

## بررسی تجربی رفتار شکست روسازی بتن غلتکی حاوی خرده آجر بازیافتی

مقاله علمی - پژوهشی

سعید حسامی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران  
سارا شیرزاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران  
راحل خمسی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: s.hesami@nit.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صفحه ۳۳۹-۳۵۲

### چکیده

سالانه مقدار قابل توجهی آجر ضایعاتی از چرخه ساخت خارج شده و در محل دفن زباله‌ها انباشته می‌شود. بازیافت این ضایعات می‌تواند به‌طور قابل توجهی مشکل ذخیره سازی زباله و آلودگی زیست محیطی را کاهش داده و به حفظ منابع سنگدانه‌های طبیعی کمک کند. در پژوهش حاضر، از خرده آجر به عنوان جایگزین شن (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) در ۵ طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی به کمک آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی دو نیم شدن و رفتار شکست در مود اول بارگذاری با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی ۶۰ نمونه نیم دیسک خمشی با ترک اولیه به طول ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و نرخ بارگذاری ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مقادیر مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش مقدار آجر کاهش می‌یابد. در نرخ بارگذاری ثابت چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد و همچنین، با افزایش نرخ بارگذاری در طول ترک ثابت  $K_{IC}$  روند افزایشی پیش می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: چقرمگی شکست، خرده آجر، روسازی بتن غلتکی، نیم دیسک خمشی

### ۱-مقدمه

اثر جزیره گرمایی را در مناطق شهری در آب و هوای گرم کاهش داده و علاوه بر آن، در تحقیقات اخیر نشان داده شده است که وسایل نقلیه جهت دستیابی به روشنایی کافی برای رانندگی، به ۵۰٪ روشنایی کمتری در روسازی بتنی نسبت به روسازی آسفالتی نیاز دارند. با توجه به عمده مزایای RCCPها راه‌سازان به سمت اجرای این روسازی‌ها ترغیب شده‌اند (ghorbanian & Hesami, 2010; Harrington et al., 2014). با توجه به این که سنگدانه‌های طبیعی با سرعت فزاینده‌ای در حال مصرف هستند، صنعت بتن به دنبال جایگزین‌های دیگری می‌باشد. جایگزینی سنگدانه‌ها با ضایعاتی مانند خرده پلاستیک

روسازی بتن غلتکی ( $RCCP^1$ ) بتنی خشک است که مقدار سیمان کمتری (۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در آن استفاده شده و اسلامپ آن نزدیک به صفر می‌باشد. این نوع روسازی‌های بتنی از نظر ویژگی‌های ساخت، تفاوت قابل توجهی با بتن معمولی داشته و با استفاده از غلتک‌های لاستیکی و یک درام بزرگ ارتعاشی فولادی به شکل نهایی خود متراکم می‌شوند (Chhorn et al., 2019; Hesami & Sadeghi, 2015; Settari et al., 2015). امروزه، مخلوط‌های RCCP در بسیاری از بزرگراه‌ها، خیابان‌های شهری و شانه جاده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که از عمده مزایای آنها می‌توان به افزایش سرعت ساخت و کاهش هزینه‌ها اشاره کرد. استفاده از RCCP

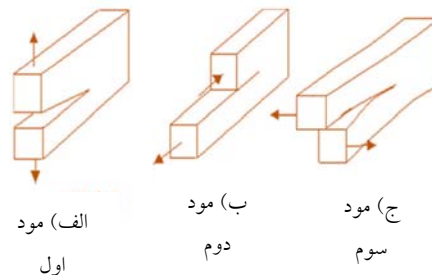
و همکاران (Debieb & Kenai, 2008) به بررسی امکان استفاده از آجر خرد شده به عنوان سنگدانه درشت و ریز برای ساخت بتن جدید پرداختند. شن، ماسه و یا هر دو با سنگدانه‌های آجر خرد شده در درصد‌های (۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) جایگزین شدند. مقاومت فشاری و خمشی پس از گذشت ۹۰ روز با مقاومت بتن ساخته شده با سنگدانه‌ی طبیعی مقایسه شد. نتایج نشان داد که می‌توان بتن حاوی آجر خرد شده (درشت و ریز) را با ویژگی‌های مشابه بتن معمولی ساخت اما به منظور استفاده بهینه از این نوع بتن و دستیابی به حداقل کیفیت بتن، بهتر است میزان جایگزینی برای سنگدانه‌های آجر درشت و ریز خرد شده به ترتیب به ۲۵ و ۵۰ درصد محدود شود. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، نتایج مطالعات نشان دادند که جایگزینی سنگدانه طبیعی با CBA در RCCP حتی با وجود کاهش خواص مکانیکی امکان‌پذیر است. روسازی‌های بتنی در طول عمر سرویس‌دهی خود، به جهت آرایش بارگذاری ترافیک همواره در معرض تنش‌های کششی و در نتیجه ترک‌خوردگی می‌باشند. از سوی دیگر به جز این ترک‌ها که ممکن است در طول عمر بهره‌برداری از روسازی بتنی ایجاد شود، در طول فرآیند ساخت و اجرای روسازی بتنی نیز، به سبب پدیده‌ی انقباض در زمان گیرش و عمل‌آوری، معمولاً ترک‌های ریزی در روسازی به‌وجود می‌آید که عملاً اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. بنابراین، کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی روسازی بتنی در ساعات ابتدایی و در بلندمدت و افزایش مقاومت پس از ترک، از جمله دغدغه‌های مطرح در طرح و اجرای روسازی بتنی می‌باشد. به‌طورکلی ترک‌ها در داخل اجسام و قطعات، در اثر شرایط بارگذاری اعمالی به چندین صورت می‌توانند تغییر شکل دهند (Anderson, 2017; Debieb & Kenai, 2008). نحوه رشد ترک، الگوی جدا شدن و از هم گسیختگی هندسی عضو را مود شکست می‌گویند که براساس شکل ۱، بسته به نوع اعمال بار مدهای بارگذاری، عبارتند از: الف) مود I بارگذاری یا مود کششی<sup>۱</sup> (بارگذاری جسم ترک‌دار به گونه‌ای است که فقط سطوح ترک نسبت به یکدیگر باز شوند) ب) مود II بارگذاری یا مود برشی<sup>۲</sup> (لبه‌های ترک در داخل صفحه‌ی جسم فقط نسبت به یکدیگر می‌لغزند.) ج) مود III بارگذاری یا مود پارگی<sup>۳</sup> (لبه‌های ترک در خارج صفحه‌ی جسم فقط نسبت به یکدیگر می‌لغزند.) (Sadeghi & Hesami, 2018).

ضایعاتی، ضایعات کشاورزی، خرده آسفالت ضایعاتی، خرده لاستیک بازیافتی، ضایعات چوب و ... از روش‌های محتاطانه است که نه تنها از نظر اقتصادی به ویژه در مناطق شهری مقرون به صرفه است، بلکه رویکرد دوست‌دار محیط زیست را نیز هدف قرار می‌دهد. وجود مواد زائد و دور ریز حاصل از فرآیندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی از معضلات مهم کشورهای در حال توسعه می‌باشد؛ در این راستا، محققان به اهمیت بازیافت پسماندهای صنعتی جهت کاهش محل دفن زباله و در نتیجه جلوگیری از آسیب به محیط زیست اذعان کرده‌اند به طوری که تحقیقات وسیعی به‌منظور بررسی روش‌های بهینه جهت بازیافت یا دفع آن‌ها در حال اجرا است. در حال حاضر، مقدار قابل توجهی از ضایعات آجر در محل‌های دفن زباله ریخته می‌شود که علاوه بر هزینه بر بودن، به ندرت می‌توان آنها را به روش دیگری بازیافت کرد (Lopez-Uceda et al., 2018; Tavakoli et al., 2021; Zheng et al., 2018). آجر سفالی خرد شده در برخی کشورها به عنوان یک منبع ساختمانی قابل استفاده مجدد در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند به‌منظور ساخت بتن مورد استفاده قرار گیرد (mojtahedzadeh et al., 2022; Nabizadeh Rafsanjani et al., 2011). استفاده از آجر خرد شده به عنوان سنگدانه در بتن به‌منظور حفظ منابع طبیعی سنگدانه‌ها و همچنین کاهش ضایعات و ذخیره‌سازی زباله از اهمیت خاصی برخوردار است. در سال ۲۰۲۲، Klak و همکاران (Klak et al., 2022) با بررسی امکان استفاده از آجرهای رسی خرد شده (CBA<sup>۲</sup>) در مخلوط‌های بتنی با درصد‌های مختلف (صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰) به عنوان جایگزین ریزدانه دریافتند، با افزایش مقدار CBA مقاومت فشاری و مقاومت کششی روندی نزولی در پی گرفتند و همچنین به دلیل جذب آب بالای CBA نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، کارایی مخلوط کاهش یافت. Cachim (2009) نتایج یک برنامه تحقیقاتی را جهت ارزیابی خصوصیات بتن ساخته شده با آجرهای خرد شده که جایگزین سنگدانه‌های طبیعی می‌شود را ارائه می‌دهد. در این تحقیق نسبت جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با آجر ۱۵ و ۳۰ درصد و همچنین نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد. نتایج تجربی به وضوح نشان داد که آجرهای خرد شده را می‌توان به‌عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی تا ۱۵ درصد بدون کاهش در مقاومت مکانیکی استفاده کرد. Debieb

نمی‌دهد (Bazant & Planas, 1997; Cachim, 2009; Mermerdaş et al., 2013; Yang et al., 2014). بنابراین، از پارامتر چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) در مکانیک شکست جهت تحلیل شکست اجسام استفاده می‌شود. بر اساس تعریف،  $K_{IC}$  ظرفیت یک ماده جهت مقاومت در برابر تنش معین در نوک ترک است تا از ایجاد ترک کششی پیشرونده جلوگیری شود. پس از انجام آزمون شکست به کمک بار بحرانی ( $P_{max}$ ) چقرمگی شکست در مود I محاسبه می‌شود، بنابراین:

$$k_{IC} = \frac{P_{max}}{2Rt} \sqrt{\pi t} Y_I \left( \frac{a}{R}, \frac{s}{R} \right) \quad (1)$$

RCCP تاکنون تنها به بررسی پارامترهای مکانیکی پرداخته‌اند (Khalaf, 2006; Khalaf & DeVenny, 2005; Yang et al., 2011; Zong et al., 2014) که البته تناقضاتی هم در آن‌ها دیده می‌شود. صرف نظر از اینکه علی‌الاصول استفاده از خرده آجر به دلیل پایین بودن مقاومت فشاری آن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خواهد شد ولیکن به جهت اهمیت استفاده از آن یکی از اهداف این پژوهش امکان سنجی استفاده از خرده آجر در RCCP جهت بررسی تغییرات مقاومت فشاری نسبت به درصد استفاده از آن با توجه به حداقل مقاومت مجاز RCCP می‌باشد. همچنین، با توجه به اینکه ترک‌ها از رایج‌ترین خرابی‌ها در روسازی‌های بتنی هستند و همچنین فقدان مطالعه بر رفتار شکست RCCP، مطالعه‌ی حاضر به بررسی مقاومت فشاری، کششی دونیم شدن و مهم‌تر از آن‌ها رفتار شکست روسازی بتن غلتکی حاوی CBA با درصدهای متفاوت در مود اول بارگذاری که مود غالب در روسازی‌ها می‌باشد، به کمک پارامتر چقرمگی شکست می‌پردازد. شایان ذکر است که تاثیر طول ترک (۲۰ و ۲۵ میلیمتر) و نرخ بارگذاری (۱ و ۵ میلی‌متر دقیقه) بر  $K_{IC}$  نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۱. مدهای ترک خوردگی در قطعه ترک‌دار

روش‌های کنونی طراحی روسازی بتنی مبتنی بر خصوصیات مکانیکی بتن همانند مقاومت فشاری و مقاومت کششی، تصویر کاملی از رفتار شکست روسازی بتنی را نشان

مود I تابعی از نسبت طول ترک ( $a/R$ )، نسبت دهانه ( $s/R$ ) و  $Y_I$  ضریب هندسه بی‌بعد مود I است (Ayatollahi et al., 2011). در میان نمونه‌ها با اشکال متفاوت، نیم دیسک خمشی ترک‌دار (SCB) از نمونه‌هایی است که در سال‌های اخیر به دلیل ساخت آسان و مقرون به صرفه بودن محققان را به سمت استفاده از آن جهت آزمایش شکست در مودهای مختلف سوق داده است (Lim et al., 1993).

اصولاً استفاده از ضایعات در بتن به جهت کاهش آلاینده‌ی محیط زیست و همچنین مدیریت مصرف منابع طبیعی می‌باشد. خرده آجر به عنوان یک ضایعات ساخت و ساز هر روزه در حال افزایش است لذا با توجه به اینکه سالانه حجم قابل توجهی RCCP در راه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، خرده آجر به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه در این مطالعه استفاده گردیده است که می‌تواند سهم قابل توجهی در کاهش این ضایعات در طبیعت داشته باشد (Alamdarlo & Hesami, 2020; Hesami et al., 2013).

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد، تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از CBA به عنوان جایگزین درشت‌دانه در

## ۲-روش تحقیق

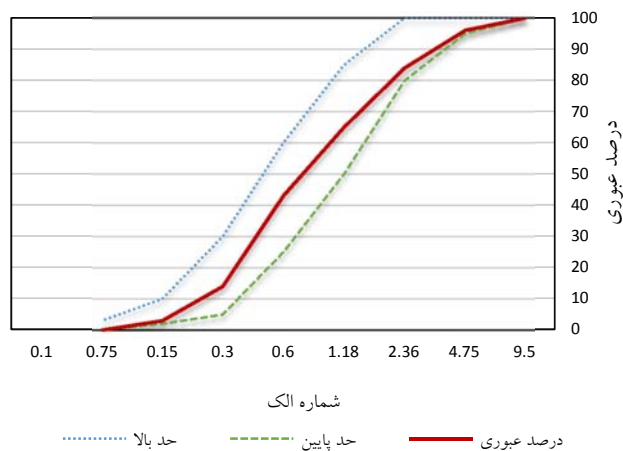
### ۲-۱- مصالح

سیمان، ریزدنه (ماسه)، درشت دانه (شن) و CBA اجزای اصلی مخلوطها هستند. مواد سیمانی مورد استفاده در RCCP باید مطابق  $IS328$  PCA و  $PCA IS009$ ,  $ACI 325$  باشد. از استانداردهای مقاومت و دوام طراحی برخوردار باشند. از سیمان پرتلند نوع II با مساحت سطح تعریف شده  $130 \text{ m}^2/\text{kg}$  استفاده شد که خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۱ نشان داده شده است. در ساخت نمونه‌های RCCP از شن با اندازه حداکثر ۱۹ میلی‌متر و ماسه شکسته شده استفاده شده است. این سنگدانه‌ها و همچنین CBA مطابق با الزامات  $ASTM D448-12$  و  $ASTM C127-15$  انتخاب شدند.

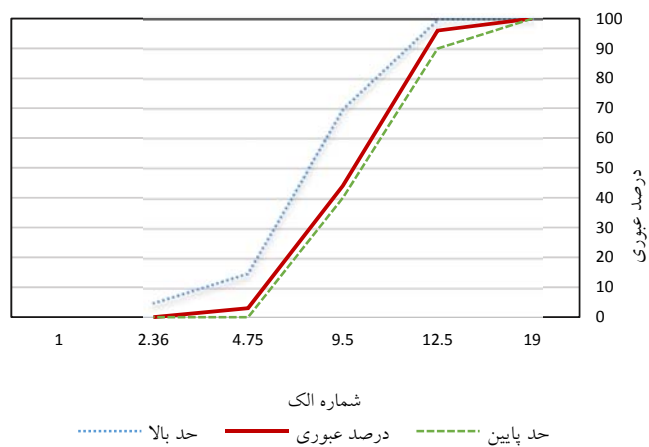
توزیع اندازه ماسه، شن و CBA به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است و ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها در جدول ۲ آمده است. CBA از محل ساختمان تخریب شده جمع آوری و سپس به صورت دستی با چکش خرد شده و به روشی الک شد که نمودار درجه بندی آن دقیقاً با شن طبیعی مطابقت داشته باشد. ۲۴ ساعت قبل از اختلاط در آب اشباع قرار گرفت و سطح آن قبل از اضافه شدن به مخلوط خشک شد. تصویر نهایی آن در شکل ۴ و ویژگی‌های شیمیایی آن در جدول ۳ نمایش داده شده است. بر اساس استانداردهای ASTM، آزمون‌های جذب آب، رطوبت و وزن مخصوص CBA انجام شد. شایان ذکر است، آلاینده‌ها از قبیل چوب، ملات و گرد و غبار به طور کامل از روی CBA حذف شدند.

جدول ۱. خصوصیات شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی سیمان تیپ ۲

خصوصیات شیمیایی (درصد)		خصوصیات مکانیکی و فیزیکی	
SiO <sub>2</sub>	۲۱	مقاومت فشاری ۳ روزه (مکاپاسال)	۲۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۷	مقاومت فشاری ۷ روزه (مکاپاسال)	۳۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳/۸	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مکاپاسال)	۵۰
CaO	۶۳	سطح مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مربع)	۳۳۲۲
MgO	۲/۹	اولین زمان گیرش (ثانیه)	۱۰۴
SO <sub>3</sub>	۲	زمان گیرش نهایی (ثانیه)	۱۹۰
Na <sub>2</sub> O	۰/۴۵	وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۳/۱۵



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه



شکل ۳. دانه بندی شن و آجر

جدول ۲. خواص سنگدانه‌ها

خواص	ماسه طبیعی	آجر رسی	شن طبیعی	استاندارد
جذب آب (درصد)	۱/۱۲	۱۷/۵۶	۰/۵	ASTM C128, C127
وزن مخصوص گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۶۳	۱/۳۸	۲/۷	ASTM C127
لس آنجلس (درصد)	—	—	۱۷	ASTM C88
مدول نرمی	۲/۸	۲/۹	—	ASTM C125
ارزش ماسه‌ای	۸۷	—	—	ASTM D2419

جدول ۳. تجزیه و تحلیل شیمیایی CBA

مواد	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>
مقدار (درصد)	۴۸/۷	۱۳/۷	۵/۶۷	۹/۹۹	۰/۵	۲/۵۱	۱/۱۱	۰/۶۹



شکل ۴. خرده آجر بازیافتی

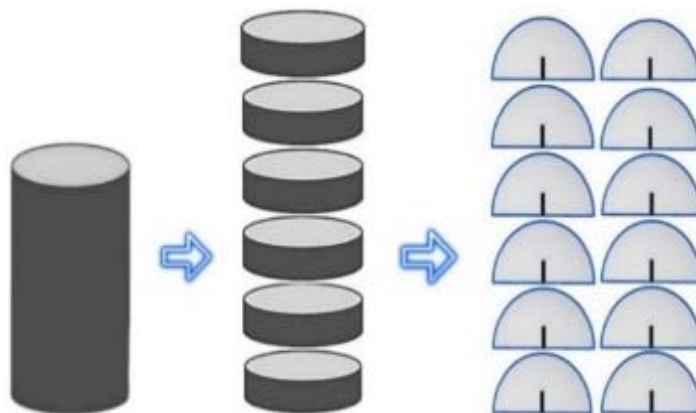
## ۲-۲- آماده‌سازی نمونه و روش‌های آزمایش

نمونه آزمون مقاومت کششی دونیم شدن براساس ASTM C496 و یک نمونه جهت تبدیل به SCB ساخته شد. نمونه‌های استوانه‌ای RCCP جهت تبدیل به نیم دیسک‌های مورد نیاز با استفاده از یک ابزار الماسی با دقت بالا، برش داده شدند و هنگام برش، از آب برای جلوگیری از آسیب حرارتی استفاده شد. در نهایت، نمونه‌های SCB با شعاع ۱۰۰ و ضخامت ۳۰ میلی متر از نمونه‌های استوانه‌ای برش داده شدند. به منظور بررسی تاثیر طول ترک بر چقرمگی شکست در مود اول نیز، ترک با طول اولیه ۲۰ و ۲۵ میلی متر با زاویه صفر بر روی نمونه‌های SCB ایجاد شد. شکل ۵ هندسه نمونه SCB و شکل ۶ خلاصه‌ای از فرآیند ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. نمونه SCB باید بر روی دو غلتک استوانه‌ای با بارگذاری پایین قرار گیرد که در فاصله از پیش تعیین شده متناسب با اندازه نمونه از هم فاصله دارند.

همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است در این مطالعه آزمایشگاهی از ۵ طرح اختلاط استفاده شد که نسبت w/c و ریزدانه، در تمام نمونه‌های RCCP ثابت نگه داشته شدند. منظور از AR، B10، C20، D30 و E40 جایگزینی درشت‌دانه با وزن صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد توسط CBA شده است (درصد جایگزینی CBA به عنوان نسبت وزنی سنگدانه‌های آجری به کل سنگدانه‌های شن در مخلوط RCCP تعریف می‌شود). سنگدانه‌ها به همراه سیمان حدود پنج دقیقه در یک میکسر با هم ترکیب شدند. سپس به تدریج اضافه شد. پس از فرآیند اختلاط جهت ارزیابی کیفیت نمونه‌ها آزمون وی بی با استفاده از یک میز ارتعاشی با فرکانس ۶۰ هرتز و اضافه بار ۲۲/۷ کیلوگرم براساس ASTM C1170/C1170M انجام شد که نتایج در جدول ۴ ذکر شده است. پس اختلاط نمونه‌ها ۲۴ ساعت قالب گیری شدند و به مدت ۲۸ روز در حوضچه عمل‌آوری نگهداری شدند. به منظور دستیابی به اهداف تحقیق، ۳۵ نمونه استوانه ۱۰۰×۲۰۰ میلی‌متر (از هر طرح اختلاط سه نمونه جهت آزمون مقاومت فشاری براساس ASTM C33، ۳

جدول ۴. طرح اختلاط RCCP

طرح	درصد جایگزینی آجر و شن	W/C	اجزای تشکیل دهنده (کیلوگرم بر متر مکعب)					نتایج آزمون وی بی
			سیمان	آب	ماسه	شن	آجر خرد شده	
AR	۰	۰/۴۵	۳۱۰	۱۳۷	۹۳۲	۱۰۶۰	۰	۳۳
B10	۱۰	۰/۴۵	۳۱۰	۱۳۷	۹۳۲	۹۵۴	۱۰۶	۴۵
C20	۲۰	۰/۴۵	۳۱۰	۱۳۷	۹۳۲	۸۴۸	۲۱۲	۴۹
D30	۳۰	۰/۴۵	۳۱۰	۱۳۷	۹۳۲	۷۴۲	۳۱۸	۵۱
E40	۴۰	۰/۴۵	۳۱۰	۱۳۷	۹۳۲	۶۳۶	۴۲۴	۵۴



شکل ۵. نحوه ساخت و برش نمونه‌های SCB



شکل ۶. خلاصه کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته

### ۳- نتایج و بحث

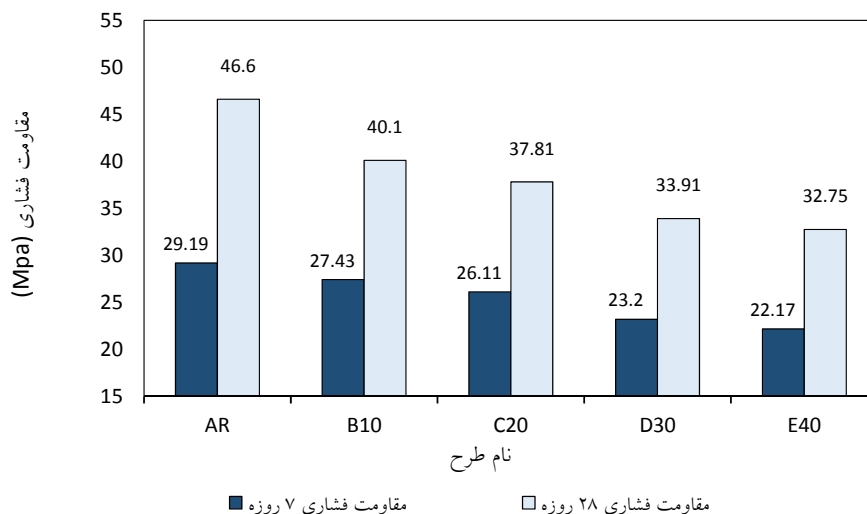
#### ۳-۱- تست مقاومت فشاری

همانطور که در شکل ۷ مقادیر مقاومت فشاری مخلوط‌های RCCP را به ترتیب در سن ۷ و ۲۸ روز نشان داده است، مقاومت فشاری نمونه‌های RCCP با افزایش مقدار CBA کاهش می‌یابد. مقاومت مخلوط B10 و C20 پس از ۷ روز به ترتیب ۶ و ۱۰ درصد در مقایسه با AR کاهش یافت. ساختار متخلخل و ترک‌های میکروسکوپی متعدد، وزن مخصوص کمتر و درصد جذب آب بالاتر آجر، منجر به تضعیف و در نتیجه کاهش مقاومت RCCP می‌شود. بنابراین هر چه CBA بیشتر

باشد، مقاومت بیشتر کاهش می‌یابد. با این وجود تمام نمونه‌ها حتی نمونه‌ی حاوی ۴۰ درصد خرده آجر، طبق نشریه ۳۵۴ به حداقل مقاومت لازم (۲۸ مگاپاسکال) در ۲۸ روز دست یافتند. با مقایسه‌ی مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه، افزایش مقاومت فشاری در تمام نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش سن مشاهده می‌شود که این روند با نتایج تحقیقات دیگر محققین مشابهت دارد (Ogbonna, 2020; Xiong et al., 2021). بیشترین میزان افزایش مقاومت، مربوط به نمونه شاهد می‌باشد که پس از گذشت ۲۱ روز نزدیک به ۶۰ درصد از مقاومت خود را به دست

شکست از میان سنگدانه‌های طبیعی و خرده آجر ضایعاتی بوده و از بین ملات سیمان عبور نکرده است. دلیل این امر انتخاب نسبت آب به سیمان مناسب برای نمونه بتن غلتکی و چسبندگی خمیر سیمان با سنگدانه‌ها می‌باشد.

آورده است. نمونه‌های حاوی خرده آجر در درصد‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به ترتیب ۴۶/۱، ۴۴/۸، ۴۷/۷ و ۴۷/۷ درصد افزایش مقاومت از خود نشان داده‌اند. در نمونه‌های بتن غلتکی حاوی آجر ضایعاتی بیشترین میزان مقاومت فشاری مربوط به نمونه B10 و کمترین مقاومت در نمونه E40 مشاهده شده است. در شکل ۸ نمونه‌های شکسته شده بتن غلتکی پس از آزمون مقاومت فشاری قابل مشاهده می‌باشد. همان طور که در تصویر مشخص است ترک‌های ایجاد شده به صورت طولی امتداد پیدا کرده و سطح خرابی به وجود آمده صاف می‌باشد زیرا محل



شکل ۷. نتایج تست مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن غلتکی حاوی خرده آجر

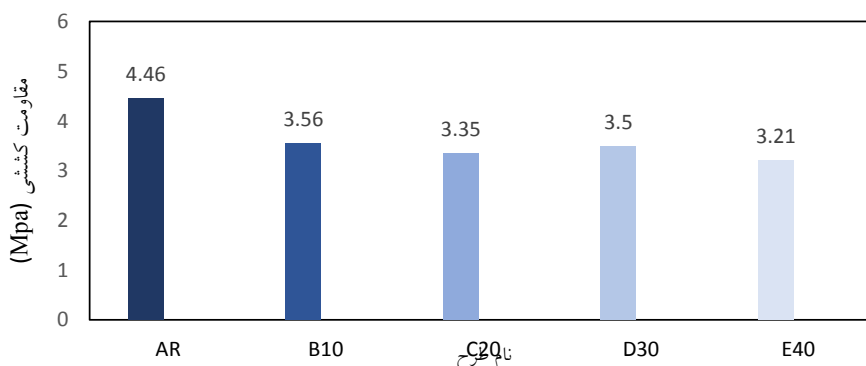


شکل ۸. نمونه‌های بتن غلتکی حاوی خرده آجر پس از بارگذاری در دستگاه جک فشاری

### ۳-۲- تست مقاومت کششی غیر مستقیم

مربوط به نمونه حاوی ۴۰ درصد آجر خرد شده به میزان ۳/۲۷ مگاپاسکال بوده است. این پدیده معمولاً به دلیل مقاومت کششی کم و ماهیت متخلخل آجر خرد شده ضایعاتی ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد ریزترک‌ها و کاهش ناگهانی مقاومت می‌شود. تغییرات مقاومت در نمونه‌های حاوی خرد آجر، اندک و بسیار نزدیک به هم می‌باشد.

شکل ۹ نتایج مقاومت کششی مخلوط‌های RCCP حاوی CBA را نشان می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد خرد آجر نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۰ و ۲۴ درصد کاهش مقاومت کششی داشته است. نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد افزودنی خرد آجر نیز دارای مقاومت کمتری نسبت به مقاومت نمونه شاهد بوده و به مقدار ۲۳ و ۲۶ درصد کاهش مقاومت داشتند. بیشترین مقاومت کششی در نمونه شاهد به مقدار ۴/۴۶ مگاپاسکال گزارش شده و کمترین مقدار مقاومت،



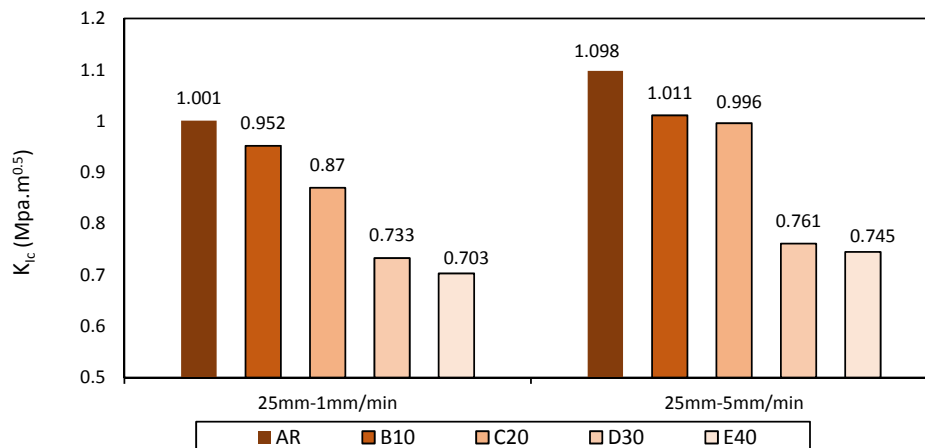
شکل ۹. نتایج تست مقاومت کششی ۲۸ روز

### ۳-۳- تست مقاومت شکست

بتن خشک حساسیت نرخ بسیار کمی را نشان می‌دهد، به جز در نرخ کرنش بسیار بالا، توجه بیشتری برای توضیح این تمایل ارائه می‌دهد. با این حال، هنگامی که نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد، اینرسی کل نمونه به طور قابل توجهی به افزایش مقاومت کمک می‌کند. از سوی دیگر، میکرواینرسی اطراف نوک ترک، انتشار شکستگی را دشوارتر می‌کند. علاوه بر این، تشکیل ریزترک‌های بیشتر با افزایش سرعت نیز نقش مهمی در تأثیر نرخ بارگذاری دارد که البته این نتیجه توسط دیگر محققین نیز مشاهده شده است (Shi & Chen, 2018). نجاتی & قزوینیان، (۱۳۹۶). نمونه E40 مقاومت بیشتری نسبت به نمونه D30 در هر دو نرخ بارگذاری بالا و پایین نشان داد. خرد شدن برخی از آجرها در حین اختلاط و پر شدن فضای خالی بین ذرات که باعث افزایش چقرمگی شکست شده است، ممکن است علت بهبود مقاومت به شکست در E40 باشد. لازم به ذکر است افزایش نرخ بارگذاری در نمونه‌های حاوی ترک ۲۰ میلی‌متر نیز روندی مشابه با نمونه‌های حاوی ترک ۲۵ میلی‌متر داشته است.

چقرمگی شکست یک ماده، ویژگی منحصر به فردی است که جهت توصیف رفتار شکست آن ماده ضروری است. به دلیل اتکا به اندازه و شکل نمونه و همچنین این واقعیت که شکست در همه نقاط به طور هم‌زمان رخ نمی‌دهد، بلکه پیشرفت می‌کند؛ ارزیابی دقیق استحکام مواد ناهمگن شبه ترد معمولاً چالش برانگیز است. با این حال، استحکام با چقرمگی شکست در ارتباط است زیرا شکست با انتشار ترک ناپایدار رخ می‌دهد. چقرمگی بالاتر به معنای مقاومت بالاتر در برابر شکست است.

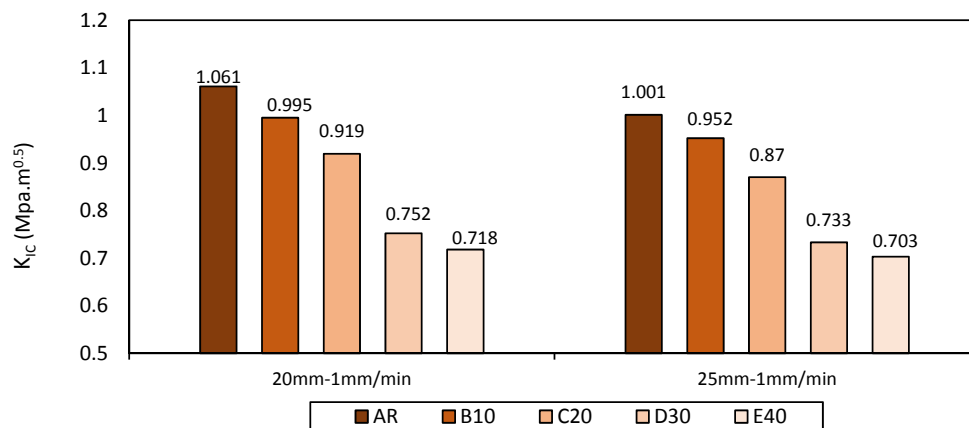
۳-۳-۱- تأثیر نرخ بارگذاری بر چقرمگی شکست نمونه بتن غلتکی حاوی خرد آجر شکل ۱۰ تأثیر نرخ بارگذاری را بر چقرمگی شکست نمونه‌های RCCP حاوی CBA در طول ترک ۲۵ میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که نمایش داده شده است با افزایش نرخ بارگذاری چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد. اثر سرعت در نرخ بارگذاری پایین حداقل بوده و عمدتاً ناشی از اثرات ویسکوزیته ناشی از حضور آب آزاد در فضاهای خالی و ساختارهای متخلخل است. این واقعیت که



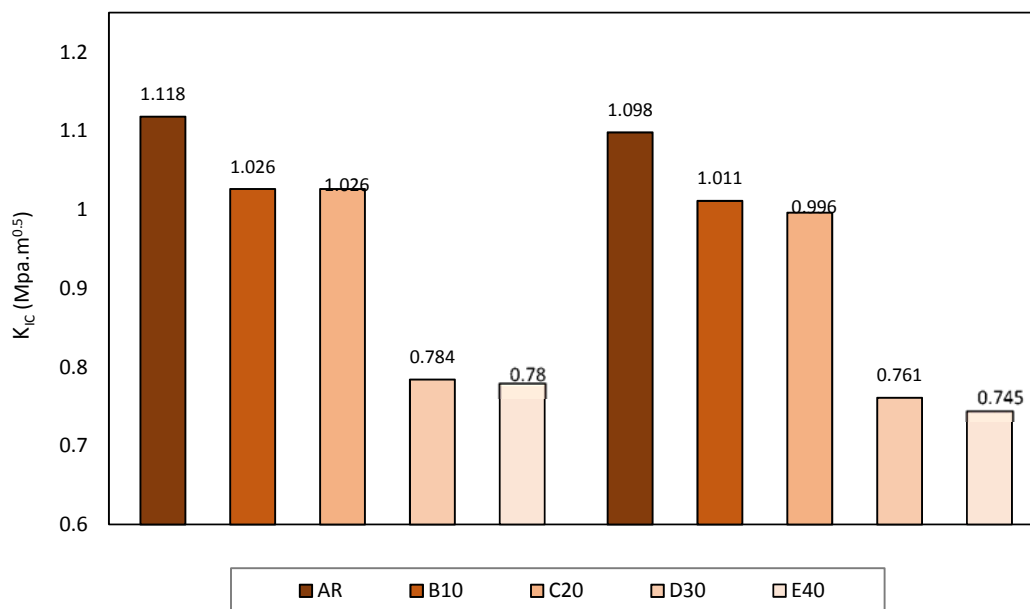
شکل ۱۰. تاثیر نرخ بارگذاری متغیر بر چقرمگی شکست نمونه‌های با طول ترک ۲۵ میلی‌متر

پژوهشگران (Alam et al., 2010) این امر ممکن است به دلیل وجود ریز ترک‌های متعددی باشد که نوک ترک اولیه را احاطه کرده‌اند. طول ترک بزرگتر منجر به ایجاد مناطق بزرگتر تحت تأثیر تجمع آسیب می‌شود. از آنجایی که ایجاد ریز ترک‌های اطراف نوک ترک اصلی، اثر تنش‌های شدید را کم‌رنگ می‌کند، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد شکست افزایش می‌یابد. با افزایش طول ترک، احتمال شکست در طول یک مسیر مشخص بسیار سریعتر افزایش می‌یابد. بنابراین، احتمال کل شکست افزایش می‌یابد، یعنی چقرمگی شکست کاهش می‌یابد.

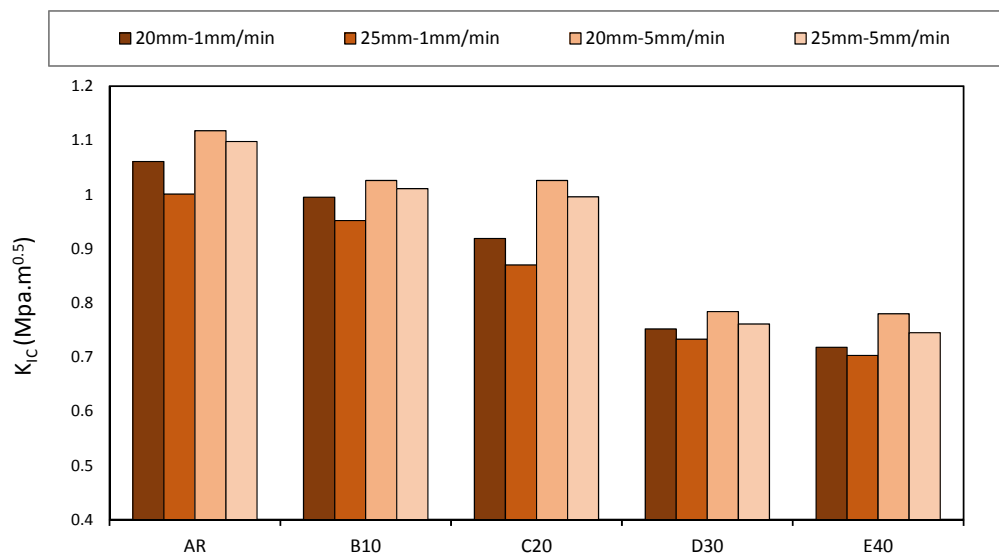
۳-۳-۲- تاثیر طول ترک بر چقرمگی شکست نمونه بتن غلتکی حاوی خرده آجر تاثیر طول ترک بر چقرمگی شکست نمونه بتن غلتکی حاوی خرده آجر  
با استفاده از آزمون خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های SCB با طول ترک اولیه ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر، اثر طول ترک بر چقرمگی شکست مخلوط‌های مورد بررسی واقع شد. شکل ۱۱ و ۱۲ یافته‌های مربوط به تاثیر طول ترک بر چقرمگی شکست را در دو نرخ بارگذاری به ترتیب ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. با افزایش طول ترک، چقرمگی شکست چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. براساس نتایج تحقیقات دیگر



شکل ۱۱. تاثیر متغیر طول ترک در مقدار ثابت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر روی چقرمگی شکست



شکل ۱۲. تاثیر متغیر طول ترک در مقدار ثابت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه بر روی چقرمگی شکست



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات چقرمگی شکست نمونه بتن غلتکی حاوی خرده آجر

5mm/min، به مقدار  $1/118$  (MPa.m<sup>0.5</sup>) بوده و کمترین مقدار متعلق به نمونه D30-25mm-1mm/min به میزان  $0/733$  (MPa.m<sup>0.5</sup>) می‌باشد. کمترین میزان مقاومت در برابر شکست در تمام حالات مربوط به نمونه D30 بوده که این کسری مقدار در نمونه E40 جبران شده و چقرمگی شکست افزایش یافته است. با این حال نمونه E40 نتوانست به میزان

تاثیر درصد خرده آجر بر چقرمگی شکست نمونه بتن غلتکی شکل ۱۳ نمودار خطی تغییرات چقرمگی شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی خرده آجر در نرخ بارگذاری ۱ و ۵ میلی‌متر بر دقیقه و طول ترک اولیه ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر را نشان می‌دهد. براساس آن، میزان چقرمگی شکست در نمونه‌ها با افزایش درصد آجر نسبت به نمونه شاهد، کاهش مقدار داشته است. بیشترین میزان چقرمگی مربوط به نمونه AR-20mm-

میزان چقرمگی شکست با رسیدن نرخ بارگذاری از ۱ به ۵ میلی‌متر بر دقیقه افزایش و با رسیدن طول ترک از ۲۰ میلی‌متر به ۲۵ میلی‌متر کاهش یافت.

با توجه به افزایش روز افزون قیمت مصالح، استفاده از CBA به عنوان جایگزین درشت‌دانه دارای صرفه اقتصادی بوده و کاهش میزان هزینه ساخت حمل و نقل و دفن نخاله‌ها را در پی دارد. علاوه بر آن، استفاده از CBA در مخلوط RCCP با توجه به استفاده کمتر از سنگدانه‌های طبیعی، حفظ محیط زیست، مدیریت پسماند و کاهش هزینه‌های اقتصادی اقدامی مثبت در جهت توسعه پایدار می‌باشد.

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

1. Roller Compacted Concrete Pavement
2. Crushed Brick Aggregate
3. Opening Mode
4. Sliding Mode
5. Tearing Mode
6. Semi-Circular Bending

#### ۷- مراجع

-نجاتی، حمیدرضا و قزوینیان، عبدالهادی (۱۳۹۶). تاثیر نرخ بارگذاری بر مکانیزم شکست سنگ تحت بارگذاری کشش غیر مستقیم. مکانیک سنگ.

-Alam, M., Azad, M., & Kadir, M. (2010). Fracture toughness of plain concrete specimens made with industry-burnt brick aggregates. *Journal of Civil Engineering (IEB)*, 38(1), 81-94 .

-Alamdarlo, M. N., & Hesami, S. (2020). Measuring the effect of pavement porosity filling on skid resistance by numerical model and field test. *Measurement*, 152, 107269 .

-Anderson, T. L. (2017). Fracture mechanics: fundamentals and applications. *CRC Press* .

-Ayatollahi, M., Aliha, M., & Saghafi, H. (2011). An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(1), 110-123 .

-Bazant, Z. P., & Planas, J. (1997). Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials Vol. 16. *CRC Press* .

-Cachim, P. B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292-1297 .

-Chhorn, C., Kim, Y. K., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2019). Evaluation on compactibility and workability of roller-compacted concrete for pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(8), 905-910 .

-Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 886-893 .

چقرمگی نمونه شاهد برسد. نتایج نشان می‌دهد که CBA را می‌توان به عنوان جایگزین (تا ۴۰ درصد) سنگدانه طبیعی، در ساخت RCCP استفاده نمود.

#### ۴- بهینه‌سازی مخلوط بتن غلتکی

امروزه آجر یکی از رایج‌ترین مصالح ساختمانی است که با توجه به حجم وسیع ضایعات به دست آمده از آن و درصد بسیار کم بازیافت، استفاده از این مواد در بتن غلتکی به عنوان یک راهکار نوین مطرح شده است. سهم ۴۵ درصدی هزینه‌های انرژی در تولید آجر از دیدگاه اقتصادی، بیانگر شدت مصرف انرژی در این صنعت و لزوم توجه به استفاده بهینه از آجر و ضایعات آن می‌باشد. طبق گزارشات ارائه شده، ضایعات آجر از ابتدا تا انتهای خط تولید در کارخانجات آجر بین ۱۰ تا ۲۰ درصد می‌باشد که با توجه به حجم بالای تولید میزان قابل ملاحظه‌ای است. آجر ضایعاتی می‌تواند به عنوان پوزولان و یا جایگزین جزئی شن و ماسه در بتن مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش و با استناد به بررسی‌های انجام شده پیشین، استفاده از آجر در مخلوط بتن غلتکی با توجه به ترکیبات شیمیایی و همچنین ساختار فیزیکی این مواد، رضایت بخش بوده است. در شکل ۱۳ هزینه ساخت یک متر مکعب RCCP در مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف CBA باهم مقایسه شده است. بنابر نتایج اعلام شده، هزینه ساخت با افزایش درصد CBA کاهش می‌یابد. کاهش درصد هزینه ساخت RCCP حاوی (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) خرده آجر در مقایسه با نمونه شاهد (دارای ۱۰۰ درصد درشت‌دانه طبیعی) به ترتیب ۴، ۷، ۱۰ و ۱۳ درصد می‌باشد. با توجه به افزایش روز افزون قیمت مصالح بکر و بیشتر شدن ساخت و ساز، استفاده از ضایعات آجر خرد شده به عنوان جایگزین سنگدانه‌ها دارای صرفه اقتصادی بوده و کاهش میزان هزینه ساخت، حمل و نقل و دفن نخاله‌ها را در پی دارد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

به منظور بررسی نحوه‌ی عملکرد آجرهای بازیافتی (CBA) به عنوان جایگزین درشت‌دانه در روسازی بتن غلتکی (RCCP)، CBA در مقادیر صفر، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد جایگزین با شن طبیعی شدند. خواص مکانیکی به کمک آزمون مقاومت فشاری و کششی دو نیم شدن و همچنین رفتار شکست با هدف تعیین چقرمگی شکست به کمک آزمون خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفتند. در ادامه به برخی از نتایج کلی به دست آمده در این تحقیق اشاره شده است.

با افزایش درصد CBA از صفر تا ۴۰ درصد، میزان مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم نسبت به نمونه شاهد کاهش پیدا کرد. با این حال، تمامی نمونه‌ها به میزان مقاومت مکانیکی مطلوب دست یافتند.

- Ogbonna, A. C. (2020). Characterization Of Crushed Bricks Aggregate As A Replacement Of Natural Coarse Aggregate In Construction Of Roller-Compacted Concrete Pavement. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 18(2), 105-114 .
- Sadeghi, V., & Hesami, S. (2018). Finite element investigation of the joints in precast concrete pavement. *Computers and Concrete. An International Journal*, 21(5), 547-557 .
- 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. *Construction and Building Materials*, 101, 617-621 .
- Shi, D., & Chen, X. (2018). Flexural tensile fracture behavior of pervious concrete under static preloading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 060180150.
- Tavakoli, D., Fakharian, P., & de Brito, J. (2021). Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume. *Road Materials and Pavement Design*, 1-22 .
- Xiong, B., Demartino, C., Xu, J., Simi ,A., Marano, G. C., & Xiao, Y. (2021). High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: Recycled crushed concrete and clay bricks. *Construction and Building Materials*, 301, 123875 .
- Yang, J., Du, Q., & Bao, Y. (201). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1935-1945 .
- Yang, S., Hu, X., Leng, K., & Liu, Y. (2014). Correlation between cohesive crack-tip local fracture energy and peak load in mortar beams. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(10), 04014069 .
- Zheng, C., Lou, C., Du, G., Li, X., Liu, Z., & Li, L. (2018). Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. *Results in Physics*, 9, 1317-1322 .
- Zong, L., Fei, Z., & Zhang, S. (2014). Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste. *Journal of Cleaner Production*, 70, 175-182 .
- ghorbanian, e., & Hesami, S. (2024). A Review of LC3 Cement: Feasibility of Its Use in Concrete Pavements Alongside the Reduction of Greenhouse Gases Emission. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(2), 39-55. [doi.org/10.22075/jtie.2024.34499.1679](https://doi.org/10.22075/jtie.2024.34499.1679)
- Harrington ,D., Abdo, F., Ceylan, H., Adaska, W., Hazaree, C., & Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements .
- Hesami, S., Ahmadi, S., Ghalesari, A. T., & Hasanzadeh, A. (2013). Ground surface settlement prediction in urban areas due to tunnel excavation by the NATM. *Electr. J. Geotech. Eng*, 18, 1961 .
- Hesami, S., & Sadeghi, V. (2015). Numerical investigation of the shape memory alloy dowels in jointed concrete pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 8(4), 251 .
- Khalaf, F. M. (2006). Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(4), 518-526 .
- Khalaf, F. M., & DeVenny, A. S. (2005). Properties of new and recycled clay brick aggregates for use in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(4), 456-464 .
- Klak, F. S., Saleh, H., & Tais, A. S. (2022). Recycling of crushed clay bricks as fine aggregate in concrete and cement mortar. *Australian Journal of Structural Engineering*, 1-10 .
- Lim, I., Johnston ,I., & Choi, S. (1993). Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending. *Engineering Fracture Mechanics*, 44(3), 363-382 .
- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., & López, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 36-55 .
- Mermerdaş, K., Güneyisi, E., Gesoğlu, M., & Özturan, T. (2013). Experimental evaluation and modeling of drying shrinkage behavior of metakaolin and calcined kaolin blended concretes. *Construction and Building Materials*, 43, 337-347 .
- Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64, 227-236 .
- Mojtahedzadeh, e., hesami, s., & Ravanshadian, m. (2022). Effect of nanosilica, nano halloysite and nano montmorillonite on the mechanical properties of concrete pavements. *Asas Journal*, 24(66), 16-26. [https://www.isceiran.org/article\\_173526\\_1bc4c284ad037ddc57980eeb3945afe0.pdf](https://www.isceiran.org/article_173526_1bc4c284ad037ddc57980eeb3945afe0.pdf)
- Nabizadeh Rafsanjani, H., Chehrehgani, M., & Nourbakhsh, M. (2011). Recycling of crushed clay brick as aggregate in concrete. *Applied Mechanics and Materials*.

# Experimental Study of the Fracture Behaviour of Roller Compacted Concrete Pavement Containing Recycled Crushed Brick

*Saeid Hesami, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.*

*Sara Shirzad, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.*

*Rahel Khamsi, Ph.D., Student, Department of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.*

*E-mail: s.hesami@nit.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## ABSTRACT

Annually, a significant amount of waste bricks is generated as a byproduct of the construction process and accumulated in landfill sites. Recycling these waste bricks can significantly reduce waste storage issues and environmental pollution, as well as contribute to the conservation of natural stone resources. In the present study, crushed bricks were used as a substitute for gravel (0%, 10%, 20%, 30%, and 40% by weight) in five mix designs of Roller-Compacted Concrete Pavement (RCCP). The mechanical properties were evaluated using compressive strength tests, splitting tensile strength tests, and fracture behavior under initial loading mode using three-point bending tests on 60 semi-circular bending (SCB) specimens with initial crack lengths of 20 and 25 millimeters and loading rates of 1 and 5 millimeters per minute. The results indicate that the compressive and splitting tensile strengths of the RCCP specimens decrease with an increase in the proportion of waste bricks. At a constant loading rate, the fracture toughness ( $K_{Ic}$ ) decreases with an increase in crack length, and furthermore, an increasing loading rate leads to an upward trend in  $K_{Ic}$  along the crack length.

**Keywords:** Fracture Toughness, Crushed Brick, Roller Compacted Concrete Pavement, Semi-Circular Bending