بررسی همزمان اثر پارامترهای دما و نوع ماده‌ی افزودنی بر خرابی‌های وابسته به رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی داغ

امیر کاووسی*، دانشیار، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
جواد بختیاری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

E-mail: kavussia@modares.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰۵/۳ – پذیرش: ۹۲/۰۸/۱۹

چکیده

روسازی‌هایی که در معرض رطوبت قرار دارند به سرعت دچار اضمحلال شده و از بین می‌روند. حساسیت رطوبتی[1] را می‌توان از دست دادن مقاومت و دوام ناشی از تأثیر رطوبت دانست. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که اثرات مخرب رطوبت، منجر به کاهش مدول آسفالت تا حدود ۲۵٪، افزایش شیارشدگی تا حدود ۶۰٪ و نیز افزایش خرابی‌های ناشی از خستگی تا حدود ۳۰٪ می‌شود. افزودن آهک هیدراته[2] به عنوان روشی برای کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی داغ پذیرفته شده است. در تحقیق حاضر، مصالح سنگی مورد استفاده از یک کارخانه‌ی آسفالت واقع در غرب شهر تهران و قیر مورد نیاز از پالایشگاه اصفهان تهیه و آزمایش‌های مورد نیاز روی آنها انجام شد. جهت بررسی همزمان اثر دما و ماده‌ی افزودنی، سه نوع مخلوط آسفالتی حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته (۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک دانه‌ها) تحت عنوان مخلوط آسفالتی اصلاح شده، و یک نوع مخلوط آسفالتی شاهد (بدون آهک هیدراته) در دو دمای ۴۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شدند. به‌منظور بررسی همزمان تأثیر دما و افزودنی آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی از نرم‌افزار Mini Tab، آزمایش کیفی آب جوشان[3] (ASTM D-3625)، آزمایش‌های کمّی لاتمن اصلاح شده[4] (AASHTO T-283)، میزان اثر چرخ[5] (AASHTO T-324) و پارامتر نسبت مارشال[6] (ASTM D-1559) استفاده شد. نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های مذکور و منحنی‌های میزان ترسیم شده با استفاده از نرم‌افزار Mini Tab، نشان داد که کاهش دما (از ۶۰ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد) و افزودن آهک هیدراته موجب بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی داغ در برابر خرابی‌های وابسته به رطوبت می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی داغ، حساسیت رطوبتی، آهک هیدراته، دما.

1- Moisture susceptibility
2- Hydrated lime
3- Boiling test
4- Tensile strength ratio (TSR)
5- Wheel tracking
6- Marshall quotient

۱. مقدمه

روسازی‌هایی که در معرض رطوبت و بارهای محوری سنگین قرار دارند به سرعت دچار اضمحلال شده و از بین می‌روند. رطوبت نقش به‌سزایی بر عملکرد روسازی و خرابی‌های ایجاد شده در آن دارد (آتاکان و همکاران، ۲۰۰۵). از اواخر دهه ۱۹۷۰ میلادی محققین به این نتیجه رسیدند که رطوبت تأثیر مخربی بر روسازی‌های آسفالتی داشته و موجب عریان‌شدگی در مخلوطهای آسفالتی گرم می‌شود. این پدیده باعث بروز خرابی‌های مخلوطهای آسفالتی در غرب و جنوب شرق آمریکا شده و میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارت‌های ناشی از آنها گردیده است (لیتل و اپس، ۲۰۰۶). حساسیت رطوبتی را می‌توان از دست دادن مقاومت و دوام مخلوطهای آسفالتی ناشی از تأثیر رطوبت دانست. حساسیت رطوبتی تمایل مخلوطهای آسفالتی به عریان‌شدگی[1] است و لذا این عامل می‌تواند مقدمه‌ای برای ایجاد خرابی‌هایی از قبیل ترک‌خوردگی، شیارشدگی، شن‌زدگی و ایجاد چاله باشد (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳؛ ملاحسینی و همکاران، ۲۰۱۲). این پدیده موجب شکسته شدن پیوند بین سطح مصالح سنگی و قیر شده که این مسئله منجر به کاهش مقاومت و سختی لایه آسفالتی و در نهایت ایجاد خرابی‌های مختلف در رویه‌های آسفالتی می‌شود (لاوین، ۲۰۰۳). بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شده است که آثار مخرب رطوبت، منجر به کاهش مدول آسفالت تا حدود ۲۵٪، افزایش شیارشدگی تا حدود ۶۰٪ و نیز افزایش خرابی‌های ناشی از خستگی تا حدود ۳۰٪ می‌شود (مهرآرا و خدایی، ۲۰۱۳).

خرابی‌های ناشی از حساسیت رطوبتی به دو مکانیزم تقسیم می‌شوند: ۱) از دست دادن چسبندگی به دلیل حضور آب بین لایه‌ی قیر و سنگدانه و ۲) از دست دادن پیوستگی به دلیل نرم شدن مخلوط قیر- فیلر (رفیکول و عارف‌الزمان، ۲۰۱۰). پدیده‌ی حساسیت رطوبتی به عوامل مختلفی از قبیل نوع مخلوط آسفالتی، خصوصیات قیر، شرایط آب و هوایی، شرایط زهکشی، بارهای وارده، خصوصیات مصالح سنگی، نحوه‌ی اجرا، تراکم و استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بستگی دارد (سنگز و آگار، ۲۰۰۷). در سال‌های اخیر تلاش‌های گسترده‌ای جهت بهبود حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی انجام شده است. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها در این زمینه، اصلاح مخلوطهای آسفالتی با استفاده از افزودنی‌ها است. از جمله افزودنی‌های مهمی که بسیار مورد توجه واقع شده، آهک هیدراته است. استفاده از آهک هیدراته در مخلوطهای آسفالتی برای اولین بار در سال ۱۹۷۰ میلادی و در آمریکا شروع شد و پس از سال‌ها تحقیق امروزه به عنوان یکی از مؤثرترین افزودنی‌ها در آسفالت به شمار می‌آید (لسوئر و همکاران، ۲۰۱۲). شرکت بزرگراه‌های شمال فرانسه مطالعاتی را در زمینه‌ی تأثیر افزودنی آهک هیدراته بر عملکرد مخلوط آسفالتی انجام داده و به این نتیجه رسید که مخلوطهای آسفالتی حاوی آهک هیدراته دارای دوام بیشتری (حدود ۲۰-۲۵ درصد) نسبت به مخلوطهای آسفالتی متداول (بدون افزودنی) می‌باشند (ریناد، ۲۰۰۹).

روش‌های مختلفی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی کلی آزمایش‌های کیفی[2] و آزمایش‌های کمّی[3] تقسیم‌بندی کرد. در آزمایش‌های کیفی، حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی به‌صورت بصری تخمین زده شده و به‌طور معمول برای بررسی‌های اولیه استفاده می‌شوند. مزیت اصلی این روش‌ها سادگی، سریع بودن و کم‌هزینه بودن آنهاست. از آزمایش‌های مهم این روش می‌توان به آزمایش آب جوشان (ASTM D-3625)، آزمایش نیکلسون (ASTM D-1664) و آزمایش غوطه‌وری استاتیک (ASTM T-182) اشاره کرد. از دسته‌ی آزمایش‌های کمّی یا مقاومتی می‌توان به آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T-283)، آزمایش

1- Stripping

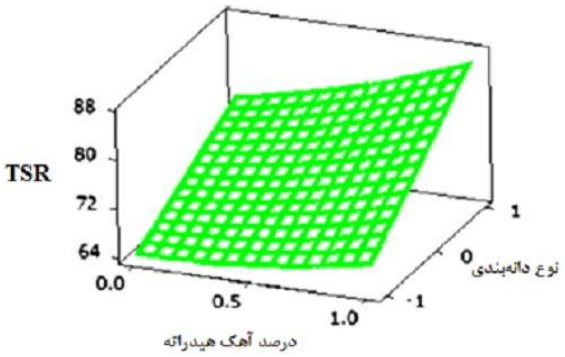
2- Qualitative

3- Quantitative

استاندارد تراکم- غوطه‌وری، آزمایش میزان اثر چرخ (AASHTO T-324) و آزمایش شاخص نسبت مارشال (ASTM D-1559) اشاره نمود.

جهت بررسی اثر آهک هیدراته بر پدیده‌ی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. در یک پژوهش آزمایشگاهی، به‌منظور بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آهک هیدراته به میزان ۲٪ وزن خشک مصالح سنگی و از آزمایش ویلتراک استفاده شد. جهت انجام این آزمایش در حالت اشباع، دال‌های بتن آسفالتی به مدت ۲٤ ساعت در حمام آب با دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. سپس آزمایش در دو حالت خشک و اشباع و در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پارامتر مورد استفاده جهت ارزیابی اثر آب و حساسیت رطوبتی، نشانه‌ی شیارشدگی بود. نشانه‌ی شیارشدگی نسبت پارامتر عمق شیارشدگی در حالت اشباع به عمق شیارشدگی در حالت خشک است (پونیت و همکاران، ۲۰۱۲). در یک پژوهش آزمایشگاهی، به بررسی اثر دانه‌بندی و ماده‌ی افزودنی آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداخته شد. سه نوع دانه‌بندی (حد بالا، پایین و وسط منحنی دانه‌بندی با یک مصالح مشخص) و سه درصد مختلف آهک هیدراته (صفر، ۰/۵ و ۱ درصد وزن خشک مصالح سنگی) با استفاده از روش تحلیل سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتیجه‌ی مطالعه این بود که آهک هیدراته به میزان ۱٪ و حد پایین دانه‌بندی بهترین نتیجه را در بهبود پارامتر TSR نتیجه دادند (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲). شکل ۱ نتایج این تحقیق را نمایش می‌دهد.

نتایج 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 غیرمستقیم به اندازه‌ی ۳/۳، ۵/۳، ٦/۵ و ۸/۱ درصد می‌شود. در مطالعات ملاحسینی و همکاران (۲۰۱۲) در ایران، به‌منظور بررسی تأثیر آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از دو آزمایش کشش غیرمستقیم و شاخص نسبت مارشال استفاده و نتیجه آن شد که افزودن آهک هیدراته به میزان ۱٪ باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد. در مطالعه سونیا (۲۰۱۲)، آزمایش شیارشدگی در شرایط مرطوب و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام و نتیجه شد که افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی باعث کاهش شیارشدگی آن در حالت مرطوب و به تبع آن کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌گردد.



شکل ۱. اثر دانه‌بندی و ماده‌ی افزودنی آهک هیدراته بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی (خدایی و همکاران، ۲۰۱۲)

۲. مواد و روش‌ها

مصالح سنگی مورد استفاده از یک کارخانه‌ی آسفالت واقع در غرب شهر تهران و قیر مورد نیاز از نوع قیر خالص ۷۰ -۶۰ بود که از پالایشگاه اصفهان تهیه شد. برای طراحی مخلوط آسفالتی مورد نظر، از دانه‌بندی شماره‌ی ٤ نشریه ۲۳٤ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی که مناسب جهت اجرا در لایه‌های آستر و رویه‌ی مخلوط آسفالتی می‌باشد، استفاده شد. دانه‌بندی مورد استفاده در این تحقیق، مقدار میانگین حدود بالا و پایین دانه‌بندی این نشریه انتخاب شد. در جدول ۱ حدود دانه‌بندی مجاز و دانه‌بندی منتخب آورده شده است. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته روی مصالح سنگی و قیر خالص مورد استفاده به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. دانه‌بندی مجاز و منتخب مصالح سنگی مطابق نشریه ۲۳٤ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی

اندازه (یا شماره‌ی) الک	۱۹ میلی‌متر	۱۲/۵ میلی‌متر	شماره ٤	شماره ۸	شماره ۵۰	شماره ۲۰۰
درصد عبوری مجاز طبق آیین‌نامه	۱۰۰	۹۰–۱۰۰	٤٤–۷٤	۲۸–۵۸	۵–۲۱	۲–۱۰
درصد وزنی منتخب عبوری از هر الک	۱۰۰	۹۵	۵۹	٤۳/۵	۱۱/۵	٦

جدول ۲. آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگی مورد آزمایش

الف) مصالح درشت دانه

آزمایش	روش	محدوده‌ی مجاز آیین نامه‌ای		نتیجه
		حداکثر	حداقل	
سایش به روش لس آنجلس (درصد)	ASTM C-131	۲۵	–	۳۳
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ASTM C-88	۸	–	۰/۲
میزان شکستگی (درصد)	ASTM D-5821	–	٦۰	۹٤
میزان سنگدانه‌های پهن و دراز (درصد)	ASTM D-4791	۱۵	–	۲۰

ب) مصالح ریزدانه

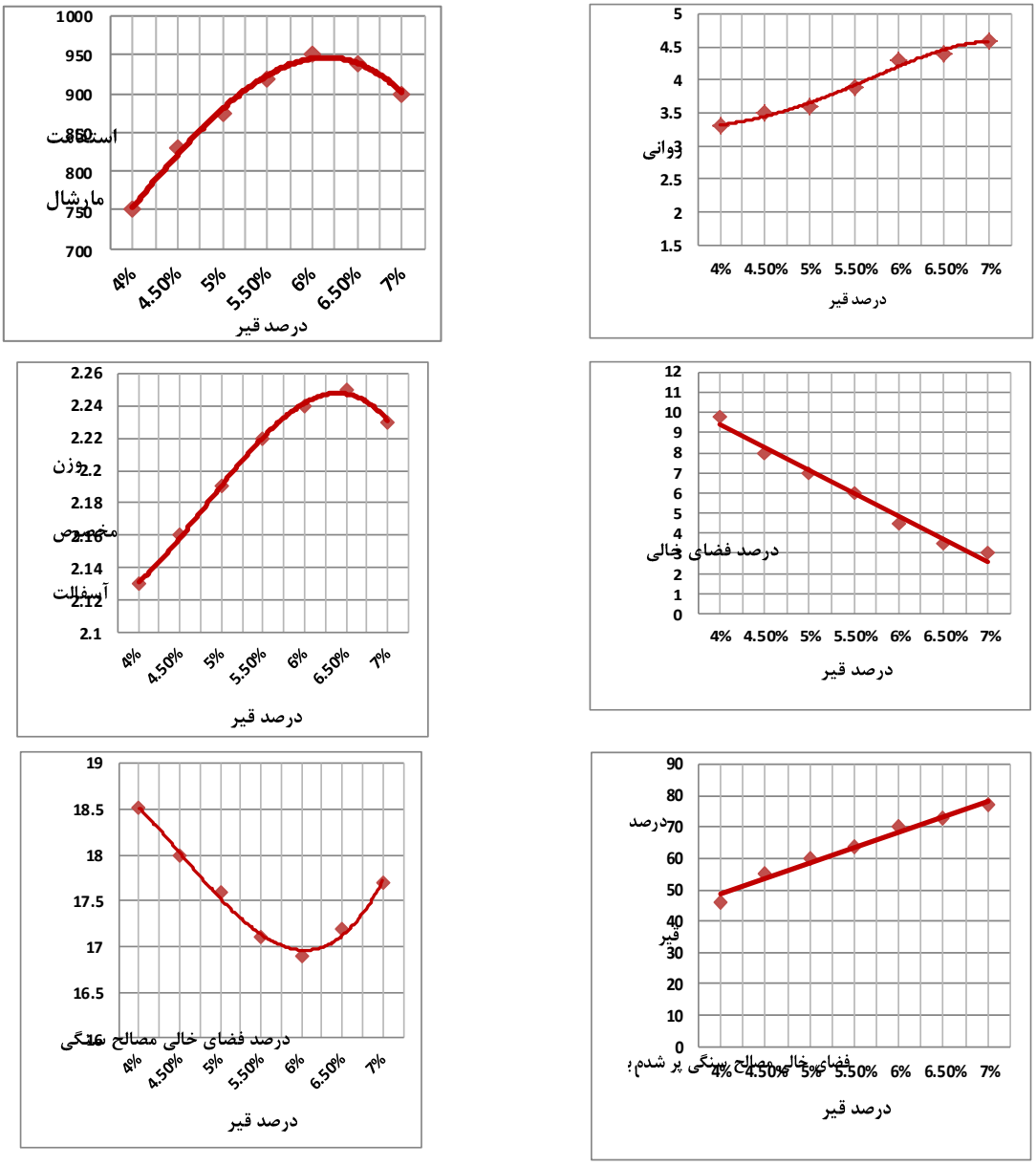
آزمایش	روش	محدوده‌ی مجاز آیین نامه‌ای		نتیجه
		حداکثر	حداقل	
دامنه خمیری PI (درصد)	ASTM D-4318	NP	NP	NP
افت وزنی ناشی از سولفات سدیم (درصد)	ASTM C-88	۱۲	–	۱۸۱
ارزش ماسه ای (درصد)	ASTM D-2419	–	۵۰	۷۱

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های قیر خالص ۷۰–٦۰ مورد استفاده از پالایشگاه اصفهان

شماره	نوع آزمایش	روش آزمایش	مقدار مجاز آیین نامه		نتیجه
			حداقل	حداکثر	
۱	درجه نفوذ (یک دهم میلی‌متر)	ASTM D-5	٦۰	۷۰	٦۰
۲	نقطه نرمی قیر (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D-36	٤۹	۵٦	٤۹
۳	قابلیت کشش در ۲۵ درجه سانتیگراد (سانتی‌متر)	ASTM D-113	۱۰۰	–	+۱۰۰
٤	وزن مخصوص قیر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM D-3289	۱/۰۱۳	۱/۰۱۷	۱/۰۱۳
۵	ویسکوزیته سینماتیک در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد	ASTM D-2170	۲۰۰	۱۰۰۰	۳۱۰
٦	اندیس نفوذ، PI				-۱/۰۲۷
۷	تغییر جرم پس از آزمایش لعاب نازک قیر (درصد)	ASTM D1754	–	۰/۸	۰/۰٤

۳. طرح اختلاط

جهت دستیابی به درصد بهینه قیر از روش طرح اختلاط مارشال استفاده شد (ASTM D-1559, 1989). برای این منظور، نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف قیر (۴، ۴/۵، ۵، ۵/۵، ۶ و ۶/۵ درصد) تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های مارشال مربوط به مصالح سنگی منطقه‌ی غرب تهران در شکل ۲ ارائه شده است. با توجه به منحنی نتایج آزمایش مارشال، درصد بهینه قیر برای مصالح سنگی مورد آزمایش ۶٪ تعیین شد.



شکل ۲. نتایج آزمایش مارشال مخلوط تهیه شده از مصالح غرب تهران

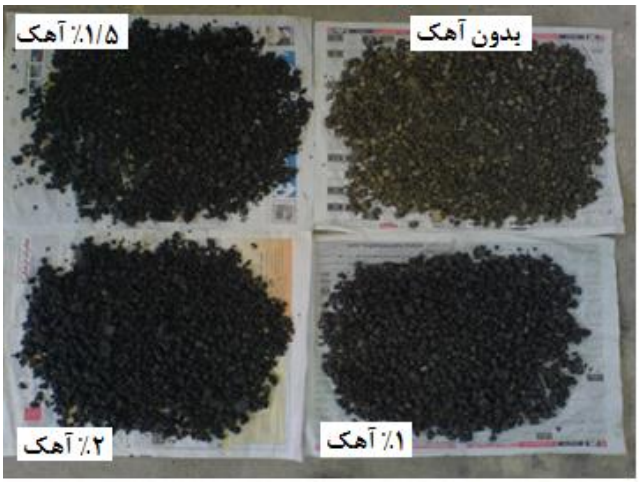
۴. نتایج و بحث

در این پژوهش آزمایشگاهی، به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی، از آهک هیدراته با مقادیر ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک مصالح سنگی استفاده شد. آهک هیدراته جایگزین فیلر مصالح سنگی مخلوط شده و از روش اختلاط خشک جهت افزودن آهک هیدراته استفاده شد. همچنین، جهت بررسی اثر دما، آزمایش‌های اشاره شده در دو دمای ٤٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. به‌منظور ارزیابی خرابی‌های وابسته به رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی داغ، آزمایش کیفی آب جوشان و نیز آزمایش‌های کمّی لاتمن اصلاح شده، میزان اثر چرخ و شاخص نسبت مارشال مورد استفاده قرار گرفتند.

٤-١. آب جوشان (ASTM D-3625)

این آزمایش، که یک آزمایش تخمینی و بصری می‌باشد، اطلاعات اولیه‌ای از استعداد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی ارائه می‌دهد. پس از اختلاط سنگدانه‌ها با قیر، تا

حدی که قیر سطح تمامی مصالح سنگی را به‌طور یکنواخت بپوشاند و سرد شدن نمونه‌ها در هوای آزمایشگاه، نمونه‌های مخلوط آسفالتی به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوش قرار داده می‌شوند. سپس مخلوط آسفالتی از آب جوش بیرون آورده می‌شود. با مشاهده‌ی بصری مصالح سنگی حاوی قیر، به‌طور تقریبی درصد عریان-شدگی تعیین می‌گردد. در این آزمایش، برای هر درصدی از آهک هیدراته، سه نمونه‌ی آسفالتی متراکم نشده در درصد بهینه قیر آماده شده و تحت آزمایش قرار گرفتند. در شکل ۳ نمونه‌هایی از مخلوط‌های آسفالتی که با استفاده از مصالح سنگی غرب تهران تهیه شده و تحت آزمایش آب جوشان قرار گرفته‌اند، نمایش داده شده است. نتایج این آزمایش در جدول ٤ ارائه شده است.



شکل ۳. نمونه‌ای از انجام آزمایش آب جوشان

جدول ۴. نتایج مربوط به آزمایش آب جوشان برای مصالح سنگی غرب تهران

نوع مخلوط آسفالتی	درصد پوشش قیر اطراف مصالح سنگی قبل از آزمایش	درصد پوشش قیر اطراف مصالح سنگی بعد از آزمایش
بدون آهک هیدراته	۱۰۰	۳۰-۳۵
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۱۰۰	۶۵-۷۵
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۱۰۰	۸۰-۹۰
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۱۰۰	۸۵-۹۰

٤-۲. شاخص نسبت مارشال (ASTM D-1559)

برای تعیین این پارامتر از دو ویژگی استقامت و روانی مارشال استفاده می‌شود. شاخص نسبت مارشال، نسبت استقامت مارشال به روانی آن است. جهت بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش مارشال، دو سری نمونه تهیه شدند. نمونه‌های سری اول که بیانگر حالت مرطوب آزمایش بودند، پس از تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای محیط، به مدت ٤٨ ساعت در آب با دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و سپس به مدت ٤٨ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. پس از گذشت این مدت زمان، نمونه‌ها آماده-ی آزمایش شده و به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت ارزیابی اثر دما، این آزمایش با شرایط ذکر شده، در دمای ٤٥ درجه سانتی‌گراد نیز انجام گردید (سنگول و همکاران، ۲۰۱۲). نمونه‌های سری دوم که بیانگر حالت خشک آزمایش بودند پس از

تراکم با چکش مارشال و خنک شدن در دمای محیط، به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب با دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند (ASTM D-1559, 1989). در این پژوهش، برای هر درصدی از آهک هیدراته، سه نمونه تهیه و مقدار متوسط آنها گزارش شد. در جداول ۵ و ٦ نتایج آزمایش شاخص نسبت مارشال برای نمونه‌های آسفالتی در دو حالت خشک و اشباع از آب و در دو دمای ٦۰ و ٤۵ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است.

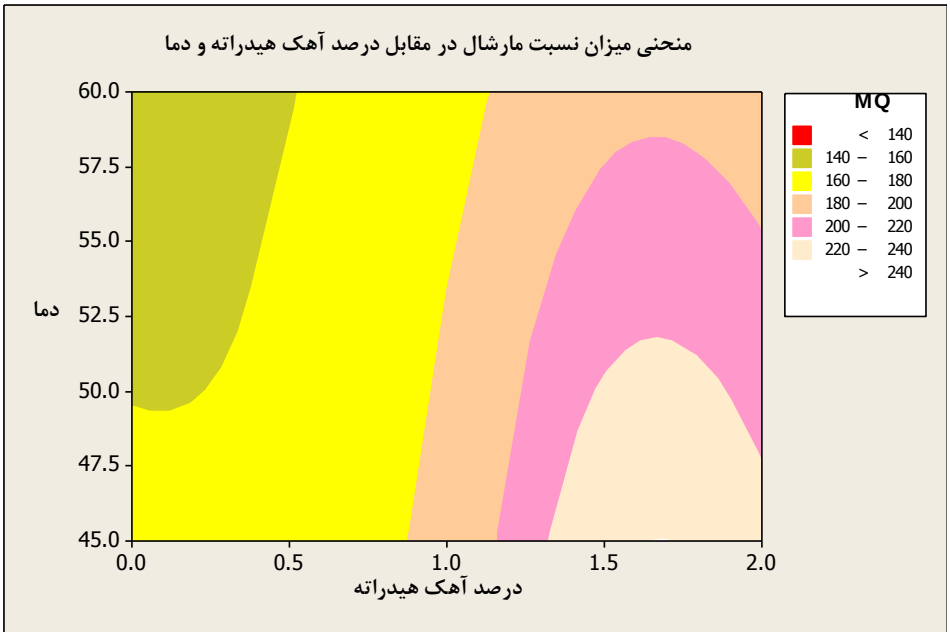
جدول ۵. نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ٦۰ درجه سانتی‌گراد

نوع مخلوط آسفالتی	پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش مارشال					
	استقامت (کیلوگرم)		روانی (میلی‌متر)		نسبت مارشال	
	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب
بدون آهک هیدراته	۷۸۰/۱٦	۷۰۲/۵٦	٤/۸۰	۵/٦۵	۱٦۲/۵۳	۱۲٤/۳٤
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۸٤۵/۳٤	۸۱۵/٦٤	٤/٤۰	۵/۱۵	۱۹۲/۱۲	۱۵۸/۳۸
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۸٦۳/۹۷	۸۳۲/۰۹	٤/۱۰	٤/۷۵	۲۱۰/۷۲	۱۷۵/۱۸
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۸۹۱/۸۰	۸٦۲/۱٦	٤/۳۵	۵/۰۵	۲۰۵/۰۱	۱۷۰/۷۳

جدول ٦. نتایج پارامتر نسبت مارشال در دمای ٤۵ درجه سانتی‌گراد

نوع مخلوط آسفالتی	پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش مارشال					
	استقامت (کیلوگرم)		روانی (میلی‌متر)		نسبت مارشال	
	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب	حالت خشک	حالت مرطوب
بدون آهک هیدراته	۱۰٤۹/٤۲	۹۰۲/۰۸	۵/٤	٦/٤۵	۱۹٤/۳۳	۱۳۹/۸٦
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۱۰۵۵/۳۰	۹۹۸/۵۱	۵/۱	٦/۰۵	۲۰٦/۹۲	۱٦۵/۰٤
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۱۰۸۹/۵۷	۱۰۸۲/۳۳	٤/۲۰	۵/۱۰	۲۵۹/٤۲	۲۱۲/۲٤
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۱۱۳٦/۳۰	۱۱۰۱/۲۵	٤/۵۵	۵/٤۰	۲٤۹/۷۲	۲۰۳/۹٤

در شکل ٤، با استفاده از نرم‌افزار Mini Tab، منحنی میزان تغییر پارامتر نسبت مارشال در مقابل تغییرات درصد آهک هیدراته و دما برای مصالح غرب تهران رسم شده است. این منحنی میزان به‌منظور بررسی همزمان اثر دما و افزودنی آهک هیدراته استفاده شده است. همانطور که از جدول راهنما در شکل فوق برمی‌آید، گستره‌ی نارنجی رنگ مربوط به نسبت مارشال در محدوده‌ی ۱٤۰ تا ۱٦۰ کیلوگرم بر متر، گستره‌ی زرد رنگ مربوط به نسبت مارشال در محدوده‌ی ۱٦۰ تا ۱۸۰ کیلوگرم بر متر و به همین ترتیب گستره‌ی کرم رنگ مربوط به نسبت مارشال در محدوده‌ی ۲۲۰ تا ۲٤۰ کیلوگرم بر متر می‌باشد. با توجه به منحنی میزان فوق می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما از ٦۰ به ٤۵ درجه سانتی‌گراد و افزایش درصد آهک هیدراته، نسبت مارشال (MQ) افزایش می‌یابد. نکته‌ی قابل ذکر آن است که نتایج به‌دست آمده از منحنی میزان فوق تنها در محدوده‌ی دمایی ٤۵ تا ٦۰ درجه سانتی‌گراد و درصد آهک هیدراته‌ی بین صفر تا ۲ درصد دارای اعتبار است.



شکل ٤. منحنی میزان تغییر پارامتر نسبت مارشال در مقابل تغییرات دما و درصد افزودنی آهک هیدراته

٤-٣. آزمایش شیارشدگی چرخ یا ویلتراک (AASHTO T-324)

این آزمایش به‌منظور بررسی تغییرشکل‌های دائمی و حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌رود. آیین‌نامه‌ی مورد استفاده برای انجام این آزمایش، استاندارد AASHTO T-324 می‌باشد. دال‌های آسفالتی در ابعاد ۵۰×۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و در درصد بهینه قیر ساخته شده و به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا سرد شوند. نمونه‌های حالت خشک به مدت ۵ ساعت در داخل محفظه‌ی دستگاه مورد آزمایش و در دو دمای ٤٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شدند. نمونه‌های حالت اشباع نیز به همین مدت زمان در داخل حمام آب با دمای ٤٠ و ٦٠ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و آماده آزمایش شدند (AASHTO T-324, 2004). در این پژوهش، میزان بار وارده برابر ۷۰۵ نیوتن، تعداد دفعات بارگذاری برابر ۸۰۰۰ سیکل رفت و برگشت و سرعت عبور چرخ بارگذاری ٢٦/٥ دور در دقیقه تنظیم شد. در جداول ۷ و ۸ نتایج آزمایش اثر چرخ در دو حالت خشک و اشباع و در دو دمای ٦٠ و ٤٠ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. منظور از پارامتر نسبت شیارشدگی در این جداول، نسبت عمق شیارشدگی به ضخامت دال‌های آسفالتی آماده شده (۵۰ میلی‌متر) می‌باشد. در شکل‌های ۵ و ٦، منحنی‌های تغییرات عمق شیارشدگی بر حسب تعداد دفعات بارگذاری نمایش داده شده است.

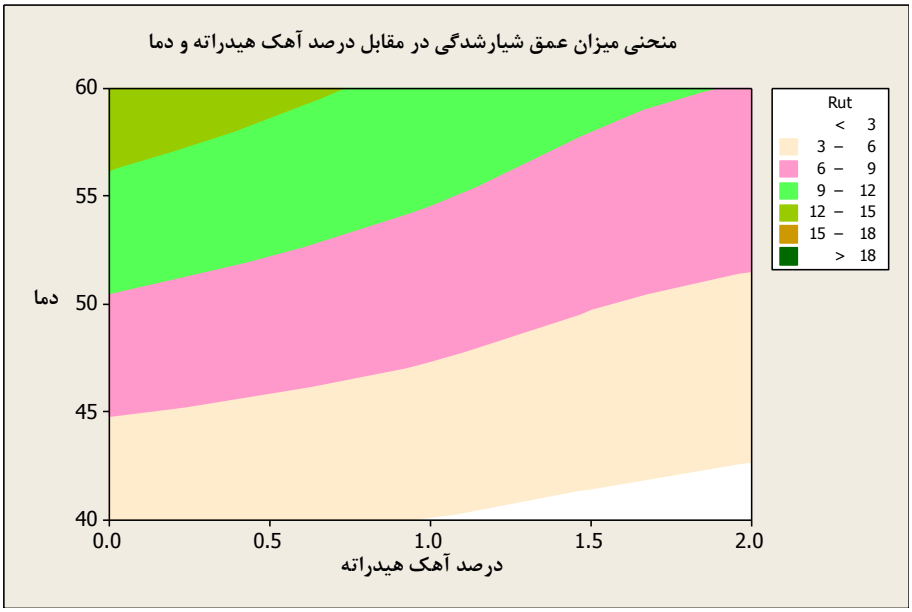
جدول ۷. پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش شیارشدگی چرخ در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد

نوع مخلوط آسفالتی	عمق شیارشدگی (میلی‌متر)		نسبت شیارشدگی (درصد)	
	حالت خشک	حالت اشباع	حالت خشک	حالت اشباع
بدون آهک هیدراته	۲/۶۱	۴/۲۸	۵/۲۲	۸/۵۶
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۲/۱۵	۳/۷۴	۴/۳۰	۷/۴۸
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۱/۸۹	۳/۰۳	۳/۷۸	۶/۰۶
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۱/۵۹	۲/۵۷	۳/۱۸	۵/۱۴

جدول ۸. پارامترهای به‌دست آمده از آزمایش شیارشدگی چرخ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد

نوع مخلوط آسفالتی	عمق شیارشدگی (میلی‌متر)		نسبت شیارشدگی (درصد)	
	حالت خشک	حالت اشباع	حالت خشک	حالت اشباع
بدون آهک هیدراته	۹/۷۰	Failed	۱۹/۴۰	–
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۸/۳۵	۱۴/۱۰	۱۶/۷۰	۲۸/۲۰
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۶/۸۵	۱۲/۵۸	۱۳/۷۰	۲۵/۱۶
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۵/۵۰	۱۲/۲۴	۱۱/۰۰	۲۴/۴۸

به‌منظور بررسی همزمان اثر دما و افزودنی آهک هیدراته بر خرابی‌های وابسته به رطوبت، با استفاده از نرم‌افزار Mini Tab، منحنی میزان تغییر پارامتر عمق شیارشدگی (در دو حالت خشک و خیس) در مقابل تغییرات درصد آهک هیدراته و دما، در شکل ۵ رسم شده است. همانطور که از جدول راهنما در شکل فوق برمی‌آید، گستره‌ی نارنجی رنگ مربوط به عمق شیارشدگی در محدوده‌ی ۱۲ الی ۱۵ میلی‌متر، گستره‌ی لیمویی رنگ مربوط به عمق شیارشدگی در محدوده‌ی ۹ الی ۱۲ میلی‌متر و به همین ترتیب گستره‌ی سفید رنگ مربوط به عمق شیارشدگی در محدوده‌ی کمتر از ۳ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به منحنی میزان فوق می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش دما از ۶۰ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد و افزایش درصد آهک هیدراته، عمق شیارشدگی (Rut) کاهش می‌یابد. نکته‌ی قابل ذکر آن است که نتایج به‌دست آمده از منحنی میزان فوق تنها در محدوده‌ی دمایی ۴۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد و آهک هیدراته‌ی بین ۰ تا ۲ درصد دارای اعتبار است.



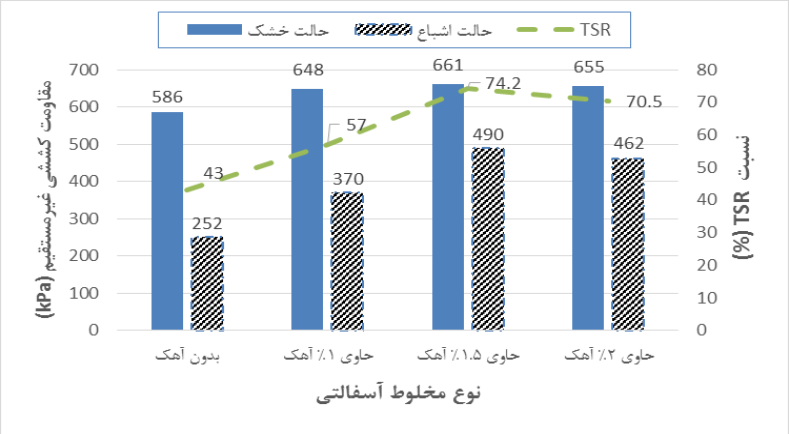
شکل ۵. منحنی میزان پارامتر عمق شیارشدگی در مقابل تغییرات دما و درصد افزودنی آهک هیدراته

۴-۴- آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T-283)

با توجه به نتایج آزمایش مارشال و بعد از دستیابی به درصد بهینه قیر، نمونه‌هایی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش لاتمن اصلاح شده تهیه شدند. از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اشباع به نمونه‌های خشک، نسبت TSR به‌دست می‌آید که شاخص مؤثری برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در جدول ۹ و شکل ۶ نتایج این آزمایش ارائه شده است.

جدول ۹. نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

نوع مخلوط آسفالتی	مقاومت کششی غیرمستقیم (کیلوپاسکال)		نسبت TSR (درصد)
	حالت خشک	حالت اشباع	
بدون آهک هیدراته	۵۸۶	۲۵۲	۴۳
حاوی ۱٪ آهک هیدراته	۶۴۸	۳۷۰	۵۷
حاوی ۱/۵٪ آهک هیدراته	۶۶۱	۴۹۰	۷۴/۲
حاوی ۲٪ آهک هیدراته	۶۵۵	۴۶۲	۷۰/۵



شکل ۶. نتایج آزمایش لاتمن اصلاح شده روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته

۵. نتیجه‌گیری

– نتایج آزمایش کیفی آب جوشان نشان داد که افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی پوشش قیر اطراف مصالح سنگی می‌گردد. افزایش پوشش قیر اطراف مصالح سنگی باعث می‌گردد که در حضور رطوبت، واکنشی که موجب جداشدن قیر از سطح سنگدانه می‌شود، به سختی صورت پذیرد.

– نتایج آزمایش نسبت مارشال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که با افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی، استقامت مارشال در دو حالت خشک و اشباع افزایش می‌یابد. به‌طوری که از بین نمونه‌های آزمایش شده، نمونه‌ی حاوی ۲٪ آهک هیدراته دارای بیشترین استقامت مارشال در دو حالت خشک و اشباع بود. نسبت استقامت مارشال به روانی نمونه‌ها (شاخص نسبت مارشال) نیز با افزودن آهک هیدراته افزایش یافت. مقدار این پارامتر برای مصالح منتخب با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته، نسبت به حالت عدم استفاده از آهک هیدراته، به ترتیب افزایشی در حدود ۱۸، ۳۰ و ۲۶ درصد را برای حالت خشک آزمایش و افزایشی در حدود ۲۷، ۴۰ و ۳۷ درصد را برای حالت مرطوب آزمایش به همراه داشت.

– نتایج آزمایش نسبت مارشال در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و در دو حالت خشک و اشباع نشان داد که با افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی، استقامت و نسبت مارشال افزایش یافتند. مقدار پارامتر نسبت مارشال برای مصالح منتخب با ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته، نسبت به حالت عدم استفاده از آهک هیدراته، به ترتیب افزایشی در حدود ۷، ۳۳ و ۲۸ درصدی برای حالت خشک آزمایش و افزایشی در حدود ۱۸، ۵۱ و ۴۶ درصدی برای حالت مرطوب آزمایش را نتیجه داد.

– بررسی اثر رطوبت در پارامتر نسبت مارشال نشان داد که اشباع نمودن نمونه‌ها باعث کاهش این پارامتر به ترتیب در حدود ۲۳، ۱۸، ۱۷ و ۱۷ درصد در دمای ۶۰

درجه سانتی‌گراد و ۲۸، ۲۰، ۱۸ و ۱۸ درصد در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های بدون آهک هیدراته و نمونه‌های حاوی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته گردید.

– نتایج آزمایش میزان اثر چرخ (ویلتراک) در دو حالت خشک و اشباع از آب و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که با افزودن آهک هیدراته به میزان ۱، ۱/۵ و ۲ درصد وزن خشک سنگدانه‌ها، پارامتر عمق شیارشدگی کاهش یافت. مناسب‌ترین وضعیت از نظر این پارامتر در مخلوط آسفالتی حاوی ۲٪ آهک هیدراته مشاهده شد که کاهش ۳۹٪ (برای حالت خشک آزمایش) و ۴۰٪ (برای حالت اشباع) را نسبت به مخلوط آسفالتی بدون آهک هیدراته نتیجه داد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نیز نتیجه‌ی مشابه‌ای به‌دست آمد که حاکی از بهبود پارامتر عمق شیارشدگی در دو حالت خشک و اشباع از آب و به تبع آن حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی درصدهای مختلف آهک هیدراته بود.

– بررسی اثر دما بر نتایج آزمایش میزان اثر چرخ نشان داد که با افزایش دما (از ۴۰ به ۶۰ درجه سانتی‌گراد) پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی به شدت افزایش یافت. همچنین بررسی اثر رطوبت در آزمایش میزان اثر چرخ نشان داد که با اشباع نمودن نمونه‌ها پارامتر عمق شیارشدگی افزایش می‌یابد.

– نتایج آزمایش کمّی لاتمن اصلاح شده نشان داد که افزودن آهک هیدراته به مخلوط آسفالتی موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم آن در دو حالت خشک و اشباع می‌شود. میزان پارامتر TSR (نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی در حالت اشباع به حالت خشک)، برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۱، ۱/۵ و ۲ درصد آهک هیدراته، افزایشی به ترتیب در حدود ۳۴، ۷۳ و ۶۵ درصدی را نسبت به مخلوط آسفالتی بدون آهک هیدراته نتیجه داد.

– بررسی همزمان اثر پارامترهای دما و افزودنی آهک هیدراته با استفاده از نرم‌افزار Mini Tab مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها به صورت منحنی‌های میزانی ارائه شد که در آنها تغییر پارامترهای نسبت مارشال و عمق شیارشدگی در مقابل تغییرات دما و درصد آهک هیدراته به‌دست آمدند. نتایج تحلیل این منحنی‌های میزان نشان داد که با کاهش دما (از ۶۰ به ۴۵ درجه سانتی‌گراد) و افزایش درصد آهک هیدراته (از صفر تا ۲٪) عملکرد مخلوط‌های آسفالتی داغ در برابر خرابی‌های رطوبتی بهبود یافت.

۶. مراجع

AASHTO T-324. 2004. “Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA)”. American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM D-1559. 1989. “Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures using Marshall Apparatus”. American Society for Testing and Materials.

Atakan A., Samlioglu, K., Tayfur, S. and Ozen, H. 2005. “Effect of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixture”. Construction and Building Materials 19: 11-18.

Hossain, K. and Ullah, F. 2011. “Laboratory evaluation of lime modified asphalt concrete mixes with respect to moisture susceptibility”. J. Civil Environ. Eng. 11(4): 47-54.

Khodaii, A., Haghshenas, H. F. and Kazemi Tehrani, H. 2012. “Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology”. Constr. Build. Mater. 34: 131-135.

Lavin, P. 2003. “A Comparison of Liquid Anti Strip Additive and Hydrated Lime Using AASHTO T-283”. Construction Chemical Technical Director ARR.MAZ Products.

Lesueur. D., Petit, J. and Hans, J. R. 2012. “Increasing the Durability of Asphalt Mixture by Hydrated Lime Addition: What Evidence?”. Eurasphalt & Eurobitume Congress, A5EE-255, Istanbul, Turkey.

Little, D. N. and Epps, J. A. 2006. “The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt”. National Lime Association.

Mehrara, A. and Khoadii, A. 2013. “A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete”. Constr. Build. Mater. 38: 423-442.

Mollahosseini, H. S., Hayati, P. and Kavussi, A. 2012. "Evaluation of Hydrated Lime Effect on Asphalt Mixture Durability against Moisture: A Case Study in Iran". Eurasphalt & Eurobitume Congress, A5EE-437, Istanbul, Turkey.
Punith, V. S., Xiao, F., Wingard, D., Putman, B. J. and Aziz, N. W. 2012. "Moisture Susceptibility and Rutting Resistance Evaluation of Foamed Half Warm Asphalt Mixture". Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
Rafiqul, A. T. and Arifuzzaman, M. 2010. "Nano scale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalt". J. Mater. Civil Eng. ASCE 22(7), 714–725.
Raynaud, C. 2009. "L'ajout de chaux hydratée dans les enrobés bitumineux", BTP Matériaux 22: 42-43.
Sengoz, B. and Agar, E. 2007. "Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot mix asphalt". J. Build. Environ. 42: 3621-3628.
Sengul, C. E., Aksoy, S., Iskender, E. and Ozen, H. 2012. "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance". Constr. Build. Mater. 30: 139-148.
Sonia, R. 2012. "The way to resist moisture damage and rutting in asphalt mixture in Bangladesh by the application of hydrated lime". IOSR J. Mech. Civil Eng. 3(2): 36-40.