

مروری بر رویکردهای به کارگیری تراشه آسفالت بازیافتی

در ساخت روسازی‌های بتنی

مقاله علمی-مروری

محمدرضا غفاری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ایران
میلاذ سلیمانی، دانش آموخته کارشناسی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، کرج، ایران
*محمدعلی غضنفری (نویسنده مسئول)، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی،

دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ghmohammadali30@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵

صفحه ۴۵۶-۴۳۹

چکیده

ارزیابی قابلیت بازیافت مصالح در صنعت ساخت‌وساز، طی دهه گذشته به یکی از محورهای پژوهشی فزاینده تبدیل شده است. این استقبال روزافزون، ریشه در مزایای کلیدی زیست‌محیطی همچون صیانت از منابع طبیعی بکر و کاهش حجم پسماندهای گسیل‌شده به مراکز دفن زباله دارد. در این میان، «تراشه آسفالت بازیافتی» (که به اختصار RAP نامیده می‌شود) به عنوان محصول حاصل از تخریب و تراش روسازی‌های انعطاف‌پذیر، اخیراً توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. این مصالح به‌طور گسترده‌ای به عنوان جایگزین بالقوه سنگدانه‌های طبیعی (اعم از ریزدانه و درشت‌دانه) در ساخت روسازی‌های بتنی مورد آزمایش قرار گرفته و شاخص‌های مقاومت و دوام آن‌ها در مقایسه با بتن متعارف سنجیده شده است. با این حال، چالش اساسی این است که آیا RAP واقعاً جایگزینی نویدبخش و بی‌نقص برای سنگدانه‌های بکر به شمار می‌رود؟ مقاله مروری حاضر با تمرکز بر این پرسش کلیدی، به دنبال تبیین دقیق امکان‌سنجی، پتانسیل‌ها و محدودیت‌های کاربرد RAP در روسازی‌های بتنی است. در این راستا، با بررسی جامع اسناد پژوهشی در دسترس اعم از مقالات کنفرانسی و نشریات، گزارش‌های فنی، دستورالعمل‌های آیین‌نامه‌ای و کتب مرجع، تلاش شده است تا شناخت راهبردی و یکپارچه‌ای از عملکرد بتن حاوی RAP برای هدایت پژوهش‌های آینده حاصل شود. این مرور ادبیات، سیر تکاملی و مراحل توسعه‌ای را که مصالح RAP در صنعت عمران طی کرده‌اند، ترسیم می‌کند. علاوه بر این، شواهد نشان می‌دهد که تاکنون اقدامات محدودی در راستای اصلاح و بهبود مقاومت بتن حاوی RAP صورت گرفته است؛ از این رو، نیاز مبرمی به توسعه راهکارهای نوین جهت ارتقا و غنی‌سازی پتانسیل عملکردی این مصالح در روسازی‌های صلب وجود دارد. در نهایت، انتظار می‌رود خروجی این مقاله مروری، افق‌ها و ابعاد جدیدی را پیش روی دانشکامیان و پژوهشگران بکشد تا بستری مؤثر برای توسعه فرآیندهای پایدار در صنعت روسازی فراهم گردد.

واژه‌های کلیدی: روسازی‌های بتنی، تراشه آسفالت بازیافتی (RAP)، روسازی پایدار، بازیافت تراشه آسفالت

۱- مقدمه

به افزایش قیمت و کمیابی مصالح طبیعی شده است. از سوی دیگر، فرآیند توسعه با تولید انواع پسماندها همراه است؛ ضایعاتی نظیر بتن تخریبی، سنگدانه‌های مازاد و غیراستاندارد، آجرهای شکسته، ضایعات چوب، فلزات اسقاطی و شیشه‌ها و

توسعه شتابان زیرساخت‌ها نقشی حیاتی در پاسخگویی به نیازهای جمعیت رو به رشد و پیشرفت‌های اقتصادی-اجتماعی ایفا می‌کند (Baradaran et al. 2024a, 2024b; Salimi & Ziaee, 2025). با این حال، این حجم از ساخت‌وساز منجر

(Devulapalli et al. 2022; Baradaran & Ziaee, 2025b)

مفهوم استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن، دهه‌هاست که مطرح شده اما محدودیت در تامین سنگدانه‌های طبیعی، ردپای کربنی بالای آن‌ها و برنامه‌های کاهش گسیل گازهای گلخانه‌ای سبب شده است که این مصالح طی ده سال گذشته اهمیت دوچندانی پیدا کنند (Tam et al. 2007). «سنگدانه‌های بازیافتی» اصطلاحی عام است که معمولاً به سنگدانه‌های حاصل از عملیات ساخت، اسقاط و ضایعات تولیدشده در فرآیند تخریب یا نوسازی اطلاق می‌شود. بر اساس منشأ تولید، محققان سنگدانه‌های بازیافتی را به چهار دسته اصلی تقسیم کرده‌اند (Silva et al. 2014) که به شرح زیر مشخص می‌شوند.

-سنگدانه بتنی بازیافتی (RCA): سنگدانه حاصل از بتن اسقاطی که شامل سنگدانه‌های پوشیده شده با خمیر سیمان است.

-سنگدانه بنایی بازیافتی (RMA): سنگدانه حاصل از تخریب سازه‌های بنایی.

-سنگدانه بازیافتی مخلوط (MRA): ترکیبی از دو مورد فوق شامل RCA و RMA.

-تراشه آسفالت بازیافتی (RAP): مصالح سنگدانه‌ای حاصل از تخریب روسازی‌های قیری (آسفالتی).

اگرچه مصالح RCA، RMA و MRA جایگاه مناسبی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی پیدا کرده‌اند، اما امروزه RAP به دلیل حجم بسیار بالای تولید ناشی از عملیات تراش و روکش لایه‌های تک یا چندگانه روسازی، به حوزه اصلی مطالعات تبدیل شده است. ساخت و بهسازی گسترده راه‌ها در سطح بین‌المللی روزانه حجم عظیمی از RAP تولید می‌کند (Devulapalli et al. 2021). با این حال، بازیافت RAP

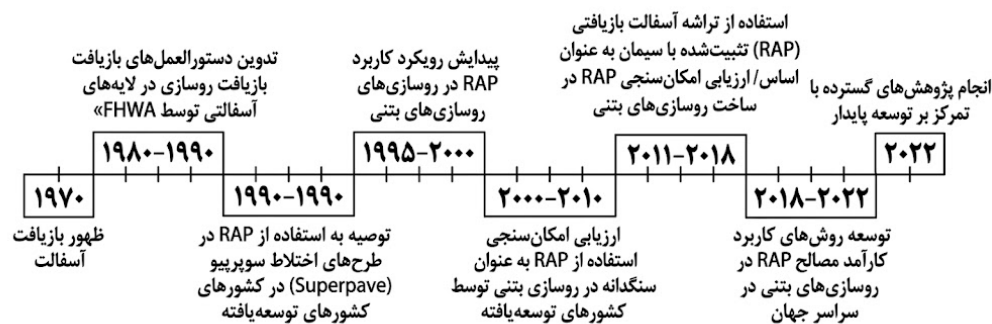
در مخلوط‌های بتنی در برخی مناطق همچنان یک چالش به شمار می‌رود که علت آن نبود دستورالعمل‌ها و آیین‌نامه‌های جامع است و تحقیقات در این زمینه از دهه ۱۹۷۰ میلادی (مطابق شکل ۱) در حال تکامل است. اگرچه بخش قابل‌توجهی از این مصالح در ساخت لایه‌های اساس یا روسازی‌های آسفالتی جدید بازیافت می‌شود، اما هنوز بیش از ۵۰ درصد از RAP استحصال‌شده بدون استفاده باقی می‌ماند که می‌تواند موجب آلودگی خاک، آب و هوا گردد (Mathias et al. 2004b)

پلاستیک‌های بازیافتی (Baradaran & Ziaee, 2025a; Baradaran & Ameri, 2025, Kamboozia et al., 2025). مدیریت این حجم از پسماند به دغدغه‌ای جدی برای متخصصان برنامه‌ریزی شهری تبدیل شده است؛ چرا که آن‌ها با کمبود شدید زمین برای دفن زباله، افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و دفع و چالش کاهش تخریب‌های زیست‌محیطی مواجه هستند (Baradaran & Ameri, 2026; Baradaran & Ziaee & Aliha, 2026).

آمارها نشان می‌دهند که امروزه تولید سالانه پسماندهای جامد به ده‌ها میلیون تن می‌رسد که در این میان، ضایعات ساختمانی سهم عمده‌ای در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهند (TIFAC-DST. 2001). افزایش قیمت‌ها در کنار کمپایی مصالح بکر و ضرورت‌های زیست‌محیطی، صنعت ساخت‌وساز را به سمت بازیافت ضایعات تخریبی سوق داده است. روند نگران‌کننده پایان یافتن سنگدانه‌های طبیعی، توسعه فناوری‌های بازیافت را به امری اجتناب‌ناپذیر بدل کرده تا بتوان این منابع ارزشمند را برای نسل‌های آینده حفظ کرد.

پیشینه بازیافت ضایعات ساختمانی به دوره پس از جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد؛ جایی که هدف اولیه، رهایی از حجم انبوه آوارهای ساختمانی ناشی از جنگ و در عین حال، یافتن منبع جدیدی از مواد اولیه برای بازسازی مناطق آسیب‌دیده بود. متعاقباً، پژوهش‌های برجسته‌ای در کشورهای پیشرو نظیر بریتانیا، ژاپن، فرانسه، ایالات متحده، آلمان و کشورهای حوزه اسکاندیناوی مانند دانمارک برای ارزیابی امکان بازیافت کامل پسماندهای ساختمانی انجام شد. بسیاری از پژوهشگران کارایی این ضایعات را به عنوان جایگزین مصالح بکر تأیید کرده‌اند (TIFAC-DST. 2001; Baradaran & Ameri, 2023; Ayar et al., 2022) برای نمونه، برخی کشورهای پیشرو اکنون به نرخ بازیافت بالای ۹۵ درصد در حوزه ضایعات ساختمانی دست یافته‌اند (Shima et al. 2005). امروزه کشورهای در حال توسعه نیز تمرکز ویژه‌ای بر اصل پایدارسازی از طریق مدیریت کارآمد پسماندها معطوف کرده‌اند (Devulapalli et al. 2021, and IRC 2017).

در همین راستا، به‌کارگیری مصالح بازیافتی در ساخت جاده‌ها از دهه‌های پایانی قرن گذشته و هم‌زمان با کمیاب شدن مصالح سستی آغاز شد. گزارش‌های فنی و نهادهای ارزیابی فناوری نشان می‌دهند که سالانه میلیون‌ها تن ضایعات بتنی و صدها هزار تن ضایعات سنگدانه‌ای قیرپوش، به ترتیب ناشی از نوسازی و تخریب ساختمان‌های قدیمی و روسازی‌ها انباشته می‌شود



شکل ۱. روند تکاملی و سیر تاریخی بازیافت مصالح RAP و مراحل نفوذ آن به صنعت روسازی‌های بتنی

هزینه‌ها را به شدت کاهش می‌دهد (Preethi et al. 2023; Baradaran & Aliha, 2025). از سال ۲۰۲۱ به بعد، محققان تمرکز ویژه‌ای بر کاربرد RAP هم‌زمان با جایگزینی سیمان و سنگدانه‌ها معطوف کرده‌اند. در یکی از این مطالعات، بازیافت ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌های RAP نشان داد که عملکرد مخلوط حاصل، کمی ضعیف‌تر از این تحقیق مسیر را برای پژوهشگران آینده روشن کرد تا علل این تغییرات عملکردی را در مخلوط‌های بازیافتی درک کنند. در پژوهش دیگری، اثر استفاده از RAP شسته‌شده به عنوان سنگدانه و دوده سیلیسی حاوی زیرکونیا به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بررسی شد و نتیجه نشان داد که جایگزینی تا ۴۰ درصد RAP شسته‌شده و ۱۰ درصد دوده سیلیسی حاوی زیرکونیا، عملکرد فوق‌العاده‌ای به همراه دارد (Rout et al. 2023). بهبود عملکرد، کاهش هزینه‌ها و مزایای زیست‌محیطی، دغدغه‌های اصلی صنعت و دانشگاه هستند. در سال‌های اخیر یک چرخش نگرش آشکار رخ داده است: ترکیب سنگدانه‌های RAP با جایگزین‌های درشت‌دانه، جایگزین‌های سیمان و افزودنی‌های شیمیایی جهت بازیابی مقاومت بتن. البته باید توجه داشت که مشخصات RAP بسته به منشأ محلی، نوع و ساختار روسازی اولیه، طول عمر عملیاتی، شرایط محیطی، میزان قیر و ویژگی‌های پیری آن تغییر می‌کند (Devulapalli et al. 2022). این تنوع در منابع RAP می‌تواند پایداری نتایج آزمایشگاهی و عملکردی را تحت تاثیر قرار دهد؛ از این رو، پژوهشگران به سمت استفاده از منابع یکدست مصالح در انواع و رده‌های مختلف مخلوط‌های بتنی متمایل شده‌اند (Sarir et

مصالح RAP شامل سنگدانه‌های باکیفیتی است که با قیر پیرشده (اکسیدشده) پوشانده شده‌اند. ارزیابی ویژگی‌های RAP نشان داده است که این مصالح جایگزین مناسبی برای منابع طبیعی هستند. مزایای اصلی استفاده از RAP در ساخت روسازی‌های بتنی، ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی آن است که به تحقق توسعه پایدار کمک می‌کند (Devulapalli et al. 2019, and Milada et al. 2020). در این راستا و در جهت حرکت به سوی توسعه پایدار، تمرکز بر به‌کارگیری ارقام کلان مصالح بازیافتی همچون RAP، به‌ویژه در صنعت روسازی اهمیت بالایی دارد. در همین زمینه، پژوهش‌ها بر روی بتن‌های فعال‌شده با قلیایی (خاکستر بادی/سرپاره) حاوی RAP نشان‌دهنده افت روانی (کارایی) و خواص مقاومتی این نوع بتن‌ها بوده است (Sepuri et al. 2022). این مطالعات نتیجه گرفتند که استفاده از افزودنی‌های شیمیایی برای افزایش درصد جایگزینی RAP ضروری است. بررسی‌های مشابه برای ارزیابی اثر RAP در بتن‌های ژئوپلیمری نیز انجام شده است (Rahman and Khatak 2021). این تحقیقات، استفاده از بتن ژئوپلیمری حاوی RAP به‌صورت بتن غلتکی را برای لایه‌های اساس یا رویه راه‌های کم‌ترافیک توصیه می‌کنند. به‌طور کلی، به‌کارگیری RAP در بتن‌های ژئوپلیمری طی سال‌های اخیر اهمیت بالایی یافته است. به عنوان مثال، در طراحی مخلوط ژئوپلیمری برای رده مقاومتی بالا، مشخص شد که درصد جایگزینی بسیار بالا (مانند ۸۰ درصد) مانع از تحقق مقاومت هدف می‌شود؛ این مطالعه تعیین یک درصد بهینه (مانند ۶۰ درصد) را پیشنهاد داد که بدون آسیب به مشخصات مقاومتی،

۲- پیشینه تحقیق

امروزه RAP دیگر یک ماده ضایعاتی تلقی نمی‌شود؛ با این حال، همچنان در بسیاری از نقاط دنیا این مصالح در حاشیه راه‌ها دپو شده یا به شکل غیرقانونی انبار می‌شوند. نیاز مبرم به ایجاد خروجی‌های متنوع برای مصرف RAP، سبب هدایت این مصالح به سمت صنعت روسازی‌های بتنی شده است (Debbarma et al. 2020c). در این فرآیند، RAP با سنگدانه‌های ریز و درشت سستی جایگزین می‌شود (Preethi et al. 2023).

این مقاله پژوهشی قصد دارد مراحل توسعه بازیافت RAP را در مطالعات بین‌المللی مرور کند. همچنین، تلاش شده تا یافته‌ها و تحلیل‌های مربوط به فرصت‌ها و چالش‌های بازیافت RAP به یکدیگر پیوند داده شوند. کشورهای پیشرفته همواره در حال ابداع فناوری‌ها و مصالح نوین برای ساخت زیرساخت‌های جاده‌ای سازگار با محیط‌زیست و تطبیق‌پذیر هستند. بخش عمده‌ای از کاربردهای بازیافت RAP حاصل پژوهش‌هایی است که افق‌های دید خود را محدود نکرده‌اند و تحقیقات پیشگامانه متعددی برای کشف کاربردهای دست‌نخورده این مصالح در جریان است. دغدغه اصلی در خصوص مصالح RAP، تضمین پایداری ویژگی‌های کیفی آن‌ها در درازمدت برای عملکرد بهینه در روسازی‌هاست. افزون بر این، ارزیابی مناسب بودن RAP بدون کوچک‌ترین آسیب به سلامت محیط‌زیست و بهداشت شغلی کارگران در حال و آینده، باید در اولویت نخست قرار گیرد. این مطالعه برای تمام ذینفعان بخش ساخت‌وساز و تصمیم‌گیرانی که هدفشان ترویج بازیافت به عنوان راهکاری برای حفظ منابع طبیعی است، اهمیت بالایی خواهد داشت.

۲-۱- وضعیت بازیافت RAP

بررسی‌های آماری در سال‌های گذشته نشان داد که از میان حدود ۲ میلیون تن RAP تولیدشده ناشی از تخریب دوره‌ای سطوح جاده‌ای در مناطقی مانند فرانسه، تنها ۱۰ درصد مستقیماً در خود روسازی‌ها بازیافت می‌شد (Mathias et al. 2004a). بخشی از آن‌ها صرف خاکریزی‌های سازه‌ای و ساخت پشته‌ها می‌گردید و حدود ۵۰ درصد از RAP بدون استفاده می‌ماند. با این حال، قوانین نوین اروپایی، RAP را یک ماده کاملاً قابل‌بازیافت قلمداد کرده و دفن آن در زمین را ممنوع اعلام کرده‌اند (Mathias et al. 2004a). در مناطقی مانند ایالات متحده،

(al. 2023). در این میان، نتایج حاکی از افزایش انعطاف‌پذیری (شکل‌پذیری) بتن سیمانی ساده با ورود مصالح RAP است. در حال حاضر، پژوهشگران اثر درصد جایگزینی درشت‌دانه‌های RAP بر طرح اختلاط، کارایی، مقاومت و دوام را در مقیاس آزمایشگاهی ارزیابی می‌کنند. از آنجا که RAP حاوی بخش‌های ریزدانه قابل‌توجهی است، جایگزینی آن با ریزدانه‌ها (ماسه) می‌تواند بیشترین صرفه اقتصادی را به همراه داشته باشد، هرچند مطالعات محدودتری در بخش ریزدانه گزارش شده است. بسیاری از محققان بر این باورند که نبود تحلیل‌های اقتصادی-زیست‌محیطی و کمبود داده‌های کارگاهی (شامل طول عمر عملیاتی و فرآیند بهبود عملکرد) از چالش‌های اصلی در ایجاد اعتماد نسبت به بازیافت RAP است (Butera et al. 2015, and Salimi et al. 2026). افزون بر این، مطالعات نشان داده‌اند که بازیافت هوشمندانه ریزدانه و درشت‌دانه RAP می‌تواند هزینه‌های ساخت را بدون ایجاد پیامد منفی بر مقاومت و دوام به حداقل برساند (Soosan et al. 2016).

با درک این شرایط، هدف از مطالعه حاضر شناخت پیشینه و ویژگی‌های RAP و به‌طور کلی، بهینه‌سازی کاربرد آن در صنعت ساخت‌وساز است. این مقاله با تکیه بر اصل پایداری زیست‌محیطی، نتایج کلیدی متون علمی را ارائه می‌دهد. محورهای مورد بحث عبارتند از: وضعیت بازیافت RAP در سطح کلان، امکان‌سنجی استفاده در روسازی‌های بتنی، درصد بهینه جایگزینی و مزایای زیست‌محیطی آن. گرچه بیشتر مطالعات خواص مکانیکی و دوام را بررسی کرده و تا حدی به موفقیت دست یافته‌اند، اما هنوز خلاءهای پژوهشی جدی در زمینه درک پیوند قیر-سیمان، رفتارهای دوام، چرخه عمر، نقش افزودنی‌ها، کاربرد درصد‌های بالای ریزدانه RAP و اثرات اصلاح سطحی سنگدانه‌ها وجود دارد. این مقاله بر خلاءهای بالقوه‌ای تأکید می‌کند که باید توسط محققان آینده مورد کاوش قرار گیرند. علاوه بر این، به حداکثر رساندن نرخ بازیافت و استفاده از مواد مضاف جهت ارتقای عملکرد بتن، نیازمند مطالعات بیشتر است تا بتوان بتن حاوی RAP را به مصالحی کاملاً پایدار تبدیل کرد. در کنار شناخت مشخصات ذاتی RAP و مزایای آن، تعیین نسبت بهینه سنگدانه‌های RAP همراه با افزودنی‌های مناسب در بتن، امری حیاتی است.

۲-۲- مزایای زیست محیطی

مصالح RAP می‌توانند راهکاری طلایی برای کاهش تقاضای سنگدانه‌های بکر، تقلیل هزینه‌ها و مهار گرمایش جهانی از طریق به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای باشند (Debbarma et al. 2020b). استفاده از RAP در ساخت روسازی‌ها، روشی کارآمد برای پیاده‌سازی پایدارسازی و افزایش طول عمر مفید معابر است (Devulapalli et al. 2020). عملیات معدن‌کاری و حفاری‌های عمیق زمین صرفاً برای استخراج سنگدانه‌های بکر، به تنهایی سهمی در حدود ۱ درصد در کل گسیل گازهای گلخانه‌ای دارند (Singh et al. 2018). از این رو، جایگزینی آن‌ها با RAP مسیر را برای حفظ محیط‌زیست هموار می‌کند و همان کارایی سنگدانه‌های بکر را ارائه می‌دهد (Abraham et al. 2020, and Debbarma et al. 2019). کاربرد این مصالح فشار بر مراکز دفن زباله و آلودگی‌های وابسته به آن در هوا، خاک و آب را کاهش می‌دهد (Devulapalli et al. 2021). علاوه بر این، استفاده از RAP مقاومت در برابر ترک‌خوردگی (چقرمگی شکست)، پایداری و دوام را در لایه‌های روسازی بهبود می‌بخشد (Devulapalli et al. 2020). صرفه‌جویی مالی حاصل از به‌کارگیری مصالح RAP می‌تواند به بودجه‌های نگهداری و توسعه بزرگراه‌ها تزریق شود (B. Nia et al. 2023, and Behnia et al. 2011). نرخ بهره‌وری از RAP، صنعت ساخت‌وساز ناگزیر به ورود این مصالح به بخش روسازی‌های بتنی است (Okafor 2010). با وجود مزایای زیست محیطی چشمگیر، تا پیش از این گام‌های پژوهشی محدودی برای ارزیابی دقیق سازگاری RAP با ساختارهای بتنی برداشته شده بود که این روند امروزه با شتاب بالایی در حال تغییر است (Li et al. 2026).

۲-۳- کاربرد RAP در بتن

طرح اختلاط بتن حاوی تراشه آسفالت بازیافتی هنوز از نظر تعیین نسبت‌های بهینه مصرف، الزامات آیین‌نامه‌ای، پارامترهای مقاومتی، پاسخ‌های حرارتی و نقش مواد مضاف جهت ارتقای مقاومت، به‌طور جامع مورد ارزیابی قرار نگرفته است. مطالعه حاضر به بررسی دیدگاه‌ها و تحولات اخیر در زمینه ارزیابی بتن حاوی RAP می‌پردازد. در گام نخست، قابلیت و مناسب بودن کاربرد مصالح RAP در بتن بر اساس ادبیات پژوهشی موجود کاوش شده است. در گام دوم، تاثیر درصد جایگزینی RAP

سالانه بیش از ۱۰۰ میلیون تن RAP تولید می‌شود که بخشی از آن در لایه‌های رویه، اساس و زیرآساس روسازی استفاده می‌شود؛ اما بالاترین مصرف ماندن ۵۰ درصد مابقی آن به یک نگرانی فزاینده تبدیل شده است (Collins & Ciesielski 1994; Baradaran et al., 2023). گزارش‌های مدیریت بزرگراه‌ها در سال ۲۰۰۷ نشان داد که از ۱۰۰ میلیون تن RAP بازیابی شده، ۴۰ میلیون تن در ساخت‌وسازهای جاده‌ای استفاده شده است. از دهه ۱۹۹۰ میلادی، توسعه زیرساخت‌های جاده‌ای جهان حجم بازیابی RAP را به شدت افزایش داده است که در صورت عدم مدیریت، تهدیدی برای منابع خاک و آب خواهد بود. با وجود این چالش‌ها، RAP در مقایسه با سایر ضایعات ساختمانی، بالاترین نرخ بهره‌وری و بازیافت را به خود اختصاص داده است (McNeil and Kang 2013).

در بسیاری از شبکه‌های جاده‌ای جهان، سهم روسازی‌های انعطاف‌پذیر (آسفالتی) بسیار بیشتر از روسازی‌های بتنی (صلب) است (برای مثال سهم ۹۸ درصدی در برابر ۲ درصد). با این حال، نرخ استفاده از RAP در مخلوط‌های بتنی در کشورهای در حال توسعه در مقایسه با کشورهای پیشرفته هنوز بسیار پایین است (Magar et al. 2022). با توجه به این ظرفیت خالی، پژوهش‌های عمیقی می‌توانند RAP را به عنوان یک سنگدانه بالقوه مطرح کنند. نبود مشخصات آیین‌نامه‌ای مدون و عدم اعتماد کافی در میان مهندسان اجرایی، از عوامل محدودکننده کاربرد RAP است (Devulapalli et al. 2019). شرکت‌های ساختمانی باید برنامه‌ای جامع برای مدیریت بهتر و تسهیل مسئولیت مشترک میان ذینفعان جهت جابجایی ضایعات ساختمانی داشته باشند (Serpell and Alarcon 1998). مباحث مالی در مدیریت پسماند مستقیماً به نرخ بازیافت قیدشده در قراردادهای عمرانی وابسته است (Tam and Tam 2008) به عنوان یک ماده بازیافتی ارزشمند، RAP به منبع مهمی برای تامین سنگدانه جایگزین در روسازی‌های بتنی تبدیل شده است. استفاده از RAP در بتن پیش از این به دلیل نبود راهنماهای طرح اختلاط، کیفیت نامشخص و کمبود شواهد تجربی موفق، محدود بود (Debbarma et al. 2020a)؛ اما امروزه تقاضای فزاینده‌ای برای کاربرد RAP در ساخت روسازی‌های بتنی بدون افت مقاومت و دوام شکل گرفته است (Debbarma et al. 2020b).

بر عملکرد مخلوط مورد مرور قرار می‌گیرد. در گام سوم، تلاش‌های مختلف پژوهشگران در راستای بهبود مشخصات مقاومتی و شاخص‌های دوام بتن حاوی RAP بررسی می‌شود. در نهایت، این مقاله مروری با ارائه چند استنتاج کلیدی و تبیین مسیرهای پژوهشی آینده به پایان می‌رسد.

۲-۴- فاز امکان‌سنجی

عامل بازدارنده و چالش اصلی در به‌کارگیری مصالح RAP در بتن این است که افزودن RAP به ترکیبات سیمانی معمولاً کاهش مقاومت خمشی و افت شدید مدول الاستیسیته را به همراه دارد. در طول دهه ۲۰۰۰ میلادی، اگرچه RAP در کشورهای توسعه‌یافته ماده‌ای شناخته‌شده بود، اما اثر آن بر رفتار خستگی و خواص مکانیکی استاتیکی بتن به‌طور گسترده مورد پژوهش قرار نگرفته بود. در همین راستا، مطالعه‌ای بر روی بازیافت RAP در روسازی‌های بتنی صورت گرفت (Mathias et al. 2004b). در آن پژوهش، مصالح RAP از یک منبع واحد تامین شد و امکان‌سنجی به‌کارگیری آن در دو لایه روسازی، یعنی لایه سطحی (رویه) و لایه پایادام یا اساس (بتن مگر یا کم‌سیمان) بررسی گردید.

نتایج نشان داد که بازیافت RAP در بتنی که به‌خوبی متراکم شده است، در صورت فراتر رفتن درصد جایگزینی از ۵۰ درصد، موجب کاهش شدید مقاومت فشاری می‌شود (Mathias et al. 2004b). یکی از مشاهدات مهم این بود که دوزهای بالای RAP در بتن، مشخصات آن را نسبت به تغییرات دما حساس می‌کند. در این تحقیق، درصد جایگزینی RAP ۹۰ تا درصد نیز اعمال شد و محققان دریافتند که دستیابی به یک طرح اختلاط بهینه در آستانه جایگزینی بالا بسیار دشوار است. با این حال، نتیجه‌گیری شد که امکان استفاده از مصالح RAP تا سقف ۵۰ درصد بدون آسیب جدی به عملکرد بتن وجود دارد (Huang et al. 2005, and Mathias et al. 2004b).

بررسی‌ها نشان داد که شاخص سختی ضربه‌ای بتن حاوی RAP به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که مقاومت‌های فشاری و خمشی با افت جزئی مواجه می‌شوند. این مطالعه دیدگاه مهمی را مطرح کرد مبنی بر اینکه بتن ساخته‌شده با درشت‌دانه‌های RAP اگرچه کاهش مقاومت دارد، اما از نظر چقرمگی عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. بیشتر مطالعات گزارش داده‌اند که درشت‌دانه‌های RAP ویژگی‌هایی مشابه با سنگدانه‌های بکر دارند (جدول ۱). بررسی‌ها نشان داده‌اند که

ترکیب مناسب RAP و سنگدانه‌های طبیعی برای تضمین مدول الاستیسیته مناسب، ضریب انبساط حرارتی پایین و مدول گسیختگی کافی، امری حیاتی است (Hossiney et al. 2010). در پژوهش‌های دیگری (Huang et al. 2006)، از RAP در بتن سیمانی ساده به عنوان جایگزین ریزدانه (ماسه) استفاده شد و محققان بهبود چقرمگی و شکل‌پذیری بتن را مشاهده کردند. نتایج تجربی نشان داد که مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن)، مدول گسیختگی، مقاومت فشاری و مدول یانگ با افزایش درصد کاربرد RAP کاهش می‌یابند. به نحو مشابه، مطالعات مبتنی بر روش المان محدود (FEA) نشان‌دهنده کاهش شدید نسبت «حداکثر تنش به مدول گسیختگی» در بتن‌های حاوی RAP بودند. این یافته‌ها به پژوهشگران اثبات کرد که در صورت کاربرد اصولی و مناسب RAP، می‌توان عملکرد کلی روسازی‌های بتنی را بهبود بخشید. در جریان یک تحقیق (Nandi et al. 2023) مشخص شد که ویژگی‌های مقاومت نهایی بتن حاوی RAP به میزان چسبندگی و یکپارچگی پوشش قیری روی سطح سنگدانه‌ها بستگی دارد. بر اساس یافته‌های آن‌ها، مقاومت فشاری بتن بازیافتی حاوی RAP در حدود ۲۵ مگاپاسکال تعیین شد. آن‌ها همچنین استفاده از RAP را در بتن توصیه کردند و یادآور شدند که این مصالح در آینده می‌توانند گزینه‌ای رایج برای بتن‌ریزی‌های با مقاومت اسمی و معمولی باشند. در حالی که بیشتر مطالعات بر روی RAP به عنوان جایگزین درشت‌دانه تمرکز یافته‌اند، تنها چند پژوهش به جایگزینی ریزدانه RAP در بتن پرداخته‌اند. در همین راستا، خواص مکانیکی بتن ساخته‌شده با ریزدانه RAP مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که استفاده از ریزدانه RAP تا سقف ۳۰ درصد، خطری برای افت رفتار مکانیکی بتن ایجاد نمی‌کند (Evangelista and Brito, 2007). این موضوع یک سرنخ پژوهشی برای محققان است که نشان می‌دهد بخش ریزدانه RAP هنوز حوزه‌ای دست‌نخورده و نیازمند کاوش است. علاوه بر این، مشخصات ریزدانه RAP را می‌توان در مقایسه با ماسه رودخانه‌ای، ماسه ساختگی (حاصل از شکستن سنگ)، خاکستر بادی، دوده سیلیسی و غیره ارزیابی کرد. اگرچه تحقیقات در این بخش محدود بوده، اما مشخص شده است که این مصالح ویژگی‌های مورد نیاز ریزدانه‌ها را بر اساس استانداردهای مرجع و بین‌المللی پوشش می‌دهند (جدول ۲). مرور مطالعات انجام‌شده بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ نشان

می‌دهد که تمرکز اصلی بر امکان‌سنجی جایگزینی سنگدانه‌های بکر با RAP بوده و محققان بر این حقیقت توافق دارند که مقاومت بتن در دوزهای بالای RAP کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، به دلیل مدول الاستیسیته پایین مصالح RAP، پدیده ترک‌خوردگی در بتن‌های حاوی این ماده بازیافتی کاهش یافته است. از دیگر نکات برجسته این دوره، کمبود پژوهش در زمینه کاربرد ریزدانه RAP بود که همین امر، این موضوع را به یک پتانسیل پژوهشی جذاب در دهه ۲۰۲۰ تبدیل کرد.

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی و درشت‌دانه‌های RAP

ویژگی / پارامتر فیزیکی	سنگدانه طبیعی (بکر)	درشت‌دانه RAP	الزامات آیین‌نامه‌ای و استاندارد مرجع	مراجع
وزن مخصوص	۲,۵ – ۳,۰	۲,۴۰ – ۲,۴۴	مطابق با ضوابط استاندارد سنگدانه	(Debbarma et al. 2020c, and IS 383 2016, and Mathias et al. 2004b, and Priyanka et al. 2020)
جذب آب (%)	۰,۱۰ – ۲,۰	۰,۲۰ – ۰,۴۵	مجاز در محدوده استاندارد	
وزن مخصوص توده‌ای (kN/m ³)	۱۷,۵ – ۱۲	۱۶,۵ – ۱۴,۲۰	در محدوده بهینه فنی	
شاخص خرد شدن سنگدانه (%)	۱۹,۰ – ۰,۲۲	۱۵ – ۱۶,۴۱	≤ ۴۵٪ برای سطوح غیر باربر و بدون سایش	
شاخص ضربه سنگدانه (%)	۱۸,۰ – ۲۰,۰	۱۶,۲۱ – ۱۸,۱۳	≤ ۳۰٪ برای رویه‌ها و لایه‌های تحت سایش	
شاخص سایش لوس‌آنجلس (%)	۱۹,۰ – ۲۴,۰	۲۳,۴۰ – ۲۳,۶۲	≤ ۵۰٪ برای لایه‌های غیر رویه ≤ ۳۰٪ برای رویه‌ها	

جدول ۲. خواص فیزیکی سنگدانه‌های طبیعی، ماسه‌های ساختمانی و ریزدانه‌های RAP

ردیف	ویژگی / پارامتر فیزیکی	ماسه طبیعی (رودخانه‌ای)	ماسه ساختمانی (شکسته)	ریزدانه RAP	الزامات استاندارد مرجع	مراجع
۱	وزن مخصوص	۲,۶۵ – ۲,۶۲	۲,۷۳ – ۲,۶۰	۲,۴۵	۲,۹ – ۲,۳	(Bida et al. 2016, and IS 383 2016, and Thakur et al. 2012, and Priyanka et al. 2020, and TIFAC-DST 2001)
۲	جذب آب (%)	۱,۵ – ۱,۱۵	۱,۸ – ۱,۶	۱,۳۶ – ۱,۳۰	< ۲٪	

۳- فاز جایگزین پذیری

عمق تراش، سرعت دستگاه، ابعاد ناخن‌های تراشیده و نوع ماشین‌آلات از پارامترهای مهمی هستند که دانه‌بندی RAP را کنترل می‌کنند. در صورتی که مصالح RAP توسط بیل مکانیکی یا بولدوزر برداشت شوند، به صورت قطعات و تکه‌های بزرگ (کلوخه) خواهند بود. اما اگر عملیات توسط دستگاه آسفالت‌تراش انجام شود، مصالح به شکل پودری و خردشده استحصال می‌شوند. این مصالح در کارگاه جمع‌آوری و پاک‌سازی شده، در صورت نیاز تحت فرآیند سنگ‌شکنی قرار می‌گیرند و در نهایت در کارخانه فرآوری به دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه تفکیک می‌شوند. به عملیات تراش یا خرد کردن و جداسازی RAP به بخش‌های ریز و درشت، «دانه‌بندی مجزا» یا فرکشنیشن می‌گویند. مشخص شده است که این فرآیند نقشی کلیدی در بهبود یکدستی و ثبات خواص RAP دارد (Dong and Huang 2014). محققان تاکید دارند که برای کسب نتایج بهتر، انجام فرآیند فرکشنیشن در زمان اختلاط RAP در بتن الزامی است (Fakhri et al. 2017).

بیشتر پژوهش‌ها با جایگزینی درشت‌دانه‌های طبیعی با درشت‌دانه RAP انجام گرفته‌اند (Evangelista and Brito 2007) و مطالعات محدودی به جایگزینی ریزدانه پرداخته‌اند. در پژوهشی، مصالح RAP پس از کوبش به عنوان لایه زیراساس روسازی‌های بتنی به کار گرفته شد (Bakash et al. 2013). در این مطالعه ذکر شد که افزودن مقدار کمی از مواد سیمانی مانند گرد و غبار کوره سیمان به عنوان تثبیت‌کننده، روند کسب مقاومت را شتاب می‌بخشد. نتایج نشان داد که ترکیب RAP با غبار کوره سیمان، شاخص‌های کیفی لایه زیراساس دانه‌ای ریزدانه را بهبود می‌دهد. این یافته سرخ مناسبی است که نشان می‌دهد پتانسیل استفاده از مواد افزودنی و تثبیت‌کننده باید در پژوهش‌های آینده مورد توجه قرار گیرد. ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که جایگزینی کامل سنگدانه‌ها با RAP منجر به افزایش خزش و تغییرشکل‌های ماندگار بتن می‌شود (Dong and Huang 2014). چندین محقق راهکارهایی چون محصورسازی RAP با استفاده از ژئوسل، تثبیت RAP با افزودنی‌های شیمیایی، یا مخلوط کردن آن با سنگدانه‌های بکر را پیشنهاد داده‌اند (Jitendra and Han 2015). این روش‌ها به منظور فراهم کردن امکان استفاده از درصد‌های بالاتر RAP بدون افت عملکرد بتن ابداع شده‌اند.

در حالی که مطالعات اولیه بر روی قابلیت به‌کارگیری RAP تمرکز داشتند، پژوهش‌های بعدی به سمت ارتقای رفتار مکانیکی تغییر جهت دادند.

پس از سال ۲۰۱۱، تمرکز پژوهش‌ها بر شناسایی دقیق مشخصات تفکیکی RAP و ارزیابی سازگاری بتن حاصله برای ساخت روسازی‌ها معطوف شد. در همین راستا، امکان‌سنجی بازیافت RAP در روسازی‌های بتنی با در نظر گرفتن شرایط عمومی و با استفاده از ماسه‌های ساختمانی استاندارد (که خواص مطلوب ریزدانه را دارا هستند) بررسی گردید (Panditharadhy et al. 2015). درصد‌های مختلفی از RAP به صورت جزیی با درشت‌دانه‌های طبیعی جایگزین شدند و مشخصات مخلوط حاصل تعیین گردید. طرح اختلاط برای بتن متعارف (NC) در چهار سطح جایگزینی RAP شامل ۱۰۰٪، ۷۵٪، ۵۰٪ و ۲۵٪ تنظیم شد، در حالی که نسبت آب به سیمان در تمامی مخلوط‌ها ثابت نگه داشته شد.

در میان این چهار طرح، مخلوط حاوی ۲۵٪ درصد RAP بالاترین مقاومت فشاری و خمشی را ثبت کرد. این پژوهش در نهایت جایگزینی سنگدانه‌ها با RAP را برای ساخت لایه‌های روسازی راه‌ها مناسب ارزیابی کرد.

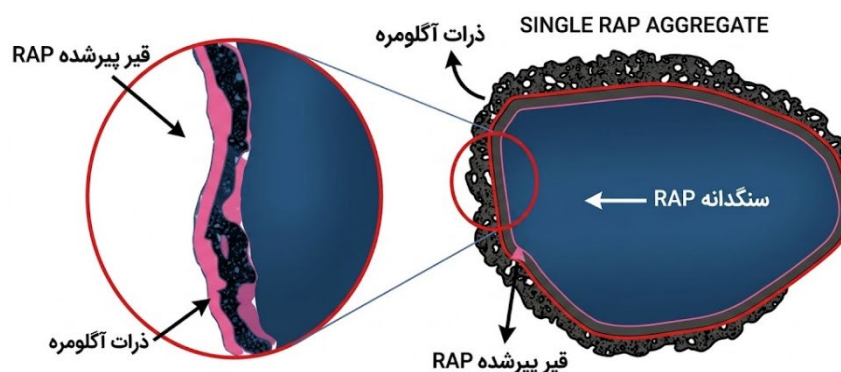
بررسی‌ها نشان دادند که وزن مخصوص مصالح RAP کمتر از سنگدانه‌های طبیعی است و میزان قیر چسبیده به سطح آن‌ها در جریان آزمایش در حدود ۷ درصد تعیین شد (Thakur et al. 2012). در این آزمایش‌ها هر دو بخش ریزدانه و درشت‌دانه RAP ارزیابی شده و ویژگی‌های آن‌ها با سنگدانه‌های بکر مقایسه گردید.

محققان نتیجه گرفتند که این لایه فیلم قیری چسبیده به سطح سنگدانه، علت اصلی افت عملکرد بتن حاوی RAP است. در این مطالعه پیشنهاد شد که حذف پوشش قیری می‌تواند عملکرد مقاومتی بتن حاوی RAP را ارتقا دهد، اما این فرآیند بسیار زمان‌بر و از نظر اقتصادی کاملاً غیراقتصادی خواهد بود؛ بنابراین، پیشنهاد گردید که مصالح RAP بدون عملیات حذف قیر و به‌صورت مستقیم جایگزین سنگدانه‌ها شوند (Preethi et al. 2023).

پژوهش‌های انجام‌شده بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ عمدتاً بر تست خواص مواد در ریزدانه و درشت‌دانه RAP و مقایسه آن با سنگدانه‌های طبیعی تمرکز داشتند. آزمایش‌های مربوط به پارامترهای مقاومت مکانیکی بتن بازایافتی نشان داد که می‌توان سنگدانه‌های درشت طبیعی را تا سقف ۵۰ درصد با درشت‌دانه

کلوخه‌ای و گردوغبار سطحی موجود در RAP (شکل ۲) به کار گرفتند تا به ریزساختاری متراکم دست یابند. نتایج نشان داد نمونه‌های شسته‌شده با آب عملکرد مؤثری داشتند، در حالی که در نمونه‌های عمل‌آوری شده در هوا، اثرات کربن برای طولانی‌مدت باقی ماند. متعاقباً، پژوهشگران ایده استفاده از افزودنی‌های معدنی (پوزولان‌ها) را برای بازیابی و افزایش مقاومت بتن حاوی RAP مطرح کردند (Debbarma et al. 2020c). با این حال، این رویکرد در آن زمان توسط محققان محدودی آزمایش شد و خروجی قاطعی به همراه نداشت. با این وجود، اکثر آزمایش‌ها پیشنهاد کردند که استفاده از مواد مضاف پوزولانی و افزودنی‌های شیمیایی می‌تواند به خواص بهتری منجر شود، هرچند که در آن دوره ارزیابی‌های تجربی کافی برای اثبات جامع این نتایج انجام نشده بود.

RAP جایگزین کرد، بدون اینکه افت شدیدی در مشخصات مقاومتی رخ دهد. با این حال، کاربرد ریزدانه RAP همچنان در مراحل اولیه پژوهش قرار داشت. پژوهشگران اثر به‌کارگیری RAP را به دو صورت شسته‌شده و شسته‌نشده (با حذف گرد و غبار و پوشش قیری از طریق فرآیندهای سایش و اصطکاک) بررسی کردند (Salimi et al. 2024). مشاهدات نشان داد که حذف گرد و غبار سطحی و لایه قیری، خواص بتن حاوی RAP را در هر دو حالت بتن تازه (کارایی) و بتن سخت‌شده (مکانیکی و دوام) به شکل چشمگیری بهبود می‌بخشد. در واقع، قیر چسبیده به سطح سنگدانه‌های RAP مقاومت پیوند بین سنگدانه و خمیر سیمان (ناحیه انتقال وجهی یا ITZ) را کاهش می‌دهد (Salimi et al. 2024). از این رو، محققان یک متدولوژی طراحی نوآورانه را برای بهبود و اصلاح ذرات



شکل ۲. تجمع ذرات ریز و گردوغبار کلوخه‌ای (آگلومره) بر روی سطح سنگدانه‌های RAP و تاثیر آن بر ناحیه انتقال وجهی بتن (Debbarma et al. 2020c)

۳-۱- فاز غنی‌سازی و دوام

RAP با بتن متعارف پرداختند (Kamboozia et al. 2025, and Salimi and Ziaee 2025). آن‌ها دریافتند که مصالح RAP به دلیل فرآیند سنگ‌شکنی و تفکیکی (فرکشیشن) که طی می‌کنند، حاوی حجم بالایی از ذرات ریزدانه هستند. این یافته یک هشدار پژوهشی را برای محققان به همراه داشت: ورود بیش از حد ریزدانه‌های RAP به مخلوط می‌تواند پیامدهای منفی بر عملکرد بتن بر جای بگذارد. در همین راستا، پژوهشی با هدف جایگزینی ریزدانه‌های طبیعی با ریزدانه RAP در محدوده صفر تا ۱۰۰ درصد (با گام‌های

تا سال ۲۰۱۵ میلادی، صنعت ساخت‌وساز این واقعیت را پذیرفت که به‌کارگیری مصالح RAP در روسازی‌های بتنی به عنوان یک رویکرد نوین و رایج تثبیت شده است؛ چرا که این مفهوم بر بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی تاکید داشته و توسعه پایدار را ترویج می‌کرد. یک توافق جمعی در میان پژوهشگران شکل گرفت مبنی بر اینکه «درصد بهینه جایگزینی RAP به عواملی چون میزان قیر، سن‌زدگی (پیرشدگی)، دانه‌بندی مصالح، نوع لایه روسازی و رده مقاومتی بتن مورد نظر بستگی دارد». بیشتر مطالعات در جریان ارزیابی‌های خود، محدوده جایگزینی ۲۰ تا ۵۰ درصد را انتخاب کرده و به مقایسه مخلوط‌های حاوی

۲۰ درصدی) انجام شد (Akatsu et al. 2022). نتایج نشان داد که با ورود ریزدانه RAP، کارایی (روانی) مخلوط افزایش و میزان جذب آب بتن کاهش می‌یابد. بر اساس این گزارش، امکان جایگزینی تا سقف ۴۰ درصد بدون ایجاد افت در مقاومت فشاری وجود دارد. در مطالعه‌ای دیگر، پژوهشگران جایگزینی هم‌زمان سنگدانه‌های ریز و درشت با RAP را در ساخت روسازی‌های بتنی مورد بررسی قرار دادند (Reddy et al. 2016). آن‌ها آزمایش‌های سیستماتیک کارگاهی را جهت صحت‌گذاری مدل المان محدود در نرم‌افزار ANSYS انجام دادند. با استفاده از این مدل نرم‌افزاری، میزان درصد افزودن RAP و سن‌زدگی قیر بر نحوه توزیع تنش تحت بارهای وارده کمی‌سازی شد. خروجی مدل ANSYS تایید کرد که افزودن RAP موجب کاهش مقاومت مکانیکی بتن می‌شود.

در پژوهش دیگری، درصد‌های جایگزینی ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد RAP به جای سنگدانه‌های طبیعی مورد آزمایش قرار گرفت (Memon et al. 2016). مقاومت بتن در پایان دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ روزه سنجیده شد و نتایج تست‌های مقاومت فشاری و کششی با بتن متعارف مقایسه گردید. نتایج برای تمامی مخلوط‌ها حتی در سن ۲۸ روزه رضایت‌بخش گزارش شد؛ به طوری که مخلوط‌های حاوی ۱۰۰ درصد RAP توانستند به ۶۴ درصد از مقاومت بتن متعارف در سن ۲۸ روزه دست یابند. این گزارش خاطرنشان کرد که برای ارتقای مقاومت بتن بازیافتی حاوی RAP، لازم است دوره‌های عمل‌آوری طولانی‌تر شده و نسبت آب به سیمان کاهش یابد. این پیشنهاد راهگشا، مبنای آزمایش‌های موفق در پژوهش‌های بعدی قرار گرفت؛ چرا که طولانی‌تر شدن زمان عمل‌آوری و تقلیل نسبت آب به سیمان نقشی کلیدی در بازیابی مقاومت بتن حاوی RAP ایفا می‌کند.

بررسی‌های تکمیلی نشان داد که امکان افزودن تا ۴۰ درصد RAP در بتن سیمانی ساده بدون افت شدید مقاومت وجود دارد (Sahan and Unsal 2023). بر اساس این یافته، کاهش مدول گسیختگی به دلیل توسعه نیروهای کششی در تار تحتانی، توسط کاهش مدول یانگ ختنی می‌شود.

با این حال، این مطالعه نیز به طور قاطع تاکید کرد که ورود بیش از حد ریزدانه‌های RAP مقاومت بتن را به شدت سرکوب می‌کند؛ یافته‌ای که در سال ۲۰۱۶ توسط محققان دیگر نیز تایید شد (Andrew et al. 2022). علاوه بر این، آزمایش‌های

کالریمتری نیمه‌آدیاباتیکی (نیمه هم‌دما) بر روی بتن حاوی RAP انجام گرفت تا اثر پوشش قیری سنگدانه‌ها بر فرآیند هیدراتاسیون بتن سیمانی ساده کمی‌سازی شود.

بر خلاف فرضیات قبلی، نتایج نشان داد که نرخ هیدراتاسیون سیمان تحت تاثیر قیر سطحی دستخوش تغییر نمی‌شود (Salimi et al. 2024)، که این امر با فرضیه تمدید زمان عمل‌آوری (Milada et al. 2020) در تناقض بود.

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که بتن حاوی RAP در مقایسه با بتن متعارف، رفتار تنش-کرنش به شدت غیرخطی‌تری از خود نشان می‌دهد (Kamboozia et al. 2025). در این زمینه، تلاش شد تا یک مدل سه‌بعدی غیرخطی با استفاده از روش المان محدود توسعه یابد که قادر باشد رفتار واقعی تنش-کرنش بتن حاوی RAP را شبیه‌سازی کرده و تنش‌های توسعه‌یافته را پیش‌بینی کند. این مطالعه نشان داد که تحت شرایط بحرانی بارگذاری و تغییرات دمایی، بتن حاوی RAP تنش‌های محاسباتی کمتری را به‌ویژه در ضخامت دال روسازی تجربه می‌کند. بنابراین پیشنهاد شد که برای ارزیابی دقیق واکنش‌های ساختاری در روسازی‌های بتنی حاوی RAP، باید مدل‌های جامعی بر پایه پارامترهای واقعی تنش-کرنش توسعه یابند. تحلیل شاخص‌های دوام بتن حاوی RAP با استفاده از مدل‌های المان محدود کارآمد، گامی نوین و آینده‌نگرانه در این حوزه به شمار می‌رود.

در حوزه اصلاح مشخصات مخلوط، اثر جایگزینی بخشی از سیمان با خاکستر بادی (Fly Ash) در بتن حاوی RAP بررسی شد (Sepuri et al. 2022). چهار مخلوط شامل:

مخلوط اول ۲۰٪ RAP و ۰٪ خاکستر بادی،

مخلوط دوم ۲۰٪ RAP و ۵٪ خاکستر بادی،

مخلوط سوم ۲۰٪ RAP و ۱۰٪ خاکستر بادی

و مخلوط چهارم ۲۰٪ RAP و ۱۵٪ خاکستر بادی.

از نظر خواص مقاومتی مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حضور خاکستر بادی در بتن حاوی RAP موجب ارتقای کارایی بتن می‌شود و درصد بهینه جایگزینی آن ۱۵ درصد تعیین شد. استفاده از خاکستر بادی برای تثبیت و بهبود ماتریس بتن حاوی RAP، یک راهکار بسیار مطلوب و قابل توجیه برای پژوهش‌های آتی است و نشان می‌دهد که عوامل تثبیت‌کننده می‌توانند ویژگی‌های چسبندگی بتن بازیافتی را ارتقا دهند. مطالعه دیگری نشان داد که افزودن خاکستر بادی به مخلوط بتنی

تعداد محدودی از پژوهش‌ها تلاش کردند تا با استفاده از مواد سیمانی و پوزولانی متنوع به عنوان افزودنی، خاصیت چقرمگی بتن بازیافتی حاوی RAP را بهبود بخشند، اما تغییرات حاصله جزئی بود. در مقابل، تلاش‌ها برای ارتقای چقرمگی بتن حاوی RAP از طریق کاهش ۲۰ درصدی نسبت آب به سیمان، موفقیت‌آمیز بود و منجر به افزایش ۵ تا ۳۳ درصدی در شاخص چقرمگی گردید (Debbarma et al. 2020c). گزارش‌ها حاکی از آن است که تاکنون تنها گام‌های اولیه‌ای برای بهبود خواص چقرمگی این بتن‌ها برداشته شده است؛ بنابراین، در آینده باید تحقیقات گسترده‌ای نه تنها برای ارتقای چقرمگی، بلکه برای ارزیابی مقاومت این بتن‌ها در برابر سایش و فرسایش (Attrition and Abrasion) جهت کاربردهای عملیاتی و اجرایی تعریف شود.

با ورود به دهه ۲۰۲۰ میلادی، دامنه پژوهش‌ها بر روی مصالح RAP گسترش یافته و امروزه این ماده در ترکیب با بتن‌های ژئوپلیمری، بتن‌های فعال‌شده با قلیایی (بر پایه خاکستر بادی/سرباره)، بتن‌های غلتکی کم‌سیمان (DLC) و بلوک‌های کف‌پوش بتنی مورد کاوش قرار می‌گیرد. قرارگیری در معرض شرایط دمایی مختلف و اتخاذ روش‌های نوین عمل‌آوری از جمله موضوعاتی هستند که در سال‌های اخیر به شدت آزمایش می‌شوند. در مجموع، تمامی این تحقیقات پیرامون جایگزینی سنگدانه‌ها با RAP، صنعت ساخت‌وساز را به سمت پذیرش مصالح بازیافتی در پروژه‌های عمرانی سوق می‌دهند.

پیامدهای زیست‌محیطی RAP و کاربرد آن در بتن

بسیاری از کشورهای در حال توسعه، تمایل بالایی به استفاده گسترده از مصالح RAP در پروژه‌های عمرانی خود دارند. بررسی‌های انجام‌شده تا به امروز، مزایای اقتصادی و فنی به‌کارگیری RAP را اثبات کرده‌اند؛ با این حال، چالش‌های زیست‌محیطی بالقوه و طول عمر مفید (دوره سرویس‌دهی) روسازی‌های حاوی این مصالح کمتر مورد توجه قرار گرفته است. ارزیابی پایداری زیست‌محیطی بتن حاوی RAP مستلزم پاسخگویی به دغدغه‌های اکولوژیک و پر کردن خلاءهای دانش موجود در این زمینه است. اخیراً در کشورهای پیشرفته، مطالعات متعددی برای ارزیابی اثرات زیست‌محیطی کاربرد RAP در لایه‌های مختلف روسازی انجام شده است. در این میان، دغدغه‌های مربوط به بازیافت پسماندها و به‌ویژه پدیده

حاوی ۱۰۰ درصد درشت‌دانه RAP، میزان نفوذپذیری بتن را تا ۵۰ درصد کاهش می‌دهد بدون آنکه آسیب جدی به مشخصات مقاومتی آن وارد کند؛ این امر تایید می‌کند که خاکستر بادی می‌تواند ریزساختار (میکروماتریس) بتن حاوی RAP را متراکم‌تر سازد، هرچند برای رسیدن به یک استنتاج پایداری کارگاهی هنوز به داده‌های بیشتری نیاز است (Hassan et al. 2000).

در تکنولوژی بتن، افزودن مواد الیافی معمولاً منجر به بهبود مشخصات مقاومتی می‌شود. این رویکرد در قبال بتن حاوی RAP نیز آزمایش شد (Devulapalli et al. 2022). محققان عملکرد مکانیکی بتن حاوی RAP مسلح‌شده با الیاف فولادی را بررسی کردند. خروجی آزمایش‌ها نشان‌دهنده کاهش کارایی و مقاومت فشاری در بتن حاوی الیاف فولادی و RAP بود، در حالی که مقاومت کششی برزیلی با افزایش سن عمل‌آوری و درصد الیاف فولادی روند صعودی داشت. از سوی دیگر، پژوهش‌های متعددی پیرامون کاربرد الیاف شیشه‌ای در روسازی‌های بتنی با سنگدانه‌های طبیعی انجام شده است. به عنوان مثال، ارزیابی اثر الیاف شیشه بر خواص مکانیکی بتن نشان داد که در دوزهای بهینه الیاف، حداکثر ۳۲ درصد افزایش در مقاومت فشاری و ۳۵ درصد افزایش در مقاومت خمشی حاصل می‌شود (Shima et al. 2005). اگرچه کارایی الیاف شیشه در روسازی‌های بتنی متعارف به اثبات رسیده است، اما نیاز مبرمی به تعریف پروژه‌های پژوهشی جهت بررسی اثر الیاف شیشه در «بتن‌های حاوی RAP» وجود دارد که می‌تواند حوزه جذابی برای محققان این بخش باشد. مطالعه‌ای دیگر به بررسی کاربرد پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف شیشه (GFRP) در روسازی‌های بتنی پرداخت و کارایی آن را در کاهش ترک‌های دسته‌ای و بهبود عملکرد بهره‌برداری دال‌ها تایید کرد (John 2021).

در پژوهشی دیگر، رفتار مقاومت ضربه‌ای بتن سیمان پرتلند حاوی RAP مورد مقایسه قرار گرفت (Sahan and Unsal 2023). تست‌های مقاومت و نمودارهای اتلاف انرژی (جذب انرژی) نشان دادند که نرخ جایگزینی بهینه ۱۰ درصد، بهترین نتایج مقاومتی را به همراه دارد. به‌کارگیری RAP در قطعات بتنی پیش‌ساخته (کف‌پوش‌ها و بلوک‌های فرش‌انداز راه‌ها) از جمله مطالعات پیشرفته‌ای است که توسط برخی پژوهشگران و با اتکا به رژیم‌های مختلف عمل‌آوری انجام شده است (Mishra 2015).

شیرابه‌دهی (Leaching) ناشی از ترکیبات شیمیایی، از اهمیت بالایی برخوردار است. قیر یا آسفالت به عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده RAP، در صورت انباشت و دپوی غیراصولی در محل‌های دفن پسماند، می‌تواند مشکلات جدی ناشی از نفوذ شیرابه ایجاد کند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که آسفالت موجود در مصالح RAP مسئول افزایش قللیت (pH) محیط و تجمع فلزات سنگین و آلیاژهای پایداری است که تخریب خاک و پوشش گیاهی منطقه را به همراه دارند (Salimi and Ziaee 2025). علاوه بر این، شیرابه تولیدشده از توده‌های RAP با نفوذ به لایه‌های زیرین خاک به آب‌های زیرزمینی رسیده و در صورت ورود به چرخه آب آشامیدنی، پیامدها و مخاطرات بهداشتی جدی برای انسان به دنبال خواهد داشت (Butera et al. 2015). در مقابل، برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اگر مصالح RAP به صورت تازه فرآوری شده و مستقیماً در روسازی‌ها به کار روند، تاثیر منفی چندانی بر کیفیت خاک و آب‌های سطحی نخواهند داشت (Yang et al. 2020). این محققان در آزمایش‌های خود با خروج ناچیز عناصر جزئی (کمیاب) در شیرابه‌های اسیدی ضعیف ناشی از دپوی RAP مواجه شدند. نتایج نشان داد که مصالح RAP عناصری مانند منگنز (Mn) و نیکل (Ni) آزاد می‌کنند که بخش عمده آن در بافت خاک جذب و بی‌اثر (تضعیف) می‌شود. از این رو پیشنهاد شد که می‌توان از RAP به عنوان مصالح بدون چسب (تثبیت‌نشده) در تمامی محیط‌ها، به جز محیط‌های با اسیدیته بالا، بهره برد. در مطالعه‌ای دیگر، رابطه متقابل میان فلزات سنگین و حد مجاز آن‌ها در شاخص‌های کیفیت آب مورد ارزیابی قرار گرفت تا یک استاندارد مشترک برای تدوین دستورالعمل‌های کاربرد RAP حاصل شود (Hung et al. 2017). این پژوهش نشان داد که اگر دانه‌بندی مصالح RAP حاوی بیش از ۷۰ درصد ذرات ریزدانه باشد، نرخ نفوذ و نشت فلزات سنگین از روسازی به خاک زیرین به شدت افزایش می‌یابد که این موضوع به یک دغدغه جدی در آینده تبدیل خواهد شد. افزون بر این، رهاسازی و تخلیه غیرقانونی مصالح RAP در حاشیه راه‌ها، منجر به تولید و انتشار گردوغبار جاده‌ای می‌گردد. دپوی ناپایدار RAP در مجاورت محورهای مواصلاتی، یکی از منابع اصلی تولید ذرات معلق (PM) در محیط پیرامونی به شمار می‌رود که اثرات مخربی بر کیفیت آب، زمین، سلامت انسان، پوشش گیاهی و کل اکوسیستم دارد؛ این موضوع یکی از زمینه‌های پژوهشی جذاب

است که باید توجه بیشتری به آن معطوف شود. در رابطه با دوام بتن، گزارش شده است که در صورت استفاده از ۱۰۰ درصد درشت‌دانه RAP شسته‌نشده (کثیف)، میزان کلر موجود در بتن تا ۵۶ درصد افزایش می‌یابد؛ در حالی که این رقم با به‌کارگیری ۱۰۰ درصد درشت‌دانه RAP شسته‌شده به ۳۲ درصد کاهش پیدا می‌کند (Singh et al. 2018). با استناد به مطالعات موجود، مشخص است که افزودن درشت‌دانه‌های RAP به مخلوط بتنی، تاثیر منفی حداقلی بر نرخ نفوذ یون کلرید دارد. با این وجود، برای دستیابی به یک استنتاج پایداری کارگاهی و قابل اعتماد، نیاز به راه‌اندازی تحقیقات جامع‌تری است. از آنجا که در حال حاضر داده متقن و کافی در خصوص اثر ریزدانه‌های RAP بر تغییر نرخ نفوذ کلرید در بتن وجود ندارد، پژوهش‌های آینده باید به طور ویژه بر این بخش تمرکز کنند (Debbarma et al. 2020c). این خلاء پژوهشی، دو مسیر راهبردی را پیش روی محققان حوزه محیط‌زیست قرار می‌دهد: نخست، فراهم شدن بستری مساعد برای سنجش میزان آلاینده‌های کل و آلاینده‌های قابل استخراج (شیرابه‌دهی) در مصالح RAP (شامل فلزات سنگین و باقی‌مانده‌های هیدروکربنی) و مقایسه آن‌ها با آستانه‌های خطر استاندارد. دوم، تحلیل سمیت بالقوه (Toxicity) مصالح RAP که می‌تواند منابع علمی ارزشمندی را برای تصمیم‌گیری‌های کلان در سطوح منطقه‌ای فراهم کرده و مهندسان را به سمت شناسایی بهترین شیوه‌های مدیریتی (BMPs) در به‌کارگیری RAP هدایت کند. این گام‌ها بدون شک نسل بعدی پژوهشگران را در درک جامع پیامدهای زیست‌محیطی بتن‌های حاوی RAP یاری خواهد داد.

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر به بررسی جامع ابعاد امکان‌سنجی، جایگزین‌پذیری، غنی‌سازی و رفتارهای دوام بتن حاوی تراشه آسفالت بازیافتی پرداخت. در این راستا، شمار زیادی از مقالات پژوهشی، گزارش‌های فنی و مقالات کنفرانسی معتبر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفتند تا استنتاج‌های دقیقی حاصل شود. اکثر یافته‌های پژوهشی، مصالح RAP را به عنوان یک جایگزین بالقوه تحول‌آفرین برای سنگدانه‌های درشت‌دانه و ریزدانه طبیعی در بتن معرفی می‌کنند. مهم‌ترین نتایج کلیدی حاصل از این مقاله مروری به شرح ادامه تبیین می‌گردد.

-بررسی‌های تاریخی اولیه: مطالعات انجام‌شده در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ میلادی، عمدتاً بر جایگزینی RAP و ارزیابی مشخصات ساختاری آن در مقایسه با بتن متعارف تمرکز داشتند؛ این پژوهش‌ها دستیابی به عملکرد مقاومتی مطلوب را در بتن‌های حاوی RAP صحنه‌گذاری کردند.

-ابهام در روند کارایی (روانی): روند تغییرات کارایی بتن در مخلوط‌های بازایفتی حاوی RAP در بسیاری از مطالعات گزارش‌شده، مبهم و متناقض ارزیابی شده است. پیشنهاد می‌شود پژوهشگران در آینده، نسبت آب به سیمان را تابع مستقیمی از درصد بازایفت RAP قرار دهند یا پس از رساندن مخلوط سنگدانه‌ها به وضعیت اشباع با سطح خشک (SSD)، این نسبت را ثابت نگه دارند.

-آستانه بهینه درشت‌دانه: تن‌های حاوی درشت‌دانه RAP تا سقف ۵۰ درصد جایگزینی، عملکردی هم‌تراز با بتن متعارف از خود نشان داده‌اند؛ اما فراتر رفتن از این میزان، منجر به بروز رفتارهای ناپایدار و عدم یکدستی در نتایج شده است. -محدودیت در سنین عمل‌آوری: پارامترهای مقاومتی بتن سخت‌شده حاوی RAP عمدتاً در سنین متداول ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه آزمایش شده‌اند؛ از این رو، ارزیابی رفتارهای بلندمدت در سنین بالاتر (نظیر عمل‌آوری ۹۰ روزه) می‌تواند به عنوان یک کیس مطالعاتی ویژه در پژوهش‌های آتی تعریف شود.

-عدم توازن در بررسی ذرات ریز و درشت: بخش عمده‌ای از ادبیات فنی موجود، مبتنی بر آزمایش‌های آزمایشگاهی با تغییر درصد درشت‌دانه RAP است و مطالعات بسیار محدودی به بررسی اثرات ورود ریزدانه RAP پرداخته‌اند. افزون بر این، فرآیند بازایفت هم‌زمان ریزدانه و درشت‌دانه RAP هنوز به طور گسترده و نظام‌مند مورد مطالعه قرار نگرفته است.

-خلأ در تحلیل‌های ریزساختاری: اسناد و پیشینه‌های پژوهشی محدودی در زمینه ارزیابی ویژگی‌های میکروساختاری مانند ناحیه انتقال وجهی یا (ITZ) در بتن‌های حاوی RAP در دسترس است.

-نیاز به توسعه رفتارهای ساختاری: مشخصات عملکردی کلیدی در بتن حاوی RAP از جمله کارایی، خستگی، مکانیک شکست، الگوهای ترک‌خوردگی، مقاومت ضربه‌ای، جمع‌شدگی (افت) و خزش، هنوز به طور جامع و عمقی کاوش نشده‌اند.

-ضرورت بازایفت هم‌زمان: شواهد تجربی نشان می‌دهند که به‌کارگیری درشت‌دانه‌های RAP نتایج مطلوب‌تری را نسبت به ریزدانه RAP به همراه دارد. با این حال، به منظور به حداکثر رساندن نرخ بازایفت پسماندها در آینده، توسعه راهکارهایی برای به‌کارگیری هم‌زمان بخش‌های ریز و درشت RAP در یک مخلوط واحد امری ضروری است.

-مدل‌سازی تنش-کرنش غیرخطی: مطالعات مربوط به رفتار تنش-کرنش تایید می‌کنند که بتن حاوی RAP به دلیل خواص شکل‌پذیری (انعطاف‌پذیری) ناشی از حضور قیر، مدلی کاملاً غیرخطی از خود نشان می‌دهد. نبود تحلیل‌های ساختاری اختصاصی در این حوزه، یک پتانسیل پژوهشی ارزشمند برای آینده به شمار می‌رود.

-تجاری‌سازی فرآورده‌های فرآوری: روش‌های فرآوری (اصلاح سطحی) سنگدانه‌های RAP به دو صورت حرارتی/مکانیکی (تیمار شده) و مستقیم (تیمار نشده)، طی سال‌های اخیر اهمیت بالایی یافته‌اند. اکنون این فرصت برای صنعت فراهم است تا با شناسایی و توسعه الگوهای بهینه شستشو یا حذف قیر، فرآیند فرآوری RAP را به سمت تجاری‌سازی هدایت کند.

با توجه به ضرورت‌های تحقق پایداری زیست‌محیطی، بتن حاوی RAP افق‌های جدیدی را پیش روی محققان می‌گشاید؛ حوزه‌های جذابی نظیر بتن‌های حاوی RAP مسلح‌شده با انواع الیاف، آنالیزهای دقیق میکروساختاری و بررسی رفتار پیوند ماتریکس سیمان-قیر، شناسایی افزودنی‌های شیمیایی و معدنی مناسب برای ارتقای دوام بلندمدت و همچنین تعدیل اثرات منفی پوشش قیری بر سزندگی بتن، از دیگر زوئ‌های پتانسیل‌دار برای تحقیق در درازمدت است. علاوه بر این، ارزیابی پتانسیل و حجم مصالح RAP در دسترس در سطوح منطقه‌ای و برنامه‌ریزی برای تولید انبوه سنگدانه‌های بازایفتی استاندارد، گامی کلیدی در جهت صنعتی‌سازی این محصول به شمار می‌رود.

۶-مراجع

- Baradaran, S., & Ameri, M. (2026). Rejuvenators and the Future of Sustainable Pavements: From the Rejuvenation of Aged Asphalt Binder to the Enhanced Performance of Recycled Asphalt Mixtures. *Road*, 34(127), 527-548.
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Ameri, M., Erarslan, N., & Sadowski, T. (2025). Evaluation of crack resistance in asphalt mixtures modified with recycled PET granules at low and intermediate temperatures. In *4th International Civil Engineering & Architecture Conference* (Vol. 1).
- Baradaran, S., Aliha, M. R. M., Maleki, A., & Underwood, B. S. (2024). Fracture properties of asphalt mixtures containing high content of reclaimed asphalt pavement (RAP) and eco-friendly PET additive at low temperature. *Construction and Building Materials*, 449, 138426. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138426
- Baradaran, S., Rahimi, J., Ameri, M., & Maleki, A. (2024). Mechanical performance of asphalt mixture containing eco-friendly additive by recycling PET. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02740. doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02740
- Baradaran, S., Ziaee, S. A., Ameri, M., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and II fracture behavior of green warm mix asphalt containing recycled plastic at various temperatures using ENDB testing method. *Case Studies in Construction Materials*, e05549. doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05549
- Behnia, B., Dave Eshan, V., Ahmed, S., Buttlar, W.G., Reis, H., (2011). Effects of recycled asphalt pavement amounts on low-temperature cracking performance of asphalt mixtures using acoustic emissions, *Transportation Research Record* 2208 64-71. doi.org/10.3141/2208-09
- Bida, S.M., Danraka, M., Maali, J.M., (2016). Performance of reclaimed asphalt pavement (RAP) as a replacement of fine aggregate in concrete, *International Journal of Science Research* 5(4) .
- Buttlar, W.G., Rebholz, F.E., Nassar, W., (2005). Detection of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in Bituminous Mixtures, Report ITRC FR 02-2, Illinois Department of Transportation, *Springfield*.
- Collins, R.J., Ciesielski, S.K., (1994). Recycling and use of waste materials and by-products in highway construction, in: *NCHRP Synthesis of Highway Practice*, No. 199, Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Debbarma, S., Ransinchung, G.D.R.N., Singh, S., (2020). Improving the properties of RAP-RCPP mixes by incorporating supplementary cementitious mineral admixtures as part addition of Portland cement, *Journal of Materials in Civil Engineering*. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003283](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003283)
- Abraham, S.M., Ransinchung, G.D.R.N., (2020). Laboratory research on reclaimed asphalt pavement-inclusive cementitious mixtures, *ACI Materials Journal*, 193-204.
- Akatsu, K., Kanou, Y., Akiba, S., (2022). Technical approaches to the recycling of reclaimed asphalt pavement into aggregate and binder, *Construction Materials* 2, 85-100. doi.org/10.3390/constrmater2020007
- Andrew, B., Buyondo, K.A., Kasedde, H., Kirabira, J.B., Olupot, P.W., Yusuf, A.A., (2022). Investigation on the use of reclaimed asphalt pavement along with steel fibers in concrete, *Case Studies in Construction Materials*. doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01356
- Ayar, P., Baradaran, S., & Abdipour Vosta, S. (2022). A review on the effect of various additives on mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA). *Road*, 30(110), 57-86.
- Bakash, S.A., Sowmith, C., Rakesh, G., Rahul, B.G., (2013). A review of the use of recycled materials in rigid pavements, *International Journal of Engineering Research and Technology* 2(4).
- Baradaran, M. S., Qazanfari, R., & Baradaran, S. (2023). Study of soil reinforcement in the east of Mashhad using glass granule. *Materials Research Express*, 10(5), 055202. doi.org/10.1088/2053-1591/acd5af
- Baradaran, S., & Aliha, M. R. M. (2025). Mode I and Mode II fracture assessment of green asphalt pavements containing plastic waste and RAP at low and intermediate temperature. *Results in Engineering*, 25, 103734.
- Baradaran, S., & Ameri, M. (2023). Investigation of rutting failure in asphalt mixtures and its improvement strategies. *Road*, 31(114), 53-70.
- Baradaran, S., & Ameri, M. (2025). Durable and sustainable warm mix asphalt pavement using value-added recycled PET. *Case Studies in Construction Materials*, e05362. doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05362
- Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Comprehensive evaluation of cracking performance in modified HMA and WMA asphalt mixtures using the SCB test. *Alexandria Engineering Journal*, 133, 349-369. doi.org/10.1016/j.aej.2025.11.029
- Baradaran, S., & Ziaee, S. A. (2025). Review of the Mechanical Properties of Asphalt Pavement Reinforced with Natural Plant Fibers as an Eco-Friendly Solution in Pavement Engineering. *Road*.
- Baradaran, S., Ziaee, S. A., & Aliha, M. R. M. (2026). Enhancing mechanical performance of rubberized asphalt pavement by using recycled plastic waste. *Construction and Building Materials*, 539, 147464. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.147464

- Hanson, C., Noland, R., Cavale, K., (2012). Life-cycle greenhouse gas emissions of materials used in road construction, *Transportation Research Record* 2287 (2012) 174–181.
- Hassan, M., Brooks, K.E., Erdman, J.J., (2000). The use of reclaimed asphalt pavement aggregates in concrete, *Waste Management Series* 1, 121–128.
- Hossiney, N., Tia, M., Bergin, M.J., (2010). Concrete containing RAP for use in concrete pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology* 3(5), 251–258.
- Huang, B., Shu, X., Burdette, E.G., (2006). Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavement, *Magazine of Concrete Research* 58(5), 313–320.
- Huang, B., Shu, X., Li, G., (2005). Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements, *Cement and Concrete Research* 35(10), 2008–2013.
- Hung, V.Q., Egodawatta, P., Gallage, C., Dawes, L., (2017). Investigating potential environmental issues of using recycled materials in road construction, *Proceedings of RTET-2017*, Singapore.
doi.org/10.17758/EIRAI.F0817113
- IRC:121-(2017), Guidelines for Use of Construction and Demolition Waste in Road Sector, IS 383, *Indian Standard – Coarse and Fine Aggregate for Concrete Specification*, Third Revision.
- Jaspreet, S., Jashanjot, S., Duggal, A.K., (2015). A review paper on reclaimed asphalt pavement (RAP), *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research* 2(8).
- Jitendra, K.T., Han, J., (2015). Recent development of recycled asphalt pavement (RAP) bases treated for roadway applications, *Transportation Infrastructure Geotechnology* 2, 68–86.
doi.org/10.1007/s40515-015-0018-7
- John, F., (2021). Use of glass fibre reinforced polymer bars in concrete pavements, Australian Society for Concrete Pavements (ASCP).
- Kamboozia, N., Salimi, A., & Dolati, H. (2025). Evaluation of Widely Used Concrete Self-Healing Methods for Use in Road Infrastructure-A Review. *Road*, 33(122), 21-44.
- Li, S., Zhang, X., Zhao, Y., Jing, H., Lyu, P., & Shan, J. (2026). Strength Degradation and Chloride Ion Diffusion Behavior of Concrete under Simulated Marine Exposure. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(5), 475.
- Magar, S., Xiao, F., Singh, D., Showkat, B., (2022). Applications of reclaimed asphalt pavement in India – a review, *Journal of Cleaner Production* 335.
doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130221
- Mathias, V., Sedran, T., Larrard, F.D., (2004). Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads, *Proceedings PRO 40 of the RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building Structures*, Barcelona.
- Debbarma, S., Ransinchung, G.D.R.N., Singh, S., (2019). Suitability of various supplementary cementitious admixtures for RAP inclusive RCCP mixes, *International Journal of Pavement Engineering*.
doi.org/10.1080/10298436.2019.1703981
- Debbarma, S., Ransinchung, G.D.R.N., Singh, S., (2020). Zinc waste as a substitute for Portland cement in roller-compacted concrete pavement mixes containing RAP aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*.
doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003278
- Debbarma, S., Selvam, M., Surender, S., (2020). Can flexible pavements' waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements? – A critical review, *Construction and Building Materials*.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120417
- Devulapalli, L., Kothandaraman, S., Sarang, G., (2021). Evaluation of fracture characteristics of reclaimed asphalt pavement incorporated stone matrix asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering* 33(11).
doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003945
- Devulapalli, L., Sarang, G., Kothandaraman, S., A (2019). Review on the mechanisms involved in reclaimed asphalt pavement, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 185–196.
- Devulapalli, L., Sarang, G., Kothandaraman, S., (2022). Characteristics of aggregate gradation, drain down and stabilizing agents in stone matrix asphalt mixtures: a state of art review, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*.
doi.org/10.1016/j.jtte.2021.10.007
- Devulapalli, L., Sarang, G., Kothandaraman, S., (2020). Effect of rejuvenating agents on stone matrix asphalt mixtures incorporating RAP, *Construction and Building Materials* 254.119298.
- Dong, Q., Huang, B., (2014). Laboratory evaluation on resilient modulus and rate dependencies of RAP used as unbound base material, *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(2), 379–383.
- Evangelista, L., Brito, J.D., (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites* 29(5) 397–401.
doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004
- Fakhri, M., Amoosoltani, E., Farhani, M., Ahmadi, A., (2017). Determining optimal combination of RCCP mixture containing RAP and crumb rubber using hybrid ANN-GA method considering energy absorbency approach, *Canadian Journal of Civil Engineering* (2017).
doi.org/10.1139/CJCE-2017-0124
- Federal Highway Administration, (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, *US Department of Transportation*, Publication No. FHWA-HRT-11–021.

- Reddy, M.S., Suvarna, P., (2016). Detailed study on reclaimed asphalt pavement in pavement quality cement concrete, *International Journal of Civil Engineering and Technology* 7(5), 382–392.
- Rout, M.K.D., Sahdeo, S.K., Biswas, S., Roy, K., Sinha, A.K., (2023). Feasibility study of reclaimed asphalt pavements (RAP) as recycled aggregates used in rigid pavement construction, *Materials* 16 1504.
doi.org/10.3390/ma16041504
- Sahan, M.F., Unsal, I., (2023). An experimental analysis for impact behavior of Portland cement concrete substituted with reclaimed asphalt pavement aggregate, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*.
doi.org/10.1007/s40996-023-01052-7
- Salimi, A., & Ziaee, S. A. (2025). A review of the use of permeable concrete as road pavement: evaluation of physical, mechanical properties, durability and environmental benefits. *Road*, 33(124), 225-254.
- Salimi, A., Kamboozia, N., & Aliha, M. R. M. (2024). Experimental Investigation of the self-healing capability of Roller-Compacted Concrete (RCC) containing epoxy-filled glass tubes through fracture properties. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03369.
doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03369.
- Salimi, A., Sengun, E., Rahman, M. L., King, D., Ceylan, H., Kim, S., & Taylor, P. C. (2026). Mineral-blended polymeric microspheres as an alternative to air-entraining agents in roller compacted concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 531, 146618.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.146618
- Sarir, M., Haq, N.U., Ullah, I., Noman, M., Shah, A.A., (2023). Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in concrete in perspective of rigid pavements, *Civil Engineering Infrastructures Journal*.
doi.org/10.22059/CEIJ.2023.345511.1857
- Sepuri, H.K., Hossiney, N., Chandra, S., Chen, Y., Bekoe, P.A., Nagavelly, V.S., (2022). Effect of recycled asphalt pavement (RAP) aggregates on strength of fly ash-GGBS-based alkali-activated concrete (AAC), *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*.
doi.org/10.1007/978-981-16-9744-9_15
- Serpell, A., Alarcon, L.F., (1998). Construction process improvement methodology for construction projects, *International Journal of Project Management* 16(4), 215–221.
- Shima, H., Tateyashiki, H., Matsushashi, R., Yoshida, Y., (2005). An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis, *Journal of Advanced Concrete Technology* 3(1), 53–67.
- Silva, R.V., de Brito, J., Dhir, R.K., (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for
- Mathias, V., Sedran, T., Larrard, F.D., (2004). Recycling reclaimed asphalt pavement in concrete roads, *Proceedings PRO 40 of the RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building Structures*, Barcelona, november.
- McNeil, K., Kang, T.K., (2013). Recycled concrete aggregates: a review, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 7, 61–69.
- Memon, M.A., Hassan, D., Pathan, A., (2016). Rigid pavement design using recycled asphaltic materials, *Sindh University Research Journal* 48(2) 399–406.
- Milada, A., Taiba, A.M., Ahmedab, A.G.F., Sollac, M., Yusoff, N.I.M., (2020). A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications, *Jurnal Teknologi*.
doi.org/10.11113/jt.v82.14320
- Mishra, B., A (2015). study on use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in flexible pavements, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4(12).
- Nandi, S., Ransinchung, G.D.R.N., (2023). Performance characteristics of concrete paver blocks incorporating individual and combined fractions of reclaimed asphalt pavement aggregates under different curing regimes, *Journal of Materials in Civil Engineering* 35(4).
doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004680
- Nia, S. B., Salimi, A., & Chari, M. N. (2023). Enhancing energy efficiency in lightweight concrete walls: validating the effectiveness of glycerin wax as a phase change material through finite volume method (FVM).
- Okafor, F.O., (2010). Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies* 17, 47–58.
- Panditharadhya, B.J., Reshma, E.K., Suhas, R., (2015). Utilization of RAP aggregates in pavement quality concrete, *Proceedings of TISI Conference*,
- Preethi, J., Deepak, P., Nikhil, N., Omkar, G., Vidya, R., Bhuvaneshwari, P., (2023). Strength characteristics of recycled asphalt pavement aggregate based geopolymer concrete, *Materials Today: Proceedings*.
doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.129
- Priyanka, P., Mukesh, C., Bharat, N., (2020). Utilization of reclaimed asphalt pavement materials in rigid pavement, *International Journal of Engineering Research and Technology* 9(6).
- Rahman, S.K., Khatak, M.J., (2021). Mechanistic and microstructural characteristics of roller compacted geopolymer concrete using reclaimed asphalt pavement, *International Journal of Pavement Engineering* 23(3), 1–19.
doi.org/10.1080/10298436.2021.1945057

- Tam, V.W.Y., Wang, K., Tam, C.M., (2007). Ways to facilitate the use of recycled concrete aggregate, *Waste and Resource Management Journal*. doi.org/10.1680/warm.2007.160.3.125
- Technical Note TN193, (2020). Use of Recycled Materials in Road Construction, Department of Transport and Main Roads, *Queensland*.
- Thakur, J.K., Han, J., Pokharel, S.K., Parsons, R.L., (2012). Performance of geocell-reinforced recycled asphalt (RAP) bases over weak subgrade under cyclic loading, *Geotextiles and Geomembranes*. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2012.06.004
- TIFAC-DST, (2001). *Utilisation of Waste from Construction Industry*.
- Yang, Q., Yin, H., He, X., Fangliang, C., Ali, A., Mehta, Y., Yan, B., (2020). Environmental impacts of reclaimed asphalt pavement on leaching of metals into groundwater, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 85, 102415. doi.org/10.1016/j.trd.2020.102415
- Yao, Y., Gao, J., Yang, J., Huang, B., Song, L., (2022). Sustainable asphalt concrete containing RAP and coal gangue aggregate: performance, costs, and environmental impact, *Journal of Renewable Materials* 10(8), 2263–2285. doi.org/10.32604/jrm.2022.018911
- concrete production, *Construction and Building Materials*. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117
- Singh, S., Ransinchung, G.D., Debbarma, S., Kumar, P., (2018). Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from sugarcane mill for production of concrete mixes, *Journal of Cleaner Production* 174, 42–52.
- Singh, S., Ransinchung, G.D., Kumar, P., (2017). An economical processing technique to improve RAP inclusive concrete properties, *Construction and Building Materials*. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.030
- Somvanshi, A., (2019). India drowns in construction, demolition debris.
- Soosan, G.T., Susan, P., Rajan, K.N., Ameena, N., Sarathlal, G., Nithin, T., (2016). Pavements using reclaimed aggregates, *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal* 3(2). doi.org/10.5121/civej.2016.3213
- Tam, V.W., Tam, C.M., (2008). Waste reduction through incentives: a case study, *Building Research and Information* 36(1), 37–43.

A Review of Approaches for Utilizing Reclaimed Asphalt Pavement in Concrete Pavement Construction

*Mohammadreza Ghaffari, M.Sc. Graduate, Department of Transportation Engineering,
Faculty of Civil Engineering, Imam Khomeini International University, Iran.*

*Milad Soleimani, B.Sc., Graduate, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.*

*Mohammad Ali Ghazanfari, Ph.D., Graduate, Department of Civil Engineering,
Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

E-mail: ghmohammadali30@gmail.com

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

Evaluating the recyclability of materials within the construction industry has emerged as an accelerating research focus over the past decade. This growing interest is rooted in pivotal environmental benefits, such as the preservation of pristine natural resources and the reduction of waste volume disposed of in landfills. Within this context, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), a byproduct generated from the milling and demolition of flexible pavements, has recently garnered significant attention. This material has been extensively evaluated as a potential alternative to natural aggregates (both fine and coarse) in the production of concrete pavements, with its strength and durability performance indicators benchmarked against conventional concrete. However, a fundamental question remains: Does RAP truly constitute a promising and flawless alternative to virgin aggregates? Addressing this critical inquiry, this review paper aims to comprehensively elucidate the feasibility, potential, and limitations of incorporating RAP into concrete pavements. To this end, a thorough investigation of available literature—including conference proceedings, journal articles, technical reports, codal guidelines, and reference books—was conducted to establish a strategic and integrated understanding of RAP-inclusive concrete performance to guide future research. This literature review maps out the evolutionary trajectory and developmental stages that RAP materials have undergone within the civil engineering industry. Furthermore, the evidence indicates that efforts directed toward optimizing and enhancing the strength of RAP-incorporated concrete have been limited thus far; consequently, there is an urgent need to develop novel strategies to upgrade and enrich the functional potential of these materials in rigid pavements. Ultimately, the insights provided by this review paper are expected to open new horizons and dimensions for academics and researchers, thereby establishing an effective platform for the development of sustainable processes in the pavement industry.

Keywords: Concrete Pavements, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Sustainable Pavement, Asphalt Pavement Recycling