

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک و گوگرد با پوشش پلیمری

اکبر دانش، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

علی اصغر اکبری نسرکانی (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران،

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدحسن سراجی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ساسان افلاکی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Email: al.as.akbari@alumni.ut.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۱۱

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۷

چکیده

اصلاح قیر با هدف نزدیک کردن رفتار رئولوژیک قیر خالص به رفتار قیر ایده آل با استفاده از اصلاح‌کننده‌های مختلف انجام می‌شود. اما نکته‌ای که باید مد نظر داشت آن است که مخلوط آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح‌شده نیز بایستی عملکرد مناسبی داشته باشد. همچنین بهتر است از مواد سازگار با محیط زیست و با قیمت مناسب برای اصلاح قیر استفاده شود. در این تحقیق، قیرهای اصلاح شده با پودرلاستیک و گوگرد با پوشش پلیمری با استفاده از همزن با نرخ برش بالا تهیه شد و پس از ساخت مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده مطابق با روش سوپریپو، آزمایش‌های مدول دینامیکی و خزش دینامیکی بر روی آن‌ها صورت پذیرفت تا خصوصیات مکانیکی و عملکردی آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با استفاده از نتایج آزمایش مدول دینامیکی در فرکانس‌ها و دماهای مختلف، منحنی جامع مدول دینامیکی رسم شد و خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی مشخص گردید. نتایج این آزمایش نشان داد که در دماهای بالا (فرکانس‌های پایین) مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با ۴۰ درصد گوگرد با پوشش پلیمری بیشترین مقدار مدول دینامیکی را دارد. سپس مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با ۲۰ درصد پودرلاستیک از مدول دینامیکی بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد برخوردار است. همچنین نتایج آزمایش خزش دینامیکی در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد نشان داد که مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پوشانده شده با پلیمر بیشترین مقاومت را در برابر خرابی شیارشدگی داراست و پس از آن، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک در برابر شیارشدگی و ایجاد تغییرشکل‌های ماندگار، مقاوم است.

واژه‌های کلیدی: پودرلاستیک، خزش دینامیکی، گوگرد با پوشش پلیمری، مخلوط آسفالتی اصلاح شده، مدول دینامیکی

۱. مقدمه

مخلوط آسفالتی اصلاح نشده است. در ادامه در این مقاله به منظور اختصار، از واژه گوگرد پلیمری به جای گوگرد با پوشش پلیمری استفاده می‌شود.

۲. مروری بر ادبیات موضوع

۱-۲ پودرلاستیک و گوگرد پلیمری

پودرلاستیک از سال ۱۹۳۰ به عنوان افزودنی در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته است [Guide, 2003]. اصلاح‌کننده پودرلاستیک به عنوان ماده‌ای برای بهبود ویژگی‌های مخلوط آسفالتی مثل حساسیت برودتی، رفتار الاستیک و مقاومت در برابر ترک خستگی شناخته می‌شود [Kök and Çolak, 2011]. با توجه به افزایش خودروها و به تبع آن افزایش لاستیک ضایعاتی و عدم برنامه‌ای مشخص برای بازیافت آن‌ها، استفاده از پودرلاستیک در آسفالت می‌تواند به بهبود وضعیت محیط زیست نیز کمک کند. ناوارو و همکاران با افزودن ۹ درصد پودرلاستیک به قیر مشاهده کردند که هم مدول ویسکوالاستیک قیر و هم گرانروی آن در دماهای بالا افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که افزودن پودرلاستیک به مخلوط آسفالتی باعث بهبود ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری مخلوط شده و درصد پودرلاستیک اضافه شده تأثیر مهمی در روند بهبود مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل و ترک خستگی دارد [Navarro et al. 2004]. ژیاو و همکاران نتیجه گرفتند که افزودن پودرلاستیک موجب افزایش VMA^v در طراحی سوپریپو شده و مقاومت مخلوط در برابر شیارشدگی را بدون توجه به اندازه و نوع پودرلاستیک بهبود می‌بخشد [Xiao et al. 2009]. البور نیز در تحقیق خود بر روی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک افزایش عمر خستگی، کاهش ترک‌های برودتی، کاهش ترک‌های انعکاسی و افزایش مقاومت کششی را در مقایسه با آسفالت بدون افزودنی مشاهده کرد [Oliver, 2000]. در چندین تحقیق دیگر نیز نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد مخلوط

امروزه با افزایش حجم ترافیک و افزایش تردد وسایل نقلیه سنگین، مخلوط آسفالتی تحت تنش‌های بالایی قرار می‌گیرد. به دلیل ویژگی‌های ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی، رفتار مکانیکی آن وابسته به دما و شرایط محیطی است. در حقیقت با افزایش دما گرانروی آن کاسته شده و قیر مخلوط شروع به نرم شدن می‌کند و از طرف دیگر رفتار پلاستیسته در آن تأثیر می‌گذارد و در نتیجه مخلوط در برابر تغییر شکل دائمی حساس‌تر می‌شود که نتیجه آن شیارشدگی ناشی از عبور وسایل نقلیه است. در دماهای پایین نیز با افزایش گرانروی قیر و سخت‌تر شدن آن در مخلوط ترک‌های برودتی شکل می‌گیرد. در واقع شیارشدگی در دماهای بالا و ترک‌های برودتی در دماهای پایین از جمله خرابی‌های متداول مخلوط آسفالتی می‌باشند [Kim, 2008]. یکی از راه‌های جلوگیری از بروز این خرابی‌ها، استفاده از افزودنی جهت اصلاح خواص رفتاری قیر و افزایش مقاومت آن نسبت به شکل‌گیری سازوکارهای خرابی است. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای بهبود ویژگی‌های رفتاری قیر انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که اصلاح‌کننده‌ها می‌توانند مقاومت مخلوط را در برابر ترک‌های برودتی، ترک‌های خستگی و تغییر شکل دائمی افزایش دهند. در نتیجه اصلاح‌کننده‌ها عملکرد آسفالت را در برابر دمای محیط (دمای بالا، متوسط و پایین) بهبود می‌بخشند [Khattak and Baladi, 2001]. اصلاح‌کننده‌های زیادی مانند پلیمرها (SBS، SBR، EVA و PP.A)، پودرلاستیک (CR)، گوگرد و گیلسونایت^۶ به عنوان اصلاح‌کننده آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرند [Aflaki and Tabatabaee, 2009]. در این پژوهش هدف، مقایسه ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی مانند مدول دینامیکی و خزش دینامیکی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک و گوگرد با پوشش پلیمری نسبت به

تیم و همکاران نیز ظرفیت سازه‌ای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. [Timm et al. 2009]. استریکلند و همکاران به این نتیجه رسیدند که مخلوط-های آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری ۵ درصد عمر خستگی کمتری نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی دارند [Strickland et al. 2008] در حالی که دم و کندی افزایش عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری را گزارش کردند [Deme and Kennedy, 2004]. حساسیت رطوبتی نیز یکی دیگر از عواملی است که با افزودن گوگرد پلیمری تغییر می‌کند. استریکلند و همکاران ۱۰ درصد کاهش در نسبت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری نسبت به مخلوط آسفالتی معمولی مشاهده کردند.

۲-۲ آزمایش مدول دینامیکی

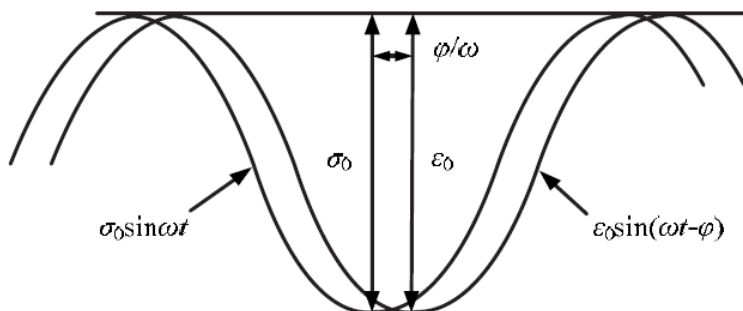
امروزه طراحی روسازی به سمت طراحی مکانیستیک-تجربی (MEPDG^۱) در حال حرکت است که هدف آن تولید روسازی با طول عمر بیشتر و رسیدن به حداکثر عملکرد مخلوط در طول عمر آن و در نتیجه کاهش هزینه‌ها است [Yu and Shen, 2012]. مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی ($|E^*|$)، که نشان‌دهنده ویژگی‌های سختی مخلوط در دماها و فرکانس‌های بارگذاری متفاوت نیز است، در طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی و فرآیند تجزیه و تحلیل آن به عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد استفاده قرار می‌گیرد [Cho, Park and Hwang, 2010]. مدول دینامیکی مصالح ویسکوالاستیک مانند مخلوط آسفالتی، رابطه بین تنش- کرنش تحت بارگذاری پیوسته سینوسی در یک دامنه فرکانسی مشخص، تعریف می‌شود. مدول دینامیکی همانطور که در رابطه (۱) نشان داده شده است، نسبت حداکثر تنش سینوسی (در هر زمان و هر فرکانس بارگذاری) به مقدار حداکثر کرنش سینوسی ایجاد شده (در همان زمان و فرکانس) است

آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک هستند [Lalwani, Abushihada and halasa, 1982, McGennis, 1995, Bahia and Davies, 1994]

یکی دیگر از مواد اصلاح‌کننده قیر، گوگرد است. ترکیبات گوگرد نوعی پسماند در فرآیند استخراج و پالایش نفت خام و گاز طبیعی به شمار می‌روند. ذخیره‌سازی و انتقال گوگرد از مشکلات پالایشگاه‌ها و معضلات مهم زیست محیطی است زیرا علاوه بر آلاینده‌گی، میزان گوگرد تولیدشده بیش از مقدار مورد نیاز برای مصرف بوده و برای سایر مصارف می‌بایست به نقاط دور دست حمل شود که این عمل فاقد توجیه اقتصادی است. استفاده از گوگرد در مخلوط آسفالتی گازهایی متصاعد می‌کند که برای کارگران ناخوشایند است و محیط زیست را آلوده می‌کند. تحقیقات مختلفی در جهت کنترل آلاینده‌گی گوگرد در مصارف راهسازی صورت گرفته است. فرآوری گوگرد با پلیمر و برخی از افزودنی-های جاذب گازهای آلاینده متصاعد شده از گوگرد در دماهای بالا، یکی از راه‌های کنترل آلاینده‌گی گوگرد است. به عنوان جایگزین گوگرد مایع داغ، اصلاح‌کننده قیر گوگردی توسعه‌یافته که به نام تایوپو^۲ نیز شناخته می‌شود توسط شرکت شل^۳ ساخته شد [Strickland et al. 2008]. تحقیقات نشان می‌دهد که این گوگرد پلیمری قادر است عملکرد مخلوط آسفالتی را بهبود بخشد. همچنین، هزینه‌های ساخت روسازی، دمای تولید و مخاطرات زیست محیطی را کاهش می‌دهد. گلوله‌های کوچک گوگرد پلیمری در قیر داغ ذوب شده و به خوبی در آن پخش می‌شوند. حداقل دمای مورد نیاز برای ذوب شدن گوگرد پلیمری ۱۲۰ درجه سانتیگراد و دمای بهینه برای ذوب شدن آن ۱۴۰ درجه سانتیگراد است و در صورتی که دما از ۱۴۵ درجه سانتیگراد عبور کند، باز هم آلودگی‌ها و مخاطرات برای کارگران و محیط زیست وجود خواهد داشت [Timm et al. 2009].

[Witczak and Bari, 2004]. شکل ۱ منحنی بارگذاری

سینوسی و کرنش اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. منحنی بارگذاری سینوسی و کرنش پاسخ آن [Zhu et al. 2011]

رفتار مخلوط‌های آسفالتی به میزان دما و نرخ بارگذاری در طول آزمایش بستگی دارد، بنابراین آزمایش مدول دینامیکی در دماها و فرکانس‌های مختلف بارگذاری، انجام می‌شود. سپس جهت مقایسه مقادیر مدول دینامیکی مخلوط‌های مختلف، نتایج در یک نمودار به نام منحنی جامع رسم می‌شوند.

بر این اساس مدول دینامیکی نمونه‌ها در دماهای مختلف و فرکانس‌های متفاوت، مطابق شکل ۲ بر روی نمودار رسم می‌شوند. سپس نتایج در دماهای مختلف نسبت به زمان بارگذاری و یک دمای مرجع انتقال می‌یابند. ضریب انتقال^{۱۲} که برای انتقال داده‌ها در نمودار برای تشکیل یک منحنی واحد به نام منحنی جامع استفاده می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید [Zhu et al. 2011]:

$$a(T) = \frac{f_r}{f} \quad (2)$$

که در این رابطه، T دما، f فرکانس بارگذاری در دمای دلخواه که بیانگر سرعت بارگذاری است، f_r فرکانس کاهش یافته^{۱۳} در دمای مرجع و $a(T)$ ضریب انتقال به عنوان تابعی از دما، است. به منظور دقت بیشتر، از یک رابطه چندجمله‌ای درجه دوم بین لگاریتم ضریب انتقال یعنی $\log a(T)$ و دما استفاده می‌شود که این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\log a(T) = aT^2 + bT + c \quad (3)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

که در این رابطه:

σ_0 : حداکثر تنش دینامیکی

ϵ_0 : حداکثر کرنش دینامیکی

مدول دینامیکی همچنین جهت پیش‌بینی رفتار روسازی کاربرد دارد، زیرا نشان دهنده کرنش و جابجایی روسازی تحت بارگذاری در شرایط مختلف دمایی و فرکانسی است [Witczak and Bari, 2004]. آزمایش مدول دینامیکی یک آزمایش غیر مخرب است که محققین مختلف آن را با شرایط و روش‌های مختلف انجام داده‌اند [Witczak et al. (2002), Witczak and Bari, (2004)]. اما روش انجام آن به صورت استاندارد در ASTM D3497 و AASHTO TP62 سال ۲۰۰۳ ارائه شد. استاندارد ASTM D3497 در سال ۲۰۰۹ بدون ارائه جایگزین، از لیست استانداردهای ASTM حذف گردید. اما استاندارد آزمایش مدول دینامیکی آشتو ویرایش و تکمیل شد و در سال ۲۰۱۱ با شماره T342 ارائه شد. بنابراین، آزمایش مدول دینامیکی در این پژوهش مطابق با آخرین ویرایش استاندارد AASHTO T342 انجام می‌شود.

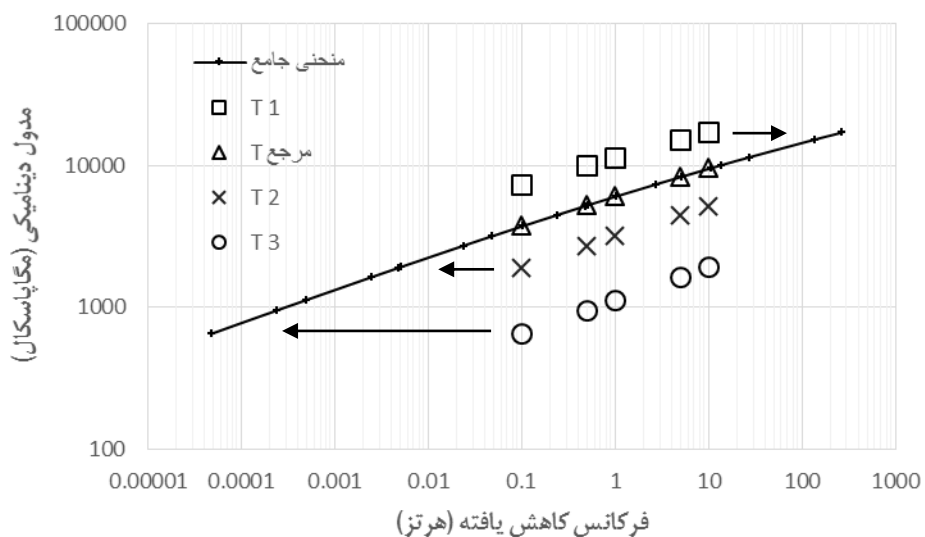
۲-۲-۱ منحنی جامع^{۱۱} مدول دینامیکی

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...

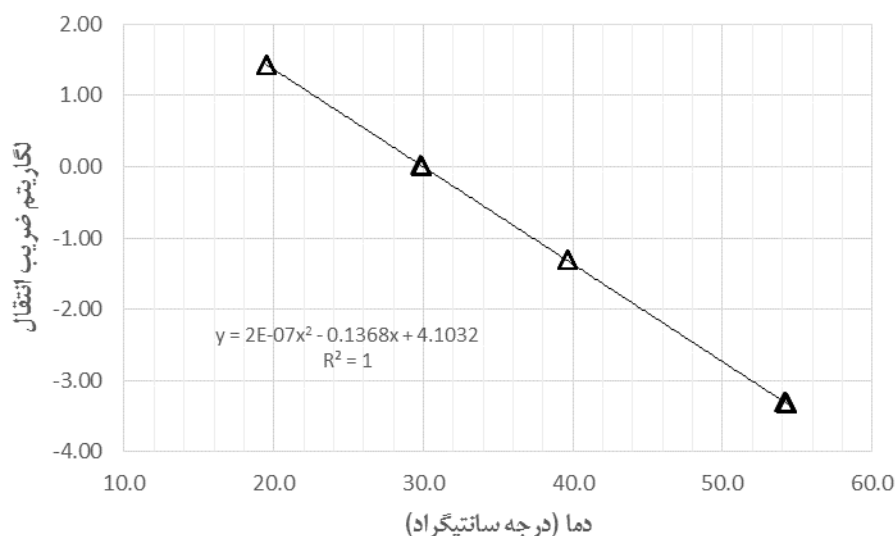
$$\delta \log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log f_r)}} \quad (4)$$

در این رابطه، $|E^*|$ مدول دینامیکی آسفالت، δ مقدار حداقل مدول دینامیکی، $\delta + \alpha$ مقدار حداکثر مدول دینامیکی، γ و β متغیرهای رابطه و f_r فرکانس کاهش یافته، است. لازم به ذکر است که این رابطه، به مدل ویتزاک برای تعیین مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی معروف است.

در این رابطه، T دمای مورد نظر و ضرایب a ، b و c پارامترهای معادله هستند که از برازش حاصل می‌شوند. شکل ۳ نمونه ای از این برازش را نشان می‌دهد. پس از آن که انتقال داده‌ها بر مبنای یک دمای مرجع انجام شد، می‌توان از طریق رابطه ۴، منحنی جامع را بر داده‌ها برازش داد و از آن طریق متغیرهای رابطه را با استفاده از روش حداقل مربعات به دست آورد و مدول دینامیکی آسفالت را برای دیگر فرکانس‌های بارگذاری که امکان انجام آزمایش برای چنین فرکانس‌هایی وجود ندارد، نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه نمود [Zhu et al 2011].



شکل ۲. نمونه نتایج آزمایش مدول دینامیکی در دماهای مختلف و نحوه رسم منحنی جامع



شکل ۳. لگاریتم ضریب انتقال به صورت تابعی درجه دوم از دما

۳-۲ آزمایش خزش دینامیکی

شیارشدهگی یکی از خرابی‌های عملکردی رایج در روسازی‌های انعطاف پذیر است. شیارشدهگی در واقع تغییر شکل دائمی تجمعی در هر لایه روسازی تحت بارگذاری مداوم ترافیک تعریف می‌شود، که شیارشدهگی لایه آسفالتی مهم‌ترین تأثیر را در مقدار شیارشدهگی کل روسازی دارد [Khodaii and Mehrara, 2009]. آزمایش‌های متعددی برای تعیین پتانسیل شیارشدهگی مخلوط‌های آسفالتی از جمله خزش استاتیکی، خزش دینامیکی و ویل‌ترک^{۱۵} استفاده می‌شوند. از میان آزمایش‌های ذکر شده، آزمایش خزش دینامیکی یکی از بهترین روش‌ها برای سنجش مقاومت مخلوط-های آسفالتی در برابر شیارشدهگی است که در این پژوهش از آن برای مقایسه مقاومت مخلوط‌های آسفالتی مختلف استفاده می‌شود. این آزمایش که با اعمال تنش محوری تکراری به نمونه‌ی آسفالتی و اندازه‌گیری مقادیر تغییر شکل‌ها توسط کرنش‌سنج‌ها (LVDTs) در اثر اعمال بار مذکور انجام می‌شود، توسط مانیس‌میت و همکاران برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ ارائه شد [Monismith, Ogawa and Freeme, 1975]. آزمایش خزش دینامیکی خروجی‌های

متعددی دارد که می‌توانند برای سنجش میزان پتانسیل شیارشدهگی مخلوط‌های آسفالتی به کار روند. به عنوان مثال آیری، کرنش نهایی و کرنش متوسط را برای تعیین مقاومت مخلوط در برابر شیارشدهگی استفاده نمود، که پارامتر اول به مراتب بهتر و قابل اعتمادتر از پارامتر دوم برای تخمین میزان پتانسیل شیارشدهگی به شمار می‌رود [Airey, 2004]. کلوش اما پارامتر دیگری به نام عدد جریان^{۱۶} را برای مقایسه مقاومت شیارشدهگی مخلوط‌های آسفالتی به کار برد. این پارامتر از طریق نمودار خزش، که کرنش پلاستیک تجمعی در مقابل تعداد سیکل بارگذاری است، به دست می‌آید [Kaloush et al. 2002]. این نمودار که از انجام آزمایش خزش به دست می‌آید، به سه بخش مختلف قابل تقسیم است. این سه بخش که کرنش برگشت‌ناپذیر مخلوط آسفالتی هستند عبارتند از:

- ۱- ناحیه اول، که نرخ کرنش رفته رفته کاهش می‌یابد. این بخش عمدتاً با تغییر حجم مخلوط همراه است؛

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...

مدل‌های قانون توانی بر اساس مدل مانیسیمیت در سال ۱۹۷۵ و مدل‌های سینگ و لیتون در سال ۱۹۸۹ اشاره کرد [Khodaii and Mehrara, 2009]. آزمایش خزش دینامیکی در این پژوهش مطابق با AASHTO TP79 انجام می‌شود.

۳. مواد و روش‌ها

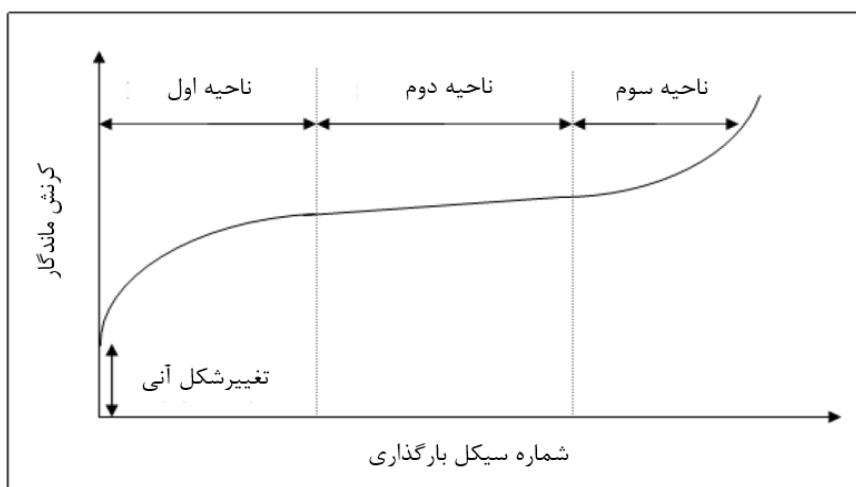
۳-۱ انتخاب مصالح

سنگدانه‌های مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها از مصالح حاصل از معدن کوهی تهیه شد. جنس سنگدانه‌ها از نوع آهکی دولومیتی بوده و محدوده دانه بندی آن بر اساس آیین‌نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) صورت گرفت، شکل ۵ منحنی دانه‌بندی مصالح مخلوط‌های آسفالتی را در این پژوهش نشان می‌دهد.

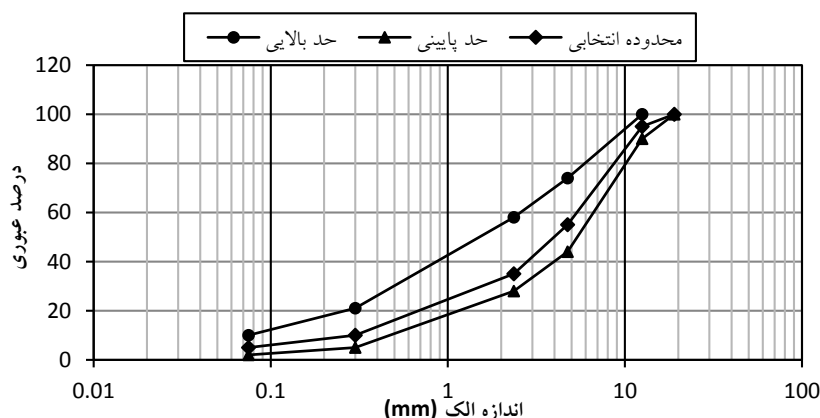
۲- ناحیه دوم، که در آن نرخ کرنش برای مدتی ثابت می‌ماند. در این بخش تغییرحجم وجود دارد و تغییرشکل برشی مخلوط با نرخ فزاینده‌ای در حال افزایش است؛

۳- ناحیه سوم، که نرخ کرنش دائماً در حال افزایش است تا زمانی که شکست ماده رخ دهد. در این بخش بدون آن‌که تغییرحجمی در ماده رخ دهد، کلیه تغییرشکل‌ها از نوع پلاستیک است. هر سه ناحیه در شکل ۴ مشخص شده است [Uzarowski, 2007].

برای برآزش منحنی خزش با یک مدل مناسب، تاکنون مدل‌های مختلفی ارائه شده است. از جمله مدل نیم‌لگاریتمی بارکسدیل که توسط ژو و همکاران در سال ۱۹۷۲ ارائه شد. همچنین می‌توان به



شکل ۴. نواحی تغییرشکل ایجادشده در مخلوط آسفالتی تحت آزمایش خزش [Uzarowski, 2007]



شکل ۵. دانه بندی سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی استفاده شده در پژوهش

جدول ۱. مشخصات قیر پایه و اصلاح شده با گوگرد پلیمری

نتیجه آزمایش			
آزمایش‌های قیر	استاندارد آزمایش	قیر پایه	قیر اصلاح شده
درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	۶۰	۹۴
نقطه نرمی ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D36	۵۳	۴۸
وزن مخصوص (gr/cm^3)	ASTM D70	۱/۰۱۲	۱/۲۵۱
درجه اشتعال ($^{\circ}\text{C}$)	ASTM D92	۳۰۹	۲۰۱
درصد افت وزنی	ASTM D1754	۰/۰۲	۰/۹۱
خاصیت شکل‌پذیری (cm)	ASTM D113	> ۱۴۰	۲۴

قیر پایه مصرفی برای تهیه نمونه‌ها، قیر ۶۰-۷۰ تولید شرکت نفت پاسارگاد است که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. برای اصلاح قیر از دو ماده پودر لاستیک و گوگرد پلیمری استفاده شده است که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها به ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. همچنین مشخصات قیر اصلاح شده با گوگرد پلیمری نیز در جدول ۱ ارائه شده است. پودر لاستیک مصرفی برای اصلاح قیر، عبوری از الک شماره ۸ می‌باشد که از خرد کردن لاستیک فرسوده کامیون در دمای محیط به دست آمده است. منابع مختلفی مقدار ۲۰ درصد را مناسب‌ترین درصد برای افزودنی پودر لاستیک ذکر کرده‌اند بنابراین در این پژوهش نیز از این درصد برای اصلاح قیر استفاده شد [Wang et al. 2013, Guide, 2003].

مصرفی برای اصلاح قیر، عبوری از الک شماره ۸ می‌باشد که از خرد کردن لاستیک فرسوده کامیون در دمای محیط به دست آمده است. منابع مختلفی مقدار ۲۰ درصد را مناسب‌ترین درصد برای افزودنی پودر لاستیک ذکر کرده‌اند بنابراین در این پژوهش نیز از این درصد برای اصلاح قیر استفاده شد [Wang et al. 2013, Guide, 2003].

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پودرلاستیک

ویژگی	خصوصیت	نتیجه آزمایش (%)
ویژگی فیزیکی	رطوبت	۰/۴۵
	وزن مخصوص	۱/۱۱ - ۱/۱۵
ویژگی شیمیایی	استن	۱۹ ± ۲
	حداکثر خاکستر	۱۵
	میزان هیدروکربن‌های لاستیکی	۴۸ ± ۲

جدول ۳. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی گوگرد پلیمری

ویژگی	خصوصیت	نتیجه آزمایش
ویژگی فیزیکی	رنگ	خاکستری
	وضعیت ظاهری	دانه‌های گرد
	وزن مخصوص	۱/۱۷۵
	دمای ذوب (°C)	۹۵ - ۱۱۰
ویژگی شیمیایی (درصد عناصر تشکیل دهنده)	گوگرد	۹۱
	منواتیلن	۰/۵
	ایزوپروپیل بوتانول	۰/۲۵
	ادیتوپلیمرآزاسیون	۶
	گیلسونایت	۲
	رنگ	۰/۲۵

۲-۳ ساخت نمونه‌ها

پودرلاستیک جایگزین شد. اختلاط قیر و پودرلاستیک در دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴۰ دقیقه با سرعت ۵۵۰۰ دور در دقیقه با دستگاه همزن با دور بالا انجام شد، به طوری که ذرات پودرلاستیک به اندازه کافی متورم و منبسط شده باشند. برای اصلاح قیر با گوگرد پلیمری نیز ۴۰ درصد وزن قیر با گوگرد پلیمری جایگزین شد. به دلیل نقطه اشتعال پایین گوگرد، اختلاط

ابتدا برای تعیین درصد قیر بهینه آزمایش تعیین حداکثر وزن مخصوص نظری مخلوط‌های آسفالتی طبق ASTM D2041 انجام شد. سپس با استفاده از روش طرح اختلاط سوپرپیو مقدار قیر بهینه برای دانه‌بندی مورد نظر ۵/۳ درصد به دست آمد. درصد هوای نمونه‌ها پس از تراکم ۰/۵ ± ۴ درصد حاصل شد. سپس برای اصلاح قیر با پودرلاستیک، مقدار ۲۰ درصد وزن قیر با

D6925 متراکم شدند. نمونه‌های ساخته شده، دارای ابعاد ۱۰۰ میلی‌متر قطر و ۱۵۰ میلی‌متر ارتفاع هستند که این ابعاد، تقریباً به ۲۶۰۰ گرم مصالح آسفالتی نیاز دارد. در این پژوهش از هر نوع مخلوط آسفالتی سه نمونه جهت بررسی تکرارپذیری نتایج ساخته شد و سپس مقادیر میانگین این سه نمونه برای بررسی مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات حجمی میانگین مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده در جدول ۴ آمده است.

قیر با گوگرد پلیمری در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد و اختلاط تا زمانی که رنگ قیر توسط گوگرد کامل عوض شده و به رنگ قهوه‌ای تبدیل شود ادامه یافت.

پس از تهیه مصالح سنگی و قیر اصلاح‌شده به مقدار مورد نیاز، اختلاط در دمای ۱۵۵ تا ۱۶۵ درجه سانتیگراد انجام شد و سپس نمونه‌ها به وسیله دستگاه تراکم ژیراتوری در شرایط استاندارد فشار ۶۰۰ کیلو پاسکال و با نرخ دوران ۳۰ دور در دقیقه با زاویه چرخش

۱/۲۵ درجه نسبت به محور قائم، طبق استاندارد ASTM

جدول ۴. مشخصات حجمی میانگین مخلوط‌های آسفالتی

VFA (%)	VMA (%)	V _a (%)	G _{mb}	G _{mm}	مشخصات مخلوط آسفالتی
۷۴/۹	۱۶/۰	۴/۰۲	۲/۳۴۶	۲/۴۴۵	مخلوط آسفالتی شاهد
۷۴/۷	۱۶/۰	۴/۰۵	۲/۳۴۸	۲/۴۴۷	مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک
۷۱/۰	۱۳/۹	۴/۰۳	۲/۴۰۶	۲/۵۰۷	مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری

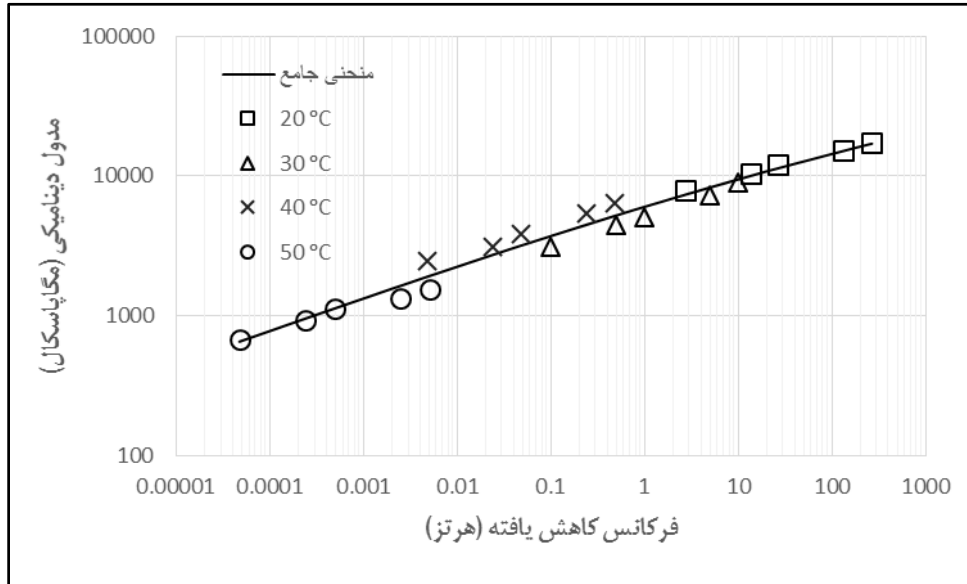
در ادامه پارامترهای مدل ویتزاک ارائه شده در رابطه (۴)، با استفاده از برنامه‌ی سالور^{۱۷} موجود در نرم افزار اکسل تعیین شده و منحنی جامع مدول دینامیکی رسم می‌گردد. روند کار برای مخلوط‌های آسفالتی شاهد و اصلاح‌شده با پودر لاستیک نیز به همین صورت است. در شکل ۷ نمودار لگاریتم ضرایب انتقال در برابر دما برای تمامی مخلوط‌های آسفالتی رسم شده است. همان طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، به طور کلی مقادیر مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش دما و یا کاهش فرکانس، کاهش می‌یابد و از سوی دیگر مقادیر مدول دینامیکی با کاهش دما و یا افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد.

۴. ارائه نتایج

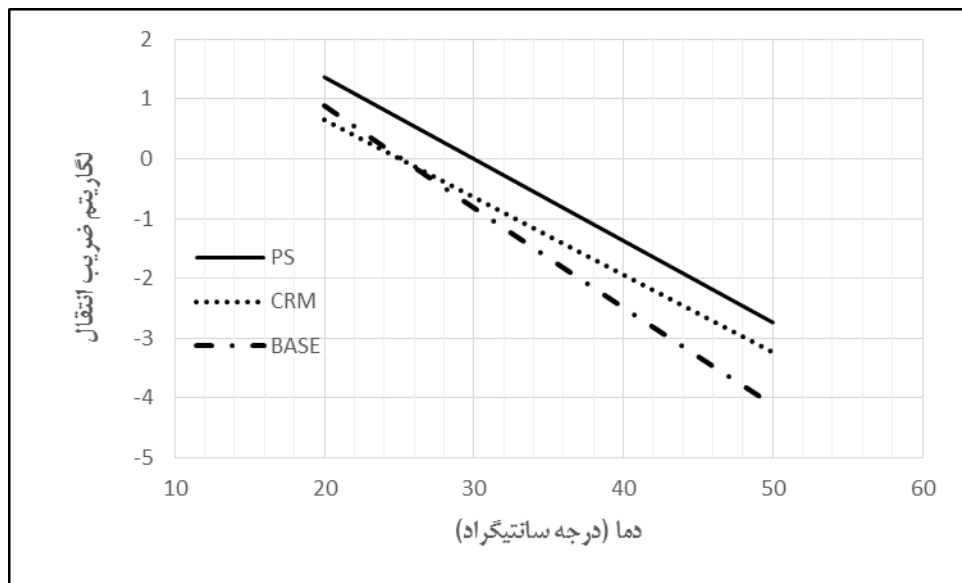
۴-۱ منحنی جامع

شکل ۶ نمودار منحنی جامع مدول دینامیکی یعنی نمودار مدول دینامیکی در برابر فرکانس کاهش یافته را برای مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری نشان می‌دهد. برای رسم منحنی جامع مدول دینامیکی، داده‌ها در دماهای مختلف نسبت به یک دمای مرجع، انتقال می‌یابند. برای انجام این کار در هر یک از دماها یک ضریب انتقال با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید. سپس بر این ضرایب انتقال، مطابق با رابطه (۳) یک چندجمله‌ای درجه دوم برازش می‌شود تا ضریب انتقال در هر دمای دلخواه به دست آید.

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...



شکل ۶. مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ۴۰ درصد گوگرد پلیمری در دماهای مختلف و رسم منحنی جامع



شکل ۷. نمودار لگاریتم ضریب انتقال بر حسب دما برای مخلوط‌های مختلف پس از برازش بر چند جمله‌ای درجه دوم (منظور از PS و CRM به ترتیب مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری و پودر لاستیک است)

۴-۲ تأثیر افزودنی‌ها بر مدول دینامیکی

شکل ۸ و ۹ منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف را در فضای نیمه لگاریتمی و لگاریتمی نشان می‌دهد. بتن آسفالتی مطلوب، آن است که در دماهای پایین مدول دینامیکی کمتری داشته باشد، یعنی نرم‌تر باشد تا پتانسیل ترک خوردن آن کاهش یابد و از سوی دیگر در دماهای بالا مقدار مدول بیشتری داشته باشد، یعنی سفت‌تر باشد تا در برابر شیارشدگی مقاوم باشد [Kim, 2008].

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در فرکانس‌های بالا (دماهای پایین)، منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری نسبت به مخلوط شاهد، افزایش می‌یابد، ولی مقدار مدول مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک نسبت به مخلوط شاهد به طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، قیر اصلاح‌شده با پودرلاستیک، مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین را افزایش می‌دهد، ولی قیر اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری به دلیل افزایش سختی، پتانسیل ترک خوردن بتن آسفالتی در دماهای پایین را نسبت به مخلوط شاهد افزایش می‌دهد.

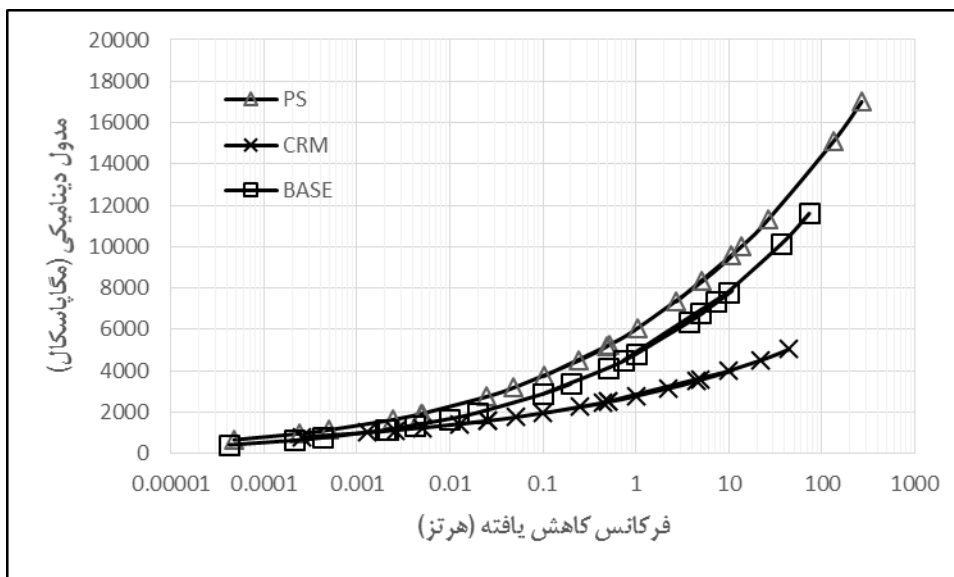
در فرکانس‌های پایین (دماهای بالا) مطابق با شکل ۹ مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک از مخلوط شاهد بیشتر است و مدول مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری از هر دو مخلوط دیگر بیشتر است. بنابراین، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری از سایر مخلوط‌ها سخت‌تر بوده و بیشترین مقاومت را در برابر شیارشدگی دارد. پس از آن، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک در برابر شیارشدگی

مقاوم است و در نهایت مخلوط آسفالتی شاهد کمترین مقاومت را در برابر خرابی شیارشدگی دارد. این به آن معنی است که اصلاح قیر با این دو افزودنی برای مناطق گرمسیر و یا مناطق دارای ترافیک با سرعت پایین می‌تواند بسیار مناسب باشد.

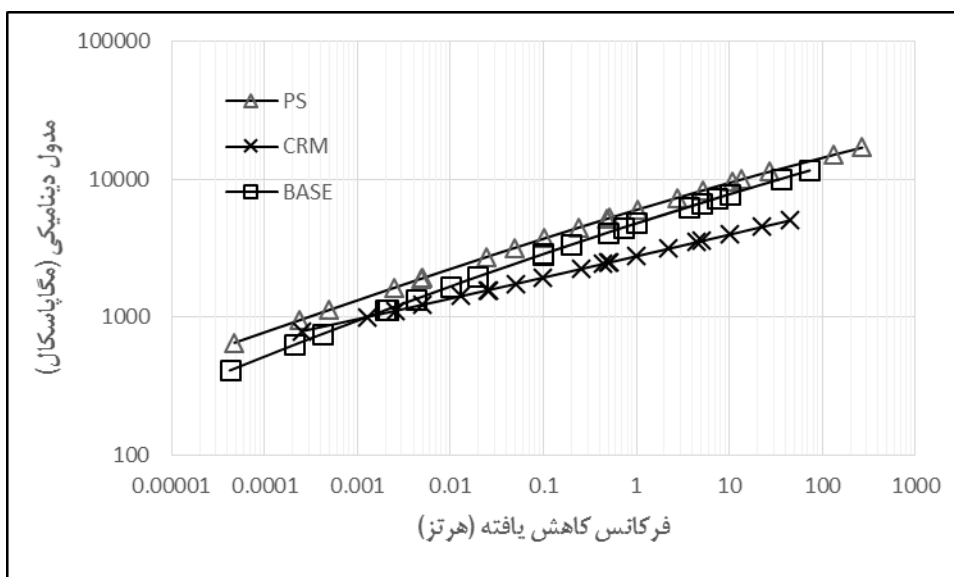
در دماهای پایین ذرات پودرلاستیک نسبت به قیر، نرم هستند و سختی کمتری از قیر دارند و این باعث می‌شود سختی کل مخلوط کاهش یابد. بنابراین در دماهای پایین مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک از مخلوط آسفالتی شاهد کمتر می‌شود. اما در دماهای بالا قیر بسیار نرم شده و سختی ذرات پودرلاستیک از قیر بیشتر می‌شود و این امر باعث می‌شود سختی کل مخلوط افزایش یابد. بنابراین در دماهای بالا مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک از مخلوط آسفالتی شاهد بیشتر می‌شود. این مسأله باعث می‌شود مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک نیز از مخلوط آسفالتی شاهد بیشتر شود. پیوندهای بین قیر گوگردی و سنگدانه‌ها نیز پیوندی بر اساس کریستال‌های گوگرد بوده که بسیار محکم و صلب بوده و باعث می‌شود مدول مخلوط به طور کلی افزایش پیدا کند.

بنابراین در یک نگاه کلی می‌توان گفت اصلاح قیر با پودرلاستیک، عملکرد مخلوط آسفالتی در همه دماها را بهبود می‌بخشد و به عنوان یک اصلاح‌کننده بسیار مناسب در صنعت راهسازی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اصلاح قیر با گوگرد پلیمری نیز عملکرد مخلوط آسفالتی در دماهای بالا را بهبود می‌بخشد و برای راه‌های با آمد و شد با سرعت کم و روسازی‌های مناطق گرمسیر بسیار مناسب است.

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...



شکل ۸. منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در فضای نیمه لگاریتمی

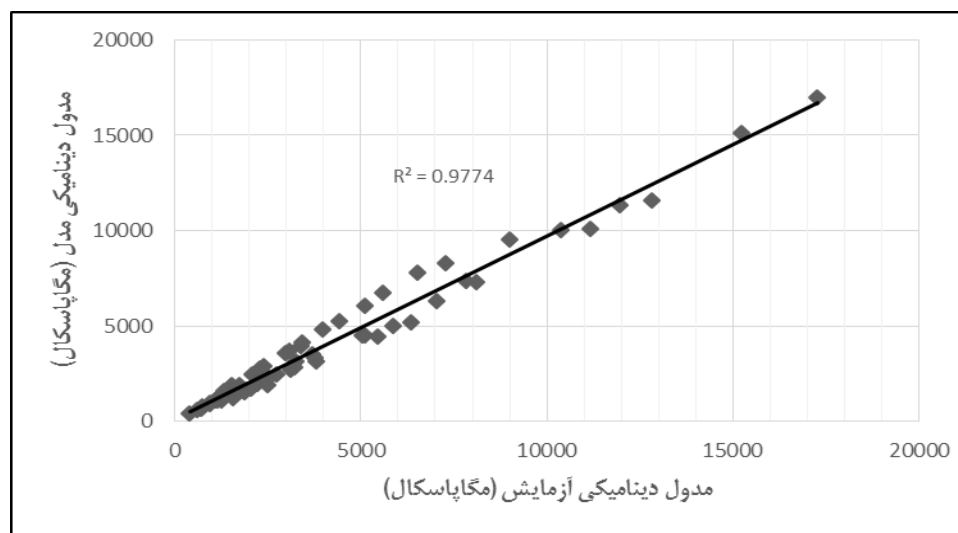


شکل ۹. منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی مختلف در فضای لگاریتمی

۳-۴ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل ویتزاک

می‌شود، نتایج حاصل از مدل، تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند و مقادیر بر روی خط همانی قرار گرفته‌اند. این امر نشان دهنده آن است که علیرغم تجربی بودن رابطه S شکل مدل ویتزاک، می‌توان از آن برای اهداف کاربردی استفاده نمود.

در شکل ۱۰ مقادیر مدول دینامیکی برای هر سه مخلوط آسفالتی، در چهار دمای مختلف و پنج فرکانس بارگذاری حاصل از آزمایش مدول دینامیکی در برابر مقادیر محاسبه شده با استفاده از مدل ویتزاک (رابطه‌ی ۴) رسم شده است. همان گونه که در شکل دیده



شکل ۱۰. نمودار مقادیر مدول دینامیکی مدل ویتزاک در برابر نتایج آزمایشگاهی

۴-۴ نتایج آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی مطابق با AASHTO TP79 و با شرط خاتمه ۱۰۰۰۰ میکرو کرنش یا ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری در سطح تنش ۷۰ کیلوپاسکال انجام شد. نمودار خزش دینامیکی یعنی نمودار کرنش ماندگار تجمعی بر حسب سیکل بارگذاری در شکل ۱۱ رسم شده است.

همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هیچ یک از نمونه‌ها در مدت انجام آزمایش، وارد ناحیه سوم نشده و به حد جاری شدن نرسیدند، بنابراین شیب ناحیه دوم مبنای مقایسه قرار می‌گیرد. در ناحیه دوم نرخ افزایش کرنش ماندگار تجمعی ثابت است، بنابراین اگر خطی بر داده‌های این ناحیه برازش کنیم، پرواضح است که تندترین شیب مربوط به مخلوط آسفالتی شاهد است. سپس مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک شیب کمتری دارد و در نهایت کمترین شیب مربوط به مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری است. این به آن معنی است که نرخ ایجاد کرنش ماندگار در مخلوط اصلاح شده با گوگرد پلیمری از سایر مخلوط‌ها کمتر بوده و بنابراین بیشترین مقاومت در برابر شیارشدگی را داراست.

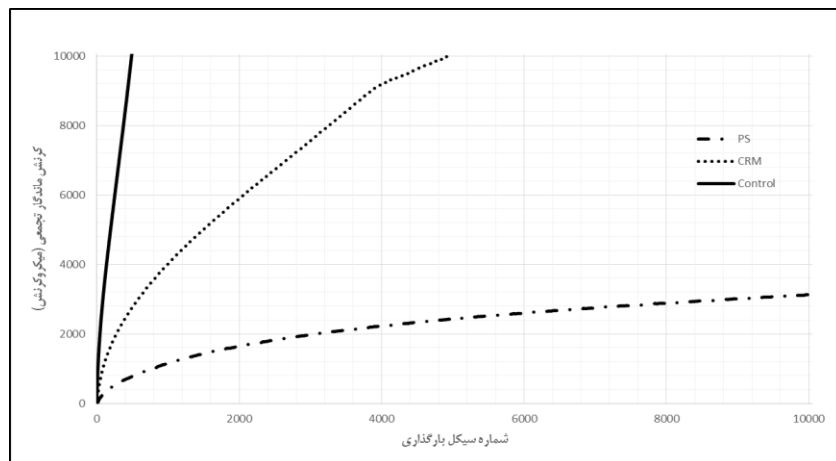
اگر کل کرنش ماندگار ایجاد شده در نمونه‌ها در طول آزمایش را با یکدیگر مقایسه کنیم، ملاحظه می‌شود که برای مخلوط آسفالتی شاهد، کرنش یک درصد در تعداد ۴۹۰ سیکل اتفاق افتاده است. با افزودن پودرلاستیک، کرنش یک درصد در تعداد ۴۹۵۰ سیکل رخ داده است و برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری با وجود اعمال ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری نیز حداکثر کرنش ۰/۳۱ درصد بوده است. بنابراین، پس از مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک مقاومت مناسبی در برابر شیارشدگی دارد و مخلوط شاهد کمترین مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی را از خود نشان می‌دهد.

نتیجه آزمایش خزش دینامیکی صحت نتایج آزمایش مدول دینامیکی در بخش قبل را تأیید نموده و همخوانی مناسبی بین این دو آزمایش در پیش‌بینی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در دماهای بالا دیده می‌شود. در آزمایش مدول دینامیکی، در فرکانس‌های پایین (دماهای بالا) مقدار مدول مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری از مدول مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودرلاستیک بیشتر بوده و هر دوی آن‌ها نیز دارای مدول بیشتری نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد بودند. در آزمایش خزش دینامیکی نیز به همین ترتیب مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...

بیشترین و مخلوط آسفالتی شاهد کمترین مقاومت در برابر

شیارشدگی را از خود نشان می‌دهند



شکل ۱۱. منحنی خزش دینامیکی برای کلبه‌ی نمونه‌های آسفالتی در سطح تنش ۷۰ کیلوپاسکال

شاهد افزایش می‌یابد که نشان از افزایش پتانسیل ترک‌خوردن در دماهای پایین دارد.

- در دماهای بالا (فرکانس‌های پایین) مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک نسبت به مخلوط شاهد افزایش داشته است و مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری نیز از هر دوی آنها بیشتر شده است. این نشان می‌دهد که مخلوط آسفالتی شاهد کمترین مقاومت را در برابر خرابی شیارشدگی دارد، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک از آن مقاوم‌تر است و در نهایت، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری بیشترین مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی را داراست.

- با توجه به نتایج آزمایش مدول دینامیکی، استفاده از پودرلاستیک در مخلوط آسفالتی، عملکرد مخلوط را در تمامی دماها را بهبود می‌بخشد و می‌تواند به عنوان یک افزودنی بسیار مناسب در صنعت روسازی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین مقدار بالای مدول

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر خرابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با ۲۰ درصد پودرلاستیک و ۴۰ درصد گوگرد پلیمری با استفاده از آزمایش‌های مدول دینامیکی و خزش دینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

- منحنی جامع مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک و گوگرد پلیمری رسم گردید که در نتیجه می‌توان از آن در طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی و همچنین مدلسازی روسازی در نرم‌افزار آباکوس تحت بارگذاری‌های مختلف در دماها و فرکانس‌های متفاوت، استفاده نمود.

- در دماهای پایین (فرکانس‌های بالا) مقدار مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با پودرلاستیک نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد کاهش پیدا می‌کند که نشان می‌دهد مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین افزایش می‌یابد، در حالی که مدول دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با گوگرد پلیمری نسبت به مخلوط

- 3- Ethyl Vinyl Acetate
- 4- Polyphosphoric Acid
- 5- Crumb Rubber
- 6- Gilsonite
- 7- Voids in Mineral Aggregates
- 8- Thiopave
- 9- Shell
- 10- Mechanistic Empirical Pavement Design Guide
- 11- Master Curve
- 12- Shift Factor
- 13- Reduced Frequency
- 15- Wheel Track
- 16- Flow Number
- 17- Solver

۷. مراجع

- Aflaki, S. and Tabatabaee, N. (2009) "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 6, pp. 2141-2150.
- Airey, G. D. (2004) "Fundamental binder and practical mixture evaluation of polymer modified bituminous materials", *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 5, No. 3, pp. 137-151.
- Bahia, H. U. and Davies, R. (1994) "Effect of crumb rubber modifiers (CRM) on performance related properties of asphalt binders", *Asphalt paving technology*, Vol. 63, pp. 414-414.
- Cho, Y. H., Park, D. W., and Hwang, S. D. (2010) "A predictive equation for dynamic modulus of asphalt mixtures used in Korea", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, No. 4, pp. 513-519.
- Deme, I. and Kennedy, B. (2004) "Use of sulphur in asphalt pavements", *Symposium on Pavement Surface Characteristics [of Roads and Airports]*, 5th, 2004, Toronto, Ontario, Canada.

دینامیکی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری نشان می دهد که استفاده از آن در مناطق گرمسیر و یا مناطق دارای ترافیک با سرعت پایین مناسب است.

- شیب ناحیه دوم در منحنی خزش دینامیکی (منحنی تغییر شکل ماندگار در برابر سیکل بارگذاری) برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک از مخلوط آسفالتی شاهد کمتر است و مقدار شیب منحنی در ناحیه دوم برای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری نیز از هر دوی آنها کمتر است. یعنی، نرخ ایجاد کرنش ماندگار در مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری از مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک کمتر است و نرخ ایجاد کرنش ماندگار در هر دوی آنها از مخلوط آسفالتی شاهد کمتر هستند. بنابراین، در یک تعداد سیکل بارگذاری مشخص، کمترین کرنش ماندگار در مخلوط آسفالتی اصلاح شده با گوگرد پلیمری ایجاد می شود و این مخلوط بیشترین مقاومت در برابر شیارشدگی را داراست. در ادامه، مخلوط آسفالتی اصلاح شده با پودر لاستیک مقاومت بیشتری در برابر خرابی شیارشدگی را از خود نشان می دهد و در نهایت کمترین مقاومت در برابر شیارشدگی مربوط به مخلوط آسفالتی شاهد است.

- همخوانی مناسبی بین نتایج آزمایش مدول دینامیکی در دماهای بالا و آزمایش خزش دینامیکی ملاحظه می شود. بنابراین می توان برای بررسی مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط های آسفالتی مختلف، به انجام آزمایش مدول دینامیکی اکتفا نمود و زمان هزینه را کاهش داد.

- رابطه تجربی S شکل ویتزاک تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد ($R^2=0.977$) و می توان از آن برای اهداف کاربردی استفاده نمود.

۶. پی نوشت ها

- 1- Styrene Butadiene Styrene
- 2- Styrene Butadiene Rubber

subgrade soils due to repeated loading”, Transportation Research Record, N0. 537, pp. 1-17.

- Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F. and Gallegos, C. (2004) “Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens”, Fuel, Vol. 83, No. 14, pp. 2041-2049.

- Oliver, J. W. (2000) “Rutting and fatigue properties of crumbed rubber hot mix asphalts”, Road Materials and Pavement Design, Vol. 1, No. 2.

- Pasargad Oil Company,
<http://en.pasargadoil.com/en-us/home.aspx>

- Strickland, D., Colange, J., Martin, M. and Deme, I. (2008) “Performance properties of sulphur extended asphalt mixtures with modified sulphur pellets”, Proceedings of the International Society for Asphalt Pavements, 2008.

- Timm, D., Tran, N., Taylor, A. J., Robbins, M. M. and Powell, R. (2009) “Evaluation of mixture performance and structural capacity of pavements using shell Thiopave®”, National Center for Asphalt Technology at Auburn University, Vol. 44, pp. 05-09.

- Uzarowski, L. (2007) “The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting”, Polyscience Publications.

- Wang, H., Dang, Z., Li, L. and You, Z. (2013) “Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture”, Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1342-1349.

- Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M. and Von Quintus, H. (2002) “NCHRP Report 465 Simple performance test for Superpave mix design”, National Cooperative Highway Research Program Report.

- Guide (2003) “Asphalt rubber usage guide”, State of California Department of Transportation.

- Kaloush, K. E., Witczak, M. W., Way, G. B., Zborowski, A., Abojaradeh, M. and Sotil, A. (2002) “Performance evaluation of Arizona asphalt rubber mixtures using advanced dynamic material characterization tests”, Final Report submitted to FNF Construction, Inc. and the Arizona Department of Transportation. Arizona State University, Tempe, Arizona.

- Khattak, M. and Baladi, G. (2001) “Fatigue and permanent deformation models for polymer-modified asphalt mixtures”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1767), pp. 135-145.

- Kim, Y. R. (2009) “Modeling of asphalt concrete”, USA: American Society of Civil Engineers.

- Khodaii, A. and Mehrara, A. (2009) “Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test”, Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2586-2592.

- Kök, B. V. and Çolak, H. (2011) “Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt”, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 8, pp. 3204-3212.

- Lalwani, S., Abushihada, A. and Halasa, A. (1982) “Reclaimed rubber-asphalt blends: measurement of rheological properties to assess toughness, resiliency, consistency and temperature sensitivity”, In Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings, Vol. 51.

- McGennis, R. B. (1995) “Evaluation of physical properties of fine crumb rubber-modified asphalt binders”, Transportation Research Record, No.1488, pp. 62-71.

- Monismith, C. L., Ogawa, N. and Freeme, C. R. (1975) “Permanent deformation characteristics of

- Yu, H. and Shen, S. (2012) "Impact of aggregate packing on dynamic modulus of hot mix asphalt mixtures using three-dimensional discrete element method", *Construction and Building Materials*, Vol. 26, No. 1, 302-309.

- Zhu, H., Sun, L., Yang, J., Chen, Z. and Gu, W. (2011) "Developing master curves and predicting dynamic modulus of polymer-modified asphalt mixtures", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 1, 131-137.

- Witczak, M. W. and Bari, J. (2004) "Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures", *Arizona State University Research Report*, Tempe (Arizona, USA): Arizona State University.

- Xiao, F., Amirkhanian, S. N., Shen, J. and Putman, B. (2009) "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures", *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 2, pp. 1028-1034.

خصوصیات ویسکوالاستیک و مقاومت در برابر شیارشدگی...

اکبر دانش، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه تهران اخذ نمود. در سال ۱۳۹۲ در آزمون دکتری تخصصی در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری دانشگاه تهران پذیرفته شد و در حال حاضر دانشجوی سال آخر دوره دکتری است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان ژئوتکنیک راه، راه آهن و مصالح شناسی آسفالت است.



علی اصغر اکبری نسرکانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه فردوسی مشهد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۴ از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مدلسازی رفتار قیر و مخلوط‌های آسفالتی و بررسی خصوصیات طراحی و عملکردی روسازی‌های مختلف بوده و در حال حاضر کارشناس دفتر تحقیق و توسعه و کارشناس آزمایشگاه قیر و آسفالت شرکت سهامی آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک وزارت راه و شهرسازی است.



ساسان افلاکی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران - عمران را در سال ۱۳۷۷ از دانشگاه صنعتی شریف و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری از دانشگاه صنعتی شریف گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان مهندسی روسازی و مصالح آسفالتی بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار در دانشکده فنی، دانشگاه تهران است.



محمدحسن سراجی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۹ از دانشگاه زنجان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه تهران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بررسی خرابی شیارشدگی روسازی‌های آسفالتی و بررسی راهکارهای اصلاح مشخصات مقاومتی آسفالت در برابر این خرابی است.

