

آنالیز حساسیت و ارایه مدل ریاضی برای تعیین درصد قیر بهینه در آسفالت

با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای

پوریا اسلامی شهرباکی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خیبری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

حامد خانی‌سانجیح*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: khani@yazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۲۷ - تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۲/۱۵

صفحه ۱-۱۲

چکیده

در حال حاضر طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای در ایران بر اساس روش مارشال انجام می‌شود. در روش طرح اختلاط مارشال درصد بهینه قیر بر اساس میانگین مقادیر درصد قیری که بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین فضای خالی در مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای را نتیجه می‌دهد، تعیین می‌شود. که این درصد الزاماً بهینه‌ترین درصد قیر نیست. در این مقاله یک مدل ریاضی برای تعیین درصد قیر بهینه در آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای به روش مارشال توسعه داده شده است. برای این منظور ابتدا معادلات مربوط به تغییرات پارامترهای موثر در طرح اختلاط مخلوط آسفالتی SMA نسبت به درصد قیر با استفاده از روش کمترین مربعات و از طریق تقریب با یک چندجمله‌ای درجه دوم تعیین می‌شود و سپس با تکیه بر این معادلات و استفاده از یک مدل ریاضی چند هدفی درصد بهینه قیر به گونه‌ای تعیین می‌شود که مخلوط آسفالتی به دست آمده تمامی شرایط گفته شده در آیین‌نامه را داشته باشد و دارای بیشترین وزن مخصوص، بیشترین استقامت مارشال و مناسب‌ترین درصد فضای خالی نیز باشد. پس از به دست آمدن درصد قیر بهینه، آنالیز حساسیت نسبت به درصد قیر خیلی کم بر روی پارامترهای موثر (مقاومت مارشال، چکالی حقیقی مخلوط آسفالتی، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی و درصد فضای خالی مصالح سنگی) در طرح اختلاط آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای انجام گردید. نتایج این تحقیق حاکی از دقت بیشتر روش مدل‌سازی ریاضی نسبت به روش سنتی است و آنالیز حساسیت نیز تاثیر میزان خطا در تعیین درصد قیر بهینه را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)، فرایند طرح اختلاط، مدل‌سازی ریاضی، آنالیز حساسیت

۱- مقدمه

طرف دیگر ساخت رویه‌های آسفالتی مقاوم در برابر تغییر شکل برای جاده‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین حائز اهمیت است [نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹]. اجرای رویه‌های آسفالتی گرم با دانه بندی پیوسته در راه‌های با آمد و شد زیاد و بار محوری

افزایش عمر رویه‌های آسفالتی، اجرای رویه آسفالتی مقاوم در برابر آمد و شد زیاد و بار محوری سنگین و تغییرات دما و فراهم نمودن رویه‌ای غیر لغزنده همراه با تامین جریان آمد و شد مورد توجه دست اندر کاران صنعت روسازی می‌باشد. از

سنگین به ویژه در مناطق گرمسیری، گاهی خرابی‌هایی نظیر گودی مسیر چرخ و قیر زدگی را به دنبال دارد. این خرابی‌ها مستلزم اجرای عملیات تعمیر و بهسازی در فواصل زمانی نسبتاً کوتاه پس از بهره برداری است که هزینه زیاد را در بر خواهد داشت [Muniandy et al, 2014]. در سال‌های اخیر در برخی از کشور های اروپایی، ایالات متحده آمریکا و کانادا جهت تامین برخی از انتظارات خاص روسازی نظیر مقاومت در برابر شیار شدگی جای چرخ، جلوگیری از گسترش ترک‌های انعکاسی و تحمل بار محوری سنگین از مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA^1) استفاده شده است [Chiu and Lu, 2007].

مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای از انواع مخلوط‌های آسفالتی گرم هستند. مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای خصوصاً در مناطق گرمسیری و در راه‌های با آمدوشد زیاد و بار محوری سنگین استفاده می‌شوند. این مخلوط‌ها مقاومت بالایی را در مقابل شیار افتادگی و تغییر شکل دائم از خود نشان می‌دهند [Fallon and McNally and Gibney, 2016]. مصالح درشت‌دانه ساختار اصلی این مخلوط‌ها را تشکیل می‌دهند. در مخلوط‌های آسفالتی SMA، مصالح سنگی درشت به میزان نسبتاً زیاد در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته مصرف می‌گردند. در این مخلوط‌ها مصالح سنگی درشت مستقیماً با یکدیگر در تماس بوده و ایجاد قفل و بست می‌نمایند. به عبارت دیگر تماس مستقیم سنگدانه به سنگدانه عامل اصلی پایداری و مقاومت است. کیفیت بالای مصالح سنگی از نظر جنس و مقاومت در پایداری و باربری این مخلوط‌ها موثر است [Cao and Liu and Feng, 2013]. به علت استفاده مقدار زیاد مصالح سنگی درشت در این مخلوط‌ها و دانه‌بندی میان تهی آنها، سطوح حاصله دارای زبری نسبتاً زیادی گردیده که منجر به افزایش اصطکاک جاده می‌شود. فضای خالی بین مصالح سنگی درشت‌دانه در خلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای با مخلوط ریزدانه، فیلر، قیر و ماده تثبیت کننده (الیاف های معدنی یا آلی، اصلاح کننده‌های پلیمری و یا ترکیبی از هر دو) پر می‌گردد [Lavasani and Latifi Namin and Fartash, 2015]. لازم به ذکر است هر مخلوطی با مقدار زیاد مصالح

درشت‌دانه، مخلوط با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای نمی‌باشد مگر آنکه فضای خالی بین سنگدانه‌ها با مواد یاد شده پر گردد. رویه‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای موجب زهکشی سطحی آب‌های حاصل از بارندگی، کاهش پاشیده شدن آب، جلوگیری از لغزندگی سطح جاده می‌گردد. در ضمن با توجه به لزوم مصرف مصالح مرغوب و مصرف مقدار نسبتاً زیاد قیر، این مخلوط‌ها دوام و پایداری بیشتری دارند [Thanh and Feng, 2013].

مخلوط SMA در اواسط سال ۱۹۶۰ در آلمان شناخته شد. دکتر زینچنر^۲، یک مهندس و مدیر آزمایشگاه برای جاده سازی در شهر استرابگ‌بابو^۳، مخترع این مخلوط بود. این مخلوط تلاشی برای حل مشکل فرسایش جاده به علت چرخ‌های میخ‌دار بود که از آن عبور می‌کردند. روش حل این مشکل در آن زمان استفاده از بتن آسفالتی با مقدار کم درشت‌دانه بود. این نوع از رویه در معرض فرسایش سریع به خاطر عبور تجهیزات با چرخ‌های میخ‌دار بود. هر دو جزء مخلوط یعنی ریزدانه و ماستیک خیلی ضعیف بودند تا مخلوطی با پایداری مناسب به وجود بیاورند. به دلیل هزینه بالای ترمیم و نوسازی روسازی، تقاضای زیادی برای یک مخلوط سطحی جدید که بتواند در مقابل چرخ‌های میخ‌دار دوام بیاورد، ایجاد شد. این الهام بخش کار دکتر زینچنر بود [Chen and Scullion, 2015].

زینچر بیان داشت که مصالح درشت‌دانه که در برابر خرد شدن مقاومت می‌کنند ممکن است مقاومت خوبی در مقابل فرسایش داشته باشند. بنابراین این مصالح باید بخش اصلی ساخت مخلوط‌های مقاوم در برابر فرسایش باشند، در حالیکه مقدار زیاد قیر و ماستیک عمر خدمت‌دهی بالایی را ارائه می‌دهد. بر این اساس یک ایده برای SMA شامل ایجاد یک اسکلت دانه‌ای قوی از مصالح درشت‌دانه است و فضای خالی بین آنها به وسیله ماستیک (یعنی مخلوطی از قیر، فیلر و ماسه) پر می‌شود. این نوع از ترکیب مصالح دانه‌ای را به اصطلاح مخلوط با دانه‌بندی باز می‌گویند. تجربه استفاده از SMA از سال ۱۹۶۰ در کشور آلمان نشان می‌دهد که عمر مفید این آسفالت در جاده‌های با حجم ترافیک بالا بیش از ۲۰ سال است. شایان ذکر است که تا سال ۲۰۰۶ سی درصد راه‌های کشور آلمان توسط آسفالت SMA پوشیده شده است که پنجاه

درصد ترافیک جاده ای این کشور را تحمل می‌کند. استفاده از این نوع آسفالت در کشور آمریکا نیز پس از ارزیابی و بررسی تجربیات کشورهای اروپایی در سال ۱۹۹۱ اتفاق افتاد. در این ارزیابی‌ها مشخص شد که آسفالت SMA به مدت بیش از ۲۰ سال در اروپا با موفقیت اجرا شده است. در سال ۱۹۹۱ در کشور آمریکا یک گروه فنی تشکیل شد که تحقیقات تکمیلی را بر روی این نوع آسفالت انجام داده و انتقال دانش به این کشور را آغاز کردند. این تحقیقات منجر به ارائه دستورالعمل طراحی و اجرای آسفالت SMA در این کشور شد. تاکنون این نوع آسفالت در اکثر ایالت های آمریکا مورد استفاده قرار گرفته است. آمریکا، آلمان، انگلستان، نروژ، اسلونی، روسیه، چین و استرالیا از جمله کشورهایی هستند که آسفالت SMA در آن‌ها به طور گسترده استفاده می‌شود [Błażejowski, 2013].

۲- روش طرح اختلاط

آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای با استفاده از مصالح شکسته با دانه‌بندی باز و قیر خالص با درجه نفوذ بین ۶۰ الی ۱۰۰ تهیه می‌شود. جهت تولید آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای و طرح آسفالت روش‌های گوناگونی وجود دارد که در این میان سه روش که متداول‌ترند را می‌توان برشمرد: ۱- روش مارشال ۲- روش هابر فیلد ۳- روش ویم (ژیراتوری) هر سه روش فوق عملاً نتایج رضایت‌بخش داشته‌اند ولی آنچه در ایران بیشتر شناخته‌شده و کاربردی‌تر به نظر می‌آید روش مارشال است. روش هابر فیلد بیشتر در طرح بتن‌های آسفالتی با دانه‌بندی نسبتاً ریز که در آن مصالح ۱۰۰ درصد از الک نمره ۴ رد می‌شوند کاربرد دارد. در روش ویم عمل کوبیدن نمونه‌های آسفالت همراه با مالش انجام می‌گیرد و اندازه بزرگ‌ترین دانه‌های آسفالت همچون روش مارشال یک اینچ می‌باشد. روش مارشال نیز نخستین بار توسط مهندسی به نام بروس مارشال ارائه گردید و بعدها نیز تغییرات زیادی در آن ایجاد شد تا اینکه به صورت کنونی تبدیل شد. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۴ اینچ (۱۰ سانتی‌متر) و ارتفاع ۲/۵ اینچ (۶/۲۵ سانتی‌متر) انجام می‌شود. عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته‌شده با چکش ۱۰

پوندی (۴/۵ کیلوگرمی) و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد [Bressi and Dumont and partl, 2016]. تعداد ضربات نیز بسته به میزان ترافیک طرح مسیر موردنظر متفاوت می‌باشد.

هدف از طرح مخلوط‌های آسفالتی گرم و بتنی آسفالتی انتخاب مناسب‌ترین و باصرفه‌ترین مخلوط مصالح سنگی و قیر است که ویژگی‌های زیر را در پوشش‌های آسفالتی تأمین نماید:

- قیر کافی داشته باشد تا ثبات و دوام آن را تأمین نماید.

- مقاومت آن به اندازه‌ای باشد که بار ناشی از آمدوشد را بدون تغییر شکل زیاد تحمل کند.

- فضای خالی کافی در آن تأمین شده باشد تا با افزایش درجه حرارت محیط و تراکم تلاشی از آمدوشد، قیر زدگی و افت مقاومت پیدا نکند و درعین حال این فضای خالی در حدی باشد که باعث نفوذ آب و هوا به جسم راه نگردد.

- کارایی کافی برای پخش و کوبیدن نهائی را داشته باشد.

- دارای سایر ویژگی‌های موردنظر باشد [Xie and Shen, 2016].

در فرایند طرح اختلاط به شیوه سنتی تعیین درصد بهینه قیر به صورت چشمی و از روی منحنی‌های دانسیته، فضای خالی و مقاومت مارشال انجام می‌شود و با توجه به اینکه این منحنی‌ها به صورت دستی رسم شده در تعیین مقدار دقیق، خطا اتفاق می‌افتد که با برآورد هزینه‌ای که از خطای فوق حاصل می‌شود می‌توان به ابعاد کلی این قضیه پی برد [فخری و غنی‌زاده، ۱۳۸۵].

مراحلی از فرایند طرح اختلاط که تأثیرپذیری بیشتری از عامل انسانی دارد شامل مرحله رسم نمودارهای تغییرات وزن مخصوص، استقامت مارشال و درصد فضای خالی به ازای درصد‌های مختلف قیر است. و همچنین مرحله تعیین درصد قیر بهینه هم شامل می‌شود [Iskender, 2016], [Ameri et al, 2012].

قیر مناسب با استفاده از منحنی‌های آزمایش وزن مخصوص و مارشال به دست می‌آید. از آنجا که درصد قیر متناظر با بیشترین میزان استقامت مارشال ممکن است درصد قیر متناظر با بیشترین وزن مخصوص نباشد یا به ازای آن مناسب‌ترین فضای خالی به دست نیاید بنابراین مقدار بهینه قیر میانگین مقادیری است که بیشترین مقاومت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و مناسب‌ترین فضای خالی را در مخلوط باعث

$$F = a + bX + cX^2 \quad (4)$$

استقامت مارشال

$$S = a + bX + cX^2 \quad (5)$$

درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی:

$$VMA = a + bX + cX^2 \quad (6)$$

لازم به ذکر است که مقدار مجهولات که a, b و c می باشد برای هر پارامتر متفاوت می باشد.

شکل ماتریسی این معادلات به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 \\ 1 & X_2 & X_2^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_n & X_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

همان طور که پیش از این به آن اشاره شد در این رابطه ها X_i ها درصد قیر نام، a, b و c مجهولات یا ضرایب چندجمله ای و y_i ها کمیت پارامتر y در درصد قیر X_i ام است. رابطه ماتریسی بالا را می توان به شکل رابطه (۷) هم نوشت:

$$[Y] = [X][A] \quad (7)$$

به منظور تعیین ضرایب مجهول چندجمله ای بر اساس روش کمترین مربعات می توان از رابطه (۸) استفاده کرد:

$$A = (X' \times X)^{-1} \times (X' \times Y) \quad (8)$$

که در این رابطه X' عبارت از ترانهاده ی ماتریس X و $X' \times X$ عبارت از معکوس حاصل ضرب دو ماتریس X' و X است. بنابراین با تشکیل ماتریس Y برای هر یک از پارامترهای طرح اختلاط و استفاده از رابطه بالا می توان ضرایب مربوط به چندجمله ای درجه دوم را برای آن پارامتر تعیین کرد. برای به دست آوردن مقدار مجهولات از نرم افزار متلب استفاده شد که در زیر روند کار و نتایج حاصل از آن قابل مشاهده است.

مدل بهینه سازی مسئله تعیین درصد قیر بهینه را می توان به صورت یک مدل برنامه ریزی غیرخطی چند هدفی نوشت، در اینجا با توجه به طبیعت مسئله روش معیار سراسری برای نوشتن تابع هدف کل مورد استفاده قرار گرفت؛ زیرا در اینجا مطلوب ترین مقدار هر یک از توابع جزء مشخص است.

می شود که این میانگین لزوماً بهترین درصد قیر نیست [Nassar and thom and parry, 2016]. کاربرد مدل های ریاضی در طراحی و تعمیر و نگهداری روسازی در تحقیقات سابق مورد استفاده بوده است [Khabiri, 2006]. در این تحقیق نیز سعی بر این است، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی برای تعیین درصد قیر بهینه در روش مارشال توسعه داده شود.

۳- مدل سازی ریاضی

مدلی که برای تعیین درصد قیر بهینه وجود دارد مدل ریاضی چند هدفی است. با استفاده از روش سیمپلکس و در دست داشتن معادلات و حدود مورد نظر می توان درصد قیر بهینه را دقیق تر تعیین کرد که در ادامه به آن اشاره می شود.

برای رسم هر کدام از منحنی های مورد استفاده احتیاج به حداقل سه آزمایش در درصد قیرهای مختلف وجود دارد و با استفاده از روش کمترین مربعات⁴ می توان منحنی مناسب را به دست آورد. فرض کنیم مشاهدات ما دربرگیرنده مقادیر زیر باشند:

$$\{X_1, X_2 \dots X_n\} = \text{درصد قیر}$$

$$\{y_1, y_2 \dots y_n\} = \text{پارامتر مورد نظر}$$

فرض می شود که معادله نهایی منحنی معادله درجه دوم به صورت رابطه (۱) باشد:

$$y = a + bX + cX^2 \quad (1)$$

در اینجا هدف مسئله به دست آوردن مقادیر مجهول a, b, c می باشد. برای هر درصد قیر یک معادله می توان نوشت که در هر معادله ۳ مجهول وجود دارد. بنابراین برای هر پارامتر ۳ معادله و ۳ مجهول وجود دارد که برای به دست آوردن مجهولات از نرم افزار متلب استفاده می شود و مقادیر مجهول برای هر کدام از پارامترها به دست می آید.

روابط ریاضی هر کدام از پارامترها به شکل رابطه (۲) تا رابطه (۶) است:

درصد فضای خالی:

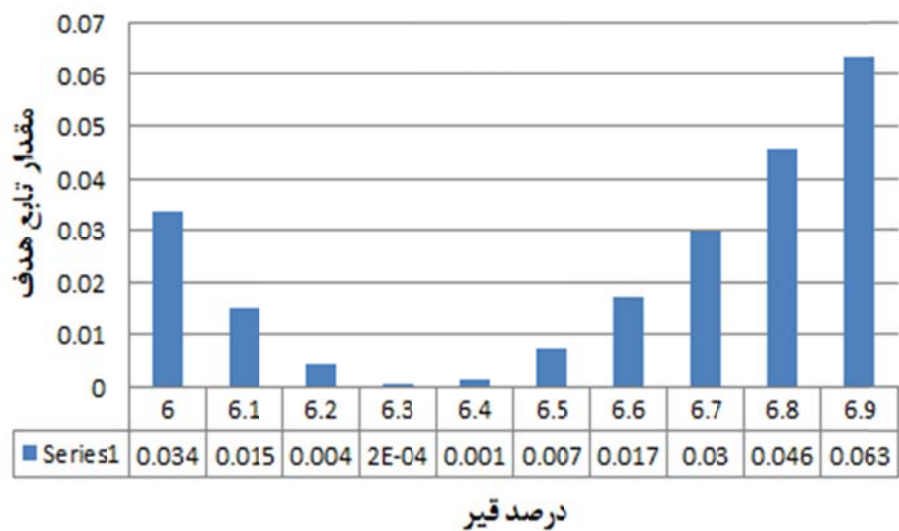
$$Va = a + bX + cX^2 \quad (2)$$

چگالی مخلوط آسفالتی

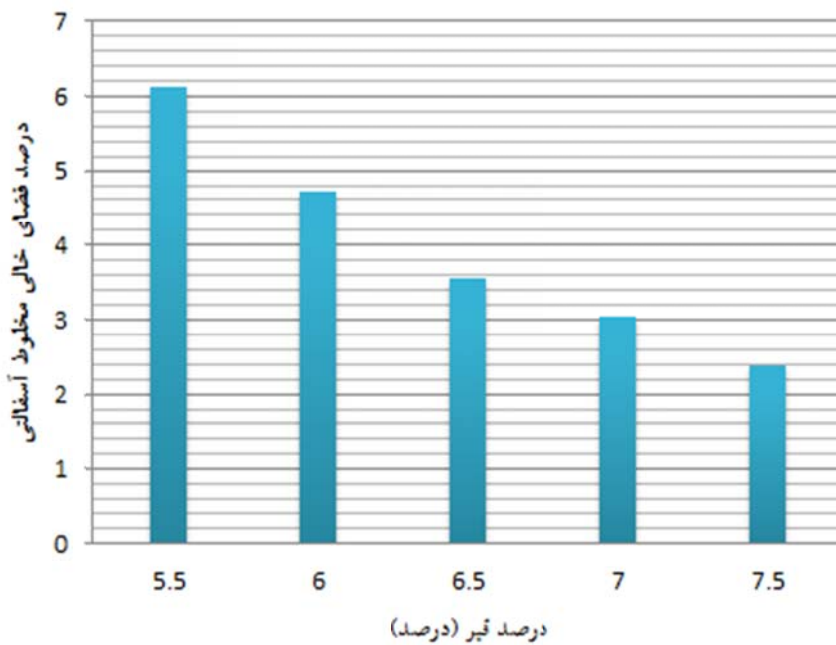
$$D = a + bX + cX^2 \quad (3)$$

روانی

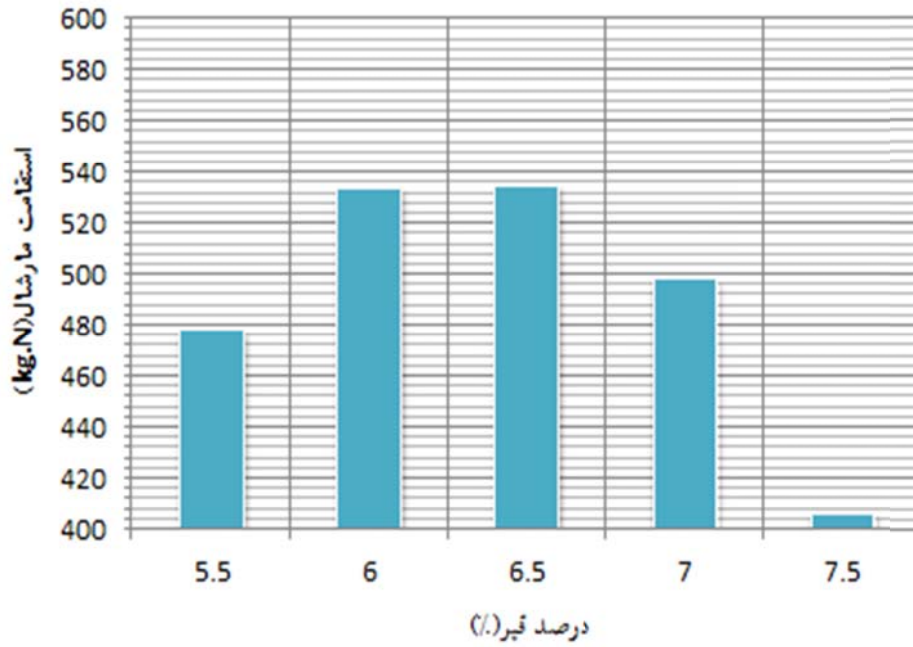
تابع هدف



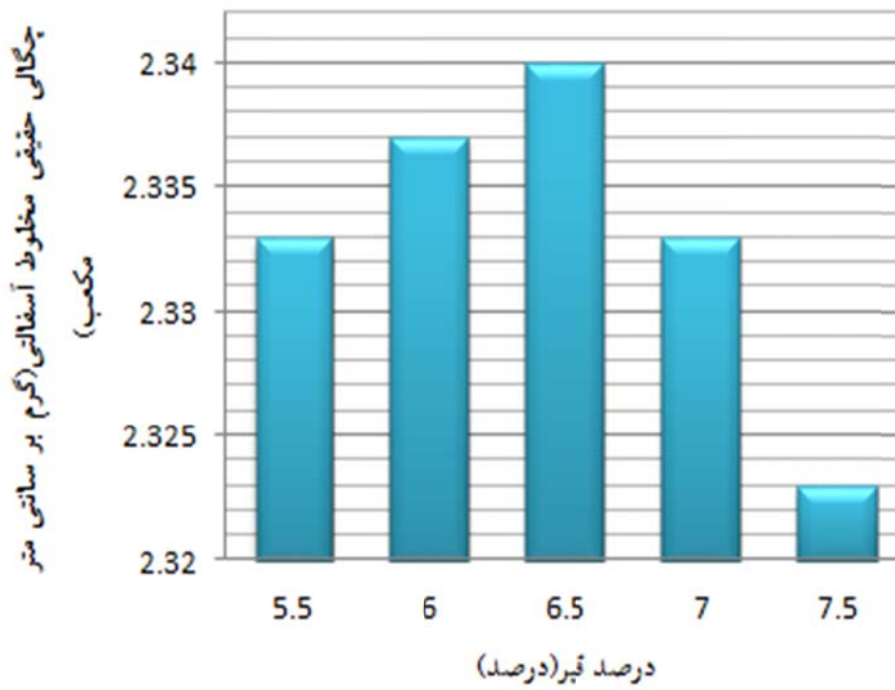
شکل ۱. روند تغییرات تابع هدف



شکل ۲. نمودار تغییرات درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی



شکل ۳. نمودار تغییرات استقامت مارشال



شکل ۴. نمودار تغییرات چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی

شکل تابع هدف کل به صورت رابطه (۹) نوشته می شود:

رابطه (۹)

$$\min f(x) = \left(\frac{\text{معادله مقاومت مارشال - بیشترین مقاومت مارشال}}{\text{بیشترین مقاومت مارشال}} \right)^2 + \left(\frac{\text{معادله فضای خالی مخلوط - مناسبترین درصد فضای خالی مخلوط}}{\text{مناسبترین درصد فضای خالی مخلوط}} \right)^2 + \left(\frac{\text{معادله چگالی حقیقی مخلوط - بیشترین چگالی حقیقی مخلوط}}{\text{بیشترین چگالی حقیقی مخلوط}} \right)^2$$

به دست آوردن مناسبترین درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی از عدد وسط بازه استاندارد آن (۳ تا ۵ درصد) یعنی ۴ درصد استفاده می شود. پیش از اینکه بهینه ترین درصد قیر با استفاده از تابع بالا به دست بیاید باید درصد قیرهایی که شرایط و محدودیت های مسئله را پشت سر می گذارند به دست آورد که محدودیت های موجود هم با توجه به شرایط استاندارد به شرح زیر هستند.

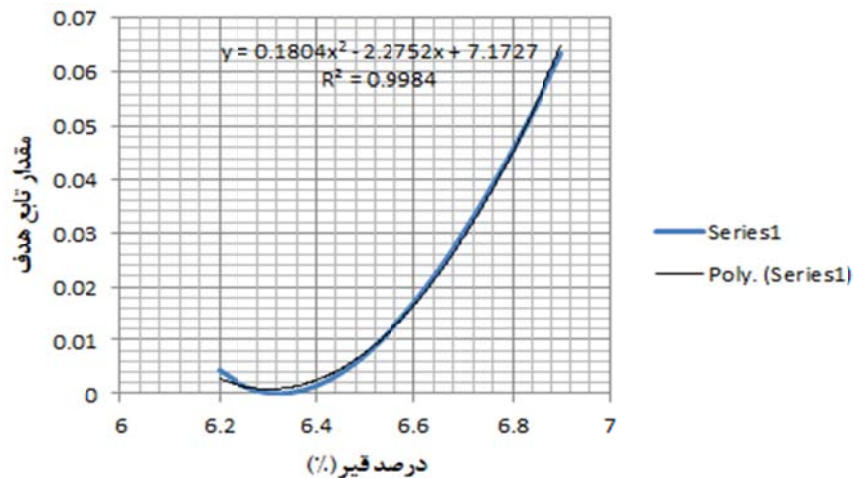
آنچه در تابع هدف موجود در این تحقیق مهم است این است که مجموع سه پارامتر کمترین مقدار را دارا باشد. پس از آنکه تک تک پارامترها به دست آمدند سه پارامتر باهم جمع می گردند. در شکل ۱ روند تغییرات تابع هدف مشخص شده است. برای به دست آوردن بیشترین مقدار مقاومت مارشال و بیشترین مقدار چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی از معادلات ۳ و ۵ مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده می شود سپس درصد قیر مربوطه به دست می آید که با قرار دادن درصد قیر در معادلات آن ها مقدار بیشینه هر کدام به دست می آید. همچنین برای

جدول ۱. محدودیت های موجود [نشریه ۲۰۶، ۱۳۷۹]

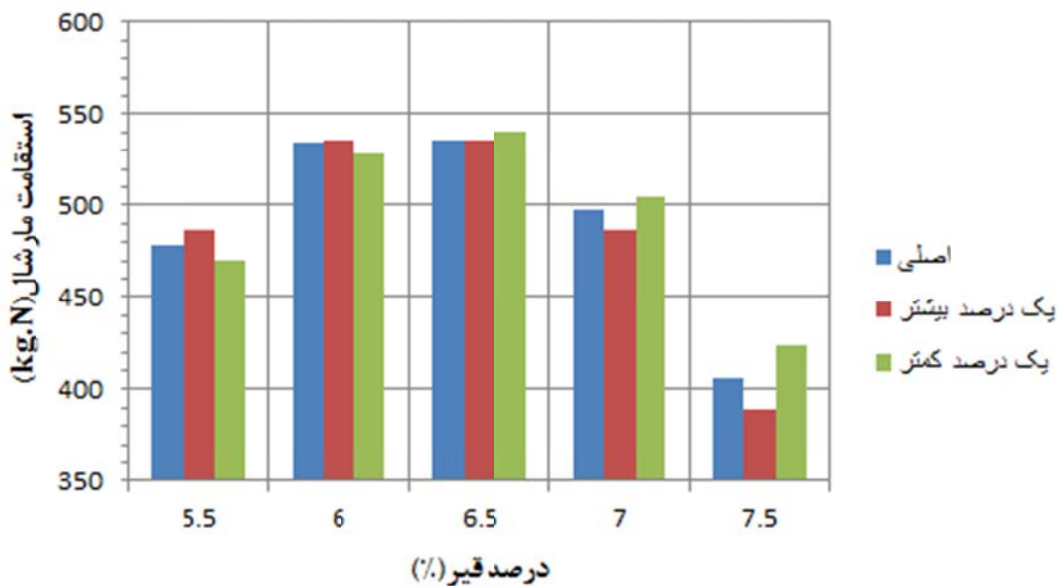
حد اقل ۱۹ درصد	درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA)
۳ تا ۵ درصد	درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی (Va)
حد اقل ۶ درصد	درصد قیر
حد اقل ۵۰۰ کیلوگرم نیرو	مقاومت مارشال

کوچکترین مقدار آن را انتخاب می کنیم، درصد قیری که به ازای آن تابع هدف کوچکترین مقدار را دارد به عنوان درصد قیر بهینه مورد استفاده قرار می گیرد.

درصد قیرهایی که شرایط بالا را دارند در داخل یک بردار به اسم بردار موجه قرار می گیرند. پس از آن مقدار هر یک از این درصدهای قیر با استفاده از تابع هدف به دست می آید و



شکل ۵. نمودار تغییرات تابع هدف



شکل ۶. نمودار تغییرات استقامت مارشال

۴- آنالیز حساسیت

روش رایج و روش ارائه شده در این تحقیق کم بود تصمیم گرفته شد که مقدار تغییرات اندک درصد قیر مورد ارزیابی قرار بگیرد تا ملاحظه شود که این تغییرات کم چه تاثیری بر روی عملکرد آسفالت خواهد گذاشت. به همین منظور مقدار درصد قیر یک درصد کم و زیاد شد تا تاثیر آن روی عملکرد آسفالت ارزیابی شود.

آنالیز حساسیت به مطالعه تاثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته (سیستماتیک) است که بتوان تاثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. در این تحقیق با توجه به اینکه اختلاف بین دو درصد قیر به دست آمده (یعنی

۴-۱- مقاومت مارشال

مقاومت مارشال یکی از خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی و حداکثر نیرویی است که نمونه مخلوط آسفالتی کوبیده شده مورد آزمایش می‌تواند قبل از گسیختگی تحمل نماید و بهترین حالت آن زمانی اتفاق می‌افتد که مخلوط ما بیشترین استقامت مارشال را داشته باشد. روند نمودار استقامت مارشال به گونه‌ای است که در ابتدا صعودی است و پس از آن نزولی می‌شود حال وقتی تغییر کمی در درصد قیر ایجاد شود مقدار متناظر آن بیشترین مقدار نیست و نسبت به حالت ماکزیمم کمتر می‌شود و مخلوط آسفالتی بهترین عملکرد خود را ندارد. طبق محاسباتی که انجام گرفت یک درصد تغییر در مقدار درصد قیر از یک تا پنج درصد تغییر در مقاومت مارشال ایجاد می‌کند. در شکل ۶ روند تغییرات قابل مشاهده است.

۴-۳- درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی

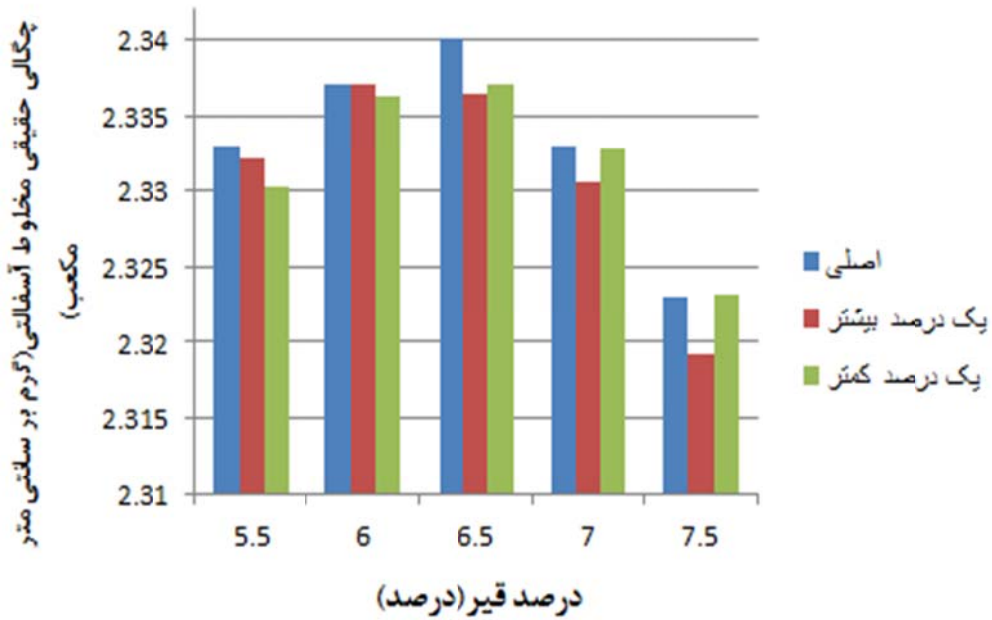
یکی دیگر از ویژگی‌های مخلوط آسفالتی که باید در هنگام تعیین درصد قیر بهینه به آن دقت کرد درصد فضای خالی مناسب در مخلوط آسفالتی می‌باشد. در صورتی که مقدار درصد قیر مناسب نباشد فضای خالی ممکن است کم یا زیاد شود. در نظر گرفتن مقدار فضای خالی کم در مخلوط‌های آسفالتی منجر به قیرزدگی مخلوط و ایجاد مقاومت در برابر فرآیند تراکم خواهد شد. از سوی دیگر افزایش بیش از حد آن موجب نفوذپذیری بالا و کاهش دوام مخلوط می‌گردد. در اینجا با توجه به تغییر یک درصدی قیر مقدار فضای خالی از یک تا سه درصد تغییر کرد که در شکل ۸ روند تغییرات قابل مشاهده می‌باشد.

۴-۲- چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی

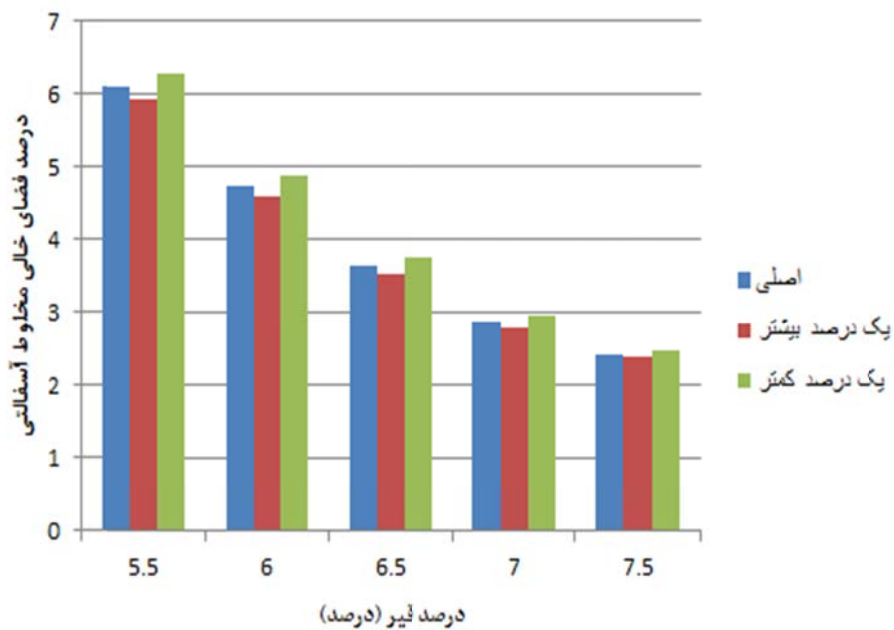
برای انتخاب درصد قیر بهینه درصدی را انتخاب می‌کنند که به ازای آن چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد. نمودار چگالی حقیقی هم منحنی درجه دوم است که یک نقطه ماکزیمم دارد یعنی ابتدا صعودی است و سپس نزولی و به ازای یک درصد قیر ماکزیمم است و وقتی کمی این درصد بیشتر یا کمتر شود دیگر حالت بیشترین را ندارد و عملکرد مخلوط آسفالتی نسبت به قبل پایین می‌آید و در بهترین حالت قرار ندارد. در شکل ۷ روند تغییرات چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی به ازای تغییر یک درصد قیر قابل مشاهده است.

۴-۴- درصد فضای خالی مصالح سنگی

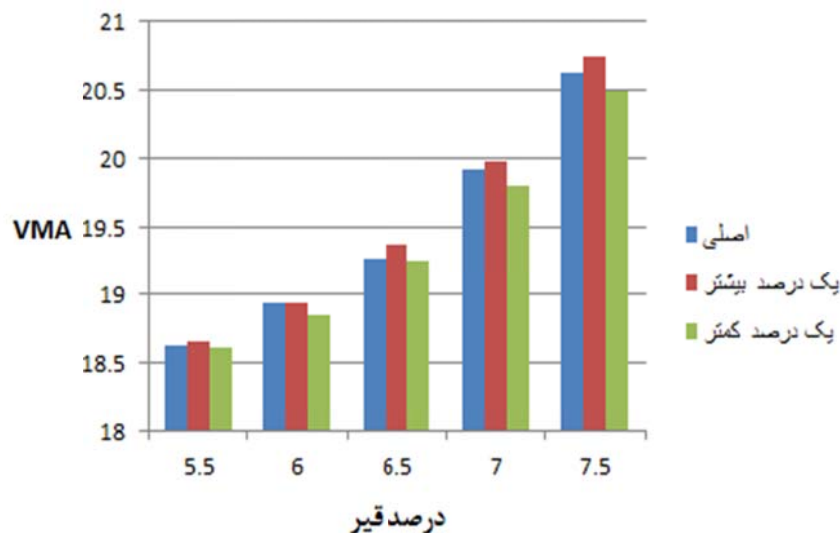
از دیگر پارامترهای مهم در طرح اختلاط درصد فضای خالی مصالح سنگی است که باید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد. در صورت کم بودن فضای خالی و اشباع شدن توسط قیر، قیرزدگی اتفاق می‌افتد که این امر منجر به پایین آمدن عملکرد آسفالت می‌شود. همچنین کم شدن درصد قیر منجر به زیاد شدن فضای خالی و تحت تاثیر قرار دادن عملکرد آسفالت می‌شود. در شکل ۹ نحوه تغییرات درصد فضای خالی مصالح سنگی با توجه به تغییر یک درصدی در مقدار قیر نشان داده شده است.



شکل ۷. نمودار تغییرات چگالی حقیقی مخلوط آسفالتی



شکل ۸. نمودار تغییرات درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی



شکل ۹. نمودار تغییرات درصد فضای خالی مصالح سنگی

۵- نتیجه گیری

کند. در زیر به طور خلاصه به تعدادی از نتایج حاصل اشاره می شود:

۱- با توجه به این که مقدار قیر مصرفی در پروژه های راه سازی زیاد است تفاوت بین مقدار قیر بهینه در دو روش در ابعاد کاری وسیع زیاد است و از لحاظ اقتصادی می تواند تأثیر زیادی بگذارد.

۲- کم یا زیاد شدن مقدار قیر بهینه هر چند که مقدار آن کم باشد می تواند در عملکرد آسفالت تأثیر زیادی داشته باشد.

۳- دقت روش مدل سازی خیلی بیشتر از روش رایج است.

۴- خطای چشم و قضاوت مهندسی در روش مدل سازی ریاضی حذف می گردد.

۵- با استفاده از مدل سازی ریاضی بعضی از مشکلات (احتمال قیرزدگی، کمبود مقاوت آسفالت و نفوذپذیری بالای مخلوط...) ناشی از درصد قیر بهینه خیلی کمتر می شود.

۶- استفاده از مدل سازی ریاضی باعث ارتقاء عملکرد آسفالت با استخوان بندی سنگدانه ای می شود.

یکی از مهمترین قسمت های طرح اختلاط آسفالت با استخوان بندی سنگدانه ای مشخص کردن مقدار قیر بهینه است که نقش مهمی در عملکرد آسفالت دارد. همان طور که در قسمت آنالیز حساسیت مشاهده گردید با تغییرات خیلی کم در مقدار قیر بهینه تغییرات به مراتب بیشتری در مقدار پارامترهای موثر در طرح اختلاط مخلوط های آسفالتی با استخوان بندی سنگدانه ای به وجود آمد که این تغییرات مانع از این می شود که آسفالت بهترین عملکرد را داشته باشد و باعث به وجود آمدن مشکلاتی می شود. روشی که برای تعیین درصد قیر بهینه وجود دارد روش میانگین گیری است که روش خیلی دقیقی نیست و خطای چشم و قضاوت مهندسی در آن نقش دارد اما در روش ارائه شده در این مقاله خطای چشم و قضاوت مهندسی حذف گردید و کلیه مراحل تعیین درصد قیر بهینه با استفاده از مدل سازی ریاضی و برنامه نویسی متلب به دست آمد و به مراتب نتایج قابل اطمینان تری با دقت بالایی حاصل گردید. درصد قیر بهینه با استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق ممکن است کمتر یا بیشتر از روش رایج به دست آید و همین امر طبق بررسی هایی که با استفاده از آنالیز حساسیت صورت گرفت می تواند موجب شود که کارایی و عملکرد آسفالت تغییر

mixtures using basalt and limestone aggregates", Construction and Building Materials, pp. 474-479.

- Chen, D.H., and Scullion, T., (2015), " Very Thin Overlays in Texas ", Construction and Building Materials, pp. 108-116.

- Chiu, Ch., and Lu, L., (2007), " A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber", Construction and Building Materials, pp. 1027-1033.

- Fallon, E., and McNally, C., and, Gibney, A., (2016), " Evaluation of fatigue resistance in asphalt surface layers containing reclaimed asphalt ", Construction and Building Materials, pp. 77-87.

- Iskender, E., (2016), " Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures", Measurement, pp. 359-371.

- Khabiri, M.M., (2006), Development of a mathematical model for increasing flexible pavement life cycle under preventive maintenance (Doctoral dissertation, Ph. D Thesis, Iran Science and Technology University).

- Lavasani, M., and Latifi Namin, M., and Fartash, H., (2015), " Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels", Construction and Building Materials, pp. 232-242.

- Muniandy, R., and Binti, N.A., and Hassim, S., and Moazami, D., (2014), " Laboratory fatigue evaluation of modified and unmodified asphalt binders in Stone Mastic Asphalt mixtures using a newly developed crack meander technique", International Journal of Fatigue, pp. 1-8.

- Nassar, A., and thom, N., and parry, T., (2016), "Optimizing the mix design of cold bitumen emulsion mixtures using response surface methodology", Construction and Building Materials, pp. 216-229.

- Thanh, D.V., and Feng, Ch.P., (2013), " Study on Marshall and Rutting test of SMA at abnormally high temperature", Construction and Building Materials, pp. 1337-1341.

- Xie, Zh., and Shen, J., (2016), "Performance properties of rubberized stone matrix asphalt mixtures produced through different processes", Construction and Building Materials, pp. 230-234.

۶- سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از پایان‌نامه با عنوان "ارایه مدل ریاضی برای تعیین درصد قیر بهینه در آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای SMA" که توسط نویسنده اول زیر نظر نویسندگان دوم و سوم در حال انجام در دانشگاه یزد است. از آزمایشگاه قیر و آسفالت و واحدهای پژوهشی این دانشگاه سپاسگزاری می‌شود.

۷- پی‌نوشت‌ها

1-Stone Matrix Asphalt

2- Zincher

3- Strabag Bau

4-Least Square Method

۸- مراجع

- فخری، م. و غنی زاده، ع. (۱۳۸۵)، "تعیین درصد بهینه‌ی قیر در روش طرح اختلاط مارشال با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی"، پژوهش‌نامه حمل‌ونقل، سال سوم، شماره چهارم.

- نشریه شماره ۲۰۶، (۱۳۷۹)، "طراحی و ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA)", سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، چاپ اول.

- Ameri, M., and khani sanij, h., and toolabi, s., and hosseini, s.h., (2012), " optimization of the cold in-place recycling mix design by nonlinear simplex method", transportation research journal, pp.1-9

- Błazejowski, K., (2011), "Stone Matrix Asphalt", Taylor & Francis Group.

- Bressi, S., and Dumont, A., and partl, M., (2016), "An advanced methodology for the mix design optimization of hot mix asphalt", Materials and Design, pp. 174-186.

- Cao, W., and Liu, Sh., and Feng, Zh., (2013), " Comparison of performance of stone matrix asphalt