یادداشت پژوهشی
ارزیابی آزمایشگاهی روشهای مقابله با پدیده عریان شدگی در مخلوطهای آسفالتی گرم

حامد خانی سانیج (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری، استادیار، عمران دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

رضا اسمعیلی، کارشناس، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک، تهران، ایران

E-mail: khani@yazd.ac.ir

دریافت:۱۳۹۳/۰۷/۱۳ پذیرش:۱۳۹٤/۰٤/۲۰

چکیده:

در این تحقیق به بررسی پدیده عریان شدگی در مخلوطهای آسفالتی گرم با توجه به شرایط ایران پرداخته شده است. برای این‌کار تاثیر آهک و سه نوع مایع ضدعریان شدگی بر دو نوع مصالح سنگی حساس در برابر پدیده عریان شدگی بررسی شده است. در این تحقیق حساسیت رطوبتی مصالح آسفالتی براساس روش مندرج در استاندارد AASHTO T283 سنجیده شده است. ارزیابی اقتصادی نیز براساس روش هزینه - اثر بخشی، برای کاربرد مواد ضد عریان شدگی انجام شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که با استفاده از آهک و مواد ضد عریان شدگی می‌توان مصالح حساس در برابر این پدیده را اصلاح کرد، ولی لازم است برای هر نوع مصالح به صورت مجزا تاثیر مواد ضد عریان شدگی بررسی شود. تحلیل اقتصادی نیز مبین این حقیقت است که در برخی از پروژه ها کاربرد مواد ضد عریان شدگی از بعد مالی نیز سبب کاهش هزینه ها، علاوه بر ارتقاءِ مشخصات فنی می‌شود. نوآوری این تحقیق ارائه راهکاری اجرایی است که علاوه بر مزایای فنی در بسیاری از موارد سبب کاهش هزینه‌ها نیز هست.

واژه‌های کلیدی: عریان‌شدگی، آهک، مواد ضد عریان شدگی مایع، RST.

۱. مقدمه

یکی از خرابیهای معمول در مخلوطهای آسفالتی گرم پدیده عریان‌شدگی است. وقوع این پدیده با رواج استفاده از مخلوطهای آسفالتی در روسازی بارها گزارش شده است. از آنجایی‌که این خرابی در اثر رطوبت ایجاد شده یا توسط رطوبت تشدید می‌شود، به آن آسیب‌دیدگی رطوبتی نیز می‌گویند [Little and Epps, 2001]. این آسیب منجر به کاهش سختی، کاهش مقاومت سازه‌ای لایه‌های روسازی راه، کاهش چسبندگی بین سنگدانه- قیر و کاهش مقاومت پیوستگی قیر یا ماستیک قیر- فیلر شده، سرانجام به تخریب ساختمان راه منتهی می‌شود [Santucci, 2003]. در صورت ایجاد چسبندگی کافی میان قیر و مصالح سنگدانه‌ای، این پیوند دیگر به آسانی از بین نمی‌رود، مگر در مواردی که مولکول آب به پیوند میان قیر و سنگدانه نفوذ نموده، آن را از بین ببرد [Kandhal., 1994]. چنان‌که مصالح سنگی غبارآلود باشند و یا گرانروی قیر زیاد باشد، قیر توانایی قیراندود کردن سطح مصالح سنگی را نداشته و چسبندگی مناسب قابل حصول نخواهد بود، اما قیرهای با گرانروی زیاد، مقاومت بهتری در برابر جدایی قیر از مصالح سنگی دارند [Allen et al. 2014].

۲. تحقیقات گذشته

لیتل و همکارش در تحقیقات خود در سال ۲۰۰۱ به این نتیجه رسیدند که اغلب این خواص مصالح سنگدانه‌ای است که بر ویژگی حساس بودن مخلوطهای آسفالتی در برابر آب اثر می‌گذارد و همچنین مشخص کرد مخلوطهایی که با درصد فضای خالی بالایی کوبیده شده‌اند، عریان‌شدگی بیشتری را نسبت به مخلوطهایی که با درصد فضای خالی پایین کوبیده شده‌اند تجربه می‌کنند [Little and Epps, 2001].

بویز در سال ۲۰۱۱ در مطالعات خود بیان داشت رایج‌ترین مواد ضد عریان‌شدگی افزودنیهای آهک و افزودنیهای مایع هستند، اما افزودنیهای جامد مانند خاکستر آتشفشانی و پوزولانها نیز بهتر است مورد بررسی قرار گیرند [Boyes, 2011].

در سال ۲۰۱٤ اداره راه فدرال آمریکا[1] (FHWA) طی تحقیقی تاثیر مواد مایع ضد عریان شدگی، آهک و چند افزودنی دیگر را بر پدیده عریان شدگی در آسفالت گرم مورد بررسی قرار داد. براساس نتایج این تحقیق آهک و مواد مایع ضد عریان شدگی تاثیر قابل توجهی در رفع مشکل عریان شدگی در مخلوط آسفالت گرم داشتند و نتایج مثبت آهک بارزتر بود [FHWD, 2014].

۳. روش‌های ارزیابی عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی

به طور کلی آزمون‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی را می‌توان در دو دسته آزمون مخلوطهای متراکم نشده و آزمون مخلوطهای متراکم شده دسته‌بندی کرد. آزمون‌های مخلوطهای متراکم نشده برای کنترل ذرات قیراندود در حضور آب مناسب‌اند [Bausano, 2006] . آزمونه‌های ویژه مخلوطهای متراکم شده شامل آزمونه‌های متراکم شده آزمایشگاهی، مغزه‌های میدانی، دالهای متراکم شده در آزمایشگاه یا دالهای نمونه‌گیری‌شده میدانی هستند[Solaimanian et al. 2003] .

انستیتوی آسفالت، آزمون جوشاندن، آزمون کشش غیرمستقیم، آزمون فشاری غرقاب، آزمون مسیر چرخ هامبورگ و آزمون تشدید شرایط محیطی را مناسب ارزیابی حساسیت رطوبتی می‌داند [Asphalt Institute, 2007]. برخلاف عدم قطعیت‌هایی همانند تجربی بودن آزمون، وابستگی نتایج به نوع تراکم، قطر آزمونه‌ها، درجه اشباع و چرخه یخبندان و ذوب هم‌اکنون استاندارد AASHTO 283 و با درجه اهمیت کمتر، ASTM 4786D از مقبولیت گسترده‌ای در تعیین عریان‌شدگی مخلوط برخوردارند.

با توجه به تمرکز این مطالعات روی رفتار مخلوط و مقبولیت گسترده استاندارد AASHTO 283، این استاندارد مناسب‌ترین ابزار سنجش عریان‌شدگی مخلوطهای آسفالتی بوده و در این تحقیق برای تعیین مقاومت عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی بکار گرفته شده است.

٤. فعالیتهای آزمایشگاهی

٤-١ انواع مواد ضدعریان‌شدگی، خصوصیات و تجربیات

مطالعات آزمایشگاهی خصوصیات فیزیکی و ترکیبی قیر حاوی افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی نشان داد که افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی موجب نرمی قیر، کاهش حساسیت دمایی و بهبود پیرشدگی قیر می‌شوند [Anderson et al. 1982].

. افزودن آهک هیدراته به مخلوط، موجب افزایش سختی مخلوط، مدول الاستیسیته دینامیکی، مقاومت کششی مخلوط و بهبود مقاومت شیارافتادگی رویه می‌شود. الزامات فیزیکی آهک افزوده شده به مخلوط به عنوان ماده ضدعریان‌شدگی باید مطابق استاندارد اشتو تی AASHTO 219 باشد [Hicks, 1991].

٤-٢ انتخاب مواد ضد عریان‌شدگی

پس از بررسی تحقیقات انجام‌شده در کشورهای مختلف و با توجه به فراوانی، ملاحظات اقتصادی و سهولت کاربرد، آهک هیدراته و سه نوع مایع شیمیایی ضد عریان‌شدگی سازگار با قیر و مصالح سنگی به‌عنوان افزودنی‌های مناسب این پروژه تحقیقاتی برگزیده شدند. به‌منظور تسهیل در بکارگیری آهک هیدراته، آهک پس از کنترل دانه‌بندی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن به صورت خشک با درصدهای یک، دو و سه درصد وزنی مصالح سنگی، جایگزین فیلر مصالح سنگدانه‌ای مخلوط‌ها گردید. مایعات شیمیایی برگزیده این پروژه به‌صورت درصد وزنی قیر خالص مخلوط، به میزان ۰/۲، ۰/۳ و ۰/٤ درصد به قیر خالص افزوده می‌شوند. این درصدها به عنوان پیش‌فرض توسط شرکت خارجی تولید کننده ارائه شده‌اند.

٤-٢-١ آهک هیدراته

آهک مناسب برای کاربرد به‌عنوان ماده ضدعریان‌شدگی، آهکی است که ضوابط استاندارد AASHTO M 303 را برآورده کند. به این منظور پس از انجام آنالیز کامل شیمیایی روی نمونه‌های آهک دریافتی از چند معدن، تنها یک نمونه توانست ضوابط استاندارد را ارضا کند که برای انجام این تحقیق انتخاب گردید.

٤-٢-٢ مایع‌های ضد عریان‌شدگی

ویژگی‌های مخلوط قیر و مایع ضد عریان‌شدگی به ترکیب شیمیایی قیر و ترکیب شیمیایی، میزان غلظت و نوع مادهٔ پراکنده‌ساز استفاده شده با مایع‌های ضد عریان‌شدگی بستگی دارد. در این تحقیق سه نوع مایع ضد عریان‌شدگی با نام شمارهٔ یک و دو و سه مورد استفاده قرار گرفتند.

٤-٣ قیر

قیرهای انتخابی برای این تحقیق از نوع ۷۰-۶۰ بوده و کلیه الزامات استاندارد را براساس آیین‌نامه ایران(جدول ١٤-١ نشریه ۱۰۱) تامین کرده است.

٤-٤ مصالح سنگی

ابتدا شش نوع مصالح سنگی انتخاب شده، پس از انجام آنالیز شیمیایی بر روی آنها، مصالح سنگی شماره یک و سه به‌عنوان مصالح مستعد عریان‌شدگی و مصالح سنگی شماره دو به‌عنوان مصالح سنگی غیرمستعد عریان‌شدگی انتخاب شدند.

مصالح سنگدانه‌ای منتخب، جدای از آنالیز شیمیایی مطابق با استاندارد ASTM C 25 ، باید تمامی ویژگی‌های مندرج در نشریه‌های شمارهٔ ۱۰۱ و ٢٣٤ را برآورده نمایند. بنابراین در گام نخست، آزمون آنالیز شیمیایی مصالح سنگی انجام شد و در ادامه آزمون‌های مرغوبیت مصالح سنگی انجام شد. نتایج آنالیز شیمیایی مصالح سنگی یک، دو و سه حاکی از آن بود که تنها این سه نوع مصالح برای ادامه آزمون‌ها مناسبند. نتایج آنالیز شیمیایی مصالح یک، دو و سه به ترتیب در جداول شماره ۱، ۲، ۳ آورده شده است.

با در نظر گرفتن مقدار درصد میانگین SiO2 و همچنین مجموع مقدار درصد فلزات حد واسط (Fe2O3+Al2O3) می‌توان انتظار وقوع عریان‌شدگی را در سنگدانه‌های مصالح شماره یک داشت ولی مقدار درصد میانگین مولفه‌های قلیایی(K2O+Na2O+MgO+CaO) را نمی‌توان نادیده گرفت [Rice, 1958].

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی مصالح سنگدانه‌ای شماره یک

مشخصات نمونه مصالح سنگی	درصد SiO_2	درصد Al_2O_3	درصد Fe_2O_3	درصد CaO	درصد K_2O	درصد Na_2O	درصد MgO	درصد CO_2
مخلوط درشت‌دانه	۵۰٫۳۰	۹٫۳۵	٤٫۱۳	۱۸٫۳۰	۱٫۳۱	۱٫٦۷	۱٫۲۱	۱۲٫٦۵
ماسه	٤۷٫٦٦	۹٫۷۳	۳٫٦۳	۲۱٫۳۸	۱٫۳۰	۱٫٦۳	۲٫۹۷	۱۵٫۱۸
فیلر	٤۰٫۱۳	۸٫۹۸	۳٫۷۳	۲٤٫۰۷	۱٫۱۷	۱٫٤۷	۲٫٤۲	۱٦٫۵۰

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی مصالح سنگدانه‌ای شماره دو

مشخصات نمونه مصالح	درصد SiO_2	درصد $Fe_2O_3 + Al_2O_3$	درصد CaO	درصد K_2O	درصد Na_2O	درصد MgO	درصد CO_2
مخلوط درشت‌دانه	۲٫۱۷	۱٫٤۵	٤۹٫٦۲	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۳٫٤۷	٤۲٫٦۷
ماسه	۲٫٦۸	۱٫۵۸	٤۸٫٦۸	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۳٫۹٤	٤۲٫٤۷
فیلر	۳٫٦۳	۱٫۵٤	٤۸٫٦۵	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۳٫۰	٤۱٫۵۵

به دلیل زیاد بودن درصد کربنات، این مصالح سنگدانه‌ای بعنوان مصالح مقاوم در برابر پدیدهٔ عریان‌شدگی شناخته و گزینش شد [Rice, 1958]. این نوع مصالح از نوع سنگدانه‌های آهکی است که به وفور در تولید آسفالت در داخل کشور استفاده می شود.

با در نظر گرفتن مقدار درصد میانگین SiO2 و همچنین مقدار درصد میانگین مولفه‌های قلیایی K2O+Na2O که تشکیل نمک‌های تک ظرفیتی (ناپایدار در حضور آب) را در فصل مشترک قیر- سنگدانه می‌دهد، می‌توان در این مصالح انتظار وقوع عریان‌شدگی داشت.

نتایج آزمایشهای مرغوبیت مصالح نشان داد که سه نوع مصالح سنگی شماره یک، دو و سه تمامی ویژگی‌های مندرج در نشریه‌های شمارهٔ ۱۰۱ و ۲۳٤ را برآورده می‌نمایند.

٤-۵ طرح اختلاط بتن آسفالتی گرم

دانه‌بندی مصالح سنگی بکار رفته در این مخلوط‌های آسفالتی مطابق با دانه‌بندی شماره ٤ جدول ۲۰-۳ نشریه ۱۰۱ است. نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای مصالح سنگی شماره یک، دو و سه با درصدهای مختلف قیر، با استفاده از قیر ۷۰-٦۰ به روش مارشال تهیه شد و برای هر نوع سنگدانه درصد قیر بهینه تعیین گردید.

۵. ارزیابی فنی مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح شده با مواد افزودنی

در این تحقیق از یک نوع سنگ آهکی و دو نوع مصالح سنگی با درصد سیلیس بالا استفاده شده است. دو نوع مصالح سنگی شماره یک و سه از جنس سنگهای غیرآهکی بوده و نسبت به آب تمایل بیشتری دارند. به همین علت این دو نوع مصالح سنگی استعداد بیشتری برای بروز پدیده عریان شدگی دارند. مصالح سنگی شماره یک در حالت عادی دارای ضریب TSR[٦] ۷۱/۷ است و بر اساس بسیاری از آیین نامه ها که در آنها حدود و

جدول۳. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی مصالح سنگدانه‌ای شماره سه

مشخصات نمونهٔ مصالح سنگی	درصد SiO_2	درصد Al_2O_3	درصد Fe_2O_3	درصد CaO	درصد K_2O	درصد Na_2O	درصد MgO	درصد CO_2
مخلوط درشت‌دانه	۵۵٫۰۵	۱٦٫۲۲	۹٫٤۰	٦٫۱۰	۳٫۱۳	۲٫٤۳	٤٫٤۹	۲٫٦۳
ماسه	۵۵٫۳۵	۱۷٫۳۵	۸٫۲۰	٤٫۳۰	٤٫۳٤	۲٫۷۰	٤٫۹۳	۲٫٤۱
فیلر	۵۳٫۷۱	۱٦٫۷۰	۷٫۲۰	۸٫۱۲	۲٫۰۷	۱٫٦۲	۳٫۷۹	٤٫۷٤

رواداری این پارامتر بالاتر یا مساوی ۷۵ درصد است، پذیرفته شده نیست. از طرفی اکثر مصالح سنگی غیرآهکی مانند مصالح شماره یک با توجه به درصد زیاد سیلیس موجود در آنها مشخصات مکانیکی بسیار خوبی برای استفاده در لایه های آسفالتی دارند. این مشخصات مکانیکی مناسب علاوه بر ایجاد مقاومت و دوام مناسب در لایه آسفالتی، سبب ارتقاء پارامترهای ایمنی مانند زبری لایه روکش آسفالتی نیز می‌شود. بنابراین استفاده از مایعات ضد عریان شدگی و آهک در این شرایط دارای توجیه فنی و اقتصادی قابل توجهی است. جداول شماره ٤، ٥ و ٦ تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع ۱ و ۲ و ۳ را به ترتیب بر میزان TSR مصالح شماره یک ، دو و سه نشان می‌دهد. در این جداول حساسیت رطوبتی سه نوع مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در ۱۳ حالت بیان شده است این حالتها شامل بدون افزودنی و سه درصد متفاوت آهک و ۳ نوع ماده ضدعریان شدگی است. مصالح شماره دو از جنس سنگهای آهکی است. درصد زیادی از مصالح سنگی موجود در کشور از این جنس است. اگر سنگ آهک دارای تراکم مناسبی باشد می‌تواند حدود و رواداریهای مشخصات مصالح سنگی موجود در آیین نامه های راهسازی برای استفاده در آسفالت را به دست آورد، ولی به طور کلی مشخصات مکانیکی و زبری سنگهای سیلیسی به علت وجود کانیهای سخت مانند کوارتزیت بالاتر از سنگهای رسوبی آهکی است. همان‌طور که از داده های جدول ۵ مشخص است، مصالح آهکی شماره دو در حالت معمولی هم دارای TSR خوبی است و مستعد عریان شدگی نیست، بنابراین استفاده از مواد ضدعریان شدگی مایع و آهک برای این مصالح ضرورتی ندارد. مصالح شماره یک تقریباً مستعد برای عریان شدگی است، ولی با استفاده از آهک، ضریب TSR آن اصلاح شده است و حتی کاربرد یک درصد آهک هم کافی است تا امکان استفاده از این نوع مصالح در تولید آسفالت گرم وجود داشته باشد.

مصالح شماره سه کاملاً نسبت به پدیده عریان شدگی حساس بوده و به صورت خالص قابل استفاده در راهسازی نیست. حتی استفاده از سه درصد آهک نیز TSR این نوع مصالح را تا

جدول ٤. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره یک

نوع ماده افزودنی	بدون افزودنی	آهک			مایع ضدعریان شدگی یک			مایع ضدعریان شدگی دو			مایع ضدعریان شدگی سه		
در صد ماده آفزودنی	–	۱	۲	۳	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۰/۳	۰/٤
TSR	۷۱/۷	۸۰	۸۱/٤	۸۵/٤	۷۵/۹	۷۸/۵	۸۰/۵	٦۹/۸	٦۸/۸	۷۱/٦	۷۷	۷۵/۵	۷٦/۸

جدول ۵. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره دو

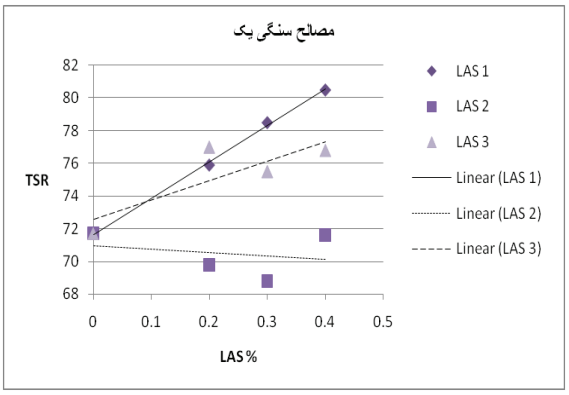
نوع ماده افزودنی	بدون افزودنی	آهک			مایع ضدعریان شدگی یک			مایع ضدعریان شدگی دو			مایع ضدعریان شدگی سه		
در صد ماده آفزودنی	–	۱	۲	۳	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۲	۰/۳	۰/٤
TSR	۸٤/۰	۸۵/٤	۸٦/۵	۸۵/٤	۹۵/۵	۹٦/۷	۹٦/٤	۹۹/٤	۹۹/۲	۹۹/۹	۹۸	۹۷/٤	۹۸/۱

جدول ٦. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره سه

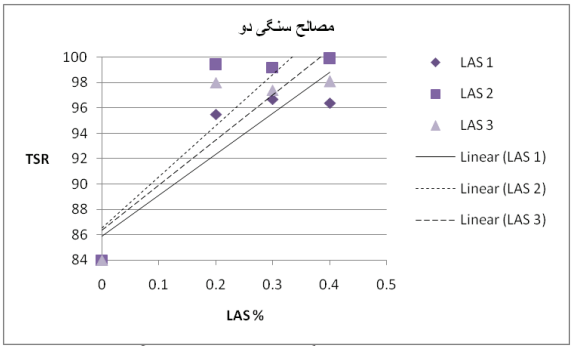
نوع ماده افزودنی	بدون افزودنی	آهک			مایع ضدعریان شدگی یک			مایع ضدعریان شدگی دو			مایع ضدعریان شدگی سه		
در صد ماده آفزودنی	–	۱	۲	۳	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۲	۰/۳	۰/٤	۰/۲	۰/۳	۰/٤
TSR	۳۲/۹	٤۳/٤	٤۹/٦	٦٦/٤	٦٦/٤	٦٦/۱	۷۷/۳	۵۸/۸	۷٦/۲	۷۵	٦۳	٦۸/۳	۷۱/٤

حدود ٦٤/٤ درصد افزایش داده است که بر اساس آیین‌نامه‌های راهسازی مناسب برای استفاده در آسفالت گرم نیست. در برخی موارد با توجه به هزینه حمل و نقل و مشخصات مکانیکی و دوام مناسب این نوع مصالح و دسترسی مشکل به مصالح آهکی بهتر است با استفاده از مواد ضد عریان شدگی مایع، این نوع مصالح را اصلاح و از آن در راهسازی استفاده کرد. نمودارهای شماره ۱، ۲ و۳ تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع ۱ و ۲ و ۳ را به ترتیب بر مصالح شماره یک ، دو و سه نشان می‌دهد. در این سه نمودار، با توجه به درصد استفاده از ماده ضدعریان‌شدگی، خطی بر داده‌ها برازش شده است. ضریب زاویه این خط بیانگر میزان تاثیر ماده ضدعریان‌شدگی است. با توجه به اینکه درصد استفاده از آهک بسیار بیشتر از مواد ضدعریان شدگی مایع است، داده‌های مربوط به آن به‌علت پراکندگی بیشتر در این نمودارها درج نشده است. در برخی از موارد طراح مجبور است برای اصلاح یک نوع مصالح مستعد برای عریان شدگی چند نوع ماده ضدعریان شدگی را آزمایش کرده و ماده مناسب و درصد استفاده از آنرا تعیین کند. در اینجا کاربرد ۰/۳ درصد مواد ضد عریان شدگی مایع ۲ و ۳ امکان اصلاح مصالح سنگی شماره ۳ را فراهم آورده است و به این ترتیب TSR این مصالح به بالای ۷۵ درصد ارتقاء یافته است که بر اساس حدود و رواداری موجود در بسیاری از آیین‌نامه‌های راهسازی پذیرفته شده است (نمودار شماره ۲).

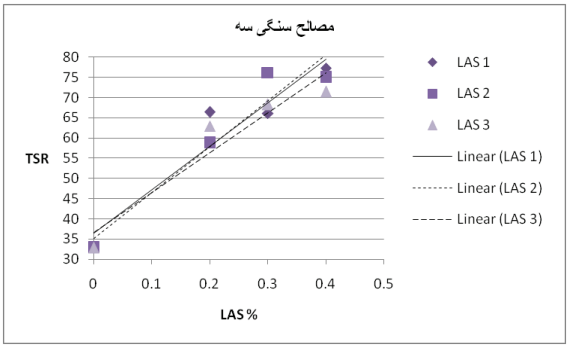
نمودار شکل شماره ۱ تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی شماره ۱ نشان می‌دهد. این مصالح در حالت عادی دارای ضریب TSR ۷۱/۷ درصد است که نشان می‌دهد بهتر است اصلاحی در زمینه پدیده عریان شدگی برای این مصالح انجام شود. آهک تأثیر خوبی در اصلاح این مصالح داشته است، ولی در صورتی که با توجه به مسائل اجرایی از مایع های ضد عریان شدگی استفاده شود، باید از نتایج موجود در نمودار شماره ۱ ت استفاده شود. نتایج نمودار شماره ۱ نشان می‌دهد که مایع ضد عریان شدگی شماره ۲ با مصالح شماره یک سازگار نیست و پارامتر TSR با استفاده از این مایع ارتقاء نیافته است.



شکل ۱. تاثیر مواد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۱



شکل ۲. تاثیر مواد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۲



شکل ۳. تاثیر مواد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۳

همچنین مایع ضد عریان شدگی شماره ۳ تأثیر زیادی در افزایش TSR این نوع مصالح ندارد. پس می‌توان نتیجه‌گیری کرد که برای انتخاب مواد ضد عریان‌شدگی مناسب، باید با توجه به نوع مصالح سنگی تحقیقات آزمایشگاهی (بررسی میزان حساسیت رطوبتی در مخلوط آسفالتی) انجام شود. این نکته گواه آن است که برطرف ساختن عریان شدگی از یک مخلوط تابع سعی و خطا

بوده، وابسته به ساختار شیمیایی قیر، سنگدانه و مواد افزودنی و اندرکنش میان اجزای سازنده مخلوط آسفالتی است و نمی‌توان با دستورالعملی یکسان عریان‌شدگی را از همه مصالح سنگی مستعد عریان‌شدگی برطرف ساخت. افزایش نسبت TSR ممکن است با تغییر درصد و نوع ماده افزودنی یا راهکارهای مناسب دیگر برای یک نوع مصالح به‌دست آید، ولی قابل تعمیم به مصالح دیگر نیست. در اینجا مایع ضد عریان شدگی شماره یک با توجه به نتایج نمودار شماره ۱ برای اصلاح مصالح شماره یک مفید است. مشاهده می‌شود ماده عریان شدگی مایع شماره ۲ که در مصالح شماره ۳ تأثیر خوبی دارد، در مصالح سنگی شماره یک اثر مناسبی ندارد، بنابراین سازگاری ماده ضد عریان شدگی باید طی روند طراحی اختلاط بررسی شود. مصالح سنگی شماره سه دارای خصوصیات مکانیکی خوبی برای استفاده در مخلوط آسفالتی است ولی میزان حساسیت رطوبتی آن بسیار زیاد است. نمودار شماره ۳ نشان می‌دهد که این مصالح به خوبی با استفاده از مواد ضدعریان شدگی قابل اصلاح است و کاربرد ۰/٤ درصد ماده ضدعریان‌شدگی شماره ۳ باعث اصلاح این مصالح شده است.

٦. ارزیابی اقتصادی مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح شده با مواد افزودنی

در این تحقیق، چهار نوع ماده افزودنی شامل آهک در سه درصد متفاوت به قیمت هر کیلوگرم ۲۳۷۵ ریال و سه نوع افزودنی شیمیایی شامل مایع شیمیایی شماره یک به قیمت هر کیلوگرم ۱۲۲۵۰۰ ریال و مایع شیمیایی شماره دو و سه به ترتیب به قیمت هر کیلوگرم ۲۱۲۵۰۰ و ۲۱٤۰۰۰ریال در سه درصد وزنی مختلف به قیر افزوده شده و میزان تغییرات TSR مخلوط‌ها با در نظر گرفتن قیمت تمام‌شده مخلوط با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به نامشخص بودن فاصله حمل مصالح سنگی، قیر، فیلر و آسفالت و سایر اضافه بهای مرتبط، ملاک مقایسه اقتصادی، بهای تمام‌شده لایه توپکای پنج سانتی‌متری در یک راه اصلی به‌طول یک کیلومتر و عرض ۷/۳ متر است و از سایر هزینه‌ها چشم‌پوشی شده است. آنالیز بهای قیمت تمام‌شده لایه توپکای پنج سانتی‌متری از مخلوط‌های بدون افزودنی و اصلاح‌شده ساخته شده با مصالح سنگی شماره یک و سه در جدول ۷ نشان داده شده است. در این جدول تغییرات TSR به درصد، در ستونهای چهارم و هفتم نوشته شده است.

با توجه به مشخص بودن تأثیر مواد افزودنی بر مخلوط‌های اصلاح‌شده نسبت به مخلوط‌های بدون افزودنی ساخته شده از مصالح سنگی شماره یک و مصالح سنگی شماره سه و آنالیز بهای قیمت تمام‌شده این مخلوط‌ها، مناسب‌ترین گزینه برای مقایسه دامنه اثر این مواد افزودنی، آنالیز هزینه –اثربخشی است. این روش نوع خاصی از آنالیز هزینه به منافع است که با هدف کاهش هزینه‌ها و افزایش تأثیر آن ایجاد شده است. گزینه اقتصادی در این روش گزینه‌ای است که شیب نمودار هزینه–اثربخشی آن کمتر باشد [Ralph et al. 1994]. این شیب برای یکایک ۹ گزینه اصلاح‌شده (سه ماده ضدعریان شدگی مایع بر روی سه نوع مصالح سنگی) نسبت به گزینه بدون افزودنی با کمک رابطه۱ به‌دست می‌آید.

$$A = \frac{P_1 - P_2}{T_1 - T_2} \qquad (۱)$$

A = شیب نمودارهزینه–اثربخشی

P1 = بهای مخلوط اصلاح‌شده

P2 = بهای مخلوط بدون افزودنی

T1 = TSR مخلوط اصلاح شده

T2 = TSRمخلوط بدون افزودنی

منظور از ΔTSR در مقاله، TSR مخلوط اصلاح شده منهای TSR مخلوط بدون افزودنی است. شیب نمودار هزینه–اثربخشی در ستونهای پنجم و هشتم جدول شماره ۷ نشان داده شده است. به علت بزرگ بودن هزینه ساخت راه نسبت به تغییرات TSR، شیب نمودار هزینه – اثربخشی، عدد بزرگی است. برای اینکه اندازه این عدد در جدول به خوبی نمایش داده شود، این اعداد بر یک میلیون تقسیم و سپس مقدار به دست آمده در ستونهای پنجم و هشتم جدول درج شده است. مقادیر مثبت در این دو ستون،

نشان دهنده تاثیر مثبت مواد ضد عریان شدگی است و هرچه این مقدار کمتر باشد و به عدد صفر نزدیک شود، نشان می‌دهد ماده ضدعریان شدگی تاثیر بیشتری داشته است. مقادیر منفی شیب نمودار هزینه–اثربخشی نشان دهنده ناسازگاری ماده ضدعریان شدگی با مصالح سنگی است که براساس داده‌های جدول شماره ۷، مصالح سنگی شماره یک با مایع ضدعریان شدگی شماره دو سازگار نبوده و این ماده بر میزان TSR این مصالح اثر منفی داشته است. بنابراین تاثیر هر ماده ضدعریان شدگی جدای از سوابق قبلی و تاثیرات مثبت آن بر روی دیگر مصالح باید بر روی مصالح جدید در آزمایشگاه بررسی شود. داده‌های جدول ۷ همچنین نشان دهنده تاثیر خوب مایعهای ضد عریان شدگی بر مصالح شماره سه است. مهم‌ترین علت این تاثیر ضعف مصالح سنگی شماره ۳ در برابر پدیده عریان شدگی است که همین باعث شده است تا این مصالح به میزان قابل توجهی در برابر مواد ضد عریان شدگی مایع واکنش نشان دهد. بیشترین میزان اثر بخشی در کل مواد ضدعریان شدگی در این تحقیق مربوط به تاثیر مایع ضد عریان شدگی شماره یک بر مصالح سنگی شماره سه است. این تاثیر به گونه‌ای است که مایع ضد عریان شدگی شماره یک این مصالح را که در حالت عادی دارای TSR پایینی در حد ۳۳ درصد بوده است را اصلاح نموده و آنرا براساس بسیاری از آیین‌نامه‌ها، قابل استفاده در لایه های آسفالتی نموده است. براساس نتایج آزمایشها، مصالح سنگی شماره سه دارای مشخصات مکانیکی خیلی خوبی است که به علت پدیده عریان شدگی نمی‌تواند در آسفالت مورد استفاده قرار گیرد. کاربرد دو دهم درصد میزان قیر بهینه ماده عریان شدگی شماره سه در این مصالح، سبب رفع نقص آن شده است. این مورد در بسیاری از پروژه‌های راهسازی در داخل کشور بسیار کارآمد و مثمر ثمر است. چون برخلاف رویه معمول در ارزیابی فنی و اقتصادی طرحهای عمرانی که در اکثر موارد با ارتقاء مشخصات فنی هزینه‌ها افزایش می‌یابد، در رابطه با کاربرد مواد ضدعریان شدگی علاوه براینکه مصالح سنگی سخت و آبدوست با مشخصات مکانیکی خوب را می‌توان در لایه آسفالتی مورد استفاده قرار داد هزینه پروژه نیز به دلیل کاهش هزینه‌های حمل کاهش می‌یابد. بنابراین کاربرد مواد ضدعریان شدگی مایع در بسیاری از موارد در داخل کشور یک عمل بسیار کارآمد است که از هر طرف دارای منافع عمده‌ای است. لازم به ذکر است ارزیابی اقتصادی مختص شرایط هر پروژه و معادن و مصالح موجود در اطراف آن است. در مواردی که معادن سنگهای سخت آبدوست در دسترس هستند، استفاده از مواد ضدعریان‌شدگی باید به عنوان یک گزینه بهینه مدنظر قرار گیرد.

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق T مواد ضد عریان شدگی و آهک، می‌توانند مسأله عریان شدگی را برای بسیاری از مصالح سنگی که به علت این پدیده در آسفالت گرم استفاده نمی‌شوند، برطرف نماید. چون این مصالح که حالت آبدوست دارند، در اکثر اوقات از سنگهای غیرآهکی با خصوصیات مکانیکی خوب و کانیهای مقاوم تشکیل شده‌اند و استفاده از آنها متغیرهای مکانیکی آسفالت را ارتقاء می‌دهد. حتی در برخی از شرایط هزینه حمل و نقل نیز با کاربرد مواد ضدعریان شدگی کاهش می‌یابد. این موضوع به خاطر این است که در بسیاری از شرایط دسترسی به سنگهای آذرین مانند گرانیت، بازالت و گابرو آسان‌تر است.

براساس نتایج آزمایشگاهی حاصل از انجام این تحقیق، مصالح سنگی شماره یک با آهک و همچنین مایع ضدعریان شدگی شماره یک قابل اصلاح است و مصالح سنگی شماره دو حساسیت خاصی نسبت به پدیده عریان شدگی ندارد. مصالح سنگی شماره سه به شدت نسبت به پدیده عریان شدگی حساس است که با مایع ضدعریان شدگی شماره دو قابل اصلاح است. نتایج نشان می‌دهد که مایع ضد عریان شدگی شماره ۲ با مصالح شماره یک سازگار نیست و پارامتر TSR با استفاده از این مایع ارتقاء نیافته است، بنابراین برطرف ساختن عریان شدگی از یک مخلوط تابع سعی و خطا بوده، وابسته به ساختار شیمیایی قیر، سنگدانه و مواد افزودنی و اندرکنش میان اجزای سازنده مخلوط آسفالتی است و نمی‌توان با دستورالعملی یکسان عریان شدگی را از همه مصالح

جدول ۷. آنالیز بهای مخلوطهای آسفالتی بدون افزودنی و اصلاح شده با مصالح سنگی شماره یک و سه

افزودنی‌ها	درصد افزودنی	قیمت مخلوط مصالح یک	ΔTSR	شیب نمودار هزینه- اثربخشی(10^6)	قیمت مخلوط مصالح سه	ΔTSR	شیب نمودار هزینه- اثربخشی(10^6)
بدون افزودنی	۰	۵۲۹۲۵۰۰۰۰	۰		۵۲۹۲۵۰۰۰۰	۰	
	۱	۵۴۷۹۰۲۹۸۰	۸/۳	۲/۲۵	۵۴۸۵۸۶۴۵۲	۱۰/۵	**۱/۸۴**
آهک هیدراته	۲	۵۶۶۵۲۲۳۸۳	۹/۷	۳/۸۴	۵۶۸۰۷۲۹۰۳	۱۶/۷	**۲/۳۲**
	۳	۵۸۵۰۸۳۵۷۴	۱۳/۷	۴/۰۸	۵۸۷۵۵۹۳۵۴	۳۳/۵	**۱/۷۴**
مایع شیمیایی شمارهٔ یک	۰/۲	۵۳۹۲۵۰۹۷۰	۴/۲	۲/۳۸	۵۳۸۰۲۱۴۹۰	۳۳/۵	**۰/۲۶**
	۰/۳	۵۴۴۳۷۶۴۵۵	۶/۸	۲/۲۲	۵۴۲۲۸۲۲۳۵	۳۳/۲	**۰/۳۹**
	۰/۴	۵۴۹۵۰۱۹۴۰	۸/۸	۲/۳۰	۵۴۶۸۴۲۹۸۰	۴۴/۴	**۰/۴۰**
مایع شیمیایی شمارهٔ دو	۰/۲	۵۴۶۸۲۷۱۹۳	-۱/۹	-۹/۲۵	۵۴۴۵۰۸۷۰۸	۲۵/۹	**۰/۵۹**
	۰/۳	۵۵۵۵۴۰۷۸۹	-۲/۹	-۹/۰۷	۵۵۲۰۶۳۰۶۱	۴۳/۳	**۰/۵۳**
	۰/۴	۵۶۴۲۵۴۳۸۶	-۰/۹	-۳۸/۹	۵۵۹۸۱۷۴۱۵	۴۲/۱	**۰/۷۳**
مایع شیمیایی شمارهٔ سه	۰/۲	۵۴۸۵۲۸۲۰۱	۵/۳	۳/۶۴	۵۴۷۱۱۱۱۲۳	۳۰/۱	**۰/۵۹**
	۰/۳	۵۵۷۶۴۲۲۳۵	۳/۸	۷/۴۷	۵۵۴۴۷۷۶۵۴	۳۵/۴	**۰/۷۱**
	۰/۴	**۵۶۶۱۴۵۶۷۴**	**۵/۱**	**۷/۲۳**	**۵۶۲۲۲۰۴۵۴**	**۳۸/۵**	**۰/۸۵**

سنگی موجود برطرف ساخت.

برای ارزیابی اقتصادی کاربرد مواد ضد عریان شدگی آنالیز هزینه- اثربخشی بر روی مصالح مورد آزمایش انجام شد که بیشترین میزان اثر بخشی در کل مواد ضدعریان شدگی در این تحقیق مربوط به تاثیر مایع ضد عریان شدگی شماره یک بر مصالح سنگی شماره سه بود.

ارزیابیهای اقتصادی نشان داد که افزایش هزینه تولید با توجه به میزان کم ماده ضدعریان‌شدگی مورد استفاده در مخلوط آسفالتی اندک است و در مقایسه با هزینه حمل و نقل مصالح آهکی ناچیز است. بطور کلی نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح موارد زیر خلاصه کرد.

- مواد مایع ضدعریان شدگی و آهک تاثیر مثبتی در مقابله با حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی دارند، ولی سازگاری آنها باید در روند طرح اختلاط بررسی شود.
- کاربرد درست و بجای مواد ضدعریان‌شدگی می‌تواند هم باعث ارتقاء مشخصات فنی و هم کاهش هزینه‌های اقتصادی تولید آسفالت شود.
- قبل از مردود کردن مصالح سنگی غیرآهکی (با دسترسی آسان)، بخاطر حساسیت رطوبتی در روند طرح اختلاط بهتر است کاربرد مواد ضدعریان‌شدگی مورد بررسی قرار گیرد.

۸. پی نوشتها

1- Federal Highway Administration
2- American Association of State Highway and Transportation Officials
3- American Society for Testing and Materials
4- Liquid anti-stripping agents
5- Belgian Road Research Centre (CRR)
6- Tensile strength ratio

۹. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، (۱۳۹۰) "آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران" وزارت راه و ترابری، مرکز تحقیقات و آموزش، نشریه شماره ۲۳۴.

- معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی (۱۳۹۲) "فهرست بهای

واحد پایه رشته راه، باند فرودگاه و زیرسازی راه‌آهن".

- Allen, R. G., Little, D. N., Bhasin, A. and Glover, C. J. (2014) "The effects of chemical composition on asphalt microstructure and their association to pavement performance", International Journal of Pavement Engineering, 15.1 pp. 9–22.

- Anderson, D. A., Duckatz, E. L. and Petersen, J. C. (1982) "The effect of anti-strip additives on the properties of asphalt cement", Journal of the Association of Asphalt Technologists, Vol. 51, pp. 298–316.

- The Asphalt Institute (2007) "Moisture sensitivity best practice to minimize moisture sensitivity in asphalt mixture", Manual Series No.24 (MS-24).

- Bausano, J. P. (2006) "Development of a new test procedure to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt", A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Iowa State University, Ames, Iowa.

- Boyes, A. J. (2011) "Reducing moisture damage in asphalt mixes using recycled waste additives", M.S. thesis, California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

- FHWD (2014) "Effects of various asphalt binder additives/modifiers on moisture-susceptible asphaltic mixtures", Research Report FHWA-ICT-14-004.

- Hicks, Gary (1991) "NCHRP 175: moisture damage in asphalt concrete", Transportation Research Board, National Highway Research Council, Washington, D. C.

- Kandhal, P. S. (1994) "Field and laboratory investigation of stripping in asphalt pavements: State of the art report", TRR. No. 1353, pp. 69-72.

- Little, D. N. and Epps, J. A. (2001) "The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt", Report for National Lime Association, The Versatile Chemical.

- Ralph, H., Roland, H. and Zaniewski, J. (1994) "Modern pavement management", Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

- Rice, J. M. (1958) "Relationship of aggregate characteristics to effect of water on bituminous paving mixture", American Society for Testing and Materials, STP. 240, p. 17.

- Santucci, L. (2003)"Moisture sensitivity of asphalt pavements", Technology Transfer Program, Institute of Transportation Studies, Pavement Research Center, UC Berkeley.

- Solaimanian, M., Harvey, J. Tahmoressi, M. and Tandon, V. (2003) "Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements", Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, San Diego, CA, Transportation Research Board.