تأثیر افزودنی آهک هیدراته بر پارامترهای عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم (WMA)

حسن زیاری، استاد، مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
حسن دیواندری*، استادیار، عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نوشهر، نوشهر
علی محمد یاوری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: divandari@iauns.ac.ir
دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۲۸ – پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۵

چکیده

مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، در قیاس با مخلوط‌های آسفالتی متداول، دارای مزایا و معایبی می‌باشند. بیشتر مزایای مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم به دمای کم تولید، ملاحظات زیست‌محیطی، پیرشدگی کمتر قیر، کاهش مصرف سوخت و افزایش مدت زمان امکان اجرای آسفالت در طول سال مربوط می‌شود. در مورد معایب این نوع مخلوط آسفالتی نیز می‌توان به عملکرد ضعیف این آسفالت در مورد مسئله حساسیت رطوبتی اشاره داشت. در این تحقیق، اثر آهک هیدراته، که نوعی ماده اصلاح‌کننده در موارد مشابه به‌حساب می‌آید، بر اصلاح این خاصیت بررسی شده است. همچنین، بهبود سایر خواص عملکردی نظیر مقاومت شیارشدگی، مدول برجهندگی و مقاومت خزشی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در انتخاب ماده اصلاح‌کننده سعی بر آن شد تا مسئله هزینه و قابلیت دسترسی برای تولید تا حد امکان مورد توجه قرار داده شود تا مزیت عمده آسفالت نیمه‌گرم، که کاهش هزینه‌های تولید مخلوط مذکور می‌باشد، به قوت خود باقی بماند. بدین منظور، مقادیر مختلف آهک هیدراته (صفر، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد وزن کل مصالح سنگی) به عنوان فیلر به مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم اضافه شد و آزمایش‌های خزش، حساسیت رطوبتی، مدول ارتجاعی و شیارشدگی انجام شد. از نتایج به‌دست آمده این‌گونه نتیجه‌گیری شد که آهک هیدراته می‌تواند به عنوان یک اصلاح‌کننده ضد عریان‌شدگی و مقاوم در برابر حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از این ماده به عنوان جایگزین بخشی از فیلر در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم به میزان ۲٪ وزن مصالح سنگی توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آهک هیدراته، آسفالت نیمه‌گرم، حساسیت رطوبتی، مقاومت خزشی، شیارشدگی.

۱. مقدمه

بخش اعظم روسازی راه‌ها را رویه‌های بتن آسفالتی تشکیل می‌دهند که کیفیت مناسب و افزایش عمر آن‌ها می‌تواند نقش به‌سزایی در صرفه‌جویی هزینه‌های جاری و نگهداری این راه‌ها ایفا نماید. در همین راستا و با توجه به این که هر کشوری با حجم انبوهی از تولید آسفالت مواجه است، فناوری‌های جدید تولید و اجرای

مخلوط‌های آسفالتی مانند آسفالت نیمه‌گرم[1] در حال گسترش هستند و موضوع آسفالت نیمه‌گرم حدود ۱۲ سال پیش در آمریکای شمالی و ایالات متحده آمریکا به طور جدی مطرح شده است (باتون و همکاران، ۲۰۰۷ و کریست‌جانس‌دوتیر، ۲۰۰۶). دمای تولید مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌باشد و این یک مزیت اساسی برای این نوع آسفالت به شمار می‌آید (باتون و همکاران، ۲۰۰۷؛ دآنجلو و همکاران، ۲۰۰۸ و کریست‌جانس‌دوتیر، ۲۰۰۶). فناوری‌های تولید آسفالت نیمه‌گرم شامل تولید مخلوط‌های کف قیری و همچنین استفاده از انواع مواد افزودنی به منظور کاهش کندروانی قیر می‌باشد (دآنجلو و همکاران، ۲۰۰۸).

دمای کم برای تولید مزیت‌هایی از جمله کاهش هزینه تولید، کاهش مصرف سوخت، کاهش پیرشدگی[2] قیر، کاهش آلاینده‌های محیط‌زیست و افزایش مدت زمان امکان اجرای آسفالت را در پی خواهد داشت. اما این کاهش دمای تولید معایبی را نیز به دنبال دارد که می‌توان به مسئله افزایش حساسیت رطوبتی[3] این نوع مخلوط آسفالتی اشاره کرد.

۲. اهمیت موضوع

مطابق با توضیحاتی که در مقدمه داده شد، آسفالت نیمه‌گرم ضمن مزایای عمده و فراوانی که دارد دارای معایبی نیز می‌باشد که می‌توان به عملکرد ضعیف این آسفالت در مورد مسئله حساسیت رطوبتی، مقاومت کمتر در مقابل شیارشدگی و مقاومت خزشی اشاره کرد. در بررسی این پدیده می‌توان گفت که کاهش دمای اختلاط سبب می‌شود آب محبوس در مصالح به‌خوبی تبخیر نشود؛ ضمن این که کاهش دمای اختلاط قیر با مصالح سبب افزایش ویسکوزیته قیر شده و باعث می‌شود قیر به درستی سطح مصالح را اندود نکند. در نهایت، این دو عامل سبب بروز خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی می‌شوند (زیاری و همکاران، ۱۳۹۴).

برای اصلاح این خواص، نیاز است تا با افزودنی‌های اصلاح‌کننده ضد عریان‌شدگی، خواص عملکردی این مخلوط آسفالتی مورد ارزیابی مجدد قرار گیرد. در مورد انتخاب این افزودنی باید مسئله هزینه و قابل دسترس بودن در داخل کشور مورد توجه قرار داده شود زیرا یکی از مزایای اصلی آسفالت نیمه‌گرم مسئله کاهش هزینه تولید به وسیله کاهش مصرف سوخت می‌باشد. برای قابل اجرا شدن آسفالت نیمه‌گرم در فرایند تولید انبوه آسفالت کشور، نباید مزیت کاهش مصرف سوخت نادیده گرفته شود. بدین منظور، از بین تمامی افزودنی‌های موجود، مانند پلیمرها، مواد نانو و سایر اصلاح‌کننده‌ها، آهک هیدراته[4] به عنوان ماده اصلاح‌کننده در این تحقیق انتخاب شد.

در راه‌سازی، آهک در دو بخش زیرسازی (تحکیم بستر) و روسازی (بتن آسفالتی) کاربرد دارد. استاندارد AASHTO-M303 به توصیف مشخصات فیزیکی و شیمیایی آهک هیدراته جهت استفاده در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته است. تحقیقات و آزمایش‌های وسیعی پیرامون استفاده از آهک هیدراته در آسفالت گرم انجام شده که نتایج آن‌ها حاکی از اثر شگرف این ماده بر بهبود خواصی از آسفالت گرم[5] نظیر حساسیت رطوبتی و مقاومت شیارشدگی می‌باشد (استروپ- گاردینر و نیوکمب، ۱۹۹۰).

استفاده از آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی گرم از دهه ۱۹۷۰ میلادی در آمریکا شروع شد و پس از سال‌ها تحقیق، امروزه به عنوان یکی از مؤثرترین

1- Warm mix asphalt (WMA)
2- Aging
3- Moisture damage
4- Hydrated lime
5- Hot mix asphalt (HMA)

افزودنی‌ها در آسفالت به شمار می‌آید. در حال حاضر، حدود ۱۰٪ مخلوط‌های آسفالتی گرم تولیدی در آمریکا حاوی آهک هیدراته هستند (لسور و همکاران، ۲۰۱۲).

۳. مروری بر پژوهش‌های پیشین

۳-۱. آهک هیدراته

نخستین بار، آهک به دلیل قابلیتش در کاهش پتانسیل عریان‌شدگی، در ساخت مخلوط آسفالتی گرم مورد استفاده قرار گرفت. تحقیقات و تجربیات بعدی نشان داد که فواید آهک بسیار بیشتر بوده و شامل موارد زیر می‌باشد (لیتل و اپس، ۲۰۰۱ و انجمن ملی آهک، ۲۰۰۱).

- کاهش عریان‌شدگی
- افزایش سختی مخلوط، بخصوص در هوای گرم و کاهش شیارافتادگی[1]
- مقابله با اکسیداسیون و تبعات آن و سخت شدن آسفالت با گذشت زمان یا پیری آسفالت
- ایجاد انعطاف‌پذیری در برابر شکنندگی، بهبود مقاومت در برابر ترک ناشی از خستگی[2] و ترک خوردگی[3] در هوای سرد.
- تغییر خواص خمیری ریزدانه‌های رسی موجود در مخلوط.

آهک هیدراته به روش‌های مختلف می‌تواند به مخلوط آسفالتی اضافه شود. عموماً، نسبت مورد استفاده ۱٪ وزن مخلوط است. هر چند، در حالاتی که انتظار عریان‌شدگی شدید وجود دارد، مقدار تقاضا می‌تواند افزایش یابد (زیاری و بدری، ۱۳۸۲).

به هر حال، در هر مورد لازم است درصد مناسب آهک و روش افزودن آن به وسیله آزمایش، با توجه به شرایط پروژه و مقاومت مطلوب تعیین شود. روش‌های زیر معمولاً بیشترین استفاده را دارند (لیتل و اپس، ۲۰۰۱ و انجمن ملی آهک، ۲۰۰۱):

- روش خشک یا افزودن به صورت فیلر
- روش آهک خشک روی سنگدانه‌های مرطوب
- روش دوغاب آهک

روش خشک: در این روش، آهک هیدراته به صورت فیلر در محلی که قیر وارد مخلوط‌کن می‌شود، اضافه می‌گردد. یکی از معایب عمده این روش، عدم فرصت-دهی کافی برای ترکیب شیمیایی آهک و سنگدانه است که باعث شده این روش علی‌رغم این که ساده‌ترین روش اجرایی می‌باشد، کمتر مورد استفاده قرار گیرد. عیب دیگر این روش، تلفات آهک در موقع افزودن آن به مخلوط می‌باشد.

روش آهک خشک روی سنگدانه‌های مرطوب: در این روش، سنگ‌دانه‌ها باید حدود ۲ الی ۳ درصد بیشتر از حالت اشباع با سطح خشک[4]، مرطوب شوند. سپس، آهک هیدراته روی مصالح سنگی که روی یک تسمه حرکت می‌کنند به صورت مساوی توزیع می‌شود.

روش دوغاب آهک: برای تهیه دوغاب آهک می‌توان از آهک هیدراته یا حتی آهک زنده استفاده کرد. مسلماً استفاده از آهک هیدراته همیشه بر آهک زنده ترجیح دارد. چون اگر آهک زنده به صورت شکفته نشده در مخلوط آسفالتی باقی بماند و در مدت عمر سرویس‌دهی با آب تماس یابد، هیدراته می‌شود. این واکنش انبساطی است و با انبساط مخلوط آسفالتی، از استحکام و کارایی آن می‌کاهد. دوغاب آهک با آبی معادل ۳٪ وزن سنگدانه‌ها تهیه می‌شود (لاوین، ۱۹۹۹). در این روش، چون نسبت به روش قبلی آب بیشتری افزوده می‌شود، مصرف سوخت افزایش یافته و تولید آسفالت کاهش می‌یابد. همچنین، استفاده از دوغاب آهک، مستلزم خریداری یا کرایه نمودن تجهیزات

1- Rutting
2- Fatigue
3- Cracking

4- Saturated surface dry (SSD)

ویژه‌ای برای تهیه دوغاب آهک است.

۳-۲. آهک هیدراته در آسفالت گرم

پژوهش‌های زیادی در مورد کاربرد آهک هیدراته برای اصلاح خواص عملکردی آسفالت گرم صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات زیر اشاره داشت:

در تحقیقی، اثر افزودنی آهک هیدراته بر شیارشدگی مخلوط آسفالتی گرم مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از آزمایش میزان اثر چرخ در حالت مرطوب در دمای ۶۴ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. نتیجه تحقیق این بود که مخلوط آسفالتی بدون آهک هیدراته پس از ۳۵۰۰ سیکل، عمق شیار ۱۲ میلی‌متر را تجربه کرد. در حالی که مخلوط آسفالتی حاوی آهک هیدراته، عمق شیار حدود ۶ میلی‌متر را پس از ۸۰۰۰ سیکل آزمایش نتیجه داد. این موضوع حاکی از افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی با افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی می‌باشد (کیم و همکاران، ۲۰۱۲).

در تحقیقات سنگول و همکاران (۲۰۱۲) نشان داده شد که افزایش میزان آهک هیدراته از ۲ تا ۶ درصد باعث افزایش شاخص نسبت مارشال و به تبع آن افزایش مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی می‌گردد.

نتایج یک پژوهش حسین و اولاه (۲۰۱۱) نشان داد که افزودن آهک هیدراته به میزان ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد باعث افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم[1] به اندازه ۳/۳، ۵/۳، ۶/۵ و ۸/۱ درصد گردید.

بحیری (۲۰۱۳) در مصر، جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از سه آزمایش کشش غیر مستقیم، نسبت مارشال و نسبت مقاومت باقی‌مانده (در دو حالت خشک و اشباع) و از دو ماده افزودنی آهک هیدراته و سیمان استفاده کرد. نتیجه این مطالعه آن بود که مخلوط‌های آسفالتی حاوی آهک هیدراته دارای TSR[2]، نسبت مارشال و نسبت مقاومت باقی‌مانده بالاتری نسبت به مخلوط‌های آسفالتی متداول (بدون ماده افزودنی) و نیز مخلوط‌های آسفالتی حاوی سیمان در دو حالت خشک و اشباع هستند. لذا، مشخص شد که آهک هیدراته افزودنی بهتری جهت کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در مقایسه با سیمان است.

در یک پژوهش آزمایشگاهی، به منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آهک هیدراته به میزان ۲٪ وزن خشک مصالح سنگی و از آزمایش میزان اثر چرخ استفاده شد. جهت انجام این آزمایش در حالت اشباع، دال‌های بتن آسفالتی به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس، آزمایش در دو حالت خشک و اشباع و در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پارامتر مورد استفاده جهت ارزیابی اثر آب و حساسیت رطوبتی، نشانه شیارشدگی بود. نشانه شیارشدگی نسبت پارامتر عمق شیارشدگی در حالت اشباع به عمق شیارشدگی در حالت خشک است. نتایج حاکی از اثر قابل ملاحظه آهک هیدراته در بهبود عملکرد در آزمایش‌های فوق می‌باشد (شیواپراساد و شیائو، ۲۰۱۲).

خلاصه‌ای از تحقیقات صورت گرفته در اروپا در زمینه استفاده از آهک هیدراته به منظور بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی گرم در جدول ۱ ارائه شده است.

1- Indirect tensile

2- Tensile strength ratio

جدول ۱. کاربرد آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی در اروپا (انجمن آهک اروپا، ۲۰۱۱)

کشور	سال استفاده	درصد آهک هیدراته	روش افزودن	هدف	موارد کاربرد
بلژیک	دهه ۱۹۸۰	۱/۵	مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی	SMA, PA
فرانسه	۱۹۹٤	۱ تا ۱/۵	خشک یا مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی، پیری و غیره	AC, CMA, PA
هلند	میانه دهه ۱۹۹۰	۲	مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی، پیری و دوام	PA
ایتالیا	میانه دهه ۱۹۹۰	۱ تا ۲	مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی	SMA, PA
دانمارک	میانه دهه ۱۹۹۰	۱ تا ۱/۵	خشک	عریان‌شدگی، پیری و غیره	AC
چک	۱۹۹٦	۱/۵	خشک	عریان‌شدگی و شیارشدگی	AC, PA
فنلاند		۱ تا ۲	خشک یا مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی، پیری و غیره	AC, SMA, CMA
لهستان	۱۹۹۸	۱ تا ۳	مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی	AC
سوئد	۱۹۹۸	۱	خشک	عریان‌شدگی و پیری	AC
انگلیس	قبل از ۲۰۰۰	۱ تا ۲	خشک	عریان‌شدگی	AC
آلمان	۲۰۰۰	۱ تا ۳	خشک یا مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی و پیری	AC, SMA
پرتغال	اوایل ۲۰۰۰	۱ تا ۲	خشک	عریان‌شدگی	PA
ایرلند	۲۰۰۱	۲	خشک	عریان‌شدگی و پیری	PA
استرالیا	۲۰۰۳	۱/۵ تا ۳/۵	خشک	عریان‌شدگی و شیارشدگی	AC, SMA, PA
اسپانیا	۲۰۰٤	۱ تا ۲	خشک	عریان‌شدگی	SMA
سوئیس	۲۰۰٦	۱/۵	خشک	عریان‌شدگی، پیری و دوام	PA, AC, SMA
رومانی	۲۰۰۷	۲	مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی و شیارشدگی	AC, SMA
اسلواکی	۲۰۰۹	۲	خشک یا مخلوط شده با فیلر	عریان‌شدگی	AC
مجارستان	۲۰۰۹	۲	تعریف نشده	عریان‌شدگی و شیارشدگی	AC

۳-۳. آهک هیدراته در آسفالت نیمه‌گرم

با توجه به اینکه آسفالت نیمه‌گرم جزو فناوری‌های جدید محسوب می‌شود، تاکنون مطالعات محدودی در ایران روی اصلاح خواص آن انجام شده است. در ادامه،

به دو پژوهش در زمینه تأثیر آهک هیدراته بر اصلاح خواص آسفالت نیمه‌گرم، که در ایران صورت گرفته است، پرداخته می‌شود.

در تحقیقی که حسامی و همکاران (۲۰۱۳) انجام داده‌اند، به بررسی تأثیر آهک هیدراته به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی رایج بر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، با استفاده از روش انرژی آزاد سطح[1]، پرداخته شد. در این تحقیق، که دو نوع افزودنی نیمه‌گرم ساسوبیت[2] و آسفامین[3] را مورد بررسی قرار داده، مشاهده شد که آهک هیدراته مؤلفه اسیدی هر دو نوع مصالح سنگی را کاهش و انرژی آزاد سطح قیر را نیز افزایش می‌دهد. این تغییر در انرژی آزاد سطح، بهبود قابل توجهی را در چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی در پی دارد. همچنین، در این تحقیق به این نتیجه دست یافته شد که اختلاف بین انرژی آزاد سطح مصالح آسفالتی و مصالح خیس در نمونه‌های اصلاح نشده، در مقایسه با نمونه‌های اصلاح شده با آهک هیدراته، بیشتر است. این یعنی که در نمونه‌های اصلاح شده، انرژی بیشتری برای رخ دادن پدیده عریان‌شدگی لازم است و نرخ حساسیت رطوبتی کاهش می‌یابد.

در تحقیق دیگری که توسط خدایی و همکاران (۲۰۱۲) انجام شد، به بررسی اثر آهک هیدراته بر نتایج آزمایش ITS در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بر آسفالت نیمه‌گرم پرداخته شد. در این تحقیق، دو نوع افزودنی نیمه‌گرم ساسوبیت و آسفامین طی دو منحنی دانه‌بندی باز و پیوسته مورد استفاده قرار گرفتند. در این تحقیق، نتیجه‌گیری شد که در حالت دانه‌بندی پیوسته، افزودن آهک هیدراته افزایش قابل توجهی در مقدار ITS حالت اشباع از خود نشان داد و مقدار حداکثر آن در حالت اضافه کردن ۲٪ آهک هیدراته بوده است. همچنین، در مخلوط‌های نیمه‌گرم با دانه‌بندی پیوسته، مقدار TSR بحرانی قابل قبول (۸۰٪) با اضافه کردن ۲٪ آهک هیدراته به دست آمده است. در حالت دانه‌بندی باز، مانند دانه‌بندی پیوسته، مقدار آهک هیدراته ۲٪ به بیشترین مقدار ITS حالت اشباع منجر شد.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی خواص عملکردی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم حاوی آهک هیدراته شامل مقاومت شیارشدگی، حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی و مقاومت خزشی مخلوط و همچنین یافتن درصد بهینه آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم می‌باشد.

٤. روش تحقیق

در این پژوهش، از مصالح سنگی موجود در معادن و کارخانه‌های آسفالت حوالی شهر تهران (کارخانه آسفالت تلو) به عنوان سنگدانه‌های بکر استفاده شده است. آهک هیدراته از شرکت تهران کیمیا اسید تهیه شده است. از قیر ٦٠/٧٠ شرکت نفت پاسارگاد برای ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. نمونه‌های آسفالتی طبق دانه‌بندی شماره ٤ آیین‌نامه راه‌های آسفالتی ایران (نشریه ٢٣٤)، تجدید نظر اول، ساخته شده‌اند. ابتدا بر اساس درصد بهینه ساسوبیت برای آسفالت‌های نیمه‌گرم (۱/۵ درصد وزنی قیر)، آزمایش‌های متداول مارشال و محاسبه درصد قیر بهینه انجام می‌پذیرد و سپس با داشتن درصد قیر بهینه، به کمک دستگاه متراکم کننده چرخشی (ژیراتوری[4]) نمونه‌های لازم برای انجام تست‌های حساسیت رطوبتی، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی و آزمون شیار چرخ در دمای اختلاط ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد (دمای قیر حاوی ساسوبیت ۱۱۵ درجه سانتی‌گراد و دمای مصالح ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) آماده می‌شوند. در پایان نیز نتایج هر یک از آزمایش‌های فوق ارائه شده و تأثیر اضافه شدن آهک هیدراته به

1- Surface free energy
2- Sasobit
3- Aspha-min
4- Superpave gyratory compactor

عنوان جایگزین درصدی از فیلر روی نتایج آزمایش‌های فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

٤-١. انتخاب مصالح سنگی، فیلر و قیر

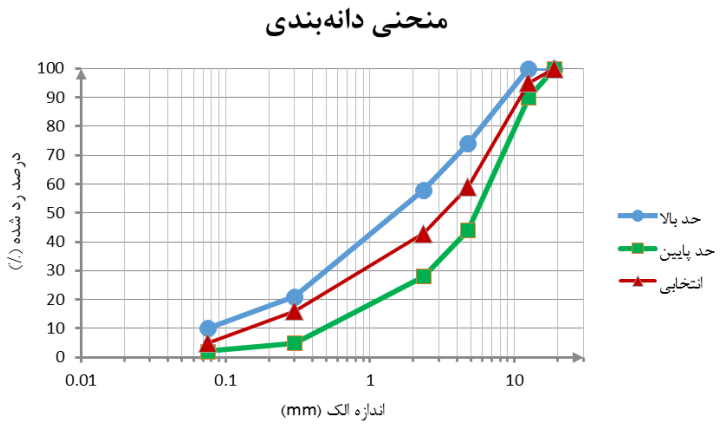
مصالح سنگی و فیلر مورد استفاده، از نوع مصالح سیلیسی بوده و از معدن تلو واقع در غرب تهران به دست آمد. برای ساخت مخلوط آسفالتی مورد آزمایش از دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ٢٣٤ (آیین نامه روسازی راه‌های ایران، ١٣٩١) که برای ساخت لایه‌های آستر و رویه روسازی پیشنهاد شده، استفاده شد. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق، مقدار حد وسط دانه‌بندی تعیین شده در شماره ٤ نشریه ٢٣٤ انتخاب شد. در جدول و شکل ، این دانه‌بندی و محدوده‌ی مربوط به دانه‌بندی شماره ٤ نشریه ٢٣٤ نشان داده شده است.

با توجه به توصیه‌های نشریه ٢٣٤، قیر ٦٠/٧٠ که مناسب برای شرایط اقلیمی گرم و معتدل ایران می‌باشد، از شرکت نفت پاسارگاد انتخاب و تهیه شد.

٤-٢. مشخصات مصالح

برای تعیین مرغوبیت مصالح سنگی، آزمایش‌های لازم روی آن‌ها صورت گرفت و نتایج در جدول آورده شده است. در جدول مشخصات فیلر استفاده شده آورده شده است.

آزمایش‌های اولیه به منظور آگاهی از مشخصات فیزیکی قیر انجام شده و نتایج در جدول آورده شده‌اند.



شکل ١. دانه‌بندی انتخاب شده برای ساخت نمونه‌ها

جدول ٢. دانه‌بندی پیوسته شماره ٤ برای رویه بر اساس آیین‌نامه شماره ٢٣٤ و دانه‌بندی انتخابی

شماره الک	اندازه الک	محدوده مجاز درصد وزنی رد شده	درصد وزنی عبوری انتخابی	درصد مانده روی هر الک	مقدار مانده به ازای ١٢٠٠ گرم
٣/٤ اینچ	١٩ میلی‌متر	١٠٠	١٠٠	٠	٠
١/٢ اینچ	١٢/٥ میلی‌متر	٩٠–١٠٠	٩٥	٥	٦٠
شماره ٤	٤/٧٥ میلی‌متر	٤٤–٧٤	٥٩	٣٦	٤٣٢
شماره ٨	٢/٣٦ میلی‌متر	٢٨–٥٨	٤٣	١٦	١٩٢
شماره ٥٠	٠/٣ میلی‌متر	٥–٢١	١٦	٢٧	٣٢٤
شماره ٢٠٠	٠/٠٧٥ میلی‌متر	٢–١٠	٥	١١	١٣٢
فیلر	٠	٠	٠	٥	٦٠

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های به‌کار رفته در تحقیق

خصوصیات فیزیکی	استاندارد	حداقل	حداکثر	نتایج
وزن مخصوص مصالح ریزدانه (gr/cm^3)	ASTM C127	–	–	۲/٦۱
جذب آب (٪)	ASTM C127	–	۲/۵	۰/۷
وزن مخصوص مصالح درشت‌دانه (gr/cm^3)	ASTM C128	–	–	۲/٦۳
سایش لس‌آنجلس (٪)	ASTM C131	–	۳۰	۲۳/۵
شکستگی در دو سمت (٪)	ASTM D5821	۸۰	–	۹٤
شکستگی در یک سمت (٪)	ASTM D5821	۵۰	–	۹۷
ارزش ماسه‌ای (٪)	ASTM D2419	٤۵	–	۷٤

جدول ٤. مشخصات فیلر به‌کار رفته در تحقیق

خصوصیات فیزیکی	استاندارد	حداقل	حداکثر	نتایج
دامنه خمیری PI (٪)	ASTM D4318	–	غیر خمیری	غیرخمیری
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (٪)	ASTM C88	–	۱۲	۲/۲۱
ارزش ماسه‌ای (٪)	ASTM D2419	۵۰	–	۷٦

جدول ۵. مشخصات قیر به‌کار رفته در این تحقیق

آزمایش قیر	استاندارد	حداقل	حداکثر	نتایج
درجه نفوذ (دهم میلی‌متر)	ASTM D5	٦۰	۷۰	٦۱
خاصیت انگمی (سانتی‌متر)	ASTM D113	۱۰۰	–	۱۰۰+
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D36	٤۹	۵٦	٤۹
درجه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D92	۲۳۲	–	۳۱۰
چگالی (gr/cm^3)	ASTM D70	۱/۰۱	۱/۰٦	۱/۰۲

٤-۳. تعیین قیر بهینه (OBC[1])

در این پژوهش، برای تعیین درصد قیر بهینه از روش طرح اختلاط آسفالت استفاده شد. پس از ساخت نمونه‌های آسفالتی آزمایش‌های مقاومت و روانی مارشال[2]، چگالی آسفالت و آزمایش رایس انجام می‌شود و نتایج به صورت نمودارهای چگالی، مقاومت مارشال، روانی، درصد فضای خالی آسفالت، درصد فضای خالی پر شده با قیر و درصد فضای خالی سنگدانه‌ها برحسب درصد قیر به دست آمده، ترسیم می‌شوند. در نهایت، با توجه به حداکثر مقاومت مارشال و چگالی و محدوده مجاز آیین‌نامه ۲۳۴ برای سایر پارامترها و نمودارها، درصد قیر بهینه برای مصالح و شرایط مورد نظر به دست می‌آید. برای تعیین درصد قیر بهینه از روش مارشال طبق آیین‌نامه ASTM D1559 استفاده شده است.

٤-٤. ساخت نمونه

به منظور ساخت نمونه‌های آسفالتی، ابتدا بر اساس نشریه ۲۳٤ برای رویه راه، درصدهای مانده روی هر

1- Optimum bitumen content
2- Marshall stability and flow

الک به دست آمده و از آنجایی کـه آهـک هیدراتـه بـه عنوان جایگزین بخشی از فیلر باید مـورد اسـتفاده قـرار می‌گرفت، مقادیر صفر، (نمونه‌های شاهد)، ۱، ۲، ۳ و ٤ درصد وزنی مصالح سنگی، از فیلر بـا توجـه بـه تعـداد مورد نیاز، با آهک هیدراته جـایگزین و تـوزین شـدند. ساخت نمونه های آسفالتی شامل سه مرحله گرم کـردن مصالح سنگی و قیر (به طور جداگانه)، مخلوط کردن و متـراکم کـردن مخلـوط مـی‌باشـد. بـرای هـر درصـد جایگزینی، ٤ سری نمونه (برای شاهد ۵ سری) سـاخته شده است. سری اول نمونـه‌هـای شـاهد مطـابق روش مارشال برای تعیین مشخصات مخلوط‌های آسفالتی اعم از استحکام مارشال، روانی، درصد فضای خالی و سـایر سری‌ها برای آزمایش‌هـای حساسـیت رطـوبتی، تعیـین مدول برجهندگی، آزمایش خزش دینـامیکی و آزمـایش ویل تراک مـورد اسـتفاده قـرار گرفتنـد کـه بـه منظـور یکنواختی و دقت ساخت، به وسیله دسـتگاه ژیراتـوری ساخته شده‌اند.

در این تحقیق، بـا توجـه بـه اسـتاندارد ASTM D6935، تعـداد ۹۰ نمونـه جهـت انجـام آزمـایش عملکردی با استفاده از دستگاه متراکم کننده ژیراتوری و بـر مبنـای وزن مخصـوص واقعـی و وزن مخصـوص حداکثری که از آزمایش‌های مارشال به دست آمده بـود ساخته شدند. طبق استاندارد AASHTO T283، فضـای خالی نمونه‌ها برای آزمایش‌ها باید ٤٪ باشـد. بنـابراین، دستگاه، نمونه‌ها را تحت زاویه ۱/۲۵ درجه، اعمال تنش ۶۰۰ کیلوپاسـکال و بـا سـرعت ۳۰ دور در دقیقـه تـا رسیدن به فضای خالی ٤٪ متراکم کرد.

٤-۵. آزمایش‌های انجام شده

پس از انجام آزمایش‌های روانی و اسـتحکام مارشـال و آزمایش رایس برای تعیین درصـد قیـر بهینـه، آزمـایش حساسـیت رطـوبتی طبـق اسـتاندارد ASTM D4867، آزمـایش مـدول برجهنـدگی طبـق اسـتاندارد ASTM D4123، آزمایش خـزش طبـق اسـتاندارد Australian: AS2891-12-1 و آزمایش شیار جای چـرخ بـه وسـیله دستگاه ویل ترک ساخته شده در مرکز تحقیقات قیـر و مخلوط‌های آسفالتی(ABRC[1]) انجام شد.

٤-۵-۱. آزمایش حساسیت رطوبتی

در این آزمایش، برای هر درصد آهک هیدراتـه، ۶ عـدد نمونه ساخته می‌شود که ۳ عدد آنها به صورت خشک و سه نمونه تحت شرایط مرطـوب (اشـباع و سـپس طـی کردن سیکل‌های انجماد و ذوب) مـورد آزمـایش قـرار می‌گیرند. پس از اشباع کردن نمونـه‌هـایی کـه بایـد در حالت مرطوب آزمایش شوند، به مدت ۲۴ ساعت آن‌ها در حمام آب گرم با دمای ۶۰ درجـه سـانتی‌گـراد قـرار می‌گیرند. یک ساعت قبل از انجام آزمایش، دمای حمام آب گرم بدون دسـت زدن بـه نمونـه‌هـا بـه ۲۵ درجـه سانتی‌گراد رسانده می‌شود.

بعد از اینکه مقاومت کششی نمونه‌های خشک و مرطوب تعیین شد، نسبت مقاومت کششی حالت اشباع به مقاومت کششی حالت خشک محاسبه می‌گردد. ایـن نسبت که TSR نام دارد معیاری برای سنجش حساسیت مخلـوط‌هـای آسـفالتی در برابـر رطوبـت مـی‌باشـد (AASHTO T283، ۱۹۸۹).

1- Asphalt Mixtures and Bitumen Research Center

شکل ۲. دستگاه آزمایش کشش غیرمستقیم

شکل ۳. فک دستگاه UTM5 مربوط به آزمایش مدول برجهندگی

۴-۵-۲. آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق، مدول برجهندگی با استفاده از فریم آزمایش کشش غیر مستقیم در دستگاه UTM5 مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران، طبق استاندارد ASTM D4123، در دمای ۲۵ درجه مورد آزمایش قرار گرفت.

استاندارد دستگاه آزمایش طبق استاندارد ASTM D4123 و به صورت زیر بوده است:

شکل بارگذاری: زنگوله‌ای

زمان دوره بارگذاری: ۰/۱ ثانیه

دوره بارگذاری: ۱ ثانیه

تعداد سیکل پیش‌بارگذاری: ۵۰ سیکل

تعداد سیکل بارگذاری اصلی: ۵ سیکل

بار اعمال شده: ۴۵۰ نیوتن

ضریب پوآسن فرض شده اولیه: ۰/۳۵

۴-۵-۳. آزمایش خزش دینامیکی

هدف از انجام این آزمایش، مطالعه عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌باشد. مهمترین پارامتر به دست آمده از آزمایش خزش، نمودار تغییرشکل دائمی می‌باشد که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد.

این آزمایش بر اساس استاندارد Australian: AS2891-12-1 و با استفاده از دستگاه UTM5 واقع در مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. از هر درصد آهک هیدراته بر اساس درصد قیر بهینه، ۳ عدد نمونه ساخته شده و به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می گیرد. طبق استاندارد فوق، اعمال بار به شکل مربعی با زمان بارگذاری ۵۰۰ ms و زمان استراحت ۱۵۰۰ ms و تنش تماسی اولیه۱۰ kpa و تنش در مرحله بارگذاری برابر ۴۵۰ kpa می‌باشد. این تست برای هر نمونه تا زمان ۴۰۰۰۰ سیکل بارگذاری و یا رسیدن به کرنش ۳۰۰۰۰ micro-strain ادامه می‌یابد.

شکل ٤. شمای کلی دستگاه UTM5

شکل ٥. فک دستگاه UTM5 مربوط به آزمایش خزش

۴-۵-۴. آزمایش شیار جای چرخ[1]

برای این آزمایش، ابتدا از هر نوع مخلوط سه نمونه به مدت ۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می گیرد. سپس، نمونه‌های استوانه‌ای در دستگاه قرار گرفته و توسط دو چرخ که حول مرکزشان دوران می‌کنند، با فشار حدود ۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، مورد بارگذاری قرار می‌گیرند. فرکانس بارگذاری برای هر نمونه ۱ هرتز و دمای آزمایش ۵۰ درجه سانتی‌گراد می باشد. در مجموع، نمونه‌ها تحت ۸۰۰۰ سیکل بارگذاری قرار گرفتند و پس از آن بیشترین عمق شیار به وجود آمده در هر نمونه اندازه‌گیری می‌شود. میانگین عمق شیار سه نمونه به عنوان عمق شیار هر نوع مخلوط به دست آمد.

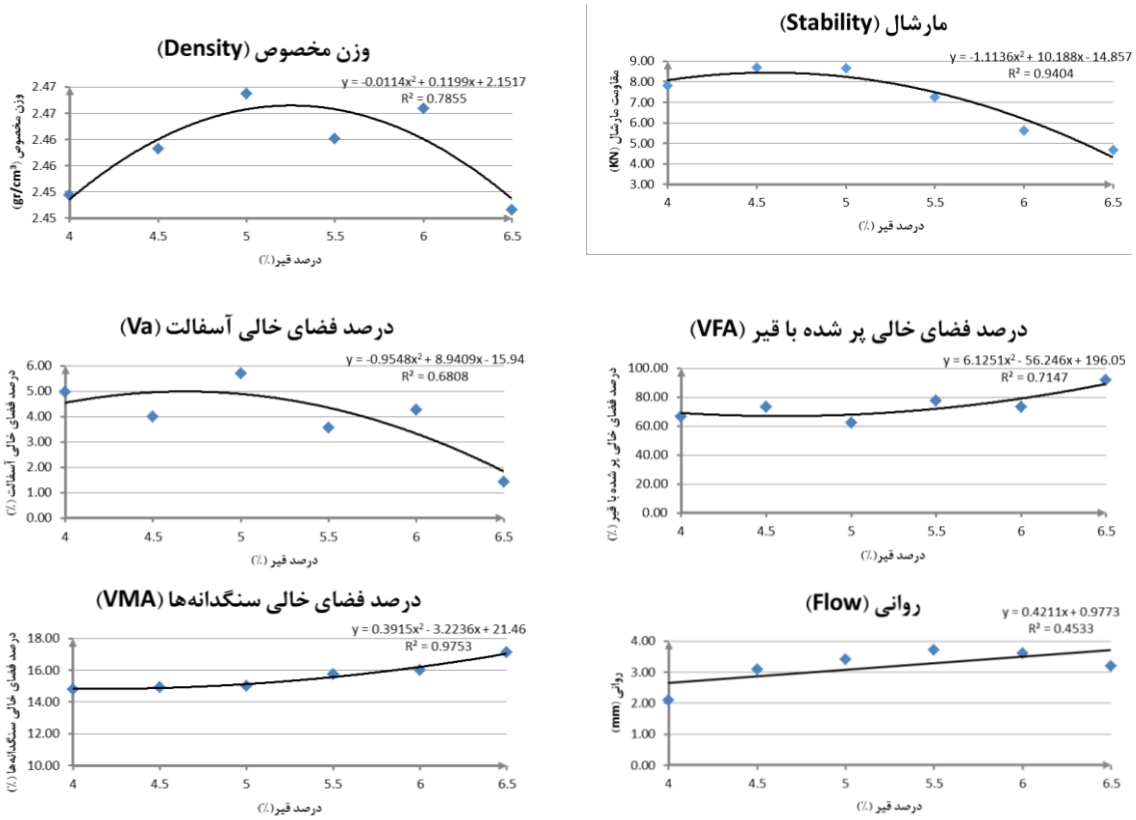
شکل ٦. دستگاه ویل ترک ساخته شده در مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی

۵. نتایج

۵-۱. نتایج آزمایش‌های مارشال

آزمایش‌های مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 برای ۷۵ ضربه در هر طرف نمونه، برای نمونه‌های بدون آهک هیدراته انجام شد. شکل ، نتایج آزمایش‌های مارشال را برای نمونه‌های مذکور نشان می‌دهد.

[1] Wheel Track

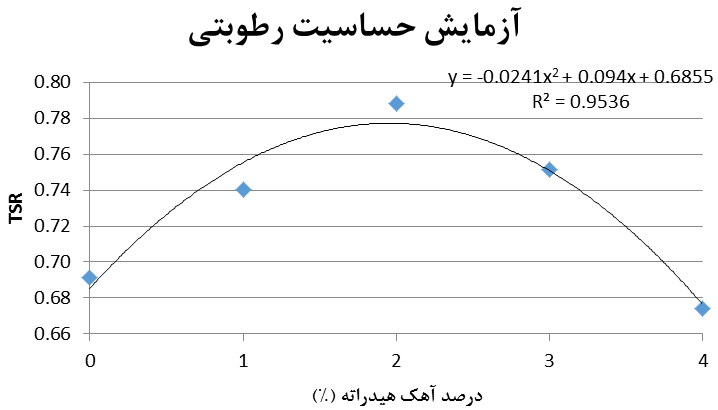


شکل ۷. نتایج آزمایش‌های مارشال برای نمونه‌های شاهد

درصد قیر بهینه، میانگین درصد قیرهای مربوط به بیشترین استقامت مارشال و بیشترین وزن مخصوص می‌باشد که باید سایر پارامترها شامل درصد فضای خالی آسفالت، روانی، درصد فضای خالی پر شده با قیر و درصد فضای خالی مصالح سنگی نیز در محدوده مجاز طبق آیین‌نامه ۲۳٤ قرار گیرند. درصد قیر بهینه برای نمونه‌های فوق برابر ۵/۱ درصد تعیین شد.

۵-۲. نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی

بنا بر استاندارد ASTM D4867 تعداد ۳۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. به طوری که برای هر درصد آهک هیدراته تعداد ٦ نمونه برای این آزمایش فراهم شد. نتایج مطابق شکل است.

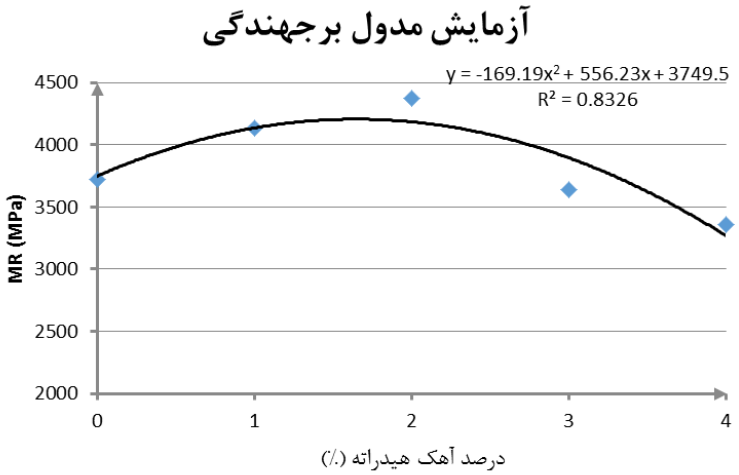


شکل ۸ نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی برای مخلوطهای حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

با مشاهده نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد که با افزایش درصد آهک هیدراته تا ۱/۹۵ درصد، میزان مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم افزایش یافته، ولی بعد از آن کاهش چشمگیری در مقاومت کششی مشاهده می‌شود.

۵-۳. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق، مدول برجهندگی با استفاده از فریم آزمایش کشش غیرمستقیم در دستگاه UTM5 مرکز تحقیقات قیر و آسفالت دانشگاه علم و صنعت ایران، طبق استاندارد ASTM D4123 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل آورده شده است.



شکل ۹. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای مخلوط‌های حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

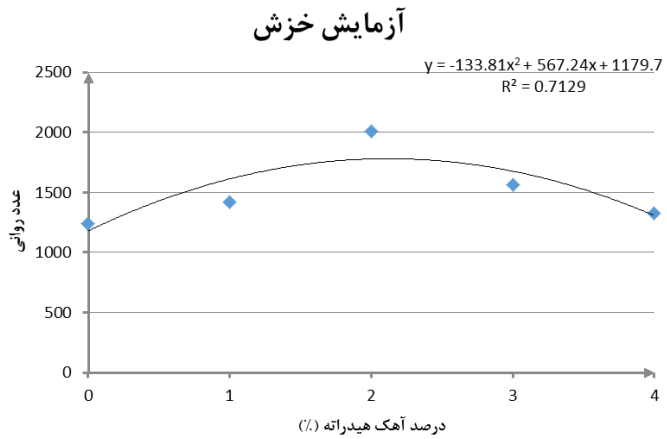
همان‌طور که مشهود است، مدول برجهندگی نمونه‌ها تا ۱/٦٤ درصد آهک هیدراته افزایش یافته و بعد از آن کاهش شدیدی می‌یابد. حتی در ٤٪ آهک هیدراته مشاهده می‌شود که مدول برجهندگی از نمونه شاهد نیز کمتر می‌باشد.

٥-٤. نتایج آزمایش خزش

نتایج این آزمایش به‌صورت منحنی کرنش دائمی[1] تجمعی در برابر تعداد سیکل‌های بارگذاری ارائه می‌شود. منحنی کرنش تجمعی به سه ناحیه اول تا سوم تقسیم می‌شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عنوان عدد روانی[2] شناخته می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش مطابق شکل ۱۰ می‌باشد.

1- Permanent deformation

2- Flow number

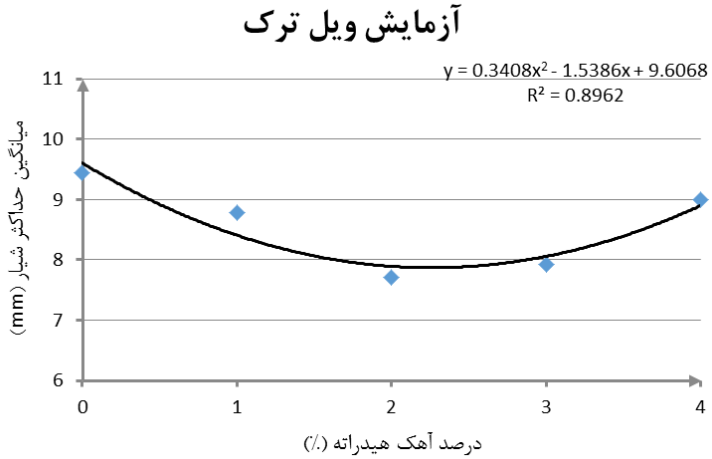


شکل ۱۰. نتایج آزمایش خزش دینامیکی برای مخلوطهای حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

همان‌طوری که در شکل و نتایج آزمایش خزش مشهود است، مقاومت مخلوطهای نیمه‌گرم حاوی آهک هیدراته در برابر تغییرشکل پایدار، با افزایش میزان آهک هیدراته در مخلوط تا ۲/۱۲ درصد، افزایش می‌یابد.

۵-۵. نتایج آزمایش شیار جای چرخ

شکل نتایج آزمایش شیار جای چرخ (ویل تراک) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش شیار چرخ برای مخلوطهای حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

نتایج آزمایش ویل تراک هم با نتایج آزمایش خزش مطابقت می‌کند و افزودن آهک هیدراته تا ۲/۲۶ درصد به جای درصدی از فیلر باعث کاهش عمق شیارشدگی در مخلوطهای آسفالتی می‌شود. در حالی که با اضافه کردن بیش از ۳٪ آهک هیدراته در مخلوط، عمق شیار به طور محسوسی بالا می‌رود.

٦. بحث

در این تحقیق، به بررسی تأثیر استفاده از آهک هیدراته در مخلوطهای آسفالت نیمه‌گرم پرداخته شد. نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق در ۵ حالت مختلف: شاهد، ۱، ۲، ۳ و ٤ درصد آهک هیدراته، که به عنوان جایگزین بخشی از فیلر به مخلوط اضافه شده بود،

ساخته شدند.

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که استفاده از ۲٪ آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم تأثیر مثبتی روی مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی، میزان خزش و شیارشدگی نمونه‌ها دارد. افزایش میزان آهک هیدراته بیشتر از ۲٪ باعث کاهش عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر آزمایش‌های صورت گرفته شد.

- استفاده از آهک هیدراته تا میزان ۲٪، مدول برجهندگی را در مخلوط به میزان ۱۸٪ افزایش می‌دهد و پس از آن با افزایش آهک هیدراته، این مقدار ۲۰٪ کاهش می‌یابد.
- در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، با افزایش آهک هیدراته، مقاومت در برابر رطوبت به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد. به طوری که پارامتر حساسیت رطوبتی از ۰/۶۹ به ۰/۷۹ افزایش می‌یابد.
- با افزایش میزان آهک هیدراته در مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل دائمی افزایش می‌یابد. اما پس از آن با افزودن ٤٪ آهک هیدراته، مقاومت در برابر شیارشدگی به میزان ۱۷٪ نسبت به نمونه حاوی ۲٪ آهک هیدراته کاهش می‌یابد.
- با افزایش میزان آهک هیدراته تا ۲٪، مقاومت خزشی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم تا ٦۰٪ افزایش یافته و پس از آن با کاهش مقاومت خزشی روبرو می‌شویم. مشاهده می‌شود که نتایج آزمایش خزش با آزمایش شیارشدگی کاملاً مطابقت داشته و آن را تأیید می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده و بحث فوق، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از آهک هیدراته تا میزان ۲٪ وزن مصالح سنگی باعث بهبود اکثریت ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم اعم از مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و شیارشدگی می‌شود.

۸. سپاسگزاری

وظیفه خود می‌دانم کمال سپاس را از پرسنل مرکز تحقیقات قیر و مخلوط‌های آسفالتی که راهنمایی‌ها و پشتیبانی‌های بی‌دریغ ایشان در تمام مراحل انجام این پژوهش روشنگر راه و دلگرمی برای اینجانب بوده است، به جای آورم.

۹. مراجع

زیاری، ح. و بدر، م. ۱۳۸۲. نقش آهک هیدراته در بهبود دوام مخلوطهای آسفالتی گرم. اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

زیاری، ح.، میرزابابایی، پ.، باباگلی، ر. و منیری، ع. ۱۳۹٤. تأثیر نوع مصالح بر خواص عملکردی آسفالت نیمه‌گرم اصلاح شده با زایکوترم. مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۳: ٦۳-۷٦.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور. ۱۳۹۱. آیین‌نامه روسازی راه های ایران. نشریه ۲۳٤، تجدید نظر اول.

AASHTO T283. 1989. "Standard method of test for resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage". 19th edn., American Association of State Highway and Transportation Officials.

Behiry, A. E. A. E. M. 2013. "Laboratory evaluation of resistance to moisture damage in asphalt mixtures". Ain Shams Eng. J., 4(3): 351-363.

Button, J. W., Estakhri, C. and Wimsatt, A. 2007. "A synthesis of warm mix asphalt". Texas Transportation Institute, 7(2): 94.

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

European Lime Association. 2011. "Hydrated lime a proven additive for durable asphalt pavements".

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". Constr. Build. Mater., 47: 935-941.

Hossain, M. K. and Ullah, F. 2011. “Laboratory evaluation of lime modified asphalt concrete mixes with respect to moisture susceptibility”. Int. J. Civil Environ. Eng., 11: 45-52.
Khodaii, A., Kazemi Tehrani, H. and Haghshenas, H. F. 2012. “Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt”. Constr. Build. Mater., 36: 165-170.
Kim, Y. R., Pinto, I. and Park, S. W. 2012. “Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results”. Constr. Build. Mater., 29: 386-393.
Kristjansdottir, O. 2006. “Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving”. Univ. of Washington, 117.
Lavin, P. A. 1999. “A comparison of liquid antistrip additives and hydrated lime using AASHTO T-283”. Constr. Chem. Technic. Director, 1: 1-12.
Lesueur, D., Petit, J. and Ritter, H. J. 2012. “Increasing the durability of asphalt mixtures by hydrated lime addition: What evidence?”. Europ. Roads Rev., 20: 48-55.
Little, D. N. and Epps, J. A. 2001. “The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt”. National Lime Association, April.
National Lime Association. 2001a. “Hydrated Lime- A Solution for High Performance Hot Mix”. National Lime Association.
National Lime Association. 2001b. “Hydrated Lime- More Than Just A filler”. National Lime Association.
Sengul, C. E., Aksoy, A., Iskender, E. and Ozen, H. 2012. “Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance”. Constr. Build. Mater., 30: 139-148.
Shivaprasad, P. and Xiao, F. 2012. “Moisture susceptibility and rutting resistance evaluation of foamed half-warm asphalt mixtures”. Transport. Res. Record: J. Transport. Res., Washington D. C., USA.
Stroup-Gardiner, M. and Newcomb, D. 1990. “Comparison of dolomitic and normally hydrated lime as antistripping additives”. Transport. Res. Record, 1269.