

بهینه‌سازی فنی اقتصادی مجموعه روسازی آسفالتی و اساس تثبیت‌شده مطالعه موردی محور اردکان-نائین***پژوهشی**مصطفی آدرسی^(۱)

چکیده هدف مطالعه حاضر تعیین درصد مناسب تراشه آسفالت و سیمان در مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان است به گونه‌ای که عامل دوام و اقتصادی بودن روسازی، هم‌زمان در نظر گرفته شوند. از این رو مقاومت فشاری و کششی در درصد‌های مختلف RAP شامل ۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و در درصد‌های مختلف سیمان شامل ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به دست آورده شد. در ادامه روسازی تحت بار استاندارد ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون ESALs تعیین ضخامت شد. با برقراری رابطه بین درصد تراشه آسفالت، درصد سیمان، عدد شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به عنوان یک پارامتر مؤثر در دوام، و هزینه اجرای روسازی در بارهای مختلف، معادله هم‌زمان هزینه دوام روسازی تشکیل گردید. نهایتاً بر اساس تکنیک بهینه‌سازی میزان درصد بهینه تراشه آسفالت و سیمان در مخلوط‌ها به منظور دست‌یابی به دوام مورد انتظار (TSR = ۷۰) تعیین گردید. بر این اساس جواب بهینه تابع هزینه که تابعی از سطح بارگذاری است، در مقدار ۲۹٫۶ درصد تراشه آسفالت، ۴٫۱۶ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد. از نتایج مقاله فوق می‌توان با تقریب مناسبی در طرح سازه‌های روسازی بادوام و اقتصادی حاوی اساس تثبیت شده با سیمان و مقادیر مختلف تراشه آسفالت بهره برد.

واژه‌های کلیدی تراشه آسفالت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام مخلوط، طرح اقتصادی.

Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naen Case Study

M. Adresi

Abstract The purpose of this study is to determine the appropriate percentage of RAP and cement in the stabilized base in such a way that the durability and economics of the pavement are considered simultaneously. Therefore, compressive and tensile strength was obtained in different percentages of RAP including 0%, 40%, 60%, and 80%, and indifferent percentages of cement including 3%, 5%, and 7%. The structural design of the Pavement was further determined under 10, 20, 35, and 50 million ESALs. By establishing the relationship between the percentages of RAP, percentage of cement, and moisture sensitivity index (TSR) as an effective parameter in durability, and the cost of paving at different loads, a simultaneous cost-durability equation of pavement was formed. Finally, based on the optimization technique, the optimal percentage of RAP and cement to achieve the expected durability (TSR = 70) was determined. Hence, the optimum cost, which is a function of the loading level, was obtained in the amount of 29.6% of RAP, 4.16% of cement, and in the minimum loading level. The results can be appropriately approximated in the design of durable and economical pavement structures Contains a stabilized base with cement and various amounts of RAP.

Key Word RAP, Compressive strength, Tensile strength, mixed durability, Economical structural mix design.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۷/۱۲ تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۸ و از صفحه ۱۷ تا ۳۴ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

مقدمه

یکی از مهم ترین موضوعات مورد توجه مهندسان راه، طرح ضخامت روسازی های حاوی تراشه آسفالت بازیافتی می باشد. این طرح ضخامت براساس درصد تراشه آسفالتی موجود در قشر روسازی می تواند گامی مهم در اقتصادی بودن طرح روسازی باشد. به منظور اقتصادی بودن و انتخاب درصد مناسب تراشه آسفالتی موجود در مخلوط باید به دو نکته یعنی هزینه اجرا و برآورده نمودن حداقل دوام مورد انتظار مخلوط اساس تثبیت شده توجه داشت. یکی از کاربردهای مهم استفاده از تراشه آسفالتی، استفاده از آن در قشر اساس می باشد که می تواند به طور قابل توجهی موجب کاهش استفاده از مصالح طبیعی شود و همچنین با توجه به دارا بودن قشر نازک قیر اطراف سنگدانه های بازیافتی و افزایش ضریب اصطکاک درونی مصالح لایه اساس و همچنین اتصال ضعیف قیر با مصالح اطراف خود، به نوعی مقاومت لایه اساس حاوی تراشه آسفالت افزایش می یابد و در نتیجه از ضخامت قشر رویه آسفالتی کاسته می شود. این موضوع خصوصا با توجه به رشد روزافزون قیمت قیر امری بسیار مهم تلقی می گردد. از جمله عوامل مؤثر در طرح ضخامت روسازی شامل قشر اساس تثبیت شده با سیمان، توجه به خصوصیات مقاومتی قشر اساس تثبیت شده با سیمان می باشد. از جمله مهم ترین خصوصیات مقاومتی که در قشر اساس تثبیت شده با سیمان مدنظر است، مقاومت فشاری و کششی مخلوط های فوق می باشد. طاها و همکاران به بررسی تأثیر تراشه آسفالت از صفر درصد تا ۱۰۰ درصد در کیفیت لایه های اساس و زیر اساس پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش تراشه آسفالت به مخلوط های اساس و زیر اساس تثبیت شده، چگالی خشک مخلوط به صورت خطی کاهش می یابد. هم چنین با بررسی CBR دریافتند که در لایه زیر اساس با افزایش ۱۰۰ درصدی تراشه آسفالت به عنوان سنگدانه های لایه زیر اساس، باز هم حداقل CBR مورد نظر قابل تأمین هست [1]. این مقدار برای لایه اساس به ۱۰ درصد

استفاده از تراشه آسفالت برای رسیدن به CBR ۸۰ درصد محدود شد. هم چنین در تحقیق دیگری با اضافه کردن CKD (Cement kiln dust) به اساس حاوی تراشه آسفالت به این نتیجه رسید که تا ۱۰۰ درصد تراشه آسفالت می توان به مخلوط اساس اضافه کرد [2]. با این کار هزینه لایه اساس به شدت کاهش خواهد یافت [3] و لایه اساس جدید از تراوایی بیشتری نسبت به لایه اساس متداول بدون تراشه آسفالت برخوردار است [4]. آدرسی و همکاران در یک تحقیق با بررسی رفتار اساس تثبیت شده با مقادیر متفاوت سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت و در نظر گرفتن اثرات دما و رطوبت بر رفتار مکانیکی مخلوط های تثبیت شده دریافتند که با افزایش تراشه آسفالت چگالی خشک مخلوط به صورت خطی کاهش می یابد. هم چنین مطالعات نشان داد که با افزایش درصد تراشه آسفالت در مخلوط با شرایط بحرانی مرطوب ۲۵ درجه سانتی گراد و خشک ۵۰ درجه سانتی گراد، مقاومت فشاری محدود نمی شود و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های تثبیت شده کاهش می یابد [5], [6]. لینگ یونگ و همکاران با اضافه کردن اساس ماکادمی بازیافتی که با سیمان تثبیت شده بود برای ساخت آسفالت گرم دریافتند که برای بهبود مقاومت در برابر رطوبت، از پرکننده های سیمان و آهک هیدراته می توان به طور مؤثری استفاده کرد. آنها ترکیب ۱٫۷۵٪ وزن سیمان/ آهک هیدراته (۱:۱) را برای رسیدن به بهترین عملکرد مقاومت در برابر رطوبت پیشنهاد دادند [7]. علم و همکاران در تحقیقی سعی کردند خواص مکانیکی مخلوط های اساس با درصدهای مختلف تراشه آسفالت از قبیل مدول برجهنگی این مخلوط ها را مورد بررسی قرار دهند. آنها دریافتند که با افزایش درصد تراشه آسفالت در لایه اساس، مدول برجهنگی لایه اساس افزایش می یابد و در نتیجه استحکام لایه زیرین لایه آسفالتی ارتقا می یابد و از ضخامت لایه آسفالتی می کاهد [8]. مسعود فرامرزی و همکاران اشاره دارند که روسازی های آسفالتی یا بتنی که از لایه اساس تثبیت شده

باربری از لایه رویه به لایه اساس تثبیت شده تغییر می کند [12].

تحقیقات زیادی بر روی مخلوط های اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت به منظور تعیین مقدار بهینه سیمان و تراشه آسفالت بر اساس معیار مقاومت فشاری محدود نشده مجاز این گونه مخلوط ها و تأثیر آن بر عملکرد کل روسازی انجام شده است که همگی مقدار ۳ الی ۵ درصد سیمان را پیشنهاد نموده اند [13], [12], [6]. محدوده مجاز مقاومت فشاری محدود شده بین ۳۰۰ الی ۵۰۰ psi در بین مراجع مختلف پیشنهاد شده است [14]. بر این اساس حداکثر ۵۰۰ psi به منظور کنترل صلبیت لایه تثبیت شده و جلوگیری از بروز ترک در لایه تثبیت شده و کاهش ریسک ترک انعکاسی در لایه رویه تعیین شده است.

طبق نظر مؤسسه به سازی و بازیافت آسفالت (ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)، حداقل TSR برای مخلوط های آسفالتی به روش باز یا ف سرد (cold recycled asphalt) CRAM (mixtures) باید ۰,۷۰ باشد، با این حال ممکن است به ۰,۶۰ کاهش یابد. هم چنین ARRA اظهار داشت که حداقل قدرت ITS CRAM در ۲۵ درجه سانتی گراد باید ۳۱۰ کیلو پاسکال باشد [15].

ایار [16] با بررسی جامع مخلوط های تثبیت شده با قیر امولسیون این طور جمع بندی کرد که استفاده از سیمان پوزولانی حاوی مخلوط های بازیافتی حاوی امولسیون قیری (RMBE (Recycled Mixture with Bitumen Emulsion) در مقایسه با سیمان پرتلند حاوی RMBE رفتار خستگی بالاتری دارد. چند سال بعد، نتایج مشابهی توسط اجوم گزارش شد که با استفاده از سیمان تا ۳٪ می تواند مقاومت خستگی RMBE را بهبود بخشد در حالی که سطح کرنش کمتر از ۲۰۰ میکرون باشد. اگرچه نتایج این مطالعات نشان داد که به طور کلی افزودن سیمان به RMBE می تواند باعث کاهش عمر خستگی در جاده های پرتراфик شود. باید

با سیمان حاوی تراشه آسفالت استفاده کرده اند دارای ترک های انعکاسی ناشی از تردشدگی لایه اساس تثبیت شده هستند. آنها با پیشنهاد مخلوط اساس تثبیتی جدید حاوی تراشه آسفالت، سیمان، قیر امولسیون، اکرولیک پلیمر توانستند به عملکرد بهتری در این حوزه دست یابند و ترک های انعکاسی را تا حدود زیادی کنترل کنند [10], [9]. در تحقیقی دیگر مهتا و همکاران قطعات مختلف روسازی آسفالتی را که لایه اساس آن توسط روش های مختلف به سازی عمقی تثبیت شده بود و توسط چسباننده های مختلف از قبیل قیر امولسیون، سیمان، CaCL₂ و ژئوتکستایل به همراه تراشه آسفالت اصلاح شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که روسازی آسفالتی شامل لایه اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت نسبت به دیگر روش های تثبیت در برابر ترک های خستگی مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد [11]. ماهر و همکاران متوجه شدند که مصالح RAP نسبت به مصالح دانه ای از مدول برجهندگی و مدول الاستیک میدانی بیشتری برخوردارند [12]. طاهای رمزی و همکاران اثر مقادیر متفاوت سیمان و تراشه آسفالت را روی ضخامت روسازی بدون در نظر گرفتن اثرات دوامی و هم چنین مسائل اقتصادی طرح روسازی نهایی شده، بررسی کردند آنها به این نتیجه رسیدند که در تمام مخلوط های اساس حاوی تراشه آسفالت بدون استفاده از سیمان، با افزوده شدن مقادیر تراشه آسفالت در مقایسه با اساس ساخته شده با ۱۰۰ درصد مصالح طبیعی، ضخامت لایه رویه افزایش می یابد. این به دلیل ضعف بیشتر لایه حاوی تراشه آسفالت در مقایسه با لایه بدون تراشه آسفالت است. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه مقادیر تراشه آسفالت کمتر باشد و مقادیر سیمان بیشتر باشد، از ضخامت لایه رویه و اساس تثبیت شده کاسته خواهد شد. هم چنین بر خلاف لایه تثبیت نشده که ضخامت لایه رویه بیشتر از اساس تثبیت نشده است، با تثبیت لایه اساس ضخامت لایه رویه کمتر از ضخامت لایه اساس تثبیت شده می شود بدین مضمون که نقش

هم‌چنین نمودار دانه‌بندی مصالح تراشه آسفالت براساس استاندارد [20] در شکل (۱) نشان داده شده است. در این نمودار محدوده مجاز دانه‌بندی براساس استاندارد [19] نشان داده شده است.

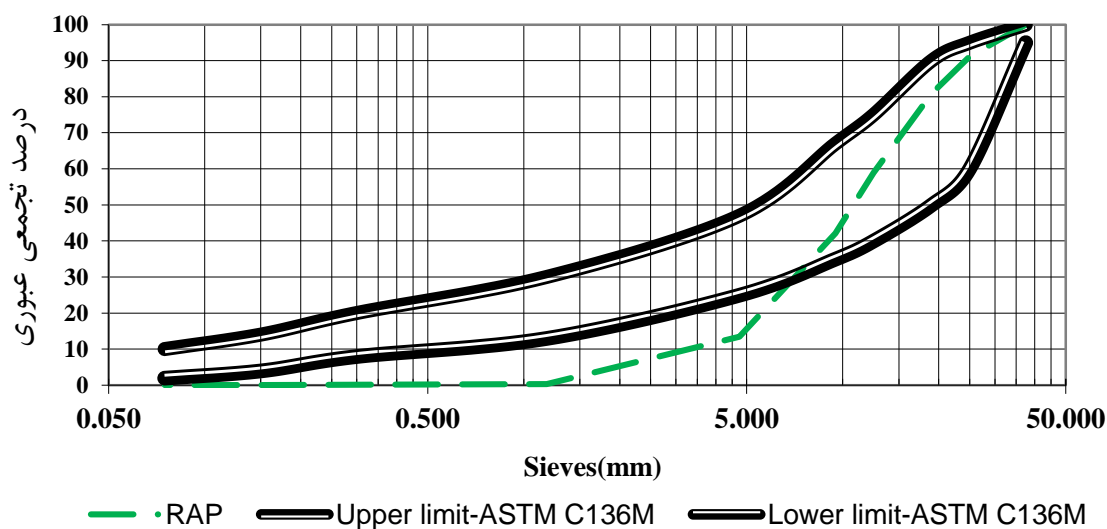
در این مقاله ابتدا با در نظر گرفتن مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت شامل ۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و هم‌چنین مقادیر مختلف ۰٫۳٪، ۰٫۵٪ و ۰٫۷٪ سیمان اقدام به ساخت مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان شد. بدین ترتیب با در نظر گرفتن متغیرهای مورد نظر، ۱۲ نوع طرح اختلاط مورد توجه است. به منظور تهیه نمونه‌های مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم، مخلوط‌های تهیه شده در قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در رطوبت بهینه [21] تحت تراکم استاندارد اصلاح‌شده کوبیده شدند. سپس بعد از ۷ روز عمل‌آوری نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری [22] و کششی [23] در دو وضعیت خشک و مرطوب قرار گرفتند. با تقسیم نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مرطوب به خشک شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR) که بیانگر حساسیت رطوبتی مخلوط تثبیت‌شده است، به دست آمد که به عنوان مبنایی برای بررسی دوام مخلوط‌های تثبیت‌شده مورد نظر است [24]، [6]. در ادامه براساس نتایج مقاومتی به دست آمده و با بهره‌گیری از رابطه ون‌تیل، اقدام به طرح ضخامت روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان در بارهای مختلف شد. نهایتاً با تشکیل تابع هزینه اجرای هر یک از روسازی‌های فوق، درصد مناسب تراشه آسفالت با در نظر گرفتن دو دیدگاه اقتصادی بودن طرح و برآورده نمودن شاخص دوام مورد انتظار که در این مقاله برابر با ۷۰ لحاظ شد، به دست آمد. فلوجارت روش تحقیق این مقاله را می‌توان در قالب شکل (۲) خلاصه نمود. (آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (Unconfined compressive strength) UCS (Indirect strength) و مقاومت کششی غیرمستقیم (Indirect strength) ITS (tensile strength)).

توجه داشت که سطح کرنش RMBE که اغلب به عنوان یک لایه زیرین در سیستم‌های روسازی استفاده می‌شود به ندرت از ۲۰۰ میکرون عبور می‌کند. بنابراین، استفاده از سیمان (تا ۳٪) به عنوان ماده افزودنی در RMBE می‌تواند عمر خستگی را افزایش دهد.

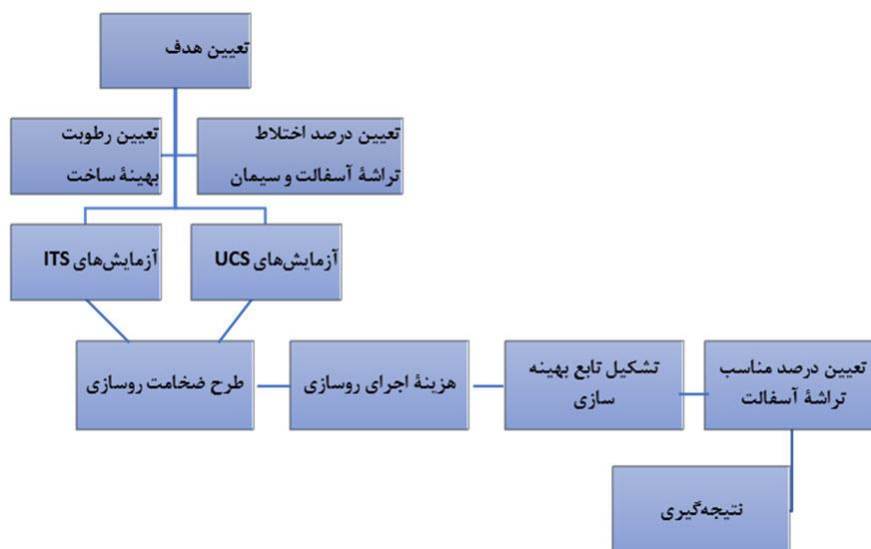
باتوجه به مطالعات گذشته عموم معیارهای مورد پذیرش برای طرح سازه‌ای روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده، براساس مقادیر و محدوده مجاز مقاومت فشاری محدود نشده استوار می‌باشد. نکته‌ای که در این جا باید بدان توجه کرد مطالعات محدودی است که به بررسی مسئله دوام و تأثیر آن بر طرح اختلاط و تعیین مقدار بهینه تراشه آسفالت و سیمان و هم‌چنین طرح سازه‌ای این گونه روسازی‌ها می‌پردازد. نوآوری این تحقیق، تعیین درصد تراشه آسفالت و سیمان بهینه مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان تحت طیف وسیعی از بارگذاری ترافیک و با در نظر گرفتن دو دیدگاه دوام مخلوط و هزینه‌ی اجرای به صورت توأمان است.

روش انجام آزمایش و 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 است و از اهمیت بالایی برخوردار است. به دلیل اهمیت زیاد و خرابی نسبتاً قابل توجه محور، لازم دیده شد تا محور فوق با تثبیت قشر اساس و سپس آسفالت بر روی آن بازسازی شود. بررسی‌های انجام شده براساس آزمایش احیای قیر (آزمایش اکسترکشن به روش دستی) [17] روی چند نمونه خرده آسفالتی نشان داد که به طور متوسط، میزان قیر مربوط به این تراشه آسفالت برابر با ۴٫۵٪ و سختی قیر پسماند در حدود ۳۰ دهم میلی‌متر براساس استاندارد [18] نفوذ سوزن تعیین شد. دانسیته مصالح تراشه آسفالتی ۲۵۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب آن در حدود ۰٫۴ درصد براساس استاندارد [19] تعیین شد.



شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح تراشه آسفالتی و محدوده مجاز دانه‌بندی مصالح اساس حاوی تراشه آسفالت



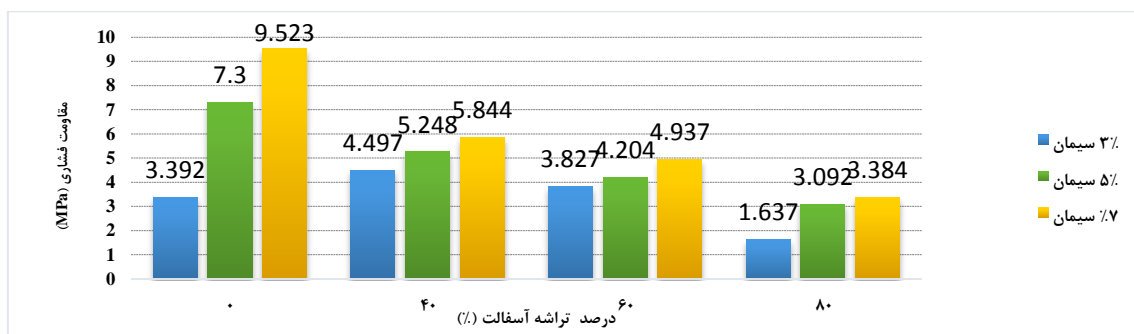
شکل ۲ فلوجارت روش تحقیق مقاله فوق

در راستای طراحی ضخامت روسازی می‌توان بهره برد. بارگذاری وارده به نمونه‌ها به صورت کنترل کرنش بود و سرعت کرنش نمونه ۱ mm/min تعیین شد. شکل (۳) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.

تحلیل و تفسیر نتایج

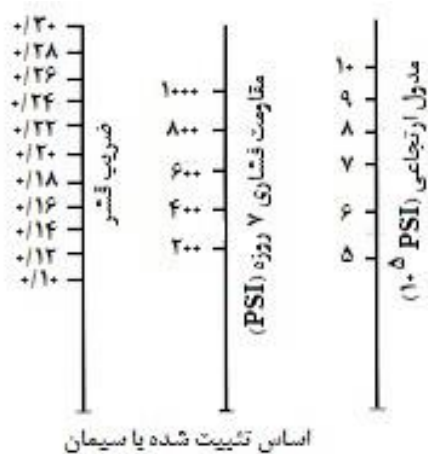
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

از جمله مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزه آنها می‌باشد. از نتایج این آزمایش‌ها به منظور دستیابی به ضریب قشر معادل و مدول برجهنگی قشر فوق



شکل ۳ تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد تراشه آسفالت

(۱) که در معادله فوق UCS مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوطها برحسب (MPa)، Rap درصد تراشه آسفالتی موجود در مخلوطها و Cement درصد سیمان موجود در مخلوطها می‌باشد. با بهره‌گیری از معادله (۱) و رابطه نموداری ارائه‌شده توسط ون‌تیل به‌سادگی می‌توان مدول ارتجاعی و ضریب قشر معادل اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشه آسفالت را به‌دست آورد و نهایتاً به طرح ضخامت لایه‌های مختلف روسازی پرداخت.



شکل ۴ رابطه بین مقاومت فشاری با ضریب قشر و مدول ارتجاعی [27]

مطابق با نمودار ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد تراشه آسفالت مقاومت فشاری محدود نشده نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدود نشده، افزایش می‌یابد. این روند با مطالعات انجام‌شده گذشته همخوانی دارد [6], [14], [24], [25].

یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت، مدول ارتجاعی آنها می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داد که قشرهای اساس حاوی تراشه آسفالت مدول ارتجاعی بالاتری دارند. از دیگر خصوصیات روسازی حاوی درصد تراشه آسفالتی، تأثیر این مواد در تغییرات ضریب قشر لایه شامل تراشه آسفالتی می‌باشد که مستقیماً تأثیر به‌سزایی در ضخامت به‌دست‌آمده روسازی دارد. براساس نتایج مطالعاتی توسط ون‌تیل، می‌توان رابطه مناسبی بین مقاومت فشاری ۷ روزه قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان با مدول ارتجاعی و ضریب قشر اساس، بیان نمود [26]. شکل (۴) نمودار ون‌تیل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهد.

براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده که در نمودار شکل (۳) بیان شد، می‌توان یک رابطه مناسب بین مقاومت فشاری محدود نشده مخلوط، درصد تراشه آسفالتی و سیمان به‌شرح معادله (۱) بیان نمود.

$$UCS = 4.350 - 0.062 * Rap + 0.583 * Cement$$

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم

از دیگر خصوصیات مهم لایه‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام آنها می‌باشد. در این مقاله به منظور بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها، اقدام به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای به منظور بررسی این خصوصیت گردید. از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم و وضعیت مرطوب نسبت به خشک می‌توان به شاخص نسبی دوام مخلوط‌ها (TSR) دست یافت. با ضرب نمودن عدد فوق در ۱۰۰، عدد دوام مخلوط اساس تثبیت شده با سیمان به دست می‌آید. این عدد، دوام قشر اساس تثبیت شده با سیمان را در برابر نفوذ آب به مخلوط و کاهش چسبندگی بین چسب که در این جا فیلم قیر و ملات سیمان با سنگدانه تحت افزایش فشار آب حفره‌ای در فرایند آزمایش می‌باشد، نشان می‌دهد. مراجع مختلف نظرات متفاوتی در رابطه با حد عدد دوام قشر تثبیت شده با سیمان دارند که عموماً این آستانه دوام بین ۵۰ تا ۷۰ تغییر می‌کند. در این مقاله آستانه عدد دوام قشر اساس تثبیت شده با سیمان برابر با ۷۰ در نظر گرفته شده است [24], [28]

[30].

با در نظر گرفتن نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و تعیین پارامتر TSR می‌توان به معادله دوام به شرح معادله (۲) دست یافت.

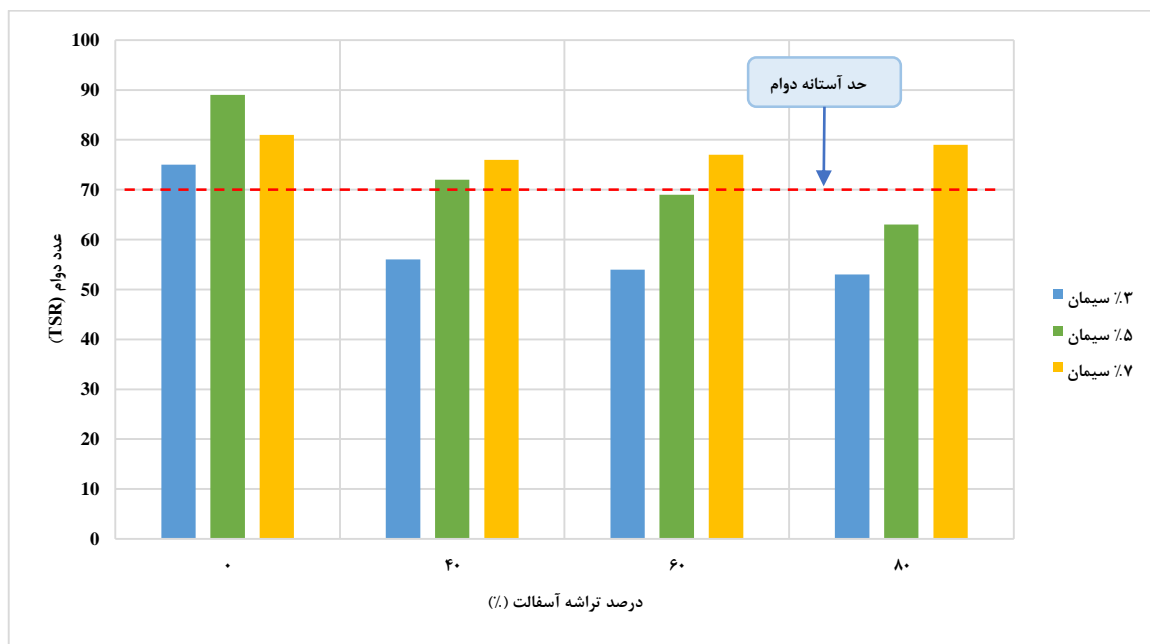
$$\text{TSR} = 47.49 - 1.116 * \text{Cement}^2 + 0.0033 * \text{Rap}^2 + 13.029 * \text{Cement} - 0.769 * \text{RAP} + 0.061 * \text{RAP} * \text{Cement}$$

(۲)

که در معادله فوق TSR عدد دوام (مثلاً ۷۰)، Cement درصد سیمان موجود در مخلوط، Rap درصد تراشه آسفالت موجود در مخلوط است.

با در نظر گرفتن آستانه دوام برابر با ۷۰ و ترسیم نمودار عدد دوام مخلوط‌های مختلف در شکل (۵) خواهیم داشت.

همان‌طور که مشاهده می‌شود بین مخلوط‌های مختلف فقط کدهای R3, R5, R7, R405, R407, R607, R607 و R807 معیار دوام را برآورده می‌کنند.

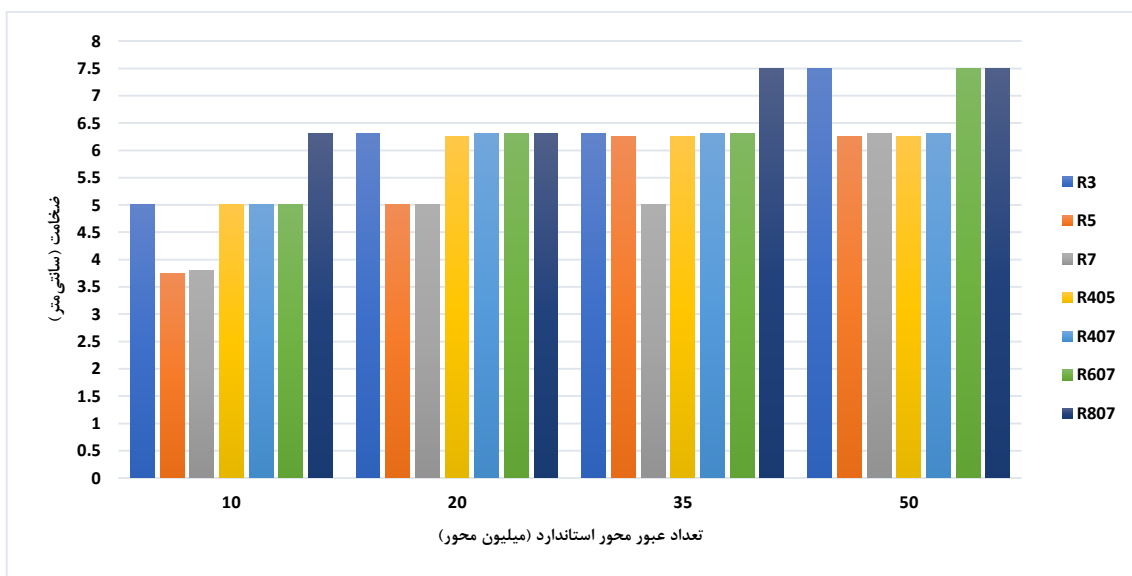


شکل ۵ تغییرات عدد دوام و بررسی مخلوط‌های با کیفیت از لحاظ دوام

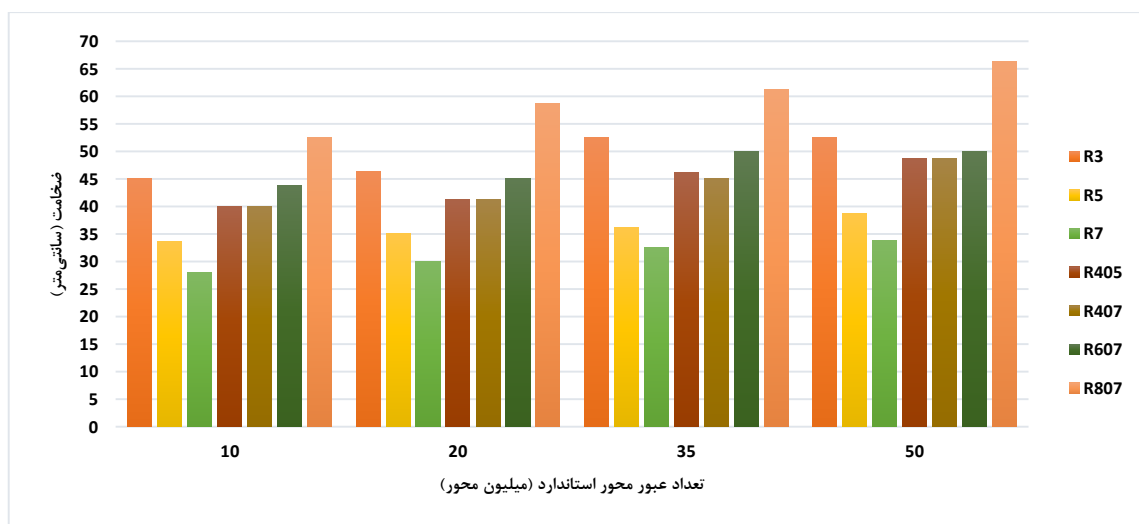
طراحی روسازی‌های اساس تثبیت‌شده

در این بخش براساس نتایج آزمایش‌های دوام و مخلوط‌هایی که الزام عدد دوام را رعایت می‌کنند، اقدام به طرح روسازی‌ها گردید. طرح روسازی‌ها براساس رابطه آشتو و با در نظر گرفتن معیار حداقل ضخامت هر قشر به منظور انتقال بار به لایه‌های زیرین

انجام گرفت [26]. شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب نتایج طرح ضخامت قشر رویه، قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهند. قابل ذکر است که ضخامت قشر زیراساس براساس رعایت الزام حداقل ۱۵ سانتی‌متر نشریه ۲۳۴ برابر با مقدار زیر در نظر گرفته شد. [27]



شکل ۶ تغییرات ضخامت قشر رویه برحسب تعداد محور عبوری



شکل ۷ تغییرات ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان برحسب تعداد محور عبوری

کیلومتر توسط مخلوطکن KMA در محل پروژه و حمل به محل اجرا به فاصله ۱۰ کیلومتر و اجرا و پخش توسط فینیشر و کوبیدگی تا ۹۷٪ تراکم استاندارد اصلاح شده به ضخامت به دست آمده در شکل (۷) ضخامت هر لایه حداکثر ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و ضخامت های بیشتر در چند لایه محاسبه هزینه شد و عمل آوری تا ۷ روز با آب و کاترژنی به فواصل ۵ متر از هم و پخش آسفالت براساس نتایج به دست آمده در شکل (۶) به فاصله حمل ۴۰ کیلومتر مفروض است. این پژوهش براساس این فرضیات پایه ریزی شده است.

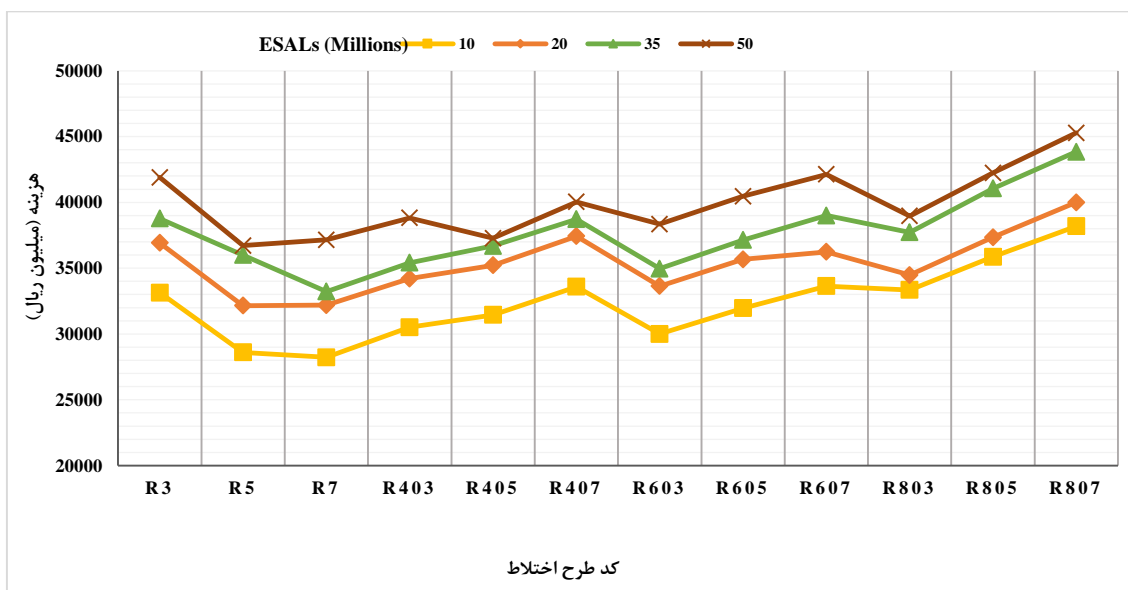
از آنجا که هدف از این پژوهش بررسی اثر میزان تراشه آسفالت و سیمان بر هزینه اجرا می باشد که اساس تثبیت شده با احتساب شاخص دوام می باشد که در معادله (۵) فرمول بندی شد، هزینه بقیه پارامترها در قالب مقدار ثابت در مدل هزینه وارد شده است. بدیهی است که با توجه به زمان و مکان اجرا، تابع هزینه متفاوت خواهد بود.

در ادامه براساس هزینه های طراحی، تابع هزینه به صورت تابعی از درصد سیمان و درصد تراشه آسفالت تشکیل شده و نهایتاً با استفاده از تکنیک بهینه سازی، مقدار درصد مناسب تراشه آسفالت براساس هر دو دیدگاه دوام و هزینه به دست می آید. شکل (۸) هزینه اجرای روسازی حاوی مقادیر مختلف تراشه آسفالت و سیمان تحت تردد بارهای محوری مختلف شامل ۱۰ میلیون محور الی ۵۰ میلیون محور استاندارد عبوری بدون توجه به مسئله دوام را نشان می دهد. در نمودار شکل (۸) دوازده نوع طرح اختلاط شامل چهار متغیر درصد تراشه آسفالت (۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪) و سه متغیر درصد سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) در نظر گرفته شده است. کدبندی مخلوط های نمودار شکل (۸) مشابه با کدبندی نمودار شکل های (۶) و (۷) می باشد. برای مثال R605 به معنای مخلوط حاوی ۶۰٪ تراشه آسفالت و ۵٪ سیمان است.

مطابق با نمودارهای ترسیم شده می توان فهمید، به طور کلی مخلوط های با کد R3، R5 و R7 نسبت به سایر مخلوط ها دارای ضخامت قشر رویه و اساس کمتری هستند. دلیل این موضوع عبارت است از این که، زمانی که قشر اساس تثبیت شده با سیمان درصد تراشه آسفالت بیشتری داشته باشد، ضریب قشر آن کمتر می شود و به موازات آن، ضخامت قشرهای فوق نیز کاهش می یابد. در واقع مطابق با رابطه ون تیل هر چه مدول ارتجاعی و ضریب قشر لایه اساس بیشتر باشد، به ضخامت کمتر رویه برای انتقال بار ترافیکی به لایه های زیرین نیاز داریم. از ضخامت های طراحی شده فوق به منظور تعیین هزینه هر یک از روسازی های طرح شده و نهایتاً تشکیل تابع هزینه و به دست آوردن مقدار بهینه تراشه آسفالت و سیمان در مخلوط استفاده می شود.

آنالیز هزینه روسازی های طرح شده

در این بخش براساس نتایج طرح ضخامت روسازی ها، اقدام به تشکیل تابع هزینه روسازی ها می گردد. در این راستا ابتدا براساس روسازی های طرح شده و با بهره گیری از فهرست بهای راه و باند ۱۳۹۳، که در زمان ساخت این محور فهرست بهای پایه پیمان بوده است، اقدام به متره و برآورد هزینه های ساخت راه به عرض ۵٫۵ متر (یک خط و شانه مجاورش) و طول ۱۰ کیلومتر می گردد که در شکل (۸) نشان داده شده است. بدیهی است براساس ضرایب پیمان می توان هزینه اجرا را در زمان های مختلف دیگر با دانستن ضریب پیمان پایه محاسبه نمود. برای محاسبه هزینه اجرای روسازی مواردی از قبیل، تراشه لایه مضمحل شده موجود، دانه بندی مصالح تراشه آسفالت، اضافه نمودن مصالح اساس با فاصله حمل ۴۰ کیلومتر، مخلوط مصالح اساس و تراشه آسفالت به نسبت های (۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪) در درصد های مختلف سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) با فاصله حمل ۱۲۰ کیلومتر براساس میزان آب بهینه با فاصله حمل ۴۰



شکل ۸. هزینه اجرای روسازی با اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشه آسفالت در تردد بارمحوری مختلف

$$\begin{aligned} \text{Costs} = & 35450.62 + 0.0436 * \text{RAP}^3 - \\ & 3.127 * \text{RAP}^2 - 134.41 * \text{RAP} - \\ & 0.293 * \text{RAP}^2 * \text{Cement} + \\ & 55.622 * \text{RAP} * \text{Cement} - \\ & 1217.93 * \text{Cement} + 181.83 * \text{ESALs} \end{aligned}$$

$R^2_{\text{adj}}=0.92$

در معادلات فوق، Costs هزینه اجرای روسازی برحسب میلیون ریال، Rap درصد تراشه آسفالت (مثلاً ۸۰) موجود در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان، Cement درصد سیمان موجود (مثلاً ۷) در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان و ESALs تعداد محور استاندارد عبوری از راه مورد نظر برحسب میلیون محور می‌باشد.

شکل (۹) مقادیر هزینه در مقابل مربع مقادیر تراشه آسفالت و توان اول سیمان در مقابل سطوح مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد که در بین گزینه‌های دیگر مدل‌سازی، بهترین پوشش و بالاترین خوبی برآزش را نشان داد. مطابق با نمودار ترسیم‌شده می‌توان دریافت که روند تغییرات هزینه اجرایی روسازی شامل اساس

با استفاده از نتایج هزینه روسازی درج شده در شکل (۸)، می‌توان به تابع هزینه برحسب درصد تراشه آسفالت و درصد سیمان و مقدار بارگذاری محور استاندارد در طول عمر طرح به فرم معادله (۴) و (۵) و (۶) مطابق زیر دست‌یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین خوبی برآزش در مربع درصد تراشه آسفالت (RAP) و توان اول سیمان (Cement) و ESALs توسط معادله (۵) تخمین زده می‌شود. از این‌رو این معادله به‌عنوان رابطه منتخب برای تخمین مقدار بهینه تراشه آسفالت و سیمان به‌منظور کمینه نمودن هزینه اجرای لایه تثبیت‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{aligned} \text{Costs} = & 26756.528 + 49.214 * \text{Rap} + \\ & 433.910 * \text{Cement} + 181.954 * \text{ESALs} \end{aligned}$$

$R^2_{\text{adj}}=0.76$

(۴)

$$\begin{aligned} \text{Costs} = & 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 - \\ & 201.00 * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} * \text{Cement} - \\ & 1078.61 * \text{Cement} + 191.454 * \text{ESALs} \end{aligned}$$

$R^2_{\text{adj}}=0.94$

و دوام را به همراه شروط مختلف به یکی از روش‌های متداول غیرخطی بهینه نمود.

برنامه‌سازی غیرخطی (Nonlinear programming) فرایند حل مسئله بهینه‌سازی است که در آن برخی از محدودیت‌ها یا خود تابع هدف غیرخطی است. این مسئله بهینه‌سازی، یک سیستم از برابری‌ها و نابرابری‌ها بر روی مجموعه‌ای از متغیرهای ناشناخته حقیقی، در یک تابع هدف است که باید کمینه یا بیشینه شود. یکی از روش‌های حل این مسئله استفاده از روش لاگرانژ است. شرایط لازم برای حل مسئله را می‌توان از طریق یافتن نقاط بحرانی تابع لاگرانژ (ماکزیم‌سازی بدون قید) به دست آورد. در این روش یکی از محدودیت‌ها (محدودیت TSR) با تکنیک لاگرانژ به داخل تابع هدف برده می‌شود و مسئله ساده‌تر حل خواهد شد.

همان‌طور که در رابطه (۷) مشخص است می‌توان تابع هزینه را با استفاده از شروط مطرح شده حل نمود و جواب بهینه تابع هزینه متناظر با آن محدودیت‌ها را استخراج نمود. در این رابطه حداقل TSR مورد پذیرش ۷۰ و حداکثر قابل قبول آن ۱۰۰ می‌باشد. هم‌چنین دیگر شروط اضافه شده، حدود تغییرات مصالح تراشه آسفالت، سیمان و بارگذاری می‌باشد. در این تحقیق از Solver اکسل برای بهینه نمودن تابع هزینه در رابطه (۷) استفاده شد. به منظور استخراج کلیه جواب‌های محتمل دامنه مقدار TSR بزرگ‌تر از توصیه آیین‌نامه‌های مختلف ($70 \leq \text{TSR} \leq 100$) در نظر گرفته شد. اگر TSR را در بین محدوده $50 \leq \text{TSR} \leq 100$ در نظر بگیریم مقادیر پاسخ بهینه تابع هزینه مطابق جدول (۱) محاسبه خواهد شد. در این حالت برای TSR کوچک‌تر از ۵۵ و بزرگ‌تر از ۸۵ تابع هزینه نقطه بهینه‌ای ندارد. براساس جدول (۱) با کاهش محدودیت TSR می‌توان از تراشه آسفالت بیشتر و سیمان کمتری استفاده نمود. باید توجه نمود که روند تغییرات پاسخ کمینه تابع هزینه، خطی نیست و با توان دوم در $\text{TSR} = 65$ دارای بیشینه است.

$$\text{Costs} = 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 -$$

$$201.00 * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} * \text{Cement} -$$

تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر تراشه آسفالت در تردد بار محوری استاندارد مختلف، شبیه هم می‌باشد. از شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه جواب بهینه (حداقل) هزینه اجرا، تقریباً در محدوده ۳۰ الی ۷۰ درصد تراشه آسفالت به همراه ۵ الی ۷ درصد سیمان واقع شده است که این مجموعه جواب در شکل (۱۰) نشان داده می‌شود. در صورتی که محدوده قابل قبول مخلوط‌های بادوام (TSR بزرگ‌تر مساوی ۷۰) برگرفته از نمودار (۵) را در شکل (۹) (به صورت کادر سیاه‌رنگ) ترسیم کنیم خواهیم دید که مجموعه پاسخ روسازی بادوام الزاماً بر مجموعه جواب روسازی ارزان منطبق نیست که با رسم این مجموعه جواب در شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که این دو مجموعه پاسخ، دارای فصل مشترکی هستند. به نظر می‌رسد پاسخ ساخت یک روسازی کم‌هزینه و بادوام در این محدوده پاسخ واقع شده باشد. از آنجا که استفاده حداکثری از تراشه آسفالت هزینه حمل و خرید مصالح جدید را کاهش می‌دهد شاید یک پاسخ منطقی استفاده از ۳۰ درصد تراشه آسفالت به همراه ۴ درصد سیمان یا به عبارتی کد R304 باشد.

براساس نمودارهای ترسیم شده (۸)، بیشترین هزینه ساخت مربوط به استفاده از مقادیر زیاد تراشه آسفالت و استفاده از مقادیر زیاد سیمان می‌باشد. این موضوع با تحقیقات طاها هم‌خوانی دارد [12], [3]. مشخص است که با افزایش تراشه آسفالت در مخلوط اساس تثبیت شده، مقاومت و ضریب قشر روسازی نیز کاهش می‌یابد و نیاز به ضخامت بیشتر می‌باشد. از طرفی افزایش سیمان علاوه بر افزایش هزینه اجرا از بعد هزینه مصالح مصرفی و هزینه حمل، نشان داد که به طور خطی باعث افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش ضخامت روسازی نخواهد شد.

باید توجه داشت که نمودار (۱۰) با فرضیاتی ترسیم شده است که مجموعه پاسخ براساس این فرضیات معتبر است. در صورتی که نیازمند مجموعه جواب جامع‌تری باشیم می‌توانیم با فرمول‌بندی تابع هزینه و استفاده از تکنیک‌های بهینه‌یابی به مجموعه جواب جامع‌تری دست یابیم. به منظور یافتن پاسخ بهینه می‌توان معادلات هزینه

$$3 \leq \text{Cement} \leq 7$$

$$0 \leq \text{RAP} \leq 80$$

$$10E6 \leq \text{ESALs} \leq 50E6$$

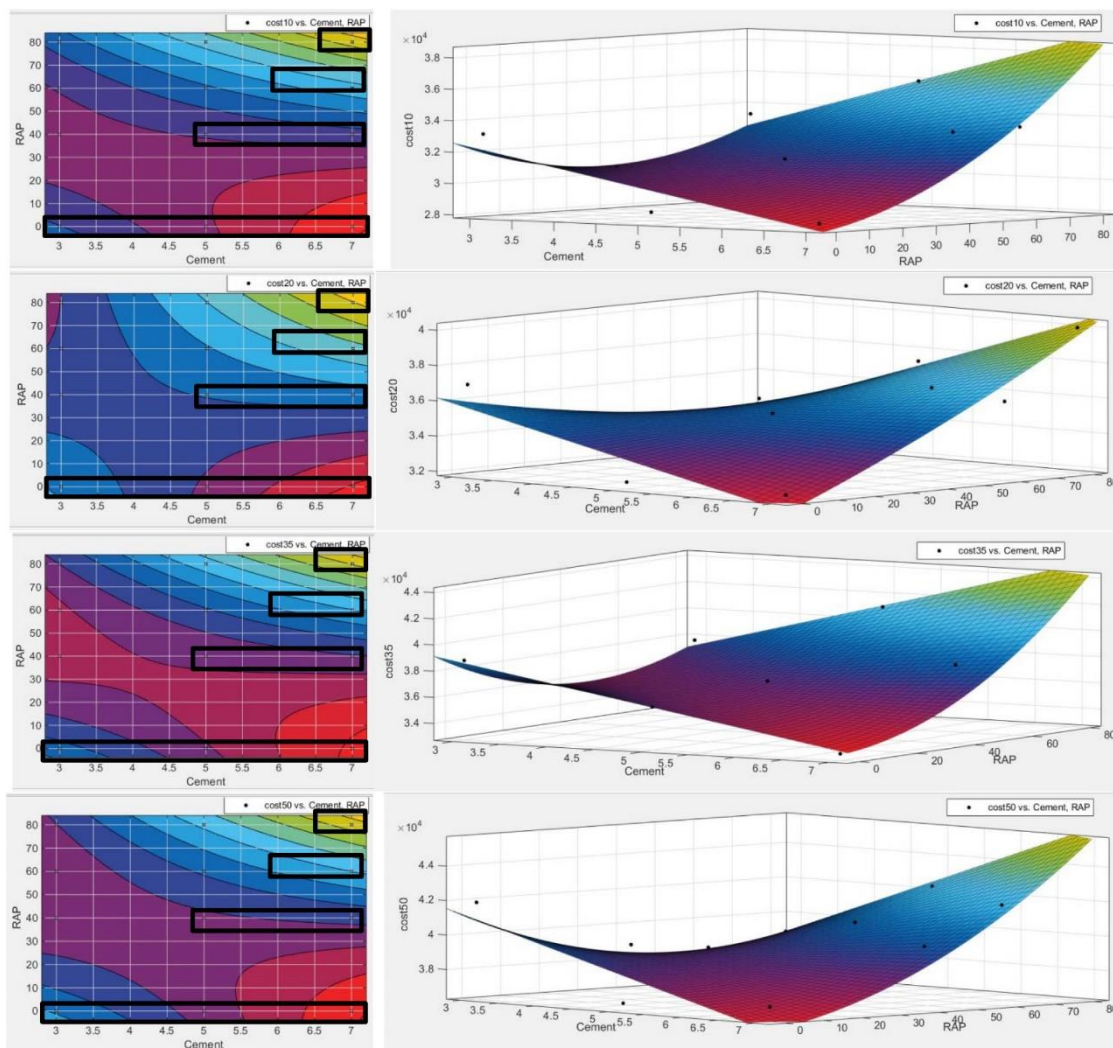
$$1078.61 * \text{Cement} + 191.454 * \text{ESALs}$$

$$\text{TSR} = 47.49 - 1.116 * \text{Cement}^2 +$$

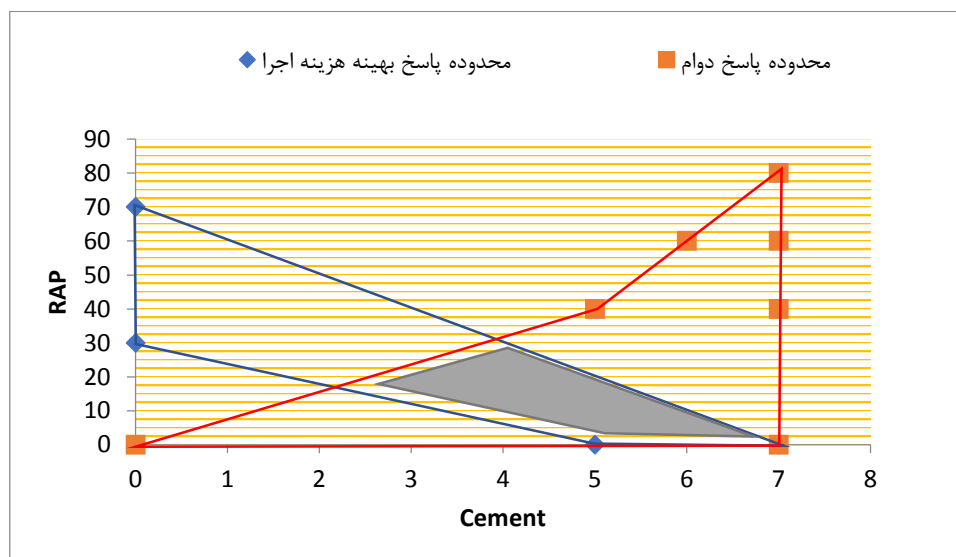
$$0.0033 * \text{Rap}^2 + 13.029 * \text{Cement} -$$

$$(V) \quad 0.769 * \text{RAP} + 0.061 * \text{RAP} * \text{Cement}$$

$$100 \geq \text{TSR} \geq 50$$



شکل ۹ ترسیم رابطه بین هزینه اجرا در مقابل درصد تراشه آسفالت مصرفی و سیمان در سطوح مختلف بارگذاری ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون محور استاندارد به همراه ترسیم محدوده مخلوط‌های قابل قبول از نظر دوام (کادر مشکی)



شکل ۱۰ مجموعه جواب بهینه (حداقل هزینه) ساخت روسازی بادوام ($TSR > 70$)

جدول ۱ جواب‌های بهینه تابع هزینه از مقادیر متفاوت تراشه آسفالت و سیمان با توجه به محدودیت‌های TSR

TSR	RAP	Cement	cost
55	51.93498492	3	30,734.21
60	38.93417509	3.149876835	30,767.75
65	34.33919233	3.606159305	30,869.88
70	29.60648301	4.157165515	30,869.07
75	24.89388374	4.933766096	30,687.91
80	15.88964307	6.272153618	29,868.37
85	0	6.518339883	29,151.53

است. باید توجه داشت که جواب به‌دست‌آمده یکی از جواب‌های قابل قبول از بین مجموعه پاسخ‌های محتمل می‌باشد. در صورتی که حدود اولیه مقادیر متغیرهای RAP و سیمان را عوض کنیم قطعاً به پاسخ‌های دیگری خواهیم رسید.

نکته‌ای که بعد از بررسی شکل (۸) به نظر می‌رسد نشان‌دهنده این است که حداقل هزینه ساخت در بار محور حداقل و در نبود تراشه آسفالت و با صرف سیمان در بازه ۵ الی ۷ درصد حادث خواهد شد. ولی با بررسی جواب‌های بهینه جدول (۱) مشاهده می‌شود در نظر

محاسبات نشان داد که جواب بهینه مقادیر RAP و سیمان به‌دست‌آمده مستقل از سطوح مختلف بارگذاری است؛ یعنی اگر مقدار حداقل بارگذاری را افزایش دهیم فقط تابع هزینه تغییر می‌کند ولی مقدار بهینه RAP و سیمان ثابت می‌ماند. این نکته را می‌توان با بررسی شکل (۹) نیز مشاهده نمود. با مقایسه نتیجه به‌دست‌آمده از فرایند محاسباتی رابطه (۷) و نتیجه به‌دست‌آمده از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که حداقل $TSR=70$ را در نظر بگیریم، درصدهای بهینه مقادیر RAP و سیمان به‌دست‌آمده برای ساخت مخلوط با کد R304 معتبر

سیمان نقش اصلی باربری روسازی به‌عهدۀ قشر اساس است، با افزایش قابل توجه تکرار محور استاندارد عبوری از راه، ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده نیز افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به‌وضوح در شکل (۷) یافت. به‌علاوه از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که شدت این افزایش ضخامت به ازای افزودن ۸۰٪ تراشه آسفالت به مخلوط، نسبت به سایر موارد بیشتر است. از آنجایی که افزایش ضخامت لایه اساس تثبیت‌شده باعث افزایش هزینه اجرا خواهد شد (تبدیل شدن از یک لایه اساس به دو لایه اساس در فرایند اجرا که هزینه اجرایی را تقریباً دو برابر می‌کند)، پیشنهاد می‌شود که حداکثر میزان استفاده از تراشه آسفالت به ۳۰٪ محدود شود.

نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله به‌دست آوردن درصد تراشه آسفالت و سیمان به‌منظور بهینه نمودن هزینه اجرای مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بارمحوری استاندارد متغیر و با در نظر گرفتن دیدگاه دوام مخلوط بود. در این راستا تعدادی آزمایش‌های مقاومت فشاری مختلف انجام شد که نتیجه آن دست‌یابی به یک رابطه مناسب مقاومت فشاری برحسب درصد تراشه آسفالت و سیمان بود به‌گونه‌ای که بتوان با کمک آن ضریب قشر و مدول ارتجاعی معادل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را به‌دست آورد. در ادامه آزمایش‌های مقاومت کششی نیز در دو حالت مرطوب و خشک انجام گردید و از نتایج آزمایش‌های به‌عمل‌آمده، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به‌عنوان معیاری برای دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان محاسبه شد. نهایتاً براساس ضریب قشر معادل و مدول ارتجاعی قشر اساس تثبیت‌شده و مفروضات منطقی درمورد خصوصیات لایه‌های رویه و زیراساس، ضخامت روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بار محوری مختلف به‌دست آمد. در پایان معادله هزینه که هم‌زمان عامل دوام و هزینه‌ی اجرا را در نظر بگیرد تشکیل گردید. بر این اساس مهم‌ترین نتایج به‌شرح

گرفتن عامل دوام در طرح سازه‌ای روسازی باعث کاهش هزینه و مصرف مقدار محدود (۳۰٪) تراشه آسفالت در TSR=70 درصد خواهد شد. این یافته با یافته‌های پیشین آدرسی و همکاران هم‌خوانی دارد که در سطوح کم مصرف سیمان و استفاده از ۳۰ الی ۴۰ درصد تراشه آسفالت، مقاومت فشاری مخلوط‌های تثبیت‌شده بیشتر از حالتی است که فقط از سیمان استفاده شده‌است و این به‌دلیل اضافه شدن مقاومت چسبندگی قیر به مقاومت چسبندگی سیمان می‌باشد [6].

نتایج نشان داد در صورتی که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینه تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینه تراشه آسفالت به ۱۶ درصد کاهش می‌یابد و مقدار سیمان تا ۶٫۳ درصد افزایش می‌یابد. از آنجا که تابع هزینه به ضخامت روسازی وابسته است و این پارامتر خود به پارامترهایی چون عدد قشر، عدد سازه‌ای و بارگذاری وابسته است. مشاهده می‌شود در این مسئله خاص تابع هزینه بیشتر به تغییرات بارگذاری حساس می‌باشد و دوام لایه تثبیت‌شده (در قالب شاخص TSR) به‌مقدار تراشه آسفالت و سیمان مصرفی وابسته است؛ لذا با افزایش TSR مقدار تراشه آسفالت کاهش و مقدار سیمان افزایش می‌یابد ولی هزینه نهایی روسازی تغییر چندانی نمی‌کند. در واقع محدوده جواب هزینه حداقل اجرای روسازی، با محدوده جواب روسازی بادوام دارای اشتراک می‌باشد و در صورت کاهش تراشه آسفالت از ۲۹٫۶ به ۱۶ درصد و افزایش سیمان از ۴٫۱۶ به ۶٫۳ درصد هزینه اجرای روسازی با دوام خیلی کم تغییر می‌کند.

هنگام انتخاب طرح اختلاط مناسب باید به دسترس بودن مصالح تازه و تراشه آسفالت توجه اکید شود. مطالعات انجام‌شده توسط سازمان‌های مختلف حمل‌ونقل آمریکا بیانگر این موضوع است که حداکثر درصد تراشه آسفالت مناسب مخلوط‌های آسفالتی حدوداً برابر با ۵۰٪ انتخاب شود. [31] [24] اهمیت این موضوع در تعداد تکرار محور استاندارد بالا، افزایش می‌یابد. در واقع از آن‌جایی که در روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با

و سیمان اثرگذار نیست و این مورد در شکل (۹) قابل مشاهده است.

نتایج نشان داد در صورتی که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینه تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینه تراشه آسفالت به ۱۶ درصد کاهش می‌یابد و مقدار سیمان به ۶,۳ درصد افزایش می‌یابد.

به‌عنوان نتیجه نهایی می‌توان پیشنهاد نمود در هر پروژه تثبیت لایه اساس با سیمان حاوی تراشه آسفالت باتوجه به شرایط پروژه، اهمیت آن و... سطح معیار دوامی تعیین گردد و بر این اساس مقادیر بهینه تراشه آسفالت و سیمان تعیین شوند به‌گونه‌ای که حداقل معیار دوامی برآورده شود و در ادامه باتوجه به سطح بارگذاری وارده، روسازی طراحی شود. نتایج این تحقیق نشان داد هزینه طرح روسازی با این روش، هزینه حداقلی خواهد بود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق قرارداد شماره ۷۳۴۱ مورخ ۱۴۰۰/۰۵/۲۳ انجام گردیده است.

زیر حاصل گردید:

تابع هزینه به‌دست آمده در این تحقیق براساس فرضیاتی استوار است و اساسا در هر پروژه می‌بایست براساس الزامات اجرایی، فواصل حمل و قیمت روز مصالح یا فهرست‌بهای پایه پیمان این معادله بازنویسی گردد.

از دو روش برای تعیین جواب بهینه در این تحقیق استفاده شد که نتیجه هر دو روش بسیار به هم نزدیک است.

جواب بهینه تابع هزینه در مقدار ۲۹,۶ درصد تراشه آسفالت، ۴,۱۶ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد که برای ۱۰ کیلومتر طول راه به عرض ۵,۵ متر (یک خط و شانه) براساس فهرست‌بهای پایه پیمان موضوع مطالعه حاضر و براساس شاخص دوام $TSR=70$ برابر ۳۰۸۶,۹۰۷ میلیون ریال تعیین شد. نتایج نشان داد که حداقل هزینه در حداقل سطح بارگذاری حاصل می‌شود که کاملا بدیهی است.

نتیجه بهینه‌سازی نشان داد در صورتی که حداقل بارگذاری را افزایش دهیم تنها تابع هزینه افزایش می‌یابد و تغییرات بارگذاری بر مقدار جواب بهینه تراشه آسفالت

مراجع

1. Taha, R., Ali, G., Basma, A. and Al-Turk, O., "Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases.", in *Transportation Research Records*, pp. 1652, Vol. 264–269, (1999).
2. R. Taha, "Evaluation of Cement Kiln Dust-stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases.", in *Transportation Research Records*, pp. 1819, Vol. 11-17, (2003).
3. M. Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. and Al-Zubeidi, "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 239–245, (2002).
4. C. H. Trzebiatowski, B.D., and Benson, "Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Recycled Asphalt Pavement", *Geotech. Test. J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 1–6, (2005).
5. M. Adresi, A. Hassani, A. Khishdari, and M. Zeini, "Determination of Optimum Mix Design for Cement Treated Base Containing High Volume of Reclaimed Asphalt Pavement", *Transp. Infrastructures Eng. J.*, Vol. 3, No. 1, pp. 53–68, (2017).

6. Adresi, M., Ahmadi, A., and Rooholamini, H., "Influence of High Content of Reclaimed Asphalt on the Mechanical Properties of Cement-treated Base under Critical Environmental Conditions", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. October, pp. 1–8, (2017).
7. L. You, K. Yan, Y. Yue, and T. Yu, "Comparisons of Natural and Enhanced Asphalt Mixtures Containing Recycled Cement-Stabilized Macadam as Aggregates", *Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 30, No. 34, pp. 502003, (2020).
8. Taylor, P., Alam, T. B., Abdelrahman, M., and Schram, S. A., "International Journal of Pavement Engineering Laboratory Characterisation of Recycled Asphalt Pavement as a Base Layer", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 11, No. 2, pp. 37–41, (2010).
9. Faramarzi, M., Lee, K. W., Kim, Y., and Kwon, Y., "A Case Study on a Cement Treated RAP Containing Asphalt Emulsion and Acryl Polymer", *Case Stud. Constr. Mater.*, Vol. 9, pp. 1-25, (2018).
10. Faramarzi, M., Kim, Y., Kwon, S., and Lee, K.-W. W., "Evaluation of Cold Recycled Asphalt Mixture Treated with Portland Cement as Base-Layer Materials", *Am. Soc. Civ. Eng. Author*, Vol. 30, No. 73, pp. 502002, (2020).
11. Francois, A., Ali, A., and Mehta, Y., "Evaluating the Impact of Different Types of Stabilised Bases on the Overall Performance of Flexible Pavements", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. September, pp. 1–9, (2017).
12. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi, M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. 14, pp. 239–245, (2002).
13. Faysal, M., *et al.*, "Determination of the Structural Coefficient of Different Combinations of Cement-Treated/Untreated Recycled Base Materials", in *Geotechnical and Structural Engineering Congress*, pp. 1198–1208, (2016).
14. Abdo, F. Y., "Cement-stabilized Base Courses-concrete Airport Pavement Workshop", (2009).
15. ARRA, "Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Basic asphalt recycling manual," (2001).
16. Ayar, P., "Effects of Additives on the Mechanical Performance in Recycled Mixtures with Bitumen Emulsion: an Overview", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 178, pp.551-561, (2018).
17. ASTM D2172/D2172M-17e1, "ASTM D2172 / D2172M-17e1, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org", (2017).
18. ASTM D5/D5M-19a, "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org", (2019).
19. ASTM C29/C29M-16, "Standard Test Method for Bulk Density ('Unit Weight') and Voids in Aggregate", (2016).

20. ASTM D1633/D1633M, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2014).
21. ASTM D1557-12e1, "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2012).
22. ASTM D1633-00, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2007).
23. ASTM C496/C496M-11, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2004).
24. Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., and Amir Khanian, S., "A literature Review on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 180, pp. 579–604, (2018).
25. Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., and Canestrari, F., "Performance Evaluation of a Cold-recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt", *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 14, No. S1, pp. 149–161, (2013).
26. AASHTO, "Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide A Manual of Practice", (2008).
27. "The Ministry of Roads and Urban Development", "Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234", (2011).
28. Newcomb, D. E., Brown, E. R., and Epps, J. A., "Designing HMA Mixtures with High RAP Content A Practical Guide", (2007).
29. Mary Stroup-Gardiner and Tanya Wattenberg-Komas, "Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications Volume 6: Reclaimed Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, and Construction Demolition Waste", (2013).
30. "AASHTO T 283, RESISTANCE OF COMPACTED ASPHALT MIXTURES TO MOISTURE-INDUCED DAMAGE", (2014).
31. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. September 2015, (2002).

