بتن متراکم غلتکی با سنگدانه بتن بازیافتی جهت کاربرد در اساس روسازی

مقاله علمی- پژوهشی

امین چوبدار، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی‌عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
امین فرج اللهی*، گروه مهندسی‌عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
علیرضاعاملی، گروه مهندسی‌عمران، واحد ملارد، دانشگاه آزاد اسلامی، ملارد، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: AminFarajollahi@gmail.com

دریافت: ١٤٠٠/٠٢/٢٧- پذیرش: ١٤٠٠/٠٨/٠٥
صفحه ٢٦٦-٢٥٥

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی بتن غلتکی متراکم استفاده شده با سنگ بتن بازیافتی به عنوان جایگزینی برای سنگدانه درشت طبیعی است. حداکثر تراکم خشک برای تهیه مخلوط بتن غلتکی با ۲۰۰ کیلوگرم در متر مکعب محتوای سیمان و سنگدانه‌های درشت طبیعی در مخلوط بتن اتخاذ شد. چهار مخلوط بتن غلتکی از نسبت‌های مختلف ترکیب (۰٪ ، ۵٪ ، ۱۵٪ و ۳۰٪) تولید شد. آزمایش تراکم، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت کششی خمشی و مدول الاستیسیته، تخلخل، چگالی و آزمون جذب آب برای تجزیه و تحلیل خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مخلوط‌ها انجام شد. برای شناسایی تأثیر سنگ بتن بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن غلتکی از تحلیل واریانس یک طرفه استفاده شد. با افزایش سنگ بتن بازیافتی در مخلوط‌ها، برخی از خصوصیات مکانیکی کاهش می‌یابد، مانند مدول الاستیسیته، اما در مقاومت کششی چنین نتیجه‌ای مشاهده نمی‌شود. تمام سنگ بتن بازیافتی مقاومت فشاری بیش از ۱۵,۰ مگاپاسکال را در ۲۸ روز، مقاومت کششی بالای ۱,۹ مگاپاسکال، مقاومت کششی خمشی بالای ۲,۹ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته بالای ۱۹,۰ گیگا پاسکال را نشان دادند. طبق استاندارد، سنگ بتن بازیافتی اضافه شده به بتن غلتکی می‌تواند برای لایه اساس استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، ضایعات بتن، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت کششی

۱-مقدمه

به گفته بالبو و دورنلاس (Balbo et al, 2015)، برزیل از دهه ۱۹۸۰ با بحران حمل و نقل روبرو بوده است. دو عامل تعیین کننده در ارتباط با این بحران وجود دارد: گسترش شبکه جاده و کیفیت روسازی. در کشور حدود ۱۷۲۰۷۰۰ کیلومتر راه وجود دارد، اما فقط ۱۲,٤٪ آسفالته، ۷۸/۵٪ آسفالت نشده و ۹/۱٪ در مرحله برنامه‌ریزی است (Confederação et al, 2020). مقدار قابل توجهی از مواد برای بهبود زیرساخت‌های حمل و نقل برزیل لازم است، دقیقاً مانند هر کشور دیگری که در پروژه‌های روسازی سرمایه‌گذاری می‌کند. امروزه، استخراج مواد طبیعی به عنوان سنگدانه‌ها به چندین مجوز زیست محیطی احتیاج دارد. زیرا این روش باعث آسیب به محیط زیست می‌شود و ساخت بزرگراه‌ها منابع محدودی را در جهان مصرف می‌کند. بهبود زیرساخت‌های بزرگراه‌ها بدون ایجاد صدمات شدید زیست محیطی، استفاده از ساخت و ساز و تخریب زباله می‌تواند جایگزینی برای کاهش حجم [1] NA و همزمان کاهش ضایعات غیرقانونی ریخته شده در مناطق شهری باشد که برای اداره آنها نامناسب است، مانند مناطق اطراف نهرها و

راه‌ها (Conteras et al, 2016; Leite et al, 2011) در برزیل تولید مصالح بازیافتی[٢] (CDW) که نمایانگر ٤٠ تا ٧٠ درصد کل پسماند جامد شهری است. با توجه به اینکه این کشور تولید سالانه CDW برابر با ٥٠٠ کیلوگرم در سال سرانه دارد و با توجه به اینکه برزیل دارای جمعیتی در حدود ٢١٠ میلیون نفر است، تولید CDW برابر با ٨٧٥،٠٠٠،٠٠٠ مترمکعب است (با توجه به جرم اختصاصی ١٢٠٠ = CDW کیلوگرم در متر مکعب). این یک مشکل زیست محیطی در مقیاس وسیع است، و یک راه حل بالقوه می تواند استفاده از این زباله ها به عنوان کل ماده برای تولید مصالح ساختمانی باشد (Pinto et al, 1999) مطالعات تحقیقاتی روی CDWاستفاده از این ماده را برای استفاده در لایه‌های روسازی توصیه می‌کند (Cardoso et al, 2016) که نوع CDW مصالح بتونی بازیافتی [٣] (RCA) است که به دلیل خواص فیزیکی آن می‌تواند گزینه‌ای عالی برای استفاده به عنوان سنگ فشرده برای لایه روسازی باشد. RCA در چندین نوع بتن استفاده شد. در برخی از مطالعات تحقیقاتی، از آن به عنوان بتن غلتکی(RCC) [٤] استفاده شده است (Lopez-Uceda et al, 2018). به‌عنوان مثال، با استفاده از RCC مخلوط با سنگ بازیافت شده(RA) [٥] به‌عنوان RCA، بسیاری از کشورها می‌توانند استخراج NA را کاهش دهند و برخی از اثرات زیست محیطی ناشی از ساخت جاده‌های جدید یا بهبود روسازی را نیز کاهش دهند. به عنوان مثال، برزیل می‌تواند از RCC با RCA به عنوان ماده‌ای برای پیاده‌روها یا روسازی‌های زیر پایه برای کاهش مشکلات از بزرگراه‌های زیرساخت استفاده کند (Angelakopoulos et al, 2015)از طرف دیگر، برخی از مزایای شناخته شده RCC در پیاده‌روها مقرون به صرفه بودن، ساخت سریع‌تر، سازگاری با محیط زیست و عملکرد سطح بالا است (Courard et al, 2010).RCC بتونی با اسلامپ صفر است که برای ساخت و سازهای هیدرولیک و روسازی در مهندسی ساختمان استفاده می‌شود. تفاوت اصلی بین بتن معمولی و RCC قوام ماده است. علاوه بر این، درصد سنگدانه‌ها در مخلوط‌ها حدود ٨٠٪ است. این ثابت می‌کند که سنگدانه‌ها برای تولید این نوع بتن حیاتی هستند (Chhorn et al, 2018). RCC می‌تواند برای دستیابی به خصوصیات مکانیکی بالا مانند مقاومت فشاری ناشی از تلاش تراکم و بهم پیوستگی سنگین طراحی شود. برای رسیدن به یک تراکم خوب، RCC باید به اندازه کافی مخلوط باشد تا بتواند از غلتک پشتیبانی کند و به اندازه کافی مرطوب باشد تا توزیع مناسب مواد را بدون جداسازی امکان پذیر کند. مواد تشکیل دهنده مورد استفاده برای RCC همان مواردی است که برای بتن معمولی استفاده می‌شود. (Chhorn et al, 2017) روسازی بتن غلطکی می‌تواند در لایه‌های مختلف روسازی به عنوان یک زیر اساس، اساس و سطح مورد استفاده قرار گیرد، درصد سیمان را اصلاح کند تا خصوصیات بهبود یافته در لایه‌های مختلف حاصل شود . استفاده از RCC به عنوان یک لایه اساس می‌تواند مقاومت تحمل روسازی، خصوصاً توانایی مقاومت در برابر تنش کششی ناشی از تحمل بار ترافیکی را بهبود بخشد (Harrington et al , 2010)انتخاب مواد در RCC برای دستیابی به خصوصیات عالی در کاربردهای لایه روسازی بسیار اساسی است. روش‌های مختلفی برای متناسب سازی مخلوط برای تولید RCC وجود دارد. روش حداکثر چگالی خشک پرکاربردترین روش متناسب سازی مخلوط برای روسازی‌های RCC است. این روش اساساً شامل انتخاب سنگدانه‌های درجه بندی شده خوب، انتخاب محتوای سیمان، تهیه طرح رابطه رطوبت و چگالی بر اساس تست Proctor و ریخته‌گری نمونه‌ها برای اندازه گیری مقاومت فشاری و محاسبه نسبت مخلوط است (Valencia et al, 1999). طبق انجمن سیمان پرتلند (مقاومت فشاری RCCاز ٢٨–٤١ مگاپاسکال در ٢٨ روز و مقاومت خمشی از ٧–٣.٥ مگاپاسکال در ٢٨ روز متغیر است. به گفته بوستا و همکاران (Boussetta et al, 2018)، RCC باید مقاومت فشاری٢٠ مگاپاسکال را در ٢٨ روز و مقاومت کششی تقسیم ١.٦ مگاپاسکال را در ٢٨ روز نشان دهد. در برزیل، RCC باید با تغییر دادن لایه‌ای که به عنوان مواد روسازی استفاده می‌شود، مقادیر کمتری از آنچه در بالا ذکر شد را بدست آورد. جدول ١ این مقادیر RCC مورد نیاز را نشان می‌دهد تا براساس لایه روسازی استفاده شود. با توجه به اینکه RCC مقدار قابل ملاحظه‌ای NA برای تولید خود مصرف می‌کند، هدف اصلی این مطالعه تحقیقاتی ارزیابی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی RCC با استفاده از RCA و استفاده از آن به عنوان لایه پایه روسازی است. استفاده از

RCAبه عنوان یک توده درشت برای RCC براساس سایر تحقیقات انجام شده بر روی RCC است. این ماده از سنگدانه‌های بازیافتی مختلفی مانند CDW یا روکش آسفالت احیا شده استفاده کرد. RCA در مطالعات تحقیقاتی بین المللی به عنوان یک جمع کل بازیافت شده درشت استفاده شد و نتایج آنها استفاده ازRCA اضافه شده به RCC را به دلیل در دسترس بودن به عنوان ماده‌ای برای پیاده‌روها توصیه کرد.

جدول ۱. نیازهای بتن متراکم غلتکی (RCC)

لایه	*fc* (MPa)	*fr* (MPa)	سن (روز)	ضخامت (میلیمتر)	عیار سیمان
زیراساس	بزرگتر از ۵	–	۷	–	۱۲۰–۸۰
اساس و رویه	بزرگتر از مقاومت مشخصه	–	۲۸	–	۲۰۰
اساس	بزرگتر از ۱۵	۱,۵	۲۸	۱۰ الی ۲۰	–

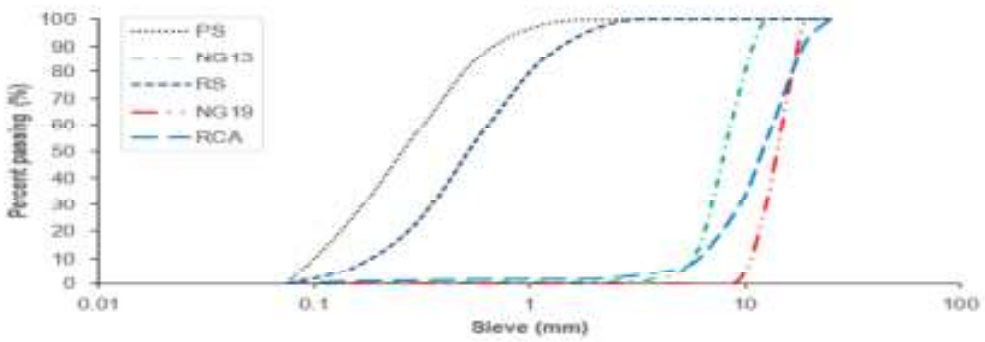
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

از حداکثر چگالی خشک برای انتخاب محتوای سیمان استفاده شد، نسبتهای کسری NA برای دستیابی به دامنه درجه بندی پیشنهادی انتخاب شد و تست پروکتور برای شناسایی محتوای بهینه رطوبت انجام شد. از سیمان پرتلند از نوع [۱](انجمن سیمان پرتلند برزیل) استفاده شد. این نوع سیمان مقاومت اولیه و مقاومت به سولفات بالا را ایجاد می‌کند. ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان در جدول ۲ نشان داده شده است. از دو نوع شن طبیعی استفاده شده است: شن رودخانه (RS) [۶] با حداکثر اندازه دانه ۲,٤ میلی‌متر و شن گودال (PS) [۷] با حداکثر اندازه دانه ۱,۲ میلی متر. گنیس درشت دانه درشت طبیعی با دو اندازه حداکثر ۱۳ میلی‌متر و ۱۹ میلی‌متر استفاده شد RCA در یک شرکت تصفیه خانه از Joinville (برزیل) تولید شده است. حداکثر اندازه RCA ۲۵ میلی‌متر بود. بنابراین، از غربالگری بر روی ذرات بالای ۱۹,۱ میلی‌متر استفاده شد زیرا حداکثر اندازه شن طبیعی ۱۹ میلی‌متر بود و در نظر گرفته شده است. توزیع اندازه ذرات در شکل ۱ نشان داده شده است و خصوصیات آنها در جدول ۳ خلاصه شده است. خصوصیات گزارش شده در جدول ۳ با استفاده از روش‌های آزمون استاندارد برزیل بر روی مواد مهندسی بزرگراه تعریف شده است. RCAمورد استفاده در این تحقیق ۹۲,۳۷٪ در ترکیب حجم ذرات ساخته شده توسط ملات یا ذرات NG را نشان می‌دهد. ثابت شده است که نوع سنگ RCA است و نه سنگ مصالح بازیافتی.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سیمان ۱

CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	K_2O	Specific Gravity	Blaine
55.40%	20.10%	4.80%	3.50%	5.60%	2.80%	1.00%	5.03 g/cm^3	3.11 g/cm^3



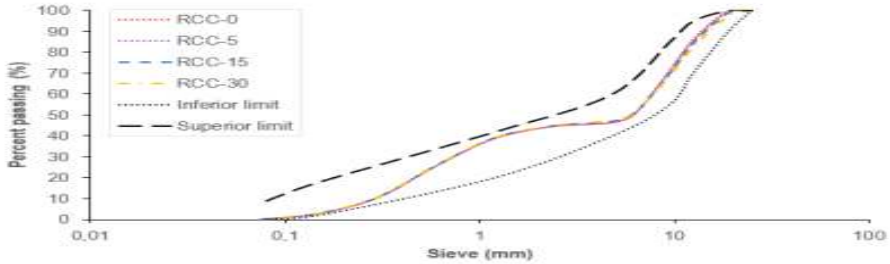
شکل ۱. منحنی‌دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

جدول ۳. خصوصیات سنگدانه‌ها

خصوصیات	RS	PS	NG۱۳	NG۱۹	RCA
وزن مخصوص خشک ماکزیمم	۲.٦۳	۲.٦٤	۲.۹۳	۲.۷۲	۲.۱۹
درصد جذب اب	–	–	۰.۲۷	۰.۲	۷.٦۳
سایش لس آنجلس	–	–	١٤.١٥	١٢.٨٣	۳۲

۲-۲- فرآیند مخلوط‌کردن

حداکثر چگالی خشک برای دوز RCC انتخاب شد. محتوای سیمان ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان استاندارد برزیل که این حداقل مقدار سیمان را برای RCC برای روسازی‌های پایه و سطح توصیه می‌کند، تصویب شد. انرژی تراکم به کار رفته، انرژی واسطه ای پروکتور مورد نیاز استاندارد دیگری از برزیل است که این انرژی را هنگام استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در لایه‌های روسازی توصیه می‌کند. RCA برای جایگزینی NG، در مخلوط جرمی، در سه نسبت مختلف انتخاب شد: ۵٪ ، ۱۵٪ و ۳۰٪ ، سپس مخلوط‌ها RCC-۰ (بدون RCA)، RCC-۵، RCC-۱۵ و RCC-۳۰نامگذاری شدند، مربوط به سطح جایگزینی NG توسط RCA . درصد جایگزینی در این سطح درصد تعریف شده است زیرا جایگزینی بیش از ٤۰٪ NA درشت در بتن توصیه نمی‌شود. زیرا در صورت جایگزینی بیشتر از ٤۰٪ خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. به علاوه، سطوح درصد مشاهده شده توسط بوره با ۱۰٪ و ۳۰٪ NG بازالت با RAP[۸] جایگزین شد و مخلوط ۱۰٪ RAP خصوصیات مکانیکی بالاتری نسبت به مخلوط با ۳۰٪ RAP فراهم کرد. شکل ۲ درجه بندی کل مخلوط‌های RCC را نشان می‌دهد و شباهت در بین هر درجه‌بندی در هر مخلوط مشهود است.



شکل ۲. درجه بندی کل مخلوط‌های بتن متراکم شده غلتکی(RCC)

طبق Trichês، از معادله (۱) برای محاسبه نسبت مواد لازم برای تولید RCC استفاده شده است و مقادیر مواد مورد نیاز برای تولید ۱ متر مکعب RCC در جدول ٤ نشان داده شده است. این معادله در سال ۱۹۹۳ به عنوان بخشی از روش

برزیلی برای طراحی RCC پیشنهاد شد. این رویه همانطور که در سایر تحقیقات تحقیقاتی برزیل در مورد RCC نیز اتخاذ شده است. مقدار سنگدانه بر اساس واحدهای سیمان

(١)

C محتوای سیمان، کیلوگرم در متر مکعب است. Vv حجم خالی هوا است، L؛ c تراکم سیمان، گرم بر سانتی‌متر کعب است ag میانگین وزنی چگالی کل، گرم بر سانتی متر مکعب است. M مقدار کمی کل سنگدانه‌ها بر اساس واحد سیمان، بدون بعد است h رطوبت ،٪ است.

(متر) با معادله (١) محاسبه شد، رطوبت به عنوان ٦.٥ = h ٪ تصویب شد زیرا این مقدار در OMC مشترک است و حجم خالی هوا ٥٠ = VV L بود.

$$C = \frac{1000 - V_v}{\frac{h(1+m)}{100} + \frac{m}{\gamma ag} + \frac{1}{\gamma c}}$$

آزمون واسطه ای پروکتور برای شناسایی درصد رطوبت بهینه و حداکثر تراکم خشک هر مخلوط انجام شد. این آزمایش طبق استاندارد برزیل انجام شده است. نمونه‌های استوانه‌ای (٣٠٠ × ١٥٠ میلی‌متر) با انرژی واسطه پروکتور در یک فشرده کننده مکانیکی ریخته می‌شوند.

جدول ٤. مقدار مواد برای تولید ١ متر مکعب بتن

مخلوط	سیمان (کیلوگرم)	PS (kg)	RS (kg)	NG13	NG19	RCA	آب
RCC-0	٢٠٠	٣٠٦	٦١٢	٨١٦	٣٠٦	٠	٢١٠
RCC-5	٢٠٠	٣٠٢	٦٠٦	٧٥٨	٢٥٢	١٠١	٢١٢
RCC-15	٢٠٠	٢٩٦	٥٩٤	٦٤٤	١٤٨	٢٩٦	٢١١
RCC-30	٢٠٠	٢٨٨	٥٧٦	٤٨٠	٠	٥٧٦	٢٠٩

٢-٣ - آماده سازی نمونه

پس از آزمون تراکم، نمونه‌های استوانه‌ای و منشوری برای بررسی خصوصیات RCC سخت شده قالب‌گیری شدند. مخلوط‌ها با توجه به روش اتخاذ شده توسط بوره در مخلوط کن بتن محور شیب دار تهیه می‌شوند. همه نمونه‌ها با استفاده از یک فشرده ساز دستی قالب‌گیری شدند.٦٨ نمونه استوانه‌ای (١٠٠ × ٢٠٠ میلی‌متر) در سه لایه با ٣٢ ضربه در هر لایه قالب‌گیری شد. هشت نمونه منشوری (١٠٠ × ١٠٠ × ٥٥٠ میلی‌متر) در دو لایه با ١٦٣ ضربه در هر لایه قالب‌گیری شد. معادله (٢) برای محاسبه تعداد ضربات لازم برای هر نوع نمونه به کار گرفته شد.

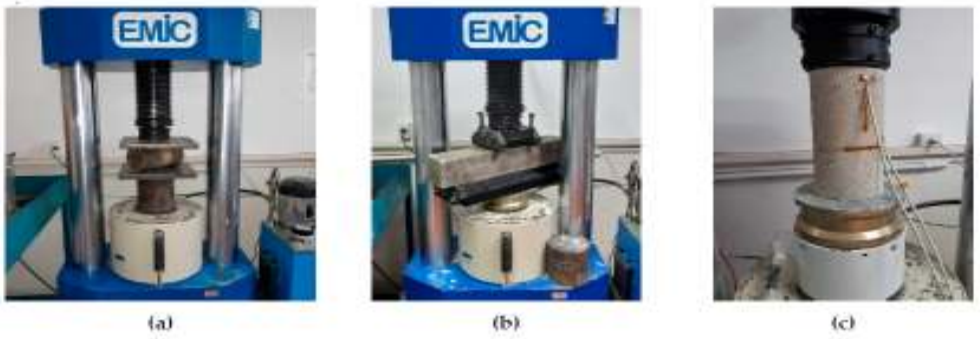
$$E_P = \frac{W \times h \times n_b \times n_l}{V} \qquad (2)$$

Ep انرژی پتانسیل، kg.cm/cm3 است.Wوزن کمپکتور، کیلوگرم است. h ارتفاع سقوط کمپکتور، سانتی‌متر است nb تعداد ضربه در هر لایه است. Nl تعداد لایه‌ها است و V حجم قالب، ٣ سانتی متر است. مقادیر اتخاذ شده در معادله (٢) Ep = ١٢.٣ kg.cm/cm3 مربوط به انرژی Proctor واسطه ، w=٤.٥٣٦ کیلوگرم و ساعت = ٤٥,٧ سانتی متر، V و nl وابسته به نوع نمونه بود و nb حاصل شد. عمل آوری مرطوب به مدت ٧ و ٢٨ روز در یک مخزن آب با استفاده از هیدروکسید کلسیم انجام شد.

٢-٤ - تست‌های آزمایشی

آزمون‌های زیر برای بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مخلوطهای RCC سخت شده انجام شده است: مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافته (شکل ٣ الف)، مقاومت کششی خمشی (شکل ٣ ب)، مدول الاستیسیته (شکل ٣ **C**)، و تراکم خشک، جذب آب و تخلخل. سپس، فشار ١٢٠ وات با استفاده از چسب سیانوآکریلات در نمونه‌های استوانه‌ای چسبیده شدند تا مدول الاستیسیته را بدست آورند. یکی از فشارها را به صورت متقاطع روی نمونه چسبانده و دیگری را به صورت طولی چسبانید. نمودار تنش در مقابل کرنش رسم شد و یک خط منفرد اضافه شد تا از مبدا نمودار شروع شود تا نقطه‌ای برابر با ٤٠٪ کشش پارگی، طبق قانون هوک. از معادله (٣) برای تخمین مقدار مدول الاستیسیته استفاده شد.

$$E = \frac{\sigma_{40\%}}{\varepsilon_{40\%}} \qquad (3)$$



شکل ٣. (a) انجام آزمایش کشش تقسیم کننده، (b) انجام آزمایش کشش خمشی، (c) جزئیات کرنش گیج که برای آزمایش مدول الاستیسیته روی نمونه‌ها چسبانده شده است.

٢-٥- تحلیل آماری

داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی در نرم افزار RStudio مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل واریانس[٩] (ANOVA) برای هر ویژگی مکانیکی (یک طرفه) انجام شد تا مشخص شود آیا درصد RCAدر این ویژگی‌های RCC تداخل دارد یا خیر. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی بین خواص فیزیکی و مکانیکی RCC در ٢٨ روز تنظیم شد. همبستگی بین خصوصیات RCC برای شناسایی رابطه بین دو متغیر انجام شد. در این حالت، همبستگی یک پیش بینی کننده و یک متغیر وابسته را در نظر می‌گیرد. این همبستگی می‌تواند نشان دهد که آیا متغیری مستقیماً به متغیر دیگری وابسته بوده است یا خیر. از ANOVA برای شناسایی تفاوت بین میانگین مشاهده شده در هر خاصیت سخت شده مخلوط RCC در روز ٧ و ٢٨ استفاده شد. برای استفاده از این آزمون آماری سطح معنی داری ٠/٠٥ به انتخاب شد.

تجزیه و تحلیل ANOVA یک طرفه میانگین‌های برابر را تعریف کرد و فرضیه جایگزین (H1) تصویب شده فرضیه صفر (H0) بود که در آن حداقل یک میانگین با سایر فرق داشت، مطابق آزمون‌های فرضیه رایج استفاده از تحلیل ANOVA یک طرفه برای بررسی اینکه آیا نمونه‌ها مستقل هستند، باقیمانده‌ها به طور معمول توزیع می‌شوند و واریانس‌ها همگن هستند. از نرم افزار RStudio برای انجام آزمون نرمال بودن باقیمانده با استفاده از آزمون شاپیرو برآورد شد: جایی که مقدار p بالاتر از ٠/٠٥ بود، فرض نرمال بودن نقض نمی‌شد. آزمون لون برای تأیید همسان‌سازی انجام شد، بنابراین، اگر مقدار p بالاتر از ٠/٠٥ باشد، واریانس برابر است و اگر مقدار p کمتر از ٠/٠٥ باشد، واریانس متفاوت است. این آزمون‌های آماری بر روی تمام خصوصیات انجام شده است، و بنابراین، فرضیه‌های ANOVA نقض نشده است.

٣- نتایج و بحث

مقادیر حداکثر تراکم خشک (MDD)[١٠] و OMC در مخلوط‌های RCC در جدول ٥ ارایه شده است. شکل ٤ الف رابطه بین میزان رطوبت RCC و چگالی خشک را نشان می‌دهد.OMC در تمام منحنی‌های چگالی رطوبت بالاتر از ٩,٠٪ است، این مقدار باید در حدود ٦,٥٪ متفاوت باشد. با این حال ، سایر محتویات رطوبت توسط سایر مطالعات تحقیقاتی به تصویب رسید، به ویژه هنگامی که سنگدانه‌های بازیافتی در مجموع درصد گنجانده شوند.

OMC از مخلوط RCC مخلوط با RAP ، ٤٠/٨٪ و ١٠،٠٠٪ برای RCC مخلوط با CDW از ٧/٥٠٪ تا ٨/٤٠٪ متغیر بود و برای RCC مخلوط با NA از ٧/٢٥٪ تا ١١،٠٠٪ تغییر داشت. مقادیر OMC ما ٩/٤١ و ٩/٨٩ درصد حد قابل قبولی از OMC را رعایت می‌کنند. همانطور که در سایر تحقیقات انجام شده است بین MDD و OMC بدست آمده (جدول ٦) همبستگی خوبی وجود دارد. ضریب ٠.٩٢٠٢ (R2)بود. وقتی درصد RCA در مخلوط افزایش می‌یابد، MDD کاهش می‌یابد و OMC افزایش می‌یابد.

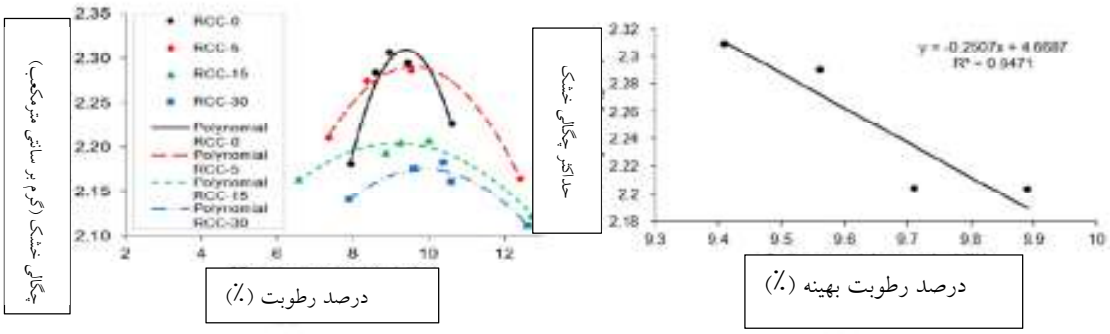
RCAاضافه شده به RCC و NA اضافه شده به RCC هیچ تفاوت معنی داری در بین مخلوط MDD نشان نمی‌دهد. نتایج از ٢,٢٠٣-٢,٣٠٩ گرم در سانتی‌مترمکعب متغیر بودند. تغییر MDD را در بین مخلوط NA به RCC اضافه کرد و RCA از ٢,١٩-٢,٣٤ گرم در سانتی متر مکعب برای RCC با محتوای سیمان برابر با ١١٠، ١٧٥، ٢٥٠ و ٣٥٠ کیلوگرم در متر مکعب بود. لوپز-اوسدا و دیگران RCCرا با ١٥٠ و ٢٥٠ کیلوگرم در متر مکعب سیمان و ١٠٠٪ RA مطالعه کرد، در مقایسه با مخلوط RCC مرجع مخلوط با RA، که کاهش مقادیر MDD را نیز نشان می‌دهد. محققان دیگری MDDرا در RCC مشاهده کردند که با افزایش درصد CDW روند CDW کاهش نشان می‌دهد. به دلیل خاصیت قیر در ذرات،RAP همچنین تمایل به کاهش MDD در RCC دارد و با افزایش درصد آن در مخلوط، رطوبت را افزایش می‌دهد. بنابراین، این نتایج با کاهش MDD، فرضیه افزایش درصد RA در مخلوط‌ها را تأیید می‌کند و سپس میزان رطوبت افزایش می‌یابد.

جدول ٥. نتایج آزمون تراکم برای مخلوط RCC با ٢٠٠ کیلوگرم در متر مکعب سیمان

خصوصیت مخلوط	RCC-0	RCC-5	RCC-15	RCC-30
حداکثر چگالی خشک	٢,٣٠٩	٢,٢٠٩	٢,٢٠٤	٢,٢٠٣
درصد رطوبت بهینه	٩,٤١	٩,٥٦	٩,٧١	٩,٨٩

جدول ٦. خلاصه همبستگی بین حداکثر تراکم خشک (MDD) و میزان رطوبت مطلوب(OMC)

C	معادله	تعداد نقاط	Df	RSE	R2	Adj. R2
چگالی و رطوبت چگالی= -٠,٢٥٠٧ رطوبت + ٤,٦٦٨٧		٤	٢	٠.٠٢٦٨	٠.٨٤٧١	٠.٧٧٠٧



شکل ٤. نمودار چگالی خشک و حداکثر چگالی خشک نسبت به رطوبت

میانگین ویژگی مکانیکی مخلوط‌های RCC در جدول ۷ نشان داده شده است. نتایج ANOVA یک طرفه در جدول ۸ نشان داده شده است. مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری در ۷ روز و مقاومت کششی خمشی در ۷ و ۲۸ روز با اهمیت مشاهده شد سطح ۰,۰۵، و این خصوصیات مکانیکی تفاوت بین میانگین‌ها را نشان می‌دهد. با افزایش درصد RCA تمایل به کاهش دارند. مقاومت فشاری در ۲۸ روز ۰,۰۵ سطح معنی‌داری از تداخل را به‌عنوان مقاومت در برابر کشش در هر سنی نشان نمی‌دهد. برخی از خصوصیات مکانیکی RCCاثبات آماری از تداخل به عنوان درصدRCA در مخلوط‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ درANOVA یک طرفه نشان ندادند . این خصوصیات مقاومت فشاری در ۲۸ روز و مقاومت در برابر شکست در ۷ و ۲۸ روز است. این انتظار نمی‌رفت زیرا تمام خصوصیات مکانیکی RCC با RCAاضافه شده. از سایر مطالعات تحقیقاتی با افزایش درصد RCA در مخلوط کاهش نشان می‌دهد. می‌توان اظهار داشت که درصد RCA هنگام تجزیه و تحلیل این خصوصیات در خصوصیات مکانیکی RCC تداخل نکرده است . اگرچه ، هنگامی که مقاومت فشاری در ۷ روز، مدول الاستیسیته در ۲۸ روز و مقاومت خمشی در ۷ و ۲۸ روز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت، تداخل درصد RCA در مخلوط مشهود بود. به عبارت دیگر، وقتی درصد RCA افزایش می‌یابد، مقادیر خصوصیات مکانیکی در این خصوصیات کاهش می‌یابد. لوپز–اوسدا و دیگران همچنین این رفتار را برای مخلوط‌های RCC خود مشاهده کرد، که مقاومت فشاری در ۷، ۲۸ و ۹۰ روز، مقاومت کششی تقسیم، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد، در حالی که درصد RCA در مخلوط افزایش می‌یابد. خصوصیات فیزیکی RCA که به شدت بر رفتار مکانیکی RCC تأثیر می‌گذارد قابل تأیید است و می‌توان گفت RCA مورد استفاده در تحقیقات ما از نظر ترکیب ذرات یا همگنی در مقایسه با موارد استفاده شده توسط لوپز اوسدا و همکاران هم پایین‌تر است.

جدول ۷. خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های RCC

مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		مقاومت شکست (مگاپاسکال)		مقاومت خمشی		مدول الاستیسیته
	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۲۸ روزه
RCC-0	١٤,٦٤	١٦,٧٢	٢,٠٢	١,٩٢	٢,٨٥	٣,٨٢	٢٢,١٣
RCC-5	١٥,٦٣	١٨,٧٢	١,٦٨	٢,٠٣	٣,١٧	٣,٣٥	٢١,٨٢
RCC-15	١٣,٥٥	١٧,٩٧	١,٨٦	١,٩٦	٣,٣٥	٣,٧٨	٢١,١٦
RCC-30	١٣,٠١	١٥,٧١	١,٦٥	٢,١٢	٢,٩٢	٢,٩٩	١٩,٢٦

جدول ٨. آزمون‌های ANOVA برای خواص RCC سخت شده

خصوصیت	Df	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F- value	P-value	سطح اهمیت
	٣	١٤,٨٩٢	٤,٩٦٤	٤,١٠٤	٠,٠٤٨٩	٠,٠٥
مدول الاستیسیته	٨	٩,٦٧٨	١,٢٠٩			
	١١	٢٤,٥٦٣				
	٣	١٢,٢٤٢	٤,٠٨١	٥,٥٤٥	٠,٠٢٣٥	٠,٠٥
مقاومت فشاری ٧ روزه	٨	٥,٨٨٨	٠,٧٣٦			
	١١	١٨,١٣				
	٣	١٥,٤٤	٥,١٤٦	٣,٣٠١	٠,٠٨٧٥	قابل توجه نیست
مقاومت فشاری ٢٨ روزه	٨	١٢,٤٧	١,٥٥٩			
	١١	٢٧,٩١				
	٣	٠,٢٦٥٤	٠,٠٨٨٤٥	١,١٠٩	٠,٤٠١	قابل توجه نیست
مقاومت شکست ٧ روزه	٨	٠,٦٣٧٩	٠,٠٥٨			
	١١	٠,٩٠٣٣				
	٣	٠,٠٦٦٨١	٠,٠٢٢٦٨	٠,٣٠٩	٠,٧٦٣	قابل توجه نیست
مقاومت شکست ٢٨ روزه	٨	٠,٤٦٤	٠,٠٥٨			
	١١	٠,٥٣٢١				
	٣	٠,٤٨٠٨	٠,١٦٠٢٧	٨٩.٢٤	٠	٠,٠٥
مقاومت خمشی ٧ روزه	٨	٠,٠٣٦٨	٠,٠٠٤٥٩			
	١١	٠,٥١٧٦				
	٣	١,٣٧٢٧	٠,٤٥٧	٦١,٠٦	٠	٠,٠٥
مقاومت خمشی ٢٨ روزه	٨	٠,٠٥٩٩	٠,٠٠٧٥			
	١١	١,٤٣٢٦				

٤- نتیجه‌گیری

این مطالعه تحقیقاتی نتایج تحقیق RCA اضافه شده به RCC را با نسبت اختلاط ٠٪ ، ٥٪ ، ١٥٪ و ٣٠٪ ارایه می‌دهد. استفاده احتمالی برای استفاده از این مواد در لایه‌های روسازی برزیل بررسی شد. با توجه به نتایج مشاهده شده نتیجه‌گیری‌های زیر انجام شد RCA : می‌تواند به عنوان یک دانه درشت در تولید RCC استفاده شود زیرا محتوای کمی از ذرات‌ریز، ٢,١٩ گرم در سانتی متر مکعب وزن مخصوص، ٧,٦٣ درصد جذب آب و ضریب LA برابر با ٣٢ را نشان می‌دهد. با این حال، نسبت زیادی برای جایگزینی RCC توصیه نمی‌شود. زیرا این نوع RA تمایل به کاهش خواص

مکانیکی بتن دارد. به عنوان مثال، هنگامی که نسبت RCA ١٠٠٪ باشد مقاومت فشاری بیش از ٣٠٪ کاهش می‌یابد. اگر نسبت ٣٠ RCA ٪ باشد، مقاومت فشاری فقط ٦,٠٪ کاهش می‌یابد، همانطور که در نتایج مقایسه‌ای ٠-RCC و-RCC ٣٠مشاهده شد. ANOVA یک طرفه برخی از خصوصیات مشابه مخلوط‌های RCC سخت شده را نشان می‌دهد که به طور قابل توجهی تحت تأثیر افزایش درصد RCAدر بتن در سطح معنی داری ٠/٠٥ قرار می‌گیرند. مقاومت فشاری در ٧ روز، مقاومت خمشی در ٧ و ٢٨ روز و مدول الاستیسیته اثبات آماری از تداخل را به عنوان درصد RCA در مخلوط‌های RCC نشان می‌دهد. سایر خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری در ٢٨ روز و مقاومت کششی تقسیم شده در ٧ و ٢٨ روز به دلیل درصد RCAدر مخلوط های RCC تأثیر معنی داری آماری بر خصوصیات RCC ندارند. در مقایسه با سایر مطالعات تحقیقاتی برزیل در مورد RCC ، تمام مخلوط‌های RCC با RCAدارای ویژگی‌های برابر یا بهتر مربوط به مقاومت فشاری و مقاومت کششی شکست مخلوط RCC مخلوط با NAو RCC مخلوط با الیاف پلی پروپیلن بوده‌اند. علاوه بر این، در این مطالعات تحقیقاتی از انرژی تراکم بالاتر (انرژی اصلاح شده پروکتور) نسبت به انرژی ما (انرژی واسطه پروکتور) استفاده شده است ٣٠-RCC . در هفت روز کمترین میانگین (١٣,٠١ مگاپاسکال) مقاومت فشاری را ارایه داد. با این حال، این میانگین بالاتر از بهترین میانگین آن مطالعات تحقیقاتی (١٢,٣٧ مگاپاسکال) بود. مقاومت کششی تقسیم شده در هفت روز میانگین کمتری را نشان می‌دهد زیرا RCA به RCC افزوده و این خصوصیات مکانیکی را کاهش می‌دهد و الیاف نیز به RCC اضافه می‌شود و باعث افزایش مقادیر مقاومت کششی تقسیم می‌شود. برخی از همبستگی‌ها بین خواص مکانیکی در ٢٨ روز، شاخص همبستگی خوبی را نشان ندادند، که نشان دهنده همبستگی ضعیفی است. همبستگی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی شکافی، همبستگی بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته و همبستگی بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی خمشی به دلیل پراکندگی بیشتر مقادیر مقاومت فشاری اندازه‌گیری شده، یک شاخص همبستگی کم به دست آورد. همبستگی بین مقاومت کششی تقسیم شده و مقاومت کششی خمشی به عنوان یک همبستگی بالا مانند سایر مطالعات تحقیقاتی به دست آمد. تمام مخلوط‌های RCC طراحی شده حداقل الزامات استانداردهای برزیل مانند حداقل مقدار سیمان ٢٠٠ کیلوگرم در متر مکعب برای پایه‌ها یا سطح روسازی، مقاومت فشاری در ٢٨ روز برابر یا بیشتر از ١٥ مگاپاسکال را برآورده می کنند قدرت برابر یا بیشتر از ١,٥ مگاپاسکال در ٢٨ روز برای مقاومت کششی را براورده کرده است. تمام مخلوط های RCC برای مقاومت فشاری در مقایسه با نیازهای ایالات متحده و فرانسه حداقل ٢٨ و ٢٠ مگاپاسکال را در ٢٨ روز برآورده نکردند، اما، مخلوط‌های ٠-RCC و ١٥-RCC مقاومت کششی خمشی را بالاتر از حداقل مقدار (٣,٥ مگاپاسکال) نشان داده‌اند. در روسازی‌های آمریکا استفاده ازRCC لازم است در حالی که در فرانسه حداقل مقدار مخلوط‌ها مورد نیاز برای مقاومت کششی (١,٦ مگاپاسکال) را بدست آوردند.

٥- پی‌نوشت‌ها

1- Natural Aggregates
2- Recycled Concrete Aggregate
3- Roller Compacted Concrete
4- Construction And Demolition Wastes
5- Recycled Aggregates
6- River Stone
7- Pit Stone
8- Recycled Asphalt Pavement
9- Analysis Of Variance
10-Maximum Dry Density

٦- مراجع

-Angelakopoulos, H. Papastergiou, P. Pilakoutas, K. (2015), "Fibrous roller-compacted concrete with recycled materials—Feasibility studies", Mag. Concr. Res., pp. 67, pp.801–811.
-Balbo, J.T. Dornelas, R.C., (2015), "Custos de reciclagem de pavimentos de concreto e seu potencial econômico na realidade brasileira", Transports, (In Portuguese), No.23, pp.75–84.
-Bernucci, L.B. Motta, L.M. Ceratti, J.A.P. Soares, J.B. (2008), "Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros; Petrobrás, Abeda: Rio de Janeiro, (In Portuguese), Brazil.
-Courard, L. Michel, F. Delhez, P., (2010), "Use of concrete road recycled aggregates for Roller Compacted Concrete", Constr., Build., Mater., 2010, 24, pp.390–395.
-Chhorn, C. Lee, S.W., (2018), "Influencing compressive strength of roller-compacted concrete, Constr. Mater., 171, pp.3–10.
-Chhorn, C.; Hong, S.J.; Lee, S.W., (2017), "A study on performance of roller-compacted concrete for pavement", Constr. Build. Mater., No. 153, pp.535–543
-Cardoso, R. Silva, R.V. Brito, J. Dhir, R., (2016), "Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications", A literature review, Waste Manga, No. 49, pp.131–145.
-Confederação Nacional de Transportes (CNT), (2020), "Pesquisa CNT de Rodovias, Available online: https://pesquisarodovias.cnt.org.br/relatorio-gerencial", (In Portuguese), accessed on 3 January.
-Conteras, M. Teixeira, S.R. Lucas, M.C. Lima, L.C.N. Cardoso, D.S.L. Silva, G.A.C. Gregório, G.C. Souza, A.E. Santos, A., (2016), "Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study)", Constr. Build. Mater., No. 123, pp.594–600.
-Harrington, D. Abdo, F. Adaska, W. Hazaree, C.V. Ceylan, H., (2010), "Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements", Iowa State University: Ames, IA, USA.
-Intituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), (2019), "Available online: https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/ ".
-Leite, F.C. Motta, R.S. Vasconcelos, K.L. Bernucci, L., (2011), "Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements", Constr. Build. Mater., 25, pp.2972–2979.
-Lopez-Uceda, A. Agrela, F. Cabrera, M. Ayuso, J. López, M., (2018), "Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates", Road Mater., Pavement Des., No. 19, pp.36–55.
-Lopez-Uceda, A. Ayuso, J. Jiménez, J.R. Galvín, A.P. Rey, I.D. (2018), "Feasibility study of roller compacted concrete with recycled aggregates as base layer for light-traffic roads", Road Mater. Pavement Des., No. 21, pp.1–13.
-Pinto, T.P. Metodologia Para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana., (1999), Ph.D. Thesis, (In Spanish), University of São Paulo, São Paulo, Brazil.
-Valencia, L.E.S., (1999), "Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo (CCR)", Ciencia E Ingeniería Neogranadina, (In Spanish), No. 8, pp.9–23.

Roller Compacted Concrete with Recycled Concrete Aggregate for the Base of Pavement

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: August 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT

This research aimed to investigate the mechanical and physical properties of Roller Compacted Concrete (RCC) used with Recycled Concrete Aggregate (RCA) as a replacement for natural coarse aggregate. The maximum dry density method was adopted to prepare RCC mixtures with 200 kg/m³ of cement content and coarse natural aggregates in the concrete mixture. Four RCC mixtures were produced from different RCA incorporation ratios (0%, 5%, 15%, and 30%). The compaction test, compressive strength, splitting tensile strength, flexural tensile strength, and modulus of elasticity, porosity, density, and water absorption tests were performed to analyze the mechanical and physical properties of the mixtures. One-way Analysis of Variance (ANOVA) was used to identify the influences of RCA on RCC's mechanical properties. As RCA increased in mixtures, some mechanical properties were observed to decrease, such as modulus of elasticity, but the same was not observed in the splitting tensile strength. All RCCs displayed compressive strength greater than 15.0 MPa at 28 days, splitting tensile strength above 1.9 MPa, flexural tensile strength above 2.9 MPa, and modulus of elasticity above 19.0 GPa. According to Brazilian standards, the RCA added to RCC could be used for base layers.

Keywords: Roller Compacted Concrete, Recycled Concrete Aggregate, Compressive Strength, Flexural Strength, Tension Strength