

A. R. Ghanizadeh*

Associate Professor, Department
of Civil Engineering, University
of Technology, Sirjan, Iran.

e-mail:

ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

F. Fathizadeh

Department of Civil
Engineering, University of
Technology, Sirjan, Iran.

e-mail:

Fathizade.farzane@gmail.com

Numerical Investigation of the Effect of Using Base Materials Containing Recycled Concrete Aggregates on the Performance of Asphalt Pavements Considering Nonlinear Behavior of Materials

In this study, the effect of adding different percentages of recycled concrete aggregates to aggregate base layer materials on the fatigue and rutting life of pavement has been investigated. In the performed analyzes, nonlinear analysis by NonPAS software has been used. To this end six four-layered pavement sections with different layers thickness were analyzed for three types of very soft, soft and medium clay subgrade soil. The behavior of asphalt layer materials was considered as linear elastic and the behavior of base, subbase and subgrade materials was considered as nonlinear elastic. In all sections of pavement, the use of 0 to 100% of recycled concrete aggregates for all subgrades, at least 61.6% and maximum 198.5% increases the fatigue life and at least -22.6% and maximum 88.4% increases rutting life. In very soft clay subgarde, in thicknesses above 20 cm for the base layer and thicknesses above 30 cm for the subbase layer, it is possible to use recycled concrete materials. In medium clay subgrades, in thicknesses above 15 cm for the base layer, thicknesses above 20 cm for the subbase layer and also thicknesses above 15 cm for the asphalt layer, it is possible to use recycled concrete materials. In hard subgarden, there is no special considerations in terms of the thickness of pavement layers for the use of recycled concrete materials.

Keywords: Granular base, Recycled concrete aggregate (RCA), Pavement analysis, Fatigue and Rutting.

* Corresponding author

Received 17 April 2022, Revised 18 July 2022, Accepted 20 July 2022.
DOI: 10.22091/cer.2022.8110.1386

ارزیابی عددی تأثیر استفاده از مصالح اساس حاوی مصالح خرده بتنی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح

علیرضا غنیزاده*

دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه

صنعتی سیرجان، کرمان، ایران.

پست الکترونیک:

ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

فرزانه فتحی زاده

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی

سیرجان، کرمان، ایران.

پست الکترونیک:

Fathizade.farzane@gmail.com

در این تحقیق، تأثیر افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح لایه اساس سنگدانه‌ای بر روی عمر خستگی رویه آسفالتی و عمر شیارشده بستر روسازی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های انجام‌شده از تحلیل غیرخطی توسط نرم‌افزار NonPAS استفاده شده است. برای این منظور ۶ مقطع روسازی چهار لایه با ضخامت لایه‌های متفاوت به ازای سه نوع خاک بستر رس خیلی نرم، نرم و متوسط تحلیل شدند. رفتار لایه آسفالت به صورت ارجاعی خطی، مصالح اساس و زیراساس به صورت ارجاعی غیرخطی با مدل Universal و مصالح بستر به صورت ارجاعی غیرخطی با مدل Bilinear فرض شدند. در کلیه مقاطع روسازی مورد بررسی، استفاده از صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خرده بتنی به ازای کلیه بسترها، حداقل ۶۱/۶ درصد و حداً کمتر ۱۹۸/۵ درصد موجب افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی و حداقل ۲۲/۶٪ و حداً کمتر ۸۸/۴٪ موجب تغییر عمر شیارشده بستر شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در بستر رسی خیلی نرم، در ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه اساس و ضخامت‌های بالای ۳۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس امکان استفاده از مصالح خرده بتنی وجود دارد. در بستر رسی متوسط، در ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه اساس، ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس و همچنین ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه آسفالت امکان استفاده از مصالح بتنی بازیافتی وجود دارد. در بسترها سخت، نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات خاص از نظر ضخامت لایه‌های روسازی جهت استفاده از مصالح خرده بتنی نیست.

واژگان کلیدی: اساس سنگدانه‌ای، مصالح خرده بتنی، تحلیل غیرخطی روسازی، خستگی رویه آسفالتی و شیارشده بستر.

روسازی مورداستفاده قرار می‌گیرد [۲]. استفاده از مصالح بازسازی و نخاله‌های ساختمانی در لایه اساس و زیراساس روسازی توسط بسیاری از محققین پیشنهاد و بررسی شده است [۳]. تا سال ۲۰۱۷، ۶۹٪ از نخاله‌های ساختمانی و مصالح حاصل از تخریب در ایالات متحده، ضایعات بتنی با وزن تقریباً ۳۹۷ میلیون تن بودند [۴]. در مقیاس جهانی، میزان نخاله‌های ساختمانی و مصالح حاصل از تخریب که ۵۰ تا ۶۰ درصد آن را ضایعات بتنی تشکیل می‌دهد، بیش از ۳ میلیارد تن است [۵]. کمبود سنگدانه‌های طبیعی باکیفیت بالا منجر به تقاضای

۱- مقدمه

امروزه، نقش مسائل اقتصادی و زیست محیطی بر نگهداری روسازی‌ها بسیار ضرورت دارد [۱]. هر ساله بیش از یک بیلیون تن سنگدانه طبیعی (NA^۲) تولید می‌شود و حدود ۷۵ درصد از این مقدار در ساخت و بازسازی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۱/۲۸، بازنگری ۱۰/۴/۲۷، پذیرش ۱۰/۴/۲۹

(DOI): 10.22091/cer.2022.8110.1386

² Natural aggregate

آزمون‌های آزمایشگاهی، معیارهای موردنظر برای مصالح سنگدانه‌ای لایه زیراساس را برآورده می‌کنند و طبق نتایج آزمایش سه محوری دینامیکی، عملکرد رضایت‌بخشی را نشان می‌دهند [۱۰]. مصرف نامناسب منابع طبیعی و تولید بیش از حد ضایعات ناشی از ساخت‌وساز و تخریب ساختمان‌ها یکی از چالش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی در جهان است. این زباله‌ها به مدافن‌های زباله انتقال داده می‌شوند و نیازمند مدیریت جهانی هستند. از آنجاکه میزان ضایعات حاصل از تخریب رو به افزایش است، بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات تخریب برای حفظ مصالح طبیعی ضروری است. انتقال مصالح خرد بتنی به مدافن‌های زباله، تأثیر منفی در درازمدت بر محیط‌زیست می‌گذارد و همچنین منجر به هزینه‌های حمل و نقل بالا و افزایش مسائل ایمنی می‌گردد؛ بنابراین استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی یکی از راههای جایگزین برای حفاظت از محیط‌زیست است [۱۱]. مصالح خرد بتنی دارای خمیر سیمانی هستند و نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارای ظرفیت جذب آب بالاتر، چگالی کمتر و کاهش مقاومت در برابر سایش می‌باشند [۱۲]. پون^۴ و چان^۵ در سال ۲۰۰۴، امکان استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی و آجرهای رسی خردشده در لایه زیراساس را موربدبرسی قراردادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی به جای مصالح طبیعی منجر به افزایش رطوبت بهینه و کاهش حداکثر چگالی خشک می‌شود. مقادیر نسبت باربری کالیفرنیا (CBR^۶) خشک و اشباع برای نمونه‌های با سنگدانه‌های بتن بازیافتی در مقایسه با نمونه‌های با ۱۰۰٪ مصالح خرد بتنی افت محسوسی نشان می‌داد [۱۳]. غربیلو در سال ۱۳۹۱، به ارزیابی فنی استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی و مصالح بنایی بازیافتی در لایه زیراساس راه‌ها پرداخت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که

روزافزون برای مصالح بازیافتی جایگزین در ساخت روسازی مانند مصالح خرد بتنی (RCA) شده است. بازیافت بتن عبارت از شکستن، برداشت، خرد کردن و پردازش بتن سخت شده برای تولید سنگدانه بتن بازیافتی یا مصالح خرد بتنی است. این مصالح شامل سنگدانه‌های باکیفیت بالا (معمولًاً سنگدانه‌های معدنی) است که توسط خمیر سمنتاسیون سخت شده به هم چسبیده‌اند. مصالح خرد بتنی از طریق تخریب المان‌های بتن سیمانی پرتلند از جاده‌ها، باند فرودگاهها و سازه‌ها در هنگام بازسازی جاده، حفاری‌های خدمات شهری یا عملیات تخریب تولید می‌شوند. روسازی‌های بتنی، قابلیت ۱۰۰٪ بازیافت را دارند و به‌طور کلی منابع بسیار خوبی برای تولید مصالح خرد بتنی هستند، زیرا بتن آن‌ها از مشخصات کیفی لازم برخوردار است [۶].

در روسازی‌های انعطاف‌پذیر، لایه اساس سنگدانه‌ای، بین لایه آسفالت و بستر قرار می‌گیرد. وظیفه اصلی این لایه پشتیبانی از لایه آسفالت و محافظت از بستر در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشدنگی^۷) روسازی است [۷]. با استفاده از مصالح سنگدانه‌ای مصرف ساخت روسازی، منابع طبیعی مصالح سنگدانه‌ای در نمی‌شوند و حفظ می‌گردند و درنتیجه هزینه‌های ساخت روسازی و همچنین میزان ریختن نخاله‌های روسازی به مدافن‌های زباله^۸ کاهش می‌یابد [۸]. برای افزایش پایداری روسازی و کاهش تقاضا برای سنگدانه‌های طبیعی، مصالح خرد بتنی می‌توانند با مصالح سنگدانه‌ای بکر با درصدهای مختلف ترکیب شوند [۹] و درنتیجه، موج ب تغییر مشخصات این مصالح خواهد شد. از طرف دیگر ضرورت حفظ محیط‌زیست و کاهش هزینه‌های ساخت روسازی، استفاده از ترکیب مصالح خرد بتنی و مصالح اساس در ساخت لایه‌های روسازی را توجیه می‌کند. مصالح خرد بتنی با توجه به یک سری از نتایج

⁴ Poon

⁵ Chan

⁶ California bearing ratio

¹ Recycled concrete aggregate

² Rutting

³ landfills

برای ارزیابی این تأثیر می‌توان از روش‌های مکانیستیک-تجربی خصوصاً روش‌های مبتنی بر تحلیل غیرخطی مصالح استفاده کرد. با توسعه برنامه‌های ارجاعی خطی، مطالعه خصوصیات مصالح ارجاعی غیرخطی^۵ برای اساس دانه‌ای غیر چسبیده از اواخر دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید.

با وجود تحقیقات انجام شده در خصوص ارزیابی مدول برجهندگی و تغییرشکل‌های ماندگار اساس سنگدانه‌ای حاوی مصالح خرده آسفالتی، تحقیقات اندکی در خصوص تأثیر استفاده از مصالح اساس سنگدانه‌ای حاوی درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی بر روی افزایش عمر روسازی با استفاده از مدل‌سازی غیرخطی این مصالح انجام شده است. در این تحقیق، تأثیر جایگزینی درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به جای مصالح سنگدانه‌ای بکر قشر اساس بر روی عمر خستگی و عمر شیارشده‌گی روسازی (مطابق روابط انسنتیو آسفالت) مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های انجام‌شده از تحلیل غیرخطی توسط نرم‌افزار NonPAS استفاده شده است و شش مقطع روسازی با ضخامت لایه‌های متفاوت و با فرض سه نوع خاک بستر خیلی نرم، نرم و متوسط به ازای افزودن درصدهای مختلف صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ مصالح خرده بتنی در لایه اساس سنگدانه‌ای مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های انجام شده، لایه آسفالت به صورت ارجاعی خطی و لایه‌های اساس، زیراساس و خاک بستر به صورت ارجاعی غیرخطی در نظر گرفته شده‌اند.

۲- مدل‌های غیرخطی مدول برجهندگی

در پژوهه‌های راهسازی، یکی از ملزمات طراحی لایه‌های اساس و زیراساس روسازی، مدول برجهندگی است. مدول برجهندگی معیاری برای اندازه‌گیری سختی مصالح تحت بارگذاری تکراری است [۱۷]. مدول برجهندگی تعیین شده از آزمایش سه محوری تکراری

⁵ Nonlinear elastic material

افزودن سنگدانه‌های بتن بازیافتی به سنگدانه‌های طبیعی منجر به افزایش CBR نمونه‌های خشک و همچنین نمونه‌های اشباع می‌شود. همچنین افزودن سنگدانه‌های بتن بازیافتی به سنگدانه‌های طبیعی باعث افزایش رطوبت بهینه و کاهش حداکثر چگالی خشک شده است [۱۴].^۱ Bennert^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۵، مقادیر مدول برجهندگی^۳ و تغییرشکل‌های ماندگار مصالح را با استفاده از افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به لایه اساس سنگدانه‌ای، از طریق آزمایش سه محوری تکراری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، مصالح متشكل از ۱۰۰٪ مصالح خرده بتنی، بیشترین مقدار مدول برجهندگی و مصالح متشكل از ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بکر، کمترین مقدار مدول برجهندگی را نشان دادند. همچنین مشخص شد که با افزایش درصد مصالح خرده بتنی در مصالح اساس، مقدار مدول برجهندگی افزایش می‌یابد. به علاوه، مصالح متشكل از ۱۰۰٪ مصالح خرده بتنی، حداقل کرنش ماندگار را نتیجه دادند [۱۵]. صابری و همکاران به توصیف خواص مکانیکی و فیزیکی مصالح خرده بتنی به عنوان مصالح لایه اساس پرداختند. در این تحقیق، مقدار ضریب تطویل^۴ و تورق^۴ و چگالی نسبی مصالح خرده بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. این تحقیق نشان داد که مصالح خرده بتنی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی از مقاومت کافی برخوردار است. ظرفیت برابری مصالح خرده بتنی نسبت به مصالح سنگدانه‌ای کمتر و همچنین درصد تورم مصالح خرده بتنی ناچیز است [۱۶].

تغییر مدول برجهندگی مصالح اساس در اثر جایگزینی درصدی از مصالح خرده بتنی با مصالح سنگدانه‌ای بکر می‌تواند بر روی عمر خستگی رویه آسفالتی و عمر شیارشده‌گی بستر تأثیر داشته باشد که

¹ Bennert

² Resilient modules

³ Elongation

⁴ Flakiness

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad (6)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} \quad (7)$$

که در این رابطه τ_{oct} ، تنش برشی هشتوجه‌ی است. در آیین‌نامه طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی (MEPDG^۵)، مدلی برای توصیف مدول برجهندگی مصالح سنگدانه‌ای شرح داده است. این معادله هم اثر سخت شدگی تنش حجمی و هم اثر نرم شدگی تنش برشی را باهم ترکیب می‌نماید؛ بنابراین مقادیر k_2 باید مثبت باشند، زیرا افزایش تنش حجمی منجر به سخت شدگی مصالح می‌گردد. با این حال، k_3 باید منفی شود تا اثر نرم شدگی را نمایش دهد [۲۲]. این مورد در خصوص مدل‌های Uzan و مدل Universal نیز صادق است. مدل MEPDG به صورت رابطه ۸ قابل‌بیان است.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (8)$$

مدل Semi-log یک مدل نیمه لگاریتمی است که به صورت رابطه ۹ بیان می‌شود [۲۳].

$$M_r = k_1 p_a k_2 \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right) k_3 \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right) \quad (9)$$

مدل ۱-۲۸ NCHRP^۶ یک مدل تمام لگاریتمی برای مصالح تثبیت‌شده بر حسب تنش انحرافی و تنش همه‌جانبه است که توسط NCHRP ۱-۲۸ توسعه داده شده است [۲۴]. این مدل به صورت رابطه ۱۰ قابل‌بیان است.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^{K_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{K_3} \quad (10)$$

در این تحقیق با برازش هریک از مدل‌های ذکر شده به مقادیر اندازه‌گیری شده مدول برجهندگی مصالح اساس سنگدانه‌ای حاوی درصدهای مختلف مصالح خردہ بتنی، کفایت و دقت هریک از این مدل‌ها مورد ارزیابی

برابر با نسبت تنش انحرافی تکراری^۱ به کرنش محوری برگشت‌پذیر^۲ است [۱۸].

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

مدول برجهندگی مصالح سنگدانه‌ای تابعی از تنش‌های اعمال شده است. به منظور بیان رابطه بین مدول برجهندگی و وضعیت تنش، مدل‌های مختلفی پیشنهاد شده است که در ادامه معرفی شده‌اند.

در مدل K-θ، مدول برجهندگی به صورت تابعی از تنش حجمی در نظر گرفته می‌شود و کاربرد آن برای مصالح سنگدانه‌ای است. این مدل به شکل رابطه ۲ قابل‌بیان است [۱۹].

$$M_r = k_1 \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \quad (2)$$

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3)$$

که در این روابط θ ، تنش حجمی یا مجموع تنش‌های اصلی، k_1 و k_2 ، ضرایب ثابت مدل و P_a فشار اتمسفر مصالح از آنجاکه مدل K-θ برای بیان رفتار برشی مصالح سنگدانه‌ای کفایت نمی‌کند، اوزان^۳ تنش انحرافی را وارد مدل K-θ نمود [۲۰]. مدل Uzan به شکل رابطه ۴ قابل‌بیان است.

$$M_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\sigma_d}{P_a} \right)^{k_3} \quad (4)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - 0.5(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (5)$$

که در این روابط σ_d ، تنش انحرافی و k_1 ، k_2 و k_3 ضرایب ثابت مدل هستند.

تنش انحرافی در مدل اوزان از آزمایش سه محوری به دست می‌آید. در مدل Universal به جای تنش انحرافی از تنش برشی هشتوجه‌ی^۴ استفاده شده است. این مدل مطابق رابطه ۶ هست [۲۱].

¹ Repeated axial deviator stress

² Resilient axial strain

³ Uzan

⁴ Octahedral shear stress

⁵ Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
⁶ National cooperative highway research program

در صد رطوبت بهینه برای نمونه با درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی در محدوده ۵ الی ۷/۵ درصد متغیر است. آزمایش مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۴/۲ و ارتفاع ۳۰۴/۸ میلی‌متر در درصد رطوبت بهینه و حداقل وزن مخصوص خشک براساس استاندارد AASHTO TP46-94 انجام شده است. جزئیات بیشتر در خصوص مصالح مورد استفاده و روش‌های آزمایشگاهی در تحقیق بنرت و همکاران ذکر شده است [۱۵].

داده‌های آزمایشگاهی مربوط به مدول برجهندگی مصالح اساس سنگدانه‌ای حاوی درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی در جدول ۱ آورده شده است.

قرار گرفته است و در نهایت مدل بهینه غیرخطی برای این مصالح جهت تحلیل روسازی انتخاب شده است.

۳- داده‌های مدول برجهندگی لایه اساس

در این تحقیق از نتایج آزمایشگاهی بنرت و همکاران در سال ۲۰۰۰ جهت تعیین مدل‌های مدول برجهندگی مصالح اساس سنگدانه‌ای حاوی درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی استفاده شده است. با توجه به منحنی دانه‌بندی، مصالح لایه اساس سنگدانه‌ای خوب دانه‌بندی شده دارای ۶/۷ درصد و مصالح خردہ بتی دارای ۳/۴ درصد ریزدانه بودند. بر روی نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف خردہ بتی، آزمون تراکم پروکتور استاندارد به روش ASTM D698 انجام شده است.

جدول ۱- نتایج مدول برجهندگی اندازه‌گیری شده برای ترکیب‌های مختلف مصالح سنگدانه‌ای و مصالح خردہ بتی [۱۵].

Mr (kPa) (100% RCA)	Mr (kPa) (25% AB+75 % RCA)	Mr (kPa) (50% AB+50 % RCA)	Mr (kPa) (75% AB+25 % RCA)	Mr (kPa) (100% AB)	σ_3 (kPa)	σ_1 (kPa)	دفعات بارگذاری
۱۹۳۹۴۲	۱۶۶۲۲۶	۱۵۸۲۶۷	۹۴۲۱۶	۸۶۹۵۴	۲۰/۶۸	۴۱/۳۶	۱
۲۳۱۰۸۷	۱۷۰۹۵۳	۱۵۷۱۶۲	۱۰۶۱۳۹	۹۷۷۸۳	۲۰/۶۸	۶۲/۰۵	۲
۲۱۸۴۸۵	۱۹۹۴۵۶	۱۷۷۰۵۱	۱۲۵۵۸۴	۱۰۷۹۹۱	۲۰/۶۸	۸۲/۷۳	۳
۲۴۹۶۰۹	۲۱۲۴۴۴	۱۹۹۴۵۶	۱۱۹۵۷۱	۱۱۴۰۰۴	۳۴/۴۷	۶۸/۹۴	۴
۲۷۵۳۴۶	۲۳۷۸۵۷	۲۲۷۸۷۰	۱۴۵۴۹۹	۱۲۷۰۵۱	۳۴/۴۷	۱۰۳/۴۲	۵
۲۷۳۴۲۲	۲۴۹۶۰۹	۲۳۵۹۹۷	۱۶۹۷۵۹	۱۳۹۰۵۷	۳۴/۴۷	۱۳۷/۸۹	۶
۳۵۹۳۸۱	۳۱۹۰۱۱	۲۸۱۱۹۷	۱۶۷۳۹۶	۱۶۰۶۷۰	۶۸/۹۵	۱۳۷/۹۰	۷
۳۶۹۶۰۰	۳۳۰۳۸۹	۳۱۹۰۱۱	۲۰۹۴۸۷	۱۸۲۳۱۳	۶۸/۹۵	۲۰۶/۸۵	۸
۳۸۰۱۰۹	۳۳۰۳۸۹	۳۱۲۳۷۲	۲۰۶۵۷۱	۱۹۹۵۴۱	۶۸/۹۵	۲۷۵/۷۹	۹
۴۰۷۷۰۹	۳۴۴۵۸۱	۳۴۲۱۷۴	۱۹۳۹۴۲	۱۸۹۰۲۶	۱۰۳/۴۲	۱۷۲/۳۷	۱۰
۴۱۳۴۶۵	۳۴۹۴۴۵	۳۵۹۳۸۱	۲۳۷۶۵۷	۱۹۷۷۵۴	۱۰۳/۴۲	۲۰۶/۸۴	۱۱
۴۳۷۳۱۲	۳۷۲۲۰۰	۳۶۹۶۰۰	۲۳۵۹۹۷	۲۲۲۳۸۱	۱۰۳/۴۲	۳۱۰/۲۶	۱۲
۴۷۵۶۸۷	۴۱۶۳۷۳	۴۱۰۵۷۷	۲۵۸۵۱۲	۲۲۲۳۸۳	۱۳۷/۹	۲۴۱/۳۲	۱۳
۴۸۲۴۰۲	۴۴۰۳۸۸	۴۱۹۳۰۲	۲۴۹۶۰۹	۲۲۸۴۹۱	۱۳۷/۹	۲۷۵/۸۰	۱۴
۵۱۳۸۱۵	۴۴۶۶۰۵	۴۴۳۴۸۶	۳۱۲۳۷۲	۲۵۴۶۴۵	۱۳۷/۹	۴۱۳/۶۹	۱۵

مختلف مصالح خردہ بتی (RCA) به تعیین بهینه‌ترین مدل غیرخطی پرداخته شد. برای این منظور، مدل‌های MEPDG غیرخطی مختلف شامل مدل‌های k-θ و semi-log، NCHRP1-28، Uzan، Universal

با بهره‌گیری از نتایج آزمایشگاهی مدول برجهندگی مصالح اساس سنگدانه‌ای (GB^{۲۰}) حاوی درصدهای

²⁰ Granular Base

نمی‌باشد. نتایج به دست آمده از کالیبراسیون مدل‌ها نشان می‌دهد که ترکیب مصالح اساس و مصالح خرد بتنی در اکثر موارد با افزایش تنفس حجمی، سخت شدگی و با افزایش تنفس‌های انحرافی یا تنفس‌های برشی هشت‌وجهی، نرم شدگی از خود نشان داده‌اند. در صورتی که در مورد مدل 1-28 NCHRP ضریب k_3 در اکثر موارد مقداری مثبت است که نشان‌دهنده افزایش مدول برجهندگی مصالح با افزایش تنفس انحرافی است. این موضوع با رفتار مصالح سنگدانه‌ای انتباطی چندانی ندارد؛ زیرا انتظار می‌رود با افزایش تنفس انحرافی مقدار مدول کاهش یابد؛ بنابراین مدل 1-28 NCHRP نیز مدل مناسبی برای بیان رفتار غیرخطی ترکیب مصالح سنگدانه‌ای و مصالح خرد بتنی نیست.

براساس این داده‌های آزمایشگاهی کالیبره شدن و در مورد هر مدل با تعیین دو پارامتر R^2 و RMSE نحوه برازش مدل به داده‌های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج مربوط به کالیبراسیون مدل‌های غیرخطی مختلف با توجه به جایگزینی درصدهای مختلف مصالح خرد بتنی در جدول ۲ آورده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، برای ترکیب‌های مختلف مصالح اساس سنگدانه‌ای و مصالح خرد بتنی، مدل semi-log کمترین مقدار R^2 را دارد. همچنین مدل $k\text{-}\theta$ در درصدهای جایگزینی بالای مصالح خرد بتنی دارای دقت کافی جهت مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح نیست؛ بنابراین مدل log و $k\text{-}\theta$ مدل‌های مناسبی برای بیان رفتار غیرخطی مصالح اساس سنگدانه‌ای حاوی RCA

جدول ۲- نتایج کالیبراسیون مدل‌های غیرخطی به ازای افروزن درصدهای مختلف RCA به مصالح DGABC

Universal مدل					MEPDG مدل					ترکیب
RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	
۸۷۲/۲	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۴	۰/۵۰۳	$۹/۶۵۲ \times 10^{-3}$	۹۰۵/۱	۰/۹۹۹۶	۰/۰۰۵	۰/۵۰۶	$۹/۵۶۶ \times 10^{-3}$	(100% AB)
۱۱۹۵۳/۵	۰/۹۶۲۱	۰/۰۶۶	۰/۴۵۸	$۱/۱۸۸ \times 10^{-3}$	۱۱۸۷۶/۷	۰/۹۶۲۶	۰/۱۳۱	۰/۴۸۶	$۱/۰۳۵ \times 10^{-3}$	(75%AB+2% RCA)
۸۲۷۲/۴	۰/۹۹۲۳	-۰/۱۰۷	۰/۶۲۱	$۱/۳۵۰ \times 10^{-3}$	۸۶۸۴/۸	۰/۹۹۱۴	-۰/۲۹۳	۰/۵۹۸	$۱/۷۰۵ \times 10^{-3}$	(50%AB+5% RCA)
۱۱۷۵۷/۸	۰/۹۸۳۴	-۰/۰۸۳	۰/۵۶۲	$۱/۵۳۲ \times 10^{-3}$	۱۱۳۵۰/۰	۰/۹۸۴۵	-۰/۲۶۳	۰/۵۵۴	$۱/۸۴۲ \times 10^{-3}$	(25%AB+7% RCA)
۸۷۱۹/۴	۰/۹۹۲۶	-۰/۱۰۲	۰/۵۵۶	$۱/۷۵۱ \times 10^{-3}$	۱۰۳۵۷/۷	۰/۹۸۹۵	-۰/۲۷۵	۰/۵۳۴	$۲/۱۸۳ \times 10^{-3}$	(100% RCA)
Uzan مدل					NCHRP1-28 مدل					ترکیب
RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	ترکیب
۸۸۱/۹	۰/۹۹۹۷	۰/۰۰۴	۰/۵۰۳	$۹/۶۱۹ \times 10^{-3}$	۲۲۳۶/۶	۰/۹۹۸۰	۰/۱۷۴	۰/۳۳۴	$۱/۹۴۲ \times 10^{-3}$	(100% AB)
۱۱۹۲۳/۵	۰/۹۶۲۱	۰/۰۶۶	۰/۴۵۹	$۱/۱۳۰ \times 10^{-3}$	۱۱۷۸۹/۰	۰/۹۶۳۱	۰/۲۲۱	۰/۳۰۵	$۲/۱۴۴ \times 10^{-3}$	(75%AB+25% RCA)
۸۲۴۹/۳	۰/۹۹۲۳	-۰/۱۰۷	۰/۶۲۱	$۱/۴۶۴ \times 10^{-3}$	۷۶۳۶/۹	۰/۹۹۳۴	۰/۱۰۱	۰/۴۱۴	$۳/۴۸۶ \times 10^{-3}$	(50%AB+50% RCA)
۱۱۷۶۰/۵	۰/۹۸۳۴	-۰/۰۸۳	۰/۵۶۲	$۱/۶۳۰ \times 10^{-3}$	۱۱۶۰۹/۰	۰/۹۸۳۸	۰/۱۰۶	۰/۳۷۴	$۳/۵۷۴ \times 10^{-3}$	(25%AB+75% RCA)
۸۷۱۷/۶	۰/۹۹۲۶	-۰/۱۰۲	۰/۵۵۶	$۱/۸۹۱ \times 10^{-3}$	۷۱۹۲/۳	۰/۹۹۴۹	۰/۰۸۳	۰/۳۷۲	$۴/۱۱۶ \times 10^{-3}$	(100% RCA)
k-θ مدل					semi-log مدل					ترکیب
RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	RMSE	R^2	K_3	K_2	K_1	ترکیب
۸۹۵/۹	۰/۹۹۹۷	-	۰/۵۰۷	$۹/۷۰۲ \times 10^{-4}$	۱۵۵۷۷/۴	۰/۹۰۹۰	۱/۱۷۷	۱/۷۴۱	$۸/۸۸۰ \times 10^{-3}$	(100% AB)
۱۲۱۴۳/۸	۰/۹۶۰۸	-	۰/۵۲۰	$۱/۰۶۸ \times 10^{-5}$	۱۷۵۳۶/۶	۰/۹۱۸۵	۱/۲۰۵	۱/۷۳۰	$۹/۶۹۴ \times 10^{-3}$	(75%AB+25% RCA)
۱۴۲۳۹/۰	۰/۹۷۷۱	-	۰/۵۲۲	$۱/۶۶۱ \times 10^{-5}$	۲۴۹۶۷/۷	۰/۹۲۹۲	۱/۱۰۸	۱/۹۴۴	$۱/۵۲۰ \times 10^{-3}$	(50%AB+50% RCA)
۱۵۶۰۲/۹	۰/۹۷۰۷	-	۰/۴۸۶	$۱/۸۰۲ \times 10^{-5}$	۲۵۹۳۹/۳	۰/۹۱۹۳	۱/۱۰۵	۱/۸۳۹	$۱/۶۶۲ \times 10^{-3}$	(25%AB+75% RCA)
۱۵۴۷۹/۵	۰/۹۷۶۶	-	۰/۴۶۳	$۲/۱۳۲ \times 10^{-5}$	۲۵۳۳۳/۶	۰/۹۳۷۱	۱/۰۹۲	۱/۸۱۵	$۱/۹۶۴ \times 10^{-3}$	(100% RCA)

خطی، مصالح اساس و زیراساس به صورت ارجاعی غیرخطی (مدل Universal) و مصالح بستر به صورت ارجاعی غیرخطی (مدل Bilinear) فرض شدند. مشخصات و پارامترهای مصالح مختلف لایه‌های روسازی جهت تحلیل غیرخطی توسط نرم‌افزار NonPAS در جدول ۳ بیان شده است. در این تحقیق، از نتایج آزمایشگاهی پارک و همکاران در سال ۲۰۰۹، برای مدل‌سازی غیرخطی مصالح زیراساس سنگدانه‌ای استفاده شده است [۲۶]. برای این منظور از مدول برجهندگی مصالح SB-4 آن تحقیق استفاده شده است. شش مقطع مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. در هر کدام از مقاطع، موقعیت نقاط پاسخ و موقعیت نقاط تنش نمایش داده شده است. برای تحلیل این مقاطع روسازی در نرم‌افزار NonPAS، از محور منفرد با چرخ زوج در سه نقطه پاسخ مرکز چرخ، لبه چرخ و حدفاصل چرخ زوج از طریق نقطه تنش وسط لایه و اصلاح تنش دایره مورکولمب استفاده شد. تنش قائم وارد از طرف هر چرخ برابر با $104/22 \text{ kPa}$ و شعاع تماس هر چرخ برابر با $mm 586$ در نظر گرفته شد. جهت تخمین عمر هریک از مقاطع روسازی مفروض به روش مکانیستیک-تجربی، حداکثر مقدار کرنش کششی افقی تار پایین لایه آسفالت و حداکثر کرنش فشاری روی خاک بستر محاسبه شد.

باید توجه داشت که مدل Uzan با فرض برابر بودن تنش‌های همه‌جانبه قابل استفاده است، درصورتی که مدل Universal با فرض نابرابر بودن تنش‌های همه‌جانبه قابل استفاده است. نتایج بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که دو مدل Universal و MEPDG از دیدگاه دقیق، مدل‌های مناسبی هستند. در تحقیق حاضر، مدل Universal به عنوان مدل غیرخطی ترکیب مصالح اساس سنگدانه‌ای و مصالح خردۀ بتی مورداستفاده قرار گرفت.

۴- تحلیل غیرخطی روسازی

در این تحقیق، به منظور ارزیابی عددی تأثیر استفاده از مصالح اساس حاوی مصالح خردۀ بتی بر عملکرد روسازی‌های آسفالتی از نرم‌افزار NonPAS استفاده شده است. در این برنامه، هفت مدل غیرخطی از Uzan، NCHRP 1-28، Universal، MEPDG، جمله k-θ و semi-log تجزیه و تحلیل روسازی، از جمله تنش‌ها، کرنش‌ها و افت و خیزها در سه جهت اصلی، تنش‌های برشی، تنش‌ها و کرنش‌های اصلی، حداکثر تنش برشی، تنش برشی و کرنش برشی هشت‌وجهی و حداکثر تنش افقی در نقاط پاسخ مختلف محاسبه می‌گردند [۲۵].

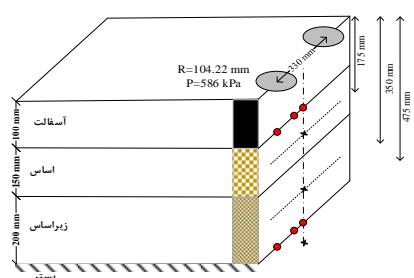
در این تحقیق شش مقطع روسازی چهار لایه مورد بررسی قرار گرفته است. لایه آسفالت به صورت ارجاعی

جدول ۳- مشخصات مصالح لایه‌های مختلف روسازی

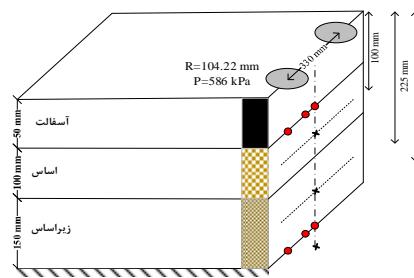
Φ (°)	K_0	ضریب پواسون (v)	چگالی (kN/m³)	Riftar مصالح	ضخامت (cm)	لایه‌ها
-	-	0/۳	21/195	ارجاعی خطی	۵	آسفالت
				M_r (kPa)	10	
				$3/1 \times 10^6$	15	
					20	
40	0/357	0/35	19/81	ارجاعی غیرخطی: مدل Universal	10 15 20	اساس
				k_3		
				0/004		
				0/503		
				$9/652 \times 10^{-3}$		
				0/066		
				0/458		
				$1/188 \times 10^{-3}$	٪RCA	
				-0/107		
				0/621		
				$1/350 \times 10^{-3}$		
				-0/083		
				0/562	٪25RCA	
				$1/532 \times 10^{-3}$		
				-0/102	٪50RCA	
				0/556		
				$1/751 \times 10^{-3}$	٪75RCA	
				-0/101		
				0/551	٪100RCA	
				$1/751 \times 10^{-3}$		

جدول ۳- ادامه

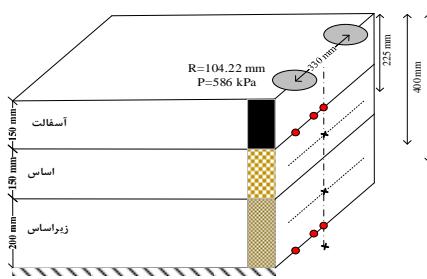
۲۸	۰/۶	۰/۳۵	۱۹/۶۱	ارتجاعی غیرخطی: مدل Universal				۱۵ ۲۰ ۳۰ ۴۰	زیراساس				
				k_3	k_2	k_1 (kPa)	ترکیب						
				-۰/۱۲۱	۰/۶۲۰	۷۸۷/۳۵	A-1-a (GW)						
ارتجاعی غیرخطی: مدل Bilinear													
به ازای هر سه نوع بستر و $K_3=۱۱۱$ ، $K_2=۴۲/۷۸$ و $K_4=۱۷۸$ است.													
نوع خاک بستر								-					
k_1 (kPa)		مدول		رس خیلی نرم		رس نرم		رس متوسط					
۶۸۹۵		۱۳۸۰۰		۲۰۸۲۲		۲۰۶۸۴		۵۲۹۵۲					
۵۲۹۵۲		۴۸۲۶۳											



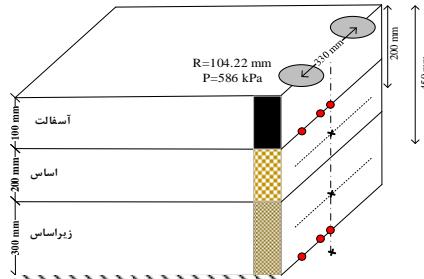
(ب) مقطع روسازی دوم (AC10-B15-SB20)



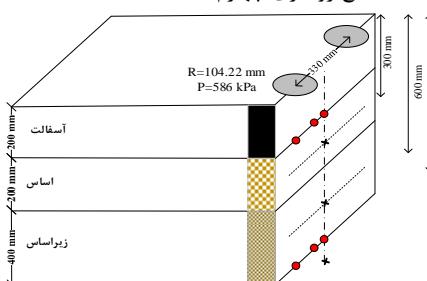
(الف) مقطع روسازی اول (AC5-B10-SB15)



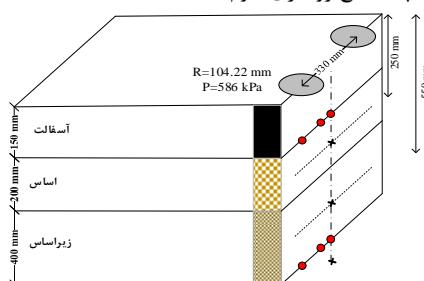
(ت) مقطع روسازی چهارم (AC15-B15-SB20)



(پ) مقطع روسازی سوم (AC10-B20-SB30)



(ج) مقطع روسازی ششم (AC20-B20-SB40)



(ث) مقطع روسازی پنجم (AC15-B20-SB40)

شکل ۱- شش مقطع روسازی مورد بررسی

مجاز برای جلوگیری از ترک خستگی (N_f) وابسته به کرنش کشنشی در تار پایین لایه آسفالت (ϵ_t) و مدول ارجاعی لایه آسفالت (E_t) بر حسب kPa است. معادله خرایی انستیتو آسفالت جهت پیش‌بینی عمر خستگی قشر

سپس از روابط تجربی انستیتو آسفالت برای تبدیل مقادیر کرنش‌های بحرانی به تعداد عبور مجاز خستگی و شیارشده‌گی بهره‌گیری شد. این روابط در ادامه بیان گردیده‌اند. در روش طراحی انستیتو آسفالت، تعداد عبور

روسازی با مصالح خرده بتنی

تأثیر افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای بر روی افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه مشاهده می‌شود بدون توجه به اینکه چه مقطعی مورد نظر است، در هر سه نوع بستر با افزایش درصد مصالح خرده بتنی، عمر خستگی رویه آسفالتی افزایش یافته است.

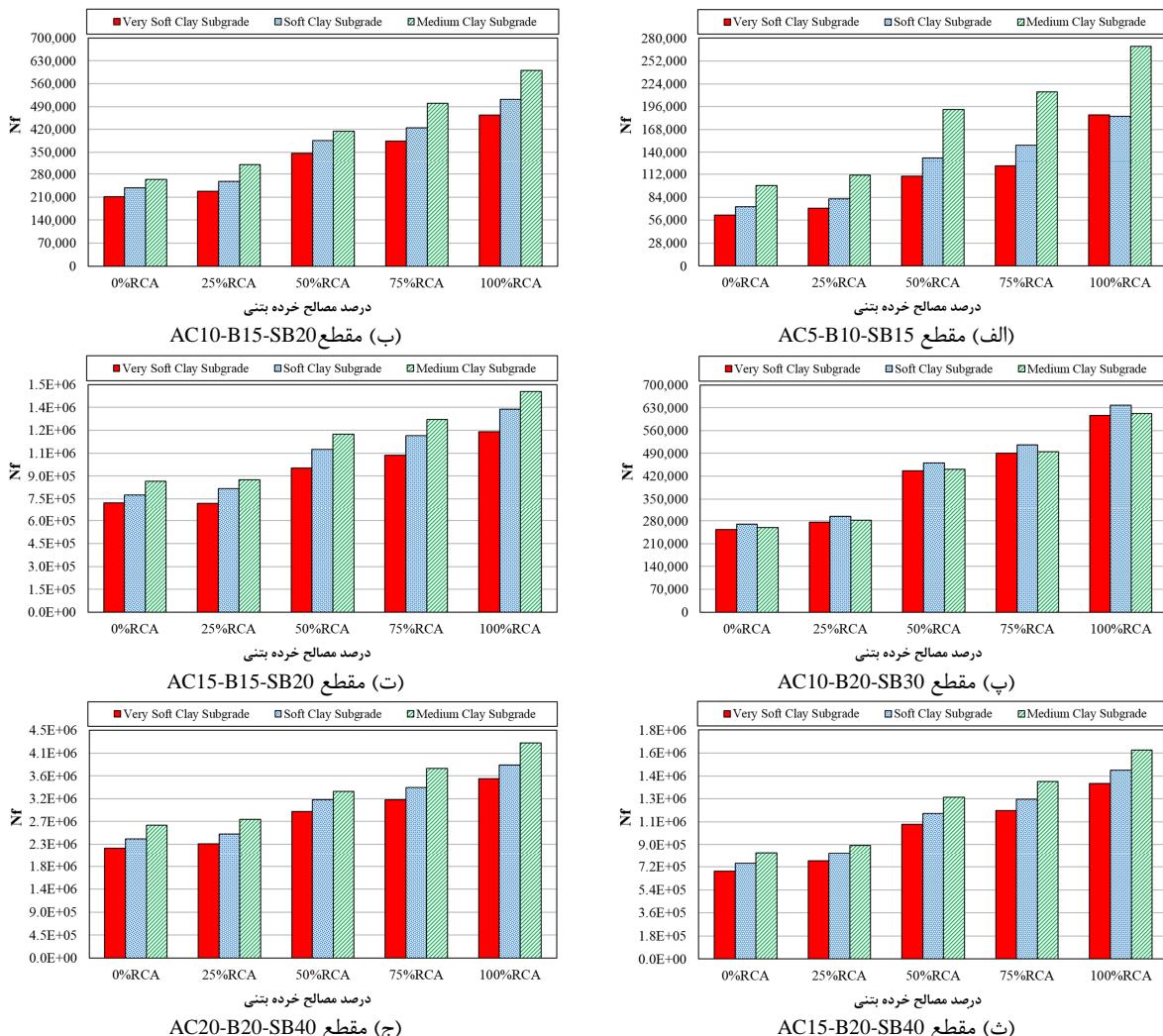
بن آسفالتی به صورت زیر است [۲۷]:

$$N_f = 0.414(\varepsilon_t)^{-3.291}(E_l)^{-0.854} \quad (12)$$

همچنین در روش طراحی انسیتو آسفالت، تعداد عبور مجاز برای جلوگیری از شیارشدن بستر (N_d) وابسته به کرنش فشاری قائم روی خاک بستر (ε_c) است. معادله خرابی انسیتو آسفالت جهت پیش‌بینی عمر شیارشدن رویه آسفالتی به صورت زیر است [۲۸]:

$$N_d = 1.365 \times 10^{-9}(\varepsilon_c)^{-4.477} \quad (13)$$

۵- ارزیابی عمر خستگی رویه آسفالتی در



شکل ۲- تأثیر اضافه نمودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای بر روی عمر خستگی رویه آسفالتی

شده است. با توجه به جدول، در کلیه مقاطع روسازی مورد بررسی، استفاده از صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خرده بتنی به ازای کلیه بسترهای، حداقل ۶۱/۶٪ و حداکثر ۹۸/۵٪

درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی مربوط به هر سه نوع بستر به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای در جدول ۴ آورده

کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت با نسبت E_1 به E_2 رابطه مستقیم دارد، در نتیجه با کاهش نسبت E_1 به E_2 کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت کاهش می‌یابد و در نهایت منجر به افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی می‌گردد. در مقطع AC5-B10-SB15، ظرفیت باربری روسازی بسیار پایین است و بیشترین تأثیر بر روی عمر خستگی رویه آسفالتی با افزایش درصد مصالح خرده بتی در این مقطع رخ داده است.

موجب افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی می‌شود. حداقل تأثیر در مورد مقطع AC20-B20-SB40 و حداکثر تأثیر در مورد مقطع AC5-B10-SB15 است. با افزایش درصد مصالح خرده بتی، مدول برجهندگی ترکیب مصالح خرده بتی و اساس سنگدانه‌ای افزایش می‌یابد. افزایش مدول برجهندگی مصالح اساس باعث می‌شود که نسبت مدول ارجاعی لایه آسفالت (E_1) به مدول ارجاعی لایه اساس (E_2) کاهش یابد. از آنجاکه

جدول ۴- مقایسه درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی به ازای افزایش درصدهای مختلف RCA

درصد افزایش مصالح خرده بتی در لایه اساس سنگدانه‌ای				مقاطع روسازی
%۱۰۰ صفر به	%۷۵ صفر به	%۵۰ صفر به	%۲۵ صفر به	
%۱۹۸/۵ الی ۱۵۴/۵	%۱۱۸/۹ الی ۹۶/۶	%۷۰/۲۵ الی ۲۵/۶	%۱۲/۹ الی ۱۲/۸	AC5-B10-SB15
%۱۲۷/۸ الی ۱۱۴/۶	%۸۹/۵ الی ۷۸/۱	%۶۳/۳ الی ۵۷/۰	%۱۷/۲ الی ۷/۷	AC10-B15-SB20
%۱۴۰/۰ الی ۱۳۵/۴	%۹۴/۱ الی ۹۰/۵	%۷۳/۰ الی ۲۰/۰	%۹/۰ الی ۸/۷	AC10-B20-SB30
%۷۲/۶ الی ۶۵/۰	%۵۰/۱ الی ۴۳/۳	%۳۸/۵ الی ۳۲/۰	%۵/۱ الی ۰/۳	AC15-B15-SB20
%۱۰۱/۰ الی ۹۶/۵	%۶۷/۰ الی ۵۲/۱	%۵۴/۶ الی ۵۲/۱	%۱۱/۸ الی ۷/۰	AC15-B20-SB40
%۶۲/۷ الی ۶۱/۶	%۴۳/۶ الی ۴۲/۸	%۳۲/۲ الی ۲۵/۲	%۴/۳ الی ۴/۰	AC20-B20-SB40

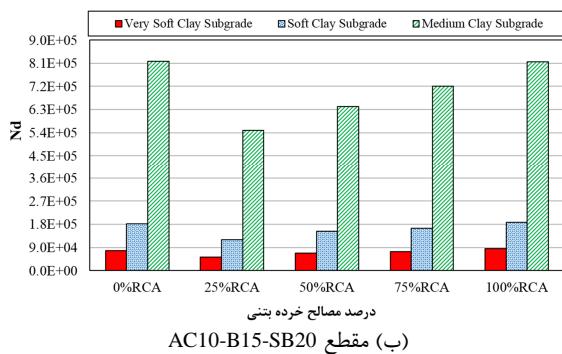
آسفالت و افزایش ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس، افزایش درصد عمر خستگی رویه آسفالتی مشاهده می‌گردد.

در کلیه مقاطع مورد بررسی، نوع بستر رابطه مستقیمی با افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی در اثر استفاده از مصالح خرده بتی ندارد. به عنوان مثال، حداکثر درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی با افزودن صفر تا ۱۰۰ درصد مصالح خرده بتی در مقطع AC10-B20- SB30 به ازای بستر خیلی نرم ۱۴۰/۰٪، در مقطع AC15-B15-SB20 به ازای بستر نرم ۷۲/۶٪ و در مقطع AC10-B15-SB20 به ازای بستر متوسط ۱۲۷/۸٪ می‌باشد. همان‌گونه که در جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی مربوط به هر سه نوع بستر به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتی، بسیار به یکدیگر نزدیک است. به عنوان مثال، در مقطع AC10-B15-SB20 درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی به ازای افزودن صفر تا ۱۰۰

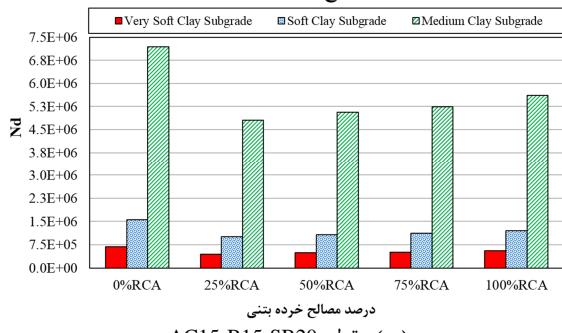
به منظور بررسی تأثیر افزایش ضخامت لایه آسفالت بر روی افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی، از مقایسه دو مقطع AC10-B15-SB20 و AC15-B15-SB20 و همچنین دو مقطع AC20-B20 و AC15-B20-SB40 استفاده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر دو مورد با ثابت ماندن ضخامت لایه اساس و زیراساس و افزایش ضخامت لایه آسفالت، کاهش درصد عمر خستگی رویه آسفالتی در اثر جایگزینی مصالح بتی بازیافتی با مصالح سنگدانه‌ای طبیعی مشاهده می‌گردد. زیرا هرچه ضخامت آسفالت کمتر باشد، شدت تنش‌هایی که به لایه پایین‌تر می‌رسد کمتر است.

به منظور بررسی تأثیر افزایش ضخامت لایه اساس و زیراساس بر روی افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی از مقایسه دو مقطع AC10-B20 و AC10-B15-SB20 و AC15-B15-SB20 و همچنین دو مقطع AC15-B20-SB40 استفاده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر دو مورد با ثابت ماندن ضخامت لایه

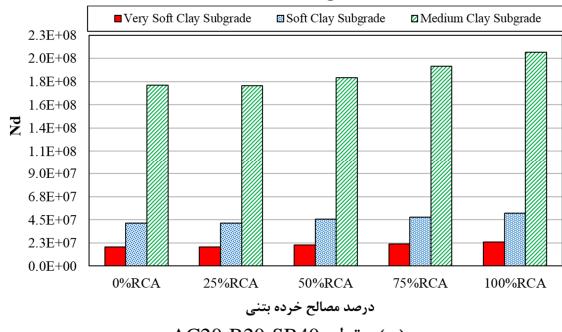
به مصالح اساس سنگدانه‌ای بر روی افزایش عمر شiarشدگی بستر در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، تغییرات عمر شiarشدگی بستر با افزایش درصد مصالح خرده بتنی متفاوت است. درصد افزایش عمر شiarشدگی بستر مربوط به هر سه نوع بستر به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای در جدول ۵ آورده شده است.



(ب) مقطع



(ت) مقطع



(ج) مقطع

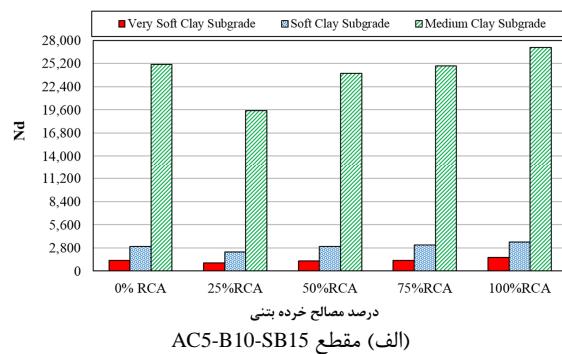
شکل ۳- تأثیر اضافه نمودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای بر روی عمر شiarشدگی بستر

شود. همچنین با افزایش درصد مصالح خرده بتنی، کرنش فشاری روی خاک بستر کاهش و مدول برجهندگی بستر افزایش می‌یابد و در نتیجه منجر به افزایش عمر شiarشدگی بستر با افزایش درصد مصالح خرده بتنی می-

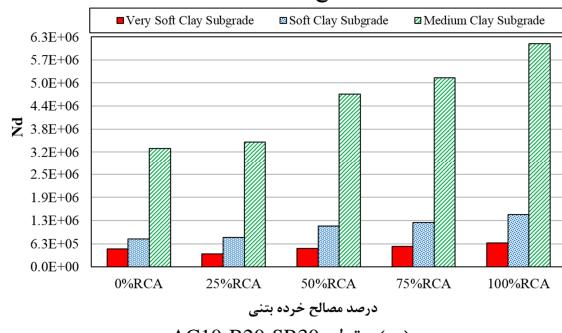
مصالح خرده بتنی در بستر خیلی نرم تا بستر متوسط از AC10-B20-114/6 به ۱۲۷/۸٪ و همچنین در مقطع SB30 از ۱۳۵/۴ به ۱۴۰/۰٪ افزایش یافته است. بنابراین تأثیر نوع بستر بر روی افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی، چندان مشهود نیست.

۶- ارزیابی شiarشدگی بستر در روسازی با مصالح خرده بتنی

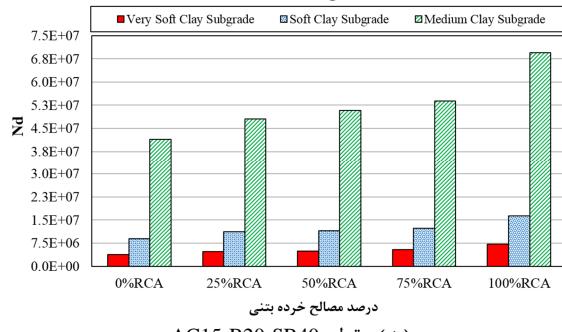
تأثیر افزودن درصدهای مختلف مصالح خرده بتنی



(الف) مقطع



(ب) مقطع



(ج) مقطع

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در کلیه مقاطع روسازی مورد بررسی، استفاده از صفر تا ۱۰۰ درصد مصالح خرده بتنی به ازای کلیه بسترهای حداقل ۲۲/۶٪ و حداقل ۸۸/۴٪ موجب افزایش عمر شiarشدگی بستر می-

دو مقطع AC20-B20-SB40 و AC15-B20-SB40 دو مقطع شود.

استفاده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر دو مورد با ثابت ماندن ضخامت لایه اساس و زیراساس و افزایش ضخامت لایه آسفالت، کاهش درصد عمر شیارشده‌گی بستر مشاهده می‌گردد.

بهمنظور بررسی تأثیر افزایش ضخامت لایه آسفالت بر روی افزایش عمر شیارشده‌گی بستر مصالح اساس حاوی درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی از مقایسه دو مقطع AC15-B15-SB20 و AC10-B15-SB20 و همچنین

جدول ۵- مقایسه درصد افزایش عمر شیارشده‌گی بستر به ازای افزایش درصدهای مختلف RCA

درصد افزایش مصالح خردہ بتی در لایه اساس سنتگدانه‌ای				مقاطع روسازی
صفر به ۱۰۰٪	صفر به ۷۵٪	صفر به ۵۰٪	صفر به ۲۵٪	
٪۲۸/۲- ۸/۱	٪۶/۸- ۰/۷	٪۴/۵- ۰/۷	٪۲۲/۳- ۲۳/۹	AC5-B10-SB15
٪۰/۸- ۰/۲	٪۵/۵- ۱۱/۷	٪۱۵/۲- ۲۱/۴	٪۳۲/۷- ۳۴/۱	AC10-B15-SB20
٪۸۸/۴- ۳۲/۶	٪۵۹/۵- ۱۲/۴	٪۴۶/۱- ۲/۷	٪۵/۷- ۲۷/۴	AC10-B20-SB30
٪۱۹/۳- ۲۲/۶	٪۲۵/۶- ۲۸/۰	٪۲۸/۶- ۳۰/۵	٪۳۳/۱- ۳۴/۷	AC15-B15-SB20
٪۶۲/۸- ۴۵/۳	٪۴۲/۸- ۳۰/۵	٪۳۲/۷- ۲۳/۰	٪۶/۱- ۲/۲	AC15-B20-SB40
٪۲۷/۶- ۱۸/۱	٪۱۷/۱- ۱۰/۲	٪۱۱/۷- ۳/۹	٪۰/۴- ۰/۳	AC20-B20-SB40

روی افزایش عمر شیارشده‌گی بستر، متفاوت و حائز اهمیت است.

همچنین ملاحظه می‌گردد که درصد افزایش عمر شیارشده‌گی بستر در یکسری از مقاطع روسازی مورد بررسی به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی منفی شده است. به عنوان مثال، در مقطع AC15-B15-SB20 درصد افزایش عمر شیارشده‌گی بستر به ازای افزودن صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خردہ بتی در بستر خیلی نرم تا بستر متوسط از ۲۲/۶- ۱۹/۳ به ۰٪ افزایش یافته است. این موضوع به این دلیل است که کرنش فشاری روی خاک بستر تابع مدول برجهندگی خاک بستر است. هنگامی که لایه‌های فوقانی سخت‌تر می‌شوند، خاک بستر تنش کمتری را تجربه می‌کند و در نتیجه مدول برجهندگی لایه بستر که غیرخطی و تابع تنش است، کاهش می‌یابد.

۷- ارزیابی تأثیر افزودن درصدهای مختلف بر عمر کلی روسازی RCA

مکانیسم خرابی غالب با توجه به کمترین مقدار از

بهمنظور بررسی تأثیر افزایش ضخامت لایه اساس و زیراساس بر روی افزایش عمر شیارشده‌گی بستر از مقایسه دو مقطع AC10-B20-SB30 و AC10-B15-SB20 و همچنین دو مقطع AC15-B15-SB20 و AC15-B20-SB40 استفاده شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در هر دو مورد با ثابت ماندن ضخامت لایه آسفالت و افزایش ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس، افزایش درصد عمر شیارشده‌گی بستر مشاهده می‌گردد.

همان‌گونه که در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد، درصد افزایش عمر شیارشده‌گی بستر مربوط به هر سه نوع بستر به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی، به یکدیگر نزدیک نیست. به عنوان مثال، در مقطع AC10-B20-SB30 درصد افزایش عمر شیارشده‌گی بستر به ازای افزودن ۱۰۰٪ مصالح خردہ بتی در بستر خیلی نرم تا بستر متوسط از ۳۲/۶ به ۰٪ افزایش یافته است. همچنین عمر روسازی در صورت استفاده از مصالح اساس حاوی ۱۰۰٪ مصالح خردہ بتی در مقطع AC15-B20-SB40 از ۱۸/۱ به ۴۵/۳ و در مقطع AC20-B20-SB40 از ۱۰/۳ به ۲۷/۶ افزایش یافته است. بنابراین تأثیر نوع بستر بر

خرده بتنی به مصالح اساس سنگدانه‌ای در بستر رسی خیلی نرم، نرم و متوسط در جدول ۶ آورده شده است.

بین عمر خستگی رویه آسفالت لایه آسفالت و عمر شیارشده‌گی بستر لایه بستر روسازی قبل از افزودن مصالح خرده بتنی و بعد از افزودن درصدهای مختلف مصالح

جدول ۶- مکانیسم خرابی غالب در بسترهاي رسی مختلف

مقاطع روسازی							افزوندی
AC20-B20-SB40	AC15-B20-SB40	AC15-B15-SB20	AC10-B20-SB30	AC10-B15-SB20	AC5-B10-SB15	بررسی مکانیسم خرابی غالب	
بستر رسی خیلی نرم							
FATIGUE	FATIGUE	RUTTING	FATIGUE	RUTTING	RUTTING	نوع	%RCA
۲۱۷۶۵۷۶	۶۸۶۴۸۲	۶۸۰۷۴۸	۲۵۲۶۱۷	۷۸۰۸۲	۱۲۶۶	N	
۲۲۶۲۹۱۶	۷۶۷۷۴۷	۴۴۸۲۱۴	۲۷۵۲۵۵	۵۱۸۶۷	۹۶۴	N	%۲۵RCA
۴	۱۲	-۳۴	۹	-۳۴	-۲۴	% افزایش	
۲۸۹۸۱۷۶	۱۰۶۱۴۵۵	۴۸۶۳۴۵	۴۳۶۹۸۲	۶۸۴۶۸	۱۲۲۷	N	%۵۰RCA
۳۳	۵۵	-۲۹	۷۳	-۱۲	-۳	% افزایش	
۳۱۲۶۱۴۸	۱۱۶۸۳۸۶	۵۰۶۵۸۹	۴۹۰۴۰۴	۷۳۸۰۲	۱۳۰۳	N	%۷۵RCA
۴۴	۷۰	-۲۶	۹۴	-۵	۳	% افزایش	
۳۵۴۱۰۲۰	۱۳۷۹۵۳۷	۵۴۹۳۹۱	۶۰۶۳۷۴	۸۴۹۹۴	۱۶۲۳	N	%۱۰۰RCA
۶۳	۱۰۱	-۱۹	۱۴۰	۹	۲۸	% افزایش	
بستر رسی نرم							
FATIGUE	FATIGUE	FATIGUE	FATIGUE	RUTTING	RUTTING	نوع	%RCA
۲۳۵۶۵۹۰	۷۴۵۸۲۰	۷۷۵۶۶۸	۲۶۹۲۹۶	۱۸۱۲۸۱	۲۹۶۱	N	
۲۴۵۳۶۸۱	۸۳۱۳۸۳	۸۱۵۵۶۰	۲۹۳۴۵۱	۱۱۹۵۳۲	۲۲۹۰	N	%۲۵RCA
۴	۱۱	۵	۹	-۳۴	-۲۳	% افزایش	
۳۱۲۸۶۶۳	۱۱۴۴۳۵۵	۱۰۷۴۴۴۸	۴۶۱۱۶۳	۱۵۳۷۸۸	۲۹۸۱	N	%۵۰RCA
۳۳	۵۳	۳۹	۷۱	-۱۵	۱	% افزایش	
۳۳۷۲۴۱۹	۱۲۵۸۰۴۰	۱۱۶۴۳۷۳	۵۱۶۳۸۱	۱۶۴۷۱۹	۳۱۶۳	N	%۷۵RCA
۴۳	۶۹	۵۰	۹۲	-۹	۷	% افزایش	
۳۸۱۸۴۹۶	۱۴۸۳۶۷۳	۱۳۳۸۸۲۳	۶۳۷۳۴۲	۱۸۸۵۱۰	۳۵۳۴	N	%۱۰۰RCA
۶۲	۹۹	۷۳	۱۳۷	۴	۱۹	% افزایش	
بستر رسی متوسط							
FATIGUE	FATIGUE	FATIGUE	FATIGUE	FATIGUE	RUTTING	نوع	%RCA
۲۶۲۷۰۵۶	۸۳۶۸۲۱	۸۶۶۶۴۳	۲۵۹۸۱۷	۲۶۳۹۳۵	۲۵۱۰۵	N	
۲۷۴۱۱۳۲	۸۹۵۰۳۷	۸۷۶۲۷۶	۲۸۲۳۹۱	۳۰۹۲۱۹	۱۹۵۰۰	N	%۲۵RCA
۴	۷	۱	۹	۱۷	-۲۲	% افزایش	
۳۲۸۸۲۸۸	۱۲۷۲۵۱۲	۱۱۷۵۱۳۶	۴۴۱۷۳۱	۴۱۴۴۹۰	۲۳۹۷۹	N	%۵۰RCA
۲۵	۵۲	۳۶	۷۰	۵۷	-۴	% افزایش	
۳۷۵۰۴۹۹	۱۳۹۷۰۹۱	۱۲۶۹۷۵۲	۴۹۴۸۴۱	۵۰۰۱۶۳	۲۴۹۳۲	N	%۷۵RCA
۴۳	۶۷	۴۷	۹۰	۹۰	-۱	% افزایش	
۴۲۴۶۵۲۴	۱۶۴۴۰۹۵	۱۴۵۵۱۶۱	۶۱۱۶۷۰	۶۰۱۱۴۱	۲۷۱۳۸	N	%۱۰۰RCA
۶۲	۹۶	۶۸	۱۳۵	۱۲۸	۸	% افزایش	

است، مکانیسم خرابی غالب در بستر رسی خیلی نرم، شیارشدنگی بستر است و در این حالت، افزودن مصالح خردہ بتی به مصالح اساس سنگدانه‌ای می‌تواند باعث کاهش عمر شیارشدنگی بستر شود.

در مجموع می‌توان دید که تأثیر استفاده از مصالح خردہ بتی در لایه اساس و زیراساس در بستر رسی خیلی نرم در ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه اساس و ضخامت‌های بالای ۳۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس مثبت است و استفاده از مصالح خردہ بتی مجاز است. همچنین در بستر رسی متوسط، در ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه اساس، ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس و همچنین ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه آسفالت، استفاده از مصالح بتی بازیافتی مجاز است. به عبارتی در بسترهای سخت، نیاز به در نظر گرفتن ملاحظات خاص از نظر ضخامت لایه‌های روسازی جهت استفاده از مصالح بتی بازیافتی نیست. در حالی که در بسترهای رسی ضعیف، باید بررسی شود که آیا استفاده از مصالح خردہ بتی باعث تأثیر منفی بر روی عمر شیارشدنگی بستر می‌شود یا خیر.

۸- نتیجه‌گیری

در کلیه مقاطع روسازی مورد بررسی، استفاده از صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خردہ بتی به ازای کلیه بسترهای حدود ۶۱/۶ تا ۱۹۸/۵٪ موجب افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی و حدود ۲۲/۶ تا ۸۸/۴٪ موجب تغییر عمر شیارشدنگی بستر می‌شود.

با افزایش ضخامت لایه آسفالت، درصد افزایش عمر شیارشدنگی بستر و عمر خستگی رویه آسفالتی ناشی از افزودن مصالح خردہ بتی در قشر اساس کاهش می‌یابد. با افزودن صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خردہ بتی، حداقل درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی در مقطع AC10-B20-SB30 مربوط به بستر خیلی نرم و برابر با ۱۴۰/٪، در مقطع AC15-B15-SB20 مربوط به بستر

همان‌گونه که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، با افزایش مقاومت خاک بستر در مقاطع AC10-B15- SB20 و AC15-B15-SB20 مکانیسم خرابی از شیارشدنگی بستر به خستگی رویه آسفالتی تغییر یافته است. عمر خستگی رویه آسفالتی به ازای افزودن درصدهای مختلف مصالح خردہ بتی به مصالح اساس سنگدانه‌ای با افزایش مقاومت خاک بستر افزایش می‌یابد. در بستر رسی خیلی نرم، در صورت چشمپوشی از مقطع AC10-B15-SB20، AC5-B10-SB15 و AC15-B15-SB20 می‌توان چنین بیان کرد که افزودن ۲۵ درصد مصالح خردہ بتی به مصالح اساس سنگدانه‌ای، عمر کلی روسازی را به میزان حدود ۱۲-۴ درصد افزایش می‌دهد. این درصد افزایش عمر کلی برای درصدهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح خردہ بتی به ترتیب در حدود ۷۳-۳۳ درصد، ۹۴-۴۴ درصد و ۶۳-۱۴۰ درصد است. در بستر رسی نرم، در صورت چشمپوشی از مقطع AC10-B15-SB20 و AC5-B10-SB15 می‌توان چنین بیان کرد که افزودن ۲۵ درصد مصالح خردہ بتی به مصالح اساس سنگدانه‌ای، عمر کلی روسازی را به میزان حدود ۱۱-۴ درصد افزایش می‌دهد. این درصد افزایش عمر کلی برای درصدهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح خردہ بتی به ترتیب در حدود ۷۱-۳۳ درصد، ۹۲-۴۳ درصد و ۶۲-۱۳۷ درصد است.

در بستر رسی متوسط، در صورت چشمپوشی از مقطع AC5-B10-SB15، می‌توان چنین بیان کرد که افزودن ۲۵ درصد مصالح خردہ بتی به مصالح اساس سنگدانه‌ای، عمر کلی روسازی را به میزان حدود ۱۷-۱ درصد افزایش می‌دهد. این درصد افزایش عمر کلی برای درصدهای ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد مصالح خردہ بتی به ترتیب در حدود ۷۰-۲۵ درصد، ۹۰-۴۳ درصد و ۶۲-۱۳۵ درصد است.

با وجود اینکه در مقاطع AC10-B15-SB20 و AC15-B15-SB20، ضخامت لایه‌های روسازی زیاد

و ضخامت‌های بالای ۳۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس مجاز است. در غیر این صورت استفاده از مصالح اساس حاوی خرده آسفالت می‌تواند سبب کاهش عمر شiarشندگی بستر شود. بر همین اساس، استفاده از مصالح خرده بتی در بستر رسی متوسط، در ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه اساس، ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه زیراساس و همچنین ضخامت‌های بالای ۱۵ سانتی‌متر برای لایه آسفالت مجاز است.

در مجموع با توجه به تحلیل‌های غیرخطی انجام شده می‌توان نتیجه‌گیری نمود که جایگزینی مصالح اساس سنگدانه‌ای با مصالح خرده بتی در تمامی حالاتها به دلیل افزایش مدول برجهندگی مصالح اساس، سبب کاهش کرنش کششی تار پایین لایه آسفالت و افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی می‌شود. افزایش عمر خستگی رابطه مستقیم با درصد جایگزینی مصالح خرده بتی دارد. با این وجود در برخی مقاطع جایگزینی مصالح اساس سنگدانه‌ای با مصالح خرده بتی سبب کاهش عمر شiarشندگی بستر می‌شود که علت اصلی این امر افزایش سختی مصالح اساس سنگدانه‌ای و کاهش شدت تنفس در خاک بستر و در نتیجه افت مدول برجهندگی مصالح خاک بستر است.

AC10-B15-SB20 نرم و برابر با ۷۲/۶٪ و در مقطع مربوط به بستر متوسط و برابر با ۱۲۷/۸٪ است. همچنین حداکثر درصد افزایش عمر شiarشندگی بستر در مقطع AC10-B20-SB30 مربوط به بستر متوسط و برابر با ۸۸/۴٪، در مقطع AC15-B20-SB40 مربوط به بستر خیلی نرم و برابر با ۶۲/۸٪ و در مقطع AC20-B20-SB40 مربوط به بستر خیلی نرم و برابر با ۲۷/۶٪ است. این موضوع نشان می‌دهد، نوع بستر رابطه مستقیمی با افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی و عمر شiarشندگی بستر در اثر استفاده از مصالح خرده بتی ندارد.

در مقطع AC10-B20-SB30 درصد افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی به ازای افزودن صفر تا ۱۰۰٪ مصالح خرده بتی در بستر خیلی نرم تا بستر متوسط از ۱۱۴/۶ به ۱۲۷/۸٪ و درصد افزایش عمر شiarشندگی بستر از ۳۲/۶ به ۸۸/۴٪ افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد، نوع بستر بر روی افزایش عمر خستگی رویه آسفالتی تأثیر چندانی ندارد اما بر روی عمر شiarشندگی بستر، تأثیر متفاوت و حائز اهمیتی دارد.

براساس نتایج تحلیل غیرخطی، استفاده از مصالح خرده بتی در لایه اساس و زیراساس در بستر رسی خیلی نرم، در ضخامت‌های بالای ۲۰ سانتی‌متر برای لایه اساس

مراجع

- [1] Rahrovan, M. (1395). "Assessment of reclaimed asphalt pavement material and subgrade soil mix stabilized with Portland cement and lime", M.S Thesis, Department of Civil Engineering, Yazd University.
- [2] USGS (United States Geologic Survey). (2019). "Mineral commodity summaries", U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- [3] Lu, C., Chen, J., Gu, C., Wang, J., Cai, Y., Zhang, T & Lin, G. (2021). "Resilient and permanent deformation behaviors of construction and demolition wastes in unbound pavement base and subbase applications", Transportation Geotechnics, 28, 100541.
- [4] US EPA. (2020). "advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet", Assessing Trends in Materials Generation and Management in the United States.
- [5] Akhtar, A. and Sarmah, A. K, (2018). "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective", Journal of Cleaner Production, 186, 262–281.
- [6] American College Personnel Association (ACPA). (1993). "Concrete Paving Technology: Recycling Concrete Pavement", American Concrete Pavement Association: Skokie, Illinois.
- [7] Ashtiani, R. S. (2009). "Anisotropic characterization and performance prediction of chemically and hydraulically bounded pavement foundations", Ph.D. Thesis, Texas A&M University, College Station: Texas.
- [8] Williams, B. A., Copeland, A., & Ross, C. T. (2018). "Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2017, Information Series 138 (8th edition) ", In National Asphalt Pavement Association (NAPA): Lanham.
- [9] ACPA (American Concrete Pavement Association). (2019). "Why recycled concrete pavements?",

- <http://1204075.sites.myregisteredsite.com/downloads/TS/EB043P/TS043.1P.pdf>, last accessed 2019/10/2019.
- [10] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Aatheesan, T., & Bo, M. W. (2011). “Geotechnical Properties of Recycled Crushed Brick in Pavement Applications”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(10), 1444–1452.
- [11] Fraj, A. B., & Idir, R. (2017). “Concrete based on recycled aggregates—Recycling and environmental analysis: A case study of paris’ region”, *Construction and Building Materials*, 157, 952-964.
- [12] Butler, L., Tighe, S., West, J. (2013). “Guidelines for Selection and Use of Coarse Recycled-Concrete Aggregates in Structural Concrete”, *Transportation Research Record*, 2335, 3-12.
- [13] Poon, C. S., & Chan, D.X. (2006). “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base”, *Construction and Building Materials*, 20(8), 578–585.
- [14] Gharibloo, A. (1391). "Technical evaluation of recycled concrete material and recycled construction material in sub-base layer of highways, M.S Thesis, Department of Civil Engineering, Imam Khomeini International University.
- [15] Bennert, T., Papp Jr, W. J., Maher, A., & Gucunski, N. (2000). “Utilization of construction and demolition debris under traffic-type loading in base and subbase applications”, *Transportation Research Record*, 1714, 33–39.
- [16] Saberi, S. S., Mohamed, A., & Eltwati, A. S. (2021). “Mechanical And Physical Properties Of Recycled Concrete Aggregates For Road Base Materials”, In *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 1973(1).
- [17] Gu, C., Ye, X., Cao, Z., Cai, Y., Wang, J., & Zhang, T. (2020). “Resilient behavior of coarse granular materials in three dimensional anisotropic stress state”, *Engineering Geology*, 279, 105848.
- [18] Titi, H. h, Elias, M. b, & Helwany, S. (2006). “Determination of typical resilient modulus values for selected soils in Wisconsin (Final Report 0092-03-11) ”, Office of Research Services and Administration, University of Wisconsin-Milwaukee. http://wisdotresearch.wi.gov/wp-content/uploads/0092-08-12_RFP1.
- [19] Hicks, R. G., & Monismith, C. L. (1971). “Factors influencing the resilient response of granular materials”, *Highway Research Record*, 345, 15–31.
- [20] Uzan, J. (1985). “Granular Material Characterization”, *Transportation Research Record*, 1022, 52–59.
- [21] Witczak, M. W., & Uzan, J. (1998). “The Universal Airport Pavement Design System: Granular Material Characterization”, In University of Maryland, Department of Civil Engineering: College Park, Md.
- [22] NCHRP. (2004). “Guide for Mechanistic–Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures (Final Report for Project 1-37A)”, In National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board: Washington, D.C.
- [23] Andrei, D., Witczak, M. W., Schwartz, C. W., & Uzan, J. (2004). “Harmonized resilient modulus test method for unbound pavement materials”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1874(1), 29–37.
- [24] NCHRP. (1997). “aboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design (Web Document 14 for Project 1-28) ”, In National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board: Washington, D.C.
- [25] Ghazizadeh, A. R., & Ziaie, A. (2015). “NonPAS : A Program for Nonlinear Analysis of Flexible Pavements”, *International Journal of Integrated Engineering*, 7(1), 21–28.
- [26] Park, H. I., Kweon, G. C., & Lee, S. R. (2009). “Prediction of resilient modulus of granular subgrade soils and subbase materials using artificial neural network”, *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 647–665.
- [27] Shook, J. F. (1982). “Thickness Design of Asphalt Pavements—The Asphalt Institute Method”, Proceedings, 5th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Delft university of Technology, The Netherlands, 1, 17-44.
- [28] Asphalt Institute (AI). (1982). “Research and Development of the Asphalt Institute’s Thickness Design (MS-1)”, Research Rep. 82-2, 9th ed, Asphalt Institute.