ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دینامیکی مخلوط‌های لایه اساس حاوی مصالح تراشه آسفالت (RAP)

مقاله علمی – پژوهشی

سید محمد منصورزاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
احمدرضا محبوبی اردکانی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
عطا آقایی آرایی، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a_mahboubi@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵
صفحه ۱۸-۱

چکیده

مصالح تراشه آسفالت یا خرده آسفالت (RAP) که شامل سنگدانه و قیر می‌باشد، را می‌توان در مخلوط آسفالت بازیافتی یا لایه اساس در روسازی مورد استفاده قرار داد. بازیافت این مصالح می‌تواند به حفظ منابع سنگدانه طبیعی، کاهش مصرف انرژی، کاهش فاصله حمل و کاهش هزینه دپوی مصالح بازیافتی کمک نماید. با این حال، به نظر می‌رسد مصالح RAP به دلیل تغییرپذیری و تنوع منابع و همچنین پارامترهای مقاومتی و سختی ناکافی نمی‌تواند به تنهایی و بدون افزودنی تثبیت کننده، به عنوان یک جایگزین برای مصالح سنگدانه طبیعی در لایه اساس روسازی استفاده شود. این امر مستلزم اتخاذ یک روش تثبیت شیمیایی یا مکانیکی مقرون به صرفه برای استفاده از RAP به عنوان مصالح اساس روسازی است. در این مقاله پس از مروری بر ویژگی‌های مصالح RAP و مخلوط‌های سنگدانه حاوی درصدهای مختلف RAP، نتایج مطالعات موجود اخیر در خصوص برخی خواص مقاومتی و دینامیکی این مصالح ارائه می‌گردد. بر اساس جمع‌بندی نتایج حاصل از مطالعات موجود، به نظر می‌رسد که با افزایش درصد مصالح RAP در مخلوط‌های حاوی RAP، مدول برجهندگی M_R و تغییر شکل‌های ماندگار تجمعی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مصالح تراشه آسفالت، لایه اساس، مدول برجهندگی، تغییر شکل ماندگار تجمعی

۱-مقدمه

امروزه در سطح دنیا با توجه به هزینه‌های زیاد ساخت روسازی‌های نو با مصالح دانه‌ای تازه و از طرفی کمبود و منابع رو به نقصان این مصالح، کاربرد مصالح روسازی‌های مضمحل شده برای عملیات ساخت و بهسازی، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. علاوه بر این استفاده مجدد از این مصالح آثار مفید دیگری همچون کاهش مصرف انرژی و سوخت‌های فسیلی، کاهش آلودگی هوا و محیط زیست، کاهش ضخامت لایه‌های روسازی، کاهش هزینه حمل و همچنین کاهش هزینه نگهداری و ذخیره مصالح بازیافت شده را در پی دارد. در ایالات متحده اقدامات گوناگونی توسط دپارتمان‌های حمل و نقل[1] و سایر آژانس‌های فدرال انجام شده است تا میزان استفاده از مصالح تراشه آسفالت[2] (RAP) را در پروژه‌های بهسازی و ساخت بزرگراه‌ها، برای کاهش مشکلات مربوط به دپوی این مصالح و ترغیب به استفاده از مصالح روسازی پایدار، افزایش دهند (Das et al., 2018). بیش از ۷۶/۹ میلیون تن مصالح تراشه آسفالت بازیافتی در روسازی‌های جدید در ایالات متحده در سال ۲۰۱۶ استفاده شده است (Hansen and Copeland, 2017). از مصالح RAP می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی داغ[3]،

گرم، بازیافت سرد، مصالح اساس و زیر اساس استفاده نمود. استفاده از مصالح تراشه آسفالت در اختلاط مصالح اساس دارای مزایای فراوانی است که در بخش‌های بعدی این مقاله به آن پرداخته خواهد شد. در خصوص استفاده از RAP در لایه اساس مطالعات متعددی انجام شده است. در برخی از این مطالعات امکان استفاده ماکزیمم از RAP بررسی شده و مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد. معمولاً در روسازی انعطاف‌پذیر مقدار CBR برای زیراساس و اساس با مصالح دانه‌ای، به ترتیب برابر با حداقل ۳۰ و ۸۰ درصد است. اما مقدار CBR مخلوط ۱۰۰ درصد RAP معمولا در محدوده بین ۸ تا ۲۰ درصد است (Saha and Mandal, 2017). لذا، برای تأمین CBR مورد نیاز و برآورده شدن دیگر الزامات فنی، لازم است که مصالح RAP با افزودنی سیمان یا دیگر مصالح تثبیت کننده سنتی یا نوین تثبیت شوند. از سوی دیگر یکی از مسائل مهم در خصوص لایه روسازی تثبیت شده، بحث عملکرد و دوام آن در اثر تکرار بارگذاری بلند مدت و تغییر شرایط اقلیمی و محیطی است. با وجود افزایش مقاومت بستر و صرفه‌جویی در جابجایی خاک، بستر و روسازی در دراز مدت دچار فرسودگی زودرس می‌گردد. همچنین با وجود گسترش مصالح نوین، هنوز مصالح سنتی تثبیت به ویژه در کشور ما مورد توجه می‌باشد و مقایسه جامعی به لحاظ فنی، اجرایی و مالی (تحلیل بهره‌وری) بین آنها انجام نشده است. در گذشته پژوهشگران متعددی در مورد بهبود عملکرد لایه‌های روسازی با استفاده از مصالح RAP با مخلوط کردن آن با سنگدانه‌های تازه و یا با استفاده از تثبیت کننده‌های شیمیایی مانند آهک، سیمان و خاکستر بادی مطالعه نموده‌اند. این مطالعات توصیه می‌کنند که مخلوط RAP و سنگدانه بکر[4] با استفاده از مواد افزودنی سیمانی به راحتی در لایه اساس روسازی قابل استفاده می‌باشد. در این مقاله پس از مروری بر ویژگی‌های مصالح RAP و مخلوط‌های حاوی RAP، ضمن دسته بندی پژوهش‌های موجود در این زمینه، نتایج مطالعات موجود اخیر در خصوص برخی خواص مقاومتی و دینامیکی این مصالح ارایه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

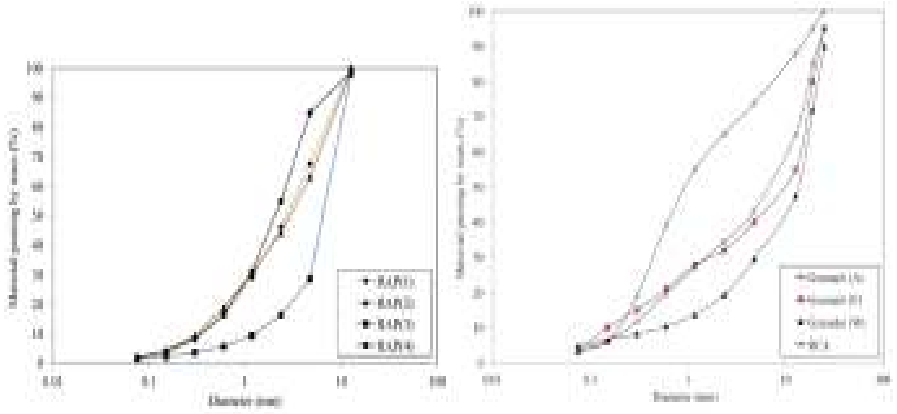
مطالعات موجود را می‌توان در دو دسته یا گروه طبقه‌بندی نمود. گروه اول، شامل مطالعات آزمایشگاهی تعیین پارامترهای مقاومتی و خواص دینامیکی مصالح RAP یا مخلوط‌های حاوی RAP بدون استفاده از افزودنی تثبیت کننده هستند. از جمله می‌توان مطالعات (Arshad and Ahmed, 2017)، (Arshad, 2019)، (Mousa et al., 2020) را برشمرد که در این گروه قرار می‌گیرند. گروه دوم، شامل مطالعات آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهای مقاومتی و خواص دینامیکی مصالح فوق‌الذکر در شرایط تثبیت شده می‌باشد. از جمله مطالعاتی که در این گروه قرار می‌گیرند می‌توان به مطالعات (Puppala et al., 2011)، (Jitendra et al., 2015)، (Saha and Mandal, 2017)، (Seferoglu et al., 2018)، (Suddeepong et al., 2018)، (Ghanizadeh et al., 2018)، (Arshad, 2020) اشاره نمود. برخی از مطالعات فوق به تعیین ویژگی‌های مقاومتی همچون مقاومت تک محوری، نسبت باربری کالیفرنیا، مقاومت کششی غیرمستقیم و برخی دیگر به بررسی پارامترهای دینامیکی از جمله مدول برجهندگی[5] و تغییر شکل‌های ماندگار[6] مخلوط مصالح RAP تثبیت شده یا تثبیت نشده تحت بارهای دینامیکی پرداخته‌اند.

۳- بحث و تحلیل مسأله

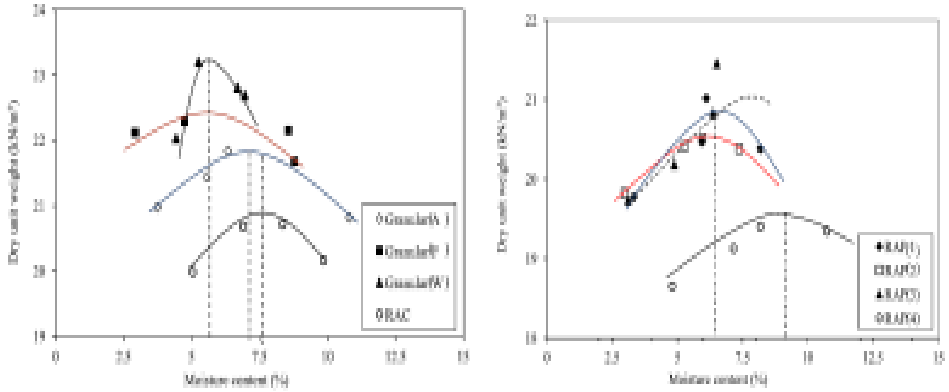
در این قسمت به بررسی مطالعات موجود شامل گروه اول و دوم تشریح شده در بند ۲ فوق پرداخته می‌شود.

۳-۱- بررسی مطالعات گروه اول

مطالعه اول (Arshad and Ahmed, 2017): در این مطالعه آزمایشگاهی، به بررسی مدول برجهندگی و ویژگی‌های تغییر شکلی نمونه‌های مخلوط شامل مصالح دانه‌ای تازه، مصالح RAP و مصالح بتن بازیافتی[7] (RCA) پرداخته شد. برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، از ٤ نوع مصالح RAP با عنوان RAP(1)، RAP(2)، RAP(3) و RAP(4) و ۳ نوع مصالح دانه‌ای با عنوان (A/F/W) و یک نوع مصالح RCA استفاده گردید. در ساخت این نمونه‌ها از دو درصد متفاوت RAP استفاده شد و برخی نمونه‌ها شامل ۲۵٪ و برخی شامل ۷۵٪ مصالح RAP بودند. در شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح دانه‌ای و مصالح RAP ارایه گردیده است. همچنین در شکل ۲ نمودارهای دانسیته خشک- رطوبت برای هریک از مصالح ارایه شده است (Arshad and Ahmed, 2017).



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی مصالح دانه‌ای A، F، W، RCA و RAP (Arshad and Ahmed, 2017)



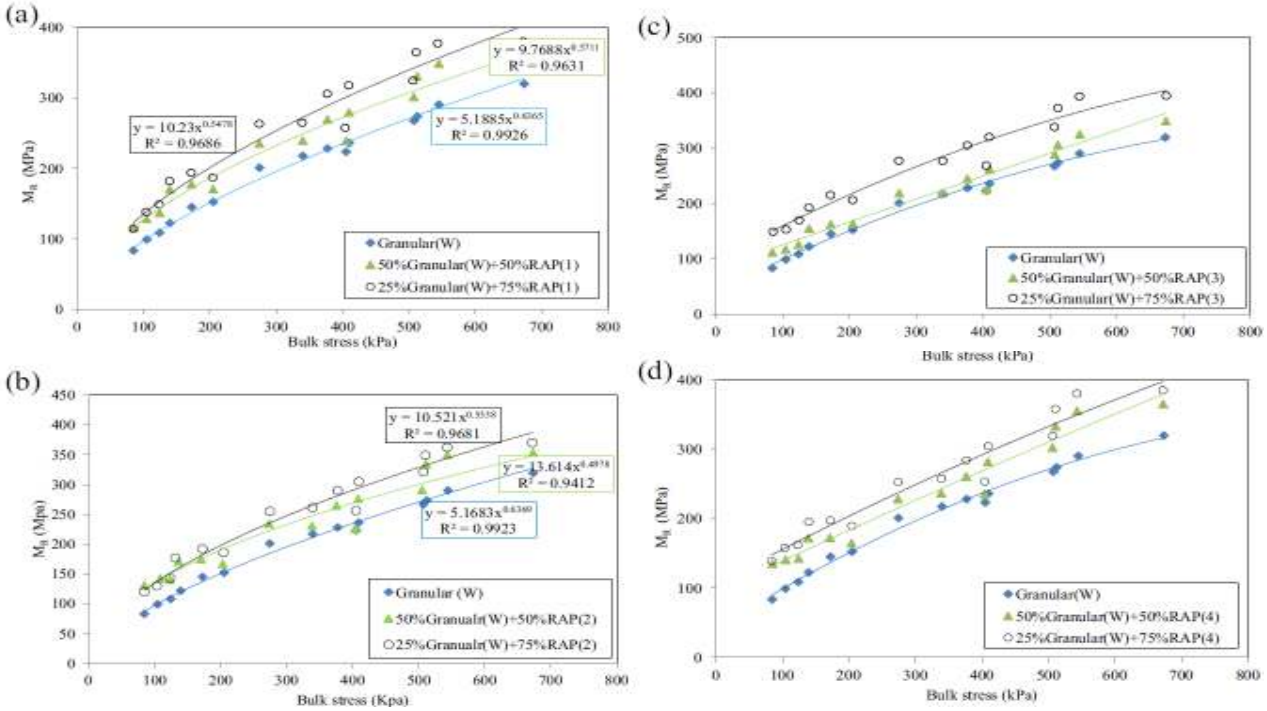
شکل ۲. نمودارهای دانسیته خشک- رطوبت برای هر یک از مصالح (Arshad and Ahmed, 2017)

برنامه آزمایش‌ها مطابق جدول ۱ و حداقل تعداد آزمایش‌های مدول برجهندگی و مدول محدود شده[۸] هر کدام ۳۶ عدد می‌باشد. ۳ نمونه بدون افزودن RAP و تنها با استفاده از مصالح دانه‌ای و ۱ نمونه بدون افزودن RAP و تنها با استفاده از RCA و مابقی نمونه‌ها با ۲۵٪ و ۷۵٪ افزودنی RAP تهیه شده است. آزمایش مدول برجهندگی بر اساس استاندارد AASHTO T307-99 انجام شده است. قطر و ارتفاع قالب نمونه‌ها برای آزمایش مدول برجهندگی به ترتیب برابر با ۱۵۲ و ۳۰۵ میلیمتر بوده و مطابق این استاندارد، ذرات بزرگتر از ۳۷,۵ میلیمتر حذف شده است. اما برای مینیمم کردن تأثیر حذف ذرات بزرگتر، یک سری آزمایش فشاری یک بعدی نیز با استفاده از یک قالب با قطر و ارتفاع ۳۰۰ میلیمتر انجام گردیده است. این قالب برای ذرات با ابعاد ۴۰ تا ۵۰ میلیمتر قابل کاربرد است. مدول محدود شده که مبین فشردگی‌پذیری و سختی مصالح است از این آزمایش قابل حصول می‌باشد.

جدول ۱. برنامه آزمایش‌ها (Arshad and Ahmed, 2017)

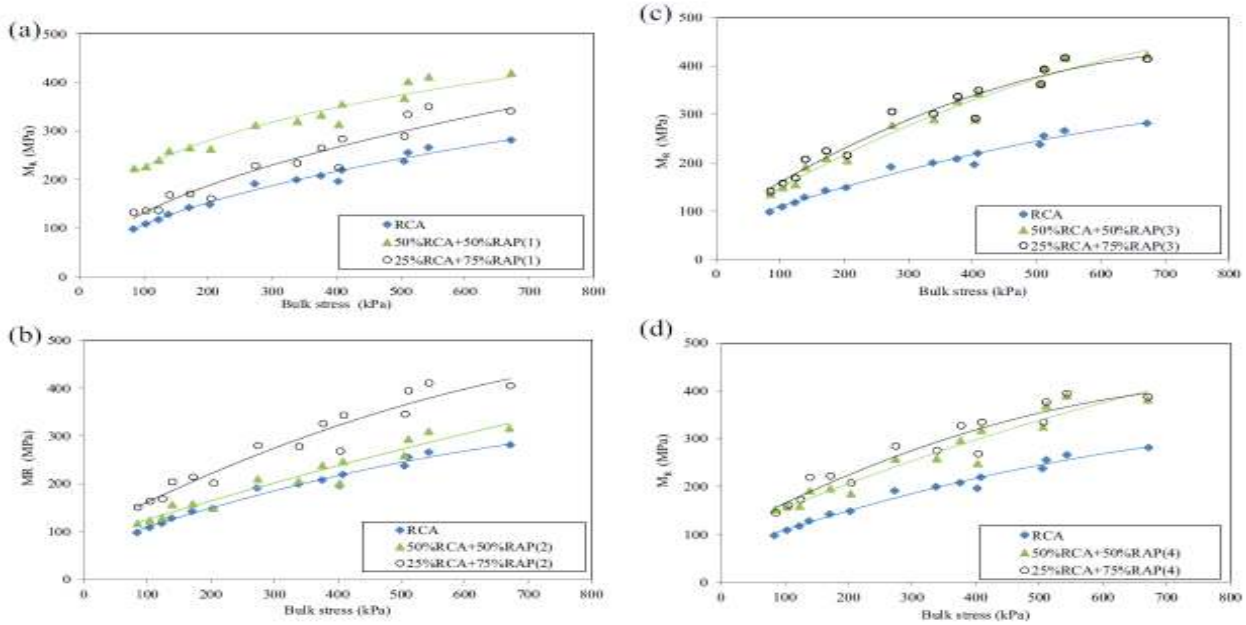
Fresh granular sample/RCA	RAP	Minimum Number of Resilient Modulus Tests	Minimum Number of Constrained Modulus Tests
Fresh granular sample A, F, W	-	3	3
RCA	-	1	1
Fresh granular sample A, F, W	$4 \times 2^{*}$	$3 \times 2 \times 4 = 24$	$3 \times 2 \times 4 = 24$
RCA	$4 \times 2^{*}$	$2 \times 4 = 8$	$2 \times 4 = 8$
Total		36	36

در شکل ۳ تغییرات مدول برجهندگی بر حسب تنش حجمی[۹] برای مصالح دانه‌ای نوع W با و بدون افزودنی RAP نشان داده شده است. به طور کلی این شکل نشان دهنده افزایش مقدار مدول برجهندگی با افزایش درصد RAP از ۰ به ۲۵٪ و سپس ۷۵٪ می‌باشد.



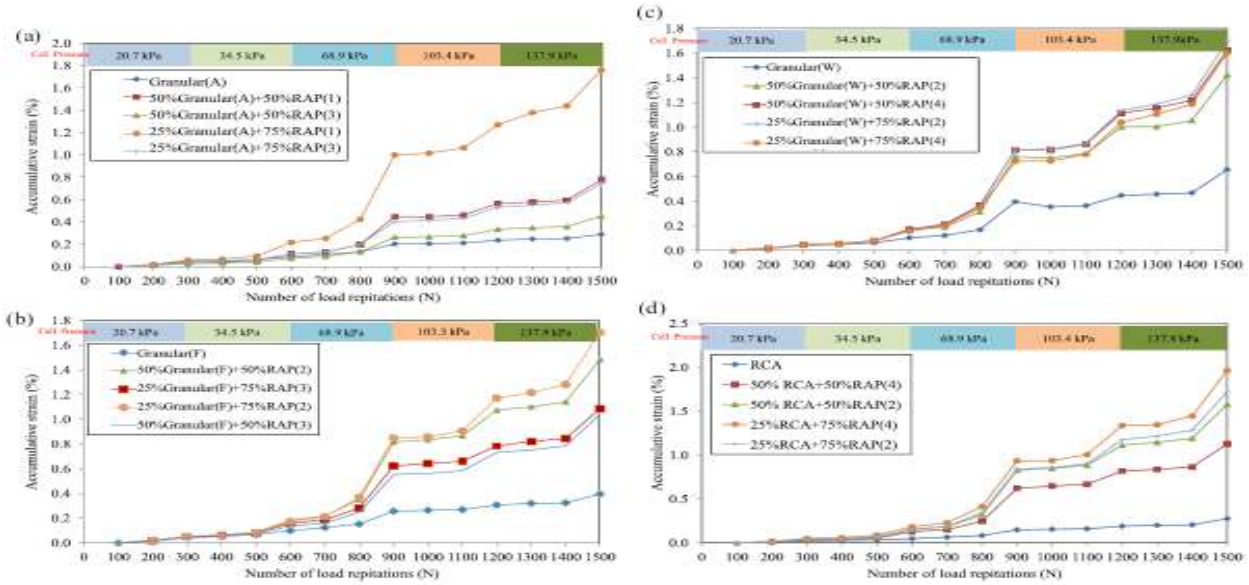
شکل ۳. تأثیر افزایش RAP بر مدول برجهندگی برای مصالح دانه‌ای نوع W (Arshad and Ahmed, 2017)

همچنین در شکل ٤ تغییرات مدول برجهندگی بر حسب تنش حجمی برای مصالح بتن بازیافتی RCA با و بدون افزودنی RAP نشان داده شده است. به طور کلی این شکل نیز نشان دهنده افزایش مدول برجهندگی با افزایش درصد RAP می‌باشد.



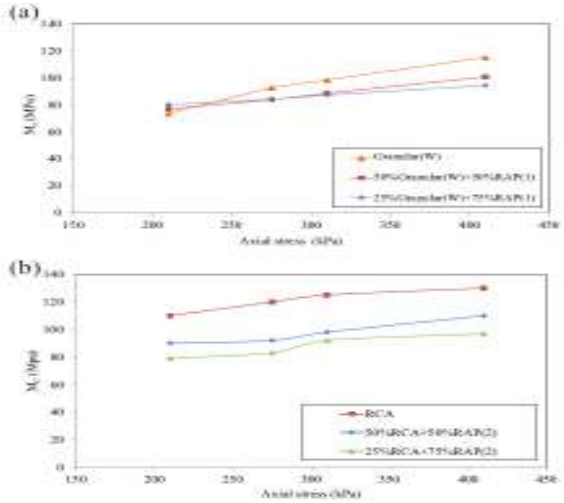
شکل ٤. تأثیر افزایش RAP بر مدول برجهندگی برای مصالح RCA (Arshad and Ahmed, 2017)

در شکل ۵ نمودار کرنش ماندگار تجمعی[10] در برابر تعداد سیکل بارگذاری برای هر یک از مصالح و مخلوطهای مربوطه ارایه گردیده است. با توجه به نمودارها می‌توان گفت که به طور کلی با افزایش درصد RAP مقدار کرنش تجمعی افزایش می‌یابد.

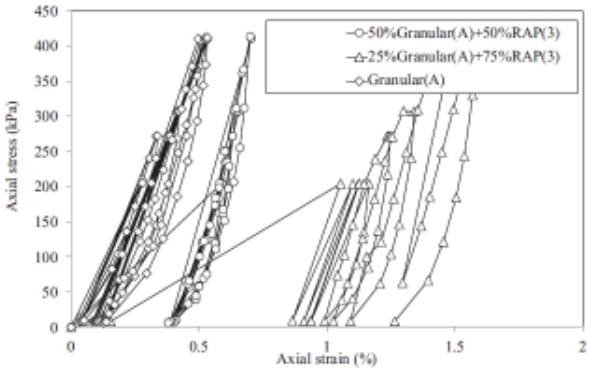


شکل ۵. تغییرات کرنش تجمعی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری در فشارهای محدود کننده متفاوت برای هر یک از مصالح با و بدون افزودن RAP (Arshad and Ahmed, 2017)

در شکل ٦ نتایج آزمایش فشاری یک بعدی (مدول محدود شده) برای مصالح نوع W و RCA ارائه شده است. مطابق این شکل با افزایش مقدار RAP مقدار مدول محدود شده بر خلاف مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. در آزمایش فشاری یک بعدی نیز تأثیر درصد RAP بر میزان تغییر شکل‌های ماندگار بررسی گردید. به عنوان نمونه در شکل ۷ نمودار تغییرات تنش- کرنش محوری برای مصالح نوع A با و بدون افزودن RAP نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش درصد RAP کرنش عمودی ماندگار نیز افزایش می‌یابد. همچنین بخش بیشتر این کرنش ماندگار در بارگذارهای اولیه رخ می‌دهد.

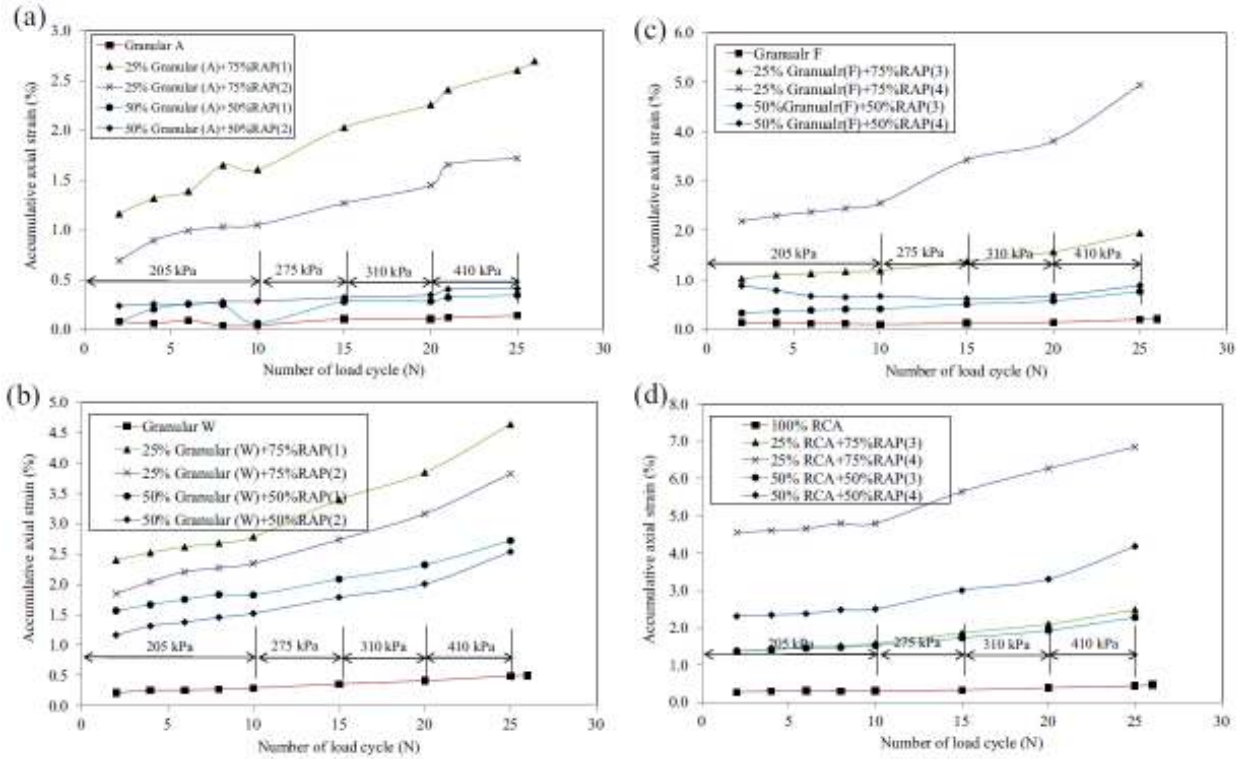


شکل ٦. تغییرات مدول محدود شده بر حسب افزایش تنش محوری و تغییر درصد RAP (Arshad and Ahmed, 2017)



شکل ۷. تأثیر درصد RAP بر تغییر شکل‌های ماندگار در آزمایش فشاری یک بعدی برای مصالح نوع A (Arshad and Ahmed, 2017)

در شکل ۸ تغییرات کرنش ماندگار بر حسب تعداد سیکل بارگذاری محوری در آزمایش فشاری یک بعدی ارایه شده است. از این شکل ملاحظه می‌شود که مقدار کرنش ماندگار تجمعی نه تنها به درصد و نوع RAP بلکه به تعداد سیکل و سطح تنش محوری هم بستگی دارد.



شکل ۸. تأثیر درصد RAP بر کرنش ماندگار در آزمایش مدول محدود شده برای مصالح مختلف (Arshad and Ahmed, 2017)

به عنوان یک نتیجه از این مطالعه، چنین بیان شد که افزودن RAP به مصالح دانه‌ای تازه، منجر به مدول‌های برجهندگی بالاتری نسبت به نمونه‌های با مصالح دانه‌ای بدون RAP می‌شود که این نتایج می‌تواند دلگرم کننده و رضایت‌بخش باشد به ویژه در درصدهای بالای RAP در حدود ۷۵٪. با این وجود، افزایش کرنش‌های ماندگار بالاتر تحت بارگذاری سیکلی (به دلیل افزودن مقدار RAP) ممکن است برای عمر مفید روسازی مضر باشد. همچنین اعلام گردید که آزمایش مدول محدود شده، روش دیگری برای بررسی سختی و تغییر شکل نمونه‌های مصالح دانه‌ای حاوی RAP با اندازه ذرات بزرگتر تا ۵۰ میلی‌متر ارایه می‌دهد. افزایش کرنش به دلیل افزودن محتوای RAP به نمونه‌های دانه‌ای تازه نیز در آزمون‌های مدول محدود شده،

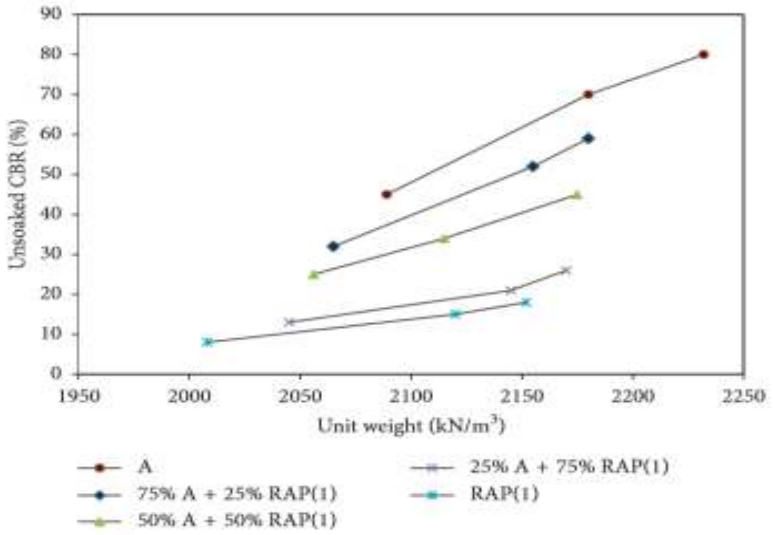
مشاهده گردید. یکی از محدودیت‌های این مطالعه، تعداد کم سیکل‌های بارگذاری (۱۵۰۰ سیکل) نسبت به شرایط واقعی جاده اعلام گردید. مطالعه دوم (Arshad, 2019): در این مطالعه به بررسی همبستگی بین CBR و مدول برجهندگی مصالح بازیافتی RAP و RCA پرداخته شد. در برنامه آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه نیز از ٤ نوع مصالح RAP و یک نوع RCA و ۳ نوع مصالح دانه‌ای تازه طبیعی (A و F و W) استفاده گردید. برنامه آزمایش‌ها در جدول ۲ ارایه شده است (Arshad, 2019).

جدول ۲. برنامه آزمایش‌ها (Arshad, 2019)

Natural aggregate/RCA	RAP	Minimum number of resilient modulus tests	Minimum number of CBR tests	Minimum number of repeated load triaxial tests
Natural aggregate *A, F, W*	—	3	3	2
RCA	—	1	1	—
Blends of natural aggregates with RAPs	4×3*	3×3×4=36	3×3×4=36	7
Blends of RCA with RAPs	4×3*	3×4=12	3×4=12	—
Total		52	52	9

*Blended samples were prepared by mixing 25%, 50%, and 75% (by weight) of each RAP type with the natural aggregates and RCA.

در شکل ۹ نتایج آزمایش CBR بر روی نمونه‌های با درصدهای مختلف مصالح جدول ۲ ارائه گردیده است. و در شکل ۱۰ تغییرات MR برحسب تنش حجمی و درصدهای مختلف مصالح جدول ۲ ترسیم گردیده است.



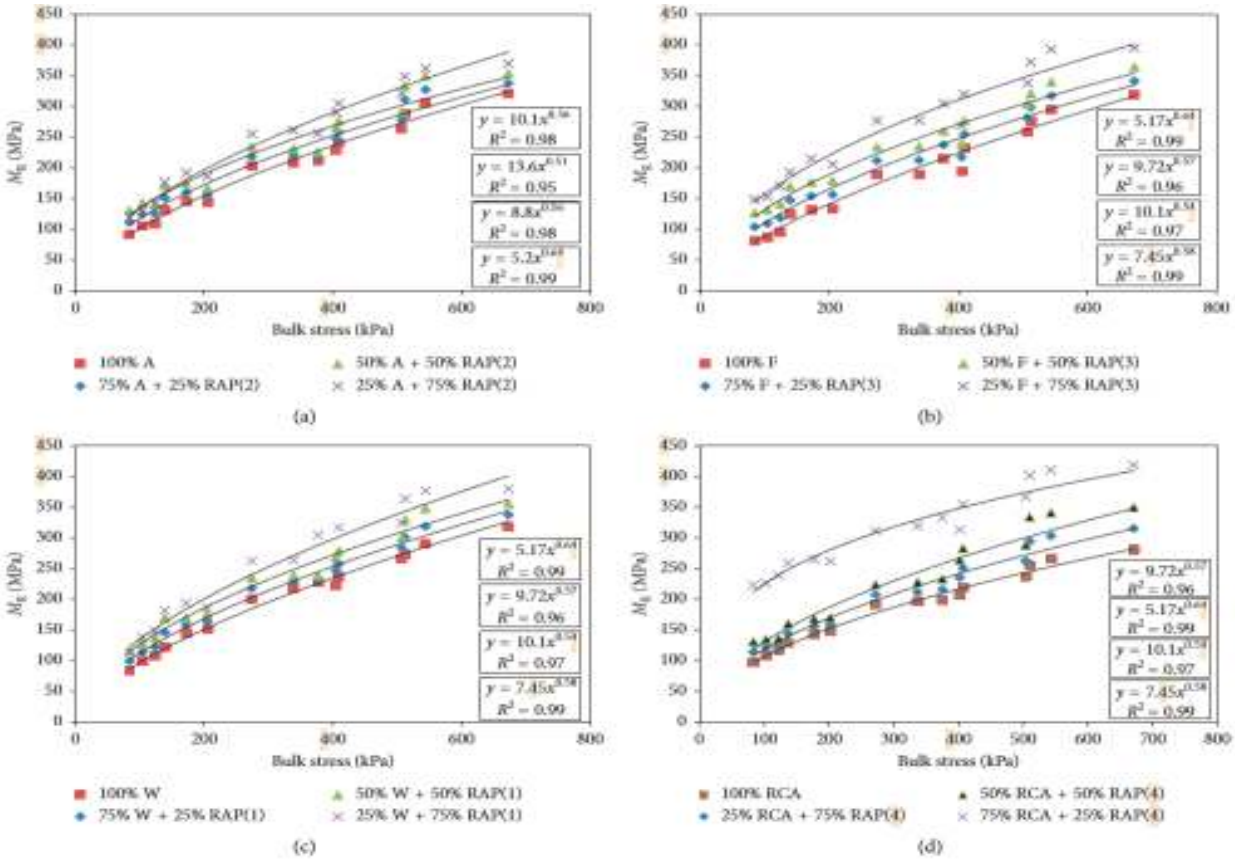
شکل ۹. تأثیر میزان RAP بر CBR (Arshad, 2019)

در نهایت بر اساس نتایج این تحقیق، رابطه همبستگی ذیل بین مقادیر مدول برجهندگی و CBR پیشنهاد گردید.

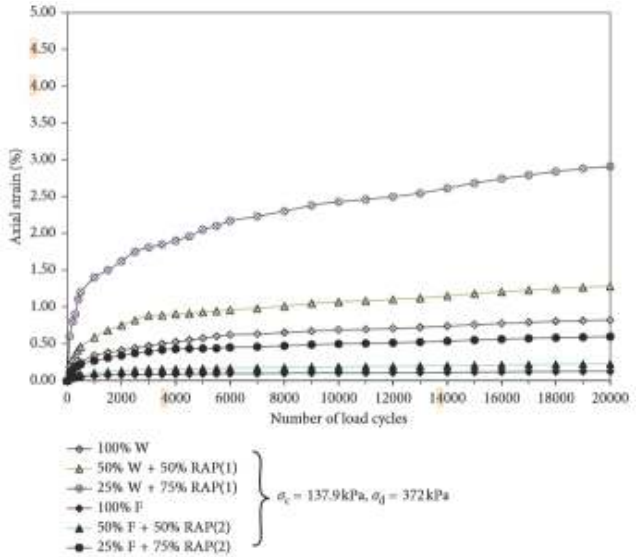
(۱)

$$M_R = 49.37 \times (CBR)^{0.59}$$

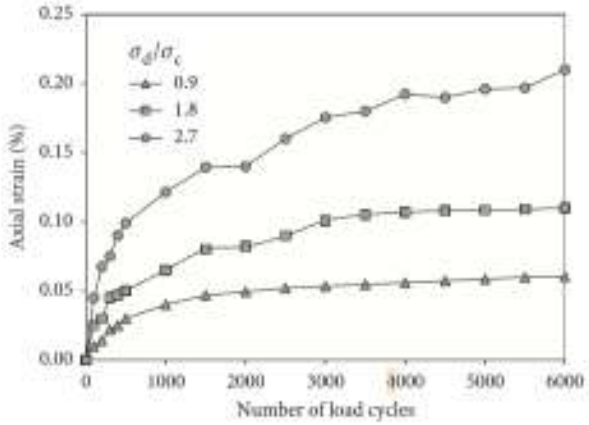
در شکل ۱۱ تأثیر مقدار RAP بر کرنش محوری ماندگار در طول بارگذاری سیکلی سه محوری بلند مدت نشان داده شده است. همچنین مطابق شکل ۱۲، کرنش محوری ماندگار با افزایش نسبت تنش انحرافی سیکلی[11] به تنش محدود کننده[12]، در طول بارگذاری تکراری بلند مدت[13] افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰. تغییرات MR برحسب تنش حجمی و درصدهای مختلف مصالح (Arshad, 2019)

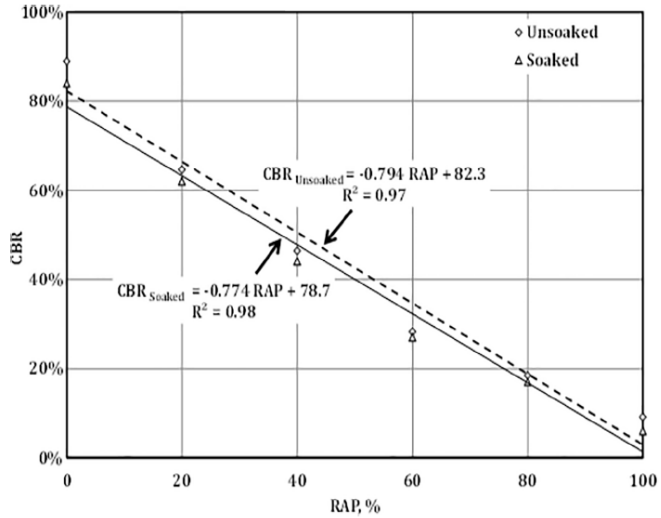


شکل ۱۱. تأثیر درصد RAP بر کرنش ماندگار
در شرایط بارگذاری تکراری بلندمدت (Arshad, 2019)

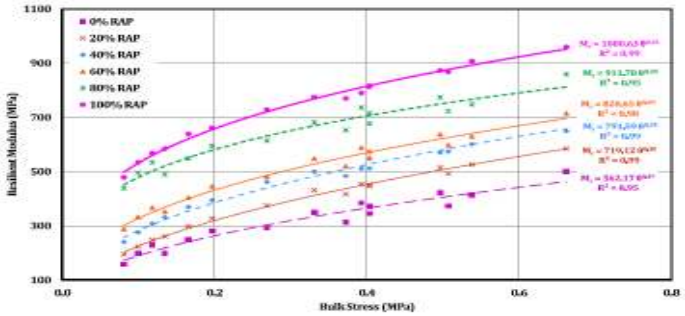


شکل ۱۲. تأثیر نسبت تنش انحرافی سیکلی به تنش محدود کننده بر کرنش ماندگار در شرایط بارگذاری تکراری بلندمدت (Arshad, 2019)

مطالعه سوم (Mousa, 2020): در این مطالعه آزمایشگاهی، مقاومت باربری، مقاومت برشی، نفوذپذیری و مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RAP، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌های آزمایش، از مخلوط کردن مصالح سنگدانه طبیعی با درصدهای مختلف RAP تهیه شده و تحت آزمایش‌های مختلف قرار گرفتند. در شکل ۱۳ نمودار CBR در برابر درصد RAP نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱٤ نمودار تغییرات مدول برجهندگی در برابر درصد RAP ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۳ مقدار CBR اشباع و غیر اشباع با افزایش درصد RAP کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱٤ نیز افزایش درصد RAP منجر به افزایش مدول برجهندگی می‌شود.



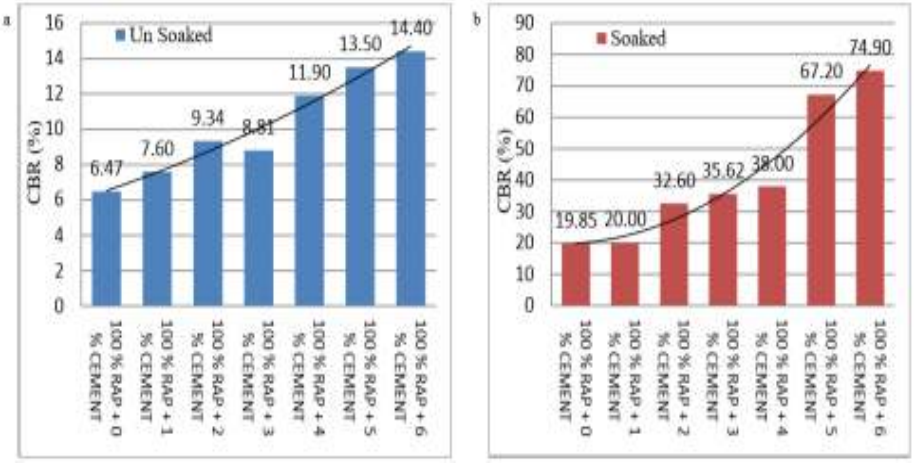
شکل ۱۳. تأثیر افزایش درصد RAP بر نسبت باربری کالیفرنیا (Mousa, 2020)



شکل ۱۴. تأثیر افزایش تنش حجمی و درصد RAP بر مدول برجهندگی (Mousa, 2020)

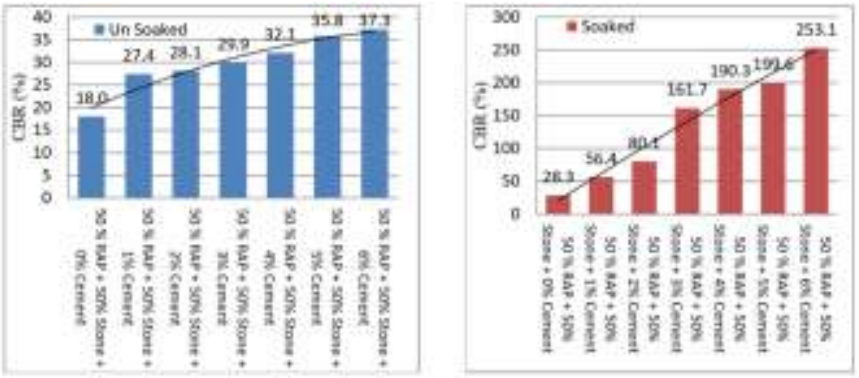
۲-۳- بررسی مطالعات گروه دوم

مطالعه اول (Saha and Mandal, 2017): در این مطالعه آزمایشگاهی، استفاده از مصالح تراشه آسفالتی به عنوان لایه اساس در روسازی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق آزمایش‌های CBR بر روی مصالح RAP و همچنین مخلوط RAP با سنگ‌دانه‌های شکسته[۱۴] CSA در حالت تثبیت شده انجام گردید. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مقدار CBR غیراشباع مصالح RAP مخلوط با سنگ‌دانه‌های شکسته و تثبیت شده با سیمان، به طور محسوسی تغییر نمی‌کند، در حالی‌که مقدار CBR اشباع شده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. مقدار CBR اشباع شده مصالح RAP هنگامی که با نسبت‌های مختلف سنگدانه‌های شکسته مخلوط شده و با درصد کمی از سیمان تثبیت شود، به طور فزآینده‌ای از ۲۰ درصد تا ۱۰۰ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۱۵ نتایج CBR مخلوط ۱۰۰ درصد RAP با مقادیر مختلف سیمان در شرایط اشباع و غیر اشباع ارایه شده است.



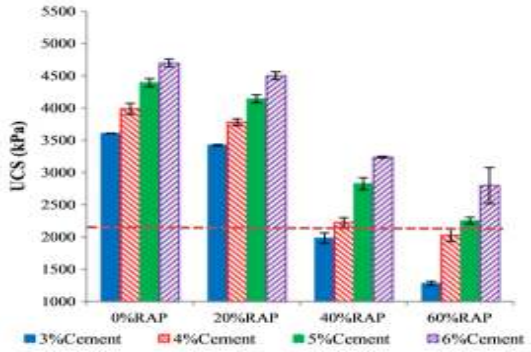
شکل ۱۵. مقدار CBR اشباع و غیر اشباع مخلوط ۱۰۰ درصد RAP و مقادیر مختلف سیمان (Saha and Mandal, 2017).

در شکل ۱۶ نیز نتایج CBR مخلوط ۵۰ درصد RAP با ۵۰ درصد CSA مقادیر مختلف سیمان در شرایط اشباع و غیر اشباع ارایه شده است.

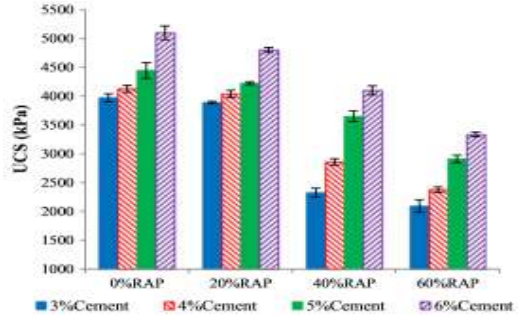


شکل ۱۶. مقدار CBR اشباع و غیر اشباع مخلوط ۵۰ درصد RAP با ۵۰ درصد CSA و مقادیر مختلف سیمان (Saha and Mandal, 2017)

مطالعه دوم (Ghanizadeh et al., 2018): با انجام این مطالعه آزمایشگاهی در خصوص احیاسازی عمقی روسازی[۱۵]، با تهیه نمونه‌های مختلف با درصدهای مختلف RAP و مصالح دانه‌ای GW-GC و تثبیت کننده سیمان و با انجام آزمایش تک محوری بر روی نمونه‌های تهیه شده، نتایجی به دست آمد که در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ ارایه شده است. مطابق با نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدود نشده افزایش می‌یابد (Ghanizadeh et al., 2018). این روند با مطالعات مختلف انجام شده از جمله (Suddeepong et al., 2018) همخوانی دارد.

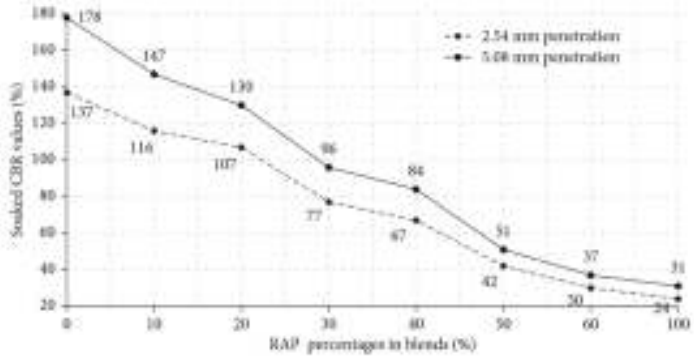


شکل ۱۷. مقاومت فشاری محدود نشده ۷ روزه مخلوط مصالح دانه‌ای GW-GC و RAP و سیمان (Ghanizadeh et al., 2018)

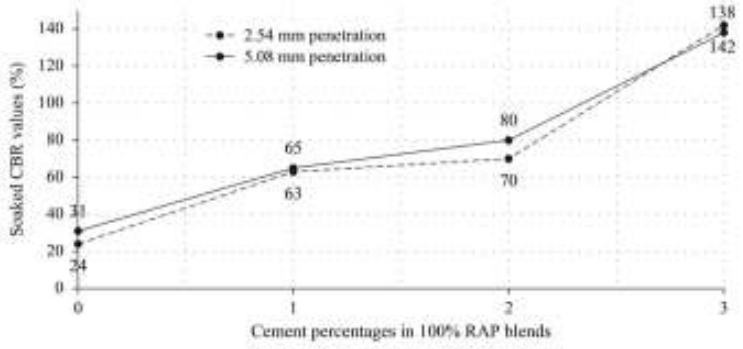


شکل ۱۸. مقاومت فشاری محدود نشده ۲۸ روزه مخلوط مصالح دانه‌ای GW-GC و RAP و سیمان (Ghanizadeh et al., 2018)

مطالعه سوم (Seferoglu et al., 2018): در این مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر افزودن مصالح RAP و سیمان به مخلوط اساس تثبیت شده و تأثیر آن بر رطوبت بهینه، ماکزیمم چگالی خشک، نفوذپذیری و ظرفیت باربری لایه اساس پرداخته شد. در شکل ۱۹ نتایج آزمایش CBR مخلوط شامل مصالح سنگدانه‌ای اساس و RAP نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲۰ نتایج آزمایش CBR و تأثیر افزایش درصد سیمان در مخلوط شامل ۱۰۰ درصد RAP نشان داده شده است. (Seferoglu et al., 2018).



شکل ۱۹. نتایج آزمایش CBR مخلوط شامل مصالح سنگدانه‌ای اساس و RAP (Seferoglu et al., 2018).

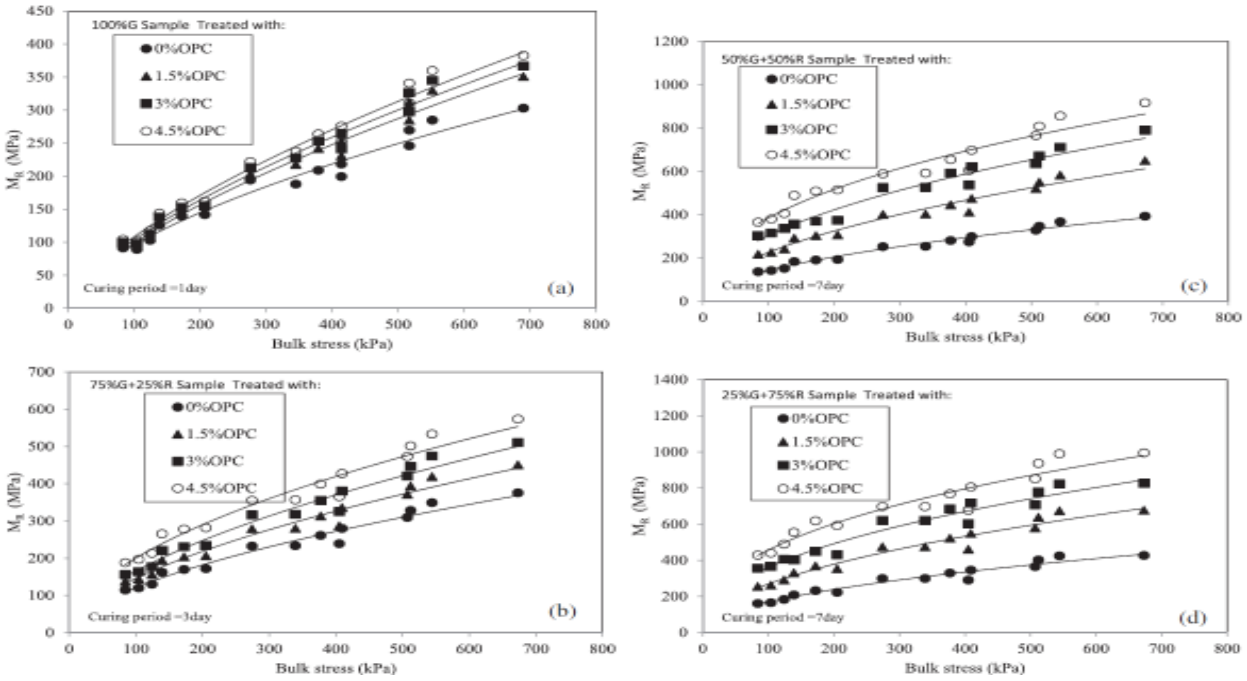


شکل ۲۰. تأثیر افزایش سیمان بر CBR اشباع مخلوط ۱۰۰ درصد RAP (Seferoglu et al., 2018).

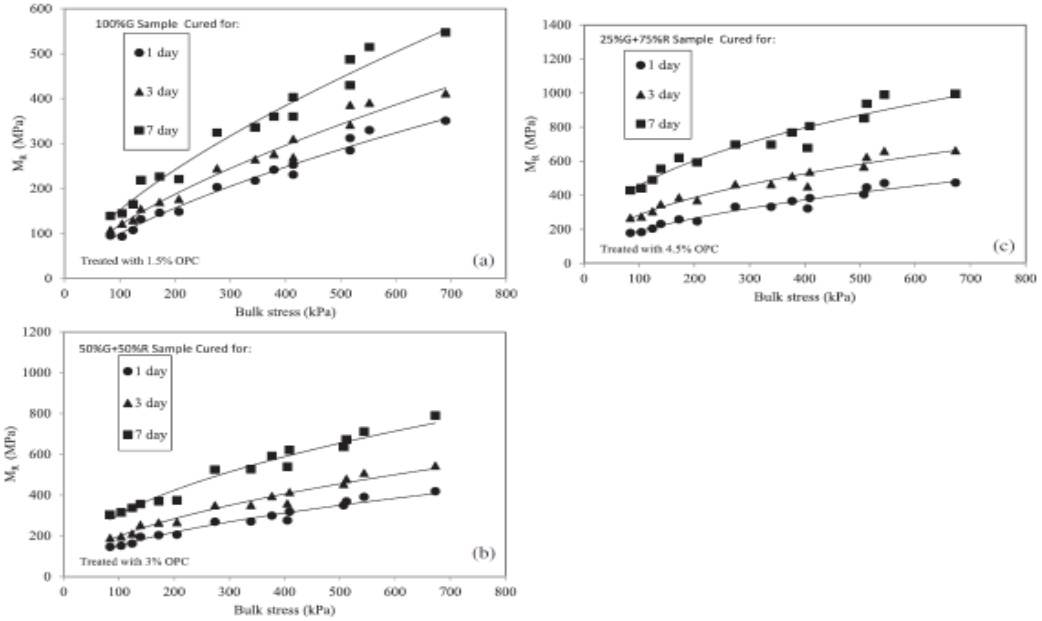
مطالعه چهارم(Arshad, 2020): در این مطالعه تجربی، به بررسی و ارزیابی خواص برجهندگی، مقاومت و عملکرد بلند مدت مخلوط‌های حاوی RAP تثبیت شده با سیمان، تحت بارگذاری سیکلی و خزشی پرداخته شد. نمونه‌های آزمایش، از مخلوط کردن مصالح RAP (R) با مصالح دانه‌ای تازه (G) به نسبت مشخص تهیه گردید. مصالح طبیعی و RAP در دمای محیط آزمایشگاه (به طور معمول $23 \pm 2°C$) خشک شدند. سپس این نمونه‌ها با استفاده از یک جعبه استاندارد کاملاً مخلوط شدند. مقدار مناسب هر مخلوط (۰٪ ، ۲۵٪ ، ۵۰٪ و ۷۵٪ RAP) بدون افزودن سیمان در کیسه‌های پلاستیکی غیر قابل نفوذ نگهداری شدند تا زمانی که برای انواع مختلف آزمایش در این مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

در این مطالعه برای تمام آزمایش‌های انجام شده (مدول برجهندگی، مقاومت تک محوری، خزش، بلند مدت سیکلی) از قالب استوانه‌ای به ابعاد ۱۵۲ و ۳۰۵ میلیمتر استفاده گردید. آزمایش مدول برجهندگی در این تحقیق بر اساس AASHTO T 307-99 انجام گردید (Arshad, 2020).

در شکل ۲۱ تأثیر درصد سیمان بر مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RAP با مدت عمل آوری مختلف ارائه شده است. سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان پرتلند معمولی[۱۶] (OPC) بوده است. همچنین در شکل ۲۲ تأثیر مدت عمل آوری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RAP با درصدهای مختلف سیمان ارایه شده است.

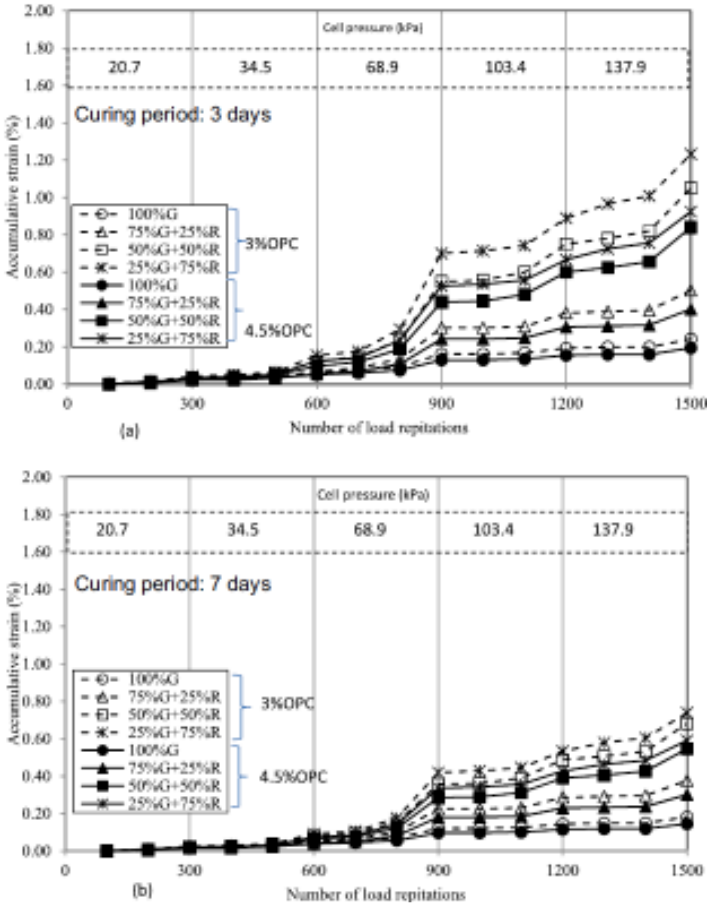


شکل ۲۱. تأثیر درصد سیمان (OPC) بر مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RAP در مدت‌های عمل آوری مختلف (Arshad, 2020)

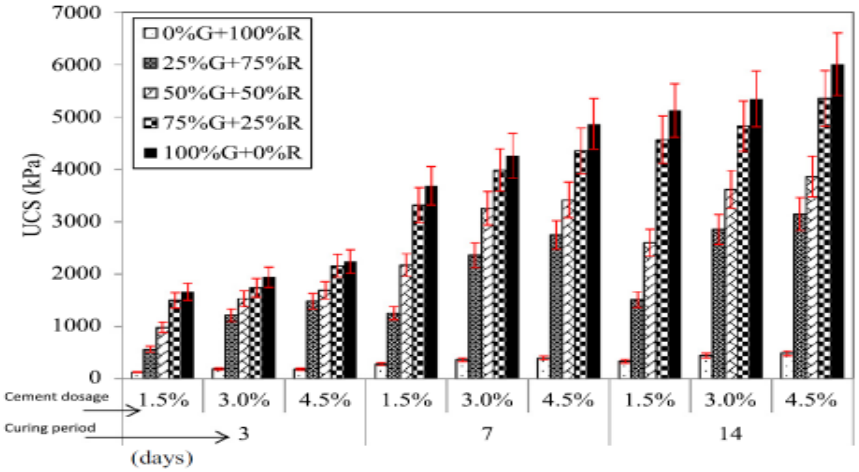


شکل ۲۲. تأثیر مدت عمل آوری بر مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی RAP با درصدهای مختلف سیمان (Arshad, 2020)

در شکل ۲۳ تأثیر مدت عمل آوری و درصد سیمان بر کرنش‌های محوری ماندگار در حین انجام آزمایش مدول برجهندگی ارایه شده است. در شکل ۲۴ نتایج آزمایش‌های تک محوری (UCS) مخلوط‌های مختلف به ازای درصدهای سیمان و مدت عمل آوری مختلف نشان داده شده است.

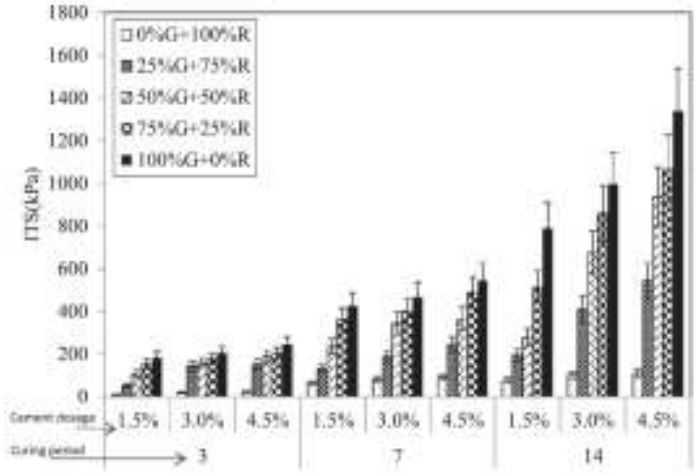


شکل ۲۳. تأثیر مدت عمل آوری و درصد سیمان بر کرنش‌های محوری ماندگار در حین انجام آزمایش مدول برجهندگی (a) ۳ روز عمل آوری (b) ۷ روز عمل آوری (Arshad, 2020)

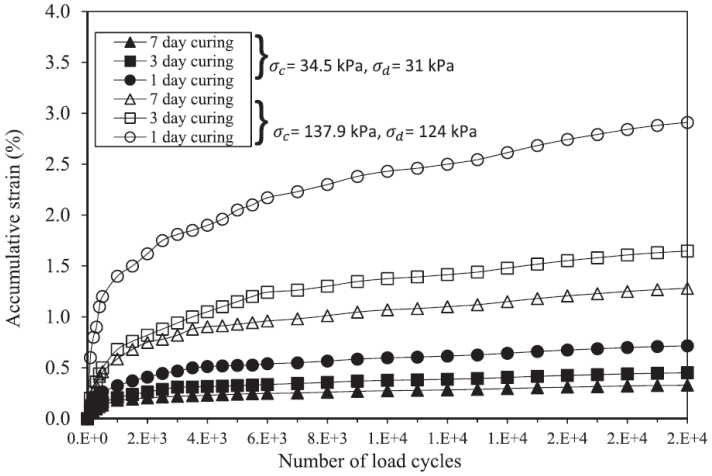


شکل ۲۴. مقاومت تک محوری نمونه‌های مختلف (Arshad, 2020)

در شکل ۲۵ نتایج آزمایش مقاومت کشش غیر مستقیم (برزیلی) نمونه‌های مختلف ارایه گردیده است. در این شکل تأثیر مدت عمل آوری و درصد سیمان بر مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) نشان داده شده است. در شکل ۲۶ عملکرد بلند مدت سیکلی[17] نشان داده شده است. تعداد سیکل‌های بار در بارگذاری بلند مدت، برابر با ۲۰۰۰۰ سیکل بوده است.



شکل ۲۵. مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های مختلف (Arshad, 2020)



شکل ۲۶. تأثیر بارگذاری بلند مدت سیکلی نمونه‌های مختلف (Arshad, 2020)

۳-۳- جمع بندی و تحلیل نتایج

به عنوان جمع بندی، می‌توان نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی مصالح دانه‌ای حاوی RAP در دو حالت تثبیت نشده و تثبیت شده را به صورت ذیل بیان نمود: افزودن RAP به مصالح دانه‌ای تازه در شرایط تثبیت نشده، منجر به مدول‌های برجهندگی بالاتری نسبت به نمونه‌های با مصالح دانه‌ای بدون RAP می‌شود که این نتایج می‌تواند دلگرم کننده و رضایت‌بخش باشد. با این وجود، افزایش کرنش‌های ماندگار تحت بارگذاری سیکلی (به دلیل افزودن مقدار RAP) ممکن است برای عمر مفید روسازی مضر باشد. همچنین آزمایش مدول محدود شده، روش دیگری برای بررسی سختی و تغییر شکل نمونه‌های مصالح دانه‌ای حاوی RAP به ویژه با اندازه ذرات بزرگتر می‌باشد. در آزمایش مدول محدود شده نیز، افزایش

کرنش به دلیل افزایش درصد RAP به نمونه‌های دانه‌ای تازه قابل مشاهده است. همچنین با افزایش درصد RAP، مقدار مدول محدود شده برخلاف مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. این تفاوت در رفتار را می‌توان به تفاوت ماهیت بارگذاری در دو آزمایش مدول برجهندگی (بارگذاری دینامیک) و مدول محدود شده (بارگذاری استاتیک) و همچنین به وجود پوشش قیری و ماهیت ویسکوز مصالح RAP مرتبط دانست.

افزودن RAP به مصالح دانه‌ای تازه در شرایط تثبیت شده با سیمان نیز منتج به مدول‌های برجهندگی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون RAP می‌شود. همچنین، با افزایش مقدار RAP و تحت بارگذاری سیکلی، کرنش‌های ماندگار تجمعی افزایش می‌یابد. با افزایش زمان عمل آوری و درصد سیمان، مقادیر مدول برجهندگی نیز افزایش می‌یابد. نتیجه دیگر اینکه با افزایش مقدار RAP، مقادیر مقاومت تک محوری UCS و کششی غیر مستقیم ITS کاهش می‌یابد. هر چند در درصد یکسان RAP، با افزایش درصد سیمان و زمان عمل آوری، مقادیر UCS و ITS افزایش می‌یابد.

نکته قابل ذکر اینکه در مطالعات دینامیکی، اکثر پژوهشگران یکی از محدودیت‌های مطالعه خود را تعداد کم سیکل‌های بارگذاری (۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰۰ سیکل) نسبت به شرایط واقعی جاده با میلیون‌ها سیکل بارگذاری اعلام نموده‌اند.

٤- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر با بررسی و جمع بندی مطالعات موجود انجام پذیرفته اخیر، به بررسی ویژگی‌های مقاومتی و برخی خواص دینامیکی مصالح RAP به عنوان لایه اساس روسازی پرداخته شده است. در خصوص استفاده از RAP در لایه اساس مطالعات متعددی انجام شده است. در برخی از این مطالعات امکان استفاده ماکزیمم از RAP بررسی شده و مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد. به طور کلی مطالعات نشان می‌دهند که مخلوط‌های حاوی RAP تثبیت شده با سیمان، رفتار مکانیکی بهبود یافته‌ای (نسبت به مخلوط مصالح بدون RAP) تحت بارگذاری اعمال شده دارند و مدول‌های برجهندگی بالاتری از خود نشان می‌دهند. هر چند که مخلوط‌های مذکور کرنش‌های ماندگار تجمعی بزرگتری نیز دارند. با این حال، به دلیل تعداد اندک مطالعات دینامیکی انجام شده در مورد این موضوع، بسیاری از جنبه‌های رفتاری این مخلوط‌ها از جمله رفتار برجهندگی، رفتار طولانی مدت تحت بارگذاری خزش و ویژگی‌های مقاومتی این مخلوط-ها هنوز مشخص نیست. همچنین اثر تعداد سیکل بالا، اثر فرکانس بارگذاری، تأثیر شکل بار، بررسی رفتار خستگی، تغییر شکل دائمی و عملکرد و دوام تحت بارهای سیکلی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، مخلوط RAP با مصالح دانه‌ای طبیعی باز هم مواد تجدیدناپذیر را کاهش می‌دهد و چنانچه بتوان امکان استفاده از درصد بالای RAP و در حد ۱۰۰ درصد را فراهم نمود، از نظر اقتصادی و زیست محیطی بسیار مناسب خواهد بود. در داخل کشور نیز به دلیل توسعه محدود کارخانه-های آسفالت در جهت استفاده از مصالح تراشه آسفالت برای تولید مخلوط‌های آسفالتی جدید، تمایل بیشتری به استفاده از مصالح تراشه آسفالت در لایه اساس راه به منظور بهبود خواص عملکردی لایه اساس و افزایش توان باربری آن می‌باشد. این در حالی است که به لحاظ اجرایی، استفاده از RAP چه در رویه آسفالتی و چه در بدنه اساس راه بسیار محدود می‌باشد. بنابراین، هم از دیدگاه اقتصادی و هم از نظر زیست محیطی، لازم است که مطالعات گسترده‌تری در این خصوص انجام پذیرد.

٥- پی‌نوشت‌ها

1. Department of Transportation (DOTs)
2. Reclaimed Asphalt Pavement
3. Hot Mix Asphalt
4. Cement treated virgin aggregate-RAP mix
5. Resilient Modulus
6. Permanent Deformation
7. Recycled Concrete Aggregate
8. Constrained modulus
9. Bulk stress
10. Accumulated permanent Strain
11. Cyclic deviator stress
12. Confined Stress
13. Long-term repeated loading
14. Crushed Stone Aggregates (CSA)
15. Full Depth Reclamation (FDR)
16. Ordinary Portland cement
17. Long term performance

٦- مراجع

-AASHTO T307-99, (2012), "Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials" American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.

-Adresi M, Khishdari A, Ahmadi A, Rooholamini H (2019), "Influence of high content of reclaimed asphalt on the mechanical properties of cement-treated base under critical environmental conditions", Int. J. Pavement Eng. 8436, pp.1198–1105. doi:10.1080/10298436.2017.1388508.

-Arshad M, Ahmed MF, (2017), "Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements", Constr. Build. Mater. 151, pp.83–97.

-Arshad M., (2019), "Development of a Correlation between the Resilient Modulusand CBR Value for Granular Blends Containing Natural Aggregates and RAP/RCA Materials", Advances in Materials Science and Engineering, Vol.19, Article ID 8238904, pp.16.

-Arshad M., (2020), "Laboratory investigations on the mechanical properties of cement treated "RAP-natural aggregate blends used in base/subbase layers of pavements", Constr. Build. Mater. 254.

-Bilodeau JP, Perez Gonzalez EL, (2021), "Permanent deformation analysis of base layers with recycled material: Effect of density and stress level" Transportation Geotechnics. 27, 100466. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100466.

-Das JT, Banerjee A, Chakraborty S., (2018), "A Framework for Assessment of Sustainability and Resilience in Subgrade Stabilization for a High-Volume Road. Transportation Research Board 97th Annual Meeting, January 7-10, Washington, DC.

-Fedrigo W, Núñez WP, Castañeda López MA, Kleinert TR, Ceratti JAP, (2018), "A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile", triaxial and flexural tests. Constr. Build. Mater. 171, pp.161–169.

-Gaillarda L, Carlos Quezadaa J, Chazallona C, Hornychb P., (2020), "Resilient modulus prediction of RAP using the Contact Dynamics Method", Transportation Geotechnics. 24, 100371. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100371.

-Ghanizadeh AR, Rahrovan M, Bafghi KB, (2018), "The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation. Constr", Build. Mater. 161, pp.165–174. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124.

-Hansen KR, Copeland A., (2017), "Annual asphalt pavement industry survey on recycled materials and warm-mix asphalt usage", 7th annual survey (IS 138). Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.

-Mousa E, El-Badawya S, Azam A., (2020), "Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt", Transportation Geotechnics, 100414.

-Puppala AJ, Hoyos LR, Potturi AK, (2011), "Resilient Moduli Response of moderately Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates", Journal of Materials in Civil Engineering, 23, pp.990-998.

-Romeo E, Orazi M, Orazi US, Accardo C, Noto S, Tebaldi G., (2019), "Evaluation of ''long-term behaviour under traffic" of cement treated mixture with RAP", Constr. Build. Mater. 208, pp.421-426.

-Saha DC, Mandal JN., (2017), "Laboratory investigations on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for using it as base course of flexible pavement", Procedia Engineering 189, pp.434 – 439. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.069.

-Seferoglu AG, Seferoglu MT, Akepmar MV, (2018), "Investigation of the Effect of Recycled Asphalt Pavement Material on Permeability and Bearing Capacity in the Base Layer", Advances in Civil Engineering, Volume 2018, Article ID 2860213, pp.6 .

-Suddeepong A., Intra A, Horpibulsuk S., "Suksiripattanapong C, Arulrajah A, Shen JS., (2018), "Durability against wettingdrying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock", Soils Found. 58, pp.333–343. doi:10.1016/j.sandf.2018.02.017.

Evaluation of Mechanical and Dynamic Properties of Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Materials

Seyed Mohammad Mansoorzadeh, Ph.D. Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran. and Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

Ahmad Reza Mahboubi Ardakani, Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.

Ata Aghaei Araei, Associate Professor, Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

E-mail: a_mahboubi@sbu.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: November 2021

ABSTRACT

Reclaimed asphalt pavement (RAP) materials, which include aggregate and bitumen, can be used in recycled asphalt mixes and granular base layers. Recycling these materials helps conserve natural resources. It also reduces energy consumption and costs. However, due to the variety of sources as well as insufficient strength, RAP materials without stabilizing additive is not suitable as an alternative to virgin aggregates in granular base layers. Therefore, it is necessary to use a suitable chemical or mechanical stabilization method to use reclaimed asphalt pavement as a base material. In this paper, the properties of RAP materials and aggregates containing different percentages of RAP are reviewed. Then the results of recent studies on the mechanical properties of these materials are presented. The results show that with increasing the percentage of RAP material in mixtures containing RAP, the resilient modulus and the accumulated permanent deformation increase.

Keywords: Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), Resilient Modulus, Accumulated Permanent Deformation