

## تعیین طرح اختلاط مناسب مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت

مصطفی آدرسی\*، دکترای راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ابوالفضل حسنی، استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران  
ابوالفضل خویشداری، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد  
مریم زینی، دانشجوی دکتری حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: Mostafa.adressi@modares.ac.ir

دریافت: ۹۴/۱۰/۲۸ - پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۸

### چکیده

استفاده از مواد بازیابی شده آسفالتی در صنعت روسازی، به دلیل مقرون به صرفه بودن، در چند دهه اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این مطالعه آزمایشگاهی، ارائه روند طرح اختلاط مناسب شامل تعیین حدود دانه‌بندی مناسب و فرمول‌بندی میزان رطوبت لازم تحت روش تراکمی استاندارد اصلاح شده و در نهایت بررسی تأثیر تراشه آسفالت بر مقاومت فشاری و تعیین مقدار بهینه تراش آسفالت و سیمان با حداقل هزینه اجرا می‌باشد. بدین منظور، در ابتدا خصوصیات دانه‌بندی مصالح مختلف و تراشه آسفالت و دانه‌بندی مناسب انتخاب گردید. برای بررسی خصوصیات تراکمی و تعیین رطوبت بهینه، ۱۲ طرح اختلاط مختلف، ترکیبی از چهار مقدار تراشه آسفالت (صفر، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد) و مقادیر متفاوت سیمان (۳، ۵ و ۷ درصد) ساخته شد. سپس، نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتی‌متر به منظور بررسی خصوصیات مقاومت فشاری تک‌محوری در درصد رطوبت بهینه ساخته شدند. نتایج نشان داد که حدود دانه‌بندی نشریه ۱۰۱ کشور با توجه به جنبه‌های مختلف اجرایی و آشنایی پیمانکاران و ادارات راه، به‌عنوان حدود مناسب معرفی می‌شود. همچنین، نتایج مدل‌سازی میزان رطوبت بهینه نشان داد که با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه افزایش و به تبع آن چگالی خشک مخلوط کاهش می‌یابد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه مرطوب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس مشخص کرد که با افزایش درصد تراشه آسفالت، مقاومت نمونه‌های تثبیت شده کاهش می‌یابد. همچنین، ۶۸٪ تراشه آسفالت به همراه ۵٪ سیمان، به‌صرفه‌ترین طرح اختلاط مصالح، با توجه به محدودیت مقاومت فشاری ۳/۸ مگاپاسکال، می‌باشد. در مجموع، می‌توان انتظار داشت که به‌جای استفاده از کوبش نمونه‌ها با استفاده از چکش استاندارد، می‌توان از تراکم لرزه‌ای با زمان تقریبی ۶۰ ثانیه نیز استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تراشه آسفالت، دانه‌بندی، رطوبت بهینه، مقاومت فشاری، تراکم لرزه‌ای

## ۱. مقدمه

تراکم این مصالح، استانداردهای حاکم بر این روند و همچنین تعیین طرح اختلاط لایه مد نظر شامل تعیین مقدار تراشه آسفالت، ماده تثبیت کننده مانند سیمان و آب، با هزینه اجرای مناسب می باشد. مقاله حاضر سعی در بررسی سؤال مذکور و ارائه پاسخ مناسب به آن دارد. با توجه به جدید بودن استفاده از تراشه آسفالت در تثبیت لایه اساس به همراه سیمان، لذا تحقیق حاضر در مورد طرح اختلاط و ارائه استانداردهای مرتبط در این رابطه، در فرایند اجرا بحث می کند. نوآوری تحقیق حاضر را می توان در لحاظ اثر همزمان عملکرد و مقاومت مخلوط های تثبیت شده و قیمت آن ها دانست که به نظر می رسد کمتر مورد بررسی محققین قرار گرفته است. با کمک چنین رویکردی می توان طرح اختلاط بهینه را از هر دو لحاظ قیمت و عملکرد انتخاب نمود.

## ۲. مرور تحقیقات گذشته

تراشیدن و شکستن سنگ دانه ها می تواند باعث دانه بندی جدید تراشه آسفالت شود که عمدتاً ریزتر و چگال تر از دانه بندی سنگ دانه های طبیعی است. دانه بندی تراشه آسفالت در طول عملیات تراشیدن تابعی از درشت ترین اندازه سنگ دانه و دانه بندی سنگ دانه ها در روسازی آسفالتی که تراشه آسفالت از آن حاصل می شود و همچنین نحوه و سرعت عملیات تراش می باشد. به علاوه، تراکم مصالح تراشه آسفالت خرد یا تراشیده شده، به ویژه برای ذرات با اندازه بیش از ۰/۵ اینچ، ممکن است باعث تغییر دانه بندی مصالح تراشه آسفالت شود (یوان و همکاران، ۲۰۱۰). بر اساس معیار FHWA، حداکثر بُعد سنگ دانه تراشه آسفالتی از ۱/۵ اینچ (۳۸ میلی متر) تا ۳/۵ اینچ (۸۸/۹ میلی متر) در موارد مختلف، برحسب کاربرد، معرفی شده است (مؤسسه FHWA، نشریه Rap-131، ۲۰۱۰). تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با دانه بندی پیشنهادی اساس حاوی

امروزه، با توجه به هزینه ی زیاد ساخت روسازی های نو با مصالح جدید و کمبود این مصالح، استفاده از مصالح روسازی های مضمحل شده، به منظور عملیات ساخت و بهسازی، از جایگاه والایی برخوردار می باشد. علی رغم این که نتایج تحقیقات انجام شده حاکی از انجام پروژه های باز یافت از سال ۱۹۱۵ به این طرف می باشد (NAPA، ۱۹۷۸)، با این حال، اولین تلاش های موفقیت آمیز برای برداشت و استفاده مجدد از مصالح روسازی قدیمی در سال ۱۹۷۴ در ایالات نوادا و تگزاس انجام شد (TRB، ۱۹۷۸).

به طور کلی، بر اساس مطالعات انجام شده توسط مؤسسه FHWA، پنج نوع عملیات باز یافت روسازی شامل: ۱) تراش کنترل شده و سطحی روسازی آسفالتی<sup>۱</sup>، باز یافت گرم<sup>۲</sup>، باز یافت گرم درجا<sup>۳</sup>، باز یافت سرد<sup>۴</sup> و احیاسازی عمقی روسازی<sup>۵</sup> تعریف می گردد. در حال حاضر در کشور، با توجه به توان فنی و امکانات اجرایی بیشتر، باز یافت سرد در دستور کار مدیران قرار گرفته است. یکی از چالش های پیش رو، استفاده از تراشه های آسفالت به منظور مصالح اولیه مناسب در احداث لایه روسازی است. به نحوی که هزینه اجرایی را تا حد ممکن بتوان کاهش داد.

در ایران، به دلیل توسعه محدود کارخانه های آسفالت در استفاده از تراشه آسفالت برای تهیه مخلوط های آسفالتی جدید، تمایل ادارات راه بیشتر به استفاده از مصالح تراشه آسفالت در جسم اساس راه، به منظور بهبود خواص عملکردی لایه اساس و افزایش توان باربری آن، می باشد. در این راستا، سؤال مهم و اساسی، تعیین محدوده مناسب دانه بندی مصالح اساس، طریقه

<sup>1</sup> - Cold Planning (CP)

<sup>2</sup> - Hot Recycling (HR)

<sup>3</sup> - Hot-In place-Recycling (HIR)

<sup>4</sup> - Cold Recycling (CR)

<sup>5</sup> - Full Depth Reclamation (FDR)

همچنین، مطابق با مطالعات انجام شده برای ۱۶ بخش درون ایالتی تگزاس مشاهده شده است که بسته به بخش مورد نظر، مقدار حداکثر استفاده از مصالح تراشه آسفالتی تغییر می‌کند. به طوری که تحقیقات نشان داده است که حدود ۹۴٪ از بخش‌های مختلف این ایالت مقدار ۴۴٪ و ۵۰٪ تراشه آسفالت را به عنوان مقادیر حداکثر مجاز در مخلوط‌ها دانسته‌اند (یوان و همکاران، ۲۰۱۰). برخی از تحقیقات دیگر نیز مقدار حداکثر استفاده از تراشه آسفالت در مخلوط را برابر با ۵۰٪ دانسته‌اند (مک‌گرا، ۲۰۰۷؛ تولبرت، ۲۰۱۴).

از آنجایی که مصالح تراشه آسفالتی به دلیل داشتن فیلم قیر روی خود، نسبت به مصالح طبیعی تازه، متفاوت می‌باشند، میزان تراکم و رطوبت بهینه تراکم این مصالح در کنار مصالح اساس دارای اهمیت به‌سزایی می‌باشد. در این خصوص، بررسی‌های انجام شده توسط محققین حاکی از آن است که افزایش مصالح تراشه آسفالت به قشر اساس موجب کاهش میزان دانسیته و افزایش درصد رطوبت بهینه مخلوط‌های اساس حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت می‌گردد (گاتریه و همکاران، ۲۰۰۵؛ هنکس و مگنی، ۱۹۸۹؛ مک‌گرا، ۲۰۰۷؛ سینیور و همکاران، ۱۹۹۴؛ طاها و همکاران، ۱۹۹۹؛ تولبرت، ۲۰۱۴؛ وو، ۲۰۱۱؛ یوان و همکاران، ۲۰۱۰).

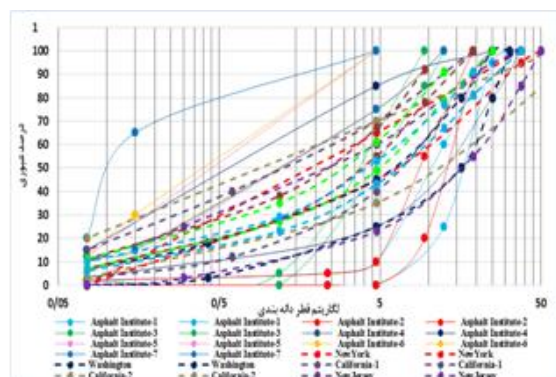
همچنین، بررسی محققین حاکی از آن است که در یک مقدار ثابتی از افزودن مصالح تراشه آسفالت به قشر اساس، با افزایش درصد سیمان، میزان دانسیته مخلوط تثبیت شده افزایش می‌یابد (یوان و همکاران، ۲۰۱۰؛ تولبرت، ۲۰۱۴).

از دیگر خصوصیات مکانیکی مصالح قشر اساس حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت، تغییرات مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های تثبیت شده با سیمان نسبت به افزودن مقادیر مختلف تراشه آسفالت می‌باشد. اهمیت این موضوع از آنجایی نشأت می‌گیرد که به‌طور

مقادیر زیاد تراشه آسفالت و درصد بهینه تراشه آسفالت در لایه اساس انجام شده است. مؤسسه انجمن آسفالت<sup>۱</sup>، دانه‌بندی باز (۱ تا ۳) و پیوسته (۴ الی ۷) را برای مخلوط تراشه آسفالت و مصالح سنگدانه‌ای را به دو صورت باز و پیوسته مطابق با بخشی از نمودار ترسیمی شکل ۱ در نظر می‌گیرد (شیخ‌سندیانی، ۱۳۸۵).

در شکل ۱، خلاصه‌ای از حدود دانه‌بندی مخلوط تراشه آسفالت و اساس موجود برای برخی ادارات حمل‌ونقل آمریکا آمده است. منحنی‌های دانه‌بندی داده شده نسبت به یکدیگر تغییرات شدیدی دارند (دپارتمان حمل و نقل ایالت واشنگتن، ۲۰۱۴؛ ادیل، ۲۰۱۱؛ مک‌گرا، ۲۰۰۷).

تاکنون تأثیر مقادیر مختلفی از تراشه آسفالت در بهبود خصوصیات آسفالت داغ مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده، زمانی که میزان تراشه آسفالت در مخلوط‌های مختلف از ۲۵٪ بیشتر شود، تأثیر آن بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها و همچنین هزینه تمام شده مربوط به آن قابل توجه است و از این رو می‌توان استفاده بیشتر از ۲۵٪ از مصالح تراشه آسفالت در مخلوط‌های آسفالتی را زیاد دانست (نیوکمب و همکاران، ۲۰۰۷).

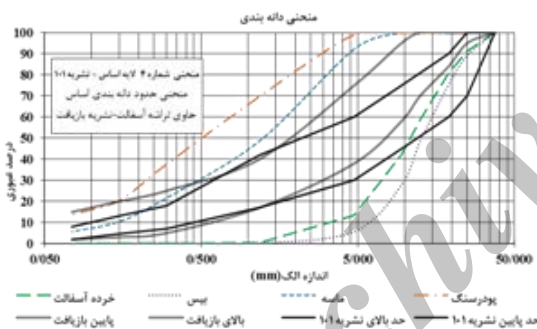


شکل ۱. حدود دانه‌بندی ترکیب تراشه آسفالت و اساس مطابق با مراجع مختلف (دپارتمان حمل‌ونقل ایالت واشنگتن، ۲۰۱۴؛ ادیل، ۲۰۱۱؛ مک‌گرا، ۲۰۰۷).

<sup>1</sup> - Asphalt Institute

توجه محور، لازم دیده شد تا محور فوق مورد عملیات تثبیت قشر اساس و سپس آسفالت روی آن قرار گیرد. بررسی های انجام شده بر اساس آزمایش احیای قیر (آزمایش اکسترکشن به روش دستی) (ASTM D2172)، (۲۰۱۱) روی چند نمونه خرده آسفالتی نشان داد که به-طور متوسط، میزان قیر مربوط به این تراشه آسفالت برابر با ۵٪ می باشد.

در این تحقیق، در ابتدا، هر یک از مصالح مطابق با مراجع استاندارد (ASTM C136/C136M، ۲۰۱۴) دانه بندی شدند. شکل ۲، دانه بندی هر یک از مصالح تراشه آسفالت، اساس، ماسه و پودر سنگ را به همراه مقایسه ی آنها با محدوده دانه بندی استاندارد ارائه شده توسط نشریه اساس حاوی تراشه آسفالت بازیافت شده و همچنین منحنی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ نشان می دهد (شیخ سنديانی، ۱۳۸۵؛ نشریه ۱۰۱، ۱۳۸۲)



شکل ۲. منحنی دانه بندی مصالح تراشه آسفالت، اساس، ماسه و پودر سنگ

همچنین، آزمایش های تعیین حدود آتربگ نیز انجام شد که بیانگر غیرخیمیری بودن مصالح مختلف مورد نظر بود (ASTM D4318، ۲۰۱۰).

### ۲-۳. روش انجام آزمایش

در این مقاله سعی شده است تا به منظور تعیین درصد اختلاط مصالح مختلف تشکیل دهنده اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت، در وهله اول محدوده دانه بندی مناسب برای ساخت اینگونه

معمول زمانی که قشر اساس تثبیت گردد، مقاومت CBR آن تقریباً برابر با ۱۰۰٪ می گردد. بنابراین، به منظور طراحی ضخامت قشر آسفالتی روی اساس تثبیت شده با سیمان، باید از مقدار مقاومت فشاری تک-محوری<sup>۱</sup> بهره برد.

یوان و همکاران (۲۰۱۰) نمونه های مختلف حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت (شامل ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) و تثبیت شده با مقادیر مختلف سیمان (۲، ۴ و ۶ درصد) ساختند. نتایج آزمایش های مقاومت تک-محوری انجام شده توسط آنها حاکی از آن بود که اولاً با افزایش درصد سیمان به ازای یک مقدار ثابت از افزودن تراشه آسفالت، مقدار مقاومت فشاری تک-محوری افزایش می یابد. همچنین، در یک مقدار سیمان ثابت، با افزودن مصالح تراشه آسفالت، مقدار مقاومت فشاری تک-محوری و همچنین شدت تغییرات این مقاومت افزایش می یابد (یوان و همکاران، ۲۰۱۰).

البته مطالعات انجام شده توسط تولبرت (۲۰۱۴) بیانگر این مطلب است که افزایش مصالح تراشه آسفالتی، به ازای یک مقدار ثابت از سیمان، تأثیر جزئی در مقدار مقاومت فشاری تک-محوری دارد. همچنین، در یک مقدار ثابت از افزودن مصالح تراشه آسفالتی، تأثیر افزودن سیمان در بهبود مقاومت فشاری تک-محوری شدید است (تولبرت، ۲۰۱۴).

### ۳. مواد و مصالح مصرفی و روش تحقیق

#### ۳-۱. مواد و مصالح مصرفی

تراشه آسفالت مورد استفاده در این تحقیق از مصالح تراش داده شده واقع در محور اردکان - عقدا در استان یزد تهیه گردید. محور فوق یکی از پرترددترین محورهای مواصلاتی بین شهری بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل اهمیت زیاد و خرابی نسبتاً قابل

<sup>۱</sup> - Unconfined compressive strength

مصلح طرح اختلاط و الزامات فوق، روش C استاندارد انتخاب گردید. نمونه‌های ساخته شده طرح اختلاط در ۵ لایه و در هر لایه به وسیله ۵۶ ضربه چکش استاندارد آزمایش تراکم اصلاح شده به وزن ۴/۵۴ کیلوگرم و از ارتفاع ۴۵۷ میلی‌متر به خوبی متراکم گردید. در ادامه، نمونه‌های استوانه‌ای تثبیت شده در ۱۲ حالت طرح فوق به ابعاد ۳۰×۱۵ و هر کدام سه عدد ساخته شد. در ساخت نمونه‌ها، انرژی تراکم مساوی با استاندارد تراکم اصلاح شده اعمال شد. نمونه‌های ساخته شده بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و به مدت ۷ روز در حمام آب ۲۵ درجه سلسیوس عمل‌آوری شدند (ASTM C192/C192M, ۲۰۱۳). بعد از اتمام دوره عمل‌آوری، نمونه‌های تثبیت شده در حالت مرطوب تحت آزمایش فشاری مطابق با استاندارد ASTM D1633 قرار گرفتند.

جدول ۱. طرح آزمایش

کد طرح اختلاط	درصد تراشه آسفالت	درصد سیمان
۱ الی ۱۲	صفر، ۴۰، ۶۰ و ۸۰	۳، ۵ و ۷

#### ۴. تحلیل و تفسیر نتایج

##### ۴-۱. آزمایش‌های دانه‌بندی و طرح اختلاط

مطابق با نمودار دانه‌بندی در شکل ۲ می‌توان دریافت که هیچ کدام از مصالح به تنهایی در محدوده‌های دانه بندی، خصوصاً محدوده دانه‌بندی اساس حاوی تراشه آسفالت، قرار ندارند. در این مقاله، با توجه به درصد-های مختلف تراشه آسفالت سعی شد تا دانه‌بندی مصالح فوق به گونه‌ای انتخاب گردد که نهایتاً مخلوط نهایی در محدوده‌ی دانه‌بندی استاندارد قرار گیرد. بدین منظور، در ابتدا لازم است با بررسی محدوده‌های دانه‌بندی استاندارد در مراجع مختلف و مقایسه آنها با منابع داخلی، محدوده‌ی استاندارد مناسب تعیین شود. یکی از بزرگ‌ترین مشکلات ادارات راه در مسئله استفاده از تراشه آسفالت، عدم وجود استاندارد معتبر

مخلوط‌ها تعیین شود. در ادامه، مصالح مختلف اساس، تراشه آسفالت، پودر سنگ و ماسه به گونه‌ای با هم مخلوط شوند که مخلوط نهایی در داخل محدوده دانه-بندی تعیین شده قرار گیرد. با توجه به نقش زیاد آب در تراکم و فرایند هیدراسیون این نوع مخلوط، ابتدا تأثیر هر یک از پارامترهای درصد تراشه آسفالت و مقدار سیمان بر میزان آب تعیین و محاسبه شود و تأثیر این دو پارامتر بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گیرد. در انتها، با توجه به مقادیر مجاز و توصیه شده مقاومت فشاری (گاربر و همکاران، ۲۰۱۱) که بین ۳۰۰ الی ۸۰۰ psi (معادل ۲/۱ الی ۵/۵ مگاپاسکال) تغییر می‌کند، مقدار تراشه آسفالت و درصد سیمان به گونه‌ای انتخاب شود تا ترکیب نهایی اقتصادی‌ترین ترکیب را تولید کند.

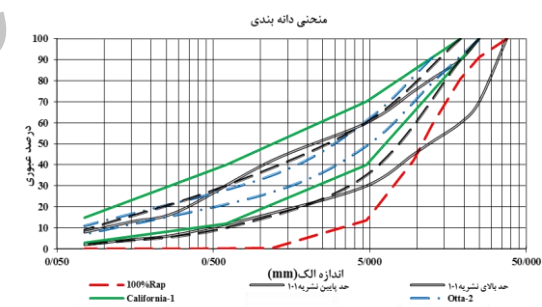
لذا، ابتدا مقادیر صفر، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد تراشه آسفالت به همراه ۳، ۵ و ۷ درصد سیمان جهت ساخت ۱۲ طرح اختلاط مختلف مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور، مطابق استاندارد در ۱۲ طرح نشان داده شده در جدول ۱، آزمایش تراکم اصلاح شده انجام شد و درصد رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک مخلوط استخراج شد. آزمایش تراکم به دو روش استاندارد و اصلاح شده صورت گرفت. مطالعات محققین گذشته نشان داده که به دلیل تطابق بهتر روش تراکم اصلاح شده در مقایسه با روش استاندارد و کوبش لایه‌های مصالح در ۵ لایه، استفاده از روش اصلاح شده، به منظور تعیین خصوصیات تراکمی مصالح و به دست آوردن رطوبت بهینه مصالح، بهتر از روش استاندارد می‌باشد. تراکم مصالح به روش اصلاح شده مطابق با استاندارد انجام گرفت (ASTM D1557, ۲۰۱۲). در استاندارد فوق، سه روش مختلف به منظور انجام آزمایش‌های تراکم در نظر گرفته شده است و انتخاب روش مناسب بر اساس قطر اسمی سنگ‌دانه موجود در طرح اختلاط می‌باشد. در این مقاله، با توجه به دانه‌بندی

مطابق با حدود دانه بندی ترسیم شده در شکل ۳ می توان دریافت که در صورت استفاده از حدود با قطر اسمی ۲۵ میلی متر، حدود تعریف شده در مراجع ASTM و دانه بندی شماره ۴ نشریه ۱۰۱ مناسب می باشد. به طور مشابه، مطابق با شکل ۴ می توان دریافت که در صورت انتخاب قطر اسمی ۳۷/۵ میلی متر، مراجع ASTM، Washington و نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت، به ترتیب بیشترین تطابق را با دانه بندی تراشه آسفالتی دارند. در این مقاله، با جمع بندی شکل های ۳ و ۴، پیشنهاد می شود که در وهله اول، مرجع نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت مورد انتخاب قرار گیرد. دلیل این موضوع، تطابق مناسب دانه بندی نشریه فوق در هر دو حالت و تفاوت بیشتر حدود بالا و پایین دانه بندی است که در هرچه اجرایی بودن استفاده از مصالح تراشه آسفالت در ترکیب با مصالح دیگر کمک بزرگی می کند. در صورت عدم رعایت الزامات دانه بندی نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت مطابق با شکل های ۳ و ۴، استفاده از دانه بندی مرجع ASTM پیشنهاد می گردد. همچنین، در صورت داشتن قطر اسمی برابر با ۳۷/۵ میلی متر در مخلوط، مرجع Washington نیز مناسب است.

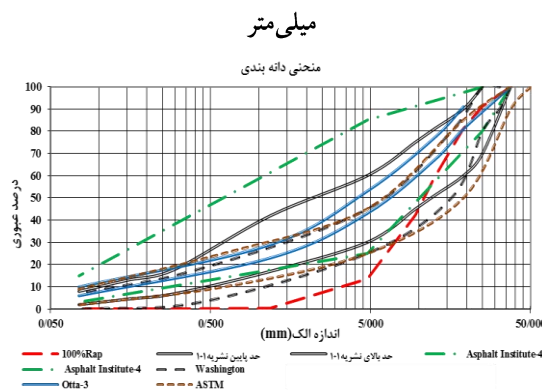
به منظور تعیین رطوبت بهینه مخلوط های اساس حاوی تراشه آسفالت، مصالح مختلف با نسبت های ارائه شده در جدول ۲ با هم مخلوط شده و مخلوط های نهایی در شکل ۵ به همراه محدوده دانه بندی شماره ۴ قشر اساس نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی نشان داده شده اند. مطابق با نمودار شکل ۵، می توان به مناسب بودن حدود دانه بندی نشریه ۱۰۱، با در نظر گرفتن طرح اختلاط های فوق از لحاظ رعایت الزامات دانه بندی، پی برد.

داخلی در زمینه محدوده ی مصالح مورد استفاده در لایه اساس حاوی تراشه آسفالت می باشد. مشکل از آنجا شروع می شود که مصالح تراشه آسفالت به دلیل ماهیت تولید آن ها نسبتاً درشت بوده و لذا از نظر اجرایی، قراردعی آن ها در محدوده استاندارد نیازمند صرف هزینه بالایی است. از این رو، عموم پیمانکاران، با توجه به تغییر ماهیت مصالح از حالت طبیعی به مخلوطی از مصالح طبیعی و تراشه آسفالت، مدعی استفاده از استانداردهای دیگر به غیر از استاندارد ۱۰۱ هستند. از این رو، در این تحقیق، سعی شد تا با بررسی محدوده های دانه بندی مصالح مختلف، امکان استفاده از محدوده نشریه ۱۰۱ نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

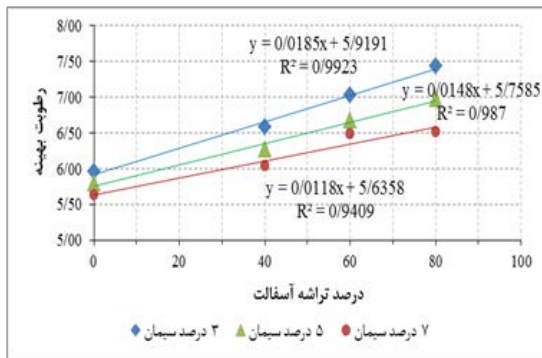
برای این منظور، ابتدا در شکل های ۳ و ۴، به ترتیب حدود دانه بندی مراجع مختلف با قطر اسمی ۲۵ میلی متر و ۳۷/۵ میلی متر ترسیم شد و در ادامه با رسم دانه بندی مصالح تراشه آسفالت، نزدیک ترین محدوده ها به منحنی تراشه آسفالت انتخاب شد.



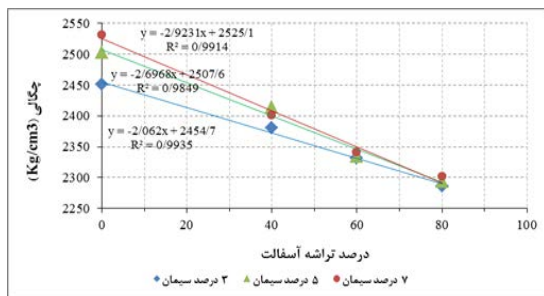
شکل ۳. حدود دانه بندی مراجع مختلف با قطر اسمی ۲۵ میلی متر



شکل ۴. حدود دانه بندی مراجع مختلف با قطر اسمی ۳۷/۵ میلی متر

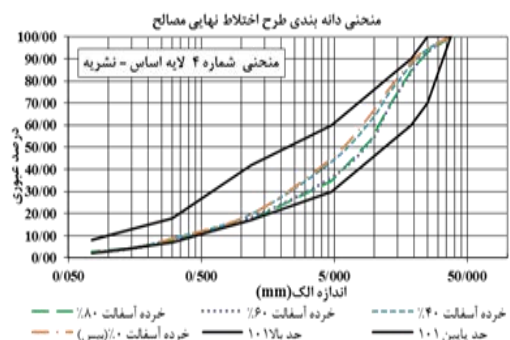


شکل ۶. مقادیر رطوبت بهینه مصالح (درصدهای مختلف تراشه آسفالت) و درصدهای مختلف سیمان (۳، ۵، و ۷)



شکل ۷. مقادیر چگالی خشک مصالح (درصدهای مختلف تراشه آسفالت) و درصدهای مختلف سیمان (۳، ۵، و ۷)

انتظار می‌رود که با افزایش درصد قیر در مخلوط مصالح، به دلیل پوشش بیشتر سطح سنگ‌دانه‌ها، رطوبت بهینه می‌بایست کاهش یابد. اما نتایج نشان‌دهنده رفتار کاملاً مشابهی است. عمده دلیل داشتن این رفتار غیرقابل‌انتظار، زبری بیشتر سطح سنگ‌دانه‌های مخلوط مصالح سنگی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های طبیعی است که به دلیل تراش داده شدن آسفالت به وجود می‌آید. در واقع، با تراش دادن آسفالت، اصطکاک سطح سنگ‌دانه‌ها بیشتر شده و نیاز به رطوبت بیشتری برای غلبه بر این اصطکاک و حصول به تراکم نهایی است. افزایش اصطکاک سطح سنگ‌دانه‌های تراشیده شده و وضعیت قرارگیری آنها باعث ایجاد بافتی متخلخل می‌شود. لذا، برای غلبه بر این نیروی داخلی و ایجاد تراکم مورد نظر نیاز به رطوبت بهینه بیشتر است. شکل ۸ اثر زبری و گوشه‌دار بودن مصالح و همچنین درستی آنها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. حدود دانه‌بندی طرح اختلاط نهایی مصالح جدول ۲. ترکیب اختلاط اساس تثبیت شده

کد طرح اختلاط	سیمان (%)	اساس (%)	خرده آسفالت (%)	ماسه (%)	پودر سنگ (%)
۱	۰	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۲	۰	۰	۶۰	۴۰	۰
۳	۳	۰	۸۰	۰	۲۰
۴	۰	۶۵	۰	۳۰	۵
۵	۰	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۶	۵	۰	۶۰	۴۰	۰
۷	۰	۰	۸۰	۰	۲۰
۸	۰	۶۵	۰	۳۰	۵
۹	۰	۲۰	۴۰	۴۰	۰
۱۰	۷	۰	۶۰	۴۰	۰
۱۱	۰	۰	۸۰	۰	۲۰
۱۲	۰	۶۵	۰	۳۰	۵

#### ۲-۴. آزمایش‌های تراکم

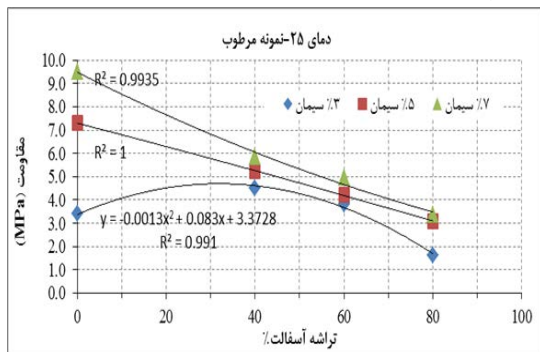
شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب نمودارهای رطوبت بهینه و چگالی خشک مخلوط‌های مختلف را نشان می‌دهند. از نمودارهای ترسیم شده می‌توان دریافت که با افزایش درصد تراشه آسفالت، به‌طورکلی درصد رطوبت بهینه مخلوط افزایش و چگالی خشک مخلوط کاهش می‌یابد.



به تغییرات تراشه آسفالت خطی، ولی نسبت به تغییرات درصد سیمان غیرخطی است.

#### ۳-۴ مقاومت فشاری محدود نشده

شکل ۹ نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده انجام شده را در وضعیت مرطوب نشان می‌دهد.



شکل ۹. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های

مرطوب (۲۵ °C) در درصد‌های مختلف سیمان

با بررسی دقیق نمودار شکل ۹ می‌توان دریافت که با افزایش مقدار تراشه آسفالت، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به علاوه، با افزایش مقدار سیمان از ۳٪ به ۷٪، مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها افزایش می‌یابد. برخلاف تغییرات مقاومتی نمونه‌های ۵٪ و ۷٪ سیمان که دارای روند تقریباً خطی می‌باشند، مشاهده می‌شود که در نمودار مربوط به نمونه‌های حاوی ۳٪ سیمان روند مقاومت در مقابل درصد تراشه آسفالت منحنی شکل بوده و حداکثر مقاومت فشاری در محدوده ۳۰ الی ۴۰ درصد تراشه آسفالت مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه ضریب رگرسیون منحنی درجه ۲ برازش شده بر ۳٪ سیمان برابر ۰/۹۹۱ است، می‌توان به تفسیر بسیار مطلوب داده‌ها توسط منحنی برازش شده دست یافت. این موضوع برای سایر منحنی‌ها نیز صادق است. با یکبار مشتق‌گیری، مقدار حداکثر مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی ۳٪ سیمان در ۳۰٪ تراشه آسفالت برابر با ۳۱/۹ درصد به دست می‌آید. این در حالی است که در



شکل ۸. گوشه‌دار و درشت‌دانه بودن مصالح آسفالتی

تراش داده شده

از نمودار شکل ۶ می‌توان دریافت که شدت افزایش درصد رطوبت در اثر افزایش تراشه آسفالت با افزایش درصد سیمان، کاهش می‌یابد. در واقع، وجود سیمان در مخلوط و ایجاد خمیر سیمان باعث جابه‌جایی بهتر سنگدانه‌ها در فرایند تراکم و کاهش نیاز به آب جهت نیل به تراکم نهایی شده است.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد تراشه آسفالت، حداکثر چگالی خشک مخلوط‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع به دلیل پوشش قیر به‌عنوان ماده با چگالی حدود  $1 \text{ gr/cm}^3$  روی مصالح تراشه آسفالتی است که باعث کاهش چگالی ترکیبی مخلوط مصالح سنگی به‌همراه تراشه می‌شود. بنابراین، هرچه مقدار تراشه آسفالت بازیافتی در مخلوط بیشتر باشد، اثر آن بر کاهش چگالی بیشتر است. به علاوه، از نتایج به‌دست آمده مشخص می‌شود که هرچه سیمان بیشتری به مخلوط اضافه شود، چگالی خشک مخلوط افزایش می‌یابد. این مسئله در مورد افزایش سیمان از ۳ به ۵ درصد تقریباً سه برابر افزایش چگالی خشک مخلوط از ۵ به ۷ درصد می‌باشد. علت این امر، وجود حفرات خالی است که به نظر می‌رسد تا مقدار ۵٪ سیمان کاملاً به حداقل خود کاهش یافته و در واقع سیمان در این محدوده نه‌تنها نقش چسباننده را بازی می‌کند، بلکه نقش پرکنندگی هم دارد. همچنین، با بررسی بیشتر نمودار ترسیمی شکل ۷ می‌توان به این مهم دست یافت که روند تغییرات چگالی خشک مصالح بازیافتی نسبت



جدول ۳. فرضیات قیمت در نظر گرفته شده

موضوع	قیمت (ریال)	حمل
مصالح سنگی (تن)	۹۰۰۰۰	۵۰۰۰۰ ریال (حمل تا ۳۰ کیلومتر)
خرده آسفالت (تن)	۲۰۰۰۰	صفر
سیمان (تن)	۹۵۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰ ریال (تن تا ۹۰ کیلومتر)
تثبيت لایه (متر مربع)	۲۰۰۰۰۰	-
آسفالت با اجرا (تن)	۱۰۰۰۰۰۰	۵۰۰۰۰ ریال (تن تا ۳۰ کیلومتر)

جدول ۴، نتایج طرح ضخامت قشر رویه و اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت را نشان می‌دهد. در این راستا، در ابتدا بر اساس مقادیر پیشنهادی مقاومت فشاری تک‌محوری قشر اساس تثبیت شده با سیمان (گاربر و همکاران، ۲۰۱۱) که بین ۳۰۰ الی ۸۰۰ psi (معادل ۲/۱ الی ۵/۵ مگاپاسکال) تغییر می‌کند، ضرایب قشر و مدول برجهنگی قشر اساس تثبیت شده با سیمان (ون‌تیل و همکاران، ۱۹۷۲) بر اساس نمودار مرتبط با طراحی این قشر به دست آمد.

در ادامه، مطابق با روش طراحی ون‌تیل و همکاران (۱۹۷۲) بر مبنای تحمل هر لایه متناظر با بار وارده به آن، ضخامت قشرهای رویه و اساس تثبیت شده با سیمان بر اساس بار فرضی ۳۵ میلیون محور استاندارد در کل طول عمر روسازی به دست آمد (جدول ۴). قابل ذکر است که مطابق با نشریه ۲۳۴ (۱۳۹۰)، مقادیر حداقلی مرتبط با قشر رویه پیشنهاد گردیده است. از آنجایی که هدف پژوهش حاضر بررسی دقیق ضخامت‌ها بود، طرح ضخامت‌ها با عدم لحاظ مقادیر حداقل پیشنهادی نشریه ۲۳۴ (۱۳۹۰) صورت پذیرفت.

نمودارهای ۵٪ و ۷٪ سیمان، حداکثر مقاومت فشاری در مخلوط فاقد تراشه آسفالت روی می‌دهد. از این مطلب می‌توان نتیجه گرفت که در حالت تثبیت با مقادیر نسبت بالای سیمان، مقدار سیمان در فرایند کسب مقاومت نقش تعیین‌کننده دارد و همانند بتن هرچه مصالح تمیزتر و فاقد آلودگی (قیر) باشد، مقاومت افزایش می‌یابد. ولی با نگاه به نمودار ۳٪ سیمان می‌توان نتیجه گرفت که روند کسب مقاومت، ناشی از دو پدیده چسبندگی سنگ‌دانه‌ها به هم به دلیل وجود قیر در مخلوط و همچنین وجود سیمان به عنوان چسباننده سنگ‌دانه‌ها است. هرچه سنگ‌دانه‌ها تمیزتر باشند، چسبندگی با سیمان بیشتر می‌شود؛ ولی چسبندگی به خاطر وجود ماده چسبناک قیر کمتر می‌شود و بالعکس. لذا، رفتار مقاومتی نمونه‌ها متأثر از دو عامل چسباننده بوده و مقدار بهینه استفاده از تراشه آسفالت برابر با ۳۱/۹ درصد به دست می‌آید.

به منظور محاسبه مقدار بهینه طرح اختلاط بر اساس مقاومت فشاری، ابتدا بر اساس آیین‌نامه‌های مرتبط، مقدار حداکثر مقاومت فشاری تعیین می‌شود. دلیل این امر، افزایش حداکثری مدول و سختی لایه تثبیت شده و به دنبال آن کاهش ضخامت لایه گرانیقیمت آسفالت است. در این رابطه، مقدار بهینه تراشه آسفالت بر اساس فرضیات جدول ۳ و کمینه مقدار ارزش متر مربع اجرا به دست آمد. مقادیر ارزش داده شده در جدول ۳ بر اساس قیمت روز به سال ۱۳۹۵ می‌باشد. ذکر این نکته مهم است که نسبت به فواصل حمل مختلف ممکن است قیمت متر مربع اجرای روسازی حاوی قشر اساس تثبیت شده تغییر پیدا کند. لیکن، با توجه به تأثیر کمتر آن در مقایسه با سایر هزینه‌ها، مقادیری فرضی برای فواصل حمل در نظر گرفته شد.

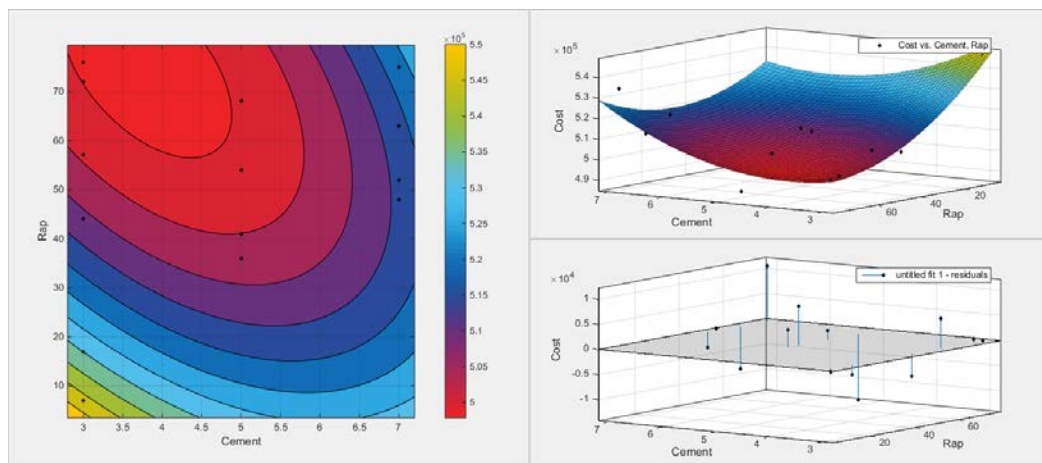
تعیین طرح اختلاط مناسب مخلوط های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر زیاد تراشه آسفالت

۱۰، شمایی از این نمودار سه‌بُعدی به همراه دیگر خصوصیات شامل منحنی‌های تغییرات دو‌بُعدی و مقادیر باقیمانده (تفاضل مقادیر حقیقی و تخمین زده شده توسط رگرسیون) را نشان می‌دهد. محورهای اصلی نمودار فوق شامل درصد سیمان و تراشه آسفالت مورد استفاده در مخلوط و همچنین هزینه ریالی ارزش هر متر مربع اجرای آن را نشان می‌دهند.

با در دست داشتن مقادیر ضخامت طرح شده و چگالی مربوطه در درصد سیمان و تراشه آسفالت متناظر، مقدار ارزش متر مربع اجرای روسازی (ریال) (ستون آخر جدول ۴) حاوی قشر اساس تثبیت شده با سیمان به دست آمد. بر مبنای نتایج به دست آمده از جدول ۴ و ترسیم نمودار سه‌بُعدی مقدار با محورهای مقدار تراشه آسفالت، درصد سیمان و ارزش متر مربع اجرا می‌توان طرح اختلاط بهینه را محاسبه نمود. شکل

جدول ۴. محاسبه ارزش هر متر مربع اجرای روسازی‌های با عملکرد مناسب

مقاومت	مقدار	مقدار تراشه	چگالی	ضخامت	ضخامت قشر	ارزش هر متر	ردیف
طراحی	سیمان	آسفالت	اختلاط	قشر رویه	اساس تثبیت شده	مربع اجرا	
(Mpa psi)	(%)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(cm)	(cm)	(ریال)	
۳۰۰ (۲/۱)	۳	۷۶	۲۲۹۸	۸/۷۵	۵۰	۴۹۹۴۴۱	۱
۴۰۰ (۲/۸)	۳	۷۲	۲۳۰۶	۸/۷۵	۴۷/۵	۵۰۰۵۸۴	۲
	۳	۷	۲۴۳۶	۷/۵	۴۲/۵	۵۴۶۲۵۵	
۵۰۰ (۳/۸)	۳	۵۷	۲۳۴۴	۸/۷۵	۴۲/۵	۵۱۰۴۳۴	۳
	۵	۶۸	۲۳۲۰	۷/۵	۴۳/۷۵	۴۸۷۵۹۹	
	۷	۷۵	۲۳۰۵	۸/۷۵	۴۶/۲۵	۵۳۴۰۱۶	
۶۰۰ (۴/۶)	۳	۱۷	۲۴۲۳	۷/۵	۴۲/۵	۵۳۰۳۰۱۷	۴
	۳	۴۴	۲۳۶۲	۷/۵	۴۶/۲۵	۵۰۶۸۶۳	
	۵	۵۴	۲۳۶۰	۷/۵	۴۲/۵	۵۰۳۱۹۰	
۷۰۰ (۵/۳)	۷	۶۳	۲۳۴۰	۷/۵	۴۲/۵	۵۰۹۹۱۳	۵
	۵	۴۱	۲۳۹۸	۷/۵	۴۰	۵۱۲۸۲۳	
	۷	۵۲	۲۳۷۸	۷/۵	۴۰	۵۱۶۸۶۱	
	۵	۳۶	۲۴۱۰	۷/۵	۳۷/۵	۵۱۰۶۳۲	
۸۰۰ (۵/۵)	۷	۴۸	۲۳۸۵	۷/۵	۳۷/۵	۵۱۳۰۴۵	۶



شکل ۱۰. شمایی از تغییرات همزمان درصد سیمان، درصد تراشه آسفالت و هزینه هر متر مربع اجرا (ریال)



شکل ۱۱. تراکم نمونه‌ها با استفاده از تراکم لرزهای

جدول ۵. ویژگی‌های خاص دستگاه تراکم لرزهای

ویژگی	مقدار ویژگی مورد نظر
توان دستگاه	۱۵۰۰
فرکانس بارگذاری	(۱۵-۳۱/۵ Hz)
انرژی نقطه‌ای	۲۵ J
وزن سرباره بارگذاری	۱/۷۵ kg

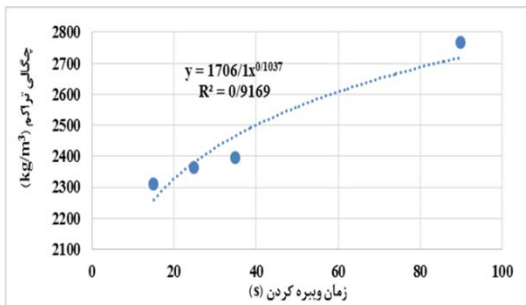
به‌منظور تخمین زمان بهینه تراکم، پنج نوع نمونه تراکمی و از هر نوع، پنج نمونه ساخته شد. ابتدا مصالح مورد نیاز دانه‌بندی شدند و سپس از مصالح دانه‌بندی شده به‌منظور ساخت نمونه‌های تراکمی استفاده گردید.

بر مبنای شکل ۱۰ و یا نتایج جدول ۴ می‌توان پی برد که طرح اختلاط بهینه بر مبنای هر دو معیار مقاومت و هزینه، طرحی است که مقدار تراشه آسفالت مخلوط برابر با ۶۸٪ باشد و با میزان سیمان ۵٪ مورد تثبیت قرار گیرد.

#### ۴-۴. تراکم ویرهای

از آنجا که در فرایند ارزیابی و ساخت نمونه‌های لازم جهت انجام آزمایش فشاری یا خمشی می‌بایست مصالح تثبیت شده با انرژی تراکمی در واحد حجم قالب منتخب، همانند انرژی تراکمی به‌کار رفته در واحد حجم روش تراکم استاندارد اصلاح شده متراکم گردند و از آنجا که ممکن است در یک تحقیق تعداد زیادی نمونه فشاری یا خمشی مدنظر باشد، لذا به‌منظور تسهیل در فرایند آزمایش، تصمیم گرفته شد تا روش تراکم به‌وسیله تراکم لرزهای توسعه یابد. بدین منظور، در صورت استفاده از تراکم لرزهای با مشخصات ذکر شده در جدول ۵ می‌توان با یافتن زمان بهینه تراکم، روند انجام آزمایش‌ها را به نحو زیادی تسهیل نمود. شکل ۱۱، ویراتو مورد استفاده در پژوهش فوق را نشان می‌دهد.

شده، چگالی مرطوب به عنوان معیار مناسب در دست-یابی به زمان تراکم لرزه‌ای نمونه‌ها معرفی گردید. با استفاده از نتایج آزمایش‌های به‌دست‌آمده از تراکم و بیرهای و پرداخت مدل رگرسیون خطی برای میانگین نتایج تراکم چهار سری ساخت انجام شده در هر زمان و بیرهای می‌توان به نتایج نمودار شکل ۱۲ زیر دست یافت.



شکل ۱۲. تغییرات چگالی مرطوب نمونه‌ها بر حسب زمان و بیر کردن آن‌ها

بر اساس نتایج شکل ۱۲، بین تراکم و بیرهای و زمان و بیر کردن رابطه زیر برقرار می‌باشد:

$$D = 1706.1 * t^{0.1037} \quad (1)$$

که  $D$  چگالی تراکمی نمونه‌ها ( $\text{kg/m}^3$ ) و  $t$  زمان و بیر کردن نمونه‌ها (ثانیه) است.

همچنین، میانگین و انحراف استاندارد مقادیر تراکم دستی به ترتیب برابر با  $2602.7/41167$  و  $260.2/7$   $\text{kg/cm}^3$  می‌باشد. مطابق با رابطه‌ی به‌دست‌آمده (۱) و میانگین نتایج تراکم دستی، می‌توان زمان بهینه را بر اساس رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$t = \left( \frac{2602.7}{1760.1} \right)^{1/0.1037} \cong 60s \quad (2)$$

بنابراین، مطابق با رابطه (۲)، زمان بهینه تراکم و بیرهای برابر با ۶۰ ثانیه به دست می‌آید. بازه اطمینان ۹۵٪ مربوط به چگالی به‌دست‌آمده از ۶۰ ثانیه و بیر نمودن برابر با ۲۵۴۶-۲۶۵۸  $\text{kg/m}^3$  بر متر مکعب می‌باشد. این بدین معنی است که در صورتی که به‌جای کوبش نمونه‌ها در ۵۶ ضربه در هر لایه ۶۰ ثانیه تراکم لرزه‌ای انجام شود، با احتمال ۹۵٪ می‌توان انتظار داشت

در نوع اول، نمونه‌ها با استفاده از تراکم دستی، در قالبی به قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر، از چکش استاندارد تراکم اصلاح‌شده به وزن سقوط ۴/۵۴ کیلوگرم و ارتفاع سقوط ۴۵۷ میلی‌متر، در پنج لایه و هر لایه ۵۰ ضربه، جهت حصول به انرژی تراکمی در واحد حجم نمونه‌ها مطابق با استاندارد تراکم اصلاح شده استفاده گردید. در بقیه نمونه‌ها، این عمل با استفاده از دستگاه تراکم لرزه-ای صورت گرفت، که در آن، زمان و بیر نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۹۰ ثانیه انتخاب گردید. طبق تعریف این پژوهش، زمان بهینه و بیر کردن نمونه‌ها برابر با زمان مورد نیاز برای ویر کردن نمونه‌ها تا رسیدن به چگالی تقریباً برابر با چگالی حاصل از تراکم دستی نمونه‌ها می‌باشد. بر اساس تعریف بیان شده، چگالی حاصل از هر یک از نمونه‌های ساخته شده با استفاده از تراکم دستی و ویرهای به دست آمد. دلیل برابر قرار دادن چگالی مرطوب دو نمونه در این است که زمانی که چگالی مرطوب دو نمونه برابر قرار داده شود، اثر رطوبت نیز در نظر گرفته می‌شود. در واقع در فرایند تثبیت، نمونه‌ها باید به یک چگالی مرطوب برسند تا براساس آن و سیمان بهینه مربوطه بتوان به طرح اختلاط مناسب اساس حاوی تراشه آسفالت دست یافت. دلیل دیگر این موضوع در مشاهده تراکم یافتگی نمونه‌ها در وضعیت مرطوب می‌باشد. در صورتی که چگالی خشک در نظر گرفته شود، به دلیل رابطه غیرخطی بین چگالی خشک و درصد سیمان نمی‌توان در رابطه با تراکم یافتگی نمونه‌های تثبیت شده نظر داد. همچنین، به دلیل خصوصیات دینامیک تراکم لرزه‌ای (فرکانس بارگذاری و جابه‌جایی جزئی قالب حین عملیات تراکم) زمانی که انرژی در واحد حجم نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شود، اثر همزمانی و بیر شدن و تراکم یافتگی در نظر گرفته نشده و زمان فرکانس اعمال بار وارده به اشتباه به دست می‌آید. با توجه به دلایل ذکر

در روابط جدول ۶،  $\omega$  رطوبت ساخت (درصد)، RAP(%) درصد خرده آسفالت موجود در مخلوط، Cement(%) درصد سیمان موجود در مخلوط،  $C_c$  ضریب انحنای دانه‌بندی مخلوط،  $\rho$ ، UCS و Cost به ترتیب دانسیته ( $\text{kg/m}^3$ )، مقاومت تک‌محوری (Mpa) و هزینه هر متر مربع اجرای طرح اختلاط (ریال) می‌باشند.

با بهره‌گیری از روابط (۳) الی (۶) به راحتی می‌توان خصوصیات مکانیکی و هزینه اجرای طرح اختلاط روسازی حاوی قشر اساس تثبیت شده با سیمان را محاسبه نمود.

که نتایج تراکم روش دستی در بازه ۲۵۴۶-۲۶۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب قرار گیرد.

## ۵. استخراج روابط تحلیلی

در این بخش، به استخراج روابط پیرامون نتایج طرح اختلاط و خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. در این راستا، با بهره‌گیری از روابط آماری و تحلیل‌های مرتبط، به استخراج روابط مربوطه پرداخت شده است. جدول ۶ نتایج روابط استخراج شده برای خصوصیات مکانیکی مخلوط‌ها را بر اساس درصد سیمان و تراشه آسفالت موجود در مخلوط‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۶. نتایج تحلیل رگرسیونی

رابطه	رابطه تخمینی	$R^2$	Adj $R^2$
(۳)	$\omega = 6.503 + 0.015 * RAP - 0.1463 * Cement - 1.7 * 10^{-4} * C_c$	0.974	0.964
(۴)	$\rho = 2362 - 38.24 * Cement - 2.062 * Cement^2 - 1.482 * Rap + 1.894 * 10^{-5} * Rap^2 - 0.216 * Cement * Rap$	0.989	0.980
(۵)	$UCS = -1.646 + 2.13 * Cement - 0.083 * Cement^2 + 0.052 * Rap - 0.0004 * Rap^2 - 0.015 * Cement * Rap$	0.937	0.884
(۶)	$Cost = 6.24 * 10^5 - 2.983 * 10^4 * Cement + 2441 * Cement^2 - 1846 * Rap + 8.517 * Rap^2 + 150.7 * Cement * Rap$	0.836	0.734

به‌علاوه، مشخص شد که در صورت عدم دستیابی به الزامات نشریه ۱۰۱ می‌توان منحنی‌های دانه‌بندی مرجع ASTM و در وهله بعدی مرجع Washington را ملاک قرار داد.

۲- مطابق با نتایج به‌دست آمده، پیش‌بینی می‌شود که با افزودن تراشه آسفالت به قشر اساس تثبیت شده با سیمان، درصد رطوبت بهینه مخلوط افزایش یابد که دلیل آن، زبری بیشتر مصالح تراشه آسفالت نسبت به مصالح طبیعی و فضای خالی بیشتر و در نتیجه نیاز به رطوبت بیشتر جهت پر نمودن خلل و فرج مخلوط می‌باشد. همچنین، مشخص گردید که با افزایش درصد تراشه آسفالت، چگالی خشک مخلوط کاهش یابد، که

## ۶. نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش انجام شده را می‌توان در قالب موارد زیر خلاصه نمود:

۱- درصد دانه‌بندی تراشه آسفالت درون مخلوط باید به‌گونه‌ای تعیین گردد که الزامات آیین‌نامه‌ای را برآورده کند. در پژوهش حاضر، این عمل بر اساس آزمایش‌های دانه‌بندی مختلف روی مصالح مناسب مخلوط به دست آمد و نهایتاً ۱۲ نوع طرح اختلاط معرفی گردید. نتایج نشان داد که مصالح قشر اساس حاوی تراشه آسفالت الزامات نشریه ۱۰۱ را برآورده می‌کند و لذا استفاده از نشریه فوق به‌منظور طرح اختلاط اساس تثبیت شده با سیمان پیشنهاد می‌گردد.

مخلوط و هزینه اجرای آن شامل ۶۸٪ مصالح تراشه آسفالتی و ۵٪ سیمان می باشد.

۴- با استفاده از روش ویبره ای، زمان اختلاط بهینه ای که چگالی معادل روش تراکم استاندارد اصلاح شده را به دست دهد، برابر با ۶۰ ثانیه به دست آمد. بازه اطمینان ۹۵٪ چگالی به دست آمده از روش تراکم ویبره ای با مدت زمان ویبره برابر با ۶۰ ثانیه در هر لایه برابر با ۲۵۴۶-۲۶۵۸ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد.

۵- در این پژوهش، روابط مناسب حاکم بر خصوصیات مکانیکی و هزینه هر متر مربع اجرای روسازی به دست آمدند که می توانند به منظور بررسی خصوصیات دقیق مخلوط های دلخواه مورد نظر طراحان مورد استفاده قرار گیرند.

دلیل این موضوع تشکیل لایه ی فیلم قیر روی سنگدانه های تراش داده شده می باشد.

از آنجایی که چگالی قیر تقریباً برابر با واحد می باشد، بنابراین چگالی کلی مخلوط کاهش می یابد. این موضوع در درصدهای مختلف سیمان شدت مختلفی داشته و سیمان به عنوان یک ماده چسباننده مصالح و پرکننده ی آن، نقش مهمی را در افزایش چگالی ایفا می کند. به طوری که با افزودن ۵٪ سیمان، چگالی مخلوط نسبت به افزودن ۳٪ سیمان تا سه برابر افزایش می یابد.

۳- مطابق با بررسی های پژوهش حاضر می توان اذعان داشت که طرح اختلاط بهینه برای تردد فرضی ۳۵ میلیون محور با در نظر گرفتن همزمان عملکرد

## ۷. مراجع

دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی. ۱۳۸۲. "مشخصات فنی عمومی راه". نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، تجدید نظر اول، معاونت امور فنی.

شیخ سندیانی، ش. ۱۳۸۵. "روش های بازیافت سرد و گرم آسفالت و امکان سنجی اقتصادی آن در ایران". وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۹۰. "آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران". نشریه شماره ۲۳۴، وزارت راه و شهرسازی، مؤسسه قیر و آسفالت ایران، پژوهشکده حمل و نقل.

Asphalt Recycling and Reclaiming Association. 2001. "Basic Asphalt Recycling Manual". Publ. NHI 01-022, Annapolis, Maryland.

ASTM Committee D04 on Road and Paving Materials, ASTM D-2940. 2003. "Standard Specification for Graded Aggregate Material for Bases or Subbases for Highways or Airports".

ASTM Volume 04-08, ASTM D4318- 10e1. 2010. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils".

ASTM Volume 04-03, ASTM D2172/ D2172M-11. 2011. "Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures".

ASTM Volume 04-08, ASTM D1557-12. 2012. "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)).

ASTM Volume 04-03, ASTM C192/C192M-13. 2013. "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory".

ASTM Volume 04-02, ASTM C136/C136M. 2014. "Standard Test Methods for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates".

Bloomquist, D., Diamond, G., Oden, M., Ruth, B. and Tia, M. 1993. "Engineering and environmental aspects of recycling materials for highway construction". Federal Highway Administration and U.S. Environmental Protection Agency, Report No. FHWA-RD-93-008, Washington, DC.

Edil, T. B. 2011. "Specifications and recommendations for recycled materials used as unbound base course". University of Wisconsin, Madison.

- Garber, S., Rasmussen, R. O. and Harrington, D. 2011. "Guide to cement-based integrated pavement solutions". Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center, and Portland Cement Association.
- Garg, N. and Thompson, M. 1996. "Lincoln avenue reclaimed asphalt pavement base project". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/1547-13>.
- Guthrie, W., Cooley, D. and Eggett, D. 2005. "Effects of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of base materials". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, DOI: <http://dx.doi.org/10.3141/2005-06>.
- Hanks, A. J. and Magni, E. R. 1989. "The use of recovered bituminous and concrete materials in granular base and earth". Report MI-137, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, ON, Canada.
- Kang, D. H., Gupta, S. C., Ranaivoson, A. Z., Siekmeier, J. and Roberson, R. 2010. "Recycled materials as substitutes for virgin aggregates in road construction: I. Hydraulic and mechanical characteristics. Soil Sci. Soc. Am. J. 75(4): 1265-1275.
- McGarrah, E. J. 2007. "Evaluation of current practices of reclaimed asphalt pavement/virgin aggregate as base course material". Washington State Department of Transportation, WA-RD 713.1.
- National Asphalt Pavement Association (NAPA). 1977. "Hot recycling of yesterday". Recycling Report, Volume 1, No. 2, Lanham, Maryland.
- Newcomb, D. E., Ray Brown, E. and Epps, J. A. 2007. "Designing HMA mixture with high RAP content, a practical guide". National Pavement Association, Quality Improvement Series 124, Lanham, Maryland.
- Senior, S. A., Szoke, S. I. and Rogers, C. A. 1994. "Ontario's experience with reclaimed materials for use in aggregates". International Road Federation Conference, Calgary, Alberta.
- Taha, R., Ali, G., Basma, A. and Al-Turk, O. 1999. "Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases". Transportation Research Record, 1652: 264-269.
- Transportation Research Board (TRB). 1978. "Recycling materials for highways". National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice No. 54, Washington, DC.
- Tolbert, J. C. 2014. "Effect of high percentages of reclaimed asphalt pavement on mechanical properties of cement-treated base material". <http://scholarsarchive.byu.edu/etd/4217>
- US Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2010. <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/RAP131.cfm>, 15, April.
- Van Til, C. J., McCullough, B. F., Vallerga, B. A. and Hicks, R. G. 1972. "NCHRP Report 128: Evaluation of AASHTO interim guides for design of pavement structures". TRB, National Research Council, Washington, DC.
- Washington State Department of Transportation (WSDOT). 2014. Construction Manual. Engineering and Regional Operations.
- Wu, M. 2011. "Evaluation of high percentage recycled asphalt pavement as base course materials". MSc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University.
- 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.



Archive of SID