مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره ۲۳، شماره ۵، سال ۱۴۰۲
صفحات ۷ تا ۱۹

# بررسی حساسیت رطوبتی و ویژگی‌های مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی داغ (HMA) حاوی تراشه بتنی بازیافتی اصلاح شده

**امیر کاووسی[1*]، مهدی بایزیدی[2]، فربد کاظمیان[3]**

۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

**Emai: kavussia@modares.ac.ir***

**تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۰۳**

## چکیده

فعالیت صنعت ساخت و ساز، سالانه منجر به تولید مقادیر قابل توجهی نخاله و ضایعات می شود. بازیافت این نخاله‌های ساختمانی در پروژه‌های عمرانی، مزایای قابل توجهی برای محیط زیست دارند، از آن جمله می‌توان به کاهش استفاده از منابع سنگدانه‌ای طبیعی، کاهش تخریب معادن و زیست بوم‌ها و کاهش دفن نخاله‌ها اشاره نمود. در میان انواع نخاله‌های ساختمانی تراشه‌های بتنی بخش قابل توجهی از نخاله‌ها را تشکیل می‌دهند. به‌طورکلی تراشه‌های بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت و مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارند. امروزه تراشه‌های بازیافتی بتنی (RCA) کاربرد های متنوعی در صنعت ساخت پیدا کرده‌اند. در این مقاله نتایج حاصل از مطالعه تجربی مخلوط‌های آسفالتی داغ(HMA) حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفته است. تراشه‌های بتنی بازیافتی در دو حالت اصلاح نشده و اصلاح شده در مخلوط آسفالتی جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شده‌اند. به منظور بهبود خواص تراشه‌های بتنی بازیافتی درشت دانه از روش اصلاح یک مرحله‌ای استفاده شد. اصلاح تراشه بتنی بازیافتی به وسیله غرقآب شدن در محلول آهک هیدراته صورت گرفت. در این روش، تراشه‌های بتنی بازیافتی به مدت ۲۸ روز در محلول آهک هیدراته قرار گرفتند و سپس ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن‌ها شامل وزن مخصوص، جذب آب، مقاومت فشاری و خمشی، مقاومت به رفتار خوردگی و همچنین زمان نفوذ آب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که غرق‌آب شدن تراشه‌های بتنی بازیافتی در محلول آهک هیدراته منجر به افزایش ٦ درصد وزن مخصوص، کاهش ۱۵ درصد جذب آب، افزایش ۱۵ درصد مقاومت های فشاری و خمشی و افزایش حدودا ۱۸ درصدی دوام در آن شد. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که اصلاح تراشه‌های بتنی بازیافتی می‌تواند به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی مخلوط‌های تهیه شده یا آن‌ها انجام شود. از طرفی نمونه‌های آسفالتی متعدد با سنگدانه‌های بازیافتی (اصلاح شده و اصلاح نشده) ساخته شد. حساسیت رطوبتی و ویژگی‌های مکانیک شکست نمونه‌ها با انجام آزمایش SCB تعیین شد. نتایج نشان داد که گرچه اصلاح تراشه بتنی بازیافتی منجر به افزایش هزینه تولید شود اما مزایای چشمگیری از نظر کاهش حساسیت رطوبتی و افزایش ویژگی‌های مکانیکی خواهد داشت. به عبارت دیگر، نتایج نشان داد که مخلوط‌های آسفالت حاوی ۵۰٪ مصالح بازیافتی بتنی اصلاح نشده، ۱۵ درصد مقاومت در برابر رطوبت را کاهش داده در حالی که مخلوط‌های آسفالت حاوی ۵۰٪ مصالح بازیافتی بتنی اصلاح شده با محلول آهک هیدراته، در مقایسه با مخلوط شاهد تقریبا مقاومت یکسانی در برابر رطوبت داشتند.به این ترتیب، اصلاح مصالح بازیافتی بتنی با استفاده از محلول آبی آهک هیدراته، می‌تواند بهبود مقاومت به رطوبت را نتیجه شود. همچنین نتایج حاکی از آن است که با جایگزینی مصالح سنگی خام با تراشه بتنی بازیافتی، ویژگی‌های مربوط به مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالت بهبود می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** تراشه بتنی بازیافتی، حساسیت رطوبتی، ویژگی‌های مکانیک شکست.



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

## ۱- مقدمه

رشد اقتصادی و افزایش جمعیت از جمله مهم‌ترین عواملی هستند که بر صنعت راهسازی تاثیر می‌گذارند. در این راستا در ساخت روسازی راه‌ها، مخلوط‌های آسفالتی یکی از پرکاربردترین مواد مصرفی می‌باشند. بتن آسفالتی را می‌توان به عنوان مخلوطی مرکب که شامل سه جز اصلی سنگدانه، قیر و فضای خالی است معرفی کرد، که تقریبا ٪۹۵ آن را سنگدانه و ۵٪ دیگر را قیر و سایر افزودنی‌ها تشکیل می‌دهد. همین امر منجر به افزایش قابل توجه کاربرد سنگدانه‌های طبیعی شده است. تخمین زده‌اند که برای اجرای یک کیلومتر روسازی با ضخامت ۱۵۰ میلی متر و عرض ۱۰ متر تقریباً ۳۷۵۰ تن مخلوط آسفالت داغ (HMA[1]) نیاز است، همچنین برآورد شده است که برای روسازی یک کیلومتر جاده با عرض کم به ۱۲۵۰۰ تن سنگدانه طبیعی نیاز است [1].

در دهه‌های اخیر، تخریب و بازسازی ساختمان‌های شهری در ایران افزایش قابل توجه داشته که باعث رشد میزان ضایعات ساخت و ساز و تخریب ساختمانی[2] شده است. حدود ۵۵ هزار مترمکعب خاک و نخاله ساختمانی به صورت روزانه در سطح شهر تهران تولید می‌شود[2]. هزینه بالای حمل و نقل و مشکلات زیست محیطی ناشی از این ضایعات از دلایل مهم بازیافت اینگونه مواد می‌باشد [3, 4].

ضایعات ساختمانی به طور کلی از مواد و مصالح مختلفی از جمله بتن، سنگ، چوب، فلز، پلاستیک و سایر مواد تشکیل شده اند[5, 6] در این میان تراشه بتنی درصد بیشتری از این نوع ضایعات را تشکیل می دهد، به طوری که در کلانشهر تهران، تقریباً یک پنجم کلیه ضایعات ساخت و تخریب ساختمانی را نخاله بتنی تشکیل می‌دهد [2]. نخاله‌های بتنی از تخریب و نوسازی ساختمان‌های بتنی، پل‌ها، روسازی‌های بتنی و سایر منابع تولید می‌شوند. بنابراین، توسعه و پیشرفت در بکارگیری مجدد نخاله‌های بتنی می‌تواند راه‌حلی مناسب و پایدار برای حل مشکلات مختلف از جمله کاهش مصرف مصالح طبیعی، کاهش مواد زاید در محل‌های دفن زباله و کاهش مشکلات زیست محیطی باشد. به همین دلیل این ماده توجه بسیاری از محققان را به عنوان جایگزین مناسبی برای سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی، جلب کرده است[7–9].

## ۲- سابقه تحقیق

تراشه بتنی بازیافتی[3](RCA) بیشتر از دو بخش: ۱- سنگدانه طبیعی[4](NA) (٪۷۰-٪۶۵)، ۲- ملات سیمانی که به سنگدانه طبیعی چسبیده است (٪۳۵-٪۳۰) تشکیل شده است. میزان ملات سیمانی چسپیده به RCA به اندازه ذرات، فرآیند خرد شدن و طرح اختلاط اولیه بتن بستگی دارد [1]. کیفیت و میزان ملات چسپیده، ایجاد ترک‌های ریز در طول فرآیند خرد شدن و تضعیف اتصال ملات سیمانی به سنگدانه طبیعی از جمله عوامل مهمی هستند که بر ویژگی‌های فیزیکی RCA تأثیر می‌گذارند و به کارگیری آن را در مقایسه با سنگدانه طبیعی نامطلوب می‌کنند [10–12]. با این حال RCA به طور کلی به عنوان ماده‌ای با چگالی کمتر، بافت سطحی زبرتر، مقاومت کمتر، گوشه‌های تیزتر و سطح ویژه بیشتری توصیف می‌شود [13]. میزان قابل توجه درصد جذب آب و تخلخل بیشتر مصالح RCA که ناشی از وجود ملات سیمانی است، منجر به کاهش خواص مکانیکی مخلوط تهیه شده با آن می‌شود. علاوه بر این، به دلیل متفاوت بودن منابع RCA و فرآیندهای مختلف خرد کردن آن، ترکیبات RCA به طور گسترده‌ای متفاوت است و مخلوط‌های آسفالتی حاوی RCA رفتارهای بحث برانگیزی از خود نشان داده‌اند. به همین دلیل نتایج حاصل از تأثیر RCA بر ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالتی، از جمله مقاومت در برابر آسیب رطوبتی[14–16] و مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی[16–18] توسط محققین مختلف مورد تحقیق قرار گرفته و نتایج متفاوتی حاصل شده است. در حالی که طول عمر خستگی[19, 20] و ترک‌خوردگی در دمای پایین [16, 19] مخلوط‌های آسفالتی حاوی RCA روندی مشابه با مخلوط آسفالتی معمولی نشان

1 Hot Mix Asphalt
2 Construction Demolition Waste
3 Recycled Concrete Aggregate
4 Natural Aggregate



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]
[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

می‌دهند. RCA به دلیل وجود ملات سیمانی نسبت به مصالح طبیعی (NA) واکنش پذیری بیشتری دارد، در نتیجه از نظر تعامل با سایر مواد مستعدتر است [1]. به همین علت مخلوط های آسفالتی حاوی RCA در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی متداول دارای درصد قیر بهینه و فضای خالی بیشتری هستند. میزان این پارامترها با افزایش درصد جایگزنی RCA بیشتر می شود. این ویژگی برای مصالح ریزدانه RCA به دلیل سطح ویژه بزرگتر، بیشتر می‌باشد [1]. به همین دلیل برای جلوگیری از افزایش درصد قیر بهینه، محققین پیشنهاد می‌کنند که RCA به صورت درشت دانه در مخلوط آسفالتی استفاده شود.

به همین دلیل جهت رفع مشکلات RCA و بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آن مطالعات زیادی انجام و چندین روش اصلاح پیشنهاد شده است. این روش‌ها را در دو گروه مختلف دسته‌بندی می شوند: ۱- حذف ملات چسپیده ۲- بهبود ملات چسپیده[1, 21]. بسیاری از محققان برای از بین بردن ملات سیمانی و سایر ناخالصی‌ها، مصالح RCA را با آب شسته‌اند [22]، در حالی که بعضی از محققین غوطه‌ور کردن RCA در اسیدهای مختلف را پیشنهاد کرده‌اند [23]. برخی دیگر نیز از روش مکانیکی مشابه دستگاه لُس‌آنجلس استفاده کرده‌اند [1]. این روش‌ها تا حدودی برای حذف ملات سیمانی موفق بوده‌اند. از طرفی دیگر برای بهبود کیفیت ملات سیمانی چندین روش، از جمله پوشش سطح ملات با استفاده از محلول‌های نانو پوزولانی [24]، رزین سیلیکونی مایع [25] و قیر امولسیونی[26] برای تقویت ملات سیمانی موجود استفاده شده است. در این روش‌ها با آغشته کردن مصالح RCA، مواد موجود در این محلول‌ها سطح RCA ها را می‌پوشاند، که به طور مؤثری باعث بهبود RCA می‌شود. از طرفی دیگر برخی از محققان برای اصلاح RCA از دو روش به طور همزمان استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه، در تحقیقی از نویسندگان مقاله[27] از روش اصلاح به صورت دو مرحله‌ای استفاده شد. در این تحقیق ابتدا از محلول اسیدی برای حذف ملات سیمانی ضعیف و در مرحله دوم از محلول پوزولانی برای تقویت ملات سیمانی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که این روش‌های اصلاح می‌توانند کیفیت RCA را بهبود بخشند.

## ۳- روش تحقیق

در پژوهش حاضر، با هدف بهبود خواص مصالح RCA درشت دانه و رفع نواقص آن، روشی ساده و کارآمد برای اصلاح این مصالح بکار گرفته شد تا راهی برای افزایش استفاده از این ضایعات در صنعت راه‌سازی گشوده شود. پس از تهیه تراشه بتنی بازیافتی درشت دانه، از محلول آهک هیدراته برای اصلاح این نوع مصالح استفاده شد. پس از اصلاح صورت گرفته روی تراشه بتنی بازیافتی، مشخصات سنگدانه‌ها مانند جذب آب، چگالی و ... مورد بررسی قرار گرفته و کیفیت اصلاحات سطحی ارزیابی شد. در ادامه مخلوط آسفالتی داغ (HMA) با درصدهای جایگزینی صفر، ۲۵ و ۵۰ درصد مصالح RCA درشت دانه (مانده روی الک ٤) در دو حالت اصلاح نشده و اصلاح شده تهیه و آماده شد. درصد قیر بهینه برای مخلوط شاهد (حاوی ۱۰۰٪ مصالح طبیعی و صفر درصد مصالح RCA) تعیین شد که از همین درصد قیر برای سایر ترکیبات استفاده شد. پس از آن، به بررسی حساسیت رطوبتی و ارزیابی مکانیک شکست مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف تراشه بتنی پرداخته شد. همانطور که در سابقه تحقیق اشاره شده به دلیل ویژگی‌های فیزیکی مصالح RCA، با افزایش درصد جایگزینی آن در مخلوط مقدار بهینه افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر هزینه اولیه تهیه قیر در مقایسه با مواد تشکیل دهنده مخلوط آسفالتی بالا می‌باشد، لذا در پژوهش حاضر، به منظور کاهش دخالت پارامتر های مختلف، درصد قیر بهینه بر اساس درصد قیر بهینه و سایر شرایط طرح اختلاط برای سایر درصدهای جایگزین RCA اصلاح شده و اصلاح نشده ثابت و برابر با مخلوط شاهد در نظر گرفته شده است. هدف ازین کار فراهم کردن شرایط یکسان برای تمام حالات در نظر گرفته شده در این پژوهش می‌باشد تا بتوان میزان تاثیر مستقیم روش اصلاح پیشنهاد شده و درصد جایگزین مصالح RCA بر ویژگی‌های مخلوط آسفالتی بررسی شود.



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

## ٤- مصالح و مواد

مشخصات قیر، مصالح سنگی و افزودنی‌های مورد استفاده به شرح زیر است.

### ٤-١- قیر

قیر مورد استفاده در این تحقیق، قیر خالص پالایشگاه تهران با درجه‌ی نفوذ ٧٠-٦٠ است که بیشتر در نواحی دارای آب و هوای گرم و معتدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیر مورد نظر از شرکت نفت پاسارگاد تهران تهیه و ویژگی‌های آن در جدول ١ آورده شده است.

### ٤-٢-مصالح سنگی

در این تحقیق از دو نوع سنگدانه برای تهیه مخلوط های آسفالتی استفاده شد: ١- سنگدانه طبیعی (NA) ٢- تراشه بتنی بازیافتی (RCA). سنگدانه طبیعی از معدنی واقع در شهرستان دماوند، شمال شرقی استان تهران تأمین شده که از نوع مصالح آهکی می‌باشد. مطالعات گذشته نشان می دهد که مصالح درشت دانه RCA در مقایسه با مصالح ریزدانه آن دارای ملات سیمانی کمتری است[28].

**جدول ٢.** ویژگی‌های فیزیکی مصالح طبیعی و تراشه‌های بتنی بازیافتی

| Test | Standard Methods | Natural aggregate | Untreated RCA |
|---|---|---|---|
| **Specific gravity (g/cm3)** | AASHTO T96 | 2.61 | 2.39 |
| **Water absorption (%)** | ASTM C127 | 1.05 | 5.32 |
| **Abrasion loss (%)** | ASTM C131 | 27 | 45 |
| **Flatness particles (%)** | ASTM D4791 | 12 | 15 |
| **Elongation particles (%)** | ASTM D4791 | 13 | 16 |
| **Aggregate Impact Value (AIV)** | BS812 | 14 | 23 |

**Table2.** Physical characteristics of natural and RCAs aggregates

به همین دلیل انتظار می رود که مصالح درشت دانه RCA دارای کیفیت بهتری در مقایسه با مصالح ریزدانهRCA باشند. در این تحقیق از مصالح درشت دانه RCA (مانده روی الک شماره٤) به عنوان جایگزین مصالح طبیعی استفاده شد. همچنین از دو درصد جایگزینی RCA ، یعنی ٢٥ و ٥٠ درصد برای تهیه مخلوط های آسفالتی استفاده شد. دانه‌بندی مصالح مطابق با حد میانی دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ٢٣٤ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی است. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مصالح طبیعی و تراشه‌های بتنی بازیافتی در جدول (٢) ارائه شده است.

### ٤-٣- آهک هیدراته

بیشتر آهک هیدراته به عنوان افزودنی برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به کار برده می‌شود. در این تحقیق از محلول آن برای اصلاح RCA استفاده شد. البته گرچه مواد شیمیایی متفاوتی (شامل مواد ضدعریان‌شدگی [29]) برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند اما محلول آهک هیدراته به دلیل فراوانی، کاربرد آسان و اقتصادی بودن در مقایسه با سایر مواد انتخاب شد. اجزای شیمیایی و خواص فیزیکی آن در جدول (٣) گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که این ماده با ٩١ درصد هیدروکسیدکلسیم دارای خلوص بالا بوده و می‌توان از آن به عنوان افزودنی آهک هیدراته در ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده کرد.

**جدول (١).** مشخصات فیزیکی قیر ٧٠-٦٠ مورد استفاده

| Test | Method | Result |
|---|---|---|
| **Flash point (ºC)** | ASTM D92 | 316 |
| **Softening point (ºC)** | ASTM D36 | 53 |
| **Loss on heating (%)** | ASTM D1754 | 0.19 |
| **Specific gravity (g/cm3)** | ASTM D70 | 1.02 |
| **Ductility (25ºC; cm)** | ASTM D113 | 164 |
| **Penetration (at 25ºC; 0.1 mm)** | ASTM D5 | 65 |
| **Viscosity (60 ºC;P)** | ASTM D 2171 | 1900 |

**Table 1**. Physical properties of the 60-70 pen asphalt binder

## ٥- اصلاح مواد و آزمایشات

### ٥-١- اصلاح نخاله‌های بتنی

تراشه‌های بتنی بازیافتی درشت کاملاً شسته شدند، به طوری که همه ناخالصی‌های قابل توجه آن‌ها، از جمله خاک،



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

ذرات برگ گیاهان خشک شده و سایر مواد از آنها جدا شدند. سپس، به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط قرار گرفته تا خشک شدند.

**جدول ۳.** ترکیب شیمیایی و خصوصیات فیزیکی آهک هیدراته مورد استفاده

| Properties | Content |
|---|---|
| $Ca(OH)_2$ (%) | 91.14 |
| MgO (%) | 3 |
| $SiO_2$ (%) | --- |
| CaO (%) | 72 Active |
| $Al_2O_3/Fe_2O_3$ (%) | < 0.5 |
| Passing Sieve No. 200 (%) | 99 |
| Density ($g/cm^3$) | 2.34 |

**Table3.** Chemical composition and physical properties of the Hydrated Lime

تراشه‌های بازیافتی بتنی به مدت ٢٤ ساعت در محلول ٦٪ آهک هیدراته در دمای محیط غوطه‌ور شدند. سپس در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد پخش و خشک شدند تا دانه‌بندی آن‌ها تعیین شود. شکل (۱) نمایی کلی از فرآیند اصلاح نخاله‌های بتنی را نمایش می‌دهد. همچنین در این شکل نمونه‌ای از مصالح RCA در دو حالت اصلاح شده و اصلاح نشده، آورده شده است که مقایسه ظاهری مصالح، بیانگر اندود کامل سطوح نخاله های بتنی توسط محلول آهک هیدراته می باشد[30].

## ۲-۵- طرح اختلاط

طرح اختلاط مخلوط آسفالتی حاوی قیر و مصالح سنگی طبیعی مطابق روش طراحی مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 انجام شد. برای تعیین قیر بهینه، مصالح طبیعی با درصد قیرهای ٤، ٤/٥، ٥ ، ٥/٥ ، ٦ و ٦/٥ درصد نسبت به وزن مخلوط، ترکیب شده و در داخل استوانه استاندارد مارشال با ۷۵ ضربه چکش مارشال در هرطرف کوبیده شدند. پس از مخلوط کردن مواد و قبل از عمل تراکم ، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد (به منظور شبیه‌سازی پیرشدگی کوتاه مدت) و اطمینان از جذب قیر توسط سنگدانه‌ها نگهداری شدند. دماهای اختلاط و تراکم به ترتیب ۱۶۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در تعیین شد. مقدار قیر بهینه برای نمونه‌های شاهد (حاوی۱۰۰٪ مصالح طبیعی) ٤/٧ ٪ به دست آمد.

مصالح RCA در دو حالت اصلاح شده و اصلاح نشده در سه سطح ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزین بخش درشت دانه مصالح طبیعی شدند و نمونه‌ها با همان درصد قیر بهینه نمونه شاهد مخلوط و متراکم شدند. ترکیب طراحی مختلف نمونه‌ها در جدول (٤) آورده شده است

**شکل ۱.** تراشه بتنی بازیافتی **الف)** اصلاح نشده **ب)** اصلاح شده با محلول آهک هیدراته

**Fig. 1.** RCA materials. **a)** untreated **b)** treated with liquid Hydrated Lime



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

**شکل ۱.** تراشه بتنی بازیافتی **الف)** اصلاح نشده **ب)** اصلاح شده با محلول آهک هیدراته

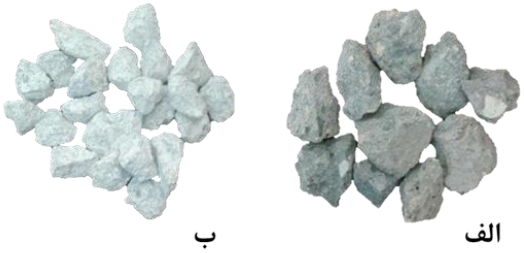


**Fig. 1.** RCA materials. **a)** untreated **b)** treated with liquid Hydrated Lime

**جدول ٤.** مخلوط‌های مورد آزمایش و اختصارات آن‌ها

| 50LTR | 50R | 25LTR | 25R | Control | **abbibivation** |
|---|---|---|---|---|---|
| Treated RCA 50% | RCA 50% | Treated RCA 25% | RCA 25% | Natural aggregate | **explain** |

**Table 4.** The mixtures under testing and their abbreviations

### ۳-۵- مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS[1])

برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به عنوان پدیده‌ای که بر عملکرد و طول عمر روسازی تاثیرگزار است، از آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) مطابق استاندارد AASHTO T-283 روی نمونه‌ها انجام شد. این آزمایش به بررسی میزان استحکام کششی مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک و مرطوب می‌پردازد.

برای هر طرح اختلاط شش نمونه آماده شد. نمونه‌ها دارای قطر ۱۰۱/٦ میلی‌متر و ارتفاع حدود ٦۳/۵ میلی‌متر بودند. مطابق استاندارد میزان درصد فضای خالی مخلوط‌ها باید در بازه ۸-٦٪ باشد. از آنجایی که در محدوده مورد نظر هر چه میزان قیر مخلوط بیشتر شود، درصد فضا خالی کاهش پیدا می‌کند می‌توان اینگونه تفسیر نمود که با جایگزینی سنگدانه های بازیافتی به علت جذب قیر بیشتر این سنگدانه‌ها نسبت به سنگدانه عادی، قیر مخلوط کمتر می شود. نتیجه این اتفاق این است که درصد فضا خالی افزایش پیدا می‌کند که این امر بیانگر آن است که با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های عادی، تعداد ضربات لازم برای رسیدن به فضا خالی ۸-٦ درصد کاهش پیدا می‌کند. برای آماده کردن نمونه‌های مرطوب برای هر طرح اختلاط ابتدا سه نمونه به وسیله پمپ خلأ تحت فشار ۳۵ کیلوپاسکال، به میزان ۵۵ الی ۸۰ درصد تحت شرایط اشباع قرار گرفتند. سپس مطابق روش استاندارد فوق‌الذکر به مدت ١٦ ساعت در دمای ۱۸- درجه سانتی گراد نگهداری شدند و پس از آن به مدت ٢٤ ساعت در حمام آب ٦۰ درجه قرار داده شدند. با انجام این فرآیند نمونه یک سیکل ذوب و یخ را تجربه می‌کند. قبل از انجام آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌ها باید به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شوند. برای نمونه‌های غیر اشباعی نیز مطابق استاندارد به مدت ۲ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی قرار داده شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. در آزمایش کششی غیر مستقیم، نمونه‌ها در راستای قطر با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر در دقیقه بار گذاری می‌شوند و مقدار بار در هنگام شکست نمونه اندازه‌گیری می شود. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$ITS = \frac{2F}{t\pi d} \qquad (۱)$$

که در آن ITS مقاومت کششی غیرمستقیم (kPa)، F بار وارد شده در لحظه شکست (kN) است، t ضخامت نمونه (mm) و dقطر نمونه (mm) است. پس از انجام آزمایش مقدار مقاومت

1 Indirect Tensile Strength



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

کششی غیرمستقیم برای حالت‌های خشک و مرطوب محاسبه و مطابق معادله (۲) مقدار شاخص TSR[1] (نسبت مقاومت کششی) اندازه‌گیری شد:

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \qquad (۲)$$

در این معادله $ITS_{wet}$ و $ITS_{dry}$ به ترتیب مقاومت‌های کششی غیر مستقیم در شرایط مرطوب و خشک است. کمتر بودن این نسبت از ۷۵ درصد، بیانگر مستعد بودن مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی است.

### ٤-٥- آزمایش خمش نیم دایره‌ای[2](SCB)

برای بررسی ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی در دمای میانی، از آزمایش شکست SCB مطابق استاندارد ASTM D 8044 استفاده شد. نمونه‌های SCB به دلیل شکل هندسی، آسان بودن تهیه و ساخت نمونه و اقتصادی بودن روش، یکی از مناسب ترین روش‌های آزمایشگاهی برای انجام آزمایش شکست مخلوط می‌باشد. نمونه SCB با برش نمونه‌های استوانه‌ای مخلوط آسفالتی به ضخامت ۵۷ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ایجاد ترک به عرض ۰/۳ میلی‌متر و عمق‌های ۲۵ میلی‌متر ،۳۲ میلی‌متر و ۳۸ میلی‌متر در وسط نمونه مطابق با ASTM D 8044 تهیه شدند.کروکی نمونه‌ها در شکل (۲) آورده شده است. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM تحت بار یکنواخت با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر در دقیقه انجام شد. طبق تعریف انرژی کرنشی شکست[3](U) برابر است با مساحت زیر نمودار نیرو–جابه‌جایی تا بیشترین بار تحمل شده توسط نمونه. پارامتر دیگری که در این آزمایش بدست می‌آید، جَی–انتگرال (J-integral) می‌باشد که معیاری برای تعیین مقاومت مواد در برابر ترک خوردگی است. این پارامترعملکرد شکست مخلوط های آسفالتی را در حالت غیرخطی توصیف می‌کند. هر چه مقدار (J-integral) بیشتر باشد، نشانگر آن است که مخلوط در برابر شکست سخت‌تر و مقاوم‌تر است. نموداری بر حسب طول ترک‌ها و انرژی کرنشی متناظرشان رسم می‌شود که از طریق محاسبه شیب نمودار و جایگذاری در رابطه‌ی (۳) مقدار بحرانی (J-integral) بدست می‌آید:

$$J_C = \frac{-1}{b}\left(\frac{dU}{da}\right) \qquad (۳)$$

در این رابطه:

Jc = نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی[4] ($kJ/m^2$)،

b = ضخامت نمونه (m)،

a = عمق ترک (m)،

U = انرژی کرنشی (kJ)،

dU / da = تغییر انرژی کرنشی متناظر با طول ترک (kJ / m)

## ٦- نتایج و تحلیل

### ٦-١- ویژگی‌های سنگدانه‌های مختلف

نتایج بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی تراشه‌های بتنی بازیافتی اصلاح شده با محلول آهک هیدراته در جدول (۵) ارائه شده است. با بررسی کلی و مقایسه نتایج بدست آمده از جداول و می‌توان گفت که روش‌های اصلاح باعث بهبود کیفیت مصالح RCA شده است. درصد جذب آب به طور مستقیم بر دوام مصالح RCA تاثیر می‌گذارد.

نتایج جدول (۵) حاکی از آن است که دوام این مصالح به طور قابل توجهی با اصلاح سنگدانه‌ها افزایش یافته است (۱۵٪ برای روش محلول آهک هیدراته). محلول آهک هیدراته می‌تواند تا حدودی منافذ RCA را پر کرده و جذب آب آن را کاهش دهد و باعث تقویت چسپندگی قیر و سنگدانه شود.

1 Tensile Strength Ratio
2 Semi-Circular Bending (SCB)
3 strain energy to failure
4 critical strain energy release rate



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]
[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

**جدول ۵.** ویژگی‌های فیزیکی تراشه‌های بتنی بازیافتی اصلاحی

| Test | Standard Methods | Hydrated lime treated |
|---|---|---|
| **Specific gravity (g/cm3)** | AASHTO T96 | 2.54 |
| **Water absorption (%)** | ASTM C127 | 4.5 |
| **Abrasion loss (%)** | ASTM C131 | 38 |
| **Flatness particles (%)** | ASTM D4791 | 13 |
| **Elongation particles (%)** | ASTM D4791 | 16 |
| **Aggregate Impact Value (AIV)** | BS812 | 19 |

**Table 5.** Physical characteristics of RCAs aggregates

**شکل ۲.** آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)

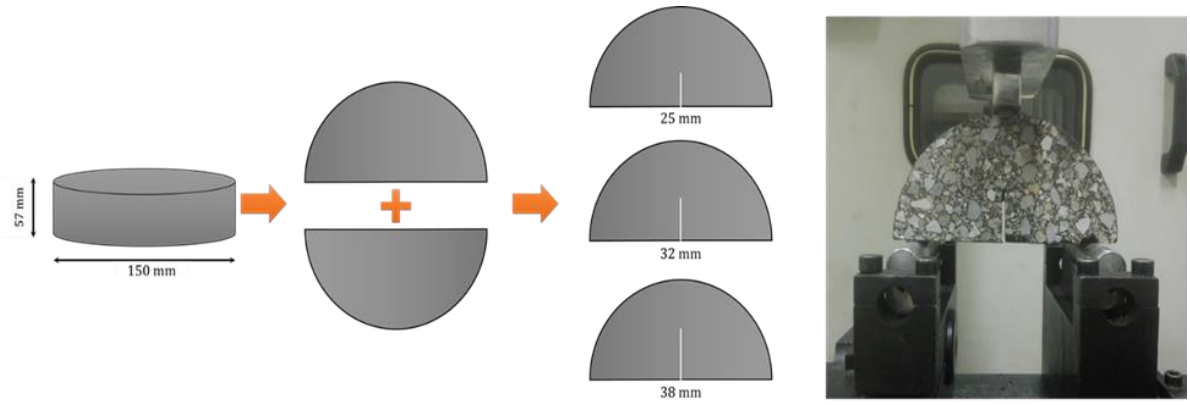


**Fig. 2.** Semi-circular bending (SCB) test

## ۲-۶- مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) برای ارزیابی رفتار مخلوط آسفالتی در برابر ترک خوردگی، تغییر شکل دائم و حساسیت رطوبتی انجام می‌شود. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در سه حالت خشک، اعمال یک سیکل ذوب و یخ و اعمال سه سیکل ذوب و یخ، برای مخلوط‌های حاوی RCA اصلاح شده و اصلاح نشده در شکل ۳ آورده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، مقادیر ITS نمونه‌های HMA حاوی RCA نسبت به درصد جایگزینی و مصالح RCA اصلاح شده حساس است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، در حالت کلی با افزایش درصد جایگزینی RCA مقدار ITS نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همانطور که در ابتدا اشاره شد، عموماً میزان جذب آب و قیر تراشه بتنی بازیافتی به دلیل وجود ملات سیمانی متخلخل نسبت به سنگدانه‌های طبیعی بیشتر است. از طرف دیگر در این تحقیق مقدار قیر بهینه برای تمامی حالت ها ثابت نگه داشته شد. بنابراین با افزایش درصد جایگزین RCA در مخلوط‌های آسفالتی، مقدار قیر مؤثر آنها کاهش می یابد که همین امر باعث کاهش چسبندگی بین اجزای مخلوط شده و موجب کاهش ITS گردید. همچنین همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، مقدار ITS مخلوط‌های آسفالتی حاوی RCA اصلاح شده در درصدهای برابر، بیشتر از حالت RCA اصلاح نشده است. این نتایج نشان می‌دهند که روش اصلاح موثر بوده و توانسته است خواص سطحی و مکانیکی RCA را بهبود بخشد. همچنین آهک هیدراته تا حدودی قادر به افزایش چسپندگی بین مصالح و قیر بوده و توانسته است که مقدار ITS مخلوط‌های آسفالتی حاوی RCA اصلاح شده را افزایش دهد. از طرف دیگر دو پارامتر زاویه‌داری مصالح RCA و روش اصلاح توانسته‌اند تا حدودی کمبود قیر موثر در درصد جایگزین ۲۵ را جبران کنند. در نمونه 25LTR مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتر از نمونه 25R می‌باشد. در مقابل، در مخلوط‌های 50LTR و 50R به دلیل افزایش درصد جایگزینی RCA، مقدار قیر مؤثر به صورت چشمگیری کاهش پیدا کرده و باعث کاهش چسپندگی بین مصالح سنگی و قیر شده و در نتیجه مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها کاهش یافته است.



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

این یافته‌ها نشان از تاثیر مثبت قابل توجهی در استفاده از RCA اصلاح شده در مخلوط‌های آسفالتی دارند. به طور خلاصه نتایج نشان می‌دهد که اصلاح RCA می‌تواند منجر به بهبود خواص سطحی مصالح سنگی و ویژگی‌های مکانیکی شود. علاوه بر این، افزودن آهک هیدراته می‌تواند باعث افزایش چسبندگی بین مواد و قیر شود که برای دوام کلی روسازی‌های آسفالتی بسیار مهم است. با این حال، بررسی دقیق درصد جایگزینی RCA ضروری است تا اطمینان حاصل شود که قیر موثر دچار دگرگونی قابل توجهی نشود.

**شکل ۳.** نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم(ITS) مخلوط‌های آسفالتی حاوی RCA

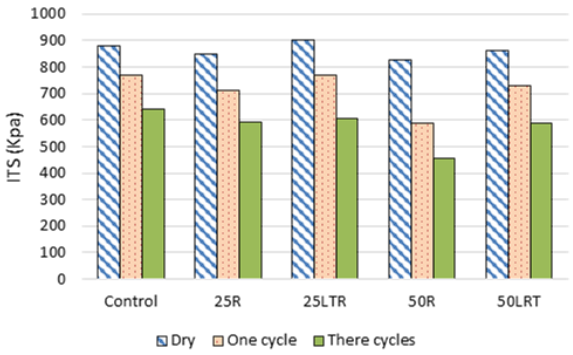


**Fig. 3.** Indirect tensile strength testing results of RCA content HMA

حساسیت رطوبتی به نوعی از خرابی اطلاق می‌شود که به دلیل وجود آب، به طور عمده بر ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی تأثیر می‌گذارد. برای آن که مخلوط آسفالتی بتواند در برابر رطوبت و آب مقاومت کند، کمترین مقدار TSR مورد نیاز ۸۰٪ است. نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) نمونه‌های حاوی RCA در شکل (٤) نشان داده شده است. در تمامی نمونه‌هایی که تحت شرایط یک سیکل ذوب و یخ قرار گرفته‌اند (به جز حالت 50R) حداقل TSR که مطابق آیین‌نامه ۸۰ ٪ در نظر گرفته شده است، برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد RCA به دلیل کاهش قیر موثر و در نتیجه تضعیف چسپندگی بین سنگدانه‌ها تمایل به آسیب‌های رطوبی افزایش می‌یابد، اما بهبود خواص RCA از طریق بکارگیری محلول آهک هیدراته در این تحقیق در بهبود این ویژگی موثر بوده است. با توجه به نزدیکی نتایج بدست آمده از نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) در مخلوط آسفالتی شاهد و مخلوط‌های حاوی مصالح RCA اصلاح شده، می‌توان به جنس سنگدانه طبیعی به کارگرفته شده در این مخلوط که از نوع مصالح آهکی بوده و همچنین روش پیشنهادی برای اصلاح مصالح RCA که از محلول آهک هیدراته استفاده شده است، اشاره کرد. که به نتایج حاکی از نقش ماده‌ی آهک هیدراته در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت اشاره کرد.

**شکل ٤.** نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم(TSR) نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف RCA

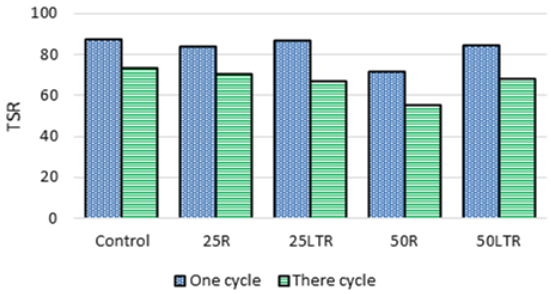


**Fig. 4.** Indirect Tensile Strength Ratio (TSR) of HMA mixes containing RCA

## ۳-٦- آزمایش خمش نیم دایره‌ای (SCB)

در این تحقیق برای ارزیابی خواص شکست مخلوط آسفالتی از آزمایش SCB استفاده شد. نمونه‌های SCB با سه طول ترک (۲۵ ، ۳۲ ، ۳۸ میلی متر) تحت یک بار یکنواخت با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی متر در دقیقه، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. مقدار بار و جابه‌جایی متناظر آن به طور مداوم برای نمونه‌های مختلف با طول ترک‌های متفاوت ثبت شد. به عنوان نمونه نمودار نیرو–جابه‌جایی برای نمونه R۲۵ در شکل (۵) نشان داده شده است.

همان‌گونه که پیش‌بینی شد نمونه‌های با طول ترک بیشتر مقاومت کمتری از خود نشان دادند و به دلیل طول بازشدگی بیشتر، سریعتر به نیروی حداکثر رسیده و مقاومت کششی کمتری از خود نشان دادند. مساحت زیر نمودار نیرو–جابه‌جایی که تا بیشترین نیرو برابر با انرژی کرنشی است، با



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]
[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

افزایش طول ترک رابطه عکس دارد. به عبارت دیگر، انرژی کرنشی با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد.

**شکل ۵.** نمودار نیرو-جابه‌جایی برای نمونه 25R در آزمایش SCB

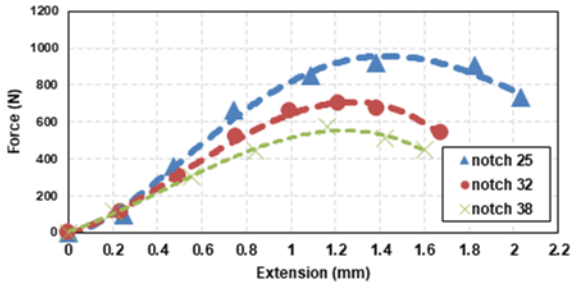


**Fig. 5.** Force-extension curves for Specimen 25R in SCB testing

**شکل ٦.** نمودار انرژی کرنشی نمونه‌های مختلف ؛ دارای بازشدگی‌های مختلف

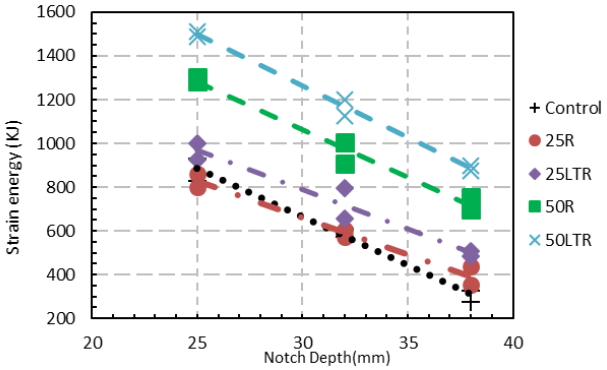


**Fig. 6.** Fracture energy versus notch depths of the different specimens

انرژی شکست از پارامترهای مکانیک شکست است که در این تحقیق محاسبه شد. نتایج برای نمونه‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف RCA با طول ترک‌های متفاوت در شکل (٦) رسم شده است. اختلاف در نتایج بدست آمده تحت تاثیر متغییرهای آزمایشگاهی(درصد جایگزینی و اصلاح مصالح RCA) می‌باشد. جایگزین کردن مصالح RCA با مصالح طبیعی تا حدود ۵۰٪، مقدار انرژی کرنشی مخلوط را افزایش داده و مقاومت نمونه را بیشتر و آن را سخت‌تر کرده است. جایگزین کردن مصالح طبیعی با مصالح RCA در هر دو حالت اصلاح نشده و اصلاح شده، انرژی شکست را که پارامتر آغازگر ترک است، بهبود می‌دهد. این امر می‌تواند ناشی از افزایش اصطکاک و درگیری مصالح درشت دانه RCA با یکدیگر و دیگر مصالح سنگی باشد. همان طور که در شکل (٦) مشاهده می‌شود، در اندازه شکاف‌های مختلف تقریبا روند ثابت و مشخصی وجود دارد. به عنوان نمونه میزان انرژی کرنشی نمونه‌های مختلف در طول شکاف ۲۵ میلی‌متر حاکی از آن است که به طور کلی هر چه میزان سنگدانه‌های بازیافتی افزایش می‌یابد، میزان انرژی کرنشی نمونه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین در درصد جایگزینی مشابه این نکته نیز قابل مشاهده است که نمونه های دارای سنگدانه‌های اصلاح شده انرژی بیشتری نسبت به نمونه‌های اصلاح نشده دارند. در توجیه این مهم اهمیت فرآیند اصلاحی و حذف نواحی دارای ضعف سنگدانه ها نقش موثری دارد.

همان‌گونه که از این نمودار مشاهده می‌شود RCA به طور کلی سختی مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد. نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی(Jc)، پارامتری برای مقایسه مقاومت در برابر ترک‌خوردگی مخلوط‌های آسفالتی در سطوح مختلف ترافیکی و دماهای میانی است. مقادیر نرخ آزادسازی انرژی کرنشی بحرانی (Jc) در شکل (٧) نشان داده شده است. همان‌گونه که ازین شکل مشاهده می‌شود، نتایج Jc ، نتایج حاصل از انرژی شکست را در حالت کلی تایید می‌کند. بدین گونه که مقاومت در برابر ترک خوردگی در مخلوط آسفالتی با جایگزینی ۵۰ درصد RCA در هر دو حالت اصلاح شده و اصلاح نشده بهبود یافته است. اگرچه مقدار Jc برای حالت ۲۵ درصد جایگزینی از مقدار مربوط به مخلوط شاهد کمتر است، این مقدار در محدوده استاندارد ASTM D8044 قرار دارد. این عملکرد بیشتر نتیجه جایگزینی RCA است که مانع انتشار ترک در مخلوط آسفالتی می‌شود. با دقت در نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که برای حالتی که مصالح RCA با محلول آهک هیدارته اصلاح شده است، مقدار انرژی کرنشی و نرخ آزاد شدن انرژی بحرانی برای درصد مشابه بیشتر می‌باشد. به نظر می‌رسد که محلول آهک هیدراته توانسته است تخلخل ملات سیمانی موجود را کاش داده و مقدار جذب قیر آن را پایین بیاورد. از طرفی دیگر با برقراری پیوند شیمیایی بین مصالح RCA و قیر، مقاومت



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

چسپندگی آنها افزایش یافته است که این امر نقش موثری در مکانیک شکست نمونه‌ها (علاوه بر اصطکاک موجود بین مصالح) ایفا می‌کند. به طور خلاصه افزودن و جایگزینی مصالح RCA باعث بهبود خواص شکست مخلوط‌های آسفالتی شده است. البته شایان ذکر است که باید عملکرد مخلوط برای درصدهای بالا نیز مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان به نتیجه قابل اعتماد دست یافت.

**شکل ۷.** مقادیر نرخ آزاد شدن انرژی بحرانی (Jc) در نمونه‌های مختلف HMA حاوی RCA

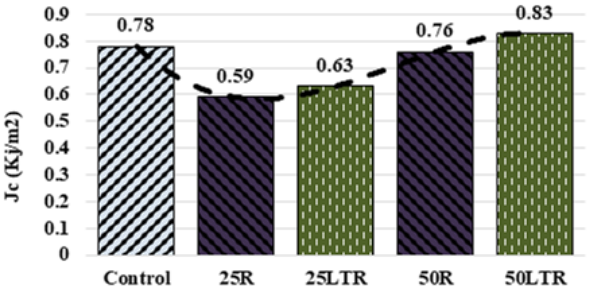


**Fig. 7.** Critical Energy ($J_c$) parameter of mixtuers containing different percentages of RCA materials specimens

## ۷- نتیجه‌گیری

مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد RCA تهیه شدند. به منظور بهبود کیفیت مخلوط‌ها، مصالح RCA به وسیله دوغاب آهک اصلاح شدند، سپس به همراه مصالح طبیعی در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفتند. اهم نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مختلف روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح RCA اصلاح شده و اصلاح نشده به صورت زیر است:

۱- مصالح RCA را می‌توان به جای سنگدانه‌های طبیعی در مخلوط‌های آسفالتی استفاده نمود. این امر علاوه بر مزایای مکانیکی دارای آثار زیست محیطی زیادی است.

۲- درصد محدودی از RCA را می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی جایگزین مصالح طبیعی کرد به طوری که عملکرد مخلوط آسفالتی تغییر قابل توجهی نکند. برای حالت اصلاح شده این مقدار ۵۰ درصد و برای حالت اصلاح نشده ۲۵ درصد پیشنهاد می‌شود.

۳- روش‌های اصلاحی به کارگرفته شده برای بهبود خواص مصالح RCA باعث کاهش جذب آب آن‌ها و افزایش دوام و مقاومت مخلوط‌های آسفالتی شد.

٤- مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰٪ RCA اصلاح نشده مقاومت رطوبتی لازم را نداشت، در حالی که مخلوط آسفالتی حاوی ۵۰٪ RCA اصلاح شده در برابر رطوبت مقاوم بود و حداقل TSR=%۸۰ تامین گردید.

۵- مخلوط آسفالتی حاوی مصالح RCA، انرژی کرنش بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متداول حاوی سنگدانه‌های طبیعی داشتند.

## ۷- مراجع


[1] H. Al-Bayati, S. Tighe, J.A.- Resources, C. And, U. 2018, Influence of recycled concrete aggregate on volumetric properties of hot mix asphalt, Elsevier۲۰۱۸) .).

[2] A. Asgari, T. Ghorbanian, N. Yousefi, D. Dadashzadeh, F. Khalili, A. Bagheri, M. Raei, A.H. Mahvi, Quality and quantity of construction and demolition waste in Tehran, J. Environ. Heal. Sci. Eng. 15 (2017) 1–8.

[3] Taherkhani, Hassan, Noorian, Farid, Bayat, Investigating the volume, strength and creep characteristics of asphalt concrete containing recycled asphalt and waste motor oil, Transportation Engineering Quarterly. 12 (2021) 561–585.

[4] F. Kazemian, H. Rooholamini, A. Hassani, Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates, Constr. Build. Mater. 209 (2019) 690–700.

[5] Taherkhani, Hassan, Abbasi, Investigating the effects of aging on the performance of hot asphalt mixtures containing high percentage of recycled asphalt crumb and waste edible oil, Transportation Research Journal. 19 (2022) 67–78.

[6] J.G. Bastidas-Martínez, F.A. Reyes-Lizcano, H.A. Rondón-Quintana, Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review, J. Traffic Transp. Eng. (English Ed. 9 (2022) 725–741. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.08.001.

[7] Y. Hou, X. Ji, J. Li, X. Li, Adhesion between asphalt and recycled concrete aggregate and its impact on the properties of asphalt mixture, Materials (Basel). 11 (2018). https://doi.org/10.3390/ma11122528.

[8] A.I. Kareem, H. Nikraz, H. Asadi, Evaluation of the double coated recycled concrete




[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

aggregates for hot mix asphalt, Constr. Build. Mater. 172 (2018) 544–552. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.158.
[9] J. Ma, D. Sun, Q. Pang, G. Sun, M. Hu, T. Lu, Potential of recycled concrete aggregate pretreated with waste cooking oil residue for hot mix asphalt, J. Clean. Prod. 221 (2019) 469–479. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.256.
[10] B. Luzana Leite, P. Fátima Maria De Souza, V. Pablo De Abreu, M.J.M. Elias, Concrete production of hot asphalt using recycled aggregates CDW, in: Mater. Sci. Forum, 2017: pp. 346–350. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.881.346.
[11] S. Fatemi, R. Imaninasab, Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials, Constr. Build. Mater. 120 (2016) 450–456. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.117.
[12] S. Ismail, M.R.-C. and B. Materials, U. 2013, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications, Elsevier .2013.
[13] H. Al-Bayati, P. Das, S. Tighe, H.B.-C. and Building, U. 2016, Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, Elsevier.(2013)
[14] Y.H. Cho, T. Yun, I.T. Kim, N.R. Choi, The application of Recycled Concrete Aggregate (RCA) for Hot Mix Asphalt (HMA) base layer aggregate, KSCE J. Civ. Eng. 15 (2011) 473–478. https://doi.org/10.1007/s12205-011-1155-3.
[15] S. Wu, J. Zhong, J. Zhu, D. Wang, Influence of demolition waste used as recycled aggregate on performance of asphalt mixture, Road Mater. Pavement Des. 14 (2013) 679–688. https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779304.
[16] J. Zhu, S. Wu, J. Zhong, D.W.-C. and B. Materials, U. 2012, Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings, Elsevier(2012).
[17] J. Mills-Beale, Z.Y.-C. and B. Materials, U. 2010, The mechanical properties of asphalt mixtures with recycled concrete aggregates, Elsevier.(2010).
[18] H.K.A. Al-Bayati, S.L. Tighe, Effect of Recycled Concrete Aggregate on Rutting and Stiffness Characteristics of Asphalt Mixtures, J. Mater. Civ. Eng. 31 (2019). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002810.
[19] M. Chen, J. Lin, S. Wu, Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture, Constr. Build. Mater. 25 (2011) 3909–3914. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022.
[20] I. Pérez, M. Toledano, J. Taibo, J. Gallego, Mechanical properties of hot mix asphalt made with recycled aggregates from reclaimed construction and demolition debris, Mater. Constr. 57 (2007) 17–29.
[21] Salehi, Hassan, b. Jo, Bozdari, study of the effect of mother concrete properties on the mechanical parameters of recycled concrete, civil engineering. 38 (2022) 47–57.
[22] A. Katz, Treatments for the improvement of recycled aggregate, J. Mater. Civ. Eng. 16 (2004) 597–603. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(597).
[23] V.W.Y. Tam, C.M. Tam, K.N. Le, Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches, Resour. Conserv. Recycl. 50 (2007) 82–101. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.012.
[24] V.S. Babu, A.K. Mullick, K.K. Jain, P.K. Singh, Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate-influence of processing, J. Sustain. Cem. Mater. 4 (2014) 54–71. https://doi.org/10.1080/21650373.2014.976777.
[25] Y. Hou, X. Ji, X. Su, W. Zhang, L. Liu, Laboratory investigations of activated recycled concrete aggregate for asphalt treated base, Constr. Build. Mater. 65 (2014) 535–542. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.115.
[26] J.P. Giri, M. Panda, U.C. Sahoo, Performance of bituminous mixes containing emulsion-treated recycled concrete aggregates, J. Mater. Civ. Eng. 30 (2018). https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002239.
[27] A. Kavussi, A. Hassani, F. Kazemian, M. Taghipoor, Laboratory evaluation of treated recycled concrete aggregate in asphalt mixtures, Int. J. Pavement Res. Technol. 12 (2019) 26–32. https://doi.org/10.1007/s42947-019-0004-5.
[28] A.R. Pasandín, I. Pérez, Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates, Constr. Build. Mater. 74 (2015) 151–161.
[29] Kavossi, Azarnia, T. Zawareh, Hasan, Investigating the effect of polymer sulfur and rubber powder additives on stripping resistance of asphalt mixtures, Modares Civil Engineering. 16 (2016) 137–146.
[30] Kavussi, A., Kazemian, F., & Bayzidi, M. (2020). Properties of Hot Mix Asphalt Containing Treated Recycled Concrete Aggregates Using SCB and ITS Tests. In Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements—Mairepav9 (pp. 419-431). Springer International Publishing.



[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-12-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]

# Moisture Susceptibility and Fracture Resistance of Hot Mix Asphalt Containing Treated Recycled Concrete Aggregate

**A. Kavussi[1]*, M. Bayzidi[2], F. Kazemian[3]**

1- Professor, Highway Group, Faculty of Civil and Environmantal Eng, Tarbiat Modares University
2-MSc Graduate Student, Highway Group, Faculty of civil and environmental Eng, Tarbiat Modares University
3-PhD Student, Highway Group, Faculty of Civil and Environmental Eng, Tarbiat Modares University
Received: 10/03/2021 Accepted: 22/02/2022
**Email: kavussia@modares.ac.ir***

## Abstract:

The construction industry produces substantial amounts of waste materials, which contribute to negative environmental impacts when disposed of in landfills. Recycling Construction and Demolition Waste (CDW) as secondary materials is an effective approach to reducing these negative effects. Recycled Concrete Aggregates (RCA) derived from distressed pavements, buildings, and concrete structures have potential for a variety of applications, including in asphalt mixes. This paper reports experimental research on the use of treated and untreated RCAs in preparing Hot Mix Asphalt (HMA). RCA materials were added in both treated and untreated form to HMA mixes. To improve the quality of recycled mixes, RCAs were treated with lime solutions. In order to improve quality of recycled mixes, RCAs were treated with lime solutions before that the recycled mixes were subjected to various tests. The treatment was applied to coarse RCA materials. The coarse RCAs were washed thoroughly, so that all noticeable impurities, including wood chips and other similar materials, were removed. These were then dried at ambient temperature for 24 h before that the treatment was applied. In order to reduce stripping susceptibility of the recycled asphalt mixtures, hydrated lime was added as a treatment additive. The addition of hydrated lime solution was beneficial due to, its abundance the convenience of application in HMA mixes. RCAs were impregnated in a 6% solution of hydrated lime for 24h at ambient temperature. Then these were dried at ambient temperature before being used in asphalt mixes. The physical and mechanical characteristics of the treated/untreated RCAs were determined. Asphalt mixtures were prepared that contained 25% and 50% RCAs of the size ranging from 4.75 to 12.5 mm. Various asphalt mixtures containing different amounts of RCAs were prepared. Moisture susceptibility of HMA mixes were evaluated using indirect tensile strength test (ITS). Fracture properties of mixes applying Semi-Circular Bending (SCB) were determined. SCB testing was performed according to ASTM D 8044 Standard testing method. Samples were prepared containing three different notches of 25, 32, and 38 mm. SCB samples were tested using a UTM machine. The loading mode as in monotonic compression at the speed of 0.5 mm/min. J-integral suggests as a criterion for resistance of materials to cracking. Testing was performed on HMA mixes treated and untreated samples. The results indicated that although treating RCAs might require more effort in production processing, significant benefits result in reducing moisture susceptibility and increasing fracture toughness of samples. It was also found that replacing virgin aggregates with RCA, improved fracture properties of HMA mixtures. The results indicated that with using RCA instead of conventional aggregates in asphalt mixes, has positive benefits for the environment and enhanced mechanical properties of HMA mixtures. A limited percentage of RCAs can be used in asphalt mixtures without significantly affecting performance of asphalt mixtures. The treatment resulted in reduced water absorption and increased fracture energy of mixes. Asphalt mixes containing 50% untreated RCA materials showed some moisture susceptibility while asphalt mixes containing 50% treated RCA showed improved moisture resistance. In conclusion, the study demonstrated that treating RCAs with hydrated lime solution improved the moisture susceptibility and fracture resistance of recycled HMA mixtures. Furthermore, utilizing recycled construction materials as secondary materials in asphalt mixes has significant environmental benefits. Future research can explore the potential use of various waste materials, including RCAs, in asphalt mixes.

**Keywords**: Recycled Concrete Aggregate, Fracture Energy, Moisture susceptibility

[ Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-02-03 ]

[ DOI: 10.22034/23.5.1 ]