

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

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

E-mail: ameri@iust.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۰۱

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۱

چکیده

مخلوط آسفالتی گرم همان مخلوط آسفالتی داغ است با این تفاوت که دمای اختلاط و تراکم می‌تواند تا ۳۰ الی ۴۰ 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) استفاده شده است. آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های ساخته شده 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.

۱. مقدمه

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 پایین تر می شود و این تغییر می تواند 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 مخلوط های آسفالتی بر عملکرد آنها تأثیر گذار هستند و با تغییر و بهبود خصوصیات این اجزا، عملکرد مخلوط آسفالتی تغییر می کند. به طور مثال اگرچه قیر درصد کمی از مخلوط آسفالتی را تشکیل می دهد اما خصوصیات آن بر عملکرد مخلوط آسفالتی بسیار تأثیرگذار است و نوع قیر و خصوصیات آن مانند ویسکوزیته می تواند 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 می تواند در چسبندگی سنگدانه ها و قیر و نهایتاً بر انسجام مخلوط آسفالتی در شرایط مختلف اثرگذار باشند.

با توجه به اهمیت و تأثیر 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 زیست محیطی که منجر به گسترش استفاده از فناوری آسفالت گرم شده، اما نگرانی هایی در مورد رفتار این مخلوط ها در خرابی هایی همچون شیارشدگی و حساسیت رطوبتی وجود دارد که بررسی و ارزیابی تأثیر هر یک از اجزا در عملکرد این مخلوط ها الزامی

با توجه به کمبود منابع و آلودگی زیست محیطی، پژوهشگران پژوهشات گسترده ای برای تولید مخلوط آسفالتی با فناوری جدید انجام دادند، به گونه ای که این فناوری ها با کاهش آلودگی های زیست محیطی، کاهش انرژی مصرفی و هزینه تولید، منجر به تولید مخلوط های آسفالتی با عملکرد مطلوب شوند. روش های تولید مخلوط آسفالتی گرم (WMA) و سرد از جمله فناوری ها هستند. [Harrison and Christodoulaki, 2000].

مخلوط آسفالتی گرم اجازه می دهد تا مخلوط آسفالتی در دمای پایین تر از مخلوط های آسفالتی داغ^۲ (HMA) تولید شود [Oliveira et al. 2013]. کاهش گازهای گلخانه ای، صرفه جویی اقتصادی، کاهش هزینه های تولید، امکان اجرا در آب و هوای سرد، کاهش زمان بازگشایی پس از اجرا روسازی و امکان استفاده در مسافت های طولانی تر را می توان به عنوان مزایای مخلوط آسفالتی گرم نام برد [Ameri, Hesami and Goli, 2013]. با وجود مزایای متعدد مخلوط آسفالتی گرم، نگرانی هایی در مورد عملکرد این مخلوط در برابر خرابی های 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 سنگدانه ها به وجود می آید [Hefer, Little and Lytton, 2005; Copeland and Kringos, 2006]. در مخلوط های آسفالتی گرم ممکن است مصالح سنگی به خوبی خشک نشود و کمی رطوبت در خود داشته باشد و باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط شود [Diefenderfer and Hearon, 2007].

همچنین پژوهشات نشان دهنده آن است که کاهش دما تولید باعث کاهش پیر شونده قیر می شود که این امر می تواند 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

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

و به این نتیجه رسیدند که باینکه 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 ۲۰۱۶ 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 در صد ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد وزنی به‌عنوان جایگزین مصالح عبوری از الک ۴۰ و افزودنی‌های رثوفالت، ساسوبیت و زایکوترم به میزان ۱ درصد وزن قیر مورد استفاده 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 رثوفالت 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 ۶۰-۷۰ پالایشگاه نفت جی اصفهان استفاده شده است و مشخصات آن در جدول ۱ نمایش داده شده است.

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 ساخته شده 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 قرار گرفته 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 قرار دادند. 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 جریان 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 مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی زایکوترم دارای مقاومت بیشتری در برابر رطوبت نسبت به مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی ساسوبیت هستند اما از نظر سختی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ساسوبیت دارای سختی بیشتری هستند [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017].

مالادی و همکاران در سال ۲۰۱۴ عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم با افزودنی‌های ساسوبیت و ادورا را مورد ارزیابی قرار دادند

۲-۳ مصالح مصرفی

فولادی استفاده گردیده است که مشخصات این مصالح در

جدول ۲ آمده است.

دانه بندی مصالح مطابق با حد و سط دانه بندی شماره ۴ نشریه

۲۳۴ برای آستر و رویه است و منحنی دانه بندی در شکل ۱

نشان داده شده است.

برای بر سی 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.

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.

مشخص شده است که مصالح سنگی و دانه بندی تأثیر

قابل توجهی روی مقاومت و عملکرد مخلوط‌های بتن آسفالتی

دارد. در این پژوهش از دو نوع مصالح سنگی آهکی و سرباره

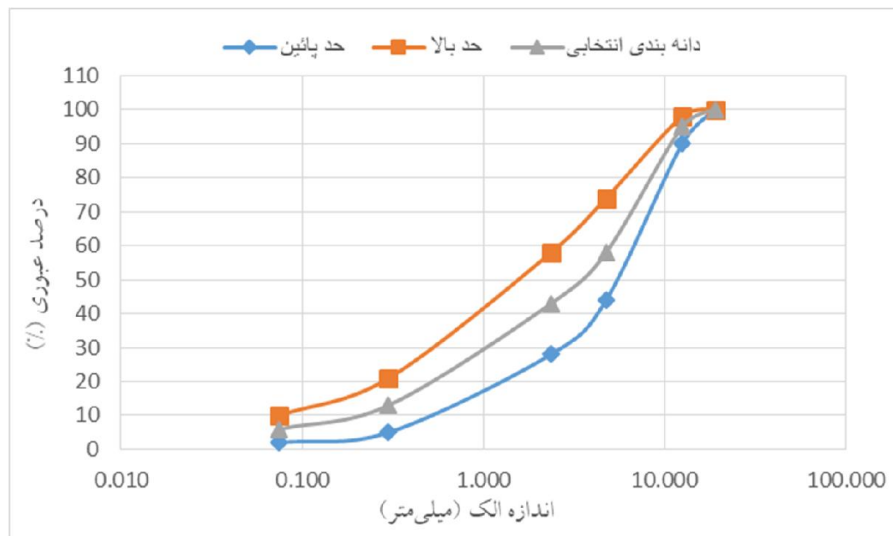
جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده

مشخصات	نتایج آزمایش	حدود مجاز	استاندارد
درجه نفوذ	۶۶	۶۰-۷۰	ASTM D-5
نقطه نرمی	۵۲/۷	۴۹-۵۶	ASTM D-36
خاصیت انگمی	۱۰۲	حداقل ۱۰۰	ASTM D-113
تغییر وزن در اثر گرما	۰/۰۲	حداکثر ۰/۲	ASTM D-6
درجه اشتعال	۲۹۸	حداقل ۲۵۰	ASTM D-92
وزن مخصوص	۱/۰۵۰۱	۱/۰۱-۱/۰۶	ASTM D-70

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مصرفی

شرح	نتایج آزمایش		استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴
	نوع مصالح			
	آهکی	سرباره	استاندارد	رویه
سایش به روش لوس آنجلس (درصد)	۲۳	۱۸	AASHTO-T96	۳۰
ضریب تورق	۱۲	۱۱	BS-812	۲۵
شکستگی در دو جبهه روی الک شماره ۴ (درصد)	۹۲	۱۰۰	ASTM-D5821	۹۰
درصد جذب آب (مصالح درشت دانه)	۰/۶	۱/۷	AASHTO-T85	۲/۵
درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۱/۲	۲	AASHTO-T84	۲/۵
وزن مخصوص واقعی (gr/cm ³) درشت دانه	۲/۶۹	۲/۸۳	ASTM-C127	-
وزن مخصوص واقعی (gr/cm ³) ریزدانه	۲/۵۶	۲/۶۵	ASTM-C128	-

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



شکل ۱. حد بالا، وسط و انتخابی دانه‌بندی شماره ۴

جدول ۳. مشخصات شیمیایی (اجزای تشکیل‌دهنده) فیله‌های مورد استفاده

ردیف	اجزای تشکیل‌دهنده برحسب درصد (%)						
	CaO	SiO ₂	L.O.I	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃
سیمان	۶۴	۲۱/۷۵	۱/۵	۱/۸۵	۵/۱	۱/۵۹	۴
پودر سنگ	۵۵/۰۱	۱/۲۹	۴۳/۴	۰/۰۹	-	-	-

این پژوهش مقدار ۳ درصد برای افزودن به قیر در نظر گرفته شده است. این افزودنی از شرکت رومنتا آلمان است. مشخصات آسفالتن-بی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات آسفالتن-بی

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

۳-۳-۲ زی‌کوترم

زی‌کوترم^۶، یک افزودنی شیمیایی نانو و بدون بو است که جهت بهبود خواص عملکردی قیر و مخلوط آسفالتی تولید شده

۳-۳-۳ مواد افزودنی گرم

۳-۳-۳-۱ آسفالتن-بی

آسفالتن-بی^۳ مانند ساسوبیت جزو مواد افزودنی گرم عالی یا واکس قرار دارد. آسفالتن-بی مخلوط موم مونتان^۴ و هیدروکربن است. موم مونتان در آلمان، شرق اروپا و مناطق از ایالت متحده آمریکا پیدا می‌شود. این موم قهوه‌ای رنگ از تغییرات شیمیایی زغال‌سنگ و فسیل گیاهی به وجود آمده است. این موم به دلیل پایداری در آب و خاصیت نامحلول بودن مورد توجه است. آسفالتن-بی نیز مانند مواد افزودنی گرم دیگر باعث کاهش دمای تولید مخلوط آسفالتی می‌شود و نقطه ذوب آن بالای ۱۰۰ درجه است و در این دما به راحتی می‌تواند با قیر مخلوط شود. همچنین بر اساس پیشنهاد شرکت سازنده و پژوهش‌های پیشین [Rubio et al. 2012] مقدار بهینه آسفالتن-بی در قیر برابر ۲ تا ۴ درصد وزنی قیر است که در

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 زیگوترم در قیر بر اساس پژوهش‌های پیشین [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017] و پیشنهاد شرکت سازنده ۰,۱ درصد انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی زیگوترم در جدول ۵ ارائه شده است.

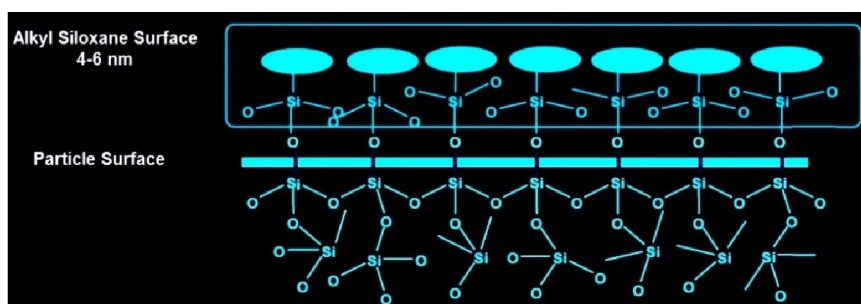
جدول ۵. مشخصات زیگوترم

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

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 از لحاظ کارایی مؤثرتر به نظر می‌رسد. پیوند سیلوکسانی (Si-O-Si) تشکیل شده روی سطح مصالح پس از واکنش گروه‌های سیلانول فعال با سطح مصالح سنگی در شکل ۲ نشان داده شده است و این پیوندها آب‌گریزند و به آسانی شسته نمی‌شوند. در حالت عادی، در مصالح آب‌دوست، پیوند برقرار شده بین قیر و مصالح، پیوند فیزیکی ضعیف و از نوع برهمکنش قطبی-قطبی است که تنها ۵ تا ۱۵ درصد در پیوند شرکت می‌کند. می‌توان پیوند برقرار شده را به پوست پرتقال تشبیه کرد که به آسانی قابلیت جداشدگی دارد. در حالی که 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

جدول ۶. 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)	۴/۸۷
L-C	آهکی (L)	سیمان (C)	۴/۹۲
S-S	سرباره (S)	پودر سنگ (S)	۵/۷۷
S-C	سرباره (S)	سیمان (C)	۵/۹۳



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

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

۴. روش آزمایش

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 می‌شود. این نسبت که با TSR (نسبت مقاومت کششی) نشان داده می‌شود و با توجه به نشریه ۲۳۴ نباید از ۸۰ درصد کمتر باشد. کمتر بودن نسبت TSR از ۷۵ درصد، بیانگر مستعد بودن مخلوط در برابر خرابی‌های رطوبتی است. مقدار نسبت مقاومت کششی (TSR) از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.

$$TSR = \frac{ITS_{sat}}{ITS_{dry}} \quad (2)$$

۴-۲ 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 در صورتی که 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 ۴۵۰ نیوتن و به شکل زنگوله‌ای با دوره بارگذاری ۰٫۱ ثانیه و زمان استراحت ۰٫۹ ثانیه انجام می‌شود.

محاسبه مدول برجه‌ندگی بر اساس رابطه ۳ است:

$$M_R = \frac{P(v + 0.2734)}{tH} \quad (3)$$

قیر بهینه بر اساس روش مارشال مطابق استاندارد ASTM D1599 به دست آمده است. مقدار درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی بر اساس نوع مصالح (آهکی و سرباره فولادی) و فیلر (پودر سنگ و سیمان) در جدول ۶، ارائه شده است همچنین درصد قیر بهینه برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی داغ و مخلوط آسفالتی گرم با مصالح مشابه، برابر در نظر گرفته شده است. پس از تعیین مقدار قیر بهینه، نمونه‌های نهایی مخلوط آسفالتی برای ارزیابی عملکرد توسط آزمایش‌های لاتمن اصلاح شده، مدول برجه‌ندگی و خزش دینامیکی توسط دستگاه متراکم کننده ژیراتوری (SGC) ساخته شده است.

۴-۱ آزمایش لاتمن اصلاح شده

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 ۶ نمونه ساخته می‌شود. جهت آماده‌سازی نمونه‌های اشباع، ۳ نمونه ابتدا به میزان ۵۵ تا ۸۰ درصد اشباع و سپس به مدت ۱۶ ساعت در دمای منفی ۱۸ و همچنین به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه نگهداری می‌شود و نهایتاً سه نمونه اشباع (عمل‌آوری شده) و سه نمونه دیگر (خشک) به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رسانده می‌شود و بعد از این مرحله آزمایش مقاومت کششی روی آن‌ها 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:

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

پاسکال قرار می‌گیرد. نمایی از دستگاه UTM در شکل ۴ نشان داده شده است.

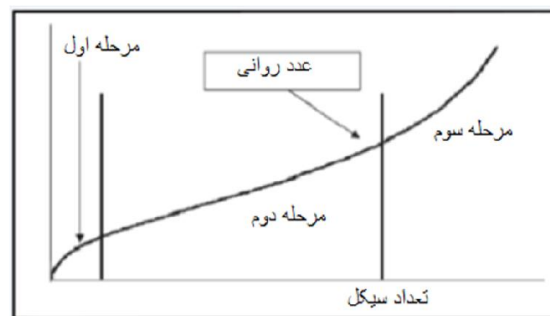


شکل ۴. نمایی از دستگاه UTM قبل از آزمایش خزش دینامیکی

در این رابطه $MR =$ مدول برجهنگی (مگا پاسکال)، $P =$ بار تکراری (نیوتن)، $v =$ نسبت پوآسون، $t =$ ضخامت نمونه (میلی‌متر)، $H =$ تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی‌متر) است.

۴-۳ 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. به‌طور کلی 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 می‌شود که سیکل شروع ناحیه سوم مورد توجه 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]

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 می‌شود. 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 می‌شوند. به‌طور کلی، 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

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 ۴۵۰ کیلو

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

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 موتنان در این ماده دانست. موتنان در آب پایدار است و با آب واکنش نمی‌دهد و به همین دلیل باعث کاهش حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. در پژوهش دیگری به مقایسه زایکوترم و ساسوبیت پرداخته شده و نتایجی مشابه ارائه شده است. [Ayazi, Moniri and Barghabany, 2017]

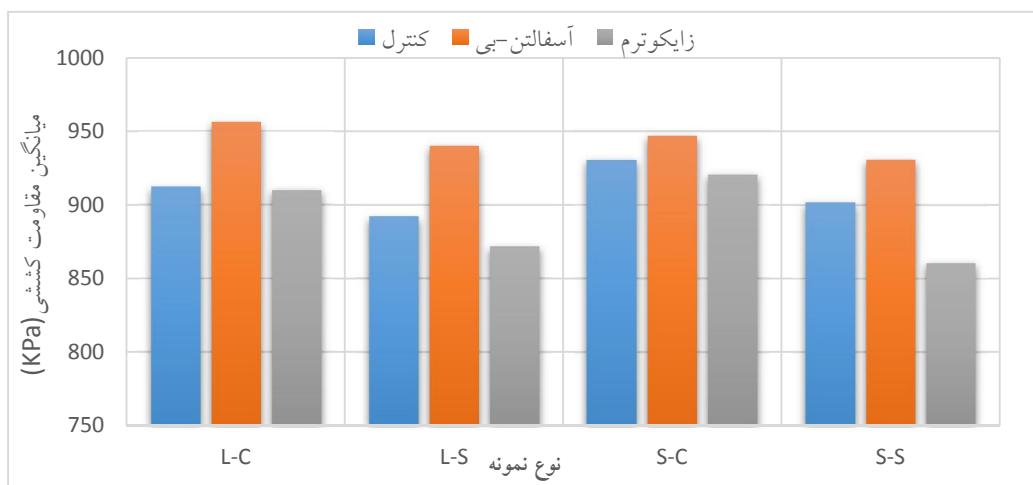
مصالح سنگی آهکی و سرباره فولادی هر دو به رطوبت حساس نیستند اما مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره فولادی دارای TSR بیشتری هستند. اجزا تشکیل‌دهنده و درصد پائین سیلیس در این مصالح باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌ها شده است.

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.

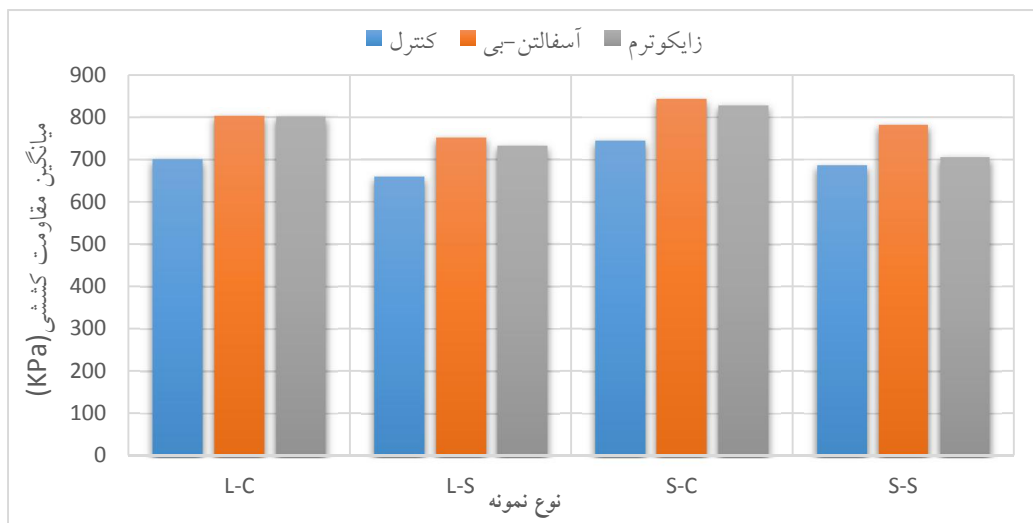
مقاومت کششی مخلوط نسبت به پودر سنگ می‌شود که دلیل این امر بهبود چسبندگی بین مصالح و قیر در مخلوط‌های حاوی فیلر سیمان نسبت به پودر سنگ دانست.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود 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 اشاره شده است. [Ziari, Naghavi and Imaninasab, 2016]

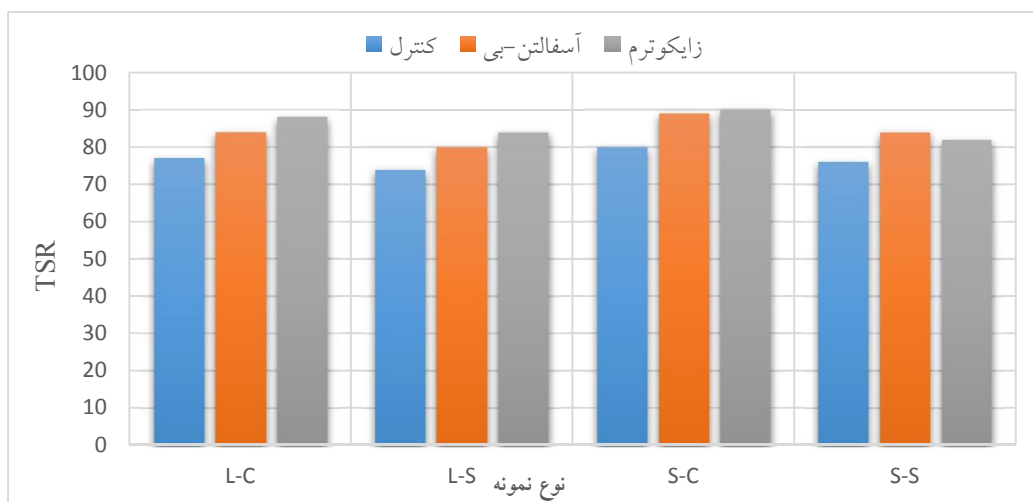
در شکل (۷) نیز نتایج نسبت مقاومت کششی (TSR) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر دو ماده افزودنی باعث افزایش مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می‌شوند و حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد. زایکوترم نسبت به آسفالتن-بی در کل بهتر عمل کرده است در حالی که آسفالتن-بی در مصالح سرباره نتایج نزدیک به زایکوترم از خود نشان داده است. وجود مواد عریان‌شدگی در زایکوترم و همچنین سیلانول فعال و آب‌گریز بودن این مصالح موجب افزایش TSR نسبت به مخلوط آسفالتی داغ شده است. ماده افزودنی



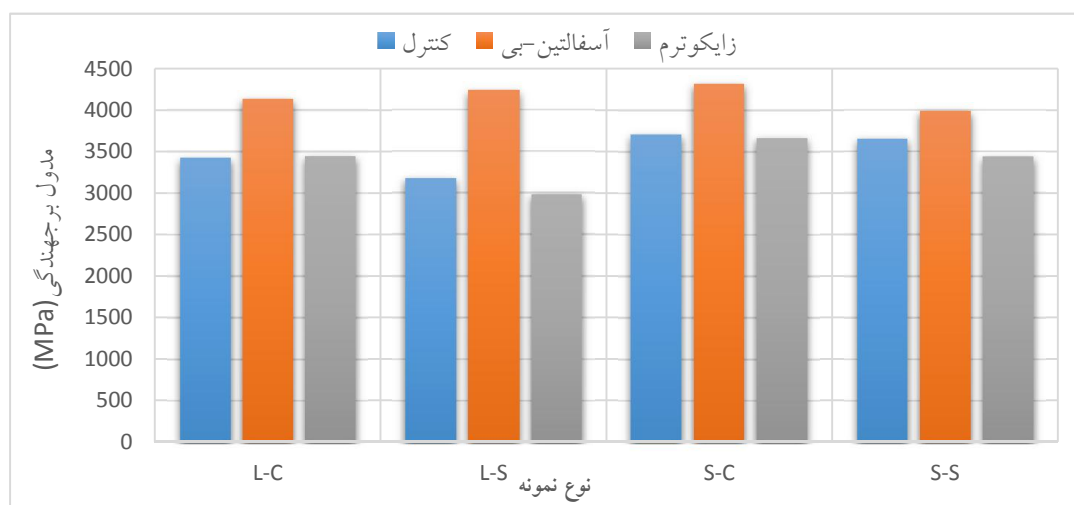
شکل ۵. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک



شکل ۶. نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تر (عمل آوری شده)



شکل ۷. نتایج نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR)



شکل ۸. نتایج مدول برجهنگی

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

۲-۵ 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 می‌شود به صورتی که به‌طور میانگین ۲۰ درصد مدول برجهندگی را نسبت به 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 مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح سرباره‌ای به دلیل دارا بودن سختی بیشتر نسبت به مصالح سنگی آهکی باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط‌های 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.

۳-۵ آزمایش خزش دینامیکی

شکل ۹ نتایج خزش دینامیکی و عدد روانی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. آسفالتن-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 پژوهش‌های مختلف نتایج 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 که 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 مخلوط‌های آسفالتی داغ مقایسه گردید که در ادامه به صورت مختصر نتایج مهم ارائه می‌گردد:

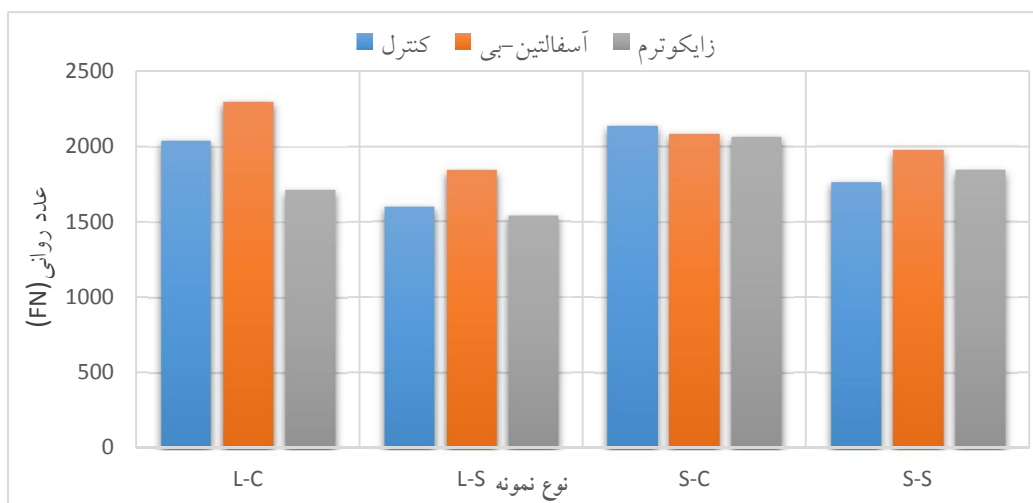
- نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نشان‌دهنده آن است که در حالت خشک مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد افزودنی آلی باعث افزایش مقاومت مخلوط نسبت به مخلوط آسفالتی داغ می‌شود درحالی‌که زایکوترم باعث

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 به‌طور کلی 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.

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 می‌شود. مصالح سنگی سرباره فولادی و آهکی هر دو به یک نسبت به رطوبت حساس هستند و نتایج نزدیک به هم ارائه



شکل ۹. نتایج خزش دینامیکی

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

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. در مجموع می‌توان نتیجه‌گیری 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 (۱۳۹۴) "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانورس"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال ششم، شماره ۴، ص. ۶۱۳-۶۲۶.

-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.

مخلوط‌های 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 مخلوط‌های آسفالتی حاوی مصالح آهکی در خزش دینامیکی نتایج بهتری نسبت به مدول برجهنگی 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 برجهنگی به‌عنوان معیار طراحی روسازی و اختلاف میزان مدول برجهنگی در نمونه‌های اصلاح شده گرم بخصوص نمونه حاوی آسفالتن-بی نسبت به نمونه پایه، می‌توان گفت

- 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.

-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 Amir Khanian, 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.

محمود عامری، مهدی امیری هرمزکی، مصطفی وامق، محمد مهدی 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 تگزاس 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 مصالح رو سازی و مدیریت رو سازی بوده و در حال حاضر عضو هیئت علمی 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، راه آهن و پل بوده و در حال حاضر در شرکت مهندسی مشاور در زمینه مهندسی راه سازی 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.



محمد مهدی خبیری، درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - راه و ترابری در سال ۱۳۷۸ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی 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 هیئت علمی دانشگاه یزد است.

