

## بررسی اثر نانو اکسیدهای آهن و آلومینیوم بر کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی گرم

مسعود رضوان\*، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آیت الله آملی، گروه عمران، آمل،

ایران

امیر ایزدی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شمال، آمل

E-mail: masoud.rezvan66@gmail.com

دریافت: ۹۴/۰۶/۱۰ - پذیرش: ۹۴/۱۰/۰۷

### چکیده

به منظور بهبود خرابی رطوبتی روش‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آنها استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی است. افزودنی‌های مورد استفاده تحت عنوان مواد ضد عریان‌شدگی به قیر، سنگدانه‌ها و یا به مخلوط قیر-سنگدانه‌ها اضافه می‌شوند. در این پژوهش، به معرفی دو نوع نانوماده (اکسید آهن و اکسید آلومینیوم) به عنوان افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی که اصلاح‌کننده قیر هستند، پرداخته شده است. دو نوع سنگدانه مختلف با پتانسیل حساسیت رطوبتی متفاوت (سنگ آهک و گرانیت)، قیر با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ تهیه شده از پالایشگاه اصفهان و دو نوع نانوذره اکسید آهن و اکسید آلومینیوم که هر کدام در دو درصد وزن قیر (۲ و ۴ درصد) مورد استفاده قرار می‌گیرند، از مواد به کار رفته در این پژوهش بودند. به منظور بررسی تأثیر استفاده از نانومواد از روش لاتمن اصلاح‌شده به عنوان متداول‌ترین روش برای تعیین حساسیت رطوبتی نمونه‌های مخلوط آسفالت گرم استفاده شده است. نتایج روش لاتمن اصلاح‌شده نشان می‌دهد که استفاده از مواد نانو باعث افزایش شاخص نسبت کشش غیر مستقیم در نمونه‌های ساخته شده با قیرهای اصلاح شده گشته است. استفاده از نانو اکسید آهن در کاهش پتانسیل خرابی رطوبتی در نمونه‌های مخلوط آسفالتی نسبت به نانو اکسید آلومینیوم مشهودتر بوده است. نتیجه دیگری که از این پژوهش به دست آمده این است که مشابه با پژوهش‌های پیشین، نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های سنگ آهک دارای مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالت گرم، نانو اکسیدها، خرابی رطوبتی، روش لاتمن اصلاح‌شده، سنگدانه‌های سنگ آهک.

### ۱. مقدمه

علاوه بر آنکه خود یک خرابی مهم به حساب می‌آید، می‌تواند سبب رخداد یا تشدید سایر خرابی‌ها مانند ترک‌خوردگی خستگی، شیارشدگی، جداسدن قیر از سنگدانه و چاله در روسازی‌های انعطاف‌پذیر شود (مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۴؛ مارتین و همکاران، ۲۰۰۳).

یکی از خرابی‌هایی که باعث صرف هزینه‌های گزاف در روسازی‌های انعطاف‌پذیر می‌شود، خرابی رطوبتی است (آپیگی و همکاران، ۲۰۱۴). خرابی رطوبتی را از دست دادن خصوصیات مکانیکی مواد در نتیجه وجود آب در مخلوط‌های آسفالتی تعریف می‌کنند. این نوع خرابی

روش دوم، استفاده از پوشش سطح سنگدانه‌ها با استفاده از مواد مناسب می‌باشد که باعث تغییر در خصوصیات سطح سنگدانه‌ها، به‌ویژه سنگدانه‌های اسیدی، می‌شود و سبب می‌گردد تا میل آب‌دوستی این نوع از سنگدانه‌ها کاهش یابد تا در هنگام وارد شدن آب به سیستم قیر-سنگدانه شدت عریان‌شدگی کاهش یابد. از پرکاربردترین این مواد می‌توان به آهک هیدراته یا پلیمرها اشاره نمود (عربانی و حامدی، ۲۰۱۰؛ مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). اگرچه استفاده از مواد ذکر شده باعث کاهش خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود اما استفاده از آنها با یک سری مشکلات اجرایی یا فنی همراه است. با توجه به مشکلات فنی و اجرایی در استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی ذکر شده، در این پژوهش سعی شده تا به بررسی استفاده از نانوذرات به عنوان ماده ضد عریان‌شدگی پرداخته شود. در این پژوهش، از دو ماده نانو اکسید آهن و نانو اکسید آلومینیوم، به علت خصوصیات فلیابی و قیمت کم تولید آنها در مقایسه با سایر نانوذرات، استفاده شده است.

## ۲. هدف پژوهش

عمده‌ترین هدف از پژوهش حاضر، تهیه مخلوط آسفالت مقاوم در برابر خرابی رطوبتی با استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی است. بدین منظور، سعی بر آن شد تا با تغییرات در مواد مخلوط آسفالتی مورد استفاده در کشور آن را به نحوی مطلوب در برابر خرابی رطوبتی مقاوم کرد. با توجه به مطالب ذکر شده در قسمت‌های قبل، مشاهده می‌شود که مؤثرترین روش برای تهیه مخلوط آسفالت گرم مقاوم در برابر خرابی رطوبتی استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی می‌باشد. افزودنی‌های متعددی در فرایند امکان‌یابی مورد توجه و آزمایش‌های ابتدایی قرار داشتند که فاکتورهای کلیدی همچون مقاوم‌سازی مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت (که مهم‌ترین هدف مطالعه موجود است)، عدم نقصان در سایر ویژگی‌های فنی مخلوط حاصل، ملاحظات اجرایی، ملاحظات اقتصادی و ملاحظات زیست‌محیطی

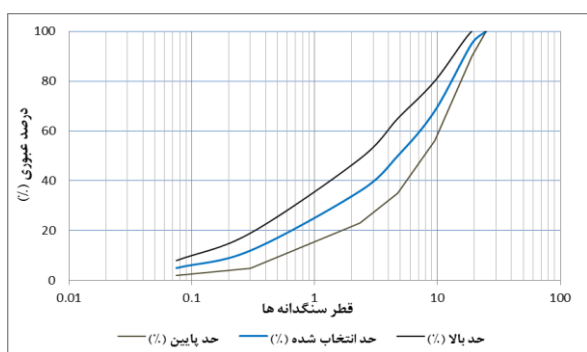
شدت خرابی رطوبتی، که عریان‌شدگی نیز نامیده می‌شود، به فاکتورهای داخلی و خارجی ارتباط دارد. فاکتورهای داخلی به خصوصیات مواد مورد استفاده در مخلوط آسفالتی ارتباط دارند در حالی که فاکتورهای خارجی عبارتند از: شرایط محیطی، روش‌های تولید و اجرا، طراحی روسازی و شدت ترافیک (اپس و همکاران، ۲۰۰۳).

اگرچه خرابی رطوبتی بیش از ۷۰ سال است که مورد توجه محققین قرار گرفته است اما جنبه‌های بسیاری از این نوع خرابی هنوز ناشناخته باقیمانده است (یوسف و همکاران، ۲۰۱۴). دو سؤال مهم که در رابطه با این نوع خرابی وجود دارد، عبارتند از: ۱) روش‌هایی که می‌توان شدت خرابی رطوبتی را کاهش داد و ۲) روش و شرایطی که می‌توان پتانسیل خرابی رطوبتی را به صورت دقیق پیش‌بینی کرد (اپس و همکاران، ۲۰۰۳؛ تارفدر و زمان، ۲۰۱۰).

امروزه، نیاز به استفاده از مواد جدید در ساختار مخلوط‌های آسفالتی برای کاهش خرابی رطوبتی به دلیل گسترش شبکه روسازی، افزایش شدت ترافیک، وجود کامیون‌های بزرگ و سنگین‌تر و در برخی نقاط شرایط محیطی خشن‌تر، بیشتر احساس می‌شود. دو روش اصلی برای بهبود چسبندگی قیر-سنگدانه و به تبع آن کاهش خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد (حامدی و همکاران، ۲۰۱۵؛ مقدس نژاد و همکاران، ۲۰۱۴).

روش اول، استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی مایع اضافه شونده به قیر به منظور بهبود خصوصیات پیوستگی قیر و چسبندگی قیر-سنگدانه می‌باشد. مواد ضد عریان‌شدگی مایع در واقع فعال‌سازهای شیمیایی هستند که با تغییر در ساختار قیر باعث افزایش چسبندگی قیر-سنگدانه و پوشش‌پذیری بهتر قیر روی سطح سنگدانه می‌شوند. اکثر مواد ضد عریان‌شدگی مایع از خانواده آمین‌ها یا آمیدوآمین‌ها می‌باشند (عربانی و حامدی، ۲۰۱۴). دلیل کثرت استفاده از آنها، راحتی استفاده از این مواد در کارخانجات آسفالت می‌باشد.

می‌باشد. بر حسب تعریف، دانه‌بندی مصالح سنگی عبارت است از تعیین درصد وزنی دانه‌های یک اندازه در مخلوط مورد آزمایش. در راستای بهبود خصوصیات عملکردی مخلوط‌های آسفالتی لایه آستر و رویه راه، نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس دانه‌بندی (شماره ۴ نشریه ۱۰۱) و با نسبت‌های وزنی مندرج در شکل ۱ انتخاب شده است. به این منظور، ابتدا سنگدانه‌ها در آون خشک شده و سپس روی الک‌های شرح داده شده در شکل ۱ قرار داده و مجموعه خاک ماسه‌ای و الک‌ها به مدت ۱۰ دقیقه روی یک لرزاننده قرار داده می‌شود.



شکل ۱. دانه‌بندی سنگدانه‌های مورد استفاده در این

پژوهش

#### ۴-۲. قیر مصرفی

قیر مصرفی، قیر ۷۰-۶۰ پالایشگاه اصفهان است که مشخصات آن در جدول ۱ درج گردیده است.

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی در ساخت نمونه‌ها

نتیجه	استاندارد	آزمایش
۶۴	ASTM D5-73	درجه نفوذ (۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه، ۲۵ درجه)، ۰/۱ میلی‌متر
۲۳	ASTM D5-73	درجه نفوذ (۲۰۰ گرم، ۶۰ ثانیه، ۴ درجه)، ۰/۱ میلی‌متر
۰/۳۶	ASTM D5-73	نسبت نفوذ
۱۱۲	ASTM D113-79	چکش خواری
۵۱	ASTM D36-76	نقطه نرمی
۲۶۲	ASTM D92-78	نقطه اشتعال
۰/۷۵	ASTM D1754-78	افت وزنی گرمایی

از مهم‌ترین این موارد بودند. براین اساس، دو نوع نانوماده به نام‌ها نانواکسید آهن و نانو اکسید آلومینیوم در دو درصد وزنی مختلف به عنوان مواد ضد عریان‌شدگی اصلاح‌کننده قیر مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳. بیان پژوهش

در این پژوهش دو نوع سنگدانه مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که برای هر سنگدانه پنج نوع قیر متفاوت (یک نوع قیر خالص و چهار نوع قیر خالص اصلاح شده) وجود دارد. ابتدا به روش طرح اختلاط مارشال، درصد قیر بهینه برای دو ترکیب اصلی (سنگدانه آهکی - قیر خالص و سنگدانه گرانی - قیر خالص) تعیین می‌شود.

سپس در درصد قیر بهینه تعیین شده برای هر نوع سنگدانه، نمونه‌هایی برای تعیین حساسیت رطوبتی ساخته می‌شود. این نمونه‌ها تحت ۱، ۲ و ۳ سیکل یخ-ذوب قرار گرفته و تحت آزمایش AASHTO T283 قرار می‌گیرند تا حساسیت رطوبتی آنها تعیین شود.

### ۴. مصالح مصرفی و آزمایش‌ها

#### ۴-۱. مصالح سنگی و دانه‌بندی آن

دانه‌بندی مصالح سنگی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر استقامت و ظرفیت باربری مخلوط آسفالتی

### ۳-۴. نانو مواد

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 هستند، تقسیم می‌شوند. 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 مونت موریلونیت یا آلومینوسیلیکات لایه‌ای می‌باشد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴).

وقتی اندازه نانوذرات کاهش می‌یابد، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش یافته، اثرات سطحی قوی‌تر شده و خواص کاتالستی افزایش می‌یابد. به همین دلیل، نانوذرات به عنوان کاتالیزور در زمینه‌هایی نظیر باتری‌ها،

پیل‌های سوختی و انواع فرایندهای 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 (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴).

اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات تأثیر زیادی بر کارایی و کاربرد آنها دارد. ایجاد خواص آب‌دوستی و آب‌گریزی جزء روش‌های اصلاح شیمیایی نانوذرات محسوب می‌شوند. برای نمونه، نانوذرات سیلیکاتی برای به دست آوردن خاصیت آب‌گریزی بیشتر باید به صورت شیمیایی اصلاح شوند. مثلاً می‌توان با استفاده از یون‌های آمونیوم یا مولکول‌های بزرگتری نظیر سیلسزکیوکسان‌های الیگومریک چندوجهی، که هم برای روکش‌دهی نانوذرات سیلیکات و هم به عنوان پرکننده مناسب هستند، این اصلاح شیمیایی را انجام داد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۴). 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 ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی دو نوع نانوماده مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی	نانو اکسید آهن	نانو اکسید آلومینیوم
ساختار سازه‌ای	Cubic Crystal	alpha, gamma
جرم مخصوص ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	2.6-2.9	5.9-6.4
شاخص انعکاس	1.5-1.8	3
مساحت سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{gr}$ )	38±2	45±5
میانگین اندازه ذرات (nm)	≈ 40	≈ 24
جرم مخصوص حجمی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	0.38-0.45	0.22-0.40
درجه اسیدیته	8.4-10.6	8.7-9.9
درصد آب	≤0.6	≤0.4

کاسه همزن ریزذرات با ۱۰۰۰۰ دور، ریخته شده است. همزدن را تا جایی ادامه داده که مخلوطی همگن از قیر و نانوذرات ایجاد شد. این دستگاه (شکل ۲) با کنترل

### ۴-۴. اختلاط نانو مواد با قیر

ابتدا قیر را تا دمای ۱۵۰ درجه گرم نموده و در طول نیم ساعت با فواصل زمانی مشخص، نانوذرات به آرامی در

چندین پروژه تحقیقاتی در مورد نقصان‌های این روش ارائه شده و برخی اصلاحات نیز در آن اعمال شده که در حال حاضر این روش آزمایش به عنوان معتبرترین روش آزمایش حساسیت رطوبتی به کار می‌رود (حامدی و همکاران، ۲۰۱۵).

در این آزمایش، 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 حداکثر وزن مخصوص نمونه‌ها مشخص نباشد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲).

قبل از انجام آزمایش اصلی، تعدادی آزمایش برای پیدا کردن تعداد ضربه‌های لازم برای تراکم نمونه‌های اصلی برای رسیدن به درصد حفرات هوای  $7 \pm 1$  مورد نیاز است. درصد حفرات هوا مطابق با استاندارد AASHTO T269 مشخص می‌شود. هنگامی که تعداد ضربات مشخص شده و نمونه‌ها 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 خلأ قرار داده تا به میزان درجه اشباع ۸۰-۵۵ درصد برسند. نمونه‌های اشباع شده به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس و در ادامه به مدت ۲۴ ساعت در حمام آب با دمای ۶۰ درجه سلسیوس نگهداری می‌شوند. بقیه نمونه‌ها در شرایط خشک نگهداری می‌شوند (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲).

همه نمونه‌ها به دمای یکسان آزمایشگاه (۲۵ درجه سلسیوس) آورده شده و آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم روی نمونه‌ها انجام می‌شود. نرخ بارگذاری در این آزمایش ۲ اینچ در دقیقه (در حدود ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه) می‌باشد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). مقدار کشش غیر مستقیم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S = \frac{2P}{\Pi D t} \quad (1)$$

لحظه‌ای تغییرات دما دارای مزایایی به صورت زیر می‌باشد:

الف) دور بالای همزن (بیش از ۲۸۰۰۰ دور و تغییرات خودکار آن در طول زمان اختلاط)

ب) امکان جابجایی عمودی شفت همزن به طور خودکار در طول زمان اختلاط

پ) تنظیم لحظه‌ای و پیرامونی دمای قیر و امکان ثابت نگه داشتن آن در طول زمان اختلاط

ت) تزریق خودکار نانوذرات به قیر به صورت کنترل شده در طول زمان اختلاط



شکل ۲. همزن نانوذرات

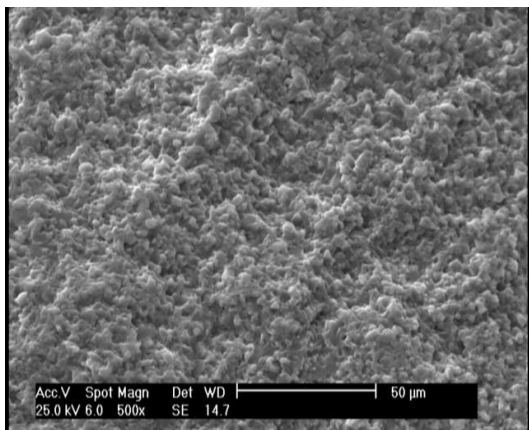
#### ۴-۵. آزمایش حساسیت در برابر خرابی رطوبتی

##### براساس استاندارد AASHTO T283

آزمایش AASHTO T283 تحت عنوان "مقاومت مخلوط‌های قیری متراکم در برابر خرابی رطوبتی"<sup>۱</sup> یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به شمار می‌آید. این آزمایش مشابه آزمایش لاتمن است که برخی تغییرات در آن اعمال شده است و تحت عنوان لاتمن اصلاح‌شده یا AASHTO T283 استاندارد شده است.

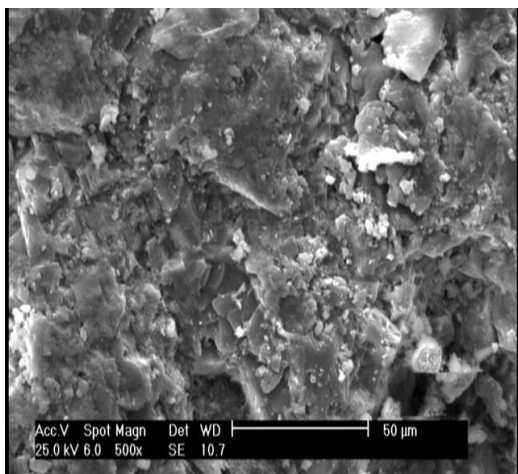
در نهادهای ایالتی راه در آمریکا، گزارش‌های موفقی در ارتباط با عملکرد مناسب این روش آزمایش وجود دارد.

<sup>1</sup> Resistance of compacted bituminous mixture to moisture induced damage



شکل ۳. ساختار سطحی سنگدانه‌های قلیایی (سنگ آهک)

در این پژوهش



شکل ۴. ساختار سطحی سنگدانه‌های اسیدی (گرانیت) در

این پژوهش

که در آن،  $P$  حداکثر مقدار بار عمودی وارده،  $D$  قطر نمونه و  $t$  ضخامت نمونه می‌باشد.

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

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

که در آن،  $S_{cond}$  میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های تحت شرایط مرطوب قرار گرفته و  $S_{uncond}$  میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم نمونه‌های خشک است.

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر بهتر نانومواد، شرایط مرطوب نمونه‌ها با ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب انجام شده است.

## ۵. نتایج

### ۵-۱. نتایج آزمایش طرح اختلاط

به جهت مقایسه علمی و منطقی نتایج به دست آمده از آزمایش روی نمونه‌های آسفالتی کنترل و اصلاح شده، درصد قیر بهینه مربوط به هر نوع اختلاط (شامل دو نوع سنگدانه گرانیت و سنگ آهک) به کمک روش طرح اختلاط مارشال تعیین گردید و سپس نمونه‌های آسفالتی با درصد قیر بهینه در شرایط مختلف ساخته شد. همانگونه که از مندرجات جدول ۳ برداشت می‌شود، نمونه‌های حاوی سنگ آهک دارای مقدار قیر بهینه بیشتری به نسبت نمونه‌های حاوی گرانیت می‌باشند. این امر به دلیل خلل و فرج بیشتر سطوح سنگدانه سنگ آهک و جذب قیر بیشتر این نوع سنگدانه در مقایسه با گرانیت می‌باشد که این موضوع در عکس‌های میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده که در شکل‌های ۳ و ۴ قابل مشاهده است.

در ادامه این قسمت، نتایج آزمایش‌های مارشال برای تعیین میزان قیر بهینه در نمونه‌های کنترل به ازای دو نوع سنگدانه گرانیت و سنگ آهک نشان داده شده است.

جدول ۳. درصد قیر بهینه نمونه‌های مورد استفاده

ردیف	نوع سنگدانه	درصد قیر بهینه
۱	گرانیت	۴/۷
۲	سنگ آهک	۵/۱

### ۵-۲. نتایج آزمایش نسبت کشش غیرمستقیم

#### (AASHTO T283)

در این پژوهش، برای تعیین حساسیت رطوبتی نمونه‌های مخلوط آسفالتی ساخته شده، از این آزمایش استفاده شده است. برای به دست آوردن شاخص نسبت

شده است. از داده‌های ارائه شده در این جداول می‌توان مشاهده نمود که تأثیر استفاده از نانواکسید آهن در افزایش میزان مقاومت کششی غیرمستقیم مشهودتر بوده است.

همانطور که از داده‌های این دو جدول مشخص است نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیته دارای مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری در شرایط خشک می‌باشند. اما در شرایط مرطوب، این روند همیشه به نفع نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیته نمی‌باشد. بر طبق استانداردهای مورد استفاده، عدد مقاومت کششی غیرمستقیم به تنهایی شاخصی برای تعیین حساسیت رطوبتی نمونه‌ها نمی‌باشد. بلکه نسبت کشش غیرمستقیم شاخص تعیین حساسیت رطوبتی نمونه‌های آسفالتی می‌باشد.

مقاومت کششی، ابتدا باید مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها به دست آید. نتایج این آزمایش برای نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیته و سنگ‌آهک به ترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده است.

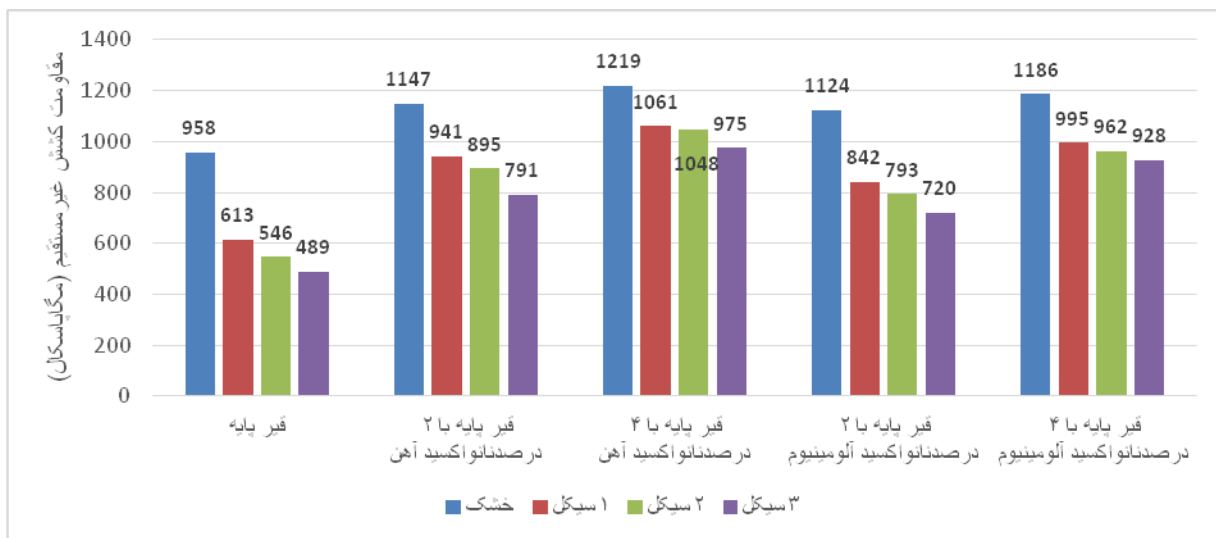
همانطور که از داده‌های ارائه شده در جداول ۴ و ۵ و شکل‌های ۵ و ۶ مشخص است، اضافه کردن نانواکسیدهای آهن و آلومینیوم باعث شده تا مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده نسبت به نمونه‌های ساخته شده با قیر پایه بهبود یابد. این افزایش در مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم را می‌توان به بهبود در میزان چسبندگی نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده نسبت داد. با توجه به اینکه اکسیدهای نوری مورد استفاده خصوصیات قلیایی دارند، استفاده از آنها باعث بهبود در میزان چسبندگی بین قیر و سنگدانه‌ها به‌طور ویژه سنگدانه‌های اسیدی

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیته (مگاپاسکال)

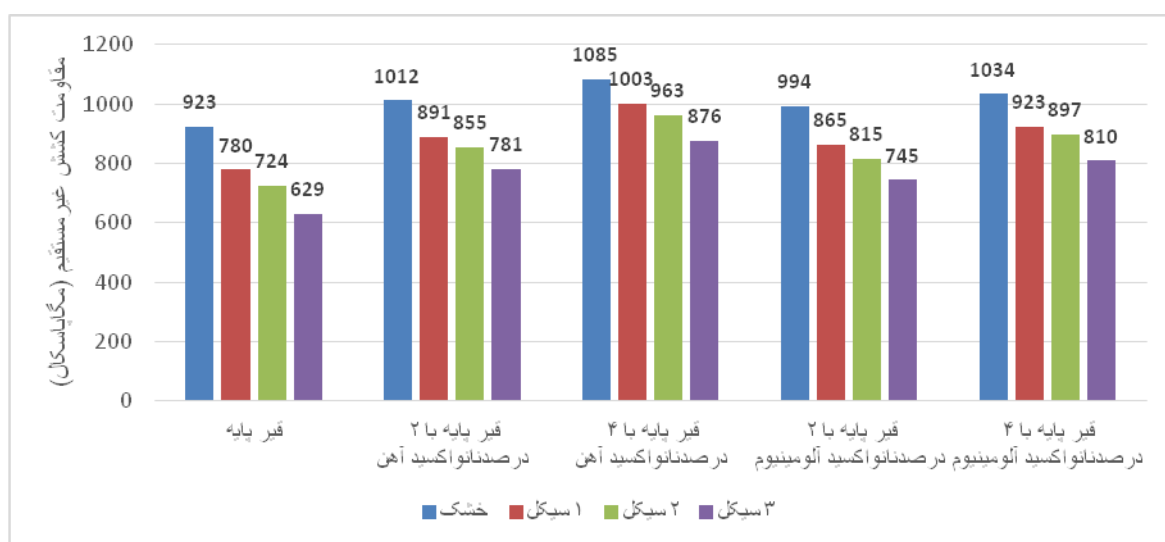
شرایط	قیر پایه	قیر پایه با ۲٪ نانواکسید آهن	قیر پایه با ۴٪ نانواکسید آهن	قیر پایه با ۲٪ نانواکسید آلومینیوم	قیر پایه با ۴٪ نانواکسید آلومینیوم
خشک	۹۵۸	۱۱۴۷	۱۲۱۹	۱۱۲۴	۱۱۸۶
۱ سیکل	۶۱۳	۹۴۱	۱۰۶۱	۸۴۲	۹۹۵
۲ سیکل	۵۴۶	۸۹۵	۱۰۴۸	۷۹۳	۹۶۲
۳ سیکل	۴۸۹	۷۹۱	۹۷۵	۷۲۰	۹۲۸

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم روی نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک (مگاپاسکال)

شرایط	قیر پایه	قیر پایه با ۲٪ نانواکسید آهن	قیر پایه با ۴٪ نانواکسید آهن	قیر پایه با ۲٪ نانواکسید آلومینیوم	قیر پایه با ۴٪ نانواکسید آلومینیوم
خشک	۹۲۳	۱۰۱۲	۱۰۸۵	۹۹۴	۱۰۳۴
۱ سیکل	۷۸۰	۸۹۱	۱۰۰۳	۸۶۵	۹۲۳
۲ سیکل	۷۲۴	۸۵۵	۹۶۳	۸۱۵	۸۹۷
۳ سیکل	۶۲۹	۷۸۱	۸۷۶	۷۴۵	۸۱۰



شکل ۵. مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیت



شکل ۶. مقادیر مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک

نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم را می‌دهد که نشان دهنده این است که این ماده در مقایسه با نانو اکسید آلومینیوم در کاهش خرابی رطوبتی مؤثرتر بوده است. همچنین قابل مشاهده است که هنگامی که درصد ماده افزودنی نانو افزایش یابد باعث بهبود در مقاومت در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم می‌شود. اما با توجه به هزینه بالای استفاده از نانو مواد در حال حاضر، شاید استفاده از ۲٪ از نظر اقتصادی مناسب‌تر باشد.

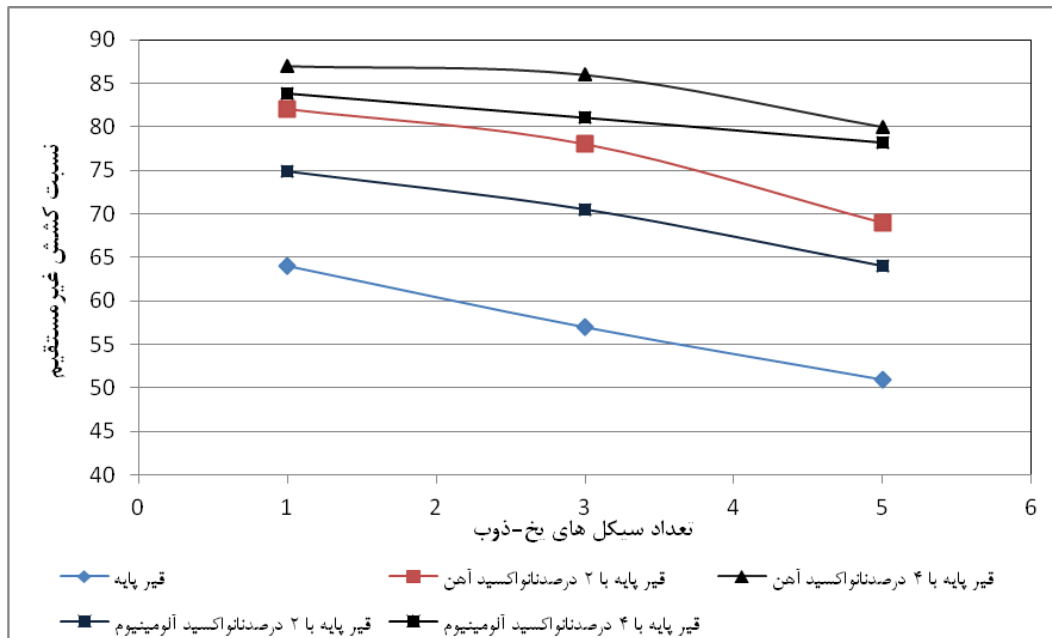
از داده‌های شکل ۸ می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های ساخته شده با فیر پایه نیز دارای مقاومت بالایی در برابر خرابی رطوبتی می‌باشند. این رخداد به علت

با استفاده از داده‌های جداول ۴ و ۵ و به کمک رابطه (۲)، مقادیر نسبت کششی غیرمستقیم در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. این نسبت در اکثر نهادهای متولی راه و ترابری به عنوان شاخصی برای تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از داده‌های ارائه شده در شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که اضافه کردن دو نوع نانو اکسید مورد استفاده در این پژوهش باعث بهبود چشمگیر در شاخص نسبت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیتی شده است. همانطور که در این شکل می‌توان مشاهده نمود، استفاده از ۴٪ نانو اکسید آهن بیشترین مقدار

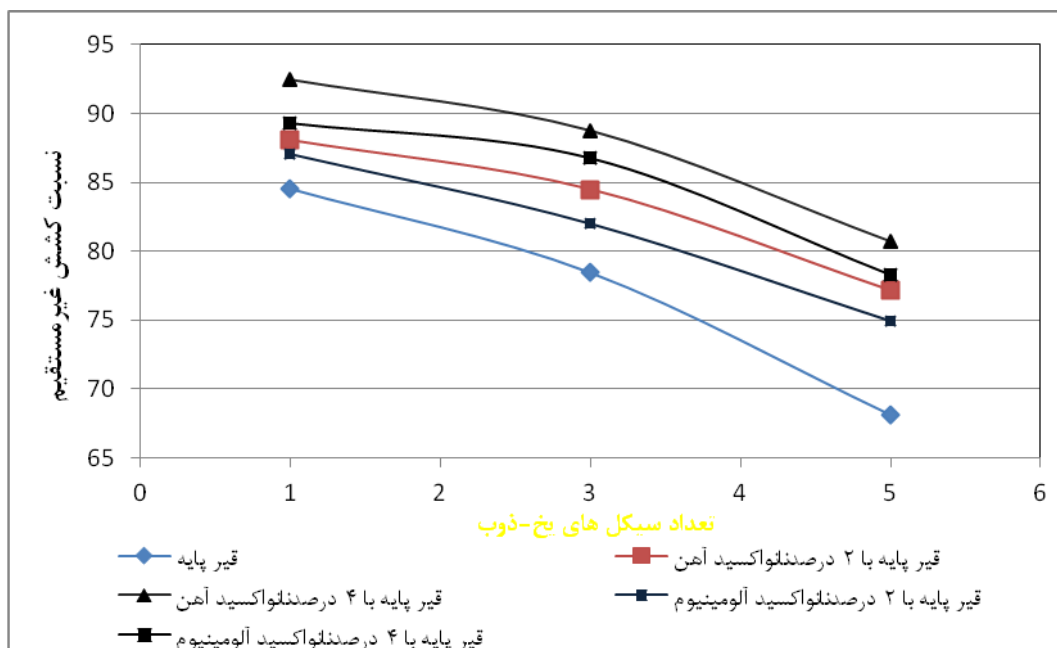


مقاومت کششی غیرمستقیم بیشتری در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با قیر پایه باشند. استفاده از نانوماده اکسید آهن نسبت به نانواکسید آلومینیوم عملکرد بهتری در کاهش حساسیت رطوبتی نمونه‌ها ساخته شده با سنگ آهک داشته است.

خصوصیات آب‌گریزی سنگدانه‌های سنگ آهک مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد. همچنین، مانند نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیتی، مشاهده می‌شود که استفاده از افزودنی‌های نانو باعث شده که نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده دارای نسبت



شکل ۷. مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیت.



شکل ۸. مقادیر نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه سنگ آهک

خوبی توانسته‌اند مقاومت مخلوط‌های آسفالتی را در برابر خرابی رطوبتی بهبود بخشند. این بهبود مقاومت

قابل ذکر است که هر دو افزودنی مورد استفاده در این پژوهش (نانواکسید آهن و نانواکسید آلومینیوم) به

۱. استفاده از نانومواد باعث شده تا مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در شرایط خشک (بدون سیکل یخ-ذوب) افزایش یابد. این رخداد را می‌توان ناشی از بهبود چسبندگی بین قیر-سنگدانه نسبت داد.

۲. استفاده از نانواکسید آهن باعث بهبود قابل توجه در نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه گرانیته شده است.

۳. افزایش در مقاومت در برابر خرابی رطوبتی در نمونه‌های ساخته شده قیر اصلاح شده با نانوماده اکسید آهن در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با قیر اصلاح شده با نانوماده اکسید آلومینیوم مشهودتر است.

۴. هر چه درصد ماده نانو (از ۲ به ۴ درصد) افزایش یابد، باعث بهبود در مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی می‌شود.

در برابر خرابی رطوبتی در نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیته مشهودتر بوده است.

## ۶. نتیجه‌گیری

خرابی رطوبتی یا عریان‌شدگی یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی می‌باشد. برای بهبود این نوع خرابی روش‌های متفاوتی وجود دارد که مهم‌ترین این روش‌ها استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی می‌باشد. در این پژوهش، سعی شده تا به معرفی نوع جدیدی از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی پرداخته شود. بدین منظور دو نوع نانواکسید فلزی به نام‌های نانواکسید آهن و نانواکسید آلومینیوم در دو درصد مختلف به عنوان اصلاح کننده قیر مورد استفاده قرار گرفته است. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

## ۷. مراجع

- Apeageyi, A. K., Grenfell, J. R. A. and Airey, G. D. 2014. "Observation of reversible moisture damage in asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 60: 73-80.
- Arabani, M. and Hamed, G. 2010. "Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt". *J. Mater. Civil Eng.*, 23(6): 802-811.
- Arabani, M. and Hamed, G. H. 2014. "Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistripping additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt". *Int. J. Pavement Eng.*, 15(1): 66-78.
- Epps, J., Berger, E. and Anagnos, J. 2003. "Treatments in Moisture Sensitivity of Asphalt". *Proc. of A National Seminar, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements*, Feb. 4-6, San Diego, California.
- Hamed, G. H., Moghadas Nejad, F. and Oveisi, K. 2015. "Investigating the effects of using nanomaterials on moisture damage of HMA". *Road Mater. Pavement Design*, 16(3): 536-552.
- Martin, J., Cooley, Jr., L. A. and Hainin, H. R. 2003. "Production and construction issues for moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements". *Proc. of A National Seminar, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements*, Feb. 4-6, San Diego, California.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, Gh. H. Hamed and M. J. Azarhoosh. 2012. "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.*, 31: 384-388.
- Moghadas Nejad, F., Hamed, G. H. and Azarhoosh, A. 2013. "The use of surface free energy method to evaluate the mechanism of the effect of hydrate lime on moisture damage of hot mix asphalt". *J. Mater. Civil Eng.*, 25(8): 1119-1126.
- Moghadas Nejad, F., Tanzadeh, R., Tanzadeh, J. and Gholami, M. 2014a. "Investigating the effect of nanoparticles on the rutting behaviour of hot-mix asphalt". *Intl. J. Pavement Eng.* 17(4): 353-362.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Gh. H. Hamed and Roshani, H. 2014b. "Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements". *Road Mater. Pavement Design*, 15(1): 207-219.
- Tarefder, R. A. and Zaman, A. M. 2010. "Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts". *J. Mater. Civil Eng.*, 22(7): 714-725.
- Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N. M., Hamim, and Ahmad, J. 2014. "The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 72: 139-147.