

ارزیابی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیار شدگی مخلوط آسفالتی گرم حاوی افزودنی ضد عریان شدگی با بکارگیری قیر لاستیکی

پیمان دارپرنیان*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
علی عبدی کردانی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
بابک گلچین، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: payman.d70@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۲۰ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۱۶۹-۱۸۳

چکیده

در سال‌های اخیر تکنولوژی جدیدی با عنوان مخلوط آسفالت گرم در صنعت راه‌سازی ابداع شد. هدف اصلی از تولید این نوع مخلوط‌ها، کاهش انتشار آلاینده‌ها و مصرف انرژی کمتر در راستای توافقنامه کیوتو می‌باشد. علاوه بر این، مزایای دیگری مانند امکان اجرای روسازی در هوای سرد، بهبود کارایی، بازگشایی سریع‌تر ترافیک، کاهش آلاینده‌های مضر برای کارگران و کاهش احتمال بروز پیرشدگی قیر به سبب کاهش دمای تولید را موجب خواهد شد. با وجود اینکه مزایای نامبرده باعث تشویق متولیان روسازی به استفاده از این تکنولوژی شده است، اما جنبه‌های مختلف رفتاری این نوع تکنولوژی هنوز به درستی مشخص نشده است. یکی از این جنبه‌های رفتاری، پتانسیل شیار شدگی و حساسیت رطوبتی در عملکرد طولانی مدت روسازی‌های ساخته شده با تکنولوژی مخلوط آسفالت گرم می‌باشد. اگر مخلوط آسفالت لاستیکی به صورت گرم ساخته شود هزینه اولیه ساخت آسفالت لاستیکی به دلیل ساخت آسفالت در دمای پایین‌تر از آسفالت داغ معمولی کمتر می‌شود. استفاده همزمان از پودر لاستیک و افزودنی ضدعریان شدگی در مخلوط آسفالتی گرم باعث بهبود عملکرد طولانی و پتانسیل شیار شدگی و حساسیت رطوبتی در مقایسه با مخلوط آسفالت داغ معمولی می‌شود. در تحقیق حاضر به ارزیابی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی مقاومت آسفالت پودر لاستیکی گرم حاوی ماده ضد عریان شدگی در برابر حساسیت رطوبتی و مقایسه آن با مخلوط آسفالتی داغ پرداخته شده است. نتایج نشان داده شده در حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که مقدار بهینه افزودنی زایکوترم در نمونه حاوی ۰.۱ درصد می‌باشد. همچنین نتایج در آزمایش مدول برجهندگی و خزش دینامیکی نشان می‌دهد که بیشترین مدول برجهندگی و خزش دینامیکی برای افزودنی زایکوترم در نمونه حاوی ۰.۱۲ درصد می‌باشد که این نتایج بهتر از نمونه کنترلی بوده است. به طور کلی افزودن ماده ضد عریان شدگی مخلوط آسفالتی گرم حساسیت رطوبتی و مقاومت شیار شدگی آسفالت لاستیکی را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، زایکوترم، پودر لاستیک، حساسیت رطوبتی، شیارشدگی

۱- مقدمه

بالا بودن حساسیت رطوبتی در روسازی‌های آسفالتی سبب جدا شدن قیر از سنگ دانه می‌شود و این پدیده تا جایی ادامه می‌یابد که مقاومت داخلی مخلوط آسفالتی کاهش پیدا کند؛ در این حالت، تنش‌های ناشی از بارهای ترافیکی به‌گونه‌ای چشمگیر افزایش می‌یابد و خرابی‌هایی همچون شیارزدگی،

قیر ماده چسباننده مصالح سنگی در بتن آسفالتی است و نقش زیادی در کارایی مخلوط دارد. ویژگی‌های فیزیکی و ویژگی‌های حساسیت حرارتی قیر بر عملکرد نهایی مخلوط آسفالتی اثر می‌گذارد. بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط های آسفالتی همواره مد نظر پژوهشگران بوده است، زیرا

عریان شدگی و ترک های خستگی ایجاد می شود (Yilmaz and Vural Kok, 2009).

یکی از راه کارهای مقابله با عملکرد ضعیف و خرابی های زودرس مخلوط های قیری، بهبود عملکرد قیر است. استفاده از افزودنی های قیر یکی از روشهای بهبود عملکرد قیر می باشد که این امر، ایده استفاده از ضایعات پلیمری را برای برخی اهداف بوجود آورده است.

اما استفاده از آسفالت لاستیکی به علت استفاده از تایرهای فرسوده و فواید آن برای محیط زیست از اهمیت بیشتری برخوردار است (Takallou and Sainton, 1992). به طور کلی به قطعات خرد شده لاستیک که به عنوان ماده افزودنی در مخلوط آسفالتی به کار می رود، پودر لاستیک گفته می شود (Guide, 2003).

مخلوط آسفالتی گرم (WMA) در محدوده‌ی دمای بین ۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از آسفالت داغ متداول تولید می شود. هدف از بکارگیری مخلوط آسفالت گرم استفاده از کارخانه‌ها و استانداردهای تولید آسفالت داغ متداول برای تولید مخلوط های با دانه بندی پیوسته با کیفیت، در دماهای پایین تر است (Button et al., 2007).

امروزه، سه نوع از تکنولوژی های مخلوط آسفالت گرم شناخته شده است: تکنولوژی کف قیری، افزودنی های ارگانیک و شیمیایی. تکنولوژی استفاده از افزودنی های شیمیایی برای تولید مخلوط آسفالتی گرم در ایالات متحده توسعه داده شد که منجر به استفاده از انواع مختلفی از افزودنی های شیمیایی شده است. این افزودنی های شیمیایی معمولاً شامل مواد ضد عریان شدگی و روان سازها می باشند، همچنین باعث ارتقای اندود پذیری، چسبندگی، و کارایی مخلوط های آسفالتی می گردند (Angelo et al., 2008).

۲- پیشینه تحقیق

مورنو و همکاران در سال ۲۰۱۳ تحقیقی بر روی تاثیر پودر لاستیک بر روی مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر تغییر شکل های پلاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد با افزودن پودر

لاستیک به مخلوط مقاومت در برابر تغییر شکل های پلاستیک افزایش می یابد (Moreno et al., 2013).

ناوارا و همکاران در تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۲ بر روی تاثیر پودر لاستیک بر مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط های آسفالتی انجام دادند گزارش دادند که افزودن پودر لاستیک به قیر مقاومت کششی غیر مستقیم و چسبندگی را کمی کاهش و مدول سختی را افزایش داده و در نتیجه کاهش در تغییر شکل های روسازی را شاهد خواهیم بود (Navarro et al., 2012).

فونتس و همکاران در سال ۲۰۱۰ تحقیقی بر روی تغییر شکل های دائمی مخلوط های آسفالتی انجام دادند. آن ها قیری با درجه نفوذ ۵۰-۳۵ را با ۲۰ درصد پودر لاستیک به روش تر مخلوط نمودند. برای بررسی تغییر شکل های دائمی از دستگاه ویل تراک استفاده نمودند. نتایج آزمایش فونتس و همکاران نشان داد که افزودن پودر لاستیک به قیر مقاومت در برابر تغییر شکل های دائمی را بهبود می بخشد (Fontes et al., 2010).

اولیورا و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعه بر روی مخلوط های آسفالتی لاستیکی با افزودنی مخلوط آسفالت داغ سورفکانت انجام دادند. نتایج آزمایش ITS نشان داد که افزودنی در مقاومت نمونه های خشک به سختی تغییر ایجاد کرد در حالی که مقاومت نمونه های تر را به خوبی بهبود بخشید. این آزمایش نشان داد که حساسیت رطوبتی در مخلوط WMA کاهش یافته است (Oliveira et al., 2013).

پور عباس و همکاران در سال ۱۳۹۰ تحقیقی را بر روی تاثیر استفاده از پودر لاستیک بر استقامت مارشال و مقاومت کششی غیر مستقیم انجام دادند. نتایج نشان داد که نمونه های اصلاح شده با پودر لاستیک مقادیر استحکام مارشال و همچنین مقاومت کششی غیر مستقیم بیش از مقدار اصلاح نشده بود (پور عباس و مرنندی و بارزی، ۱۳۹۰).

در پژوهش هایی که در دانشگاه آزاد تهران جنوب انجام شد، جهت کاهش خرابی های ناشی از رطوبت و عریان شدگی مخلوط های آسفالتی و افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی، از پودر لاستیک استفاده شد. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم در این پژوهش نشان داد که استفاده از پودر لاستیک باعث بهبود مقاومت عریان شدگی می شود (منصوریان، ۱۳۶۷).

آکیستی و همکاران در سال ۲۰۰۹ تحقیقی را برای تعیین مشخصات قیرهای لاستیکی حاوی افزودنی در دمای بالا آغاز نمودند. در این پژوهش از دو افزودنی ساسوبیت و آسفامین استفاده گردید. افزودنی ساسوبیت با نسبت ۱/۵ درصد وزنی قیر و افزودنی آسفامین با نسبت ۶ درصد قیر با قیرهای لاستیکی مخلوط شدند. نتایج نشان داد که با افزودن آسفامین به قیر، ویسکوزیته افزایش یافت در حالی که با افزودن ساسوبیت به قیر، ویسکوزیته کاهش پیدا کرد (Akisety et al., 2009).

مورنو و همکاران در سال ۲۰۱۳ تحقیقی بر روی تاثیر پودر لاستیک بر روی مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزودن پودر لاستیک به مخلوط مقاومت در برابر تغییر شکل‌های پلاستیک افزایش می‌یابد (Moreno et al., 2013).

پالیت و همکاران در سال ۲۰۰۴ گزارش دادند که مخلوطهای اصلاحی با پودر لاستیک پتانسیل شیارشدگی کمتری را نسبت به مخلوطهای معمول دارند و هم چنین مقاومت خستگی مخلوطهای اصلاحی با پودر لاستیک به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مخلوطهای معمول می‌باشد (Palit et al., 2004). زنجانی تحقیقی را با هدف اصلاح ویژگی‌های قیر با استفاده از پودر لاستیک به عنوان یک ماده افزودنی در مقابل خرابی‌های ناشی از حرارت و رطوبت در روسازی انجام داد. نتایج نشان داد که قیر حاوی ۱۵ درصد پودر لاستیک مقاومت بهتری را در برابر حساسیت رطوبتی از خود نشان داد (زنجانی، ۱۳۷۴).

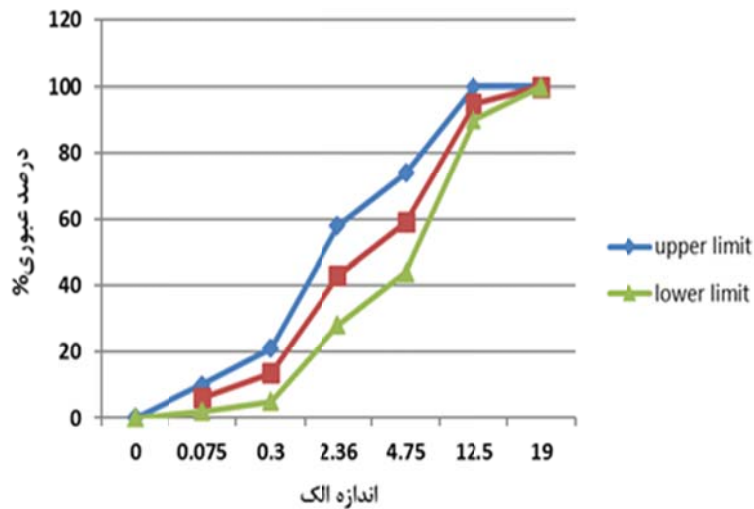
۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- انتخاب مصالح سنگی، فیلر و قیر

مصالح سنگی و فیلر مورد استفاده، از نوع مصالح آهکی بوده و از کارخانه آسفالت تلو واقع در حوالی شهر تهران تهیه گردیده است. برای ساخت مخلوط آسفالتی مورد آزمایش از دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ (آیین نامه روسازی راه‌های ایران) که برای ساخت لایه آستر و رویه پیشنهاد شده، استفاده شد. دانه بندی مورد استفاده در این تحقیق، مقدار حد وسط دانه بندی تعیین شده در شماره ۴ نشریه ۲۳۴ انتخاب شد. در جدول ۱ و شکل ۱، این دانه بندی و محدوده مربوط به دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ نشان داده شده است. قیر مورد استفاده در این تحقیق، قیر ۶۰/۷۰ از شرکت نفت پاسارگاد انتخاب و تهیه شد.

۳-۲- مشخصات مصالح

برای تعیین مرغوبیت مصالح سنگی، آزمایش‌های لازم روی آن‌ها صورت گرفت و نتایج در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۳ مشخصات فیلر استفاده شده آورده شده است. آزمایش‌های اولیه به منظور آگاهی از مشخصات فیزیکی قیر انجام شده و نتایج در جدول ۴ آورده شده‌اند.



شکل ۱. دانه بندی انتخاب شده برای ساخت نمونه‌ها

جدول ۱. دانه بندی پیوسته شماره ۴ برای رویه بر اساس آیین نامه شماره ۲۳۴ و دانه بندی انتخابی

اندازه الک	محدوده مجاز	درصد وزنی عبوری انتخابی	درصد مانده روی	مقدار مانده به ازای ۱۲۰۰ گرم
۱۹ میلی‌متر	۱۰۰	۱۰۰	۰	۰
۱۲/۵ میلی‌متر	۹۰-۱۰۰	۹۰	۱۰	۱۲۰
۴/۷۵ میلی‌متر	۴۴-۷۴	۴۴	۴۶	۵۵۲
۲/۳۶ میلی‌متر	۲۸-۵۸	۴۰	۴	۴۸
۰/۳ میلی‌متر	۵-۲۱	۱۵	۲۵	۳۰۰
۰/۰۷۵ میلی‌متر	۲-۱۰	۱۰	۵	۶۰
فیلتر	-	-	۱۰	۱۲۰

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سنگدانه های به کار رفته در تحقیق

سنگدانه آهکی	خصوصیات فیزیکی
۲/۶۱	وزن مخصوص مصالح ریزدانه
۰/۷	جذب آب (%)
۲/۶۳	وزن مخصوص مصالح درشتدانه
۲۳/۵	سایش لس آنجلس (%)
۹۴	درصد شکستگی در دو سمت

جدول ۳. مشخصات فیلر به کار رفته در تحقیق

روش آزمایش	نتایج	خصوصیات
ASTM D-4318	غیر خمیری	دامنه خمیری PI (%)
ASTM C-88	۲/۲۳	افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (%)
ASTM D-2419	۷۳	ارزش ماسه ای (%)

جدول ۴. مشخصات قیر به کار رفته در تحقیق

روش آزمایش	قیر ۶۰/۷۰	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۲	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-5	۶۴	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-36	۴۹	نقطه نرمی (درجه سانتی گراد)
ASTM D-113	بیش از ۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سانتی گراد
ASTM D-92	۳۰۵	نقطه اشتعال
ASTM D-70	۳۱۷	نقطه احتراق

۳-۳-۳- افزودنی ها

۳-۳-۱- پودر لاستیک

در این تحقیق پودر لاستیک مصرفی با مش ۴۰ می باشد که از کارخانه یزد تایر تهیه گردیده است. پودر لاستیک مورد نظر از تایرهای ضایعاتی خودرو سواری و خودرو سنگین بوده و از فرآیند خرد کردن در دمای محیط تولید شده است.

۳-۳-۲- زایکوترم

زایکوترم محصولی با فناوری نانو است که به عنوان یک افزودنی در مخلوط آسفالتی گرم (WMA)، دمای تولید و تراکم را تا بیش از ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش می دهد. ساخت شرکت زایدیکس هند است که به نحو قابل توجهی موجب بهبود پوشش قیر بر روی مصالح سنگی شده، تراکم یکنواخت و بهتر را تضمین کرده و باعث رفع عریان شدگی مصالح سنگی از قیر می شود، در نتیجه دستیابی به روسازی آسفالتی بادوام در طول عمر کاری آن را فراهم می کند.

۳-۳-۴- ساخت نمونه آسفالتی

در این تحقیق به منظور ساخت نمونه های آسفالتی ابتدا بر اساس دانه بندی شماره ۴ آیین نامه روسازی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) برای رویه راه، درصد های مانده روی هر الک به دست می آید.

برای تعیین درصد قیر بهینه طبق طرح اختلاط مارشال نمونه های بتن آسفالتی با شش درصد قیر مختلف (۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹) و از هر درصد ۳ نمونه تهیه شدند. در ساخت تمامی نمونه ها مصالح سنگی با نسبت های مشخص بر اساس دانه بندی انتخاب شده با یکدیگر مخلوط شده تا نمونه های ۱۲۰۰ گرمی آماده شود و سپس این نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۴۵ درجه سانتی گراد قرار می گیرند، سپس قیر را تا دمای ۱۳۸ درجه گرم می کنیم سپس با توجه به درصد قیر بهینه نمونه های مربوط به آزمایش کشش غیرمستقیم، مدول برجهنگی و خزش دینامیکی ساخته می شوند که به منظور یکنواختی و دقت ساخت، به وسیله دستگاه ژیراتوری انجام می شود.

مواد افزودنی در این تحقیق شامل زایکوترم و پودر لاستیک می باشد که زایکوترم به میزان (۰.۱۲، ۰.۱، ۰.۰۸) درصد و پودر

لاستیک به میزان ۱۰ درصد نسبت به وزن قیر مصرفی به قیر اضافه می شود. در این تحقیق تعداد ۳۰ نمونه برای آزمایش کشش غیرمستقیم ساخته می شود که شامل ۶ نمونه شاهد، ۶ نمونه با پودر لاستیک (۱۰٪)، ۱۸ نمونه با پودر لاستیک (۱۰٪) و زایکوترم (۰.۱۲٪/۰.۱٪/۰.۰۸٪) می باشد و تعداد ۲۴ نمونه برای آزمایش مدول و خزش ساخته شد. همچنین تعداد ۳۶ نمونه برای تعیین درصد قیر بهینه ساخته می شود که ۱۸ نمونه برای درصد قیر بهینه با پودر لاستیک و ۱۸ نمونه هم برای شاهد در نظر گرفته می شود، که تعداد کل نمونه های آزمایشگاهی برابر با ۹۰ نمونه می باشد.

نمونه های آسفالت لاستیکی بدون افزودنی مخلوط آسفالت گرم و نمونه های آسفالت داغ به عنوان شاهد در نظر گرفته می شود و هدف از این کار، مقایسه بین نمونه آسفالت لاستیکی بدون افزودنی مخلوط آسفالت گرم و نمونه های آسفالت داغ با مخلوط آسفالت لاستیکی حاوی افزودنی های ضد عریان شدگی در مخلوط آسفالت گرم می باشد.

۳-۳-۵- آزمایش های انجام شده

پس از انجام آزمایش های مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه، آزمایش حساسیت رطوبتی طبق استاندارد ASTM D4867، آزمایش مدول برجهنگی طبق استاندارد ASTM D4123، آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد Australian:AS2891-12-1 انجام شد.

۳-۳-۱- آزمایش حساسیت رطوبتی

آزمون مقاومت کششی غیر کششی مخلوط های آسفالتی انجام می شود. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی بوسیله مقاومت پیوستگی قیر مخلوط و مقاومت ناشی از پیوند بین سطح سنگدانه و قیر به وجود می آید. مقاومت کششی بوسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می تواند تحمل کند، محاسبه می شود. تاثیر آب در کاهش مقاومت مخلوط های آسفالتی به عنوان یکی از نگرانی های اصلی مطرح است که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این تحقیق آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از استاندارد ASTM D4867 انجام شده است. بار اعمالی در این

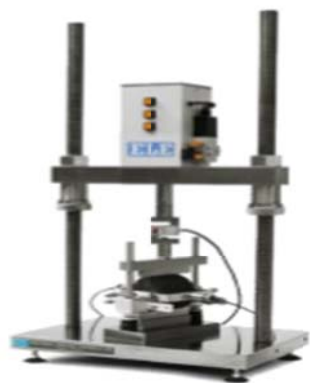
قسمت ب در آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران (نشریه ۲۳۴) با عنوان دوام مخلوط های آسفالتی در برابر آب معیار حداقل ۷۵ درصد، برای نسبت مقاومت کششی مطرح شده است.

$$TSR = \frac{\text{مقاومت کششی مخلوط در حالت اشباع}}{\text{مقاومت کششی مخلوط در حالت خشک}} \quad (۲)$$

۳-۵-۲- آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق مدول برجهندگی با استفاده از فریم آزمایش کشش غیرمستقیم در دستگاه UTM5 مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران طبق استاندارد ASTM D4123 در دمای ۲۵ درجه مورد آزمایش قرار گرفت. استاندارد دستگاه آزمایش به صورت زیر بوده است.

- شکل بارگذاری: زنگوله ای
- زمان دوره بارگذاری: ۰/۱۵ ثانیه
- دوره بارگذاری: ۲ ثانیه
- تعداد سیکل پیش بارگذاری: ۵۰ سیکل
- تعداد سیکل بارگذاری اصلی: ۵ سیکل
- بار اعمال شده: ۴۵۰ نیوتون
- ضریب پواسون فرض شده اولیه: ۰/۳۵



شکل ۳. فک دستگاه UTM5 مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

آزمایش یک تغییر شکل کششی عمود بر جهت بارگذاری را ایجاد می کند که منجر به شکست کششی می شود، با ثبت بار نهایی و مشخص بودن ابعاد نمونه مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$ITS = \frac{2P}{\pi.D.t} \quad (۱)$$

در این رابطه، ITS مقاومت کششی (برحسب کیلو پاسکال)، P، بیشینه بار (برحسب نیوتن)، D قطر نمونه (برحسب میلی متر)، t ضخامت نمونه (برحسب میلی متر) است.

شش نمونه برای هر مخلوط (خشک و اشباع) تهیه و متراکم شد. نمونه های متراکم شده باید دارای فضای خالی ۶ تا ۸ درصد باشند. نمونه های خشک باید قبل از شکستن حداقل به مدت ۱ ساعت در آب ۲۵ درجه سانتی گراد قرار گیرند تا به دمای تعادل برسند. برای اعمال شرایط رطوبتی طبق استاندارد ASTM D4867 نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در آب 1 ± 60 درجه سانتی گراد قرار داده شدند. سپس در آب با دمای 1 ± 25 درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت قرار گرفتند. نمونه ها به طور قائم بین دو فک دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم که فلزی است، قرار داده شدند. بار قطری با سرعت ۵۰ mm/min بر نمونه اعمال شد تا بار به بیشینه مقدار خود برسد و نمونه بشکند. بعد از آنکه متوسط مقاومت کششی برای هر گروه از نمونه ها تعیین شد، نسبت مقاومت کششی از رابطه ۲ محاسبه می شود. طبق بند ۹-۷-۶



شکل ۲. دستگاه آزمایش کشش غیر مستقیم

۳-۵-۳- آزمایش خزش دینامیکی

هدف از انجام این آزمایش، مطالعه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی می باشد. مهمترین پارامتر به دست آمده از آزمایش خزش، نمودار تغییر شکل دائمی می باشد که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. این آزمایش بر اساس استاندارد -12-AS2891-Australian و با استفاده از دستگاه UTM5 واقع در مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. از هر

درصد افزودنی بر اساس درصد قیر بهینه، ۳ عدد نمونه ساخته شده و به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد قرار می‌گیرد. طبق استاندارد فوق، اعمال بار به شکل مربعی با زمان بارگذاری ۵۰۰ ms و زمان استراحت ۱۵۰۰ ms و تنش تماسی اولیه ۱۰ kpa و تنش در مرحله بارگذاری برابر ۴۵۰ kpa می‌باشد. این تست برای هر نمونه تا زمان ۴۰۰۰۰ سیکل بارگذاری و یا رسیدن به کرنش ۳۰۰۰۰ micro-strain ادامه می‌یابد.



شکل ۴. شمای کلی دستگاه UTM5



شکل ۵. فک دستگاه UTM5 مربوط به آزمایش خزش

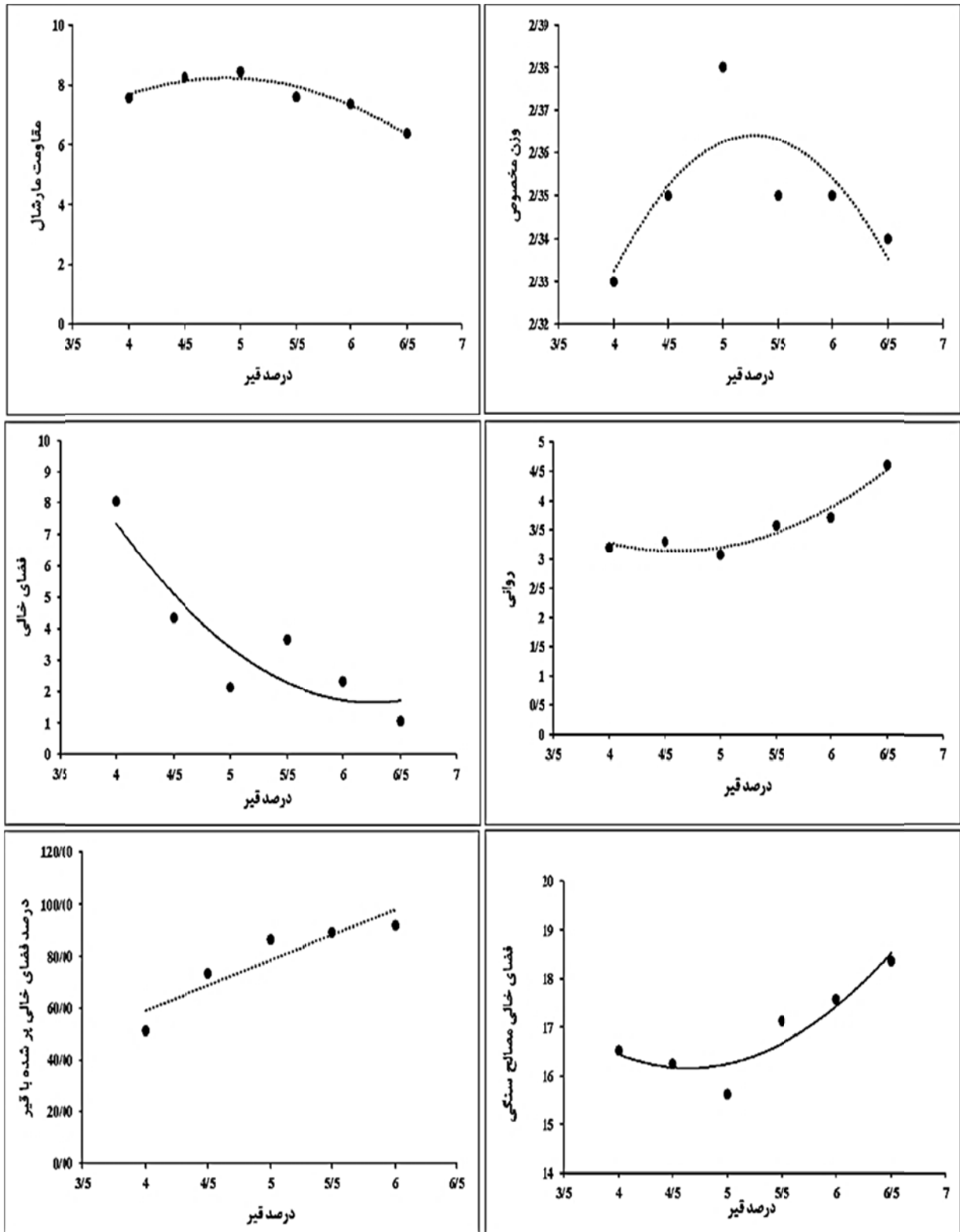
۴- نتایج

۴-۱- نتایج آزمایش مارشال

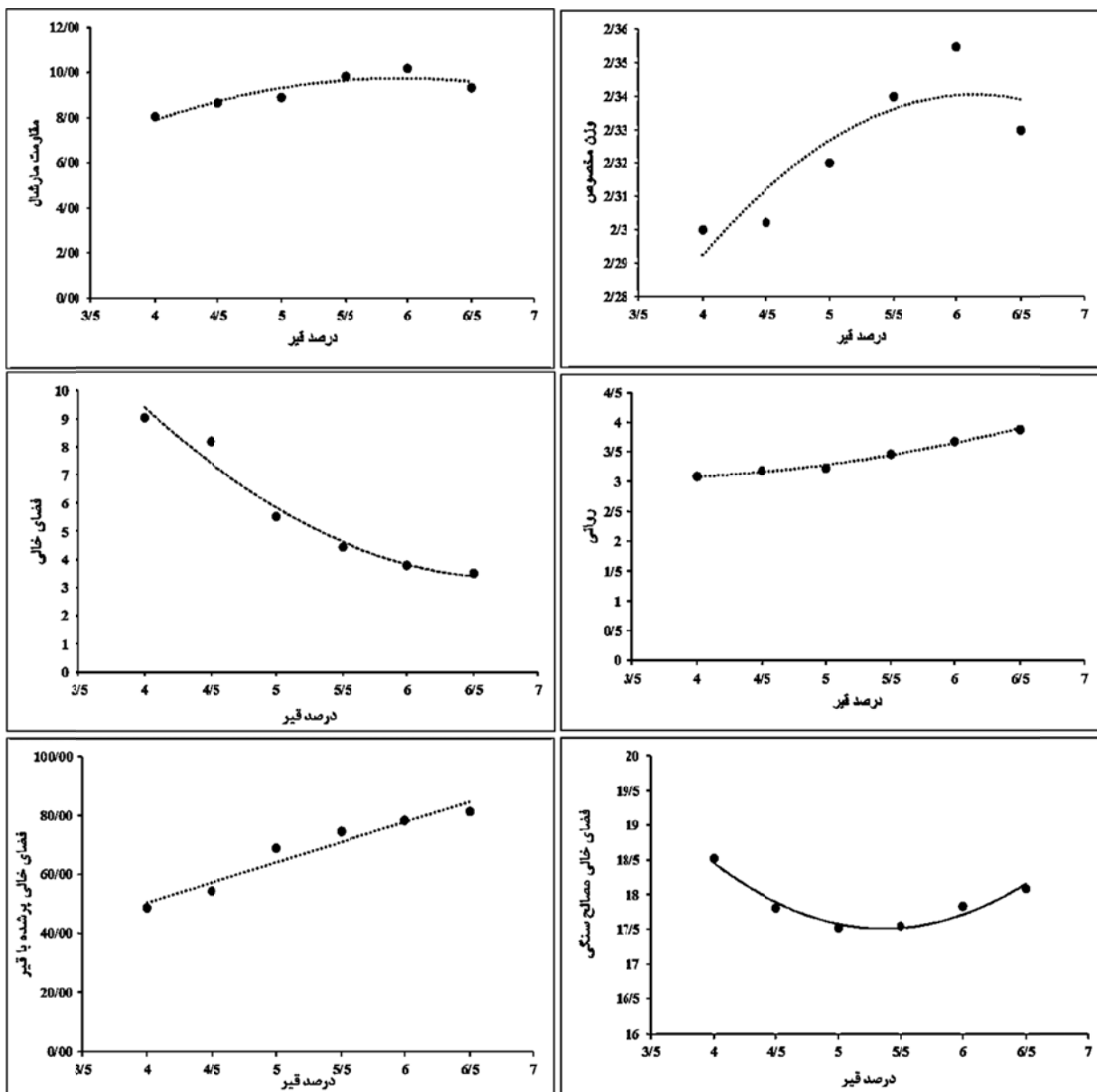
نمونه های اصلاح شده با ۱۰٪ پودر لاستیک انجام شد. شکل ۶ و ۷ نتایج آزمایش مارشال را برای نمونه های مذکور نشان می‌دهد.

آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 برای ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه، برای نمونه های بدون پودر لاستیک و

- نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش مارشال مخلوط‌های آسفالتی بدون پودر لاستیک



شکل ۶. نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش مارشال در مخلوط‌های آسفالتی بدون پودر لاستیک



شکل ۷. نمودارهای مربوط به نتایج آزمایش مارشال در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با ۱۰ درصد پودر لاستیک

بهینه به دست می‌آید. درصد قیر بهینه میانگین در قیر برای مخلوط‌های آسفالتی محاسبه شده و در جدول ۵ آورده شده است.

درصد قیر بهینه میانگین در قیر مربوط به بیشترین استقامت مارشال، بیشترین وزن مخصوص و درصد فضای خالی ۴ درصد می باشد که برای نمونه شاهد و ۱۰٪ پودر لاستیک محاسبه شده است. در هر طرح اختلاط با استفاده از این ۶ نمودار، درصد قیر

جدول ۵. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی

نمونه شاهد	۱۰٪ درصد پودر لاستیک
۴/۸	۵/۶۵

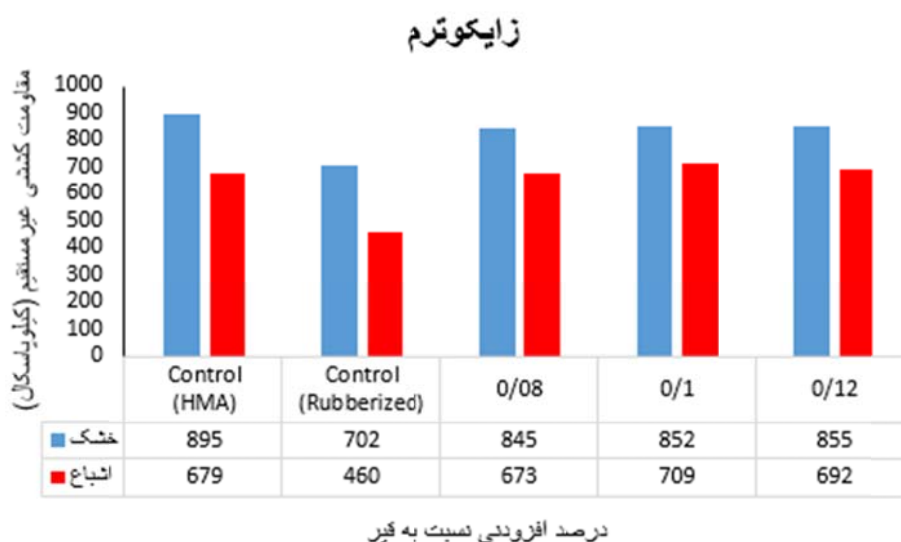
همان‌طور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، درصد قیر بهینه لاستیکی از نمونه شاهد، بدون پودر لاستیک بیشتر است.

۲-۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم (ITS)

در شکل ۴ آورده شده است.

مقاومت کششی مخلوط‌های WMA ساخته شده با افزودنی

زایکوترم و همچنین مخلوط کنترلی HMA و Rubberized



شکل ۸. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized

کاهش در حدود ۴٪ نسبت به نمونه HMA و افزایش در حدود ۲۲٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد و بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه اشباع حاوی ۰.۱ درصد افزودنی زایکوترم می‌باشد که این مقدار افزایشی در حدود ۴٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۵۴٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد.

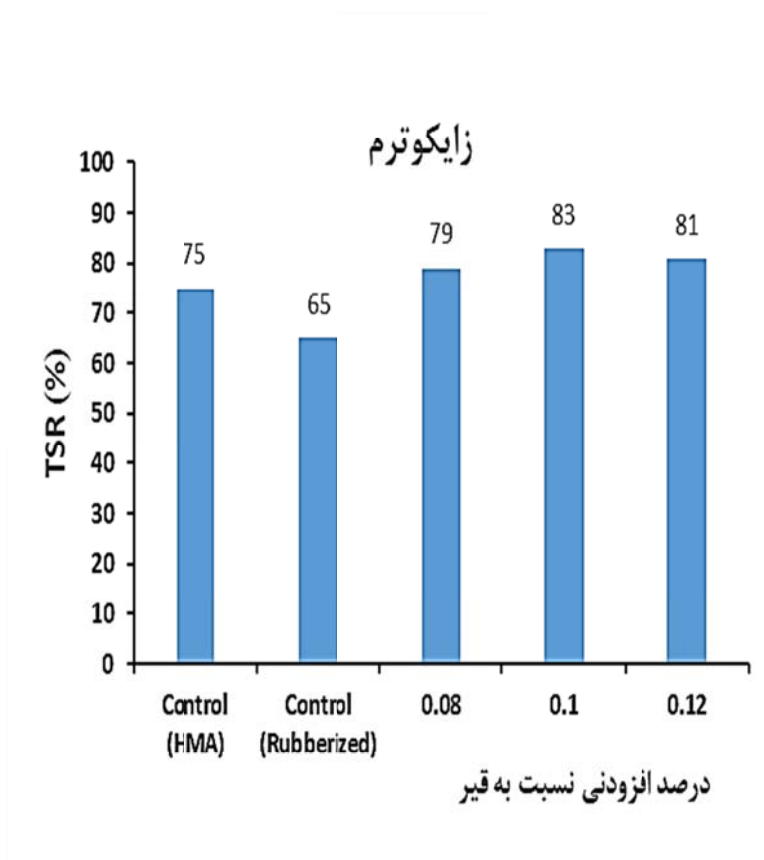
همان‌طور که دیده می‌شود با اضافه شدن درصد افزودنی زایکوترم مقاومت کششی مخلوط در حالت خشک افزایش می‌یابد که در تمامی مقادیر افزودنی زایکوترم مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه HMA و مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه Rubberized دارند.

بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه خشک حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می‌باشد که این مقدار

۳-۴- نتایج TSR

نتایج TSR در شکل ۹ نشان می‌دهد که برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی زایکوترم منتخب با ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۱۲ درصد به ترتیب افزایشی در حدود ۵٪، ۱۱٪ و ۸٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۲۲٪، ۲۸٪ و ۲۵٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. یعنی نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی درصدهای مختلف زایکوترم نسبت به نمونه HMA و Rubberized بیشتر بوده است، که دلیل آن کاهش کمتر مقاومت کششی این مخلوط در اثر رطوبت نسبت به دو مخلوط HMA و Rubberized می‌باشد. استفاده از نانو زایکوترم علاوه بر کاهش دمای اختلاط و تراکم، مقاومت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی گرم را نیز افزایش می‌دهد که دلیل

آن ترکیبات ارگانوسیلیکون موجود در این افزودنی می‌باشد. تحلیل نتایج در شکل ۹ نشان می‌دهد که در افزودنی زایکوترم حداکثر مقدار پیشرفت TSR برای مقدار ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم رخ داده است که این مقدار به ترتیب افزایشی در حدود ۱۱٪ و ۲۸٪ نسبت به نمونه HMA و Rubberized دارد و مقدار بهینه افزودنی ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم مشخص شده است. با توجه به اینکه در آیین‌نامه حد مجاز مقدار TSR، ۷۵٪ مشخص شده است و با توجه به نتایج این تحقیق در رابطه با آزمایش نسبت کشش غیرمستقیم (TSR)، تمامی نمونه‌های ساخته شده با زایکوترم در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار گرفته است.



شکل ۹. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط اصلاح‌شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized

۴-۴- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

نتایج مدول بر جهندگی مخلوط اصلاح شده با افزودنی

زایکوترم نسبت به نمونه‌های کنترلی HMA و Rubberized

در شکل ۱۰ نشان داده شده است

نتایج آزمون در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که مدول بر جهندگی

مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی زایکوترم با افزایش درصد

افزودنی افزایش می‌یابد. مدول برجهندگی برای زایکوترم منتخب

با ۰.۰۸، ۰.۱، ۰.۱۲، درصد با ترتیب افزایشی در حدود ۰.۲۴، ۰.۲۵،

و ۰.۲۶ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۰.۱۱، ۰.۱۲ و

۱۳٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. بیشترین مدول

برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم

می‌باشد که در آن مدول بر جهندگی برابر با ۴۷۸۹ می‌باشد.

۴-۵- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

نتایج خزش دینامیکی برای مخلوط اصلاح شده با افزودنی

زایکوترم نسبت به نمونه‌های کنترلی HMA و Rubberized

در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

تحلیل نتایج در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش درصد

افزودنی زایکوترم مقدار مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش

می‌یابد. عدد روانی برای زایکوترم منتخب با ۰.۰۸، ۰.۱ و ۰.۱۲

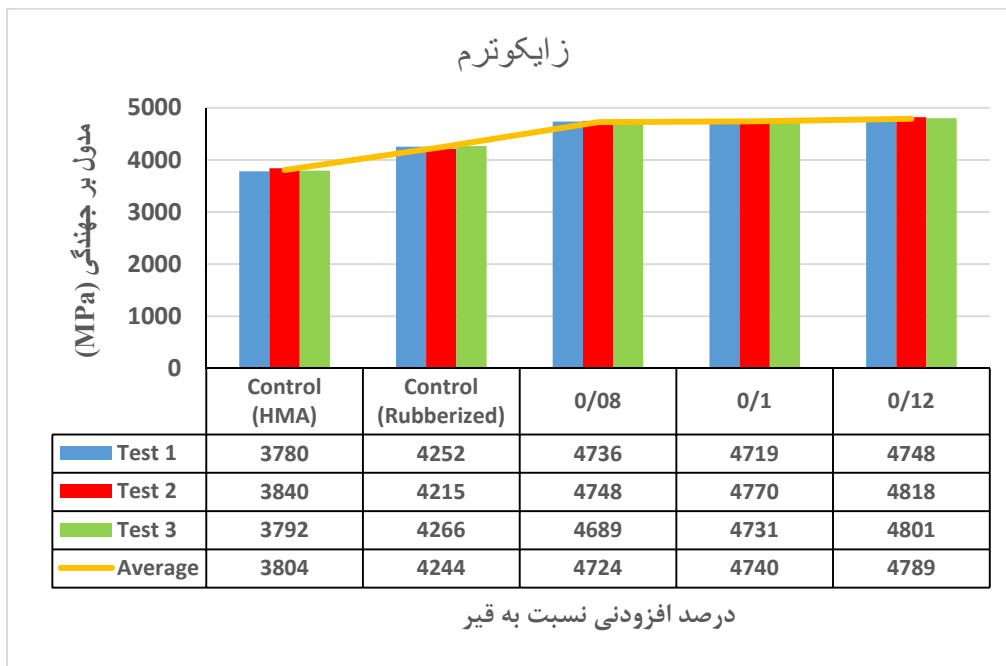
درصد به ترتیب افزایشی در حدود ۰.۸۵، ۰.۸۶ و ۰.۸۸ نسبت به

نمونه HMA و افزایشی در حدود ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ نسبت به نمونه

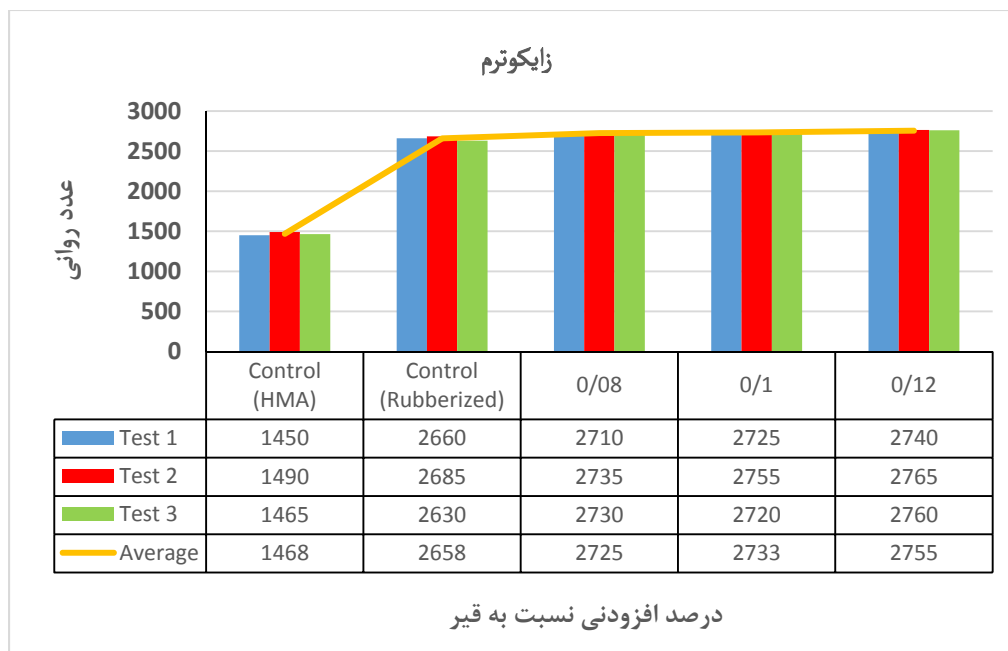
Rubberized دارد. بیشترین مقدار مقاومت در برابر شیار

شدگی مربوط به نمونه حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم

می‌باشد که در آن عدد روانی برابر با ۲۷۵۵ می‌باشد.



شکل ۱۰. مدول بر جهندگی مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized



شکل ۱۱. خزش دینامیکی مخلوط اصلاح شده با افزودنی زایکوترم و نمونه HMA و Rubberized

۵- نتیجه گیری

- در مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک مقاومت مارشال، نسبت به مخلوطهای آسفالتی بدون پودر لاستیک افزایش می یابد.

- درصد قیر بهینه مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک نسبت به مخلوطهای آسفالتی بدون پودر لاستیک افزایش می یابد.

- مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه های خشک در تمام مقادیر افزودنی زایکوترم مقاومت کششی کمتری نسبت به نمونه HMA و مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه rubberized دارند. بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه خشک حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که این مقدار کاهش در حدود ۴٪ نسبت به نمونه HMA و افزایش در حدود ۲۲٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد و بیشترین مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به نمونه اشباع حاوی ۰.۱ درصد افزودنی زایکوترم می باشد که این مقدار افزایش در حدود ۴٪ نسبت به نمونه HMA و افزایش در حدود ۵۴٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد.

- مقدار TSR را برای مخلوطهای آسفالتی حاوی زایکوترم منتخب با ۰.۰۸، ۰.۱ و ۰.۱۲ درصد نشان می دهد که به ترتیب افزایشی در حدود ۵٪، ۱۱٪ و ۸٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۲۲٪، ۲۸٪ و ۲۵٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. یعنی نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوطهای آسفالتی گرم حاوی درصدهای مختلف زایکوترم نسبت به نمونه HMA و Rubberized بیشتر بوده است، که دلیل آن کاهش کمتر مقاومت کششی این مخلوط در اثر رطوبت نسبت به دو مخلوط HMA و Rubberized می باشد.

- مدول بر جهندگی مخلوطهای آسفالتی حاوی افزودنی زایکوترم با افزایش درصد افزودنی افزایش می یابد. مدول بر جهندگی برای زایکوترم افزایشی در حدود ۲۴٪ الی ۲۶٪ نسبت به نمونه HMA و افزایشی در حدود ۱۱٪ الی ۱۳٪ نسبت به نمونه Rubberized دارد. بیشترین مدول بر جهندگی مربوط به نمونه حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می باشد.

- افزایش درصد افزودنی زایکوترم مقدار مقاومت آن در برابر شیار شدگی افزایش می یابد. عدد روانی برای زایکوترم نسبت به نمونه HMA و Rubberized افزایش یافته است. بیشترین

-F. Moreno, M. Sol, J.Mart, M. Perez, M.C. Rubio. (2013), "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation", *Materials and Design* pp.274-280.

-Fontes, L.P.T.L., Triches, G., Pais, J.C., Pereira, P.A.A. (2010), "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures", *Construction and Building Materials*, pp.1193-1200.

-H. B. Takallou and A. (1992), Sainton, "Advances in technology of asphalt paving materials containing used tire rubber," *Transportation Research Record*.

-J. W. Button, C. Estakhri, and A. Wimsatt. (2007), "A synthesis of warm mix asphalt," *Texas Transportation Institute ,Texas A & M University System*.

-Joel R.M. Oliveira, Hugo M.R.D Silva, iliana P.F. Abreu, Sara R.M. Fernandez (2013), "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperature and to improve the performance of asphalt rubber mixture", *journal od Cleaner Production*, 41, pp.15-22.

-Navarro, F. J., et al. (2004), "Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumen's." *Fuel* 83.14: pp.2041-2049.

-Palit, S. K., K. Sudhakar Reddy, and B. B. Pandey. (2004), "Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes." *Journal of materials in civil engineering* 16.1: pp.45-53.

-Yilmaz M; Vural Kok B. (2009), "The effects of using Lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt"; *J Construction and Building Materials*; 23: pp.1999-2006.

مقدار مقاومت در برابر شیار شدگی مربوط به نمونه حاوی ۰.۱۲ درصد افزودنی زایکوترم می‌باشد.

۶-مراجع

-بهلولی زنجانی، ش. (۱۳۷۴). "بررسی ویژگی‌های آسفالت لاستیکی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

-پور عباس، م.، مرندی، س. م.، جبال بارزی، م.، (۱۳۹۰). "تأثیر استفاده از قیرهای اصلاح‌شده با پودر لاستیک ضایعاتی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و افزایش عمر آسفالت".

-منصوریان.ع. (۱۳۷۶)، "بهسازی مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت"، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب.

-Chandra K. Akisety, Soon-Jae Lee, Serji N. Amirkhanian. (2009), " High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives", *Construction and Building Materials*, 23 , pp.565-573.

-D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., and Yeaton, B. (2008), "Warm-Mix Asphalt: European Practice" US Department of Transportation, 68.

-F. Moreno, M. Sol, J.Mart, M. Perez, M.C. Rubio (2013), "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt mixes to plastic deformation", *Materials and Design* pp.274-280.