

## ارزیابی مقاومت فشاری و رفتار تنش - کرنش لایه اساس حاوی تراشه آسفالت

### مقاله علمی - پژوهشی

سید محمد منصورزاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

احمدرضا محبوبی اردکانی<sup>\*</sup>، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

عطا آقایی آرابی، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

<sup>\*</sup> پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a\_mahboubi@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

صفحه ۱۴۶-۱۲۹

### چکیده

استفاده از مصالح تراشه آسفالت به عنوان یک نوع مصالح بازیافتی، در لایه آسفالت یا لایه اساس در روسازی امکان پذیر است. معمولاً این مصالح به دلیل تغییرپذیری و مقاومت ناکافی، همراه با افزودنی تثبیت کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تراشه آسفالت تثبیت شده با سیمان طی یک مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای فشاری، از سیمان با درصدهای ۵، ۶ و ۷ استفاده شده است. نمونه‌ها با انرژی تراکمی استاندارد تهیه شده و در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در اتاق رطوبت عمل آوری شده‌اند. ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد ۵۵۸ ای اس تی ام (خاص تراکم خاک- سیمان) بوده و آزمایش فشاری محدود نشده به روش کرنش کنترل و با سرعت ۱،۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. به منظور بررسی تأثیر رطوبت ساخت، علاوه بر رطوبت بهینه رطوبت های کمتر و بیشتر از بهینه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه آزمایشگاهی، با افزایش درصد سیمان و دوره عمل آوری، مقاومت فشاری محدود نشده و مدول الاستیسیته سکانتی به طور مشهودی افزایش می‌یابد. همچنین مشخص گردید که در هر طرح اختلاط، برحسب درصد سیمان مصرفی، مقاومت ماکزیمم ممکن است در رطوبت بهینه یا کمتر از بهینه رخ دهد.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالت، مخلوط اساس حاوی تراشه آسفالت، مقاومت فشاری محدود نشده، اساس تثبیت شده سیمانی، خاک- سیمان

### ۱- مقدمه

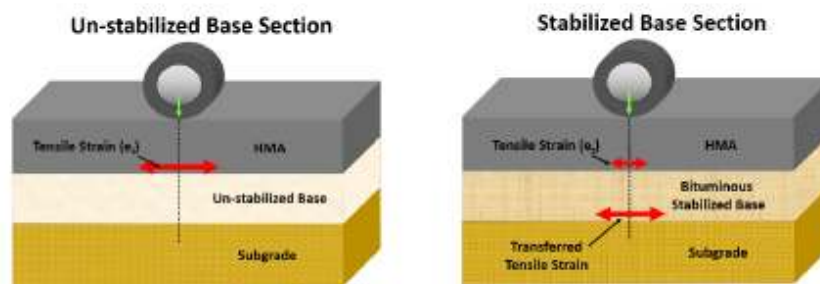
می‌شود (Yuan et al., 2010). در سال‌های اخیر تمایل زیادی به استفاده از درصد بالای RAP چه در لایه آسفالت و چه در لایه اساس به ویژه در ایالات متحده به وجود آمده است. از دلایل این امر، یکی مشکلات مربوط به دپوی این مصالح و دیگری ترغیب به استفاده از مصالح روسازی پایدار عنوان گردیده است (Das et al., 2018). به طور کلی از مصالح RAP می‌توان در مخلوط‌های آسفالتی داغ، گرم، بازیافت سرد، مصالح اساس و زیر اساس استفاده نمود. اما انتخاب هریک از این گزینه‌ها به شرایط و پارامترهای خاص هر پروژه یا منطقه بستگی دارد. با این حال، به نظر می‌رسد مصالح RAP به دلیل

گرایش روزافزون به سمت استفاده از مصالح پایدار در صنعت ساخت و ساز باعث شده است که مواد بازیافتی در کاربردهای مختلف مهندسی عمران مورد توجه قرار گیرند (Roychand et al., 2021; Xiong et al., 2021; Kazemi et al., 2020). یکی از مواد بازیافتی، خرده مصالح آسفالتی یا تراشه آسفالت<sup>۱</sup> (RAP) می‌باشد. تراشه آسفالت از آسیاب شدن، تراشیدن و یا به طور کامل برداشته شدن روسازی بتن آسفالتی یا همان مخلوط آسفالتی داغ<sup>۲</sup> (HMA) موجود، ایجاد می‌شود. بر اساس نظرسنجی انجام شده توسط اداره بزرگراه فدرال، گزارش شده که تقریباً ۱۰۰ میلیون تن روسازی بتن آسفالتی هر سال در ایالات متحده تراشیده یا آسیاب شده و تبدیل به RAP

ماده تثبیت کننده سیمانی و آب است (Adresi et al., 2017). تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده<sup>۳</sup> نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نسبت به افزودن مقادیر مختلف مصالح RAP، از نکات قابل توجه در بررسی خصوصیات مکانیکی مصالح اساس است. اهمیت این موضوع به این دلیل است که در محاسبه ضخامت لایه آسفالتی روی اساس تثبیت شده، مقاومت فشاری تک محوری مورد نیاز است (Adresi et al., 2017). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۷ مشخص شد که لایه اساس تثبیت شده می‌تواند کرنش کششی در پایین لایه آسفالتی (HMA) فوقانی را نسبت به حالتی که اساس تثبیت نشده، کاهش دهد. علاوه بر این مطابق شکل ۱ کرنش‌های اندازه‌گیری شده در پایین لایه اساس تثبیت شده بیشتر از آن‌هایی بودند که در پایین لایه آسفالتی بودند. که این امر نشان می‌دهد لایه تثبیت شده با موفقیت کرنش را به عمق ساختار روسازی منتقل کرده است (Daniel et al., 2017).

تغییرپذیری و تنوع منابع و همچنین پارامترهای مقاومتی و سختی ناکافی نمی‌تواند به تهایی و بدون افزودنی تثبیت کننده، به عنوان یک جایگزین برای مصالح سنگدانه طبیعی در لایه اساس روسازی استفاده شود. لذا یک روش تثبیت شیمیایی یا مکانیکی مقرون به صرفه برای استفاده از RAP به عنوان مصالح اساس روسازی اجتناب ناپذیر است (Taha et al. 1999, Kazmee et al. 2016).

در ایران به دلیل توسعه محدود کارخانه‌های آسفالت در جهت استفاده از مصالح RAP برای تولید مخلوط‌های آسفالتی گرم، تمایل ادارات راه بیشتر به استفاده از مصالح تراشه آسفالت در بدنه اساس راه به منظور بهبود خواص عملکردی لایه اساس و افزایش توان باربری آن می‌باشد. در این راستا سوال مهم و اساسی، تعیین محدوده مناسب دانه‌بندی مصالح اساس، نحوه تراکم این مصالح، استانداردهای حاکم بر این روند و همچنین تعیین طرح اختلاط لایه مورد نظر شامل مقدار تراشه آسفالت،



شکل ۱. کرنش‌های کششی پایین لایه آسفالتی در حالت اساس تثبیت شده و تثبیت نشده (Daniel et al., 2017)

مصالح تثبیت شده با سیمان، برای اجتناب از آزمون ترخشک و ذوب-انجماد مورد توجه ویژه واقع شده است. اغلب آژانس‌ها طراحی بر اساس مقاومت فشاری را به جای استفاده از D560 و D559 ترجیح می‌دهند. دلایل آن عبارتند از: تست‌های ترخشک و ذوب-انجماد نیاز به زمان تست طولانی‌تری دارند (یک ماه در مقایسه با یک هفته)، تجهیزات آزمایشگاهی بیشتری نیاز دارند و مشارکت بیشتر تکنسین‌ها را می‌طلبد (FHWA/MS-DOT-RD-13-206, 2013). اغلب آژانس‌ها و سازمان‌ها، استانداردهای خاص خود را برای طراحی مقاومت فشاری اتخاذ کرده‌اند. به عنوان مثال، بخش حمل و نقل می‌سی سی پی<sup>۵</sup> حداقل مقاومت فشاری ۲۰۷۰ کیلو پاسکال را برای طراحی لایه اساس

طراحی مخلوط تراشه آسفالت-سیمان را می‌توان در راستای توسعه روش‌های طراحی خاک-سیمان دانست. روش‌های طراحی خاک-سیمان در طول چندین دهه تکامل یافته است. در سال ۱۹۳۵، انجمن سیمان پرتلند<sup>۶</sup> اقدام به توسعه روش‌هایی برای تولید خاک-سیمان یکنواخت و بادوام نمود و در نهایت ASTM D560، ASTM D559، و ASTM D558 را برای تعیین میزان رطوبت بهینه، حداکثر دانسیته خشک و حداقل محتوای سیمان توسعه داد. D560 و D559 حداقل میزان سیمان را بر اساس دوام مصالح ارائه می‌دهند. اما با گذشت زمان، بسیاری از آژانس‌ها با استفاده از معیار مقاومت فشاری محدود نشده، برای طراحی خاک-سیمان سازگار شده‌اند. همبستگی بین دوام و مقاومت فشاری محدود نشده

رویه‌ها و معیارهای طراحی را توسعه داده‌اند که تا حدودی بر اساس رویه‌های PCA و USACE است. این معیارهای طراحی عمدتاً بر اساس مقاومت فشاری نامحدود است. معمولاً در چنین شرایطی برای اطمینان از دوام کافی، رابطه همبستگی بین مقاومت فشاری و دوام براساس نوع خاک لایه اساس ارایه می‌گردد. از این معیارهای همبستگی برای تعیین حداقل مقاومت فشاری برای برآورده کردن الزامات دوام استفاده می‌شود (FHWA/MS-DOT-RD-13-206, 2013).

روسازی، مشخص نموده است. در این روش مقدار سیمان طراحی به گونه‌ای انتخاب می‌گردد که مقاومت حداقل ۲۰۷۰ کیلو پاسکال یا بیشتر از آن در طی مدت ۷ یا ۱۴ روز حاصل شود. در روش طراحی انجمن سیمان پرتلند، مقاومت فشاری محدود نشده UCS برای عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه بر اساس طبقه بندی نوع خاک در جدول ۱ ارائه شده است. در روش مهندسی ارتش آمریکا<sup>۶</sup> معیار طراحی در جدول ۲ ارایه شده است. همچنین ادارات حمل و نقل ایالتی<sup>۷</sup> به طور مستقل

جدول ۱. معیار طراحی خاک-سیمان بر اساس انجمن سیمان پرتلند

Soil Classification		Max Weight Loss for 12 Wet-Dry Typical $\sigma$ (kPa) or Freeze-Thaw Cycles (%)		
AASHTO	USCS		7-day	28-day
A-1, A-2-4, A-2-5, A-3	GW, GC, GP, GM, SW, SC, SP, SM	14	2069 - 4137	2758 - 6895
A-4, A-5	ML, CL	10	1724 - 3447	2069 - 6205
A-6, A-7	MH, CH	7	1379 - 2758	1724 - 4137

جدول ۲. معیار طراحی خاک-سیمان بر اساس معیار مهندسی ارتش آمریکا

Type of Soil	Max Weight Loss for 12 Wet-Dry or Freeze-Thaw Cycles (%)	Minimum $\sigma$ at 7 days (kPa)	
		Flexible Pavement	Rigid Pavement
Granular, PI < 10	11		
Granular, PI > 10	8	5171	3447
Silt	8		
Clays	6		

(2009) در اداره حمل و نقل ایالتی تگزاس این مقدار بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ پوند بر اینچ مربع مشخص گردیده است. لازم به ذکر است در مورد مخلوط‌های حاوی RAP تثبیت شده با سیمان، با توجه به افزایش مقاومت کششی این گونه مخلوط‌ها به نظر می‌رسد که با این افزایش در مقاومت کششی، پتانسیل ترک خوردگی کاهش می‌یابد. لذا تعیین حداکثر مقاومت فشاری مجاز برای جلوگیری از صلیبیت لایه تثبیت شده نیز، نیاز به بازنگری دارد. انجام مطالعات بیشتری در این خصوص ضروری به نظر می‌رسد.

در سال‌های اخیر پژوهشگران متعددی در مورد بهبود عملکرد لایه‌های روسازی با استفاده از مصالح RAP با مخلوط کردن آن با سنگدانه‌های تازه و یا با استفاده از تثبیت کننده‌های شیمیایی مانند آهک، سیمان و خاکستر بادی مطالعه نموده‌اند. این مطالعات توصیه می‌کنند که مخلوط RAP و سنگدانه بکر<sup>۸</sup> با استفاده از مواد افزودنی سیمانی به راحتی در لایه اساس

محتوای افزودنی بهینه بر اساس حداقل نیاز طراحی انتخاب می‌شود. معمولاً در هر پروژه حداقل مقاومت مورد نیاز مشخص می‌شود. همچنین برای جلوگیری از یک لایه اساس تثبیت شده بسیار سخت و یا ایجاد ترک خوردگی زودرس انقباضی، معمولاً یک حداکثر مقاومت فشاری تعریف می‌شود. مقدار حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده به منظور کنترل صلیبیت لایه تثبیت شده و اجتناب از ایجاد ترک در این لایه و کاهش ریسک ترک انعکاسی در رویه پیشنهاد گردیده است (Wen et al., 2014). حداقل مقاومت فشاری نیز بر اساس دوام مخلوط در برابر تر و خشک شدن یا ذوب و یخ زدن و همچنین کرناتنه شدن پیشنهاد شده است. محدوده مجاز مقاومت فشاری محدود نشده بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ پوند بر اینچ مربع (۲/۱ تا ۳/۵ مگاپاسکال) در برخی مراجع مختلف پیشنهاد گردیده است (Yuan et al., 2010; Abdo et al.,

آدرسی و همکاران (۲۰۱۹) نیز طی یک مطالعه آزمایشگاهی و با ساخت نمونه‌های استوانه‌ای و انجام آزمایش فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های مذکور، به نتایج نسبتاً مشابهی با مطالعه غنی زاده و همکاران (۲۰۱۸) دست یافتند. به طوری که در مقادیر سیمان ۵٪ و ۷٪ با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها با روند خطی کاهش می‌یابد. ولی در مقدار سیمان ۳٪ با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. دلیل خطی بودن کاهش مقاومت در نمونه‌های با درصد بالای سیمان، حاکم بودن نقش پر رنگ سیمان (نظیر نقش عامل تمیز بودن سنگدانه‌ها در بتن) و دلیل غیر خطی بودن نمودار متناظر با ۳ درصد سیمان را وجود نقش تعیین کننده هر دو ماده چسباننده سیمان و قیر در مخلوط حاوی سیمان کم، اعلام نموده‌اند. در مطالعه آنها نیز حداکثر مقدار استفاده از RAP برابر با ۸۰٪ بوده است (Adresi et al., 2019).

همان طور که پیش از این بیان گردید، در مقاله حاضر مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۰۰٪ تراشه آسفالت تثبیت شده با سیمان طی یک مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. تمرکز این مطالعه بر تغییر درصد سیمان، تغییر درصد رطوبت، تنوع دوره عمل آوری می‌باشد. از سیمان با درصدهای ۴، ۵ و ۶ استفاده شده است. نمونه‌ها در رطوبت بهینه ۱٪ و ۲٪ کمتر از بهینه با انرژی تراکمی استاندارد تهیه شده و در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در اتاق رطوبت عمل آوری شده‌اند. تغییرات مقادیر مقاومت فشاری نسبت به تغییر هر کدام از پارامترهای مقدار سیمان، مقدار رطوبت ساخت، طول دوره عمل آوری در این مطالعه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به هر طرح اختلاط ارائه شده و بر اساس این منحنی‌ها، مدول سکانتی ۵۰٪ (E50) هر دسته منحنی محاسبه و تغییرات آن بررسی شده است.

### ۳- مواد و مصالح مصرفی

مصالح تراشه آسفالت مورد بررسی در این مطالعه، از دپوی شرکت توزینگر واقع در شهرک صنعتی بهارستان در کرج تهیه گردید. RAP تولید شده در سطح خیابان و جاده‌ها پس از جمع آوری و حمل به دپوی این شرکت، توسط تجهیزات موجود در آن محل خردایش شده و سپس در دپوی مربوطه

روسازی قابل استفاده می‌باشد. در مقاله حاضر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های تراشه آسفالت تثبیت شده با سیمان طی یک مطالعه آزمایشگاهی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای فشاری، از سیمان با درصدهای ۴، ۵ و ۶ استفاده شده است. نمونه‌ها در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در اتاق رطوبت عمل آوری شده‌اند. به منظور بررسی تأثیر رطوبت ساخت، علاوه بر رطوبت بهینه رطوبت‌های کمتر یا بیشتر از بهینه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. یکی از نکات قابل توجه این مطالعه، استفاده حداکثری ۱۰۰٪ از مصالح RAP می‌باشد. یعنی RAP تولید شده در سطح خیابان و جاده‌ها پس از جمع آوری خردایش شده و مستقیماً با افزودن سیمان و رطوبت متراکم شده و به اتاق رطوبت منتقل شده است و پس از طی دوره عمل آوری تحت بارگذاری تک محوری طبق استاندارد مربوطه قرار گرفته‌اند.

### ۲- پیشینه تحقیق

یوان و همکاران در سال ۲۰۱۰ طی یک مطالعه آزمایشگاهی با ساخت نمونه‌های حاوی مقادیر بالای RAP (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) و تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان (۲، ۴ و ۶ درصد) به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری محدود نشده با افزایش درصد سیمان در یک درصد ثابت RAP، افزایش می‌یابد. مطالعه ایشان جزو محدود مطالعات آزمایشگاهی است که در آن، نمونه‌های با ۱۰۰٪ مقدار RAP نیز ساخته و مورد ارزیابی واقع شده‌اند. نمونه‌هایی با میزان RAP برابر با ۱۰۰٪، و با مقدار سیمان ۲٪، ۴٪ و ۶٪ به ترتیب مقادیر مقاومت فشاری ۱۵۰، ۳۰۰ و ۴۵۰ پوند براینچ مربع معادل با ۱۰۵۰، ۲۱۰۰ و ۳۱۵۰ کیلو پاسکال داشته‌اند (Yuan et al., 2010).

غنی زاده و همکاران نیز طی یک مطالعه آزمایشگاهی در سال ۲۰۱۸، با ساخت نمونه‌های مختلف تثبیت شده با سیمان با درصدهای مختلف RAP و مصالح دانه‌ای از جنس GW-GC طی انجام آزمایش‌های فشاری تک محوری بر روی نمونه‌های مذکور به نتایج قابل توجهی دست یافتند. در مطالعه آنها با افزایش درصد RAP، مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش یافته است. همچنین با افزایش درصد سیمان، مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافته است. لازم به توضیح است که در مطالعه آنها حداکثر مقدار RAP برابر با ۸۰٪ بوده است (Ghanizadeh et al., 2018).

ذخیره و نگهداری و نهایتاً در پروسه بازیافت پروژه‌های آن شرکت استفاده می‌شوند.

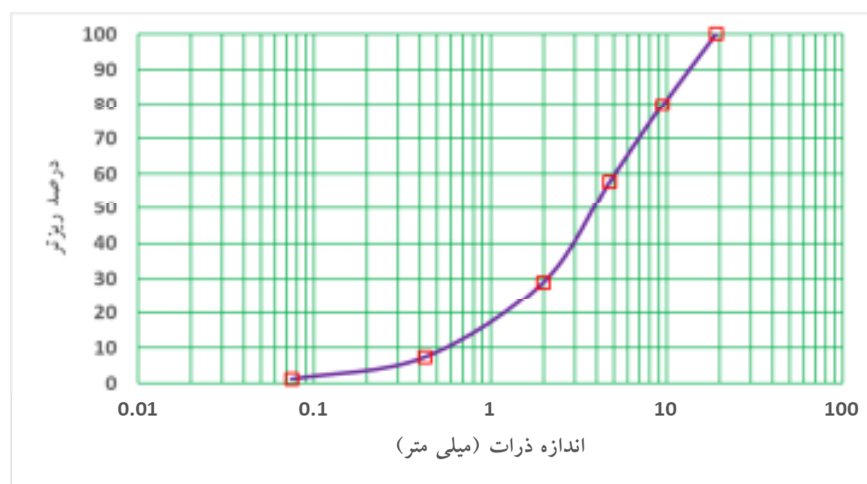
### ۳-۱- آزمایش دانه‌بندی و تشخیص نوع مصالح

آزمایش‌های شاخص شامل دانه‌بندی (ASTM C136)، اتربرگ (ASTM D4318) و تعیین درصد رطوبت بهینه (ASTM D1557) مصالح تراشه آسفالت، انجام گردید.

در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی این مصالح ارائه شده است. این مصالح مطابق جدول شماره ۳، با توجه به پارامتر ضریب یکنواختی بزرگتر از ۶ و ضریب انحنا که در محدوده بین ۱ و ۳ می‌باشد، از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>۹</sup> با علامت SW قابل نمایش است. همچنین آزمایش حدود اتربرگ انجام شد و مشخص گردید که بخش ریزدانه این مصالح، غیر خمیری می‌باشد.

نتایج وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه از آزمایش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557)، برای مصالح

تراشه آسفالت (بدون مواد افزودنی) بدست آمد. به طور کلی مطابق با استاندارد ASTM D1557، سه روش A، B و C جهت انجام آزمایش تراکم اصلاح شده وجود دارد. برای مصالح تراشه آسفالت مورد نظر در این تحقیق با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلی‌متر، تراکم اصلاح شده آزمایشگاهی به روش C انجام گردید. لذا برای تعیین رابطه مقدار رطوبت بهینه<sup>۱۱</sup> (OMC) و وزن مخصوص خشک حداکثر<sup>۱۱</sup> یا همان منحنی تراکم، از قالب با قطر ۱۵۲/۴ میلی‌متر و چکش با جرم ۴/۵ کیلوگرم با ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر استفاده شد. تعداد لایه ۵ و تعداد ضربه در هر لایه ۵۶ می‌باشد. وزن مخصوص خشک حداکثر و مقدار رطوبت بهینه به ترتیب ۲۱/۲ کیلو نیوتن بر متر مکعب و ۶/۴ درصد برای مصالح تراشه آسفالت (بدون مواد افزودنی) به دست آمد (شکل ۳).



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح تراشه آسفالت توزینگر

جدول ۳. پارامترهای دانه بندی مصالح تراشه آسفالت مورد مطالعه

مقدار (میلی‌متر)	علامت	پارامترهای دانه بندی
۰/۵۵	D <sub>1۵</sub>	اندازه موثر
۲	D <sub>۳۰</sub>	اندازه روزه که ۳۰ درصد از مصالح از آن کوچکتر است
۳/۸	D <sub>۶۰</sub>	اندازه متوسط
۵	D <sub>۱۰۰</sub>	اندازه روزه که ۳۰ درصد از مصالح از آن کوچکتر است
۹/۰۹	C <sub>۰</sub>	ضریب یکنواختی
۱/۴۵	C <sub>۱</sub>	ضریب انحنا

### ۳-۲- سیمان

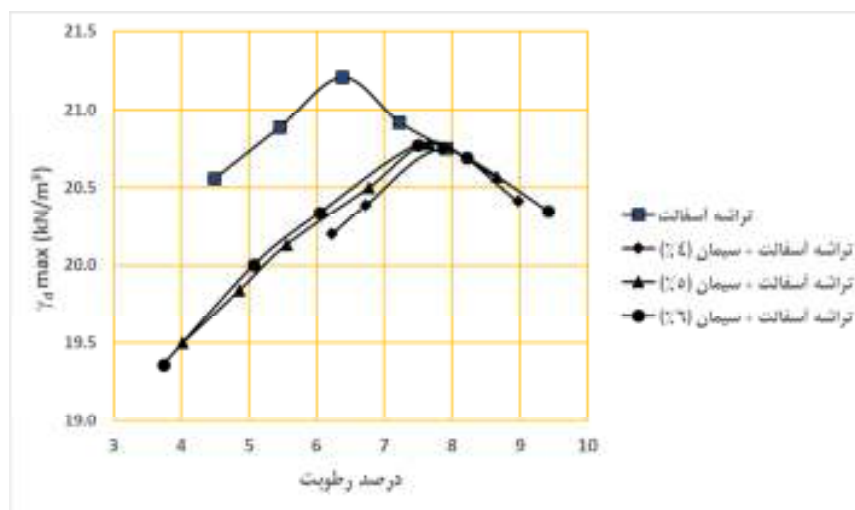
سیمان مورد استفاده در این مطالعه آزمایشگاهی، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی شرکت سیمان تهران می‌باشد.

### ۳-۳- آزمایش تراکم بر روی مخلوط تراشه

#### آسفالت و سیمان

همان طور که گفته شد برای تعیین مشخصات مصالح تراشه آسفالت بدون افزودنی، از روش تراکم اصلاح شده مطابق بند ۳-۱ استفاده گردید. ولی در تعیین مشخصات مخلوط تراشه آسفالت و سیمان از روش تراکم استاندارد بهره گرفته شد. نکته قابل ذکر این که از کد ASTM D558 به جای کد ASTM

D698 استفاده شد. کد ASTM D558 به عنوان روش استاندارد خاص مخلوط‌های خاک-سیمان، از نظر انرژی تراکم مشابه روش تراکم پروکتور استاندارد (ASTM D698) می‌باشد. اما تفاوتی هم بین این دو روش از نظر نحوه تهیه مخلوط و ابعاد قالب وجود دارد. مطابق با استاندارد ASTM D558، دو روش A و B برای انجام آزمایش وجود دارد. برای مصالح تراشه آسفالت مورد نظر با حداکثر اندازه دانه ۱۹ میلی‌متر، روش B استفاده شد. آزمایش روی مصالح تراشه آسفالت با درصد‌های سیمان ۴، ۵ و ۶ درصد انجام گردید. دامنه تغییرات دانسیته خشک از ۲۰/۷ تا ۲۰/۸ کیلو نیوتن بر متر مکعب و دامنه تغییرات درصد رطوبت بهینه از ۷/۴ تا ۷/۶ درصد می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳. نتایج آزمایش تراکم با استانداردهای ای اس تی ام ۵۵۸ (برای مخلوط RAP و سیمان) و ۱۵۵۷ (RAP)

### ۴- روش ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

با توجه به موارد فوق، برای نمونه‌های متراکم شده با روش تراکم ASTM D558، وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه به ترتیب برابر با ۲۰/۷ کیلو نیوتن بر متر مکعب (معادل با ۲/۱۱ گرم بر سانتیمتر مکعب) و ۷/۵ درصد در نظر گرفته شد. نمونه‌های استوانه‌ای تثبیت شده با سیمان با اندازه قطر ۱۰/۱ cm و ارتفاع ۱۱/۶ cm در ۳ لایه با ضخامت یکسان مطابق با استاندارد ASTM D1633 کوبیده شدند.

در این پژوهش برای لحاظ نمودن اثرات تغییر رطوبت ساخت، رطوبت‌های بالا و پایین رطوبت بهینه نیز در طرح اختلاط نمونه‌ها در نظر گرفته شد. در تراکم ASTM D558 با توجه به رطوبت بهینه ۷/۵ درصد، در ابتدا درصد‌های رطوبت ۶/۵، ۷/۵ و ۸/۵ به عنوان رطوبت‌های ساخت در نظر گرفته شد. اما با توجه به این که نمونه‌های با رطوبت ۸/۵ درصد به صورت گل و شل در می‌آمدند و عملاً ساخت نمونه

در مجموع نمونه‌های این تحقیق با ۳ درصد مختلف سیمان، ۳ درصد مختلف رطوبت ساخت، ۴ دوره عمل آوری و با تعداد ۳ تکرار (مجموعاً تعداد ۱۰۸ نمونه استوانه‌ای) تهیه شده‌اند. برای شناسایی هر نمونه یک کد با فرمت خاصی در نظر گرفته شده است. نمونه‌ها به صورت کلی با فرمت CxWyCz می‌باشند. در این کدها X نشان دهنده درصد سیمان و Y درصد رطوبت ساخت و Z تعداد روز عمل‌آوری<sup>۱۲</sup> می‌باشند.

با این درصد رطوبت علاوه بر صعوبت از تراکم مناسبی نیز برخوردار نبود، لذا از این درصد رطوبت صرف نظر شد. بنابراین نمونه‌های با رطوبت بهینه، ۱٪ و ۲٪ کمتر از بهینه، ملاک عمل قرار گرفتند. پس در مجموع، کلیه نمونه‌ها با درصدهای رطوبت ۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵ ساخته شدند. نمونه‌ها در اتاق رطوبت در دمای ۲۳ درجه سلسیوس و در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM D1632 عمل‌آوری شدند. در شکل ۴ یک نمونه تکی در کنار تعداد بیشتری از نمونه‌های عمل‌آوری شده در این مطالعه، نشان داده شده است.



شکل ۴. یک نمونه تکی در کنار تعدادی از نمونه‌های عمل‌آوری شده

## ۵- انجام آزمایش، بحث و تفسیر نتایج

دستمال یا حوله، وزن و ابعاد هر نمونه اندازه‌گیری شده و سپس تحت بارگذاری تک محوری مطابق با استاندارد فوق قرار گرفته و شکسته شدند. آزمایش فشاری تک محوری به روش کرنش کنترل و با سرعت ۱٫۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردیده است. شکل ۵ تعدادی از نمونه‌ها را در وضعیت قبل و پس از غرقاب ۴ ساعته نشان می‌دهد. در شکل ۶ تصویر نمونه قبل و پس از گسیختگی ارائه شده است.

نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D1633 با قطر ۱۰/۱ و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی‌متر در ۳ لایه با ضخامت یکسان کوبیده شدند. نمونه‌های تثبیت شده پس از ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری در اتاق رطوبت، تحت آزمایش تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D1633 قرار گرفتند. لازم به ذکر است که نمونه‌ها قبل از بارگذاری، به مدت ۴ ساعت در داخل حوضچه آب به صورت غرقاب قرار گرفته‌اند و سپس از آب خارج شده و پس از خشک نمودن سطح هر نمونه توسط یک



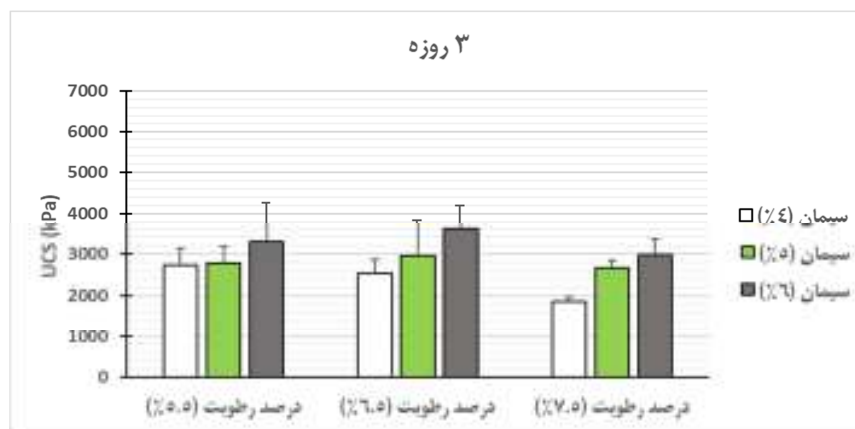
شکل ۵. نمونه‌ها در وضعیت قبل و پس از غرقاب ۴ ساعته



شکل ۶. نمونه قبل و پس از گسیختگی در آزمایش فشاری تک محوری

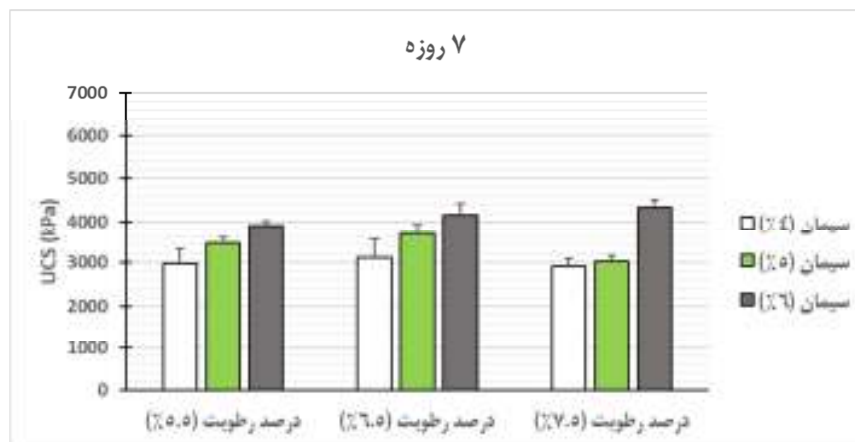
نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه تا ۹۰ روزه بر حسب درصد رطوبت (به ازای درصد سیمان ثابت) ارایه شده است.

در اشکال ۷ تا ۱۰ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه تا ۹۰ روزه بر حسب درصد سیمان (به ازای رطوبت ثابت) ارایه شده است. همچنین در اشکال ۱۱ تا ۱۴ به گونه‌ای دیگر،

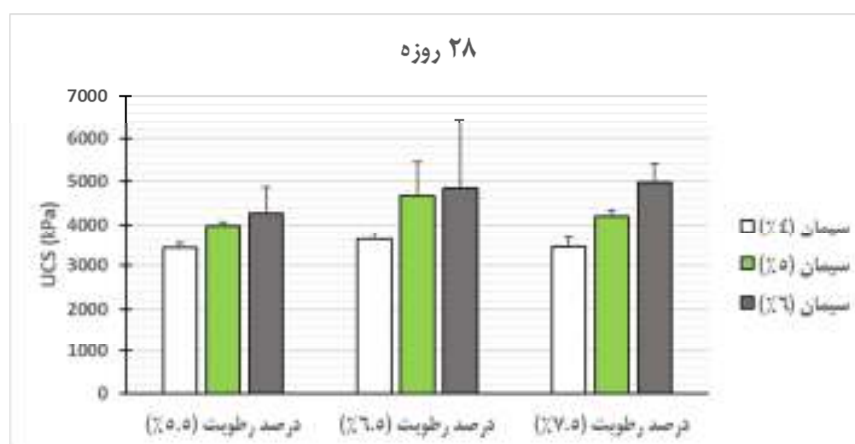


شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه بر حسب درصد سیمان

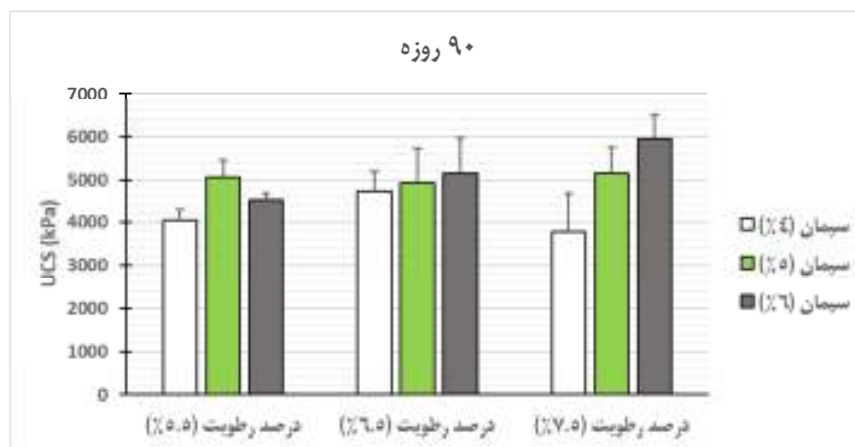




شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بر حسب درصد سیمان



شکل ۹. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر حسب درصد سیمان



شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه بر حسب درصد سیمان

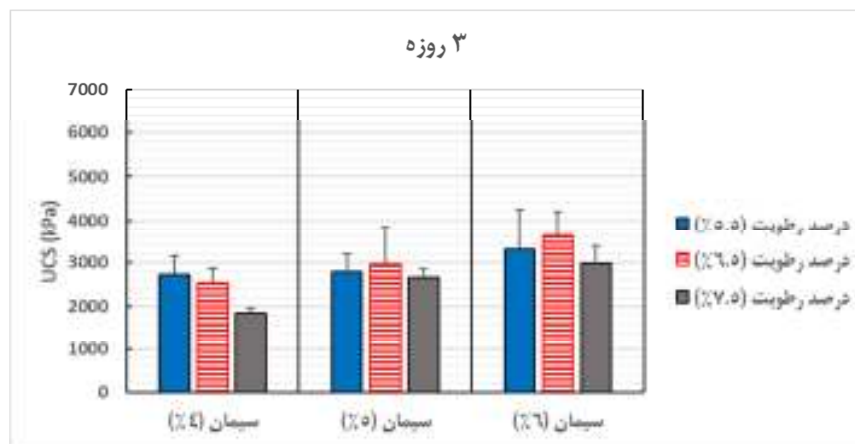
و ۵٪ مشاهده می‌شود. به عبارتی دیگر در مقدار سیمان ۶٪، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه، به طور مداوم افزایش مقاومت دیده می‌شود. لذا بیشترین مقاومت در رطوبت بهینه و کمترین مقاومت در نقطه ۲٪ کمتر از بهینه ثبت شده است. این موارد نیز در شکل ۱۲ به نحو بهتری مشاهده می‌شود. تمام موارد فوق که در خصوص نمونه‌های ۷ روزه بیان گردید، در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه نیز صدق نموده و در شکل‌های ۹ و ۱۳ ارایه شده است. همچنین در مورد نمونه‌های ۹۰ روزه نیز دقیقاً روندهای فوق‌الذکر ثبت شده است و در شکل‌های ۱۰ و ۱۴ نشان داده شده است.

اما این روند در مورد نمونه‌های ۳ روزه صادق نبوده و با مراجعه مجدد به شکل‌های ۷ و ۱۱ مشاهده می‌شود که در مقدار سیمان ۴٪، با افزایش رطوبت از ۵/۵ درصد تا ۷/۵ درصد، مقاومت روند یکنوای کاهشی دارد. به بیانی دیگر حداقل مقاومت فشاری در رطوبت بهینه ثبت شده است. اما در مقدار سیمان ۵٪، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه، ابتدا افزایش و سپس کاهش مقاومت دیده می‌شود و بیشترین میزان مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی ۱٪ کمتر از بهینه ثبت شده است. حتی در مقدار سیمان ۶٪ نیز، از سمت خشک به سمت بهینه روند کسب مقاومت یکنوا نبوده و ابتدا افزایش و سپس کاهش مقاومت به چشم می‌خورد. چنین به نظر می‌رسد که این تفاوت روند کسب مقاومت در نمونه‌های ۳ روزه با دیگر نمونه‌ها مربوط به عدم تکمیل بلوغ نمونه‌ها در سن ۳ روز باشد. به عبارت دیگر در مدت زمان ۳ روز هنوز بلوغ نمونه‌ها کامل نشده و روندی کاملاً متفاوت با دیگر سنین دارند.

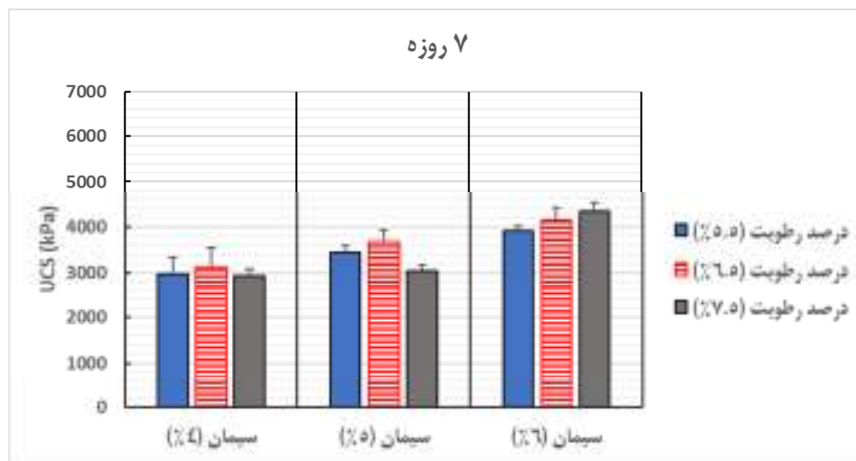
مطابق شکل ۷ در مورد نمونه‌های ۳ روزه می‌توان چنین بیان نمود که در یک رطوبت دلخواه ثابت با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد.

این نکته در مورد نمونه‌های با دوره‌های عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با شکل‌های ۸ تا ۱۰ نیز مشاهده می‌شود. این گفته برای هر رطوبت دلخواه یعنی هم برای رطوبت بهینه ۷/۵ درصد و هم رطوبت‌های ۱٪ و ۲٪ کمتر از بهینه صدق می‌کند و در شکل‌های ۷ تا ۱۰ به وضوح مشاهده می‌شود. تنها استثناء در مورد نمونه‌های ۹۰ روزه و فقط در مقدار رطوبت ۵٪ روندی متفاوت به چشم می‌خورد به طوری که مطابق شکل ۱۰ با افزایش مقدار سیمان لزوماً افزایش مقاومت دیده نمی‌شود. اما عکس این مطلب درست نیست. یعنی در درصد سیمان ثابت، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه روند یکنوای افزایشی در مقاومت به چشم نمی‌خورد. به عنوان مثال برای نمونه‌های ۷ روزه مطابق شکل ۸ و در مقدار سیمان ۴٪، با افزایش رطوبت از ۵/۵ درصد تا ۷/۵ درصد، ابتدا افزایش و سپس کاهش مقاومت دیده می‌شود. به بیانی دیگر حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی ۱٪ کمتر از بهینه ثبت شده است.

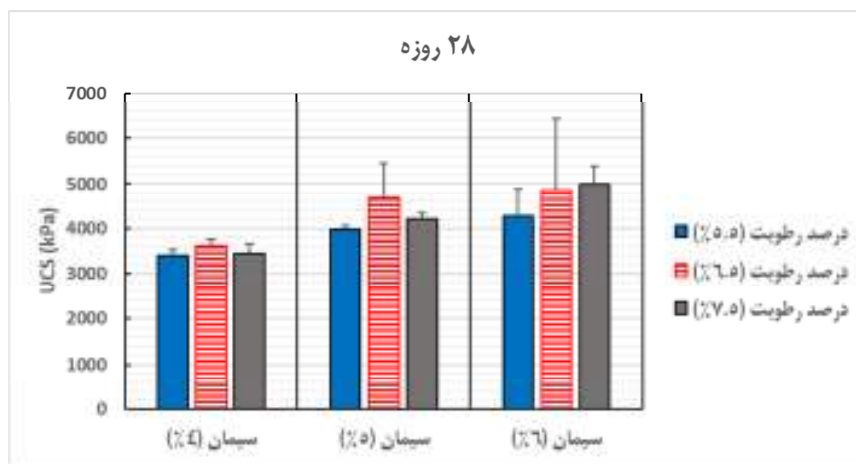
این موضوع در شکل ۱۲ به نحو مناسب‌تری قابل مشاهده می‌باشد. همین مطلب دقیقاً در مقدار سیمان ۵٪ نیز به چشم می‌خورد. به طوری که با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه، ابتدا افزایش و سپس کاهش مقاومت دیده می‌شود. در اینجا نیز بیشترین میزان مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی ۱٪ کمتر از بهینه ثبت شده است. اما در مقدار سیمان ۶٪، از سمت خشک به سمت بهینه روند مقاومت یکنوای افزایشی بوده یعنی روندی متفاوت از مقدار سیمان ۴٪



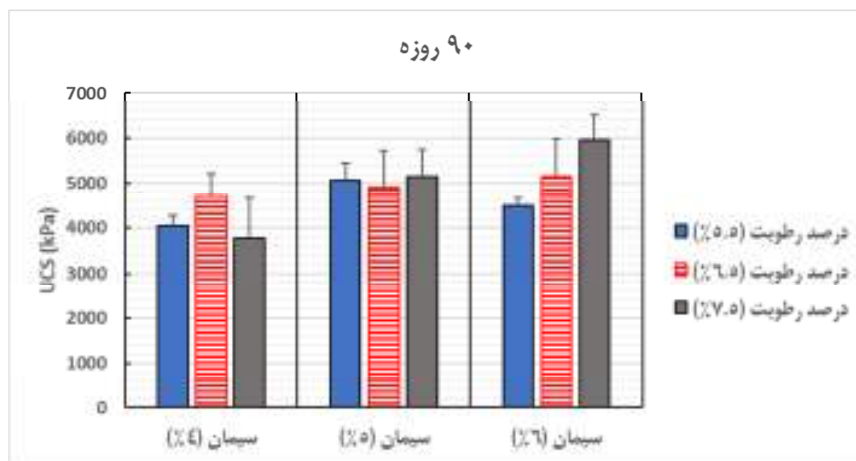
شکل ۱۱. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه بر حسب درصد رطوبت



شکل ۱۲. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بر حسب درصد رطوبت



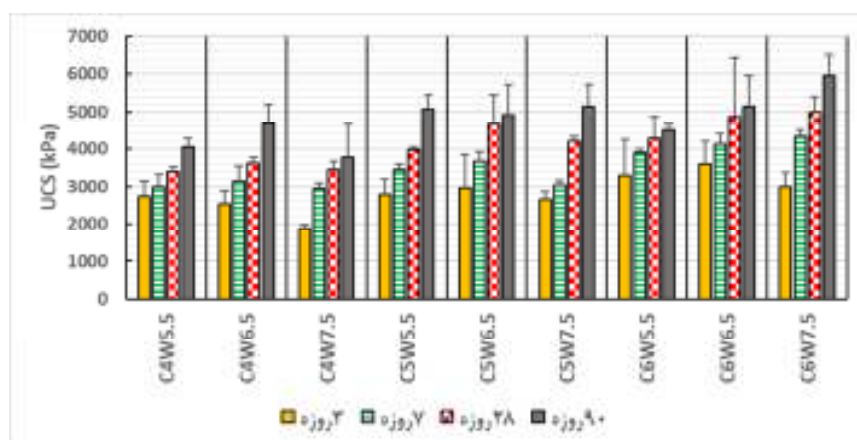
شکل ۱۳. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر حسب درصد رطوبت



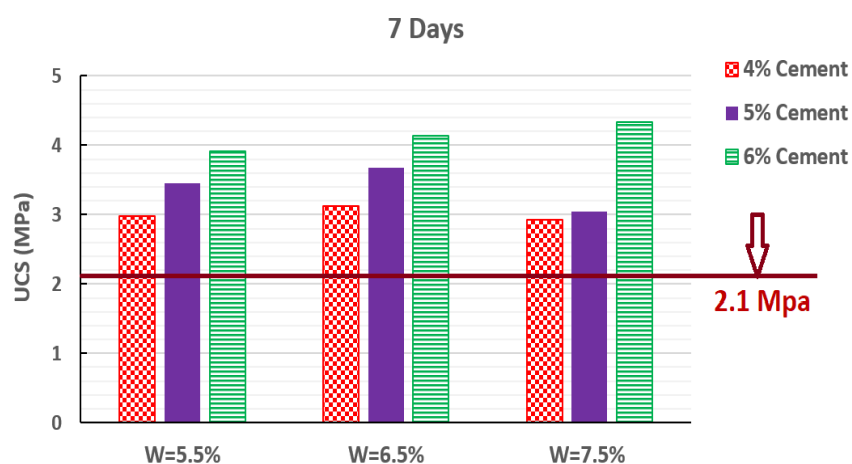
شکل ۱۴. مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه بر حسب درصد رطوبت

روزه لازم که بیانگر مقاومت ۲/۱ مگا پاسکال (۲۱۰۰ کیلو پاسکال) می‌باشد و توسط برخی دیپارتمان‌های حمل و نقل ایالات متحده و همچنین انجمن سیمان پرتلند پیشنهاد شده است (Morian et al., 2012; Syed, 2007). توسط یک خط افقی مشخص شده است. همان طور که پیش از این نیز بیان گردید، حداقل مقاومت فشاری بر اساس دوام مخلوط در برابر تر و خشک شدن یا ذوب و یخ زدن و همچنین کربناته شدن پیشنهاد شده است. با توجه به شکل ۱۶ مشخص می‌شود که تمامی طرح اختلاط‌های مورد بررسی در این مطالعه مقاومت ۷ روزه بالاتر از حد نصاب فوق‌الشاره را دارا می‌باشند.

همچنین در مقایسه بین مقادیر مقاومت فشاری ۷ روزه حاصل از مطالعه حاضر و مقادیر مقاومت فشاری ۷ روزه ارائه شده در مطالعه یوان و همکاران (۲۰۱۰) مشخص گردید که مقادیر مطالعه حاضر از حدود ۳۵٪ تا ۵۰٪ نسبت به آن مطالعه افزایش داشته‌اند. ناگفته نماند که جنس و دانه‌بندی RAP مورد استفاده در دو پژوهش متفاوت بوده است. در شکل ۱۵ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف بر حسب دوره عمل‌آوری نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۵ برای هر طرح اختلاط مورد بررسی در این مطالعه، افزایش طول زمان عمل‌آوری، افزایش مقاومت فشاری را در پی دارد. اما نرخ افزایش در همه نمونه‌ها یکسان نیست. همچنین در شکل ۱۶ حداقل مقاومت فشاری ۷



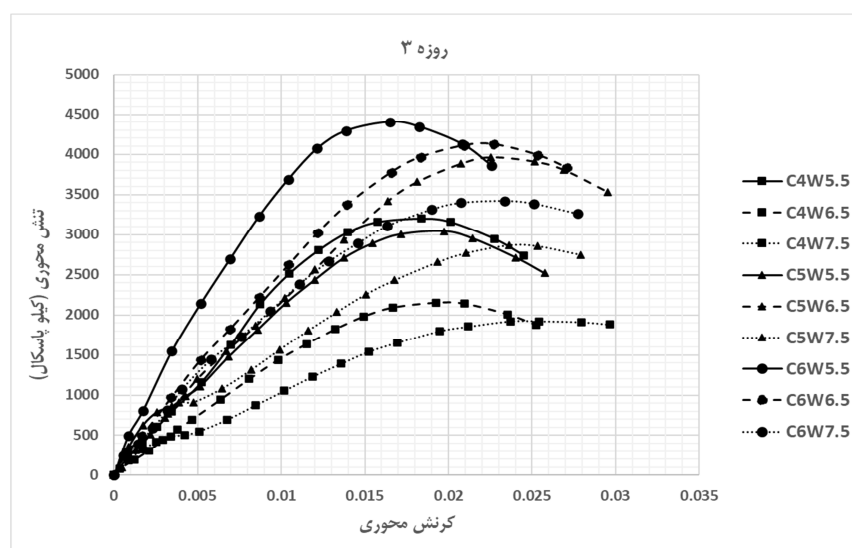
شکل ۱۵. مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف بر حسب دوره عمل‌آوری، استاندارد ای اس تی ام ۵۵۸



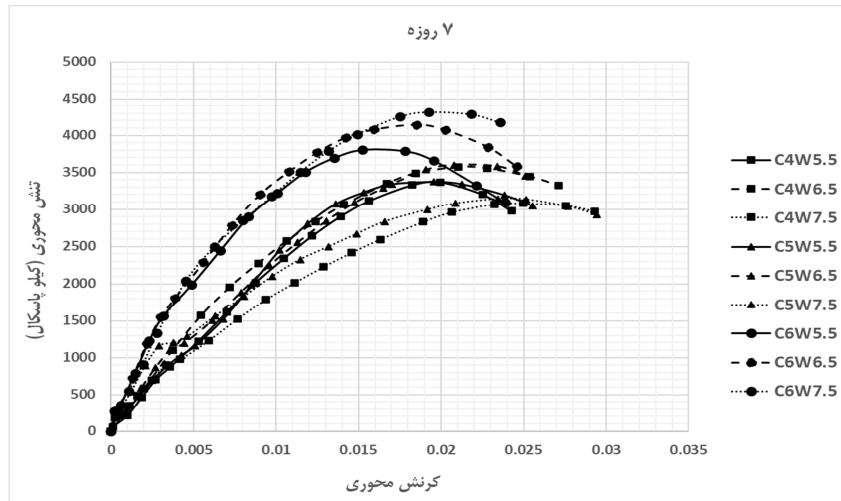
شکل ۱۶. حد نصاب حداقل مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های ۷ روزه

مشخص می‌شود که مقدار مدول سکانتی با مقدار سیمان و طول دوره عمل آوری رابطه مستقیم دارد. نکته قابل ذکر این که برای تعیین مقدار مدول سکانتی در هر درصد سیمان، مدول‌های سکانتی متناظر با درصد رطوبت بهینه و ۱٪ و ۲٪ کمتر از بهینه محاسبه شده و سپس مقدار میانگین حسابی هر ۳ مقدار، به عنوان میزان متوسط مدول سکانتی برای آن درصد سیمان خاص اعلام شده است. با توجه به نتایج فوق چنین به نظر می‌رسد که به تناسب نیاز می‌توان از RAP تثبیت شده با سیمان به عنوان لایه اساس راه و باند استفاده نمود. به بیانی دیگر استفاده از RAP در اجرای لایه اساس می‌تواند هم در قالب طرح تثبیت تمام عمق<sup>۱۳</sup> (FDR) و هم به صورت کاربرد ۱۰۰ درصدی RAP باشد. در طراحی لایه اساس حاوی تراشه آسفالت لازم است که بر اساس معیارها، حداقل مقاومت فشاری تک محوری برای برخورداری از دوام مناسب در نظر گرفته شود. لذا بررسی و مطالعه دوام لایه اساس حاوی تراشه آسفالت در برابر شرایط جوی و سیکل‌های ذوب و یخ و تر و خشک از جمله موارد ضروری می‌باشد. با این وجود در طرح لایه اساس حاوی RAP لازم است پارامترهای دینامیکی همچون مدول برجهدگی<sup>۱۴</sup>، نسبت میرایی<sup>۱۵</sup>، مدول برشی<sup>۱۶</sup> و تغییر شکل‌های تجمعی ماندگار<sup>۱۷</sup> مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. تأثیر عواملی مانند ناهمسانی تنشی و فرکانس بارگذاری بر پارامترهای دینامیکی فوق از اهم موارد مورد بررسی در مطالعات و تحلیل‌های دینامیکی می‌باشند.

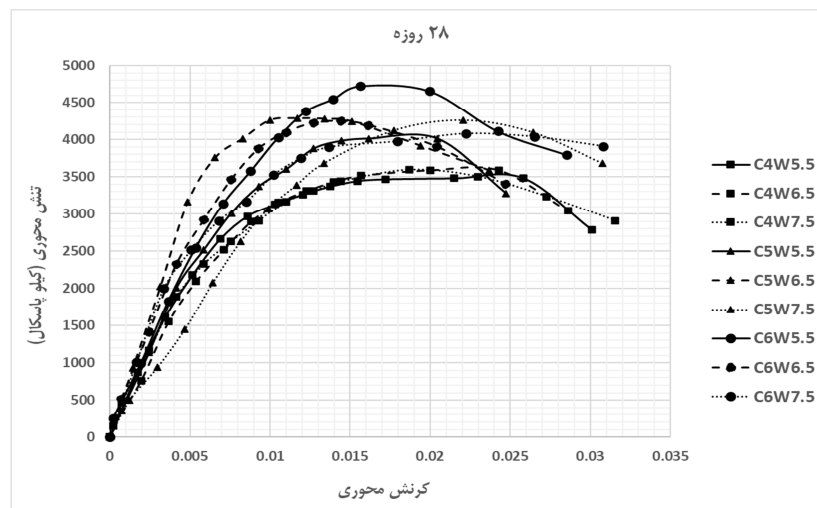
در اشکال ۱۷ تا ۲۰ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های مختلف برای دوره‌های عمل آوری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه ارائه شده است. لازم به ذکر است که منحنی تنش-کرنش نشان داده شده در این اشکال، فرم اصلاح شده منحنی تنش-کرنش می‌باشد و شیب قسمت ابتدای هر منحنی اصلاح شده است. با توجه به این شکل‌ها به طور کلی به نظر می‌رسد که با افزایش مقدار سیمان در هر نمودار، شیب قسمت ابتدای نمودار نیز بیشتر می‌شود. به بیان دیگر می‌توان چنین استنباط نمود که صرف‌نظر از سن نمونه‌ها، افزایش مقدار سیمان افزایش مدول الاستیسیته را در پی دارد. با توجه به نمودار تنش-کرنش هر نمونه می‌توان مدول سکانت مربوط به آن نمونه را محاسبه نمود. در این راستا با مراجعه به نمودار تنش-کرنش یک طرح اختلاط خاص، ماکزیمم مقاومت را تعیین نموده و همچنین نقطه متناظر با نصف این مقدار ماکزیمم را می‌توان با توجه به نمودار مشخص نمود. سپس کرنش نظیر مقاومت مذکور (مقاومت ۵۰٪) را از روی نمودار مشخص نموده و حاصل تقسیم مقاومت بر کرنش نظیر به عنوان مدول سکانت ۵۰٪ قلمداد می‌گردد و در شکل ۲۱ با علامت E50 نشان داده شده است. در شکل ۲۱ نمودار مدول سکانت بر حسب درصد سیمان ارائه شده است. با توجه به این شکل در هر سن دلخواه، با افزایش درصد سیمان، مدول سکانتی نیز افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۲۲ مدول سکانت بر حسب دوره عمل آوری به نحو مناسب‌تری نشان داده می‌شود. با توجه به این دو شکل



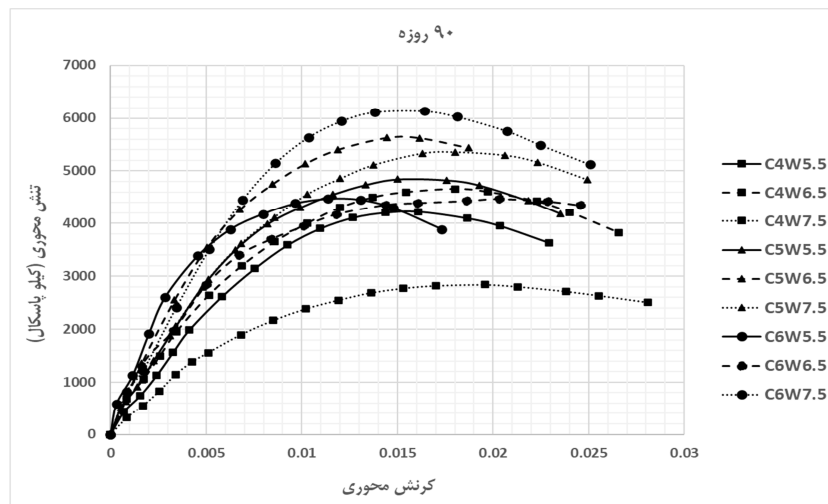
شکل ۱۷. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ۳ روزه



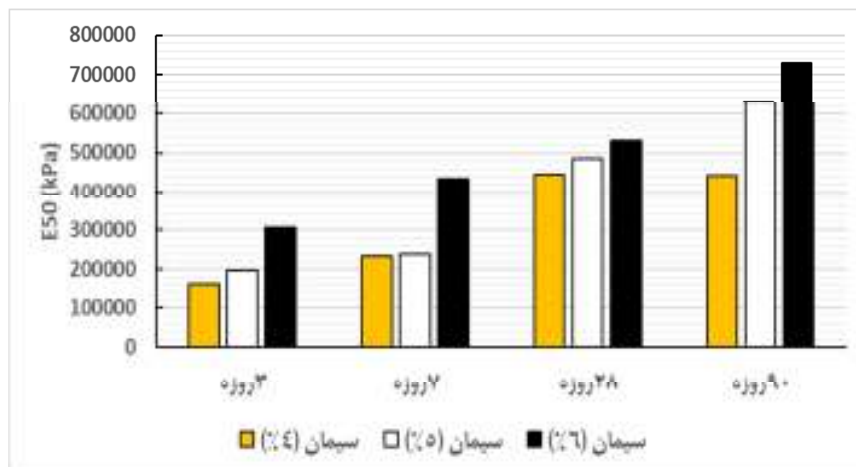
شکل ۱۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ۷ روزه



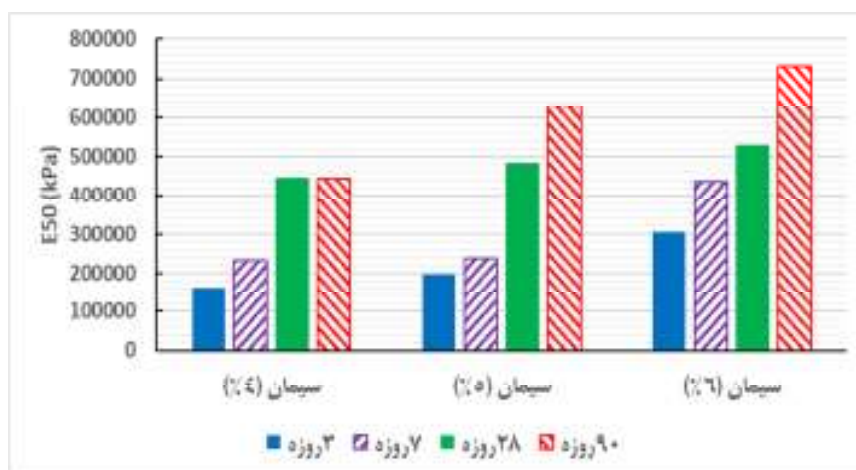
شکل ۱۹. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ۲۸ روزه



شکل ۲۰. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های ۹۰ روزه



شکل ۲۱. مدول سکانت E50 نمونه‌های مختلف بر حسب درصد سیمان



شکل ۲۲. مدول سکانت E50 نمونه‌های مختلف بر حسب دوره عمل آوری

## ۶- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مطالعه آزمایشگاهی بر روی حد ماکزیمم RAP تثبیت شده با سیمان تمرکز دارد. میزان RAP استفاده در نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر برابر با ۱۰۰٪ می‌باشد. به عنوان جمع بندی، نتایج بدست آمده از این مطالعه آزمایشگاهی به شرح زیر است.

در یک رطوبت ثابت، با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. این نکته تقریباً در مورد تمامی نمونه‌های با دوره‌های عمل آوری ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مصداق دارد. همچنین این گفته برای هر رطوبت دلخواه یعنی هم برای رطوبت بهینه ۷/۵ درصد و هم رطوبت‌های ۱٪ و ۲٪ کمتر از بهینه صدق می‌کند.

در این مقاله مقاومت فشاری، مدول و رفتار تنش- کرنش مصالح RAP به عنوان لایه اساس روسازی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در خصوص استفاده از RAP به حالت تثبیت شده در لایه اساس مطالعات متعددی انجام شده است. از طرفی، مخلوط RAP با مصالح دانه‌ای طبیعی باز هم مواد تجدیدناپذیر را کاهش می‌دهد و چنانچه بتوان امکان استفاده از درصد بالای RAP و در حد ۱۰۰ درصد را فراهم نمود، از نظر اقتصادی و زیست محیطی بسیار مناسب به نظر می‌رسد. در برخی از مطالعات هر چند که تعدادشان بسیار اندک می‌باشد، پژوهشگران امکان استفاده ماکزیمم یعنی ۱۰۰٪ از RAP را بررسی نموده‌اند. اما مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد.

پژوهشگران پیشنهاد شده است. همان طور که پیش از این نیز بیان گردید، حداقل مقاومت فشاری بر اساس دوام مخلوط در برابر تر و خشک شدن یا ذوب و یخ زدن و همچنین کربناته شدن پیشنهاد شده است.

-در نمودار تنش- کرنش متناظر با هر طرح اختلاط، به نظر می-رسد که با افزایش مقدار سیمان شیب قسمت ابتدای نمودار نیز بیشتر می-شود. به بیان دیگر می-توان چنین استنباط نمود که صرف-نظر از سن نمونه‌ها، افزایش مقدار سیمان افزایش مقدار مدول را در پی دارد.

-در سطح کشور به تناسب نیاز می-توان از RAP تثبیت شده با سیمان استفاده نمود. در طراحی اساس حاوی RAP لازم است که بر اساس معیار حداقل مقاومت فشاری محدود نشده جهت برخورداری از دوام مناسب اقدام نمود. اما کماکان در طرح لایه اساس حاوی RAP لازم است پارامترهای دینامیکی همچون مدول برجهندگی مد نظر قرار گیرد. بنابراین انجام تحقیقات بیشتری درخصوص عملکرد دینامیکی لایه اساس حاوی RAP ضروری به نظر می-رسد. علاوه بر مدول برجهندگی پارامترهای دینامیکی دیگری همچون نسبت میرایی، مدول برشی و کرنش تجمعی ماندگار نیز لازم است که مد نظر قرار گیرد. تأثیر عواملی مانند ناهمسانی تنشی و فرکانس بارگذاری بر پارامترهای دینامیکی فوق‌الذکر از موارد مهم مورد نظر در مطالعات و تحلیل‌های دینامیکی آبی می-باشد.

-در درصد سیمان ثابت، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه روند یکنوای افزایشی در مقاومت به چشم نمی-خورد. لذا، ممکن است مقاومت ماکزیمم در رطوبت بهینه یا در کمتر از بهینه رخ دهد. رخداد این پدیده برحسب مقدار یا درصد سیمان مصرفی می-تواند گوناگون باشد. حتی سن و بلوغ نمونه نیز می-تواند در این امر تاثیر گذار باشد. در این مطالعه برای دوره عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و درصد سیمان ۴٪ و ۵٪، مقاومت ماکزیمم در کمتر از رطوبت بهینه ولی برای درصد سیمان ۶٪، در رطوبت بهینه رخ داده است. اما در مورد نمونه-های ۳ روزه باز هم این روند متفاوت بوده و مقاومت ماکزیمم هیچگاه در رطوبت بهینه رخداد نداشته است و عملاً بسته به مقدار سیمان، گاهی در ۱٪ کمتر و گاهی در ۲٪ کمتر از رطوبت بهینه به وقوع پیوسته است. به نظر می-رسد در مورد نمونه‌های ۳ روزه، کامل نبودن بلوغ نمونه دلیل این رخداد باشد.

-برای هر طرح اختلاط مورد بررسی در این مطالعه، افزایش طول زمان عمل آوری، افزایش مقاومت فشاری را در پی دارد. اما نرخ این افزایش، در همه نمونه‌ها یکسان نیست.

-تمامی طرح اختلاط‌های مورد بررسی در این مطالعه مقاومت ۷ روزه بالاتر از حد نصاب ۲/۱ مگا پاسکال (۲۱۰۰ کیلو پاسکال) را دارا می-باشند. این حد نصاب همان حداقل مقاومت فشاری است که توسط تعدادی از دپارتمان‌های حمل و نقل ایالات متحده و همچنین انجمن سیمان پرتلند و نیز برخی از

## ۷- سپاسگزاری

داده‌های این مقاله از پروژه تحقیقاتی با عنوان "رفتار دینامیکی و مونوتونیک پساسیکلی مصالح تراشه آسفالت (RAP) به‌عنوان لایه اساس روسازی و آرایه پیش‌نویس راهنمای استفاده از RAP" ابلاغ شده با شماره ۱۳۶۲۱-۲۲-۰۰ مورخ ۱۴۰۰/۸/۱۵ توسط مرکز تحقیقات راه، مسکن و

## ۸- پی‌نوشت‌ها

1. Reclaimed Asphalt Pavement
2. Hot Mix Asphalt (HMA)
3. Unconfined Compressive Strength (UCS)
4. Portland Cement Association (PCA)
5. MDOT: Mississippi Department of Transportation
6. USACE: United States Army Corps of Engineers
7. State Departments of Transportation (DOTs)
8. Virgin aggregate
9. Unified Soil Classification System (USCS)



10. Optimum Moisture Content (OMC)
11. Maximum Dry Unit Weight
12. Curing
13. Full-Depth Reclamation (FDR)
14. Resilient Modulus
15. Damping Ratio
16. Shear Modulus
17. Accumulated permanent Strain

## ۹- مراجع

- Morian D.A., Solaimanian M., Scheetz, B., Jahangirnejad S., (2012), "Developing Standards and Specifications for Full Depth Pavement Reclamation, Common wealth of Pennsylvania Department of Transportation", USA, Harrisburg.
- Mousa E, El-Badawya S, Azam A., (2020), "Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt", *Transportation Geotechnics*. 100414.
- Roychand, R., Li, J., De Silva, S., Saberian, M., Law, D., Pramanik, B.K., (2021), "Development of zero cement composite for the protection of concrete sewage pipes from corrosion and fatbergs", *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105166.
- Suddepong A. Intra A. Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C. Arulrajah A. Shen JS., (2018), "Durability against wettingdrying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock", *Soils Found*. 58, pp.333–343. Doi:10.1016/j.sandf.2018.02.017.
- Syed I.M., (2007), "Full-Depth Reclamation with Portland Cement: A Study of Long-Term Performance: Portland Cement Association".
- Taha, R. Ali, G. Basma, A. and Alturk, O., (1999), "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases", in: *Transp. Res. Rec.*, pp. 1652, pp.264–269.
- Texas Department of Transportation. Cement Treatment. ITEM 2762014.
- Wen H., Muhunthan B., Edil T., Tinjum J.M., (2014), "Stabilized layers for use in pavement design and analysis Appendix A", *Literature Review and Survey Results, NCHRP Project 4-36*.
- Xiong, Z., Wei, W., Liu, F., Cui, C., Li, L., Zou, R., Zeng, Y., (2021), "Bond behaviour of recycled aggregate concrete with basalt fibre-reinforced polymer bars", *Composite Structures*, 256, 113078.
- Yuan, D., Nazarian, S., Hoyos, L. R. and Puppala, A. J., (2010), "Cement treated RAP mixes for roadway bases", *Center for Transportation Research Systems, The University of Texas at El Paso, Texas, and Department of Civil Engineering, The University of Texas at Arlington, Texas*.
- Abdo F.Y., (2009), "Cement-stabilized base courses-concrete airport pavement workshop".
- Adresi M, Khishdari A. Ahmadi A. Rooholamini H., (2019), "Influence of high content of reclaimed asphalt on the mechanical properties of cement-treated base under critical environmental conditions", *Int. J. Pavement Eng.* 8436, pp.1198–1105. Doi:10.1080/10298436.2017.1388508.
- Arshad M., Ahmed MF, (2017), "Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements", *Constr. Build. Mater.*, 151, pp.83–97.
- Arshad M., (2020), "Laboratory investigations on the mechanical properties of cement treated RAP-natural aggregate blends used in base/subbase layers of pavements. *Constr. Build. Mater.*", 254.
- Das JT, Banerjee A, Chakraborty S., (2018), "A Framework for Assessment of Sustainability and Resilience in Subgrade Stabilization for a High-Volume Road", *Transportation Research Board 97th Annual Meeting, January 7-10, Washington, DC*.
- Fedrigo W, Núñez WP, Castañeda López MA, Kleinert TR, Ceratti JAP, (2018), "A study on the resilient modulus of cement-treated mixtures of RAP and aggregates using indirect tensile, triaxial and flexural tests", *Constr. Build. Mater.*, 171, pp.161–169.
- Ghanizadeh AR, Rahrovan M, Bafghi KB, (2018), "The effect of cement and reclaimed asphalt pavement on the mechanical properties of stabilized base via full-depth reclamation", *Constr. Build. Mater.*, 161, pp.165–174. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.124.
- Kazemi, M., Hajforoush, M., Talebi, P.K., Daneshfar, M., Shokrgozar, A., Jahandari, S., Saberian, M., Li, M., (2020), "In-situ strength estimation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and point load test", *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(5), pp.289-306.
- Kazmee, H., Tutumluer, E., and Beshears, S., (2016), "Using accelerated pavement testing to evaluate reclaimed asphalt pavement materials for pavement unbound granular layers", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29 (2), pp.1–13.

# **Evaluation of Compressive Strength and Stress-Strain Behavior of Materials for Base Layer Containing Reclaimed Asphalt Pavement**

*Seyed Mohamad Mansoorzadeh, Ph.D., Student, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.*

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

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

*E-mail: a\_mahboubi@sbu.ac.ir*

Received: February 2023- Accepted: April 2023

## **ABSTRACT**

It is possible to use reclaimed asphalt pavement materials as a type of recycled material in the asphalt concrete layer or the base layer in the pavement. However, due to the variety of sources as well as insufficient strength, a RAP material without stabilizing additive is not suitable in granular base layers. In this paper, the unconfined compressive strength of cement treated RAP base has been investigated and evaluated in a laboratory study. Three cement contents of 4, 5, and 6 percent were added and the samples were cured for 3, 7, 28, and 90 days after compaction. Samples were prepared with standard compaction energy according to ASTM D558. The unconfined compressive test has been carried out using the strain control method. In order to investigate the effect of moisture, in addition to the optimum moisture, moisture levels below and above the optimum have also been evaluated. Based on the results of this laboratory study, with the increase of cement percentage and curing period, unconfined compressive strength and modulus of elasticity increase visibly. It was also found that according to the percentage of cement used in the mixing design, the maximum strength may occur at the optimum moisture or less than the optimum moisture content.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt Pavement, Cement Treated RAP Base Mix, Unconfined Compressive Strength, Cement Treated Base, Soil-Cement