

## بررسی و ارزیابی تأثیر افزودنی نانو کربنات کلسیم بر خصوصیات مکانیکی قیر و مخلوط آسفالتی

مقاله علمی - پژوهشی

محسن عموزاده عمرانی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m\_amouzadeh@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۴۸۸-۴۶۷

### چکیده

هدف از تحقیق حاضر بررسی و ارزیابی تأثیرات نانو کربنات کلسیم بر خصوصیات مکانیکی قیر و مخلوط آسفالتی می‌باشد. برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل استفاده از دو درصد افزودنی نانو کربنات کلسیم (۳٪، ۵٪ وزنی قیر) برای اصلاح قیر خالص می‌باشد. آزمایش‌های مختلفی از جمله: درجه نفوذ، نقطه نرمی، کشش پذیری،  $MSCR$ ،  $LAS$ ، مقاومت کششی غیرمستقیم، مدول برجهنگی و خستگی و خزش دینامیکی انجام شد. آزمایش خستگی براساس تست تیر خمشی چهار نقطه‌ای با سطح کرنش ثابت در سه سطح ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو کرنش با بارگذاری سینوسی انجام شد. عمر خستگی نمونه‌ها براساس کاهش پنجاه درصدی در مدول سختی اولیه ارزیابی شد. نتایج نشان داد افزودن نانو کربنات کلسیم سبب افزایش نقطه نرمی و کاهش درجه نفوذ و خاصیت انکمی گردیده. همچنین نتایج شیارشدگی قیر نشان داد افزودن نانو کربنات کلسیم سبب افزایش عمر خستگی نمونه‌ها گردیده است. با توجه به نتایج، عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر اصلاح شده با نانو کربنات کلسیم بیشتر از مخلوط‌های آسفالتی معمولی می‌باشد. همچنین، بتنویت منجر به افزایش نسبی مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول سختی مخلوط‌های آسفالتی گردید.

واژه‌های کلیدی: نانو کربنات کلسیم، عمر خستگی، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای، نانو مواد، خزش دینامیکی

### ۱-مقدمه

استفاده قرار گرفتند. در میان همه این اصلاح‌کننده‌ها، استفاده از نانومواد در چند سال اخیر به دلیل جنبه‌های مفید آن در کاهش تغییر شکل‌های دائمی، خستگی و ترک خوردگی شیارشدگی، آسیب‌های رطوبتی، تنش‌های ناشی از دما و غیره توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این مطالعه، تلاشی برای بررسی دقیق کاربرد نانومواد مختلف در قیر انجام شده است (Saltan et al, 2019; Shah et al, 2020; Saboo et al. 2021; Wang et al, 2020). توسعه نانومواد به دلیل کاربرد قابل انعطاف آنها در تقریباً تمام بخش‌های مهندسی، برای بشر یک موهبت است. اخیراً، محققان در تلاش هستند تا نانو مواد مختلف

مشکلات روسازی به دلیل بارهای سنگین ترافیکی، تغییرات دما، مواد با کیفیت پایین، اختلالات آب و هوایی، کیفیت پایین چسب و غیره، به نگرانی‌های جدی برای شکست هر روسازی قبل از دوره طراحی تبدیل شده است. بنابراین، محققان اکنون بر روی قیرهای اصلاح‌شده برای بهبود تغییر شکل‌های روسازی مانند ترک‌خوردگی ناشی از خستگی، شیار شدگی در دمای بالا و غیره تمرکز می‌کنند. در طی چندین سال گذشته، انواع اصلاح‌کننده‌ها مانند معرف‌های پلیمری، تراشه‌های طبیعی/سنتتیک، لاستیک طبیعی/خرده‌دار، پلاستیک‌های ضایعاتی، نانومواد و غیره مورد

زیاری و همکاران (Ziari et al, 2014) با استفاده از نانولوله کربنی (CNT<sup>v</sup>) به عنوان تعدیل کننده عملکرد بایندر آسفالت ارزیابی کردند. استفاده از این افزودنی هم ویژگی کلاسیک (نقطه نرم شدن، درجه نفوذ و غیره) و هم عملکرد (مدول پیچیده، زاویه فاز، پارامتر خستگی، ضریب شیار) بایندر آسفالت را در مقایسه با آسفالت استاندارد بهبود بخشیده است. هدف از این تحقیق، مطالعه خصوصیات و رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با قیر اصلاح شده بتونیتی از طریق آزمایش‌های مختلف می‌باشد. آزمایشات مختلفی برای ارزیابی خصوصیات مهندسی مخلوط آسفالتی از جمله: مدول برجهندگی، مقاومت کششی غیر مستقیم و عمر خستگی با استفاده از آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای انجام شد. سرانجام، براساس نتایج آزمایشگاهی و با استفاده از رگرسیون خطی لگاریتمی نتایج، مدلی جهت توصیف رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی شامل قیر اصلاح شده بتونیتی با رویکرد پدیده شناختی تجربی پیشنهاد گردید.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- مصالح سنگی و قیر

قیر مورد استفاده در برنامه آزمایشگاهی، قیر با درجه ۷۰-۶۰ بود. آزمایش‌های رایج قیر شامل آزمایش‌های تعیین درجه نفوذ، تعیین وزن مخصوص، تعیین نقطه نرمی، تعیین مقدار کشش قیر، تعیین میزان حلالیت قیر، تعیین درجه اشتعال قیر، تعیین گرانیوی کینماتیک قیر، تعیین افت وزنی در اون لایه نازک قیر بر روی قیر پایه مورد استفاده انجام پذیرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. مصالح سنگی مورد استفاده در برنامه آزمایشگاهی، از نوع مصالح سیلیسی در اندازه‌های فیلر، ماسه ۰-۶ میلی‌متر، شن ۶-۱۲ میلی‌متر، شن ۱۹-۱۲ میلی‌متر نمونه‌گیری گردید.

آزمایش‌های تعیین حدود ات‌برگ، تعیین ارزش ماسه‌ای، تعیین شاخص تطویل و تورق، تعیین درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس، تعیین افت وزنی در مقابل سولفات سدیم و تعیین درصد شکستگی در یک وجه و دو وجه، بر روی مصالح سنگی انجام پذیرفت که نتایج آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. دانه بندی مصالح سنگی با اندازه‌های مختلف بر اساس استاندارد AASHTO-T27 و همچنین با روش شستشو (تر) برای مصالح سنگی ریز دانه تعیین گردید. نتایج حاصل از دانه بندی مصالح سنگی در جدول ۳ و شکل‌های ۱ الی ۴ ارائه شده است.

را در مخلوط آسفالت مشارکت دهند تا عملکرد کلی آن را بهبود بخشند. طبق مطالعات قبلی، نانومواد در مقایسه با مواد استاندارد تأثیر عمده‌ای در افزایش عملکرد در مهندسی روسازی داشتند. روسازی آسفالتی اصلاح شده با نانومواد مقاومت بالاتری برای پیرشدگی کوتاه مدت و بلند مدت نشان داد. در برخی از مطالعات، افزودن نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو سیلیس در قیر باعث بهبود چقرمگی و ویسکوزیته شد. مخلوط آسفالت مخلوط گرم اصلاح شده نانو نیز می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر آسیب رطوبت ایجاد کند. برخی از محققین اشاره کردند که هزینه اصلاح آسفالت با نانومواد گاهی کمتر از اصلاح پلیمری است. قیرهای اصلاح شده نانو ماهیت ویسکوزیته بالایی دارند و قابلیت چسبندگی بالایی دارند و عملکرد روسازی را بهبود می‌بخشند با توجه به چنین مزیت‌هایی، این نانومواد علاقه بسیاری از محققین و دانشمندان را برای کار با این نانو قیرهای اصلاح شده به خود جلب کرده است و در حال حاضر نیز کارهای تحقیقاتی متعددی در این زمینه در حال انجام است (Kim et al, 2009; Ye et al, 2009; Ziari et al, 2019; Bhat. Et al. 2019). نانو اصلاح‌کننده‌های مختلف برای بهبود خواص مکانیکی قیر برای سال‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مطالعه ای که توسط یوسف و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد، ویژگی‌های عملکردی مخلوط آسفالت اصلاح شده پلیمری (PMA<sup>v</sup>) با افزودن ذرات نانو سیلیس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نانو سیلیس حساسیت به رطوبت را کاهش می‌دهد و استحکام مخلوط‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده شده است که خستگی و مقاومت شیارشدگی برای PMA<sup>v</sup> مخلوط با ذرات نانو سیلیس افزایش یافته است. همچنین، به نظر می‌رسد افزودن ۴ درصد نانو سیلیس با PMA<sup>v</sup> بیشترین پتانسیل را برای اصلاح مفید بایندر دارد. در مطالعات دیگری توسط آذرهوش و همکاران (۲۰۱۸، ۲۰۱۶) اثر نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو اکسید روی بر روی رفتار خستگی HMA<sup>v</sup> مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عمر خستگی مخلوط‌های حاوی نانومواد بیشتر از مخلوط‌های شاهد بود. این امر به این واقعیت نسبت داده می‌شود که افزودن نانو مواد منجر به بهبود انسجام و انرژی چسبندگی و مقاومت بالاتر در برابر ترک خوردگی ناشی از خستگی در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. همچنین حامدی و همکاران. (Hamedi et al, 2015) اثر NCC<sup>v</sup> را به عنوان یک عامل ضد عریان شدگی بر روی آسیب رطوبت HMA<sup>v</sup> با استفاده از انرژی آزاد سطحی (SFE<sup>v</sup>) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که حساسیت به رطوبت برای مخلوط‌های شاهد بیشتر از مخلوط‌های حاوی NCC بود. علاوه بر این،

جدول ۱. مشخصات قیر مورد استفاده

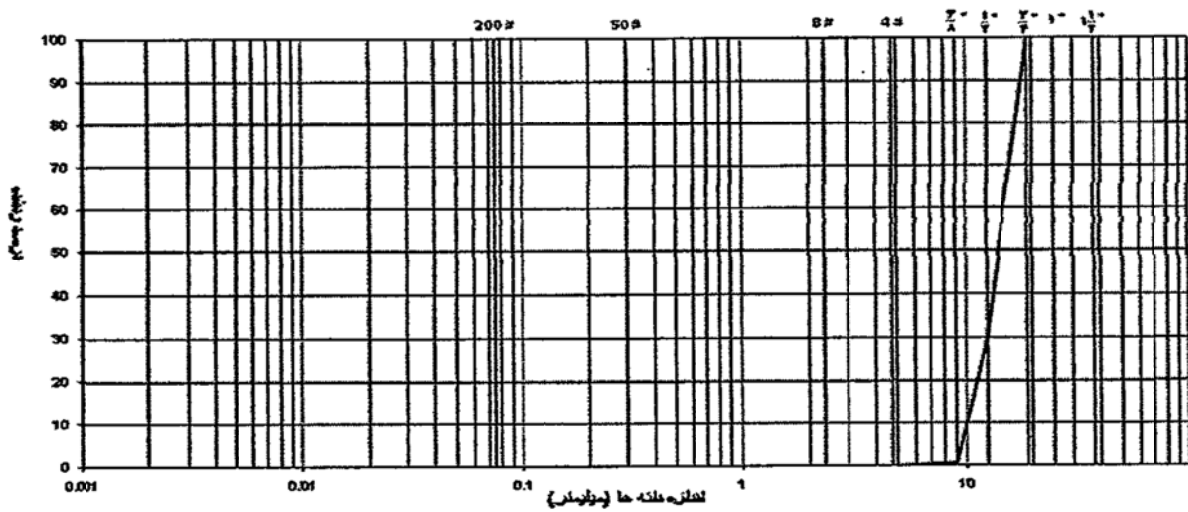
مشخصات استاندارد		نتایج	روش آزمایش		آزمایشات قیرهای خالص
حداکثر	حداقل		AASHTO	ASTM	
-	-	۱/۰۱۴	T228	D70	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد
۷۰	۶۰	۶۳	T49	D5	درجه نفوذ در ۲۵ °C (۱۰۰گرم-۵ثانیه) بر حسب ۰/۱ میلی متر
۵۶	۴۹	۵۱	T53	D36	نقطه نرمی (ساچمه-حلقه) بر حسب درجه سانتی گراد
-	۱۰۰	>۱۰۰	T51	D113	مقدار کشش در ۲۵ درجه سانتی گراد بر حسب سانتی متر
-	۹۹	۹۹/۹	T44	D2042	حلالیت در تری کلرو اتیلن بر حسب درصد
-	۲۳۲	۲۹۲	T48	D92	درجه اشتعال (روباز-کیلوئند) بر حسب درجه سانتی گراد
-	-	۹۸۵	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۲۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
-	-	۴۹۸	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۳۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
-	-	۱۳۶	T201	D2170	کندروانی کینماتیک در ۱۶۰ درجه سانتی گراد (سانتی استوکس)
۰/۸	-	*	T179	D1754	لعب نازک قیر (۱۶۳ درجه سانتی گراد - پنج ساعت)
-	-	۴۴	-	-	درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی بر حسب ۰/۱ میلی متر
-	۵۴	۶۹/۸	-	-	نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش افت حرارتی به درجه نفوذ اولیه
-	۵۰	>۵۰	-	-	مقدار کشش قیر بعد از آزمایش افت حرارتی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد بر حسب سانتی متر
					حساسیت حرارتی قیر
		- ۰/۵			PI- (بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و نقطه نرمی قیر)
		-۰/۴			PVN(۲۵-۱۳۵)- (بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و غلظت بر حسب سانتی استوکس در ۱۳۵ درجه سانتی گراد)
		-			PVN(۲۵-۶۰)- (بر حسب درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد و غلظت بر حسب پوز در ۶۰ درجه سانتی گراد)

جدول ۲. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

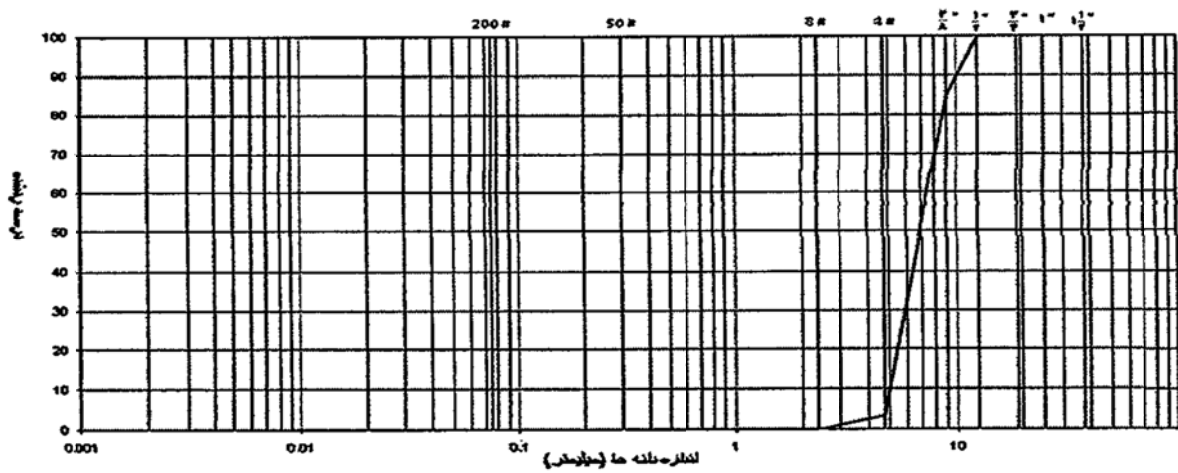
مشخصه	مخلوط درشت دانه	ماسه ۰-۶ میلی‌متر	فیلر مصالح
(AASHTO- T176) ارزش ماسه ای			
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس	نوع دانه بندی	B	—
	تعداد دور	۵۰۰	—
	درصد سایش	۱۱	—
حدود اتربرگ (AASHTO-T89, 90)	(PI) دامنه خمیری	—	N.P
	(PL) حد خمیری	—	—
	(LL) حد روانی	—	غیر قابل تعریف
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴ (ASTM-D5821)	در یک جبهه	۱۰۰	—
	در دو جبهه	۱۰۰	—
درصد تطویل و تورق (BS-812)	تطویل	۱۷	—
	تورق	۱۵	—
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (AASHTO-T104)			
درصد اندود قیر به مصالح سنگی (AASHTO-T182)			
	بیش از ۹۵	—	—

جدول ۳. نتایج دانه بندی مصالح

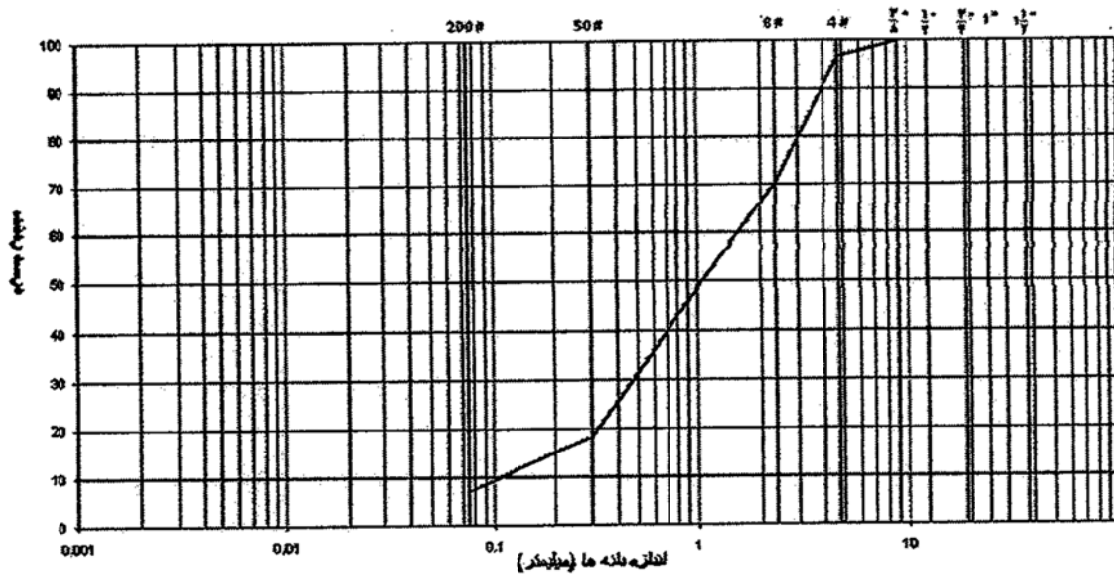
اندازه الک	شن ۱۲-۱۹	شن ۶-۱۲	ماسه ۰-۶	فیلر
۳۷/۵ میلی متر (۱/۵)	—	—	—	—
۲۵ میلی متر (۱ اینچ)	—	—	—	—
۱۹ میلی متر	۱۰۰	—	—	—
۱۲/۵ میلی متر	۴۱/۵	۱۰۰	—	—
۹/۵ میلی متر	۴/۷	۷۵/۱	۱۰۰	—
۴/۷۵ میلی متر (شماره ۴)	۰	۱/۸	۹۴/۳	—
۲/۳۶ میلی متر (شماره ۸)	—	۰	۵۷/۴	۱۰۰
۰/۳ میلی متر (شماره ۵۰)	—	—	۵/۱	۷۸/۸
۰/۰۷۵ میلی متر (شماره ۲۰۰)	—	—	۲/۲	۴۰/۶



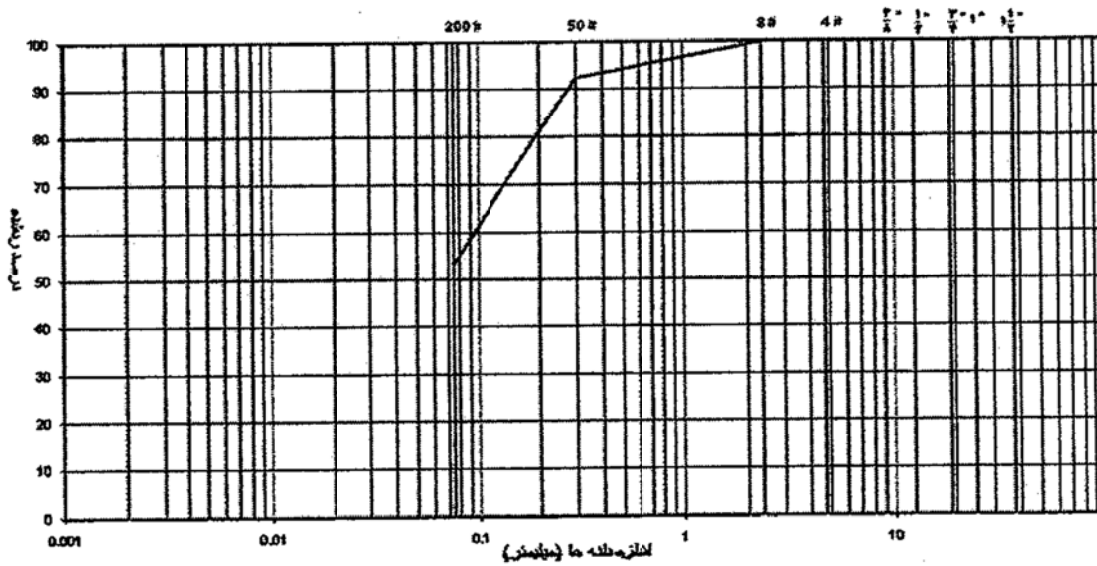
شکل ۱. نمودار دانه بندی شن مورد استفاده ۱۲-۱۹ میلی متر



شکل ۲. نمودار دانه بندی شن مورد استفاده ۶-۱۲ میلی متر



شکل ۳. نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده ۶-۰ میلی متر



شکل ۴. نمودار دانه بندی فیلر مورد استفاده

## ۲-۲- افزودنی

مطالعه و مقایسه شده است. جدول ۴ مشخصات نانو مواد را نشان می‌دهد.

در این پژوهش از نانو ذرات کربنات کلسیم وارداتی استفاده شده است و اثرات آن بر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی قیر

جدول ۴. مشخصات نانو مواد

خلوص	۹۸٪
APS	۲۰-۵۰nm
چگالی ظاهری	۰/۶۸ گرم بر سانتی متر
ظاهر و شکل	پودر سفید

### ۲-۳- روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

قیر بهینه و برای نمونه های آسفالت گرم با مقدار مشخص افزودنی به همراه قیر مخلوط گردیده‌اند. قالب تراکم نیز به همراه مخلوط در این دما داخل اون گرم شد. سپس مخلوط به داخل قالب ریخته و تراکم بر روی نمونه‌ها با دستگاه مورد نظر انجام گرفت. متوسط زمان تراکم برای نمونه‌ها حدود ۱۵ دقیقه می‌باشد. بعد از مدت زمان برای خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌ها از داخل قالب‌ها جدا گردید. در این تحقیق، برای ارزیابی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش تحت کرنش ثابت انجام شد. تمامی نمونه‌ها با ۴ درصد فضای خالی در درصد قیر بهینه ساخته شد. برای جلوگیری از ایجاد درصد فضای زیاد در سطح نمونه، ۱۰ میلی‌متر از تمامی وجوه نمونه بریده شد. سپس نمونه‌ها برای رسیدن به ابعاد مورد نیاز برای آزمایش خستگی با استفاده از برش آب خنک مطابق ابعاد استاندارد AASHTO-T321 (۵۰x۶۳,۵x۳۸۰ میلی‌متر) برش داده می‌شوند.

اختلاط قیر و نانو ذره با استفاده از یک مخلوط کن (هموژنایزر) با سرعت برش بالا به صورت دیجیتال با کنترل کننده و نشان دهنده سرعت میکس در هر لحظه انجام پذیرفت. در این پژوهش ابتدا قیر را تا دمای ۱۸۰ درجه سانتیگراد گرم کرده و آن را به داخل مخلوط کن ریخته سپس نانو ذره را با درصدهای ۳ و ۵ به قیر اضافه کرده و عمل اختلاط قیر با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۱۷۵ درجه سانتیگراد انجام گردید. برای تراکم نمونه های تیر خستگی در این تحقیق از دستگاه ساخته شده در مرکز تحقیقات قیر و مخلوط های آسفالتی دانشگاه علم و صنعت ایران استفاده گردید. این دستگاه بر اساس استاندارد تراکم مالشی خطی دپارتمان کلورادو ساخته شده است. برای ساخت هر دال از ۹ عدد مصالح سنگی ۱۲۰۰ گرمی مورد نیاز برای ساخت نمونه مارشال، استفاده شده است. ابتدا هر کدام از این نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی با مقدار

### ۳- روش کار آزمایش

#### ۳-۱- آزمایشات رئولوژیکی و فیزیکی قیر

است که مخلوط‌های سخت تر در دماهای پایین تر بیشتر مستعد ترک خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهنگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهنگی براساس

برای ارزیابی رفتار رئولوژیکی قیرها، آزمون DSR<sup>۱</sup> انجام شد. رفتار خستگی و شیارشدگی قیرها با استفاده از آزمون رئومتر برشی دینامیکی که در فرکانس ۱۰ رادیان بر ثانیه (۱/۵۹ هرتز) به ترتیب در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد و ۶۴ درجه سانتی گراد اجرا شد و مورد ارزیابی قرار گرفت.

#### ۳-۲- مدول برجهنگی

آزمایش مدول برجهنگی در دماهای پایین بنحوی مرتبط با ترک خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده

معادله ۱ محاسبه می‌گردد.

$$M_r = \frac{p(\rho + 0.2734)}{\delta t} \quad (1)$$

$M_R$  = مدول برجهندگی (مگا پاسکال)

$P$  = بار تکراری (نیوتن)

$V$  = نسبت پواسن

$t$  = ضخامت نمونه (میلی متر)

$H$  = تغییر شکل افقی برگشت پذیر (میلی متر)

$V$  = تغییر شکل قائم برگشت پذیر (میلی متر)

### ۳-۳- آزمایش تیر خمشی چهار نقطه ای خستگی

بر اساس آیین نامه AASHTO-T321 استفاده شد. تمامی نمونه‌ها در سطح کرنش ثابت ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو استرین با بارگذاری سینوسی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش در دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد انجام شد. نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت قبل از آزمایش در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا به دمای مذکور برسند. فرکانس بارگذاری ۱۰ هرتز می‌باشد. مدول سختی براساس نیرو و جابه جایی اندازه‌گیری شده بعد از ۵۰ سیکل براساس معادلات زیر محاسبه شد:

مقاومت خستگی تیرها براساس آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای براساس آیین نامه AASHTO T321-07 ارزیابی شد. هدف از این آزمایش تعیین عمر خستگی تیرها در سطوح کرنش مختلف می‌باشد. آزمایش خستگی می‌تواند هم در شرایط تنش ثابت و کرنش ثابت انجام شود. در حالت تنش ثابت، شکست نمونه بلافاصله بعد از شروع ترک تعریف می‌شود. در حالت کرنش ثابت، شکست نمونه زمانی که مدول سختی آن به نصف مدول اولیه آن می‌رسد، تعریف می‌گردد. این معیار

$$\varepsilon = \frac{12\delta h \times 10^6}{3(G_0^2 - 4G_1^2)} \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{G_0 P}{Bh^2} \quad (3)$$

$$S = \frac{1000\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

که  $\varepsilon$  حداکثر کرنش اعمال شده بر تیر،  $\delta$  تغییر شکل ماکزیمم در وسط تیر (میلی متر)،  $G_0$  طول خارجی گیج (۳۵۵/۵ میلی متر)،  $G_1$  طول داخلی گیج (۱۱۸/۵ میلی متر)،  $\sigma$  حداکثر تنش کششی (کیلو پاسکال)،  $P$  حداکثر نیرو (کیلو نیوتن)،  $B$  میانگین عرض تیر (میلی متر)،  $S$  مدول سختی تیر (مگا پاسکال).

آزمایش خستگی تا زمانی که مدول سختی به نصف مقدار اولیه خود برسد، ادامه می‌یابد. بعد از آزمایش عمر خستگی تیرها، عمر خستگی مخلوط با معادله زیر محاسبه گردید.

$$N_f = a\varepsilon^{-b} \quad (5)$$



که  $N_f$  تعداد سیکل بارگذاری تا خستگی،  $\epsilon$  دامنه کرنش مورد استفاده در آزمایش خستگی،  $a$  و  $b$  ضرایب ثابت می‌باشند.

انرژی تلف شده در هر سیکل بارگذاری و انرژی تلف شده تجمعی به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند.

$$D = \pi \sigma \epsilon \sin(360f \varphi) \quad (6)$$

که  $D$  انرژی تلف شده ( $J/m^3$ )،  $f$  فرکانس بارگذاری (هرتز)،  $\varphi$  تأخیر زمانی (ثانیه) می‌باشد.

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} D_i \quad (7)$$

که  $W$  انرژی شکست تجمعی ( $J/m^3$ )،  $D_i$  انرژی شکست سیکل  $i$  ام.

### ۳-۴- خزش دینامیکی

یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه، توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود. نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد یعنی هر قدر عدد روانی بزرگ‌تر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییر شکل‌های دائم بیشتر است.

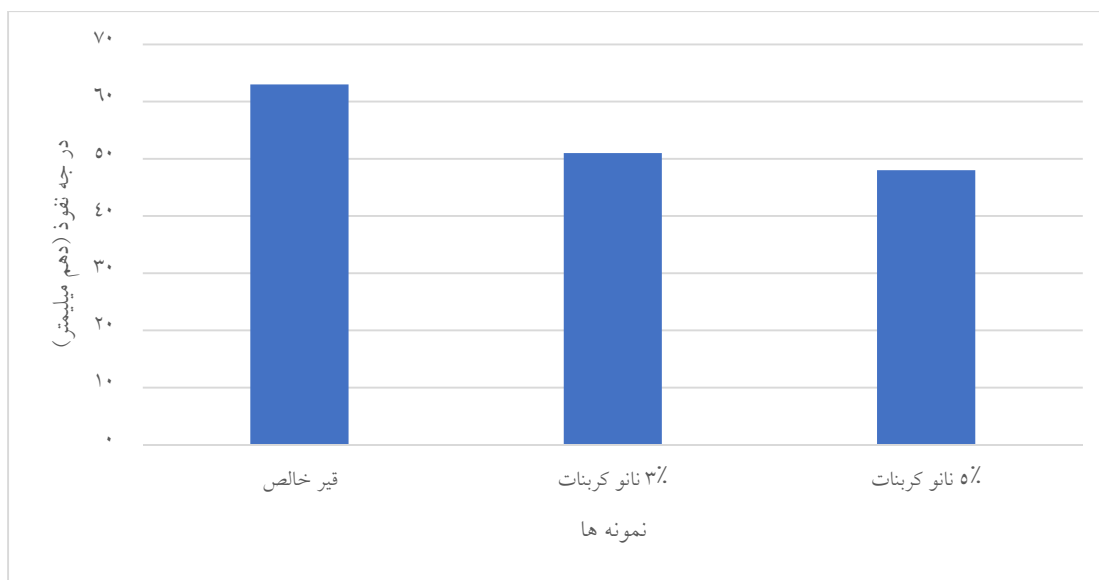
جهت بررسی شیار شدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیکی استفاده شد. آزمایش خزش دینامیکی یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM- 5P<sup>۹</sup> در دمای ثابت ۵۰ درجه سانتی‌گراد و تحت تنش ثابت ۴۵۰ کیلو پاسکال که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش

### ۴- نتایج

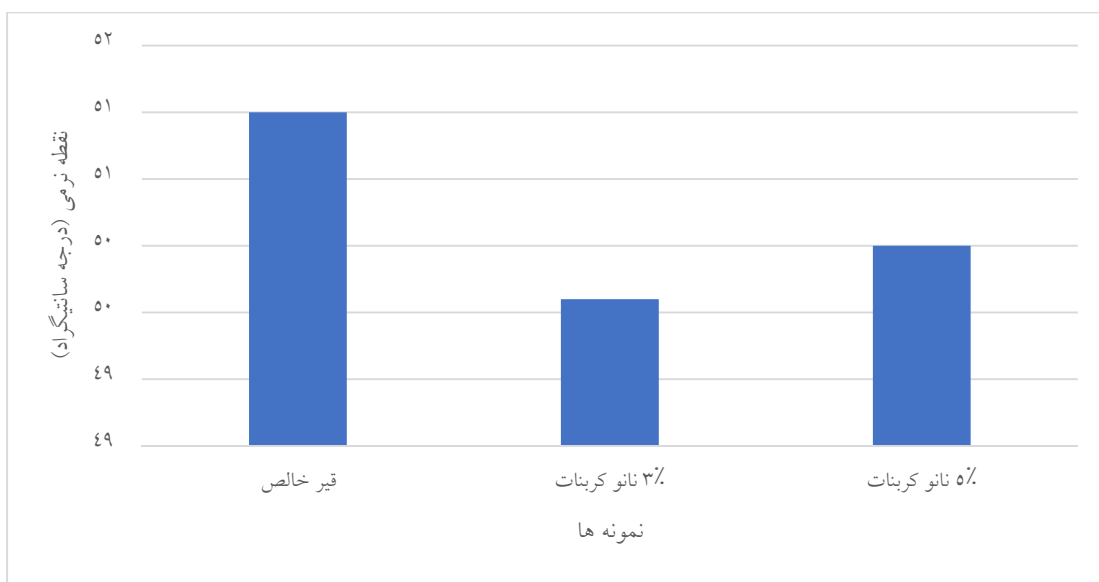
#### ۴-۱- نتایج آزمایشات قیر

روانی آن تغییر می‌کند. یکی از اهداف این آزمایش محاسبه مقدار مقاومت قیر خالص و مصالح ساخته شده با آن قیر نسبت به تغییرات درجه حرارت می‌باشد. نتایج بدست آمده از آزمون نقطه نرمی قیرهای استاندارد و اصلاح شده در شکل ۷ نشان دهنده کاهش آن برای تمامی نمونه‌ها می‌باشد و این کاهش بسیار ناچیز است. اما در حالت کلی این امر نشان دهنده آن است که آمیزه‌های قیری نسبت به قیر پایه در مقابل تغییرات درجه حرارت از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد.

همانطور که از شکل ۶ مشخص است اصلاح کننده‌های نانو کربنات کلسیم با درصدهای ۳ و ۵، درجه نفوذ قیر را در مجموع کاهش داده است. درجه نفوذ برای قیر اصلاح شده با افزایش مقدار نانو ذره همچنین کاهش می‌یابد. اصلاح کننده نانو کربنات کلسیم باعث تغییرات درجه نفوذ شده است. به طوریکه با افزودن ۳ درصد نانو ذره نفوذپذیری ۱۹ و با افزودن ۵ درصد نانو ذره ۲۴ درصد نفوذپذیری کاهش پیدا کرده است. به منظور حساسیت قیرها نسبت به تغییرات درجه حرارت آزمایش تعیین درجه نرمی انجام می‌شود. قیری که درجه نرمی‌اش بیشتر باشد، کمتر در مقابل تغییرات درجه حرارت حساس بوده و درجه نفوذ و یا کند



شکل ۶. نتایج درجه نفوذ نمونه‌ها



شکل ۷. نتایج درجه نفوذ نمونه‌ها

را نداشته و بر روی پوشش آسفالتی تهیه شده از آن ترک ایجاد می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمون قابلیت کشش که در شکل ۸ نشان داده شده است برای بررسی خاصیت انگمی قیری حاکی از آن است که تمامی نمونه‌ها دارای قابلیت کششی زیر ۱۰۰ سانتیمتر می‌باشند که در حد استاندارد نمی‌باشد. این رفتار ممکن است در نتیجه عکس العمل شیمیاییو تغییر در ساختمان شیمیایی باشد.

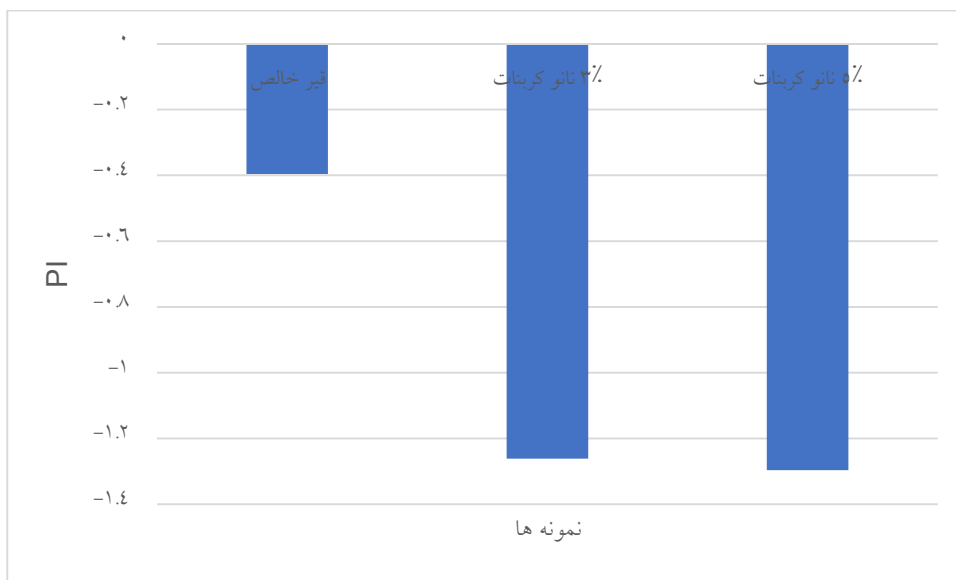
قیرهای مورد استفاده در تهیه آسفالت باید از چسبندگی کافی برخوردار باشند تا بتوانند دانه‌های شن و ماسه را آغشته کرده و در کنار هم نگه دارند. بنابراین قابلیت شکل پذیری که به درجه سختی قیر وابسته است از موارد مهم انتخاب قیر می‌باشد. اصلاح قیر باید به صورتی انجام پذیرد که با شرایط آب و هوایی مورد نظر مطابقت داشته باشد. قیری که خاصیت انگمی کمی داشته باشد سخت و شکننده می‌شود و قابلیت تحمل سرما



شکل ۸. نتایج خاصیت انگمی نمونه‌ها

خوردگی در دمای پایین و نسبت به تغییر شکل بیشتر مقاوم هستند. در شکل ۹ مقادیر شاخص نفوذ محاسبه شده، نشان داده شده است. مقدار PI کمتر دلالت بر مقدار زیاد حساسیت حرارتی قیر دارد و بیانگر این است که قیر یاد شده نمی‌تواند در مناطق با اختلاف دمای زیاد خواص مطلوبی را از خود نشان دهد.

شاخص نفوذ پذیری با استفاده از نتایج آزمون های نقطه نرمی و درجه نفوذ بدست می‌آید، برای طبقه بندی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار PI می‌تواند برای سفتی قیر در هر دما و زمان بارگیری به کار گرفته شود. همچنین می‌تواند مشخص کننده نوع ذرات در آمیزه های قیری در حد محدودی باشد. مقادیر کم PI مشخص کننده حساسیت بالای قیر به دما می‌باشد. مخلوط آسفالت متشکل از قیر با PI بالا نسبت به ترک

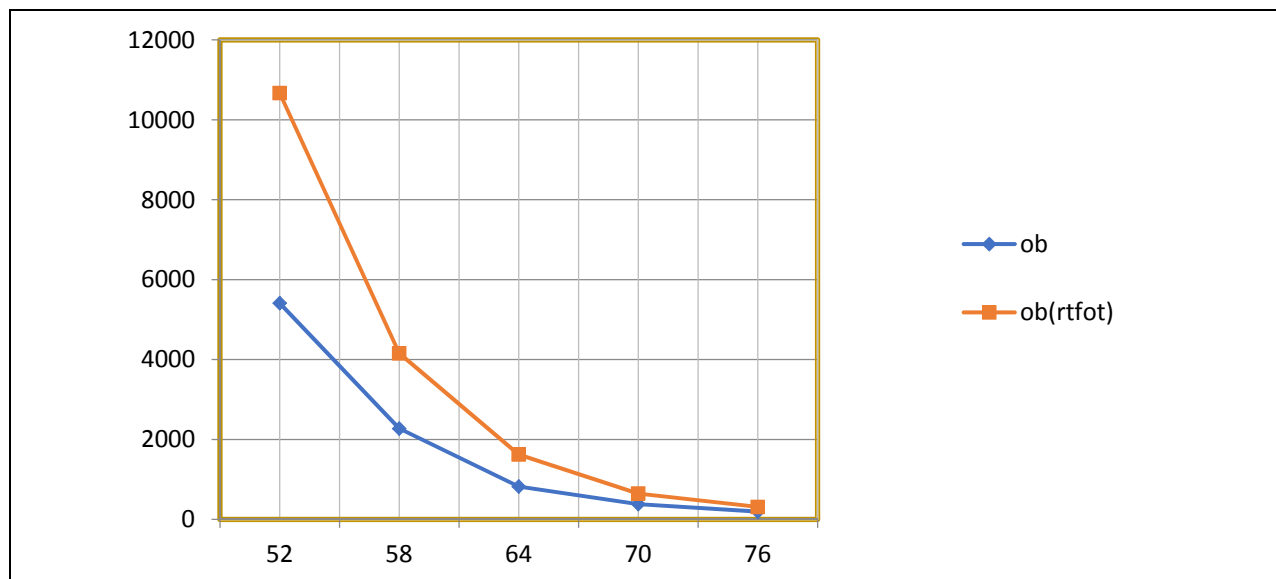


شکل ۹. نتایج PI قیرها

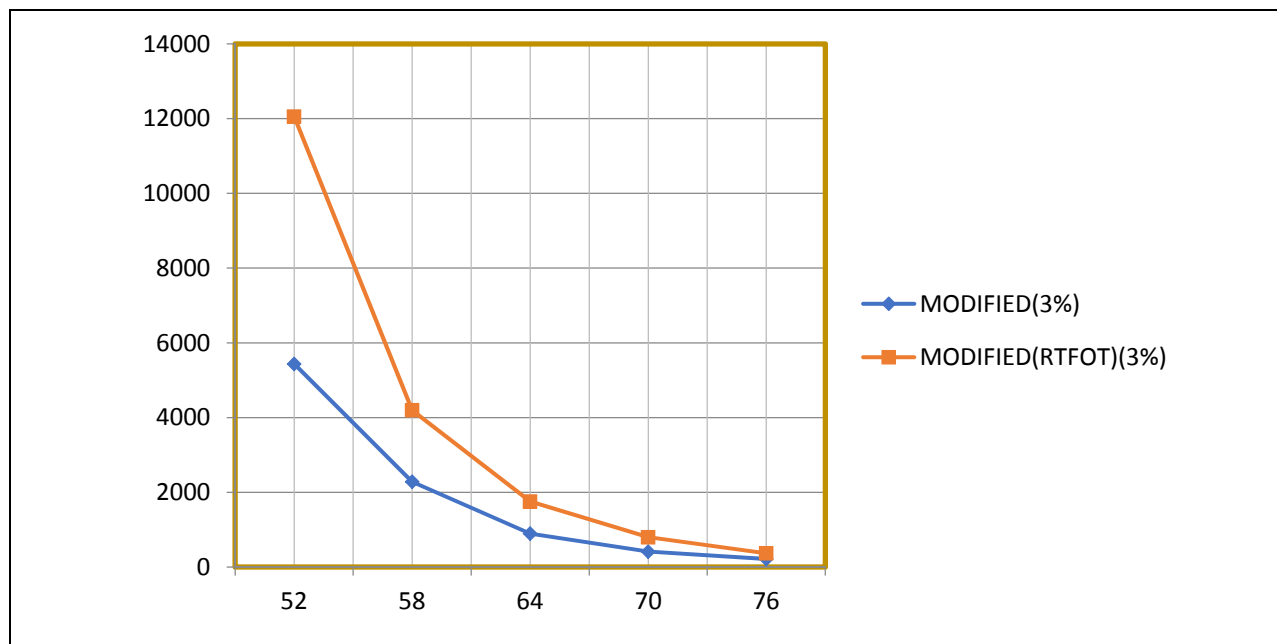
جدول ۵ و شکل ۵ تا شکل ۱۰ مقایسه بین قیر های استاندارد و اصلاح شده، پیرنشده و پیر شده را نشان می دهد.

جدول ۵. مقایسه نتایج پارامتر شیارشدگی قیر پایه و اصلاح شده

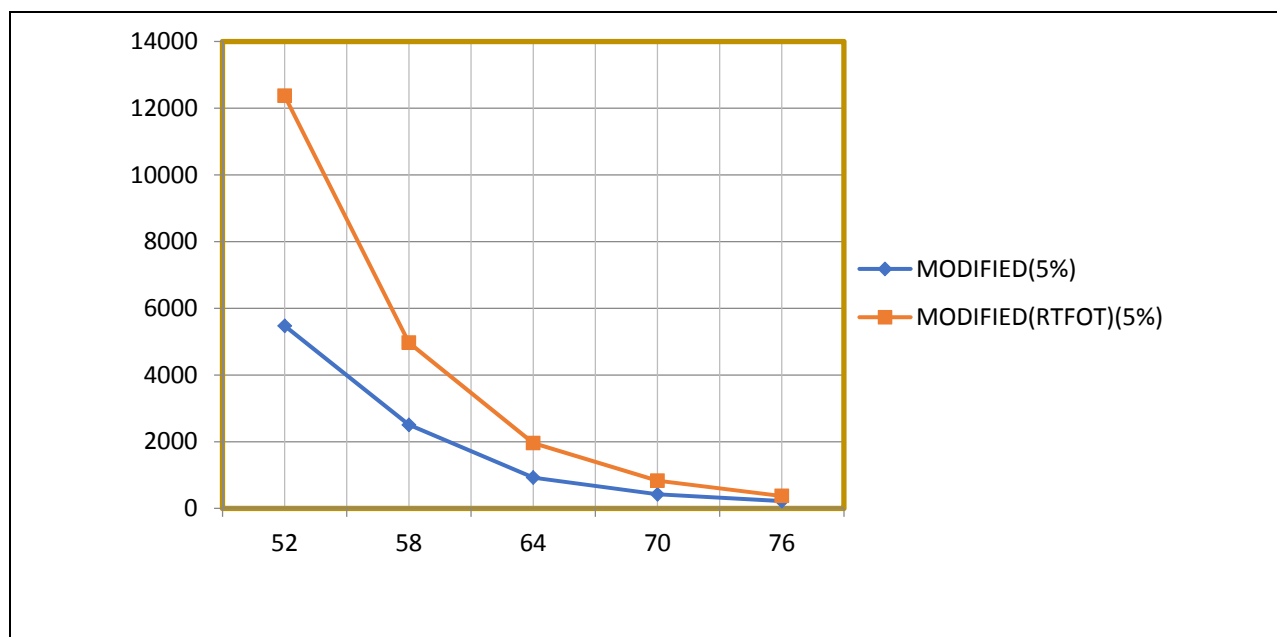
نسبت $\frac{G^*}{\sin\delta}$ اصلاح شده به استاندارد		$G^*/\sin\delta$			
قیر پیر شده (کوتاه مدت)	قیر تازه	قیر پیر شده (کوتاه مدت)	قیر تازه	دما	قیر
۱	۱	۱۰۶۶۸	۵۴۱۱	۵۲	استاندارد
۱	۱	۴۱۵۶	۲۲۷۵	۵۸	
۱	۱	۱۶۲۵	۸۲۴	۶۴	
۱	۱	۶۴۷	۳۸۳	۷۰	
۱	۱	۳۱۴	۱۹۶	۷۶	
۱/۱۳	۱/۰۰۴	۱۲۰۵۵	۵۴۳۵	۵۲	قیر اصلاح شده (۳٪)
۱/۰۱	۱/۰۰۳	۴۱۹۷	۲۲۸۳	۵۸	
۱/۰۷۹	۱/۰۸۴	۱۷۵۳	۸۹۴	۶۴	
۱/۲۴	۱/۰۸	۷۹۸	۴۱۴	۷۰	
۱/۱۷	۱/۱	۳۶۸	۲۱۵	۷۶	
۱/۱۶	۱/۰۱	۱۲۳۷۰	۵۴۷۶	۵۲	قیر اصلاح شده (۵٪)
۱/۱۹	۱/۱	۴۹۶۸	۲۵۰۶	۵۸	
۱/۲	۱/۱۲	۱۹۵۸	۹۲۵	۶۴	
۱/۲۸۳	۱/۱۰۴	۸۳۰	۴۲۳	۷۰	
۱/۱۸۸	۱/۱۲	۳۷۳	۲۱۹	۷۶	



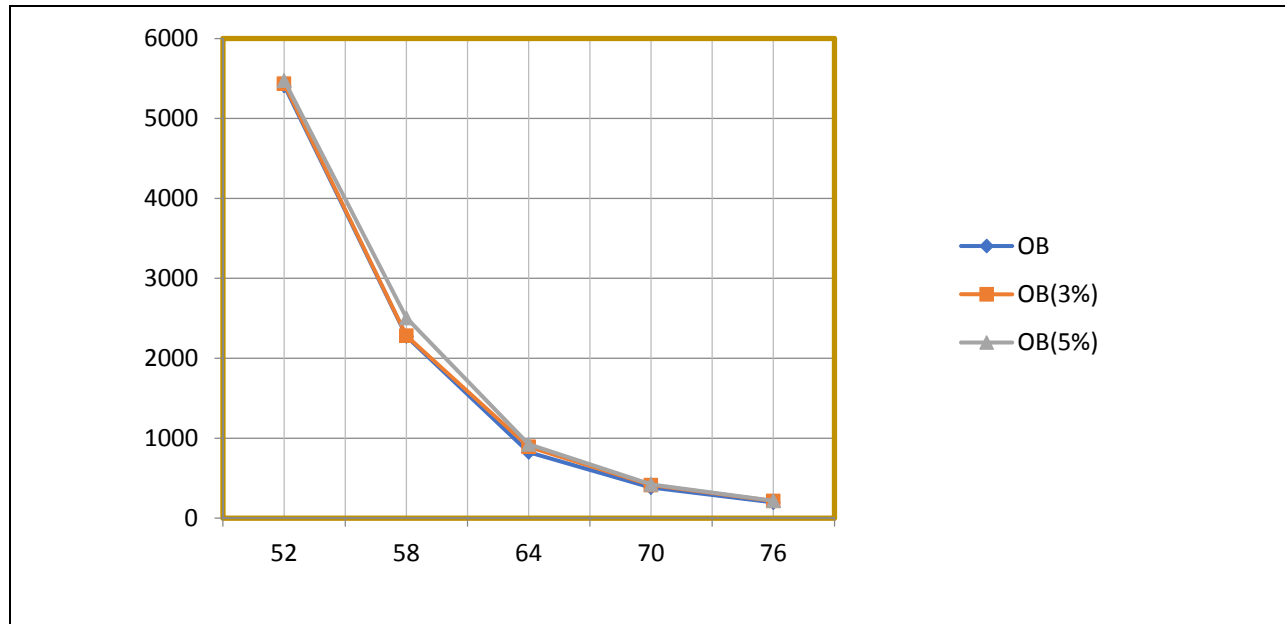
شکل ۱۰. نتایج پارامتر شیارشدگی قیر پایه پیر شده و نشده



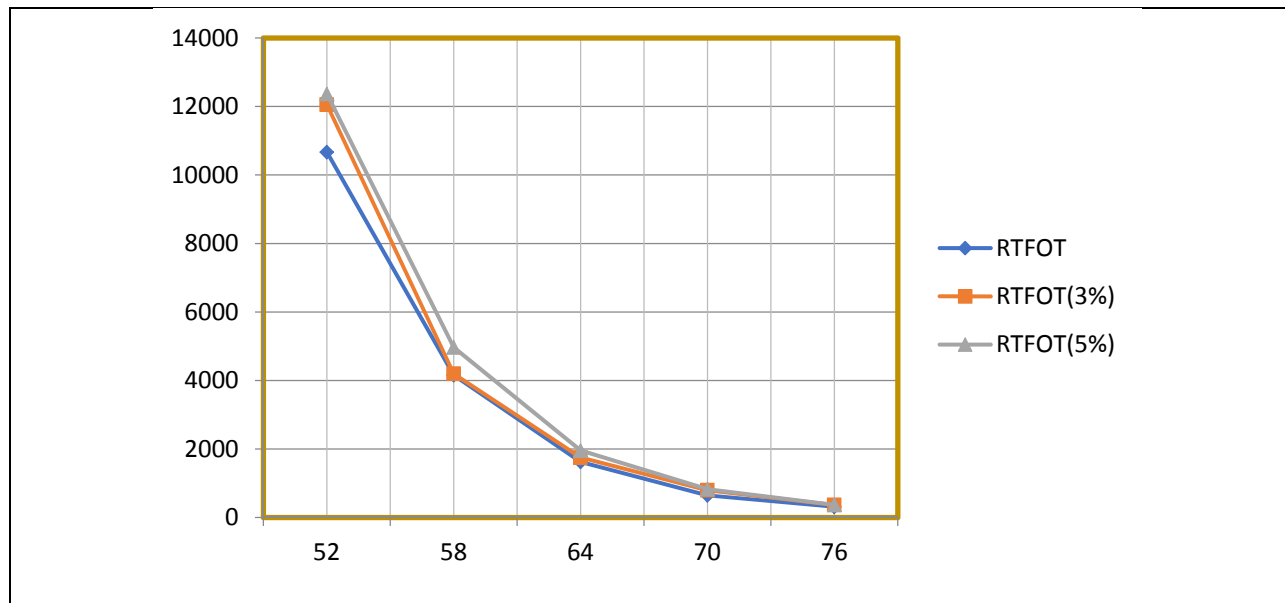
شکل ۱۱. نتایج پارامتر شیارشدگی قیر اصلاح شده با ۳٪ نانوکربنات کلسیم



شکل ۱۲. نتایج پارامتر شیارشدگی قیر اصلاح شده با ۵٪ نانوکربنات کلسیم



شکل ۱۳. مقایسه نتایج پارامتر شیارشدگی برای قیر پایه در حالت پیرنشده



شکل ۱۴. مقایسه نتایج پارامتر شیارشدگی برای قیر پایه در حالت پیرشده

کیلوپاسکال برای قیر پیر شده و محدودیت دمایی با بالاترین دما در قیر که مورد انتظار است تا مورد سرویس دهی واقع شود منطبق می‌شود. مقادیر دما معمول در این آزمایش (۷۶-۵۲) درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. حداکثر مقادیر دما در حالتی که حداقل محدودیت  $G^*/\sin\delta$  هنوز رضایت بخش است در جدول ۵ داده شده است.

پارامتر شیارشدگی برای مخلوط‌های اصلاح شده از ۱ تا ۱/۱۲ برابر بیشتر از قیرهای استاندارد است. همچنین در حالت پیر شده کوتاه مدت از ۱ تا ۱/۳ برابر قیر استاندارد می‌باشد. همانطور که از شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ مشخص است افزایش نانو ذره باعث افزایش بسیار کم مقاومت در برابر شیارشدگی شده است. حداقل محدودیت  $(G^*/\sin\delta)$  ۱ کیلوپاسکال برای قیر تازه و ۲/۲

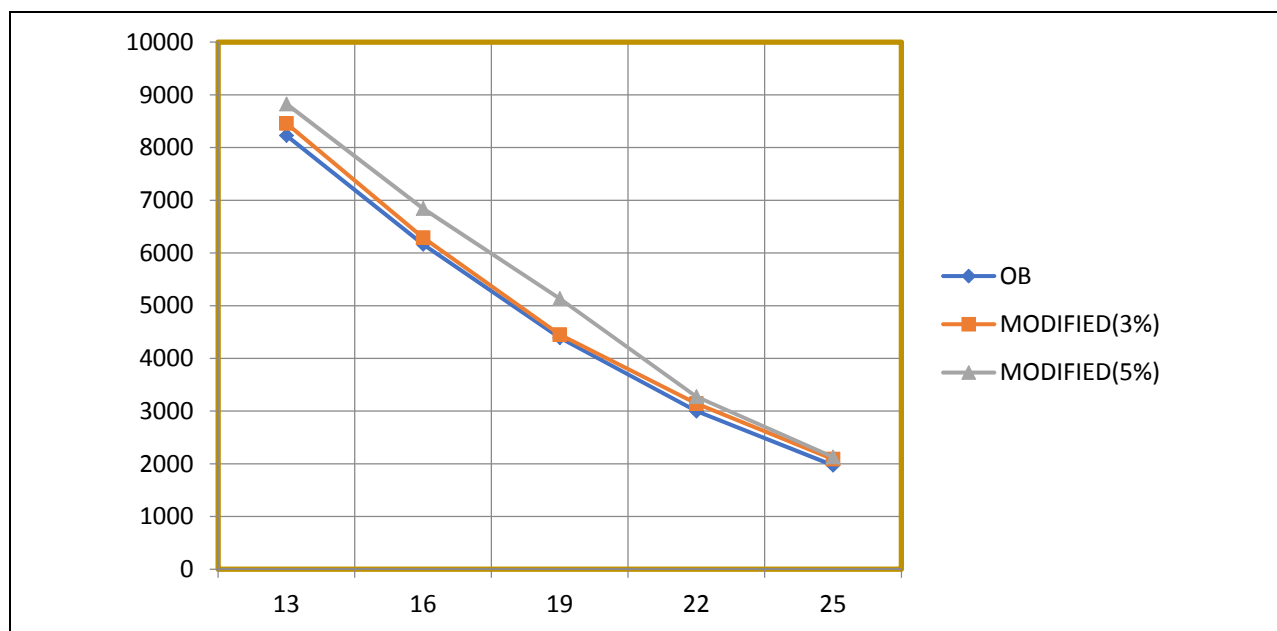
جدول ۶. مقادیر دما در محدودیت حداقل پارامتر شیارشدگی

دما		قیرها
قیر پیر شده کوتاه مدت ( $\frac{G^*}{\sin\delta} = 2/2KPa$ )	قیر تازه (OB) ( $\frac{G^*}{\sin\delta} = 1KPa$ )	
۶۳/۱۱	۶۳/۲۷	قیر استاندارد
۶۳/۳۹	۶۳/۵۴	قیر اصلاح شده (۳٪)
۶۳/۵۲	۶۳/۷۱	قیر اصلاح شده (۵٪)

جدول ۷ و شکل ۱۵ مقایسه پارامتر خستگی  $G^* \sin\delta$  بین قیرهای استاندارد و اصلاح شده را نشان می‌دهد.

جدول ۷. نتایج پارامتر خستگی نمونه‌ها

نسبت $G^* \sin\delta$ اصلاح شده به استاندارد					$G^* \sin\delta$					قیر
۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳	۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳	
۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳	۲۵	۲۲	۱۹	۱۶	۱۳	دمای انجام آزمایش (درجه سانتی‌گراد)
۱	۱	۱	۱	۱	۱۹۷۴	۳۰۰۱	۴۳۹۲	۶۱۶۴	۸۲۲۸	قیر استاندارد
۱/۰۶	۱/۰۵	۱/۰۱	۱/۰۲	۱/۰۳	۲۰۹۱	۳۱۴۳	۴۴۵۱	۶۲۹۰	۸۴۵۷	قیر اصلاح شده (۳٪ تانوزره)
۱/۰۸	۱/۰۹	۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۰۷	۲۱۳۱	۳۲۷۶	۵۱۳۶	۶۸۴۴	۸۸۲۸	قیر اصلاح شده (۵٪ تانوزره)



شکل ۱۵. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

به مقدار ناچیزی کاهش داده و تاثیرات کمی در کاهش عمر خستگی دارد. حداقل مقادیر دما در حالتی که حداکثر محدودیت  $G^* \sin \delta$  هنوز رضایت بخش است در جدول ۸ داده شده است.

تحلیل و بحث در مورد نتایج آزمایش: شکل ۱۵ و جدول ۷ نشان می‌دهد که پارامتر مقاومت در برابر خستگی، برای قیرهای اصلاح شده ۱ تا ۱/۲ برابر قیرهای استاندارد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که اصلاح کننده نانو کربنات کلسیم عمر خستگی را

جدول ۸. مقادیر حداقل دما در حداکثر پارامتر خستگی

قیرها	قیر پیر شده بلند مدت کیلوپاسکال $(G^* \sin \delta) = 5000$
قیر استاندارد	۱۷/۹۷
قیر اصلاح شده (۳٪)	۱۸/۱۰
قیر اصلاح شده (۵٪)	۱۹/۲۲

نتایج جدول ۸ نیز نشان می‌دهد که قیر اصلاح شده با نانو ذره کربنات کلسیم عمر خستگی را به میزان خیلی کمی در مقایسه با قیر استاندارد کاهش می‌دهد.

#### ۴-۲- نتایج آزمایشات مخلوط

##### ۴-۲-۱- نتایج آزمایش مارشال

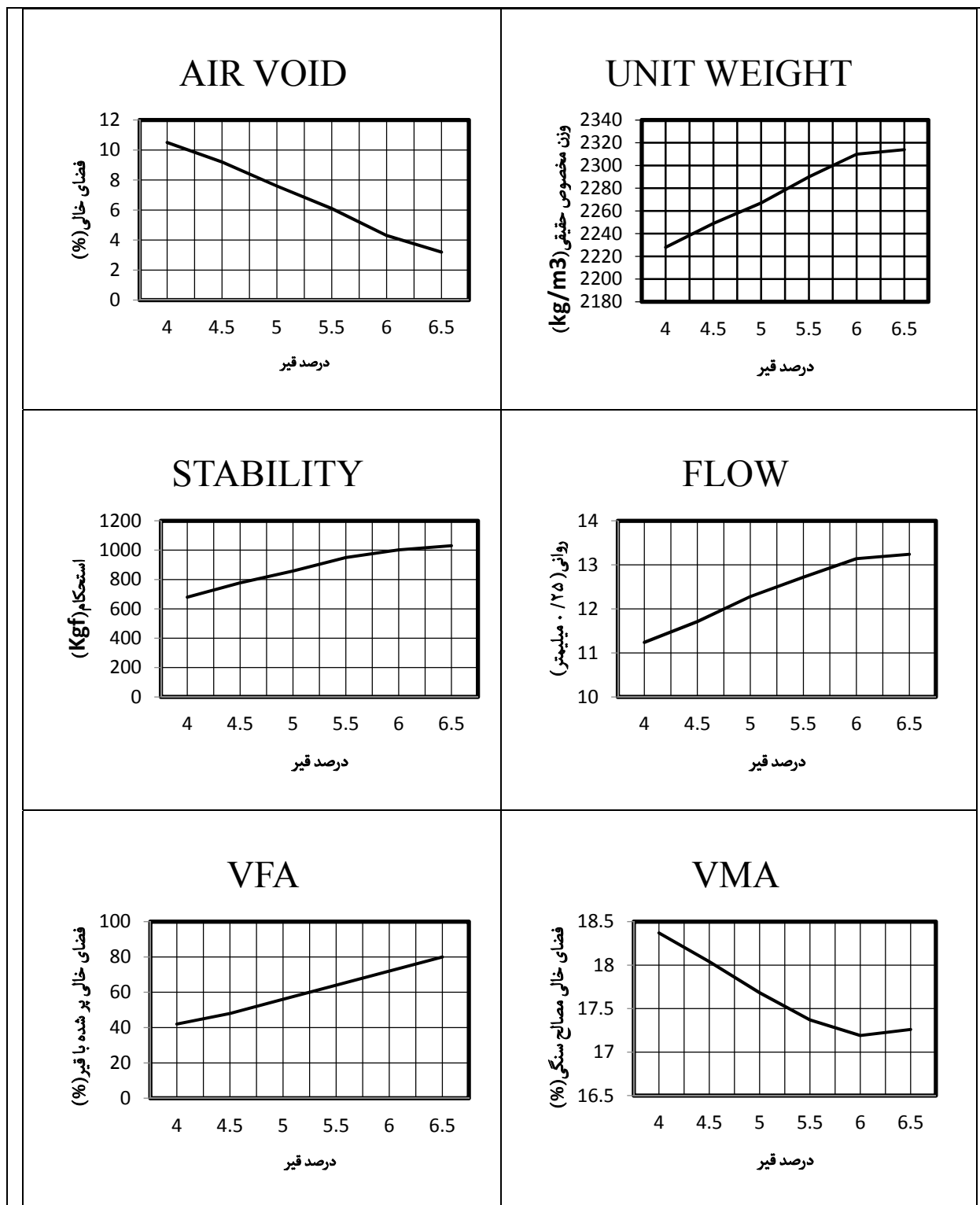
مصالح سنگی پر شده با قیر می‌باشد که منحنی تغییرات این کمیت‌ها با توجه به جدول ۹ در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مقدار استحکام مارشال با افزایش درصد قیر، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

کمیت‌های به دست آمده در آزمایش‌های طرح اختلاط مخلوط آسفالتی شامل استحکام مارشال، روانی، وزن واحد حجم (وزن مخصوص حقیقی)، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی متراکم، درصد فضای خالی مخلوط مصالح سنگی و درصد فضای خالی

جدول ۹. نتایج طرح اختلاط مخلوط

درصد قیر	$G_{mb}$	$V_a$ (%)	VMA (%)	VFA (%)	استحکام مارشال (کیلوگرم نیرو)	روانی (۰/۲۵ میلی‌متر)
۴	۲۲۲۸	۱۰/۵	۱۸/۳۷	۴۲	۶۸۰	۱۱/۲۴
۴/۵	۲۲۴۹	۹/۲	۱۸/۰۴	۴۸	۷۷۷	۱۱/۷۱
۵	۲۲۶۷	۷/۶	۱۷/۶۸	۵۶	۸۵۸	۱۲/۲۸
۵/۵	۲۲۹۰	۶/۱	۱۷/۳۷	۶۴	۹۵۰	۱۲/۷۲
۶	۲۳۱۰	۴/۳	۱۷/۱۹	۷۲	۱۰۰۲	۱۳/۱۴
۶/۵	۲۳۱۴	۳/۲	۱۷/۲۶	۸۰	۱۰۳۰	۱۳/۲۴





شکل ۱۶. نتایج طرح اختلاط مخلوط

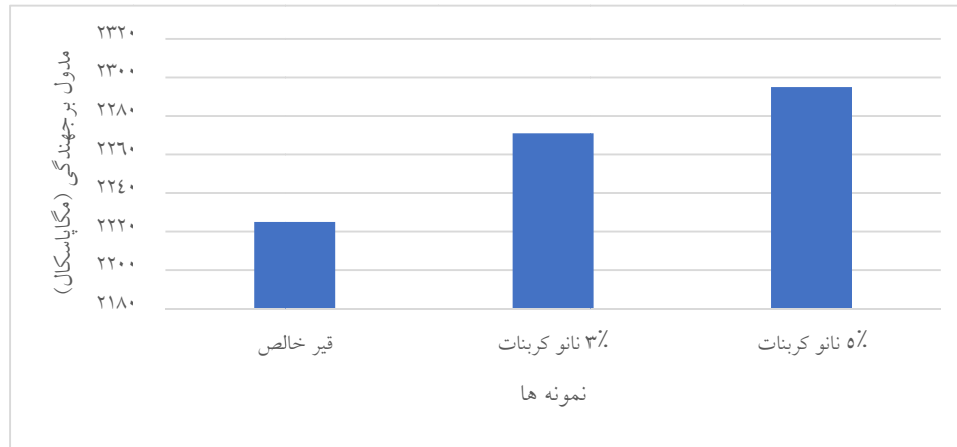
طور پیوسته توسط دو حسگر دستگاه اندازه‌گیری شده است. به منظور انجام آزمایش خستگی، زمان سیکل بارگذاری برابر ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه که ۲۵۰ میلی‌ثانیه مدت زمان اعمال بار و ۱۲۵۰ میلی‌ثانیه مدت زمان استراحت در هر سیکل می‌باشد. معیار نهایی شکست نمونه آسفالتی رسیدن به جابه‌جایی ۹ میلی‌متر تنظیم گردید. همانطور که از شکل ۱۸ دیده می‌شود عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با افزودنی نانو دارای عمر خستگی بالاتری نسبت به مخلوط‌های استاندارد می‌باشد.

#### ۴-۲-۲- نتایج مدول برجهندگی

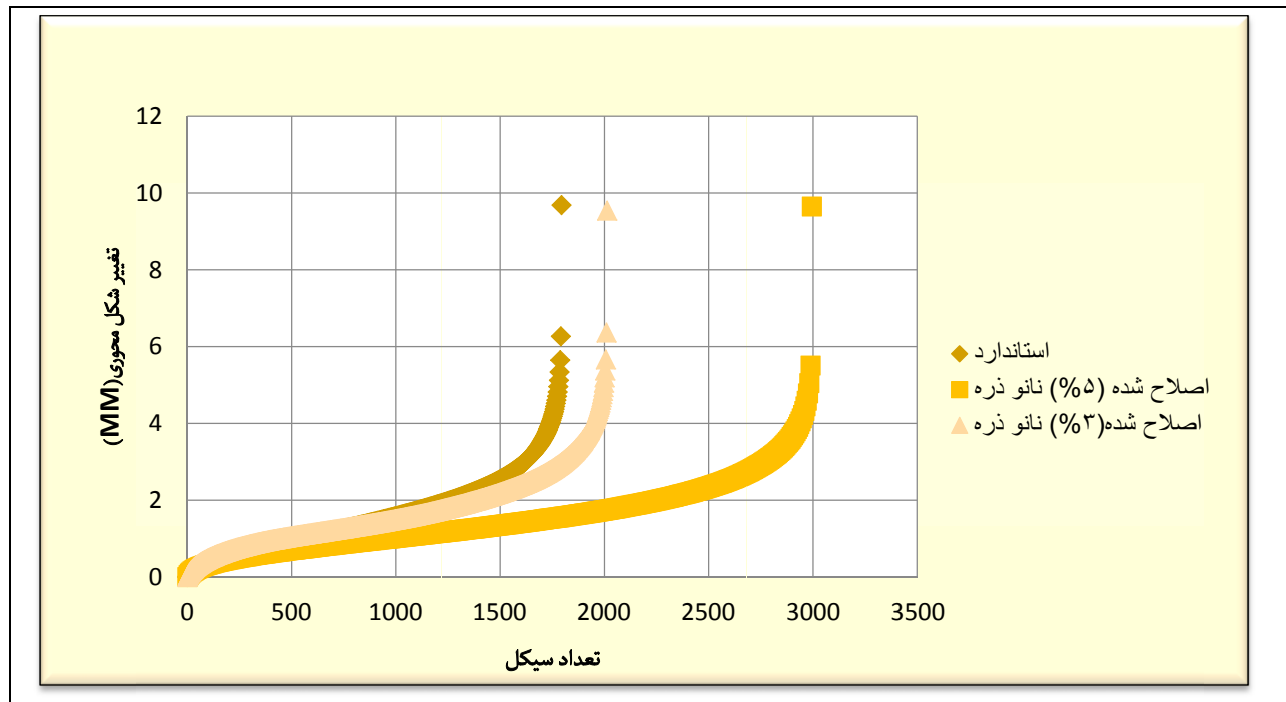
همانطور که از ۱۷ مشخص است نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان می‌دهد که اصلاح کننده نانو باعث کاهش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی می‌شود.

#### ۴-۲-۳- نتایج عمر خستگی

در این پژوهش آزمایش خستگی تحت تنش ثابت ۳۰۰ کیلو پاسکال صورت گرفته است. کرنش ایجاد شده در نمونه‌ها به



شکل ۱۷. نتایج مدول برجهندگی نمونه‌ها



شکل ۱۸. نتایج عمر خستگی نمونه‌ها

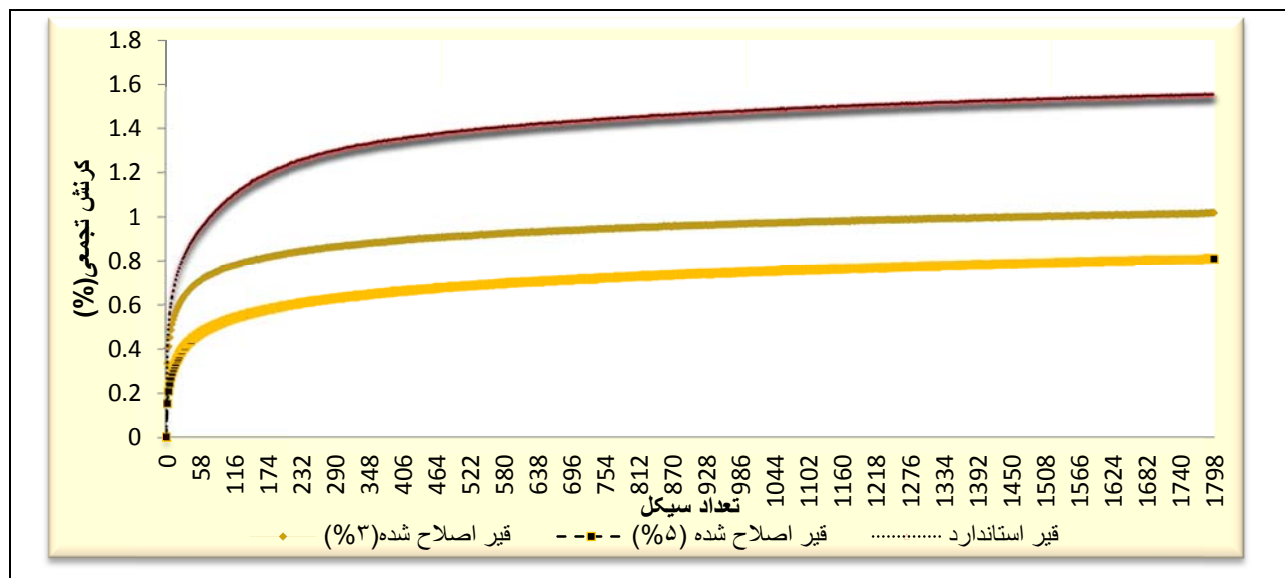
۴-۲-۴- نتایج آزمایش شیارشدگی

نمودارهای مربوط به کرنش تجمعی در برابر ۱۸۰۰ سیکل بارگذاری، مربوط به هر سه نمونه قیر در شکل ۱۹ و مقادیر کرنش تجمعی در پایان ۱۸۰۰ سیکل بارگذاری نیز در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

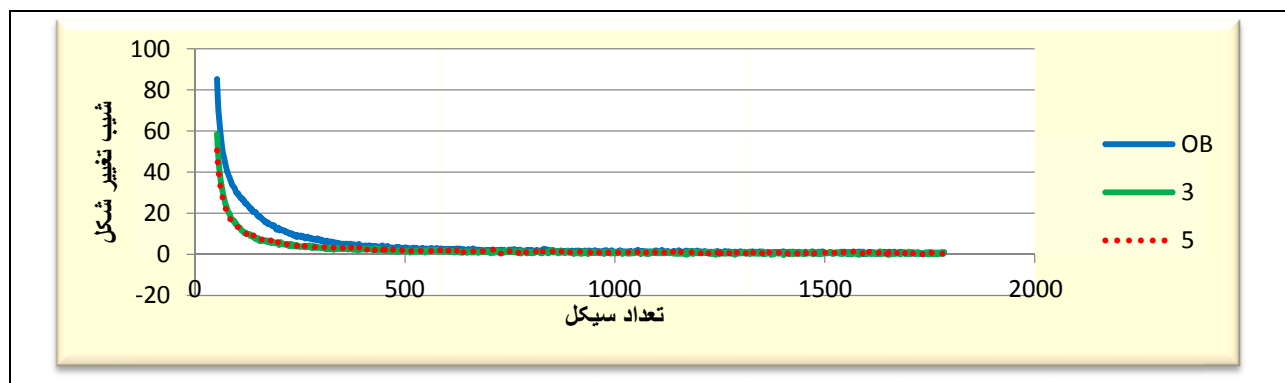
نتایج آزمایش خستگی نشان می‌دهد که مخلوط‌های اصلاح شده با ۳ درصد نانو ذره کربنات کلسیم ۱۲ درصد و مخلوط‌های اصلاح شده با ۵ درصد نانو ذره کربنات کلسیم ۶۶/۹ درصد عمر خستگی را افزایش می‌دهد.

جدول ۱۰. نتایج آزمایش شیارشدگی

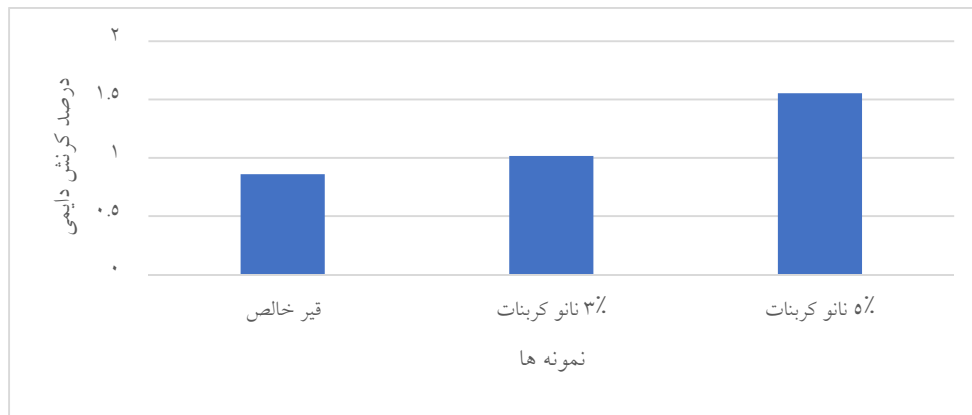
نتایج آزمایش			دمای آزمایش	نوع مخلوط آسفالتی
مدول خزشی (مگا پاسکال)	کرنش دائمی (درصد)	تغییر شکل دائمی (میلی‌متر)		
۶/۴۷۲	۱/۵۵۴	۱/۰۶۱	۴۰	مخلوط آسفالتی استاندارد
۹/۷۸۷	۱/۰۱۷	۰/۶۹۶		مخلوط آسفالتی اصلاح شده (۳٪)
۱۲/۴۷۷	۰/۸۰۶	۰/۵۵۱		مخلوط آسفالتی اصلاح شده (۵٪)



شکل ۱۹. کرنش تجمعی نمونه‌ها



شکل ۲۰. نرخ کرنش نمونه‌ها



شکل ۲۱. نتایج درصد کرنش تجمعی

بیشتر شده است. همانطور که از نتایج مشخص است نمونه‌های اصلاح شده با شیب کمتری تغییر شکل داده و در مقابل تغییر شکل مقاوم‌تر هستند درحالی که نمونه استاندارد با شیب بیشتری تغییر شکل داده و زود تر به مرحله گسیختگی می‌رسند.

نتایج حاکی از این است که افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم باعث کاهش کرنش تجمعی در مخلوط آسفالتی شده است که می‌توان از آن نتیجه گرفت مقاومت مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو ذره در برابر شیار شدگی نسبت به مخلوط آسفالتی ساده

#### ۵- نتیجه‌گیری

- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات صورت گرفته بر روی قیر پایه، قیر اصلاح شده با نانو ذره و همچنین نتایج آزمایشات مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با آن‌ها می‌توان به نکات زیر اشاره نمود:
- نانو ذره کربنات کلسیم با کاهش درجه نفوذ باعث بهبود خواص قیر می‌شود.
- نانو ذره کربنات کلسیم باعث کاهش نقطه نرمی قیر می‌شود.
- با افزایش نانو ذره، شاخص نفوذ پذیری قیر کاهش یافته که نشان دهنده افزایش حساسیت حرارتی قیرهای اصلاح شده است.
- افزودن نانو ذره کربنات کلسیم باعث کاهش در قابلیت کشش قیر پایه شده است و همگی کمتر از مقدار استاندارد شده است.
- نمونه‌های اصلاح شده با نانو ذره در حالت پیر نشده در دماهای ۶۳-۵۲ دارای مقادیر بالاتر از ۱ کیلو پاسکال و در حالت پیر شده کوتاه مدت در دمای ۶۳-۵۲ دارای مقادیر بالاتر از ۲/۲ کیلو پاسکال برای نسبت  $G^*/\sin\delta$  می‌باشد و در حالت کلی با افزایش نانو ذره مقدار این نسبت افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که نانو کربنات کلسیم به مقدار ناچیزی بر روی مقاومت در برابر شیارشدگی تاثیر گذار است. این مقدار بسیار کم افزایش یافته است.
- مقادیر  $G^*.\sin\delta$  به عنوان شاخص خستگی جهت کنترل ترک ناشی از خستگی در دماهای پایین تا متوسط برای نمونه‌های قیری این تحقیق در دماهای ۲۵-۱۹ درجه سانتی گراد کمتر از ۵۰۰۰ کیلو پاسکال می‌باشد. در حالت کلی با افزایش مقدار نانو ذره نسبت  $G^*.\sin\delta$  برای قیر افزایش یافته است. این نشان می‌دهد که نانو کربنات کلسیم به مقدار کمی در عمر خستگی تاثیر داشته و عمر خستگی را به میزان کمی کاهش می‌دهد.
- نتایج حاصل از آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر پایه و قیرهای اصلاح شده حاکی از مقاومت بالای مخلوط آسفالتی اصلاح شده با نانو ذره کربنات کلسیم نسبت به آسفالت معمولی در برابر شیار جای چرخ می‌باشد.
- نتایج حاصل از آزمایش خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با قیر پایه و قیرهای اصلاح شده حاکی از عمر خستگی در حالت اصلاح شده نسبت به حالت پایه می‌باشد.
- نتایج حاصل از آزمایش مدول برجهنگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته شده به قیر پایه و قیرهای اصلاح شده حاکی از کاهش مدول برجهنگی در حالت اصلاح شده به حالت پایه می‌باشد.

- 1- Multiple Stress Creep Recovery
- 2- Linear Amplitude Sweep
- 3- Polymer Modified Asphalt
- 4- Hot Mix Asphalt
- 5- Nano Carbonate Calcium
- 6- Surface Free Energy
- 7- Carbon Nano Tube
- 8- Dynamic Shear Rheometer
- 9- Universal Testing Machine

۷- مراجع

- Saboo, Nikhil, Mayank Sukhija, and Gaurav Singh, (2021), "Effect of nanoclay on physical and rheological properties of waste cooking oil-modified asphalt binder", *Journal of Materials in Civil Engineering* 33, No. 3, 04020490.
- Wang, Haopeng, Xueyan Liu, Panos Apostolidis, Martin van de Ven, Sandra Erkens, and Athanasios Skarpas, (2020), "Effect of laboratory aging on chemistry and rheology of crumb rubber modified bitumen." *Materials and Structures* 53, pp.1-15.
- Ye, Qunshan, Shaopeng Wu, and Ning Li, (2009), "Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixtures." *International Journal of fatigue* 31, No. 10, pp.1598-1602.
- Yusoff, N. I. M., Breem, A. A. S., Alattug, H. N., Hamim, A., & Ahmad, J., (2014), "The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 72, pp.139-147.
- Ziari, H., Farahani, H., Goli, A., & Sadeghpour Galooyak, S., (2014), "The investigation of the impact of carbon nano tube on bitumen and HMA performance", *Petroleum Science and Technology*, 32(17), pp.2102-2108.
- Ziari, Hasan, and Ali Moniri, (2019), "Laboratory evaluation of the effect of synthetic Polyolefin-glass fibers on performance properties of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials* 213, pp.459-468.
- Azarhoosh, A., Moghadas Nejad, F., & Khodaii, A., (2016), "Using the surface free energy method to evaluate the effects of nanomaterial on the fatigue life of hot mix asphalt", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(10), 04016098.
- Azarhoosh, A. R., Nejad, F. M., & Khodaii, A., (2018), "Nanomaterial and fatigue cracking of hot mix asphalt", *Road Materials and Pavement Design*, 19(2), pp.353-366.
- Bhat, Faheem Sadiq, and Mohammad Shafi Mir, (2019), "Performance evaluation of nanosilica-modified asphalt binder." *Innovative Infrastructure Solutions* 4, pp.1-10.
- Hamedi, G. H., Moghadas Nejad, F., & Oveisi, K., (2015), "Investigating the effects of using nanomaterial on moisture damage of HMA", *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), pp.536-552.
- Kim, Sungho, Gregory A. Sholar, Thomas Byron, and Jaeseung Kim, (2009), "Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement", *Transportation research record* 2126, No. 1 pp. 109-114.
- Saltan, Mehmet, Serdal Terzi, and Sebnem Karahancer, (2019), "Mechanical behavior of bitumen and hot-mix asphalt modified with zinc oxide nanoparticle", *Journal of Materials in Civil Engineering* 31, no. 3 04018399.
- Shah, Peerzada Mosir, and Mohammad Shafi Mir, (2020), "Performance of OMMT/SBS on the rheological properties of asphalt binder." *Korea-Australia Rheology Journal* 32, pp. 235-242.

# Evaluation of the Effect of Nano-Calcium Carbonate Mechanical Performance of Asphalt Binder and Mixture

*Mohsen Amoozadeh Omrani, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.*

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering,  
University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*E-mail: m\_amouzadeh@yahoo.com*

Received: March 2023- Accepted: August 2023

## **ABSTRACT**

The purpose of this research is to investigate and evaluate the effects of calcium nanocarbonate on the mechanical properties of bitumen and asphalt mixture. The laboratory program of this research includes the use of two percent calcium nanocarbonate additives (3%, 5% by weight of bitumen) to modify pure bitumen. Various tests including: penetration degree, softening point, stretchability, MSCR1, LAS2, indirect tensile strength, buckling modulus and dynamic fatigue and creep were performed. Fatigue test was performed based on four-point bending beam test with constant strain level in three levels of 600, 800 and 1000 microstrain with sinusoidal loading. The fatigue life of the samples was evaluated based on a fifty percent decrease in the initial hardness modulus. The results showed that the addition of calcium nanocarbonate increased the softening point and decreased the degree of penetration and stigmatization. Also, the bitumen rutting results showed that the addition of nano calcium carbonate increased the fatigue life of the samples. According to the results, the fatigue life of asphalt mixtures made with bitumen modified with calcium nanocarbonate is more than normal asphalt mixtures. Also, bentonite led to a relative increase in indirect tensile strength and hardness modulus of asphalt mixtures.

**Keywords:** Calcium Nanocarbonate, Fatigue Life, Four-Point Bending Beam Test, Nanomaterials, Dynamic Creep