

## ارزیابی تأثیر ایوانیک و زایکوترم بر حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های ماستیک درشت‌دانه

محمود عامری، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
حمیدرضا زورمند\*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت  
ایران، تهران

Email: hamidreza.zoormand72@gmail.com

دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

### چکیده

عملکرد رویه‌های آسفالتی در برابر عوامل محیطی، از جمله رطوبت، حائز اهمیت است و بسیاری از خرابی‌ها تحت تأثیر مستقیم ورود آب به جسم روسازی و تضعیف اتصال بین قیر و سنگدانه به وجود می‌آید. از طرفی، مخلوط آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) نوعی مخلوط آسفالتی گرم با اسکلت درشت‌دانه و درصد زیاد قیر و فیلر می‌باشد که به خاطر ریزش قیر، نیاز به استفاده از افزودنی‌ها دارد. بنابراین، هدف این تحقیق، بررسی اثر نانومواد بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی SMA است. در این پژوهش، از مصالح آهکی، قیر ۶۰/۷۰، دو افزودنی ایوانیک دگوسا<sup>۱</sup> (به میزان ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ درصد) و زایکوترم<sup>۲</sup> (به میزان ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ درصد وزنی قیر) استفاده شده است. آزمایش‌های مدول برجهنگی، کشش غیرمستقیم، آب جوشان و خزش دینامیک روی نمونه‌های آسفالتی، به منظور کنترل حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی، انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مواد ضد عریان‌شدگی ایوانیک تا ۶٪ و زایکوترم تا ۱۶٪ باعث بهبود عملکرد مخلوط‌های SMA در مقابل رطوبت می‌شود. افزودن زایکوترم (۰/۱۵ درصد وزنی قیر) به مخلوط آسفالتی نیز باعث بهبود مقاومت شیارشدگی می‌گردد. همچنین، از تحلیل و مقایسه این دو ماده نتیجه می‌شود که تأثیر نانوماده زایکوترم در بهبود خواص رطوبتی و عملکردی مخلوط نسبت به ایوانیک مطلوب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: آسفالت ماستیک درشت‌دانه، اوئیک، تغییرشکل دائم، حساسیت رطوبتی، نانوماده زایکوترم

### ۱. مقدمه

یکی از پارامترهای مؤثر در قضاوت پیشرفت یک کشور، کیفیت و عملکرد مناسب راه‌های ارتباطی آن کشور است. کیفیت روسازی راه تحت تأثیر شرایط محیطی

راه، سازه‌ای برای جابجایی و حمل‌ونقل مسافر و کالا می‌باشد که پایه پیشرفت اقتصادی در هر کشور است.

<sup>۱</sup>- TEGO Addibit L300

<sup>۲</sup>- Zycotherm

مخلوط‌های آسفالتی یکی از فاکتورهای مهم است که روی کارایی روسازی‌های انعطاف‌پذیر اثر می‌گذارد. شیارشدگی سطحی مسیر چرخ‌ها می‌تواند منجر به خطر افتادن ایمنی راه‌ها گردد. در نتیجه، شیارشدگی بیش از اندازه که معمولاً به عنوان عامل اصلی خرابی زودرس و عملیات تعمیر و نگهداری شبکه راه‌ها مطرح است، منجر به کاهش عمر سرویس‌دهی روسازی خواهد شد. از طرفی، قفل و بست بین مصالح سنگی نسبت به خصوصیات قیر روی شیارشدگی تأثیر بیشتری دارد. اما عدم توانایی قیر در ایجاد مخلوط آسفالتی یکپارچه باعث پدید آمدن شیارشدگی و تغییر شکل ماندگار در روسازی می‌شود. بنابراین، انجام آزمایش‌های مربوط به شیارشدگی روی مخلوط با قیر اصلاح شده امری ضروری به نظر می‌رسد (عامری و همکاران، ۲۰۱۹).

قیر اثر مهمی روی عملکرد بهینه، دوام و پایداری مخلوط می‌گذارد. لذا، می‌توان با تغییر در خصوصیات قیر، آسفالت‌های بادوام‌تری تولید نمود (عامری و همکاران، ۲۰۱۱). استفاده از مواد ضد عریان‌شدگی جامد و مایع، یکی از راه‌های اصلاح مخلوط‌های آسفالتی برای بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه است که در میان آنها افزودنی‌های مایع و افزودنی‌های آهکی رایج‌ترین سابقه استفاده از نوع مایع آن، به پیش از دهه ۱۹۳۰ باز می‌گردد. در دهه ۱۹۷۰، از آمین‌ها استفاده شد که حاصل فنآوری نایلون و در برابر حرارت بسیار پایدار بوده، لیکن بوی نامناسبی از آنها متصاعد می‌شد. از انواع دیگر این مواد می‌توان به آمین‌ها، آمیدوآمین‌ها و ایمیدازولین‌ها اشاره کرد (شیائو و امیرخانیان، ۲۰۱۰). نانو مواد خواص ویژه‌ای دارند که زمینه ورود این فناوری به آسفالت را فراهم کرده است.

بهبهانی و همکاران (۲۰۱۵)، پنج نوع مخلوط آسفالت شیشه‌ای با درصد‌های مختلف از زایکوسویل (صفر، ۰/۵، ۲/۵ و ۴/۵ درصد نسبت به وزن قیر) و ذرات شیشه (۱۰٪ نسبت به وزن سنگدانه) تهیه کردند و حساسیت رطوبتی و برخی از خواص مکانیکی آسفالت

مخرب و تنش‌های ناشی از بارگذاری قرار دارد که با ارتقای کیفیت اجزای سازنده مخلوط‌های آسفالتی می‌توان کیفیت روسازی را در برابر بارهای ترافیکی و شرایط محیطی افزایش داد. در دهه‌های اخیر، محققین با تغییر ساختار دانه‌بندی، مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای (SMA) را ایجاد کردند. مخلوط‌های آسفالتی SMA یکی از مقاوم‌ترین انواع مخلوط‌های آسفالتی شناخته شده تا به امروز هستند، که به دلیل استفاده از دانه‌بندی باز و ایجاد شرایط اتصال سنگ روی سنگ در ساخت این مخلوط، این نوع مخلوط آسفالتی مقاومت بالایی در برابر تغییر شکل دارد (عامری و همکاران، ۲۰۱۶). عوامل محیطی مانند دما، هوا و آب تأثیر به‌سزایی بر دوام مخلوط آسفالتی دارد. حضور آب در بین قیر و سنگدانه، باعث کاهش چسبندگی قیر و سنگدانه شده و مقاومت مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد (منصوریان و غلام‌زاده، ۲۰۱۶). در سالیان اخیر، عریان‌شدگی یکی از مشکلات عمده در ایالات متحده آمریکا بوده که این خرابی باعث شده تا میلیون‌ها دلار صرف تعمیر خسارت‌های ناشی از آن شود (NCHRP، ۲۰۰۰). در این خرابی، مواد شیمیایی توسط آب جذب می‌شود و به اصطلاح قیر از مصالح شسته شده و با ادامه این روند در کنار وجود بار ترافیکی، شکست در آسفالت رخ خواهد داد (کرینگوس و اسکارپاس، ۲۰۰۸). عواملی همچون خواص قیر، خواص مصالح سنگی، خواص مخلوط‌های آسفالتی، کنترل کیفیت در هنگام تراکم و اثر دینامیک بار ترافیکی در ایجاد حساسیت رطوبتی و تشدید خرابی‌ها نقش مؤثری دارند (حسامی و همکاران، ۲۰۱۵). یکی دیگر از مشکلات روسازی‌های آسفالتی، وقوع خزش‌های قابل توجه در آنها است. پدیده خزش، پیدایش تدریجی نشست‌ها و تغییر مکان‌های پایدار و بدون ایجاد ترک در روسازی‌ها تحت اعمال بارهای ثابت است. تغییر شکل‌های پایدار که به طور عینی به صورت شیارشدگی مسیر چرخ‌ها نمایان می‌گردند، معیار اولیه طرح روسازی‌های آسفالتی به‌شمار می‌روند. کیفیت

براساس مطالعات صورت گرفته، مشخص شده است که برای کاهش خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی گرم می‌توان از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی استفاده کرد. هدف از استفاده از این افزودنی‌ها، افزایش چسبندگی و پیوستگی میان قیر و سنگدانه در مخلوط آسفالتی می‌باشد. یکی از پُرکاربردترین افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در انجام تحقیقات علمی، زایکوترم است. در اکثر تحقیقات صورت گرفته روی این افزودنی، افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی گزارش شده است. ایوانیک<sup>۱</sup> نیز به عنوان افزودنی نوین و ارزان قیمت معرفی شده است. با توجه به اهمیت و کاربرد مخلوط‌های SMA و مطالعات اندک انجام شده روی مقاومت رطوبتی این نوع مخلوط، ضرورت بررسی خصوصیات مخلوط آسفالتی SMA با حضور نانومواد زایکوترم و ایوانیک احساس می‌شود. بنابراین، در این تحقیق، از دو ماده ایوانیک و زایکوترم به عنوان مواد ضدعریان‌شدگی استفاده شده است. هدف از انجام این پژوهش، ارزیابی و مقایسه اثر نانوماده زایکوترم به عنوان افزودنی رایج و ایوانیک به عنوان افزودنی نوین، در بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی SMA اصلاح‌شده در برابر پدیده خرابی رطوبتی است تا انتخاب افزودنی ضد عریان‌شدگی به شایستگی و راحت‌تر انجام پذیرد. در ادامه، برای کنترل خرابی رطوبتی آزمایش کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح‌شده) و جوشان تگزاس و برای کنترل سایر عملکردهای آسفالت اصلاح‌شده، آزمایش خزش دینامیک و مدول برجهندگی روی نمونه‌های حاوی قیر بهینه و اصلاح‌شده انجام شد.

## ۲. مصالح مصرفی

### ۲-۱. قیر مصرفی

قیر پایه مصرفی، قیر خالص ۶۰/۷۰ (PG64-16) است. مشخصات فیزیکی قیر مورد استفاده، مطابق جدول ۱

شیشه‌ای اصلاح شده از قبیل مدول سختی، نرمی خزشی و مقاومت کشش غیرمستقیم ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که نانوتکنولوژی زایکوسویل به میزان ۴/۵ درصد نسبت به وزن قیر، به عنوان یک عامل ضدعریان‌شدگی می‌تواند خواص مکانیکی و حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالت شیشه‌ای را به بهترین نحو بهبود بخشد. میرزابابی (۲۰۱۶) از زایکوترم به میزان ۰/۱ درصد نسبت به وزن قیر برای ارزیابی حساسیت رطوبتی آسفالت نیمه‌گرم و داغ با دانه‌بندی متفاوت مصالح سنگی از نوع سیلیس و آهکی استفاده کرد. وی پس از انجام آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی و جوشان تگزاس، با مقایسه نتایج بین مخلوط نیمه‌گرم و داغ دریافت که زایکوترم می‌تواند باعث افزایش مقاومت رطوبتی مخلوط‌های نیمه‌گرم نسبت به مخلوط داغ رایج گردد. نتایج آزمایش‌های عامری و همکاران (۲۰۱۷) نشان داد که مخلوط SMA اصلاح شده با نانورس دارای تغییرشکل دائمی کمتری (مقاومت در برابر شیارشدگی بیشتر) می‌باشد. علاوه بر این، مخلوط SMA حاوی ۳٪ نانورس و ۴ درصد SBS، دارای بیشترین مقاومت در برابر شیارشدگی است. نتایج آزمایش‌های رضوان باباگلی و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که مخلوط‌های SMA اصلاح شده با پلیمر SBS و EVA در برابر عریان‌شدگی عملکرد بهتری دارند. در میان نمونه‌های مورد آزمایش، نمونه‌های مخلوط آسفالتی SMA حاوی پلیمر SBS دارای عملکرد بهتری نسبت به پلیمر EVA می‌باشند. عامری و همکاران (۲۰۱۵) دو نوع نانورس مونت-موریلونیت CA و CB را در درصدهای ۲، ۴ و ۶ نسبت به وزن قیر، با قیر بهینه مخلوط نموده و پس از انجام آزمایش کشش غیرمستقیم و جوشان تگزاس دریافتند که نانورس CA عملکرد بهتری نسبت به CB دارد. همچنین، برای هر دو مخلوط، میزان ۶٪ این مواد بهترین نتایج را به همراه داشت.

۱- Evonik

است. در تمامی نمونه‌ها، از قیر خالص یا قیر اصلاح شده مطابق با جدول ۲ استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی قیر خالص

روش آزمایش	قیر ۶۰-۷۰	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴	خصوصیات
ASTM D-70	۱/۰۳	—	وزن مخصوص در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-5	۶۴	۷۰-۶۰	درجه نفوذ در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-36	۵۴	۵۶-۴۹	نقطه نرمی (درجه سلسیوس)
ASTM D-113	۱۰۲	حداقل ۱۰۰	انگمی در ۲۵ درجه سلسیوس
ASTM D-92	۳۰۵	حداقل ۲۳۲	نقطه اشتعال
ASTM D-70	۳۱۷	—	نقطه احتراق

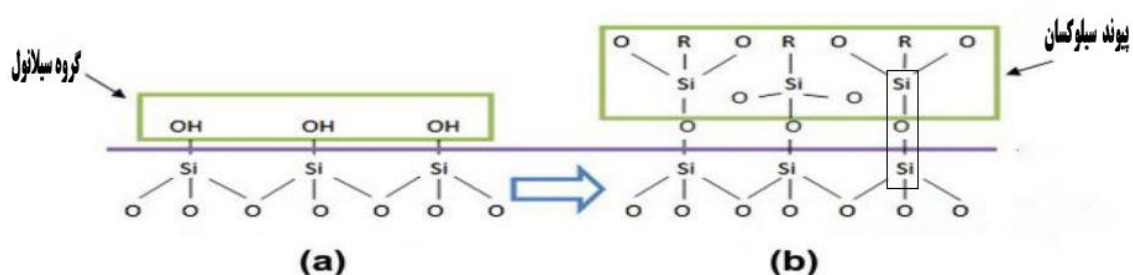
جدول ۲. علامت اختصاری قیر خالص مورد استفاده

ردیف	علامت اختصاری	نوع افزودنی	درصد
۱	AC	—	—
۲	Z 0.05	زایکوترم (Zycotherm)	۰/۰۵
۳	Z 0.10	زایکوترم (Zycotherm)	۰/۱
۴	Z 0.15	زایکوترم (Zycotherm)	۰/۱۵
۵	E 0.15	اوئیک (Evonik)	۰/۱۵
۶	E 0.25	اوئیک (Evonik)	۰/۲۵
۷	E 0.35	اوئیک (Evonik)	۰/۳۵

## ۲-۲. مواد ضد عریان‌شدگی

در این تحقیق، از نانوماده زایکوترم که نسل پیشرفته‌ای از افزودنی‌های سیلان با مزایای متعدد و تولیدی شرکت زایدکس هندوستان است با اوئیک دگوسا (TEGO Addibit L300) ساخت شرکت اوئیک آلمان، که یک افزودنی مایع با پایه پلی‌آمین‌های فتی اسیدی است، به عنوان افزودنی‌های قیر استفاده شده است. مطابق با توصیه‌های شرکت سازنده نانومواد، اختلاط قیر با این نانومواد در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به وسیله یک همزن با قدرت ایجاد گردابی به عمق ۲ تا ۳ سانتی‌متر صورت گرفت. برای اطمینان از توزیع یکنواخت، نانومواد با یک سرنگ به صورت قطره قطره در مدت ۱۰ دقیقه به آمیخته اضافه شد. مشخصات این دو ماده

افزودنی در جداول ۳ و ۴ آمده است. عملکرد اصلی مواد ضد عریان‌شدگی روی سطح سنگدانه‌ها می‌باشد. هسته عملکردی آنها در دو فاز آلی و معدنی است که از طریق پیوند کوالانسی با قیر و سنگدانه ارتباط برقرار می‌کنند. در واقع، زمانی که این مواد در دمای زیاد با قیر مخلوط می‌شوند، بخش آلی در قیر حل می‌شود. در اثر حرارت، پیوند هیدروژنی موجود در سطح سنگدانه شکسته شده و مولکول H<sub>2</sub>O تولید می‌نماید که بخش معدنی مواد ضد عریان‌شدگی به کمک این مولکول در سطح سنگدانه‌ها پیوند کوالانسی Si-O-Si تولید می‌کنند و در نهایت یک شبکه آبریز در سطح ایجاد می‌گردد (شکل ۱). این پیوند با مقاومت در برابر نفوذ آب، بین قیر و سنگدانه، از عریان‌شدگی مصالح سنگی در آسفالت جلوگیری می‌کند (میرزابائی، ۲۰۱۶).



شکل ۱. ساختار پیوند کووالانسی بین مواد سیلان و مصالح سنگی: (a) قبل از واکنش و (b) بعد از واکنش

جدول ۳. مشخصات زایکوترم

مشخصات	عنوان
$0.97 \text{ g/cm}^3$	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سلسیوس
مایع	نوع ماده
زرد کم رنگ	رنگ
بیش از ۸۰ درجه	درجه اشتعال
بدون بو	سایر

جدول ۴. مشخصات اوئیک

مشخصات	عنوان
مایع شفاف	شکل ظاهری
٪۱۰۰	فعال
چسبناکی متوسط	ویسکوزیته
۳۵	ارزش اسید
۱۵۰	ارزش آمین
٪۲	میزان آب

### ۲-۳. مصالح سنگی

است که مصالح آهکی استفاده شده از معدن اسبچران واقع در منطقه دماوند تهران تهیه شده است. دانه‌بندی به‌کار رفته در این تحقیق مطابق با گزارش NCHRP با حداکثر اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر می‌باشد. مشخصات مصالح سنگی به شرح جدول ۵ است.

در این پژوهش، از مصالح سنگی کوهی به عنوان سنگدانه (درشت‌دانه و ریزدانه) و از پودر سنگ به عنوان فیلر (عبوری از الک ۲۰۰) استفاده شده است. لازم به ذکر

جدول ۵. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده

استاندارد	حدود آیین‌نامه‌ای	نتایج	
		مصالح آهکی	شرح آزمایش
AASHTO T96	حداکثر ۳۰	۲۳	افت وزنی در مقابل سایش به روش لس آنجلس (%)
AASHTO T85	حداکثر ۲	۱/۴	درصد جذب آب درشت دانه
ASTM D4791	حداکثر ۲۰	۰/۳	سنگدانه‌های پهن و دراز
ASTM C127	-	۲/۶۲۹	وزن مخصوص درشت‌دانه
ASTM C128	-	۲/۵۹۳	وزن مخصوص ریزدانه
ASTM D854	-	۲/۵۸۹	وزن مخصوص فیلر
ASTM D5821	۱۰۰	۱۰۰	در یک جبهه
	حداقل ۹۰	۱۰۰	در دو جبهه
AASHTO T96	غیرخمیری	غیرخمیری	شاخص خمیری مصالح ریزدانه
AASHTO T84	حداکثر ۲/۵	۱/۸	درصد جذب آب ریزدانه

### ۳. روش آزمایش

۱۲/۵ میلی‌متر استفاده شده است. در نهایت، دانه‌بندی حد وسط به عنوان دانه‌بندی بهینه انتخاب شد. فرایند آزمایش به صورت طرح‌واره در شکل ۲ نمایش داده شده است. همچنین، از نرم‌افزار SPSS برای تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است.

طبق دستورالعمل NCHRP 425، برای تعیین دانه‌بندی بهینه باید برای هر اندازه اسمی سنگدانه حداقل سه دانه‌بندی آزمایشی مختلف انتخاب شود. در این تحقیق، از سه دانه‌بندی حد بالا، پایین و میانه اندازه اسمی سنگدانه



شکل ۲. طرح‌واره روش آزمایش

(۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ درصد وزنی قیر) و زایکوترم (۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ درصد وزنی قیر)، با استفاده از دستگاه ژیراتوری روسازی ممتاز ساخته شدند (ASTM D3387, ۲۰۰۳). مقاومت در برابر رطوبت برای نمونه‌های متراکم نشده با آزمایش جوشان تگزاس و برای نمونه‌های متراکم شده با آزمایش‌های کشش غیرمستقیم (لاتمن اصلاح شده) انجام می‌گیرد. در پایان، برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی و مقاومتی، آزمون خزش دینامیک و مدول برجهنگی انجام خواهد شد.

۳-۱. طرح اختلاط

طرح اختلاط نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D1599 است. در این تحقیق، برای تعیین درصد قیر بهینه، نمونه‌های آزمایشگاهی با ۶/۳، ۶/۷ و ۷/۲ درصد قیر با دانه بندی بهینه ساخته شدند. سپس، با توجه به دستورالعمل NCHRP 425 و جدول ۶، درصد قیر بهینه برای مصالح آهکی ۶/۵ به دست آمده است. برای شبیه‌سازی بهتر تراکم آزمایشگاهی و میدانی، نمونه‌های استوانه‌ای مانند شکل ۳، در درصدهای قیر بهینه و با درصدهای مختلف اوئیک

جدول ۶. تعیین درصد قیر بهینه

نمونه	Gmb	Gmm	Va	V.M.A	VCA mix%	VCA dre%	نسبت VCA	درصد ریزش قیر	TSR	درصد قیر انتخابی
AC 6.3-L	۲/۲۹	۲/۴۱	۴/۹۷۹	۱۸/۴	۳۸/۲۴	۴۱/۴	۰/۹۲	۰/۲۶	۰/۶۹	۶/۵
AC 6.7-L	۲/۳	۲/۳۸	۳/۳۶۱	۱۸/۰۴	۳۷/۹۷	۴۱/۴	۰/۹۱۷	۰/۳۱	۰/۸	
AC 7.2-L	۲/۳۲	۲/۳۶	۱/۶۹۵	۱۷/۳۳	۳۷/۴۳	۴۱/۴	۰/۹۰۴	۰/۳۸	۰/۷۳	x



شکل ۳: نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده با دستگاه ژیراتوری

این آزمون روشی ساده و کم‌هزینه برای ارزیابی اثر آب بر چسبندگی میان قیر و سنگدانه براساس استاندارد ASTM D3625 است. این آزمایش به صورت

۳-۲. آزمایش آب جوشان تگزاس

آزمایش، دستگاه نیروی گسیختگی و تغییر شکل در لحظه شکست را به عنوان داده خروجی آزمایش ثبت می‌کند که با استفاده از رابطه ۱، مقاومت کششی نمونه محاسبه می‌گردد:

$$\sigma_t = \frac{2P_{max}}{\pi t d} \quad (1)$$

که  $\sigma_t$  مقاومت کششی (KPa)،  $P$  نیروی گسیختگی (KN)،  $t$  ضخامت نمونه (m) و  $d$  قطر نمونه (m) است. حداقل ۶ نمونه از هر نوع مخلوط با فضای خالی ۶ تا ۸ درصد نیاز است. نمونه‌های مترکم شده باید دارای فضای خالی ۶ تا ۸ درصد باشند. پس از آن، نمونه‌ها را در پلاستیک حاوی ۱۰ میلی لیتر آب گذاشته و به مدت ۱۶ ساعت در فریزر با دمای ۱۸- درجه سلسیوس منجمد می‌شوند. سپس، آنها را به حمام آب ۶۰ درجه سلسیوس منتقل کرده و به مدت ۲۴ ساعت در حمام نگهداری می‌شوند. در مرحله آخر، دمای حمام را به ۲۵ درجه کاهش داده و به مدت ۲ ساعت در این دما باقی می‌ماند و نهایتاً نمونه‌ها آماده بارگذاری در شرایط اشباع هستند. برای انجام آزمایش در شرایط خشک نیز نیمی دیگر از نمونه‌ها در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرند. بارگذاری آزمایش کشش غیرمستقیم مطابق با شکل ۵، با سرعت ثابت ۵۰ میلی متر بر دقیقه انجام می‌شود و تا مشاهده ترک عمودی روی نمونه‌ها ادامه می‌یابد. پس از انجام آزمایش، مقاومت کششی نمونه‌ها با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از رابطه ۲، نسبت مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی به دست می‌آید که باید این مقدار برای مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای طبق نشریه NCHRP 425 حداقل ۷۰٪ و طبق نشریه ۲۳۴ آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران حداقل ۷۵٪ باشد. در این تحقیق، این معیار به صورت محافظ‌کارانه ۷۵٪ در نظر گرفته شده است (نشریه ۲۳۴).

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 > 75\% \quad (2)$$

چشمی و با سرعت زیاد ولی با کیفیت پایین، میزان عریان‌شدگی را بررسی می‌کند. این روش فقط یک ارزیابی مقدماتی برای برهنگی بوده و هیچ بررسی مقاومتی صورت نمی‌گیرد. در این آزمون، از حدود ۲۵۰ گرم مخلوط آسفالتی در آب جوشان، تحت شرایط مشخص، برای ارزیابی حساسیت رطوبتی استفاده می‌شود. در این مطالعه، جهت کمی‌سازی و افزایش دقت در بررسی عریان‌شدگی مصالح، از نمونه‌های مختلف قبل و بعد از انجام آزمایش، توسط یک دوربین دیجیتال عکس گرفته شد. سپس، عکس‌ها توسط نرم‌افزار MATLAB به عکس‌های دیجیتال با پیکسل‌های سیاه تا سفید به صورت فازی تبدیل شد که روشن بودن هر قسمت از عکس نشان‌دهنده‌ی عریان‌شدگی بیشتر آن قسمت می‌باشد. پیکسل‌های سیاه متناظر با عدد صفر و پیکسل‌های سفید متناظر با عدد ۲۵۵ در نرم‌افزار ثبت می‌شوند و سایر پیکسل‌ها با توجه به درجه‌ی روشنایی در این بازه قرار می‌گیرند. عدد ۱۲۸ به عنوان مرز بین مصالح عریان‌شده و عریان نشده فرض شده و آنالیز عکس نمونه‌های مختلف توسط پردازش تصاویر در این نرم‌افزار دقیقاً بررسی گردید (میرزابائی، ۲۰۱۶).

### ۳-۳. آزمایش کشش غیرمستقیم

آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم به منظور تعیین استحکام کششی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود. مقاومت کششی مخلوط آسفالتی به وسیله مقاومت پیوستگی قیر مخلوط و مقاومت ناشی از پیوند بین سطح سنگدانه و قیر به وجود می‌آید. مقاومت کششی به وسیله حداکثر باری که نمونه قبل از گسیختگی می‌تواند تحمل کند، محاسبه می‌شود. تأثیر آب در کاهش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی به عنوان یکی از نگرانی‌های اصلی مطرح است که برای ارزیابی حساسیت رطوبتی باید مورد ارزیابی قرار گیرد (مقدس‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۲). در این تحقیق، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم با استفاده از استاندارد AASHTO T283 انجام شده است. در این



ارزیابی تأثیر ایوانیک و زایکوترم بر حساسیت رطوبتی و پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های ماستیک درشت دانه

$$M_r = P \times \frac{\theta + 0.2734}{\delta t} \quad (3)$$

که  $M_r$  مدول برجهندگی (MPa)،  $P$  بار اعمالی  $\theta$ ،(N) ضریب پواسون،  $\delta$  تغییرشکل کل در جهت افقی و برگشت‌پذیر و  $t$  ضخامت نمونه (mm) است.

نسبت مدول برجهندگی نمونه‌های اشباع به مدول برجهندگی نمونه‌های خشک، پارامتر مهمی برای ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد که این نسبت باید بیشتر از ۷۰٪ باشد.

$$RMR = \frac{M_{r_{wet}}}{M_{r_{dry}}} \times 100 > 70\% \quad (4)$$

که  $RMR$  نسبت مدول برجهندگی،  $M_{r_{wet}}$  مدول برجهندگی نمونه‌های عمل‌آوری شده و  $M_{r_{dry}}$  مدول برجهندگی نمونه‌های خشک است.

که  $TSR$  نسبت مقاومت کششی،  $ITS_{wet}$  مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده و  $ITS_{dry}$  مقاومت کششی نمونه‌های خشک است.

#### ۳-۴. آزمایش مدول برجهندگی

مدول برجهندگی مطابق با استاندارد ASTM D4123-82 روی نمونه‌های استوانه‌ای خشک و اشباع در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و با اعمال بار نیمه‌سینوسی ۴۰۰ کیلونیوتن و دوره بارگذاری ۰/۱ ثانیه (۰/۹ ثانیه استراحت) مطابق با شکل ۴، اندازه‌گیری شد. مدول برجهندگی به صورت کشش غیرمستقیم، با استفاده از رابطه ۳ و توسط نرم‌افزار محاسبه شد. نتیجه برای هر نوع مخلوط به صورت میانگینی از سه نمونه تحت آزمایش گزارش می‌شود.



شکل ۵. دستگاه UTM (آزمایش کشش غیرمستقیم)



شکل ۴. دستگاه UTM (آزمایش مدول برجهندگی)

گردید (Australian Standard، ۲۰۱۵). نتایج آزمایش که روی سه نمونه از هر طرح اختلاط بهینه انجام شد، به صورت منحنی کرنش تجمعی در برابر سیکل‌های بارگذاری مطابق شکل ۷ ارائه می‌شود. منحنی کرنش تجمعی به سه ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول، تغییر مکان‌های دائم به طور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند. در ناحیه دوم، شیب نمودار به مقدار ثابتی می‌رسد

#### ۳-۵. آزمایش خزش دینامیک

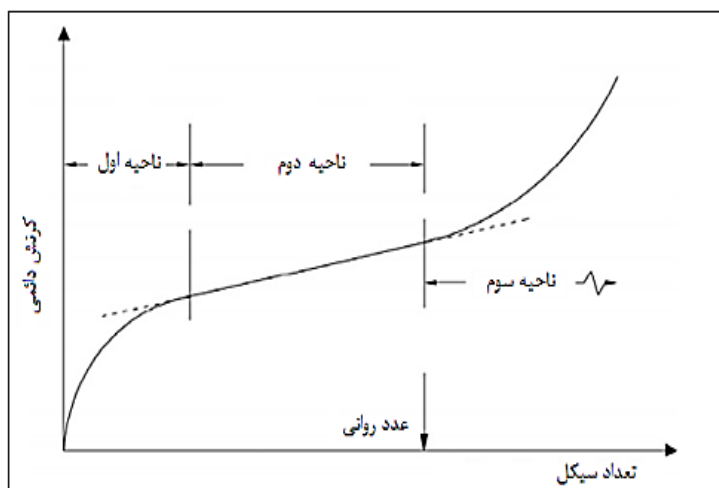
در این پژوهش، آزمایش خزش دینامیک با دستگاه UTM-5 مطابق شکل ۶ انجام شد. نمونه‌ها قبل از بارگذاری خزشی به مدت ۵ ساعت در محفظه دستگاه، در دمای ۵۰ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده و سپس بارگذاری مستطیلی با اعمال تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال به صورت ۰/۵ ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه استراحت انجام

شناخته می‌شود که معیاری برای مقایسه مقاومت شیارشدگی نمونه‌های آسفالتی است (NCHRP، ۲۰۰۲).

و در ناحیه سوم دوباره شیب تغییرمکان دائم افزایش می‌یابد و مقدار تغییرمکان دائم به شدت روی هم انباشته می‌شود. تعداد سیکل در شروع ناحیه سوم به عدد روانی



شکل ۶. دستگاه UTM (آزمایش خزش دینامیک)



شکل ۷. ارتباط بین تغییرات کرنش تجمعی و تعداد سیکل بارگذاری

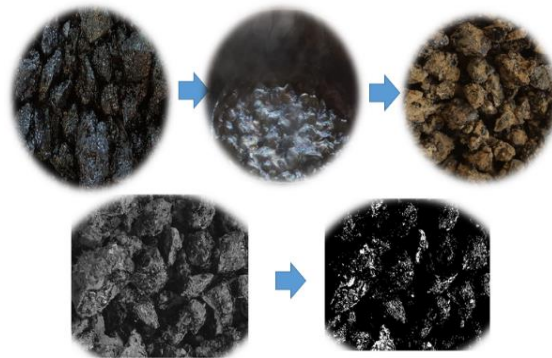
آسفالتی موفق عمل کرده‌اند. با توجه به نتایج می‌توان گفت که اثر افزودنی‌ها بر مصالح آهکی کم بوده و بیشترین کاهش پیکسل‌های سفید در نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و ۰/۳۵ درصد اوئیک حاصل شده است.

#### ۴. نتایج و تفسیر داده‌ها

##### ۴-۱. آب جوشان

با توجه به شکل ۸ و جدول ۷ می‌توان گفت که در حالت کلی، افزودنی زایکوترم و اوئیک سبب کاهش قسمت-هایی از پیکسل‌های سفیدرنگ می‌شود. این بدین معناست که زایکوترم و اوئیک به عنوان یک افزودنی ضد عریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های

شکل ۸. روند انجام آزمایش آب جوشان و پردازش تصویر



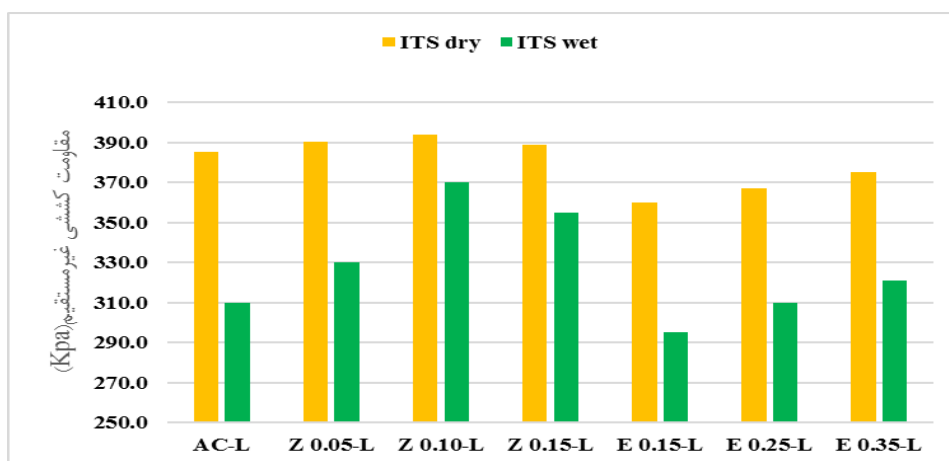
جدول ۷. نتایج پردازش تصویر

نمونه	پیکسل سیاه قبل از آزمایش	پیکسل سیاه بعد از آزمایش	درصد کاهش پیکسل سیاه	پیکسل سفید قبل از آزمایش	پیکسل سفید بعد از آزمایش	درصد افزایش پیکسل سفید
AC-L	۹۷/۶	۹۴/۱	۳/۵	۲/۴	۵/۹	۵۸/۹
Z0.05-L	۹۷/۶	۹۶/۱	۱/۵	۲/۴	۳/۹	۳۸/۶
Z0.1-L	۹۷/۹	۹۷	۰/۹	۲/۱	۳	۳۰/۴
Z0.15-L	۹۷/۹	۹۶/۶	۱/۳	۲/۱	۳/۴	۳۸/۴
E0.15-L	۹۷/۶	۹۴/۹	۲/۸	۲/۴	۵/۱	۵۳/۳
E0.25-L	۹۷/۷	۹۵/۳	۲/۵	۲/۳	۴/۷	۵۱/۳
E0.35-L	۹۷/۹	۹۶	۱/۹	۲/۱	۴	۴۶/۵

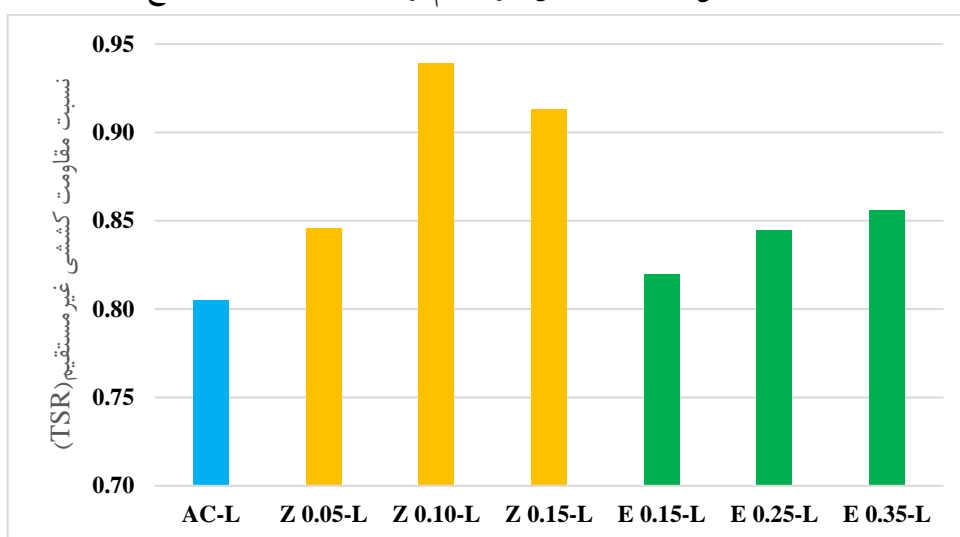
## ۲-۴. آزمایش کشش غیرمستقیم

نانومواد باعث بهبود پیوند میان سنگدانه‌ها می‌شوند. زیرا نانومواد باعث ایجاد لایه Si-O-Si روی سطح سنگدانه‌ها شده و یک پیوند قوی بین سنگدانه و قیر ایجاد می‌کنند که از نفوذ آب جلوگیری می‌شود. در نتیجه، باعث بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه می‌گردد. نمونه‌های اصلاح شده، مقاومت کششی بیشتری را در هر دو حالت خشک و اشباع از خود نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۹، با افزایش نانومواد، چسبندگی بین قیر و سنگدانه افزایش یافته و در نتیجه باعث بهبود مقاومت کششی می‌گردد.

همانطور که از نتایج آزمایش جوشان تگراس انتظار می‌رفت، بیشترین نسبت مقاومت کششی برای نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و پس از آن ۰/۳۵ درصد اوئینیک حاصل شد و در حالت کلی، زایکوترم در آسیب رطوبتی عملکرد بهتری نسبت به اوئینیک دارد (شکل ۱۰). با توجه به نتایج، زایکوترم تأثیر بیشتری نسبت به اوئینیک بر مقاومت کششی مخلوط دارد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که زایکوترم می‌تواند با اصلاح پیوند بین قیر و سنگدانه، مقاومت چسبندگی بین آنها را به مقدار بیشتری نسبت به اوئینیک افزایش دهد.



شکل ۹. مقاومت کشش غیرمستقیم برای دو حالت خشک و اشباع



شکل ۱۰. نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم

با نمونه شاهد تفاوت خاصی ندارد و در سایر مخلوطها افزایش قابل توجهی در مقدار نسبت مقاومت کششی دیده می‌شود. نمونه حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم بهترین عملکرد را نسبت به سایر نمونه‌ها، حتی نمونه حاوی بیشترین مقدار اوئیک (۰/۳۵ درصد)، داشته است.

در جدول ۸، نتایج تحلیل آماری روی نمونه‌ها به صورت دو به دو آورده شده است. در مقایسه دو به دو نمونه‌ها با یکدیگر، اکثر نمونه‌ها دارای تفاوت قابل توجهی می‌باشند. در مقایسه نمونه شاهد با سایر نمونه‌ها، به نظر می‌رسد که تنها عملکرد نمونه حاوی ۰/۱۵ درصد اوئیک

جدول ۸. تحلیل Tukey روی مقادیر نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم

<i>E0.35-L</i>	<i>E0.25-L</i>	<i>E0.15-L</i>	<i>Z0.15-L</i>	<i>Z0.1-L</i>	<i>Z0.05-L</i>	<i>AC-L</i>	
S	S	N	S	S	S	-	<i>AC-L</i>
N	N	S	S	S	-		<i>Z0.05-L</i>
S	S	S	S	-			<i>Z0.1-L</i>

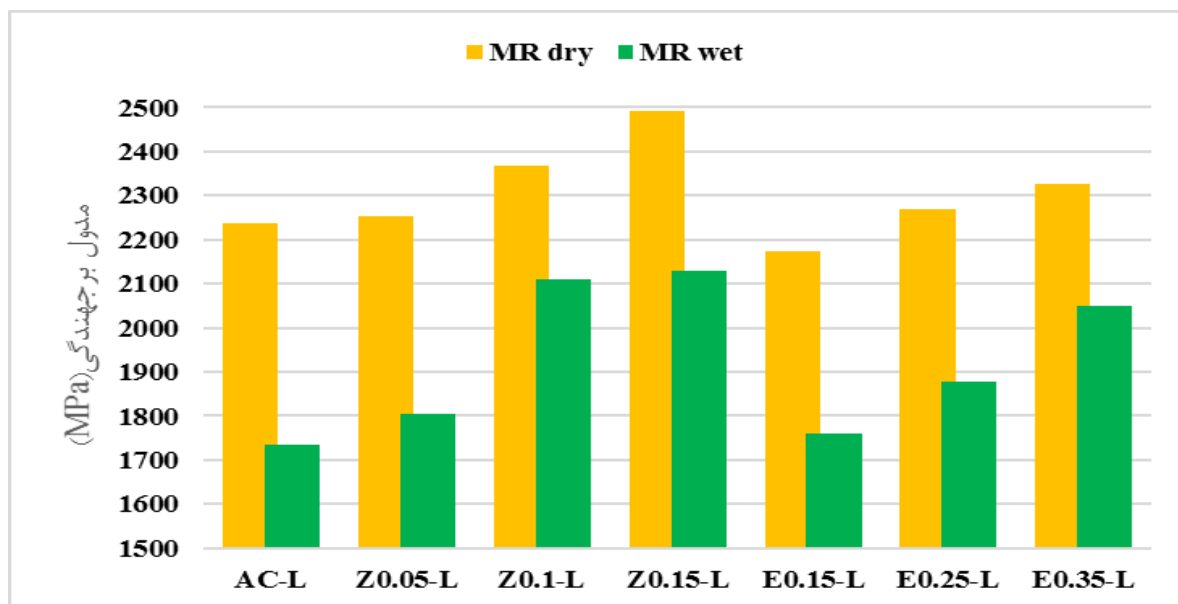
S	S	S	-	Z0.15-L
S	N	-		E0.15-L
N	-			E0.25-L
-				E0.35-L

S تفاوت معنی‌دار و N بدون تفاوت معنی‌دار

### ۳-۴. مدول برجهندگی

افزایش مقدار مدول برجهندگی می‌شود. زیرا افزایش نانومواد باعث بهبود پیوند بین قیر و سنگدانه و افزایش سختی نمونه می‌گردد که مدول برجهندگی بیشتری را نتیجه می‌دهد. شکل ۱۲ نسبت مدول برجهندگی برای مخلوط‌های ساخته شده در حالت اشباع به خشک را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی میزان پتانسیل عریان-شدگی مخلوط‌های آسفالتی از MRR استفاده شده است. بیشترین نسبت مدول برجهندگی برای نمونه‌های حاوی ۰/۱ درصد زایکوترم و ۰/۳۵ درصد اوئینیک می‌باشد.

مدول برجهندگی پاسخ‌سازی برحسب تنش‌های مکانیکی و کرنش‌های متناظر است و متغیر بسیار مهمی در رویکردهای طراحی مکانیکی برای سازه‌های روسازی است و با استفاده از آن ضخامت لایه‌های آسفالتی تعیین می‌شود. با تغییر در خواص قیر، مدول برجهندگی حساسیت بیشتری نسبت به مقاومت کششی از خود نشان می‌دهد. مدول برجهندگی در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزایش مقدار نانومواد (به جز نمونه E0.15) باعث



شکل ۱۱. تغییرات مدول برجهندگی نمونه‌های مختلف در حالت خشک و اشباع

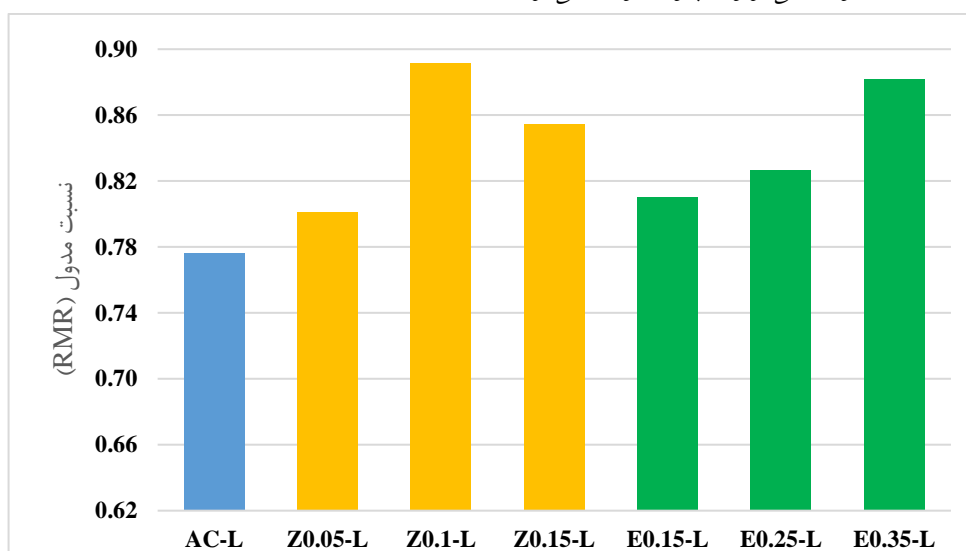
۰/۱ درصد زایکوترم و ۰/۳۵ درصد اوئینیک با وجود عدم تفاوت قابل توجه با یکدیگر، بهترین عملکرد را به ارمغان آورده‌اند. در حالت کلی، در اکثر نمونه‌های آسفالتی، تأثیر افزودنی‌ها نه تنها روی نمونه شاهد، بلکه در مقایسه‌های بین نمونه‌ای نیز اختلاف قابل توجهی ایجاد کرده است.

نتایج تحلیل آماری دو به دو روی نسبت مدول برجهندگی (جدول ۹) نشان می‌دهد که دو نمونه حاوی کمترین مقادیر افزودنی اوئینیک و زایکوترم (Z0.05-L و E0.15-L) نتوانسته‌اند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد مخلوط آسفالتی داشته باشند. در عوض، نمونه‌های دارای

جدول ۹. تحلیل Tukey روی مقادیر نسبت مدول برجهندگی

<i>E0.35-L</i>	<i>E0.25-L</i>	<i>E0.15-L</i>	<i>Z0.15-L</i>	<i>Z0.1-L</i>	<i>Z0.05-L</i>	<i>AC-L</i>	
S	S	N	S	S	N	-	<i>AC-L</i>
S	S	N	S	S	-	-	<i>Z0.05-L</i>
N	S	S	S	-	-	-	<i>Z0.1-L</i>
S	S	S	-	-	-	-	<i>Z0.15-L</i>
S	N	-	-	-	-	-	<i>E0.15-L</i>
S	-	-	-	-	-	-	<i>E0.25-L</i>
-	-	-	-	-	-	-	<i>E0.35-L</i>

*S* تفاوت معنی دار و *N* بدون تفاوت معنی دار

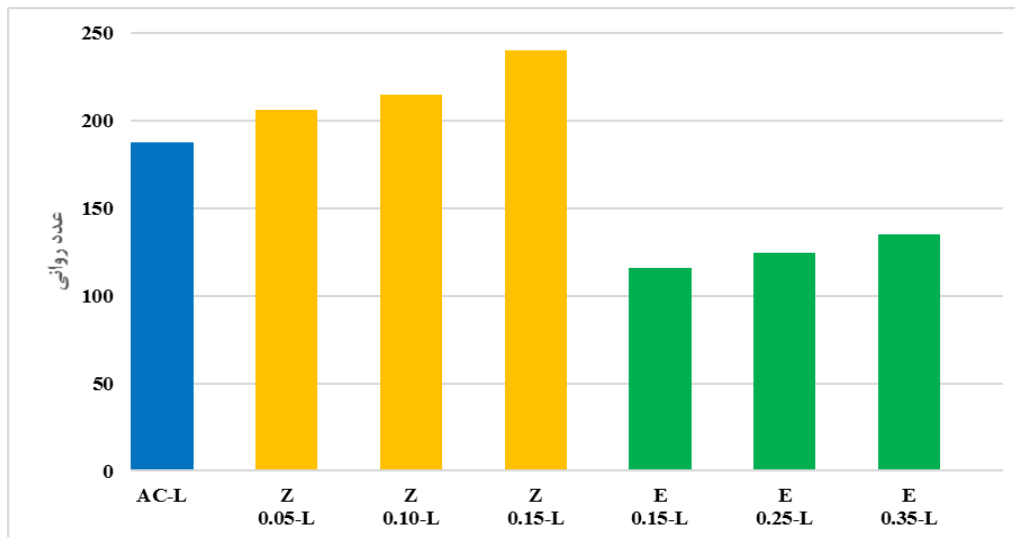


شکل ۱۲. نسبت مدول برجهندگی

#### ۴-۴. آزمایش خزش دینامیک

نرم افزار UTM نمودار کرنش تجمعی را در خروجی نشان می دهد. به دلیل نداشتن شرایط مهار جانبی نمونه ها که در واقعیت مخلوط آسفالتی از آن بهره می برد، با اعمال بار، تغییر مکان افزایش چشمگیری می یابد. با یافتن عدد روانی (نقطه تغییر شیب سریع نمودار کرنش تجمعی در ناحیه سوم) می توان مقاومت شیارشدگی نمونه ها را مورد

مقایسه قرار داد. شکل ۱۳، نتایج آزمایش خزش دینامیک را نشان می دهد. افزودن زایکوترم (۱۵/۰ درصد نسبت به وزن قیر) به مخلوط آسفالتی باعث بهبود مقاومت شیارشدگی شده است. زایکوترم با بهبود پیوند قیر و سنگدانه موجب شده است تا مخلوط اصلاح شده مقاومت بیشتری تحت بار خزشی داشته باشد. ولی استفاده از اوئیک باعث کاهش مقاومت شیارشدگی شده است.



شکل ۱۳. عدد روانی

## ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی اوئینیک و زایکوترم بر حساسیت رطوبتی و عملکرد دینامیک آسفالت ماستیک درشت‌دانه اصلاح شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش آب جوشان نشان داد که استفاده از زایکوترم و اوئینیک باعث کاهش درصد پیکسل‌های سفید می‌شود. این بدین معناست که این مواد به عنوان افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی در کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی موفق عمل می‌کنند.

- مدول برجهنگی مخلوط‌های اصلاح شده با زایکوترم و اوئینیک (به ترتیب به میزان ۰/۱ و ۰/۳۵ درصد وزن قیر) بیشترین مقادیر را دارند که این نشان از افزایش میزان باربری این مخلوط‌ها ناشی از پیوند بهتر میان سنگدانه‌ها توسط قیر است که در نهایت منجر به کاهش ضخامت روسازی در طراحی‌ها می‌شود.

- زایکوترم و اوئینیک به ترتیب در مقادیر ۰/۱ و ۰/۳۵ درصد وزنی قیر، باعث افزایش ۱۵ و ۱۳ درصدی مدول برجهنگی نسبت به نمونه شاهد شده‌اند.

- سنگ‌های آهکی از کلسیت و دولومیت تشکیل شده است که دارای چسبندگی خوبی می‌باشند و با قیر پیوند قوی الکترواستاتیک برقرار می‌کنند. مصالح آهکی دارای درصد کمی  $\text{SiO}_2$  می‌باشند. در نتیجه، زایکوترم و اوئینیک اثر کمتری بر مصالح آهکی دارند، زیرا این مصالح در حالت کلی دارای مقاومت رطوبتی مناسبی می‌باشند.

- زایکوترم و اوئینیک به ترتیب در مقادیر ۰/۱ و ۰/۳۵ درصد وزن قیر، با بهبود چسبندگی قیر و سنگدانه، مقاومت کششی غیرمستقیم را به میزان ۱۶ و ۶ درصد در مصالح آهکی نسبت به نمونه فاقد افزودنی افزایش داده‌اند. در نتیجه، تأثیر اوئینیک بسیار ناچیز است و صرفه اقتصادی ندارد.

- افزودن زایکوترم (۰/۱۵ درصد نسبت به وزن قیر) به مخلوط آسفالتی باعث بهبود مقاومت

- اوئیک هرچند به عنوان یک افزودنی جدید باعث بهبود مقاومت رطوبتی و تغییر شکل دائم می-شود، اما با این حال به لحاظ ارزیابی های انجام شده و تحلیل آماری، نانوزایکوترم با وجود قدمت بیشتر، مقاومت بیشتری را نشان داده است.
- شیارشدهگی شده است. زایکوترم با بهبود پیوند قیر و سنگدانه موجب شده است تا مخلوط اصلاح شده مقاومت بیشتری تحت بار خزشی داشته باشد.

## ۶. مراجع

- حیاتی. پ.، وامق، م. و باباگلی، ر. ۱۳۹۵. "بررسی آزمایشگاهی عملکرد مخلوط های آسفالتی SMA اصلاح شده با پلیمر در برابر پدیده حساسیت رطوبتی". هشتمین همایش قیر و آسفالت ایران.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. ۱۳۹۰. آئین نامه روسازی راه های ایران، نشریه ۲۳۴.
- عامری، م.، وامق، م.، روح الامینی، ح. و بمانا، ک. ۱۳۹۴. "ارزیابی حساسیت رطوبتی در مخلوط های آسفالتی گرم (HMA) حاوی نانورس". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۶(۴): ۶۱۳-۶۲۶.
- عامری، م.، قدمی، ا.، وامق، م. و چاوشیان، س. ف. ۱۳۹۵. "تأثیر الیاف (مصنوعی و طبیعی) بر مخلوط آسفالت SMA". هشتمین همایش و نمایشگاه قیر و آسفالت ایران.
- عامری، م.، امیری هرمزکی، م.، وامق، م. و خبیری، م. م. ۱۳۹۸. "ارزیابی مخلوط های آسفالتی گرم (WMA) با مواد افزودنی شیمیایی و آلی". فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۰(۴): ۹۸۷-۱۰۰۲.
- Ameri, M., Mohammadi, R., Vamegh, M. and Molayem, M. 2017. "Evaluation the effects of nanoclay on permanent deformation behavior of stone mastic asphalt mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 156: 107-113.
- Australian Standard. 2015. "Determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt dynamic creep test". AS 2891.12.1, Standard Australian, Sydney, Australia.
- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Khaki, A. M. and Mirabdolazimi, S. M. 2015. "Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an antistripping additive". *Constr. Build. Mater.*, 8: 60-68.
- Hesami, S., Ameri, M., Goli, H. and Akbari, A. 2015. "Laboratory investigation of moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing steel slag aggregates". *Int. J. Pavement Eng.*, 16: 745-759.
- Imaninasab, R. and Joodaki, S. 2016. "Performance evaluation of polyamine antistripping additives". *Proc. Inst. Civ. Eng.- Constr. Mater.*, 172(3): 155-163.
- Kringos, N. and Scarpas, A. 2008. "Physical and mechanical moisture susceptibility of asphaltic mixtures". *Int. J. Solid Struct.*, 45(9): 2671-2685.
- Mansourian, A. and Gholamzadeh, S. 2017. "Moisture susceptibility of hot mix asphalt containing asphalt binder modified with nanocomposite". *Road Mater. Pavement Design*, 18(6): 1434-1447.
- Mirzababaei, P. 2016. "Effect of zycotherm on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations". *Constr. Build. Mater.* 116: 403-412.
- Moghadas Nejad, F., Azarhoosh, A., Hamed, G. and Azarhoosh, M. 2012. "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Constr. Build. Mater.* 31: 384-388.
- National Cooperative Highway Research Program. 2000. "Compatibility of a test for moisture-induced damage with superpave volumetric mix design". NCHRP Report 444.
- National Cooperative Highway Research Program. 2002. "Simple performance test for superpave mix design". NCHRP Report 465, Transportation Research Board, National Academies Press, Washington D.C.
- Xiao, F. and Amirkhanian, S. N. 2010. "Effects of liquid antistripping additives on rheology and moisture susceptibility of water bearing warm mixtures". *Constr. Build. Mater.*, 24(9): 1649-1655.