

بررسی تاثیر شیشه ضایعاتی و نانوذرات اکسیدهای فلزی بر روی مقاومت عریان شدگی مخلوط‌های آسفالتی

رحیم بیرامی*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

غلامحسین حامدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

بابک گلچین، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r-beyrami@iau-ahar.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۷/۰۶ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۹۷-۱۱۲

چکیده

یکی از مواد صنعتی تجزیه‌ناپذیر، ضایعات شیشه ای می‌باشد که به روش‌های مختلف سعی می‌شود تا اثرات منفی زیست محیطی این ماده محدود شود. از مهم‌ترین روش‌های کنترل ضایعات شیشه‌ای استفاده دوباره از آن در قسمت‌های مختلف صنعت است. اخیراً استفاده از شیشه در صنعت روسازی به عنوان بخشی از ساختار مخلوط آسفالتی، به عنوان یکی از روش‌های بازیافت مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از مشکلاتی که در بکارگیری این ماده در مخلوط آسفالتی مشاهده می‌شود، این است که حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد. بدین منظور در این تحقیق، مخلوط آسفالت شیشه ای به صورتی ساخته شده است که ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از قسمت ریزدانه سنگدانه‌های طبیعی برداشته شده و بجای آن از شیشه خرد شده استفاده شود. قیر مورد استفاده در این پژوهش قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ بوده است که با استفاده از دو نوع افزودنی ضد عریان‌شدگی نانو به نام‌های نانو اکسید آلومینیوم و نانو اکسید آهن اصلاح شده است. برای بررسی تاثیر استفاده از شیشه خرد شده و ماده افزودنی ضد عریان‌شدگی نانو، آزمایش لاتمن اصلاح شده (AASHTO T283) انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از شیشه ضایعاتی باعث افزایش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه ای می‌شود و هر چقدر درصد شیشه خرد شده بیشتر شود، مقاومت در برابر رطوبت نیز کمتر می‌شود. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی نانو باعث شده است که خصوصیات رفتاری قیر تغییر کند و خصوصیات اسیدی قیر کاهش پیدا کند. این تغییر باعث چسبندگی بهتر بین قیر با شیشه خرد شده که خصوصیات اسیدی دارد، می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، آزمایش کشش غیر مستقیم، افزودنی‌های نانو، شیشه، قیر

۱- مقدمه

عنوان یکی از مهم‌ترین مواد ضایعاتی که به طور روزانه جمع‌آوری می‌شود به حساب می‌آید. این ماده که یک ماده غیرفلزی و غیرمعدنی است که نه می‌تواند سوزانده شود و نه قابلیت تجزیه دارد. شیشه ضایعاتی در ساخت راه‌ها به عنوان جایگزین قسمت درشت دانه و ریزدانه سنگدانه در مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بسیاری از کشورها در حال حاضر استفاده از شیشه در مشخصات آیین نامه‌ای آنها گنجانده شده است که پیمانکاران را برای استفاده بیشتر

با رشد سریع اقتصاد و افزایش همزمان مصرف، مقدار زیادی مواد ضایعاتی تولید می‌شود. مقدار وسیعی از ضایعات (مانند تایر ضایعاتی، شیشه، سرباره کوره‌ها، پلاستیک‌ها، مواد ضایعاتی ساختمانی و صنعتی) که در زباله‌دان‌ها در سراسر دنیا جمع‌آوری می‌شوند باعث مشکلاتی شده است که هم از حیث مالی و هم از حیث محیط زیست هزینه‌های زیادی برای دولت‌ها و شرکت‌های خصوصی به همراه داشته‌اند [Arabani, 2011]. شیشه ضایعاتی در جوامع صنعتی به

[Hamed, Moghadas Nejad and Oveisi, 2015]. متداولترین مکانیزمهای خرابی رطوبتی از دست دادن پیوستگی ماستیک و از دست دادن چسبندگی قیر-سنگدانه در سطح تماس آنهاست که هر دوی این مکانیزمها در نتیجه نفوذ رطوبت می‌باشند. برای کاهش این نوع خرابی روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد که از متداولترین آنها می‌توان به استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی اشاره کرد [Hamed, Moghadas Nejad and Oveisi, 2015]. در این تحقیق از آزمایش لاتمن اصلاح شده که بر اساس آزمایش مقاومت کشش غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی است، استفاده شده است. در این پژوهش تمرکز روی افزودنی اضافه شونده به قیر برای کاهش پتانسیل عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی حاوی شیشه ضایعاتی بوده است. مهم‌ترین اهداف پژوهش موجود عبارتست از:

- بررسی تاثیر استفاده از شیشه ضایعاتی بر روی خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی
- بررسی تاثیر استفاده از نانو مواد ضدعریان‌شدگی در کاهش خرابی رطوبتی آسفالت شیشه‌ای
- ارائه راهکارهای اجرایی در جهت کاهش حساسیت رطوبتی آسفالت شیشه‌ای

۲- روش تحقیق

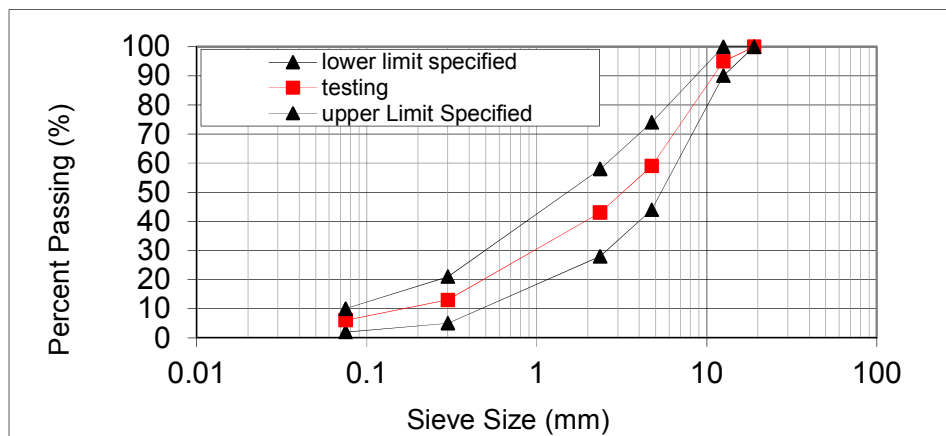
۲-۱- مصالح سنگی

سنگدانه‌های بکاررفته در ساخت نمونه‌های آسفالتی از جنس مصالح سنگی از نوع سنگ آذرین به نام گرانیت می‌باشد. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. در تحقیق حاضر از دانه بندی پیوسته ۴ (آستر و رویه) آیین نامه روسازی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴) مورد استفاده قرار گرفت. حدود این دانه بندی و دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین مشخصات فیزیکی سنگدانه مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۲ ارائه شده است.

از این ماده در ساخت راه‌ها تشویق کند. این مطلب در حالیست که استفاده از شیشه ضایعاتی به عنوان فیلر در مخلوط آسفالتی هنوز به صورت گسترده مورد آزمایش و بررسی قرار نگرفته است. وقتی شیشه خرد شده ضایعاتی در مخلوط آسفالت گرم به کار می‌رود در اصطلاح به آن *Glasphalt* گفته می‌شود [Su and Chen, 2002]. مطالعات فراوانی در مورد کاربرد شیشه به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه های مخلوط آسفالتی انجام شده است. عمده این پژوهش‌ها استفاده از این ماده به عنوان بخشی از قسمت ریزدانه و یا درشت دانه را توصیه کرده اند. علیرغم توصیه پژوهشگران در مورد استفاده از شیشه ضایعاتی در قسمت های مختلف مخلوط آسفالتی از بعضی جنبه ها نیز نگرانی هایی وجود دارد که از آن جمله می‌توان پتانسیل عریان‌شدگی بالای سنگدانه شیشه‌ای در مقایسه با سنگدانه معمولی اشاره نمود [Arabani, 2011; Ahmed Abbas, 2014]. مواد شیشه‌ای که ترد و شکننده بوده و سرشار از سیلیکون هستند و در اصطلاح مصالح آبدوست نامیده می‌شوند، همگرایی و چسبندگی کمتری در چسبندگی با قیر از خود نشان می‌دهند. این چسبندگی با حضور آب از بین رفته و به تدریج در دوره بهره برداری و تحت تاثیر آمد و شد، سنگدانه شیشه‌ای عریان شده و از سطوح روسازی آسفالتی جدا می‌شوند. بنابراین باید حساسیت این مخلوط‌ها در مقابل آب و رطوبت با آزمایشات مربوطه مورد بررسی قرار گرفته و در صورت لزوم از مواد ضد عریان‌شدگی استفاده گردد [Wu, Yang and Xue, 2004; Su and Chen, 2002; Arabani and Hamed, 2010]. رطوبتی در مخلوط‌های آسفالت گرم از دست دادن مقاومت و دوام ناشی از تاثیر رطوبت تعریف می‌شود. این نوع خرابی یکی از دلایل اضمحلال روسازی در زمان اندک به طور ویژه در مناطق پر باران است که منجر به افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. با توجه به خصوصیات شیشه مورد استفاده در مخلوط‌های آسفالتی شیشه‌ای، خرابی رطوبتی در آن چشمگیرتر از مخلوط‌های آسفالت معمولی می‌باشد

جدول ۱. مشخصات کانی‌های سنگدانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

Calcium oxide, CaO (%)	Magnesium oxide, MgO (%)	Ferric oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃ (%)	R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) (%)	Silicon dioxide, SiO ₂ (%)	سنگدانه
۲,۴	۰,۸	۱,۴	۱۴,۸	۱۶,۲	۶۸,۱	گرانیت



شکل ۱. دانه بندی مورد استفاده در این پژوهش

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

حدود مجاز	گرانیت	استاندارد	آزمایش
		ASTM C 127	وزن مخصوص (درشت دانه)
-----	۲/۶۵۴		Bulk
-----	۲/۶۶۷		SSD
-----	۲/۶۹۲		Apparent
		ASTM C 128	وزن مخصوص (ریز دانه)
-----	۲/۶۵۹		Bulk
-----	۲/۶۶۱		SSD
-----	۲/۶۸۸		Apparent
-----	۲/۶۵۶	ASTM D854	وزن مخصوص (فیلمر)
حداکثر ۴۵	۱۹	ASTM C131	مقدار مجاز سایش
حداقل ۹۰	۹۴/۵	ASTM D5821	درصد شکستگی در دو وجه
حداکثر ۱۰	۶/۵	ASTM D 4791	ذرات طولی و پهن (%)
حداقل ۴۰	۵۶/۳	ASTM C 1252	گوشه داری ذرات ریزدانه

۲-۲- شیشه خرد شده

معمولی در مقابل تغییر درجه حرارت توجه نمود. چنین ماده ای در درجه حرارت‌های بالا به صورت مایع است و با کاهش درجه حرارت، گرانشی آن افزایش می‌یابد. یعنی این

شیشه، مایعی می‌باشد که بسیار سرد شده است و در حرارتی پایین تر از نقطه انجماد آن، در حالت مایع قرار دارد. برای درک این موضوع باید به تغییرات یک ماده غیر آلی

- پایداری حجمی بالایی دارد که باعث می‌شود در برابر خرابی‌هایی مانند ترک خوردگی دما پایین مقاوم باشد. شیشه ماده ای غیر فلزی و غیر معدنی می‌باشد که بوسیله پختن مواد اولیه مانند سیلیکات و سایر اکسیدها ساخته می‌شود. کانی‌های تشکیل دهنده شیشه خرد شده مصرفی در این پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است.

خرده شیشه‌هایی مورد استفاده در این پایان نامه از شیشه‌های ضایعاتی کارگاه شیشه بری تهیه شده است که به اندازه دلخواه شکسته شده‌اند. حداکثر اندازه ذرات شیشه ۴/۷۵ میلی‌متر و مطابق با نوع دانه‌بندی ارائه شده در شکل ۲ می‌باشد [Huang, Bird and Heidrich, 2007]. شیشه‌های مورد استفاده ترد و شکننده بوده و شکستن و شکل دادن آنها به صورت ذرات مناسب برای کاربرد در بتن آسفالتی آسان است. در این پژوهش قسمتی از سنگدانه گرانیتی برداشته شده و شیشه خرد شده جایگزین آن شده است. شیشه خرد شده جایگزین قسمت ریزدانه سنگدانه‌ها شده است. زیرا بر طبق مطالعات پیشین افزودن شیشه خرد شده در ابعاد درشت دانه باعث کاهش ضریب اصطکاک، خراش و پاره شدن لاستیک‌ها و مشکلات دیگر می‌شود. مطالب ذکر شده تصمیم بر آن شد تا شیشه خرد شده جایگزین ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد از قسمت ریزدانه سنگدانه‌های گرانیتی شود.

مایع با سرعت کمتری جاری می‌شود تا در نقطه معینی که نقطه انجماد نامیده می‌شود، آرایش نامنظم مولکول‌های مایع به سلختمان منظم کریستالی جامد تبدیل می‌گردد و ماده غیر آلی سخت و محکم می‌شود. شیشه جسمی سخت است که همه چیز به جز الماس را خط می‌اندازد. وزن مخصوص شیشه تقریباً، ۲/۵ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و بسیار ترد و شکننده است. شیشه در مقابل تمام مواد شیمیایی حتی اسیدهای قوی و بازها مقاومت کرده و تحت تاثیر خوردندگی واقع نمی‌شود، به همین علت ظروف آزمایشگاهی را از آن می‌سازند. فقط اسید فلئوئوریک (HF) بر آن اثر داشته و شیشه را در خود حل می‌کند. شیشه خرد شده در مخلوط آسفالتی می‌تواند خصوصیات زیر را دار باشد:

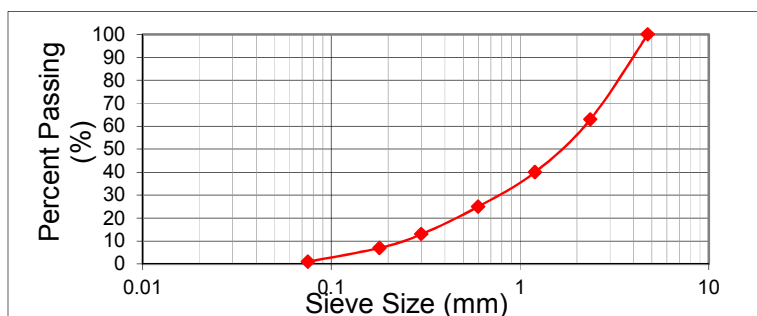
- ذرات پولکی و سوزنی (به طور ویژه در مورد ذرات خرد شده بزرگ). این مسئله ممکن است باعث مشکلاتی مانند عریان‌شدگی قیر از روی سطح شیشه، ناتوانی در ایجاد مقاومت لغزشی بالا، سایش تایرها و انعکاس نور بالا شود.

- سطح شیشه‌های خرد شده بیش از اندازه صاف است و درصد سیلیکای آن بسیار بالاست که سبب می‌شود ذرات شیشه خرد شده مانند سنگدانه‌های اسیدی رفتار آبدوستی داشته باشند. روسازی‌های با شیشه خرد شده معمولاً مشکل خرابی رطوبتی دارند مخصوصاً اگر ابعاد شیشه خرد شده بزرگ باشد.

- جذب قیر و دانسیته پایین سبب شن زدگی می‌شود.

جدول ۳. مشخصات کانی‌های شیشه خرد شده مورد استفاده در این پژوهش.

Calcium oxide, CaO (%)	Magnesium oxide, MgO (%)	Sodium oxide, Na ₂ O (%)	Aluminium oxide, Al ₂ O ₃ (%)	Potassium oxide, K ₂ O (%)	Silicon dioxide, SiO ₂ (%)
۵,۷	۲,۹	۱۶,۳	۲,۶	۱,۲	۷۰,۵



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ذرات خرده شیشه مصرفی در این پژوهش

۲-۳- نانومواد

صنعتی قابل استفاده هستند. بیشتر بودن سهم اتم‌ها در سطح نانوذرات نیز خواص فیزیکی آنها را تغییر می‌دهد مثلاً سرامیک‌هایی که به طور عادی شکننده‌اند، نرم‌تر می‌شوند. سرانجام این که افزایش سطح مؤثر حلالیت را افزایش می‌دهد، برای مثال قدرت ترکیبات ضد باکتری را بهبود می‌بخشد. اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات تاثیر زیادی در کارایی و کاربرد آنها دارد. ایجاد خواص آبدوستی و آبگریزی جزء روش‌های اصلاح شیمیایی نانوذرات محسوب می‌شوند. برای نمونه، نانوذرات سیلیکاتی برای دست آوردن خاصیت آب‌گریزی بیشتر، باید به صورت شیمیایی اصلاح شوند، مثلاً می‌توان با استفاده از یون‌های آمونیوم یا مولکول‌های بزرگتری نظیر سیلسزکیوکسان‌های الیگومریک چند وجهی، که هم برای روکش‌دهی نانوذرات سیلیکات و هم به عنوان پرکننده مناسب هستند، این اصلاح شیمیایی را انجام داد. در این پژوهش از دو اکسید فلزی به نام‌های نانو اکسید آهن و آلومینیوم استفاده شده است. خصوصیات نانومواد مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ ارائه شده است.

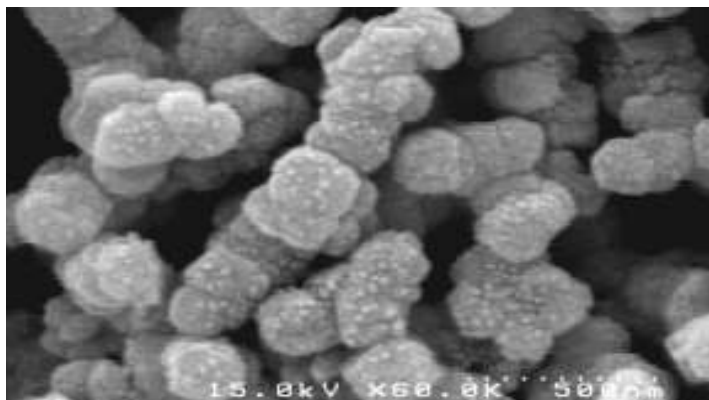
معمول‌ترین نانوذرات، نانوذرات سرامیکی هستند که به سرامیک‌های اکسید فلزی، نظیر اکسیدهای تیتانیوم، روی، آلومینیوم و آهن و نانوذرات سیلیکاتی (سیلیکات‌ها یا اکسیدهای سیلیکون نیز سرامیک هستند)، که عموماً به شکل ذرات نانومقیاسی خاک رس، تقسیم می‌شود. طبق تعریف حداقل باید یکی از ابعاد نانوذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر باشد. نانوذرات سرامیکی فلزی یا اکسید فلزی تمایل به داشتن اندازه یکسانی در هر سه بعد، از دو یا سه نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر دارند که به وسیله نیروهای الکترواستاتیک به یکدیگر چسبیده و به شکل پودر بسیار ریزی رسوب می‌کنند. نانوذرات سیلیکاتی ذراتی با ضخامت تقریباً ۱ نانومتر و پهنای ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر هستند. معمول‌ترین نوع خاک رس که نانوذرات سیلیکاتی هستند مونت‌موریلونیت یا آلومینو سیلیکات لایه‌ای می‌باشد. وقتی اندازه نانوذرات کاهش می‌یابد، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش یافته، اثرات سطحی قوی‌تر شده و خواص کاتالیتیکی افزایش می‌یابد. به همین دلیل نانوذرات به عنوان کاتالیزور در زمینه‌هایی نظیر باتری‌ها، پیل‌های سوختی و انواع فرآیندهای

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی دو نوع نانوماده مورد استفاده در این پژوهش

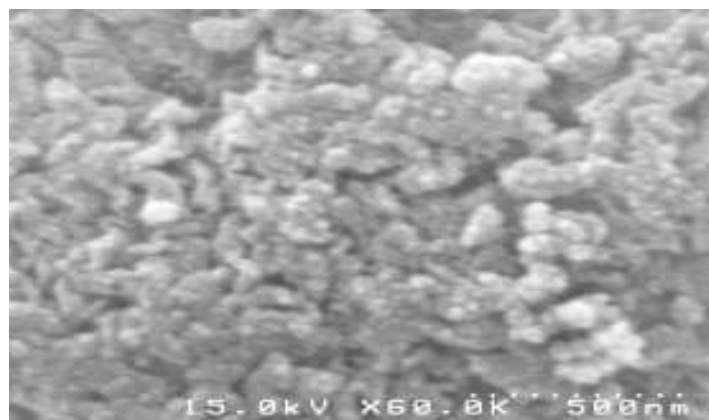
ویژگی	نانو اکسید آلومینیوم	نانو اکسید آهن
ساختار سازه‌ای	alpha, gamma	Cubic Cristal
جرم مخصوص (gr/cm^3)	5.9-6.4	2.6-2.9
شاخص انعکاس	3	1.5-1.8
مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	45±5	38±2
میانگین اندازه ذرات (nm)	≈ 24	≈ 40
جرم مخصوص حجمی (gr/cm^3)	0.22-0.40	0.38-0.45
درجه اسیدیته	8.7-9.9	8.4-10.6
درصد آب	۱۱۲	۲۶۲

بوده و شکل‌های زیر صحت اندازه و شکل ظاهری این نانوذرات را نشان می‌دهد. نانوذرات اکسید آهن به علت سنگین بودن و درشت بودن، حالت پراکنده‌تری داشته و نانو ذرات اکسید آلومینیوم با داشتن سطح مخصوص بیشتر حالت پرکننده‌تری دارند.

برای ارزیابی اندازه نانو ذرات و بررسی توزیع نانوذرات در قیر مخلوط آسفالتی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. همانطور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، عکس‌ها با بزرگنمایی ۶۰۰۰۰ برابر با ولتاژ ۱۵ کیلو وات تهیه شده‌اند. شکل ظاهری این نانوذرات تقریباً دایره‌ای



شکل ۳. ذرات نانو اکسید آهن مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۴. ذرات نانو اکسید آلومینیوم مورد استفاده در این پژوهش

۲-۴- قیر

قیر به علت داشتن دو خاصیت مهم یعنی غیر قابل نفوذ بودن در برابر آب و چسبنده بودن، یکی از مصالح ساختمانی پرکاربرد است. در این تحقیق قیر مصرفی از نوع قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد که از پالایشگاه اصفهان تهیه شد. مشخصات قیر مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است.

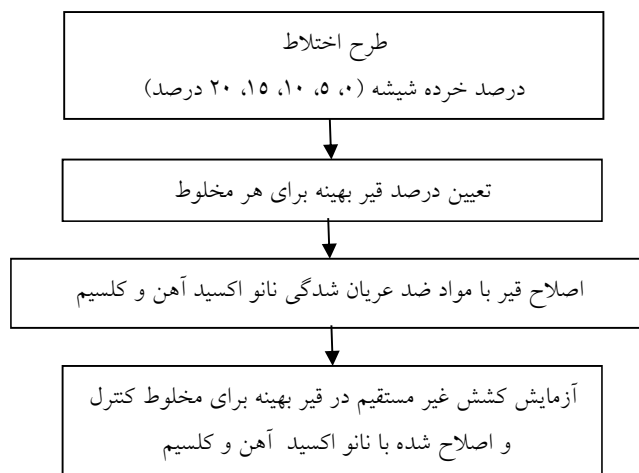
۲-۵- ساخت نمونه‌ها

نمونه‌های بتن آسفالتی که برای انجام آزمایش تهیه می‌شوند تحت شرایط کاملاً کنترل شده و استاندارد که حتی الامکان مشابه شرایط کارگاهی باشد، ساخته و آزمایش می‌شوند. تهیه نمونه‌ها شامل سه مرحله یعنی گرم کردن مصالح سنگی و قیر بطور جداگانه، مخلوط کردن و سپس متراکم کردن مخلوط بدست آمده است. در این پژوهش از طرح اختلاط به روش

مارشال برای تعیین درصد قیر بهینه استفاده شده است. انتخاب نوع دانه بندی مصالح سنگی بکار رفته در مخلوط‌های مورد نظر بر اساس دانه بندی پیشنهادی در آیین نامه روسازی راههای ایران صورت گرفته است. در شکل ۵ برنامه آزمایشگاهی مربوط به ساخت و آزمایش نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده نشان داده شده است. با توجه به این مهم که مقایسه نمونه‌های مختلف آسفالتی بدون در نظر گرفتن پارامترهای گوناگون تأثیرگذار بر خصوصیات مکانیکی و مقاومتی آنها امری غیر منطقی به نظر می‌رسد، در این پایان نامه ابتدا درصد قیر بهینه مربوط به هر اختلاط تعیین گردیده و پس از ساخت هر نمونه با قیر بهینه مربوط به خود نتایج بدست آمده در شرایط بهینه این نمونه با حالت و شرایط بهینه نمونه‌های دیگر مقایسه گردیده است.

جدول ۵. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

چگالی در ۲۵ سانتی گراد	درجه نفوذ ۱۰/ میلی متر	نقطه نرمی سانتی گراد	شکل پذیری سانتی متر	درجه اشتعال سانتی گراد	افت وزنی %	درجه خلوص %
۱/۰۲	۶۶	۵۱	۱۱۲	۲۶۲	۰/۷۵	۹۹



شکل ۵. برنامه آزمایشگاهی آزمایشات انجام شده در این پژوهش

جدول ۶. مشخصات قیر به کار رفته در ساخت نمونه‌ها

ترکیب	نوع سنگدانه	نوع قیر	ترکیب	نوع سنگدانه	نوع قیر
۱	گرانیت	قیر اصلاح نشده	۱۱	گرانیت با ۱۰ درصد شیشه	قیر با ۱ درصد نانو اکسید آهن
۲	گرانیت	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن	۱۲	گرانیت با ۱۰ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم
۳	گرانیت	قیر با ۱ درصد نانو اکسید آهن	۱۳	گرانیت با ۱۵ درصد شیشه	قیر اصلاح نشده
۴	گرانیت	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم	۱۴	گرانیت با ۱۵ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن
۵	گرانیت با ۵ درصد شیشه	قیر اصلاح نشده	۱۵	گرانیت با ۱۵ درصد شیشه	قیر با ۱ درصد نانو اکسید آهن
۶	گرانیت با ۵ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن	۱۶	گرانیت با ۱۵ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم
۷	گرانیت با ۵ درصد شیشه	قیر با ۱ درصد نانو اکسید آهن	۱۷	گرانیت با ۲۰ درصد شیشه	قیر اصلاح نشده
۸	گرانیت با ۵ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم	۱۸	گرانیت با ۲۰ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن
۹	گرانیت با ۱۰ درصد شیشه	قیر اصلاح نشده	۱۹	گرانیت با ۲۰ درصد شیشه	قیر با ۱ درصد نانو اکسید آهن
۱۰	گرانیت با ۱۰ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن	۲۰	گرانیت با ۲۰ درصد شیشه	قیر با ۰/۵ درصد نانو اکسید آلومینیوم

۲-۶- تعداد نمونه‌ها

با توجه به هدف این پژوهش که بررسی نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم در درصد قیر بهینه است، تصمیم بر آن شد که برای هر درصد قیر از هر ترکیب، سه نمونه ساخته و تحت آزمایش مارشال قرار گیرد تا مقادیر قیر بهینه آنها مشخص شود. برای تعیین درصد قیر بهینه با انتخاب ۴ درصد قیر مختلف و انجام آزمایشات مارشال با توجه به اینکه برای هر درصد قیر ۶ نمونه (۳ نمونه با ۲ تکرار) نیاز است، پس برای هر ترکیب ۲۴ نمونه باید ساخته شود. با در نظر گرفتن ۵ ترکیب مختلف سنگدانه (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد شیشه) که همگی با قیر اصلاح نشده ساخته شده‌اند، باید ۱۲۰ نمونه برای تعیین درصد قیر بهینه ساخته شود. پس از تعیین قیر بهینه توسط آزمایش مارشال، ۲۰ ترکیب مختلف قیر و سنگدانه (۵ نوع سنگدانه مختلف و ۴ نوع قیر مختلف) وجود دارد که در زیر ترکیبات آورده شده است.

۲۰ ترکیب مختلف وجود دارد که برای هر کدام ۸ نمونه مورد نیاز است (۲ نمونه در شرایط خشک، ۲ نمونه در شرایط مرطوب یک سیکل یخ-ذوب، ۲ نمونه در شرایط مرطوب سه سیکل یخ-ذوب و ۲ نمونه در شرایط مرطوب پنج سیکل یخ-ذوب) که ۱۶۰ نمونه برای تعیین حساسیت رطوبتی به روش AASHTO T283 باید ساخته شوند. درصد استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی نانو معمولاً در حدود ۲-۵٪ وزن قیر می‌باشد که در این پژوهش مقادیر ۰/۵ و ۱٪ مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با افزودنی نانو اکسید آلومینیوم بایستی متذکر شد که این نمونه‌ها با ۰/۵ درصد از افزودنی نتایج بسیار خوبی داشتند که نیاز به استفاده از ۱ درصد نبوده است. کل نمونه‌های مخلوط آسفالتی این پژوهش با در نظر گرفتن نمونه‌های مارشال و حساسیت رطوبتی ۲۸۰ نمونه می‌شود.

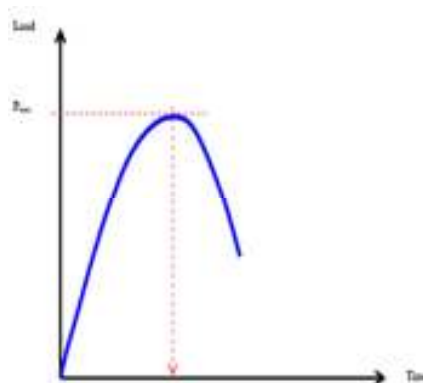
۲-۷- آزمایش کشش غیر مستقیم

مقاومت در برابر عریان‌شدگی (حساسیت رطوبتی) مخلوط‌های آسفالتی با کاهش در مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم بعد از سیکل یخ-ذوب براساس استاندارد AASHTO T283 مورد ارزیابی قرار گرفته است. مقاومت

کششی یک مخلوط آسفالت گرم بوسیله پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه تعیین می‌شود. مقاومت کششی بوسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می‌تواند تحمل کند، بیان می‌شود. مخلوط آسفالتی با مقدار مقاومت کششی بالاتر می‌تواند مقاومت بهتر در برابر خستگی و شیارشدگی فراهم کند. بنابراین هر افزودنی که بتواند مقاومت کشش بالاتری را برای مخلوط آسفالتی در شرایط مرطوب و خشک فراهم کند می‌تواند عملکرد بلند مدت مخلوط آسفالتی را بهبود دهد. این آزمایش شامل بارگذاری روی نمونه‌های استوانه‌ای با بار فشاری قائم می‌باشد که باعث تنش کششی تقریباً یکنواخت در امتداد صفحه قطری قائم می‌شود. گسیختگی معمولاً در شکل جدا شدگی در راستای این صفحه رخ می‌دهد. این آزمایش، متداول‌ترین آزمایشی است که برای بررسی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی و نیز برای بررسی تاثیر مواد ضد عریان‌شدگی به کار رود. مواد کافی برای تولید حداقل ۶ نمونه مخلوط آسفالت گرم در درصد قیر بهینه مشخص شده در قسمت قبل با هم مخلوط می‌شوند. تعداد نمونه‌های بیشتر هنگامی نیاز است که یکی از نمونه‌ها دچار مشکل شود یا اینکه مقدار ماکزیمم وزن مخصوص نمونه‌ها مشخص نباشد. قبل از انجام آزمایش اصلی تعدادی آزمایش برای پیدا کردن تعداد ضربه‌های لازم برای تراکم نمونه‌های اصلی برای رسیدن به درصد حفرات هوای 1 ± 7 مورد نیاز است. درصد حفرات هوا مطابق با استاندارد AASHTO T269 مشخص می‌شود. هنگامی که تعداد ضربات مشخص شده و نمونه متراکم شدند، نمونه‌ها به دو گروه نمونه‌های خشک و نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته تقسیم می‌شوند. سپس نمونه‌هایی که تعیین شده‌اند تا تحت شرایط قرار گیرند را تحت شرایط خلا قرار داده تا به میزان درجه اشباع ۸۰-۵۵٪ برسند. نمونه‌های اشباع شده به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سانتی گراد و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سانتی گراد نگهداری می‌شوند. بقیه نمونه‌ها در شرایط خشک نگهداری می‌شوند. همه نمونه‌ها به دمای یکسان آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی گراد) آورده شده و آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر

این آزمایش ۲ اینچ در دقیقه (در حدود ۵۰/۸ میلی متر بر دقیقه) می‌باشد.

روی نمونه‌ها انجام می‌شود. طریق انجام آزمایش و نحوه بارگذاری در شکل ۶ نشان داده شده است. نرخ بارگذاری در



شکل ۶. طریقه انجام آزمایش و نحوه بارگذاری در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

در شرایط خشک (به جای ۳ نمونه) و ۲ نمونه در شرایط مختلف مرطوب (به جای ۳ نمونه) ساخته شده است.

مقدار کشش غیر مستقیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

که در آن،

P: حداکثر مقدار بار عمودی وارده

D: قطر نمونه

t: ضخامت نمونه می‌باشد.

نسبت مقاومت کششی (TSR) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TSR = 100 \left(\frac{ITS_{cond}}{ITS_{uncond}} \right) \quad (2)$$

که در آن،

ITS_{cond}: میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته

ITS_{uncond}: میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک.

به منظور بررسی دقیق تر اثر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب به نمونه‌ها اعمال شد. همچنین به دلیل محدودیت زمانی، برای هر نوع مخلوط آسفالتی ۲ نمونه

۳- ارایه و تحلیل نتایج

۳-۱- تحلیل نتایج آزمایشات مارشال بر روی نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده

همانطور که در بخش قبلی ذکر شد، به جهت مقایسه علمی و منطقی نتایج بدست آمده از آزمایش بر روی نمونه‌های آسفالتی ساده و اصلاح شده، درصد قیر بهینه مربوط به هر نوع مخلوط به کمک آزمایشات مارشال تعیین گردید و سپس نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه در شرایط مختلف ساخته شد. همانگونه که از مندرجات جدول ۷ برداشت می‌شود، نمونه‌های حاوی شیشه خرد شده دارای مقدار قیر بهینه کمتری به نسبت نمونه‌های کنترل می‌باشند. این امر بدلیل خلل و فرج کمتر سطوح شیشه خرد شده و جذب قیر کمتر این نوع سنگدانه‌ها در مقایسه با گرانیات می‌باشد.

جدول ۷. مقدار قیر بهینه در نمونه‌های آسفالتی ساده و حاوی شیشه خرد شده

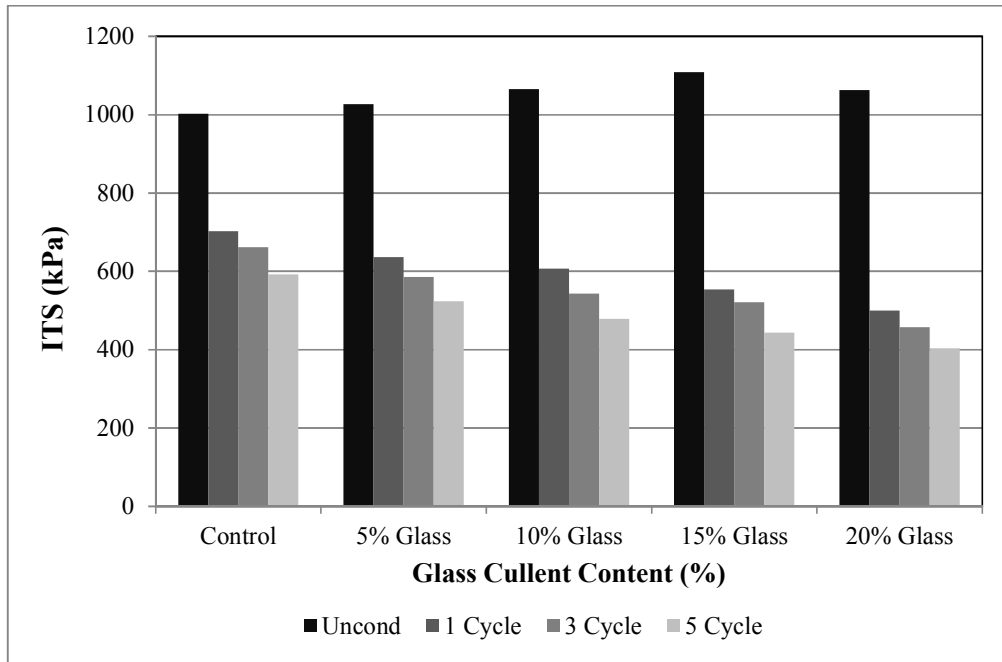
ترکیب	مقدار شیشه خرد شده (%)	قیر بهینه (%)
۱	۰ (مخلوط کنترل)	۵,۵
۲	۵	۵,۵
۳	۱۰	۵,۴
۴	۱۵	۵,۳
۵	۲۰	۵,۱

۳-۲- تحلیل نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم در سیکل‌های گوناگون یخ-ذوب

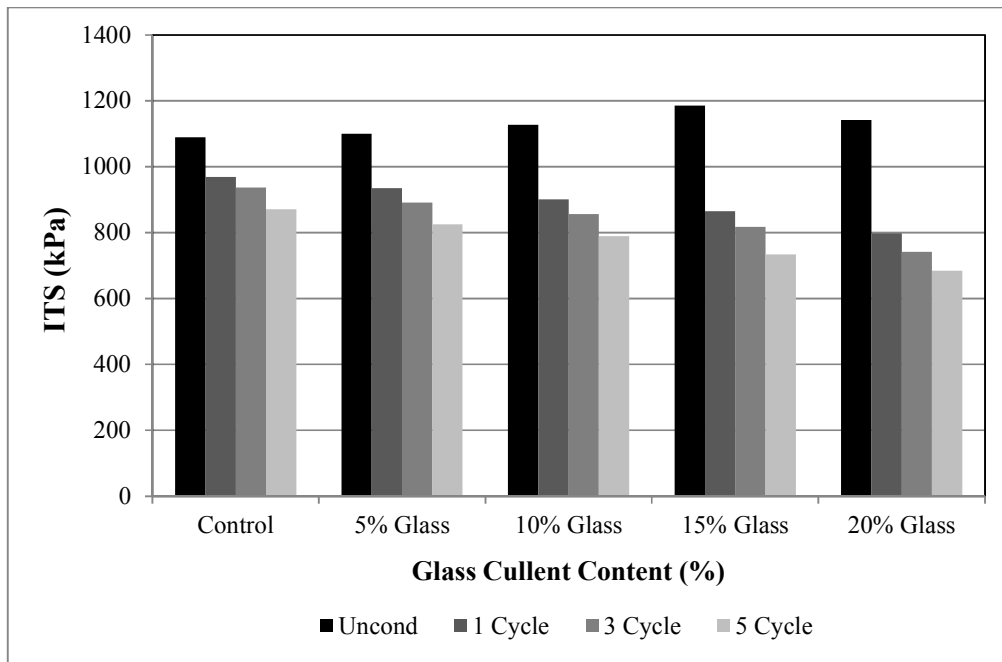
۳-۲-۱- بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید آهن

مستقیم در این نمونه‌ها همراه است. روند صعودی مقاومت کششی غیر مستقیم در درصد‌های بالای خرده شیشه به تدریج کند می‌شود. با افزایش درصد خرده شیشه به مقداری بیش از ۱۵ درصد، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی رو به کاهش می‌نهد. تراکم بالای خرده شیشه که سبب شکنندگی بالای نمونه آسفالتی می‌شود، موجب می‌گردد که مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها کاهش یابد. تأثیر منفی سطوح صاف و صیقلی ذرات خرده شیشه که باعث می‌گردد مصالح خرده شیشه به خوبی نتوانند قیر را در سطح خود حفظ نمایند، از عوامل دیگر کاهش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی شیشه‌ای پس از عبور از میزان درصد شیشه خرد شده بهینه می‌باشد. در پی این امر چسبندگی بین مصالح سنگی و خرده شیشه و قیر کاهش یافته و این امر به نوبه خود منجر به کاهش تدریجی مقاومت کششی غیر مستقیم در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد خرده شیشه ضایعاتی می‌شود. همچنین می‌توان از شکل‌های ۷ تا ۹ نتیجه‌گیری کرد که اضافه‌کردن مواد نانو، چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط افزایش داده و اجازه جابه‌جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط آسفالتی دارای افزودنی نانو دارای مقاومت کشش غیر مستقیم بالاتر نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی باشد.

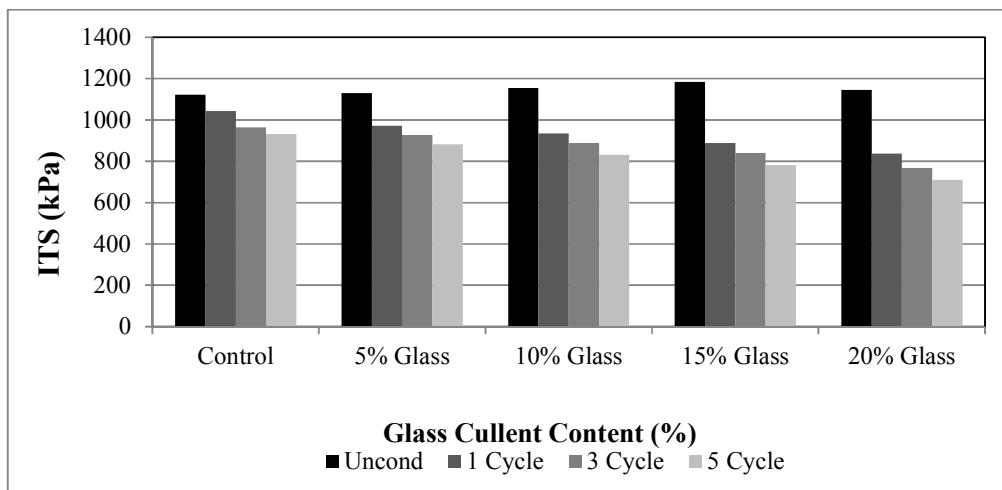
نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در شکل‌های ۷ تا ۹ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار کشش غیر مستقیم نمونه‌های ساخته شده با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب کاهش می‌یابد. کاهش در مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های یخ-ذوب را می‌توان به از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت نسبت داد زیرا نمونه‌هایی که بعد از ۳ سیکل مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند، زمان بیشتری تحت شرایط ذوب-یخ بوده‌اند. همین‌طور نمونه‌هایی که بعد از ۵ سیکل مورد آزمایش قرار گرفته‌اند نسبت به نمونه‌های ۱ و ۳ سیکل، زمان بیشتری تحت شرایط ذوب-یخ بوده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود نمونه‌های حاوی خرده شیشه روند رو به رشدی را در میزان مقاومت کششی غیر مستقیم در حالت خشک از خود نشان می‌دهند. زیرا افزایش قفل و بست میان‌دانه‌ای به سبب افزایش خرده شیشه با شکستگی همه‌جانبه، مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالت شیشه‌ای را افزایش می‌دهد. افزایش زاویه اصطکاک داخلی به دلیل تیزگوشگی بیشتر ذرات شیشه خرد شده از دلایل مهم افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های حاوی شیشه خرد شده ضایعاتی است. اما افزایش بیشتر خرده شیشه از مقدار بهینه با کاهش مقاومت کششی غیر



شکل ۷. رابطه بین ITS با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده بدون افزودنی



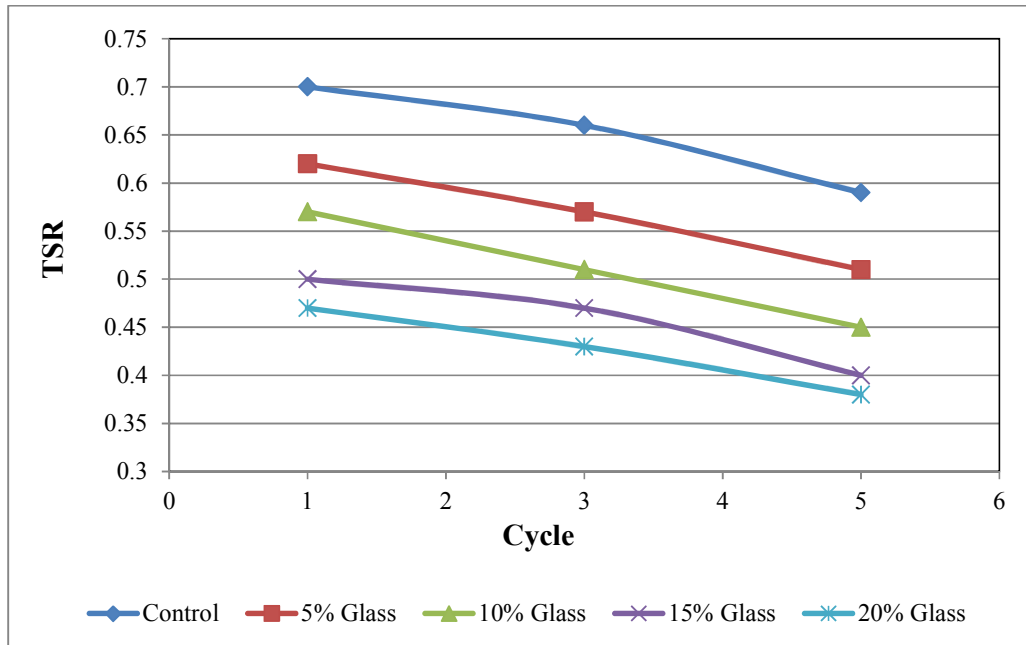
شکل ۸. رابطه بین ITS با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۰/۵ درصد نانواکسید آهن



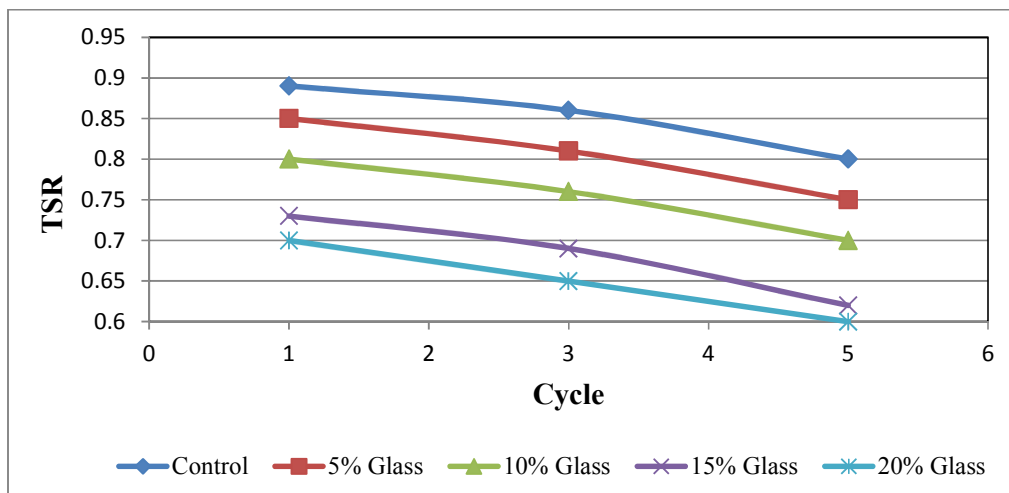
شکل ۹. رابطه بین ITS با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۱ درصد نانوآکسید آهن

این رو شیشه خرد شده در مقایسه با گرانیت آبدوست تر بوده و مخلوط‌هایی با مقاومت کمتر در برابر رطوبت تولید می‌کند. همچنین به دلیل عدم جذب قیر توسط شیشه خرد شده، قیر راحتتر از سطح دانه‌های شیشه در مقایسه با دانه های سنگی جدا میشود. با افزایش میزان شیشه موجود در نمونه‌ها حساسیت رطوبتی نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد که به دلیل تشدید شرایط ذکر شده است. همانطور که از شکل‌های ۱۰-۱۲ مشخص است مقاومت کششی از نمونه‌های خشک به نمونه‌های تحت شرایط تر به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که این رخداد نشانه خرابی رطوبتی است. این کاهش در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل کمتر نمایان است. نتایج اضافه کردن نانوآکسید آهن نشان می‌دهد که افزودن این مواد در همه درصدهای مورد استفاده در این پژوهش تاثیر مثبت در مقدار نسبت مقاومت کششی دارد. اضافه کردن ۰/۵ درصد از این مواد باعث افزایش قابل توجه در مقدار نسبت مقاومت کششی شده است. این در حالی است که این افزایش در ۱ درصد افزودنی در مقایسه با ۰/۵ درصد افزودنی چشمگیر نیست. بنابراین می‌توان گفت که مناسب ترین درصد مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی نانو با توجه به نوع سنگدانه و قیر متفاوت است و باید با آزمایش‌هایی که برای تعیین حساسیت رطوبتی استفاده می‌شود، درصد مناسب را پیدا کرد.

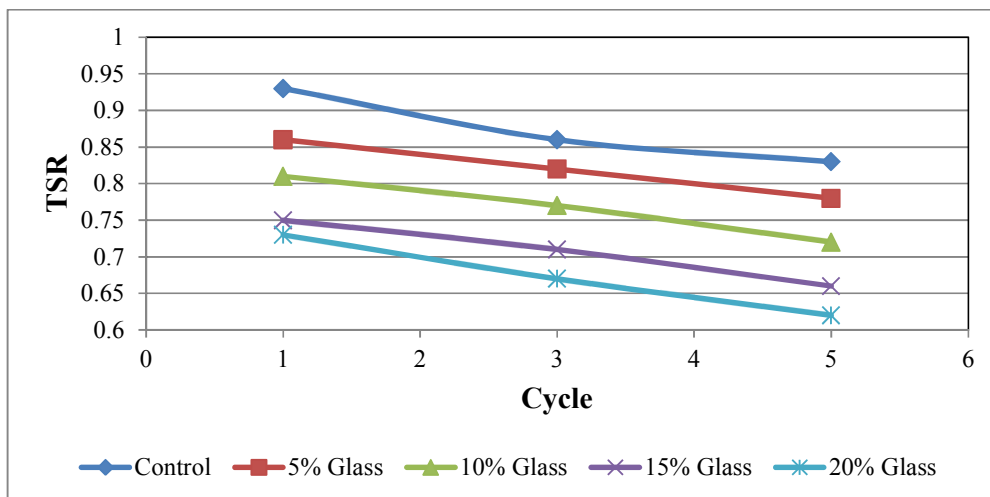
شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان‌دهنده مقادیر نسبت مقاومت کششی برای ترکیبات ساخته شده با نانوآکسید آهن در این پژوهش می‌باشد. مشخص است که با افزایش در تعداد سیکل‌های یخ-ذوب میزان نسبت مقاومت کششی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه‌های ساخته شده با استفاده از سنگدانه‌های شیشه خرد شده دارای مقادیر نسبت مقاومت کششی پایین‌تری در مقایسه با نمونه کنترل می‌باشند. هر چه درصد شیشه خرد شده افزایش می‌یابد تفاوت در پارامتر نسبت مقاومت کششی نمونه‌های کنترل و نمونه‌های مخلوط آسفالت شیشه ای بیشتر می‌شود. روند تغییرات نمودار نسبت مقاومت کششی در نمونه‌ها بدین صورت است که با افزایش درصد خرده شیشه مقدار این پارامتر رو به نزول می‌گذارد. در واقع هر چقدر درصد خرده شیشه جایگزین سنگدانه گرانیت بیشتر شود، چسبندگی ضعیف‌تری بین مجموع سنگدانه‌ها (گرانیت به همراه شیشه خرد شده) با قیر مورد استفاده ایجاد می‌شود و نمونه در سطح تنش پایین تری دچار گسیختگی و خرابی می‌شود. از طرفی خصوصیات شیمیایی سطوح سنگدانه‌ها بر روی درجه حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی تاثیر می‌گذارد. ترکیبات شیمیایی گرانیت و شیشه خرد شده به کار رفته در این پژوهش به ترتیب در جداول ۱ و ۳ ارائه شده است. این جدول‌ها نشان می‌دهند که شیشه خرد شده در مقایسه با گرانیت به دلیل داشتن SiO_2 بیشتر در ترکیب خود سیلیسی‌تر می‌باشد. از



شکل ۱۰. رابطه بین نسبت مقاومت کششی با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده بدون افزودنی



شکل ۱۱. رابطه بین نسبت مقاومت کششی با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۰/۵ درصد نانو اکسید آهن

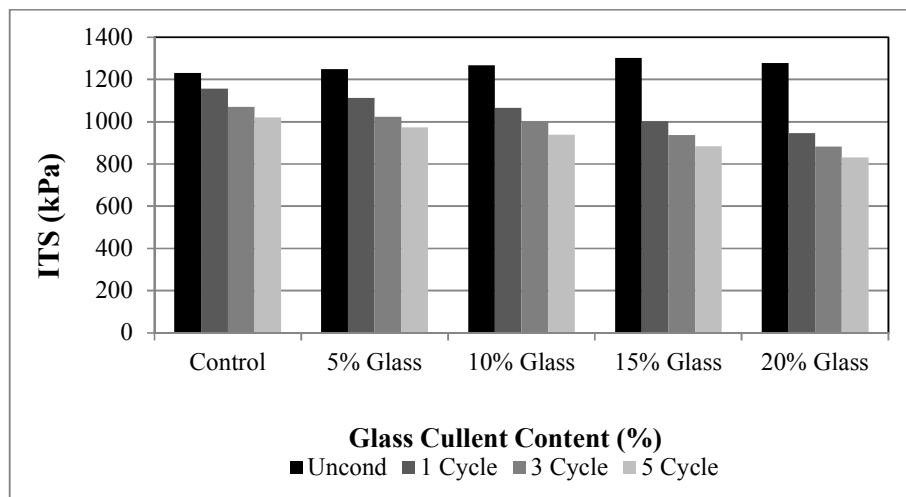


شکل ۱۲. رابطه بین نسبت مقاومت کششی با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۱ درصد نانو اکسید آهن

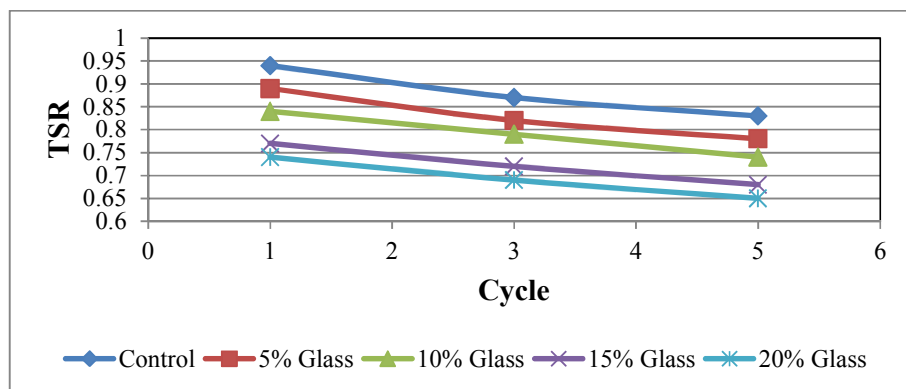
۲-۲-۳- بررسی تاثیر استفاده از نانو اکسید آلومینیوم

نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف یخ-ذوب درحالتی که نانو اکسید آلومینیوم در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است در شکل ۱۳ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۳ و مقایسه آن با شکل ۷، ملاحظه می‌شود که نمونه‌های آسفالتی حاوی خرده شیشه و نانو اکسید آلومینیوم به طور قابل ملاحظه‌ای مقاومت کششی غیر مستقیم بهتری در مقایسه با نمونه‌های آسفالتی کنترل از خود بروز می‌دهند. این امر می‌تواند بدلیل شکستگی همه جانبه ذرات خرده شیشه باشد، که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و قفل و بست میان‌دانه‌ای بهتر از روند ایجاد ترک در لایه‌های نمونه آسفالت شیشه‌ای جلوگیری می‌نماید. از طرفی پخش شدن ذرات خرده شیشه ضایعاتی در تمامی جهات که به نوبه خود سبب ایجاد مقاومت بالا در برابر جابجایی‌های برشی می‌گردد، می‌تواند از روند گسترش ترک در لایه‌های نمونه‌های آسفالتی حاوی خرده شیشه جلوگیری نماید. همچنین اضافه کردن مواد نانو اکسید آلومینیوم چسبندگی را در مخلوط افزایش داده و اجازه جا به جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ - ذوب مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشد. شکل ۱۴ نشان

دهنده مقادیر نسبت مقاومت کششی برای ترکیبات مختلف استفاده شده در این پژوهش در حضور نانو اکسید آلومینیوم می‌باشد. مشخص است که با افزایش در تعداد سیکل‌های یخ-ذوب میزان نسبت مقاومت کششی کاهش می‌یابد. همچنین، همانطور که از داده‌های این شکل مشخص است افزودن نانو اکسید آلومینیوم به نمونه‌های ساخته شده با شیشه خرد شده سبب افزایش قابل توجه در شاخص نسبت مقاومت کششی این نمونه‌ها شده است که نشان دهنده افزایش مقاومت این نمونه‌ها در برابر رطوبت می‌باشد. همچنین مطابق با استاندارد AASHTO T283، سیکل‌های یخ-ذوب ۱، ۳ و ۵ جهت بررسی دقیق تر تاثیر نانو اکسید آلومینیوم بر مقاومت در برابر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی در نظر گرفته شد. مشاهده می‌شود که کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم اصلاح شده مخلوط‌های اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم به اندازه مخلوط‌های کنترل نبوده است. از نکات قابل شکل ۱۴ می‌توان به کاهش کم در مقادیر نسبت مقاومت کششی در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب اشاره کرد که نشان دهنده چسبندگی مناسب قیر اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم و سطح سنگدانه‌ها می‌باشد.



شکل ۱۳. رابطه بین ITS با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۰/۵ درصد نانوآکسید آلومینیوم



شکل ۱۴. رابطه بین نسبت مقاومت کششی با درصد شیشه خرد شده در سیکل‌های مختلف یخ - ذوب در نمونه‌های ساخته شده با ۰/۵ درصد نانوآکسید آلومینیوم

۴- نتیجه گیری

در این قسمت مهم ترین نتایج حاصل شده از این پژوهش آورده شده است:

- استفاده از شیشه خرد شده ضایعاتی مقادیر قیر بهینه در نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده را تقلیل داده‌اند.

- افزایش زاویه اصطکاک داخلی به دلیل تیزگوشگی بیشتر ذرات شیشه خرد شده از دلایل مهم افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های حاوی شیشه خرد شده ضایعاتی است.

- با افزایش درصد شیشه خرد شده مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی افزایش می‌یابد. عواملی همچون قفل و بست میانده‌ای بهتر به همراه زبری بیشتر حاصل از

تیزگوشگی ذرات شیشه خرد شده از دلایل وقوع این اتفاق می‌باشند. اما با افزایش درصد شیشه خرد شده به میزانی بیش از درصد بهینه، لغزش تدریجی ذرات شیشه خرد شده باعث می‌گردد که مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های آسفالتی کاهش یابد.

- اضافه کردن مواد ضد عریان‌شدگی نانوآکسید آهن - چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط افزایش داده و اجازه جا به جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگدانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ - ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشد.

- Arabani, M., Hamed, GH. (2010), "Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, No. 23(6), pp.802-811.
 - Hamed, GH., Moghadas Nejad, F., Oveisi, K. (2015), "Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA", *Road Materials and Pavement Design*, No. 16(3), pp.536-552.
 - Huang, Y., Bird, RN., Heidrich, O. (2007), "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements", *Resources, Conservation and Recycling*, 2007. 52(1): pp.58-73.
 - Su, N., Chen, J. (2002), "Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. Resources, conservation and recycling", No. 35(4), pp. 259-274.
 - Wu, S., Yang, W., Xue, Y. (2004), "Preparation and properties of glass-asphalt concrete", Wuham (China): Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education, Wuham University of Technology.
 - مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های اصلاح شده با نانو اکسید آلومینیوم چه در شرایط مرطوب و چه در شرایط خشک، افزایش یافته است.
 - افزودن نانو اکسید آلومینیوم به مقدار قابل توجهی سبب افزایش مقاومت در برابر خرابی رطوبتی و افزایش مقدار نسبت مقاومت کششی در نمونه‌های اصلاح شده با این ماده نسبت به نمونه‌های با سنگدانه‌های کنترل می‌باشد.
 - استفاده از اصلاح کننده‌ها در مخلوط‌های حاوی شیشه خرد شده موثرتر می‌باشد و میزان افزایش نسبت مقاومت کششی در آن محسوس‌تر است.
 - با توجه به اینکه شیشه ساختاری اسیدی دارد اصلاح قیر با افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی مورد استفاده در این پژوهش باعث چسبندگی بیشتر و کاهش پدیده عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی شیشه‌ای می‌شود.
- ۵-مراجع**
- Ahmed, AJ. (2014), "By Using Waste Glass as Secondary Aggregates in Asphalt Mixtures", *International Journal of Advanced Research*, No. 2(1), pp. 41-46.
 - Arabani, M. (2011), "Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete", *Construction and Building Materials*, No. 25(3), pp.1181-1185.