عملکرد آزمایشگاهی مخلوطهای آسفالتی با دانه بندی درشت

نادر طباطبایی
استادیار

محسن الستی
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

استفاده از یك نوع مخلوط آسفالتی برای همه شرایط ترافیکی و آب و هوایی امکان پذیر نیست. امروزه از مخلوطهای مختلفی برای پدید آوردن ویژگیهای لازم درشرایط مختلف آب و هوایی و ترافیکی استفاده می شود. یکی از این مخلوطهای ویژه، که به عنوان مخلوط مقاوم در برابر تغییر شکل دائم مطرح است، مخلوط با دانه بندی درشت (SMA)[1] است. در مخلوطهای SMA از یك نوع ماده افزودنی برای غلیظ کردن قیر و جلوگیری از ته نشین شدن آن هنگام حمل استفاده می شود. این مقاله حاصل یك پژوهش آزمایشگاهی انجام شده توسط مؤلفین برای ارزیابی عملکرد آزمایشگاهی مخلوطهای SMA است. در این پژوهش از الیاف معدنی و پودر لاستیك به عنوان افزودنی قیر استفاده گردید. نتایج بدست آمده در این راستا ضرورت طراحی روشهای خاص آزمایش برای ارزیابی این نوع مخلوط ها را مشخص می سازد.

کلمات کلیدی

مخلوط آسفالتی با دانه بندی درشت، الیاف معدنی، پودر لاستیك، مخلوط با دانه بندی تهی

Laboratory Performance of Stone Mastic Asphalt Mixtures

N. Tabatabaee
Assistant Professor

M. Alasti
Formerly graduate student

Department of Civil Engineering,
Sharif University of Technology

Abstract

Researchers and practicing engineers have come to this realization that different mixtures should be used for different climate and traffic conditions. Rutting is one of the main performance related types of distress in areas where the asphalt pavement is subjected to heavy axle loads and high temperature. In this research various types of SMA mixtures were tested to evaluate their effictiveness for inhibiting rutting. The variables in the laboratory tests were aggregate gradation, nominal maximum aggregate size, asphalt binder content, and the type of binder thickener. Two types of asphalt binder thicknener, namely mineral fiber and crumb rubber were used. The results of this investigation revealed that special test methods should be devised for proper evaluation of these mixes.

Keywords
Stone Mastic Aphalt (SMA), mineral fiber, crumb rubber, gap-graded mixtures.

مقدمه

اگر چه سابقهٔ صنعت آسفالت در ایران به بیش از پنجاه سال می رسد، نوآوری و ابتکار در این زمینه بسیار محدود و اندک بوده است. از سوی دیگر، در یک دید کلی وضعیت عمومی روسازی جاده ها و خیابانها نسبت به عرفهای بین المللی در سطح پایینی است. با توجه به هزینه هنگفتی که سالانه برای ساخت، تعمیر و نگهداری راهها اختصاص می یابد، انجام اقدامات اساسی برای بهبود عملکرد آنها بسیار ضروری است.

در چند دهه اخیر توانایی حمل بار محوری بیشتر در کامیونها و همچنین افزایش فشار هوای داخلی در لاستیک (تایر) رادیال، و در نتیجه کاهش سطح تماس چرخ با سطح روسازی، سبب افزایش عمق شیار طولی[2] درروسازیهای بتن آسفالتی شده است. در کشورهای اروپایی نوعی مخلوط آسفالتی نسبتاً درشت دانه بنام SMA برای کاهش شیار طولی مورد استفاده قرار گرفته است. دانه بندی این نوع مخلوط آسفالتی و درصد قیر آن بطور قابل ملاحظه ای از مخلوطهای معمولی بیشتر بوده و بر خلاف آسفالتهای معمولی، اکثر بار را درشت دانه ها به لایه های زیرین منتقل می کنند. تجربهٔ استفاده از این نوع مخلوط آسفالتی نشان داده است که مقدار شیار طولی در آنها از آسفالتهای معمولی، که تحت همان شرایط ترافیکی قرار گرفته اند، کمتر است [۱].

با توجه به اینکه شیار طولی در بسیاری از جاده های کشورمان بویژه در مناطق گرمسیر مشاهده می شود، مطالعه علل ایجاد این تغییر شکلها و ارائه روشی منطقی و عملی برای کاهش این خرابی در صنعت راهسازی کشور از اهمیت بالایی برخوردار است. از اینرو، مطالعه و تحقیق در خصوص عملکرد آزمایشگاهی مخلوطهای SMA مورد توجه قرار گرفت. در مقاله حاضر ضمن تشریح فن آوری SMA، نتایج تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط مؤلفین بر روی این نوع مخلوط، و مقایسه آن با مخلوطهای معمولی، ارائه می شود.

۱ـ مروری بر فن آوری SMA

۱ـ۱ـ تاریخچه

مخلوط SMA اولین بار در دههٔ ۱۹۶۰ توسط پیمانکاران آلمانی مورد استفاده قرار گرفت [۲]. این استفاده بطور موفقیت آمیزی نشان داد که می توان یک روسازی مقاوم در برابر بروز شیار طولی ساخت که از روسازیهای معمولی نیز دوام بیشتری داشته باشد [۳]. هم اکنون استفاده از SMA در کشورهای سوئد، دانمارک، نروژ، هلند، فنلاند، لهستان و بسیاری از کشورهای دیگر گسترش یافته است. تنها در آلمان در سالهای ۱۹۸۹ و ۱۹۹۰ مقدار ۲ میلیون تن SMA بکار رفته است. سوئد، که از لحاظ استفاده از SMA در مقام دوم قرارگرفته، تنها در سال ۱۹۹۰ حدود ۳۰۰/۰۰۰ تن از این نوع آسفالت را بکار برده است [۲]. در آمریکا این نوع مخلوط از سال ۱۹۹۰ به کار گرفته شد و استفاده از آن به سرعت رو به افزایش است [۴].

۱ـ۲ـ مصالح

دانه بندی مصالح مصرفی در آسفالتهای SMA بطور کلی از نوع میان تهی[3] است. از آنجایی که در این مخلوط در صد مصالح درشت دانه بیشتر از ریزدانه هاست تماس دانه به دانه در مصالح درشت دانه، که عمل انتقال بار به لایه های زیرین را انجام می دهند، افزایش می یابد. به طور کلی در این مخلوطها ۲۰ تا ۴۰ در صد مصالح از الک شمارهٔ ۴(۴/۷۵ میلیمتر)، و ۱۵ تا ۳۵ در صد آنها از الک شمارهٔ ۸(۲/۳۶ میلیمتر) عبور می کند. فضای خالی موجود در بین درشت دانه ها توسط فیلر و قیر[4] پر می گردد. به همین دلیل مصالح رد شده از الک شمارهٔ ۸ (۲/۳۶ میلیمتر) و مانده روی الک شمارهٔ ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر) زیادتر از حد معمول است [۴].

بزرگترین اندازه اسمی سنگدانه ها[5] در آسفالتهای SMA متداول در سوئد ۱۲ تا ۱۶ میلیمتر و در آلمان ۵ تا ۱۲ میلیمتر است. اغلب در حدود ۱۰ درصد از مصالح استفاده شده در این مخلوطها فیلر بوده و نسبت وزنی فیلر به قیر مصرفی حدود ۱/۵ است [۴].

مصالح مورد استفاده در ساخت این آسفالتها باید بسیار محکم و بادوام، و حتی المقدور مکعب شکل، مقاوم در مقابل سایش، و دارای سختی کافی باشند.

۱ـ۳ـ قیر و مواد افزودنی

قیرهایی که در ساخت آسفالتهای SMA در اروپا استفاده می شوند عمدتاً از نوع قیرهای با درجهٔ نفوذ ۶۵ تا ۸۵ است. بیشتر کشورهای اروپای شمالی از قیرهای ۸۰ و ۸۵ و اروپای جنوبی از قیر ۶۵ استفاده می کنند [۴]. استفاده از قیر زیاد در مخلوطهای آسفالتی SMA دو مشکل جانبی را پدید می آورد؛ یکی جاری شدن قیر از مصالح در هنگام حمل و اجرا، و دیگری روزدگی قیر پس از اجرا، و در نتیجه کاهش ایمنی راه. از اینرو، برخی مواد افزودنی برای تثبیت قیر به این مخلوط ها اضافه می گردد. برخی از این مواد عبارتند از: الیاف، پودر لاستیک، پلیمرها، کربن، اکسید سیلیس مصنوعی و غیره. در اکثر آسفالتهای SMA از الیاف بعنوان

ماده تثبیت کننده استفاده می شود. الیاف رایج به دو گروه، الیاف آلی مانند سلولز و الیاف معدنی مانند پشم سنگ، تقسیم می شوند. درصد الیاف در مخلوط آسفالتی SMA در حدود ۳/۰ تا ۶/۰ درصد وزن مصالح است. مقدار الیاف سلولزی مصرفی معمولاً کمتر از الیاف معدنی است. با کاهش بزرگترین اندازهٔ اسمی سنگدانه ها در مخلوط، مقدار الیاف در مخلوط نیز کاهش می یابد [۴].

آسفالتهای SMA، بر خلاف آسفالتهای معمولی، نسبت به درصد قیر حساسیت زیادی ندارند. برای تعیین درصد قیر مناسب در آنها از معیار درصد منافذ هوای موجود در نمونه های مارشال استفاده می شود[۴]. برای طرح این مخلوط در آمریکا از هر دو روش مارشال و سوپرپیو[6] استفاده می شود[۵]. عوامل دیگر از قبیل درصد الیاف، درصد فیلر و درصد مصالح رد شده از الک شمارهٔ ۴(۴/۷۵میلیمتر) نیز بر مقدار قیر مصرفی اثر می گذارند.

۲ـ برنامه تحقیقات آزمایشگاهی

هدف اصلی این تحقیق بررسی آزمایشگاهی ویژگیهای مخلوطهای SMA است. در این بخش از مقاله تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط مؤلفین تشریح می گردد. ویژگیهای مواد و مصالح مصرفی و آزمایشهای انجام شده از نظر نوع، تعداد و شرایط مختلف، و در نهایت نتایج بدست آمده، در ادامه ذکر می شود.

مواد بکار رفته شامل یک نوع سنگدانه، یک نوع قیر و دو نوع افزودنی که یکی پودر لاستیک و دیگری الیاف معدنی است. از مواد ذکر شده فقط الیاف از تولیدات خارجی بود، که البته مشابه داخلی آن نیز اکنون در کشور موجود است.

۲ـ۱ـ مصالح مصرفی

سنگدانه مصرفی از جنس دولومیت بود که دارای مقاومت فشاری بالا و مناسب برای آسفالتهای SMA است. فیلر مصرفی از جنس گرانیت بود که از ناحیه کلاردشت چالوس تهیه گردید. برای تهیه مخلوطها از دو نوع دانه بندی توپر و میان تهی استفاده شد. دانه بندی توپر بر اساس استاندارد ASTM D۳۵۱۵، و دانه بندی میان تهی، مشابه موارد مطالعه شده در منابع مختلف، با حداکثر اندازهٔ اسمی ۱۹ میلیمتر، انتخاب شدند[۶]. سنگدانه های مورد استفاده دارای عدد سایش لوس آنجلس ۲۴ درصد بود. حداکثر عدد سایش لوس آنجلس توصیه شده برای این مخلوطها ۴۰ است [۴و۷].

برای بررسی ویژگیهای آسفالتهای SMA، علاوه بر دانه بندی توپر، از ۵ دانه بندی دیگر، که منحنی آنها در شکل (۱) آمده، استفاده شد. دانه بندی های $SMA^{۲}$، $SMA^{۳}$ و $SMA^{۴}$ برای بررسی تأثیر درصد مصالح رد شده ازالک شماره ۴(۴/۷۵میلیمتر) بر روی میزان شیار طولی، و دانه بندی های $SMA^{۵}$ و $SMA^{۶}$ برای تعیین تأثیر بزرگترین اندازهٔ اسمی دانه ها بر میزان شیار طولی مورد استفاده قرار گرفتند.

۲ـ۲ـ قیر و مواد افزودنی بکار رفته

برای ساخت نمونه های آسفالتی از قیر خالص پالایشگاه تهران با درجه نفوذ ۷۰-۶۰، استفاده شد.

الیاف معدنی مصرف شده در این پژوهش از نوع Inorbit M است که در کشور سوئد تولید می شود. ویژگیهای این الیاف در جدول (۱) آمده است. زمان افزودن این الیاف به مخلوط، در پایان مدت اختلاط خشک و ترجیحاً هم زمان با افزودن قیر به سنگدانه هاست. در آزمایشگاه به منظور جلوگیری از پراکنده شدن الیاف به صورت غبار، ابتدا الیاف بمدت ۵ دقیقه با قیر مخلوط شده، سپس قیر اصلاح شده به سنگدانه ها اضافه گردید.

علاوه بر الیاف معدنی، از پودر لاستیک نیز به عنوان ماده افزودنی استفاده شد. پودر لاستیک معمولاً برای کاهش حساسیت حرارتی قیر و مخلوط های آسفالتی بکار می رود، ولی در آسفالتهای SMA نیز قابل استفاده است. افزایش این ماده به قیر باعث افزایش کند روانی و مقاومت قیر در مقابل تغییرات درجهٔ حرارت می گردد. پودر لاستیک استفاده شده دارای حداکثر اندازهٔ اسمی ۶۰۰ میکرون بود [(شکل (۲)]. مناسب ترین فرایند اختلاط پودر لاستیک و قیر مورد استفاده افزودن ۱۵ درصد پودر لاستیک به قیر ۱۸۰ درجه نسبت به وزن قیر و هم زدن با همزن الکتریکی به مدت ۶۰ دقیقه تعیین گردیده است [۸].

۲ـ۳ـ آزمایشهای انجام شده روی قیر اصلاح شده

در این مرحله در مجموع ۵ سری ۶ تایی نمونه ساخته شد. این ۵سری شامل یک سری قیر خالص، ۳سری قیر اصلاح شده با الیاف، که به ترتیب حاوی ۵/۵،۵/۶ و ۵/۷ درصد الیاف، و یک سری قیر اصلاح شده با ۱۵ درصد پودر لاستیک بودند. نتایج این آزمایش ها در جدول (۲) آمده است.

مقایسهٔ نتایج جدول (۲) نشان می دهد که افزایش الیاف و پودر لاستیک موجب کاهش درجهٔ نفوذ و شکل پذیری و افزایش نقطهٔ نرمی، به مقدار قابل توجهی نسبت به قیر خالص می شود. این روند تغییرات همگی بیانگر افزایش کند روانی قیرهای اصلاح شده نسبت به قیر خالص است که استفاده از مواد افزودنی در آسفالتهای SMA را تأیید می کند. جدول (۲) نشان می دهد که میزان تغییرات رخ داده در ویژگی های

قیر برای تغییر درصد الیاف از ۶/۵ به ۷/۵ درصد چشمگیر نیست.

۲ـ۴ـ تعیین درصد قیر

برای تعیین درصد قیر مناسب، نمونه های استوانه ای مارشال به قطر ۱۰۱/۶ میلیمتر (۴اینچ) و ضخامت ۶۳/۵ میلیمتر (۲/۵اینچ) با سنگدانه های دولومیتی و مقادیر متفاوت قیر تهیه شد. آزمایش مارشال طبق استاندارد ASTM D ۱۵۵۹-۸۲ انجام شد [۶]. تعداد و حالات نمونه های آسفالتی مارشال ساخته شده در این پژوهش مطابق جدول (۳) است.

به این نکته باید اشاره شود که معیارهای پیشنهادی در روش مارشال، برای مخلوطهای آسفالتی با دانه بندی توپر است [۹]. از آنجایی که معیار مشخصی برای مخلوطهای SMA وجود ندارد، از این مقادیر فقط به عنوان راهنما و برای مقایسه با مخلوطهای متداول با دانه بندی توپر استفاده می شود. جدول (۴) درصد قیر مناسب برای مخلوطهای متداول با دانه بندی توپر مورد استفاده در این پژوهش بر اساس روش مارشال را ارائه می دهد.

۲ـ۵ـ منافذ هوای مخلوط

از نظر درصد فضای خالی نمونه های SMA با الیاف، بویژه نمونه حاوی ۶/۵ درصد الیاف، روندی مشابه با نمونه های با دانه بندی توپر دارند، به گونه ای که در مجموع افزایش درصد الیاف باعث افزایش درصد فضای خالی می شود [شکل(۳)]. نمونه SMA با پودر لاستیک از نظر مقدار منافذ هوا و روند تغییرات با بقیه متفاوت است و مشاهده می شود که بجز برای حالت ۷ درصد قیر اصلاح شده درصد فضای خالی ایجاد شده در آن حدود ۲ درصد بیشتر از بقیه است.

شکل (۴) منحنی تغییرات حفره های بین مصالح سنگی[7](VMA) را نشان می دهد. از این شکل ملاحظه می شود که شکل منحنی بطور کلی مانند منحنی متناظر برای مخلوطهای آسفالتی توپر است، به غیر از برای حالت قیر لاستیکی. اگر چه همانطور که انتظار می رفت مقدار حداقل ذکرشده برای مخلوطهای آسفالتی توپر در مورد مخلوطهای با دانه بندی میان تهی صدق نمی کند.

شکل(۵) منحنی تغییرات منافذ پر شده با قیر [8](VFA) را نشان می دهد. در این شکل نیز رفتار SMA ساخته شده با قیر حاوی پودر لاستیک با بقیه موارد کمی تفاوت دارد، که با توجه به روند مشاهده شده در شکل (۳) منطقی به نظر می رسد. مخلوط SMA ساخته شده با ۶/۵ درصد الیاف رفتاری بسیار شبیه مخلوط آسفالتی به نظر می رسد. مخلوط SMA ساخته شده با ۶/۵ درصد الیاف رفتاری بسیار شبیه مخلوط آسفالتی با دانه بندی توپر ساخته شده از قیر خالص را دارد. برای بقیه در صدهای الیاف مقدار VFA از مقادیر متناظر برای مخلوط SMA با قید خالص، و مخلوط با دانه بندی توپر ساخته شده از قیر خالص کمتر است.

نتایج ذکر شده در مورد شکل های (۳) تا(۵) و اطلاعات جدول (۲) نشان دهنده تأثیر افزایش کند روانی قیر در مخلوطهای آسفالتی SMA است. همچنین، کند روانی قیر در حالت اصلاح با پودر لاستیک بیشتر از حالت اصلاح با الیاف است.

شکل (۶) منحنی استقامت مارشال را نشان می دهد. اگرچه نمونه ها در اکثر موارد حداقل استقامت لازم بر طبق معیار دانه بندی توپر را دارا هستند، مخلوط با دانه بندی توپر در مقایسه با مخلوطهای SMA از استقامت بالاتری برخوردار است. از این شکل می توان نتیجه گرفت که حساسیت مخلوطهای SMA نسبت به تغییرات درصد قیر در مقایسه با مخلوط با دانه بندی توپر کمتر است.

شکل (۷) تغییرات در جریان[9] مارشال را نشان می دهد. در این موارد نیز می توان حساسیت کمتر مخلوطهایSMA به تغییرات درصد قیر در مقایسه با مخلوط با دانه بندی توپر را نتیجه گرفت [جدول (۳)]. نتایج آزمایش مارشال نشان داد که SMA حاوی پودر لاستیک کمترین و مخلوط آسفالتی با دانه بندی توپر بیشترین مقدار جریان مارشال را در اکثر موارد دارند. از این منحنی استعداد کمتر مخلوطهایSMA به تغییر شکل تحت بار و در نتیجه ایجاد شیار طولی کمتر در مقایسه با مخلوط با دانه بندی توپر را می توان نتیجه گرفت. درصد قیر مناسب برای هر یک از مخلوطها به شرح ذکر شده در جدول (۴) تعیین گردید.

۲ـ۶ـ جاری شدن قیر از سطح سنگدانه ها

با توجه به درصد نسبتاً زیاد قیر ودانه بندی میان تهی در آسفالتهای SMA، مشکل جاری شدن قیر از سطح سنگدانه ها در حین حمل مخلوط آسفالتی به محل اجرا مطرح می شود. اگر میزان جاری شده از مخلوط در دمای $160^{\circ}C$ کمتر از ۰/۳ درصد باشد قابل قبول، و اگر بیشتر از ۰/۳ درصد مشکل زا خواهد بود [۴].

برای بررسی جاری شدن قیر از مخلوطها ۱۱ نمونه به شرح جدول (۵) ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایشها نشان می دهد که در آسفالتهای SMA بدون ماده افزودنی مشکل جاری شدن قیر وجود دارد. افزودن الیاف یا پودر لاستیک مشکل جاری شدن قیر از سطح

سنگدانه ها را کاملاً مرتفع می سازد. مخلوط با دانه بندی توپر دارای این مشکل نبوده و نیازی به ماده افزودنی ندارد. جدول (۵) نشان می دهد که درصد قیر جاری شده از آسفالتهای SMA ساخته شده با قیر لاستیکی از نمونه های مشابه که با قیر الیافی ساخته شده اند کمتر است. نتایج نشان می دهد که در آسفالتهای SMA که با الیاف و پودر لاستیک ساخته شده اند، افزایش درصد قیر به مقدار یک درصد، میزان جاری شدن قیر را بین ۳۰ تا ۵۵ درصد افزایش می دهد.

۲-۷- دوام مخلوطهای آسفالتی در برابر رطوبت

عریان شدن مصالح سنگی از قیر، یکی از خرابی های عمده ای است که ناشی از دوام پایین مخلوطهای آسفالتی در برابر رطوبت است. البته عوامل دیگر مانند جنس سنگدانه، آلودگی مصالح به گرد و غبار، سوخته شدن قیر، یا اجرا در هوای بارانی نیز می تواند این خرابی را سبب شوند. در این پژوهش، برای مقایسه استعداد مخلوطهای آسفالتی به عریان شدگی از آزمایش ساده ای موسوم به آزمایش جوشاندن به روش تگزاس استفاده گردید [۹].

برای این آزمایش ۶ نمونه مخلوط آسفالتی ساخته شد. برای سهولت تشخیص عریان شدگی فقط از مصالح بزرگتر از الک شمارهٔ ۸(۲/۳۶ میلیمتر) استفاده شد. یک نمونه با قیر خالص به عنوان شاهد، ۳ نمونه با الیاف، و ۲ نمونه با پودر لاستیک ساخته شد. نمونه های ساخته شده با الیاف حاوی ۵/۵، ۶/۵ و ۷/۵ درصد الیاف و نمونه های ساخته شده با پودر لاستیک حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد پودر لاستیک بودند. میزان قیر اصلاح شده بکار رفته ۵ درصد نسبت به وزن کل مخلوط آسفالتی بود. با این میزان قیر، سطح سنگدانه ها با غشاء نازکی از قیر کاملاً پوشیده شد. نمونه ها تحت آزمایش جوشاندن به روش تگزاس به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفتند. نتایج ارزیابی مخلوطها که در روز بعد از آزمایش انجام گرفت، نشان می دهد که تمایل به عریان شدگی با افزایش درصد الیاف و پودر لاستیک کاهش می یابد [جدول (۶)]. به عبارت دیگر، مقاومت این نوع آسفالتها در مقابل عریان شدگی بیشتر است[۱۰].

۲-۸- آزمایش مقاومت فشاری

برای ارزیابی مقاومت نمونه های آسفالتی در برابر شیار طولی، آزمایش مقاومت فشاری مخلوطهای آسفالتی، که شرح آن در استاندارد ASTM D ۱۰۷۴ [۶] آمده است به کار گرفته شد.

برای مقایسهٔ استعداد مخلوط های مختلف در مقابل شیار طولی ۱۹ حالت متفاوت (۴۲ نمونه) مطابق جدول (۷) در نظر گرفته شد. در ابتدای کار برای هر حالت ۳ نمونه ساخته می شد، ولی با مشاهدهٔ تکرارپذیری بسیار خوب، این تعداد به ۲ نمونه برای هر حالت کاهش داده شد.

برای مقایسهٔ نتایج این آزمایشها برای هر حالت، از شیب نمودار تنش ـ کرنش [شکلهای (۸) تا (۱۱)]، که نشانگر مدول سختی[۱۱] است، به عنوان شاخصی برای بیان مقاومت مخلوط در برابر شیار طولی استفاده شد. جدول (۷) مقاومت حداکثر و مدول سختی نمونه برای هر حالت را نشان می دهد. شکلهای (۸) تا (۱۱) نشان می دهند که نمودار تنش ـ کرنش در تمامی حالات آزمایش به شکل یک سهمی بوده که از سه قسمت تشکیل می شود. در قسمت اول که تاکرنش حدود ۰/۰۲ را شامل می شود، نرخ تغییرات تنش نسبت به کرنش کم است. این پدیده به دلیل آن است که در اولین مراحل بارگذاری، نمونه بیشتر متراکم شده و سپس در مرحله بعد قادر به تحمل بار بیشتری می شود، افزایش شیب قسمت دوم منحنی مؤید این مطلب است. در قسمت دوم، که برای مخلوطهای الیافدار کرنش حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ را شامل می شود، نرخ تغییرات تنش بر حسب کرنش تقریباً ثابت بوده، و نمودار به صورت خطی است. شیب این قسمت از نمودار (m) به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت مخلوط در برابر شیار طولی انتخاب گردید. هر چه مقدار m بیشتر باشد، مقاومت مخلوط در مقابل بروز شیار طولی بیشتر است. در قسمت سوم رفتار نمونه غیر خطی بوده و نمونه به حد گسیختگی کامل می رسد.

شکل (۸) نشان می دهد که حداکثر مقاومت فشاری نمونه های آسفالتی با دانه بندی توپر از بقیهٔ نمونه ها بیشتر است. آزمایشهای پایداری مارشال [شکل (۶)] نیز همین نتیجه را ارائه داد.

جدول (۷) نشان می دهد که استعداد ایجاد شیار طولی در مخلوطهای آسفالتی با دانه بندی توپر (نمونه ۱) نسبت به اکثر مخلوطهای SMA کمتر است. البته، نمونهٔ ۹ دارای سختی در حد نمونه با دانه بندی توپر است.

آقایان Mogawer و Stuart در تحقیقی که برای مقایسهٔ استعداد شیار طولی در مخلوطهای SMA و مخلوطهای با دانه بندی توپر انجام دادند از آزمایش بارگذاری تکراری استفاده کردند [۱۰] و به این نتیجه رسیدند که استعداد بروز شیار طولی در مخلوطهای SMA نسبت به مخلوطهای با دانه بندی توپر بیشتر است، که نتیجه بدست آمده در تحقیق حاضر را تأیید می کند. آقای Brown نیز با استفاده از آزمایش خزش، میزان خزش رخ داده در در نمونه های SMA را بیشتر از نمونه های با دانه بندی توپر گزارش کرد [۱۲]. البته نوع آزمایشگاه از عوامل مهم در بررسی ویژگیهای

مخلوطهای آسفالتی در آزمایشگاه است.

مقایسهٔ سختی نمونه های ۲، ۳ و ۴ در جدول (۷) نشانگر این مطلب است که آسفالت ساخته شده با ۵ درصد قیر اصلاح شده، بدست آمده از روش مارشال، نسبت به بقیه درصدها، بالاترین میزان مدول سختی را دارد [شکل (۹)].

از سوی دیگر، افزایش پودر لاستیک، مدول سختی نمونه را کاهش و در نتیجه حساسیت مخلوط نسبت به بروز شیار طولی را افزایش می دهد.

کاهش مدول سختی آسفالتهای لاستیکی نمی تواند ناشی از کاهش چسبندگی قیر به مصالح سنگی باشد، زیرا درصد منافذ هوا حکایت از افزایش کندروانی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در مقایسه با قیر اصلاح شده با الیاف معدنی را دارد. همچنین نتایج آزمایش جوشاندن به روش تگزاس نشان می دهد که مخلوط ساخته شده با قیر لاستیکی با مخلوط ساخته شده با قیر اصلاح شده با الیاف معدنی عملکردی برابر دارد. بنابراین، بررسی های بیشتر جهت یافتن علت کاهش مدول سختی این نوع مخلوط لازم است.

مقایسهٔ سختی نمونه های شماره های ۱۳، ۳ و ۱۷ در جدول (۷) نشان می دهد که نمونه های SMA با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر ($\frac{3}{4}$ اینچ) در مقایسه با نمونه های با حداکثر اندازه اسمی ۲۵ و ۱۲/۵ میلیمتر (۱ و $\frac{1}{2}$ اینچ) حساسیت کمتری نسبت به شیار طولی دارد.

۳ـ عملکرد میدانی مخلوطهای SMA

تجربه عملکرد میدانی مخلوطهای SMA در ایران وجود ندارد. تجربیات موجود در اروپا و سپس آمریکا حکایت از عملکرد مناسب تر این گونه مخلوطهادر برابر شیار طولی نسبت به مخلوطهای توپر تحت ترافیک سنگین را دارد [۱۳]. در یک مطالعه میدانی در آمریکا ۸۶ قطعه راه که با این نوع مخلوط در ایالت های مختلف و شرایط آب و هوایی متفاوت احداث شده بودمورد بررسی قرار گرفت. مشاهدات انجام شده در مطالعه مزبور نشان داد که در نزدیک ۹۰ درصد روسازی های ارزیابی شده عمق شیار طولی کمتر از ۴ میلیمتر، ۷۰ درصد کمتر از ۲ میلیمتر و در حدود ۲۵ درصد اصلاً شیار طولی رخ نداده است [۱۴].

نکته مثبت دیگری که در مطالعه مربوط به عملکرد میدانی گزارش گردیده کیفیت خوب سطح روسازی از نظر ایجاد اصطکاک و جلوگیری از لغزندگی و همچنین عدم مشاهده ترک عرضی قابل توجه در اینگونه روسازی ها بود [۱۴].

مشکل عمده اینگونه روسازی ها قیرزدگی موضعی در برخی قطعه ها بوده است که به دلیل زیادتر بودن قیر نسبت به مخلوطهای متداول از یک سو (معمولاً حدود ۶ درصد) و ناهمگونی در توزیع الیاف در مخلوط در هنگام تهیه مخلوط گزارش شده است [۱۴]. هزینه اجرای این نوع مخلوط نیز در آمریکا حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از آسفالت معمولی است [۵].

٤ـ جمع بندی نتایج

بر اساس تعداد و شرایط نسبتاً محدود آزمایشهای انجام شده، نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر خلاصه می شود:

۱ـ نمودار ـ تنش ـ کرنش در مخلوطهای آسفالتی در تمامی حالات به شکل یک سهمی بوده که دارای سه قسمت است: شیب قسمت اول مربوط به حالت تراکم بر اثر بارگذاری است، شیب قسمت دوم این منحنی که به صورت خطی است به عنوان شاخصی برای ارزیابی مقاومت در برابر شیار طولی در مخلوطهای آسفالتی به کار گرفته شد، و شیب قسمت سوم مربوط به بارگذاری تا مرحله شکست است.

۲ـ با استفاده از دانه بندی مناسب می توان مخلوط SMA ای ساخت که از نظر مقاومت فشاری تک محوری با مخلوطهای آسفالتی با دانه بندی توپر برابری کند.

۳ـ حداکثر مقاومت فشاری مخلوطهای آسفالتی با دانه بندی توپر از نمونه های SMA که با الیاف و پودر لاستیک ساخته می شوند، بیشتر است.

۴ـ در آسفالتهای SMA درصد قیر مناسب بدست آمده از روش مارشال بیشترین مدول سختی را می دهد.

۵ـ مدول سختی نمونه های آسفالتی SMA با افزایش درصد قیر افزایش و سپس کاهش می یابد.

۶ـ نتایج بدست آمده از بررسیهای آزمایش مارشال و مقاومت فشاری در مورد استعداد مخلوطهای SMA ساخته شده با قیر حاوی پودر لاستیک در برابر شیار طولی حکایت از نیاز به بررسی بیشتر در این رابطه را دارد.

۷ـ در صورتی که استعداد بروز شیار طولی بر مقدار جریان مارشال بنا نهاده شود در مخلوطهای SMA، به ویژه در حالت حاوی پودر لاستیک، استعداد بروز شیار طولی کمتر است. ولی اگر ملاک مدول سختی بدست آمده از آزمایش فشار تک محوری انتخاب شود، در آن صورت، مخلوطهای SMA به ویژه مخلوط حاوی پودر لاستیک از استعداد بروز شیار طولی بیشتری برخوردارند.

۸ ـ درصد مصالح رد شده از الک شماره ۴ (۴/۷۵ میلیمتر) در مقدار مدول سختی نمونه مؤثر است، با تعیین این درصد می توان مدول سختی مخلوط های آسفالتی SMA را تا حد مخلوط های آسفالتی با دانه بندی توپر افزایش داد.

۹ ـ در میان دانه بندی میان تهی آزمایش شده (با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵، ۱۹، ۲۵ میلیمتر)، دانه بندی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر حساسیت کمتری در مقابل شیار طولی از خود نشان داد.

۱۰ ـ موارد بالا، به ویژه وارد ۶ و ۷ و عملکرد میدانی بهتر مخلوط های SMA در برابر شیار طولی نسبت به مخلوط های توپر متداول، نشان از نامناسب بودن روش های متداول ارزیابی آزمایشگاهی مخلوط با دانه بندی توپر بر روی این مخلوط در آزمایشگاه را دارد و ضروری است که آزمایش های مناسب دیگر بکار گرفته شود.

۵ ـ توصیه ها و زمینه های ادامه پژوهش

جمع بندی نتایج بدست آمده در این پژوهش ضرورت به ادامه پژوهش ها در شرایط وسیعتر و استفاده از دستگاه های بارگذاری در حالت های دیگر را نشان می دهد. از آن جمله می توان آزمایش مقاومت فشاری سه محوری و دستگاه بارگذاری Wheel tracking را نام برد.

ازمایش های انجام شده در این پژوهش همه در دمای معمولی آزمایشگاه (حدود ۲۰ °C) صورت گرفت. از انجایی که پدیده بروز شیار طولی معمولاً در شرایط آب و هوایی گرم رخ می دهد انجام آزمایش ها در دمای مختلف باتوجه به وجود الیاف و یا پودر لاستیک در مخلوط های SMA ضروری است.

زیرنویس ها

1 -Stone Mastic Asphalt

۲ـ تغییر شکل دائم ایجاد شده بر روی روسازی در راستای مسیر چرخهای وسایل نقلیه سنگین را شیار طولی (Rutting) گویند. بروز این خرابی می تواند ناشی از سستی لایه خاک بستر یا نرم بودن مخلوط آسفالتی باشد. در این مقاله نوع اخیر آن مد نظر است.

3- Gap-graded

۴ ـ برای جلوگیری از جاری شدن قیر از سنگدانه ها، قیر مصرفی در این مخلوطها معمولاً با مواد افزودنی کند روان تر می شود.

5- Nominal Maximum Aggregate Size (NMAS)

6- Superpave

7- Voids in Mineral Aggregates

8- Voids Filled With Asphalt

9- Flow

۱۰ـ مقادیر عریان شدگی چشمی بالای ۱۰ درصد برخی را محققین به عنوان معیاری برای حساس بودن مخلوط در برابر عریان شدگی پیشنهاد می کنند[۱۰].

۱۱ـ Stiffness modulus این مدول را برخی از محققین مدول سفتی می خوانند. با توجه به اینکه در دیگر زمینه های مهندسی عمران واژه سختی معادل Stiffness بکار رفته در این مقاله نیز از واژه متداول تر "سختی" استفاده می شود.

جدول (۱) ویژگیهای الیاف معدنی Inorbit M.

نوع قیر	درجه نفوذ (dmm)	نقطهٔ نرمی (°C)	شکل‌پذیری (cm)
قیر خالص	۶۳	۴۹	۱۰۰ <
قیر خالص + ۵/۵٪ الیاف	۴۳* (-۳۲٪)	۵۵* (۱۲٪)	۴۰* (-۶۰٪)
قیر خالص + ۶/۵٪ الیاف	۳۷ (-۵۴٪)	۶۰ (۲۳٪)	۱۵ (-۸۵٪)
قیر خالص + ۷/۵٪ الیاف	۳۵ (-۵۱٪)	۶۲ (۲۶٪)	۱۰ (-۹۰٪)
قیرخالص +۱۵٪پودرلاستیک	۲۶ (-۵۸٪)	۶۳ (۲۹٪)	۱۴ (-۸۶٪)
تعداد نمونه‌های ساخته شده	۱۰	۱۰	۱۰

* اعداد داخل پرانتز درصد اختلاف نسبت به مقدار متناظر برای قیر خالص را نشان می‌دهد.

جدول (۲). نتایج آزمایشهای انجام شده روی قیر اعداد داخل پرانتز درصد اختلاف نسبت به مقدار متناظر برای قیر خالص را نشان می دهد.

ویژگی	مقدار
میانگین قطر الیاف	۴ میکرون
میانگین طول الیاف	۶۰۰۰ میکرون
وزن مخصوص	۲/۷۵ g/cm³
قابلیت جذب رطوبت	کمتر از ۵٪

جدول (۴) درصد قیر مناسب برای حالات مختلف آزمایش.

مخلوط آسفالتی	درصد قیر بهینه
آسفالت توپر معمولی	۴/۵
آسفالت SMA حاوی ۵/۵ درصد الیاف	۵
آسفالت SMA حاوی ۶/۵ درصد الیاف	۵
آسفالت SMA حاوی ۷/۵ درصد الیاف	۵
آسفالت SMA حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک	۶
آسفالت SMA بدون افزودنی	۴/۵

جدول (۳) تعداد و شرایط نمونه های آسفالتی مارشال مورد نیاز.

نوع دانه‌بندی	نوع افزودنی برای اصلاح قیر	درصد افزودنی نسبت به وزن قیر	درصدهای قیر در هر حالت	تعداد نمونه برای هر درصد	تعداد نمونه برای هر حالت
توپر	.....	صفر	۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵،۴	۳	۱۸
میان تهی	الیاف	۵/۵	۷،۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵	۳	۱۸
میان تهی	الیاف	۶/۵	۷،۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵	۳	۱۸
میان تهی	الیاف	۷/۵	۷،۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵	۳	۱۸
میان تهی	پودر لاستیک	۱۵	۷،۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵	۳	۱۸
میان تهی	.....	صفر	۷،۶/۵،۶،۵/۵،۵،۴/۵	۳	۱۸
تعداد کل نمونه‌های مارشال					۱۰۸

جدول(۵) حالات مختلف و نتایج آزمایش جاری شدن قیر از سطح سنگ دانه ها.

نوع دانه‌بندی	نوع افزودنی	درصد افزودنی نسبت به وزن قیر	درصد قیر اصلاح شده در مخلوط	درصد جاری شدن قیر
توپر	—	—	۵	۰/۰۶
SMA_1	الیاف	۵/۵	۵	۰/۱۴
SMA_1	الیاف	۶/۵	۵	۰/۰۹
SMA_1	الیاف	۷/۵	۵	۰/۰۷
SMA_1	الیاف	۵/۵	۶	۰/۲۱
SMA_1	الیاف	۶/۵	۶	۰/۱۴
SMA_1	الیاف	۷/۵	۶	۰/۰۹
SMA_1	—	—	۵	۱/۳۰
SMA_1	—	—	۶	۳/۰۵
SMA_1	پودر لاستیک	۱۵	۵	۰/۰۵
SMA_1	پودر لاستیک	۱۵	۶	۰/۰۷

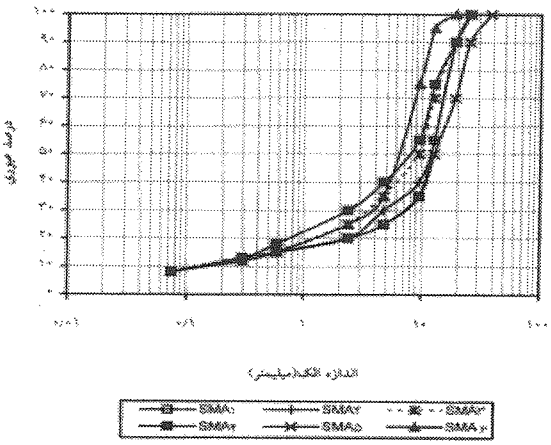
جدول (۶) میزان عریان شدگی سطح سنگدانه ها پس از آزمایش جوشاندن.

نوع مخلوط آسفالتی	درصد جداشدگی قیر از سطح سنگدانه
بدون ماده افزودنی (قیر خالص)	۴۰
حاوی ۵/۵ درصد الیاف	۳۵
حاوی ۶/۵ درصد الیاف	۳۰
حاوی ۷/۵ درصد الیاف	۱۰
حاوی ۱۰ درصد پودر لاستیک	۲۵
حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک	۱۰

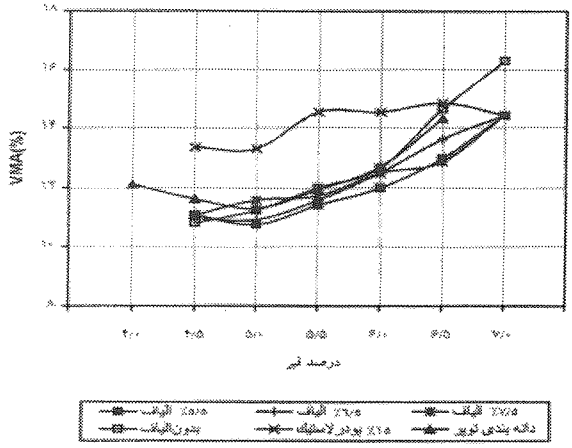
جدول (۷) نتایج آزمایش مقاومت فشاری
دانه بندیهای SMA تا SMA_6 در شکل (۱) آمده است.

شماره نمونه	نوع دانه‌بندی*	نوع افزودنی	درصد افزودنی نسبت به قیر	درصد قیر اصلاح شده در مخلوط	تعداد نمونه	حداکثر مقاومت فشاری MPa	مدول سختی MPa
۱	توپر	.....	صفر	۴/۵	۳	۲/۲۸	۴۳/۹
۲	SMA_1	الیاف	۶/۵	۴/۵	۲	۱/۵۱	۳۵/۳
۳	SMA_1	الیاف	۶/۵	۵	۳	۱/۷۸	۴۰/۷
۴	SMA_1	الیاف	۶/۵	۵/۵	۲	۱/۵۳	۳۷/۷
۵	SMA_1	پودر لاستیک	۱۵	۶	۳	۱/۰۷	۲۱/۴
۶	SMA_1	پودر لاستیک	۱۰	۶	۲	۱/۳۴	۲۷/۴
۷	SMA_1	پودر لاستیک	۵	۶	۲	۱/۴۷	۳۵/۷
۸	SMA_1	.....	صفر	۴/۵	۳	۱/۷۱	۴۰/۰
۹	SMA_2	الیاف	۶/۵	۵	۲	۱/۹۵	۴۳/۶
۱۰	SMA_3	الیاف	۶/۵	۵	۲	۱/۸۸	۳۹/۷
۱۱	SMA_4	الیاف	۶/۵	۵	۲	۲/۰۳	۴۱/۲
۱۲	SMA_5	الیاف	۶/۵	۴	۲	۱/۲۴	۳۵/۴
۱۳	SMA_5	الیاف	۶/۵	۴/۵	۲	۱/۵۷	۳۹/۸
۱۴	SMA_5	الیاف	۶/۵	۵	۲	۱/۴۱	۳۷/۱
۱۵	SMA_5	الیاف	۶/۵	۵/۵	۲	۱/۳۸	۳۴/۰
۱۶	SMA_5	الیاف	۶/۵	۴	۲	۱/۵۰	۳۵/۲
۱۷	SMA_5	الیاف	۶/۵	۴/۵	۲	۱/۵۸	۳۸/۵
۱۸	SMA_6	الیاف	۶/۵	۵	۲	۱/۵۴	۳۷/۲
۱۹	SMA_6	الیاف	۶/۵	۵/۵	۲	۱/۲۳	۳۵/۴
تعداد کل نمونه‌های مقاومت فشاری					۴۲		

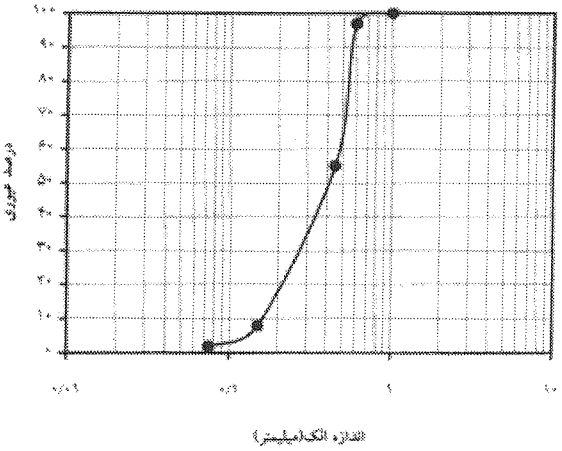
* دانه‌بندیهای SMA_1 تا SMA_6 در شکل (۱) آمده است.



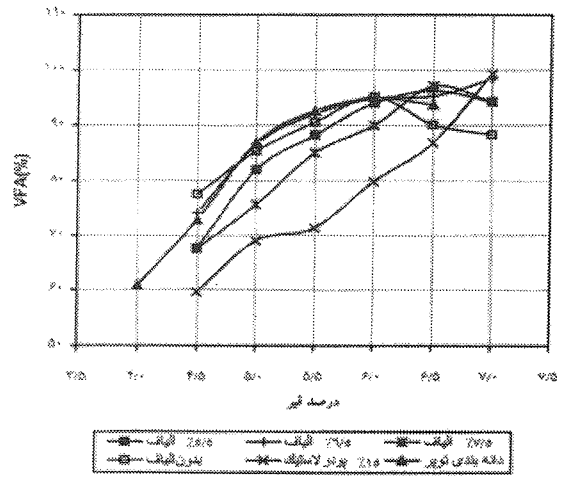
شکل (۱) منحنی دانه بندیهای مختلف به کار رفته جهت بررسی خصوصیات آسفالتهای S.M.A.



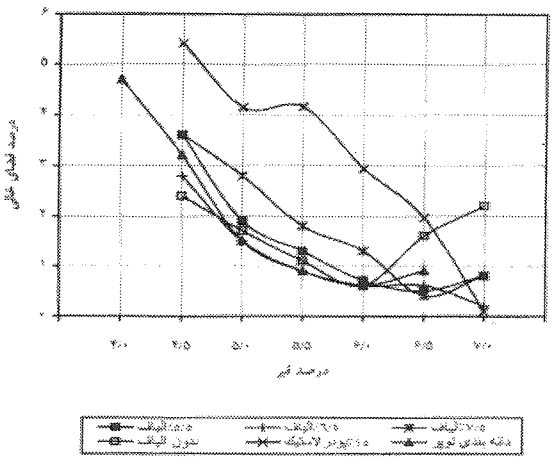
شکل (۴) نمودار مقایسه ای نتایج VMA نمونه های آسفالتی آزمایشگاهی.



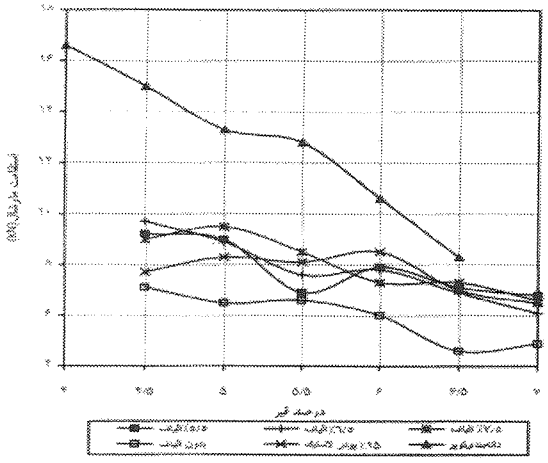
شکل (۲) منحنی دانه بندی پودر لاستیک مصرفی.



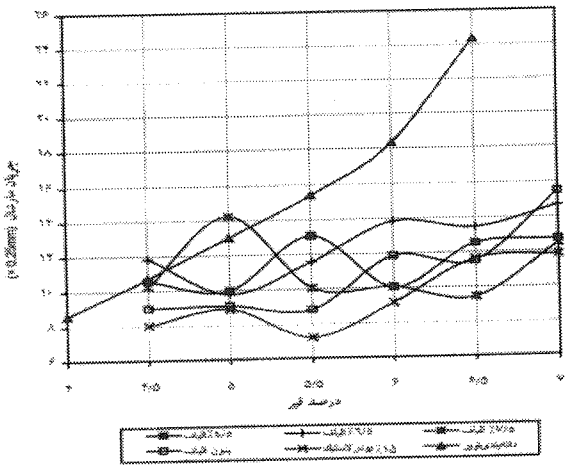
شکل (۵) نمودار مقایسه ای نتایج VFA نمونه های آسفالتی آزمایشگاهی.



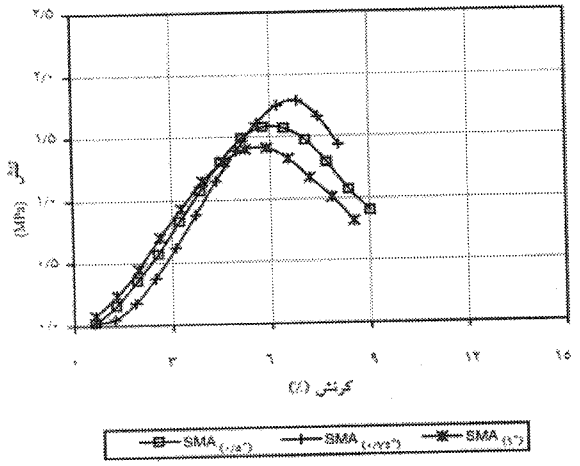
شکل (۳) نمودار مقایسه ای نتایج درصد فضای خالی نمونه های آسفالتی آزمایشگاهی.



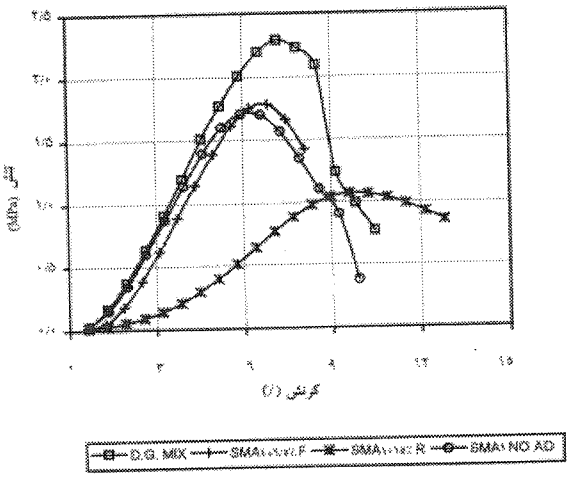
شکل (۶) نمودار مقایسه ای استقامت مارشال نمونه های آسفالتی.



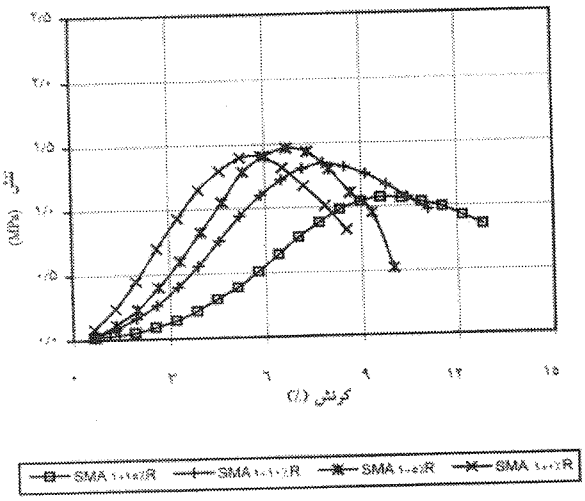
شکل (۷) نمودار مقایسه ای جریان مارشال نمونه های آسفالتی.



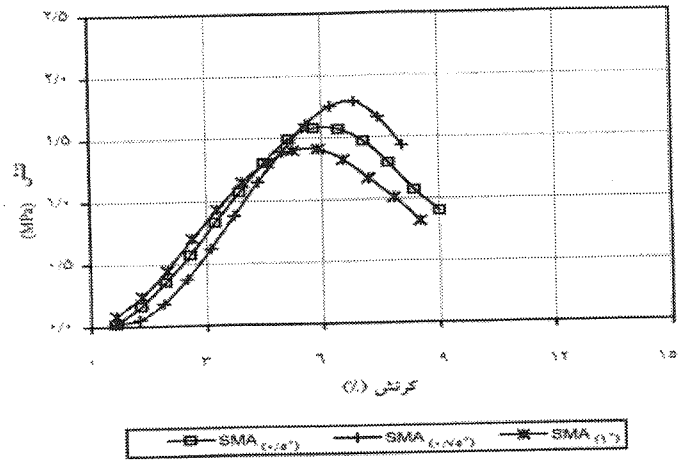
شکل (۹) نمودار تنش ـ کرنش برای نمونه های SMA با درصد های مختلف قیر .



شکل (۸) نمودار تنش ـ کرنش برای نمونه های SMA و دانه بندی توپر.



شکل (۱۰) نمودار تنش ـ کرنش برای نمونه های SMA با درصد های مختلف پودر لاستیک.



شکل (۱۱) نمودار تنش ـ کرنش برای نمونه های SMA با حداکثر اندازه اسمی دانه های ۵ / ۱۲ . ۱۹ . ۲۵ ، میلیمتر (۵ / ۰ / ۷۵ . ۰ / ۰۰ . ۱ اینچ).

Refrence

[1]**Mahboud K., Simpson A., Oduroh P., and Flcckenstein J., "Field Performance of Large Stone Hot Mix Asphalt on a Kentucky Coal Haul Road," Transportation Research Record 13.37, TrB, National Rescarch Council, Washigton D. C., 1990.**

[2] Stuart K.D. and Malmquist P., "Evaluation of Using Different Stabilizers in the U.S. Route 15 (Maryland)," Transportation Research Record 1454, TRB, National Research council, Washington, D,C., 19994.

[3] Bukowski J.R.,"SMA in America: Past, Present and Future". Presented at the 72nd annual meeting of Transportation Reseach Board, Washington, D.C., January 11th. 1993.

[4] Stuart K.D., Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixture Design, U.S.Dwpartment of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA -RD-92-006, March 1992.

[5] Kuenen, T., "Gap-graded Maryland Mixes Meld SMA Superpave Designs,"Focus on Hot Mix Asphalt Technology, Volume 4, No, 2, Summer 1999.

[6] ASTM, "Road and Paving materials, Pavement Management Technologies." Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.03, American Society for Testing and Materials, 1994.

[7] Brown E.R., allick, R., and Haddak, J., "Performance Evaluation of SMA Pavements in the U.S.," Hot Mix Asphalt Technology, National Asphlt Pavement Association, Fall 1997.

[۸] طباطبایی، نادر و شهرام بهلولی زنجانی، «بررسی خصوصیات قیر اصلاح شده با پودر لاستیک»، در مجموعه مقالات اولین سمینار قیر و آسفالت ایران، آبان ۱۳۷۳، ص ص ۳۲۲ - ۳۴۹.

[9] Kennedy T.W., and Ping W.V.,"An Evaluation of Effectiveness of Antistripping Additives in Protecting Asphalt Mixtures from Moisture Damage,"Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 60., 1991.

[10] Mogawer W.S., and Stuart K.D., "Effects of Mineral Fillers on Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures,"Transportation Research Record 1530 TRB, National Reserach Council, Washington, D.C., 1996.

[11] Mogawer W.S., and Stuart K.D., "evaluation of Stone Matrix Asphalt versus Dense - Graded Mixtures," Transportation, Research Record 1454, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1994.

[12] Brown E.R., "Evaluation of Stone Mastic Asphalt Used in Michgan in 1991."Transportation Research Record 1427, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1993.

[13] EAPA, Heavy Duty Surfaces: The Arguments for SMA, European Asphalt Pavement Association, 1998.

[14] Brown E.R., Mallick, R.B., Haddok, J.E., and Bukowski, J., "Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States," Journal of Asphlt Paving Technologists, Vol, 66, 1977.