

## تاثیر استفاده از مصالح بازیافتی در خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
ابراهیم پرورش کاران\*، گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی کاربردی، فناوری و ایمنی، دانشگاه میلرزویل، میلرزویل، پنسیلوانیا، ایالات متحده آمریکا

سیدامیرحسین هاشمی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ebrahim.karan@millersville.edu

دریافت: ۹۶/۱۰/۲۰ - پذیرش: ۹۷/۰۴/۲۰

صفحه ۲۹۶-۲۷۱

### چکیده

استفاده از مصالح پسماند برای تولید آسفالت، بتن و مصالح ساختمانی، در طی چند دهه اخیر رونق پیدا کرده است. یکی از پر مصرف ترین مصالح بازیافتی خرده آسفالت (RAP) است که بیشترین توجه را به خود معطوف نموده است. از آنجایی که این مصالح حاوی ۳ تا ۴ درصد قیر است، لذا بعنوان مصالح دور ریز از قیمت و ارزش بالایی برخوردار و گزینه مناسبی برای بکارگیری در سایر مصالح ساختمانی یا راه سازی بعنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی است. مطالعات گذشته در رابطه با استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در بتن حاکی از این بوده است که در اثر اضافه نمودن این مصالح، مقاومت کششی و فشاری بتن کاهش یافته است. ولی مطالعات کمی در رابطه با استفاده از این مصالح در بتن غلتکی برای مصرف در روسازی راه صورت گرفته است و بنظر میرسد که هنوز جای کار زیادی در زمینه مطالعات خصوصیات بتن غلتکی پس از افزودن مصالح بازیافتی وجود دارد. در این مطالعه تاثیر استفاده از تراشه آسفالت بر انعطاف پذیری مخلوط بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است. صرفنظر از نوع مصالح بازیافتی (که خود می تواند در برخی پارامترها تاثیر گذار باشد)، اثر دانه بندی و مقدار مصرف آن در ترکیب بتن غلتکی نیز بررسی شده است. در نهایت ۳۲ طرح مختلف بتن غلتکی با درصدهای مختلف مصالح بازیافتی و سیمان در دو نوع دانه بندی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. اثر متغیرهای مختلف بر خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی نظیر مقاومت فشاری، کششی و طاقت آن مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: مخلوط بتن غلتکی، تراشه آسفالتی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، طاقت، انرژی جذب شده

### ۱- مقدمه

هزینه‌های مربوط به استهلاک وسایل نقلیه و نارضایتی شهروندان را از طرف دیگر در پی دارد. برای حل این معضلات ناگزیر باید عملیات نگهداری و تعمیر در روسازی معابر صورت پذیرد. هزینه سنگین اجرای راه‌های جدید، خسارت‌های ناشی از خرابی راه‌های موجود و نقایص متعدد روش‌های

شبکه معابر موجود در هر شهر یکی از مهمترین زیرساخت‌های موجود در آن میباشد. وقوع خرابی روسازی معابر درون شهری تاثیر بسزایی در کاهش سرعت ترافیک و به تبع آن ایجاد تاخیر بیشتر برای حرکت وسایل نقلیه از یک طرف و خطر بروز تصادف و افزایش هزینه‌های ناشی از مصرف سوخت،

معایب خاص خود را دارد. لازم به توضیح است که استفاده از مصالح و سنگدانه های طبیعی در اغلب مناطق مقدور نیست و یا هزینه حمل و نقل مصالح به محل پروژه بالاست. با این وجود استفاده از خرده آسفالت بازیافتی بعنوان جایگزین مصالح سنگی در اینگونه مناطق می تواند از صرفه اقتصادی برخوردار باشد. بازیافت روسازیهای تخریب شده و یا بتنهای تخریبی از ساختمانها و سایر مناطق می تواند گزینه مناسبی برای ساخت روسازی های جایگزین و سازگار با محیط زیست باشد. سالانه در تهران و مناطق دیگر میلیون ها تن خرده آسفالت بازیافتی حاصل از تراش روسازیهای تخریب شده، تولید می شوند که حفظ و نگهداری و انبارداری از آنها خود به معضل محیط زیستی تبدیل شده است. بر اساس آمار اداره بزرگراه فدرال آمریکا تولید ۱۰۰ میلیون تن خرده آسفالت در سال برای آمریکا تخمین زده شده است (McGarrah, 2007). فاصله حمل مصالح می تواند اثر بسزایی در هزینه و انرژی مصرفی برای بازیافت مصالح داشته باشد. حامد در سال ۲۰۰۹ روش جایگزینی برای تهیه مصالح سنگی درشت دانه و امکانسنجی استفاده از خرده بتن بازیافتی را از لحاظ هزینه های تهیه و حمل مورد مطالعه و بررسی قرار داده است (Hameed, 2009). دلواری و همکاران ۱۹۹۷ از دو ترکیب متفاوت نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۵ در تهیه مخلوطهای بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی استفاده نمودند و شاهد کاهش اندکی در مقاومت فشاری بتن حاصله و افزایش انعطاف پذیری آن بودند. آنها در مرحله اول مقادیر ۲۵،۵۰،۷۵ و ۱۰۰ درصد جایگزینی جایگزینی خرده آسفالت ریز دانه با مصالح سنگی را بررسی نموده و پس از آن در طرحی متفاوت مقادیر درشت دانه را با همین درصدها جایگزین نمودند. آنها مقاومت خمشی مخلوطها را بر اساس استاندارد ASTM C78-84 و آزمایش تیرچه ۳ نقطه ای بدست آوردند. براساس نتایج بدست آمده مدول شکست برابر ۶۸۵ Psi گزارش گردید که با توجه به معیارهای طراحی می تواند گزینه مناسبی به لحاظ مقاومت خمشی در بتن غلتکی روسازی باشد. اگرچه با افزودن خرده آسفالت بازیافتی، مقاومت فشاری در تمامی مخلوطها کاهش یافت، ولیکن میزان انعطاف پذیری بالاتری در مقایسه با مخلوطهای بدون خرده آسفالت بازیافتی مشاهده گردید. برای این مخلوطهای کترلی،

متداول در بهسازی راهها، متخصصین روسازی را بر آن داشته که در جهت اصلاح روشهای سنتی بهسازی و ارائه روشهای نوین توأم با نوگرایی در زمان، هزینه، دوام، کیفیت و پارامترهای جانبی آن در تکاپو باشند. از سوی دیگر، به دلیل محدودیت منابع و معادن سنگی مرغوب، توسعه و نگهداری شبکه راهها به شیوه سنتی به تدریج پاسخگوی نیازهای جامعه نخواهد بود. صنعت راهسازی یکی از مهمترین تولیدکنندگان گازهای گلخانه ای و مصرف کنندگان انرژی است (Barandica et al., 2013)، لذا همواره فشار زیادی بر این صنعت وجود دارد تا نقشی فعال در کاهش اثرات مخرب زیست محیطی داشته باشد. یکی از این فعالیتها کاهش مصرف منابع تجدیدناپذیر از طریق بازیافت مصالح دورریختنی (Blankendaal et al., 2014; Turk et al., 2014) است. هم اکنون سالانه ۹۶۰ میلیون تن زباله خشک در هند تولید می شود که محصولی از کشاورزی، صنعت، معدن، شهرها و سایر مناطق می باشد. از این مقادیر ۳۵ میلیون تن زباله های ارگانیک کشاورزی و ۲۵۰ میلیون تن آن مربوط به صنعت و معدن می باشد (Pappu et al., 2007). آمار تولید تراشه آسفالت در شهر تهران به منظور بهسازی معابر شهری در جدول ۱ آورده شده است. از آنجاکه بهسازی دوره ای معابر بصورت طرح جهادی و در مقاطع زمانی ویژه در شهر تهران صورت گرفته است، لذا با احتساب ۵۰٪ حجم عملیات سالانه مقدار تقریبی ۱۸۰ هزار تن تراشه آسفالت سالانه در شهر تهران تولید خواهد شد که نیازمند انبار و مصرف بهینه از آن خواهد بود. امروزه استفاده از تراشه های آسفالت در صنعت راهسازی بسیار مرسوم شده است. بعبارت بهتر محدودیت منابع و مصالح سنگی مرغوب و قیر، حل معضلات زیست محیطی ناشی از تولید تراشه های خرده آسفالت و فواید اقتصادی سبب بهره برداری مجدد از مصالح موجود در صنعت راهسازی شده است. در حقیقت با بررسی ها و مطالعات انجام شده در رابطه با تراشه های آسفالت از ابعاد گوناگون نظیر مسائل زیست محیطی، جبران کمبود برخی منابع و غیره، دیگر لزوم و اهمیت استفاده مجدد از تراشه های آسفالت بر کسی پوشیده نیست. در صنعت راهسازی و اجرای روسازی معابر از تراشه های آسفالت در بخشهای مختلفی استفاده می شود که با توجه به شرایط موجود، هر یک مزایا و

قابلیت جذب انرژی مصالح و تغییر شکل قبل از شکست است. بنابراین این خاصیت ارزشمندی برای مصالح است و موادی که از طاقت پایبندی برخوردارند، ضعیفترند. بیلود و همکاران در سال ۲۰۱۱ اثر افزودن خرده آسفالت بر مخلوط بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی را مورد مطالعه قرار دادند. در طرح اختلاط از ۱۲٪ سیمان هیدرولیکی شامل ترکیبی از کلینکر، خاکستر بادی، اسلاگ و سنگ آهن استفاده شد. خرده آسفالت معادل ۰، ۴۰ و ۸۰ درصد در ترکیبات استفاده شد. مقاومت فشاری بر اساس استاندارد ASTM C39 و مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 انجام پذیرفت. نتایج حاکی از کاهش این مقاومت‌ها در اثر افزودن خرده آسفالت داشت. آنها نشان دادند که مخلوطهای حاوی خرده آسفالت دارای خصوصیات ویسکوالاستیک بوده و تغییرات دما بر آنها تاثیرگذار است ( Bilodeau et al., 2012; Bilodeau et al., 2011). محققان اداره راه ایالت مونتانا نشان دادند که افزودن خرده آسفالت به بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی و افزایش انعطاف پذیری مخلوط می‌گردد و استفاده از آن را به مخلوط اساس محدود کردند. خرده آسفالت ریز دانه در محدوده ۰ تا ۵۰ درصد و خرده آسفالت درشت دانه ۲۵ تا ۱۰۰ درصد جایگزین شد. با بررسی نتایج آنها دریافتند که مقاومت ۷ روزه بتن تحت تاثیر میزان درشت دانه و مقاومت ۲۸ روزه به هر دو وابسته و با افزایش میزان خرده آسفالت کاهش می‌یابد. در نهایت آنان میزان ریزدانه را به ۲۰ درصد و میزان درشت دانه را به ۴۵ درصد محدود نمودند ( Berry et al., 2013). تحقیقات مرشد و همکاران نیز نشان داد که با افزودن خرده آسفالت در بتن، مقاومت فشاری کاهش خواهد یافت. بنابراین آنان استفاده از آن را در نواحی غیر سازه‌ای و جداول و ... محدود نمودند. تحقیقات مشابه دیگری در مورد افزودن خرده آسفالت، مصالح ساختمانی و خرده بتن در بتن انجام شد که نتایج مشابهی داشت. در برخی استفاده از خرده بتن را به ۳۰٪ محدود نمودند. راهکار مناسبی که برخی برای کاهش اثر منفی ناشی از افزودن خرده آسفالت ارائه دادند، کاهش نسبت آب به سیمان مخلوطها بود.

این مورد بویژه بعلت کاهش جذب آب مصالح آسفالتی قیر اندود منطقی بنظر می‌رسد ( Al-Oraimi et al., 2009; )

شکست در مرز خمیر سیمان و از طریق پکیدن بتن صورت می‌پذیرد. ولی با افزایش مقادیر خرده آسفالت بازیافتی، مسیر شکست به سمت مرز خمیر سیمان در تماس با خرده آسفالت منحرف شد. همچنین مشاهده شد که بتن از میزان کرنش بیشتری پس از شکست برخوردار بوده که مشخصه بارز انعطاف پذیری بالاتر مخلوطهای حاوی خرده آسفالت است (Delwar et al., 1997). در تحقیقات آتی این گروه مقادیر مختلف خرده آسفالت را در ترکیب با بتن مورد استفاده قرار دادند. آنان مقادیر بهینه ۳۰ تا ۵۰ درصد استفاده از خرده آسفالت را پیشنهاد نمودند که بیشترین مقاومت فشاری در محدوده مجاز را دارا بودند.

این مطالعه نیز همچنان افزایش مقاومت خمشی و کاهش مقاومت فشاری را بیان نمود. در مطالعه مشابهی که توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا و اداره بزرگراه فدرال صورت پذیرفت، مشخص شد که رطوبت و تغییرات دما تاثیر چندانی بر خصوصیات مکانیکی مخلوطهای بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت ندارد. همچنین با توجه به کاهش دانسیته مخلوطها در اثر استفاده از خرده آسفالت بعلت میزان حفرات بوجود آمده در اثر بکار گیری این مصالح، استفاده از خاکستر بادی برای افزایش دوام و کارایی مخلوطها توصیه شده است و در نهایت استفاده از مخلوطها حاوی مقادیر بالای خرده آسفالت تنها در بتنهای غیر سازه‌ای توصیه شده است ( Delwar et al., 1997). هوانگ و همکاران نیز تحقیقات مشابهی با استفاده از ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد خرده آسفالت در بتن در سال ۲۰۰۰ انجام دادند. آنها از خمیر سیلیکا در ترکیب بتن با مقادیر ۱۰ و ۲۰ درصد استفاده بردند. اگرچه تغییرات زیادی در اسلامپ مخلوط مشاهده نموده ولیکن بیشترین تاثیر را در کاهش مقاومت فشاری و کششی مخلوط گزارش نمودند. ولیکن آنها نیز شاهد انعطافپذیری بالاتر بتن در مقایسه با مخلوط کنترلی بودند. در ادامه براند نشان داد که با افزودن خرده آسفالت ریزدانه، انعطاف پذیری افزایش یافته و اندکی از مقاومت کاسته خواهد شد (Brand et al., 2012).

طاقت در حقیقت سطح زیر منحنی تنش-کرنش است و بیانگر قابلیت مصالح برای تحمل بار در محدوده پلاستیک قبل از رسیدن به مدول شکست است. به عبارت دیگر طاقت

طرح تثبیت یا ساخت بتن غلتکی از خردایش آسفالت (RAP) و مصالح موجود بعد از شخم زدن و کندن یا معادن شن و ماسه تهیه می‌گردد. مصالح مصرفی باید عاری از هرگونه مواد آلی و نباتی بوده و دانه‌های بزرگتر از ۲۵ میلیمتر نداشته باشد. از خاکهای مورد مصرف باید طبق روش آشتو T 27 نمونه برداری کرده و نمونه‌های حاصل تحت آزمایشهای دانه بندی، هیدرومتری، و تعیین حد روانی و خمیری قرار گیرد. مصالح موجود مطابق استاندارد ASTM D- 558 با سیمان مخلوط گردیده و مورد آزمایشات حداکثر وزن مخصوص و رطوبت بهینه قرار می‌گیرد. مصالح تهیه شده باید با سیمان واکنشزا بوده به طوری که پس از تثبیت، مقاومت فشاری تک محوری آن که با روش ASTM D- 1633 اندازه‌گیری می‌شود، بیش از مقاومت فشاری خاک تثبیت نشده (خاک معمولی و بدون سیمان) باشد. از آنجاکه اکثراً از مصالح سنگی رودخانه‌ای (بعلت فراوانی بیشتر و استحصال ارزاتر) در تولید مخلوط‌های بتن استفاده می‌شود، جهت رسیدن به معیارهای فنی مصالح نظیر ارزش ماسه‌ای مناسب و کاهش مقادیر رس و لای، از روش شستشوی مصالح ماسه‌ای استفاده می‌شود. این روش به دلیل کاهش فیلر موجود در مصالح می‌تواند در ایجاد دانه بندی مصالح مطابق استانداردهای موجود اختلال ایجاد نماید. و با بررسی طرحهای اختلاط موجود در کارخانجات تولید بتن می‌توان به این ضعف پی برد. بدین منظور در این تحقیق از مصالح شکسته کوهی معدن اسب چران محتوی فیلر پودر سنگ در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. مشخصات مربوط به مصالح سنگی مورد استفاده در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است. در استانداردهای مختلف، دانه بندی‌های متفاوتی جهت ساخت مخلوطهای بتن غلتکی ارائه شده است. از جمله معتبرترین آیین نامه‌ها، میتوان به آیین نامه‌های ACI, PCA اشاره نمود. لازم به ذکر است که عملکرد بتن غلتکی تا حدود زیادی به نوع دانه بندی مصالح بستگی خواهد داشت. بسته به محل اجرای بتن غلتکی، حداکثر اندازه اسمی ۲۵ میلیمتر برای مصالح سنگی پیشنهاد شده است ولی جهت دستیابی به بافت

Debieb and Azzouz, 2002; Delwar et al., 1997; (Institute, 2004; Limbachiya et al., 2000).

تراشه آسفالتی نوع دیگر از مصالح دور ریختنی است که از آسیاب کردن لایه‌های روسازی مضمحل شده بدست می‌آید. کاربرد این ماده در لایه‌های غیرچسبنده روسازی از گذشته متداول بوده است (Kazmee et al., 2016) اما با توجه به حضور قیر در این ماده بازیافت آن در مخلوط آسفالتی می‌تواند بسیار سودمندتر باشد. در این مطالعه تراشه آسفالت به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی بتن مورد استفاده قرار گرفت. پس از بررسی متون گذشته درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ تراشه آسفالت برای استفاده در بتن غلتکی تعیین شد. همچنین ۴ درصد مختلف سیمان جهت ساخت نمونه‌های بتن با عیار ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بتن، مورد استفاده قرار گرفت. تغییرات مقاومت فشاری و کششی و انعطاف پذیری بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی بررسی شده و روابط مربوطه مورد بررسی قرار گرفتند.

پارامترهایی نظیر مدول الاستیسیته و طاقت نمونه‌ها نیز بدست آمده و بررسی شد. همچنین روابط موجود مابین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌های مختلف بررسی شده و روابط بدست آمده بر اساس مقادیر مصالح بازیافتی و سیمان مرتب گردیده است. در نهایت این مطالعه امکان استفاده از مصالح بازیافتی بعنوان جایگزین مصالح سنگی در بتن غلتکی را با عنایت به بهبود خصوصیات انعطاف پذیری مخلوط به عنوان گزارش نهایی ارائه نموده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مصالح

#### ۲-۱-۱- مصالح سنگی و RAP

نوع و جنس مصالح سنگی و همچنین انتخاب دانه بندی مناسب، از موارد تاثیر گذار در کیفیت و عملکرد مخلوطهای بتن غلتکی است. آیین نامه‌های مختلفی نظیر نشریه ۳۵۴، نشریه ۱۰۱، آیین نامه آبا، ACI و PCA در راستای انتخاب مصالح سنگی مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این تحقیق عمدتاً از نشریه ۳۵۴ استفاده شده است. مصالح مصرفی برای

روی نمونه مصالح سنگی انجام پذیرفت که نتایج حاصل در صفحات انتهایی گزارش آمده و ترسیم شده است. نمودار دانه بندی های بکار گرفته شده به همراه حدود بالا و پایین آنها در اشکال ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین دانه بندی مصالح RAP نیز در شکل ۱ آورده شده است. تراشه آسفالت ابتدا سرنده شده، و دانه های بزرگتر از ۲۵ میلی متر جدا گردیده و در گروه های مطلوب، دانه بندی شد. از آنجاکه امکانسنجی استفاده از مصالح بازیافتی نظیر تراشه آسفالت بعنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی یکی از اهداف اساسی این تحقیق است، برنامه انجام آزمایشات بر پایه تعیین مشخصات مکانیکی ترکیبات مختلف تراشه آسفالت در بتن غتکی استوار گردیده است. در این راستا از مقادیر مختلف RAP برای ساخت نمونه های بتن غتکی استفاده گردید. با استناد به مطالعات انجام شده محدوده ۰ تا ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت (۰،۲۵،۵۰،۱۰۰ درصد) در ساخت مخلوطها مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت کلیه آزمایشات و طرحهای اختلاط بر اساس این ترکیبات مورد ارزیابی قرار گرفت.

سطحی یکنواخت تر از حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر در بتنهای غلتکی راهسازی استفاده می شود (۱۳۸۸). همانگونه که قبلا نیز عنوان شد، وجود حداقل ۶٪ فیلر در مصالح سنگی ریز دانه برای حصول به دانه بندی یکنواخت و توپر توصیه می شود. با توجه به منابع و آیین نامه های موجود و مطالعات انجام شده سابق، دو نوع دانه بندی پیشنهاد شده توسط ACI (دانه بندی شماره ۱) و دانه بندی پیشنهادی PCA (دانه بندی شماره ۲) جهت ساخت مخلوط های بتن غلتکی مورد استفاده قرار گرفت. میزان عبوری از الک شماره ۴ با توجه به اینکه این الک مرز میان درشت دانه و ریز دانه است، می تواند معیار مناسبی در تعیین دانه بندی مصالح باشد. با مطالعه جدول ۴ می توان دریافت که دانه بندی شماره ۲ با ۶۷٪ درصد عبوری از الک شماره ۴ در مقایسه با ۶۰ درصد عبوری دانه بندی شماره ۱، به میزان زیادی درشت دانه تر از دانه بندی شماره ۱ است. درشت دانه تر بودن مخلوط به دلیل کاهش سطح مخصوص مصالح باعث کاهش میزان درصد جذب آب و در نتیجه بالاتر رفتن کارایی مخلوط شده است. افزایش کارایی باعث کاهش نسبت آب به سیمان این مخلوطها و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری آنها می گردد. همچنین مشاهدات ظاهری از نحوه تراکم نمونه ها حاکی از بالاتر رفتن تراکم پذیری نمونه ها و در نتیجه چگالی بالاتر آنها بوده است. آزمایش دانه بندی مصالح سنگی بر اساس استاندارد ASTM C 136 با روش شستشو بر

جدول ۱. حجم تولید تراشه آسفالت به تفکیک مناطق در شهر تهران در سال ۱۳۹۱

منطقه	حجم تولید تراشه (مترمکعب)	منطقه	حجم تولید تراشه (مترمکعب)
۱	۱۱۷۴۷	۱۲	۵۲۴۵
۲	۶۸۵۲	۱۳	۴۹۱۳
۳	۱۶۰۶۵	۱۴	۱۰۱۹۳
۴	۸۶۷۲	۱۵	۱۱۱۹۷
۵	۱۲۳۵۳	۱۶	۹۰۶۲
۶	۹۲۶۸	۱۷	۵۹۴۳
۷	۵۴۷۰	۱۸	۶۷۱۰
۸	۴۱۲۶	۱۹	۷۶۳۵
۹	۲۶۵۰	۲۰	۱۱۹۸۴
۱۰	۴۸۰۱	۲۱	۱۲۲۳۳
۱۱	۲۲۴۳	۲۲	۶۱۰۱
مجموع	۱۷۵۵۰۰ متر مکعب معادل ۳۶۸۵۵۰ تن		

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی مصالح سنگی

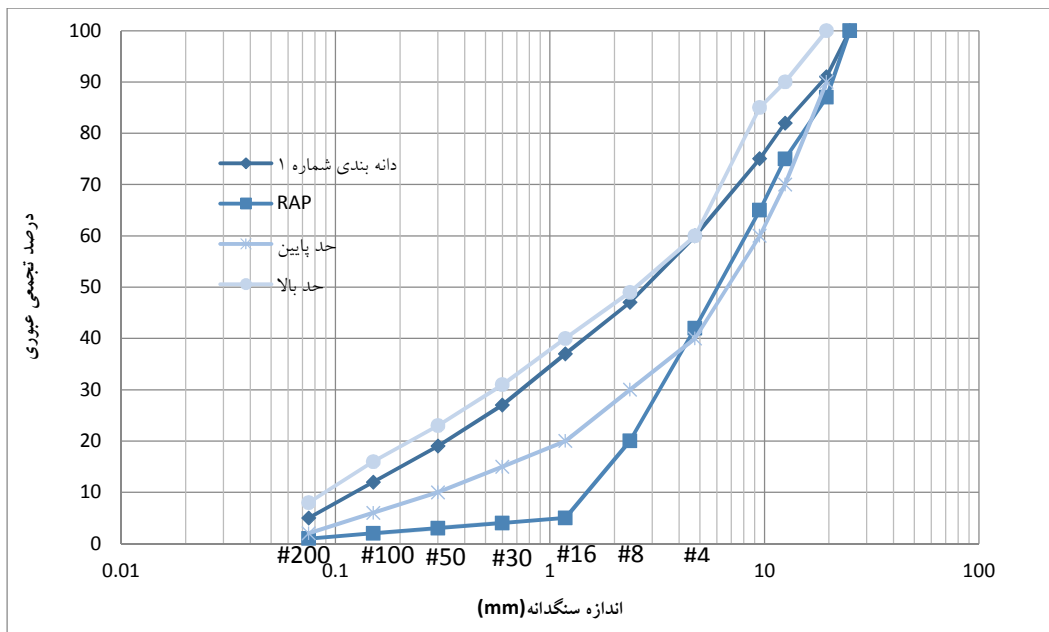
نتایج آنالیز شیمیایی (%)					
Co <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
33.35	3.8	40.60	1.25	1.92	13.47

جدول ۳. مشخصات مصالح سنگی

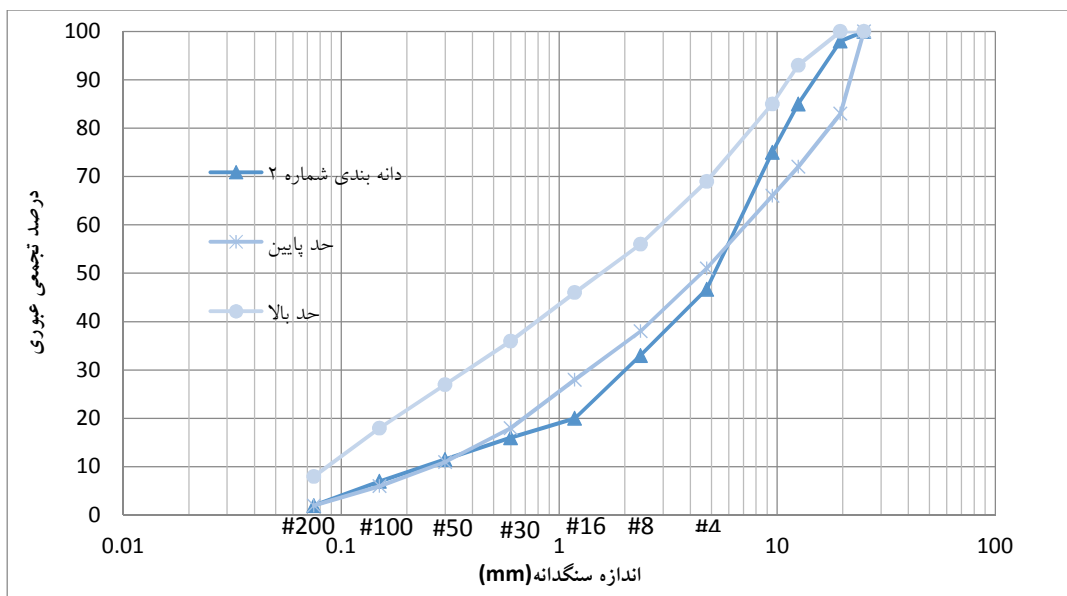
نوع مصالح	چگالی (T/M <sup>3</sup> )	درصد جذب آب (%)		درصد سایش لوس آنجلس	آزمایش درصد سلامت
		AASHTO T84-85	ASTM C-127		
مصالح سنگی	۲/۵۹۸	۱/۳	۱/۷	۱۷	۱/۸
		۲/۶۹۴	۲/۶۹۴	۱/۳	۱/۸
RAP	۲/۲۷	۱/۴	۱/۴	-	۳/۷

جدول ۴. جدول دانه بندی مصالح مصرفی و دانه بندی های مورد استفاده (Association, 1987; Committee, 2001)

شماره الی	حدود دانه بندی پیشنهادی ACI و دانه بندی استفاده شده		حدود دانه بندی پیشنهادی PCA و دانه بندی استفاده شده		حدود دانه بندی استفاده شده		شماره الی
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	
1	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
3/4	۱۰۰	۸۳	۱۰۰	۹۰	۹۸	۸۷	۸۷
1/2	۹۳	۷۲	۹۰	۷۰	۸۵	۷۵	۷۵
3/8	۸۵	۶۶	۸۵	۶۰	۷۵	۶۵	۶۵
#4	۶۹	۵۱	۶۰	۶۰	۴۶/۷	۴۲	۴۲
#8	۵۶	۳۸	۴۷	-	-	۲۰	۲۰
#16	۴۶	۲۸	۳۷	۴۰	۲۰	۵	۵
#30	۳۶	۱۸	۲۷	-	-	۴	۴
#50	۲۷	۱۱	۱۹	-	-	۳	۳
#100	۱۸	۶	۱۲	۱۶	۷	۲	۲
#200	۸	۲	۵	۸	۲	۱	۱



شکل ۱. نمودار دانه بندی مصالح سنگی شماره ۱ و RAP (Association, 1987; Committee, 2001)



شکل ۲. نمودار دانه بندی مصالح سنگی شماره ۲ (Association, 1987; Committee, 2001)

## ۲-۱-۲- سیمان

دانه بندی نیز در این مقوله موثرند. از آنجاکه مخلوطهای بتن غلتکی از چگالی بالاتری نسبت به بتن‌های معمولی برخوردارند، لذا در معیار مقاومتی یکسان، میزان سیمان کمتری

بطور کلی سیمان در مخلوطهای بتن غلتکی نقش چسباننده، یکپارچگی و استحکام بخشیدن به مخلوط را بر عهده دارد. البته میزان سیمان بکار برده شده نقش بسزایی در مقاومت مخلوط بتن غلتکی خواهد داشت ولیکن میزان تراکم مخلوط و نوع

معمولا استفاده از سیمان تیپ I در ساخت نمونه‌های بتن توصیه می‌شود. ولیکن به دلیل اینکه در تهران بیشتر سیمان تیپ II تولید شده و عمده مصرف سیمان شهر تهران نیز از کارخانه سیمان تهران تامین می‌شود، لذا در ساخت نمونه‌ها از سیمان تیپ II استفاده شد. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۵ آورده شده است.

لازم خواهند داشت. بنابراین معیار مقاومتی طرح، میزان سیمان مورد نیاز برای مخلوط‌ها را تعیین خواهد نمود. در این تحقیق از مقادیر متفاوت سیمان جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. دامنه کاربرد سیمان به منظور حصول به مقادیر مقاومتی مختلف تعیین شده است. در ساخت مخلوط‌ها از عیار سیمان ۴۰۰ و ۳۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰ کیلومتر بر مترمکعب معادل ۱۱/۶ تا ۲۰ درصد وزنی مصالح سنگی استفاده شده است.

جدول ۵. جدول آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	LOI	Other
21.84	4.72	3.77	1.15	61.14	0.44	2.23	0.65	1.63	2.43

## ۲-۲- طرح اختلاط

558 مصالح آماده شده برای اختلاط را دانه بندی نموده، سپس با توجه به درصد مصالح رد شده ۳/۴ و ۳/۱۶ اینچ جهت ادامه آزمایش میزان مصالح جهت آزمایش، نوع قالب و تعداد ضربات مشخص می‌شود. با اختلاط مصالح و سیمان (در اینجا ۱۱ تا ۲۰ درصد سیمان) در درصدهای مختلف آب و از ترسیم منحنی‌های تراکم، حداکثر وزن مخصوص مصالح مخلوط، رطوبت بهینه و مقدار درصد وزنی بهینه سیمان به دست می‌آید. مطابق استاندارد ASTM D-558 مصالح سنگی به مقادیر مناسب توزین شده و به هر واحد مقادیر مشخص سیمان افزوده و با درصدهای مختلف آب در قالب استاندارد به ۹۴۴ سانتیمتر مکعب (استوانه به قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۴/۵۸ اینچ) وبا کوبه ۵/۵ پوندی در سه لایه یکسان، متراکم می‌شود تا حداکثر وزن مخصوص خشک مخلوط مصالح، درصد رطوبت بهینه و درصد سیمان بهینه مخلوط بدست می‌آید.

به منظور دستیابی به ترکیبهای متفاوت با خواص مختلف و جهت بررسی تاثیر افزودن مصالح بازیافتی، با توجه به مطالعات پیشین، متغیرهای مورد استفاده شامل: ۴ گروه درصد سیمان، ۲ نوع دانه بندی، ۴ گروه درصد خرده آسفالت بازیافتی، بوده که در مجموع ۳۲ مخلوط متفاوت در ساخت نمونه‌ها با طرح اختلاط بر اساس زمان وی بی در نظر گرفته شد. ذکر این نکته ضروری است که طرح اختلاط نمونه‌ها با احتساب درصد رطوبت بهینه مخلوط صورت گرفته و تعیین طرح اختلاط بهینه از اهداف این تحقیق نبوده است. مشخصات نمونه‌های تیرچه و مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۶ آورده شده است. منظور از طرح اختلاط مصالح با سیمان، تعیین میزان مناسب سیمان برای خاک با مشخصات معین که در پروژه باید مصرف شود، می‌باشد. بدیهی است که مصالح باید به نحوی طراحی شود که عملکرد مناسبی به عنوان خاک مصرفی در بهسازی و روسازی داشته باشد. مطابق استاندارد ASTM D-



جدول ۶. مشخصات طرح اختلاط نمونه‌های تیرچه به وزن تقریبی ۷۸۰۰ گرم

شماره طرح	مشخصه نمونه	شماره دانه بندی	میزان سیمان (گرم)	نسبت آب به سیمان	درصد جذب آب
۱	C250G1	۱	۸۱۸	۰/۴	۱/۲
۲	C300G1	۱	۹۸۰	۰/۳۹	۱/۳
۳	C350G1	۱	۱۱۴۰	۰/۳۷	۱/۹
۴	C400G1	۱	۱۳۰۵	۰/۳۶	۱/۴
۵	C250R25G1	۱	۸۱۸	۰/۴	۱/۱
۶	C300R25G1	۱	۹۸۰	۰/۳۹	۱/۲
۷	C350R25G1	۱	۱۱۴۰	۰/۳۷	۱/۶
۸	C400R25G1	۱	۱۳۰۵	۰/۳۶	۲
۹	C250R50G1	۱	۸۱۸	۰/۴	۲/۶
۱۰	C300R50G1	۱	۹۸۰	۰/۳۹	۲/۴
۱۱	C350R50G1	۱	۱۱۴۰	۰/۳۷	۱/۷
۱۲	C400R50G1	۱	۱۳۰۵	۰/۳۶	۱/۱
۱۳	C250R100G1	۱	۸۱۸	۰/۴	۴/۴
۱۴	C300R100G1	۱	۹۸۰	۰/۳۹	۱/۵
۱۵	C350R100G1	۱	۱۱۴۰	۰/۳۷	۱/۳
۱۶	C400R100G1	۱	۱۳۰۵	۰/۳۶	۱/۷
۱۷	C250G2	۲	۸۱۸	۰/۳۹	۱/۴
۱۸	C300G2	۲	۹۸۰	۰/۳۸	۰/۹
۱۹	C350G2	۲	۱۱۴۰	۰/۳۶	۰/۷
۲۰	C400G2	۲	۱۳۰۵	۰/۳۵	۰/۷
۲۱	C250R25G2	۲	۸۱۸	۰/۳۹	۱/۸
۲۲	C300R25G2	۲	۹۸۰	۰/۳۸	۰/۸
۲۳	C350R25G2	۲	۱۱۴۰	۰/۳۶	۰/۸
۲۴	C400R25G2	۲	۱۳۰۵	۰/۳۵	۰/۹
۲۵	C250R50G2	۲	۸۱۸	۰/۳۹	۲/۲
۲۶	C300R50G2	۲	۹۸۰	۰/۳۸	۱/۵
۲۷	C350R50G2	۲	۱۱۴۰	۰/۳۶	۱/۳
۲۸	C400R50G2	۲	۱۳۰۵	۰/۳۵	۱/۲
۲۹	C250R100G2	۲	۸۱۸	۰/۳۹	۲/۳
۳۰	C300R100G2	۲	۹۸۰	۰/۳۸	۱/۶
۳۱	C350R100G2	۲	۱۱۴۰	۰/۳۶	۱/۲
۳۲	C400R100G2	۲	۱۳۰۵	۰/۳۵	۱/۱

### ۳-۲- آماده‌سازی نمونه‌های بتن غلتکی

همانطور که پیش‌تر بیان گردید در این مطالعه از نمونه‌های استوانه‌ای و تیرچه استفاده گردیده است. نمونه‌های استوانه‌ای در قالب‌هایی با قطر داخلی ۱۵۲ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و در لایه‌های با ارتفاع مناسب و نمونه‌های تیرچه در قالب‌هایی با ابعاد داخلی ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۳۵۰ میلی‌متر آماده گردید. جهت تراکم کردن نمونه‌ها از میز لرزه‌ای وی بی مطابق با استاندارد ASTM C1176-92 استفاده می‌شود (شکل ۳). ارتعاش این میز بصورت سینوسی و با فرکانس ۶۰ HZ و دامنه ۰/۴۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین برای تراکم کردن نمونه‌ها از سرباری معادل ۹ کیلوگرم طبق استاندارد ASTM C1176 بر روی نمونه استفاده می‌شود. وزن سربار طبق استانداردهای مختلف، متفاوت بوده و استاندارد ASTM D1170 سرباری معادل ۲۲/۷ کیلوگرم را پیشنهاد نموده است. نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۵ ثانیه تحت تراکم و ارتعاش قرار می‌گیرند.

همانطور که پیش‌تر بیان گردید در این مطالعه از نمونه‌های استوانه‌ای و تیرچه استفاده گردیده است. نمونه‌های استوانه‌ای در قالب‌هایی با قطر داخلی ۱۵۲ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و در لایه‌های با ارتفاع مناسب و نمونه‌های تیرچه در قالب‌هایی با ابعاد داخلی ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۳۵۰ میلی‌متر آماده گردید. جهت تراکم کردن نمونه‌ها از میز لرزه‌ای وی بی مطابق با استاندارد ASTM C1176-92 استفاده می‌شود (شکل ۳). ارتعاش این



شکل ۳. بارگذاری نمونه تیرچه (سمت راست) برای تعیین انرژی شکست و مدول الاستیسیته و نحوه تراکم کردن نمونه بتن غلتکی در آزمایشگاه-میز وی بی (سمت چپ) (رامی، ۱۳۹۰)

ذرات کوچکتر موجود در ذره آسفالتی حاوی قیر نشان داده شده است.

شکل ۴ تصویر میکروسکوپ نوری از ترکیب مخلوط حاوی خرده آسفالت را ارائه می‌دهد. در این شکل چسبندگی خوبی مابین لایه آسفالت و خمیر سیمان ایجاد شده است. همچنین

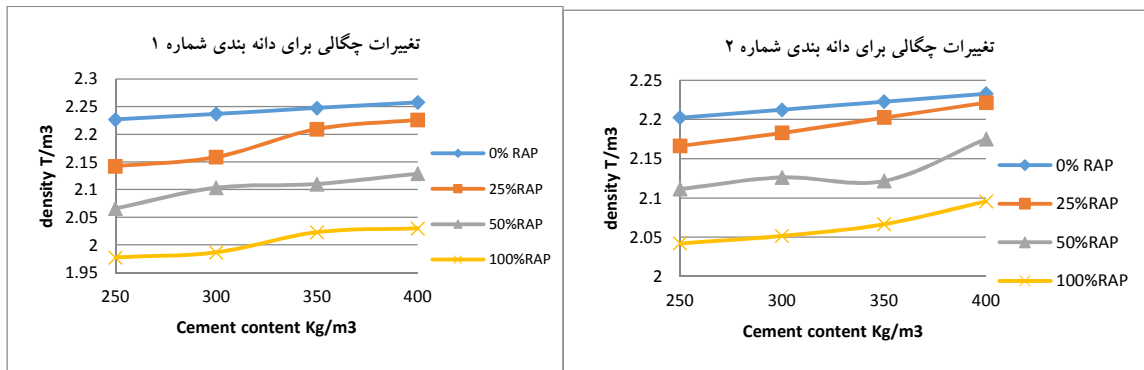


شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نوری از مخلوطهای بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت

## ۲-۴- چگالی

با استفاده از فینیشرهای مخصوص می توان تا ۹۰ درصد تراکم اولیه را بلافاصله پس از پخش بدست آورد. چگالی نمونه ها در آزمایشگاه به روش استغراق و با محاسبه میزان جذب آب نمونه ها اندازه گیری شد. شکل ۵ تغییرات چگالی نمونه ها را نشان می دهد.

میزان رطوبت بهینه طرح باعث ایجاد چگالی بیشینه شده و مطابق استاندارد ASTM D558 تعیین می گردد. در محل اجرا درصد تراکم نسبی توسط تجهیزات چگالی سنج مغناطیسی کنترل شده و عملیات متراکم کردن تا حصول ۹۸ درصد تراکم از طریق غلتکهای فلزی و بیره انجام می پذیرد. البته



شکل ۵. نمودار تغییرات چگالی مخلوطها

مقایسه شد. به منظور تبدیل نتایج ابعاد نمونه ها به ابعاد استاندارد (۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی متر) از رابطه ۱ استفاده شد (Yi et al., 2006):

$$f_{cu}(d) = \frac{1.17f'_c}{\sqrt{1+d/2.6}} + 0.62f'_c \quad (1)$$

آزمایشات بارگذاری خمشی ۴ نقطه ای توسط دستگاه UTM ساخت شرکت سنتام با قابلیت بارگذاری مونوتینیک و با سرعت بارگذاری ۱ mm/min در حالت کنترل تغییر مکان انجام پذیرفت. مقادیر مدول الاستیسیته، چقرمگی و انرژی جذب شده از تحلیل نتایج آزمایش ۳ نقطه ای، بدست آمده و بصورت خلاصه در جدول ۷ آورده شده است.

## ۲-۵- آزمایشات مشخصات مکانیکی مخلوطها

همانگونه که در بخشهای قبل بیان گردید از نمونه های تیرچه به ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۳۵۰ میلی متر برای تعیین مشخصات مکانیکی مخلوطها نظیر مقاومت خمشی، انرژی جذب شده و چقرمگی استفاده شد. تست ۳ نقطه ای به روش استاندارد ASTM C78M انجام گرفت. برای هر طرح ۳ نمونه تیرچه و در مجموع ۹۶ نمونه، جهت تکرار پذیری نتایج ساخته شد. اثر تکرار پذیری نتایج نمونه ها در ضمیمه ۲ آورده شده است. از نمونه های استوانه ای به ابعاد ۶ × ۱۲ اینچ جهت انجام همچنین نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی متر حاصل از برش تیرچه ها نیز جهت آزمایش مقاومت فشاری نمونه ها استفاده قرار گرفت و با نتایج نمونه های استوانه ای

جدول ۷. نتایج مشخصات مکانیکی نمونه‌های بتن غلتکی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی

Specimen No.	Specimen ID	cement content (Kg/m <sup>3</sup> )	$f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	Toughness	Energy (N.mm)
1	C250G1	250	6.0	29.2	2182.1	0.33	2505
2	C300G1	300	6.4	32.9	9019.2	0.27	2007
3	C350G1	350	6.9	34.9	12997.4	0.23	1726
4	C400G1	400	7.2	38.6	18586.2	0.14	1208
5	C250R25G1	250	4.8	26.9	4551.8	0.49	3643
6	C300R25G1	300	5.5	30.2	6146.6	0.46	3426
7	C350R25G1	350	5.8	32.7	12793.9	0.25	3184
8	C400R25G1	400	6.6	36.6	13197.2	0.16	2666
9	C250R50G1	250	3.8	17.5	5598.6	0.50	3715
10	C300R50G1	300	5.6	22.2	9713.5	0.48	3602
11	C350R50G1	350	5.6	23.8	11960.2	0.36	3266
12	C400R50G1	400	5.8	24.3	7400.6	0.29	2480
13	C250R100G	250	2.3	10.2	4935.8	0.57	4289
14	C300R100G	300	4.1	16.2	6135.5	0.50	3797
15	C350R100G	350	4.4	17.4	3738.9	0.36	3507
16	C400R100G	400	4.8	22.2	7866.2	0.30	2993
17	C250G2	250	6.3	36.0	14382.8	0.24	2334
18	C300G2	300	6.9	36.1	18490.2	0.20	2318
19	C350G2	350	7.5	36.8	20158.5	0.17	2139
20	C400G2	400	7.9	42.1	21419.3	0.12	1261
21	C250R25G2	250	5.2	28.6	5830.5	0.38	4160
22	C300R25G2	300	6.2	32.6	6635.4	0.40	4009
23	C350R25G2	350	7.4	34.8	6971.7	0.18	4411
24	C400R25G2	400	7.8	39.0	7514.7	0.12	3662
25	C250R50G2	250	4.5	21.8	6424.3	0.42	4603
26	C300R50G2	300	5.1	23.8	6751.8	0.45	3425
27	C350R50G2	350	5.5	25.9	8778.4	0.32	3350
28	C400R50G2	400	5.9	32.6	9740.1	0.30	2712
29	C250R100G	250	3.2	12.4	4564.8	0.40	6306
30	C300R100G	300	4.0	13.7	3724.0	0.51	3874
31	C350R100G	350	4.5	18.0	2548.1	0.35	3798
32	C400R100G	400	4.7	19.2	5006.4	0.30	3116

## ۲-۵-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری در درصد‌های وزنی مختلف سیمان مطابق استاندارد ASTM D-1663 برای نمونه‌های مخلوط سیمان و مصالح سنگی در قالب استوانه‌ای در جدول ۶ آورده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای متراکم شده به روش میز وی بی، پس از خارج شدن از قالب به مدت ۷ روز در حوضچه آب، عمل آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار می‌گیرند. حداقل میزان مقاومت فشاری برای بتن غلتکی به شرایط و معیارهای طراحی بستگی دارد. مطالعات جامعی توسط کمیته ACI بر روی مشخصات بتن غلتکی و طرح اختلاط آن صورت پذیرفت و از نتایج آن، محدوده‌هایی برای مقاومت فشاری و

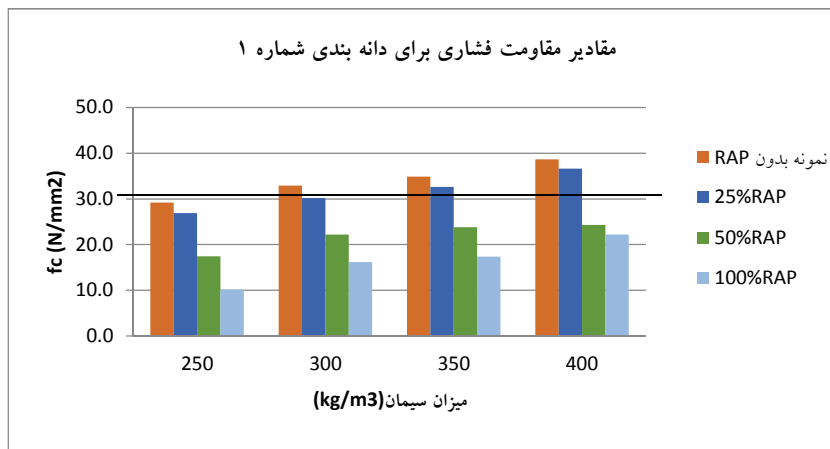
آزمایش مقاومت فشاری بهترین روش آزمایش برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن و خاک‌های تثبیت شده با سیمان است. مقاومت فشاری بتن و خاک‌های تثبیت شده با سیمان بستگی به جنس مصالح سنگی و خاک، درصد سیمان، کیفیت اختلاط خاک تثبیت و کوبیده شده، شرایط عمل آوردن مخلوط و زمان (۷ روزه، ۲۸ روزه و ۴۲ روزه) دارد. در روسازیهای بتن غلتکی که معمولاً تحت بارگذاریها و ترافیک سنگین قرار می‌گیرند، امکان عمل آوری بیشتر از ۷ روز میسر نیست. مطالعات نشان داده‌اند که روند افزایش مقاومت بتن غلتکی کندتر از بتن معمولی می‌باشد (Brotman et al., 2007). نتایج آزمایش

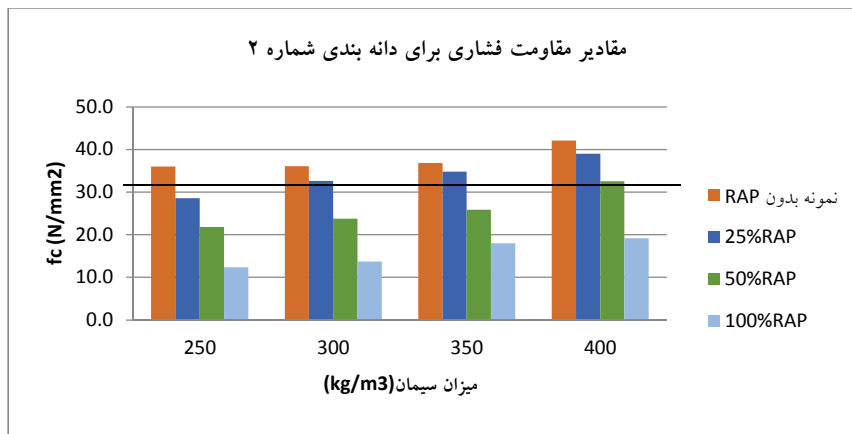
معیار ذکر شده نمونه‌ها حاوی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ تراشه آسفالت دارای مقاومت فشاری کمتری می‌باشند و قابل قبول نخواهند بود. همچنین شکل ۶ موقعیت دستگاه تست مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

خمشی، دانه بندی مخلوط و سایر مشخصات اجرایی بدست آمده است. بر اساس مطالعات آنان حداقل مقاومت فشاری معادل ۲۷/۶ MPa برای لایه روسازی با بتن غلتکی پیشنهاد گردید (Committee, 2001). نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول ۶ و شکل ۷ آورده شده است. با توجه به حداقل



شکل ۶. آزمایش مقاومت فشاری و نحوه خرد شدن نمونه‌ها





شکل ۷. نمودار تغییرات مقاومت فشاری مخلوطها

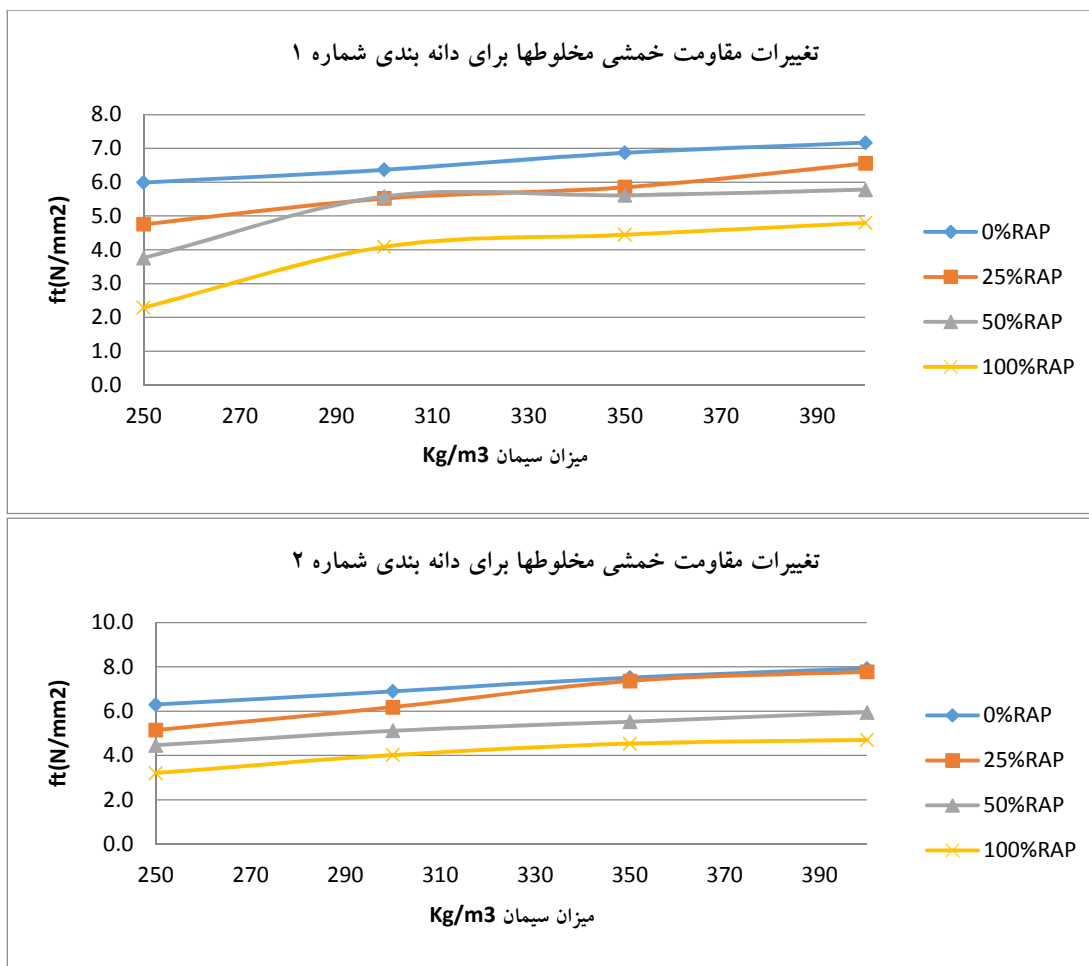
### ۲-۵-۲- مقاومت خمشی

$$f_t = c\sqrt{f_c} \quad (۲)$$

$$f_t = \frac{PL}{bh^2} \quad (۳)$$

P: نیروی اعمال شده، L: طول دهانه، b: عرض نمونه، h: ارتفاع نمونه و C در این رابطه در بازه ۹/۴ تا ۱۰/۸ (برحسب psi) قرار دارد، که با توجه به طرح بتن غلتکی و نوع آن متغیر خواهد بود (Brotman et al., 2007). شکل ۸ مقادیر مقاومت خمشی مخلوطها در این پژوهش نشان داده شده است.

مطالعات گسترده ای در مورد مقاومت خمشی مخلوطهای بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافتی انجام شده و روابط گوناگونی مابین مقاومت خمشی و فشاری مخلوطهای بتن غلتکی ارائه شده است. یکی از مشهورترین روابط موجود مابین این دو رابطه ارائه شده طبق رابطه ۲ است که برای ارتباط این دو مقاومت در سنین مختلف ارائه شده است. به این منظور می توان مقاومت ۷ روزه بتن را معیار بررسی قرارداد. رابطه ۳ میزان مقاومت خمشی را بر مبنای بارگذاری تیرچه ۳ نقطه ای بیان می دارد.



شکل ۸ نمودار تغییرات مقاومت خمشی مخلوطها

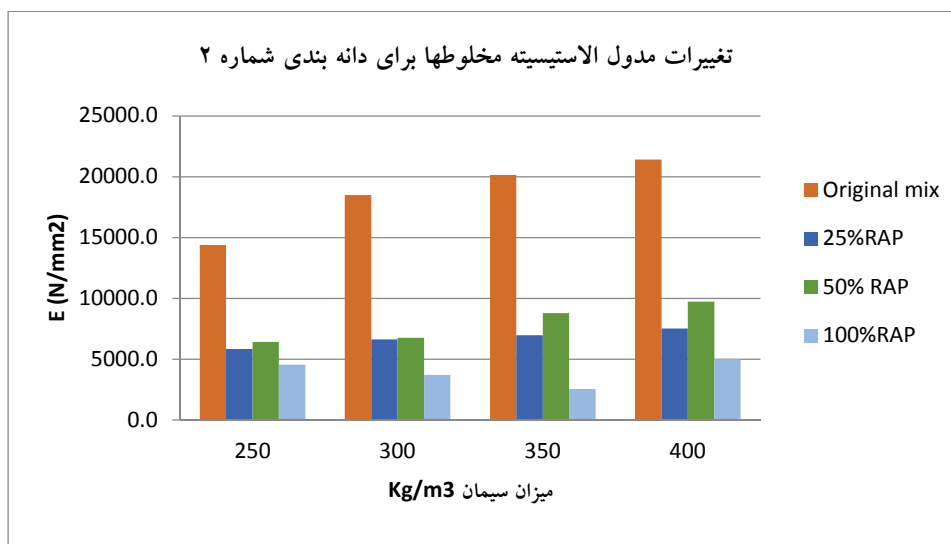
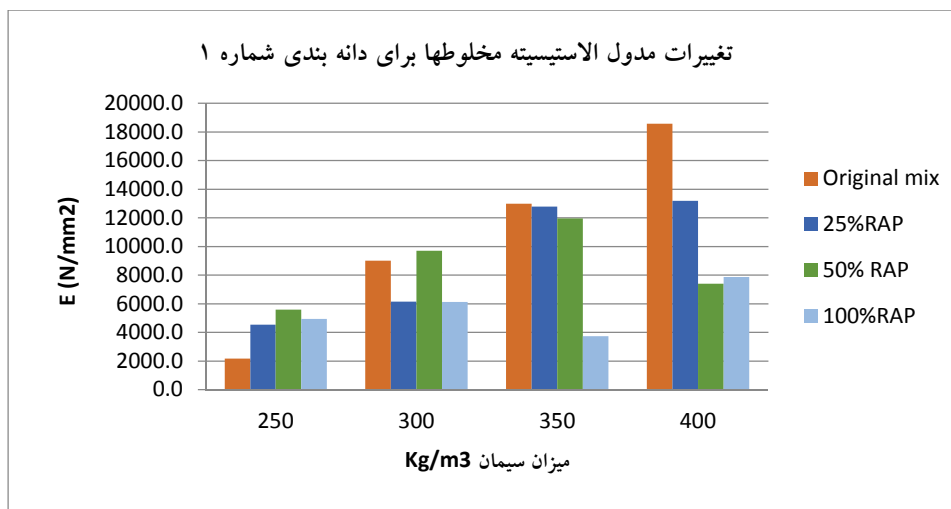
### ۲-۵-۳- مدول الاستیسیته (E<sub>a</sub>)

مدول الاستیسیته، خصوصیتی از مصالح است که رفتار مصالح تحت بارگذاری در ناحیه الاستیک را نشان داده و در واقع میزان استقامت الاستیک مصالح را نشان می‌دهد. بدین ترتیب میتوان رفتار مصالح تحت بارگذاری را باین معیار ارزیابی و طبقه بندی نمود. با مطالعه رابطه ۴ می‌توان دریافت که مدول الاستیسیته ارتباط مستقیمی با میزان بار وارده به نمونه در ناحیه الاستیک دارد و مدول الاستیسیته بالاتر بیانگر میزان باربری بیشتر بوده که برای مصالحی همچون بتن میتواند میزان تردی بیشتری را نیز نشان دهد. در حقیقت انعطافپذیری و چقرمگی مصالح رابطه

معکوس با مدول الاستیسیته دارد. مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها با استفاده از آزمایش ۴ نقطه ای از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$E = \frac{23 PL^3}{108 \delta b h^3} \quad (4)$$

در این رابطه E مدول الاستیسیته، P: نیروی اعمال شده، L: طول دهانه، b: عرض نمونه، h: ارتفاع نمونه و δ تغییر مکان زیر بار است. شکل ۹ نمودار تغییرات مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار تغییرات مدول الاستیسیته مخلوط های حاوی تراشه آسفالت

## ۲-۵-۴- شاخص چقرمگی (طاقة)

$\epsilon_p$ ،  $\epsilon$  کرنش در نقطه دلخواه، و  $\epsilon_p$  کرنش متناظر با حداکثر تنش است. شاخص چقرمگی عملکرد نمونه را تعریف و برای مواد کاملاً پلاستیک برابر ۱ (یعنی مساحت ناحیه الاستیک در مقابل ناحیه پلاستیک قابل صرف نظر کردن است) و برای مواد ترد برابر صفر (یعنی شکست کاملاً ترد بوده و منحنی پس از شکست کشیدگی ندارد) است که نشانگر عدم وجود ظرفیت باربری پس از شکست می باشد (Huang et al., 2005).

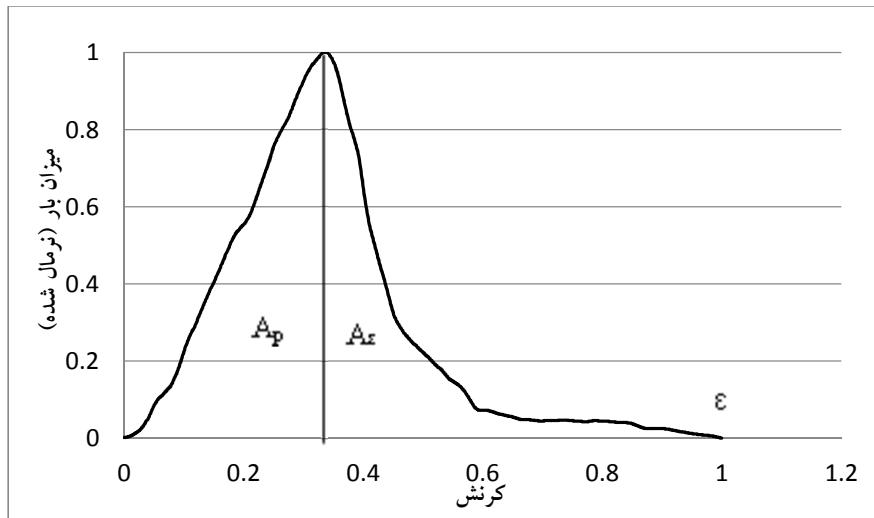
(شکل ۳-۱۰)

شاخص چقرمگی پارامتری است که سختی نمونه در ناحیه پس از ترک خوردگی را نشان داده و از طریق نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم محاسبه می گردد. برای تحصیل شاخص چقرمگی بدون بعد، بایستی نمودار بار جابجایی نرمال شود. شاخص چقرمگی  $TI_{it}$  از رابطه ۵ محاسبه می شود (Huang et al., 2005):

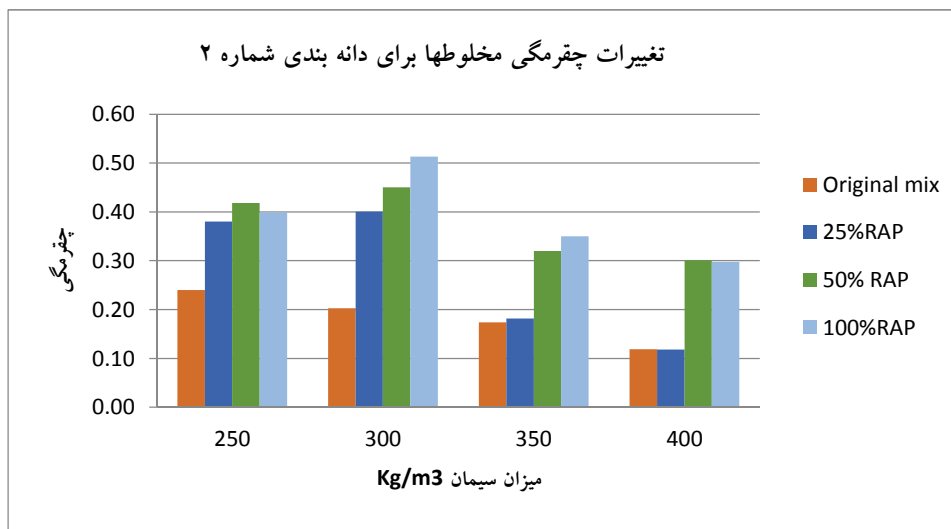
$$TI_{it} = \frac{A_{\epsilon} - A_p}{\epsilon - \epsilon_p} \quad (5)$$

$A_{\epsilon}$  مساحت ناحیه زیر منحنی تنش-کرنش نرمال شده تا کرنش  $\epsilon$  است،  $A_p$  مساحت ناحیه زیر منحنی تنش-کرنش تا کرنش





شکل ۱۰. نمودار شماتیک محاسبه سختی و چقرمگی



شکل ۱۱. نمودار تغییرات چقرمگی مخلوطهای حاوی تراشه آسفالت

با مطالعه نمودارها میتوان مشاهده نمود که مخلوط های بدون مصالح بازیافتی کمترین مقدار چقرمگی را دارند. همچنین افزایش مقاومت خمشی باعث کاهش چقرمگی شده در صورتیکه افزایش درصد سیمان اثر معکوسی بر روی آن دارد. این پدیده در اثر ترد شدن نمونه ها و شکست ناگهانی پس از شکست رخ می دهد. بهرحال هرچه قابلیت باربری نمونه ها افزایش یابد، شکست بصورت ناگهانی تری رخ داده و انرژی شکست کاهش خواهد یافت.

نتایج مدول الاستیسیته و چقرمگی نمونه ها در اشکال ۹ و ۱۱ آورده شده است. روند تغییرات مدول الاستیسیته متفاوت از روند مشاهده شده در چقرمگی است. بر اساس نتایج، مخلوطهای بدون مصالح بازیافتی، دارای بیشترین مدول الاستیسیته ولی چقرمگی مخلوط ها با افزایش مصالح بازیافتی، افزایش می یابد که روندی کاملاً متفاوت است. چقرمگی بیانگر خاصیت باربری و جذب انرژی مصالح پس از شکست است و به میزان بار و تغییر شکل پس از شکست، بستگی دارد.

## ۲-۵-۵- انرژی جذب شده (Ea)

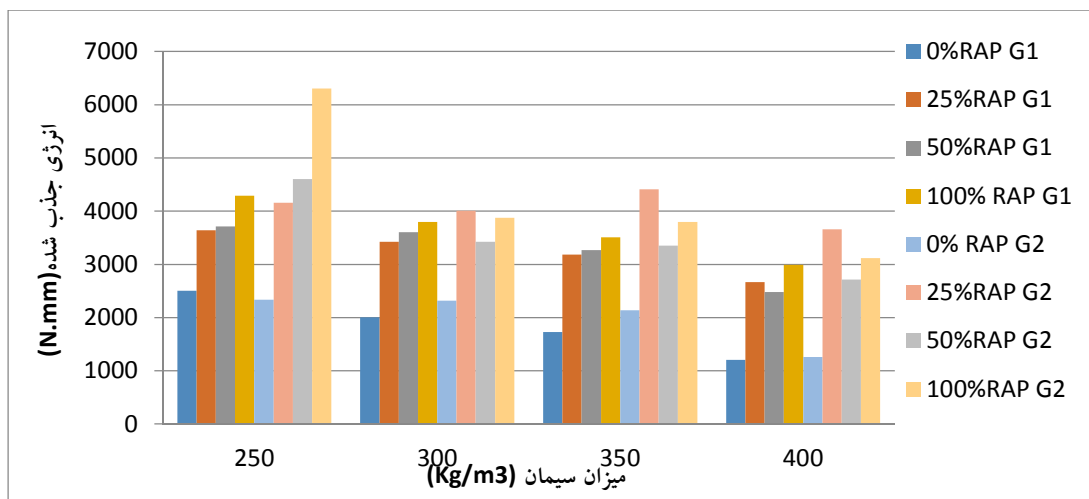
در کنار یافته‌ها و نتایج بدست آمده، از مصالح بازیافتی جهت بهبود خواص مکانیکی استفاده می‌گردد که در کنار این مزیت، اثرات مطلوب زیست محیطی و صرفه اقتصادی، معیار جذب انرژی و به تبع آن تاخیر در ترک خوردگی و در نتیجه افزایش عمر روسازی، کاربرد مصالح بازیافتی را توجیه پذیرتر می‌نماید. بنابراین مطالعه چقرمگی و جذب انرژی مخلوطها در اثر افزودن مصالح بازیافتی یکی از اهداف این پژوهش می‌باشد. مساحت زیر نمودار نمایانگر انرژی شکست جذب شده نمونه است و طبق رابطه ۶ تعریف می‌گردد (Pérez-Jiménez et al., 2013):

$$G = W_f = \int_0^{\Delta R} F \cdot du \quad (6)$$

F: نیروی بکارگرفته شده (kN)، u: تغییر مکان (mm) و  $\Delta R$  تغییر مکان در  $R = 0.1 \text{ kN}$  پس از شکست (mm) که به عنوان مقدار باقیمانده در نظر گرفته می‌شود.

با افزایش انعطاف پذیری نمونه‌ها، میزان انرژی جذب شده آنها نیز افزایش خواهد یافت. بر این اساس با افزودن مصالح بازیافتی، مخلوط از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار می‌گردد و رفتار مطلوب تری در مواجهه با بارگذاریهای متناوب و روند گسترش ترک خواهند داشت. مخلوطهای بدون مصالح بازیافتی، بعلاوه جاذبه بیشتر مابین سنگدانه‌ها و خمیر سیمان، رفتار متفاوتی دارند. مخلوطهای حاوی مصالح تراشه آسفالت، چسبندگی کمی با خمیر سیمان داشته و مسیر گسترش ترک تحت تاثیر تراشه آسفالت قرار می‌گیرد. این باعث شده تا ترک در مرز بین خمیر سیمان و سنگدانه (خرده آسفالت) گسترش پیدا کرده تا ضمن افزایش مسیر ترک، تغییر شکل نهایی نمونه

نیز افزایش یافته و در نتیجه انرژی جذب شده بسته به طول مسیر ترک افزایش یابد (Huang et al., 2005). از آنجایی که انرژی جذب شده از خواص ویژه مصالح نمی‌باشد، استفاده از نمونه‌های تیرچه بعنوان نمونه استاندارد برای بررسی انرژی شکست، آنچنان قابل اطمینان نخواهد بود. در حقیقت این ویژگی از خصوصاتی است که به نوع نمونه وابسته است (Bažant and Kazemi, 1991; Chiou, 1986). شکل ۱۲ نمودار تغییرات انرژی جذب شده مخلوطهای بتن غلتکی حاوی تراشه آسفالت را نشان می‌دهد. بعنوان نتیجه کلی می‌توان مشاهده نمود که افزودن مصالح بازیافتی سبب افزایش انرژی جذب شده گردیده و می‌تواند به عنوان انعطاف پذیری بیشتر بیان گردد. درصد سیمان نمونه‌ها نیز می‌تواند بر میزان انرژی جذب شده تاثیرگذار باشد. بدین ترتیب که نمونه‌های حاوی سیمان کمتر از انعطاف پذیری بالاتری برخوردار بوده و در نتیجه میزان جذب انرژی بیشتری دارند. بنابراین انتخاب معیار جذب انرژی اگرچه نمی‌تواند معیار مناسبی برای بررسی و انتخاب مخلوط بهینه باشد، ولی در کنار سایر پارامترهای موثر همانند مقاومت فشاری و کششی در تعیین مقادیر طرح، می‌تواند تاثیرگذار باشد. با تفسیر گراف فوق میتوان، استنباط نمود که انرژی جذب شده در محدود میزان سیمان  $350 \text{ kg/m}^3$  - ۲۵۰ به حالت بهینه میزان جذب انرژی خواهد رسید. چنانچه قبلا نیز بیان گردید میزان انرژی جذب شده، کمیتی است که وابستگی زیادی به نوع و شکل نمونه و شرایط آزمایش دارد. به هر حال بروز خطا در آزمایشات اجتناب ناپذیر بوده و در تفسیر نتایج تاثیر گذار خواهد بود. بنابراین مدلسازی نتایج با روشهای رگرسیونی دچار مشکل خواهد شد و خطای بالایی بوجود خواهد آورد.



شکل ۱۲. نمودار میزان انرژی جذب شده مخلوطهای بتن غلتکی حاوی تراشه آسفالت

### ۳- بررسی و تحلیل نتایج

#### ۳-۱- مدل رگرسیونی چگالی

به هر اندازه که نقاط به خط آبی (خط ۴۵ درجه) نزدیکتر باشند، مدل عملکرد مطلوب تری دارد، به این معنی که داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های مدل تقریباً برابر می‌باشند. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد برخی از نقاط از خط دور می‌باشند، و این نشان دهنده این است که مدل رگرسیون در آن نقاط به خوبی مدلسازی را انجام نداده است.

در این بخش ابتدا، آنالیز واریانس، جهت تعیین تأثیر درصد RAP بر میزان چگالی مخلوطها بکار برده شد. سپس جهت تعیین روابط موجود میان متغیرها و تاثیر آنها بر چگالی مخلوطها، از رگرسیون خطی استفاده گردید. نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است. شکل ۱۳ میزان مطابقت نتایج مربوط به چگالی نمونه‌های آزمایشگاهی و نتایج بدست آمده از طریق مدل رگرسیونی را بصورت منحنی پراکندگی نشان می‌دهد.

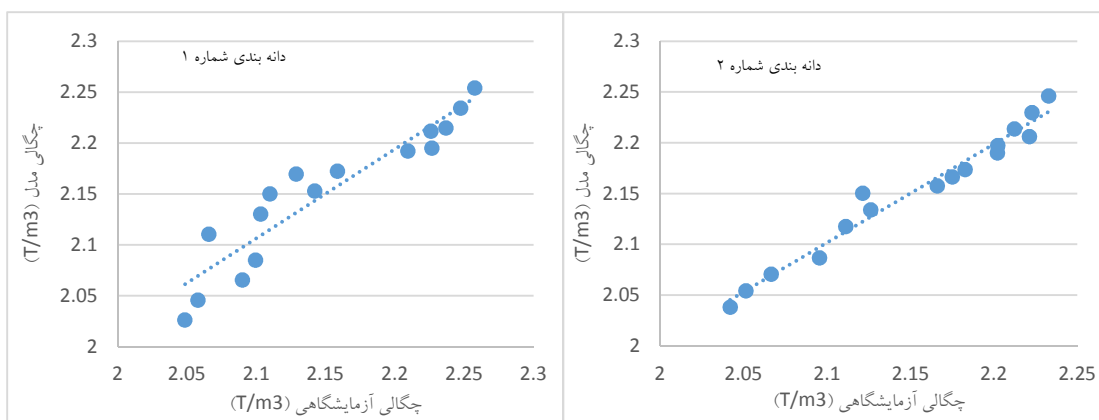
جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس و مدل رگرسیونی چگالی مخلوطهای بتن غلتکی

ANOVA							
دانه بندی	Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
شماره ۱	درصد سیمان	0.007817	3	0.002606	16.43112	0.00054	3.862548
	درصد RAP	0.070935	3	0.023645	149.1067	5.45E-08	3.862548
	خطا	0.001427	9	0.000159			
	مجموع	0.080179	15				
شماره ۲	درصد سیمان	0.005588	3	0.001863	23.67771	0.000132	3.862548
	درصد RAP	0.056352	3	0.018784	238.7697	6.8E-09	3.862548
	خطا	0.000708	9	7.87E-05			
	مجموع	0.062648	15				

مدل رگرسیونی					
		ضریب	خطای استاندارد	t Stat	P-value
شماره ۱	مقدار ثابت	2.096785	0.0415862	50.42010	2.69E-16
	سیمان	0.393240	0.1236433	3.180439	0.007235
	RAP	-0.169044	0.0186931	-9.04313	5.7E-07
مدل رگرسیونی				<b>Density=2.097+0.39Cement-0.17RAP</b>	R <sup>2</sup> =0.87
شماره ۲	مقدار ثابت	2.116164	0.01816	116.5281	5.14E-21
	سیمان	0.324732	0.053993	6.014311	4.34E-05
	RAP	-0.159256	0.008163	-19.5095	5.19E-11
مدل رگرسیونی				<b>Density=2.116+0.325Cement-0.159RAP</b>	R <sup>2</sup> =0.97

می‌توان دریافت که افزودن تراشه آسفالت سبب کاهش چگالی شده و این روند کاهش، در نمونه‌های با دانه بندی شماره ۲ کمتر بوده است. این رخداد می‌تواند بر اثر میزان بالای کارایی این دانه بندی بوده که سبب تراکم پذیری و چگالی بیشتر می‌گردد.

با توجه به اینکه بازه اطمینان در آنالیز واریانس ۵٪ در نظر گرفته شده است، و بنابر آنچه در فصل پیش بیان گردید، براساس آزمون فرض صفر، میزان P-VALUE می‌بایست از ۵٪ کمتر بوده و شرط  $F_{crit} < F$  نیز برقرار باشد. بر این اساس RAP تاثیر مستقیمی بر چگالی داشته، و با مطالعه جدول ۷

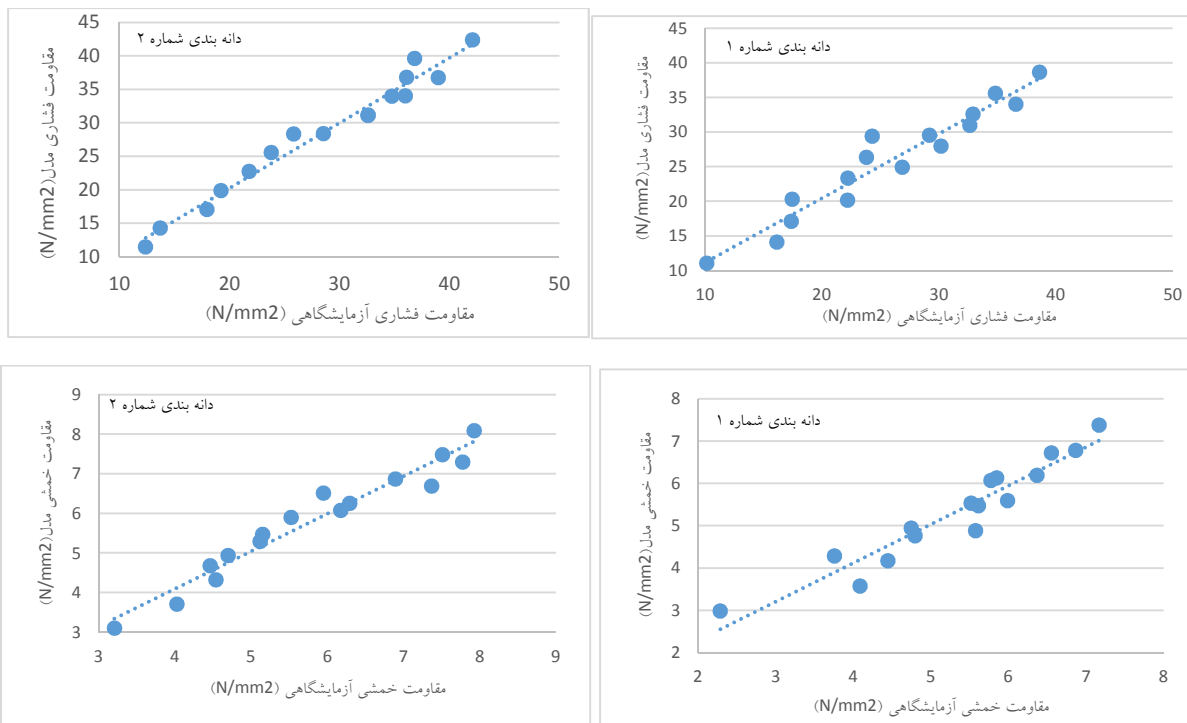


شکل ۱۳. نمودار پراکنده داده‌ها و مدل رگرسیونی چگالی برای دانه بندی های شماره ۱ و ۲

### ۳-۲- مدل رگرسیونی مقاومت خمشی و فشاری

خمشی و فشاری نمونه‌ها را بر اساس مقادیر مختلف درصد سیمان و RAP نشان می‌دهد.

همانند مطالب ذکر شده در بخش ۳-۱، تفاسیر مشابهی در خصوص متغیرهای مقاومت خمشی و فشاری قابل بیان می‌باشد. جدول ۸ نتایج روابط رگرسیونی مقادیر مقاومت



شکل ۱۴. نمودار پراکندگی نتایج مدل و مشاهدات آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها

بنابراین قفل و بست کمتری مابین آنها بوجود می‌آید همچنین کمتر بودن میزان نسبت آب به سیمان مخلوطها در اثر بکارگیری تراشه آسفالت، نیز می‌تواند در افزایش مقاومت تاثیرگذار باشد. اگرچه روش تراکم در افزایش مقاومت مخلوط موثر می‌باشد، اما همچنان چسبندگی بین خمیر سیمان و مصالح، تعیین کننده است. در نهایت درصد سیمان فاکتور تعیین کننده در افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌باشد. شکل ۱۴ نمودار پراکندگی نتایج مدل و مشاهدات آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج و حداقل معیار  $27/6 \text{ MPa}$  برای مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی، نمونه‌های حاوی  $1.0\%$  و  $5.0\%$  خرده آسفالت بازیافتی، قادر به برآورده نمودن حداقل مشخصات نمی‌باشند. مطابق انتظار، دانه بندی شماره ۲ دارای مقاومت بیشتری نسبت به دانه بندی شماره ۱ می‌باشد. بر اساس روابط رگرسیونی و آنالیز واریانس، تراشه آسفالت تاثیر منفی بر مقاومت فشاری و خمشی مخلوطهای بتن غلتکی دارند. علت اصلی این پدیده چسبندگی کم میان مصالح بازیافتی (قیر در سطح سنگدانه‌های آسفالت) و خمیر سیمان می‌باشد. بر اثر این موضوع خمیر سیمان نفوذ اندکی در تراشه آسفالت داشته و

جدول ۸. نتایج آنالیز رگرسیون و واریانس برای مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی

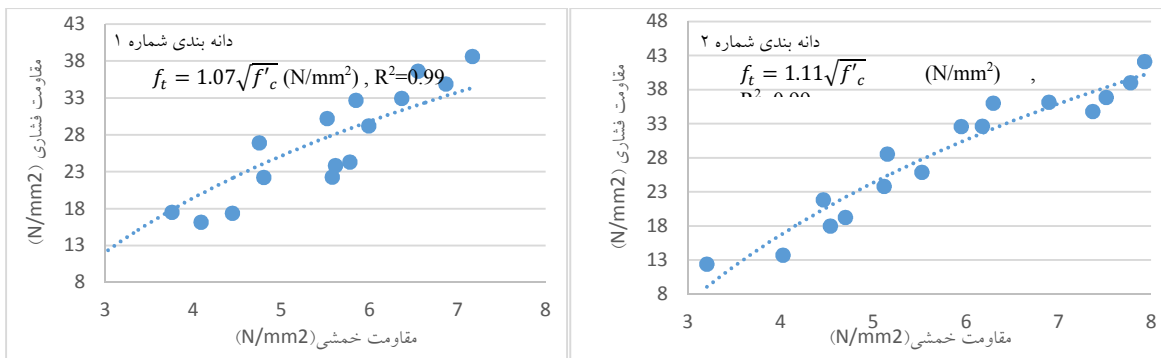
	نوع دانه بندی	Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit	
مقاومت خمشی	1	درصد سیمان	820.3245	3	273.4415	22.11267	0.000173	3.862548	
		درصد RAP	1570.274	3	523.4246	42.32831	1.24E-05	3.862548	
		خطا	111.2925	9	12.36583				
		مجموع	2501.891	15					
	2	درصد سیمان	795.9981	3	265.3327	33.81885	3.14E-05	3.862548	
		درصد RAP	2340.899	3	780.2998	99.45568	3.21E-07	3.862548	
		خطا	70.61134	9	7.845704				
		مجموع	3207.509	15					
مقاومت فشاری	1	درصد سیمان	19553.68	3	6517.894	52.15935	5.16E-06	3.862548	
		درصد RAP	83364	3	27788	222.3731	9.32E-09	3.862548	
		خطا	1124.651	9	124.9612				
		مجموع	104042.3	15					
	2	درصد سیمان	16912.59	3	5637.531	27.18372	7.63E-05	3.862548	
		درصد RAP	116537.5	3	38845.84	187.3115	1.99E-08	3.862548	
		خطا	1866.477	9	207.3863				
		مجموع	135316.6	15					
نتایج مدل رگرسیونی	1	$f_t = 26.72 + 121.1 C - 26.65 \text{ RAP}$					$R^2 = 0.91$		
	2	$f_t = 32.61 + 124.59 C - 32.2 \text{ RAP}$					$R^2 = 0.95$		
	1	$f_c = 14.39 + 60.56 C - 18.49 \text{ RAP}$					$R^2 = 0.93$		
	2	$f_c = 20.04 + 55.85 C - 22.54 \text{ RAP}$					$R^2 = 0.97$		

C: درصد سیمان ( $T/m^3$ ),  $f_c$ : مقاومت فشاری ( $N/mm^2$ ),  $f_t$ : مقاومت کششی ( $Kg/cm^2$ )

### ۳-۳- مدل رگرسیونی رابطه بین مقاومت خمشی و فشاری

تقریبی این دو کمیت بیان گردید. در این قسمت رابطه دقیق این دو پارامتر از طریق مدل رگرسیون بررسی و در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

چنانچه پیش تر بیان گردید، به جهت اینکه مقاومت فشاری نمونه‌ها به راحتی تعیین می‌گردد، تعیین مقاومت خمشی نمونه‌ها از طریق مقاومت فشاری آنها، یکی از مطالب مورد علاقه محققین بوده است. در بخش قبل ارتباط تنوریک و

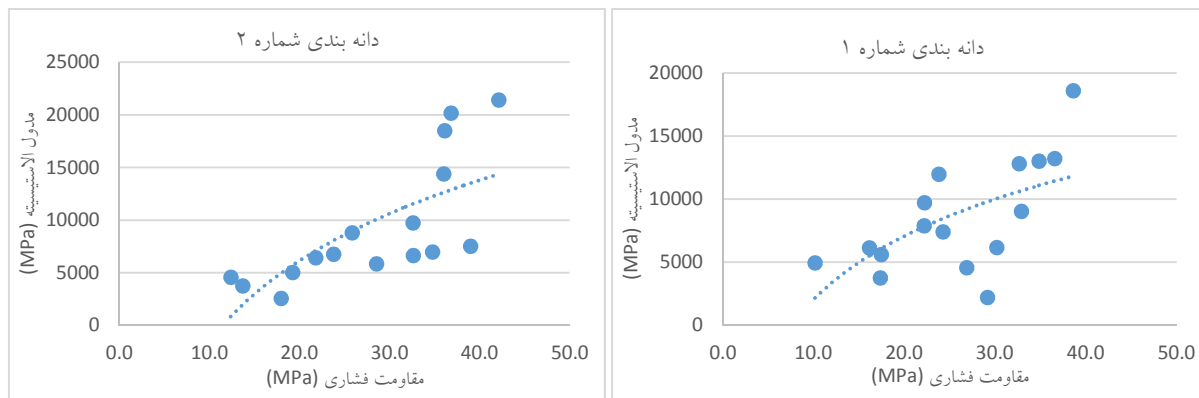


شکل ۱۵. نمودار منحنی برازش شده بر نتایج مشاهدات آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتن غلتکی

### ۳-۴- مدل رگرسیونی رابطه بین مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن غلتکی

آورده شده است. در این قسمت بطور دقیق رابطه موجود مابین نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های حاوی تراشه آسفالت بررسی خواهد شد. رابطه دقیق این دو پارامتر از طریق مدل رگرسیون بررسی و در شکل ۱۶ و جدول ۹ نشان داده شده است.

از آنجا که تعیین مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در آزمایشگاه بسیار معمول است، و دانستن مقدار مدول الاستیسیته بتن نیز در طراحی روسازی بتن موثر است، لذا دانستن رابطه مابین این دو پارامتر کاملاً مفید خواهد بود. ارتباط تئوریک مابین این دو کمیت در اکثر آیین نامه‌های روسازی و بتنی



شکل ۱۶. نمودار منحنی برازش شده بر نتایج مشاهدات آزمایشگاهی برای مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن غلتکی

جدول ۹. نتایج آنالیز رگرسیون برای مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن غلتکی

شماره دانه بندی	ضریب همبستگی	رابطه استخراج شده
دانه بندی شماره ۱	$R^2=0.86$	$E=1740\sqrt{f'_c}$ (N/mm <sup>2</sup> )
دانه بندی شماره ۲	$R^2=0.81$	$E=1857\sqrt{f'_c}$ (N/mm <sup>2</sup> )

فشار، استفاده نموده و روابط را بر این اساس گزارش نموده اند که ماهیتا با نتایج ارائه شده در این تحقیق تفاوت دارد. از طرفی لازم است تا برای ارائه رابطه جامع تر از دستگاه های دقیق تر با تواتر انجام آزمایش بیشتری استفاده شود. در نهایت نتایج بدست آمده می تواند بعنوان الگوی مناسبی برای سایر محققین استفاده شود.

اگرچه مدل ارائه شده از ضریب همبستگی بالایی برخوردار نیست و تقارب زیادی با مدل های ارائه شده سایر محققین ندارد، اما بایستی اشاره کرد که نحوه محاسبه مدول الاستیسیته در این تحقیق با سایر تحقیق ها متفاوت بوده و در محاسبه آن از نمونه تیرچه خمشی ۳ نقطه ای استفاده شده و به تبع آن مدول الاستیسیته خمشی نیز محاسبه گردیده است. سایر محققین از نتایج منحنی تغییر مکان- بار نمونه های استوانه ای در آزمایش

#### ۴- نتیجه گیری

پذیرد، زیرا مقاومت کششی نمونه ها نیز تا حد زیادی تحت تاثیر افزودن مصالح بازیافتی است.

• افزودن مصالح بازیافتی به مخلوط بتن غلتکی، سبب افزایش جذب انرژی می شود (شکل ۱۲). از سوی دیگر مدول الاستیسیته مخلوطها با افزایش درصد مصالح بازیافتی، کاهش خواهد یافت (شکل ۹). در مقابل، چقرمگی نمونه ها با افزایش درصد سیمان افزایش خواهد یافت (شکل ۱۱) که بیانگر ماهیت تردی بتن میباشد.

• میان مقاومت فشاری و کششی مخلوط بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافتی رابطه صریحی وجود دارد (شکل ۱۵). بر این اساس، می توان نتیجه گرفت که مخلوطهایی که میزان مقاومت فشاری بیشتری دارند، مقاومت کششی بیشتری نیز خواهند داشت. بنابراین مصالح بازیافتی تاثیر منفی بر مقاومت فشاری و به دنبال آن، مقاومت کششی می گذارد. علاوه بر این رابطه مشابهی میان مدول الاستیسیته و انرژی جذب شده نمونه ها وجود دارد که بیانگر این واقعیت است که انرژی جذب شده بیشتر، نتیجه بالابودن میزان مدول الاستیسیته قبل از شکست خواهد بود. اگرچه میزان انرژی جذب شده مخلوطهای حاوی مصالح بازیافتی بیشتر است، و با توجه به اینکه می تواند بعنوان معیار مناسبی برای تعیین مخلوط بهینه مورد استفاده قرار گیرد، استفاده از روشهای آماری رگرسیون به تنهایی قادر به تعیین مخلوط بهینه نخواهد بود. ولی باین وجود با مطالعه دقیقتر گرافها می توان به ترکیب بهینه بصورت تقریبی دست یافت (با در نظر گرفتن محدودیت حداقل مقاومت فشاری، شکل ۷).

با توجه به مشکل ضعف لایه های زیرین روسازی و اعمال بارهای بیش از حد طراحی بر روسازیهای سطح شهر تهران و همچنین بالا بودن هزینه بهسازی عمقی لایه های روسازی، در اغلب موارد استفاده از مصالح بازیافتی و گزینه های تثبیت با سیمان و استفاده از مصالح محلی بعنوان محتملترین گزینه بهسازی مطرح می گردد. بدین ترتیب در این مطالعه خصوصیات مکانیکی مخلوطهای بتن غلتکی، با استفاده از مصالح سنگی غیر بازیافتی و بازیافتی شامل RAP، بعنوان جایگزین جزئی از مصالح سنگی بررسی گردید. همچنین پس از ساخت نمونه های بتن غلتکی در آزمایشگاه، مشخصات مکانیکی مخلوطها بررسی شد. بر اساس نتایج آزمایشات و آنالیزهای صورت گرفته نتایج زیر حاصل شده است:

• مخلوط بتن غلتکی توسط میز وی بی متراکم گردیده است. در مقایسه با مصالح غیر بازیافتی، وجود مصالح بازیافتی سبب کاهش میزان درصد آب لازم برای مخلوطها و کاهش حداکثر چگالی بتن می گردد. همچنین به دلیل میزان جذب آب کمتر مصالح بازیافتی، میزان بیشتری از خمیر سیمان آزاد وجود داشته که سبب افزایش کارایی و تراکم مخلوط می گردد.

• با استناد به شکل ۷، استفاده از RAP، بویژه مقادیر بیشتر از ۵۰٪ سبب کاهش مقاومت فشاری نمونه های بتن غلتکی شده است. این پدیده بر اثر چسبندگی کمتر میان خمیر سیمان و ذرات RAP می باشد. بنابراین توجه بیشتری نسبت به استفاده از مصالح بازیافتی در روسازی بتن غلتکی می بایست صورت



## ۵- مراجع

- Bilodeau, K., Sauzeat, C., Di Benedetto, H., Olard, F., Bonneau, D., (2011), "Laboratory and In Situ Investigations of Steel Fiber-Reinforced Compacted Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement".
- Blankendaal, T., Schuur, P., Voordijk, H., (2014), "Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach". *Journal of cleaner production* 66, pp.27-36.
- Brand, A.S., Roesler, J.R., Al-Qadi, I.L., Shanguan, P., (2012), "Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement".
- Brotman, I., Crist, M., Gaul, J., (2007), "Roller Compacted Concrete Pavement: Properties, Design, and Construction, Soil and Material Inputs for Mechanistic-Empirical Pavement Design". pp. 1-10.
- Chiou, W.-J., (1986), "Fracture energy and tensile behavior of concrete".
- Committee, A., (2001), "Comittee 325. 10 R-95. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements".
- Debieb, S.K.F., Azzouz, L., (2002), "Mechanical properties and durability of concrete made with coarse and fine recycled aggregates, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9-11 September", Thomas Telford, pp. 383.
- Delwar, M., Fahmy, M., Taha, R., (1997), "Use of reclaimed asphalt pavement as an aggregate in Portland cement concrete". *ACI Materials Journal* 94(3), pp.251-256.
- Hameed, M., (2009), "Impact of transportation on cost, energy, and particulate emissions for recycled concrete aggregate. university of florida.
- "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور"، (۱۳۸۸)، نشریه شماره ۳۵۴، معاونت نظارت راهبردی، وزارت راه و شهرسازی، تهران، ایران.
- رامی، ش.ز.ف.ا.ز.، (۱۳۹۰)، "بررسی میزان نفوذپذیری بتن غلتکی و مقایسه آن با دیگر خصوصیات بتن". ششمین کنگره ملی مهندسی عمران (دانشگاه سمنان).
- Al-Oraimi, S., Hassan, H.F., Hago, A., (2009) "Recycling of reclaimed asphalt pavement in Portland cement concrete". *The Journal of Engineering Research [TJER]* 6(1), pp.37-45.
- Association, P.C., (1987), "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements". Portland Cement Association.
- Barandica, J.M., Fernández-Sánchez, G., Berzosa, Á., Delgado, J.A., Acosta, F.J., (2013), "Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects". *Journal of Cleaner Production* 57, pp.79-91.
- Bažant, Z.P., Kazemi, M.T., (1991), "Size dependence of concrete fracture energy determined by RILEM work-of-fracture method, Current Trends in Concrete Fracture Research". Springer, pp. pp.121-138.
- Berry, M., Stephens, J., Bermel, B., Hagel, A., Schroeder, D., (2013), "Feasibility of reclaimed asphalt pavement as aggregate in portland cement concrete". Montana Department of Transportation.
- Bilodeau, K., Sauzéat, C., Di Benedetto, H., Olard, F., (2012), "Roller compacted concrete for road base layer with RAP and steel fibers: Viscous properties and description of experimental sites, 10th International Conference on Concrete Pavements International Society for Concrete Pavements Holcim (Canada) Transports Quebec".

- Pappu, A., Saxena, M., Asolekar, S.R., (2007), "Solid wastes generation in India and their recycling potential in building materials". *Building and Environment* 42(6), pp.2311-2320.
- Pérez-Jiménez, F., Botella, R., Moon, K.-H., Marasteanu, M., (2013), "Effect of load application rate and temperature on the fracture energy of asphalt mixtures". *Fénix and semi-circular bending tests. Constr. Build. Mater.* 48, pp.1067-1071.
- Turk, J., Mladenović, A., Knez, F., Bras, V., Šajna, A., Čopar, A., Slanc, K., 2014. Tar-containing reclaimed asphalt—Environmental and cost assessments for two treatment scenarios. *Journal of Cleaner Production* 81, pp.201-210.
- Yi, S.-T., Yang, E.-I., Choi, J.-C., (2006), "Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete". *Nucl. Eng. Des.* 236(2), pp.115-127.
- Huang, B., Shu, X., Li, G., (2005), "Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements". *Cem. Concer. Res.* 35(10), pp.2008-2013.
- Institute, A.C., (2004), "Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05)". American Concrete Inst.
- Kazmee, H., Tutumluer, E., Beshears, S., (2016), "Using accelerated pavement testing to evaluate reclaimed asphalt pavement materials for pavement unbound granular layers .*J. Mater.*" *Civ. Eng.*, 04016205.
- Limbachiya, M., Leelawat, T., Dhir, R., (2000), "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete". *Materials and structures* 33(9), pp.574.
- McGarrah, E.J., (2007), "Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material".