Archive of SID

بررسی خصوصیات رفتاری بتن غلتکی حاوی مصالح خرده آسفالتی

امیر مدرس (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
سیده زینب حسینی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
E-mail: a-modarres@nit.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۸ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

چکیده

با توجه به اینکه در صنعت ساخت بزرگراه‌ها، هرساله چندین میلیون تن خرده آسفالت تولید می‌شود و معمولاً میزان بسیار زیادی از این مواد غیرقابل استفاده، حجم زیادی از زمین را اشغال می‌کند، استفاده مناسب از این مواد گریزناپذیر است. هر چند استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی امری معمول شده، اماهنوز استفاده از آنها در روسازی بتن غلتکی آن‌طور که باید، مورد توجه قرار نگرفته‌است. در این پژوهش، خرده آسفالت به‌عنوان جایگزین بخش درشت‌دانه باخرده‌آسفالت، جایگزینی بخش ریزدانه‌با خرده‌آسفالت و همچنین جایگزین هر دو بخش درشت دانه و ریزدانه با خرده آسفالت، مورداستفاده قرارگرفت. نتایج نمودار بار – تغییر مکان که از آزمایش خمش سه نقطه‌ای به دست آمد، نشان داد که قابلیت جذب انرژی با افزودن خرده آسفالت افزایش یافته و آستانه گسیختگی بتن را افزایش می‌دهد. قابلیت جذب انرژی آن مخلوطی که بخش درشت‌دانه آن با خرده آسفالت جایگزین گردیده‌است، تقریباً به مخلوطی که هر دو بخش آن با خرده آسفالت جایگزین شده و بیشترین قابلیت جذب انرژی رادارد نزدیک است. با توجه به اینکه مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول گسیختگی این مخلوط حداقل‌های استانداردها را نسبتاً برآورده می‌کند، درنتیجه خرده آسفالت می‌تواندجایگزین مناسبی برای سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی باشد.

واژه های کلیدی: بتن غلتکی روسازی، خرده آسفالت، خمش سه نقطه ای، مدول گسیختگی، قابلیت جذب انرژی

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

استفاده از مواد بازیافتی در بتن‌های سیمانی در سال‌های اخیر مورد توجه بیشتری قرار گرفته است، و همواره بهبود خواص بتن از اهداف اصلی به شمار آمده است. تحقیقاتی در زمینه استفاده از مصالح خرده آسفالتی[1] در مخلوط‌های بتنی انجام شده، ولی با توجه به اینکه بتن غلتکی[2] مزیت‌های زیادی از قبیل سهولت اجرا و هزینه کمتر نسبت به بتن معمولی دارد، تحقیقات در این زمینه بسیار محدود است. از این‌رو در این پژوهش به بررسی تأثیر مصالح خرده آسفالتی بر عملکرد بتن غلتکی پرداخته شده است.

طبق تعریف، بتن غلتکی عبارت است از مخلوط سفت و نسبتاً خشکی از سنگ‌دانه‌ها (با اندازه حداکثر ۱۹ میلی‌متر)، مواد سیمانی و آب که توسط دستگاه‌های متداول روسازی آسفالتی (فینیشر) پخش و پس از آن توسط غلتک لرزنده کوبیده و متراکم می‌شود. مخلوط بتن غلتکی دارای کارآیی و ظاهری مشابه با مخلوط شن مرطوب و یا بتن با اسلامپ صفر است. کارآیی بتن غلتکی بسیار مهم بوده و بر روی تراکم‌پذیری آن تأثیر بسیار دارد. در حالت سخت شده بتن غلتکی روسازی از بسیاری جهات مشابه بتن معمولی است و پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر روی خواص بتن‌های معمول مانند: نسبت آب به سیمان (w/c) و میزان تراکم، تأثیر مشابه روی خواص بتن غلتکی دارند. درجه تراکم دارای اهمیت زیادی است و بنابراین درصد رطوبت مخلوط از دیدگاه ژئوتکنیکی باید نزدیک به درصد رطوبت بهینه آن باشد تا منجر به تراکم حداکثر و در نتیجه مقاومت مناسب گردد. همچنین با کاهش (w/c) مقاومت بتن افزایش می‌یابد. البته موضوع اخیر با فرض کافی بودن درصد رطوبت، جهت تراکم مطلوب بتن غلتکی است. مخلوط بتن غلتکی معمولاً به عنوان سطح نهایی سواره‌رو استفاده می‌شود [Guidelines for design and performance of roller compacted concrete in roads (IRI), 2009].

بتن غلتکی مزایای دیگری نیز دارد که سبب برتری آن نسبت به روسازی‌های آسفالتی و بتنی معمولی شده است، که از آن جمله می‌توان به مواردی چون: اجرای سریع، هزینه‌های اجرایی کمتر به میزان حدود ۱۵ تا ٤۰٪ نسبت به بتن معمولی [Naik et al. 2001] نیاز به حداقل تعمیر و نگهداری، اجازه عبور ترافیک بلافاصله بعد از تراکم سطح روسازی، مصرف کمتر سیمان نسبت به سایر روسازی‌های بتنی اشاره نمود. همچنین در صورت طراحی درست، مقاومت فشاری و دوام بسیاری نیز دارد. مسئله امکان آب‌انداختگی[3] در روسازیهای بتن معمولی از مواردی است که باید مد نظر قرار گرفته و کنترل شود. در بتن‌های غلتکی به علت کم بودن آب اختلاط، پدیده آب‌انداختگی رخ نمی‌دهد .[Guidelines for design and performance of roller compacted concrete in roads (IRI), 2009]

مزایای بتن غلتکی در مقایسه با روسازی آسفالتی مواردی چون:

۱- .افزایش مقاومت خمشی در حدود ۲۵/۲ ٪

۲- مقاومت خوب در برابر سایش

۳- عدم نیاز به لایه محافظتی[4]، به عبارتی در آینده بعد از خرابی سطح می‌توان از یک لایه محافظتی استفاده کرد.

٤- مقاومت بهتر در دمای زیاد [Koohmishi, 2013]. یکی از مزیت‌های مهم بتن غلتکی نسبت به روسازی آسفالتی این است که بستر، تنش‌های کمتری را زیر بار چرخ ماشین‌ها تحمل می‌کند [Prusinski et al. 2013].

بتن غلتکی از لحاظ رنگ بسیار شبیه به روسازی بتنی معمولی است، ولی از نظر بافت سطح، متفاوت است. بزرگ‌ترین مانع برای استفاده از بتن غلتکی در بزرگراه‌های با سرعت زیاد، ناهمواری سطح آن است. اغلب استفاده از بتن غلتکی برای پارکینگ‌های صنعتی و شانه‌های بزرگراه‌ها است. [Rock Products Committee, 2012]

مزیت‌های اصلی این پژوهش را می‌توان در دو مورد خلاصه کرد:

۱- خرده آسفالت‌های بازیافتی مسلماً از قیمت کمتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی برخوردارند. از آنجایی که بتن غلتکی هزینه کمتری نسبت به روسازی بتنی معمولی دارد، می‌تواند هزینه‌های ساخت را بسیار کم کند

۲- مزایای زیست‌محیطی استفاده از خرده آسفالت، شامل کاهش استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و دست نزدن به منابع طبیعی آن‌ها و کاهش فضای مورد نیاز جهت دپوی خرده آسفالت است.

مخلوط‌های بتنی معمولی عموماً دارای میزان چقرمگی[5] کمی هستند که ممکن است منجر به شکست ناگهانی ساختار و طول عمر کوتاه

www.SID.ir

Archive of SID

آن‌ها شود [Huang et al. 2006]. بنابراین لازم است که خصوصیات چقرمگی و قابلیت جذب انرژی[6] بر روی بتن حاوی خرده آسفالت نیز بررسی شود. یکی از اهداف این تحقیق بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت بر میزان چقرمگی مخلوط بتن غلتکی است. به دلیل وجود لایه قیر در اطراف خرده آسفالت، استفاده از این مصالح به عنوان جایگزین مصالح طبیعی بتن غلتکی می‌تواند باعث کاهش جذب آب و در نتیجه کاهش میزان آب مورد نیاز شود. بنابراین استفاده از خرده آسفالت در بتن غلتکی توجیه فنی بیشتری، نسبت به بتن‌های معمولی دارد. از دیگر اهداف مهم این تحقیق پیدا کردن یک مخلوط متعادل از نظر خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری (قابلیت جذب انرژی) در روسازی بتن غلتکی است.

نوآوری‌های این پژوهش، استفاده از اندازه‌های مختلف (درشت‌دانه و ریزدانه) خرده آسفالت در مخلوط‌های بتن غلتکی است. آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های تیرشکل، جهت به دست آوردن مدول گسیختگی و قابلیت جذب انرژی با استفاده از تجهیزات دستگاه یونیورسال انجام شد. در پژوهش‌های قبلی برای محاسبه پارامتر قابلیت جذب انرژی از نمونه‌های استوانه‌ای و نتایج آزمون ITS استفاده شده بود. به دست آوردن مدول گسیختگی با استفاده از آزمون خمش، باعث محاسبه ضخامت روسازی برای مخلوط‌ها شد.

۲. پیشینه تحقیقات

اولین کاربرد بتن غلتکی به شکل امروزی در ساخت محوطه‌هایی برای کارخانه‌های چوب و الوار با بارگذاری سنگین در ونکوور کانادا در سال ۱۹۷۰ بود [Iran. Ministry of Roads and Transportation, 2009]

گسترش این نوع روسازی عمدتاً به علت بحران نفتی دهه ۷۰ میلادی بوده که باعث افزایش هزینه‌های اجرای آسفالت در سطح جهان شده بود. این فنآوری جدید سبب کاهش هزینه‌های اجرایی به میزان ۳۰ درصد شده است [Al Abdul Wahhabh, and Asi, 1999]. در مناطقی از دنیا از روسازی بتن غلتکی به عنوان یک راه حل اقتصادی و جدید برای بازسازی و نوسازی جاده‌ها استفاده می‌شود. [Delatte, 2009]

در سال‌های اخیر مواد بازیافتی زیادی در مخلوط‌های بتنی معمولی و بتن غلتکی بکار رفته است. پژوهشی که در زمینه بررسی نقش خرده بتن بازیافتی راه به عنوان سنگدانه در بتن غلتکی انجام شده، نشان‌دهنده عملکرد بسیار خوب سنگدانه‌های بازیافتی و قابل استفاده بودن این مصالح در بتن غلتکی است. به عنوان مثال مشخصات آن شامل وزن مخصوص برابر با kg/m^3 ۲۶۴۳ و جذب آب آن برابر با ٤/٥٨ درصد و ضریب لس‌آنجلس برابر با ۲۵ بوده است. همچنین این تحقیق نشان داد که خرده بتن ریزتر می‌تواند تأثیر بیشتری روی خواص مکانیکی بتن غلتکی بگذارد. با توجه به اینکه افزودن خرده بتن، مقاومت فشاری مخلوط را کاهش می‌دهد، اما به دلیل اثرات زیست‌محیطی مثبت و صرفه اقتصادی، استفاده از آن در مخلوط‌های بتن غلتکی مطلوب گزارش شده است. [Courard et al. 2010].

تحقیقی که در مورد مصالح بازیافتی دیگر از سرباره کنورتر کارخانه ذوب‌آهن انجام شده و در آن، این مصالح بازیافتی جایگزین بخشی از سنگدانه‌های مخلوط بتن غلتکی شده است، نشان داد که جایگزینی ۲۵ درصد این مواد باعث بهبود خواص مقاومتی بتن غلتکی شده و افزایش بیشتر در درصد جایگزینی سرباره باعث کاهش مقاومت گردید. بر مبنای تحقیقات انجام شده در تحقیق فوق با توجه به قیمت ارزان‌تر سرباره نسبت به سنگدانه طبیعی، استفاده از سرباره موجب کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود [Ameri et al. 2009]

هوانگ و همکاران، به بررسی تأثیر استفاده از خرده آسفالت در مخلوط‌های بتنی معمولی پرداخته اند. در این پژوهش به جای خرده آسفالت بازیافتی از خرده آسفالت مصنوعی و پیر شده[7] در آزمایشگاه و در قالب ۳ مخلوط به صورت: جایگزینی در بخش درشت دانه، جایگزینی در بخش ریزدانه و جایگزینی در هر دو بخش، استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم، نشان دهنده کاهش مقاومت در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بود. در بخش دیگری از این پژوهش، بررسی شاخص چقرمگی[8] در سنین مختلف حاکی از افزایش

www.SID.ir

Archive of SID

قابلیت جذب انرژی در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بوده است [Huang et al. 2006].

پژوهش مشابهی در دانشگاه فلوریدا در رابطه با افزودن خرده آسفالت به بتن معمولی انجام شده است. خرده آسفالت با درصدهای مختلف ۰، ۲۰، ٤۰، ۷۰ و ۱۰۰ به مخلوط بتن معمولی اضافه گردید. نتایج این پژوهش نشان دهنده کاهش در مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم با افزایش درصد خرده آسفالت بود. میزان کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بود. ولی شاخص انبساط حرارتی و انقباض ناشی از خشک شدن[۹] با افزایش درصد خرده آسفالت افزایش یافت [Hossiney, 2012].

در پژوهشی دیگر، از لاستیک‌های خرد شده به عنوان جایگزین سنگدانه استفاده شد. نتایج تا حد زیادی مشابه با خرده آسفالت و نشانگر کاهش مقاومت، با افزایش درصد خرده لاستیک بوده است. تنها تفاوت در این است که بتن ترکیبی با لاستیک، کاهش مقاومت بیشتری را نسبت به خرده آسفالت از خود نشان داده و این می‌تواند از مزیت‌های خرده آسفالت نسبت به خرده لاستیک باشد. مزیتی که اضافه کردن خرده لاستیک به بتن معمولی دارد، افزایش خاصیت جذب انرژی در بتن است [Huang et al. 2004 and Neyisi et al. 2004].

پژوهشی در زمینه افزودن دوده CFBC[۱۰] به مخلوط‌های بتن غلتکی انجام شده و تاثیر آن بر روی این بتن بررسی شده است. CFBC محصول دور ریز یا تولید یک نیروگاه احتراق کک است. خاکستر CFBC ممکن است کارآیی بتن تازه را کاهش دهد. میزان "وی بی"، مطابق پیشنهاد ACI برای همه مخلوط‌ها به استثنای مخلوط با ۱۵٪ جایگزینی رضایت‌بخش بود. این خاکستر می‌تواند میزان جذب آب[۱۱] را افزایش دهد و در کاهش جذب سطحی اولیه[۱۲] موثر باشد؛ زیرا این خاکستر میزان زیادی اکسید کلسیم (Cao)، SO_3 و L.O.I دارد. همچنین تاثیر مثبتی بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها داشته است [Chi and Huang, 2014].

پژوهشی که در زمینه اضافه کردن خاکستر پوسته برنج[۱۳] به مخلوط بتن غلتکی انجام شد، نشان داد که میزان ۵ درصد خاکستر پوسته برنج مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته آن را افزایش می‌دهد. این رشد بستگی به سن عمل‌آوری مخلوط و یا نوع سیمان مصرفی نیز دارد. اضافه کردن همین مقدار خاکستر پوسته برنج به مخلوط بتن غلتکی باعث کاهش مصرف سیمان لازم برای رسیدن به مقاومت خمشی مطلوب می‌شود. همچنین باعث کاهش در میزان مصرف سنگدانه‌های معدنی از مقدار لازم آن است. کاهش در میزان سیمان و سنگدانه اثرات زیست محیطی مثبتی نیز خواهد داشت. [Villena et al. 2011]

در پژوهشی که کریمی در رابطه با استفاده از خرده آسفالت در بتن غلتکی انجام داد، نشان داده شد که استفاده از خرده آسفالت تاثیر چندانی بر روانی و میزان آب مورد نیاز مخلوط بتن غلتکی ندارد و تقریباً زمان "وی بی" ثابت است. از این‌رو می‌توان تا حدی مقدار آب مخلوط را کاهش داد که خود عملی در افزایش مقاومت مخلوط‌های بتنی است. در این پژوهش روابطی با R-Square جهت پیش‌بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی ارائه شد. مقادیر درصد مجاز جایگزینی خرده آسفالت وابسته به مقاومت طراحی مخلوط مبنا است. مخلوط بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت به رسم سایر مخلوط‌های حاوی مواد قیری در مقابل تغییرات دما و به ویژه افزایش دما حساس است و در اثر افزایش دما و متعاقباً افزایش روانی قیر، مقاومت فشاری مخلوط بیش از حد معمول مخلوط‌های بتن غلتکی کاهش می‌یابد [Karimi and Hasani, 2011]

۳. تحقیقات آزمایشگاهی

برنامه تحقیقات آزمایشگاهی بر پایه بررسی مشخصات فنی بتن غلتکی حاوی دو نوع آسفالت بازیافتی درشت‌دانه و ریزدانه استوار است. خرده آسفالت بازیافتی مورد استفاده در این پژوهش از نمونه‌های تراشیده شده سطح روسازی‌های آسفالتی انتخاب شده است. برای ارزیابی مشخصات فنی نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۷ و ۲۸ روز، از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی غیرمستقیم بهره گرفته شده است. مقاومت خمشی نیز در زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه بررسی شد.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۱ مصالح

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل شن و ماسه طبیعی، خرده آسفالت بازیافتی، سیمان و آب بوده است. سیمان استفاده شده از نوع تیپ II با مشخصات استاندارد ASTM C150 است. حداکثر اندازه اسمی مصالح ۱۹ میلی‌متر بوده و دانه‌بندی آن مطابق جدول (۱) بر اساس دستورالعمل PCA انتخاب شد [Portland Cement Association, 1987]. لازم به ذکر است که برای همه ترکیب‌ها از همین دانه‌بندی استفاده شده تا شرایط یکسانی برای همه حالت‌ها در نظر گرفته شود. در این پژوهش تنها از یک نوع دانه‌بندی استفاده شد. مشخصات فنی سنگ دانه‌های مورد آزمایش نیز مطابق جدول (۲) است.

جدول۱. دانه‌بندی مورد استفاده

اندازه الک	درصد عبوری از الک	
	دانه‌بندی PCA	دانه‌بندی مورد استفاده
۱in	۱۰۰	۱۰۰
۳/٤in	۹۰-۱۰۰	۹۸
۱/۲in	۷۰-۹۰	۸۵
۳/۸in	۷۰-۸۵	۷۵
#٤	٤۰-٦۰	٤۰/۷
#۱٦	۲۰-٤۰	۲۰
#۱۰۰	٦-۱٦	۷
#۲۰۰	۲-۸	۲
درصد درشت دانه		۵۹/۳
درصد ریزدانه		٤۰/۷

جدول۲. مشخصات فنی سنگدانه‌ها

ویژگی	استاندارد	واحد	نتیجه
مقاومت فشاری	BS 812-3	Kg/cm^2	۸۰۰
مقاومت ضربه‌ای	ASTM D5821-13	٪	۲۳
سایش لس‌آنجلس	ASTM C131-06	٪	۲۰

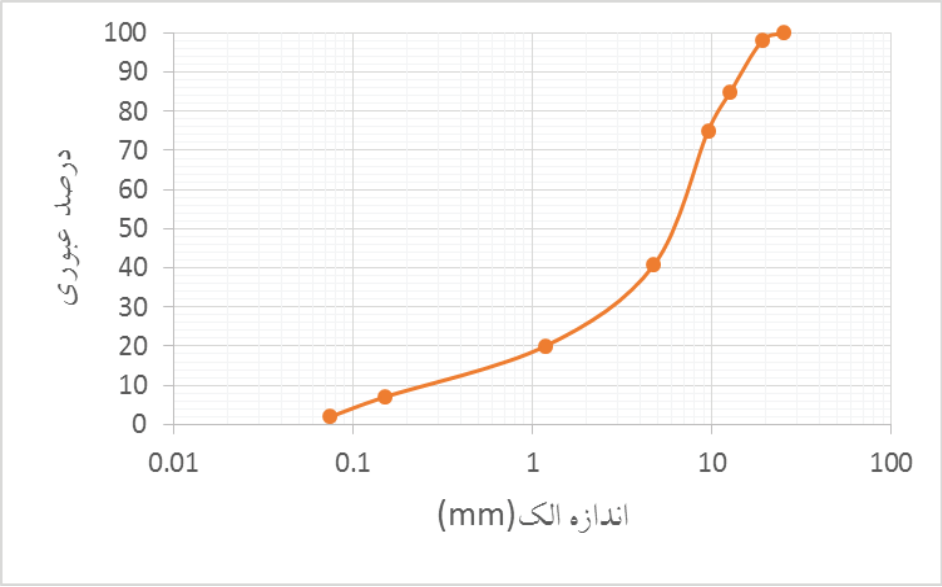
مصالح خرده آسفالتی از دپوی موجود در اطراف شهر دماوند تهیه شد. تکه‌های بزرگ خرده آسفالت در گرم‌کن قرار گرفته و پس از نرم شدن، توسط چکش لاستیکی کاملاً خرد شدند. پس از سرد شدن خرده آسفالت‌ها، بخش درشت‌دانه و ریزدانه با استفاده از الک شماره ٤ از یکدیگر جدا و دانه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که جنس و مشخصات خرده آسفالت مورد استفاده در این تحقیق ثابت بوده و تنها پارامتر متغیر دانه‌بندی خرده آسفالت است. نمودار دانه‌بندی خرده آسفالت در حین استفاده مطابق شکل ۱ است. برای قرار گیری نمونه‌ها در شرایط یکسان، خرده آسفالت‌ها نیز مشابه با سنگدانه‌های طبیعی دانه‌بندی شدند.

۳-۲ ترکیبات مورد مطالعه و طرح اختلاط

ترکیبات مورد مطالعه و نسبت اختلاط مصالح در این تحقیق مطابق جدول‌های (۳) و (٤) بوده است. مخلوط شماره ۱ که هر دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه آن از سنگدانه طبیعی ساخته شده، در واقع همان مخلوط بتن غلتکی شاهد است. تأثیر خرده آسفالت‌های درشت‌دانه و ریزدانه بر مخلوط‌های بتن غلتکی در قالب مخلوط‌های جدا بررسی شد. مخلوط‌های شماره ۲ تنها حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه و مخلوط شماره ۳ تنها حاوی خرده آسفالت ریزدانه است. آخرین مخلوط هم تنها از خرده آسفالت ساخته شده و هیچ گونه سنگدانه طبیعی در آن وجود ندارد. روش‌های طرح اختلاط بتن غلتکی به دلیل سفت‌تر بودن مخلوط و نیز دانه بندی متمایز آن، با روش‌های بکار رفته برای بتن‌های معمولی متفاوت است. روش‌های مختلفی برای طرح اختلاط مخلوط‌های بتن غلتکی ارائه شده است. این روش‌ها را

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خرده آسفالت

می‌توان به دو دسته کلی زیر تقسیم کرد:

– طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن (روش بتنی)

– طرح اختلاط با استفاده از آزمایش‌های تراکم خاک (روش خاکی)

در این پژوهش از روش تراکم خاک استفاده شد. این کار مشابه روش‌هایی است که برای تعیین رابطه بین مقدار رطوبت و چگالی خاک‌ها یا مخلوط‌های خاک–سنگدانه بکار می‌رود. تجهیزات و میزان انرژی تراکم برای تهیه نمونه‌های آزمایش رطوبت– چگالی در استاندارد ASTMD1557-12 شرح داده شده است.

ریزدانه و درشت‌دانه، به نحوی انتخاب می‌شوند که ترکیبی با دانه‌بندی مناسب ایجاد کنند. مقدار حجم ریزدانه و درشت دانه در واحد حجم بتن غلتکی پس از محاسبه مقدار رطوبت بهینه، تعیین می‌شود. مقدار بهینه رطوبت مخلوط، مقدار متناظر با نقطه پیک منحنی رطوبت–چگالی است که بستگی به خواص سنگدانه‌های مصرفی و مقدار مواد سیمانی دارد. میزان رطوبت بهینه و چگالی حداکثر برای مخلوط بتن غلتکی شاهد به دست آمد و برای سه مخلوط مورد مطالعه دیگر نیز به همین اندازه تعیین گردید تا شرایط یکنواختی برای هر ٤ مخلوط به وجود آید.

میزان سیمان مورد استفاده در مخلوط‌ها حدود ۲ ٪ جرم مصالح خشک تعیین و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۵ در نظر گرفته شد.

نسبت اختلاط مخلوط‌های آزمایشگاهی در جدول (٤) نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات مخلوط بتن غلتکی شاهد و مخلوط شده با خرده آسفالت

شماره مخلوط	ریزدانه	درشت‌دانه
۱	طبیعی	**طبیعی**
۲	طبیعی	**آسفالت بازیافتی**
۳	آسفالت بازیافتی	**طبیعی**
٤	آسفالت بازیافتی	**آسفالت بازیافتی**

۳–۳ ساخت نمونه‌ها و عمل‌آوری

به دلیل خشک‌تر بودن بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی، روش ساخت نمونه‌ها در این نوع بتن متفاوت است. روش‌های طرح اختلاطی که تاکنون بکار گرفته شده‌اند شامل دو دسته کلی هستند. در روش اول نمونه بتن غلتکی در داخل قالب و روی میز

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ٤. نسبت اختلاط مخلوط‌های آزمایشگاهی(kg/m^3)

مخلوط	درشت‌دانه RAP	ریزدانه RAP	سنگ درشت‌دانه	سنگ ریزدانه	سیمان	آب
1	—	—	۱۰۸٤	۹۵۲	۲۸٦	۱۰۰
2	۱۰۸٤	—	—	۹۵۲	۲۸٦	۱۰۰
3	—	۹۵۲	۱۰۸٤	—	۲۸٦	۱۰۰
4	۱۰۸٤	۹۵۲	—	—	۲۸٦	۱۰۰

ارتعاش، تحت وزن سربار و در سه لایه متراکم می‌شود. استاندارد ASTM C1176-13 جزئیات این روش را بیان می‌کند. در روش دیگر نمونه‌ها به وسیله ضربات کوبه و در پنج لایه مطابق روش ذکر شده در استاندارد ASTM D1557-12 ساخته می‌شوند. ایجاد تراکم کامل در نمونه بتن غلتکی با استفاده از میز ارتعاشی دشوار بوده و غالباً در مقایسه با مغزه‌های گرفته شده از روسازی راه، چگالی کمتری داشته اند [Guidelines for design and performance of roller compacted concrete in roads (IRI), 2009]. در مقابل، نمونه‌های متراکم شده توسط کوبه می‌توانند چگالی مشابهی با نمونه‌های اخذ شده از سطح روسازی راه داشته باشند. از این‌رو در این پژوهش از روش تراکم با کوبه استفاده شد [Guidelines for design and performance of roller compacted concrete in roads (IRI), 2009]. نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم به صورت استوانه‌ای بوده‌اند. برای آزمایش خمش، نمونه‌های تیرچه‌ای استفاده شد. نمونه‌های تیرچه دارای سطح قابل توجهی هستند و برای آن‌ها کاربرد روش تراکم کوبه‌ای مناسب نبوده و دستیابی به تراکم یکنواخت بسیار مشکل است. بنابراین با توجه به توصیه‌های انجام شده، این نمونه‌ها با استفاده از روش تراکم ارتعاشی همراه با سربار ساخته شدند، به‌این صورت که قالب منشوری شکل فلزی، با گیره دستی به میز ویبره بسته و ثابت شد. مطابق استاندارد، مخلوط در سه لایه درون قالب ریخته شده و با استفاده از سربار ۲۰kg هر لایه جداگانه متراکم شد.

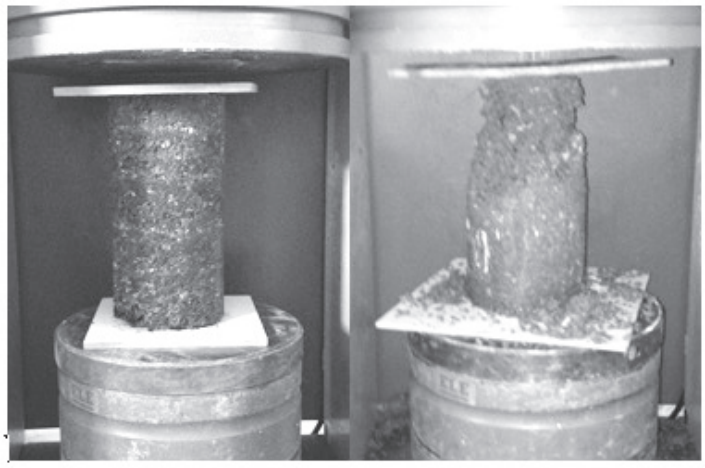
پس از اتمام ساخت، نمونه‌ها در شرایط عمل‌آوری قرار داده شدند. به‌این منظور نمونه‌ها، ابتدا به مدت ٢٤ ساعت درون قالب و در حالتی که روی آن‌ها با روکش نایلونی پوشانده شده بود، نگهداری شدند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و درون حمام آب قرار گرفتند.

٤-٣ روش آزمایش

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰۰ در ارتفاع ۲۰۰ و برای اندازه‌گیری مقاومت کششی غیرمستقیم نیز از نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ در ارتفاع ۳۰۰ استفاده شد. نمونه های مقاومت فشاری سپس با توجه به ضرائب آئین نامه بتن ایران به اندازه استاندارد یعنی استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ در ارتفاع ۳۰۰ اصلاح شدند. محاسبات با ابعاد استاندارد انجام شد. مطابق استاندارد ASTM C39-14، مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی پس از ۷ و ۲۸ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. شکل (۲) وضعیت نمونه‌ها را پس از گسیختگی در آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد. با توجه به شکل، نمونه شاهد تقریباً متلاشی شده، در حالی‌که تغییر قابل توجهی در ظاهر مخلوط حاوی خرده آسفالت مشاهده نشد. این موضوع می‌تواند به دلیل قابلیت جذب انرژی بیشتر نمونه‌های حاوی خرده آسفالت باشد که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

www.SID.ir

Archive of SID

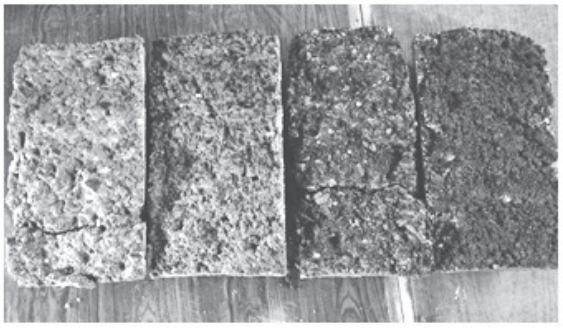


(ب) (الف)

شکل ۲. وضعیت نمونه‌ها بعد از آزمایش مقاومت فشاری الف) نمونه شاهد ب) نمونه حاوی خرده آسفالت

آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نیز بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مدت ۷ و ۲۸ روز و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، طبق استاندارد ASTM C496-11 انجام شد. شکل (۳) وضعیت نمونه‌ها را قبل و بعد از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۵ وضعیت سطح نمونه‌ها در صفحه گسیختگی برای ٤ نمونه مورد مقایسه، طبق ترکیبات جدول ۳ ارائه شده است. گسیختگی نمونه‌های شاهد از قسمت سنگدانه اتفاق افتاد و نمونه‌های حاوی خرده آسفالت به دلیل ضعیف بودن چسبندگی بین ملات سیمان و مصالح خرده آسفالت، از ناحیه ملات دچار گسیختگی شده‌اند.

شکل ۳. وضعیت نمونه قبل و بعد از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم



(۱) (۲) (۳) (٤)

شکل ٤. وضعیت صفحه گسیختگی برای مخلوط‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ٤ بعد از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

www.SID.ir

Archive of SID

در ادامه با استفاده از دستگاه یونیورسال، پارامترهای مدول گسیختگی[14] و قابلیت جذب انرژی با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای[15] مورد ارزیابی قرار گرفت. از این‌رو نمونه‌های تیرشکل با ابعاد mm ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ ساخته شد. برای ساخت این نمونه‌ها همان‌طور که گفته شد، روش تراکم با کوبه مناسب نبوده و از روش میز ارتعاشی به همراه سرباره استفاده شد. آزمون خمش سه نقطه‌ای پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، برای هر ٤ مخلوط انجام شد. در این آزمایش با بارگذاری در وسط تیر، مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی تعیین می‌گردد. در طی مدت آزمایش، نمودار بار-تغییرمکان توسط نرم‌افزار مربوطه ترسیم شده و مدول گسیختگی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM C293-10 و ASTM C78-10 ، مطابق با رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$R = \frac{3pl}{2bd^2}$$

در این رابطه:

R: مدول گسیختگی (MPa)

P: بیشینه بار وارده (N)

L: طول دهانه (mm)

b: عرض متوسط نمونه در لحظه شکست (mm)

d: عمق متوسط نمونه در لحظه شکست (mm)

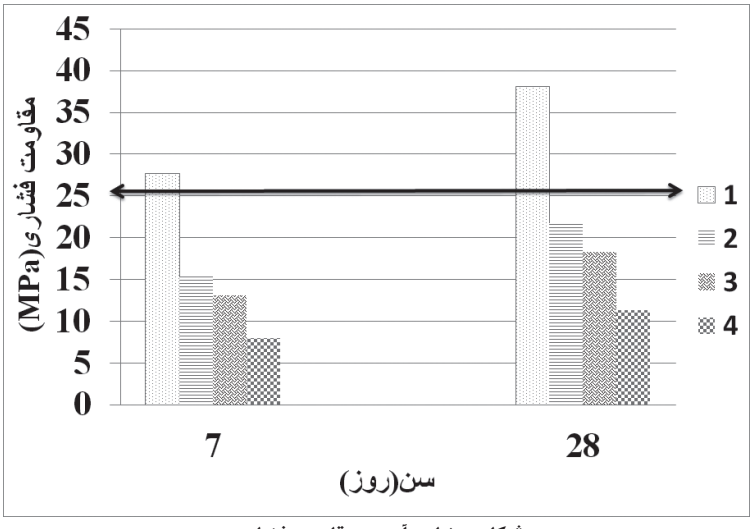
با استفاده از نمودار بار-تغییرمکان، قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها که معرف میزان انعطاف‌پذیری نمونه‌ها تا وقوع شکست بوده، قابل ارزیابی است. مطابق تعریف ارائه شده در استاندارد JCI SF4,1983، میزان قابلیت جذب انرژی یا چقرمگی برای نمونه‌های تیرشکل برابر با مساحت زیر نمودار بار-تغییر مکان تا نقطه l/۱۵۰ است.

٤. نتایج و بحث‌ها

٤-۱ مقاومت فشاری

شکل (۵) نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌ها برای دوره عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه نشان داده شده است. مقدار حداقل نیز با فلش بر روی نمودار نشان داده شده است، که مطابق استاندارد ACI325.10، 6/27 مگا پاسکال است.

نتایج ارائه شده در شکل (۵)، نشانگر کاهش ساختاری مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده آسفالت نسبت به نمونه‌های شاهد است. همچنین مقاومت نمونه‌های بتن غلتکی حالت ٤ که حاوی آسفالت ریزدانه و درشت‌دانه بوده، بیشترین کاهش را در بین سه نوع مخلوط دیگر داشته است. علاوه بر موارد فوق، در شکل (۷) مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌هایی که فقط قسمت درشت‌دانه آن‌ها با خرده آسفالت جایگزین شده است (حالت ۲)، کمترین کاهش را نسبت به نمونه‌های شاهد از خود نشان داده‌اند و پس از آن نمونه‌های حاوی خرده آسفالت ریزدانه در درجه بعدی کاهش قرار گرفته‌اند. در آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه،



شکل ۵. نتایج آزمون مقاومت فشاری

www.SID.ir

Archive of SID

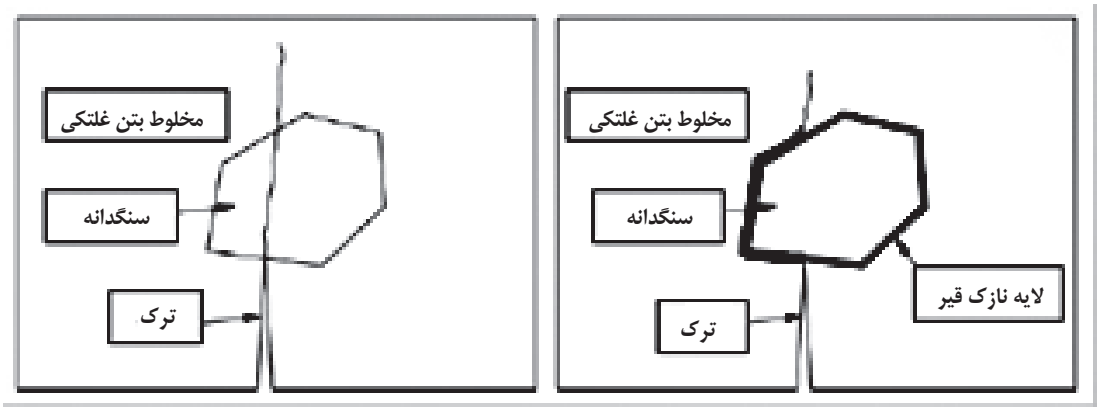
مقاومت نمونه‌های نوع دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۵۷٪، ۴۸٪ و ۳۰٪ نمونه‌های بتن غلتکی شاهد بوده است. این نتایج کاملاً با نتایج پژوهش‌های هوانگ سازگار است. البته در پژوهش هوانگ که بررسی استفاده از خرده آسفالت در بتن معمولی بود، آزمون مقاومت فشاری در سه دوره ۳، ۷ و ۲۸ روزه انجام شده بود. در آن پژوهش نیز، مخلوط حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه مقاومت بهتری نسبت به مخلوط حاوی خرده آسفالت ریزدانه از خود نشان داد. حتی نسبت مقاومت نمونه‌های نوع دوم، سوم و چهارم به نمونه شاهد در آزمایش ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵۸/۷٪، ۵۰٪ و ۲۷/۶٪ بوده و بسیار نزدیک به نتایج بدست آمده در این پژوهش بوده است [Huang et al. 2005]. نتایج نشان دهنده این مطلب است که بتن معمولی و بتن غلتکی در زمینه افزودن خرده آسفالت بسیار شبیه به یکدیگر عمل می‌کنند.

مقدار سیمان مصرفی برای مخلوط‌های بتن غلتکی بین ۱۲ تا ۱۷ درصد بوده است. در این پژوهش، حداقل درصد سیمان بکار گرفته شد. با بکار بردن درصدهای بیشتری سیمان و کاهش مقدار w/c، مقاومت مخلوط‌ها افزایش می‌یابد. در این صورت مقاومت مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه که مقدار کمی از مقاومت حداقل کمتر شده است به این مقاومت رسیده و قابل قبول‌تراند.

علت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده آسفالت به این صورت قابل توجیه است که اولاً مصالح خرده آسفالت بازیافتی از کیفیت پایین‌تری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی برخوردارند و دلیل دیگر، قرار داشتن قیر در اطراف سنگدانه‌ها و تضعیف چسبندگی این مصالح است.

در پژوهشی در مورد افزودن خرده لاستیک به بتن معمولی، عنوان شده است که مصالح انعطاف‌پذیر مانند لاستیک در مخلوط‌های مرکب تمرکز تنش ایجاد می‌کنند. این تمرکز تنش باعث از بین بردن چسبندگی بین ماده انعطاف‌پذیر با مخلوط بتنی می‌شود. همچنین می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های مویی در مخلوط بتن شود. تحت بارهای فشاری، اتصال و چسبندگی خرده لاستیک با سنگدانه‌ها همانند فضای خالی در بتن اصلاح شده عمل می‌کند و به ناچار مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد [Li et al. 2004]. در این پژوهش این ماده انعطاف‌پذیر، خرده آسفالت بوده و حضور قیر نرم سبب تمرکز تنش در بتن غلتکی شده است و این تمرکز تنش‌ها و به وجود آمدن ترک‌های مویی دقیقاً همانند بتن حاوی خرده لاستیک عمل می‌کند.

علت دیگر این ضعف می‌تواند عدم اتصال و پیوستگی مناسب در فصل مشترک قیر و فاز دوگانه سنگدانه و سیمان باشد، زیرا این لایه قیر نازک دور سنگدانه اثر چسبندگی سطح سنگدانه به ملات سیمان را کاهش داده و باعث انتقال ترک به دور سنگدانه شده و این امر عملاً مقاومت این نوع سنگدانه‌ها را از بین می‌برد. در صورت بروز این اتفاق، بتن حاوی خرده آسفالت، به جای اینکه از قسمت سنگدانه گسیخته شود، به دلیل ضعف چسبندگی، از قسمت ملات سیمان شکسته می‌شود. مکانیزم این پدیده در شکل (٦) نشان داده شده است.



شکل ٦. مکانیزم گسترش ترک در بتن غلتکی و بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت

www.SID.ir

Archive of SID

روش‌هایی برای تعدیل یا برطرف کردن این نقیصه یعنی کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی خرده آسفالت پیشنهاد شده است. یکی از آن‌ها بهبود مشخصات مربوط به مقاومت و مدول سختی آسفالت در اثر فرسودگی و دیگری بهبود شرایط تماس بین آسفالت و بتن از طریق استفاده کردن از مصالح سنگی تیزگوشه است.

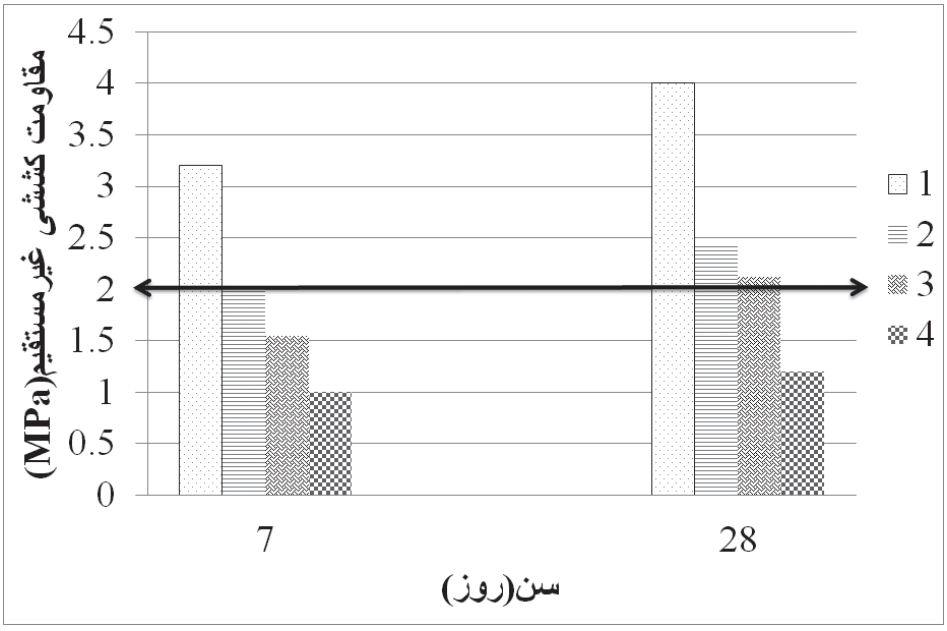
٤-٢ مقاومت کششی غیرمستقیم

شکل (٧) نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها برای دوره عمل‌آوری ٧ و ٢٨ روزه نشان داده شده است. مقدار حداقل نیز با فلش بر روی نمودار نشان داده شده است، که مطابق استاندارد ACI325.10، حدود ٢ مگا پاسکال است.

همان‌گونه که در شکل (٧) مشاهده می‌شود، الگوی کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های بتن غلتکی همانند نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری است. در این حالت نیز مشابه آزمون مقاومت فشاری، مخلوط حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه نسبت به بقیه مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت در این پژوهش در برابر آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم همانند آزمایش مقاومت فشاری عمل کردند. نتایج این آزمون برای مخلوط شماره ٢ و ٣، بالاتر از مقدار حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم بوده و از این دیدگاه مورد پذیرش است. برای نمونه‌های ٢٨ روزه، نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های نوع ٢، ٣ و ٤ به نمونه شاهد به ترتیب برابر با ٦٠٪، ٥٣٪ و ٣٠٪ بوده است.

از آنجایی که سطح پوشیده از قیر در خرده آسفالت درشت‌دانه کمتر از خرده آسفالت ریزدانه است، اثر ضعف عدم اتصال و چسبندگی سطح سنگدانه به ملات سیمان را نسبت به مخلوط حاوی خرده آسفالت ریزدانه کاهش می‌دهد. این امر باعث بیشتر بودن مقاومت (فشاری و کششی غیرمستقیم) این مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت ریزدانه است.

در پژوهش هوانگ، نسبت کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم به طور محسوسی کمتر از نسبت کاهش مقاومت فشاری در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت بود و این نسبت برای نمونه‌های نوع ٢، ٣ و ٤ نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب برابر با ٩٥/٣٪، ٧٩/١٪ و ٤٩/٥٪ بودند [Huang et al. 2005]. در حالی که در این پژوهش نسبت کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم بسیار نزدیک به نسبت کاهش مقاومت فشاری بود.



شکل ٧. نتایج آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم

www.SID.ir

Archive of SID

٤-٣ مدول گسیختگی

نتایج به دست آمده از این آزمایش در شکل (٨) مشاهده می‌شود. مطابق شکل برای نمونه‌های ٢٨ روزه، نسبت مدول گسیختگی نمونه‌های ٢، ٣ و ٤ به نمونه شاهد به ترتیب برابر با ٩٢٪، ٨٣٪ و ٦٦٪ بوده است.

در روش طرح روسازی اشتو، مقدار حداقل مدول گسیختگی حدود ٣/٥ مگا پاسکال است [AASHTO Guide, 2009]. با مقایسه مقادیر مدول گسیختگی در این پژوهش با مقدار حداقل مدول گسیختگی، مشاهده می‌شود که مخلوط‌های ١، ٢ و ٣ بیشتر از این میزان بوده و قابل قبول هستند.

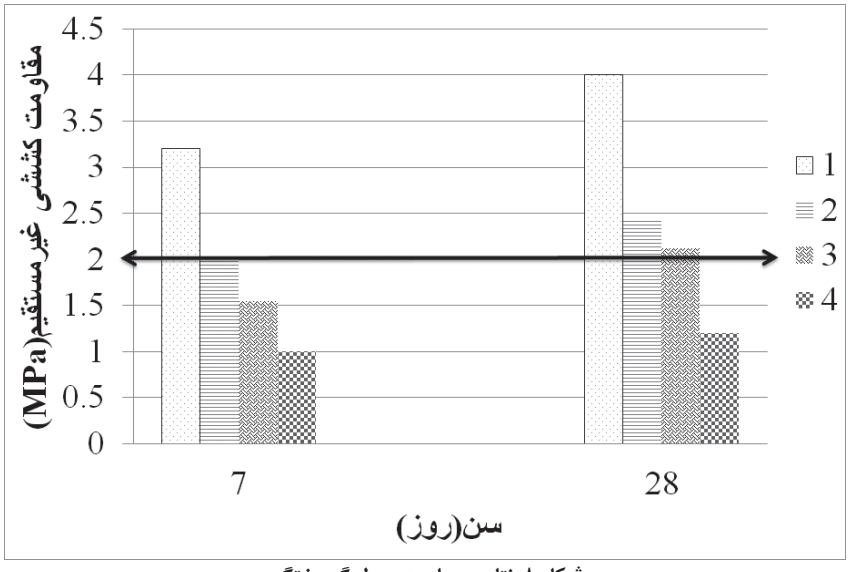
٤-٤ طراحی ضخامت روسازی بتن غلتکی

روسازی بتن غلتکی نوع خاصی از روسازی بتنی است که می‌توان آن را در گروه روسازی‌های بتنی ساده (غیرمسلح) درز دار در نظر گرفت. بنابراین روش‌های طراحی روسازی بتن غلتکی به صورت کلی مشابه روسازی‌های بتنی ساده درز دار و به صورت بدون دال آن است. البته تفاوت‌های قابل توجهی بین بتن غلتکی و روسازی بتن معمولی بدون داول وجود دارد که عمدتاً مربوط به فواصل درزها و عملکرد آنها از نظر انتقال بار است.

عموماً طراحی روسازی بتن غلتکی بر اساس محدود کردن تنش‌های خمشی و خرابی ناشی از خستگی در اثر بار انجام می‌گیرد. دو روش مهم برای طراحی روسازی بتن غلتکی در حال حاضر وجود دارد. اول روش PCA و دیگری روش گروه مهندسین ارتش آمریکا است. با توجه به اینکه در روش گروه مهندسین ارتش آمریکا به طور محافظه‌کارانه و با در نظر گرفتن عدم انتقال بار در درزها، از نمودارها و ضوابط طراحی بتن معمولی استفاده می‌شود، در این تحقیق از این روش برای طراحی ضخامت استفاده شد. تنش‌های کششی طراحی، با استفاده از معادلات تنش وسترگارد برای لبه آزاد محاسبه می‌شود.

برای طراحی به روش گروه مهندسین ارتش آمریکا، ابتدا گروه ترافیکی مشخص می‌شود. سپس برای تأثیر دادن تکرار بارها از جدول مربوطه، یک نشانه طراحی[١٦] انتخاب می‌شود. طرح روسازی برای راه‌ها بر مبنای اندیس طراحی است که تأثیر ترکیبی گروه‌های بار ترافیکی تعریف شده را بیان می‌کند. این اندیس با توجه به نیاز روسازی از ١ تا ١٠ تغییر می‌کند. در نهایت ضخامت لایه روسازی از نمودار مربوطه با توجه به نشانه طراحی و مقاومت خمشی مخلوط‌ها به دست می‌آید.

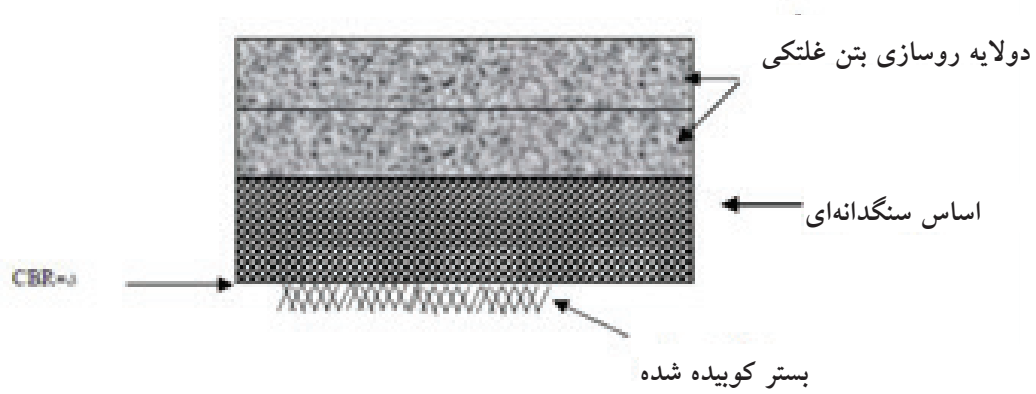
مقطع تیپ یک روسازی بتنی غلتکی در شکل ٩ نشان داده شده است [AASHTO Guide, 2009]. با فرض مدول عکس العمل بستر $60\ MN/m^3$ و با داشتن مدول گسیختگی مخلوط‌های مورد آزمایش، ضخامت روسازی برای نشانه طراحی ١ (حداقل) و ١٠ (حداکثر) مطابق جدول ٥ به دست آمد.



شکل ٨. نتایج محاسبه مدول گسیختگی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹. مقطع روسازی بتنی غلتکی

جدول ۵. نتایج محاسبه ضخامت روسازی

مخلوط	مدول گسیختگی (MPa)	ضخامت روسازی (cm)	
		نشانه طراحی=۱۰	نشانه طراحی=۱
۱	٤/۲	۲۳	۱۱
۲	۳/۸۹	۲٤	۱۱
۳	۳/۵۱	۲۵	۱۲
٤	۲/۷٦	۲۹	۱٤

در این روش حداقل ضخامت روسازی بتن غلتکی، ٤ اینچ (۱۰/۱٦ سانتی‌متر) و حداکثر آن برای امکان تراکم پذیری ۱۰ اینچ (۲۵/٤ سانتی‌متر) است. با اینکه در مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت با کاهش مدول گسیختگی بر ضخامت روسازی افزوده می‌شود ولی تقریباً هر ٤ مخلوط در محدوده ضخامت قرار داشته و قابل تأیید هستند. تنها مخلوط شماره ٤ با نشانه طراحی ۱۰، از مقدار حداکثر بیشتر است. در روش گروه مهندسین ارتش آمریکا برای ضخامت‌های بیشتر از حداکثر، سه حالت در نظر گرفته شده و طراحی روسازی در این مورد هم قابل حل است:

۱- تمام چسبنده[۱۷]: هنگامی که دو لایه، به فاصله زمانی کمتر از ۱ ساعت از هم، ریخته و متراکم شوند و یا یک لایه نازک دوغاب بین دو لایه اجرا گردد. در این حالت، کل ضخامت به‌صورت یک دال یکپارچه در نظر گرفته شده و از نمودار و معادلات مربوطه طرح می‌شود.

۲- چسبندگی جزیی[۱۸]: هنگامی که دو لایه، به فاصله زمانی بیشتر از ۱ ساعت از هم ریخته شوند. در این حالت، ضخامت به مانند حالت روکش صلب روی اساس صلب با چسبندگی طرح می‌شود.

۳- بدون چسبندگی[۱۹]: هنگامی که لایه ای بین دو لایه مانند امولوسیون قیر حائل شود. در این حالت، ضخامت به مانند حالت روکش صلب بدون چسبندگی طرح می‌شود.

مخلوط‌های شماره ۲ و ۳ فرق چندانی از نظر ضخامت نداشته و تقریباً نزدیک به نمونه بتن غلتکی معمولی هستند. با توجه به اینکه مدول گسیختگی این دو مخلوط در محدوده طراحی اشتو قرار داشته و از مقدار حداقل مشخص شده در نموگرام بالاترند، قابل قبول‌تر هستند.

٤-۵ قابلیت جذب انرژی

چقرمگی به معنای مقاومت ماده در برابر شکستگی و یا قابلیت آن در جذب انرژی مکانیکی بدون شکسته شدن است. چقرمگی از نظر مقداری با سطح کل منحنی تنش- کرنش برابر است و مشخص کننده مقدار کاری است که می‌توان بدون گسیختگی ماده در ناحیه تغییر فرم پلاستیک بر روی آن اعمال کرد. به بیان دیگر هر چه سطح زیر منحنی تنش- کرنش بیشتر باشد و ماده در اثر اعمال تنش با ازدیاد طول بیشتر، دیرتر دچار شکستگی شود، چقرمه‌تر است. برای نمونه‌های تیرشکل استفاده از نمودار بار - تغییرمکان،

www.SID.ir

Archive of SID

قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها که معرف میزان انعطاف‌پذیری نمونه‌ها تا وقوع شکست بوده، قابل ارزیابی است.

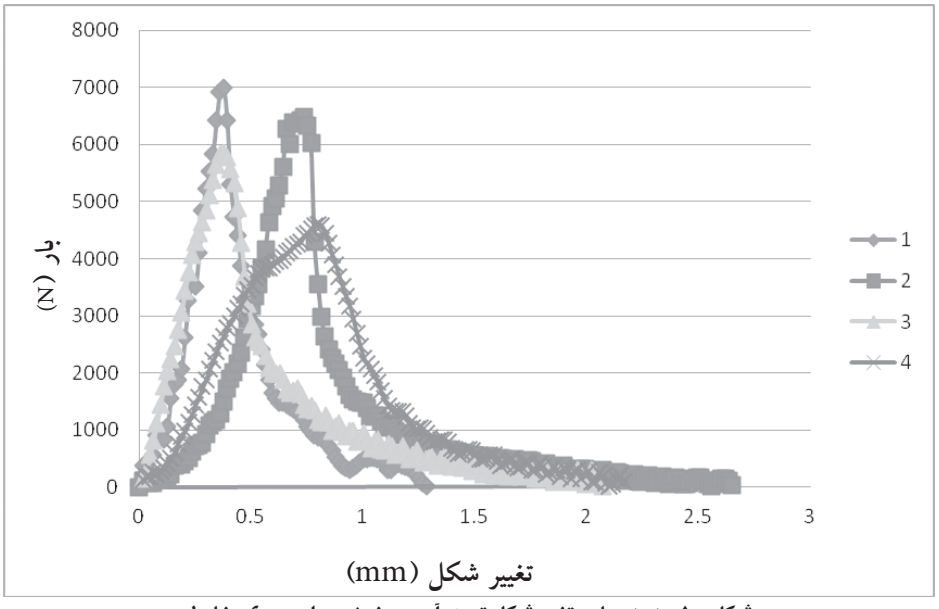
ترد و شکننده بودن از ویژگی‌های مخلوط‌های بتنی است، به این شکل که منجر به شکست ناگهانی و انتشار ترک پس از بروز ترک می‌شود. رفتار بتن در منحنی بار- تغییرمکان آن در مراحل ابتدایی الاستیک و با مدول الاستیسیته (خطی) است تا جایی که اولین ترک‌ها اتفاق بیفتند. بعد از وقوع اولین ترک، شیب نمودار تنش- کرنش روند نزولی پیدا می‌کند تا به حد تسلیم می‌رسد و بعد از آن با یک شکست کاملا ترد از هم گسیخته می‌شود. از اهداف مهم افزودنی‌هایی همچون خرده آسفالت، افزایش قابلیت جذب انرژی در مراحل بعد از بروز اولین ترک‌ها بوده تا از شکست ترد جلوگیری کند.

مطابق تعریف ارائه شده در استاندارد JCISF4، میزان قابلیت جذب انرژی یا چقرمگی برای نمونه‌های تیرشکل برابر با مساحت زیر نمودار بار - تغییرمکان تا نقطه l/۱۵۰ است. برای محاسبه قابلیت جذب انرژی، محور افقی نمودار (تغییرشکل) تا نقطه l/۱۵۰ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه l (فاصله بین دو تکیه‌گاه) در این تحقیق ٤۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، پارامتر l/۱۵۰ برابر با ۲/٦ به دست می‌آید و محور افقی تا این مقدار در نظر گرفته می‌شود.

در شکل (۱۰) منحنی تغییرات بار- تغییرشکل در آزمایش مقاومت خمشی ۲۸ روزه برای تمامی ترکیبات مورد مطالعه نشان داده شده است. یکی از نکات قابل توجه در شکل آن است که نمونه‌های بتنی حاوی خرده آسفالت علی رغم کمتر بودن مقدار بار حداکثر، تغییرشکل‌های بزرگ‌تری را قبل از وقوع شکست تحمل کرده‌اند.

با انجام آزمایش مقاومت فشاری نیز می‌توان شواهدی دال بر قابلیت بالای جذب انرژی و تاب بیشتر نمونه‌های حاوی خرده آسفالت تا وقوع شکست نهایی آن‌ها مشاهده کرد، زیرا آن‌ها همانند نمونه‌های شاهد، به سرعت و به طور ناگهانی به مرحله شکست نمی‌رسیدند. بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی سطح ترک بر نمونه‌های حاوی خرده آسفالت در زمان گسیختگی اندک بوده، در حالی‌که نمونه‌های شاهد دچار شکست قابل توجهی شدند. در شکل (۱۱) قابلیت جذب انرژی نمونه‌های بتن غلتکی ۲۸ روزه که از نمودار روش خمش سه نقطه ای به دست آمده مشاهده می‌شود. نتایج نشانگر تأثیر مثبت خرده آسفالت در افزایش قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد بوده است.

افزایش قابلیت جذب انرژی همچنین می‌تواند مقاومت نمونه‌های استوانه‌ای را در مقابل دو نیم شدن در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش دهد [Li et al. 2004]. این مسئله در آزمایش کشش ثابت شد، زیرا نمونه‌های شاهد بعد از آزمون به راحتی به دو نیم



شکل ۱۰. منحنی بار- تغییرشکل تحت آزمون خمش برای هر ٤ مخلوط

www.SID.ir

Archive of SID

تقسیم شدند، ولی نمونه‌های حاوی خرده آسفالت با چکش و به سختی به دو نیم تقسیم شدند. در حالت کلی مخلوط شماره ٤ دارای بیشترین قابلیت جذب انرژی (سطح محصور بین منحنی بار-تغییرمکان) بوده است. در این میان رفتار مخلوط شماره ۲ که حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه بود، تا حدی نزدیک به مخلوط شماره ٤ بوده و تغییر شکل پذیری این گروه بهتر از مخلوط شماره ۳ است. مخلوط شماره ۳ و مخلوط کنترل کمترین قابلیت جذب انرژی را دارند.

۵. نتیجه‌گیری

این تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی مشخصات مکانیکی مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده و تحلیل‌های صورت پذیرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر به عنوان دستاوردهای این پژوهش اشاره کرد:

۱- بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت، از مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول گسیختگی کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد برخوردار است. علت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی خرده آسفالت، کیفیت بدتر مصالح خرده آسفالت بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی و عدم اتصال و پیوستگی مناسب در فصل مشترک قیر و فاز دوگانه سنگدانه و سیمان است.

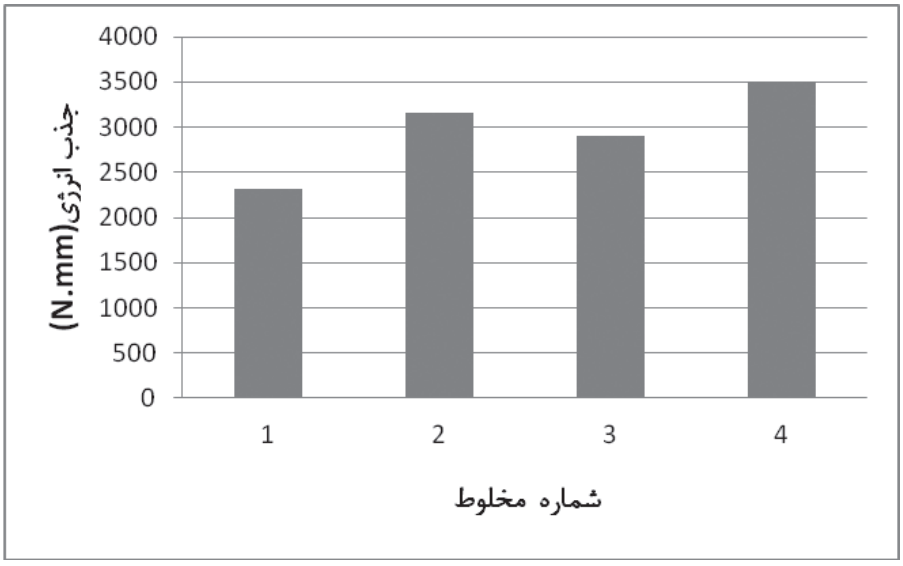
۲- در طراحی اشتو، مقدار حداقل مدول گسیختگی حدود ۳/٤۷ مگا پاسکال است. مدول گسیختگی مخلوط‌های شاهد، مخلوط حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه و مخلوط حاوی خرده آسفالت ریزدانه بیشتر از این میزان بوده و قابل قبول هستند.

۳- با استفاده از روش "گروه مهندسین ارتش آمریکا"، برای طراحی ضخامت روسازی‌های بتن غلتکی، ضخامت روسازی با فرض مدول عکس العمل بستر ثابت و تنها با تغییر مدول گسیختگی برای هر ٤ مخلوط به دست آمد. هر ٤ مخلوط در محدوده ضخامت این روش قرار داشته و قابل تأیید هستند.

٤- ضخامت روسازی مخلوط حاوی خرده آسفالت درشت‌دانه و ریزدانه با نشانه طراحی ۱۰، از مقدار حداکثر بیشتر است. در این روش برای ضخامت‌های بیشتر از حداکثر، سه حالت در نظر گرفته شده و طراحی روسازی در این مورد هم قابل حل است.

۵- هرچه بر مقدار خرده آسفالت در نمونه‌های بتن غلتکی افزوده شد، علی رغم کاهش در میزان بار حداکثر، قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها افزایش یافته و تغییرشکل‌های بزرگ‌تری را قبل از شکست تحمل کرده‌اند.

٦- به طور کلی نتیجه گرفته می‌شود که مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت از چقرمگی بیشتری نسبت به نمونه‌های بتن غلتکی بدون خرده آسفالت برخوردار بوده و بنابراین استفاده از



شکل ۱۱. قابلیت جذب انرژی برای ٤ مخلوط مورد مقایسه

www.SID.ir

Archive of SID

آن‌ها در پروژه‌های عمرانی می‌تواند بسیار مورد توجه قرار گیرد.

۷- استفاده از خرده آسفالت درشت‌دانه، اثر کاهنده کمتری بر مقاومت نمونه‌های بتن غلتکی داشت و قابلیت جذب انرژی چشمگیری در حد مخلوط حاوی هر دو فاز خرده آسفالت از خود نشان داد. علاوه بر این موارد، ضخامت روسازی را هم در حد قابل قبول نگه داشته است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که جایگزینی بخش درشت‌دانه بتن غلتکی با خرده آسفالت کاربردی‌تر است.

٦. پی نوشت‌ها

1. Recycled asphalt pavement (RAP)
2. Roller Compacted Concrete (RCC)
3. Bleeding
4. Protective layer
5. Toughness
6. Energy absorption capability
7. Aged
8. Toughness Index
9. Drying Shrinkage
10. Circulating Fluidized Bed Combustion
11. Water absorption
12. Initial surface absorption test (ISAT)
13. Rice Husk Ash (RHA)
14. Modulus of rupture
15. Third-Point Loading
16. Index Design
17. Full Bond
18. Partial Bond
19. Non Bond

۷. مراجع

- ایران. وزارت راه و ترابری (۱۳۸۸) "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه‌های کشور" ؛ معاونت نظارت راهبردی وزارت راه و ترابری. نشریه شماره ۳٥٤

- دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک) در ایران. دفتر مطالعات فنآوری و ایمنی. (۱۳۸٤) "کاربرد بتن غلتکی در راهسازی"، تهران، پیارک

- عامری، م.، شکرچی زاده، م. و شهابی شهمیری، ح. (۱۳۸۸) "بررسی تأثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگدانه بر بتن غلتکی روسازی راه"، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، اردیبهشت ۱۳۸۸

- کریمی گوغری، م. و حسنی، الف (۱۳۹۰) " امکان سنجی آزمایشگاهی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن غلتکی روسازی راه"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال سوم / شماره اول .

- AASHTO (2009) “Guide for design of pavement structure” , American Association of State Highway and Transportation Official, DC. Used by permission. American Concrete Institute

- ACI (2000) “State of art report on roller compacted concrete pavements,” American Concrete Institute, ACI 325.10-95.

- Al Abdul Wahhabh, Hi and Asi, I. M. (1999) “Optimization of roller compacted concrete for local application“, Transportation Research Record, No. 1458, pp. 1-7.

- Al-Oraimi, S. Hassan, H. and Hago, A. (2007) “Recycling of reclaimed asphalt pavement in portland cement concrete“ , Journal of Engineering Research, Vol. 6, No.1, pp. 37-45

- Berry, M., Stephens, J. and Cross, D. (2009) “Feasibility of reclaimed asphalt pavement as aggregate in Portland cement concrete pavements” , A proposal prepared for the Montana Department of Transportation

- Chi, Maochieh and Huang, Ran (2014) “Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete”, Cement & Concrete Composites No.45, pp.148–156

- Courard, L., Michel, F. and Delhez, P. (2010) “Use of concrete road recycled aggregates for roller com-

www.SID.ir

Archive of SID

- Li, G., Stubblefield, M. A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. and Huang, B. (2004) "Development of waste tire modified concrete", Cement and Concrete Research. Vol. 34, No. 12, pp. 2283-2289.

- Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N. , Singh, S. S., Pennock, L. C. and Ramme, B.W. (2001) "Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements", Pract Periodical Struct Des Construct,Vol. 6, No. 4, pp.155–65.

- Okafor, Fidelis O. (2010) "Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete", Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Issue 17, pp. 47-58.

- Portland Cement Association (1987) "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements", USA: PCA.

- PrusinskiJan, Jan R. and Leed-Ap, P. E. (2013) "Roller compacted concrete: A value added pavement solution", Lower RIO Grande valley American Institute of Architects (LRGV AIA).

- Rock Products Committee (2012) "Roller compacted concrete", Scoping Document, Concrete Task Group.

- Villena, J., Trichês, G., and Prudêncio, Jr L. R. (2011) "Replacing the aggregate by rice husk ash in roller compacted concrete for composite pavements", GeoHunan International Conference, Hunan, China.

pacted concrete", Construction and Building Materials No.24, pp.390–395.

- Delatte, N. (2009) "Design and construction of streets and roads with Roller Compacted Concrete", Civil & Environmental Engineering Department, Cleveland State University

- Guneyesi, Erhan, Gesog˘lu, Mehmet and Ozturan, Turan (2004) "Properties of rubberized concretes containing silica fume", Cement and Concrete Research, Vol 34, No. 12, pp. 2309– 2317.

- Hossiney, N. (2012) "Evaluation of concrete containing RAP for use in concrete pavement", Master's Thesis, University of Florida, Gainesville

- Huang, B., Li, G., Pang, S.-S. and Eggers, J. (2004) "Investigation into waste tire rubber-filled concrete", Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE). Vol. 16, No. 3, pp 187–194.

- Huang, B., Shu, X. and Burdette. E. G. (2006) "Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements", Magazine of Concrete Research, Vol. 58, N0. 5, pp. 313–320

- Huang, B., Shu, X. and Li, G. (2005) "Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 10, pp.2008–2013.

- Japan Concrete Institute (1983) "Standards for test methods of fiber reinforced concrete", JCI-Sf4.

- Koohmishi, Mehdi (2013) "Evaluation of application of roller compacted concrete versus asphalt concrete as pavement surface layer for high traffic Volume routes", J. Basic. Appl. Sci. Res. Vol. 3, No. 5, pp. 330-335.

www.SID.ir