

# ارزیابی فنی کاربرد مصالح سخت و آبدوست (باطله‌های معدن چغارت بافق یزد) در مخلوط‌های آسفالتی

حامد خانی سانجی\*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران  
سید سعید عریضی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [khani@yazd.ac.ir](mailto:khani@yazd.ac.ir)

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۸ - پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

صفحه ۳۹-۵۵

## چکیده

یکی از مشکلات فنی آسفالت گرم در استان یزد مشکل مقاومت سرشی است. دلیل این مشکل بافت ریز سنگدانه‌های آهکی است. معدن سنگ آهن چغارت بافق یزد دارای میلیون‌ها تن مصالح سخت و مرغوب سیلیسی است که به عنوان مصالح غیرقابل استفاده و باطله دیو شده است. در این تحقیق مقاومت سرشی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این نوع سنگدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و روش اصلاح مشکل حساسیت رطوبتی این نوع سنگدانه‌ها نیز بیان شده است. در این تحقیق به عنوان نوآوری از آزمایش‌های عملکردی پاندول انگلیسی و حساسیت رطوبتی برای بررسی و اصلاح باطله‌های معدن سنگ آهن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده مقاومت سرشی بهتر باطله‌های معدن بافق نسبت به سنگدانه‌های مرسوم آهکی است و همچنین نشان‌دهنده رفع مشکل حساسیت رطوبتی این مصالح با مواد زیکوترم و زایکوسیل است. علاوه بر مزایای فنی مزایای زیست محیطی کاربرد باطله‌های معدن سنگ آهن بافق قابل توجه است.

واژه‌های کلیدی: حساسیت رطوبتی، مقاومت سرشی، مواد ضد عریان شدگی، مخلوط آسفالت گرم

## ۱- مقدمه

می‌دهند. این امر سبب از بین رفتن بافت ریز و مقاومت سرشی آسفالت خواهد شد. براساس گزارش‌های پلیس در جاده‌های شهر یزد به علت کاهش مقاومت سرشی در برخی موارد طول خط ترمز تا دو برابر حد معمول نیز رسیده است. یکی از راهکارهای مناسب برای حل مشکل مقاومت سرشی در روسازی‌های آسفالتی استفاده از مصالح سنگی سیلیسی است. با توجه به اینکه سیلیس در مقیاس موس دارای شاخص سختی هفت است، دارای سختی مناسبی بوده و با گذشت زمان و بر اثر عبور ترافیک کمتر سختی خود را از دست می‌دهد. مشکل اصلی مصالح سنگی تهیه شده از باطله‌های معدن بافق که

یکی از خصوصیات عملکردی آسفالت گرم مقاومت سرشی<sup>۱</sup> است. با توجه به مسطح بودن سطح روسازی راه‌های اصلی بافت ریز در مقاومت سرشی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. مصالح سنگی که دارای زبری مناسبی در مقیاس موس نباشند با گذشت زمان بافت ریز و به طبع آن مقاومت سرشی خود را از دست می‌دهند. عموماً مصالح سنگی آهکی به خاطر جذب قیر و عدم حساسیت رطوبتی بیشترین کاربرد را در راه‌های ایران و استان یزد دارند. این مصالح دارای سختی در حدود سه تا چهار در مقیاس موس هستند که عدد پایینی است و به مرور زمان و بر اثر عبور ترافیک زبری خود را از دست

دارای درصد سیلیس بالایی هستند، حساسیت رطوبتی است. این مصالح چون آبدوست هستند در بسیاری از موارد طبق مشخصات مندرج در نشریه ۲۳۴ برای تولید آسفالت گرم به دلیل حساسیت رطوبتی زیاد مناسب نیستند (نشریه ۲۳۴، ۱۳۹۰). آسیب حساسیت رطوبتی 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 (Lottman, 1982).

خرابی حساسیت رطوبتی معمولاً به صورت عریان‌شدگی خود را نشان می‌دهد. مکانیسم‌های مختلفی برای ایجاد عریان‌شدگی و جدایی قیر از سطح سنگدانه معرفی شده است. این مکانیسم‌ها شامل جدایی قیر از سنگدانه، جایگزینی آب و قیر، امولسیون‌شدگی خود بخودی، فشار آب حفره‌ای، آب‌شستگی و تخریب لایه‌نازک قیری هستند (Solaimanian et al., 2003).

#### ۱-۱- تحقیقات گذشته

کاوسی و همکارش در تحقیقات خود در سال ۲۰۱۵ به این نتیجه رسیدند که اغلب این خواص مصالح سنگدانه‌ای است که بر ویژگی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی اثر می‌گذارد و همچنین مشخص کردند 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 (Nazirizad et al., 2015). شفابخش در سال ۲۰۱۴ تأثیر آهک هیدراته را بر روی بتن آسفالتی مورد ارزیابی قرار داد. تحقیقات او، نشان داد که اضافه کردن آهک هیدراته باعث تغییر خواص فیزیکی و افزایش ویسکوسیته (کندروانی) چسبنده قیری می‌شود.

پارامترهایی که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی به کار برده شدند شامل: مقاومت کششی غیر مستقیم، خواص تغییرشکل دائم، مدول برجهنگی و مقاومت خستگی بود. نتایج این تحقیق نشان دهنده بهبود در خواص تغییرشکل دائمی و تحمل خستگی مخلوط‌های آسفالتی

بود و مشخص گردید که گرچه مواد ضدعریان‌شدگی برای مخلوط‌های آسفالتی حساس به رطوبت، مفید هستند؛ اما استفاده نابجای افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی، مانند نسبت‌های غلط افزودنی‌ها یا روش غلط به کارگیری آن‌ها، نتیجه معکوس می‌دهد (Shafabakhsh et al., 2015).

در سال ۲۰۱۴ اداره راه فدرال آمریکا (FHWA) طی تحقیقی تأثیر مواد مایع ضد عریان‌شدگی، آهک و چند افزودنی دیگر را بر پدیده عریان‌شدگی در آسفالت گرم مورد بررسی قرار داد. براساس نتایج این تحقیق آهک و مواد مایع ضد عریان‌شدگی تأثیر قابل توجهی در رفع مشکل عریان‌شدگی در مخلوط آسفالت گرم داشتند و نتایج مثبت آهک بارزتر بود (Al-Qadi et al., 2014).

مقاومت در برابر لغزندگی، عبارت از نیروی بازدارنده و مقاومی است که تحت اندرکنش روسازی و چرخ قفل شده وسیله نقلیه ایجاد می‌شود (Wang & Flintsch., 2007). این نیرو متشکل از دو جزء چسبندگی و هیستریسیس است که جزء چسبندگی آن بعلمت جاذبه بین مولکولی شیار لاستیک چرخ و ذرات مصالح و جزء هیستریسیس در نتیجه تغییر شکل آج لاستیک در هنگام تماس با دانه‌های مصالح سنگی روسازی وجود می‌آید (Flintsch et al., 2005). هنگامیکه لاستیک در تماس با سنگدانه‌های روسازی فشرده می‌شود، توزیع تنش باعث ذخیره انرژی تغییر شکل درون لاستیک شده و زمانی که لاستیک آزاد می‌گردد، بخشی از انرژی ذخیره شده دوباره بازگردانی و بخش دیگر به صورت گرما از دست می‌رود، که برگشت ناپذیر است. انتظار می‌رود که اصطکاک ناشی از هیستریسیس (پسماند) در ذرات مصالح نامنظم یا زاویه‌دار بیشتر از ذرات گرد گوشه باشد زیرا نامنظم بودن باعث ایجاد تغییر شکل بیشتر در آج لاستیک می‌شود. لازم به ذکر است که جزء چسبندگی حساسیت بیشتری به بافت سطحی دارد (Bazlamit & Reza, 2005).

## ۲- روش‌های ارزیابی عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی

به طور کلی آزمون‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی را می‌توان در دو دسته آزمون مخلوط‌های متراکم‌نشده و آزمون مخلوط‌های متراکم‌شده دسته‌بندی کرد (Hamedi et al., 2015). آزمون‌های مخلوط‌های متراکم‌نشده برای کنترل ذرات قیراندود در حضور آب مناسبند. از مزایای مهم‌شان می‌توان به انجام ساده و ارزان و به تجهیزات و فرآیند آزمایشی ساده آن‌ها اشاره کرد اما این آزمون‌ها در مدل کردن اثر ترافیک و فشار آب حفره‌ای ناتوانند. آزمون‌های ویژه مخلوط‌های متراکم‌شده شامل آزمون‌های متراکم‌شده آزمایشگاهی، مغزه‌های میدانی، دال‌های متراکم‌شده در آزمایشگاه یا دال‌های نمونه‌گیری شده میدانی می‌باشند. با استفاده از این آزمون‌ها می‌توان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مخلوط را در اثر عملکرد آب، ترافیک و فشار آب حفره‌ای، اندازه‌گیری کرد. از معایب آزمون‌های مخلوط‌های متراکم‌شده، می‌توان به تجهیزات گران‌قیمت آزمایشگاهی آزمون‌ها، مدت زمان بیشتر آزمون‌ها، و نیاز به کار گسترده برای انجام آزمون اشاره کرد (Solaimanian et al. 2003).

انستیتیوی آسفالت آزمون جوشاندن<sup>۳</sup>، آزمون کشش غیرمستقیم، آزمون فشاری غرقاب، آزمون مسیر چرخ هامبورگ و آزمون تشدید شرایط محیطی را مناسب ارزیابی حساسیت رطوبتی میدانند (Asphalt ۲۰۰۷ Institute,).

از میان آزمون‌های ارزیابی حساسیت رطوبتی تنها آزمون‌هایی همچون "تأثیر آب روی مقاومت فشاری مخلوط‌های آسفالتی" یا اشتو<sup>۴</sup> (AASHTO) تی ۱۶۵، "مقاومت مخلوط‌های آسفالتی متراکم در اثر خرابی رطوبتی" یا اشتو تی ۲۸۳، "اثر رطوبت بر مخلوط‌های بتن آسفالتی" یا ای‌اس‌تی‌ام<sup>۵</sup> (ASTM) دی ۴۸۷۶، "تجهیزات سنجش شیارافتادگی جای چرخ برای نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم" یا اشتو تی ۳۲۴ و "اثر آب بر سنگدانه‌هایی با پوشش قیری با استفاده از جوشاندن" ای‌اس‌تی‌ام دی ۳۶۲۵ جزو استانداردهای

اشتو و ای‌اس‌تی‌ام پذیرفته شده‌اند (Al-Qadi et al., 2014). استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۳۶۲۵ ویژه مخلوط‌های متراکم‌نشده بوده و در برخی از مؤسسات حمل و نقل ایالات‌متحده برای سنجش تأثیر مواد ضد عریان‌شدگی در فرآیند تولید و کنترل کیفی مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. این آزمون بصری بوده و به بررسی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط و آثار ترافیک نمی‌پردازد (Hamedi & Moghadas nejad, 2016). به عقیده بسیاری از متخصصین استاندارد اشتو تی ۳۲۴ برای ارزیابی پتانسیل عریان‌شدگی بسیار سخت‌گیر است (Asphalt ۲۰۰۷ Institute,). استاندارد اشتو تی ۱۶۵ نسبت به آسیب‌دیدگی رطوبتی حساس نبوده، به‌گونه‌ای که حتی پس از بروز عریان‌شدگی بصری در آزمون، مقاومت باقی‌مانده کاهش چندانی نمی‌یابد. برخلاف عدم قطعیت‌هایی همانند تجربی بودن آزمون، وابستگی نتایج به نوع تراکم، قطر آزمون‌ها، درجه اشباع و چرخه یخبندان و ذوب هم-اکنون استاندارد اشتو تی ۲۸۳ و با درجه اهمیت کمتر استاندارد ای‌اس‌تی‌ام دی ۴۸۶۷ از مقبولیت گسترده‌ای در تعیین عریان‌شدگی مخلوط برخوردارند. با توجه به تمرکز این مطالعات روی رفتار مخلوط و مقبولیت گسترده استاندارد اشتو تی ۲۸۳، این استاندارد به‌عنوان مناسب‌ترین ابزار سنجش عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی بوده و در این تحقیق برای تعیین مقاومت عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی بکار رفته است (Nazirizad et al., 2015).

## ۳- فعالیتهای آزمایشگاهی

### ۱-۳- انواع مواد ضدعریان‌شدگی، خصوصیات و تجربیات

مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی برای بهبود بخشیدن پیوند میان قیر و سنگدانه به کار می‌روند. از انواع افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی می‌توان به آهک هیدراته، افزودنی‌های مایع مانند آمین‌ها و دی‌آمین‌ها، مواد پلیمری، سیمان، خاکستر بادی و گرد دوده، انواع فیلرها و غیره اشاره کرد. تحقیقات نشان داده است که آمین‌ها، سیمان

پرتلند و آهک هیدراته نسبت به پلیمرها در جلوگیری از آسیب‌دیدگی رطوبتی موثرتر هستند. آزمون جوشاندن (ای‌اس‌تی‌ام دی ۳۶۲۵) روشی سریع برای نشان دادن سازگاری شیمیایی بین قیر و سنگدانه در مخلوطهای آسفالتی غیرمتراکم است. در این آزمایش معیار پذیرش مصالح سنگی حفظ ۹۵ درصدی پوشش قیری سنگدانه‌های فیراندود است. اگر مخلوطی در آزمون

مخلوط متراکم‌نشده پذیرفته نشود، باید با افزودنی مناسب اصلاح شده، آزمون تکرار شود. با پذیرش مخلوط متراکم‌نشده، باید صلاحیت مخلوط متراکم‌شده با کمک یکی از آزمون‌های استاندارد کنترل عریان‌شدگی ارزیابی شود (ASTM, ۲۰۰۵). استانداردهای مناسب جهت کنترل خصوصیات فیزیکی این مواد در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع

| ردیف | آزمایش  | روش آزمایش  |
|------|---|-------------|
| ۱    | وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۷۷ فارنهایت)        | AASHTO T228 |
| ۲    | گرانروی بروکفیلد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۷۷ فارنهایت) | ASTM D2196  |
|      | با استفاده از گرانروی‌سنج RVT                             |             |
| ۳    | نقطه اشتعال فنجان بسته پنسکی - مارتنز                     | ASTM D93    |
|      | نقطه اشتعال ظرف روباز کلیولند                             | AASHTO T48  |
| ۴    | طیف‌سنجی مادون قرمز (مصالح تمیز)                          | روش مناسب   |

یکی از مواد ضدعریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی آهک است. آهک مناسب مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی بیشتر به شکل آهک زنده با کلسیم زیاد، آهک دولومیتی زنده، آهک هیدراته با کلسیم زیاد، آهک دولومیتی زنده عادی هیدراته شده و آهک دولومیتی زنده تحت فشار هیدراته شده‌است. آهک هیدراته ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) و آهک زنده (CaO) هر دو در جلوگیری از عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی گرم موثر هستند، اما بکارگیری آهک هیدراته متداول‌تر است. محققان نشان دادند که با اضافه نمودن آهک هیدراته به مخلوط‌های آسفالتی، چسبندگی پیوند میان سنگدانه و قیر بهبود می‌یابد. علاوه بر آن، آهک هیدراته می‌تواند با رس موجود بر سطح یا درون سنگدانه‌ها واکنش داده، آسیب‌دیدگی رطوبتی حاصل از ذرات رسی را به حداقل رساند (Nazirizad et al., 2015). افزودن آهک هیدراته به مخلوط موجب افزایش سختی مخلوط، مدول الاستیسیته دینامیکی، مقاومت کششی مخلوط و بهبود مقاومت شیارافتادگی رویه می‌شود استاندارد آشتو ام ۳۰۳، مشخصات آهک هیدراته با کلسیم زیاد و آهک هیدراته

منگیزی یا دولومیتی را برای استفاده در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی ارائه می‌نماید. الزامات فیزیکی آهک افزوده شده به مخلوط به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی باید مطابق استاندارد آشتو تی ۲۱۹ باشد. آمین‌ها، سیمان پرتلند و آهک هیدراته نسبت به پلیمرها در جلوگیری از آسیب‌دیدگی رطوبتی موثرتر هستند. (Al-Qadi, I.L. et al., 2014).

### ۳-۲- 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 دو 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

نماید. 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. آنالیز شیمیایی این آهک در جدول ۲ ارائه شده است (AASHTO, 1993).

خالص مخلوط، به میزان ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد به قیر خالص افزوده می‌شوند. این درصدها به عنوان پیشفرض توسط شرکت خارجی تولید کننده ارائه شده‌اند.

### ۳-۲-۱- آهک هیدراته

آهک مناسب برای کاربرد به‌عنوان ماده ضد عریان‌شدگی آهکی است که ضوابط استاندارد اش تو ام ۳۰۳ را برآورد

جدول ۲. درصد ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه آهک پذیرش شده طبق تاییدیه مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

| آب آزاد<br>برحسب درصد | CO <sub>2</sub><br>برحسب درصد | MgO<br>بر حسب درصد | CaO<br>برحسب درصد | Ca(OH) <sub>2</sub><br>برحسب درصد |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------------|
| ۰/۸                   | ۳/۳                           | ۱/۱                | ۳/۲               | ۹۱/۶                              |

### ۳-۲-۲- مایع‌های ضد عریان‌شدگی

#### ۳-۳- قیر

قیرهای انتخابی برای این تحقیق از نوع ۶۰-۷۰ بوده و کلیه الزامات استاندارد را براساس آیین‌نامه ایران (جدول ۱-۱۴ نشریه ۱۰۱) تامین کرده است.

#### ۳-۳-۴- مصالح سنگی

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

مصالح سنگدانه‌ای منتخب جدای از آنالیز شیمیایی مطابق با استاندارد ای‌اس‌تی‌ام سی ۲۵، باید تمامی ویژگی‌های مندرج در نشریه‌های شماره ۱۰۱ و ۲۳۴ 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 شش و چهار حاکی از آن بود که این چهار نوع مصالح برای ادامه آزمون‌ها مناسبند. نتایج آنالیز شیمیایی مصالح

ویژگی‌های مخلوط قیر و مایع ضد عریان‌شدگی به ترکیب شیمیایی قیر و ترکیب شیمیایی، میزان غلظت و نوع ماده پراکنده‌ساز استفاده شده با مایع‌های ضد عریان‌شدگی بستگی دارد (Kim et al., 2012). در این تحقیق دو نوع مایع ضد عریان‌شدگی با زایکوسیل و زایکوترم مورد استفاده قرار گرفتند. مواد ضدعریان‌شدگی مایع، محلول در قیر هستند و برای افزودن آن‌ها نیاز به ادوات پیشرفته مانند پلیمرها نیست ولی باید یکنواختی اختلاط آن‌ها با قیر کنترل گردد. ویژگی‌های مخلوط قیر و مایع ضد عریان‌شدگی به ترکیب شیمیایی قیر و ترکیب شیمیایی، میزان غلظت و نوع ماده پراکنده‌ساز استفاده شده با مایع‌های ضد عریان‌شدگی بستگی دارد. در این تحقیق دو نوع مایع ضد عریان‌شدگی با نام زایکوترم وزایکوسیل مورد استفاده قرار گرفتند. ویژگی‌های این مایع‌ها بر پایه اعلام شرکت تولیدکننده آن به شرح جدول ۳ است. مواد ضدعریان‌شدگی مایع، محلول در قیر هستند و برای افزودن آن‌ها نیاز به ادوات پیشرفته مانند پلیمرها نیست ولی باید یکنواختی اختلاط آن‌ها با قیر کنترل گردد.

سیلیسی و آهنی به ترتیب در جداول شماره ۴، ۵ آورده شده است. قلیایی ( $K_2O+Na_2O+MgO+CaO$ ) را نمی توان نادیده گرفت.

با در نظر گرفتن مقدار درصد میانگین  $SiO_2$  و همچنین مجموع مقدار درصد فلزات حد واسط ( $Fe_2O_3+Al_2O_3$ ) می توان انتظار وقوع عریان شدگی را در سنگدانه های مصالح شماره یک داشت ولی مقدار درصد میانگین مولفه های بدلیل زیاد بودن درصد کربنات، این مصالح سنگدانه ای بعنوان مصالح مقاوم در برابر پدیده عریان شدگی شناخته و گزینش شد. این نوع مصالح از نوع سنگدانه های آهنی است که به وفور در تولید آسفالت در داخل کشور استفاده می شود.

جدول ۱. مشخصات مایع های ضد عریان شدگی بر پایه اعلام شرکت تولیدکننده

| ردیف | مایع     | حالت | رنگ                    | نقطه اشتعال    | دمای احتراق    | نقطه انجماد   | دانشیته در $kg/m^3$ در $20^\circ C$ | حلالیت در آب |
|------|----------|------|------------------------|----------------|----------------|---------------|-------------------------------------|--------------|
| ۱    | زایکوترم | مایع | روشن به رنگ زرد کم رنگ | $>180^\circ C$ | $>240^\circ C$ | $7^\circ C$   | ۹۵۰                                 | نامحلول      |
| ۲    | زایکوسیل | مایع | روشن به رنگ زرد کم رنگ | $280^\circ C$  | $>240^\circ C$ | $-11^\circ C$ | ۹۷۷                                 | نامحلول      |

جدول ۴. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی مصالح سنگدانه ای سیلیسی

| شماره سنگ | درصد $SiO_2$ | درصد $Al_2O_3$ | درصد $CaO$ | درصد $K_2O$ | درصد $Na_2O$ | درصد $MgO$ | درصد $P$ | درصد $S$ | درصد $Ti_2O$ | درصد $Fe$ |
|-----------|--------------|----------------|------------|-------------|--------------|------------|----------|----------|--------------|-----------|
| یک        | ۶۲/۶         | ۱۳/۱           | ۱/۳۲       | ۰/۰۴۱       | ۱/۴۴         | ۲/۵۵       | ۰/۰۳۳    | ۰/۰۴۰    | ۰/۲۸         | ۲/۳۳      |
| دو        | ۵۴/۵         | ۸/۶            | ۸/۱۶       | ۰/۹۳۶       | ۰/۸۷         | ۴/۴۶       | ۰/۰۱۸    | ۰/۰۲۵    | ۰/۲          | ۴/۳۴      |
| شش        | ۷۴/۸         | ۱۶/۷           | ۰/۴۲       | ۰/۰۷۸       | ۱/۷۵         | ۰/۴۱       | ۰/۰۳۲    | ۰/۰۱۲    | ۰/۲۹         | ۱/۳۹      |

جدول ۲. نتایج آنالیز شیمیایی بر روی مصالح سنگدانه ای شماره چهار (آهنی)

| مشخصات نمونه مصالح       | درصد $SiO_2$ | درصد $Fe_2O_3 + Al_2O_3$ | درصد $CaO$ | درصد $K_2O$ | درصد $Na_2O$ | درصد $MgO$ | درصد $CO_2$ |
|--------------------------|--------------|--------------------------|------------|-------------|--------------|------------|-------------|
| شماره چهارم (مصالح آهنی) | ۲/۳۲         | ۱/۳۴                     | ۴۹/۶۷      | ۰/۰۱        | ۰/۰۴         | ۳/۴۷       | ۴۲/۲۵       |

با در نظر گرفتن مقدار درصد میانگین  $SiO_2$  و همچنین مقدار درصد میانگین مولفه های قلیایی  $K_2O+Na_2O$  که تشکیل نمک های تک ظرفیتی (ناپایدار در حضور آب) را در فصل مشترک قیر- سنگدانه می دهد، می توان در این مصالح انتظار وقوع عریان شدگی داشت. آزمایش های تعیین حدود اثربرگ، ارزش ماسه ای، تعیین شاخص تطویق و

تی ۱۶۶ و مقدار استحکام و روانی نمونه‌ها با استناد به استاندارد اشتو تی ۲۴۵ تعیین شد.

#### ۴-۱- آزمایش آونگ انگلیسی<sup>۶</sup>

در این تحقیق برای ارزیابی مقاومت لغزندگی از آزمایش آونگ انگلیسی بر روی نمونه‌ها استفاده شد. این آزمایش در استانداردهای مختلفی تشریح شده‌است که کاملترین آنها دستورالعمل موسسه تحقیقات راه و حمل و نقل انگلستان (TRRL) و استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ای ۳۰۳ است. در این تحقیق از استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ای ۳۰۳ استفاده شده‌است. در شکل ۱ آونگ انگلیسی موجود در آزمایشگاه قیر و آسفالت دانشگاه یزد نشان داده شده‌است. در این تحقیق مقاومت لغزندگی نمونه‌های آسفالتی تهیه شده با چند نوع مصالح سنگی تولید شده از باطله‌های معدن بافق مورد آزمایش لغزندگی قرار گرفته تا با آسفالت تولید شده با سنگ آهکی مقایسه گردد. آزمایش لغزندگی بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ای ۳۰۳ بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و میانگین ۵ قرائت متوالی مشروط بر این که بیش از ۳ واحد با هم اختلاف نداشته باشند به عنوان BPN ثبت شد.

تورق، تعیین درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس‌آنجلس، تعیین افت وزنی در مقابل سولفات سدیم، تعیین درصد شکستگی در یک جبهه و دو جبهه مصالح سنگی بر روی مصالح سنگی انجام شد که نتایج آن برای مصالح سنگدانه‌ای در جداول ۶ ارائه شده‌است. مشاهده می‌شود که ویژگی‌های هر چهار نوع مصالح سنگدانه‌ای با مشخصات ارایه شده در نشریه‌های شماره ۱۰۱ و ۲۳۴ مطابقت دارد.

#### ۴- طرح اختلاط بتن آسفالتی گرم

دانه‌بندی مصالح سنگی بکار رفته در این مخلوط‌های آسفالتی مطابق با دانه‌بندی شماره ۴ جدول ۲۰-۳ نشریه ۱۰۱ است. نمونه‌های مخلوط آسفالتی برای مصالح سنگی شماره یک، دو و شش و چهار با درصد‌های مختلف قیر، با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با استفاده از قیر ۷۰-۶۰ به روش مارشال تهیه شد. وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط آسفالتی مترکم براساس استاندارد اشتو

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های مرغوبیت مصالح سنگدانه‌ای شماره یک، دو و سه و چهار

| واحد | استاندارد آزمایش | حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴ |      | نتایج آزمایش |       |       |       | مشخصه                  |                               |
|------|------------------|-------------------------|------|--------------|-------|-------|-------|------------------------|-------------------------------|
|      |                  | رویه                    | آستر | سنگ ۴        | سنگ ۶ | سنگ ۲ | سنگ ۱ | حدافل شکستگی روی الک ۴ | در یک وجه                     |
|      | T176             |                         |      |              |       |       |       |                        | ارزش ماسه‌ای                  |
| درصد | T96              | ۳۰                      | ۴۰   | ۲۳           | ۱۹    | ۱۶    | ۱۷    |                        | سایش لوس آنجلس                |
| درصد | D5821            |                         |      |              |       | ۱۰۰   | ۹۸    |                        | در یک وجه                     |
| درصد |                  | ۹۰                      | ۸۰   |              |       | ۱۰۰   | ۹۲    | در دو وجهه             |                               |
| درصد | BS 812           |                         |      | ۹            | ۱۵    | ۱۵    | ۱۴    |                        | تطویق                         |
| درصد |                  | ۲۵                      | ۳۰   | ۱۹           | ۱۷    | ۱۸    | ۱۸    |                        | تورق                          |
| درصد | T182             |                         |      | ۰/۳          | ۱/۴   | ۰/۹   | ۱/۲   |                        | افت وزنی در مقابل سولفات سدیم |



شکل ۱. دستگاه آونگ انگلیسی

این جداول حساسیت رطوبتی چهار نوع مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق در ده حالت بیان شده است این حالت‌ها شامل بدون افزودنی و سه درصد متفاوت آهک و ۲ نوع ماده ضد عریان‌شدگی هر کدام با سه درصد است. مصالح شماره چهارم 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 آیین‌نامه‌های راهسازی برای استفاده در آسفالت را بدست آورد ولی به‌طور کلی مشخصات مکانیکی و زبری سنگ‌های سیلیسی بعلت وجود کانی‌های سخت مانند کوارتزیت بالاتر از سنگ‌های رسوبی آهکی است. همانطور که از داده‌های جدول ۱۲ مشخص است مصالح آهکی شماره چهارم در حالت معمولی هم دارای TSR خوبی است و مستعد عریان‌شدگی نمی‌باشد. بنابراین استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی مایع و آهک برای این مصالح ضرورتی ندارد. مصالح شماره دو تقریباً مستعد برای عریان‌شدگی 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. ولی با توجه به مسائل اجرایی، بسیاری از پیمانکاران در این مورد هم ترجیح می‌دهند از مقدار کمی مواد ضد عریان‌شدگی مایع درحد ۰/۰۵

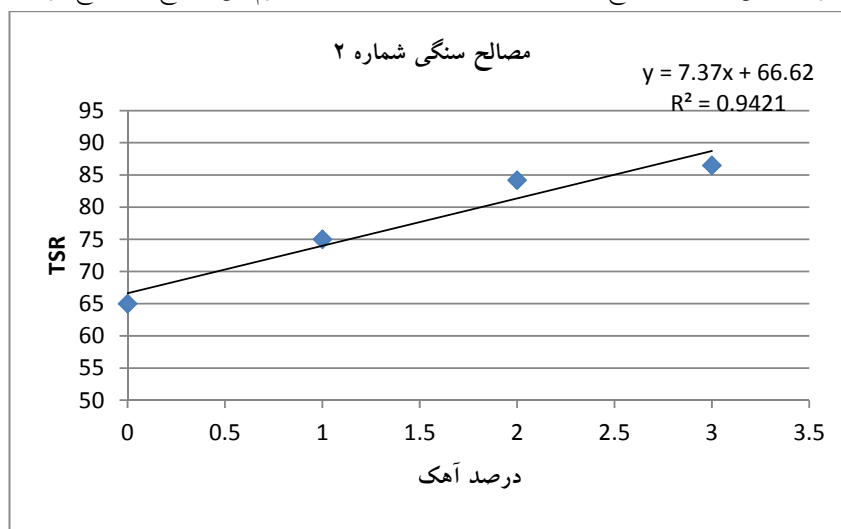
#### ۴-۲- ارزیابی فنی مخلوط‌های آسفالتی گرم اصلاح شده با مواد افزودنی

در این تحقیق از یک نوع سنگ آهکی و سه نوع مصالح سنگی با درصد سیلیس بالا استفاده شده است. سه نوع مصالح سنگی شماره یک و دو و شش از جنس سنگ‌های غیرآهکی بوده و نسبت به آب تمایل بیشتری دارند. به همین علت این سه نوع مصالح سنگی استعداد بیشتری برای بروز پدیده عریان‌شدگی دارند. مصالح سنگی شماره دو در حالت عادی دارای ضریب  $TSR^1$  ۶۵ درصد است و بر اساس بسیاری از آیین‌نامه‌ها که در آن‌ها حدود و رواداری این پارامتر بالاتر یا مساوی ۷۵ درصد است، پذیرفته شده نیست. از طرفی اکثر مصالح سنگی غیرآهکی مانند مصالح شماره دو با توجه به درصد زیاد سیلیس موجود در آن‌ها دارای مشخصات مکانیکی بسیار خوبی برای استفاده در لایه‌های آسفالتی می‌باشند 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 مایع‌های ضد عریان‌شدگی و آهک در این شرایط دارای توجیه فنی و اقتصادی قابل توجهی است. جداول شماره ۸ تا ۱۱ تاثیر مواد ضد عریان‌شدگی مایع زایکوترم و زایکوسیل را به ترتیب بر میزان TSR مصالح شماره یک، دو و شش و چهار نشان می‌دهد. در

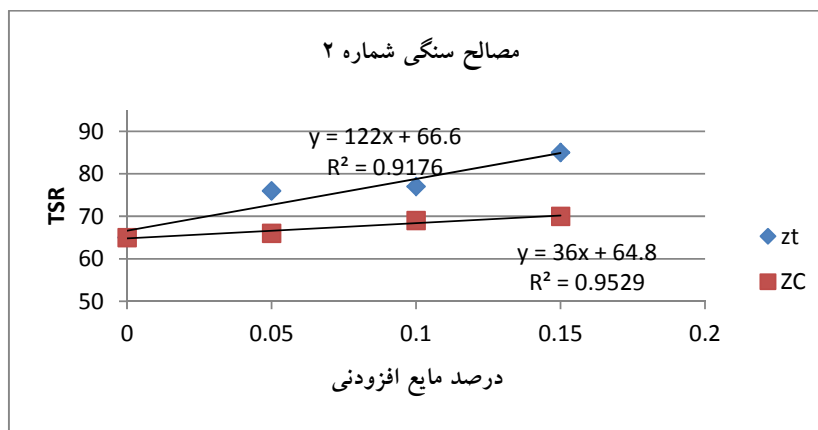


برخی از موارد طراح مجبور است برای اصلاح یک نوع مصالح مستعد برای عریان‌شدگی چند نوع ماده ضد عریان‌شدگی را آزمایش کرده و ماده مناسب و درصد استفاده از آنرا تعیین نماید. در اینجا کاربرد ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد از هر دو نوع مواد ضد عریان‌شدگی مایع امکان اصلاح مصالح سنگی شماره ۱ و ۶ را فراهم آورده است و به این ترتیب 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 پنج و هفت). نمودار شکل شماره ۲ تأثیر آهک بر مصالح سنگی شماره دو نشان می‌دهد. این مصالح در حالت عادی دارای ضریب TSR ۶۵ درصد است که نشان می‌دهد بهتر است اصلاحی در زمینه پدیده عریان‌شدگی برای این مصالح انجام شود. آهک تأثیر خوبی در اصلاح این مصالح داشته است ولی در صورتی که با توجه به مسائل اجرایی از مایع‌های ضد عریان‌شدگی استفاده شود باید از نتایج موجود در نمودار شماره ۳ استفاده شود. نتایج نمودار شماره ۳ نشان می‌دهد که مایع ضد عریان‌شدگی زایکوسیل با مصالح شماره دو سازگار نیست و پارامتر TSR با استفاده از این مایع ارتقاء کمی یافته است و استفاده از آهک و زایکوترم برای رفع مشکل حساسیت رطوبتی مصالح شماره دو موثر است و میتوان با استفاده از ۲ درصد آهک و یا ۰/۰۸ درصد زایکوترم این مصالح را اصلاح کرد.

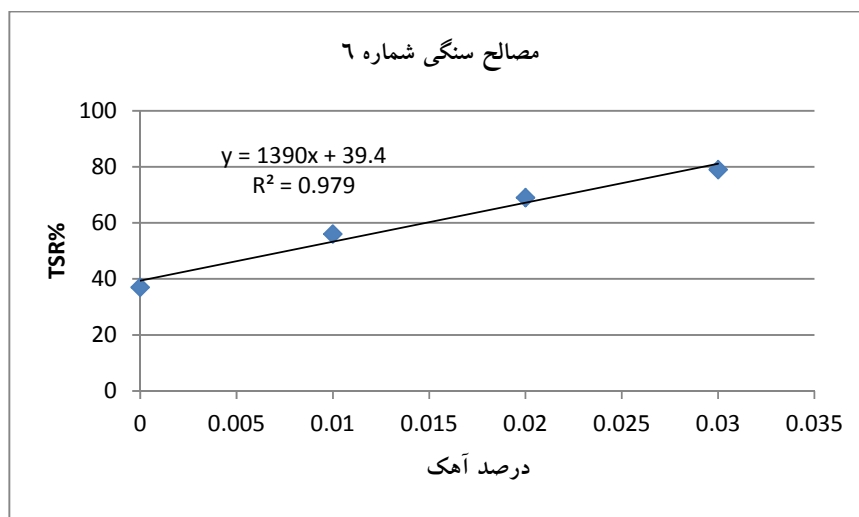
درصد میزان قیر بهینه برای اصلاح مصالح شماره دو استفاده کنند. مصالح شماره یک و شش کاملاً نسبت به پدیده عریان‌شدگی حساس بوده و به‌صورت خالص قابل استفاده در راهسازی نیست. حتی استفاده از دو درصد آهک نیز TSR مصالح سنگی ۶ را تا حدود ۶۹ درصد و مصالح سنگی ۱ را ۷۰ درصد افزایش داده است که بر اساس آیین‌نامه‌های 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 عریان‌شدگی مایع این نوع مصالح را اصلاح نمود و از آن در راهسازی استفاده کرد. در این تحقیق به دلیل شرایط خاص و مشکل لغزندگی با اصلاح حساسیت رطوبتی که از نوع باطله‌های معدن سنگ آهن بافق است، نسبت به اصلاح این مصالح اقدام شده است. نمودارهای شماره ۲ تا ۹ تأثیر مواد ضد عریان‌شدگی مایع زایکوترم و زایکوسیل و آهک را به ترتیب بر مصالح شماره یک، دو و شش نشان می‌دهد. در این نمودارها با توجه به درصد استفاده از ماده ضد عریان‌شدگی، خطی بر داده‌ها برازش شده است. ضریب زاویه این خط بیانگر میزان تأثیر ماده ضد عریان‌شدگی است. با توجه به اینکه درصد استفاده از آهک خیلی بیشتر از مواد ضد عریان‌شدگی مایع است داده‌های مربوط به آن به علت پراکندگی بیشتر، در این نمودارها درج نشده است. در



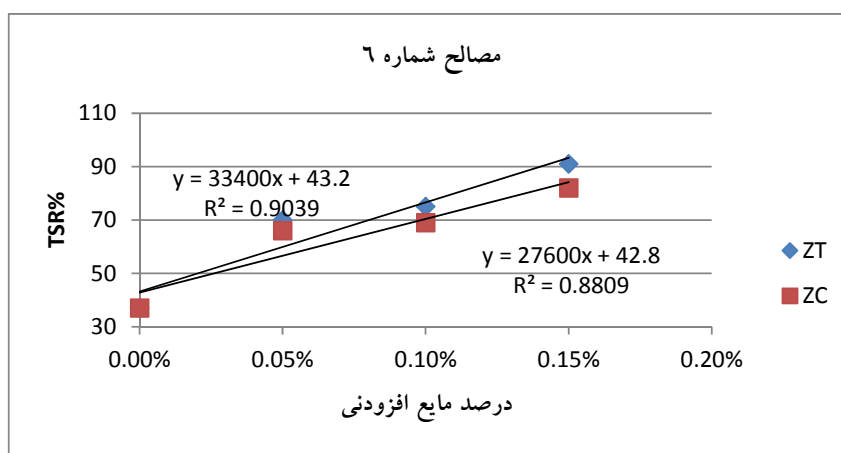
شکل ۱. تأثیر ماده ضد عریان‌شدگی آهک بر مصالح سنگی ۲



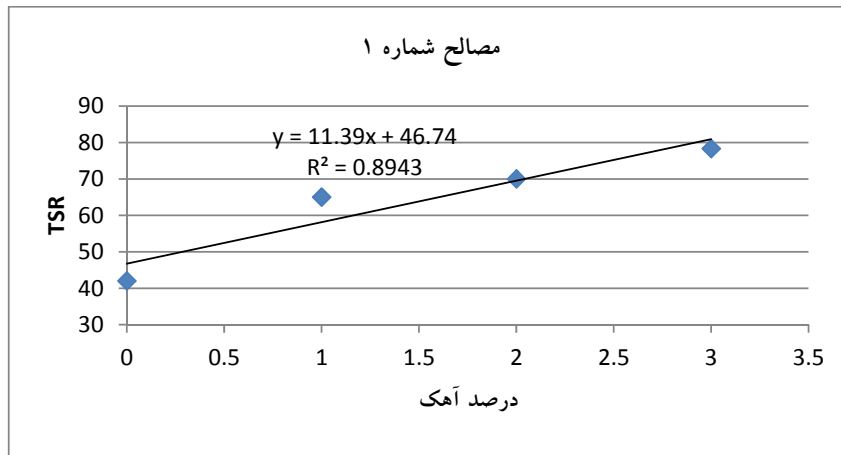
شکل ۳. تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۲



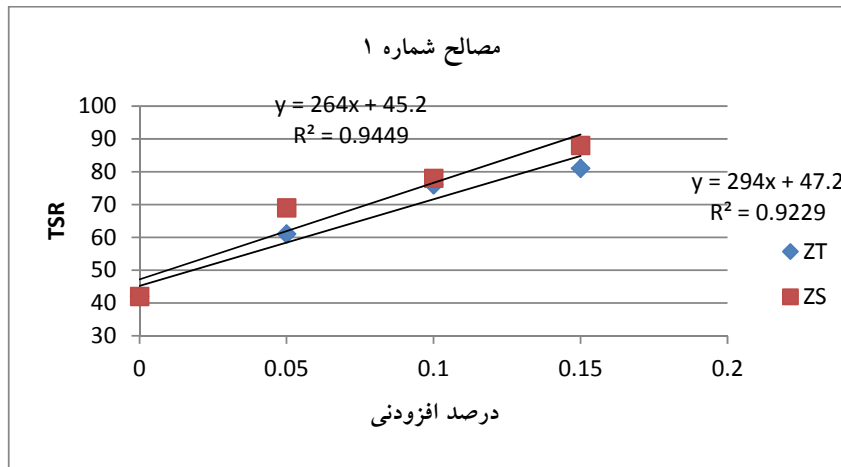
شکل ۲. تاثیر ماده ضد عریان شدگی آهک بر مصالح سنگی ۶



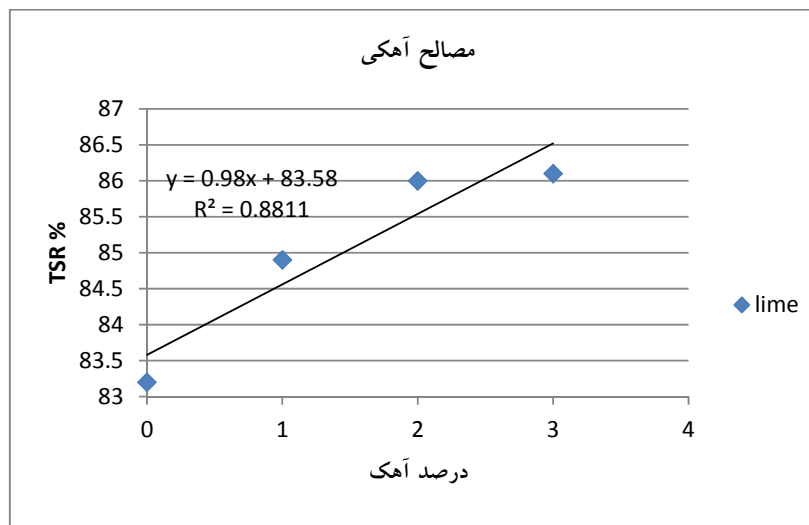
شکل ۳. تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۶



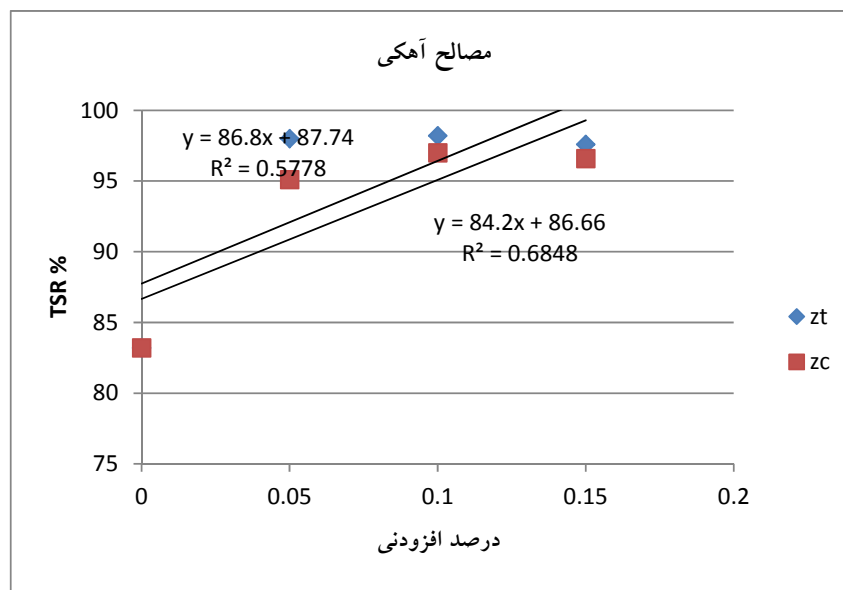
شکل ۴. تاثیر ماده ضد عریان شدگی آهک بر مصلح سنگی ۱



شکل ۵. تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع بر مصلح سنگی ۱



شکل ۶. تاثیر ماده ضد عریان شدگی آهک بر مصلح سنگی ۴ (آهکی)



شکل ۷. تاثیر مواد ضد عریان شدگی مایع بر مصالح سنگی ۴ (آهکی)

مشاهده می‌شود ماده ضد عریان‌شدگی مایع شماره ۲ که در مصالح شماره ۱ و ۶ تأثیر خوبی دارد، در مصالح سنگی شماره دو اثر مناسبی ندارد، بنابراین سازگاری ماده ضد عریان‌شدگی باید طی روند طراحی اختلاط بررسی شود. مصالح سنگی شماره ۱ و ۶ دارای خصوصیات مکانیکی خوبی برای استفاده در مخلوط آسفالتی است ولی میزان حساسیت رطوبتی آن‌ها بسیار زیاد است. نمودارهای شماره ۴ و ۵ و ۶ و ۷ نشان می‌دهد که این مصالح به خوبی با استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی قابل اصلاح هستند.

همانطور که از نمودارهای شکل شماره ۹ مشخص است میزان ضریب همبستگی در این نمودار به شکل کاملاً بارزی از نمودارهای دیگر مربوط به تاثیر زایکوسیل و زایکوترم بر مصالح سنگی پایین تر است. این امر نشان دهنده عدم همبستگی بین افزایش مواد ضد عریان شدگی مایع و حساسیت رطوبتی مصالح آهکی است و تاثیر کم زایکوسیل و زایکوترم را بر مصالح سنگی آهکی نشان می‌دهد.

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 عریان‌شدگی 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 برای یک نوع مصالح بدست آید ولی قابل تعمیم به مصالح دیگر نیست. در اینجا مایع ضد عریان‌شدگی شماره یک با توجه به نتایج نمودار شماره سه برای اصلاح مصالح شماره دو مفید است.

جدول ۴. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره یک

| مایع ضد عریان شدگی دو |     |      | مایع ضد عریان شدگی یک |     |      | آهک  |    |    | بدون افزودنی | نوع ماده افزودنی  |
|-----------------------|-----|------|-----------------------|-----|------|------|----|----|--------------|-------------------|
| ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۳    | ۲  | ۱  | -            | درصد ماده افزودنی |
| ۸۸                    | ۷۸  | ۶۹   | ۸۱                    | ۷۶  | ۶۱   | ۷۸/۳ | ۷۰ | ۶۵ | ۴۲           | TSR               |

جدول ۹. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره دو

| مایع ضد عریان شدگی دو |     |      | مایع ضد عریان شدگی یک |     |      | آهک  |      |    | بدون افزودنی | نوع ماده افزودنی  |
|-----------------------|-----|------|-----------------------|-----|------|------|------|----|--------------|-------------------|
| ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۳    | ۲    | ۱  | -            | درصد ماده افزودنی |
| ۷۰                    | ۶۹  | ۶۶   | ۸۵                    | ۷۷  | ۷۶   | ۸۶/۵ | ۸۴/۲ | ۷۵ | ۶۵           | TSR               |

جدول ۵. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره شش

| مایع ضد عریان شدگی دو |     |      | مایع ضد عریان شدگی یک |     |      | آهک |    |    | بدون افزودنی | نوع ماده افزودنی  |
|-----------------------|-----|------|-----------------------|-----|------|-----|----|----|--------------|-------------------|
| ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۳   | ۲  | ۱  | -            | درصد ماده افزودنی |
| ۸۲                    | ۶۹  | ۶۶   | ۹۱                    | ۷۵  | ۷۰   | ۷۹  | ۶۹ | ۵۶ | ۳۷           | TSR               |

جدول ۱۱. میزان حساسیت رطوبتی مصالح سنگی شماره چهار (آهکی)

| مایع ضد عریان شدگی دو |     |      | مایع ضد عریان شدگی یک |      |      | آهک  |    |      | بدون افزودنی | نوع ماده افزودنی  |
|-----------------------|-----|------|-----------------------|------|------|------|----|------|--------------|-------------------|
| ۰/۱۵                  | ۰/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۱۵                  | ۰/۱  | ۰/۰۵ | ۳    | ۲  | ۱    | -            | درصد ماده افزودنی |
| ۹۶/۶                  | ۹۷  | ۹۵/۱ | ۹۷/۶                  | ۹۸/۲ | ۹۸   | ۸۶/۱ | ۸۶ | ۸۴/۹ | ۸۳/۲         | TSR               |

## ۵- بررسی میزان لغزندگی مصالح

از بافت زیر (بافت ریز) این نوع سنگدانه‌ها است. به دلیل مقاومت سایش بالاتر باطله‌ها نسبت به مصالح آهکی در آزمایش لس‌آنجلس، مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده از باطله‌ها تحت بار ترافیکی نیز قادر به حفظ مقاومت اصطکاکی خود برای مدت زمان طولانی خواهند بود. یکی از مزایای مصالح سنگی تهیه شده از مصالح باطله بر اساس نمودار شماره ۱۰ مقاومت لغزندگی آنهاست علاوه بر مقاومت لغزندگی آزمایش لس‌آنجلس بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام سی ۱۳۱ بر روی این نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج این آزمایش می‌تواند ملاکی برای تعیین میزان سایش

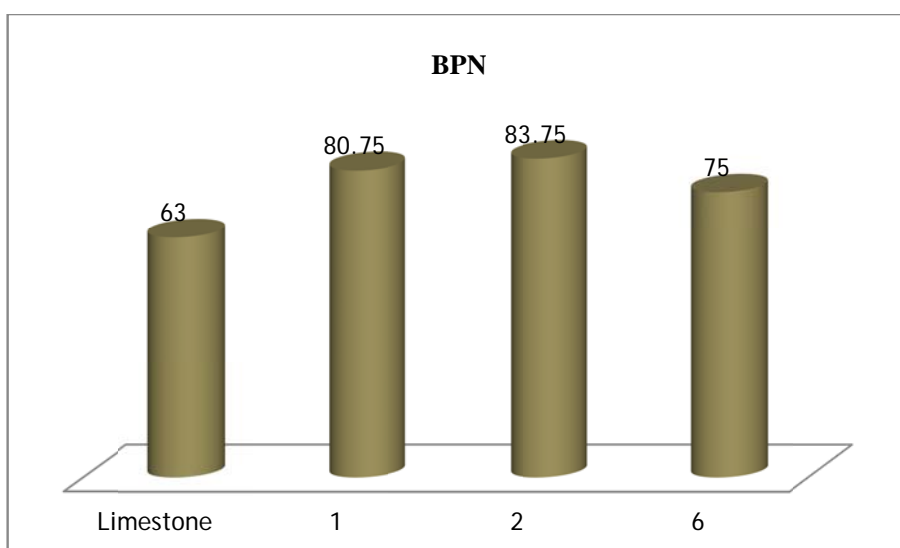
مقاومت لغزندگی اندازه‌گیری شده با دستگاه آونگ انگلیسی مطابق استاندارد ای‌اس‌تی‌ام ای ۳۰۳ برای ۴ نوع مخلوط آسفالتی در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مخلوط آسفالتی ساخته شده از نمونه‌های باطله معدن دارای بیشترین مقدار BPN است. مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت لغزندگی در مخلوط آسفالتی تهیه شده از باطله‌ها مصالح سنگی شماره ۲، ۳۲٪ نسبت به مخلوط بتن آسفالتی با سنگدانه آهکی افزایش پیدا کرد. دلیل این افزایش ناشی

بنابراین سنگدانه‌های باطله معدن بافق باید علاوه بر BPN بهتر نسبت به سنگ آهک از لس‌آنجلس بهتری نیز برخوردار باشند، یعنی پارامتر لس‌آنجلس آن‌ها باید علاوه بر این که مندرجات آیین‌نامه ایران (نشریه ۱۰۱) را تامین می‌کند، باید نسبت به مصالح آهکی نیز بهتر باشد که همین طور است. مقاومت این نوع سنگدانه‌ها همچنین نباید تحت تاثیر شرایط محیطی قرار گیرد و باید از این نظر نیز بهتر از مصالح موجود باشد برای این منظور آزمایش ذوب و یخبندان بر اساس استاندارد ای‌اس‌تی‌ام سی ۱۳۱ بر روی این مصالح انجام گرفت که نمودار مندرج در شکل ۱۲ نشان‌دهنده نتایج این آزمایش است. نتایج این آزمایش نشان‌دهنده کیفیت مناسب سنگدانه شماره ۲ از باطله‌های معدن بافق است. نتایج این آزمایش نیز باید علاوه بر تامین مشخصات نشریه ۱۰۱ به میزان ملموسی از نتایج آزمایش سنگ‌های آهکی بهتر باشد.

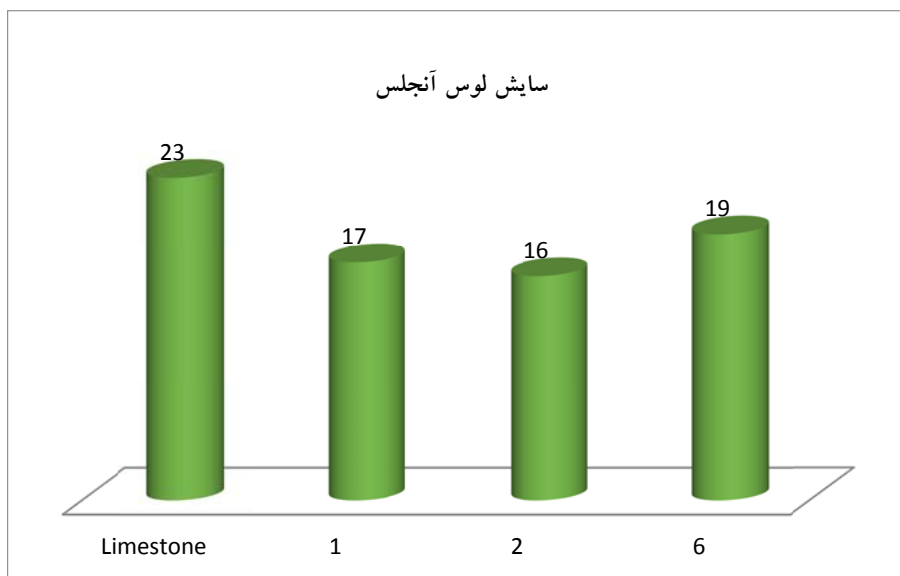
سنگدانه باشد. سنگدانه‌های آسفالتی اگر با مرور زمان و با عبور ترافیک دچار سایش شوند بافت ریز خود را از دست خواهند داد و همین امر باعث کاهش مقاومت لغزندگی آسفالت است پس حفظ مقاومت لغزندگی با گذشت زمان در اینجا دارای اهمیت زیادی است.

اهمیت این مورد شاید بیش از مقاومت ابتدایی سنگدانه‌ها باشد به همین دلیل بر روی سه نمونه سنگ باطله‌های معدنی علاوه بر آزمایش آونگ انگلیسی، آزمایش لس‌آنجلس نیز انجام شد که نتایج آن در نمودار شماره ۱۱ نشان داده شده است.

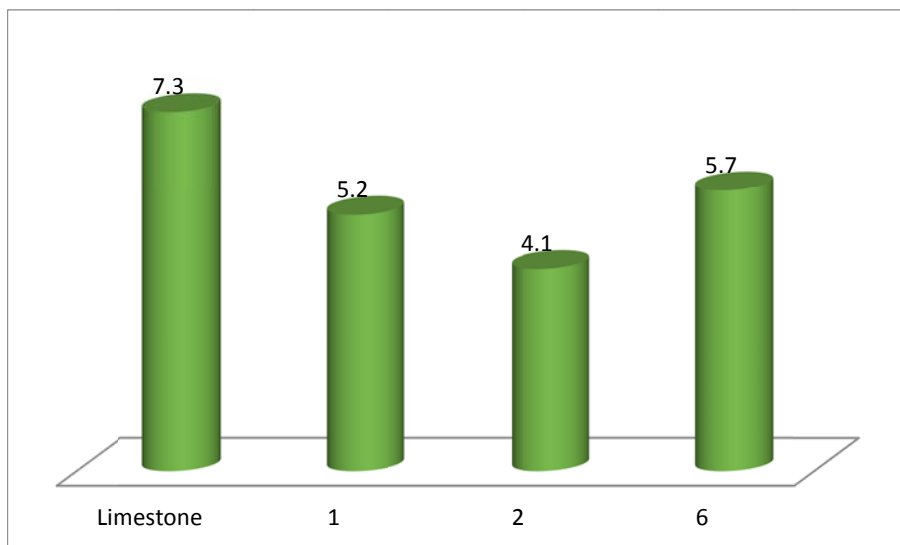
آزمایش لس‌آنجلس نشان دهنده مرغوبیت بیشتر مصالح آذرین شماره ۲ تهیه شده از باطله‌های معدن بافق است. مصالح سنگی تهیه شده از باطله‌های معدن بافق دارای سختی بیشتر و سایش کمتری هستند و این موضوع در هنگام تولید و در سنگ‌شکن نیز قابل مشاهده است.



شکل ۸. مقاومت لغزندگی مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۹. سایش لوس آنجلس مخلوط‌های آسفالتی



شکل ۱۲. افت وزنی در مقابل یخبندان و ذوب مخلوط‌های آسفالتی

## ۶- نتیجه‌گیری

کانی‌های مقاوم مانند کوارتزیت تشکیل شده‌اند استفاده از آن‌ها متغیرهای مکانیکی آسفالت را ارتقاء می‌دهند. نتایج آزمون مصالح شماره یک نشان می‌دهد که رفع عریان‌شدگی از مخلوط‌های آسفالتی ماهیت سعی و خطا داشته نمی‌توان با دستورالعملی یکسان عریان‌شدگی را از همه مصالح سنگی موجود برطرف ساخت.

با توجه به مطالعات انجام شده در این تحقیق آهک و زایکوترم و زایکوسیل می‌توانند مسأله حساسیت رطوبتی را برای بسیاری از مصالح سنگی مانند باطله‌های معدن بافق برطرف نمایند. چون این مصالح که حالت آبدوست دارند از سنگ‌های غیرآهکی با خصوصیات مکانیکی خوب و

-Al-Qadi, I.L., Abuawad, I.M., Dhasmana, H. & Coenen, A.R., et al. (2014), "Effects of various asphalt binder additives/modifiers on moisture-susceptible asphaltic mixtures", Illinois Center for transportation, Research Report FHWA-ICT-14-004.

-AASHTO T209, (2012), "Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot-Mix Asphalt Paving Mixtures", American Association of State Highway and Officials.

-AASHTO M 303-89 (1993), "Lime for asphalt Mixtures", American Association of State Highway and Officials.

Asphalt Institute, (2007), "Moisture Sensitivity Best Practice to Minimize Moisture Sensitivity in Asphalt Mixture", Manual Series No.24 (MS-24).

-ASTM D 3625-12, (2012), "Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water", Volume 04.03.

-Bazlamit, S.M. & Reza, F., (2005), "Changes in asphalt pavement friction components and adjustment of skid number for temperature", Journal of Transportation Engineering, 131(6), pp.470-476.

-Flintsch, G.W., Luo, Y. & Al-Qadi, I.L., (2005), "Analysis of the effect of pavement temperature on the frictional properties of flexible pavement surfaces", In 84th Transportation Research Board Annual Meeting.

-Hamedi, G.H., Moghadas Nejad, F. & Oveisi, K., (2015), "Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA", Road Materials and Pavement Design, 16 (3), pp. 536-552.

-Hamedi, G. and Moghadas Nejad, F. (2016), "Evaluating the Effect of Mix Design and Thermodynamic Parameters on Moisture Sensitivity of Hot Mix Asphalt." J. Mater. Civ. Eng. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001734 , 04016207.

براساس نتایج آزمایشگاهی حاصل از انجام این تحقیق مصالح سنگی شماره یک با آهک و زایکوترم و زایکوسیل قابل اصلاح است و مصالح سنگی آهکی حساسیت خاصی نسبت به پدیده عریان‌شدگی ندارد و مصالح سنگی شماره شش به شدت نسبت به پدیده عریان‌شدگی حساس است که با مایع ضد عریان‌شدگی زایکوترم قابل اصلاح است. نتایج نشان می‌دهد که مایع ضد عریان‌شدگی زایکوسیل با مصالح شماره دو سازگار نیست و پارامتر TSR با استفاده از این مایع ارتقاء نیافته است بنابراین برطرف ساختن عریان‌شدگی از یک مخلوط تابع سعی و خطا بوده، وابسته به ساختار شیمیایی قیر، سنگدانه و مواد افزودنی است.

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده مقاومت سرشی مناسب مصالح سنگی تهیه شده از باطله‌های معدن بافق است. کاربرد این مصالح می‌تواند در رفع مشکل مقاومت لغزندگی در راه‌های استان یزد مفید باشد. نتایج آزمایش‌های افت وزنی لس آنجلس و افت وزنی ناشی از ذوب و یخبندان همچنین نشان داد که مصالح سنگی باطله معدن بافق دارای مقاومت مناسبی در برابر ترافیک و دوام خوبی در برابر شرایط محیطی هستند و جایگزینی آن‌ها بجای مصالح آهکی می‌تواند برای رفع مشکل لغزندگی آسفالت در راه‌های استان یزد مفید باشد.

## ۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Skid Resistance
- 2- Federal Highway Administration
- 3- Texas Boiling Test
- 4- American Association of State Highway and Transportation Officials
- 5- American Society for Testing and Materials
- 6- british pendulum tester

## ۸- مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، (۱۳۹۰)، "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران" وزارت راه و شهرسازی، مرکز تحقیقات و آموزش، نشریه شماره ۲۳۴.



- Shafabakhsh, G.H., Faramarzi, M. & Sadeghnejad, M., (2015), "Use of Surface Free Energy method to evaluate the moisture susceptibility of sulfur extended asphalts modified with antistripping agents", *Construction and Building Materials*, 98, pp.456–464.
- Solaimanian, M., J. Harvey, M. Tahmoressi and V. Tandon, (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.
- Wang, H. & Flintsch, G.W. (2007), "Investigation of Short-and Long-Term Variations of Pavement Surface Characteristics at the Virginia Smart Road", In *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*.
- Hicks, R.G. (1991), "NCHRP 175: Moisture damage in asphalt concrete", *Transportation Research Board, National Highway Research Council*, Washington, D.C.
- Kim, Y.-R., Pinto, I. & Park, S.-W. (2012), "Experimental evaluation of anti-stripping additives in bituminous mixtures through multiple scale laboratory test results", *Construction and Building Materials*, 29, pp.386–393.
- Lottman, R. P. (1982), "Laboratory Test Method for Predicting Moisture-Induced Damage to Asphalt Concrete", *Transportation Research Record 843*, National Highway Research Council, Washington, D. C., pp. 88-95.
- Nazirizad, M., Kavussi, A. & Abdi, A., (2015), "Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 84, pp.348–353.