

## تاثیر نانو زایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی مناطق سردسیر (نمونه موردی: شهرستان سقز)

سید فرزین فائزی\*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران  
عبدالرحمن فرخی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: farzin\_faezi@yahoo.com

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۶ - پذیرش: ۹۷/۰۱۱/۰۵

صفحه ۱۷-۱

### چکیده

با کمتر شدن دمای آسفالت مقدار تنش کششی در آن بیشتر می‌شود. در صورتی که مقدار تنش کششی در آسفالت بیشتر از مقاومت کششی آن باشد، آسفالت روسازی ترک می‌خورد. مطالعات قبلی در بهبود عملکرد آسفالت در دماهای بالا تمرکز دارند، درحالی که عملکرد آسفالت در دماهای پایین نادیده گرفته شده است. لذا هدف از این پژوهش تاثیر نانو مواد زایکوترم به عنوان افزودنی و اصلاح کننده آسفالت در دماهای پایین می‌باشد. بدین منظور چهار نوع مخلوط آسفالتی از مصالح سیلیسی کارخانه آسفالت محل مورد نظر تهیه گردید. مخلوط نوع اول به عنوان نمونه شاهد و بدون مواد افزودنی و مخلوط نوع دوم با ۰/۱ درصد افزودنی نانو مواد زایکوترم و مخلوط نوع سوم با ۰/۱۵ درصد مواد افزودنی و مخلوط نوع چهارم با ۰/۱ درصد مواد افزودنی و فیلر سیمانی است. هر نوع مخلوط با سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه در حالت اشباع، در مجموع ۲۴ نمونه آزمایش شد. آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و شاخص نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها در دو حالت: شرایط خشک و بعد از طی چرخه انجماد و ذوب بر روی نمونه‌های ذکر شده انجام گرفت. نتایج نشان دادند افزودن ۰/۱۵ درصد نانو مواد زایکوترم باعث افزایش مقاومت کششی در حالت خشک گردید ولی اثر بخشی افزودن ۰/۱ درصد نانو مواد زایکوترم بیشتر از افزودن ۰/۱۵ درصد نانو مواد زایکوترم بود. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم بیشترین مقاومت مربوط به افزودنی نانو مواد زایکوترم با مقدار ۰/۱ درصد افزودنی زایکوترم با فیلر سیمانی است، که نشان می‌دهد که مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت خشک و در حالت بعد از چرخه انجماد و ذوب بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: نانو مواد، مقاومت کششی غیرمستقیم، زایکوترم، ترک حرارتی

### ۱- مقدمه

آسفالتی ترک‌های عرضی ایجاد خواهد شد. بنابراین اگر چرخه کاهش دما (ذوب و انجماد) تکرار شود، ترک‌ها ناشی از خستگی در آسفالت باعث از بین رفتن روسازی آسفالتی و کاهش ایمنی سفر استفاده کنندگان از راه و افزایش هزینه‌های مرمت و بازسازی روسازی آسفالتی می‌شود (طاهرخانی، کاظمی ثانی، ۱۳۹۴). ترک خوردگی آسفالت یک پدیده شایع در مناطق سرد می‌باشد که این نوع ترک خوردگی به صورت ترک‌های عرضی در طول سطح روسازی رخ می‌دهد. همچنین اثرات تناوبی درجه حرارت محیط منجر به افزایش تدریجی

در اثر سرد شدن ناگهانی هوا در مناطق سردسیر، لایه‌های فوقانی روسازی به سرعت سرد شده و نتیجه آن انقباض ناگهانی لایه فوقانی می‌باشد. این انقباض ناگهانی باعث به وجود آمدن تنش‌های کششی در سطح لایه آسفالت شده و ترک‌هایی در سطح لایه آسفالت پدیدار می‌گردد (et al, 2015). تنش‌های کششی ایجاد شده از افت سریع درجه حرارت محیط در زمستان، باعث کاهش انعطاف‌پذیری مخلوط آسفالتی می‌شود. در این شرایط وقتی که حداکثر تنش کششی در آسفالت از مقاومت کششی آن تجاوز نماید، در رویه

عملکرد آسفالت در دماهای پایین نادیده گرفته می شود ( Sun et al., 2016). نانو مواد با توجه به ماهیت آن یعنی سطح بزرگ و اندازه کوچک، در مقایسه با دیگر مواد، ویژگی های خاصی را از خود نشان می دهد. با توجه به این خواص و این ویژگی ها می توان آن را به عنوان یک افزودنی در زمینه بهبود عملکرد آسفالت استفاده کرد (Saltan et al., 2017).

## ۲-۱- خصوصیات شیمیایی نانو زایکوترم به عنوان افزودنی نانو در نمونه آسفالت

زایکوترم نسل پیشرفته ای از محصولات با فن آوری نانو است که به عنوان افزودنی نانومایع استفاده می شود. این ماده یک ترکیب ارگانوسیلیکون است که از گروه های سیلانول (Si-OH) تشکیل شده است. زایکوترم به صورت مایع بوده و مانند نانو الیاف، نیاز به میکسرهایی خاص برای اضافه کردن آن به مخلوط آسفالتی نمی باشد (Hamedi, 2017). ترکیبات ارگانوسیلیکون در حضور آب به سیلانول (Si-OH) تبدیل می شوند و از طریق واکنش یا سیلانول های سطحی سنگدانه ها پوششی از پیوندهای (Si-O-Si) را بر روی سنگدانه ها ایجاد می کنند. پیوند کوالانسی (Si-O-Si) به عنوان پوشش، مانع از نفوذ آب می شود (بلورچیان، ۱۳۹۰). ترکیبات شیمیایی و مواد تشکیل دهنده زایکوترم در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. ترکیبات شیمیایی زایکوترم

درصد مواد تشکیل دهنده	مواد تشکیل دهنده زایکوترم
۶۵-۷۰٪	Hydroxyalkyl-alkoxy-alkylsilyl
۲۵-۲۷٪	Benzyl Alcohol
۳-۵٪	Ethylene Glycol

سیلان ها موادی منومری هستند که برای ضد آب سازی استفاده می شوند به آلکیل آلکوکسی سیلان معروف اند. آلکیل آلکوکسی سیلان ها دو گروه دارند: الف) گروه آلکیل (R') و ب) گروه آلکوکسی (OR) که با بیشتر مصالح ساختمانی واکنش پذیرند. بیشتر مصالح ساختمانی گروه هیدروسیل (OH) دارند. این گروه های OH می توانند با گروه های آلکوکسی سیلان واکنش

مقدار باز شدگی دهانه ترک می شود (Marasteanu et al, 2004). یکی از فناوری هایی که به مرور توانسته جایگاه ویژه ای در صنعت و مهندسی پیدا نماید فناوری نانو می باشد که در حال حاضر در بیشتر کشورهای پیشرفته دنیا بر روی این موضوع سرمایه گذاری و مطالعه شده است (Wu, et al, 2009). نانو مواد ترکیباتی مورفولوژیک در مقیاس نانو هستند و خواص ویژه ای دارند. لذا هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر نانو زایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی مناطق سردسیر می باشد. تاکنون در قالب بررسی تاثیر افزودنی نانو مواد مایع مانند زایکوترم و اثر آن بر آزمایش های کنترلی آسفالت تحقیقاتی در داخل و خارج کشور صورت پذیرفته است. عمده این موارد تاثیر نانومواد مایع زایکوترم بر مخلوط های آسفالتی انجام گرفته که در شرایط محیطی و دمایی گرم و معتدل بوده است و قیری که در این مناطق استفاده می شود دارای درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می باشد. حال آنکه مشکل اساسی ناشی از کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتر در مناطق سردسیر که ممکن است چرخه ذوب و انجماد در طول شبانه روز به دفعات اتفاق بیفتد و قیری که بیشتر در این مناطق استفاده می شود دارای درجه نفوذ ۸۵/۱۰۰ و یا قیر با درجه عملکردی ۲۲-۵۸ است. لذا نوع آوری در این تحقیق تاثیر نانو مواد مایع زایکوترم بر مقاومت کششی مخلوط های آسفالتی مناطق سردسیر می باشد که یکی از اساسی ترین خرابی های روسازی شایع در منطقه مورد مطالعه می باشد.

## ۲- پیشینه تحقیق

در طی دهه های اخیر با افزایش تعداد خودروها و نیز وزن خودروهای روی سطح جاده، روسازی جاده ها در معرض آسیب های بیشتری قرار گرفته اند که بسیاری از این اتفاقات حتی پیش از عمر بهره برداری مورد انتظار روسازی رخ داده است (Shafabakhsh et al, 2015). از این رو، برای حل این مشکل طراحان و مهندسان راه بر آن شدند تا راه حل هایی برای بهبود خصوصیات روسازی بیابند. یکی از مرسوم ترین راه حل ها ساخت مخلوط آسفالتی با خصوصیات اصلاح شده است (Ziari, Babagoli, Mirzababaei, 2016).

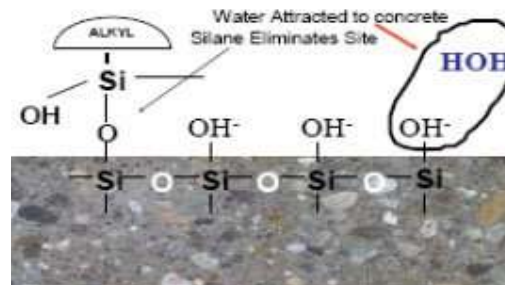
نانو مواد با به عنوان اصلاح کننده های قوی برای افزایش عملکرد آسفالت مطرح هستند. با این حال، مطالعات قبلی در بهبود عملکرد آسفالت در دماهای بالا تمرکز دارند. در حالی که

## ۲-۲- مطالعات انجام شده

تحقیقات زیادی به مسئله ترک خوردگی‌های حرارتی اختصاص داده شده است. نتایج این تحقیقات به منظور پیش‌بینی شروع ترک خوردگی‌های حرارتی و یا ارزیابی مقدار پیشرفت این نوع ترک خوردگی‌ها انجام گرفته است. در روش مدل هیلز و برین برای پیش‌بینی دمای شکست مخلوط‌های قیری نشان داده شده است که با کاهش دما ضریب سفتی و مقاومت کششی مخلوط آسفالتی افزایش پیدا می‌کنند. با کمتر شدن دمای آسفالت مقدار تنش کششی در آن بیشتر می‌شود، در صورتی که مقدار تنش کششی در آسفالت بیشتر از مقاومت کششی آن باشد، آسفالت روسازی ترک می‌خورد (Hills and Brien, 2014). در پژوهشی به ارزیابی مقاومت کششی چند نمونه آسفالت با درصد‌های متفاوت قیر و فیلر و دماهای مختلف پرداخته شده است. نتایج نشان دادند که تاثیر دمای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی مقاومت کششی نمونه‌های آسفالتی و همچنین تغییر شکل نسبی افقی آنها به مراتب بیشتر از تاثیر سایر پارامترها (دانه‌بندی مصالح سنگی، درصد قیر و فیلر) می‌باشد. مقادیر مقاومت کششی نشان داد که مقاومت کششی کلیه نمونه‌های آزمایش شده در دماهای ۲۵ و ۶۰ درجه سانتیگراد با افزایش درصد قیر و همچنین افزایش درصد فیلر افزایش یافته است. در این راستا تاثیر افزایش درصد قیر در افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها بیشتر از تاثیر افزایش درصد فیلر است (عامری، ۱۳۸۹). در تحقیقی رفتار خرد شدگی ریز آسفالت در تست کشش غیرمستقیم (IDT) توسط مدل‌سازی المان گسسته مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان دادند ترک‌های ریز ابتدا در بالا و پایین نمونه قبل از پیک بار به دلیل فشردگی محلی توسط بارگذاری صفحه‌ها ظاهر می‌شوند و در مرحله نرم شدن، ترک‌های کوچک به سرعت گسترش می‌یابند، که باعث ایجاد ترک‌های بزرگ در وسط نمونه می‌شود (Zhang et al., 2015). در پژوهشی اثرات نانومواد بر روی استحکام کششی مخلوط آسفالتی پرداخته شد. همچنین مزایای بالقوه نانومواد برای مخلوط آسفالت مورد استفاده در معابر آسفالتی، مخصوصاً هنگامی که آنها در معرض آب و یا محلول‌های یخ‌زدا قرار می‌گیرند، بررسی شد. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که افزودن نانو و میکروفیلر کربن باعث بهبود عملکرد رطوبتی مخلوط یا کاهش توان بالقوه رطوبت در اکثر موارد می‌شود (WeiGoha et al., 2016).

دهند و با لایه‌های زیرین پیوندهای سیلوکزان دائمی تشکیل دهند. گروه آلکیل در سطح، آب‌گریزی (دفع آب) ایجاد می‌کند (شکل ۱). بنابراین این نوع محصولات با اصلاح ویژگی‌های سطحی مواد، از آب‌دوست به آب‌گریز میل به دفع آب ایجاد می‌کنند (Blau and Halket, 2010). خصوصیات فیزیکی زایکوترم در جدول ۲ بیان شده است.

### Reactive Silanes Cap Off Silanol Sites



شکل ۱. ترکیبات شیمیایی زایکوترم

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی نانو مواد زایکوترم در نمونه آسفالت

مشخصه	شرح
وضعیت	مایع
رنگ	زرد کم رنگ
نقطه اشتعال	$> 80^{\circ} \text{C}$ ( $176^{\circ} \text{F}$ )
خطر انفجار	وجود ندارد
تراکم	1.01 g/ml
نقطه انجماد	$5^{\circ} \text{C}$ ( $35^{\circ} \text{F}$ )
انحلال پذیری	محلول در آب
مقدار PH	۱۰٪ محلول در آب خنثی یا کمی اسیدی
ویسکوزیته (۲۵ درجه سانتیگراد)	CPS ۱۰۰۰-۴۰۰

روش افزودن زایکوترم به قیر و دیسپرس شدن سریع زایکوترم در هنگام اختلاط از اهمیت بسیاری برخوردار است. هنگام بارگیری در ترمینال، زایکوترم باید به تانکر قیر تزریق شود (یا قبل از اینکه پمپاژ قیر شروع شود، زایکوترم اضافه شود. زایکوترم نباید به تانکر پر از قیر اضافه شود. در این تحقیق برای اضافه کردن زایکوترم، هنگامی که تانکر مشغول تخلیه قیر به مخزن ذخیره سازی بود از یک سیستم تزریق استفاده شد.

حساسیت رطوبتی مخلوطهای ساخته شده از آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهندگی استفاده شد. همچنین آزمایش خزش دینامیکی برای ارزیابی پتانسیل شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی ساخته شده استفاده شد. نتایج نشان دادند که نانو ماده زایکوترم علاوه بر کاهش دمای اختلاط، باعث بهبود حساسیت رطوبتی مخلوطهای آسفالتی نسبت به مخلوط آسفالتی گرم و مخلوط ساسوبیتی می‌شود. از طرف دیگر ساسوبیت با افزایش سختی مخلوط آسفالتی باعث افزایش مدول برجهندگی و همچنین کاهش میزان شیارشدگی نسبت به دو مخلوط دیگر شد (بهبهانی و همکاران، ۱۳۹۵). نتایج تحقیق دیگری در مورد ارزیابی شیارافتادگی مخلوطهای آسفالتی نیمه گرم با افزودنی زایکوترم نشان داد، مقاومت مخلوطهای آسفالتی نیمه گرم در برابر رطوبت به میزان قابل توجهی بهبود یافت (میرزابابی و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج تحقیق دیگری نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با زایکوترم دارای درصد کرنش کمتر و مدول غیرقابل بازگشت بیشتری می‌باشد. در نتیجه مقاومت آن در برابر شیارشدگی نسبت به نمونه‌های خالص کمتر می‌باشد (باباگلی زیاری، ۱۳۹۵). در پژوهشی سعی شده است تا با استفاده از روشهای ترمودینامیک و مکانیکی تاثیر استفاده از نانوماده زایکوترم به عنوان افزودنی ضد عریان شدگی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی بررسی شود. به این منظور نانو ماده زایکوترم در دو درصد مختلف به قیر اضافه و آزمایشهای انرژی آزاد سطحی بر روی قیر و آزمایش لاتمن اصلاح شده بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از نانومواد باعث کاهش جز اسیدی و افزایش جز بازی انرژی آزاد سطحی قیر می‌شود که باعث چسبندگی بیشتر قیر با سنگدانه‌های اسیدی، که مستعد خرابی رطوبتی هستند، می‌شود. نتایج بدست آمده از آزمایش لاتمن اصلاح شده نیز بهبود مقاومت در برابر خرابی رطوبتی در نتیجه استفاده از نانو ماده زایکوترم را تایید کرد (مقدس نژاد و همکاران، ۱۳۹۳).

### ۳- روش تحقیق

در این مطالعه تحقیقاتی، از روش آزمایشگاهی استفاده شده است. مخلوطهای آسفالتی با استفاده از مصالح مربوط به کارخانه آسفالت شرکت طرح و ساخت سازه سندج واقع در

در پژوهشی اثر تقویت الیاف فولادی در بتن آسفالتی از طریق آزمونهای تنش غیرمستقیم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایش نشان دادند که مقاومت ترک خوردگی در دمای پایین، به طور قابل توجهی با اضافه کردن نوع مناسب و مقدار الیاف فولادی، بهبود یافته است. نمونه‌های حاوی الیاف تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح با افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم به میزان % ۶۲/۵ را نشان دادند (Abtahi et al., 2013). در تحقیقی ادعا شد که نانو مواد با توجه به ماهیت آن یعنی سطح بزرگ و اندازه کوچک، در مقایسه با دیگر مواد ویژگی‌های خاصی را از خود نشان می‌دهد. با توجه به این خواص و ویژگیها می‌توان آن را به عنوان یک افزودنی در زمینه بهبود عملکرد آسفالت استفاده کرد (Li et al., 2017). بیشتر آسفالتها نمی‌توانند به‌طور همزمان در دماهای بالا و پایین، مقاومت مناسبی داشته باشند. بنابراین در تحقیقی با هدف یافتن سیستم اصلاح جدید برای بهبود ویژگی‌های دمای بالا و پایین آسفالت، ذرات اکسید روی (ZnO) ذرات نانو تیتانیو (TiO<sub>2</sub>)، کربنات نانو (CaCO<sub>3</sub>)، استیرن-بوتادین-استیرن (SBS) به‌عنوان اصلاح کننده انتخاب شدند. نتایج نشان دادند نانومواد می‌توانند خواص دماهای بالا و پایین آسفالت را بهبود بخشند (Hong-liang et al., 2015). در یک تحقیق مروری که بر روی آسفالت‌های اصلاح شده پلیمری در طول سه دهه گذشته، مواد افزودنی پلیمری آسفالت به‌طور روز افزون تبدیل به یک اصل قانونی در طراحی بهینه جاده‌ها و گذرگاه‌ها به ویژه در ایالت متحده آمریکا، کانادا، اروپا و استرالیا شده است. پلیمرهای خاصی که به عنوان اصلاح کننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل لاستیک، SBR، SBS و Elvaloy هستند. ویژگی‌هایی که طراحی شده‌اند و مواردی که از قبل وجود داشته برای دستیابی به خواص رئولوژیکی مواد اصلاح شده پلیمری بهبود یافته است (Yildirim, 2005). در تحقیقی عملکرد آسفالت گرم و قیر اصلاح شده با نانو مواد براساس روش طراحی مخلوط سوپریو مورد ارزیابی قرار گرفت. در این مطالعه، قیر با سیلیکا (SiO<sub>2</sub>) اصلاح شد. نانو مواد با ۰/۱ ، ۰/۳ و ۰/۵ درصد قیر مخلوط شدند. نتایج نشان دادند بهترین عملکرد آسفالت با ۰/۳ درصد نانو است (هاشمیان، کاووسی، ۱۳۸۹). در تحقیقی نانو ماده زایکوترم به‌عنوان یک افزودنی شیمیایی جدید و ساسوبیت به‌عنوان رایج‌ترین واکنش آلی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. به منظور بررسی

شهرستان سقز تهیه شدند. نانو مواد افزودنی زایکوترم نیز از شرکت اکسیر شرق تهیه گردید. مخلوط آسفالتی با افزودنی نانو مواد مطابق طرح اختلاط آسفالت و دستورالعمل شرکت سازنده نانو مواد در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کردستان تهیه و آماده گردید. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی است. همچنین این آزمایش برای ارزیابی نسبت مقاومت کششی بعد از طی چرخه انجماد و ذوب و عمر خستگی نمونه آسفالتی نیز استفاده می‌شود. در حال حاضر برخی از خبرگان در فناوری آسفالت معتقدند که نحوه بارگذاری نمونه‌های آسفالتی در آزمایش کشش غیرمستقیم بهتر از نحوه بارگذاری نمونه‌های آسفالتی در آزمایش‌های فشاری تک محوری و یا تیر خمشی است زیرا وضعیت تنش واقعی‌تری را در نمونه‌های آزمایش به وجود می‌آورد (Mirzababaei, 2015). لذا آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در شرایط خشک و اشباع بر طبق استاندارد آشتو (T283-07) بر روی نمونه مخلوط آسفالت با درصد‌های متفاوت افزودنی نانو مواد انجام گرفت.

پروژه مورد مطالعه در شهرستان سقز واقع در استان کردستان قرار گرفته است. از نظر اقلیمی این منطقه دارای آب و هوای سرد و کوهستانی می‌باشد. قیر مصرفی در این پژوهش از نوع قیر ۸۵/۱۰۰ پالایشگاه پاسارگاد اراک می‌باشد و وضعیت نگهداری آن در مخزن و نحوه گرم کردن به شیوه غیرمستقیم می‌باشد. مصالح سنگی، قیر و نوع طرح اختلاط در این مطالعه تحقیقاتی از نوعی است که بیشترین تولید و اجرا را داشته است، لذا آسفالت بیندر ۲۵-۰ مورد آزمایش قرار گرفت. جنس مصالح سنگی از نوع سیلیسی و ماسه سنگ می‌باشد که این مصالح جزء سنگ‌های هایدروفیلک هستند که اندود قیری را به خوبی نگه نمی‌دارند و در مجاورت آب، اندود قیری به آسانی از مصالح سنگی جدا می‌شوند. دانه‌بندی مصالح سنگی مصرفی براساس استاندارد آشتو (T27) انتخاب شد. نمونه‌ها بر اساس درصد وزنی رد شده حاصل از اختلاط با نسبت‌های مورد نظر، با استفاده از مخلوط مصالح سنگی تهیه و ساخته شد. برای رسیدن به شرایط آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک چندین نمونه آماده و مورد آزمایش قرار گرفت. به منظور بررسی هر چه بهتر شرایط ذوب و یخبندان

که در مناطق کوهستانی در طی زمان شب و روز به وجود می‌آید آزمایش مقاومت کششی در حالت اشباع نیز انجام و مورد ارزیابی قرار گرفت. برای انجام هر آزمایش حداقل شش نمونه ساخته شد که سه نمونه در حالت خشک و سه نمونه دیگر بعد از اشباع شدگی جزئی و عمل‌آوری رطوبتی با یک چرخه ذوب و انجماد، مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه نمونه‌ها با قطر ۴ اینچ و ضخامت ۲/۵ اینچ در نظر گرفته شد. همچنین وزن هر نمونه مخلوط آسفالتی ۱۲۰۰ گرم و فضای خالی آن مطابق استاندارد برابر  $0/5 \pm 7$  انتخاب گردید. همچنین تعداد ضربات جهت تراکم نمونه‌ها ۱۵ ضربه انتخاب و به کار گرفته شد. نمونه‌ها به چهار شیوه مطابق استاندارد آماده شدند: نمونه بدون مواد افزودنی (نمونه شاهد)، نمونه حاوی ۰/۱ درصد نانو مواد افزودنی زایکوترم، نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد نانو مواد افزودنی زایکوترم، نمونه حاوی ۰/۱ درصد نانو مواد افزودنی زایکوترم و فیلر سیمانی. هر شیوه با سه آزمایش در حالت خشک و سه آزمایش در حالت اشباع انجام شد. پس از عمل‌آوری و گرمادهی نمونه‌های مخلوط آسفالتی، وزن مخصوص حقیقی ( $G_{mb}$ ) و حداکثر وزن مخصوص تئوری ( $G_{mm}$ ) و در نهایت فضای خالی نمونه‌ها محاسبه گردید. با توجه به فضای خالی به دست آمده، نمونه‌ها به دو گروه سه‌تایی به نحوی تقسیم گردید که میانگین فضای خالی دو گروه تقریباً برابر باشد. خلاءزایی با فشار مطلق ۱۳ تا ۶۷ کیلوپاسکال برای مدت کوتاهی حدود ۵ دقیقه انجام شد و شرایط خلاء قطع گردید و نمونه برای مدت کوتاهی درون آب رها شد. سپس جرم نمونه اشباع با سطح خشک و حجم آب جذب شده و درجه اشباع شدگی محاسبه شد.

برای تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و اشباع، نمونه‌ها را از حمام ۲۵ درجه سانتیگراد خارج کرده و در بین نوارهای بارگذاری فولادی قرار داده و سپس بارگذاری انجام شد (شکل ۲). بارگذاری با سرعت ثابتی برابر میلی متر بر ثانیه ۲۵ در راستای قطری به نمونه اعمال شد و سپس مقاومت کششی ( $S_T$ ) و نسبت مقاومت کششی (TTR) تعیین شدند.

نتایج حاصل از آزمایش‌های صورت گرفته بر روی قیر خالص نمونه برداری شده با مشخصات استاندارد ایران مطابقت دارد (جدول ۵). طبق آیین‌نامه ایران، دمای تراکم و اختلاط مخلوط‌های آسفالتی با توجه به کندروانی قیر تعیین می‌گردد. بدین منظور کندروانی قیر خالص نمونه برداری شده در سه دمای متفاوت ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد تعیین شد و براساس آن محدوده دمای اختلاط ۱۳۶ الی ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد و محدوده دمای تراکم ۱۲۵ الی ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد (شکل ۴). نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های متفاوت قیر، با اعمال ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با استفاده از قیر نمونه برداری شده به روش مارشال تهیه شد. وزن مخصوص نمونه‌های مخلوط آسفالتی متراکم و بر اساس استاندارد AASHTO-T166 تعیین شد. سپس مقدار حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط آسفالتی به ازای درصد‌های متفاوت قیر محاسبه گردید (ASTM D2041). با توجه به منحنی‌های تغییرات کمیت‌های مخلوط‌های آسفالتی با درصد‌های متفاوت قیر و مطابق استاندارد طبق استاندارد ASTM D1559 و با توجه به بررسی مقاومت کششی و ارزیابی تاثیر چرخه‌های ذوب و انجماد در این پژوهش نتایج درصد قیر بهینه و حداکثر مخصوص تئوری در جدول ۶ ذکر شده است.



شکل ۲. بارگذاری نمونه در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم

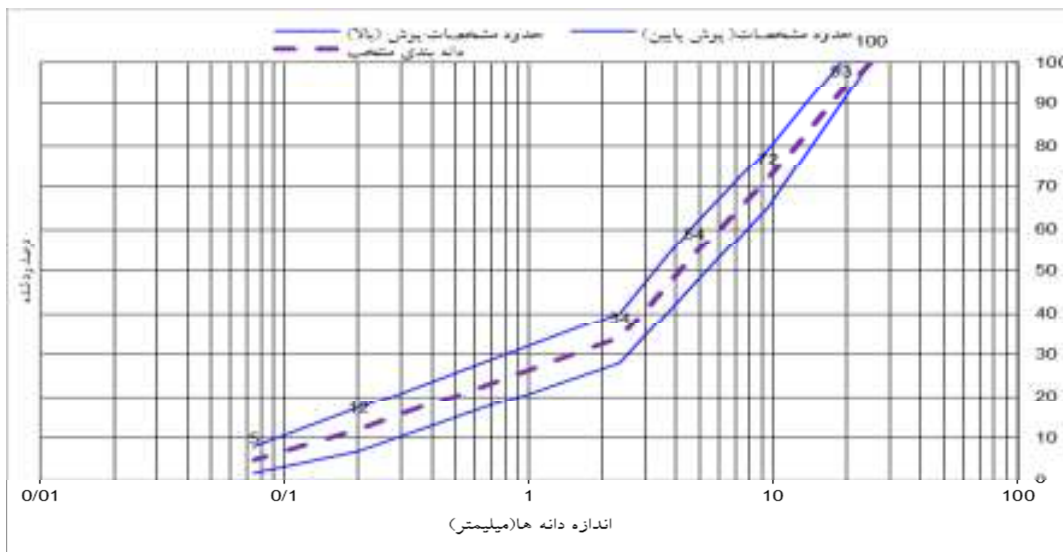
#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی

منحنی مخلوط مصالح سنگی به کار رفته در این پژوهش، با توجه به دانه‌بندی شماره III آیین‌نامه ایران، در شکل ۳ ترسیم شده است، که نتایج درصد وزنی رد شده مخلوط مصالح سنگی از الک‌های مورد نظر در دانه‌بندی در جدول ۳ بیان شده است.

نتایج مربوط به تعیین مرغوبیت مصالح روی مصالح نمونه برداری شده انجام پذیرفت و نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۴ مصالح سنگی منتخب تمامی الزامات آیین‌نامه را برآورده نموده و برای تهیه آسفالت بیندر ۲۵-۰ مناسب تشخیص داده شدند.

##### ۴-۲- نتایج آزمایش‌های قیر



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی مصالح نمونه

جدول ۳. دانه بندی مخلوط مصالح سنگی

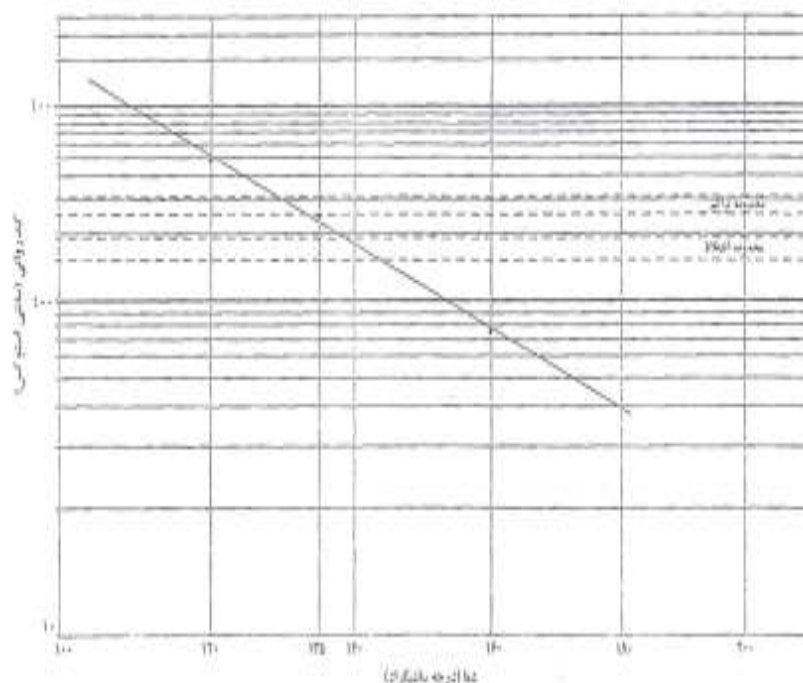
اندازه الک	دانه بندی شماره III	درصد وزنی رد شده حاصل از نسبت اختلاط مصالح سنگی	حدود مشخصات با اعمال رواداری مجاز
۱	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۳/۴	۹۰-۱۰۰	۹۳	۹۰-۱۰۰
۳/۸	۵۶-۸۰	۷۲	۷۹-۶۵
۴	۳۵-۶۵	۵۴	۴۷-۶۱
۸	۲۳-۴۹	۳۴	۲۸-۴۰
۵۰	۵-۱۹	۱۲	۷-۱۷
۲۰۰	۲-۸	۵	۲-۸

جدول ۴. نتایج آزمایش های مرغوبیت مصالح سنگی

مشخصات	مقدار (درصد)	استاندارد آزمایش	نام آزمایش
<۳۰%	٪۱۸	AASHTO T96	سایش لس آنجلس
<۱۲%	٪۱	AASHTO T104	ریزدانه
<۸%	٪۲		درشت دانه
-	٪۹۰	ASTM D5821	شکستگی در یک وجه
>۸۰%	٪۸۶	ASTM D5821	شکستگی در دو وجه و بیشتر
>۹۵%	بیش از ٪۹۵	AASHTO T182	چسبندگی قیر به مصالح
<۲۵%	٪۲۳	(BS-812)	تورق
>۵۰%	٪۷۸	AASHTO T176	ارزش ماسه ای SE (مواد ریزدانه)
۴	N.P	دامنه خمیری	حدود اتربرگ
غیر خمیری	غیر قابل تعیین	حد روانی	

جدول ۵. نتایج آزمایش های قیر

آزمایش	روش استاندارد	نتیجه	حدود مشخصات قیر
			۱۰۰-۸۵ حداقل حداکثر
وزن مخصوص قیر در ۲۵ درجه	ASTM D20	۱/۰۱۴	-- --
درجه نفوذ قیر	ASTM D5	۸۵	۸۵ ۱۰۰
نقطه اشتعال قیر	ASTM D92	۳۱۴	۲۳۲ --
کشش پذیری قیر	ASTM D113	۱۰۰	۱۰۰ --
نقطه نرمی	ASTM D36	۴۷	۴۵ ۵۲
حلالیت	ASTM D2042	۹۹/۲۸	۹۹ --
کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ درجه	ASTM D2170	۴۹۲	-- --
کندروانی کینماتیک در ۱۳۵ درجه	ASTM D2170	۲۵۱	-- --
کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ درجه	ASTM D2170	۷۵	-- --



شکل ۴. نمودار دما-کندروانی قیر خالص

#### ۴-۴- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت حاوی

##### ۰/۱ درصد مواد زایکوترم

مقایسه نتایج ارزیابی مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع در شکل ۶ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک ۶۳ کیلوپاسکال و حداکثر مقدار مقاومت کششی در حالت اشباع ۴۵۰ کیلوپاسکال می‌باشد که در حدود ۷۱ کیلوپاسکال افت داشته است. همچنین اختلاف مابین مقدار میانگین مقاومت کششی در حالت خشک ۶۳ کیلوپاسکال با نمونه‌هایی که در چرخه انجماد و ذوب ۴۵۰ کیلو پاسکال قرار گرفته در حدود ۳۶ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین حداکثر و حداقل مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه حاوی ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم بعد از چرخه انجماد و ذوب به ترتیب برابر با ۴۵۰ و ۳۹۲ کیلوپاسکال می‌باشد. نسبت مقاومت کششی براساس میانگین نمونه برابر ۹۲ درصد می‌باشد و همچنین کمترین مقدار مقاومت کششی براساس نمونه‌ها ۸۵ درصد و بیشترین نسبت مقاومت کششی براساس نمونه ۱۰۰ درصد می‌باشد که مقادیر به دست آمده بیشتر از حداقل تعیین شده در نشریه ۲۳۴ می‌باشد.

#### جدول ۶. نتایج وزن مخصوص و درصد قیر بهینه

مشخصه نمونه	حداکثر وزن مخصوص تئوری نمونه	درصد قیر بهینه
نمونه بدون فیلر سیمانی	۲/۴۷۳	۴/۵۵ %
نمونه حاوی فیلر سیمانی	۲/۵۲۸	۴/۵۵ %

#### ۴-۳- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت بدون

##### مواد افزودنی

مقایسه نتایج ارزیابی مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع در شکل ۵ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک ۳۸۶ کیلوپاسکال و حداکثر مقدار مقاومت کششی در حالت اشباع ۳۰۹ کیلوپاسکال می‌باشد که در حدود ۷۷ کیلو پاسکال افت را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف مابین مقدار میانگین مقاومت کششی در حالت خشک با نمونه‌هایی که در چرخه انجماد و ذوب قرار گرفته در حدود ۱۰۴ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

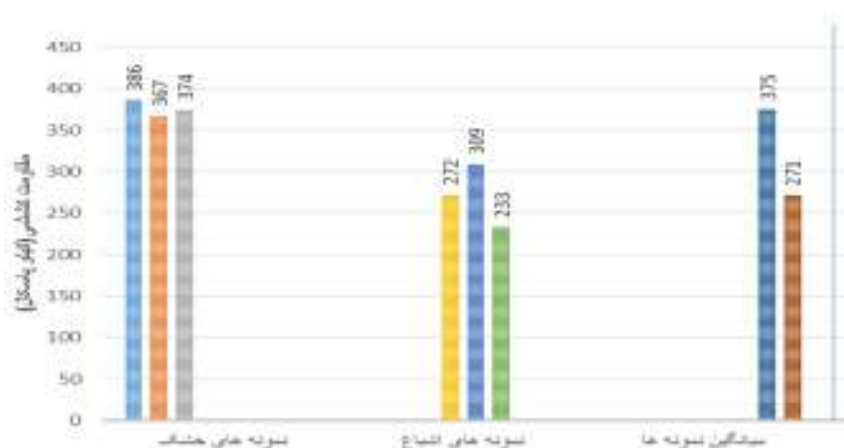


با توجه به شکل ۹ مقاومت کششی نمونه خشک بدون مواد افزودنی از ۳۷۵ کیلوپاسکال به مقدار ۴۵۰ کیلوپاسکال با افزودن ۰/۱۵ درصد نانومواد زایکوترم رسیده است و به اندازه ۷۵ کیلوپاسکال بهبود مقاومت کششی مشاهده شده است. درحالیکه با افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم مقاومت کششی نمونه خشک مقدار ۷۱ کیلو پاسکال بهبود یافته است. همچنین مقاومت کششی نمونه در حالت بعد از چرخه انجماد و ذوب از مقدار ۲۷۱ کیلوپاسکال مربوط به نمونه بدون مواد افزودنی به مقدار ۴۰۵ کیلوپاسکال با ۰/۱۵ درصد مواد زایکوترم رسیده است که به مقدار ۱۳۴ کیلو پاسکال بهبود مقاومت کششی مشاهده شده است. در حالیکه با افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم مقاومت کششی حالت اشباع به مقدار ۱۳۹ کیلوپاسکال بهبود یافته است. نسبت مقاومت کششی با افزودن ۰/۱۵ درصد مواد زایکوترم از ۷۲ درصد مربوط به نمونه بدون افزودنی به مقدار ۹۰ درصد افزایش پیدا کرده است که به اندازه ۱۸ درصد بهبود در شاخص نسبت مقاومت کششی مشاهده گردید در حالیکه در نمونه حاوی ۰/۱ درصد مواد افزودنی مقدار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم ۹۲ درصد بوده است و به ۲۰ درصد به مقدار نسبت مقاومت کششی نمونه بدون مواد افزودنی بهبود پیدا کرده بود. و نشان دهنده این است که مقدار ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم اثر بخشی بهتری را دارد.

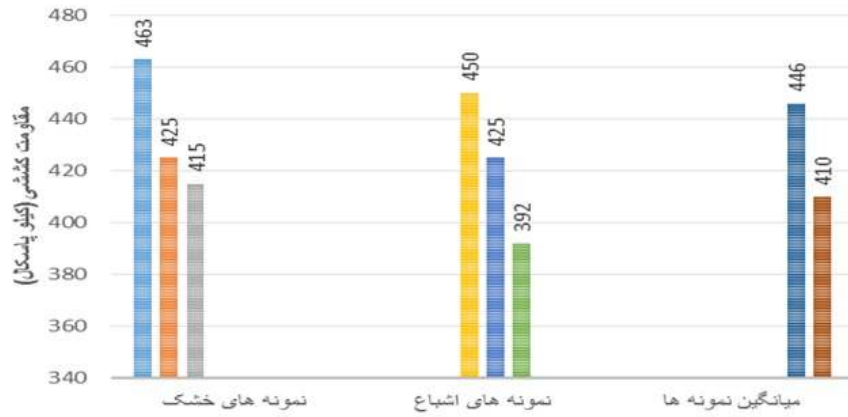
باتوجه به شکل ۷ با افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم مقاومت کششی نمونه خشک بدون مواد افزودنی از ۳۷۵ کیلوپاسکال به مقدار ۴۶۶ کیلوپاسکال رسیده است و به اندازه ۷۱ کیلوپاسکال بهبود مقاومت کششی در حالت خشک مشاهده شده است. همچنین مقاومت کششی در حالت بعد از چرخه انجماد و ذوب از مقدار ۲۷۱ کیلوپاسکال به مقدار ۴۱۰ کیلوپاسکال رسیده است که به مقدار ۱۳۹ کیلوپاسکال بهبود مقاومت کششی مشاهده شده است. نسبت مقاومت کششی از ۷۲ درصد به مقدار ۹۲ افزایش پیدا کرده است که به اندازه ۲۰ درصد بهبود در شاخص نسبت مقاومت کششی مشاهده گردید. مقدار افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم در اثر اضافه نمودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم درحالتی که نمونه‌ها در چرخه انجماد و ذوب قرار گرفته‌اند بیشتر از حالت خشک می‌باشد.

#### ۴-۵- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت حاوی ۰/۱۵ درصد مواد زایکوترم

مقایسه نتایج ارزیابی مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع در شکل ۸ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک ۴۷۰ کیلوپاسکال و حداکثر مقدار مقاومت کششی در حالت اشباع ۴۶۶ کیلوپاسکال می‌باشد که در حدود ۴ کیلوپاسکال افت داشته است ولی در مقایسه با حداکثر مقاومت کششی در حالت اشباع نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم، بیشتر می‌باشند. همچنین اختلاف مابین مقدار میانگین مقاومت کششی در حالت خشک ۴۷۰ کیلوپاسکال با نمونه‌هایی که در چرخه انجماد و ذوب ۴۶۶ کیلوپاسکال قرار گرفته، ۴۵ کیلوپاسکال است.



شکل ۵. نتایج مقاومت کششی نمونه‌های شاهد



شکل ۶. مقایسه نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم



شکل ۷. مقایسه نتایج نمونه های بدون افزودنی و نمونه های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم



شکل ۸. نتایج مقاومت کششی نمونه های حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم



شکل ۹. مقایسه نتایج نمونه‌های بدون افزودنی و نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و نمونه‌های حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم

بهبود یافته است. نسبت مقاومت کششی با افزودن ۰/۱ درصد مواد زایکوترم و فیلر سیمانی از ۷۲ درصد مربوط به نمونه بدون افزودنی به مقدار ۹۴ درصد افزایش پیدا کرده است که به اندازه ۲۲ درصد بهبود در شاخص نسبت مقاومت کششی مشاهده گردید از طرفی در نمونه حاوی ۰/۱ درصد مواد افزودنی و بدون فیلر سیمانی مقدار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم ۹۲ درصد بوده است و ۲۰ درصد نسبت به مقاومت کششی نمونه بدون مواد افزودنی بهبود پیدا کرده بود.

#### ۴-۷- مقایسه و ارزیابی مقاومت کششی نمونه‌ها

با توجه به شکل ۱۲ و رسم منحنی برازش بر اساس مقاومت کششی در حالت خشک نشان می‌دهد که بیشترین مقاومت کششی در حالت خشک مربوط به نمونه حاوی افزودنی ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم با فیلر سیمانی و مقدار ۴۵۲ کیلوپاسکال می‌باشد و با توجه به این منحنی برازش مشخص می‌شود که فیلر سیمانی تاثیر خود را به عنوان یک فیلر جایگزین بر روی مقاومت کششی در حالت خشک گذاشته است. بیشترین مقاومت کششی بعد از اعمال چرخه انجماد و ذوب مربوط به نمونه حاوی ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم و فیلر جایگزین سیمانی می‌باشد و منحنی برازش در بعد از طی چرخه ذوب و انجماد این روند را نشان می‌دهد. منحنی مذکور نمایانگر آن است که کمترین مقدار افت مقاومت کششی غیرمستقیم مربوط به هر نمونه در حالت خشک و در بعد از اعمال چرخه ذوب و انجماد مربوط به نمونه حاوی ۰/۱ درصد

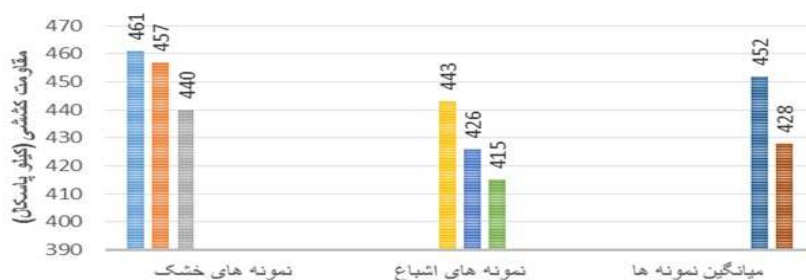
#### ۴-۶- نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم آسفالت حاوی ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم و فیلر سیمانی

نتایج ارزیابی مقاومت کششی در حالت خشک و اشباع در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که حداکثر مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم در حالت خشک ۴۶۱ کیلوپاسکال و حداکثر مقدار مقاومت کششی در حالت اشباع ۴۴۳ کیلوپاسکال می‌باشد که در حدود ۱۸ کیلو پاسکال افت را نشان می‌دهد. همچنین اختلاف مابین مقدار میانگین مقاومت کششی در حالت خشک (۴۵۲ کیلوپاسکال) با مقاومت کششی نمونه‌هایی که در چرخه انجماد و ذوب (۴۲۸ کیلوپاسکال) قرار گرفته در حدود ۲۴ کیلوپاسکال را نشان می‌دهد.

نسبت مقاومت کششی براساس میانگین نمونه‌ها برابر ۹۴ درصد می‌باشد و همچنین کمترین مقدار مقاومت کششی براساس نمونه‌ها ۹۰ درصد و بیشترین نسبت مقاومت کششی براساس نمونه ۱۰۰ درصد می‌باشد که مقادیر بدست آمده بیشتر از حداقل تعیین شده در آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی می‌باشد. همچنین مقاومت کششی نمونه در حالت بعد از چرخه انجماد و ذوب از مقدار ۲۷۱ کیلوپاسکال مربوط به نمونه بدون مواد افزودنی به مقدار ۴۲۸ کیلوپاسکال با ۰/۱ درصد مواد زایکوترم رسیده است که به مقدار ۱۵۷ کیلو پاسکال بهبود مقاومت کششی مشاهده شده است در حالیکه با افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم و بدون استفاده از فیلر سیمانی مقاومت کششی حالت اشباع به مقدار ۱۳۹ کیلوپاسکال

درصد زایکوترم (۴۶۶ کیلو پاسکال) می باشد. حداقل مقاومت کششی در بین نمونه های حاوی افزودنی مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم (۴۳۵۳ کیلو پاسکال) می باشد. بیشترین مقدار میانگین مقاومت کششی مربوطه نمونه حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و فیلر سیمانی (۴۲۸ کیلو پاسکال) است. کمترین مقدار میانگین مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم می باشد.

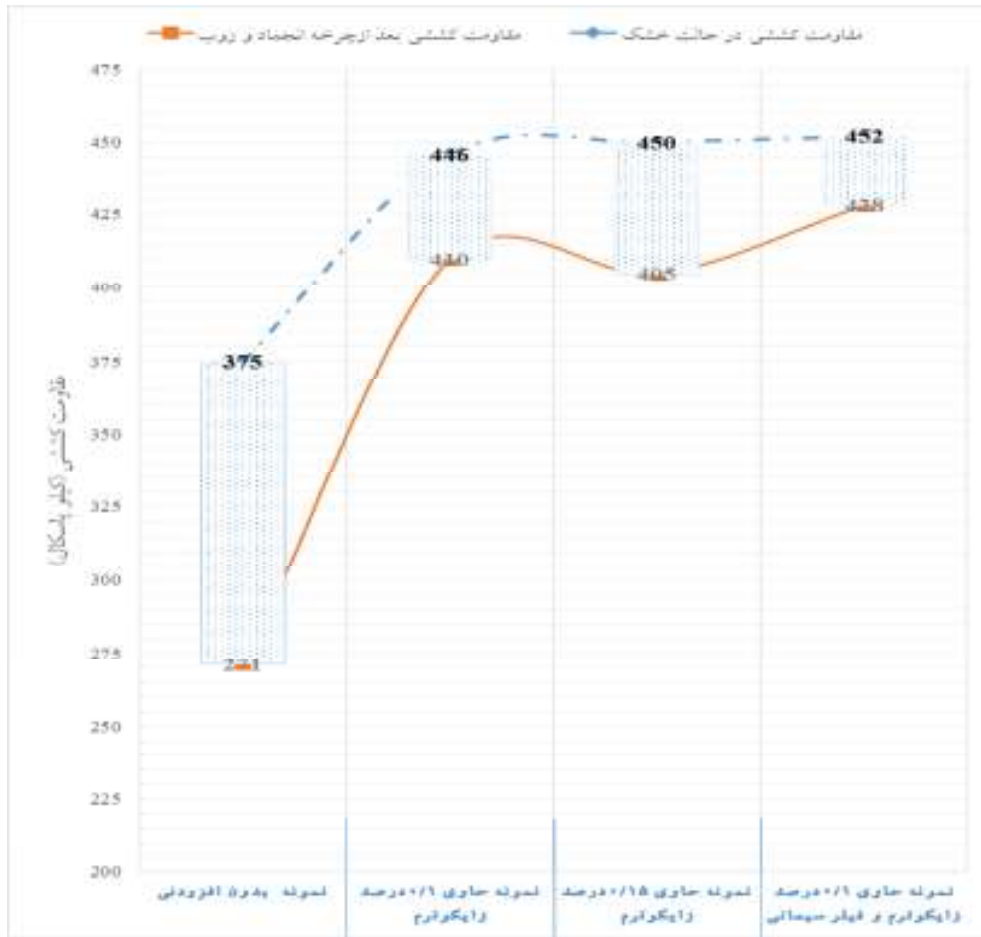
نانو مواد زایکوترم و فیلر سیمانی می باشد. همچنین نشان می دهد که در نمونه شاهد که بدون مواد افزودنی است مقاومت کششی آن بعد از طی چرخه انجماد و ذوب به شدت کاهش پیدا کرده است. منحنی برازش نشان دهنده مقاومت کششی در حالت خشک می باشد که روند افزایش مربوط به نمونه های حاوی افزودنی نانوزایکوترم را نشان می دهد. با توجه به نتایج مقاومت کششی نمونه ها در شکل ۱۳، حداکثر مقاومت کششی در حالت خشک مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم (۴۷۰ کیلو پاسکال) می باشد. حداقل مقاومت کششی در بین نمونه های حاوی افزودنی مربوط به نمونه حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم (۴۱۵ کیلو پاسکال) می باشد. بیشترین مقدار میانگین مقاومت کششی مربوطه نمونه حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و فیلر سیمانی (۴۵۲ کیلو پاسکال) است. همچنین کمترین مقدار میانگین مربوط به نمونه حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم می باشد. با توجه به نتایج مقاومت کششی نمونه ها در شکل ۱۴ حداکثر مقاومت کششی در حالت اشباع مربوط به نمونه حاوی ۰/۱۵



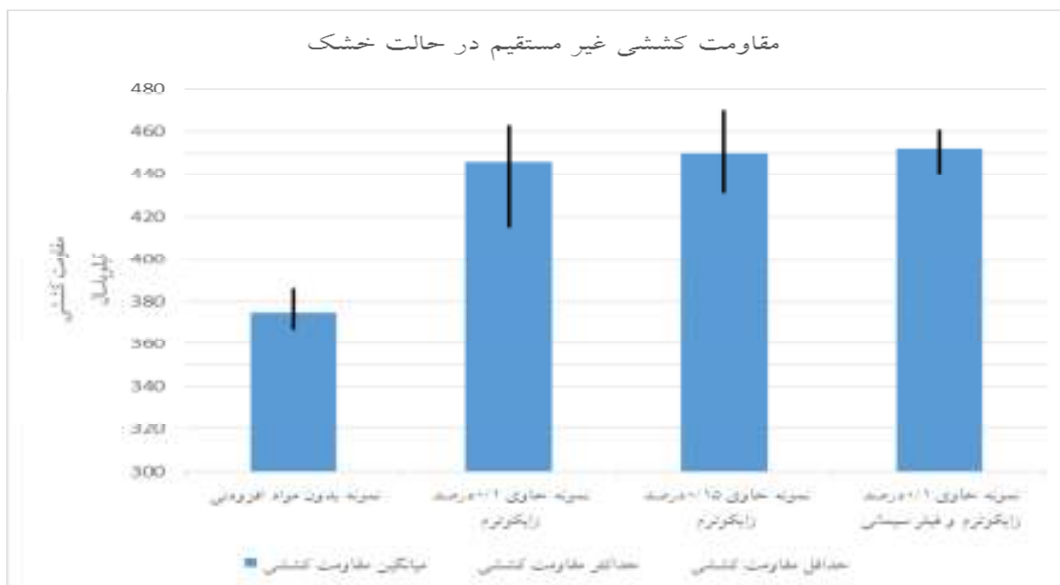
شکل ۱۰. نتایج مقاومت کششی نمونه های حاوی ۰/۱ نانو مواد زایکوترم و فیلر سیمانی



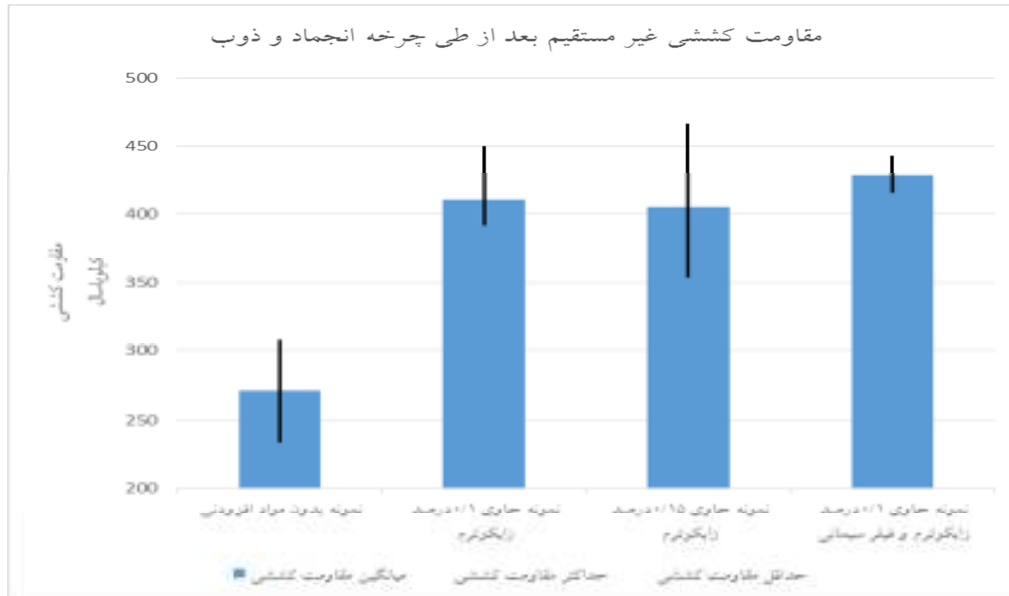
شکل ۱۱. مقایسه نتایج نمونه های بدون افزودنی و نمونه های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و نمونه های حاوی ۰/۱۵ درصد زایکوترم و فیلر سیمانی



شکل ۱۲. مقایسه و ارزیابی مقاومت کششی نمونه‌ها



شکل ۱۳. میانگین، حداقل و حداکثر مقاومت کششی نمونه در حالت خشک



شکل ۱۴. میانگین، حداقل و حداکثر مقاومت کششی نمونه بعد از چرخه انجماد و ذوب

## ۵- نتیجه گیری

این نامه روسازی آسفالتی ۷۵ درصد است. علت این امر را می‌توان به نقش افزودنی نانومواد مایع در افزایش چسبندگی قیر به مصالح مربوطه و واکنش پذیری نانو مواد، قیر و مصالح سنگی دانست.

- افزودن ۰/۱۵ درصد نانومواد زایکوترم باعث افزایش مقاومت کششی در حالت خشک گردید ولی اثر بخشی افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم بیشتر از افزودن ۰/۱۵ درصد نانومواد زایکوترم بود. همچنین باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم بر روی نمونه‌هایی که در شرایط انجماد و ذوب قرار گرفته‌اند گردید ولی اثر بخشی افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم بیشتر از افزودن ۰/۱۵ درصد نانومواد زایکوترم بود.

- افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم و استفاده از فیلر سیمانی باعث افزایش مقاومت کششی در حالت خشک و در شرایط انجماد و ذوب گردید و اثر بخشی آن از افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم بدون استفاده از فیلر سیمانی بیشتر بود. همچنین افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم و فیلر سیمانی باعث افزایش شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم گردید که نشان می‌دهد اثر بخشی آن از افزودن ۰/۱ درصد نانو مواد زایکوترم بدون استفاده از فیلر سیمانی بیشتر

نانوموادها به منظور بهتر نمودن ویژگی‌های عملکردی آسفالتی به کار گرفته می‌شوند. نانوموادها به‌عنوان افزودنی به مخلوط‌های آسفالتی به منظور اصلاح پارامترهای موثر در خرابی‌های آسفالتی استفاده می‌گردد که در این تحقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. این مطالعه آزمایشگاهی با هدف بررسی امکان بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم و ارزیابی تغییرات مقاومت کششی با افزودن نانومواد زایکوترم در شرایط خشک و بعد از طی چرخه انجماد و ذوب انجام شد. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم ابزار مناسبی برای ارزیابی مقاومت کششی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط‌های آسفالتی است. جهت بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم از نانومواد زایکوترم که یک محلول مایع است و فیلر سیمانی استفاده گردید. نتایج این آزمایشات را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

- افزودن ۰/۱ درصد نانومواد زایکوترم باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه در حالت خشک و بعد از طی چرخه انجماد و ذوب گردید. همچنین باعث افزایش شاخص نسبت مقاومت مقاومت کششی غیرمستقیم گردید. درواقع مقاومت کششی بعد از طی چرخه انجماد و ذوب به مقدار ۹۲ درصد مقاومت اولیه کششی درحالت خشک رسید. در حالی که حداقل مقدار شاخص نسبت مقاومت کششی در نشریه ۲۳۴

-میرزابابایی، پ.، زیاری، ح.، باباگلی، ر.، منیری، ع.، (۱۳۹۶)، "بررسی تاثیر زایکوترم روی خواص عملکردی آسفالت نیمه گرم تهیه شده با مصالح آهکی و سیلیسی"، مهندسی زیرساختهای حمل و نقل، دوره ۴، شماره ۱، ص. ۱۵-۲۲.

-هاشمیان، ل. و کاوسی، ا.، (۱۳۸۹)، "ارزیابی مشخصات مخلوطهای گرم کف قیری تولید شده با استفاده از دو نوع قیر WMA-Foam"، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره ۳، ص. ۱-۱۲.

-Abtahi, S. M., Esfandiarpour, S., Kunt, M., Hejazi, S. M. and Ebrahimi, M. G. (2013), "Hybrid reinforcement of asphalt concrete mixtures using glass and polypropylene fibers", Journal of Engineering Fibers and Fabrics, Vol. 8, No. 2, pp. 25-35.

-Aksoy, A., Samlioglu, K., Tayfur, S. and Ozen, H. (2015), "Effect of Various Additives on the Moisture Damage Sensitivity of Asphalt Mixtures". Construction and Building Materials. Vol.19, No.1, pp.11-18.

-Blau, K. and Halket, J. (2010), Handbook of Derivatives for Chromatography. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

-Golchin, B., Hamzah, M.O. and Hasan, M.R.M. (2017), "Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive", Construction and Building Materials, Vol 141, pp. 578-588.

-Hamed, G.H., (2017), "Evaluating the effect of asphalt binder modification using nanomaterials on the moisture damage of hot mix asphalt", Road Materials and Pavement Design, Vol 18, No. 6, pp. 1375-1394.

-Hills, J.F. and Brien, D. (2014), "The Fracture of Bitumens and Asphalt Mixes by Temperature Induced Stresses". Association of Asphalt Paving Technologists, pp. 292 - 309.

بود. علت این امر را می توان به نقش سیمان در سخت کردن مخلوط و نیز افزایش چسبندگی قیر به مصالح مربوطه دانست.

## ۶-مراجع

-آیین نامه روسازی آسفالتی راه های ایران، (۱۳۹۰)، "نشریه شماره ۲۳۴"، تجدید نظر اول. معاونت نظارت راهبردی، وزارت راه و شهرسازی.

-باباگلی، ر. زیاری، ح.، (۱۳۹۵). "بررسی رفتار رئولوژیکی قیر حاوی افزودنی نانوتکنولوژی زایکوترم"، دومین کنفرانس بین المللی یافته های نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت.

-بلورچیان، س.، (۱۳۹۰)، "شیمی ارگانوسیلیکون"، انتشارات علوم پایه فرهنگستان علوم.

-بهبهانی، ح.، ایازی، م.، شجاعی، م.، (۱۳۹۵)، "ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوطهای آسفالتی نیمه گرم"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، دوره ۷، شماره ۳، ص. ۴۰۵-۴۱۸.

-ظاهرخانی، ح. کاظمی ثانی فریمانی، ب.، (۱۳۹۴)، "بررسی آزمایشگاهی اثر استفاده از الیاف کرین و نایلون بر عملکرد بتن آسفالتی"، مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، دوره ۶، شماره ۴، ص. ۵۹۳-۶۱۲.

-عامری، م.، (۱۳۸۹). "ضوابط طرح مخلوط های آسفالتی برای مناطق گرمسیر، سردسیر و شیبهای تند جاده ها"، معاونت تحقیقات، آموزش و فناوری وزارت راه و ترابری و سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور.

-مقدس نژاد، ف. حامدی، غ.، آذرهوش، ع.، (۱۳۹۳)، "تاثیر استفاده از افزودنی های ضد عریان شدگی بر روی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت گرم". ششمین همایش ملی قیر و آسفالت ایران، تهران، وزارت راه و شهرسازی مرکز تحقیقات راه.

- Sun, L., Xin, X. and Ren, J. (2017), "Asphalt modification using nano-materials and polymers composite considering high and low temperature performance". *Construction and Building Materials*, Vol. 133, pp. 358-366.
- WeiGoha, S., MichelleAkinb, ZhanpingYoua and XianmingSh. (2016), "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture". *Construction and Building Materials*. Vol. 25, pp. 195-200.
- Wu, S. P., Yue, H. B., Ye, Q. S. and Pang, L. (2009), "Performance research of hybrid fiber reinforced asphalt concrete" *Journal of materials Science*, Vol. 614, pp. 283-288.
- Yildirim, Y. (2007), "Polymer modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 66-72.
- Zhang, D., Hou, S., Bian, J. and He, L., (2016), "Investigation of the micro-cracking behavior of asphaltmixtures in the indirect tensile test". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 163, pp. 416-425.
- Ziari, H., Babagoli, R., Mirzababaei, P., (2016), "Properties of bituminous mixtures modified with a nano-organosilane additive", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 34, No.4, pp. 386-393.
- Hong-liang, Z., Man-man, S., Shi-feng, Z., Yong-ping, Z. and Zeng-ping, Z. (2016), "High and low temperature properties of nano-particles/polymer modified asphalt". *Construction and Building Materials*. Vol.114, pp.323-332.
- Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. and Huang, J. (2017), "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials". *Construction and Building Materials*. Vol 143, pp. 633-648.
- Mihai O. Marasteanu, Xue Li., Timothy R. Clyne, Vaughan R. Voller, David H. Timm, David E. (2016), "Low temperature cracking of asphalt". Report No, MN/RC – 2004-23, Minnesota.
- Mirzababaei, P. (2016), "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations". *Construction and Building Materials*. Vol. 116, pp. 403-412.
- Shafabakhsh, G.H., Faramarzi, M. and 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*, Vol. 98, pp.456-464.



پژوهشنامه حمل و نقل، شماره ۵۷، زمستان ۱۳۹۷