نشریه عمران و پروژه
Civil & Project Journal(CPJ)
www.cpjournals.com

Review of the properties of roller concrete and the use of recycled and pozzolanic materials

Hassan Divandari[۱], Ali hassannejad [۲]*

۱- *Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

divandari@iauns.ac.ir

۲*-*Phd student, Engineering Faculty,University of Islamic azad, Ayatollah amoli, Amol, Iran*

alihasannejad@gmail.com

ABSTRACT

One of the new types of concrete that helps to solve problems such as cracking, grooving in concrete, and is known as one of the most popular concretes in the civil engineering community, is roller concrete (RCC) which is made in construction. Types of road pavements and structural uses can be used. In recent years Due to the high cost of pavement construction and environmental considerations, various waste and recycled materials have been used in concrete mixes and roller concrete. In this research, a relatively comprehensive review of the composition of waste and recycled materials on the mechanical properties of roller concrete is presented. The mechanical properties of roller concrete by replacing coarse and fine-grained materials in concrete with recycled materials including rubber chips and steel slag have been investigated in a leading study. In the researches, compressive strength, indirect tensile and three-point bending tests have been performed on ۷ and ۲۸ day samples. ۳-point bending test is used to obtain flexural strength and toughness and energy absorption.

Keywords: *Roller compacted concrete pavement, Roller concrete, coal waste, steel slag, Asphalt crumb materials, Crumb rubber materials, Mechanical properties*

All rights reserved to Civil & Project Journal.

نشریه عمران و پروژه (Civil & Project Journal(CPJ)) ISSN:۲۶۷۶-۵۱۱X www.cpjournals.com
سال سوم، دوره ۳، شماره ۱۰، دی ۱۴۰۰،شماره پیاپی ۳۲،صفحه ۲۹ تا صفحه ۴۸

مروری بر خواص بتن غلتکی و کاربرد مصالح بازیافتی و پزولانی در آن

حسن دیواندری[۱]، علی حسن نژاد اسفندانی* [۲]

۱. گروه مهندسی عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران
divandari@iauns.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، آمل، ایران* alihasannejad@gmail.com

تاریخ دریافت:۱۴۰۰/۰۳/۲۸ تاریخ پذیرش:۱۴۰۰/۰۴/۲۴

چکیده

یکی از انواع بتن های نوین که به حل معضلاتی همچون ترک خوردگی، شیارشدگی در بتن کمک شایانی می‌نماید، و به عنوان یکی از بتن‌های پرطرفدار در جامعه مهندسی عمران شناخته می‌شود، بتن غلتکی (RCC) می‌باشد که در ساخت انواع روسازی‌های راه و مصارف سازه‌ای قابل استفاده است. در سال‌های اخیر، به‌دلیل هزینه‌های زیاد ساخت روسازی و ملاحظات زیست محیطی، از مصالح ضایعاتی و بازیافتی مختلفی در مخلوط‌های بتنی و بتن غلتکی استفاده شده است. در این پژوهش بررسی مروری نسبتاً جامعی در زمینه ترکیب مصالح ضایعاتی و بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن غلتکی ارایه شده است. خصوصیات بتن‌های غلتکی با جایگزین نمودن مصالح درشت‌دانه و ریزدانه با مصالح بازیافتی شامل، خرده لاستیک، سرباره فولاد و ... در پژوهش پیش‌رو مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش‌های مورد بررسی عموماً آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه‌نقطه‌ای روی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای جهت به‌دست آوردن مقاومت خمشی، چقرمگی و قابلیت جذب انرژی استفاده شد.

کلمات کلیدی: بتن غلتکی روسازی راه، بتن غلتکی، پسماند زغال سنگ، سرباره فولاد، مصالح خرده آسفالتی، مصالح خرده لاستیک، خصوصیات مکانیکی

۱- مقدمه

موضوع زیرساخت‌های حمل و نقل برای توسعه اقتصادی و اجتماعی در سطح منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی بسیار مهم است. عنصر اصلی زیرساخت حمل و نقل، روسازی است، که می‌تواند با هدف‌های مختلف، صلب یا انعطاف‌پذیر باشد. هر دو نوع روسازی، مزایا و معایبی از نقطه نظر انتقال بارهای ترافیکی دارند. روسازی بتنی برای ساخت راه‌های با حجم ترافیک زیاد، فرودگاه‌ها، تونل‌ها، پل‌ها، توقفگاه‌های روباز، محوطه‌های روباز و انواع دیگر کفسازی‌ها بهکار می‌رود. امروزه با پیشرفت علم روسازی، حصول معیارهای مهمی، از جمله افزایش عمر رویه‌ها، افزایش مشخصات فنی، داشتن صرفه اقتصادی، در نظر گرفتن جنبه‌های زیست‌محیطی و رقابت با سایر انواع رویه‌ها مد نظر می‌باشد.

امروزه استفاده از بتن غلتکی[۱] در ساخت روسازی‌های راه بسیار مورد توجه است، که علت آن نیز توجیهات فنی و اقتصادی است. آنچه که موجب گسترش این نوع روسازی گردیده مواردی چون اجرای سریع و آسان، هزینه‌های کمتر اجرا و مقاومت آن در شرایط آب و هوایی بسیار سرد یا بسیار گرم می‌باشد. با پیشرفت علم روسازی، حصول معیارهای مهمی، از جمله افزایش عمر رویه‌ها، افزایش مشخصات فنی، داشتن‌صرفه اقتصادی، در نظر گرفتن جنبه‌های زیست محیطی و رقابت با سایر انواع رویه‌ها مد نظر قرار گرفته است.

بتن غلتکی عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگدانه‌ها، ماسه با دانه‌بندی توپر، مواد سیمانی و آب که در مخلوط‌کن بتن مخلوط شده و همگن می‌گردد که دارای کارآیی و ظاهر مشابه با مخلوط شن نمدار است. بتن غلتکی می‌توان به عنوان اساس رویه آسفالتی، مسیر عبور کامیون و لچکی بزرگراه‌ها به کار برد. از این نوع بتن برای کاربری‌های مختلفی نظیر روسازی کف انبارهای سرپوشیده، روسازی جاده‌های ویژه وسایل نقلیه سنگین کم سرعت و وسایل نقلیه نظامی زنجیردار، جاده‌های با شیب زیاد و در فرودگاه‌ها استفاده می‌شود.

با توجه به اینکه این نوع بتن از آب و سیمان کمتری نسبت به بتن معمولی برخوردار است، دارای خواص بتن با اسلامپ صفر است، و از این جهت یک گزینه مهم در راستای سیاست‌های حمل و نقل بسیاری از کشورهای پیشرفته قرار گرفته است، زیرا باعث افزایش سرعت اجرا و صرفه‌جویی اقتصادی در مقایسه با سایر روسازی‌ها می‌شود. حدود ۳۰ درصد صرفه‌جویی در مقایسه با روسازی بتنی به دلایلی از جمله میزان سیمان کمتر، عدم استفاده از میلگرد، فاصله بیشتر درزها، وعدم نیاز به هیچ وسیله و دستگاه خاصی برای ساخت آن، بهره‌برداری سریع از جاده و همچنین می‌تواند بدون قالب‌بندی و با تجهیزات آسفالت پخش و متراکم شود (لوپز یوسدا و همکاران، ۲۰۱۸). سرعت اجرا روسازی بتن غلتکی در مقایسه با روسازی بتنی معمولی بیشتر است. سازگاری با محیطزیست، علاوه بر اقتصادی بودن، باعث کاهش تولید دی‌اکسید کربن می‌شود (بیلی و همکاران، ۲۰۱۵). استفاده متداول از بتن غلتکی برای ساخت روسازی در مناطق صنعتی است، که سرعت ترافیک کندتر است و به آسفالت سفت و بادوام نیاز است. تحقیقات روی روسازی بتن غلتکی در دهه ۸۰ میلادی آغاز شد و اولین قطعه راه آزمایشی در سال ۱۹۸۲ ساخته شد. امروزه، با توسعه فناوری و پیشرفت فنی دستگاه‌ها و غلتک‌های متراکم کننده، ظرفیت مناسبی برای توسعه روسازی‌های بتن غلتکی ایجاد شده است (ACI ۲۰۷.۵R-۹۹، ۲۰۰۴).

در تهیه‌ی این نوع بتن‌ها از انواع مواد افزودنی استفاده می‌شود تا خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها ارتقا یافته و نسبت به شرایط اولیه‌ی خود دارای مزایای بیشتری باشند. نتیجه‌ی این امر انجام پژوهش‌ها و مطالعات راهبردی زیادی در مورد استفاده از انواع افزودنی‌ها در بتن غلتکی است که امروزه جزو پرطرفدارترین موضوعات پژوهشی می‌باشد. استفاده از مواد جایگزین سیمان، طرح اختلاط‌ها با درصد بهینه سیمان و بهبود دوام پذیری بتن به عنوان موضوعات اصلی در راستای توسعه صنعت بتن مطرح هستند. استفاده از پزولان‌ها نیاز به عملیات پر هزینه مشابه پخت کلینکر سیمان ندارد. همچنین سختی کمتر پزولان‌ها سبب می‌شود انرژی کمتری صرف آسیاب نمودن مخلوط کلینکر با این مواد کمکی شود. استفاده از مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های ریز و درشت و همچنین استفاده از افزودنی‌هایی به عنوان جایگزین سیمان، نه تنها راه‌حلی مقرون به‌صرفه می‌باشد، بلکه می‌تواند اثرات منفی زیست محیطی بتن غلتکی را نیز

۱- RCC (Roller Compacted Concrete)

کاهش دهد. به عنوان مثال، لاستیک‌خرد شده، خرده آسفالت بازیافتی (RAP)[۲] پسماند ذغال سنگ وشیشه‌های خرد شده دورریز، از جمله مهمترین مواد پسماند بازیافت شده مورد استفاده به عنوان سنگدانه‌های ریز و درشت و جایگزین سیمان در روسازی‌های بتن غلتکی هستند.

۲- بررسی خواص بتن غلتکی

۲-۱-مقاومت‌های مکانیکی

مقاومت‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری، خمشی، مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت برشی می‌باشند که با توجه به تأثیری که در مقاومت سایش و مقاومت در برابر یخزدگی دارند، بایستی تعیین شوند. مقاومت RCC در حالت کلی به کیفیت دانه‌بندی، درجه تراکم، نسبت‌های سیمان، پوزولان و آب بستگی دارد. نوع مصالح سیمانی تأثیر زیادی در روند افزایش مقاومت مخصوصا در سنین پایین بتن دارد.

۲-۲-مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مورد نظر برای بتن غلتکی جهت روسازی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقاومت‌های در نظر گرفته شده برای بتن‌های غلتکی مورد استفاده در سدسازی است. در بتن‌های غلتکی سدسازی با توجه به اهمیت ویژه مسائل حرارتی سعی بر این است که مقدار سیمان به حداقل لازم محدود گردد. همچنین با توجه به عدم نیاز به مقاومت بالا در بتن‌های حجیم سدسازی، نسبت آب به سیمان در این بتن‌ها عمدتا بالا بوده و اغلب بین ۰/۵ تا ۱ تعیین می‌گردد. در زمینه روسازی راه خصوصا وقتی از بتن غلتکی به‌عنوان سطح نهایی تردد استفاده می‌شود، تهیه بتن غلتکی با دوام و مقاومت فشاری بالا مد نظر قرار می‌گیرد و این در حالی است که با توجه به ضخامت کم روسازی بتن غلتکی و امکان اتلاف نسبتا آسان حرارت تولید شده در بتن‌های غلتکی روسازی راه، مسئله حرارت زایی و پایین نگه داشتن مقدار سیمان چندان حائز اهمیت نیست. لذا مقدار مواد سیمانی در این نوع بتن‌های غلتکی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقادیر معمول در بتن‌های غلتکی پروژه‌های سدسازی می‌باشد. در آمریکا مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی عمدتاً در مشخصات فنی بیش از ۲۷/۶ مگا پاسکال قید شده است (ACI ۳۲۵.۱۰R، ۱۹۹۹).

در کشورهایی نظیر سوئد که الزامات بارگذاری و یا شرایط جوی شدید حاکم است، مقاومت بالاتری مدنظر قرار گرفته می‌شود. در این کشور بتن غلتکی روسازی باید دارای حداقل مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال در ۲۸ روز و دوام مناسب در برابر ذوب، انجماد و سایش باشد. با توجه به تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی روی مقاومت فشاری و دوام بتن، جهت حصول الزامات ذکرشده، درصد مواد سیمانی نسبت به وزن کل بتن غلتکی حداقل ۱۴ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۲- Reclaimed asphalt pavement

جدول ۱ مقایسه مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بتن غلتکی

بتن غلتکی (RCC)	بتن معمولی (هوادار)	
مقاومت فشاری (۲۸ روزه) ۴۵ MPa		
۲۷۰	۳۵۰	مقدار سیمان (kg/m^3)
۰/۴	۰/۴	نسبت آب به سیمان (w/c)
مقاومت فشاری (۲۸ روزه) ۶۰ MPa		
۳۰۰	۴۲۰	مقدار سیمان (kg/m^3)
۰/۳۵	۰/۳۴	نسبت آب به سیمان (w/c)

۲-۳- مقاومت خمشی

هرچند مقاومت خمشی بتن غلتکی به‌عنوان پارامتر مهمی در طراحی مهمی روسازی در نظر گرفته می‌شود ولی تهیه نمونه‌های خمشی در آزمایشگاه یا بریدن نمونه‌های منشوری لازم از بتن درجا اجرا شده جهت تعیین این پارامتر دشوار است. برای روسازی‌های تحت ترافیک، معیار گسیختگی مصالح تنش خمشی بتن است که نباید از مقاومت فشاری بتن بیشتر شود. آیین‌نامه NASRA رابطه زیر را توصیه می‌کند:

$$f_r = C\sqrt{f_c'} \qquad (۱)$$

که f_{cf}' مقاومت خمشی بتن بر حسب psi اندازه‌گیری شده به وسیله تیر بارگذاری سه نقطه‌ای و f_c' مقاومت فشاری بتن بر حسب psi می باشد. همچنین C ثابت عددی است که بسته به طرح مخلوط RCC مقداری حدود ۱۰/۸- ۹/۴ دارد. مدول گسیختگی(مقاومت خمشی) ۵-۴ مگاپاسکال توسط ACI-۲۳۵ توصیه شده است.

۲-۴- مدول الاستیسیته

عوامل اصلی مؤثر در خواص الاستیسیته، سن، نوع دانه‌بندی، مقاومت و مقدار مصالح سیمانی است. مصالحی نظیر کوارتز و سنگ‌رس متورق معمولا باعث تولید مدول الاستیسیته متوسط بالایی برای یک نمونه بتنی می‌شوند. در مقابل استفاده از مصالحی نظیر ماسه‌سنگ یا مصالح دانه‌ای مشابه، مدول الاستیسیته کمتری را به دست می‌دهد. استفاده از مقدار سیمان بالا یا سیمان به علاوه پوزولان مشابه بتن‌های معمولی، مدول الاستیسیته را بهبود می‌بخشد. در حالاتی که به‌صورت حجیم از RCC استفاده می‌شود، برای کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی، مطلوب است که از مدول الاستیسیته پایین استفاده شود. مخلوط‌های کم سیمان که از مصالح ریزدانه یا فیلر ساخته می‌شوند، مقاومت معمولی در حدود ۱۰۶ psi یا کمتر دارند (هانگ، ۱۹۹۳).

۲-۵- رفتار خستگی RCC

با توجه به اینکه تفاوت کامل بین PCC[۳] و RCC در ترکیب مصالح و فرایند ساخت وجود دارد، رفتار در مقابل خستگی آن‌ها با هم فرق دارد، به‌طوری‌که استفاده از فرمول خستگی PCC برای روسازی RCC مناسب نیست. ترک خوردن لایه‌های سیمانی نشان می‌دهد که خستگی یکی از دلایل اصلی از دست دادن خدمت‌دهی در روسازی‌ها صلب است. این نوع نقص، نقطه شروع خرابی سازه‌ای است که

۳-Portland Cement Concrete

تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در سیستم لایه‌ای را تغییر می‌دهد. توسعه ترک به پدید خستگی و افت مربوط است. عموما ترک‌های ناشی از افت در مدت‌زمان کوتاهی، بعد از ساخت گسترش می‌یابند. این ترک‌ها می‌تواند ناشی از عوامل ذیل باشند: لذا ترک‌های خستگی با فرآیند پیشرونده تغییر داخلی مواد که تحت تنش‌های تکراری هستند، مرتبط است. شکست ناشی از خستگی می‌تواند طی دو مرحله گسترش یابد: در فاز اول شکست، ترک‌های ریز اتفاق می‌افتد که ناشی از خرد شدن، سیمانی شدن[۴] بین دانه‌ها است. در فاز دوم، ترک‌های ریز رشد می‌کنند و ترک‌ها را تشکیل می‌دهند. درنتیجه ضعف تدریجی مصالح اتفاق می‌افتد و در صورت تکرار بارهای وارده، لایه و سازه ممکن است هر دو فروریزند.

برای مقدار سیمان یکسان RCC، مقاومت خستگی افزایش می‌یابد و این افزایش در نمونه با مصالح درشت‌دانه، بیشتر از نمونه با مصالح ریزدانه است. تأثیر دو برابر شدن انرژی تراکم در رفتار خستگی معادل افزایش ۱۰-۱۵ kg/m^3 سیمان در مخلوط است. یعنی در مقایسه با تأثیر سیمان، تأثیر کمی دارد.

۳- مواد تشکیل‌دهنده بتن غلتکی

۳-۱- دانه‌بندی

یکی از عوامل بسیار مهم و تعیین‌کننده و مؤثر در کیفیت و اقتصادی بودن بتن انتخاب مصالح دانه‌ای مناسب است و مصالح دانه‌ای معمولا حاوی درشت‌دانه، ریزدانه می‌شود. در انتخاب دانه‌بندی می‌بایستی موارد زیر را رعایت کرد (کواترز و مارچند، ۲۰۰۵).

۱) معدن موجود در منطقه را مدنظر قرار داد.

۲) ماکزیمم اندازه دانه‌های مورداستفاده نباید از ۱/۳ ضخامت لایه‌ها بیشتر شود تا مسئله جدایش در بافت سطحی محدودتر گردد.

۳) با توجه به اینکه RCC بتن خشک می‌باشد، افزایش اندازه دانه‌ها به بیش از ۲۵ mm تمایل به جدایش را به هنگام بتن‌ریزی و پخش بتن افزایش می‌دهد.

۳-۲-مصالح درشت‌دانه

مصالح درشت‌دانه ممکن است شامل مصالح شنی شکسته شده یا طبیعی، بتن بازیافتی، سنگ شکسته شده و یا ترکیبی از این‌ها باشد. انجمن مهندسین ارتش آمریکا، استاندارد ASTM C۳۳ را ملاک ارزیابی قرار می‌دهد. بایستی توجه کرد که درشت‌دانه‌ها نقش مؤثری در تضمین کنترل کارایی RCC ایفا می‌کند. حداکثر اندازه اسمی درشت‌دانه‌ها معمولا به ۱۹ mm مخصوصا در حالاتی که کیفیت خوب بافت سطحی روسازی مدنظر می‌باشد، محدود می‌شود.

از طرف دیگر، دانه‌های بزرگتر از ۱۹ mm باعث ایجاد جدایش و نتیجتا باعث ایجاد حفره‌های کرومو می‌شوند. لذا معمولا اندازه، ۲۰-۲۲ میلی‌متر و کمتر توصیه می‌شود.

۳-۳-مصالح ریزدانه

مصالح ریزدانه ممکن است شامل ماسه طبیعی، ماسه شکسته یا ترکیبی از این دو باشد. در این مورد نیز، انجمن مهندسین ارتش آمریکا، ASTM C۳۳ را ملاک ارزیابی کیفیت قرار داده است و نیز حداکثر درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰، به ۵ درصد محدود شده است.

۴- Cementatin

استفاده از ماسه‌های حاوی مقادیر زیاد ذرات سیلیسی غیر پلاستیکی نیز ممکن است به‌عنوان مصالح پرکننده و عاملی در کاهش مقدار سیمان لازم، اقتصادی باشد.

۴-۳-مصالح دیگر

نتایج آزمایش‌ها روی RCC نشان داد که مصالح دیگر را به‌طور موفقیت‌آمیزی می‌توان به‌عنوان مصالح RCC مورداستفاده قرار داد. مصالح مصرفی در لایه اساس و آسفالت را به‌طور مؤثری می‌توان در RCC استفاده کرد. این مصالح معمولا درصد بالایی دانه‌های ریزتر از الک شماره ۲۰۰ در مقایسه با بتن معمولی دارند و در نتیجه سطح ناتراوا تری را ایجاد می‌کنند (لوهر، ۲۰۱۶).

جدول ۲ دانه بندی بتن غلتکی

درصد عبوری از الک	اندازه الک (in)
۸۳-۱۰۰	۳/۴
۷۲-۹۳	۱/۲
۶۶-۸۵	۳/۸
۵۱-۹۶	۴
۳۸-۵۶	۸
۲۸-۴۶	۱۶
۱۸-۳۶	۳۰
۱۱-۲۷	۵۰
۶-۱۸	۱۰۰
۲-۸	۲۰۰

۴- مشخصات تأثیرگذار در طرح مخلوط بتن غلتکی

۴-۱-کارایی

برای دستیابی به یک سطح صاف با حداقل ناهمواری نیاز است که بتن غلتکی دارای کارایی کافی و مناسب در هنگام تراکم باشد. ایجادکننده این کارایی خمیری است که شامل، سیمان، آب، فیلر و مواد افزودنی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین این عوامل آب مصرفی است. تعیین آب موردنیاز برای یک مخلوط بتنی به‌اندازه حداکثر دانه‌ها، شکل و درصد مواد ریزدانه بستگی دارد. همان‌طور که ذکر شد یک راه تعیین میزان آب لازم بر اساس زمان vebe است که مطابق استاندارد ASTM C۱۱۷۰ تعیین می‌گردد.

۴-۲-چگالی

چگالی بتن بر اساس چگالی دانه‌های سنگی و تا حدودی میزان هوای محبوس تعیین می‌گردد. به‌طور عمده دستیابی به یک چگالی زیاد زمانی امکان‌پذیر است که فضای بین درشت‌دانه‌ها با ماسه، فیلر، مواد سیمانی و آب پر گردد. به‌نحوی‌که فضای خالی بین

ماسه‌ها را نیز ذرات ریز پر کنند. حال اگر حجم این پرکننده‌ها برای پر کردن فضاهای خالی کافی نباشد یا به دلیل عدم تراکم کافی نباشد یا به دلیل عدم تراکم کافی کلیه فضاهای خالی پر نشود، چگالی کاهش خواهد یافت (بری و همکاران، ۲۰۰۱).

۳-۴-مقاومت

در روسازی‌های بتن غلتکی مهم‌ترین مقاومت‌های مکانیکی موردنیاز مقاومت فشاری، خمشی، کششی و در شرایط خاص مقاومت برشی است. ازآنجایی‌که مقاومت فشاری به نسبت دیگر مقاومت‌ها به سهولت تعیین می‌گردد و همچنین اینکه ارتباط این مقاومت با دیگر رفتارهای بتن غلتکی مشخص است این مقاومت به‌عنوان یک مقاومت پایه در طراحی مخلوط شناخته می‌شود. مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی تابعی از نسبت آب به سیمان، درجه تراکم، دانه‌بندی مصالح و جنس و نوع آن‌ها است. همواره توصیه می‌گردد که به دلیل حساسیت مقاومت فشاری و برای دستیابی به مقاومت هدف، باید حاشیه ایمنی در نظر گرفته شود. این ضرایب اطمینان نیز برحسب مورد در ACI۲۱۱ ارائه‌شده است.

مقاومت فشاری بتن غلتکی مهم‌ترین فاکتور نشان‌دهنده قابلیت و کارایی رویه اجرا شده است در کنار این مقاومت، مقاومت خمشی نیز که تا حدی خصوصیات کششی بتن نیز در آن ظاهر می‌شود می‌توان قابلیت‌ها و توانایی‌های بتن سخت شده را ارائه کند. دستیابی به مقاومت‌های مناسب از طریق انتخاب صحیح مصالح با دانه‌بندی مناسب، اختلاط مناسب، نگهداری و عمل‌آوری صحیح مسیر خواهد شد. باید توجه گردد که برای یک مخلوط مناسب محدوده مقاومت فشاری قابل‌قبول برای دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، ۲۵ تا ۴۵ مگاپاسگال است.

۴-۴-مدول گسیختگی خمشی

این ضریب در آزمایش خمش و بعد از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه تعیین می‌گردد. این آزمایش طبق استاندارد CSA A۲۳,۲-۸C بر روی نمونه‌های منشوری mm ۴۰۰*۱۰۰*۱۰۰ انجام می‌گیرد (دروند، ۲۰۰۱).

۵-۴-نفوذپذیری

نفوذپذیری از مواردی است که در سدهای بتن غلتکی اهمیت بسزایی دارد. هرچند که با کاهش نفوذپذیری در روسازی‌های راه نیز می‌توان عمر این سازه‌ها را افزایش داد. یکی از مؤثرترین راه‌ها به‌منظور کاهش نفوذپذیری استفاده از یک دانه‌بندی پیوسته است.

ظاهر سخت و خشن RCC در ابتدا مفهوم نفوذپذیری بسیار کم را در ذهن تداعی می‌کند ولی حقیقت آن است که RCC نسبت به بتن معمولی به‌مراتب نفوذپذیری و حضور آب در داخل بتن کاملا با مکانیسم یخزدگی و آب‌شدگی در ارتباط است.

تحقیقات فراوانی در زمینه نفوذپذیری بروی رویه‌های RCC انجام یافته است. نتیجه مشترک این تحقیقات نفوذپذیری در بتن‌های RCC، تابه‌حال هیچ مورد ضعفی در خصوص این بتن‌ها در برابر شرایط یخزدگی و آب‌شدگی گزارش نشده است.

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نفوذپذیری RCCP نسبت به بتن‌های معمولی بیشتر است. استفاده کردن از دوده، سیلیس و سیمان نرم‌تر، باعث کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود. نفوذپذیری یک خاصیت مهم در بتن است. دو فاکتور مهم در میزان این خاصیت، مقدار هوای تصادفی ورودی و میزان تخلخل ماتریس سیمان هیدراته شده است. نسبت آب به سیمانی که به ظاهر باعث آب‌بند شدن بتن می‌شود، مقدار آن ۰/۴۵ می‌باشد. نسبت‌های طرح اختلاط و روش تراکم نامناسب RCC و نسبت آب به سیمان کم، یک ساختار داخلی ایجاد می‌کند که آب را از میان آن به‌راحتی عبور می‌دهد. اگر RCCP خوب متراکم شده باشد، هیچ‌گونه تفاوتی میان نفوذپذیری قسمت فوقانی و میانی و تحتانی، نباید مشاهده شود. داشتن نسبت W/C زیاد برای RCC از نظر ضریب نفوذپذیری، هم می‌تواند مفید باشد و هم مضر. چنانچه انتظار می‌رود، نسبت W/C زیاد موجب افزایش قطر منافذ موبینگی می‌شود که این امر باعث هدایت جریان مایعات به داخل

بتن و افزایش ضریب نفوذپذیری می‌گردد. در همین حال در بتن‌های غلتکی، نسبت W/C زیاد می‌تواند روند تراکم‌پذیری با غلتک را راحت‌تر کند و به بتن نفوذناپذیری کافی دست خواهیم یافت. استفاده از سیمان نرم‌تر می‌تواند ضریب نفوذپذیری را کاهش دهد. البته سیمان نرم دارای سطح مخصوص بالا و در نتیجه مقدار آب درخواستی زیاد است. همچنین مشکل تراکم با غلتک را دارد. استفاده از دوده سیلیس نیز می‌تواند ضریب نفوذپذیری را کاهش دهد. البته سیمان نرم دارای سطح مخصوص بالا و درنتیجه مقدار آب درخواستی زیاد است. همچنین مشکل تراکم با غلتک را دارد. در مخلوط‌های ساخته‌شده با دوده سیلیس، ضریب نفوذپذیری با گذشت زمان به‌سرعت کاهش می‌یابد. یکی از اهداف اصلی در روند تراکم بتن، خارج کردن هوای تصادفی است. غلتک‌های سنگین ویبراتوری یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌های متراکم کردن است. در RCC با روانی مناسب و یک ترکیب ایده آل از مصالح می‌توان به مقدار انرژی تراکمی مناسبی دست‌یافت که می‌تواند یک رویه بسیار پرچگال با نفوذپذیری در RCC می‌تواند در طول منافذ تراکمی میانی نیز رخ دهد و همچنین در سطح متخلخل خمیر سیمان و سنگدانه ها، وقتی‌که خوب به‌هم‌پیوسته نباشند رخ دهد. با تنظیم یک ترکیب مناسب برای مخلوط و استفاده از تکنیک تراکم و عمل‌آوری مناسب برای RCC می‌توان به نفوذپذیری‌های کمتر و خصوصیات مکانیکی بهتر دست یافت.

۶-۴-دوام

یکی از مهم‌ترین اهداف طرح بتن غلتکی دستیابی به دوام زیاد است. چراکه دلیل کاربرد فراوان این ماده دوام زیاد آن است. از مهم‌ترین مواردی که دوام روسازی‌های بتن غلتکی را به مخاطره می‌اندازد، وقوع واکنش‌های قلیایی و قرار گرفتن در شرایط یخزدگی و آب‌شدگی‌های متوالی در شرایط آب و هوایی سرد است. برای حل مشکل اول لازم است که در انتخاب مصالح دقت کافی دقت گیرد و برای حل مشکل دوم نیاز به مواد حباب‌ساز در داخل مخلوط‌های پر سیمان است. البته دقت شود که ایجاد حباب‌های هوا در مخلوط‌های کم‌عیار توصیه نمی‌شود. اما در شرایط آب و هوایی گرم چنین مشکلی وجود ندارد با استفاده از درصد مناسب ریزدانه و تهیه مخلوط و با استفاده از درصدهای مناسب اختلاط و انجام تراکم کافی می‌توان حتی در شرایطی روسازی‌هایی با عمر بیش از ۵۰ سال ساخت (نایک و همکاران ۱۹۹۵).

همچنین یکی از مسائلی که می‌تواند دوام یک رویه بتنی غیرمسلح را در مناطق ساحلی (که نمک و رطوبت حضور دارد) به خطر بیندازد نفوذ یون کلر و انجام تبلور نمک در داخل رویه است. کمیته ACI۲۰۱ با انجام آزمایش‌های تجربی نشان داد که تبلور (یک عمل صرفا فیزیکی) نمک‌های سولفات در داخل منافذ بتن، می‌تواند باعث آسیب بسیار زیادی در بتن بشود. برای مثال، وقتی یک سمت رویه از بتن نفوذپذیر، با محلول نمک در تماس باشد و سمت دیگر آن تحت تبخیر قرار گیرد، در این صورت، رویه بر اثر آسیب ناشی از فشار نمک‌های متبلور شده در منافذ، آسیب می‌بیند. در بسیاری از مصالح متخلخل، تبلور نمک‌های حاصل از محلول‌ها فوق اشباع در داخل حفره‌ها، می‌توانند موجب ایجاد فشارهایی بشوند که این فشارها به حدی زیاد است که می‌توانند باعث ترک‌خوردگی در آن مصالح شوند. در حقیقت عقیده بر این است که رطوبت و تبلور نمک، دو عامل اصلی آسیب‌رسان، در انهدام رویه‌ها در شرایطی که هر دو حضور داشته باشند هستند.

۵- روش اختلاط

به‌طورکلی هدف از طرح بتن غلتکی برآوردن الزامات طرح بتن غلتکی برآوردن الزامات طرح در حالت‌های بتن تازه و سخت شده با حداقل هزینه‌های ممکن است. بدین منظور همواره تلاش می‌گردد مخلوطی طرح شده که در آن حداقل مقدار ممکن سیمان به کار گرفته شده باشد و از سنگدانه‌ها حداکثر بهره‌گیری شده باشد. در اجرای رویه‌های بتنی لازم است بتن در حالت تازه دارای کارایی و روانی حداقل باشد و در زمان سخت شدن نیز مقاومت فشاری و خمشی کافی در عین دوام را تأمین کنند. ضمناً به دلیل روش خاص اجرا در بتن غلتکی لازم است که شرایطی فراهم گردد که حداقل نفوذپذیری و حداکثر تراکم‌پذیری نیز حاصل گردد. به‌طورکلی راه‌سازی و اجرای روسازی‌های آسفالتی امری بوده است که همواره نیازمند تجهیزات و ماشین‌آلات بسیار است. روسازی‌های بتن غلتکی باعث گردیده که

تجهیزات موردنیاز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یابند بطوریکه بتن پس از ساخت، به محل پروژه حمل شده در دستگاه فینیشر ریخته شده و به وسیله غلتک متراکم می‌گردد و همچنین اینکه همان دستگاه‌هایی که برای اجرای آسفالت استفاده می‌شده با حداقل تغییرات برای این امر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در طراحی باید مشخص گردد که حداقل میزان سیمان مصرفی باید به نحوی باشد که با این مقدار بتوان در محدوده تنش‌های مجاز فشاری و خمشی قرار گیریم. همچنین توصیه می‌گردد حداقل نسبت آب به سیمان نیز به ۰/۴ محدود گردد.

دو روش عمده که برای طرح اختلاط بتن غلتکی در حال حاضر مورداستفاده قرار می‌گیرند عبارتنداز:

۱. آزمون‌های روانی
۲. تراکم خاک

۱-۵- طرح به روش تراکم خاک

طرح یک بتن غلتکی همواره باید به نحوی باشد که دستیابی به مقادیر مقاومتی را امکان‌پذیر کند و قابلیت‌ها و نیازهای طرح را برآورده سازد به‌طوری‌که از مصالح نیز حداکثر بهره‌وری صورت پذیرد. این نکته بسیار حائز اهمیت است که باید بتنی طرح شود که صرفه اقتصادی داشته باشد حداقل سیمان مصرف شود و بیشترین استفاده از مصالح سنگی انجام گیرد. تا به حال یک روش استاندارد جامع برای طرح اختلاط بتن غلتکی ارائه نشده است. در هر مورد بر حسب کاربری و مصالح در دسترس از روش خاص استفاده می‌گردد. طرح به روش تراکم خاک تلفیقی از شرایط مکانیک خاک و تئوری‌های بتن است و بعد از طرح برای کنترل صحت طرح از نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی استفاده می‌گردد.

تعیین نسبت‌های اختلاط بر اساس روش تراکم خاک در حقیقت برقراری رابطه بین وزن واحد خشک و میزان رطوبت در یک محدوده مشخص رطوبت است. این روش مشابه با روش مورداستفاده برای تعیین رابطه بین مقدار رطوبت بهینه و وزن واحد خشک خاک‌ها و مصالح سنگی می‌باشد. در این روش دستگاه و انرژی تراکمی بر اساس استاندارد ASTM D۱۵۵۷ است. میزان سیمان مصرفی بر اساس نیازهای مقاومتی و دوام تعیین می‌گردد و به‌صورت درصدی از وزن کل خشک مصالح گزارش می‌گردد. عموما این مقدار در محدوده ۱۰ تا ۱۷ درصد وزن خشک است. همان‌طور که قبلا اشاره گردید مصالح سنگی در ایجاد یک مخلوط مناسب تأثیر بسزایی دارند که حجم این مصالح در واحد حجم کل بتن بعد از اینکه مقدار رطوبت بهینه تعیین شد محاسبه می‌گردد. مقدار رطوبت بهینه به‌صورت مقدار رطوبتی که از نقطه اوج منحنی رطوبت – چگالی به دست می‌آید تعیین می‌گردد. مقدار این رطوبت بستگی به خواص مصالح سنگی و میزان سیمان مصرفی دارد و درصورتی‌که این رطوبت در زیر حد رطوبت بهینه و یا بیش از آن باشد سبب کاهش مقاومت می‌گردد. منحنی‌های رطوبت چگالی عموما بر اساس حداقل مصالح سیمانی ترسیم می‌گردد. در این روش تراکم بر اساس روش اصلاح‌شده انجام می‌گیرد (پرکتیس، ۱۹۹۷).

در این روش مخلوط‌هایی با مقادیر متفاوت سیمانی و مقادیر مختلف آب تهیه می‌گردد سپس با روش پراکتور یا همان تراکم، که عبارت است از کاهش دادن حجم خاک در اثر خارج ساختن هوا با استفاده از اعمال نیرو که در این حالت اصطکاک بین ذره‌ها بیشتر می‌شود و وزن واحد آن زیاد می‌شود و این وزن، معیار تراکم خاک است، به‌منظور کاهش امکان خردشدگی مصالح، انرژی تراکم آن به حدود ۱۱۱۵ Kj/m۳ کاهش داده‌شده متراکم می‌گردد. آنگاه حداکثر چگالی بهینه و میزان آب بهینه از ترسیم نمودار چگالی نسبت به مقدار آب برای نمونه متراکم شده با مقادیر مختلف سیمانی تعیین می‌شود. البته توصیه می‌گردد برای جبران آب از دست رفته، آب واقعی یک درصد بیش از مقدار تعیین شده باشد.

۲-۵- طرح به روش آزمون روانی

این روش طراحی بر پایه و اصل کلی دستیابی به مقاومت طرح و بهینه‌ترین کارایی صورت می‌پذیرد. در این روش فرض بر این است که تراکم با میز vebe اصلاح شده صورت می‌گیرد. این دستگاه دارای قالب فلزی با قطر داخلی ۲۳ cm و ارتفاع ۱۸ cm است. درون این قالب نمونه بتنی و بر روی آن یک سربار برای تراکم بهتر قرار می‌گیرد و سپس لرزش میز آغاز می‌گردد تا نشانه‌هایی از شیره بتن ظاهر گردد که نشان‌دهنده پایان آزمایش است و لازم است زمان از آغاز آزمایش تا این لحظه ثبت گردد. شکل۱، دستگاه موجود در آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت مدرس را نشان می‌دهد.

شکل۱ : دستگاه vebe اصلاح‌شده برای بتن غلتکی در آزمایشگاه بتن دانشگاه تربیت مدرس

تحقیقات نشان داده زمان وب مناسب برای مخلوط‌های بتن غلتکی بین ۲۰ تا ۴۰ ثانیه است. این زمان به میزان آب مصرفی، بزرگترین اندازه اسمی دانه‌ها، مقدار مصالح سنگی و ریزدانه‌های ریزتر از الک ۲۰۰ وابسته است. در روش‌های طرح اختلاط که بر اساس آزمون روانی عمل می‌کنند معمولا کلیه عوامل از قبیل آب، سیمان یا مصالح سنگی را ثابت نگه می‌دارند و فقط یک عامل برای رسیدن به هدف تغییر می‌کند. به‌این‌ترتیب می‌توان هر عامل در مخلوط را برای رسیدن به خواص مطلوب بهینه کرد. یکی از ملاحظاتی که در گزارش ACI۲۱۱ آمده است انتخاب مناسب نسبت حجم هوای آزاد خمیر به حجم هوای آزاد ملات (PV) است. مخلوط نهایی باید شامل حجم خمیر کافی برای پر کردن تمام حفرات داخلی بین ذرات باشد و انتخاب صحیح نسبت (PV) سبب ایجاد رویه با تراکم کافی و سطح رویه مناسب خواهد گردید و توضیح اینکه این نسبت عددی بین ۰/۳۸ تا ۰/۴۶ می‌باشد که مقدار پیش‌فرض این در شروع طراحی می‌تواند ۰/۳۸ باشد .

نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ تا ۰/۶۵ می‌تواند چگالی بهینه و مقاومت کشش بتن در آب‌وهوای گرم تحت شرایط آزمایشگاهی را تأمین کند. برخلاف بتن معمولی کاهش این نسبت کمتر از یک مقدار بهینه، باعث افزایش مقاومت بتن نمی‌شود دلیل این امر نیز کاهش تراکم‌پذیری بتن است که سبب کاهش عمده‌ای در مقاومت می‌شود. یکی از فاکتورهای مهمی که اکثر خواص بتن تازه و سخت را تحت کنترل قرار می‌دهد، میزان عیار سیمان است. توصیه می‌گردد همواره میزان سیمان مصرفی در ساخت بتن غلتکی کمتر از $۳۵۰kg/m^۳$ باشد. همچنین توصیه می‌گردد سیمان‌های حاوی پوزولان یا روباره مورداستفاده قرار گیرند (پرکتیس، ۱۹۹۷).

در مخلوط بتن غلتکی معمولا ۱۶-۱۰٪ سیمان موردنیاز است ولی در شرایط بسیار گرم باید به ۱۵-۱۲٪ محدود گردد. خاکستر بادی نیز در صورت امکان در حدود ۲۰-۱۵٪ حجمی مواد سیمانی می‌تواند مورداستفاده قرار گیرد که در این حالت محدوده مناسب نسبت

آب به سیمان را بین ۰/۵-۰/۴ می‌باشد. با افزایش نسبت W/C تا مقدار بهینه آن (۰/۵۵) به دلیل انجام تراکم مناسب مقاومت فشاری و خمشی افزایش می‌یابد. همچنین کاهش W/C مانع از تراکم مناسب مخلوط می‌شود و توجه گردد هیچ‌گاه نسبت آب به سیمان از ۰/۴ کمتر نشود. برای W/C ثابت، با افزایش نسبت CA/FAریزدانه/درشت‌دانه) مقاومت خمشی نیز افزایش می‌یابد. در ذیل نسبت‌های مناسب درشت‌دانه به ریزدانه و کل مصالح سنگی به سیمان به ترتیب ارائه شده است (پرکتیس، ۱۹۹۷).

۱-۱.۴=ریزدانه/درشت‌دانه (۲)

۵/۴-۷= سیمان/کل سنگدانه (۳)

۳-۵- محدوده‌های توصیه‌شده برای نسبت‌های مخلوط و روش اختلاط

ملاک عمل در اجرای روسازی‌های بتن غلتکی دست‌یابی به یک روانی مناسب برای تسهیل در اجرا است. تحقیقات نشان داده روانی در حدی زیادتر از خاک‌های سیمانی می‌تواند مناسب باشد. به‌طورکلی در طرح اختلاط بتن غلتکی سه عامل کنترل‌کننده است: ۱- نسبت آب به سیمان ۲-(w/c)نسبت مصالح سنگی درشت به مصالح سنگی ریز ۳-(CA/FA)نسبت کل مصالح سنگی به سیمان (TA/c) موارد فوق در حقیقت کنترل‌کننده روانی، غلتک پذیری، مقاومت خمشی و فشاری چگالی و تا حدی نفوذپذیری رویه اجرا شده است. حدود توصیه‌شده هر یک از این ۳ عامل کنترل‌کننده عبارت‌اند از:

$$CA/FA \leq ۱/۴ \geq ۱ \quad (۴)$$

$$TA/c \leq ۷ \geq ۴/۵ \quad (۵)$$

$$۰.۴\leq W/C \leq ۰.۶۵ \quad (۶)$$

البته انتخاب هر یک از عوامل فوق در بعضی موارد کاملا تحت تأثیر مقاومت فشاری و خمشی موردنیاز طرح، شرایط بهره‌برداری و مصالح در دسترس قرار دارد. یکی از نسبت‌های اختلاطی که در چندین پروژه عملی در کشورهای اطراف جنوب ایران مورداستفاده قرارگرفته عبارت است از:

$$W/C=۰.۵۵ \quad (۷)$$

$$TA/c=۶.۵ \quad (۸)$$

$$CA/FA=۱.۸۶ \quad (۹)$$

۶- مرور برخی پژوهش های صورت گرفته شده مرتبط تاثیر مصالح بازیافتی بر بتن غلتکی

۶-۱-بررسی تاثیر استفاده از لاستیک خرد شده را در روسازی بتن‌غلتکی

مداح و همکاران در پژوهشی به بررسی مقاومت فشاری روسازی بتن غلتکی ساخته شده با سنگدانه‌های لاستیکی پرداختند و بیان نمودند که در صورت اصلاح زبری سطوح لاستیکی، می‌تواند ۱۱ تا ۲۸ درصد بهبود یابد این در حالی است که مقاومت کششی می‌تواند ۱۵ تا ۲۰ درصد بهبود یابد. همچنین دریافتند که وجود لاستیک در روسازی بتن غلتکی، خاصیت انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است. عیب اصلی استفاده از لاستیک، کاهش خصوصیات مکانیکی روسازی بتن غلتکی است (مداح و همکاران، ۲۰۱۷).

استفاده از خرده آسفالت در تهیه مخلوط‌های بتنی می‌تواند مقدار مصرف مصالح جدید را کاهش دهد و منجر به صرفه‌جویی در مصرف سرمایه و منابع طبیعی گردد. به بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های بتنی معمولی پرداخته‌اند. در این پژوهش، به جای خرده آسفالت بازیافتی، ازخرده آسفالت مصنوعی و پیر شده در آزمایشگاه و در قالب سه مخلوط به صورت جایگزینی در بخش درشت‌دانه، جایگزینی در بخش ریزدانه و جایگزینی در هر دو بخش، استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم نشاندهنده کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بود (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶). پژوهش مشابهی در دانشگاه فلوریدا در رابطه با افزودن خرده آسفالت به بتن معمولی انجام شد. خرده آسفالت بادرصدهای مختلف صفر، ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ به مخلوط بتن معمولی اضافه گردید. نتایج این پژوهش نشان دهنده کاهش در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصدخرده آسفالت بود. میزان کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بود (حسینی و همکاران، ۲۰۰۸).

فخری و عموسلطانی در پژوهشی نشان دادند که استفاده از خرده آسفالت باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی شد؛ به ویژه هنگامی که میزان مصالح خرده آسفالتی بیش از ۵۰٪ باشد. این رفتار، با چسبندگی کمتر بین ملات سیمان و دانه‌های مصالح خرده آسفالت توجیه شده است. چسبندگی بین مصالح سنگی و ماتریس سیمان تحت تأثیر منفی حضور سنگدانه‌های مصالح خرده آسفالتی درمخلوط‌های بتن غلتکی است و این می‌تواند کاهش مشاهده شده در مقاومت آنها را توضیح دهد (بوستا و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، باید در استفاده از مصالح خرده آسفالتی برای روسازی‌های بتن غلتکی توجه زیادی شود، تا حداقل مشخصات لازم برای روسازی‌های بتنی‌حفظ گردد. استفاده از هر بخشی از مصالح خرده آسفالتی (ریزدانه، درشت‌دانه یا ترکیب هر دو) می‌تواند مقاومت فشاری، کششی و خمشی مخلوط بتن غلتکی را در تمام زمان‌های عمل‌آوری تا حد زیادی کاهش دهد. با این‌حال، مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی ریزدانه، خصوصیات مقاومتی بهتری را نسبت به مخلوط حاوی مصالح خرده آسفالتی درشت‌دانه و مخلوط حاوی مصالح‌خرده آسفالتی ترکیبی نشان می‌دهد (دبارما و سینگ، ۲۰۱۹). همچنین، وجود مصالح خرده آسفالتی می‌تواند مقاومت چقرمگی مخلوط بتن غلتکی را افزایش دهد. بدین ترتیب، ظرفیت تحمل بار پیش از گسیختگی و شکست در روسازی افزایش می‌یابد (دبارما و همکاران، ۲۰۱۹). در ضمن، تا٪۵۰ از مصالح سنگی طبیعی را می‌توان با بخشی از مصالح خرده آسفالتی (درشت‌دانه یا ریزدانه) جایگزین‌کرد، تا مخلوط بتن غلتکی به عنوان لایه سطحی روسازی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا این مخلوط‌ها مقاومت کافی در برابر سایش ناشی از حرکت وسایل نقلیه را دارند (دبارما و سینگ، ۲۰۱۹).

بتن غلتکی ترکیبی با لاستیک، کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به خرده آسفالت از خود نشان می‌دهد، که این می‌تواند از مزیت‌های خرده آسفالت نسبت به‌خرده لاستیک باشد. مزیتی که اضافه کردن خرده لاستیک به بتن معمولی دارد، افزایش بیشتر خاصیت جذب انرژی در بتن است. بدین ترتیب، در قیاس با لاستیک، خرده آسفالت شانس بیشتری برای جایگزینی سنگدانه در مخلوط بتنی، به‌ویژه در مقادیر بیش از ۱۰٪ نسبت به وزن‌کل مخلوط دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۴). فخری و همکاران، رفتار ترک خوردگی مخلوط بتن‌حاوی مصالح خرده آسفالتی و خرده لاستیک را بررسی‌کردند. به طور کلی، مشخص شد که با افزایش مقدار سیمان از ۱۲ درصد به ۲۰ درصد، چقرمگی شکست همه مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. مخلوط‌های حاوی خرده‌لاستیک، مقادیر چقرمگی شکست بیشتری را در مقایسه با مخلوط‌های حاوی مصالح خرده آسفالتی نشان می‌دهند. ضعف در مشخصات مکانیکی بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی در صورت جایگزینی بخشی از آن‌با مصالح دیگر می‌تواند قابل حل باشد.

۲-۶- بررسی تاثیر استفاده از سرباره کوره فولاد در روسازی بتن غلتکی

تحقیقی که در مورد مصالح بازیافتی حاصل از سرباره کنورتر کارخانه ذوب آهن به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط بتن غلتکی انجام شد، نشان داد که جایگزینی ۲۵ درصد این مواد باعث بهبود خواص‌مقاومتی بتن غلتکی شده و افزایش بیشتر در درصدجایگزینی سرباره باعث کاهش مقاومت گردید. بر مبنای نتایج حاصل شده در تحقیق فوق، و با توجه به قیمت ارزانتر سرباره نسبت به

سنگدانه طبیعی، استفاده از سرباره موجب کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود. در ضمن، استفاده از ترکیب ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان، ضمن اقتصادی کردن طرح مخلوط، سبب افزایش دوام بتن می‌شود. در پژوهش مستوفی نژاد و نظری منفرد با به‌کارگیری چنین ترکیبی از مواد سیمانی، برای ساخت بتن‌ها در مجاورت یون سولفات و از جمله ابنیه مسیر راه و پایه‌های پل توصیه شده است (مدرس و هاشمی، ۲۰۱۴). در پژوهشی دیگر، با افزایش نسبت مصالح سرباره کوره قوس الکتریکی به عنوان درشت‌دانه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیک روسازی بتن غلتکی در تمامی زمان‌های عمل‌آوری، در مقایسه با نمونه‌های شاهد، کمی کاهش یافت، در حالی‌که مقاومت در برابر سایش افزایش یافت. بتن غلتکی‌حاوی ۱۰۰٪ سرباره فولاد به عنوان جایگزین درشت‌دانه، به مقاومت مطلوبی برای استفاده در روسازی رسید (لم و همکاران، ۲۰۱۸a). در پژوهشی دیگر، بافت زبر مصالح سرباره قوس الکتریکی باعث بهبود مقاومت‌کششی مخلوط بتن غلتکی شد (لم و همکاران، ۲۰۱۸b). سرباره فولاد ریزدانه و درشت‌دانه حاصل از کوره قوس الکتریکی اثرات متفاوتی بر خصوصیات مکانیکی بتن‌غلتکی دارند. نتایج نشان داده که با جایگزینی مصالح‌ریزدانه با سرباره، مشخصات مکانیکی به دست آمده کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، استفاده از سرباره فولاد در بخش درشت‌دانه، به دلیل زاویه‌دار بودن و زبری زیاد آن، باعث افزایش قفل و بست مصالح سنگی و به تبع آن‌باعث افزایش خصوصیات مکانیکی و شکستگی می‌شود (روحالامینی و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهش‌های پیشین، بررسی تأثیر استفاده جداگانه و ترکیبی سرباره کوره فولاد و خرده آسفالت بازیافتی برخواص مکانیکی روسازی بتن غلتکی مورد مطالعه ومقایسه قرار نگرفته است. بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه بتن غلتکی بر پایه بررسی نقش مصالح محلی و ضایعاتی به عنوان جایگزین مصالح درشت‌دانه روی رفتار بتن غلتکی استوار بوده است. همچنین، روش‌هایی که محققین مختلف برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی به‌کاربرده‌اند با یکدیگر متفاوت است. این تحقیق، ضمن‌استفاده از خرده آسفالت ناشی از تخریب روسازی‌های قدیمی و رفع مشکلات ناشی از دفع این نوع مصالح در طبیعت و همچنین استفاده از سرباره کارخانه‌های فولادسازی، که حجم انبوهی را در کارخانه‌ها به خوداختصاص می‌دهد، به عنوان جایگزینی مناسب برای‌سنگدانه در بتن، علاوه بر حفظ محیط زیست، باعث‌کاهش استفاده از منابع طبیعی شن و ماسه می‌شود. همچنین، بررسی خواص مکانیکی و زیست محیطی بتن غلتکی با افزودن توأمان خرده آسفالت و سرباره فولاد وبررسی درصدهای بهینه مصالح و تحلیل خصوصیات بهینه آنها یک رویکرد جدید خواهد بود. تحقیقی که در مورد مصالح بازیافتی دیگر از سرباره کنورتر کارخانه ذوب‌آهن انجام شده و در آن، این مصالح بازیافتی جایگزین بخشی از سنگدانه های مخلوط بتن غلتکی شده است، نشان داد که جایگزینی ۲۵ درصد این مواد باعث بهبود خواص مقاومتی بتن غلتکی شده و افزایش بیشتر در درصد جایگزینی سرباره باعث کاهش مقاومت گردید. بر مبنای تحقیقات انجام‌شده در تحقیق فوق با توجه به قیمت ارزان‌تر سرباره نسبت به سنگدانه طبیعی، استفاده از سرباره موجب کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود (حسامی و همکاران، ۲۰۱۴)

بر اساس نتایج تحقیقات مستوفی نژاد و نظری منفرد در دانشگاه صنعتی اصفهان، استفاده از ترکیب ۱۰ درصد سرباره و ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک جایگزین سیمان، ضمن اقتصادی کردن طرح مخلوط، سبب افزایش دوام بتن‌ها می‌شود. در این تحقیق، به‌کارگیری چنین ترکیبی از مواد سیمانی، برای ساخت بتن‌های در مجاورت یون سولفات و از جمله ابنیه مسیر راه و پایه‌های پل توصیه شده است (مستوفی‌نژاد و نظری منفرد، ۱۳۸۵). سرباره فولادسازی یک فرآورده جانبی صنایع آهن و فولاد است که به مقدار زیاد در اصفهان تولید می‌شود و با توجه به حضور سیلیس آمورف در ترکیب آن به‌عنوان ماده‌ای با خاصیت پوزولانی محسوب می‌گردد. هرساله ۲۵۰ میلیون کیلوگرم سرباره در اصفهان تولید می‌شود که حاوی مواد و ترکیبات باارزشی مانند اکسید کلسیم، اکسید منیزیم، آهن، فسفر، منگنز و سیلیسیم می‌باشد. این مواد در حاضر بدون استفاده ماند که علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی احتمالا خطرات بالقوه زیست محیطی را نیز دربردارد. بنابراین در صورت استفاده از این مواد در طرح‌های بیابان‌زدایی علاوه بر کنترل بیابان‌ها می‌توان تا اندازه‌ای از هزینه‌های تحمیلی جهت نگهداری و انتقال آن‌ها کاست.

مطابق گزارش منتشرشده توسط اداره راه فدرال آمریکا با موضوع "استفاده از سرباره آهن‌گدازی سرد شده به‌عنوان درشت‌دانه در روسازی بتنی" ، خواص سرباره به‌سرعت سرد شدن آن بستگی دارد. سرباره‌هایی که به آهستگی سرد می‌شوند دارای تخلخل کمتری هستند که موجب افزایش چگالی آن‌ها می‌شود. سرد شدن آهسته همچنین باعث تشکیل فازهای کریستالی می‌شود که باعث پایداری

شیمیایی آن‌ها می‌شود. هرچه سرباره چگال تر و کریستالیزه تر باشد، مطلوب‌تر است. جذب آب سرباره نسبت به سنگدانه های طبیعی بیشتر است به‌گونه‌ای که باکیفیت‌ترین سرباره‌های کوره آهن‌گدازی دارای جذب آب کمتر از ۴درصد می‌باشد. مطابق گزارش‌های موجود، استفاده از سنگدانه های سرباره‌ای در بتن به‌صورت SSD باعث افت کارپذیری بتن تازه و افزایش جمع شدگی و ترک‌خوردگی زودهنگام تصادفی در روسازی‌های ساخته‌شده می‌گردد همچنین باعث آسیب ریزساختار بتن به دلیل خشک‌شدگی موضعی خمیر سیمان در مجاورت دانه‌های سرباره می‌گردد. در بتن سخت شده، مهم‌ترین خاصیت مکانیکی روسازی بتنی، مشخصات سطح ترک تشکیل‌شده در درزهای کنترل است. سطح ترک در بتن شامل سنگدانه سرباره‌ای نسبتا صاف است و ترک از میان آن عبور می‌کند نه از اطراف سنگدانه ها. سطح صاف ترک باعث می‌شود تا سنگدانه ها تا حدودی دارای قفل و بست بین‌دانه‌ای باشند. متوسط هزینه نگهداری روسازی‌های بتنی تقریبا دو برابر روسازی‌های شامل سنگدانه های طبیعی است.

۶-۳- بررسی تاثیر استفاده از پسماند ذغال سنگ در روسازی بتن غلتکی

پسماند ذغال‌سنگ در زمینه‌های مختلفی همچون ساخت مصالح ساختمانی(آجر)، جایگزینی به عنوان سیمان در تثبیت خاک، ساخت فونداسیون روسازی استفاده می‌شود. صنعت تولید ذغال اثرات منفی زیست محیطی از جمله فرونشست زمین، آلودگی آب‌های جاری و آلودگی هوا را در پی دارد. تحقیقات نشان داده که با توجه به روند فعلی مصرف ذغال سنگ، تمامی این ماده‌ی سوختی پرکاربرد، حداکثر تا ۵۰ سال آینده به اتمام می‌رسد؛ بنابراین در زمینه‌های معدن کاری و استخراج ذغال سنگ بایستی از روش‌های سازگار با محیط زیست بهره جست (زهانگ، ۲۰۱۰). در سال ۲۰۱۳ پسماند ذغال سنگ بعنوان ریزدانه‌ی جایگزین ماسه در بتن بلوکی روسازی مورد استفاده قرار گرفت. در نسبت آب به سیمان ۰/۳۹، پودر ذغال سنگ به عنوان جایگزین ۲۵،۵۰،۷۵ و ۱۰۰ درصدی ماسه‌ی رودخانه‌ای طی ۷، ۲۸ و ۹۰ روز مورد عمل آوری قرار گرفت. پس از ۲۸ روز، نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد پودر پسماند مقاومت فشاری، مقاومت در مقابل خوردگی و جذب آبی مشابه مخلوط کنترلی داشت. با جایگزینی ۲۵ تا ۵۰ درصد ذغال سنگ پسماند به‌جای ماسه، نتایج رضایت بخشی از نظر مقاومت مکانیکی حاصل شد (کاسیانو، ۲۰۱۳). فریس و همکاران در سال ۲۰۱۲، پسماند ذغال سنگ را پس از پختن در دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد طی ۲ ساعت فعال کردند و در ۱۰ ، ۲۰ درصد وزنی بعنوان بخشی از سیمان مورد استفاده قراردادند. سیمان آمیخته حاصل از پسماند ذغال سنگ فعال(ACW) سبب تغییر زمان عمل آوری نمی‌گردد؛ هرچندکه سبب کاهش مقاومت فشاری ملات می‌شود. علاوه بر بررسی خصوصیات سیمانی، سیمان آمیخته حاصله تحت زمان‌های عمل‌آوری ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روزه برای بررسی مقاومت فشاری ملات انتخاب گردید. ۱۰ و ۲۰ درصد جایگزینی سیمان توسط ACW، مقاومت فشاری ۷ روزه را افزایش، ولی مقاومت ۲۸ و ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد؛ این کاهش برای ۲۰ درصد جایگزینی، بیشتر گزارش شده است (فریس و همکاران، ۲۰۱۲). از بین پوزولان‌های به کار رفته در زمینه روسازی‌های بتن غلتکی بیشترین کاربرد مربوط به خاکستر بادی (Fly Ash) بوده است. خاکستر بادی دوده حاصل از سوخت ذغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی است. خاکستر بادی در واقع پسماند سوختن ذغال سنگ و شامل مقدار زیادی SiO۲ و Al۲O۳ است. این ماده همانند ریزدانه‌های بسیار ریز عمل کرده و سبب افزایش دوام می‌گردد. آزمایش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که هر چند مقاومت بتن غلتکی با مقدار زیاد خاکستر بادی در روزهای اولیه عمل آوری بسیار کم است، ولی این مقدار با طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری به سرعت رشد می‌کند و در نهایت مقاومت طولانی مدت بتن غلتکی با مقدار زیاد خاکستر بادی در روزهای اولیه بسیار کم است، ولی این مقدار با طولانی‌تر شدن زمان عمل آوری به سرعت رشد می‌کند و در نهایت مقاومت طولانی مدت بتن غلتکی با مقادیر زیاد خاکستری بادی همانند بتن غلتکی معمولی (بدون خاکستر بادی) خواهد بود (چی و هانگ، ۲۰۱۳).

بر اساس نتایج تحقیقات کینتا، بتن غلتکی در هر دو حالت با و بدون خاکستر بادی، از مقاومت خستگی بهتری در مقایسه با بتن معمولی برخوردار است .همچنین مقاومت بتن غلتکی حاوی خاکستر بادی در برابر خستگی به میزان ۵۰-۴۰ درصد نسبت به مقاومت بتن غلتکی بدون خاکستر بادی بیشتر می باشد .در ادامه با بررسی های انجام شده معلوم شد، کاهش فضاهای خالی موجود در بتن غلتکی که به صورت اثر ترکیبی ناشی از تراکم به وسیله غلتک و مقادیر مختلف خاکستر بادی موجود در بتن غلتکی ظاهر می شود، به عنوان یک عامل

کلیدی، به افزایش طول عمر بتن در برابر پدیده خستگی کمک می کند و ظرفیت بتن را نیز در تحمل بار ناشی از این پدیده افزایش می دهد (کینتا و نزام، ۲۰۰۹).

۶-۴- بررسی تاثیر استفاده از خرده آسفالت در روسازی بتن غلتکی

اولین گام در استفاده مجدد از خرده آسفالت در روسازی موجود تبدیل مصالح آسفالتی و سنگدانه‌ای به مصالح استاندارد و قابل استفاده در ساخت روسازی جدید است مزیت این مصالح این است که در وضع طبیعی دارای مصالح سنگی و قیر می‌باشند به این نوع مصالح در اصطلاح (خرده آسفالت) اطلاق می‌شود از این مصالح می‌توان در کلیه عملیات آسفالتی از قبیل نوسازی، اجرای روکش و روش‌های مختلف بهسازی راه‌ها استفاده نمود. به‌طورکلی بازیابی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد "استفاده مجدد (طی یکسری مراحل فرآوری) از موادی که قبلاً سرویس‌دهی اولیه خود را انجام داده‌اند".

خواص مصالح خرده آسفالتی تا حدود زیادی به مشخصات مواد اصلی تشکیل‌دهنده آن و نوع قیری که در روسازی قدیمی بکار رفته، بستگی دارد کیفیت مصالح خرده آسفالتی به پارامترهای متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- کیفیت اولیه آسفالت فرسوده و مصالح آن
- تعداد دفعاتی که روسازی آسفالتی مورد بهسازی قرارگرفته است
- درصد لکه‌گیری‌های موجود در سطح روسازی
- درصد ترک‌های سطحی و میزانی از این ترک‌ها که با قیر یا ماسه آسفالت پر شده است
- درصد استفاده از سایر روش‌های بهسازی در پیشینه نگهداری راه

استفاده از خرده آسفالت در تهیه مخلوط‌های جدید می‌تواند مقدار مصرف مصالح جدید را کاهش دهد و منجر به صرفه‌جویی در مصرف سرمایه و منابع طبیعی گردد. چنانچه خرده آسفالت در تهیه مخلوط‌های جدید مورداستفاده قرارگیرد، لازم است که اثر مصالح فرسوده در طرح جدید مدنظر قرارگیرد باید توجه نمود که مصالح سنگی خرده آسفالت با مصالح سنگی جدید ترکیب می‌گردد و می‌بایست ترکیب آن‌ها برای تعیین خصوصیات فیزیکی و مقاومتی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین لازم است قیر فرسوده خرده آسفالت نیز مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد . قیر فرسوده می‌تواند میزان قیر جدید لازم برای تهیه مخلوط جدید را کاهش دهد. باید توجه نمود که قیر خرده آسفالت به‌دست‌آمده از یک جاده در طی مدت اجرا و همچنین مدت خدمت‌دهی به دلیل واکنش با اکسیژن هوا، به‌تدریج فرسوده و سخت شده است چنانچه قیر خرده آسفالت خیلی سخت شده باشد و یا مقدار خرده آسفالت مصرفی در تهیه مخلوط جدید زیاد باشد، ترکیب نهایی قیر خرده آسفالت و قیر جدید ممکن است عملکردی مشابه با عملکرد قیری با سختی زیاد داشته باشد که در این صورت پدیده سخت شدگی قیر را باید با افزودن قیر نرم‌تر به مخلوط آسفالتی جبران نمود همچنین گاهی اوقات می‌توان از روان‌کننده‌ها نیز برای نرم‌تر نمودن(کاهش سختی) قیر سخت شده خرده آسفالت استفاده نمود. تقاضای استفاده از بازیافت مخلوط‌های آسفالتی گرم در پی افزایش قیمت قیر و کمبود مصالح سنگی باکیفیت در برخی مناطق جهان تشدید شده است.

مطالعه‌ای مشابه نیز در دانشگاه فلوریدا انجام شد که در آن مصالح خرده آسفالتی به مخلوط بتن معمولی اضافه شد. مواد و مصالح خرده آسفالتی با درصدهای متفاوت به مخلوط اضافه شدند. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد مصالح خرده آسفالتی بیشتر می‌شود. اما کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقاومت‌های فشاری و کششی غیرمستقیم است و از این گذشته معلوم شد که اضافه نمودن مصالح خرده آسفالتی سبب افزایش ضریب انبساط حرارتی و گیرش خشک‌شوندگی مخلوط بتن می‌شود. با مقایسه منحنی‌های تنش–کرنش مخلوط‌های مختلف معلوم شد که اضافه نمودن مصالح خرده آسفالتی و محتوای آن سبب افزایش انعطاف‌پذیری مصالح و کرنش شکست مخلوط بتن می‌شود.

هوانگ و همکاران، به بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های بتنی معمولی پرداخته‌اند. در این پژوهش به‌جای خرده آسفالت بازیافتی از خرده آسفالت مصنوعی و پیر شده در آزمایشگاه و در قالب ۳ مخلوط به‌صورت: جایگزینی در بخش درشت‌دانه، جایگزینی در بخش ریزدانه و جایگزینی در هر دو بخش، استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم، نشان دهنده کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بود. در بخش دیگری از این پژوهش، بررسی شاخص چقرمگی در سنین مختلف حاکی از افزایش قابلیت جذب انرژی در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بوده است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶).

پژوهش مشابهی در دانشگاه فلوریدا در رابطه با افزودن خرده آسفالت به بتن معمولی انجام شده است. خرده آسفالت با درصدهای مختلف ۰، ۲۰،۴۰،۷۰ و ۱۰۰ به مخلوط بتن معمولی اضافه گردید. نتایج این پژوهش نشان دهنده کاهش در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد خرده آسفالت بود. میزان کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بود. ولی شاخص انبساط حرارتی و انقباض ناشی از خشک شدن با افزایش درصد خرده آسفالت افزایش یافت (حسینی و همکاران، ۲۰۰۸).

در پژوهشی که کریمی در رابطه با استفاده از خرده آسفالت در بتن غلتکی انجام داد، نشان داده شد که استفاده از خرده آسفالت تأثیر چندانی بر روانی و میزان آب مورد نیاز مخلوط بتن غلتکی ندارد و تقریباً زمان "وی بی" ثابت است. از این رو می‌توان تا حدی مقدار آب مخلوط را کاهش داد که خود عملی در افزایش مقاومت مخلوط‌های بتنی است. در این پژوهش روابطی با R-Square جهت پیش‌بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی ارائه شد. مقادیر درصد مجاز جایگزینی خرده آسفالت وابسته به مقاومت طراحی مخلوط مبنا است. مخلوط بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت به رسم سایر مخلوط‌های حاوی مواد قیری در مقابل تغییرات دما و به ویژه افزایش دما حساس است و در اثر افزایش دما و متعاقباً افزایش روانی قیر، مقاومت فشاری مخلوط بیش‌ازحد معمول مخلوط‌های بتن غلتکی کاهش می‌یابد (کریمی و حسنی، ۱۳۹۰). در مورد مخلوط‌هایی که در آن‌ها خرده آسفالت بازیافتی فقط با بخش ریزدانه جایگزین شده است، کاهش مقاومت همراه با افزایش مقدار خرده آسفالت بازیافتی، شدت کمتری دارد. استفاده از خرده آسفالت بازیافتی تأثیر چندانی بر روانی و میزان آب موردنیاز مخلوط بتن غلتکی ندارد. استفاده از خرده آسفالت در مخلوط بتن غلتکی باعث کاهش مقاومت می‌شود که به دلیل سطح چرب و لایه نازک قیر در سطح این سنگدانه‌ها است. بیشترین کاهش مقاومت مربوط به مخلوطی است که در هر دو فاز درشت‌دانه و ریزدانه، حاوی خرده آسفالت بازیافتی است. پس از آن مخلوطی که تنها در فاز درشت‌دانه جایگزینی صورت گرفته است، در رده دوم کاهش مقاومت قرار دارد و مخلوطی که تنها در فاز ریزدانه حاوی خُرده بازیافتی است کمترین کاهش مقاومت را نشان می‌دهد.

۶-۵- بررسی تاثیر استفاده از خاکستر پوسته برنج در روسازی بتن غلتکی

پژوهشی که در زمینه اضافه کردن خاکستر پوسته برنج به مخلوط بتن غلتکی انجام شد، نشان داد که میزان ۵ درصد خاکستر پوسته برنج مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته آن را افزایش می‌دهد. این رشد بستگی به سن عمل آوری مخلوط و یا نوع سیمان مصرفی نیز دارد. اضافه کردن همین مقدار خاکستر پوسته برنج به مخلوط بتن غلتکی باعث کاهش مصرف سیمان لازم برای رسیدن به مقاومت خمشی مطلوب می‌شود. همچنین باعث کاهش در میزان مصرف سنگدانه‌های معدنی از مقدار لازم آن است. کاهش در میزان سیمان و سنگدانه اثرات زیست محیطی مثبتی نیز خواهد داشت (کاترینا و همکاران، ۲۰۱۱).

۷- نتیجه‌گیری

امروزه بتن به عنوان ماده ای پر کاربرد در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به نوع کاربرد بتن، می‌توان خواص متفاوتی را از آن انتظار داشت. استفاده‌های فراوان در صنایعی از قبیل پل سازی، سدسازی، محوطه سازی، سازه‌های ساختمانی، ایجاد بندرها، اسکله‌ها و سازه‌های خاص موجب گردیده این ماده ارزشمند، به عنوان مرکز توجه بسیاری از محققین و دانشمندان قرار گیرد. بسته به نوع کاربرد و محل استفاده از بتن، این ماده دارای محدودیت‌ها و مشکلات نیز می‌باشد. از مسائل مهمی که در حال حاضر جهان را به خود مشغول داشته است، مسأله بازیافت می‌باشد. بازیافت، یعنی استفاده مجدد از موادی که قبلاً مصرف شده‌اند. یکی از راهکارها در مدیریت مصالح، بازیافت و استفاده مجدد از آنها می‌باشد. یکی از راهبردهای توسعه پایدار استفاده از بتن بازیافتی در بخش ساخت و ساز و استفاده مجدد از مصالح تخریبی و بازیافتی می‌باشد.

در پژوهش پیش‌رو ابتدا به معرفی بتن‌های غلتکی و بیان خواص مکانیکی بتن‌های غلتکی پرداخته شده است. همچنین اجزا تشکیل دهنده بتن‌های غلتکی و روش‌های طرح اختلاط بتن غلتکی بیان شده است. در ادامه بررسی مروری بر روی بتن‌های غلتکی پژوهش‌های شاخص در زمین استفاده از پزولان و مصالح بازیافتی در بتن‌های غلتکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مصالح بازیافتی مورد بررسی در بتن‌های غلتکی شامل لاستیک خرد شده، سرباره کوره فولاد، پسماند ذغال سنگ، خرده آسفالت و خاکستر برنج می‌باشد. در ادامه مهم‌ترین نتایج بررسی مواد بازیافتی ذکر شده است.

جایگزین نمودن خرده لاستیک در بتن‌های غلتکی سبب کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. این در حالی است که جذب انرژی و مقاومت کششی و چقرمگی در بتن حاوی خرده لاستیک افزایش می‌یابد. همچنین در بتن‌ها حاوی خرده لاستیک با افزایش زبری لاستیک شاهد افزایش مقاومت فشاری بتن خواهیم بود.

استفاده از سرباره کوره فولاد به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن غلتکی به میزان مناسب سبب افزایش مقاومت فشاری نمونه بتن غلطکی و افزایش بیش از حد سرباره سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. بررسی‌های بیشتر در خصوص استفاده از سرباره‌کوره فولاد و ترکیب نمودن با سایر افزودنی‌ها بیانگر افزایش مقاومت و دوام بتن می‌گردد. به دلیل تولید و مخاطرات زیست محیطی سرباره فولاد در صورت استفاده از این ماده در بتن علاوه بر کاهش مخاطرات زیست محیطی، هزینه کمتر سرباره کوره فولاد نسبت به سنگدانه سبب کاهش هزینه تمام شده بتن نیز می‌گردد.

از جمله پرکاربردترین پزولان‌ها در زمینه روسازی بتن غلتکی خاکستر بادی می‌باشد، که دوده حاصل از سوخت ذغال سنگ در نیروگاه‌های حرارتی است و در واقع پسماند سوخت ذغال سنگ است. این ماده به عنوان ریزدانه در بتن استفاده شده و عملکرد این ماده در طولانی مدت سبب افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. شایان ذکر است در کوتاه مدت در صورت جایگزین نمودن ریزدانه بتن با خاکستر بادی مقاومت بتن کمتر از بتن معمولی خواهد بود. همچنین بتن با خاکستر بادی مقاومت خستگی بسیار بهتری دارد.

استفاده از خرده آسفالت به عنوان جایگزین درشت دانه و ریز دانه در بتن‌های غلتکی صورت می‌پذیرد. بررسی پژوهش‌های گذشته بیانگر این موضوع است که در صورت استفاده از خرده آسفالت به عنوان ریزدانه کاهش مقاومت فشاری بتن شدت کمتری دارد نسب به استفاده از خرده بتن به عنوان درشت دانه و همچنین در صورت استفاده از خرده آسفالت به عنوان درشت‌دانه و ریزدانه در بتن بازیافتی کاهش مقاومت فشاری بتن بیشتر خواهد شد.

مراجع

ACI ۲۰۷.۵R-۹۹. ۲۰۰۴. “Roller compacted mass concrete”. ACI Manual of Concrete Practice.

ACI ۳۲۵.۱۰R. ۱۹۹۹. “Roller compacted concrete pavements”. American Concrete Institute.

B. Huang, X. Shu, and E. G. Burdette, "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements," Concrete, no. ۵, pp. ۳۱۳–۳۲۰, ۲۰۰۶.

Bílý, P., Fládr, J. and Haase, M. ۲۰۱۵. "Experimental verification of properties of roller-compacted concrete for pavements". In: Advanced Materials Research, ۱۱۲۴: ۳۰۷-۳۱۲, Trans Tech Publications Ltd.

Boussetta, I., El Euch Khay, S. and Neji, J. ۲۰۱۸. "Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates". Eur. J. Environ. Civ. Eng. https://doi.org/۱۰.۱۰۸۰ /۱۹۶۴۸۱۸۹.۲۰۱۸.۱۴۸۲۷۹۲

Cassiano Rossi dos Santos, Juarez Ramos do Amaral Filho, Rejane Maria Candiota Tubino, Ivo André Homrich Schneider, "Use of Coal Waste as Fine Aggregates in Concrete Blocks for Paving", Geomaterials, ۲۰۱۳,۳,۵۴-۵۹.http://dx.doi.org/۱۰.۴۲۳۶/gm.۲۰۱۳.۳۲۰۰۷ Published Online April ۲۰۱۳ (http://www.scirp.org/journal/gm)

D. R. Luhr, "Roller-Compacted Concrete Pavement," no. June, pp. ۱–۶, ۲۰۱۶

Debbarma, S., Ransinchung RN, G. D. and Singh, S. ۲۰۱۹. "Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement". Constr. Build. Mater., ۱۹۹: ۵۰۸-۵۲۵.

Debbarma, S., Singh, S. and Ransinchung RN, G. D. ۲۰۱۹. "Laboratory investigation on the fresh, mechanical, and durability properties of roller compacted concrete pavement containing reclaimed asphalt pavement aggregates". Transport. Res. Record J. Transport. Res. Board, ۲۶۷۳(۱۰): ۶۵۲-۶۶۲.

Hossiney, N., Wang, G., Tia, M. and Bergin, M. J. ۲۰۰۸. "Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement". In: Proceedings of the Transportation Research Board Annual Meeting (Cdrom), Transportation Research Board, Washington, DC.

Huang, B., Li, G., Pang, S. S. and Eggers, J. ۲۰۰۴. "Investigation into waste tire rubber-filled concrete". J. Mater. Civ. Eng., ۱۶(۳): ۱۸۷-۱۹۴.

J. Durand, "ville de montreal beton compacte au Rouleau (BCR) service de environnement," la Div. des Lab., ۲۰۰۱.

J. R. Berry et al., "Report on Roller-Compacted Concrete Pavements," vol. ۹۵, no. Reapproved, pp. ۱–۳۲, ۲۰۰۱.

Kinuthia J, Nidzam R. Effect of slag and siliceous additions on the performance of stabilized coal waste backfill. World Coal Ash ۲۰۰۹ Conf. Lexington, KY, USA., ۲۰۰۹.

Karimi Goghari, M., & Hassani, A. (۲۰۱۱). Laboratory Feasibility Study of Using Recycled Asphalt Pieces as an Aggregate in Road Pavement Roller Concrete. Journal of Transportation Engineering.

Lam, M. N. T., Jaritngam, S. and Le, D. H. ۲۰۱۸b. "EAF slag aggregate in roller-compacted concrete pavement: Effects of delay in compaction". Sustain., ۱۰(۴): ۱۱۲۲.

Lam, M. N. T., Le, D. H. and Jaritngam, S. ۲۰۱۸a. "Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash". Constr. Build. Mater., ۱۹۱: ۹۱۲-۹۲۲.

Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J. and López, M. ۲۰۱۸. "Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates". Road Mater. Pavement Design, ۱۹(۱): ۳۶-۵۵.

M. Frías , M.I. Sanchez de Rojas, R. García, A. Juan Valdés, C. Medina, ۲۰۱۲, "Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement", Cement & Concrete Composites ۳۴, p۶۷۸-۶۸۳.

Maochieh Chi, Ran Huang, “Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete.”, Cement & Concrete Composites ۴۵ (۲۰۱۴) ۱۴۸–۱۵۶.

Meddah, A., Bensaci, H., Beddar, M. and Bali, A. ۲۰۱۷. “Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement”. Innov. Infrastruct. Solut., ۲(۱): ۱۷.

Modarres, A. and Hosseini, Z. ۲۰۱۴. “Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. Mater. Design, ۶۴: ۲۲۷-۲۳۶.

Mostofinejad, a., & Nazari monfared, h. (۲۰۰۶). Add slag and limestone powder to concrete to increase its durability in sulfate medium. Transportation Research Journal, ۱-۱۳.

N. Hossiney, G. Wang, M. Tia, and M. J. Bergin, “Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement,” ۸۷th Annu. Meet. Transp. Res. Board, vol. ۳, no. ۵, pp. ۲۵۱–۲۵۸, ۲۰۰۸

P. Gauthier and J. Marchand, “Design and construction of roller compacted concrete pavements in Quebec,” ۲۰۰۵

Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B. and Adresi, M. ۲۰۱۹. “Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete”. Constr. Build. Mater., ۲۱۱: ۸۸-۹۸.

S. Practices, “Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete,” Concrete, pp. ۱–۲۶, ۱۹۹۷.

Saeid Hesami, Saeed Ahmadi, Mahdi Nematzadeh, “Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties

T. R. Naik, S. S. Singh, and M. M. Hossain, “Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made With Class C Fly Ash,” ACI Mater. J, ۱۹۹۵.

U. Federal, D. S. Catarina, and F. D. S. Catarina, “Replacing the Aggregate by Rice Husk Ash in Roller Compacted Concrete for Composite Pavements,” no. ۲۱۲, pp. ۱۹–۲۷, ۲۰۱۱.

U.S. Department of the Interior USGS. Mineral commodity summaries ۲۰۱۰. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey; ۲۰۱۰-۲۰۱۳.

Y. Huang, Pavement analysis and design. ۱۹۹۳

Zhengfu۱ B., Hilary I., John D., Frank O., Sue S., (۲۰۱۰), “Environmental issues from coal mining and their solutions”, Mining Science and Technology, Vol. ۲۰, pp ۰۲۱۵–۰۲۲۳.