

## ارزیابی آزمایشگاهی اثر انرژی تراکم و درصد رطوبت بر رفتار مکانیکی لایه اساس حاوی خرده مصالح آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

سید محمد منصورزاده، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
احمدرضا محبوبی اردکانی\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
عطا آقایی آرای، دانشیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a\_mahboubi@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۸۴-۶۳

### چکیده

در این تحقیق، مقاومت فشاری لایه اساس تثبیت شده سیمانی (CTB) حاوی ۱۰۰٪ مصالح خرده آسفالت (RAP) با استفاده از نمونه‌های با سنین مختلف بلوغ مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، بر اساس نتایج آزمایش تراکم، نمونه‌های CTB در سه درصد مختلف سیمان (۴، ۵ و ۶٪) و سه درصد آب (۵، ۵، ۵ و ۶، ۵ و ۷، ۵٪) با بکارگیری دو روش تراکم براساس استانداردهای ASTM 558 و ASTM D1557 ساخته شد. مجموعاً تعداد ۲۷۰ نمونه فشاری در سنین عمل آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) قرار گرفت. آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده به روش کرنش کنترل و با سرعت ۱،۳ میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. به منظور بررسی تأثیر رطوبت ساخت، علاوه بر رطوبت بهینه، رطوبت‌های کمتر و بیشتر از بهینه نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS) بر روی نمونه‌های منتخب (۴۵ نمونه) با تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) و در رطوبت بهینه و با سنین عمل آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ انجام گردید. مشخص شد که در هر طرح اختلاط، برحسب میزان انرژی تراکم و درصد سیمان مصرفی، مقاومت فشاری و کششی ماکزیمم ممکن است در رطوبت بهینه یا کمتر از بهینه رخ دهد. چنین می‌توان گفت که از بین سایر عوامل تأثیرگذار، زمان عمل آوری و انرژی تراکم به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر میزان مقاومت اکتسابی دارند. بر اساس نتایج بدست آمده، به نظر می‌رسد که بکارگیری مخلوط‌های CTB حاوی ۱۰۰٪ مصالح RAP به عنوان لایه اساس امکان‌پذیر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خرده مصالح آسفالتی، مخلوط اساس حاوی تراشه آسفالت، مقاومت فشاری محدود نشده، مقاومت کششی غیرمستقیم، اساس تثبیت شده سیمانی

### ۱- مقدمه

انعطاف‌پذیر یا صلب استفاده کرد. از سوی دیگر، ساخت و ساز و نگهداری منظم روسازی راه مستلزم مصرف مقادیر قابل توجهی مواد و منابع انرژی است. استفاده مجدد از مصالح بازیافتی و زائد یکی از راهکارهای مقابله با مصرف روز افزون مصالح طبیعی است و به تبع آن فواید زیست محیطی و صرفه

اساس تثبیت شده با سیمان<sup>۱</sup> (CTB) مخلوطی از سنگدانه‌ها، سیمان پرتلند و آب است که از طریق گیرش سیمان پس از تراکم لایه سخت می‌شود و لایه‌ای قوی و بادوام ایجاد می‌کند. CTB به طور گسترده‌ای در ساخت روسازی جاده‌ها و باند فرودگاه‌ها استفاده می‌شود. این لایه را می‌توان در روسازی‌های

اغلب آژانس‌ها با کاربرد معیار UCS به جای تست‌های دوام، برای طراحی خاک-سیمان سازگار می‌باشند. همبستگی بین دوام و UCS مصالح تثبیت شده با سیمان، برای اجتناب از آزمون‌های تر-خشک و ذوب-یخبندان مورد توجه ویژه واقع شده و بسیاری از آژانس‌ها طراحی بر اساس مقاومت فشاری محدود نشده را به جای استفاده از ASTM D559 و ASTM D560 ترجیح می‌دهند. دلایل این امر عبارتند از: تست‌های تر-خشک و ذوب-یخ نیاز به زمان تست طولانی‌تر (یک ماه در مقایسه با یک هفته)، تجهیزات آزمایشگاهی بیشتر و مشارکت بیشتر تکنسین‌ها را دارند. 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>۸</sup> حداقل مقاومت فشاری ۲۰۷۰ کیلو پاسکال را برای طراحی لایه اساس 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. معمولاً برای اطمینان از دوام کافی، رابطه همبستگی بین UCS و دوام براساس نوع خاک لایه CTB ارائه می‌گردد و یک حد مقاومت حداقل (برای تأمین دوام) و حداکثر (اجتناب از سختی بیش از حد لایه) برای CTB تعریف می‌شود. به عنوان نمونه Caltrans یک حد مقاومت طراحی برای CTB از حداقل ۳۰۰ پوند بر اینچ مربع (۲۱۰۰ کیلو پاسکال) تا ۶۰۰ حداکثر پوند بر اینچ مربع (۴۲۰۰ کیلو پاسکال) پس از عمل آوری ۷ روزه را مشخص نموده است. از طرفی برخی نتایج تحقیقاتی نشان می‌دهند که با اضافه شدن RAP به مخلوط، مقاومت کششی لایه CTB افزایش می‌یابد و لذا پتانسیل ترک خوردگی کاهش یافته و رفتار مخلوط از ترد به انعطاف پذیر سوق پیدا می‌کند. از این رو به نظر می‌رسد برای این گونه مخلوط‌ها مقدار حد حداکثر مقاومت فشاری محدود نشده مجاز، لازم است که به صورت افزایشی اصلاح گردد. به نظر می‌رسد درصد قیر، نوع قیر، دمای آزمایش، مقدار پیرشدگی و ... می‌تواند در تعیین محدوده پیشنهادی مذکور موثر باشد (Adresi et al., 2019).

برای طراحی مخلوط تراشه آسفالت-سیمان تاحدودی می‌توان از روش‌های طراحی خاک-سیمان الگو گرفت. در سال‌های اخیر پژوهشگران متعددی در مورد بهبود عملکرد لایه‌های روسازی با استفاده از مصالح RAP با مخلوط کردن

اقتصادی حاصل از این رویکرد فراوان است. بکارگیری مصالح بازیافتی عمدتاً همراه با افت مشخصات دوام و مقاومت همراه است که اثر آنرا می‌توان با بکارگیری مواد شیمیایی<sup>۲</sup> کاهش قابل توجه داد. با توجه به اثرات فراوان زیست محیطی و عملکردی تلاش در جهت استفاده از اساس تثبیت شده سیمانی با استفاده از مصالح بازیافتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. 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>۳</sup> (RAP) می‌باشد.

مصالح خرده آسفالتی یکی از مصالح با دسترسی زیاد و پتانسیل بالا جهت جایگزینی مصالح بکر است. استفاده مجدد از این مصالح که از حذف بخش‌های روسازی فرسوده در طول فرآیندهای تراش، روکش مجدد و بهسازی سالانه بصورت انبوه بدست می‌آید می‌تواند باعث کاهش فاصله حمل، کاهش هزینه، حفظ منابع مصالح بکر<sup>۴</sup> و بهبود توسعه پذیری<sup>۵</sup> گردد. در گذشته پژوهشگران متعددی در مورد بهبود عملکرد لایه‌های روسازی با استفاده از مصالح RAP با مخلوط کردن آن با سنگدانه‌های بکر 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 با استفاده از مواد افزودنی سیمانی به راحتی در اساس روسازی قابل استفاده می‌باشد.

به طور کلی ارزیابی مقاومت فشاری و کششی لایه تثبیت شده با سیمان، از نکات قابل توجه در بررسی خصوصیات مکانیکی لایه اساس است. اهمیت این موضوع به این دلیل است که در محاسبه ضخامت لایه آسفالتی قرار گرفته بر روی لایه اساس تثبیت شده، مقاومت فشاری محدود نشده<sup>۶</sup> و همچنین مقاومت کششی غیرمستقیم<sup>۷</sup> نقش تعیین کننده‌ای دارد. لایه اساس تثبیت شده می‌تواند کرنش کششی در پایین لایه آسفالتی را نسبت به حالتی که اساس تثبیت نشده، کاهش دهد. در این وضعیت مقادیر کرنش در قسمت تحتانی لایه اساس تثبیت شده از مقادیر کرنش در قسمت تحتانی لایه آسفالتی بزرگتر می‌باشد. به بیانی دیگر لایه اساس تثبیت شده با موفقیت کرنش را به عمق ساختار روسازی منتقل می‌نماید.

سیمان و رطوبت متراکم شده و در اتاق رطوبت، عمل آوری شده است. همچنین با توجه به اینکه مقاومت کششی یک آیتم تاثیر گذار در عملکرد و رفتار مکانیکی لایه اساس است، آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم روی طرح مخلوط‌های منتخب تثبیت شده با سیمان در رطوبت بهینه با تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) و درصد‌های سیمان ۴٪، ۵٪ و ۶٪ در سنین ۳، ۱۴، ۲۸، ۵۶، ۹۰ روزه انجام پذیرفت.

## ۲- پیشینه تحقیق

یوان و همکاران مطالعه‌ای بر روی مخلوط RAP و خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند انجام دادند و یک رابطه خطی بین درصد سیمان و مقاومت فشاری محدود نشده پیدا کردند. آنها بیان کردند که افزایش درصد سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری محدود نشده می‌شود (Yuan et al., 2010). در مطالعه‌ای دیگر خواص مکانیکی مخلوط‌های CTB بررسی شد و مشخص گردید که یک رابطه غیر خطی می‌تواند میزان رطوبت را با UCS مرتبط کند. علاوه بر این، مشخص شد که معادلات خطی می‌توانند برای بیان رابطه بین زمان عمل‌آوری و UCS در مقیاس لگاریتمی و ITS و UCS در مقیاس نرمال مفید باشند (Xuan et al., 2012).

اوخ‌خی<sup>۵</sup> و همکاران یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی خصوصیات مکانیکی مخلوط خاک RAP تثبیت شده با سیمان انجام دادند. آنها در کار خود، نسبت سیمان را ثابت نگه داشتند در حالی که درصد RAP را تغییر دادند. یافته‌های آنها نشان داد که افزایش درصد RAP مقاومت فشاری محدود نشده را کاهش می‌دهد (Euch Khay et al., 2014). در تحقیقی دیگر، مخلوط‌های CTB حاوی حجم بالایی از RAP با مقادیر متفاوت نسبت آب به سیمان تهیه شد. نتایج نشان داد که استفاده از ۳۰ و ۷۰ درصد RAP در مخلوط‌های CTB بدون کاهش UCS در صورتی امکان‌پذیر است که میزان سیمان به ترتیب ۲۳ و ۳۷ درصد افزایش یابد (Isola et al., 2012).

غنی‌زاده 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،

آن با سنگدانه‌های تازه و با استفاده از تثبیت کننده‌های شیمیایی مانند آهک، سیمان و خاکستر بادی مطالعه نموده‌اند. در نتایج این مطالعات بیان شده است که مخلوط RAP و سنگدانه بکر با استفاده از مواد افزودنی سیمانی به راحتی در لایه اساس روسازی قابل استفاده می‌باشد.

RAP به دلیل وجود لایه نازکی از قیر در اطراف سنگدانه‌های آن، ویژگی‌های متفاوتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارد. این می‌تواند تراکم پذیری و محتوای رطوبت بهینه<sup>۹</sup> (OMC) را هنگامی که در لایه اساس تثبیت شده استفاده می‌شود، تغییر دهد. تحقیقات نشان داده است که افزایش محتوای RAP در مخلوط‌های اساس می‌تواند میزان (OMC) را افزایش داده و حداکثر چگالی خشک<sup>۱۱</sup> (MDD) را کاهش دهد علاوه بر این افزایش محتوای سیمان مخلوط‌ها در حالی که مقدار RAP ثابت باشد، می‌تواند چگالی مخلوط‌های تثبیت شده با سیمان را افزایش دهد (Adresi et al., 2019). تست ITS حساسیت بیشتری نسبت به تست UCS به نوع تثبیت کننده نشان می‌دهد و همچنین به عنوان معیاری برای دوام طولانی مدت اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. برخی تحقیقات اخیر نشان داده است که حداقل مقدار ITS برابر با ۲۵۰ کیلو پاسکال برای مقاومت در برابر نیروهای مخرب ایجاد شده توسط کربناتاسیون مورد نیاز است. در این مقاله رفتار مکانیکی لایه اساس تثبیت شده با سیمان حاوی ۱۰۰٪ خرده مصالح آسفالتی طی یک مطالعه آزمایشگاهی بررسی شده است. در این راستا نخست مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌های حاوی ۱۰۰٪ تراشه آسفالت تثبیت شده با سیمان ارزیابی شده است. تراکم نمونه‌ها در دو سطح انرژی تراکمی اصلاح شده و استاندارد بر اساس استانداردهای ۱۵۵۷ و ۵۵۸ ای اس تی ام انجام شده است. در ساخت نمونه‌های استوانه‌ای فشاری در هر دو روش تراکم، از سیمان با درصد‌های ۴، ۵ و ۶ استفاده شده است و نمونه‌ها در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه در اتاق رطوبت عمل‌آوری<sup>۱۱</sup> شده‌اند. به منظور ارزیابی تأثیر رطوبت ساخت، علاوه بر رطوبت بهینه رطوبت‌های کمتر و بیشتر از رطوبت بهینه نیز بررسی شده است و لذا از سه درصد آب (۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵) برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. یکی از نکات اساسی در این مطالعه، کاربرد ۱۰۰٪ مصالح RAP در مخلوط تثبیت شده می‌باشد. RAP تراشیده شده در سطح خیابان و جاده پس از انتقال به دیو، خردایش شده و سپس با افزودن

همان طور که قبلا نیز بیان شد، در مطالعه حاضر مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های تثبیت شده با سیمان حاوی ۱۰۰٪ تراشه آسفالت طی یک مطالعه آزمایشگاهی بررسی و ارزیابی شده است. تمرکز این مطالعه بر تغییر درصد سیمان، تغییر درصد رطوبت و تنوع دوره عمل آوری در دو روش تراکم با دو سطح انرژی تراکم مختلف است. از سیمان با درصدهای ۴، ۵ و ۶ استفاده شده است. نمونه‌ها در رطوبت بهینه و ۱٪ بیشتر و کمتر از بهینه با درصدهای مختلف آب (۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵٪) با دو سطح از انرژی تراکمی تهیه شده و در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه در اتاق رطوبت عمل آوری شدند. در ادامه تغییرات مقادیر مقاومت فشاری و کششی غیر مستقیم نسبت به تغییر هر کدام از پارامترهای مقدار سیمان، مقدار رطوبت ساخت و طول دوره عمل آوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس مقادیر مقاومت فشاری و کششی در دو تراز انرژی تراکم استاندارد و اصلاح شده مقایسه شده است. همچنین منحنی‌های تنش- کرنش مربوط به هر طرح اختلاط ارائه شده و تغییرات آن بررسی شده است.

### ۳- مشخصات مصالح مصرفی

مصالح RAP مورد استفاده در این مطالعه آزمایشگاهی، از دپوی شرکت توزینگر واقع در شهرک صنعتی بهارستان در کرج تهیه گردید. RAP تراشیده شده در سطح خیابان پس از جمع آوری و حمل به دپوی این شرکت، در ابتدا خردایش شده و سپس در محل‌های مربوطه ذخیره و نگهداری می‌شوند و نهایتاً در پروسه‌های آسفالت بازیافتی استفاده می‌شوند (شکل ۱).

مقادیر مقاومت فشاری محدود نشده افزایش یافته است. حداکثر مقدار RAP در مطالعه آنها ۸۰٪ بوده است (Ghanizadeh et al., 2018).

آدرسی و همکاران (۲۰۱۹) با انجام یک مطالعه آزمایشگاهی به نتایج تقریباً یکسانی با مطالعه غنی زاده و همکاران (۲۰۱۸) دست یافتند. آنها دریافتند که در مقادیر سیمان ۵٪ و ۷٪ با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها به شکل خطی کاهش می‌یابد. اما در میزان سیمان ۳٪ با افزایش درصد RAP، مقاومت فشاری محدود نشده ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. آنها کاهش خطی مقاومت در درصد بالای سیمان را نقش پر رنگ سیمان و کاهش غیر خطی در درصد سیمان ۳٪ را نقش تعیین کننده هر دو ماده چسبنده قیر و سیمان بیان نمودند. در مطالعه آنها حداکثر RAP مورد استفاده ۸۰٪ بوده است (Adresi et al., 2019).

برخی از محققین به این نتیجه رسیده اند که نفوذپذیری با افزایش محتوای RAP کاهش می‌یابد، در حالی که نظرات و نتایج مخالف نیز توسط سایر محققان ارائه شده است. این به دلیل محتویات مختلف قیر، دانه بندی و مقادیر ریز مواد RAP مورد استفاده است. موسی و همکاران با بکارگیری CT اسکن بر روی نمونه‌های اساس/زیراساس حاوی مصالح RAP تحت آزمایش مدول برجهنگی نشان دادند که مصالح بکر (Virgin) دارای درصد فضای خالی بیشتری نسبت به مصالح RAP هستند که این امر موجب کاهش نفوذ پذیری و افزایش مدول برجهنگی در نمونه‌های حاوی RAP می‌گردد (Mousa et al., 2020).



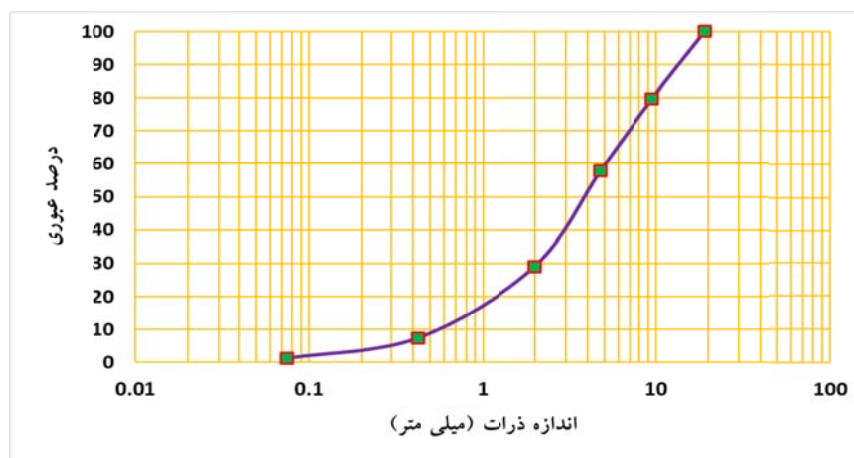
شکل ۱. مصالح تراشه آسفالت در محل دپوی توزینگر (چپ) و آزمایشگاه (راست)

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

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

آزمایش‌های شاخص شامل دانه‌بندی (ASTM C136) و اتربرگ (ASTM D4318) انجام گردید. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی RAP مورد استفاده ارائه شده است. این مصالح دارای پارامتر ضریب انحنای بین ۱ و ۳ و ضریب یکنواختی بزرگتر از ۶ می‌باشد، لذا از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده بوده و بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد<sup>۹</sup> با SW نشان داده می‌شود. همچنین آزمایش حدود اتربرگ انجام گردید و مشخص شد که بخش ریزدانه این مصالح، غیر پلاستیک می‌باشد.

نخست برای مصالح تراشه آسفالت (بدون افزودن سیمان)، مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه از آزمایش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) بدست آمد.



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح تراشه آسفالت توزینگر

### ۳-۲- سیمان

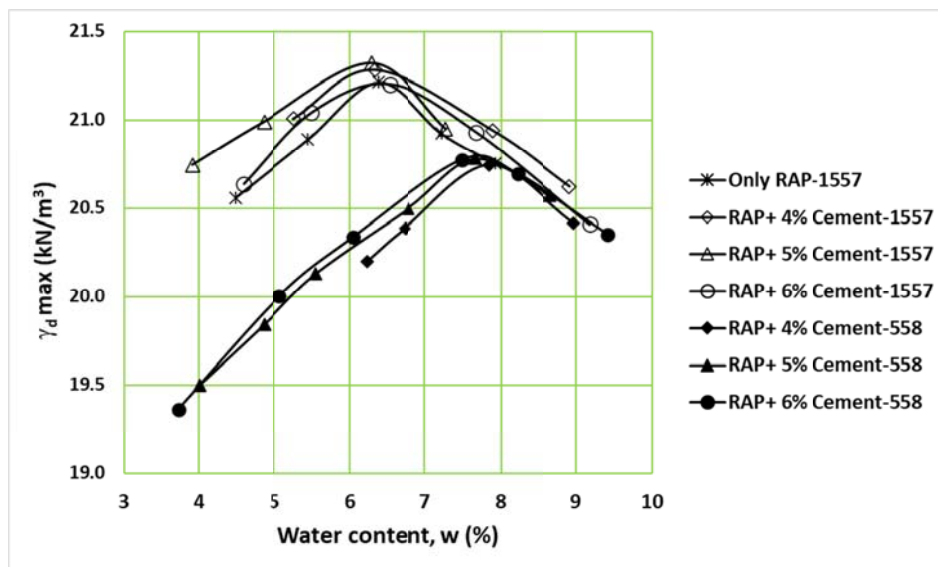
سیمان مورد استفاده در این مطالعه آزمایشگاهی، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی شرکت سیمان تهران می‌باشد.

مکعب و دامنه تغییرات درصد رطوبت بهینه از ۶/۳ تا ۶/۵ درصد بدست آمد (شکل ۳). اما برای تراکم استاندارد از کد ASTM D558 استفاده شد. مطابق با این استاندارد، 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 مخلوط مصالح RAP با سیمان در مقادیر ۴، ۵ و ۶ درصد سیمان 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 ۷/۷ درصد می‌باشد (شکل ۳).

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

#### آسفالت- سیمان

در تعیین مشخصات تراکم مخلوط تراشه آسفالت- سیمان از هر دو روش تراکم استاندارد و اصلاح شده بهره گرفته شد. تراکم اصلاح شده آزمایشگاهی بر اساس استاندارد ASTM D1557 بر روی مخلوط تراشه آسفالت و سیمان با درصدهای ۴، ۵ و ۶ درصد به روش C انجام گردید. در این روش دامنه تغییرات دانسیته خشک از ۲۱/۱ تا ۲۱/۳ کیلو نیوتن بر متر



شکل ۳. نتایج آزمایش تراکم

#### ۴- روش ساخت و عمل آوری نمونه‌ها

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 با این درصد رطوبت علاوه بر صعوبت از تراکم مناسبی نیز برخوردار نبود، لذا از این درصد رطوبت صرف نظر شد. لذا کلیه نمونه‌های این تحقیق در هر دو نوع تراکم با درصدهای رطوبت ۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵ ساخته شدند.

عمل آوری نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش کششی غیر مستقیم در اتاق رطوبت در دمای ۲۳ درجه سلسیوس و در دوره‌های ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد ASTM D1632 انجام شد. در شکل ۴ تعدادی از نمونه‌های فشاری عمل آوری شده در این مطالعه آزمایشگاهی، مشاهده می‌شود.

در مجموع نمونه‌های این تحقیق با ۲ نوع تراکم، ۳ درصد مختلف سیمان، ۳ درصد مختلف رطوبت ساخت، ۵ دوره عمل آوری و با تعداد ۳ تکرار (مجموعاً تعداد ۲۷۰ نمونه استوانه‌ای فشاری و ۴۵ نمونه کششی غیر مستقیم) تهیه شده‌اند. برای شناسایی هر نمونه یک کد با فرمت کلی CxWyDz مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. در این کد C و W و D مویدهای حروف اول کلمات سیمان، آب و تراکم بوده و X نشان دهنده درصد سیمان، Y درصد رطوبت ساخت و Z مویدهای نوع تراکم می‌باشد (جدول ۲).

برای ساخت نمونه‌ها، از مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه در روش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) به ترتیب برابر با ۲۱/۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب (معادل با ۲/۱۷ گرم بر سانتیمتر مکعب) و ۶/۵ درصد و در روش تراکم ASTM D558، به ترتیب برابر با ۲۰/۷ کیلو نیوتن بر متر مکعب (معادل با ۲/۱۱ گرم بر سانتیمتر مکعب) و ۷/۵ درصد بهره گرفته شد (مطابق جدول ۱). نمونه‌های استوانه‌ای تثبیت شده با سیمان با قطر ۱۰/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی‌متر در ۳ لایه یا ۵ لایه (با توجه به مقدار انرژی تراکم مورد نیاز) با ضخامت یکسان برای هر لایه کوبیده شدند. در این پژوهش برای لحاظ نمودن اثرات تغییر رطوبت ساخت، یک درصد بالا و پایین رطوبت بهینه نیز در طرح اختلاط نمونه‌ها در نظر گرفته شد. لذا، در ساخت نمونه‌های قابل استفاده برای آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و کششی غیر مستقیم سه مقدار مختلف رطوبت ساخت یعنی رطوبت بهینه، رطوبت بهینه منهای ۱/۱، رطوبت بهینه مثبت ۱/۱ نیز در نظر گرفته شد. بنابراین در روش تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) با توجه به رطوبت بهینه ۶/۵ درصد، درصدهای رطوبت ۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵ به عنوان رطوبت‌های ساخت در نظر گرفته شد. همچنین 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

جدول ۱. مقادیر رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر بر حسب نوع تراکم

ASTM D1557		ASTM D558		نوع مخلوط
تراکم اصلاح شده		روش تراکم خاک سیمان		
$\gamma_d$ max kN/m <sup>3</sup>	درصد رطوبت بهینه	$\gamma_d$ max kN/m <sup>3</sup>	درصد رطوبت بهینه	مخلوط RAP و سیمان
۲۱/۳	۶/۵	۲۰/۷	۷/۵	

جدول ۲. تعداد طرح اختلاط نمونه‌های تک محوری و کششی غیرمستقیم

No.	Mix ID	Cement (%)	Test Symbol	Number of Samples	Water (%)	ASTM-D	No.	Mix ID	Cement (%)	Test Symbol	Number of Samples	Water (%)	ASTM-D
1	C4W5D7	4	U	1×5*×3°=15	5.5	1557	10	C4W5D8	4	U	1×5*×3°=15	5.5	558
2	C4W6D7	4	U I	1×5*×3°=15 1×5*×3°=15	6.5	1557	11	C4W6D8	4	U	1×5*×3°=15	6.5	558
3	C4W7D7	4	U	1×5*×3°=15	7.5	1557	12	C4W7D8	4	U	1×5*×3°=15	7.5	558
7	C5W5D7	5	U	1×5*×3°=15	5.5	1557	13	C5W5D8	5	U	1×5*×3°=15	5.5	558
8	C5W6D7	5	U I	1×5*×3°=15 1×5*×3°=15	6.5	1557	14	C5W6D8	5	U	1×5*×3°=15	6.5	558
9	C5W7D7	5	U	1×5*×3°=15	7.5	1557	15	C5W7D8	5	U	1×5*×3°=15	7.5	558
7	C6W5D7	6	U	1×5*×3°=15	5.5	1557	16	C5W5D8	6	U	1×5*×3°=15	5.5	558
8	C6W6D7	6	U I	1×5*×3°=15 1×5*×3°=15	6.5	1557	17	C5W6D8	6	U	1×5*×3°=15	6.5	558
9	C6W7D7	6	U	1×5*×3°=15	7.5	1557	18	C5W7D8	6	U	1×5*×3°=15	7.5	558
* Curing ° Replicate U: UCS I: ITS							UCS=270 Samples ITS=45 Samples						



شکل ۴. تعدادی از نمونه‌های CTB ساخته شده از مخلوط ۱۰۰ درصد RAP تثبیت شده با سیمان

## ۵- انجام آزمایش، بحث و تفسیر نتایج

و رطوبت‌های مختلف در سنین متفاوت می‌باشد که در ادامه ارائه شده است.

مطالعات آزمایشگاهی در این تحقیق شامل ارزیابی مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم با تراکم‌ها



### ۵-۱- مقاومت فشاری محدود نشده

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 از غرقاب و در حین غرقاب ۴ ساعته در داخل سطل آب نشان می‌دهد. همچنین در این شکل خشک نمودن سطح نمونه‌ها با حوله یا دستمال و تعدادی از نمونه‌های گسیخته شده پس از آزمایش نشان داده شده است. در شکل ۶ نیز تصویری از دپوی نمونه‌های جمع آوری شده پس از گسیختگی نشان داده شده است.

نمونه‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰/۱ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی‌متر در ۳ لایه یا ۵ لایه (مطابق با نوع تراکم) با ضخامت یکسان کوبیده شدند. نمونه‌های تثبیت شده پس از ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز عمل آوری 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 دستمال یا حوله، وزن و ابعاد هر نمونه اندازه‌گیری شده و سپس تحت بارگذاری تک محوری مطابق با استاندارد فوق



شکل ۵. غرقاب نمونه‌ها و خشک نمودن قبل از آزمایش و نمونه‌های گسیخته شده پس از بارگذاری فشاری



شکل ۶. تصویر از دپوی نمونه‌های گسیخته شده



بهینه رخ داده است. همین مطلب دقیقاً در مقدار سیمان ۵٪ نیز به چشم می‌خورد. به طوری که در حالت تراکم استاندارد بیشترین میزان مقاومت فشاری در رطوبت ۱٪ کمتر از بهینه ثبت شده اما در حالت تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت بهینه رخ داده است. اما با افزایش درصد سیمان مصرفی یعنی در مقدار سیمان ۶٪، در هر دو حالت تراکم استاندارد و اصلاح شده مقاومت ماکزیمم در نقطه رطوبت بهینه به وقوع پیوسته است.

مطالب فوق که در خصوص نمونه‌های ۷ روزه بیان گردید، در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه نیز صدق نموده به طوری که مطابق شکل ۹ برای نمونه‌های ۲۸ روزه و در حالت تراکم استاندارد (ASTM D558) و در مقدار سیمان ۴٪، حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی ۱٪ کمتر از بهینه رخ داده ولی در حالت تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی در رطوبت بهینه رخ داده است. همچنین در مقدار سیمان ۵٪ و در حالت تراکم استاندارد، بیشینه مقاومت فشاری در رطوبت ۱٪ کمتر از بهینه ثبت شده اما در حالت تراکم اصلاح شده در رطوبت بهینه رخ داده است.

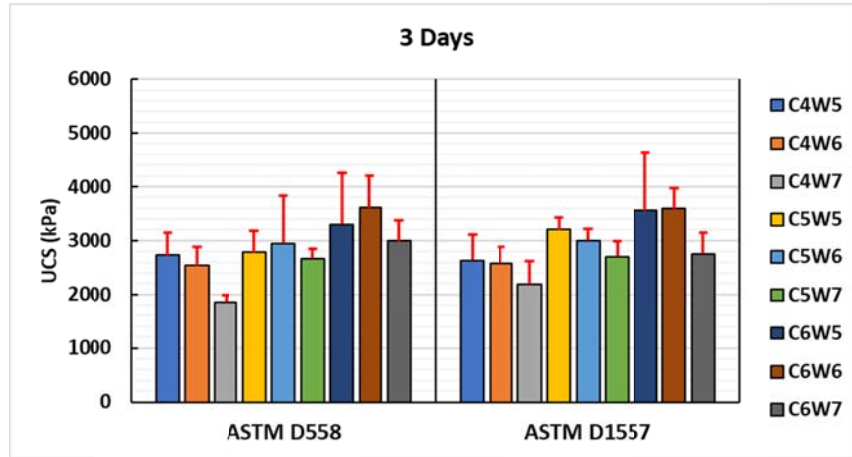
در اینجا نیز با افزایش درصد سیمان مصرفی یعنی در مقدار سیمان ۶٪، در هر دو حالت تراکم استاندارد و اصلاح شده مقاومت ماکزیمم در نقطه رطوبت بهینه به وقوع پیوسته است. روندهای فوق که در خصوص نمونه‌های ۷ روزه و ۲۸ روزه ذکر گردید، در مورد نمونه‌های ۵۶ روزه و ۹۰ روزه نیز وجود دارد و به ترتیب در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل رویت است.

اغلب مطالب فوق که در خصوص نمونه‌های ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه بیان گردید، در رابطه با نمونه‌های ۳ روزه صادق نیست و مطابق شکل ۷ در هر دو حالت تراکم استاندارد و اصلاح شده، رخداد مقاومت بیشینه در رطوبت بهینه نبوده است بلکه در رطوبت‌های کمتر از بهینه به وقوع پیوسته است. چنین به نظر می‌رسد که این تفاوت روند کسب مقاومت در نمونه‌های ۳ روزه مربوط به عدم تکمیل بلوغ نمونه‌ها در سن ۳ روز باشد. به عبارت دیگر بلوغ نمونه‌ها در مدت زمان ۳ روز کامل نشده و لذا روند کسب مقاومت متفاوت از دیگر سنین می‌باشد.

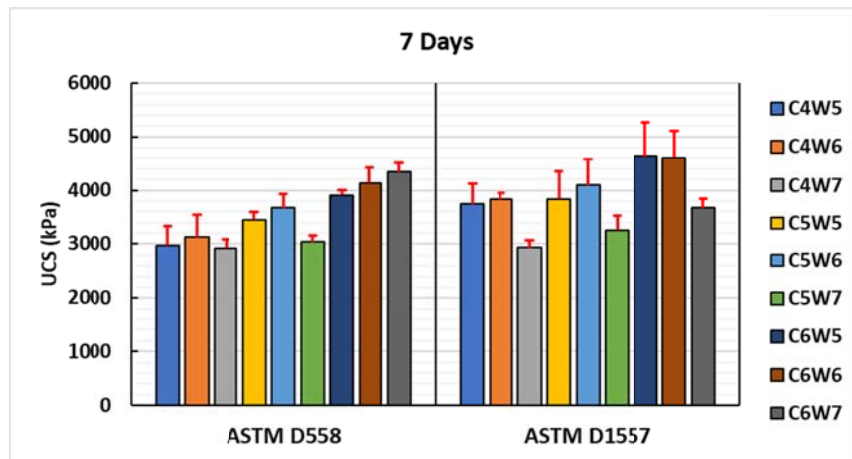
در اشکال ۷ تا ۱۱ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه تا ۹۰ روزه در دو نوع تراکم اصلاح شده و استاندارد بر حسب درصد سیمان و درصد رطوبت ارائه شده است. همچنین در اشکال ۱۲ تا ۱۶ مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های متناظر در دو وضعیت تراکمی مقایسه گردیده است. مطابق شکل ۷ در مورد نمونه‌های ۳ روزه می‌توان چنین بیان نمود که در یک رطوبت دلخواه ثابت با افزایش درصد سیمان، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. این نکته برای هر دو نوع تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) و استاندارد (ASTM D558) صدق می‌کند. این موضوع در مورد نمونه‌های با دوره‌های عمل‌آوری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه نیز مطابق با شکل‌های ۸ تا ۱۱ مشاهده می‌شود. همچنین این گفته برای هر رطوبت دلخواه یعنی هم برای رطوبت بهینه و هم رطوبت‌های کمتر و بیشتر از بهینه صادق بوده و در شکل‌های ۷ تا ۱۱ به روشنی قابل مشاهده می‌باشد. اما به طور بسیار محدود، چند مورد استثناء نیز به چشم می‌خورد. از جمله در مورد نمونه‌های ۹۰ روزه و در مقدار رطوبت ۵٪ روندی متفاوت به چشم می‌خورد به طوری که مطابق شکل ۱۱ با افزایش مقدار سیمان لزوماً افزایش مقاومت دیده نمی‌شود و تغییرات کوچکی دارد. به نظر می‌رسد این موارد محدود روند متفاوت را می‌توان ناشی از خطای آزمایش و تجهیزات قلمداد نمود.

اما عکس این مطلب درست نیست. یعنی در درصد سیمان ثابت، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه یا کاهش رطوبت از سمت تر به سمت بهینه، روند یکنوا در تغییر مقاومت به چشم نمی‌خورد و رفتار مقاومت فشاری نمونه بر حسب سطح انرژی تراکم، متفاوت می‌باشد. در یک بیان کلی می‌توان گفت که در شرایط تراکم استاندارد، مقاومت ماکزیمم اغلب در رطوبت بهینه رخ نداده است و بسته به درصد سیمان مصرفی ممکن است مقاومت ماکزیمم در رطوبت بهینه یا کمتر از آن رخ دهد. اما در شرایط تراکم اصلاح شده، مقاومت ماکزیمم اغلب در رطوبت بهینه به وقوع پیوسته است.

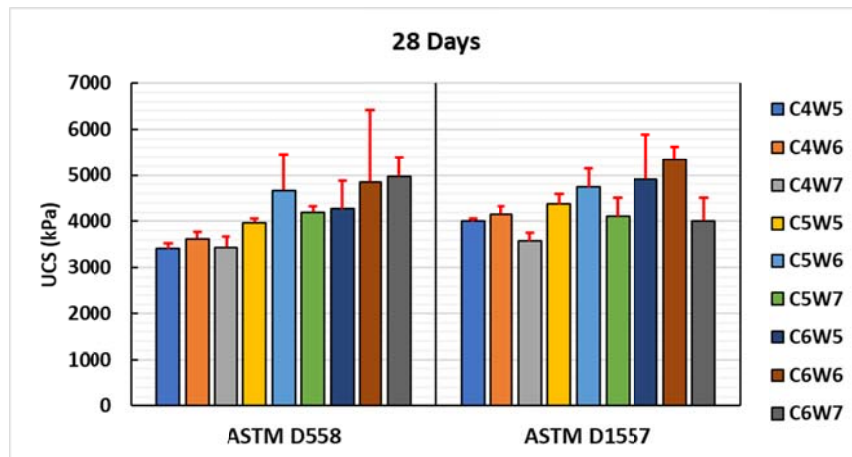
مطابق شکل ۸ برای نمونه‌های ۷ روزه و در حالت تراکم استاندارد (ASTM D558) و در مقدار سیمان ۴٪، حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی ۱٪ کمتر از بهینه رخ داده ولی در حالت تراکم اصلاح شده (ASTM D1557) حداکثر مقاومت فشاری در رطوبت ۶/۵٪ یعنی در رطوبت



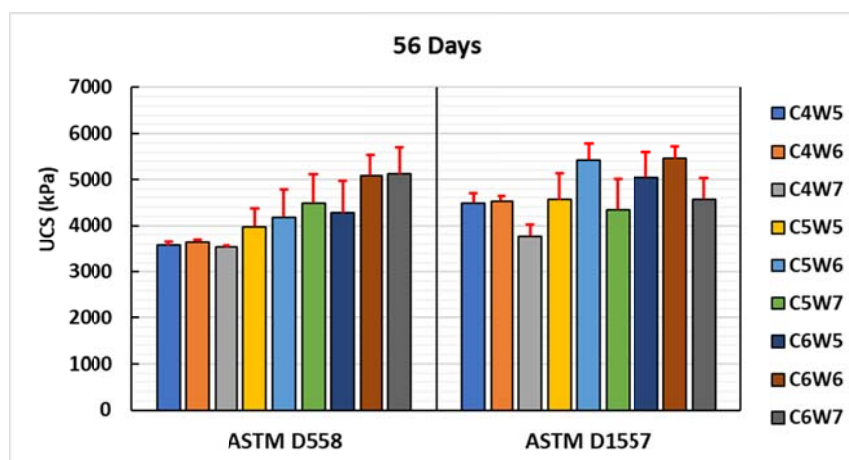
شکل ۷. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه بر حسب درصد رطوبت و درصد سیمان



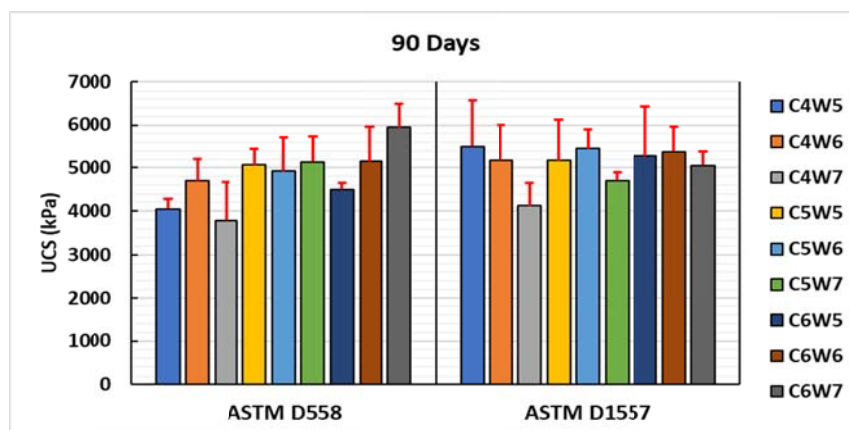
شکل ۸. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بر حسب درصد سیمان



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



شکل ۱۰. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه بر حسب درصد سیمان

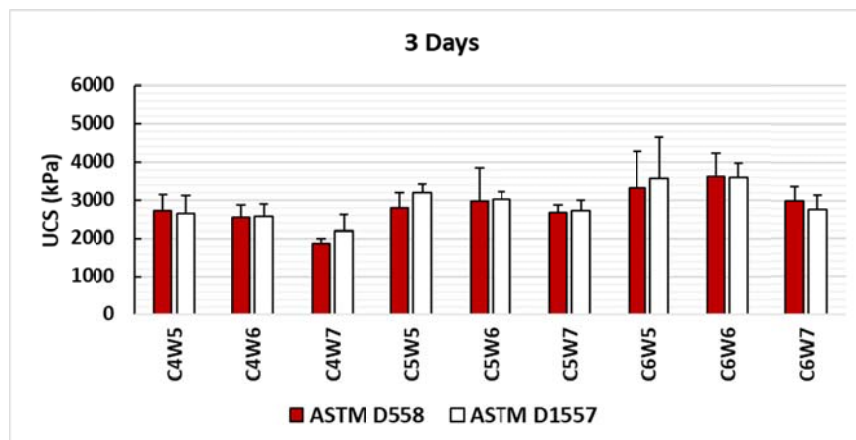


شکل ۱۱. مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه بر حسب درصد سیمان

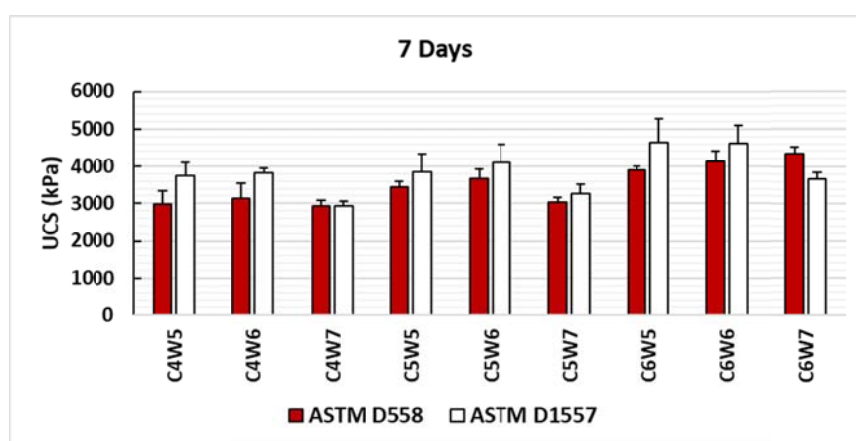
مخلوط‌ها بجز مخلوط‌های با ۷/۵ درصد رطوبت، مقادیر مقاومت متناظر با تراکم اصلاح شده بزرگتر از مقادیر متناظر با تراکم استاندارد هستند. به طور کلی می‌توان گفت که در مورد نمونه‌های ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه تنها طرح اختلاط‌های C6W7 و C5W7 در حالت تراکم اصلاح شده مقاومت کمتری نسبت به استاندارد ارائه می‌دهند. در طرح اختلاط C4W7 که مقدار سیمان آن کمتر است، مقاومت فشاری در حالت تراکم اصلاح شده بزرگتر از حالت تراکم استاندارد می‌باشد هر چند میزان اختلاف مقاومتها در این حالت کمتر از C4W6 و C4W5 است. روندهای فوق که در خصوص نمونه‌های با زمان عمل آوری ۷ تا ۹۰ روزه بیان شد در مورد نمونه‌های ۳ روزه با توجه به کامل نبودن بلوغ، اندکی متفاوت بوده و با مراجعه به شکل ۱۲ می‌توان چنین استنباط نمود که اختلاف مقادیر مقاومت در دو حالت تراکم اصلاح شده و استاندارد، کمتر از دیگر سنین عمل آوری می‌باشد.

در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ مقایسه مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های متناظر در دو وضعیت تراکمی ارائه شده است. مطابق شکل ۱۳ در مورد نمونه‌های ۷ روزه مشاهده می‌شود که در تمامی طرح اختلاطها به جز طرح اختلاط C6W7 مقادیر مقاومت مربوط به انرژی تراکمی بالاتر یعنی تراکم اصلاح شده، بزرگتر می‌باشد.

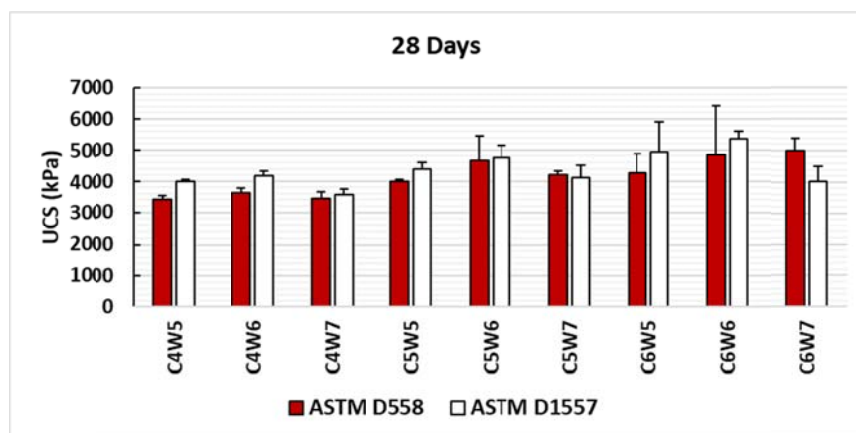
همچنین مطابق شکل ۱۴ در مورد نمونه‌های ۲۸ روزه مشاهده می‌شود که در تمامی طرح اختلاطها به جز طرح اختلاط C5W7 و C6W7 مقادیر مقاومت مربوط به حالت تراکم اصلاح شده، بزرگتر است. عین این مطلب در مورد نمونه‌های ۵۶ روزه و ۹۰ روزه نیز صادق بوده به طوری که مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۶ در تمامی طرح اختلاطها به جز طرح اختلاط C5W7 و C6W7 مقادیر مقاومت مربوط به حالت تراکم اصلاح شده، بزرگتر است. به بیانی دیگر در نمونه‌های با زمان عمل آوری ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه در تمامی



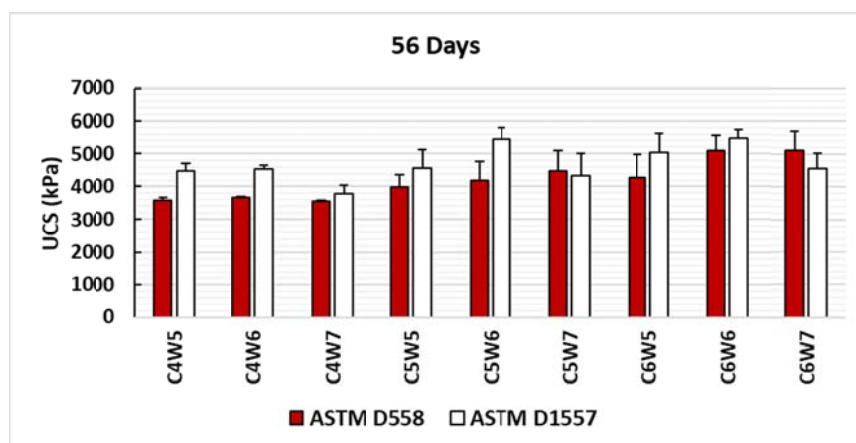
شکل ۱۲. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳ روزه بر حسب درصد رطوبت



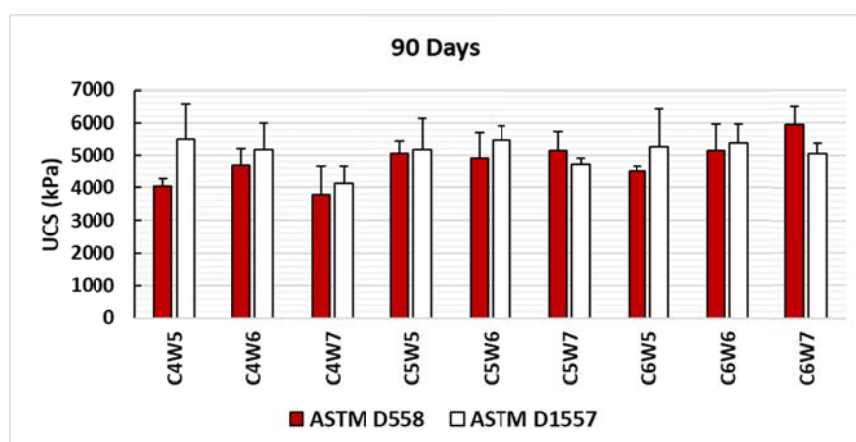
شکل ۱۳. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه بر حسب درصد رطوبت



شکل ۱۴. مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه بر حسب درصد رطوبت



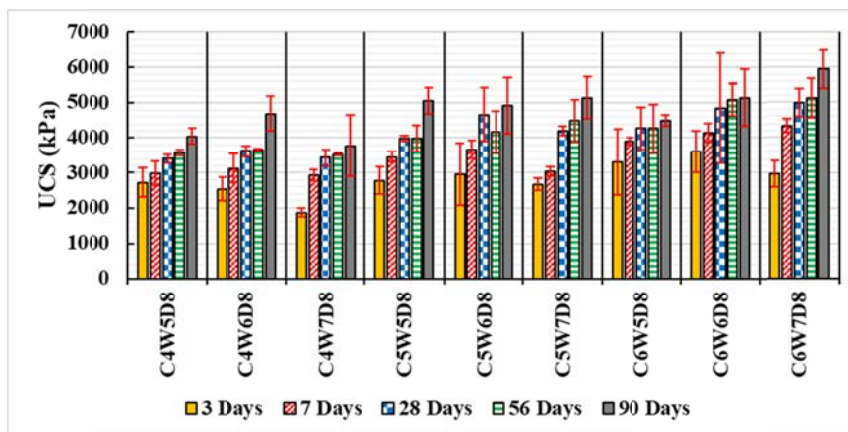
شکل ۱۵. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه بر حسب درصد رطوبت



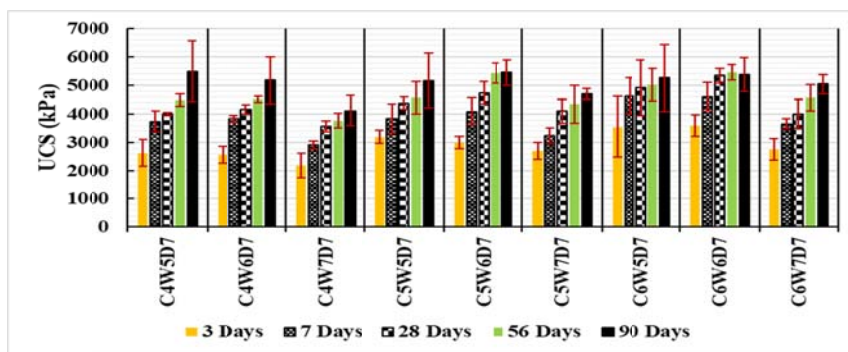
شکل ۱۶. مقاومت فشاری نمونه‌های ۹۰ روزه بر حسب درصد رطوبت

شکل ۱۸ حداقل مقاومت فشاری ۷ روزه لازم که بیانگر مقاومت ۲/۱ مگا پاسکال (۲۱۰۰ کیلو پاسکال) می‌باشد و توسط برخی دپارتمان‌های حمل و نقل و همچنین انجمن سیمان پرتلند پیشنهاد گردیده است (Morian et al., 2012; Syed, 2007). توسط یک خط افقی مشخص شده است. همان‌طور که پیش از این نیز بیان گردید، حداقل مقاومت فشاری بر اساس دوام مخلوط در برابر تر و خشک شدن یا ذوب و یخ‌زدن و همچنین کربناته شدن پیشنهاد شده است. با توجه به شکل ۱۸ مشخص می‌شود که تمامی طرح اختلاط‌های مورد بررسی در این مطالعه مقاومت ۷ روزه بالاتر از حد نصاب فوق‌الاشاره را دارا می‌باشند.

همچنین در مقایسه مقادیر مقاومت فشاری ۷ روزه مطالعه حاضر و مقادیر مقاومت فشاری ۷ روزه حاصل از مطالعه یوان و همکاران (۲۰۱۰) مشخص گردید که مقادیر مطالعه حاضر از حدود حداقل ۱۵٪ تا حداکثر ۸۰٪ نسبت به آن مطالعه افزایش داشته‌اند. لازم به ذکر است که جنس و دانه‌بندی RAP مورد استفاده در دو مطالعه متفاوت بوده است. در شکل ۱۷ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف بر حسب دوره عمل‌آوری در هر دو نوع تراکم نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۷ 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

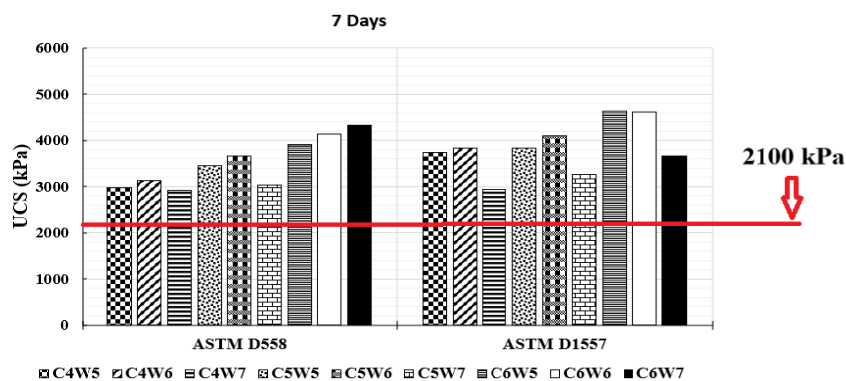


(الف)



(ب)

شکل ۱۷. مقاومت UCS بر حسب دوره عمل آوری (الف) ASTM D558 (ب) ASTM D1557

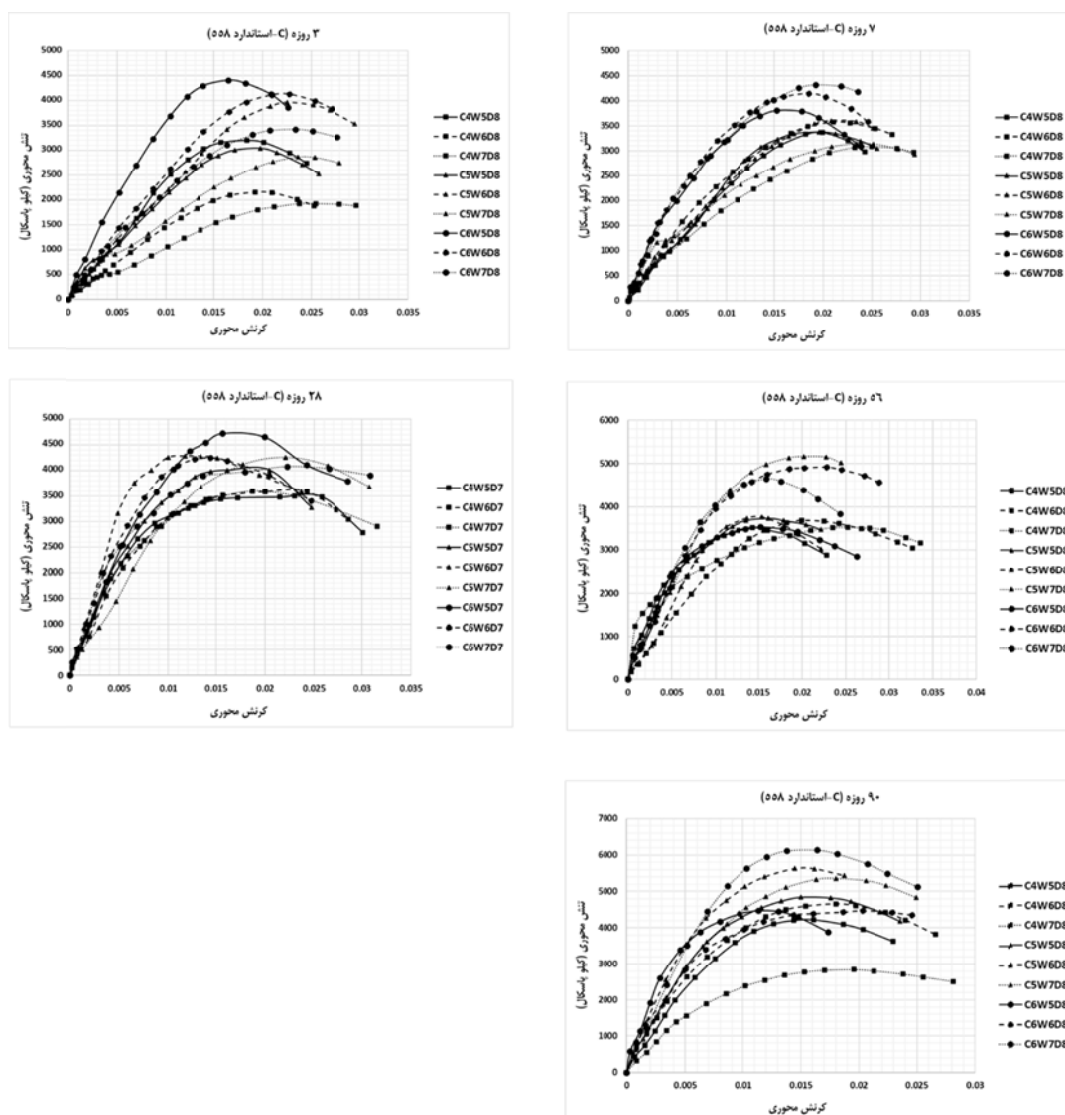


شکل ۱۸. حد نصاب حداقل UCS نمونه‌های ۷ روزه

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 مقدار مدول الاستیسیته را در پی دارد.

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمودار تنش- کرنش نمونه‌های مختلف برای سنین عمل آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ 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.



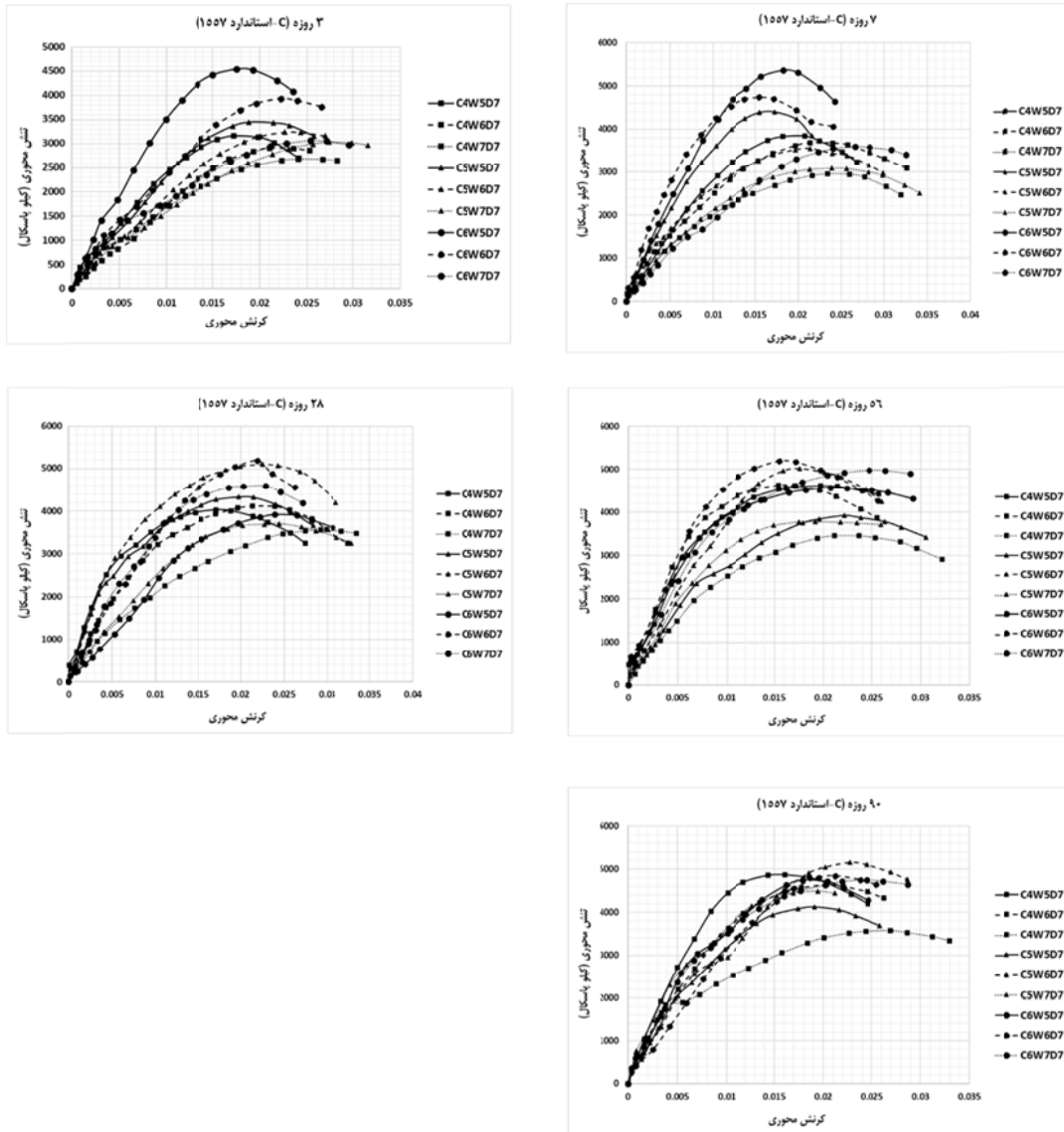


شکل ۱۹. نمودارهای تنش-گرنش نمونه‌های ۳ تا ۹۰ روزه با تراکم ۵۵۸

## ۲-۵- مقاومت کششی غیر مستقیم

درصد سیمان و مدت عمل‌آوری بر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های RAP در شکل ۲۳ ارائه شده است. مطابق شکل با افزایش درصد سیمان و سن نمونه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش یافته است. همچنین مقایسه مقاومت کششی غیر مستقیم و فشاری نمونه‌های RAP در شکل ۲۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲۴ به طور کلی می‌توان گفت که مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در حدود ۱۴ تا ۱۹ درصد مقاومت فشاری آنها می‌باشد. در جدول ۳ نیز این نتایج ارائه شده است.

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C496 انجام پذیرفت. همانند آزمایش تک محوری، نمونه‌های نظیر با قطر ۱۰/۱ سانتی متر و ارتفاع ۱۱/۶ سانتی‌متر در ۵ لایه با ضخامت یکسان کوبیده شدند. این آزمایش برای زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه برای درصد رطوبت بهینه و فقط برای شرایط ۱۵۵۷ و با تعداد ۳ تکرار انجام گرفت. بنابراین تعداد نمونه‌ها در این قسمت ۴۵ نمونه می‌باشد. در شکل ۲۱ تصویر یک نمونه در قبل و پس از گسیختگی در آزمایش کششی غیر مستقیم ارائه شده است. شکل ۲۲ نیز تعدادی از نمونه‌ها را در وضعیت قبل و پس از گسیختگی نشان می‌دهد. نتایج تأثیر



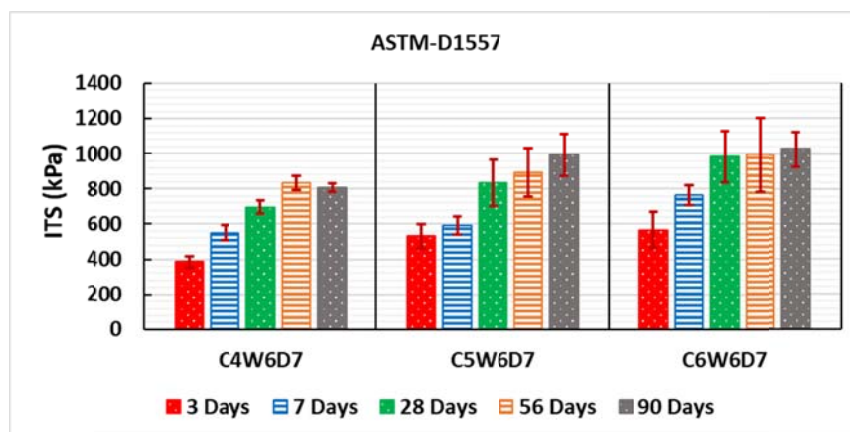
شکل ۲۰. نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های ۳ تا ۹۰ روزه با تراکم ۱۵۵۷



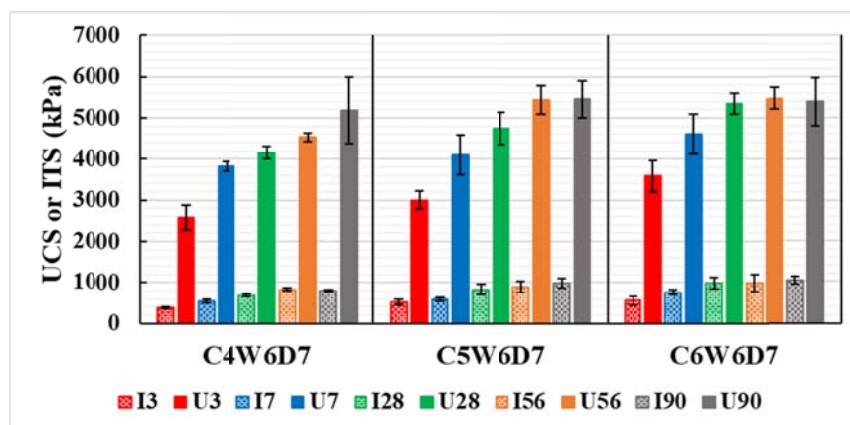
شکل ۲۱. نمونه قیل و پس از بارگذاری در آزمایش کششی غیر مستقیم



شکل ۲۲. نمونه‌های گسیخته شده در آزمایش کششی غیرمستقیم



شکل ۲۳. تأثیر درصد سیمان و مدت عمل آوری بر ITS



شکل ۲۴. مقایسه UCS و ITS

جدول ۳. نسبت مقاومت کششی غیر مستقیم به مقاومت فشاری محدود نشده

Sample Name	Stress ratio: ITS/UCS				
	3 days	7 days	28 days	56 days	90 days
C4	0.15	0.14	0.17	0.18	0.16
C5	0.18	0.14	0.18	0.16	0.18
C6	0.16	0.17	0.18	0.18	0.19

تمرکز دارد. نتایج بدست آمده از این مطالعه آزمایشگاهی را می‌توان به صورت ذیل برشمرد:

به طور کلی در یک رطوبت ثابت، با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدود نشده نیز افزایش می‌یابد. این نکته تقریباً در مورد تمامی نمونه‌های با دوره‌های عمل آوری ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه و در هر سطح انرژی تراکم، مصداق دارد. همچنین این گفته برای هر رطوبت دلخواه یعنی هم برای رطوبت بهینه و هم رطوبت‌های کمتر و بیشتر از بهینه در هر دو روش تراکم صادق است.

در درصد سیمان ثابت، با افزایش رطوبت از سمت خشک به سمت بهینه یا کاهش رطوبت از سمت تر به سمت بهینه، روند یکنوا در تغییر مقاومت به چشم نمی‌خورد و رفتار مقاومت فشاری نمونه بر حسب سطح انرژی تراکم، متفاوت می‌باشد. در یک بیان کلی می‌توان گفت که در شرایط تراکم استاندارد، مقاومت ماکزیمم اغلب در رطوبت بهینه رخ نداده است و بسته به درصد سیمان مصرفی ممکن است مقاومت ماکزیمم در رطوبت بهینه یا کمتر از آن رخ دهد. اما در شرایط تراکم اصلاح شده، مقاومت ماکزیمم اغلب در رطوبت بهینه به وقوع پیوسته است.

برای تمامی طرح اختلاط‌ها با افزایش زمان عمل آوری، مقاومت فشاری محدود نشده و مقاومت کششی غیرمستقیم افزایش یافته است. هر چند نرخ این افزایش، در همه نمونه‌ها یکسان نیست.

تمامی طرح اختلاط‌های این مطالعه دارای مقاومت ۷ روزه بالاتر از حد نصاب ۲/۱ مگا پاسکال (۲۱۰۰ کیلو پاسکال) می‌باشند. همان طور که قبلاً بیان گردید، این حداقل مقاومت فشاری، بر اساس دوام مخلوط در برابر ذوب و یخ زدن یا تر و خشک شدن و همچنین کربناته شدن پیشنهاد گردیده است.

در نمودار تنش-کرنش، با افزایش مقدار سیمان شیب قسمت ابتدای نمودار نیز افزایش یافته است. به بیان دیگر می‌توان چنین نتیجه گرفت که صرف‌نظر از طول دوره عمل آوری نمونه‌ها،

با توجه به نتایج می‌توان چنین بیان نمود که به تناسب نیاز می‌توان از RAP تثبیت شده با سیمان به عنوان لایه اساس جاده و باند فرودگاه استفاده نمود. به بیانی دیگر علاوه بر روند رایج استفاده از RAP در تثبیت تمام عمق<sup>۱۲</sup> (FDR) به نظر می‌رسد که از ۱۰۰ درصد RAP تثبیت شده با سیمان نیز می‌توان در اجرای لایه اساس بهره گرفت که فواید زیست محیطی و اقتصادی فراوانی در پی خواهد داشت. در طراحی لایه اساس حاوی RAP لازم است که بر اساس توصیه‌ها، حداقل UCS برای برخورداری از دوام مناسب در نظر گرفته شود. لذا بررسی و مطالعه دوام لایه اساس حاوی ۱۰۰ درصد RAP در برابر شرایط جوی و سیکل‌های ذوب و یخ و تر و خشک از جمله موارد ضروری می‌باشد. ضمن اینکه بررسی و ارزیابی پارامترهای دینامیکی همچون مدول برجهندگی<sup>۱۳</sup>، نسبت میرایی<sup>۱۴</sup>، مدول برشی<sup>۱۵</sup> و تغییر شکل‌های تجمعی ماندگار<sup>۱۶</sup> نیز از موارد ضروری است. ارزیابی پارامترهای دینامیکی با در نظر گرفتن عواملی مانند ناهمسانی تششی و فرکانس بارگذاری از اهم موارد مورد بررسی در مطالعات و تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله مقاومت فشاری و کششی و رفتار تنش-کرنش مخلوط‌های CTB حاوی ۱۰۰ درصد RAP به عنوان لایه اساس روسازی بررسی و ارزیابی شده است. در رابطه با استفاده از RAP به همراه مصالح بکر به حالت تثبیت شده در لایه اساس مطالعات گوناگونی انجام شده است. اما همانطور که می‌دانیم، مخلوط RAP با مصالح دانه‌ای طبیعی، باز هم مواد تجدیدناپذیر را کاهش می‌دهد و چنانچه بتوان امکان استفاده از ۱۰۰ درصد را فراهم نمود، از نظر اقتصادی و زیست محیطی فواید فراوانی دارد. در مقاله حاضر، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ۱۰۰ درصد RAP تثبیت شده با سیمان پرتلند تیپ ۲

دینامیکی لایه اساس حاوی RAP ضروری به نظر می‌رسد. علاوه بر پارامتر مدول برجهندگی پارامترهای دینامیکی دیگری مانند نسبت میرایی، مدول برشی و کرنش تجمعی ماندگار نیز لازم است که بررسی گردد. تأثیر عواملی مانند ناهمسانی تنشی و فرکانس بارگذاری بر پارامترهای دینامیکی فوق‌الذکر از موارد مهم مورد نظر در مطالعات و تحلیل‌های دینامیکی می‌باشد.

با افزایش مقدار سیمان، مقدار مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد.

- در طراحی لایه اساس حاوی ۱۰۰ درصد RAP لازم است که بر اساس معیار حداقلی مقاومت فشاری محدود نشده جهت برخورداری از دوام مناسب اقدام نمود. اما کماکان لازم است پارامترهای دینامیکی همچون مدول برجهندگی مد نظر قرار گیرد. بنابراین انجام مطالعات بیشتری درخصوص عملکرد

## ۷- سپاسگزاری

داده‌های این مقاله از پروژه پژوهشی با عنوان "رفتار دینامیکی و مونوتونیک پساویکی مصالح تراشه آسفالت (RAP) به‌عنوان لایه اساس روسازی و ارائه پیش‌نویس راهنمای استفاده از RAP" با شماره ۱۳۶۲۱-۲۲-۰۰ مورخ ۱۴۰۰/۸/۱۵ در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی استخراج گردیده است و نتایج ارائه شده، بخشی از نتایج آن طرح پژوهشی می‌باشد. لذا، بدین وسیله از حمایت‌های آن مرکز تشکر و قدردانی می‌گردد.

## ۸- پی‌نوشت‌ها

1. Cement Treated Base
2. Chemical Agent
3. Reclaimed Asphalt Pavement
4. Virgin Aggregate
5. Sustainability
6. Unconfined Compressive Strength (UCS)
7. Indirect Tensile Strength (ITS)
8. MDOT: Mississippi Department of Transportation
9. Optimum Moisture Content (OMC)
10. Maximum Dry Density
11. Curing
12. Full-Depth Reclamation (FDR)
13. Resilient Modulus
14. Damping Ratio
15. Shear Modulus
16. Accumulated Permanent Strain

## ۹- مراجع

-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.

-Euch Khay, S.E., Euch Ben Said, S.E., Loulizi, V., & Neji, J. (2014). Laboratory Investigation of Cement-Treated Reclaimed Asphalt Pavement Material, *J. Mater. Civ. Eng.* 27 (6) 04014192

-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, 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, 165-174.

-Isola, M., Betti, G., Marradi, A., Tebaldi, G. (2013). Evaluation of cement treated mixtures with high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 48, 238-247.

-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), 289-306.

-Morian, D.A., Solaimanian, M., Scheetz, B., & Jahangirnejad S. (2012). Developing Standards and Specifications for Full Depth Pavement Reclamation, Commonwealth of

-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, 1198-1105. doi:10.1080/10298436.2017.1388508.

**doi:10.1016/j.sandf.2018.02.017**

-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.

Xuan, D.X., Houben, L.J.M. Molenaar, A.A.A., & Shui, Z.H. (2012). Mechanical properties of cement-treated aggregate material - A review, *Mater Des.* 33, 496–502.

-Yuan, D., Nazarian, S., Hoyos, L. R. & 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.

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.

-Suddeepong, A., Intra, A., Horpibulsuk, S., Suksiripattanapong, C., Arulrajah, A., & Shen, JS. (2018). Durability against wettingdrying cycles for cement-stabilized reclaimed asphalt pavement blended with crushed rock. *Soils Found.* 58, 333–343.



# Laboratory Evaluation to Investigate the Effect of Compaction Energy and Moisture Content on the Mechanical Behavior of the Base Layer Containing Reclaimed Asphalt Pavement

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

*Ahmad Reza Mahboubi Ardakani, Associate Professor, Civil, Water and Environmental Engineering Department, 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: June 2023- Accepted: November 2023

## **ABSTRACT**

This study has evaluated the unconfined compressive strength (UCS) of the cement-treated base (CTB) containing 100% reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregates using different-age samples. The samples were prepared with standard and modified compaction energy based on ASTM D558 and ASTM D1557. Three cement contents of 4, 5, and 6 percent were added and the samples were cured for 3, 7, 28, 56, and 90 days after compaction. 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 increase visibly. Next, indirect tensile strength (ITS) test was performed on the selected samples (mentioned ages) and the results showed that the curing period and cement directly affected and increased the tensile strength. Results indicated that the curing period and the compaction method had the greatest and least effect on the UCS, respectively. Finally, the UCS and ITS results showed that it is possible to use 100% RAP aggregates in the CTB layer.

**Keywords:** Reclaimed Asphalt Pavement, Cement Treated Base, Cement Treated RAP Base Mix, Unconfined Compressive Strength, Indirect Tensile Strength