بررسی اثر افزودنی‌های ضد عریان شدگی و نوع مصالح سنگدانه‌ای بر مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی (مطالعه موردی: استان اردبیل)

علیرضا خاوندی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

محبوب حیدری، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهر، اهر، ایران.

احمد دهقانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

E-mail: khavandi@znu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۰۱ پذیرش : ۱۳۹۶/۰٤/۳۱

چکیده

یکی از مشکلات عمده در روسازی به ویژه در مناطق مرطوب، پدیده عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی است. در این تحقیق با تمرکز بر شناسایی نحوه ایجاد پدیده عریان‌شدگی، عوامل دخیل در بروز این خرابی مورد شناسایی قرار گرفته و روش‌های افزایش دوام آسفالت در برابر این خرابی مورد بررسی شده است. در این راستا از فیلر آهکی، آهک هیدراته و نانو مواد زایکوترم به‌عنوان مواد ضد عریان شدگی مناسب در مقادیر مختلف استفاده شده و مخلوط‌های بهینه مقاوم در برابر پدیده عریان‌شدگی تهیه شده‌اند.

همچنین با توجه به اینکه استان اردبیل تغییرات دمایی بیشتری را نسبت به مناطق معتدل تجربه می‌کند، در این تحقیق این استان به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مصالح سنگی از سه معادن A، B و C واقع در این منطقه تهیه و با استفاده از آزمایش ASTM C294 مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های خشک و اشباع مخلوط آسفالتی و طبق استاندارد AASHTO T283 پتانسیل عریان‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مشخصات مصالح و نیز متنوع بودن مصالح در معادن رودخانه‌ای بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت تاثیر دارد. همچنین طبق نتایج بدست آمده استفاده از ۲ درصد آهک هیدراته، ٤ درصد فیلر سنگ آهک، و یا ۱/۰ درصد وزن قیر از نانو مواد زایکوترم، مقاومت مخلوط آسفالتی مصالح سنگی A و C (مصالح سیلیسی) را در برابر عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد، درحالی‌که استفاده از افزودنیهای منتخب در مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی B (مصالح آهکی) تاثیری در افزایش نسبت مقاومت TSR نمونه‌های آسفالتی ندارد.

واژه های کلیدی: عریان شدگی، آسیب رطوبتی، فیلر آهکی، آهک هیدراته، زایکوترم.

۱. مقدمه

در کشور ایران، لایه رویه اکثر قریب به اتفاق روسازی راهها، بتن آسفالتی است و برای طراحی و اجرای روسازی در مناطق مختلف از آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران استفاده می‌شود. با توجه به اینکه روسازی راه‌ها در مناطق سردسیر تغییرات دمایی بیشتری را نسبت به مناطق معتدل تجربه می‌کنند، درنتیجه بروز خرابی‌ها بعضاً با سرعت و شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. استان اردبیل نیز تغییرات دمایی بیشتری را نسبت به مناطق معتدل تجربه می‌کنند و طبق اطلاعات حاصل از اداره کل هواشناسی اردبیل، وجود دماهای مطلق بین ۳۱/۵- تا ٤٤ درجه سانتیگراد در ایستگاههای هواشناسی دلالت بر اختلاف شدیددمایی در این استان دارد. به همین دلیل در این تحقیق، استان اردبیل به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مصالح سنگی از سه معادن مختلف در این منطقه برای ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی تهیه گردید.

رطوبت نقش بسزایی بر عملکرد روسازی و خرابی آن دارد. حضور آب در روسازی اگر با یخبندان و ذوب همراه باشد، اثرات تخریبی آن بیشتر می‌شود. قیر و سنگدانه دو مولفه اصلی مخلوط آسفالتی هستند و اثر متقابل آنها بر یکدیگر نقش مهمی در عملکرد روسازی ایفا می‌کند [Ghaffarpour, 2008; Rafiqul and Arif, 2010].

با توجه به شرایط آب و هوایی استان اردبیل و ماهیت روسازی آسفالتی که حذف رطوبت از آن غیر قابل اجتناب است، از طرف دیگر در بیشتر مناطق دسترسی به مصالح سنگی مرغوب و مقاوم در برابر پدیده عریان‌شدگی امکان‌پذیر نیست، روسازی‌های موجود غالباً دارای حساسیت رطوبتی بالایی بوده و احتمال وقوع عریان‌شدگی زودرس در آنها بالاست و از طرفی انجام روکش مجدد بر روی روسازی‌های موجود منجر به پرداخت هزینه گزاف می‌گردد. بنابراین در این تحقیق راهکارهای لازم برای رفع و یا حداقل کاهش این نوع خرابی مورد بررسی قرار گرفته است.

در ساخت راه‌ها دسترسی به مصالح سنگی مرغوب و مقاوم در برابر عریان‌شدگی در فواصل نزدیک پروژه همیشه امکان‌پذیر نیست، بنابراین باید با استفاده از روش‌هایی مخلوط آسفالتی را در مقابل پدیده عریان‌شدگی مقاوم نمود. از میان روش‌های مختلف، روش‌های استفاده از مواد افزودنی از قبیل آهک هیدراته، مواد ضدعریان‌شدگی مایع و مواد پلیمری را می‌توان نام‌برد.

با توجه به اینکه دسترسی به مصالح سنگی با جذب آب پایین تر از حد مجاز در تمامی مناطق امکان‌پذیر نیست، در این تحقیق برای تهیه مخلوط آسفالتی از مصالح سنگی سیلیسی با میزان جذب آب بالا در کنار دو مصالح سنگی سیلیسی و آهکی (با درصد جذب آب پایین) استفاده شده است. در ادامه میزان درصد بهینه استفاده از مواد افزودنی برای هریک از این مخلوط‌های آسفالتی تعیین شده و تاثیر هر یک از افزودنی‌های مختلف (فیلرهای آهکی و نانو مواد زایکوترم) بر افزایش مقاومت مخلوط¬های آسفالتی در برابر پدیده عریان شدگی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. همچنین در این تحقیق برای شناسایی نوع سنگدانه‌های مخلوط آسفالتی، از آزمایش تشریح نظری سنگدانه بتن[1] ASTM C294 استفاده شده است.

۲. عوامل موثر در بروز پدیده عریان شدگی

پدیده عریان‌شدگی به عوامل متعدی از قبیل نوع مخلوط آسفالتی، خصوصیات قیر، خصوصیات و بافت سطحی سنگدانه، شرایط آب و هوا و رطوبت، عدم زهکشی مناسب، ترافیک، نحوه اجرا و تراکم و ... بستگی دارد که در ادامه در مورد آن‌ها به اختصار توضیح داده شده است [Sengoz and Agar, 2007].

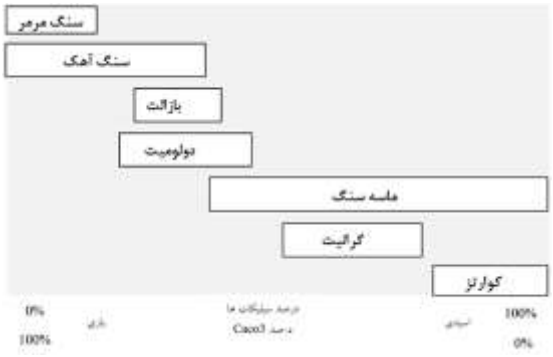
۲-۱ سنگدانه

وجود خصوصیات متفاوت شیمیایی در سنگدانه‌ها گاهاً، منجر به عملکردهای متفاوت در سطح سنگدانه می‌شود. این سنگدانه-ها قسمت‌های فعال و غیر فعال بر روی سطح خود دارند که

نقش مهمی در تاثیر متقابل مولکول‌های قیر با آن ایفا می‌کنند [Ghaffarpour, 2008].

سنگدانه‌های سیلیسی (با سطح دارای بار منفی–الکترونگتیو) که به سنگدانه‌های آب دوست موسوم‌اند بیشتر از سنگدانه‌های آهکی (دارای بار سطحی مثبت– الکتروپزوتیو) که به سنگدانه-های آب گریز موسوم‌اند دچار عریان‌شدگی می‌شوند [Shah, 2003].

همچنین وقتی آب به داخل مخلوط آسفالتی با سنگدانه سیلیسی نفوذ می‌کند مولکول‌های اسید به دو یون مثبت H^+ و یون منفی کربوکسیلات ($R\text{-}COO^-$) تجزیه شده و باعث می‌شوند تا قیر بار منفی پیدا کند بنابراین سطح سنگدانه سیلیسی و قیر هر دو دارای بار منفی شده و باعث بروز عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی می‌شوند. اما مواد قلیایی در سنگدانه‌های آهکی که دارای بار الکتریکی سطحی مثبت هستند با ترکیبات اسیدی قیر به ویژه کربوکسیلیک‌ها ترکیب شده و مخلوط مقاومی در برابر عریان-شدگی تشکیل می‌دهند. موقعیت انواع متداول مصالح سنگی مورد استفاده در آسفالت از نظر خواص شیمیایی و بار سطح مصالح در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱. دسته‌بندی مصالح سنگی از نظر جنس و خواص شیمیایی [Dehnad, 2011]

دانه‌بندی مصالح سنگی نیز بر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر عریان‌شدگی تاثیر دارد به صورتی که نمونه‌های با دانه‌بندی متراکم مقاومت خوبی در برابر عریان‌شدگی از خود نشان می‌دهند در صورتی که برای مصالح با دانه‌بندی باز این مقاومت بسیار پایین است [Shah, 2003].

اگر شکل و استحکام سنگدانه‌ها مناسب نباشد و ضعیف و سست باشند طی عملیات غلتک‌زنی و تحت بارهای ترافیکی اعمال شده، سنگدانه‌ها خرد شده و سطح جدید بدون پوشش قیری در مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود که به راحتی آب را جذب کرده و موجب بروز عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی می‌شود [Little and Jones, 2003]. همچنین بافت زبر سطح سنگدانه می‌تواند مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی را افزایش دهد چرا که قیر در خلل و فرج سطح سنگدانه نفوذ کرده و قفل و بست مکانیکی قوی‌تری ایجاد می‌شود [Mohseni Abyani, 2011].

تخلخل در سنگدانه‌ها نیز علاوه بر کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی معمولاً موجب افزایش جذب آب شده و پتانسیل عریان‌شدگی را افزایش می‌دهد.

۲-۲ قیر

انتخاب نوع و میزان قیر با توجه به شرایط جوی منطقه، ترافیک، جنس مصالح سنگی، نوع و ضخامت روسازی و نحوه اجرای آن صورت می‌گیرد. نوع منبع قیر، فرآیند پالایش، ویسکوزیته قیر، ضخامت فیلم قیر و بسیاری از خصوصیات قیر در حساسیت برهنگی مصالح مؤثر هستند اما تاثیر آن‌ها نسبت به نوع سنگدانه از اهمیت کمتری برخوردار است. برای ایجاد بیشترین تماس بین قیر و سطح مصالح سنگی، هر اندازه ویسکوزیته قیر کمتر باشد قدرت پوشش آن بیشتر خواهد بود [Shah, 2003]. از طرف دیگر هر قدر ویسکوزیته قیر مورد استفاده (البته پس از چسبیدن به سطح سنگدانه‌ها نه قبل از تماس قیر با سطح سنگدانه ها) بیشتر باشد مقاومت بیشتری در مقابل عریان شدگی از خود نشان خواهد داد [Maupin, 2003].

با افزایش درصد قیر، بدلیل کاهش درصد فضای خالی و کاهش نفوذپذیری، پیرشدگی زودرس و نفوذ آب به درون مخلوط آسفالتی، عریان شدگی در مخلوط آسفالتی تعدیل شده و دوام و

عمرمخلوط افزایش می یابد. بطوریکه بر اساس نظر محققین با افزایش ۰/۵٪ میزان قیر مصرفی، بدون هیچ عارضه‌ای، عمر رویه آسفالتی تقریبا ۵٪ افزایش می یابد. در حقیقت فیلم‌های ضخیم قیر روی سنگدانه‌ها در مخوط آسفالتی موجب می‌شوند که این مخلوط‌ها از دوام بیشتری برخوردار باشند [Maupin, 2003].

۲-۳ فیلر و افزودنی‌های مایع

فیلر به دو صورت چسبندگی بین قیر و سنگدانه را بهبود می-بخشد:

از نظر مکانیکی، فیلر موجب افزایش ویسکوزیته و سختی قیر می‌گردد. از سوی دیگر قیر با ویسکوزیته بیشتر چسبندگی بهتری با سنگدانه دارد. قسمتی از دانه‌های فیلر که ابعاد آن‌ها از ضخامت فیلم روی سطح سنگدانه کمتر است بدون تماس با سنگدانه داخل فیلم نازک قیر قرار می‌گیرد که به مخلوط حاصل از قیر و این فیلرها خمیر قیر- فیلر اطلاق می‌شود. بخش دیگر فیلرها که ابعاد آن‌ها از ضخامت فیلم نازک قیر بیشتر است به عنوان سنگدانه محسوب شده و موجب قفل و بست سنگدانه‌ها می‌شود [Alinasab, Kavussi and Ahmadi, 2014].

از نظر فیزیکی و شیمیایی، برخی از فیلرها از جمله فیلرهای آهکی واکنش موثری در سطح تماس قیر و سطح سنگدانه ایجاد می‌کنندکه موجب بهبود چسبندگی بین قیر و سنگدانه می‌شود. فیلرهای آهکی تاثیر قابل توجهی در کاهش عریان شدگی مخلوط های آسفالتی دارد. طبق تحقیقات انجام شده توسط آقای علی نسب و همکاران، در مخلوط آسفالتی (با مصالح سنگی سیلیسی) استفاده از ۱/۵ درصد آهک هیدراته و یا ٤ درصد پودر سنگ آهک منجر به کاهش قابل توجه پتانسیل عریان شدگی مخلوط آسفالتی شده است [Alinasab, Kavussi and Ahmadi, 2014].

طی مطالعه آزمایشگاهی دیگری که در دانشکده عمران بنی سویف مصر انجام شده، اثر استفاده از فیلرهای آهکی در بهبود مشخصات و عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از پودر سنگ آهک با نسبت‌های ٤، ٦ و ٨ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی استفاده شده که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از پودر سنگ آهک تا ٤ درصد وزن مخلوط آسفالتی منجر به افزایش نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم (ITS) می‌شود و استفاده از فیلر آهکی با مقادیر بالای ٤ درصد منجر به کاهش مقاومت مخلوط آسفالتی در انجام آزمایش ITS می‌گردد [Rashwan, 2016].

در تحقیقات انجام شده در دپارتمان حمل و نقل دانشگاه ایلینویز، اثر افزودنی‌های مختلف و مواد اصلاح کننده قیر در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. افزودنی‌های و اصلاح کننده‌های مورد استفاده در این تحقیق، مواد ضد عریان شدگی مایع (LAS)[۲]، استایرن بوتان استایرن (SBS)[۳]، اسید پلی فسفوریک (PPA)[٤] و آهک هیدراته است. آزمایش اصلاح شده آشتو T283 به عنوان آزمون تعیین پتانسیل عریان شدگی مخلوط آسفالتی استفاده شده و نتایج تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی SBS علی رغم افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم، با توجه به آسیب پذیری در برابر رطوبت منجر به کاهش نسبت مقاومت کششی اشباع به خشک (TSR)[۵] می‌شود. همچنین استفاده از افزودنی LAS باعث افزایش مقاومت کششی نمونه مرطوب و کاهش مقاومت کششی نمونه خشک شده که منجر به افزایش قابل توجه نسبت TSR می‌شود که این نتایج، کاهش خدمت عمرخستگی آسفالت را به همراه خواهد داشت. درصورتی‌که استفاده از افزودنی آهک هیدراته باعث بهبود مقاومت هر دو نمونه خشک و اشباع و افزایش نسبت TSR می‌شود. و در نهایت استفاده از افزودنی PPA منجر به تشدید حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی می-شود، به همین استفاده از آن در کنار مقدار مناسبی از آهک هیدراته و یا LAS توصیه می‌شود [Al-Qadi et al. 2014].

۲-٤ گرد و غبار

اگر لایه نازکی از گردوغبار بر روی سطح مصالح سنگی باشد، با وجود اینکه ممکن است قیر سطح کل سنگدانه را بپوشاند اما کاملاً به سطح مصالح سنگی نمی‌چسبد. همچنین این گردوغبار ممکن است در لایه قیر سوراخ‌های ریزی ایجاد کند و یا مسیرهایی در سطح تماس سنگدانه و قیر ایجاد کند که آب از طریق آن نفوذ کرده و موجب عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی گردد [Santucci, 2010].

۲-٥ نوع آسفالت

استفاده از لایه آسفالتی با دانه بندی باز[٦] (آسفالت متخلخل) نیز می‌تواند موجب تسریع در بروز پدیده عریان‌شدگی شود. چرا که این نوع آسفالت رطوبت را به مدت طولانی در خود نگه داشته و پس از بارندگی نمی‌تواند مانند روسازی‌های متداول سریعاً خشک شود. همچنین آب موجود در لایه آسفالتی با فشار وارده توسط وسایل نقلیه سنگین به لایه های زیرین نفوذ کرده و باعث وقوع زودهنگام پدیده عریان‌شدگی در مخلوط آسفالتی می‌شود [Santucci, 2010].

۲-٦ ترک‌های اجرایی

ترک‌های سطحی که در مراحل اولیه عمر روسازی، در طول مدت اجرا و بعد از آن به وجود می‌آیند، می‌توانند مسیری برای نفوذ آب سطحی به لایه‌های بتن آسفالتی ایجاد کنند و موجب تشدید بروز عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی گردند [Abdi, 2004].

۲-۷ تراکم

تراکم ناکافی لایه آسفالتی موجب بروز پدیده عریان‌شدگی زودهنگام در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. مطالعات نشان می-دهند که در حالتی که درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی کمتر از ٤ ٪ باشد مخلوط عملاً در برابر آب نفوذناپذیر است و در این ناحیه آب بی تأثیر است و اگر درصد فضای خالی بیشتر از حدود ۱۳-۱٤٪ باشد، مقاومت مخلوط کمتر تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد زیرا روسازی بصورت زهکش عمل می‌کند اما اگر درصد فضای خالی بین این مقادیر باشد مخلوط آسفالتی در منطقه بحرانی قرار می‌گیرد، زیرا میزان فضای خالی درمحدوده غیر بهینه قرار دارد و مخلوط آسفالتی از لحاظ آسیب رطوبتی در بحرانی‌ترین وضعیت قرار خواهد گرفت [Sarsam and Al-Azawi, 2013].

۳. آزمایش مصالح مورد استفاده در مخلوط آسفالت

مصالح سنگدانه‌ای از معادن مصالح سنگی کارخانه‌های آسفالت ائل یولی، بیستون و دنیا قوم واقع در استان اردبیل انتخاب گردید، که در این تحقیق با نام اختصاری مصالح سنگی A، B و C نامگذاری شده است. همچنین به منظور ساخت مخلوط‌های آسفالتی، قیر مورد نیاز از نوع ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تبریز، فیلرهای آهکی از کارخانه آهک قزوین و نانو مواد زایکوترم از شرکت اکسیر شرق تهیه شد.

۳-۱ آزمایش مصالح سنگی

آزمایشهای مرغوبیت مصالح سنگی مطابق نشریه ۲۳٤ بر روی مصالح سنگی منتخب انجام گرفت که به غیر از ارزش ماسه‌ای مصالح سنگی نوع A (*٤٨) که بایستی بزرگتر از ۵۰ باشد، تقریباً تمامی مشخصات هر سه نوع مصالح سنگی مطابق بر ضوابط نشریه است که نتایج آزمایشات انجام یافته به طور کامل در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی معادن منتخب

آزمایشهای مشخصات مصالح سنگی		نتایج آزمایش مصالح نوع A			نتایج آزمایش مصالح نوع B			نتایج آزمایش مصالح نوع A		
		درشت دانه	ماسه	فیلر	درشت دانه	ماسه	فیلر	درشت دانه	ماسه	فیلر
ارزش ماسه ای مصالح ریزدانه قبل از تغذیه به کارخانه آسفالت (AASHTO-T176)		_	٤٨* (حداقل ٥٠)	_	_	٦٩	_	_	٧٠	_
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (AASHTO-T96)	نوع دانه‌بندی	B	_	_	B	_	_	B	_	_
	تعداد دور	٥٠٠	_	_	٥٠٠	_	_	٥٠٠	_	_
	درصد سایش	٢١	_	_	١٦	_	_	١٧	_	_
حدود اتربرگ (AASHTO-T89,90)	دامنه خمیری (PI)	_	NP	NP	_	NP	NP	_	NP	NP
	حد خمیری (PL)	_	_	_	_	_	_	_	_	_
	حد روانی (LL)	_	غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	_	غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین	_	غیر قابل تعیین	غیر قابل تعیین
تعیین درصد شکستگی روی الک نمره ٤ (ASTM-D5821)	در یک جبهه	٩١	_	_	_	_	_	٩٧	_	_
	در دو جبهه	٩١	_	_	٩٤	_	_	٩٦	_	_
درصد دانه‌های دراز و پهن با نسبت ١:٥ (ASTM-D4791)		٠	_	_	٠	_	_	٠	_	_
درصد افت‌وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)	ریز دانه	_	١	_	_	٠/٦	_	_	٢	_
	درشت دانه	١	_	-	٠/٥	_	_	١	_	_

همچنین درصد جذب آب مصالح سنگی مورد استفاده در آزمایشات به شرح جدول ۲ است:

جدول ۲. میزان جذب آب مصالح سنگی منتخب

جذب آب مصالح سنگی (حدود مشخصات طبق نشریه ٢٣٤ آئین نامه روسازی ایران: **برای لایه توپکا حداکثر ۲/۵٪**)	**نتایج آزمایش (٪)**		
	A	**B**	**C**
مصالح مانده بر روی الک نمره ۸ AASHTO T85	٢/١	٠/٤	١/٣
مصالح عبوری از الک نمره‌ی ۸ و مانده روی الک ۲۰۰ AASHTO T87	٣/١*	٠/٧	٢/١

۳-۱-۱ آزمایش تشریح نظری سنگدانه‌ها

آزمایشهای مختلفی برای تعیین نام سنگ و شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده آن وجود دارد که در این تحقیق از آزمایش تشریح نظری سنگدانه‌ها (ASTM C294) برای تعیین کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه، نام سنگ، نوع سنگ، منشأ سنگ و سایر مشخصات مربوط استفاده شده است. نتایج آزمایش تشریح نظری بیشتر در زمینه ارائه اطلاعات مورد نیاز مصالح سنگدانه‌ای بتن دارای کاربرد و اهمیت بوده و همچنین در سایر مواردی که نیاز به شناسایی دقیق مصالح سنگدانه‌ای باشد، بکار گرفته می‌شود [ASTM C294-12, 2012].

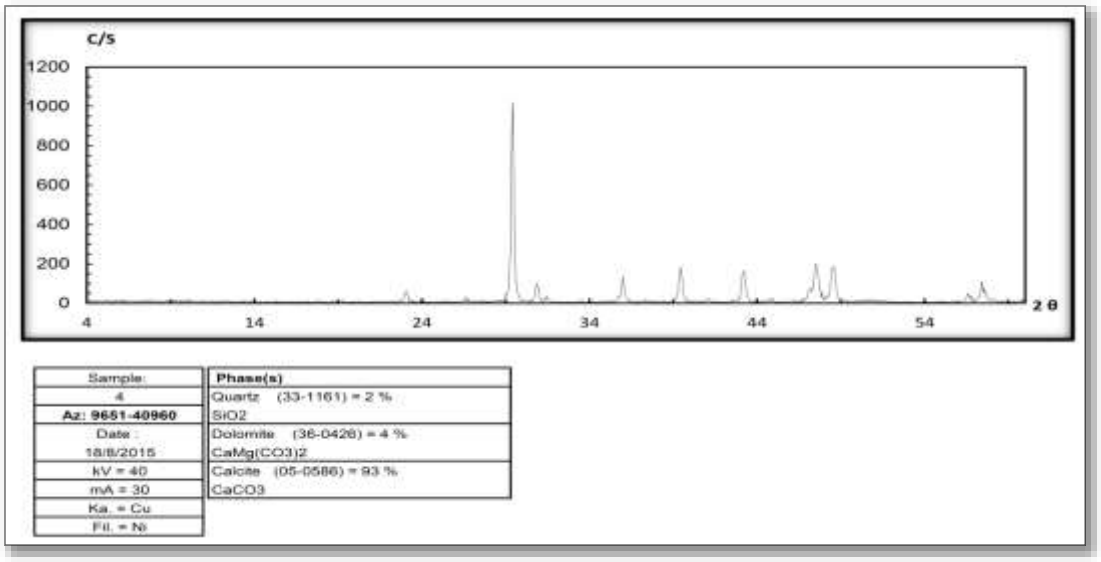
جدول ۳. نتایج آزمایش ASTM C294 بر روی مصالح سنگی

نام معدن	نوع سنگدانه	منشأ سنگدانه ها	بافت سنگدانه	ساخت سنگدانه	نام سنگدانه
مصالح سنگی نوع A	سیلیکاتی	آذرین	پورفیرو آفانتیک و پورفیرومیکرولیتیک، پورفیری	توده‌ای	تراکی آندزیت، آندزیت
	سیلیکاتی	رسوبی	میکروکریستالین	توده‌ای	توف
	سیلیکاتی	آذرین	پورفیری	توده‌ای	آندزی-بازالت
مصالح سنگی نوع B	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکروکریستالین میکرایت و در رگچه‌ها میکرواسپارایت تا اسپارایت	لایه‌ای	سنگ آهک
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	رمبوئدرهای لوزوجهی در زمینه‌ای میکرایتی و در رگچه‌ها میکرو اسپارایت تا اسپارایت	لایه‌ای	سنگ آهک دولومیتی نوع خاص
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکرائی و گاهاً الوکم دار	لایه‌ای	سنگ آهک میکرایتی
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکروکریستالین	لایه‌ای	سنگ آهک
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکرو کریستالین تا میکرواسپارایت	لایه‌ای	سنگ آهک دولومیتی
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکروکریستالین میکرایت و در رگچه‌ها میکرواسپارایت تا اسپارایت	لایه‌ای	سنگ آهک
مصالح سنگی نوع C	سیلیکاتی	آذرین	جریانی، پورفیری، پورفیرو آفانتیک و پورفیرومیکرولیتیک	توده‌ای	تراکی آندزیت، آندزیت
	سیلیکاتی	رسوبی	میکروکریستالین	توده‌ای	چرت
	سیلیکاتی	آذرین	میکروکریستالین، آفانتیک	توده‌ای	ریولیت، ریوداسیت
	سیلیکاتی	آذرین	میکرو پورفیری، آفانتیک	توده‌ای	توف
	کربناتی	رسوبی- شیمیایی	میکرو کریستالین	لایه‌ای	سنگ آهک
	سیلیکاتی	آذرین	دانه‌ای	توده‌ای	گرانیت، گرانودیوریت

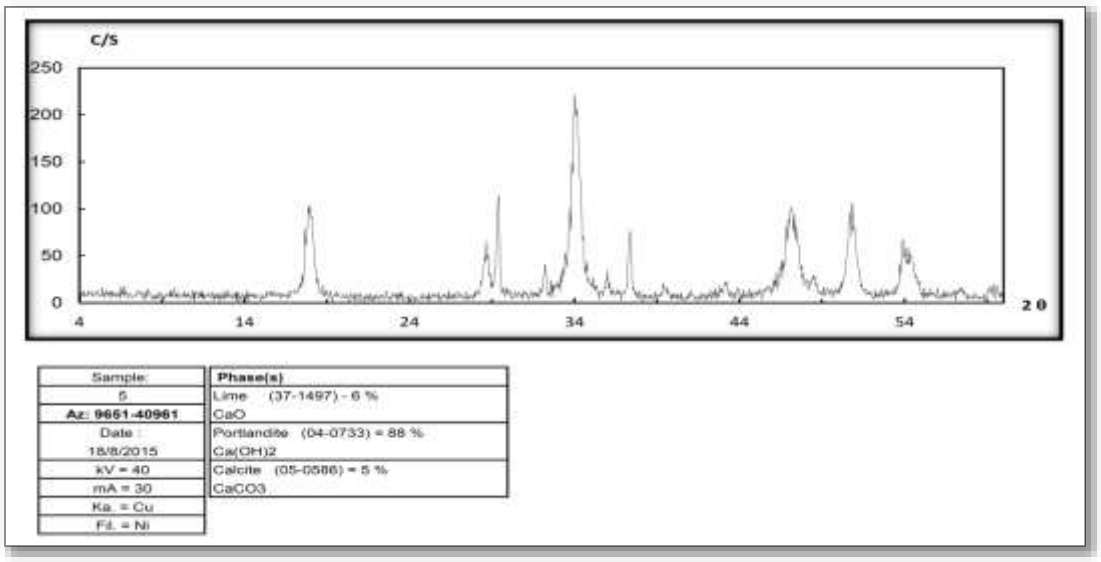
مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش ASTM C294 برای مصالح سنگی معادن منتخب که در جدول ۳ نشان داده شده است، مصالح سنگی نوع A و C از نوع سیلیسی بوده و با این تفاوت که سنگ‌های موجود در معدن نوع C دارای تنوع بیشتری نسبت به معدن نوع A بوده و همچنین مصالح سنگی نوع B آهکی است.

۳-۲ آزمایش XRD[۷] برای تعیین ترکیبات تشکیل دهنده فیلرهای آهکی

در این تحقیق از آزمایش XRD برای آنالیز ترکیب شیمیایی فیلرهای آهکی استفاده شده است. روش پراش اشعه ایکس به طور گسترده‌ای در کاربردهای معدنی مختلف جهت تعیین ساختار بلوری، ترکیب و اندازه ذره فازهای مختلف موجود در پودرها و بلورها استفاده می‌شود و روشی در دسترس، آسان، سریع و نسبتاً ارزان است. با روش پراش پرتو ایکس طول موج-های مختلف را می‌توان جداسازی و اندازه‌گیری نمود. مواد بلوری برای پرتو ایکس می‌توانند نقش توری پراش را ایفا کنند. در شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب نتایج آزمایش XRD برای پودر سنگ آهک و آهک هیدراته نشان داده شده است.



شکل ۲. نتایج آزمایش XRD پودر سنگ آهک



شکل ۳. نتایج آزمایش XRD آهک هیدراته

نتایج مربوط به آزمایش XRD بر روی فیلر پودر سنگ آهک (شکل ۲) نشان می‌هد که این فیلر دارای ۹۳ درصد کربنات کلسیم بوده و می‌توان از آن به عنوان افزودنی فیلر پودر سنگ آهک با خلوص بالا در ساخت نمونه‌های مخلوط آسفالتی استفاده کرد. همچنین در شکل ۳- نتایج آزمایش XRD آهک هیدراته نشان می‌دهد که این فیلر با ۸۸ درصد هیدروکسید کلسیم دارای خلوص بالا بوده و می‌توان به عنوان افزودنی آهک هیدراته در ساخت نمونه‌های آسفالتی استفاده کرد

جدول ٤. نتایج آزمایش‌های رایج بر روی قیر خالص مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آسفالتی

آزمایشهای قیرهای خالص	روش انجام آزمایش		نتایج	مشخصات استاندارد قیرهای خالص (گروه۱۰۰-۸۵)	
	ASTM	AASHTO		حداقل	حداکثر
وزن مخصوص در ۲۵°C	D70	T228	۱/۰۱۳	–	–
درجه نفوذ در ۲۵°C (۱۰۰گرم-۵ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلیمتر	D5	T49	۹۲	۸۵	۱۰۰
نقطه نرمی (ساچمه-حلقه) بر حسب درجه سانتیگراد	D36	T23	٤۹	٤۵	۵۲
مقدار کشش در ۲۵°C بر حسب سانتی متر	D113	T51	بیشتر از ۱۰۰	۱۰۰	–
حلالیت در تری کلرواتلین بر حسب درصد	D2042	T44	۹۹/۲	۹۹	–
درجه اشتعال (روباز-کلولند) برحسب درجه سانتیگراد	D92	T48	۲۹۸	۲۳۲	–
کند روانی کینماتیک در ۱۲۰°C (سانتی استوکس)	D2170	T201	۵۸۷	–	–
کند روانی کینماتیک در ۱۳۵°C (سانتی استوکس)	D2170	T201	۲٦۳	–	–
کند روانی کینماتیک در ۱٦۰°C (سانتی استوکس)	D2170	T201	۹۵	–	–
لعاب نازک قیر (۱٦۳°C- پنج ساعت) افت حرارتی، درصد	D1754	T179	۰/۱۲	–	۱
درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلیمتر	–	–	۵٤	–	–
نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه	–	–	۵۹	۵۰	–
مقدار کشش قیر بعد از آزمایش ۲۵°C بر حسب سانتیمتر	–	–	۸۱	۷۵	–

۳-۳ آزمایش‌های قیر

برای ساخت انواع آسفالت از یک نوع قیر یعنی قیر ۱۰۰-۸۵ پالایشگاه تبریز استفاده شد. طبق بند ١٤-٣-١ نشریه شماره ۱۰۱ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری با عنوان مشخصات فنی و عمومی راه، مشخصات فنی قیرهای خالص مورد استفاده در راهسازی که بر اساس درجه نفوذ تقسیم‌بندی شده‌اند، بایستی با مشخصات استاندارد جدول شماره ١٤-١ این دستورالعمل مطابقت داشته باشد. نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی قیر خالص (جدول ٤) با مشخصات استاندارد فوق الذکر مطابقت دارد.

٤. روش انجام آزمایش

در ادامه به منظور دست‌یابی به درصد بهینه قیر از روش مارشال استفاده شد. بدین منظور برای هر سه نوع مصالح سنگی، نمونه-هایی با درصدهای مختلف قیر تهیه و مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به ضوابط مندرج در نشریه ۲۳٤، درصد قیر بهینه برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی نوع A، B و C به ترتیب ٥/٤ ، ٤/۳ و ٦/۳ درصد انتخاب شد. برای تهیه نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این تحقیق از دانه‌بندی شماره ٤ مخصوص

مخلوطهای آسفالتی (لایه توپکا) آیین‌نامه روسازی راههای آسفالتی ایران (نشریه ۲۳٤) استفاده شد.

سپس با استفاده از نتایج مارشال و بر اساس درصد قیر بهینه، نمونه‌های کنترلی و نمونه‌های حاوی درصدهای مختلف افزودنی‌های ضد عریان شدگی تهیه شد و با انجام آزمایش‌های کشش غیر مستقیم، پتانسیل عریان‌شدگی آن‌ها مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت.

از آنجایی که مصالح سنگی نوع A و C از نوع سیلیسی بوده و در مقابل پدیده عریان‌شدگی مقاوم نیست، به منظور افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب رطوبتی، نمونه‌های آسفالتی با درصدهای مختلف پودر سنگ آهک (۲، ٤ و ٦ درصد وزن مخلوط) ، آهک هیدراته (۱، ۲ و ۳ درصد وزن مخلوط) و نانو مواد زایکوترم (۰٫۰۵، ۰٫۱ و ۰٫۱۵ درصد وزن قیر) تهیه و آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی آن‌ها انجام شد. در این تحقیق مقادیر درصدهای مختلف برای افزودنی فیلر سنگ آهک و آهک هیدراته با در نظر گرفتن حداکثر مقدار مجاز استفاده از فیلر آهکی جایگزین با توجه به فیلر ٦ درصدی در طرح اختلاط آسفالت موجود و استفاده از درصدهای پیشنهاد شده در تحقیقات گذشته (منبع ٦ و ۱۵) انتخاب گردید. همچنین درصدهای مختلف استفاده از نانو مواد زایکوترم در ساخت نمونه‌های آسفالتی بر اساس مقدار پیشنهادی تولید کننده محصول (۰٫۸الی ۱٫۲ درصد وزن قیر) و با در نظر گرفتن دامنه‌ای بزرگتر (۰٫۰۵ الی ۰٫۱۵ درصد وزن قیر) انتخاب شد. طبق نتایج بدست آمده از آزمایش ASTM C294، مصالح سنگی نوع B از نوع مصالح آهکی بوده و در مقابل پدیده عریان شدگی مقاوم بودند، بنابراین به منظور ارزیابی بیشتر، نمونه‌های آسفالتی با (٤درصد) پودر سنگ آهک، (۲درصد) آهک هیدراته و (۰٫۱ درصد وزن قیر) نانو مواد زایکوترم تهیه و با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم، تاثیر آن‌ها در افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۵. نتایج و تحلیل آن‌ها

۵-۱ نتایج و تحلیل آزمایش‌های مصالح سنگی

طبق نتایج بدست آمده از آزمایش تشریح نظری سنگدانه‌ها (ASTM C294)، مصالح سنگی معدن A دارای سنگ‌های تراکی آندزیت، آندزیت، توف و آندزی-بازالت بوده و همگی از نوع سنگ‌های سیلیکاتی و آذرین است.

مصالح سنگی معدن B، دارای سنگ آهک، سنگ آهک دولومیتی و سنگ آهک میکرایتی است که عموماً دارای بافت اصلی کلسیت یا همان ($CaCO3$) است.

همچنین مصالح سنگی معدن C سنگ‌های متنوع‌تری نسبت به دو معدن دیگر دارد، بطوریکه علاوه بر دارا بودن انواع سنگ‌های موجود در معدن A ، سنگ‌های سیلیکاتی از نوع چرت، ریولیت، ریوداسیت، گرانیت، گرانودیوریت و سنگ کربناتی بنام سنگ آهک نیز در آن وجود دارد. البته طبق گزارش ارائه شده در آزمایش ASTM C294، سنگ آهک موجود در این معدن، در برخی بخش‌ها سیلیسی شده و دارای چرت است بطورکلی می-توان گفت که مصالح سنگی نوع B دارای ترکیب کربنات کلسیم و جزو سنگ‌های آهکی با منشأ رسوبی است. همچنین مصالح سنگی معادن A دارای تنوع کمتری بوده و عمدتا از سنگ‌های سیلیکاتی با منشأ آذرین است و در مقابل مصالح سیلیکاتی نوع C دارای تنوع بیشتری در نوع و بافت سنگدانه‌ها بوده و عمدتاً از نوع سنگ‌های سیلیکاتی با منشأ رسوبی است.

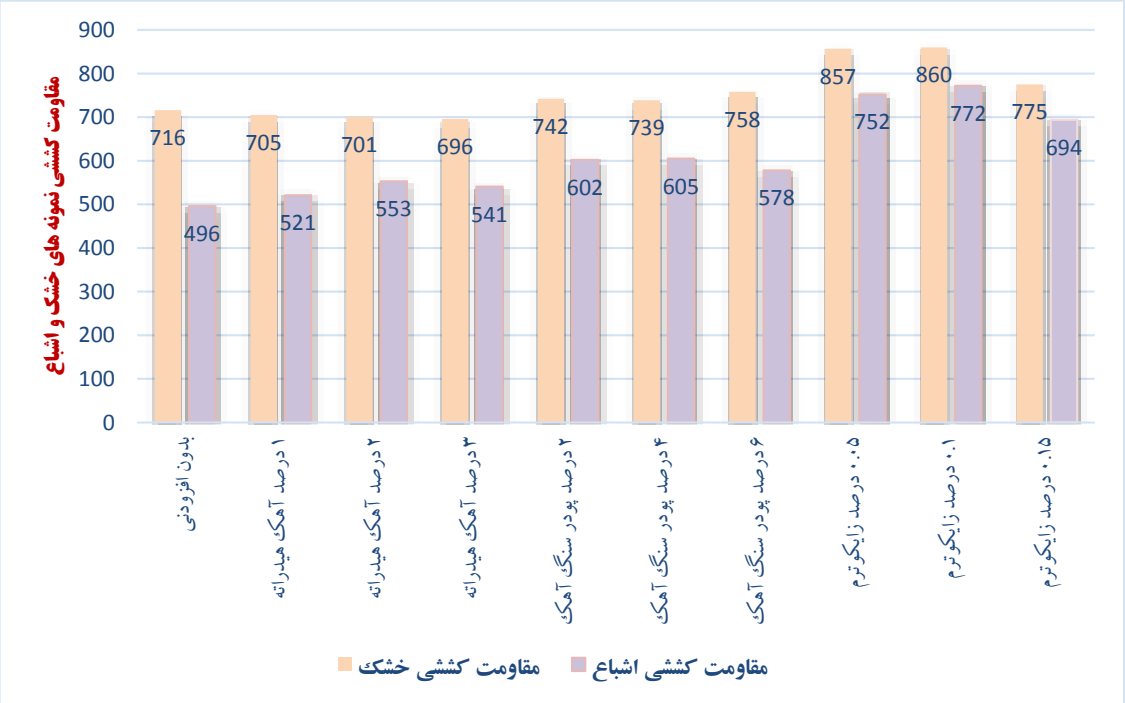
۵-۲ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم و تحلیل آن

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر اساس مراحل فوق الذکر و با اعمال سیکل ذوب و یخبندان بر روی نمونه‌ی آسفالتی انجام شد. حداقل نسبت مقاومت کششی قابل قبول بر اساس استاندارد آشتو T۲۸۳، بر اساس مشخصات ذکر شده در نشریه‌ی ۲۳٤ برابر ۷۵٪ در نظر گرفته شد. اما برای دو نوع مخلوط آسفالتی تهیه شده(A و C)، این مقدار کمتر از حداقل مقدار تعیین شده در آیین‌نامه است، بنابراین از آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک و

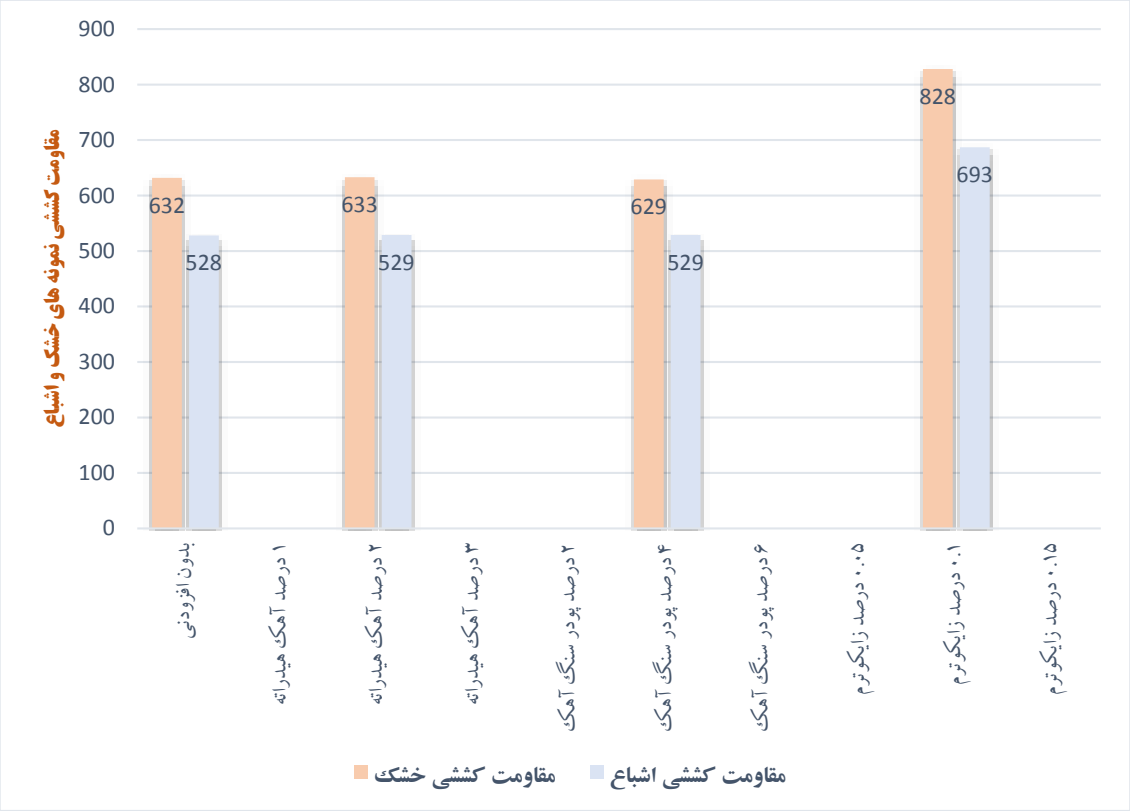
نانو مواد زایکو ترم برای بهبود حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی استفاده شد. همچنین علی‌رغم اینکه نسبت مقاومت کششی برای مخلوط آسفالتی نوع B، بالای ۷۵٪ بود به منظور بررسی بیشتر، تاثیر استفاده از افزودنی‌ها بر این نوع مصالح سنگدانه‌ای هم مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت. نتایج مقاومت کششی حاصل از شکست نمونه‌های حاوی آهک هیدراته، فیلر سنگ آهک و نانو مواد زایکوترم در شرایط خشک و اشباع به ترتیب در شکل‌های ٤ تا ٦ نشان داده شده است.

طبق نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که استفاده از افزودنی‌ها در نمونه‌های آسفالتی ساخته شده از تمامی مصالح سنگی معادن منتخب، منجر به افزایش مقاومت کششی اشباع می‌شود که این افزایش مقاومت در استفاده از نانو مواد زایکوترم، محسوس‌تر است.

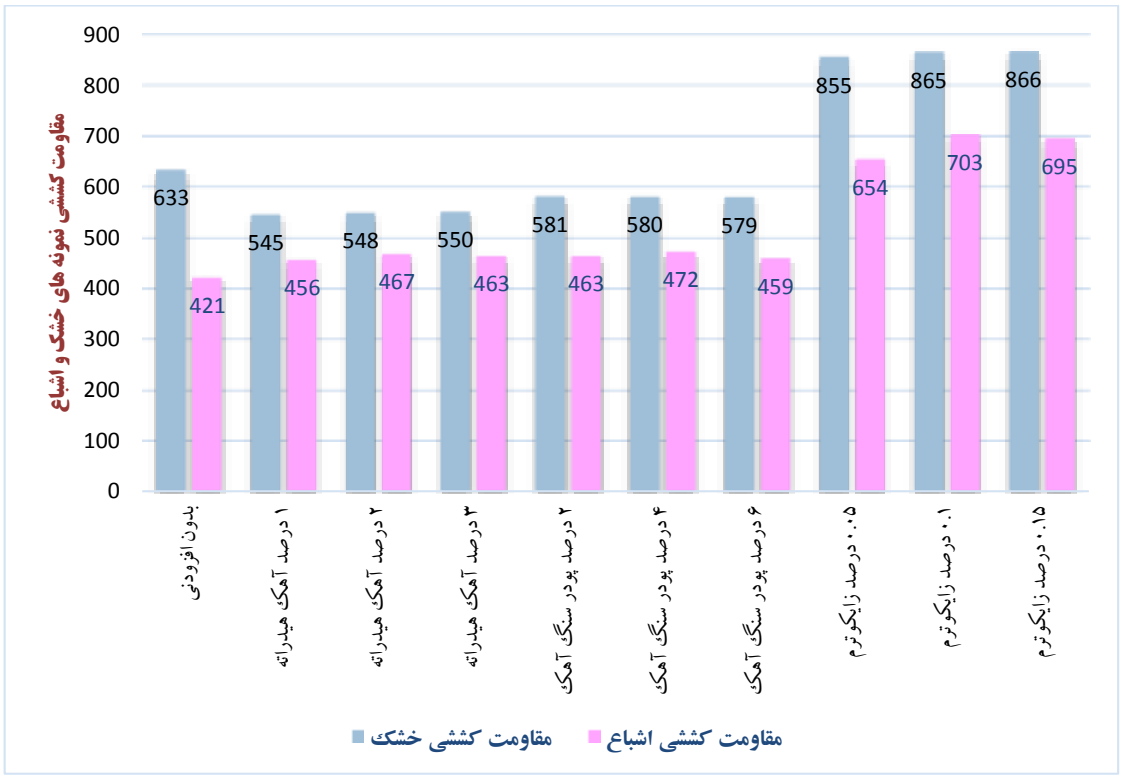
از حاصل تقسیم مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع شده بر مقاومت کششی نمونه‌های خشک، مقدار TSR به دست آمده است که شاخصی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین به منظور مقایسه بهتر تاثیر هریک از افزودنی‌ها، نتایج نسبت مقاومت کششی (TSR) برای تمامی نمونه‌های تهیه شده از معادن منتخب و درصدهای مختلف افزودنی، به صورت یکجا در شکل ۷ نشان داده شده است.



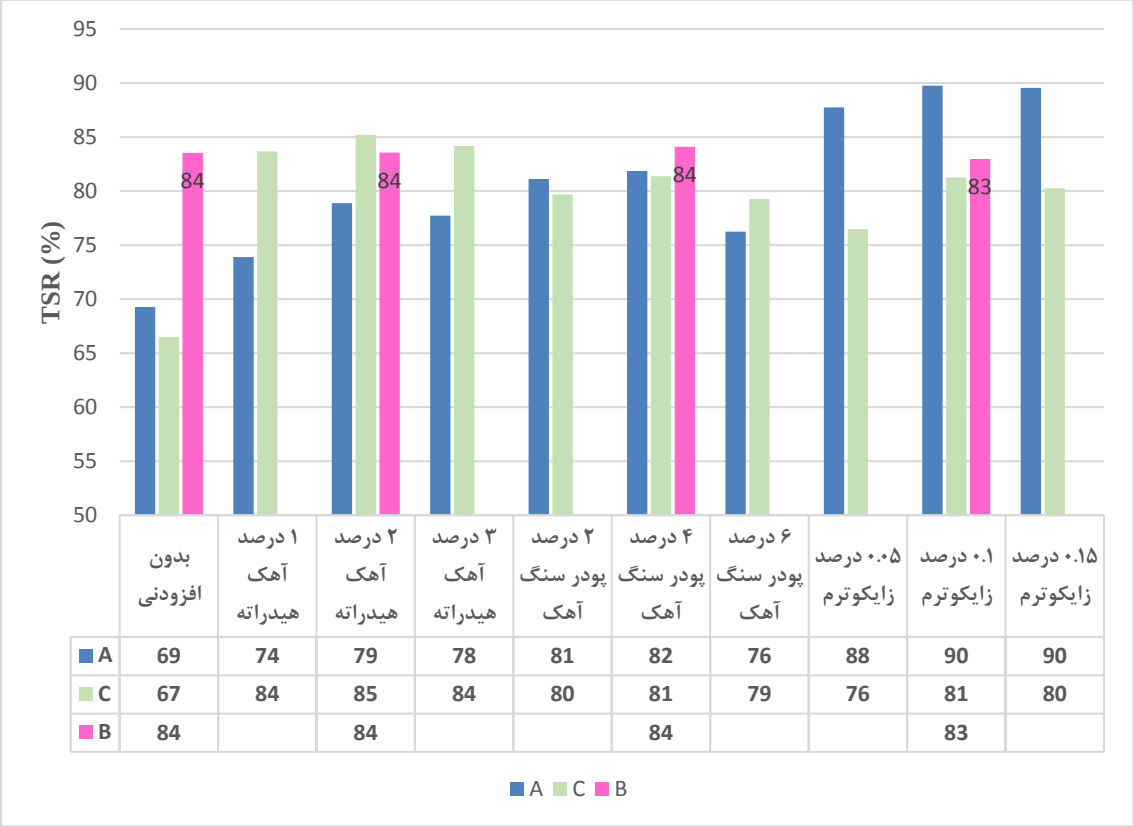
شکل ٤. نتایج مقاومت کششی خشک و اشباع برای مخلوط آسفالتی نوع A



شکل ۵. نتایج مقاومت کششی خشک و اشباع برای مخلوط آسفالتی نوع B



شکل ٦. نتایج مقاومت کششی خشک و اشباع برای مخلوط آسفالتی نوع C



	بدون افزودنی	۱ درصد آهک هیدراته	۲ درصد آهک هیدراته	۳ درصد آهک هیدراته	۲ درصد پودر سنگ آهک	۴ درصد پودر سنگ آهک	۶ درصد پودر سنگ آهک	۰.۰۵ درصد زایکوترم	۰.۱ درصد زایکوترم	۰.۱۵ درصد زایکوترم
A	69	74	79	78	81	82	76	88	90	90
C	67	84	85	84	80	81	79	76	81	80
B	84		84			84			83	

شکل ۷. نتایج (TSR) استفاده از افزودنی‌های مختلف در مخلوط‌های آسفالتی معادن منتخب

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزودن درصدهای مختلف آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک به نمونه‌ها، مقدار TSR ابتدا افزایش می‌یابد اما استفاده بیش از ۲ درصد آهک هیدراته و ٤ درصد فیلر سنگ آهک نتیجه برعکس شده و مقدار TSR کاهش می‌یابد. علت این امر سختی بیش از حد مخلوط و مستعد شدن نمونه‌ها برای ترک خوردگی تشخیص داده شده است که مقدار TSR برای این مقادیر آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک کاهش می‌یابد. طبق تحقیقات پیشین با جایگزینی آهک هیدراته و فیلر آهکی به جای فیلر مصالح، نقطه نرمی افزایش می‌یابد که نهایتاً منجر به افزایش سفتی مخلوط آسفالتی می‌شود [Alinasab, Kavussi and Ahmadi, 2014]. در این تحقیق با افزایش مقدار فیلر، مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های اشباع نیز کاهش یافته و دلیل آن این است که با افزایش مقدار آهک هیدراته و فیلر سنگ آهک خمیر فیلر–قیر سفت می‌گردد و با افزایش فیلر سنگ آهک از ٤ به ٦ درصد و آهک هیدراته از ۲ به ۳ درصد سفتی زیاد موجب می‌شود که مقاومت کششی مخلوط به ویژه در شرایط مرطوب و یخبندان کاهش یابد. به علاوه این پدیده شاید به دلیل پر شدن فضاهای خالی با فیلر باشد که باعث می‌شود مصالح سنگی از یکدیگر فاصله بگیرند و مقاومت مخلوط پایین بیاید. بنابراین نتایج استفاده از آهک هیدراته به میزان بیش از ۲ درصد وزن مصالح سنگی و فیلر سنگ آهک به میزان بیش از ٤ درصد وزن مصالح سنگی توصیه نمی‌گردد زیرا علاوه بر اینکه استفاده بیش از حد از فیلرهای آهکی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست، از نظر فنی نیز موجب کاهش مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی و کاهش مقاومت آن‌ها در برابر عریان‌شدگی می‌شود.

٦. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور ارزیابی تاثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی و نوع سنگدانه‌ها بر مقاومت مخلوطهای آسفالتی در برابر حساسیت رطوبتی، از سه مصالح سنگی (A، B و C)

استفاده شد که با افزودن درصدهای مختلف فیلر سنگ آهک، آهک هیدراته و نانومواد زایکوترم، آزمایش کشش غیرمستقیم (T283) بر روی آن‌ها انجام گرفت که نتایج بدست آمده به شرح ذیل است:

۱- مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش تشریح نظری سنگدانه، ترکیبات تشکیل دهنده مصالح سنگی معدن نوع B آهکی بوده و مصالح سنگدانه‌ای معادن نوع A و B سیلیکاتی بوده و نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه اشباع به خشک (TSR) برای مخلوط‌های آسفالتی تهیه شده با مصالح سنگدانه‌ای B برابر ۸٤٪ (بالاتر از ۷۵٪) بوده و برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح A و C به ترتیب ٦۹٪ و ٦۷٪ (کمتر از ۷۵٪) است.

۲- علی رغم اینکه مصالح سنگی نوع A و C هر دو سیلیکاتی هستند اما مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی نوع C نسبت نوع A کاهش مقاومت بیشتری در برابر آسیب‌های رطوبتی دارد که علت این امر تنوع زیاد سنگ‌ها در مصالح نوع C و وجود سنگ‌های چرت، ریولیت، ریوداسیت، گرانیت و گرانودیوریت که عمدتا از سنگ‌های سیلکاتی رسوبی است و در مقابل مصالح سنگی نوع A عمدتاً از نوع سنگ‌های سیلیکاتی آذرین است.

۳- با افزودن مقادیر مختلف آهک هیدراته، فیلر سنگ آهک و نانو مواد زایکوترم به نمونه‌های آسفالتی با مصالح سنگی نوع A و C، مقدار TSR ابتدا افزایش می‌یابد اما با استفاده بیش از ۲ درصد آهک هیدراته و ٤ درصد فیلر سنگ آهک نتیجه برعکس شده و مقدار TSR کاهش می‌یابد که علت این امر می‌تواند سخت شدن مخلوط آسفالتی باشد. بنابراین استفاده از آهک هیدراته به میزان بیش از ۲ درصد وزن مصالح سنگی و فیلر سنگ آهک به میزان بیش از ٤ درصد وزن مصالح سنگی توصیه نمی-گردد، زیرا علاوه بر اینکه استفاده بیش از حد از فیلرهای آهکی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست مقدار بیشتر فیلر آهکی موجب سخت‌شدگی بیش از حد مخلوط آسفالتی می‌گردد.

٤- مقدار TSR برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی معدن B بالاتر از۷۵٪ (حد مجاز نشریه ۲۳٤) است که علت اصلی آن نوع مصالح سنگی مذکور (سنگدانه‌ای آهکی) است. با این وجود نتایج آزمایشات نیز نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های ضد عریان شدگی تاثیر زیادی بر روی مقدار TSR نمونه‌های تهیه شده با این نوع مصالح سنگی نداشته و فقط باعث افزایش مقاومت کششی خشک و اشباع در استفاده از نانو مواد زایکو ترم شده است.

۵- استفاده از افزودنی‌های مختلف در مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با مصالح سنگی سیلیکاتی (A و C) باعث افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی علی الخصوص در حالت اشباع می‌شود که نشان دهنده تاثیر این افرودنی‌ها بر افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر آسیب‌های رطوبتی است. همچنین میزان افزایش نسبت TSR در استفاده از نانو مواد زایکوترم برای مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی نوع A نسبت به مصالح نوع C بیشتر است.

٦- استفاده بیشتر از مقدار بهینه فیلرهای آهکی باعث کاهش TSR مخلوط‌های آسفالتی می‌شود که به احتمال زیاد علت اصلی آن افزایش سختی مخلوط‌ها و افزایش احتمال ترک خوردگی و همچنین برهم خوردن دانه‌بندی مصالح در استفاده بیش از حد فیلر است، درصورتی‌که با استفاده بیش از مقدار بهینه زایکوترم، مقدار TSR کاهش نیافته و تقریباً ثابت است.

۷- پی نوشت‌ها

1. Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates.
2. Liquid Anti-Strip.
3. Styrene Butadiene Styrene.
4. Polyphosphoric Acid.
5. Tensile Strength Ratio.
6. Open-Graded Asphalt Friction Course (OGFC).
7. X-Ray Diffraction.

۸. مراجع

Transfer Program, Division of Reaserarch and Innovation at the California Department of Transportation, California, USA.

- Sarsam, S. and Al-Azawi, E. (2013) "Modeling the stripping potential of asphalt concrete", Airfield and Highway Pavement Conference, 2013, pp. 999-1007.
- Sengoz, B. and Agar, E. (2007) "Effect of asphalt film thickness on the Moisture sensitivity characteristics of hot mix asphalt" Journal of Building and Environment, Vol. 42, No. 10, pp. 23621 – 3628.
- Shah, B. D (2003) "Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes", Texas A&M University, Texas, USA.
- دهناد، محمدحسین (۱۳۹۰) "بررسی تاثیر تناوب بارگذاری و تغییر دما بر پدیده برهنگی مخلوط‌های آسفالتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران.
- عبدی، علی (۱۳۸۳) "ارائه یک رویکرد طرح مخلوط برای جلوگیری از عریان‌شدگی مصالح سنگی" ، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس.
- علی نسب، رضا، کاووسی، امیر و احمدی، امین (۱۳۹۳) "ارزیابی تاثیر فیلرهای آهکی در کاهش آثار تخریبی رطوبت و یخبندان با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم و مقاومت فشاری در مخلوطهای آسفالتی" مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس، دوره چهاردهم، تابستان ۱۳۹۳.
- محسنی ابیانه، هومن (۱۳۹۰) "بررسی تاثیر آماده‌سازی مصالح سنگی با استفاده از سیمان پرتلند و آهک شکفته در قیاس با استفاده از پاره‌ای مواد ضد جدایی در خواص دوام و تغییر شکل دائم مخلوط‌های آسفالتی روسازی" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه راه‌وترابری، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران ، دانشگاه آزاد اسلامی.
- ASTM C294-12, (2012) "Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates" ASTM standards.
- Ghaffarpour, G. J. (2008) "Estimation of resistance to moisture destruction in asphalt mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 6, pp. 2324–2331.
- Al-Qadi, Imad L., Abuwad, Ibrahim M., Dhasmana, Heena, Coenen, Aaron R. and Trepanier, James, S. (2014) "Effect of varios asphalt binder additives/modifiers on moisturesceptible asphaltic mixtures" , University of Illinois at Urbana-Champaign, Research Report FHWA-ICT-14-004, January 2014.
- Little, D. N. and Jones, D. R. (2003) "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot mix asphalt pavements" Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, Transportation Research Board of the National Academies, February 4-6.
- Maupin, G. W. (2003) "Additional asphalt to increase the durability of Virginia's superpave surface mixes" ,Virginia Transportation Research Council,Virginia, USA, FHWA/VTRC 03-R15,, Final Report, Jun 2003.
- Naglaa, K. and Rashwan, N. K.(2016) "Hot mix asphalt (HMA) performance as affected by limestone powder filler content", Department of Civil Engineering, Industrial Education College, Beni- Suef, Egypt, World Applied Sciences Journal 34 (2): 237-244.
- Rafiqul, A.T. and Arif, M.Z. (2010) "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts", Journal of Materials in Civil Engineering © ASCE, Vol. 22, No. 7, pp. 714–725.
- Santucci, L. (2010) "Minimizing moisture damage in asphalt pavements",Technologhy

علیرضا خاوندی، درجه کارشناسی در رشته عمران- عمران را در سال ۱۳۷٦ از دانشگاه تبریز و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران- راه و ترابری را در سال ۱۳۷۹ از دانشگاه علم و صنعت اخذ نمود. در سال ۱۳۸۷ موفق به کسب درجه دکتری در رشته عمران- راه و ترابری از دانشگاه علم و صنعت گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان توسعه پایدار، مدیریت زیرساختها، مدیریت نگهداری، طراحی روسازی، تکنولوژی آسفالت و قیر، طرح هندسی، ایمنی و فرودگاه بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه استادیاری در دانشگاه زنجان است.

احمد دهقانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه محقق اردبیلی و درجه کارشناسی ارشد در رشته عمران-برنامه ریزی حمل و نقل را در سال ۱۳۹۰ از دانشگاه تربیت مدرس تهران اخذ نمود.