Archive of SID

ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم (WMA) با مواد افزودنی‌های گرم آلی و شیمیایی

محمود عامری (مسئول مکاتبات)، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مهدی امیری هرمزکی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

مصطفی وامق، دانشجوی دوره دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمدمهدی خبیری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد.، ایران

E-mail: ameri@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۱ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

چکیده

مخلوط آسفالتی گرم همان مخلوط آسفالتی داغ است با این تفاوت که دمای اختلاط و تراکم می‌تواند تا ۳۰ الی ٤٠ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد. ویژگی کاهش دما، اختلاط و تراکم مخلوط آسفالتی باعث شده است تا استفاده از فنآوری آسفالت گرم افزایش یابد. اما همین کاهش دمای تولید در این نوع مخلوط‌های آسفالتی موجب نگرانی در مورد چگونگی عملکرد آن‌ها در برابر خرابی‌های عریان شدگی و شیار شدگی شده است. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر نوع ماده افزودنی گرم(آلی، شیمیایی) بر دوام و مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی و شیار شدگی است .به این منظور برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی گرم و مخلوط آسفالتی داغ و ارزیابی عملکرد آن‌ها از مصالح سنگی آهکی و سرباره فولادی، دو نوع فیلر سیمان و پودر سنگ و افزودنی‌های گرم آسفالتن-بی و زایکوترم (نانومتریال) استفاده‌شده است. آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های ساخته‌شده صورت گرفت تا بتوان میزان تأثیرگذاری نوع سنگ‌دانه، فیلر و ماده افزودنی گرم را بر مقاومت در برابر رطوبت و شیار شدگی مخلوط آسفالتی ارزیابی کرد. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی آلی (آسفالتن-بی) در آزمایش مقاومت کششی، آزمایش مدول برجهندگی و خزش دینامیکی به ترتیب ۱۰، ۱۵ و ۵ درصد عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم را نسبت به مخلوط آسفالتی داغ بهبود می‌بخشد. در مورد حساسیت رطوبتی یا نسبت مقاومت کششی می‌توان گفت که مخلوط‌های آسفالتی حاوی افزودنی شیمیایی (زایکوترم) باعث افزایش مقاومت رطوبتی در حدود ۱۰ درصد می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولادی و فیلر سیمانی نسبت به سایر نمونه‌ها دارای دوام و مقاومت بیشتری هستند.

واژه‌های کلیدی: آسفالت گرم (WMA)، آسفالتن- بی، زایکوترم، حساسیت رطوبتی، سرباره فولادی.

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

با توجه به کمبود منابع و آلودگی زیست‌محیطی، پژوهشگران پژوهشات گسترده‌ای برای تولید مخلوط آسفالتی با فنآوری جدید انجام دادند، به‌گونه‌ای که این فنآوری ها با کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش انرژی مصرفی و هزینه تولید، منجر به تولید مخلوط‌های آسفالتی با عملکرد مطلوب شوند. روش‌های تولید مخلوط آسفالتی گرم[1](WMA) و سرد ازجمله فنآوری ها هستند. [Harrison and Christodulaki, 2000].

مخلوط آسفالتی گرم اجازه می‌دهد تا مخلوط آسفالتی در دمای پایین تر از مخلوط های آسفالتی داغ[2] (HMA) تولید شود[Oliveira et al. 2013]. کاهش گازهای گلخانه‌ای، صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش هزینه‌های تولید، امکان اجرا در آب و هوای سرد، کاهش زمان بازگشایی پس از اجرا روسازی و امکان استفاده در مسافت‌های طولانی‌تر را می‌توان به‌عنوان مزایای مخلوط آسفالتی گرم نام برد [Ameri, Hesami and Goli, 2013]. باوجود مزایای متعدد مخلوط آسفالتی گرم، نگرانی هایی در مورد عملکرد این مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی و شیار شدگی وجود دارد. حساسیت رطوبتی به دلیل وجود آب و رطوبت بین مصالح و عدم پیوستگی و چسبندگی لازم بین قیر و سنگ‌دانه‌ها به وجود می‌آید [Hefer, Little and Lytton, 2005; Copeland and Kringos, 2006]. در مخلوط‌های آسفالتی گرم ممکن است مصالح سنگی به‌خوبی خشک نشود و کمی رطوبت در خود داشته باشد و باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط شود[Diefenderfer and Hearon, 2007] .

همچنین پژوهشات نشان‌دهنده آن است که کاهش دما تولید باعث کاهش پیر شوندگی قیر می‌شود که این امر می‌تواند بر مقاومت شیار شدگی و خستگی مخلوط آسفالتی تأثیرگذار باشد [D'Angelo et al. 2007; Xiao, Punith and Amirkhanian, 2012; Hossain et al. 2012]. اگرچه عامل قفل و بست بین مصالح سنگی نسبت به خصوصیات قیر بر روی شیار شدگی تأثیر بیشتری دارد، اما عدم توانایی قیر در ایجاد مخلوط آسفالتی یکپارچه باعث پدید آمدن شیار شدگی و تغییر شکل ماندگار در روسازی شود.

مواد افزودنی گرم با کاهش ویسکوزیته قیر، باعث افزایش روانی قیر در دمای پایین‌تر می‌شود و این تغییر می‌تواند منجر به بهبود چسبندگی مصالح و قیر و همچنین موجب کاهش دمای اختلاط آسفالت شود. از طرف دیگر مواد افزودنی باید خاصیت ضد عریان شدگی داشته باشند تا باعث کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی گرم شود[Mogawer et al. 2011].

خصوصیات اجزای سازنده مخلوط‌های آسفالتی بر عملکرد آن‌ها تاثیر گذار هستند و با تغییر و بهبود خصوصیات این اجرا، عملکرد مخلوط آسفالتی تغییر می‌کند. به‌طور مثال اگرچه قیر درصد کمی از مخلوط آسفالتی را تشکیل می‌دهد اما خصوصیات آن بر عملکرد مخلوط آسفالتی بسیار تأثیرگذار است و نوع قیر و خصوصیات آن مانند ویسکوزیته می‌تواند بر چسبندگی و پیرشدگی قیر اثرگذار باشد و رفتار مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی و شیار شدگی را تغییر دهد.

همچنین جنس مصالح، میزان تخلخل، درصد شکستگی و میزان و نوع فیلر و در کل تمام مشخصات مصالح بر عملکرد مخلوط آسفالتی تأثیرگذار هستند و می‌تواند در چسبندگی سنگ‌دانه‌ها و قیر و نهایتاً بر انسجام مخلوط آسفالتی در شرایط مختلف اثرگذار باشند.

با توجه به اهمیت و تاثیر زیاد اجزاء مخلوط آسفالتی مانند مصالح سنگی، فیلر، نوع قیر و ماده افزودنی در رفتار و عملکرد آن و همچنین اهمیت و مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی که منجر به گسترش استفاده از فنآوری آسفالت گرم شده، اما نگرانی‌هایی در مورد رفتار این مخلوط‌ها در خرابیهایی همچون شیارشدگی و حساسیت رطوبتی وجود دارد که بررسی و ارزیابی تاثیر هر یک از اجزا در عملکرد این مخلوط ها الزامی

www.SID.ir

Archive of SID

است در این راستا، در این پژوهش، از مواد افزودنی گرم به نام‌های آسفالتن- بی(آلی) و زایکوترم(شیمیایی)، مصالح آهکی و سرباره فولادی و فیلر پودر سنگ و سیمان، برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین تعداد ۱۰۸ نمونه بدون احتساب نمونه‌های ساخته‌شده برای آزمایش تعیین درصد بهینه قیر، ساخته شده که ۷۲ نمونه آن در آزمایش لاتمن اصلاح شده جهت بررسی تأثیر نوع ماده افزودنی، مصالح سنگی و فیلر بر روی حساسیت رطوبتی و همچنین ۳۶ نمونه دیگر، برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی با آزمایش‌های مدول برجهندگی و خزش دینامیکی مورد استفاده قرارگرفته است.

۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

حسامی و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر مصالح سنگی(گرانیت و آهکی)، افزودنی‌های گرم (آسفامین و ساسوبیت) و فیلر آهک هیدراته بر عملکرد مخلوط آسفالتی گرم (WMA) مورد ارزیابی قراردادند. نتایج نشان‌دهنده آن بودند که مواد افزودنی گرم باعث کاهش چسبندگی بین مصالح سنگی اسیدی(گرانیت) و قیر می‌شود. همچنین آهک هیدراته در چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی اسیدی(گرانیت) بهتر از چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی بازی(آهکی) عمل می‌کند. در این پژوهش بهترین عملکرد را مخلوط‌های حاوی آسفامین و سنگدانه آهکی در مقابل عریان شدگی از خود بر جای گذاشتند [Hesami et al. 2013]. ایازی و همکاران در پژوهشی دیگر به بررسی تأثیر ساسوبیت و زایکوترم بر مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح بازیافتی پرداختند و نتایج این پژوهش نشان داد که مخلوط های آسفالتی گرم حاوی زایکوترم دارای مقاومت بیشتری در برابر رطوبت نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی ساسوبیت هستند اما ازنظر سختی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ساسوبیت دارای سختی بیشتری هستند [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017].

مالادی و همکاران در سال ۲۰۱٤ عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم با افزودنی‌های ساسوبیت و ادورا را مورد ارزیابی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که بااینکه مخلوط‌های آسفالتی گرم دارای حساسیت رطوبتی بیشتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ هستند اما می‌توانند عملکرد بهتری در برابر شیار شدگی از خود بروز دهند[Malladi et al. 2014].

گلی و همکاران در سال ۲۰۱۷ تأثیر استفاده از سنگ‌دانه‌های سرباره فولادی بر رفتار مخلوط‌های آسفالتی گرم بررسی کردند و نتایج این پژوهش نشانگر این بود که استفاده از مصالح سنگی سرباره، باعث افزایش مقاومت شیارشدگی و کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم می‌شود و این مخلوط‌ها عمر خستگی بهتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی داغ دارند [Goli, Hesami and Ameri, 2017].

زیاری و همکاران در سال ۲۰۱٦ عملکرد و اثر پودر لاستیک بر حساسیت رطوبتی و مقاومت شیار شدگی در مخلوط آسفالت گرم با افزودنی‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از پودر لاستیک با درصد ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد وزنی به‌عنوان جایگزین مصالح عبوری از الک ٤۰ و افزودنی‌های رئوفالت، ساسوبیت و زایکوترم به میزان ۱ درصد وزن قیر مورداستفاده قرار گرفت.

مخلوط‌های گرم حاوی زایکوترم بدون افزودنی پودر لاستیک دارای بیشترین نسبت مقاومت کششی (TSR) و مقاومت در برابر رطوبت بود اما مخلوط‌های گرم حاوی رئوفالت بیشترین مقاومت در برابر شیار شدگی را از خود نشان داد [Ziari, Naghavi and Imaninasab, 2016].

۳. مصالح مصرفی

۳-۱ قیر

در این پژوهش از قیر خالص با درجه نفوذ ٦۰-۷۰ پالایشگاه نفت جی اصفهان استفاده‌شده است و مشخصات آن در جدول ۱ نمایش داده‌شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۳-۲ مصالح مصرفی

مصالح سنگی ۹۰ تا ۹۵٪ وزنی و ۷۵ تا ۸۵٪ حجمی مخلوط‌های بتن آسفالتی را شامل می‌شود. ساختار مقاوم‌تر مصالح سنگی به مخلوط‌های بتن آسفالتی با مقاومت بالا در مقابل تغییر شکل ناشی از بارگذاری تکرارشونده منجر می‌شود. مشخص‌شده است که مصالح سنگی و دانه‌بندی تأثیر قابل‌توجهی روی مقاومت و عملکرد مخلوط‌های بتن آسفالتی دارد. در این پژوهش از دو نوع مصالح سنگی آهکی و سرباره فولادی استفاده گردیده است که مشخصات این مصالح در جدول ۲ آمده است.

دانه‌بندی مصالح مطابق با حد وسط دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ۲۳٤ برای آستر و رویه است و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

برای بررسی نقش فیلر و پرکننده و تأثیر آن بر عملکرد مخلوط آسفالتی نیز از سیمان تیپ ۲ کارخانه تهران و پودر سنگ آهکی از کارخانه آهک و پودر سنگ سینا استفاده شده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مورداستفاده

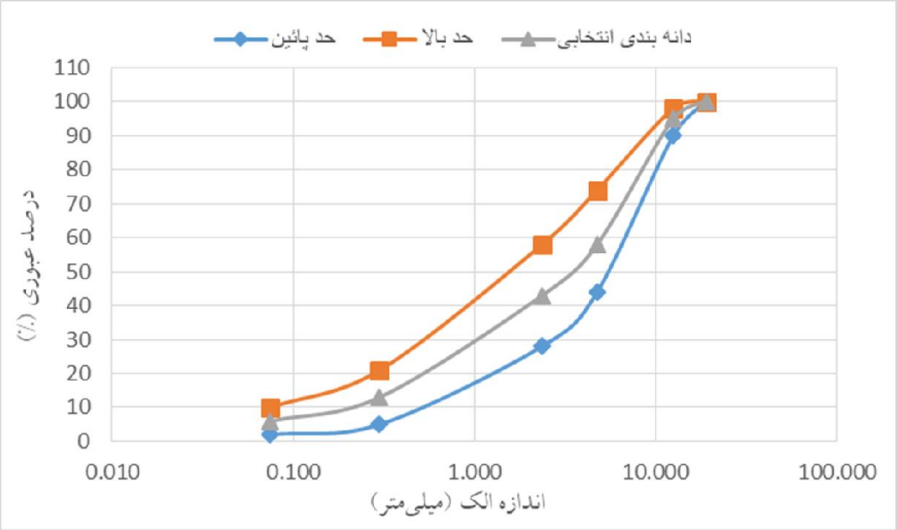
مشخصات	نتایج آزمایش	حدود مجاز	استاندارد
درجه نفوذ	٦٦	٦٠-٧٠	ASTM D-5
نقطه نرمی	٥٢/٧	٤٩-٥٦	ASTM D-36
خاصیت انگمی	١٠٢	حداقل ١٠٠	ASTM D-113
تغییر وزن در اثر گرما	٠/٠٢	حداکثر ٠/٢	ASTM D-6
درجه اشتعال	٢٩٨	حداقل ٢٥٠	ASTM D-92
وزن مخصوص	١/٠٥٠١	١/٠١-١/٠٦	ASTM D-70

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

شرح	نتایج آزمایش		حدود مجاز طبق نشریه ۲۳٤		استاندارد آزمایش
	نوع مصالح				
	آهکی	سرباره	آستر	رویه	استاندارد
سایش به روش لوس‌آنجلس(درصد)	٢٣	١٨	٤٠	٣٠	AASHTO-T96
ضریب تورق	١٢	١١	٣٠	٢٥	BS-812
شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ٤(درصد)	٩٢	١٠٠	٨٠	٩٠	ASTM-D5821
درصد جذب آب(مصالح درشت‌دانه)	٠/٦	١/٧	٢/٥	٢/٥	AASHTO-T85
درصد جذب آب(مصالح ریزدانه)	١/٢	٢	٢/٨	٢/٥	AASHTO-T84
وزن مخصوص واقعی (gr/cm3) درشت‌دانه	٢/٦٩	٢/٨٣	-	-	ASTM-C127
وزن مخصوص واقعی (gr/cm3) ریزدانه	٢/٥٦	٢/٦٥	-	-	ASTM-C128

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱. حد بالا، وسط و انتخابی دانه‌بندی شماره ٤

جدول ۳. مشخصات شیمیایی (اجزای تشکیل‌دهنده) فیلرهای مورداستفاده

فیلر	اجزا تشکیل‌دهنده برحسب درصد (٪)							
	CaO	SiO_2	L.O.I	MgO	Al_2O_3	SO_3	Fe_2O_3	ترکیبات دیگر
سیمان	٦٤	٢١/٧٥	١/٥	١/٨٥	٥/١	١/٥٩	٤	≅٠/٢
پودر سنگ	٥٥/٠١	١/٢٩	٤٣/٤	٠/٠٩	-	-	-	≅٠/٢

۳-۳ مواد افزودنی گرم

۳-۳-۱ آسفالتن - بی

آسفالتن- بی[3] مانند ساسوبیت جزو مواد افزودنی گرم عالی یا واکس قرار دارد. آسفالتن- بی مخلوط موم مونتان[4] و هیدروکربن است. موم مونتان در آلمان، شرق اروپا و مناطق از ایالت متحده آمریکا پیدا می‌شود. این موم قهوه‌ای‌رنگ از تغییرات شیمیایی زغال‌سنگ و فسیل گیاهی به وجود آمده است. این موم به دلیل پایداری در آب و خاصیت نامحلول بودن موردتوجه است. آسفالتن- بی نیز مانند مواد افزودنی گرم دیگر باعث کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی می شود و نقطه ذوب آن بالای ۱۰۰ درجه است و در این دما به‌راحتی می‌تواند با قیر مخلوط شود. همچنین بر اساس پیشنهاد شرکت سازنده و پژوهش های پیشین[Rubio et al. 2012] مقدار بهینه آسفالتن- بی در قیر برابر ۲ تا ٤ در صد وزنی قیر است که در این پژوهش مقدار ۳ درصد برای افزودن به قیر در نظر گرفته شده است. این افزودنی از شرکت رومنتا[5] آلمان است. مشخصات آسفالتن-بی در جدول ٤ ارائه‌شده است.

جدول ٤. مشخصات آسفالتن-بی

ویژگی	مقدار
گروه شیمیایی	هیدروکربن
نوع ماده	جامد
رنگ	قهوه‌ای
نقطه ذوب	۹۵ -۱۰۵(درجه سانتی‌گراد)
بو	ندارد

۳-۳-۲ زایکوترم

زایکوترم[6]، یک افزودنی شیمیایی نانو و بدون بو است که جهت بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی تولیدشده

www.SID.ir

Archive of SID

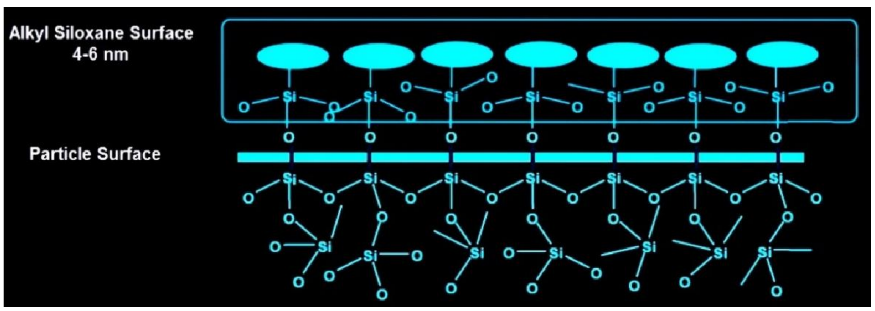
است و سبب کاهش دمای تولید و تراکم و همچنین افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌شود. برخلاف سایر افزودنی‌های شیمیایی بر پایه سیلان است که ازلحاظ کارآیی مؤثرتر به نظر می‌رسد. پیوند سیلوکسانی (Si-O-Si) تشکیل‌شده روی سطح مصالح پس از واکنش گروه‌های سیلانول فعال با سطح مصالح سنگی در شکل ۲ نشان داده‌شده است و این پیوندها آب‌گریزند و به‌آسانی شسته نمی‌شوند. در حالت عادی، در مصالح آب‌دوست، پیوند برقرارشده بین قیر و مصالح، پیوند فیزیکی ضعیف و از نوع برهمکنش قطبی–قطبی است که تنها ۵ تا ۱۵ در صد در پیوند شرکت می‌کند. می‌توان پیوند برقرارشده را به پوست پرتقال تشبیه کرد که به‌آسانی قابلیت جداشدگی دارد. درحالی‌که با اصلاح سطح مصالح توسط افزودنی‌های بر پایه سیلان، می‌توان سطح آن‌ها را از حالت آب‌دوست به حالت قیر دوست تبدیل کرد. ضمناً، با از بین بردن لایه هوای موجود در سطح مصالح سنگی، پیوند مستحکم شیمیایی(همانند پوست سیب) و برهمکنش غیر قطبی–غیرقطبی بین قیر و مصالح ایجاد کرد که بیش از ۸۰ درصد ذرات قیر در این واکنش شرکت دارند که این امر سبب کاهش پتانسیل عریان شدگی و تأثیر اکسیداسیون در محل تلاقی بین قیر و مصالح سنگی می‌گردد و میزان بهینه زایکوترم در قیر بر اساس پژوهش‌های پیشین [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017] و پیشنهاد شرکت سازنده ۰٫۱ درصد انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی زایکوترم در جدول ۵ ارائه‌شده است.

جدول ۵. مشخصات زایکوترم

ویژگی	مقدار
گروه شیمیایی	سیلان‌ها
نوع ماده	مایع
رنگ	زرد کم‌رنگ
وزن مخصوص	۰/۹۷ (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
بو	ندارد

جدول ٦. نام اختصاری و درصد بهینه نمونه‌های مختلف

نام اختصاری نمونه	مصالح سنگی (نام اختصاری)	فیلر (نام اختصاری)	درصد بهینه قیر
L-S	آهکی (L)	پودر سنگ(S)	٤/٨٧
L-C	آهکی(L)	سیمان(C)	٤/٩٢
S-S	سرباره(S)	پودر سنگ(S)	٥/٧٧
S-C	سرباره(S)	سیمان(C)	٥/٩٣



شکل ۲. پیوند سیلوکسانی(Si-O-Si) به وجود آمده روی سطح مصالح سنگی [Mirzababaei, 2016]

www.SID.ir

Archive of SID

٤. روش آزمایش

قیر بهینه بر اساس روش مارشال مطابق استاندارد ASTM D1599 به‌دست‌آمده است. مقدار درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نوع مصالح (آهکی و سرباره فولادی) و فیلر(پودر سنگ و سیمان) در جدول ٦، ارائه شده است همچنین درصد قیر بهینه برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی داغ و مخلوط آسفالتی گرم با مصالح مشابه، برابر در نظر گرفته‌شده است. پس از تعیین مقدار قیر بهینه، نمونه‌های نهایی مخلوط آسفالتی برای ارزیابی عملکرد توسط آزمایش‌های لاتمن اصلاح‌شده، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی توسط دستگاه متراکم کننده ژیراتوری (SGC) ساخته‌شده است.

٤-١ آزمایش لاتمن اصلاح‌شده

جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از آزمایش لاتمن اصلاح شده استفاده شده است. این آزمایش یا آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) به بررسی میزان استحکام کشش مخلوط‌های آسفالتی در شرایط خشک و اشباع می‌پردازد.

مطابق استاندارد AASHTO T283 برای هر نوع مخلوط ٦ نمونه ساخته می‌شود. جهت اماده‌سازی نمونه‌های اشباع، ٣ نمونه ابتدا به میزان ٥٥ تا ٨٠ درصد اشباع و سپس به مدت ١٦ ساعت در دمای منفی ١٨ و همچنین به مدت ٢٤ ساعت در دمای ٦٠ درجه نگهداری می‌شود و نهایتاً سه نمونه اشباع (عمل‌آوری شده) و سه نمونه دیگر (خشک) به دمای ٢٥ درجه سانتی‌گراد رسانده می شود و بعدازاین مرحله آزمایش مقاومت کششی روی آن ها انجام می‌گیرد و مقدار نیرو در هنگام شکستن نمونه اندازه‌گیری می‌شود [NCHRP Report 444; Ameri et al. 2017].

برای محاسبه مقاومت کشش غیرمستقیم (ITS) از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$ITS = \frac{2P}{\pi D t} \qquad (١)$$

در این رابطه ITS مقاومت کششی(برحسب نیوتن بر میلی‌متر مربع)، P بیشینه بار (برحسب نیوتن)، D قطر نمونه (برحسب میلی‌متر)، t ضخامت نمونه (برحسب میلی‌متر)، است.

پس انجام آزمایش بر روی نمونه‌ها میانگین مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت عمل‌آوری شده (ITS_{sat}) به میانگین مقاومت کششی خشک (ITS_{dry}) محاسبه می شود. این نسبت که با TSR (نسبت مقاومت کششی) نشان داده می‌شود و با توجه به نشریه ٢٣٤ نباید از ٨٠ درصد کمتر باشد. کمتر بودن نسبت TSR از ٧٥ درصد، بیانگر مستعد بودن مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی است. مقدار نسبت مقاومت کششی (TSR) از رابطه (٢) محاسبه می‌گردد.

$$TSR = \frac{ITS_{Sat}}{ITS_{Dry}} \qquad (٢)$$

٤-٢ آزمایش مدول برجهندگی به روش کشش غیرمستقیم

مدول برجهندگی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای مخلوط‌های آسفالتی است که با اعمال بار تکراری و اندازه‌گیری کرنش و رسم نمودار تنش-کرنش خصوصیات الاستیک مصالح را نشان می‌دهد. اکثر مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها دارای خاصیت الاستیک نیستند و در اثر اعمال بار دچار تغییر شکل ماندگار می‌شوند اما درصورتی‌که نسبت بار اعمال‌شده به مقاومت مخلوط کوچک باشد پس از هر اعمال بار، تغییر شکل ایجاد شده برگشت‌پذیر بوده و ماده را می‌توان الاستیک فرض کرد[Huang, 1993]. برای محاسبه مدول برجهندگی از دستگاه UTM و مطابق استاندارد ASTM D4123 استفاده می‌شود. مطابق استاندارد مذکور بار اعمالی به نمونه ٤٥٠ نیوتن و به شکل زنگوله‌ای با دوره بارگذاری ٠,١ ثانیه و زمان استراحت ٠,٩ ثانیه انجام می‌شود.

محاسبه مدول برجهندگی بر اساس رابطه ٣ است:

$$M_R = \frac{P(v + 0.2734)}{tH} \qquad (٣)$$

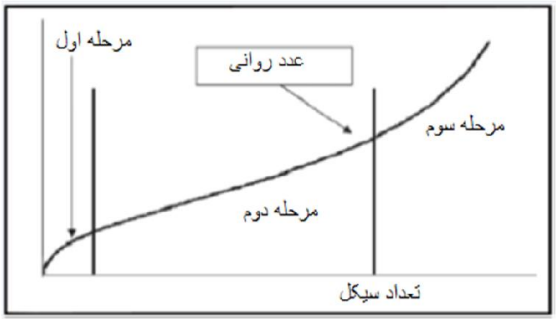
www.SID.ir

Archive of SID

در این رابطه MR = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)، P= بار تکراری (نیوتن)، v = نسبت پوآسن، t= ضخامت نمونه (میلی‌متر)، H = تغییر شکل افقی برگشت‌پذیر (میلی‌متر) است.

٤-٣ آزمایش خزش دینامیکی

برای بررسی میزان مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی از آزمایش خزش دینامیکی استفاده می‌شود. این آزمایش با ارائه نمودار تغییر شکل دائمی در برابر سیکل مقاومت شیار شدگی یا مقاومت در برابر تغییر شکل را ارزیابی می‌کند. به‌طورکلی از آزمایش خزش دینامیکی نمی‌توان عمق شیار شدگی را به دست آورد، بلکه با توجه به نمودار کرنش تجمعی به تعداد سیکل‌های بارگذاری می‌توان به مقایسه مقاومت شیار شدگی نمونه‌ها با یکدیگر می‌پردازد. در شکل ۳ یک نمونه شماتیک از نتیجه آزمایش خزش دینامیکی نمایش داده شده است که نمودار به ۳ ناحیه تقسیم می شود که سیکل شروع ناحیه سوم موردتوجه است و این سیکل، معروف عدد روانی است. هرچه عدد روانی در مخلوط آسفالتی بیشتر باشد، بیانگر مقاومت بیشتر آن در برابر شیار شدگی است [NCHRP Report 465; Ameri et al.2017].



شکل ۳. نمونه شماتیک نتیجه آزمایش خزش دینامیکی [NCHRP Report 465]

برای انجام این آزمایش از دستگاه UTM و استاندارد Australian: AS289-12-1 استفاده می‌گردد. مطابق این استاندارد، نمونه تحت اعمال بار به شکل مربعی با زمان بارگذاری ۵۰۰ میلی‌ثانیه و زمان استراحت ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه و تنش اولیه ۱۰ کیلو پاسکال و تنش بارگذاری برابر ٤۵۰ کیلو پاسکال قرار می‌گیرد. نمایی از دستگاه UTM در شکل ٤ نشان داده شده است.

شکل ٤. نمایی از دستگاه UTM قبل از آزمایش خزش دینامیکی

۵. نتایج و تحلیل داده‌ها

۵-۱ آزمایش کشش غیرمستقیم

نتایج آزمایش‌های کشش غیرمستقیم روی نمونه‌های خشک در شکل ۵ نشان داده شده است. این نتایج نشانگر بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های حاوی آسفالتن - بی نسبت به نمونه‌های شاهد است، درحالی‌که مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی زایکوترم تأثیر بسزایی در مقاومت کششی ندارند و در بعضی موارد باعث کاهش مقاومت کششی نمونه نسبت به نمونه شاهد می شود. دلیل این اتفاق را بهبود چسبندگی قیر با افزودنی آسفالتن-بی دانست درحالی‌که زایکوترم تغییری در این مشخصات به وجود نیاورده است. همچنین مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره فولادی به دلیل چسبندگی و پیوستگی بهتر بین مصالح و قیر دارای مقاومت کششی بهتر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح آهکی می شوند. به‌طورکلی، در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و حساسیت رطوبتی مصالح سرباره فولادی عملکرد بهتری نسبت به مصالح آهکی در مخلوط آسفالتی از خود نشان می‌دهند. [Ahmedzade and Sengoz, 2009]. سیمان نسبت به پودر سنگ، نقش فیلر را بهتر ایفا می‌کند و باعث افزایش

www.SID.ir

Archive of SID

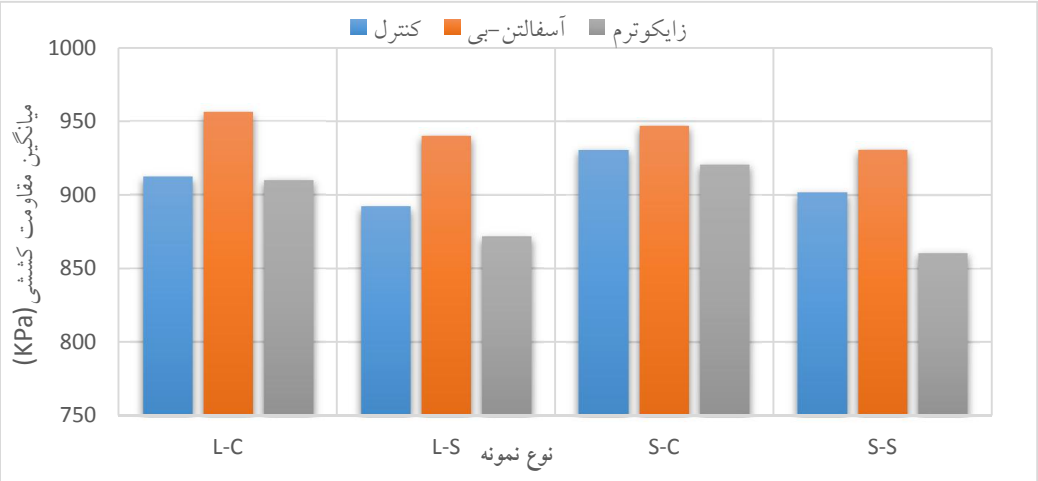
مقاومت کششی مخلوط نسبت به پودر سنگ می شود که دلیل این امر بهبود چسبندگی بین مصالح و قیر در مخلوط‌های حاوی فیلر سیمان نسبت به پودر سنگ دانست.

همان‌طور که در شکل ٦ م شاهده می شود زایکوترم در حالت مرطوب، مقاومت کششی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و نتایج نزدیک به نمونه‌های حاوی آسفالتن-بی از خود نشان می‌دهد که این امر را می‌توان به دلیل خاصیت ضد عریان‌شدگی زایکوترم دانست که در پژوهش زیاری و همکاران نیز به این نکته اشاره‌شده است [Ziari, Naghavi and Imaninasab, 2016].

در شکل (٧) نیز نتایج نسبت مقاومت کششی (TSR) نمایش داده‌شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو ماده افزودنی باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می شوند و حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد. زایکوترم نسبت به آسفالتن-بی در کل بهتر عمل کرده است درحالی‌که آسفالتن-بی در مصالح سرباره نتایج نزدیک به زایکوترم از خود نشان داده است. وجود مواد عریان شدگی در زایکوترم و همچنین سیلانول فعال و آب‌گریز بودن این مصالح موجب افزایش TSR نسبت به مخلوط آسفالتی داغ شده است. ماده افزودنی آسفالتن-بی برخلاف بقیه مواد افزودنی آلی مانند ساسوبیت در حساسیت رطوبتی نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد که دلیل این امر را می‌توان وجود مونتان در این ماده دانست. مونتان در آب پایدار است و با آب واکنش نمی‌دهد و به همین دلیل باعث کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می شود. در پژوهش دیگری به مقایسه زایکوترم و ساسوبیت پرداخته‌شده و نتایجی مشابه ارائه‌شده است. [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017].

مصالح سنگی آهکی و سرباره فولادی هر دو به رطوبت حساس نیستند اما مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره فولادی دارای TSR بیشتری هستند. اجزا تشکیل‌دهنده و درصد پائین سیلیس در این مصالح باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها شده است.

همچنین سیمان نسبت به پودر سنگ دارای خاصیت ضد عریان شدگی بیشتری است و نتایج TSR بهتری ارائه می‌دهد که دلیل آن وجود درصد CaO بیشتر در سیمان است. CaO آب‌گریز است و باعث کاهش نفوذ آب و رطوبت به پیوند قیر و مصالح می‌گردد.

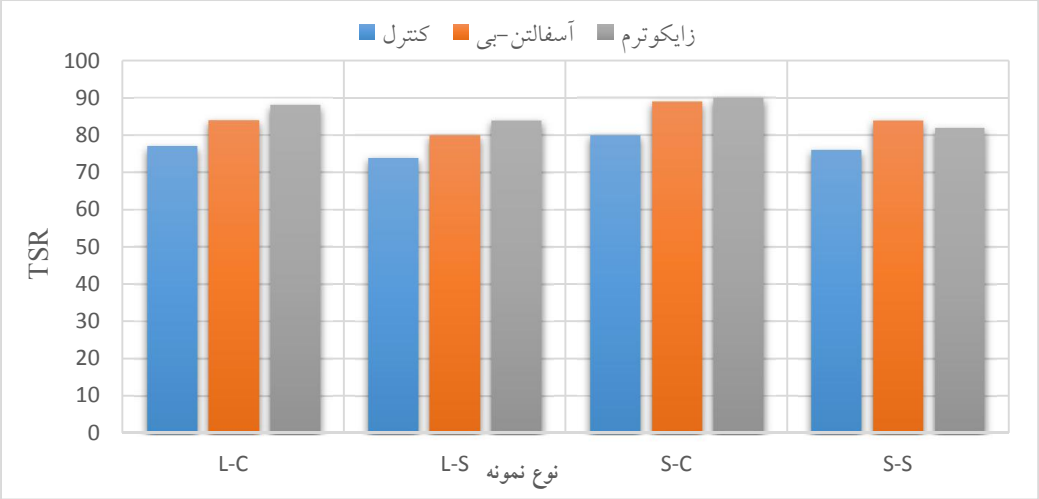


شکل ٥. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک

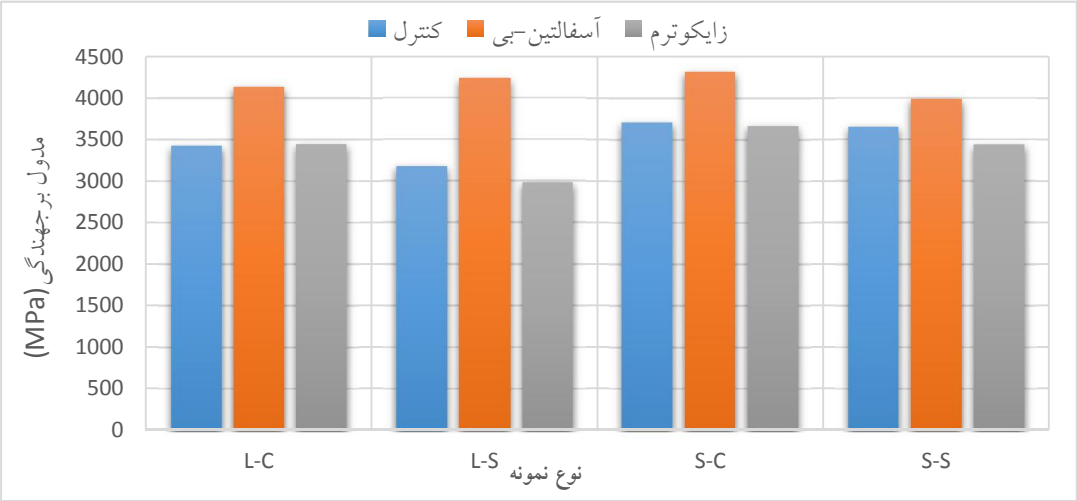
www.SID.ir

Archive of SID

شکل ٦. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تر (عمل‌آوری شده)



شکل ۷. نتایج نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)



شکل ۸. نتایج مدول برجهندگی

www.SID.ir

Archive of SID

۵-۲ آزمایش مدول برجهندگی

نتایج مدول برجهندگی بر روی نمونه‌ها در شکل ۸ آمده است و نتایج حاکی از بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی حاوی آسفالتن-بی نسبت به مخلوط کنترل است اما زایکوترم سختی مخلوط‌ها را نسبت به نمونه شاهد مقداری کاهش می‌دهد. ماده افزودنی آسفالتن-بی باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می شود به صورتی‌که به‌طور میانگین ۲۰ در صد مدول برجهندگی را نسبت مخلوط آسفالتی گرم افزایش می‌دهد. دلیل این امر را می‌توان ایجاد شبکه کریستالی در قیر دانست که باعث سختی بیشتر قیر می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد مخلوط های آسفالتی حاوی مصالح سربارهای به دلیل دارا بودن سختی بیشتر نسبت به مصالح سنگی آهکی باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط های حاوی سرباره تا ۱/۱۵ تا ۱/۳ برابر بزرگ‌تر از مخلوط‌ها حاوی مصالح سنگی آهکی می‌شوند و این نتیجه در پژوهش انجام‌شده توسط گلی و همکاران نیز نشان داده‌شده است [Goli, Hesami and Ameri, 2017]. ماده افزودنی آسفالتن - بی باعث افزایش بیشتر مدول برجهندگی مخلوط‌های آهکی نسبت به سرباره فولادی می‌شوند.

سیمان به‌عنوان فیلر در آزمایش مدول برجهندگی بهتر از پودر سنگ عمل کرده است که دلیل این امر افزایش سختی مخلوط‌ها است.

۵-۳ آزمایش خزش دینامیکی

شکل ۹ نتایج خزش دینامیکی و عدد روانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. آسفالتین-بی نسبت به زایکوترم در شیار شدگی عملکرد بهتری دارد که دلیل این امر افزایش سختی قیر و کریستالیزه شدن واکس و قیر است. به صورت میانگین بین ۱۰ تا ۱۵ درصد عدد روانی را افزایش می‌دهد، اما نتایج نشان‌دهنده آن است که این افزودنی در آزمایش مدول برجهندگی بهتر از خزش دینامیکی عمل می‌کند.

مخلوط‌های حاوی مصالح سنگی سرباره فولادی دارای بیشترین مقاومت در برابر شیار شدگی هستند و همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد سرباره فولادی باعث افزایش عدد روانی بین ۱۵ تا ۲۰ درصد نسبت به مخلوط‌ها با مصالح آهکی می‌شوند اما در مخلوط آسفالتی گرم، مخلوط‌ها حاوی مصالح آهکی به‌طور نسبی دارای عدد روانی بالاتر و عملکرد بهتری هستند. به‌طور کلی قفل و بست مصالح در کاهش تغییر شکل دائمی مخلوط آسفالتی تاثیر گذار است که همین امر باعث افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط‌های حاوی سرباره فولادی می‌شود. در پژوهش های مختلف نتایجی مبنی بر افزایش مقاومت تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی در صورت استفاده از مصالح سرباره فولادی وجود دارد [Ameri, Hesami and Goli, 2013; Fakhri and Ahmadi, 2017]. همچنین نتایج بیانگر این است در مخلوط‌های آسفالتی حاوی فیلر سیمان، مقاومت شیار شدگی بالاتری نسبت به مخلوط آسفالتی حاوی فیلر پودر سنگ دارند که دلیل این امر افزایش سختی مخلوط حاوی فیلر سیمان نسبت به پودر سنگ است.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شده است تا به بررسی تأثیر عوامل مختلف همچون نوع ماده افزودنی، مصالح سنگی و فیلر در عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی و شیار شدگی پرداخته شود. مخلوط‌های آسفالتی گرم با مواد افزودنی آلی(آسفالتن-بی) و شیمیایی (زایکوترم)، مصالح آهکی و سرباره فولادی و فیلرهای مختلف(پودر سنگ و سیمان) ساخته و با مخلوط های آسفالتی داغ مقایسه گردید که در ادامه به‌صورت مختصر نتایج مهم ارائه می‌گردد:

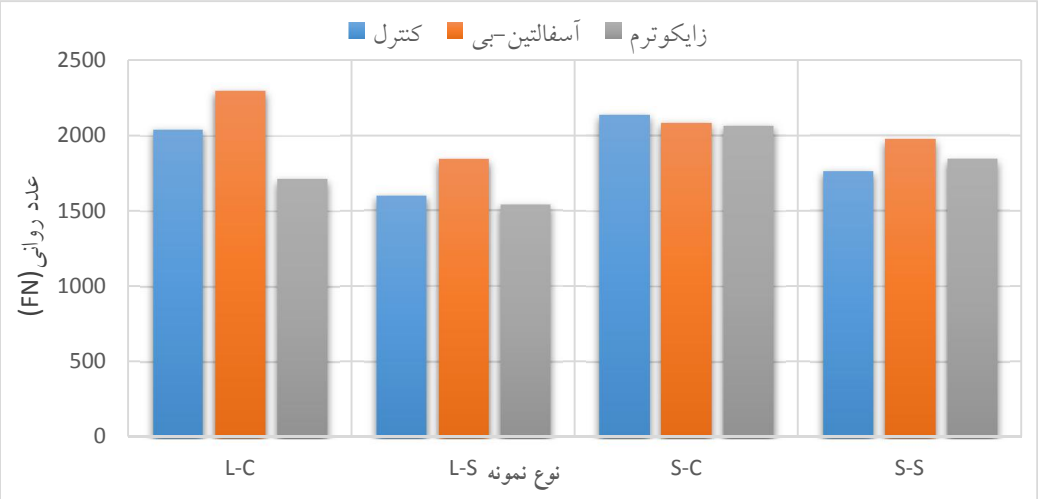
- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان‌دهنده آن است که در حالت خشک مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی آلی باعث افزایش مقاومت مخلوط نسبت به مخلوط آسفالتی داغ می‌شود درحالی‌که زایکوترم باعث

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش مقاومت می‌شود. همچنین نمونه‌های حاوی مصالح سنگی مقاومت کششی نسبت به نمونه‌های مصالح سرباره‌ای دارند اما این تأثیرگذاری کمتر از ۵ درصد است و سیمان نیز به‌عنوان فیلر از پودر سنگ در کشش غیرمستقیم بهتر عمل کرده است.

- نتایج آزمون حساسیت رطوبتی نشان می‌دهد که زایکوترم بهترین عملکرد نسبت به ماده افزودنی دیگر در نمونه‌ها دارد و باعث افزایش مقاومت مخلوط‌ها در برابر رطوبت می‌شود. آسفالتن- بی نتایج بهتری نسبت به حالت کنترل و کمتر از زایکوترم از خود نشان می‌دهد. ماده افزودنی آسفالتن- بی برخلاف بقیه مواد افزودنی آلی مانند ساسوبیت در حساسیت رطوبتی نتایج بهتری از خود نشان می‌دهد که دلیل این امر را می‌توان وجود مونتان در این ماده دانست. مونتان در آب پایدار است و با آب واکنش نمی‌دهد و به همین دلیل باعث کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می شود. مصالح سنگی سرباره فولادی و آهکی هر دو به یک نسبت به رطوبت حساس هستند و نتایج نزدیک به هم ارائه می‌کنند. سیمان نسبت به پودر سنگ دارای خاصیت ضد عریان شدگی بیشتری است و باعث افزایش مقدار TSR و کاهش حساسیت مخلوط به خرابی‌های رطوبتی می‌شود.
- نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشانگر آن است که آسفالتن- بی در بهبود سختی مخلوط بهترین عملکرد را دارد و زایکوترم نیز در بعضی از نمونه‌ها منجر به افزایش مدول برجهندگی و در بعضی از نمونه‌ها باعث کاهش آن می‌گردد و به‌طورکلی نتایج مشابه و نزدیک به نمونه‌های کنترل از خود نشان می‌دهد. مصالح سنگی سرباره فولادی نتایج بهتری نسبت به مصالح آهکی در آزمایش مدول برجهندگی نشان دادند. بهبود مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی مصالح سرباره فولادی به دلیل بیشتر بودن مقاومت این مصالح نسبت به مصالح آهکی است. سیمان عملکرد بهتری نسبت به پودر سنگ دارد و دارای مدول برجهندگی بالاتری است.



شکل ۹. نتایج خزش دینامیکی

www.SID.ir

Archive of SID

مخلوط های دارای افزودنی آسفالتن- بی بیشترین افزایش مقاومت شیار شدگی نسبت به حالت کنترل دارند. زایکوترم به‌طورکلی به مقدار کمی مقاومت شیار شدگی را کاهش می‌دهد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی سرباره فولادی در خزش دینامیکی نیز عملکرد بهتری دارند، اما مخلوط های آسفالتی حاوی مصالح آهکی در خزش دینامیکی نتایج بهتری نسبت به مدول برجهندگی و نزدیک به مخلوط‌ها با مصالح سرباره فولادی داشته است. همچنین در آزمایش خزش دینامیکی، نتایج نشان‌دهنده آن است که عملکرد سیمان در مقاومت شیار شدگی بهتر از پودر سنگ است.

- آسفالتن- بی در کلیه آزمایشها باعث افزایش مقدار نتایج نمونه‌ها نسبت به حالت شاهد می‌شود که این افزایش مقاومت را می‌توان ناشی از سازگاری قیر با آسفالتن- بی و فرآیند کریستالیزه شدن واکس در قیر در دماهای زیر نقطه ذوب واکس توجیه کرد. افزودن آسفالتن- بی علاوه بر کاهش دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی و صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید، باعث افزایش استحکام و مقاومت در برابر شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.
- به‌طورکلی، مخلوط‌های گرم با آسفالتن- بی حاوی سرباره فولادی و سیمان به‌عنوان فیلر بهترین عملکرد را در بین مخلوط‌ها از خود نشان داده است که می‌توان اثر مناسب آسفالتن-بی بر روی قیر و همچنین قفل و بست مناسب اجزا به دلیل تخلخل مصالح سرباره فولادی و چسبندگی مناسب سیمان دانست.
- از نظر فنی در تولید مخلوط آسفالتی گرم نسبت به مخلوط آسفالتی داغ، حدود ۲۰ – ۳۰ درصد در میزان مصرف انرژی صرف جویی می‌شود و همچنین با توجه به نتایج مدول برجهندگی به‌عنوان معیار طراحی روسازی و اختلاف میزان مدول برجهندگی در نمونه‌های اصلاح شده گرم بخصوص نمونه حاوی آسفالتن- بی نسبت به نمونه پایه، می‌توان گفت استفاده از مخلوط آسفالتی گرم باعث کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی ضخامت موردنیاز روسازی می‌شود، در صورتی که هزینه ناشی از استفاده از افزودنی‌ها در یک تن آسفالت تقریباً ۲۰۰۰۰ تومان برای آسفالتن- بی و ۱۱۰۰۰ تومان برای زایکوترم است. درمجموع می‌توان نتیجه گیری کرد که منافع مالی ناشی از کاهش مصرف انرژی و کاهش ضخامت موردنیاز روسازی، بسیار بیشتر از هزینه استفاده از این افزودنی‌ها برای تولید مخلوط آسفالتی گرم است.

۷. پی‌نوشت‌ها

1- Warm Mix Asphalt
2- Hot Mix Asphalt
3- Asphaltan-B
4- Romonta
5- Montan
6- Zycotherm

۸. مراجع

-عامری، محمود، وامق، مصطفی، روح‌الامینی، حامد و بمانا، کیوان (۱۳۹٤) "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم(HMA) حاوی نانو رس" ، فصلنامه ,مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره ٤، ص. ٦١٣-٦٢٦.

-Ahmedzade, P. and Sengoz, B. (2009) "Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete", Journal of Hazardous Materials, Vol.165, No. 1, pp.300-305.

-Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. (2013) "Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag", Construction and Building Materials, Vol.49, pp. 611-617.

-Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M. and Molayem, M. (2017) "Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures", Construction and Building Materials, Vol.156, pp.107-113.

www.SID.ir

Archive of SID

-Goli, H., Hesami, S. and Ameri, M. (2017) "Laboratory evaluation of damage behavior of warm mix asphalt containing steel slag aggregates", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.29, No.6, 04017009.

-Harrison, Tony and Christodulaki, Leon (2000) "Innovative processes in asphalt production and application: Strengthening asphalt's position in helping to build a better world", In World of Asphalt Pavements, International Conference, Sydney: 20-24 February 2000.

-Hefer, A. W., Little, D. N. and Lytton, R. L. (2005) "A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water", Journal of the Association Of Asphalt Paving Technologists, Vol.74, pp. 139-196.

-Hesami, S., Roshani, H., Hamedi, G. H. and Azarhoosh, A. (2013) "Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt", Construction and Building Materials, Vol.47, pp. 935-941.

-Hossain, Z., Zaman, M., O'Rear, E. A. and Chen, D. H. (2012) "Effectiveness of water-bearing and anti-stripping additives in warm mix asphalt technology", International Journal of Pavement Engineering, Vol.13 No.5, pp. 424-432.

-Huang, Yang Hsien (1993) "Pavement analysis and design", New Jersey: Prentice Hall.

-Malladi, H., Ayyala, D., Tayebali, A. A. and Khosla, N. P. (2014) "Laboratory evaluation of warm-mix asphalt mixtures for moisture and rutting susceptibility", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.27, No.5, 04014162.

-Mirzababaei, P. (2016) "Effect of Zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different

-Almudaiheem, J. A. and Al-Sugair, F. H. (1991) "Effect of loading magnitude on measured resilient modulus of asphalt concrete mixes"", Transportation Research Record, No.1317, pp. 139-144.

- Ayazi, M. J., Moniri, A. and Barghabany, P. (2017) "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives", Petroleum Science and Technology, Vol.35, No.9, pp. 890-895.

-Bhasin, A., Masad, E., Little, D. and Lytton, R. (2006) "Limits on adhesive bond energy for improved resistance of hot-mix asphalt to moisture damage", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.1970, pp. 3-13.

-Copeland, Audrey and Kringos, Nicole (2006) "Determination of bond strength as a function of moisture content at the aggregate-mastic interface", 10th International Conference on Asphalt Pavements, Quebec: 12-17 August 2006, pp. 709-718.

-D'Angelo, J., Kluttz, R., Dongre, R. N., Stephens, K. and Zanzotto, L. (2007) "Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test (With Discussion)", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol.76, pp. 123-162.

-Diefenderfer, S. and Hearon, A. (2008) "Laboratory evaluation of a warm asphalt technology for use in Virginia", No. FHWA/VTRC 09-R11.

-Fakhri, M. and Ahmadi, A. (2017) "Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation", Construction and Building Materials, vol. 147, pp. 630-638.

www.SID.ir

Archive of SID

-Oliveira, J. R., Silva, H. M., Abreu, L. P. and Fernandes, S. R. (2013) "Use of a warm mix asphalt additive to reduce the production temperatures and to improve the performance of asphalt rubber mixtures", Journal of Cleaner Production, 41, 15-22.

-Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. and Moreno, F. (2012). "Warm mix asphalt: an overview", Journal of Cleaner Production, Vol. 24, pp.76-84

-Xiao, F., Punith, V. S. and Amirkhanian, S. N. (2012) "Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures", Fuel, Vol.94, pp. 144-155.

-Ziari, H., Naghavi, M. and Imaninasab, R. (2016) "Performance evaluation of rubberised asphalt mixes containing WMA additives", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 19, Issue 7, pp. 1-7.

aggregate types and gradations", Construction and Building Materials, Vol. 116, pp. 403-412.

-Mogawer, W., Austerman, A. and Bahia, H. (2011) "Evaluating the effect of warm-mix asphalt technologies on moisture characteristics of asphalt binders and mixtures", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol.2209, pp. 52-60.

-National Cooperative Highway Research Program (2000) "Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design", NCHRP Report 444, Transportation Research Board.

-National Cooperative Highway Research Program(2002) "Simple performance test for Superpave mix design", NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Academies Press Washington D.C.

.

www.SID.ir

Archive of SID

محمود عامری، مهدی امیری هرمزکی، مصطفی وامق، محمدمهدی خبیری

محمود عامری، درجه کارشناسی و کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را به ترتیب در سالهای ۱۳۶۰ و ۱۳۶۲ از دانشگاه تکزاس اخذ نمود. در سال ۱۳۶۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری از دانشگاه تگزاس گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی رو سازی، مواد و م صالح رو سازی و مدیریت رو سازی بوده و در حال حا ضر ع ضو هیئت‌علمی دانشگاه علم و صنعت ایران است.

مهدی امیری هرمزکی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه یزد و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان روسازی آسفالتی، راه‌آهن و پل بوده و در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه مهندسی راه‌سازی و روسازی در حال فعالیت است.

مصطفی وامق، درجه کارشناسی را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران – راه و ترابری را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. از سال ۱۳۹۳ مشغول به تحصیل در مقطع دکتری رشته مهندسی عمران – راه و ترابری در دانشگاه علم و صنعت ایران است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، مواد و مصالح روسازی بوده و در حال حاضر در حال سپری کردن دوره پژوهشی در کشور ایتالیا در دانشگاه Polytechnic University of Turin است .

محمدمهدی خبیری، درجه کار شنا سی ار شد در ر شته مهند سی عمران–راه و ترابری در سال ۱۳۷۸را از دان شگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به ک سب درجه دکتری در ر شته مهند سی عمران – راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت ایران گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان طراحی روسازی، مواد و مصالح روسازی و مدیریت روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی دانشگاه یزد است.

www.SID.ir