeb et al., 2013; Shi et al., 2018b,; Mukhopadhyay and Shi, 2019). با این حال در کشورهای در حال توسعه مانند هند، به دلیل تردید مهندسان عمران در پروژه‌های ساخت و بهسازی بزرگراه‌ها به دلیل در دسترس نبودن مقررات کدگذاری مناسب، استفاده موثر از آن ناچیز است (Kumari et al., 2018). در هند، سالانه مقدار زیادی RAP تولید می شود، که موجب تولید بیشتر گازهای گلخانه‌ای می‌گردد

(Singh et al., 2018a). از طرف دیگر، فقط در هند، به ازای هر تن سیمان تولید شده تقریباً ۸۲۵ کیلوگرم CO_2 آزاد می‌شود (موئف، ۲۰۱۰) و این حجم حدود ۵-۷٪ از انتشار CO_2 جهانی را تشکیل می دهد (Hasanbeigi et al., 2012; Turner and Collins, 2013; Yang et al., 2015; Maddalena et al., 2018). اگر بتوان از بروز این دو عامل جلوگیری کرد، قطعاً می‌توان به مفهوم پایداری که پیشتر در مورد بزرگراه‌ها گفته شد، دست یافت. به دلیل برتری روسازی‌های بتنی نسبت به روسازی‌های آسفالت، وزارت راه و ترابری و بزرگراه‌ها، با هدف شکل دادن به سنگ فرش های بتنی برای حمل و نقل در سراسر کشور به سمت روش ذکرشده در این پژوهش تمایل پیدا کرد (Singh et al., 2017) با این حال، هزینه های اولیه ساخت روسازی های بتنی در مقایسه با روسازی های آسفالت بسیار زیاد است (Modarres and Hosseini, 2014) و به نظر نمی رسد دولت بتواند از نظر اقتصادی این روش را به طور مداوم و پایدار مورد استفاده قرار دهد. با در نظر گرفتن این موضوع، اجرای سنگفرش‌های بتنی متراکم شده غلتکی (RCCP[2]) در جاده‌های هند کاملاً مناسب به نظر می‌رسد، زیرا ساخت RCCP نه تنها سریع است، بلکه نیاز کمتری به ماشین آلات سنگین دارد (Palmer, 1987)؛ هزینه‌های اولیه ساخت RCCP ۱۰-۲۰٪ پایین‌تر از سنگفرش‌های بتونی معمولی، یعنی روسازی‌های بتونی سیمان (PCC[3]) هستند (Modarres and Hosseini, 2014). این ترکیب اگر به درستی فرموله‌بندی شود، مخلوط‌های RCCP می‌توانند پارامترهای ماندگاری و استقامت تقریباً معادل با مخلوط‌های PCC را نشان دهند. بعلاوه، گنجاندن RAP در مخلوط‌های RCCP نه تنها از نظر اقتصادی بصرفه می‌باشد، بلکه مزایای زیست محیطی متعددی مانند کاهش مصالح غیر قابل تجدید پذیر متداول و کاهش گازهای گلخانه ای را نیز موجب می گردد. در چند دهه گذشته، افزایش استفاده از RAP برای ساخت روسازی‌های جدید رایج تر شده است. این ترکیب طور گسترده ای برای کاربرد لایه های پایه و زیر پایه مورد استفاده قرار می گیرد. (Taha et al., 1999, 2002; Arulrajah et al., 2013; Brand and Roesler, 2015b; Avirneni et al., 2016)، گرچه مطالعات اندکی برای استفاده از آن به عنوان پوشاندن مواد سنگ فرش بتونی در دسترس است. ماده RAP قابل استفاده مجدد است که از فرز یا تخریب جاده آسفالت موجود بدست می‌آید و این ماده گرانبها پتانسیل استفاده مجدد در جاده های آسفالت و بتونی را دارد. این ترکیب به دلیل کاهش محتوای چسب بکر، به عنوان افزودنی در روسازی های آسفالت مورد استقبال قرار می گیرد، با این حال، استفاده از آن در روسازی‌های بتنی هنوز ناچیز است. این امر به این دلیل است که در کشورهای در حال توسعه مانند هند، فرز کردن جاده‌های آسفالت موجود معمولاً با استفاده از روش فرز کنترل نشده (به طور معمول با استفاده از بولدوزر) انجام می‌شود. در چنین مواردی، گرد و غبار از لایه‌های زیرین روسازی با ذرات RAP مخلوط می‌شود و همچنین لایه گرد و غبار اضافی در RAP جمع می‌شود. به دلیل ذخیره سازی این ترکیب در فضای باز و نگهداشتن چندین ماهه آن در فضای باز و در نتیجه افزودن یک آلاینده دیگر یعنی گرد و غبار همراه با لایه آسفالت موجود در RAP سبب می‌گردد بکارگیری RAP برای استفاده موثر در روسازی‌های بتنی به دلیل خروجی‌های مقاومت پایین‌تر، نیز کمتر باشد. ترکیب کسری درشت RAP در مخلوط های بتن فقط تا ۵۰٪ امیدوار کننده بود (Settari et al., 2015; Fakhri andAmoosoltani, 2017) در حالی که، استفاده از RAP جدید به دلیل درجه بندی شکاف و ماهیت مواد ترکیبی ان محدود می شود. همان منطقه انتقال ضعیف سطحی بین سنگدانه RAP و ملات سیمان معمولاً عامل اصلی کاهش خصوصیات مقاومت بتن است (Brand and Roesler, 2017a,b; Singh et al., 2019b). مواد افزودنی معدنی سیمانی تکمیلی (SCM[4]) مانند سیلیکا فوم (SF[5])، خاکستر معلق در هوا (FA[6]) و خاکستر نیشکر (SA[7]) به عنوان جایگزینی جزئی سیمان پرتلند گزارش شده اند. این مواد به عنوان پوزولانای هنری عمل می‌کنند که دارای خواص سیمانی است و در کاهش مقدار سیمان پرتلند که ماده گران قیمتی است، نقش دارد. استفاده از فرآورده های جانبی صنعتی ناشی از صنعت سیلیکون که معمولاً با نام Micro Silica یا Silica Fume شناخته می‌شود می‌تواند خصوصیات مکانیکی و دوام مخلوط‌های بتونی معمولی را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد (صدیق، ۲۰۱۱). غلظت عظیم دی اکسید سیلیکون (SiO2) (> 80٪ (و سطح بالاتر ذرات SF ذرات ریز ساختار بتن، منطقه انتقال بین سطحی ((ITZ، تشکیل ژل‌های اضافی سیلیکات هیدرات کلسیم و همچنین مقاومت در برابر سایش را افزایش می‌دهد. FA زباله جانبی حاصل از نیروگاه‌های حرارتی مستقر در زغال سنگ است و به طور گسترده‌ای برای

جایگزینی پورتلند مورد استفاده قرار گرفته است. سیمان در مخلوط‌های PCC غلظت FA نسبتاً کمتری از SiO_2 و اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) نسبت به ذرات SF دارد که به تولید ژل های اضافی $CSH^{\wedge}$ کمک می‌کند (Singh et al., 2018). استفاده از FA در مخلوط‌های بتن به ۳۰٪ محدود شده است، در حالی که در مخلوط‌های بتنی شامل RAP، استفاده از آن فقط به ۲۰٪ محدود می شود (Singh et al., 2018) با اینحال دوزهای بالاتر FA اغلب منجر به تشکیل اترینگیت می شود (به دلیل خاصیت ذرات (FA و معمولاً برای سازه های بتنی مضر محسوب می‌شود (Singh et al., 2018). همانند مواد RAP، زباله‌های کشاورزی حاصل از صنعت نیشکر که معمولاً به عنوان SA شناخته می شوند نیز به عنوان زباله‌های کشاورزی و جهت رفع مشکلات آلودگی هوا، آلودگی آب، و آلودگی زمین به کار گرفته می‌شوند. هند در تولید نیشکر در سراسر جهان رتبه دوم را دارد و بدین ترتیب منجر به تولید سالانه مقدار زیادی زباله SA می‌شود. اگر SA در دیگهای بخار در دمای متغیر ٦٠٠-٨٠٠ درجه سانتیگراد بسوزد می تواند مقدار زیادی SiO_2 تولید کند و می تواند به عنوان پوزولانای هنری برای جایگزینی سیمان پرتلند استفاده شود. (Singh et al., 2018). حداکثر فعالیت پوزولانی SA معمولاً با استفاده از ذرات رد شده از غربال ٤٥ میکرومتر. پژوهش‌های انجام گرفته نشان می دهند خواص مقاومت مخلوط PCC تا ۱۰٪ جایگزینی سیمان پرتلند توسط ذرات SA بهبود یافته‌اند. در مورد مخلوط PCC شامل RAP، مشاهده شده است که فقط تا ٥٪ سودآور خواهد بود که منجر به اثر مخرب خواص PCC به علت ماهیت رطوبت ذرات SA می شود. با در نظر گرفتن موارد فوق، به نظر می‌رسد استفاده از سنگدانه‌های RAP آلوده و سایر زباله‌های صنعتی و کشاورزی مفهوم مقاومت بتن تولیدی از این مواد را با مزایای زیر تکمیل می‌کند.

۱) حفاظت از منابع طبیعی یعنی سنگدانه‌ها، سیمان و دوگانه
۲) هزینه حمل سنگدانه‌های بکر از معادن کاری به مکان‌های دیگر به دلیل در دسترس بودن سنگدانه‌های RAP بسیار ناچیز خواهد بود.
۳) از بین بردن زمین / مشکلات دفع خاک RAP و خاکستر نیشکر.
٤) نیاز به حداکثر سازی کارایی تولید و حداقل سازی حمل و نقل، ساختن بخار سیلیکا سازگار با محیط زیست
٥) بهبود دوام جاده‌های بتونی
٦) کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای خالص
۷) افزایش زیبایی و جلوه بصری جاده‌ها و بزرگراه‌ها

۲-پیشینه تحقیق

مطالعات زیادی در مورد استفاده از RAP برای پیاده روهای مخلوط پایدار در دسترس است، با این حال، در این مطالعات، RAP در نظر گرفته شده یا به صورت آزمایشگاهی ساخته شده یا RAP شسته شده و یا RAP پردازش شده آزمایشگاهی (الک و فرآورده‌های موثر مانند سایش و سایش یا نتیجه روش فرز کنترل شده (یعنی RAP بدون آلودگی) بوده است. مطالعات کمتری در دسترس است که RAP در نظر گرفته شده از طریق روش کنترل نشده کنترل آسیاب (حاوی مقدار قابل توجهی گرد و غبار) به دست آمده و مستقیماً بدون هیچ‌گونه فرآوری برای مخلوط‌های بتن سیمان استفاده شده باشد. و علاوه بر ان، محققین پژوهش حاضر هیچ مطالعه‌ای در مورد استفاده از چنین RAP برای روسازی‌های RCCP نیافتند. علاوه بر این، تاکنون هیچ مطالعه‌ای در رابطه با افزایش ترکیبات RAP-RCCP با استفاده از مواد افزودنی معدنی سیمان مکمل تجاری (محلی) موجود در بازار مانند سیلیکا فوم، خاکستر معلق در هوا و خاکستر نیشکر انجام نشده است. بنابراین، تحقیق حاضر اولین نوع آن است که در آن سعی شده است خواص مخلوط‌های RCCP حاوی۵۰٪ مواد تجمع یافته RAP آلوده به گرد و غبار را با کمک SCMهای فوق الذکر بر اساس تعدادی تست آزمایشگاهی افزایش دهد. همچنین اعتقاد بر این است که یافته‌های این مطالعه به رفع حدس و گمان‌ها و به اطمینان رسیدن در مورد دوز استفاده از RAP و SCM برای ساخت روسازی‌های RCC کمک می‌کند و سازمان‌های دولتی و سیاست‌گذاران را به سمت تهیه فرمولاسیون بهینه برای استفاده موثر از SCM ترغیب می‌کند. مخلوط RAP-RCCP ترکیبی، با در نظر گرفتن مزایای اقتصادی و زیست محیطی که می‌توان با ترکیب چنین زباله‌هایی به دست آورد، پیشنهاد گردیده است.

شکل ۱. مواد مورد استفاده در مطالعه حاضر

۲-مواد و ترکیبات مخلوط

سیمان پورتلند نوع دوم در این تحقیق استفاده شد. خاکستر نیشکر (SA و خاکستر آتشفشان) (FA) که به عنوان مواد زائد معمولاً در محیط آزاد ریخته می‌شوند اما این مواد حاوی سیلیکای واکنشی هستند و به دلیل واکنش پوزولانی ثانویه می‌توانند تا حدی برای جایگزینی سیمان پورتلند استفاده شوند. در حالی که، سیلیکا فوم SF به دلیل محتوای سیلیس فعال مجدد آن (> ۸۵٪) گزارش شده است که به طور چشمگیری عملکرد سازه های بتنی را بهبود می بخشد SA که در شکل ۱ نشان داده شده است، در یک حالت فرآوری نشده دریافت شد. SA دریافت شده به مدت ٢٤ ساعت در فر خشک شده و سپس به کمک غربال ۷۵ میکرومتر به منظور افزایش فعالیت پوزولانی آن غربال گردید. پس از آن، SA فرآوری شده به عنوان جایگزین قطعه مورد استفاده قرار گرفت. سیمان پرتلند به نسبت ۱۰٪ و ۱۵٪ به طور مشابه، با مشخصات SF و FA که در شکل نشان داده شده است، به صورت محلی بدست آمد و با ترکیب نسبت ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ و ۳۰٪ مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب هر کدام به ترتیب حاوی حداقل ۸۵٪ و ۵۰٪ دی اکسید سیلیسیم (SiO2) بود. این تحقیق میزان رطوبت بیش از ۳٪ و از بین رفتن اشتعال بیش از ٦٪ را توصیه نمی‌کند. ترکیب شیمیایی SCMهای در نظر گرفته شده توسط طیف سنجی فلورسانس اشعه X (XRF^9) در جدول ۱ جهت مشاهده آورده شده است.

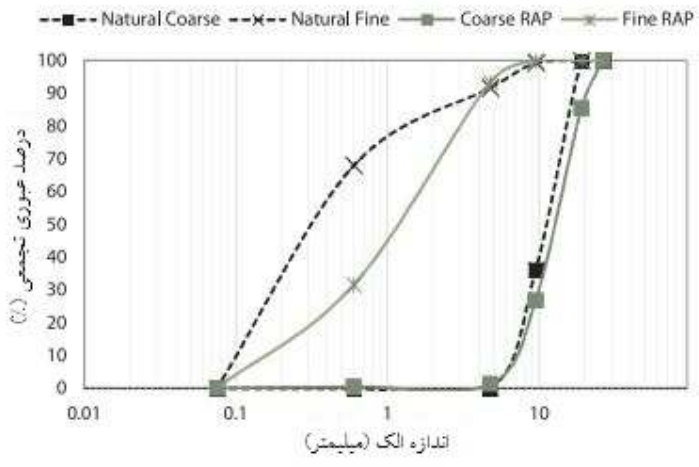
جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان پورتلند، سیلیکا فوم، خاکستر گرد و غبار معلق در هوا، خاکستر نیشکر

مواد اولیه	مقدار (%)			
	سیمان پورتلند	سیلیکا فوم	خاکستر گرد و غبار معلق در هوا	خاکستر نیشکر
SiO_2	36.28	90.76	53.08	65.98
Al_2O_3	5.63	0.96	22.69	2.26
Fe_2O_3	2.51	2.53	5.11	1.49
MgO	2.25	3.13	0.73	2.18
CaO	49.84	0.63	0.96	2.65
Na_2O	0.83	1.05	0.76	0.80
K_2O	0.62	3.14	1.35	1.79
MnO	0.03	0.06	0.04	0.04
TiO_2	0.34	0.11	1.49	0.20
P_2O_5	0.28	0.15	0.32	0.73
LOI (%)	1.24	2.3	3.86	4.67
رطوبت (%)	0.1	0.25	0.31	0.35
درجه کشش ویژه	3.15	2.20	2.35	2.14
درجه تناسب (cm^2/g)	3363	20,000	3287	2956

ماسه سنگ خرد شده خالص با سنگدانه حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی متر و شن و ماسه طبیعی به دست آمده از معدن اسب چران رودهن جمع آوری شد و با استفاده از غربال ٤,٧٥ میلی‌متر برای جداسازی ذرات درشت غربالگری شده و سپس جوانه بندی گردید. RAP نشان داده شده در شکل ۱ از طریق روش احیای کنترل نشده تهیه شد، به همین دلیل، آلاینده‌های گرد و غبار لایه‌های زیرین با سنگدانه های RAP مخلوط شده و در نتیجه مانع دیگری برای استفاده بالقوه از سنگدانه‌های RAP برای مخلوط‌های RCCP اضافه می‌شود. با این حال، در این پژوهش گرد و غبار آلوده RAP نهایی به درجات مناسبی تقسیم بندی گردید و از این رو استفاده موثر آن نشان داده شد. خصوصیات فیزیکی سنگدانه های طبیعی و RAP در جدول ۲ ارائه شده است، و توزیع اندازه دانه مصالح خالص و RAP در شکل ۲ آورده شده است. در بخشهای مختلف همین پژوهش دانه‌های خالص با RAP جایگزین شدند. بر همین اساس، برای تولید مخلوط پایدار RCCP سطح جایگزینی 50 RAP٪ با ترکیب۵۰٪ RAP درشت و ۵۰٪ RAP ناخالص توسط محققین این پژوهش توصیه می‌شود.

۳- روش تحقیق

طراحی مخلوط روسازی بتن متراکم غلتکی (RCCP) بر اساس میزان آب مربوط به بالاترین مقدار فشردگی آن است و بنابراین، برای تعیین میزان رطوبت مطلوب (OMC^{10}) و حداکثر چگالی ترکیب خشک از روش D1557ASTM، استفاده گردید. MDD^{11} مقدار مخلوط در نظر گرفته شده است. در صورت استفاده از RCCP به عنوان لایه سطحی روسازی، حداقل مقاومت فشرده و تخمین ۲۷/٦ مگاپاسکال و ٦۷/۳ مگاپاسکال مورد نیاز است (ایسی، ۲۰۰۱). همچنین در این پژوهش ، برای تعیین مقاومت فشاری و برون زدایی مخلوط RCCP در ۷، ۲۸ و ۹۱ روز پس از زمان پخت این ترکیب، استفاده شد. علاوه بر این، اگر یک لایه روسازی به عنوان لایه سطح عمل کند میزان مقاومت در برابر سایش یک پارامتر مهم است که باید ارزیابی شود. این پارامتر طبق استانداردهای ASTM C1747 انجمن آزمایش و مواد آمریکا (۲۰۱۳) برای تعیین مقاومت مورد استفاده قرار گرفت. طبق این استاندارد، بررسی و اندازه گیری سایش از لحاظ از دست دادن جرم در ۲۸ و ۹۱ روز پس از پخت ترکیب، باید انجام گیرد. بنابراین، در تحقیق حاضر، SCMهای گفته شده در مخلوط بهینه RAP، یعنی مخلوط RAP۵۰، برای بهینه‌تر شدن ترکیبات RAP-RCCP چندین تست با درصدهای مختلف در محیط آزمایشگاهی، انجام شدند. نسبت‌های مخلوط مطابق با دستورالعمل‌های IRC تهیه شده است. این دستورالعمل در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۲. توزیع ذرات متراکم و اندازه آنها

جدول ۲. خواص محتویات ترکیب مورد استفاده در پژوهش حاضر

خواص و ویژگی‌ها	ضخامت صافی طبیعی RAP	ضخامت طبیعی RAP	صافی RAP	
درجه کشش	2.63	2.59	2.41	2.35
جذب اب (%)	0.65	0.60	0.70	2.03
چگالی (kg/m^3)	1745.3	1744.2	1613.7	1663.1
تخلخل (%)	17.9	8.7	8.5	10.5
درجه تاثیر	19.07	–	10.03	–
ذرات اتشفشانی (%)	–	–	14.95	–
محتویات اسفالت (%)	–	–	1.9	4.5

٤- نتایج و بحث

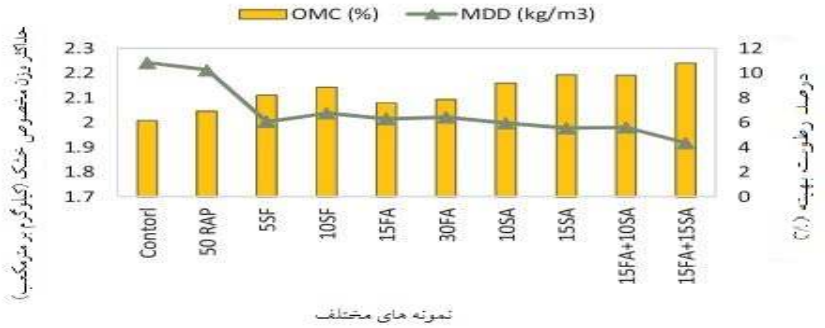
٤-١- تأثیر SCM در OMC و MDD

در شکل ۳، تأثیر مخلوط‌های اضافی سیمانی تکمیلی (SCM) بر روی مقدار رطوبت بهینه (OMC) و حداکثر چگالی خشک (MDD) مخلوط روسازی بتن فشرده غلتکی (RCCP) حاوی ۵۰٪ RAP درشت و خالص را نشان داده شده است. در ۵۰٪ RAP مشاهده شد که جایگزینی سنگدانه‌های خالص با ۵۰٪ از سنگدانه‌های روکش آسفالت اصلاح شده (RAP) باعث افزایش OMC مخلوط های RCCP در حدود ۱۲٪ می شود. این یافته در مقایسه با مطالعه انجام شده توسط مدرس و حسینی در تناقض است، چرا که مدرس و حسینی،(۲۰۱٤) گزارش کرده‌اند که در مخلوط‌های بتنی شامل RAP نیاز به آب کمتری وجود دارد، در حالی که یافته‌های ما ثابت کرد برای مخلوط‌های بتن RAP حتی نسبت به مخلوط کنترل معمولی نیز آب کمتری مورد نیاز است.

جدول ۳. نسبت مخلوط RCCP در نظر گرفته شده

نوع ترکیب	سیمان	صافی طبیعی ضخامت طبیعی		ضخامت RAP	صافیRAP	سیلیکا فوم	خاکستر گرد و غبار معلق در هوا	اب خاکستر نیشکر	
Control	350	962.5	787.5	–	–	–	–	–	130
50RAP	350	481.3	393.8	481.3	393.8	–	–	–	145
5SF	332.5	481.3	393.8	481.3	393.8	17.5	–	–	172
10SF	315	481.3	393.8	481.3	393.8	35	–	–	185
15FA	297.5	481.3	393.8	481.3	393.8	–	52.5	–	159
30FA	245	481.3	393.8	481.3	393.8	–	105	–	164
10SA	315	481.3	393.8	481.3	393.8	–	–	35	193
15SA	297.5	481.3	393.8	481.3	393.8	–	–	52.5	206
15FA + 10SA	262.5	481.3	393.8	481.3	393.8	–	52.5	35	205
15FA + 15SA	245	481.3	393.8	481.3	393.8	–	52.5	52.5	205

در مطالعه حاضر، مقدار جذب آب سنگدانه‌های RAP بیشتر از سنگدانه‌های خالص بود و این عمدتا به دلیل تجمع لایه آلاینده گرد و غبار در اطراف سنگدانه‌های RAP بود که به نوبه خود خواستار دریافت آب بیشتری هستند و در نتیجه، مخلوط RAP۵۰ در مقایسه با مخلوط شاهد بطور قابل توجهی رطوبت مطلوب را افزایش می‌داد وجود ذرات تجمع یافته نیز ممکن است برای درخواست بیشتر آب تا حدی قابل پاسخ باشد. این امر به همراه وجود مقدار قابل توجهی از آب که باعث آلودگی ان به گرد و غبار و آلاینده‌ها در RAP می شود نیز ممکن است به دلیل وجود میزان بیشتر آب و رطوبت در مخلوط‌های RCCP باشد. گنجاندن SCMهای انتخاب شده بیشتر برای افزایش OMC در مقایسه با مخلوط بهینه RAP۵۰ در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. در مواردی، OMC 19 با مقدار ۲۸ درصد، ۱۰ و ١٤ درصد، ۳۳ و ٤٣ درصد و ٥٧٠ درصد افزایش یافت که سیمان پورتلند تا حدی با ۵ و ۱۰ درصد سیلیکا فوم (SF)، ۱۵ و ۳۰ درصد گرد و غبار معلق در هوا جایگزین شد. در نتیجه آن می‌توان گفت سیلیکا فوم و خاکستر نیشکر به ترتیب ۱۰ و ۱۵٪ و ترکیبی از ذرات FA و SA قادرند میزان اب بیشتری در خود ذخیره کنند. این افزایش قابلیت جذب آب به دلیل سطح بالای ذرات SF بالاتر است، از طرف دیگر، ساختار کروی ذرات FA ممکن است در مقایسه با سایر SCMهای مورد بررسی، عامل اصلی در جذب آب کمتر باشد. با وجود افزایش قابل توجه در مقادیر OMC مخلوط RAP۵۰ شامل SCM، مشخص شد که درصد کاهش در مقادیر MDD در سطح پایین است. در مواردی، جایگزینی سیمان پورتلند توسط SF، FA، SA و FA&SA مخلوط شده، ارزش MDD را به ترتیب حدود ۸٪، ۹٪، ۱۱٪ و ۱۳٪ کاهش داد. این کاهش ممکن است به دلیل کمبود خواص SCM نسبت به سیمان پورتلند باشد. سطح ویژه پایین SCM به جز SF نیز ممکن است عامل اصلی در کاهش مقادیر MDD باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که گنجاندن SCMها در تراکم تازه مخلوط RAP۵۰ حتی در صورت افزایش تقاضای آب، ارتباط آماری معناداری ندارد.



شکل ۳. خصوصیات مخلوط‌های تازه RCCP

٤-۲-تأثیر SCM بر مقاومت فشاری

در شکل ٤، ترکیب ۵۰ RAP از سنگدانه‌های RAP برای کاهش مقاومت فشاری مخلوط RCCP پس از ۲۱ تا ۲۸ روز نگهداری، نشان داده شده است. دلیل این کاهش ممکن است آسفالت اطراف RAP باشد که تشکیل پیوند بین RAP و ملات سیمان را محدود می‌کند (سینق و همکاران، ۲۰۱۷). گنجاندن SCMهای در نظر گرفته شده به منظور کاهش بیشتر مقاومت فشاری مخلوط RAP۵۰ در شکل ٤ اورده شده است. همانطور که در شکل ٤ مشاهده می‌شود، در ۲۸ روز، کاهش ٦٪، ۱۵٪، ۱۲ و ۱۹٪ نسبت به مخلوط RAP۵۰ به ترتیب با ۱۵٪ FA، ۳۰٪ FA، ۱۰٪ SA و ۱۵٪ SA جایگزین PC شد.

شکل ٤ . مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف

این کاهش مقاومت فشاری را می‌توان ناشی از این واقعیت دانست که منطقه انتقال سطحی بین دانه‌های RAP و ملات سیمان به دلیل وجود آسفالت مایع در اطراف RAP، علی رغم درجه SCM های گفته شده، ارتقا نیافته است. (هوانگ و همکاران، ٢٠٠٦ ؛ سینگ و همکاران، ٢٠١٩). اما از سوی دیگر، پژوهش های موجود (برند و روسلر، ٢٠١٧؛ سینق و همکاران، ٢٠١٧) نیز یافته های این تحقیق را تایید می کنند که اجزا ذرات SF به عنوان بخشی از جایگزین PC، مقاومت فشاری مخلوط ٥٠ RAP طی ٧ روز، بهبود مقاومت فشاری با درجه ذرات ٥٪ و ١٠٪ 5 SF٪ و ٧٪ را نشان می‌دهند. به طور مشابه، در ٢٨ و ٩١ روز بعد از پخت، افزایش مقاومت فشاری به ترتیب ٥٪ و ٨٪ و ٤٪ و ٨٪ برای همان مخلوط های SF ذکر شده بدست امد. این افزایش قدرت را می‌توان به سطح بالاتر و مقدار سیلیکا آمورف بالاتر ذرات SF نسبت داد که ممکن است منجر به ماتریس سیمانی بهتری شود و ITZ مخلوط SF را بهبود بخشد (سینق و همکاران، ٢٠١٧). از طرف دیگر، ترکیبی از مخلوطهای FA و SA توصیه نمی‌شود زیرا کاهش درصد مقاومت در برابر فشار به طور قابل ملاحظه‌ای بالاتر از مخلوط های مختلف SCM است. برای نمونه، مشخص شد که ترکیب ١٥٪ FA و ١٠٪ SA دارای مقاومت فشاری ٤٣٪ کمتری نسبت به مخلوط RAP٥٠ است، در حالی که افزایش بیشتر نسبت SA (یعنی ١٥٪) میزان کاهش را به ٥٠٪ می‌رساند. در صورت نیاز به بهبود قدرت، این امر نشان دهنده نامناسب بودن مخلوط FA&SA برای آماده سازی مخلوط RAP-RCCP است. اما، ١٥٪ مخلوط FA حداقل معیار مقاومت فشاری ٢٧,٦ MPa، را به دست آورد، در حالی که در مطالعه حاضر محققان نتوانستند بهبود مقاومت ترکیبی بهینه RAP، یعنی مخلوط RAP٥٠ را به دست اورند. از طرف دیگر، مخلوط های SF به معیار شرط بندی رسیده و مقاومت فشاری مخلوط RAP٥٠ را نیز افزایش می‌دهند، با این حال، استفاده از آن برای پروژه‌هایی که از نظر اقتصادی و تخصیص بودجه در محدودیت هستند توصیه نمی‌شود. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد زمانی که RCCP به عنوان یک لایه سطحی استفاده می‌شود و قصد دارد بر کاهش ترافیک موثر باشد، حداکثر ١٠٪ سیلیکا فوم و ١٥٪ خاکستر گرد و غبار معلق در هوا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

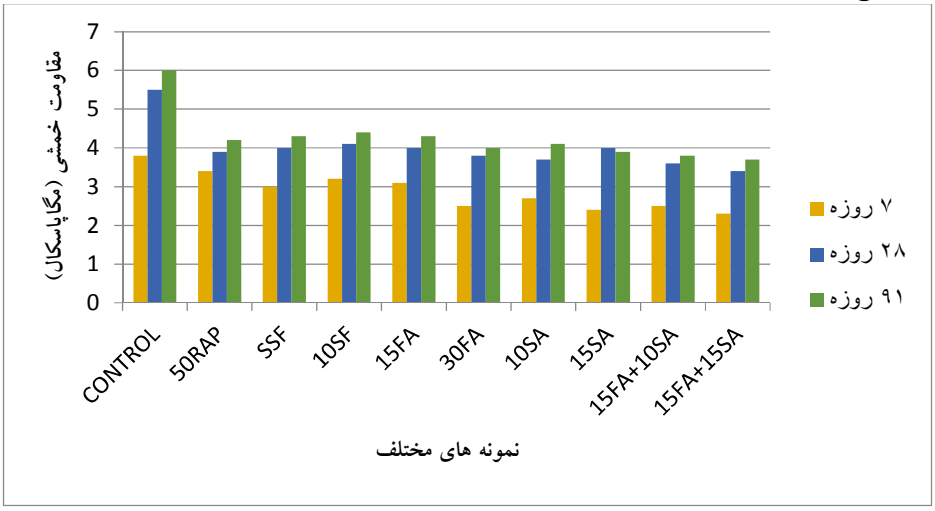
٤-٣- تأثیر SCM ها در مدول گسیختگی

شکل ٥ تأثیر SCMها را روی مدول پارگی مخلوطهای RCCP حاوی ٥٠٪ دانه های RAP نشان می‌دهد. در این شکل نتایج مقاومت فشاری، گنجاندن SCMها برای کاهش مدول پارگی مخلوط RAP٥٠ به میزان قابل توجهی (به استثنای مخلوطهای (SF) مشخص شد. در مواردی، نشان داده شد که کاهش مدول پارگی حدود ٨٪، ٩٪ و ١٦٪ است که سیمان پورتلند به ترتیب با ٣٠٪ FA، ١٠٪ SA و ١٥٪ ذرات SA جایگزین شد. این کاهش قدرت در اثر در بر گرفتن ذرات گفته شده ممکن است به مقدار ناچیزی از سیلیکای فعال شده در دسترس برای واکنش با پورتلند باشد. به طور کلی، افزایش مقاومت در مخلوطهای مختلف عمدتاً به دلیل متراکم شدن ITZ در نتیجه غلظت بالاتر سیلیس آمورف یا سطح ویژه بالاتر SCM های اعلام شده است، اما برای مخلوطهای بتنی RAP، این قضیه معتبر

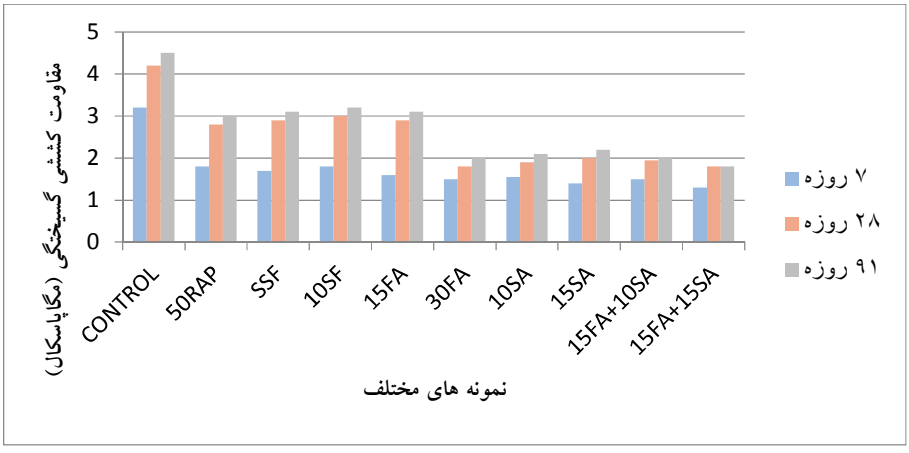
نیست. فرسودگی یا خرابی اسفالت در مخلوط‌های بتنی شامل RAP همیشه به دلیل عدم انسجام مناسب مواد تشکیل دهنده آسفالت می‌باشد، بنابراین، SCMهای گفته شده نمی‌توانند مدول پارگی مخلوط‌های RAP-RCCP٥٠ را بهبود بخشند. بهبود در مدول گسیختگی فقط در مورد مخلوط SF مشاهده شد، اگرچه افزایش درصد بسیار کمتر است. برای نمونه، در ٢٨ روز، افزایش در مدول پارگی SF٥ و SF١٠ مخلوط ١ تا ٥ روزه با توجه به گزارش شد. بدین ترتیب احتمال می‌رود مخلوط ٥٠ .RAP به دلیل غلظت بالاتر سیلیس آمورف و سطح خاص بالاتر ذرات SF عامل اصلی در افزایش مدول پارگی مخلوط‌های SF باشد.

٤-٤- تأثیر SCM در مقاومت کششی گسیختگی

شکل ٦ تأثیر SCMها را بر مقاومت کششی شکافته مخلوط‌های RCCP حاوی ٥٠٪ دانه‌های RAP نشان می‌دهد. مشابه نتایج فشاری و مدول پارگی، ضعف به دلیل وجود لایه آسفالت در اطراف سنگدانه‌های RAP مسئول کاهش قدرت تقریبی ٣٤٪ در مخلوط حاوی ٥٠٪ RAP است. علاوه بر این، مشخص شد که اجزای سازنده SCM گفته شده (به استثنای ذرات SF) از نظر نیاز به تقویت قدرت در مخلوط RAP٥٠ نامطلوب هستند. برای موارد، در ٢٨ روز پس از انجام عملیات پخت، مقاومت در برابر تقسیم FA FA ٣٠، FA FA ١٠ SA SA، ١٥ SA SA، ١٥ + FA FA 10 SA SA و ١٥٪ FA + 15 SA SA مخلوط ٣٨ ،٣٩٪، ٣٢٪، ٣٩٪ و ٤٦٪ کمتر از ترکیب ٥٠ .RAP مشاهده شد. در حالی که، ١٥ FA مخلوط FA و SF به عنوان افزایش ٦درصدی در مقاومت کششی تقسیم مخلوط RAP٥٠ نشان داده شد. این یافته‌ها باز هم نشان دهنده مناسب بودن سیلیکا فوم و استفاده از ١٥٪ ذرات خاکستر گرد و غبار معلق در هوا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پورتلند برای تولید مخلوط RAP-RCCP می‌باشد.



شکل ٥. مقاومت خمشی نمونه‌ها



شکل ٦. مقاومت کششی گسیختگی

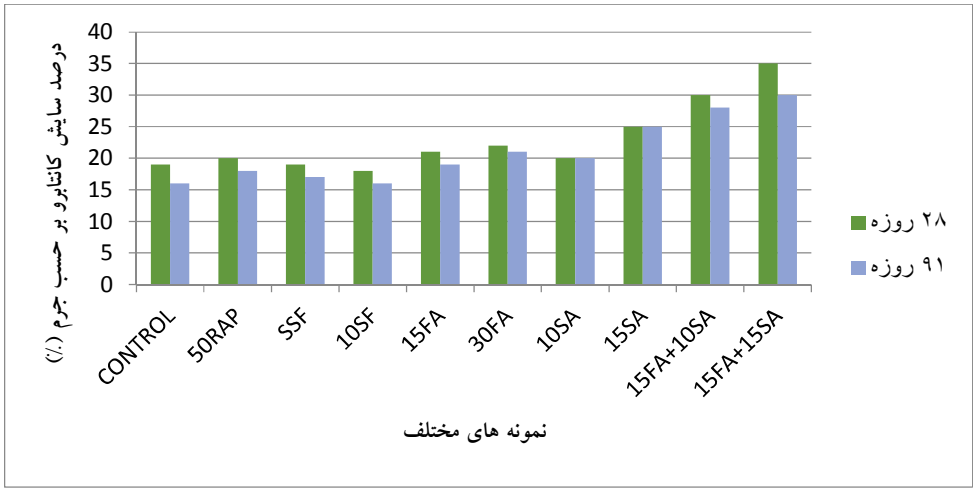
٤-٥-تأثیر SCM در مقاومت در برابر سایش کانتابرو

مقاومت در برابر سایش پارامتر مهمی برای به تصویر کشیدن مناسب بودن روسازی بتنی است که قرار است از آن به عنوان یک سطح یا پوشش استفاده شود (ابوسلیمان و همکاران، ٢٠١٩). همانطور که در شکل ٧ مشاهده می‌شود، کمترین میزان سایش در جرم برای مخلوط حاوی ١٠٠٪ مصالح خالص، با از دست دادن جرم ١٨,٥٪ و ١٦,٦٪ به ترتیب در ٢٨ و ٩١ روز مشاهده شد. بخشی که جایگزین ٥٠٪ مصالح خالص با RAP شد باعث از بین رفتن توده سایش در حدود ٥٪ و ١١٪ در همان روزهای پخت مشابه شد. تا آنجا که به SCM مربوط می‌شود، یافته ها نشان دادند فقط مخلوط SF می‌تواند مقاومت به سایش مخلوط اعلام شده را افزایش دهد. برای نمونه، در ٢٨ و ٩١ روز، اجزا ٥٪ SF و ١٠٪ SF، به ترتیب با توجه به ترکیب RAP٥٠، از بین رفتن توده سایش را ٢٪ و ٣٪ و ٤٪ و ٧٪ کاهش دادند. این امر ممکن است به این واقعیت نسبت داده شود که مقاومت در برابر سایش به مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن بستگی دارد و در حالت فعلی، ذرات SF مقاومت فشاری مخلوط RAP٥٠ را نشان دادند. جالب توجه است که مخلوط FA & SA همچنین برای ایجاد مقاومت در برابر سایش مناسب ذکر شده استف زیرا اختلاف وابسته به از دست دادن توده سایش فقط ٨ است.

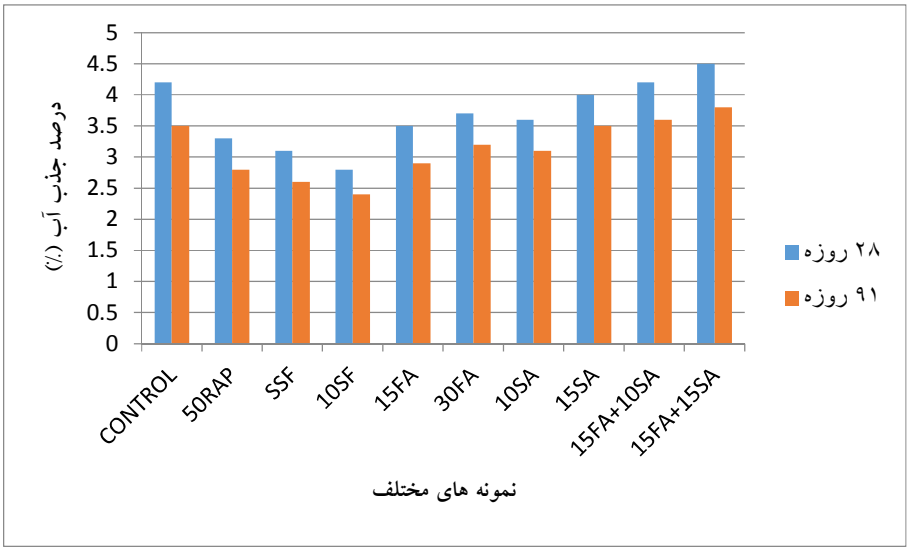
با این حال، توصیه می‌شود در مورد SA دوزهای بالاتر ذرات بیان شده تا حد ١٠ یا ١٥ درصد FA ، ممکن است با خواص مربوط به مقاومت مرتبط باشد. این یافته‌ها نشان دهنده پتانسیل سیلیکا فوم به عنوان جایگزینی سیمان پورتلند است که قرار است مخلوط‌های RCCP حاوی ٥٠٪ دانه‌های RAP به عنوان یک سطح پوششی استفاده شود. با این حال، از نظر اقتصادی، ممکن است سیلیکا فوم همیشه عملی به نظر نرسد و در چنین مواردی، استفاده از خاکستر فسیل (١٥٪) و خاکستر نیشکر (١٠٪) ممکن است توصیه شود. اما به عنوان لایه‌های پایه روسازی‌های RCC.

٤-٦-تأثیر SCM ها در جذب آب

روند مقادیر جذب آب نیز مطابق با نتایج حفره‌های نفوذپذیر است و در شکل ٨ نشان داده شده است. پر کردن فضاهای خالی توسط ژل CSH اضافی باید از مقدار کل فضاهای قابل نفوذ بکاهد و مقادیر جذب آب مخلوط RAP٥٠ را نیز کاهش دهد. اما در مورد حاضر، ترکیبات SCM برای افزایش جذب آب مخلوط RAP٥٠ یافت گردید. برای نمونه، در ٢٨ روز، مخلوط‌های FA١٥، FA٣٠، SA١٠ و SA١٥ دارای ٨٪، ١٧٪، ١١٪ و ٢٩٪ جذب آب بیشتر از مخلوط RAP٥٠ بودند. این افزایش در مخلوط‌های SA ممکن است به دلیل خاصیت رطوبت زای ذرات SA باشد، در حالی که ممکن است حفره‌های نفوذپذیری بالاتر در مخلوط‌های FA منجر به افزایش ظرفیت جذب آب شوند (شکل ٨). بعلاوه، افزایش جذب آب در مخلوط‌های گفته شده نیز ممکن است به دلیل آلودگیهای غبار معلق در آب در RAP داخلی باشد و در مطالعه حاضر، RAP دارای مقدار جذب آب بالایی نسبت به میزان طبیعی است. همانطور که انتظار می‌رود، کاهش مقادیر تخلخل در مخلوط SF منجر به کاهش ظرفیت جذب آب در مقایسه با مخلوط RAP٥٠ می‌شود. از طرف دیگر، افزایش قابل توجهی در حدود ٤٥٪ در مقادیر جذب آب برای مخلوط‌های FA&SA در هر دو سن پخت به دست آمد.



شکل ٧. درصد سایش کانتابرو



شکل ٨ درصد جذب آب نمونه‌ها

٥- بحث و پیشنهاد ویژه

نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که سیلیکا فوم (SF) نسبت به سایر مواد افزودنی مواد معدنی مکمل سیمانی (SCM) مانند خاکستر گرد و غبار معلق در هوا (FA) و خاکستر نیشکر (SA) بهتر است. اما سایر SCMها فقط به این دلیل که بالاترین پارامترهای مقاومت را ندارند نباید کنار گذاشته شوند. ایسی (2001) توصیه می‌کند، اگر RCCP قرار است. به عنوان یک لایه سطحی عمل کند، حداقل استحکام ٣/٦٧ کیلوپاسکال در ٢٨ روز مورد استفاده قرار گیرد. جدول ٦ رتبه بندی مخلوط‌های در نظر گرفته شده برای استفاده موثر آن در کاربردهای مختلف روسازی را نشان می‌دهد. مخلوط SF با ترکیب ٥ و ١٠٪ و مخلوط FA با ترکیب ١٥٪ حداقل معیارهای لازم را برای عملکرد به عنوان یک لایه سطحی تعیین می‌کند. همین مخلوط‌ها را می‌توان برای پیاده روهای حاشیه جاده‌های کم تردد و و همچنین پر تردد پیشنهاد کرد. در حقیقت، این مخلوط‌ها برای RAP-RCCP در محیط‌های اسیدی مطلوب‌ترین بودند. از طرف دیگر، مخلوط‌های دیگر هنوز هم می‌توانند به عنوان لایه زیرین و پایه سنگ فرشهای بتنی معمولی، آسانسور پایین‌تر از یک روسازی دو بالابر، در زیر پوشش‌ها، پارکینگ‌ها، حیاط‌ها و بنادر حمل و نقل، خیابان‌ها و شانه بزرگراه‌ها مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از این مواد زائد در RCCP نه تنها هزینه پروژه را کاهش می‌دهد بلکه می‌تواند منجر به مزایای زیست محیطی مانند از بین بردن RAP، خاکستر گرد و غبار معلق در هوا، مسائل مربوط به دفع خاکستر نیشکر و همچنین کمک به کاهش اثر کربن گردد. محققان این پژوهش معتقدند نتایج حاصل از مطالعه حاضر تردید در استفاده از چنین زباله هایی را در برنامه‌های روسازی از بین می‌برد و همچنین باعث آگاهی دانشگاهیان و مهندسان بزرگراه نسبت به استفاده بالقوه از این ضایعات می‌گردد. همچنین اعتقاد بر این است که نتایج حاصل از مطالعه حاضر باعث بازیافت بیشتر زباله‌ها برای ساخت جاده می‌شود و همچنین مقامات دولتی را برای چارچوب سیاست‌ها و دستورالعمل‌های استفاده از زباله‌های مختلف در برنامه‌های مختلف روسازی ترغیب می‌نماید.

٦- نتیجه‌گیری

-گنجاندن زباله های ناشی از جاده‌ها برای تهیه لایه‌های روسازی ایده خوبی است و در تحقیق حاضر نیز همین مورد مورد بررسی و تست ازمایشگاهی قرار گرفته است. همانطور که انتظار می رفت، مشخص شد که استفاده از روسازی آسفالت احیا شده 50) (RAP)٪RAP درشت و باضخامت

بالا) بر خصوصیات مخلوط روسازی بتن فشرده غلتکی ((RCCP تأثیر منفی می‌گذارد. در این پژوهش سعی بر این بوده که با استفاده از چند ضایعات صنعتی و کشاورزی مانند سیلیکا فوم (SF)، خاکستر گرد و غبار معلق در هوا (FA) و خاکستر نیشکر (SA) به افزایش استقامت و تقویت مخلوط RCCP پرداخته شود. با این حال، نتایج چندان مثبت نبودند، چرا که بر روی خواص بتن تازه تأثیرگذار بوده و به طور قابل ملاحظه ای موجب تخریب ان گردید.

-حداکثر چگالی خشک (MDD) بیشتر کاهش یافته و محتوای رطوبت مطلوب (OMC) افزایش یافته است. تا آنجا که به اثرات مربوط به خواص مقاومت مربوط می‌شود، به جز SF، سایر ضایعات در نظر گرفته شده باعث کاهش خواص مقاومت مانند مقاومت فشاری، و پارگی مدول و همچنین تقسیم مقاومت کششی در مخلوط ۵۰ .RAP گردید. به همین ترتیب، به جز SF، سایر زباله‌های صنعتی و کشاورزی بکار گرفته شده و ازموده شده در این پژوهش، هیچکدام نتوانستند هیچ گونه اثرات سودمندی در مورد ویژگی‌های دوام مخلوط RAP۵۰ ایجاد کنند، بلکه به ترتیب باعث افزایش فضای تخلخل و نفوذپذیری، جذب آب، میزان اولیه و ضریب جذب آب می‌شوند.

-این امر نشان می‌دهد که سیلیکا فوم پتانسیل زیادی برای استفاده به عنوان جایگزین سیمان پورتلند جهت تهیه مخلوط‌های RCCP حاوی ۵۰٪ دانه‌های RAP را داراست. حتی مقاومت در برابر سایش که پارامتر مهمی برای به تصویر کشیدن بهینگی مخلوط RCCP RAP برای عملکرد به عنوان یک لایه سطحی از روسازی است، در مورد مخلوط SF نتایج مثبتی به همراه داشت. بنابراین، بر اساس خواص در نظر گرفته شده، گنجاندن سیلیکا فوم برای تولید مخلوط RCCP شامل RAP توصیه می‌گردد. تا آنجا که به سایر پسماندهای صنعتی و کشاورزی مربوط می شود، از ۱۵٪ خاکستر خاکستر گرد و غبار معلق در هوا نیز می‌توان برای تولید مخلوط پایدار RCCP استفاده کرد، با این حال، خاکستر باگاس فقط باید به عنوان ماده لایه پایه روسازی‌های بتنی معمولی مورد استفاده قرار گیرد.

-بازیافت و استفاده مجدد از زباله‌های ناشی از جاده‌ها، صنایع و کشاورزی نه تنها منافع اقتصادی دارد بلکه سازگاری با محیط زیست را فراهم خواهد ساخت. براساس توصیه فوق، استفاده از دانه‌های سیلیکا فوم و دانه‌های RAP می‌تواند هزینه ساخت اولیه ۱ متر مکعب مخلوط RCCP را تا ۸,٤٪ کاهش دهد و همچنین انتشار CO_2 را تا ۹,۷٪ در مقایسه با RCCP متعارف کاهش دهد. این امر نشان می‌دهد که استفاده از زباله‌های در نظر گرفته شده نه تنها رونق اقتصادی پروژه را فراهم می‌کند بلکه می‌تواند به منافع زیست محیطی مانند از بین بردن مسائل دفع زباله، افزایش زیبایی و جلوه بصری جاده، حفظ منابع طبیعی برای آیندگان و همچنین کاهش ردپای کربن در محیط زیست کمک شایانی باشد.

۷- پی‌نوشت‌ها

1- Reclaimed Asphalt Pavement
2- Roller Compacted Concrete Pavement
3-Portland Cement Concrete
4-Supplementary Cementitious Mineral Admixtures
5- Silica Fume
6- Fly Ash
7- Sugarcane Ash
8- Calicum Silicate Hydrate
9- X-Ray Fluorescence
10- Optimum Moisture Content
11- Maximum Dry Density

۸- مراجع

-ACI (American Concrete Institute), (2001), “Report on Roller-Compacted Concrete Pavements”, ACI 325-95, Farmington Hills, MI.

-Aurangzeb, Q., Al-Qadi, I.L., Ozer, H., Yang, R., (2013), “Hybrid life cycle assessment forasphalt mixtures with high RAP content”, Resour, Conserv and Recycl, 83, pp.77–86

-Avirneni, D., Peddinti, P.R., Saride, S., (2016), “Durability and long term performance of geopolymer stabilized reclaimed asphalt pavement base courses, Constr, Build, Mater, 121, pp.198–209.

-Brand, A.S., (2015), “Interfacial Transition Zone Composition and Bonding in CementitiousMaterials With Asphalt-coated Particles”, Ph.D. Thesis, Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

-Brand, A.S., Roesler, J.R., (2017b), “Bonding in cementitious materials with

technique to improve RAP inclusive concrete properties, Constr, Build, Mater, 148, pp.734–747.
-Shi, X., Mukhopadhyay, A., Zollinger, D., (2018a), "Sustainability assessment for Portland cement concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates", J.Clean. Prod. 192, pp.569–581.
-Singh, S., Ransinchung R.N, G.D., Debbarma, S., Kumar, P., 2018a. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. J. Clean. Prod. 174, pp.42–52.
-Singh, S., Monu, K., Ransinchung RN, G.D., 2019a. Laboratory investigation of RAP forvarious layers of flexible and concrete pavement. Int. J. Pavement Eng., pp.1–14.
-Su, K., Hachiya, Y., Maekawa, R., 2009. Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement. Resour. Conserv. Recycl. 54 (1), pp.37–44.
-Taha, R., Ali, G., Basma, A., Al-Turk, O., 1999. Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases. Transp. Res. Rec. 1652 (1), pp.264–269.

-Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., (2002), Cement stabilization.
-Turner, L.K., Collins, F.G., 2013. Carbon dioxide equivalent (CO2-e) emissions: a comparison between geopolymer and OPC cement concrete, Constr, Build, Mater, 43, pp.125–130.

-Yang, K.H., Jung, Y.B., Cho, M.S., Tae, S.H., (2015), "Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO_2 emissions from concrete", J. Clean, Prod, 103, pp.774–783.

asphalt-coated particles: part II–cement-asphalt chemical interactions", Constr. Build. Mater, 130, pp.182–192.
-Fakhri, M., Amoosoltani, E., (2017), "The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement, Constr, Build, Mater, 137, pp.470–484.
-Hasanbeigi, A., Price, L., Lin, E., (2012), "Emerging energy-efficiency and CO_2 emissionreduction technologies for cement and concrete production: a technical review, Renew, Sustain, Energy Rev. 16 (8), pp.6220–6238.
-Maddalena, R., Roberts, J.J., Hamilton, A., (2018), "Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials"? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements, J. Clean. Prod. 186, pp.933–942.
-Modarres, A., Hosseini, Z., (2014), Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material,Mater, Des, 64, pp.227–236.
-Mukhopadhyay, A., Shi, X., (2019), "Microstructural characterization of Portland cement concrete containing reclaimed asphalt pavement aggregates using conventional and advanced petrographic techniques. In: Cong, D., Broton, D. (Eds.), Advances in S. Debbarma, et al. Resources, Conservation & Recycling 152, (2020), 104504 Cement Analysis and Concrete Petrography, ASTM STP1613. ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 187–206.
-Settari, C., Debieb, F., Kadri, E.H., Boukendakdji, O., 2015. Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete, Constr, Build, Mater, 101, pp.617–621.
-Singh, S., Ransinchung, G.D., Kumar, P., (2017a), "An economical processing

Investigation of the Effect of the Utilization of Industrial and Agricultural Wastes for Productions of Sustainable Roller Compacted Concrete Pavement Mixes Containing Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates

Amin Choubdar, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.
Amin Farajollahi, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.
Alireza Ameli, Department of Civil Engineering, Malard Branch, Islamic Azad University, Malard, Tehran, Iran.

E-mail: AminFarajollahi@gmail.com

Received: March 2021-Accepted: July 2021

ABSTRACT

Asphalt pavement recycling has become a common practice across the globe and has been successfully employed in construction of new pavements. While several studies considered utilization of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates for flexible and rigid pavements, very few attempted its possibility for roller compacted concrete pavements (RCCP). Additionally, studies on the possibility of enhancing the proportion of RAP for RCCP are very scanty. The present study is an attempt to increase the potential of RCCP mixes containing 50% RAP (dust contaminated & stiffened asphalt coated: 50RAP via including various industrial and agricultural wastes such as Silica Fume, Fly ash, and Sugarcane ash as partial replacement of conventional cement. It was observed that the inclusion of the stated admixtures had an insignificant effect on the density of the fresh RCCP mixes, however, increased the moisture demand considerably. In fact, the results firmly indicated the potential of silica fume for RAP-RCCP blends, as, it not only enhanced the physical and mechanical properties, but found to improve the durability of RCCP mixes considerably. Also, utilization of silica fume was found to be economical & environmentally friendly amongst all wastes: with reduced initial construction cost & CO2 emissions by up to 8.4% & 9.7%. As far as the other industrial wastes are concerned, 15% fly ash could also be utilized for producing sustainable RCCP mixes, whereas, higher dosage of fly ash (30%) and sugarcane ash (10 & 15%) may be employed as base layer material of conventional concrete pavements.

Keywords: RAP, RCCP, Wastes, Strength, Durability, Sustainability