

## ارزیابی حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه گرم اصلاح شده با نانو $TiO_2$ و گرانول لاستیکی

مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا ماهپور<sup>\*</sup>، استادیار، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
مجتبی خدادادی، دانش آموخته دکتری، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
فریدون مقدس‌نژاد، استاد، گروه راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>\*</sup>پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a\_mahpour@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۸

صفحه ۷۰-۵۵

### چکیده

حساسیت رطوبتی از جمله معایب روسازی نیمه گرم به شمار می‌رود که محققان در تحقیقات اخیر، برای رفع آن از افزودنی‌های مناسب از جمله مواد زائد استفاده می‌کنند. در این پژوهش نیز جهت کاهش مشکل مذکور، از مواد زائد دور ریختنی (گرانول لاستیکی) به همراه یک افزودنی نانو به نام تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ ) استفاده شد تا دو جنبه زیست‌محیطی و عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه گرم مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نمونه‌هایی با ۳،۱ و ۵٪ وزنی از قیر ۶۰/۷۰ با نانو  $TiO_2$  اصلاح شده و فرآیند آن با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) کنترل گردید. همچنین مقادیر ۱۰، ۲۰٪ وزنی از مصالح سنگی ریزدانه سیلیسی (عبوری از الک ۸ و مانده روی ۵۰) با گرانول‌های لاستیکی به صورت ترکیبی با قیرهای خالص و اصلاح‌شده ساخته شدند. دمای تراکم و اختلاط قیرها با استفاده از آزمایش ویسکوزیته چرخشی (RV) در دو دمای ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. جهت ارزیابی حساسیت رطوبتی نمونه‌ها، دو معیار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) و نسبت مدول برجهنگی (RMR) طی سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان محاسبه شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن نانو  $TiO_2$  به قیر، به تنهایی باعث بهبود ۱۶٪ مقاومت در برابر رطوبت شده اما استفاده از گرانول‌های لاستیکی موجب کاهش این مقاومت به میزان ۴٪ می‌شود. طبق این نتایج، جهت بهبود کارایی مخلوط حاوی گرانول لاستیکی از منظر دو شاخص TSR و RMR می‌توان برای جبران مافات از افزودنی نانو  $TiO_2$  بهره گرفت. از این رو، در بهترین حالت، جهت استفاده از ۱۰٪ گرانول‌های لاستیکی، ۳٪ از این نانو مواد لازم است. با در نظر گرفتن این رویکرد، هم جنبه اقتصادی-زیست‌محیطی و هم جنبه عملکردی مخلوط آسفالتی نیمه گرم مطلوب خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی نیمه گرم، نانو مواد، گرانول لاستیکی، ویسکوزیته چرخشی، سیکل‌های ذوب-یخبندان

### ۱-مقدمه

مکانیکی، بتواند باعث کاهش دمای ساخت و عمل‌آوری مخلوط آسفالتی شود. مخلوط‌های آسفالتی با توجه به دمای تولید، به ۴ دسته اصلی تقسیم می‌شوند که شامل: مخلوط آسفالتی گرم با درجه حرارت تولیدی ۱۵۰ الی ۱۹۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط آسفالتی نیمه گرم با درجه حرارت تولیدی

از جمله صنایع آلوده‌کننده محیط‌زیست، زیرساخت‌های حمل و نقل بوده که بیش‌ترین سهم آلودگی این صنایع، به ساخت جاده‌ها برمی‌گردد. استفاده از روش‌ها و افزودنی‌های مناسب از ملزومات تولید مخلوط‌های آسفالتی سازگار با محیط زیست بوده که در عین حفظ خصوصیات

بهبود عملکرد مصالح آهکی در مقایسه با مصالح سیلیسی چشم‌گیر بوده که علت آن به آب‌دوست بودن این نوع از مصالح برمی‌گردد. هیچ یک از نمونه‌های ساخته‌شده با مصالح سیلیسی، حداقل‌های لازم حساسیت رطوبتی را کسب نکردند. فخری و همکاران اثر دو افزودنی نانومواد زی‌کوترم و زایکوسویل بر خواص عملکردی قیر ۸۵/۱۰۰ را مطالعه کردند (Ayazi et al., 2017). طبق نتایج این تحقیق، بهبود شرایط اختلاط، کاهش دمای مخلوط آسفالتی و افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی از مزیت‌های استفاده از این افزودنی‌ها بود. غفارپور و خدایی در مطالعه‌ای با اضافه کردن نانو رس به قیر و انجام آزمایش مقاومت مارشال و ITS و مدول برجهندگی ( $M_f$ )، به این نتیجه رسیدند که مقاومت و مدول برجهندگی و تنش کشش غیرمستقیم مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده افزایش یافته است (Ghaffarpour Jahromi and Khodaii, 2009). در مطالعه‌ای دیگر، حامدی و همکاران اثر نانو  $\text{CaCO}_3$  را بر روی خرابی رطوبتی مخلوط آسفالتی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه بیان می‌کند که استفاده از نانو  $\text{CaCO}_3$  باعث افزایش چسبندگی قیر و مصالح سنگی شده و همچنین مخلوط آسفالتی حاوی این افزودنی در برابر خرابی رطوبتی مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط کنترلی از خود نشان داده است (Hamedi et al., 2016). همچنین حامدی در مطالعه دیگری با بکارگیری نانو  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  برای اصلاح قیر و استفاده از روش انرژی آزاد سطحی، به این نتیجه رسید که قیرهای اصلاح‌شده انرژی جداشدگی را کاهش می‌دهند و در نتیجه مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد (Mahpour et al., 2022). علاوه بر این، اکبری و مدرس اثر نانو رس (NC) و نانو آهک (NL) را بر دوام مخلوط آسفالتی در برابر سیکل ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان داد که افزودن NC و NL، نسبت مقاومت کششی و مدول برجهندگی را افزایش می‌دهد و در نتیجه پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد (Akbari and Modarres, 2017).

نانو  $\text{TiO}_2$  نیز یکی از نانو موادی می‌باشد که در دهه اخیر مطالعاتی در زمینه استفاده از آن در مخلوط‌های آسفالتی انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. آذرهوش و همکاران با اصلاح قیر بوسیله نانو  $\text{TiO}_2$  و انجام تست کشش غیرمستقیم خستگی بر روی مخلوط آسفالتی به این

۱۰۰ الی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، مخلوط آسفالتی متعادل با درجه حرارت تولیدی ۶۰ الی ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مخلوط آسفالتی سرد با درجه حرارت تولیدی ۰ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد اشاره کرد (EAPA, 2010; Vaitkus et al., 2009). بنابراین مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، در مقایسه با مخلوط‌های آسفالتی گرم با دمای ۲۰ الی ۴۰ درجه پایین‌تر تولید می‌شوند. از مزیت‌هایی که در تولید آسفالت نیمه‌گرم وجود دارد، می‌توان به مواردی چون: کاهش انرژی مورد نیاز برای تولید مخلوط، افزایش سرعت ساخت روسازی و افزایش فاصله حمل مخلوط آسفالت نیمه‌گرم (بدلیل کاهش دمای تراکم)، سلامت بیشتر کارگران بدلیل کاهش تولید گازهای سمی و گازهای گلخانه‌ای اشاره کرد. بالعکس، معایبی نیز در تولید این نوع آسفالت وجود دارد که به مواردی چون: حساسیت رطوبتی بیشتر به دلیل دمای عمل‌آوری پایین‌تر و عدم ایجاد پوشش کافی غشاء قیر در سطح مصالح سنگدانه‌ای اشاره نمود (You and Goh, 2010; Zaumanis, 2008).

خرابی رطوبتی از سال ۱۹۷۰ میلادی مورد توجه محققان قرار گرفت و طبق مطالعات گذشته، علت خرابی بسیاری از روسازی‌ها به عامل رطوبت برگشته که در طی دو مکانیزم کاهش چسبندگی و پیوستگی این خرابی رخ می‌دهد (Lottman, 2001).

فاصله مکانی زیاد مصالح سنگی مرغوب از محل اجرای روسازی، و بالتبع افزایش چشم‌گیر هزینه حمل آن‌ها، باعث شده تا استفاده از مواد ضدعریان‌شدگی در پروژه‌ها توجیه‌پذیر شود. این مواد، ضعف چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را افزایش داده و باعث بهبود دوام مخلوط می‌شوند. برای این منظور به دو طریق از مواد ضدعریان‌شدگی استفاده می‌شود: ۱- پوشش مصالح سنگی با ایجاد یک عامل، مانند اضافه کردن آهک به سنگدانه. این عامل باعث شده تا بار الکتریکی سطح سنگدانه معکوس شود و سطح انرژی آن کاهش یابد. ۲- کاهش سطح انرژی قیر با اعمال بار الکتریکی مخالف سطح سنگدانه‌ها، مانند اضافه‌کردن مواد ضد عریان‌شدگی مایع به قیر (Subrata, 2004). نانو مواد از جمله این مواد هستند که توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در تحقیقی اثر زی‌کوترم بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم با استفاده از استاندارد AASHTO T283 و همچنین مدول برجهندگی مورد بررسی قرار گرفت. میزان

لاستیکی نیز یکی از منابع تولید فراوان دور ریختنی‌هاست. طبق مطالعات پیشین، دو رویکرد تر و خشک برای استفاده از این ضایعات در روسازی وجود دارد. بکارگیری پودر لاستیک به عنوان اصلاح‌کننده قیر، در مطالعات زیادی ارایه شده (e.g. Tajdini et al., 2019; Poovaneshvaran et al., 2020; Wang et al., 2020; Hu et al., 2020; Kocak et al., 2020) اما استفاده از آن در صنعت با مشکلات زیادی از قبیل تهیه مخازن همزن قیر با دور برش بالا، مشکلات دو فازی شدن و غیره رو به رو است. از این رو سعی می‌شود تا استفاده از آن به صورت خشک و گرانول مورد بررسی قرار گیرد. افزودن گرانول لاستیکی به مخلوط آسفالتی باعث تغییر طرح اختلاط شده، به طوری که افزایش ۱ الی ۲ درصدی در میزان قیر بهینه مخلوط ایجاد می‌شود (Cetin, 2013). کریستیان و همکاران در مطالعه‌ای با تغییر درصد قیر مصرفی و جایگزینی با گرانول لاستیکی به دنبال بهترین طرح اختلاط مخلوط آسفالتی از نظر عملکردی بودند (Plati et al., 2019). نوری عبدالحسن و همکاران، با استفاده از تکنولوژی CT اسکن نشان دادند که استفاده از گرانول لاستیکی ریزدانه‌تر موجب کاهش اندازه خخل و فرج موجود در مخلوط آسفالتی می‌شود (Hassan et al., 2015). در مطالعات ایری و همکارانش (Airey et al., 2003) و پینهیرو و همکاران (Pinheiro et al., 2003) با افزایش مقدار ضایعات لاستیکی در مخلوط آسفالتی، مدول برجهنگی آن افزایش یافته است. در مطالعه ایوارز و همکارانش (Hernández Olivares et al., 2009)، مخلوط آسفالتی حاوی گرانول لاستیکی، مقاومت شیارافتادگی بیش‌تری نسبت به مخلوط کنترلی کسب کرده بود. لی و همکاران (Lee et al., 2008) و فونتس و همکاران (Fontes et al., 2010) نشان دادند که استفاده از گرانول لاستیکی در مخلوط آسفالتی، باعث افزایش عمر خستگی آن می‌شود ولی باعث شده تا مقاومت خزشی آن نسبت به نمونه شاهد کمتر گردد. در مطالعات استروپ و همکاران (Stroup et al., 1996) و گوودا و همکارانش (Gowda et al., 1996)، آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های حاوی گرانول لاستیکی در دمای پایین و دمای محیط انجام شد. طبق نتایج آن‌ها با افزایش درصد جایگزینی گرانول، مقاومت کششی کاهش یافت. چو و لی به مطالعه دو نوع گرانول لاستیکی با اندازه‌های مختلف پرداختند که نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که حساسیت رطوبتی این نوع مخلوط‌ها

نتیجه رسیدند که عمر خستگی مخلوط اصلاح شده نسبت به مخلوط کنترلی افزایش قابل توجهی داشته است (Mahpour et al., 2023). در مطالعه دیگر آذرهوش و همکاران، اثر نانو  $TiO_2$  بر چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی بررسی کردند. نتایج روش SFE این تحقیق بیان می‌کند که افزودن این نانو مواد، چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی را زیاد کرده است. بنابراین با افزایش مولفه بازی قیر و کاهش مولفه اسیدی قیر، چسبندگی مذکور را افزایش خواهد داد (Azarhoosh et al., 2018). همچنین، شفافبخش و همکاران، به مطالعه رفتار خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که عمر خستگی و تغییر شکل ماندگار مخلوط آسفالتی حاوی نانو  $TiO_2$ ، نسبت به مخلوط آسفالتی اصلاح‌نشده بهبود یافته است (Shafabakhsh et al., 2014). گونگ و همکاران اثر توأمان نانو  $TiO_2$  و  $CaCO_3$  را بر عملکرد مخلوط آسفالتی طی سیکل‌های ذوب-یخبندان مورد ارزیابی قرار دادند که بیانگر بهبود خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی بوده است (Gong et al., 2018). خواص فیزیکی و رئوژیکی قیر اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  توسط گونای و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت (Günay et al., 2020). آزمایش‌های تعیین درجه عملکردی و آزمایش عملکرد دمای بالا نشان از بهبود خواص رئوژیکی قیر اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  می‌باشد. اثر این ماده بر خواص عملکردی دمای پایین قیر توسط ژانگ و همکاران با استفاده از آزمایش تیرچه خمشی قیر در دمای پائین BBR، اسکن الکترونی SEM و آزمایش FTIR در دو حالت پیرنشده و پیرشده مورد بررسی قرار گرفت (Xie et al., 2020). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بهبود خواص در دمای پائین برای قیر اصلاح‌شده، حتی در حالت پیرشده کسب شده است. پائولو و همکاران نیز تاثیر این نانو را بر خواص عمر خستگی (آزمایش LAS) و خواص شیارافتادگی (آزمایش MSCR) قیر ۶۰/۷۰ بررسی کردند که نتایج نشان دهنده‌ی بهبود عمر خستگی، شیارافتادگی و همچنین بحث پیرشدگی قیر می‌باشد (Filho et al., 2019).

علاوه بر بحث نانومواد، استفاده از مواد بازیافتی و دور ریختنی (صنعتی و غیرصنعتی)، از جمله مباحث پراهمیت و کاربردی در دنیای امروزی محسوب می‌شود. ضایعات

شد، اما گرانول لاستیکی ممکن است باعث کاهش آن شود. از این رو با انجام آزمایش‌های مختلف، سعی می‌شود تا بتوان این تضعیف عملکرد بوجود آمده را با استفاده از نانو مواد جبران کرد اما در عین حال، از این مواد زائد در روسازی راه استفاده کرد.

## ۲- مواد و مصالح

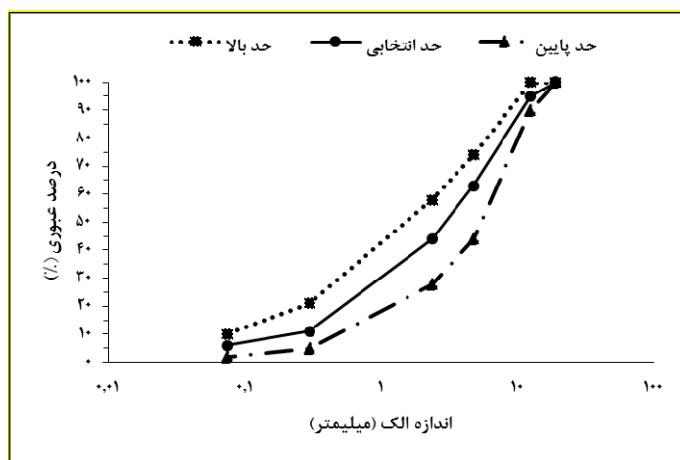
مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل مصالح سنگی، قیر، نانو تیتانیوم دی‌اکسید و گرانول لاستیکی است که در ادامه به معرفی خواص و ویژگی‌های آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- مصالح سنگی

مصالح سنگی سیلیسی رودخانه‌ای از دپوی کارخانه آسفالت آکام، واقع در جاده شهریار تهیه شده است. این نوع مصالح آب‌دوست بوده و بدلیل حساسیت بیش‌تر به وجود رطوبت، این نوع مصالح بجای مصالح آهکی انتخاب شد تا بتوان تاثیر مواد افزودنی را برای مصالح سنگی حساس‌تر بررسی کرد. دانه‌بندی این مصالح برای ساخت مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی پیوسته و حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلی‌متر، مطابق نشریه ۲۳۴ (آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران) و طبق شکل ۱ انجام شد.

تقریباً مشابه مخلوط شاهد بوده اما مقاومت شیارافتادگی آن‌ها در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، بسیار بهتر از مخلوط شاهد شده است (Chiu et al., 2007). کومار و همکاران ماده افزودنی EPDM و گرانول لاستیکی را به صورت ترکیبی در مخلوط آسفالتی بکار گرفتند که نتایج بیانگر بهبود در خواص مدول، شیارافتادگی و مقاومت کششی شده است (Kumar et al., 2020). در سال ۲۰۲۰ نیز یک مطالعه جامع در رابطه با استفاده از گرانول لاستیکی ارائه شده است که بیانگر اهمیت استفاده از این مواد دور ریختنی در سازه‌های عمرانی مانند بتن، مخلوط آسفالتی و خاک است (Mohajerani et al., 2020).

در یک جمع‌بندی کلی، استفاده از مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم (WMA) تاکنون تکامل یافته، به طوری که از افزودنی‌های زیاد با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت برای بهبود عملکرد این نوع مخلوط بکارگرفته شده است. با این وجود ارزیابی تاثیر برخی افزودنی‌های جدید مانند نانو مواد به منظور بهبود کیفیت روسازی‌های آسفالتی ساخته شده به روش نیمه‌گرم ضروری به نظر می‌رسد. همچنین با توجه به حجم تولید ضایعات لاستیکی، می‌توان گرانول آن را در مخلوط آسفالتی بکار گرفت. بنابراین در این پژوهش سعی می‌شود تا با در نظر گرفتن یکی از رایج‌ترین خرابی‌های WMA، به بررسی حساسیت رطوبتی مخلوط حاوی دو افزودنی نانو تیتانیوم دی‌اکسید و گرانول لاستیکی، به ترتیب به عنوان افزودنی قیر و جایگزین بخشی از مصالح سنگی پرداخته شود. فرضیه این تحقیق با توجه به مطالعات گذشته این است که استفاده از نانو مواد منجر به بهبود دوام خواهد



شکل ۱. دانه‌بندی انتخاب شده برای ساخت مخلوط آسفالتی

## ۲-۲- گرانول لاستیکی

۲۰٪ انتخاب گردید که برای تحلیل حساسیت آن، درصد ترکیبی ۰، ۱۰ و ۲۰٪ برای استفاده از آن انتخاب گردید.

### ۲-۳- قیر

قیر مصرفی در این مطالعه، دارای درجه نفوذ ۶۰/۷۰ (PG64-22) بوده که از کارخانه نفت پاسارگاد تهیه شده و مشخصات آن در جدول ۱ ارایه شده است.

گرانول لاستیکی با یک دانه‌بندی مشخص از کارخانه‌ای در اطراف شهر تهران تهیه گردید که در این پژوهش، حداکثر اندازه این ضایعات، ۴/۷۵ میلی‌متر (عبوری از الک ۴) و حداقل اندازه آن‌ها ۰/۳ میلی‌متر می‌باشد. ۶۰٪ این گرانول‌ها مانده روی الک ۸ و ۴۰٪ آن نیز مانده روی الک شماره ۵۰ می‌باشد. این گرانول‌ها دارای وزن مخصوص ۱/۰۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشند. با توجه به مرور ادبیات و پژوهش‌های مرتبط، حداکثر میزان مصرف این مواد زائد برای

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی در این پژوهش

| مقدار | حدود نشریه ۲۳۴ | استاندارد آزمایش | خصوصیات   |
|-------|----------------|------------------|---|
| ۱/۰۴  | ۱/۰۱-۱/۰۶      | ASTM D70         | وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (گرم بر سانتی‌متر مکعب) |
| ۶۵    | ۷۰-۶۰          | ASTM D5          | درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (۰/۱ میلی‌متر)          |
| ۵۳    | ۵۶-۴۹          | ASTM D36         | نقطه نرمی (سانتی‌گراد)                                  |
| ۱۰۶   | بزرگ‌تر از ۱۰۰ | ASTMD113         | انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد (سانتی‌گراد)                |
| ۳۰۱   | بزرگ‌تر از ۲۵۰ | ASTM D92         | نقطه اشتعال (سانتی‌گراد)                                |
| ۳۱۶   | -              | ASTM D70         | نقطه احتراق (سانتی‌گراد)                                |

## ۲-۴- نانو $TiO_2$

سیمان و ... از آن استفاده می‌شود (ASTM D3513). مشخصات مربوط نانو  $TiO_2$  استفاده‌شده در این پژوهش، در جدول ۲ ارایه شده است.

نانو دی‌اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ ) یک ماده غیر ارگانیک به شکل پودر سفید رنگ بوده که کاربرد فراوانی در صنعت دارد. معمولاً در تولیداتی چون پلاستیک، سرامیک، شیشه

جدول ۲. مشخصات نانو  $TiO_2$  استفاده‌شده در این مطالعه

| مقدار   | ویژگی                                |
|---------|--------------------------------------|
| $TiO_2$ | فرمول ملکولی                         |
| ۴۵-۱۰   | سطح ویژه مترمربع بر گرم              |
| سفید    | رنگ                                  |
| ۵       | اندازه ذرات (nm)                     |
| ۰/۴۶    | وزن مخصوص حجمی گرم بر سانتی‌متر مکعب |
| کروی    | شکل ذرات                             |

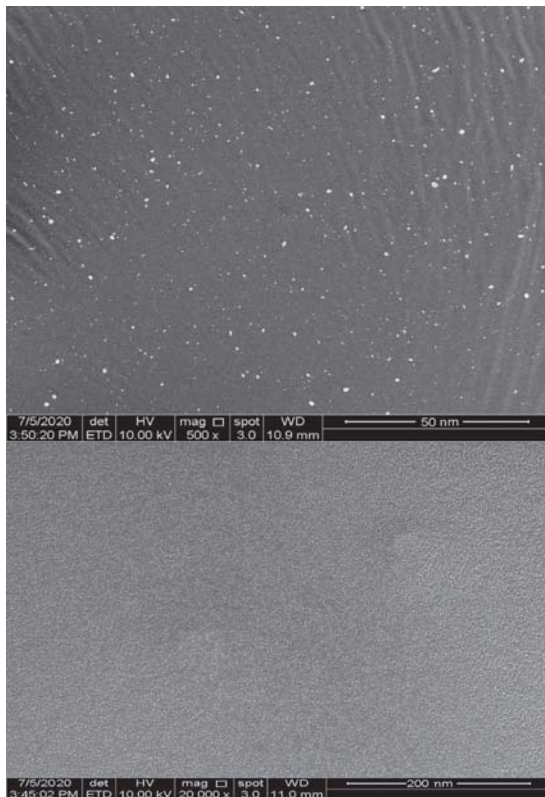
## ۲-۵- اصلاح قیر و آماده‌سازی گرانول لاستیکی

(Cheng et al., 2002). در این تحقیق، نانو  $TiO_2$  با درصد‌های وزنی ۰، ۱٪، ۳٪ و ۵٪، با قیر ترکیب و

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که محدوده مناسب برای استفاده از نانو  $TiO_2$  ۱ الی ۸ درصد وزنی قیر می‌باشد

یکنواخت نانو مواد در قیر اصلاح شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی یا همان FESEM استفاده شد تا ذرات نانو درون حجم قیر رویت گردد. نتایج در دو بزرگنمایی مختلف در شکل ۲ ارائه شده که نشان از پخش یکنواخت مواد افزودنی در قیر می باشد.

به ترتیب T0، T1، T3 و T5 نام گذاری شدند. به منظور اصلاح قیر با نانو  $TiO_2$ ، ابتدا قیر تا دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد حرارت دیده و سپس با اعمال دور برش بالای ۸۰۰۰ دور بر دقیقه، عمل اختلاط قیر با نانو مواد به مدت ۱ ساعت انجام می شود. برای حصول اطمینان از پراکندگی



شکل ۲. تصاویر FESEM از قیر اصلاح شده با ۵٪ نانو  $TiO_2$  در بزرگنمایی های مختلف

شده تعیین گردد. برای این منظور طبق استاندارد ASTM-D4402 و با دستگاه بروکفیلد، ویسکوزیته قیرها در دو دمای ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شد. سپس با کنترل محدوده ویسکوزیته برای دمای اختلاط و تراکم طبق استاندارد (۰/۱۵) الی (۰/۱۹) پاسکال ثانیه برای عمل اختلاط و (۰/۲۵) الی (۰/۳۱) پاسکال ثانیه برای عمل تراکم) این دو دما برای ساخت HMA تعیین شدند که نتایج آن در جدول ۳، ارائه شده است. با توجه به اینکه دمای اختلاط و تراکم WMA، به طور میانگین ۲۰ درجه سانتی گراد کمتر از HMA است، بنابراین از مقادیر این جدول، ۲۰ درجه سانتی گراد کم شد تا دماهای مربوط به ساخت و تراکم WMA به دست آید.

همانطور که ذکر گردید گرانول های لاستیکی در دو اندازهی مانده روی الک ۸ (عبوری از الک ۴) و مانده روی الک ۵۰، باید جایگزین بخشی از مصالح سنگی شوند. درصد جایگزینی گرانول های لاستیکی، برابر ۰، ۱۰ و ۲۰٪ وزنی مصالح سنگی بین الک ۴ و ۵۰ بوده و به ازای درصد جایگزینی، مصالح سنگی آن محدوده کم شده و بجای آن از گرانول استفاده می شود. نام گذاری این ترکیب از مصالح نیز به ترتیب G0، G10 و G20 تعیین گردید.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- دمای تراکم و اختلاط

باتوجه به افزودن نانو  $TiO_2$  به قیر و تغییر خواص آن، لازم است تا دمای تراکم و اختلاط هر کدام از قیرهای اصلاح

جدول ۳. مشخصات دمای تراکم و اختلاط بدست آمده برای قیرهای مختلف

| نام قیر        | مقدار نانو مواد (%) | دمای اختلاط | دمای تراکم |
|----------------|---------------------|-------------|------------|
| T <sub>0</sub> | ۰                   | ۱۵۲         | ۱۳۸        |
| T <sub>1</sub> | ۱                   | ۱۵۴         | ۱۴۱        |
| T <sub>3</sub> | ۳                   | ۱۵۸         | ۱۴۶        |
| T <sub>5</sub> | ۵                   | ۱۶۳         | ۱۵۳        |

در انتها، به منظور قرائت بهتر نتایج در بخش بعدی، نام‌گذاری نمونه‌های استفاده‌شده در جدول ۴ ارایه شده است. همانطور که ذکر گردید، حرف T بیانگر درصد

جدول ۴. نام‌گذاری ترکیبات مخلوط آسفالتی برای درصد نانو TiO<sub>2</sub> و درصد گرانول لاستیکی مختلف

| ترکیبات حاوی ۲۰٪ گرانول |           | ترکیبات حاوی ۱۰٪ گرانول |           | ترکیبات حاوی ۰٪ گرانول |           |
|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| درصد گرانول             | درصد نانو | درصد گرانول             | درصد نانو | درصد گرانول            | درصد نانو |
| T0G20                   | ۰         | T0G10                   | ۰         | T0G0                   | ۰         |
| T1G20                   | ۱         | T1G10                   | ۱         | T1G0                   | ۱         |
| T3G20                   | ۳         | T3G10                   | ۳         | T3G0                   | ۳         |
| T5G20                   | ۵         | T5G10                   | ۵         | T5G0                   | ۵         |

#### ۳-۲- درصد قیر بهینه

به منظور تعیین درصد قیر بهینه مخلوط آسفالتی، طرح اختلاط مارشال طبق استاندارد ASTM D1559 انتخاب گردید. افزودن نانو TiO<sub>2</sub> تاثیر چشم‌گیری بر این درصد نداشته و همان مقدر مصرفی در مخلوط شاهد، مبنای کار برای مخلوط آسفالتی حاوی نانو TiO<sub>2</sub> قرار گرفته است. این درحالیست که استفاده از گرانول لاستیکی موجب تغییر درصد قیر شد به طوری که این مقدار برای مخلوط حاوی ۰، ۱۰ و ۲۰٪ گرانول لاستیکی به ترتیب برابر ۵/۶، ۶/۰ و ۶/۳٪ شد.

(۱)

#### ۴-۲- تعیین پتانسیل حساسیت رطوبتی

جهت تعیین پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم، دو آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم و مدول برجهنگی با در نظر گرفتن ۳ تکرار انجام شد. در هر دو آزمایش، طبق استاندارد AASHTO-T283 نمونه‌ها به دو دسته تر و خشک تقسیم شده که نمونه‌های تر، تحت ۱، ۳ و ۵ سیکل ذوب و یخبندان قرار گرفتند. نمونه‌های مذکور دارای ۷٪ هوا بوده و مقاومت کششی غیرمستقیم آن‌ها از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times t}$$

به نمونه‌تر از رابطه ۲ به دست می‌آید که طبق استاندارد AASHTO-T283، این مقدار می‌بایست بیش‌تر از ۸۰٪ و مطابق نشریه ۲۳۴ ایران، بیش‌تر از ۷۵٪ باشد.

که در آن، ITS مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم (KPa)، P مقدار نیروی لحظه گسیختگی (N)، t ضخامت نمونه آسفالتی (میلی‌متر) و d قطر نمونه آسفالتی (میلی‌متر) است. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه خشک

$$TSR = \frac{ITS_{Wet}}{ITS_{Dry}} \times 100 \quad (۲)$$

غیرمستقیم و مدول برجهندگی بر روی نمونه‌های تر و خشک صورت گرفت که ابتدا آزمایش مدول برجهندگی، بدلیل غیرمخرب بودن روی نمونه‌ها انجام شد. این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM25 در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، با ۰/۱ ثانیه بارگذاری نیمه‌سینوسی و ۰/۹ ثانیه استراحت، ۱۰۰ سیکل اولیه یا کاندیشن، ۵ سیکل اصلی با اعمال بار حداکثر ۱۰۰۰ نیوتون و فرض ضریب پواسون ۰/۳۵ برای مخلوط آسفالتی انجام شد. نهایتاً مدول برجهندگی نمونه‌های خشک و تر مطابق رابطه (۳) تعیین گردید:

$$M_r = \frac{P(v+0.27)}{t \times \delta_h} \quad (۳)$$

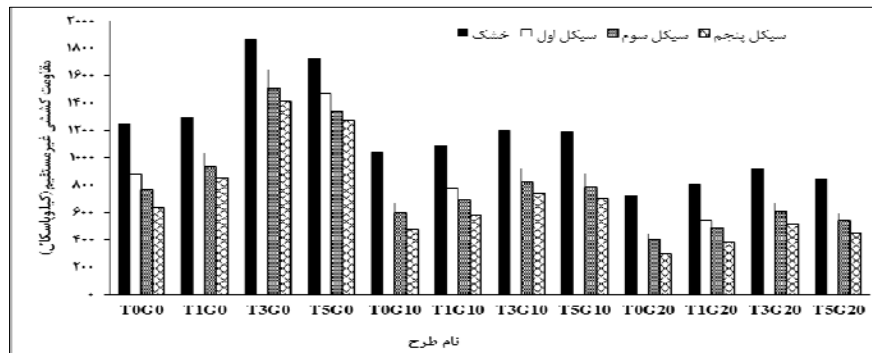
(میلی‌متر) است. همچنین شاخص RMR از رابطه ۴ قابل محاسبه است که هرچه مقدار آن بیش تر باشد، مقاومت نمونه مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت بیش تر خواهد بود:

$$RMR = \frac{M_{r_{Wet}}}{M_{r_{Dry}}} \times 100 \quad (۴)$$

جایگزینی گرانول لاستیکی در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم است.

#### ۱-۵- مقاومت کششی غیرمستقیم

نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک و تر در شکل ۳ در طی سیکل‌های مختلف برای سه تکرار نشان داده شده است.



شکل ۳. مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی در حالت خشک و تر طی سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان

که در آن، TSR نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (٪)،  $ITS_{wet}$  میانگین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های تر (KPa) و  $ITS_{dry}$  میانگین مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های خشک (کیلوپاسکال) است.

#### ۴-۵- مدول برجهندگی

مدول برجهندگی ( $M_r$ ) و نسبت مدول برجهندگی نمونه‌ی تر به خشک یا همان RMR، از دیگر شاخص‌های تعیین پتانسیل حساسیت رطوبتی بوده که می‌تواند مبنای قضاوت عملکرد مواد و مصالح در برابر رطوبت مختلف باشد. در این پژوهش هر دو تست مقاومت کششی

که در آن،  $M_r$  مدول برجهندگی (MPa)، P حداکثر مقدار نیروی سیکلی اعمالی به نمونه (N)،  $v$  ضریب پواسون مخلوط آسفالتی که برابر ۰/۳۵ فرض می‌شود،  $t$  ضخامت نمونه آسفالتی (میلی‌متر) و  $\delta_h$  جابجایی افقی نمونه آسفالتی

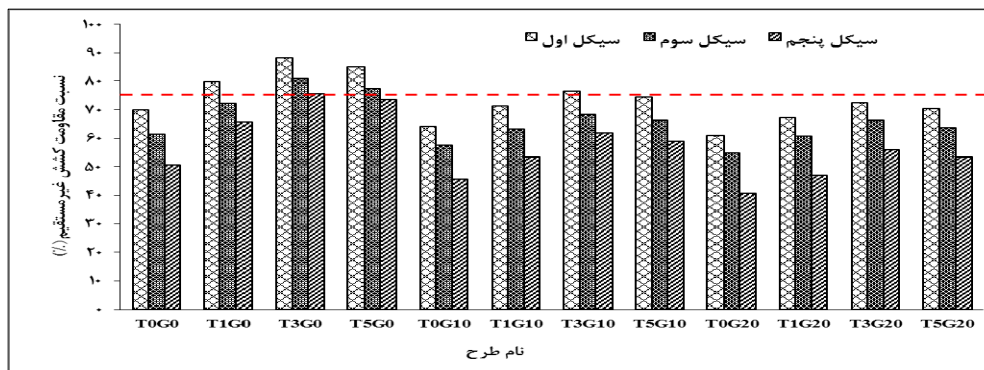
که در آن، RMR نسبت مدول برجهندگی (٪)،  $ITS_{wet}$  میانگین مدول برجهندگی نمونه‌های تر (مگاپاسکال) و  $ITS_{dry}$  میانگین مقدار مدول برجهندگی نمونه‌های خشک (مگاپاسکال) است.

#### ۵-۵- نتایج و تحلیل داده‌ها

در ابتدای این بخش مجدداً یادآوری می‌شود که حرف T بیانگر میزان نانو  $TiO_2$  موجود در قیر و حرف G درصد



نتیجه آن، تشدید در کاهش مقدار ITS خواهد بود. این درحالیست که با بهبود خواص قیر توسط نانو  $TiO_2$ ، این ضعف ایجادشده در مخلوط آسفالتی جبران می‌شود و در همه طرح‌های حاوی گرانول، افزودن نانو  $TiO_2$  باعث افزایش مقادیر ITS (البته تا ۳٪) شود. علاوه بر این، با افزایش تعداد سیکل ذوب و یخبندان، مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت به دلیل از دست دادن چسبندگی مخلوط آسفالتی و یا پیوستگی قیر بوده که ناشی از حضور بیش‌تر مخلوط در معرض رطوبت می‌باشد. با این حال، مقاومت کششی غیرمستقیم در تمامی نمونه‌های حاوی نانو  $TiO_2$  در حالت مرطوب بهبود یافته که علت آن افزایش چسبندگی در سطح تماس قیر و سنگدانه و پیوستگی در ضخامت قیری است. ادعای این مطلب نیز در مطالعه آذرهوش و همکاران به اثبات رسیده است. به علاوه، مقادیر TSR برای سیکل‌های اول تا پنجم محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان

۲۳۴ ایران را کسب کنند. افزایش درصد جایگزینی گرانول لاستیکی از ۱۰ به ۲۰٪ نیز موجب کاهش TSR شده که به دلیل عدم چسبندگی مناسب بین قیر و مصالح سنگی کل (گرانول و مصالح سیلیسی) اتفاق افتاده است. علاوه بر این می‌توان میزان کاهش TSR را در طی سیکل‌های مختلف برای مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم مورد بررسی قرار داد تا بتوان درکی از میزان مقاومت این طرح‌ها در برابر سیکل‌های متعدد ذوب و یخبندان کسب کرد. برای این منظور، کاهش TSR برای طرح‌های مختلفی از درصد جایگزین گرانول‌های لاستیکی، یعنی ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ به ترتیب در شکل‌های ۵ الی ۷ ارائه شده است.

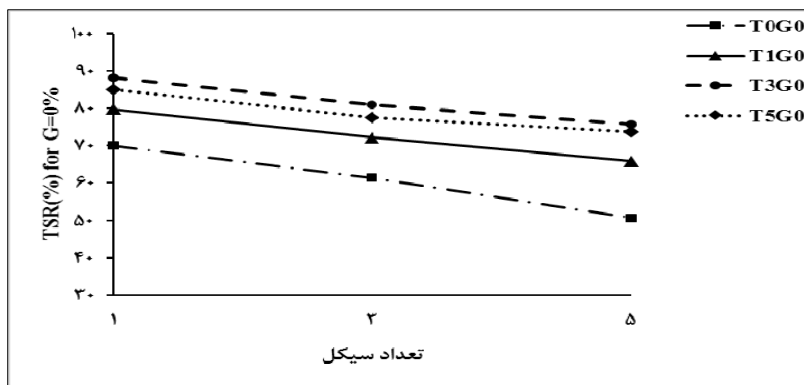
علت اعمال سیکل‌های متعدد ذوب و یخبندان، جهت بررسی دقیق‌تر تاثیر افزودنی نانو  $TiO_2$  و گرانول لاستیکی

همانطور که در شکل ۳ دیده می‌شود، افزودن نانو  $TiO_2$  موجب افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم بویژه در طرح بدون گرانول لاستیکی می‌شود. همچنین استفاده از گرانول لاستیکی به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی، موجب کاهش مقادیر ITS شده و به تدریج با اضافه شدن این درصد جایگزینی، مقادیر ITS نیز کاهش یافته‌اند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در تمامی سیکل‌های آزمایش، طرح‌های حاوی گرانول لاستیکی عملکرد ضعیف‌تری از خود نشان داده‌اند. گرچه با توجه به نتایج کسب‌شده در حالت خشک، چنین روندی دور از انتظار نبود. علت این امر این‌گونه می‌تواند تفسیر شود که بافت سطحی گرانول لاستیکی، مانند مصالح سنگی سیلیسی نبوده و توانایی زیادی برای جذب قیر را نداشته و در نتیجه باعث کاهش اصطکاک داخلی بین مصالح مخلوط آسفالتی شده و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط را کاهش داده است. سطح صاف گرانول موجب شده تا این ماده از چسبندگی مناسب با قیر برخوردار نبوده و

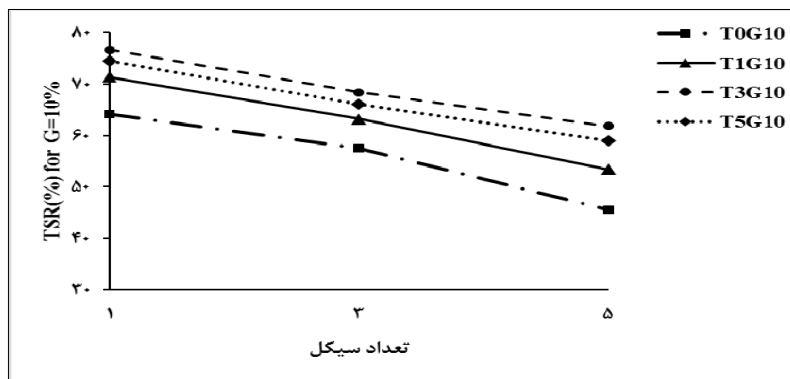
همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، اضافه کردن نانو  $TiO_2$  موجب بهبود چشم‌گیر حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم شده است. طبق نتایج این شکل، استفاده از مصالح سنگی سیلیسی در طرح اختلاط آسفالت باعث شده تا این مخلوط نتواند حداقل مقدار لازم برای نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (چه ۷۵٪ نشریه ۲۳۴ ایران و چه ۸۰٪ AASHTO T283) را کسب کند. از این‌رو استفاده از افزودنی در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم شاهد، علی‌الخصوص در مناطق بارانی امری ضروریست. طبق شکل ۴ در سیکل اول ذوب و یخبندان، تنها مخلوط‌های حاوی نانو  $TiO_2$  (یعنی طرح‌های T1G0، T3G0 و T5G0) و ترکیب ۱۰٪ گرانول لاستیکی با ۳ و ۵٪ نانو  $TiO_2$  (یعنی طرح‌های T5G10 و T3G10) توانسته‌اند ملزومات نشریه

سیکل‌های مختلف، این نوع مخلوط آسفالتی توانسته دوام بیش‌تری در برابر فرآیند ذوب و یخبندان از خود نشان دهد. با توجه به نزدیک‌بودن کاهش مقدار TSR در حالت ۰ و ۱۰٪ گرانول (یعنی ۱۷ و ۲۰ درصد) و همچنین تاثیر مثبت اصلاح‌کنندگی نانو  $TiO_2$  بر مخلوط آسفالتی حاوی ۱۰٪ گرانول لاستیکی، می‌توان توصیه کرد که به منظور حفظ مسائل زیست محیطی، بکارگیری ۱۰٪ از گرانول لاستیکی بجای مصالح سنگی سیلیسی توجیه‌پذیر است.

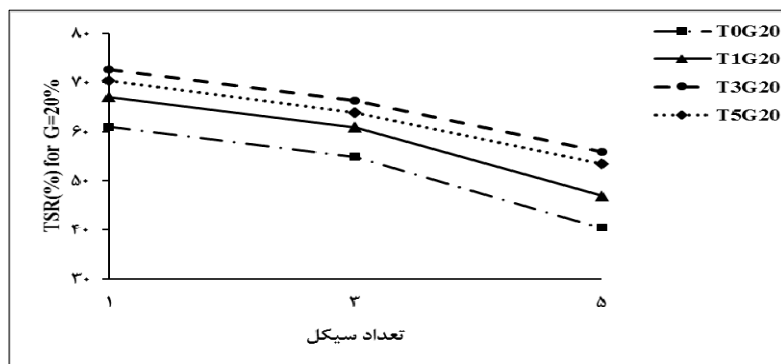
بر حساسیت رطوبتی بوده است. طبق نتایج شکل‌های ۵ الی ۷، کاهش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم برای طرح‌های مختلف به یک میزان نبوده است. مطابق شکل‌های مذکور، طرح‌های حاوی نانو مواد  $TiO_2$  دارای شیب کاهش کمیتری نسبت به مخلوط آسفالتی شاهد است. افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  موجب افزایش کندروانی قیر شده و در نتیجه باعث افزایش چسبندگی قیر به مصالح سنگی و افزایش پیوستگی در غشاء قیری می‌شود. بنابراین در طی



شکل ۵. نسبت TSR برای طرح‌های بدون گرانول لاستیکی



شکل ۶. نسبت TSR برای طرح‌های با ۱۰٪ گرانول لاستیکی

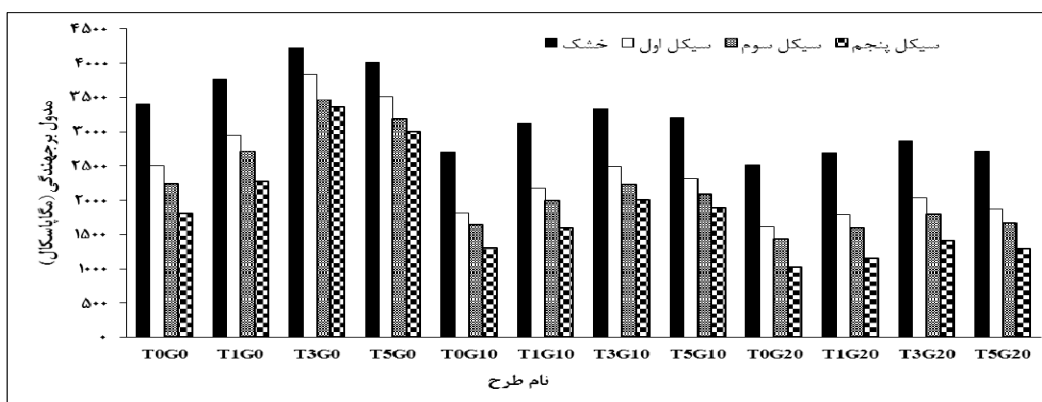


شکل ۷. نسبت TSR برای طرح‌های با ۲۰٪ گرانول لاستیکی

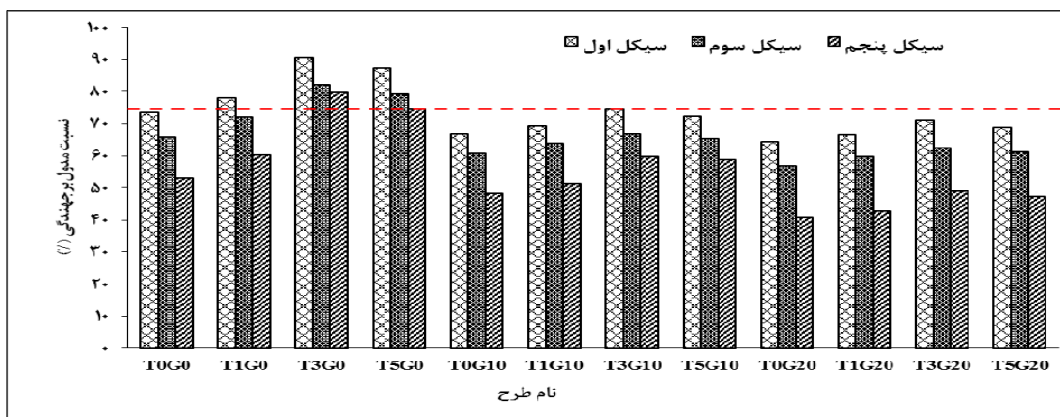
#### ۴-۲- مدول برجهندگی

گرفت. تحلیل دیگری که می‌توان از نتایج  $M_r$  داشت این است که افزایش این پارامتر در طراحی ضخامت لایه روسازی آسفالتی موثر بوده و می‌توان از منظر اقتصادی، افزایش هزینه ناشی از استفاده نانو مواد را با کاهش ضخامت لایه روسازی جبران نمود. علاوه بر این، مقادیر مربوط به نسبت مدول برجهندگی یا همان RMR برای سیکل‌های اول تا پنجم محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است.

در آزمایش دوم، یعنی مدول برجهندگی همانند آزمایش ITS، هر کدام از مجموعه نمونه‌های تر و خشک، با سه تکرار انجام شد. نتایج مدول برجهندگی نمونه‌های خشک و تر در شکل ۸ در طی سیکل‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج مدول برجهندگی در تمامی حالات خشک و تر نشان می‌دهد که افزودن ۳٪ نانو  $TiO_2$  باعث افزایش مدول برجهندگی می‌شود که در صورت مهم بودن مسائل زیست محیطی و بازیافت، می‌توان گرانول لاستیکی را به همراه ۳٪ نانو  $TiO_2$  جهت ساخت مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم کار



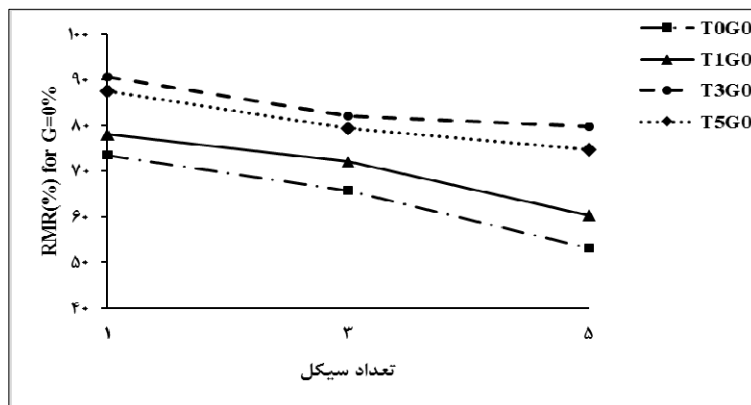
شکل ۸. مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی در حالت خشک و تر طی سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان



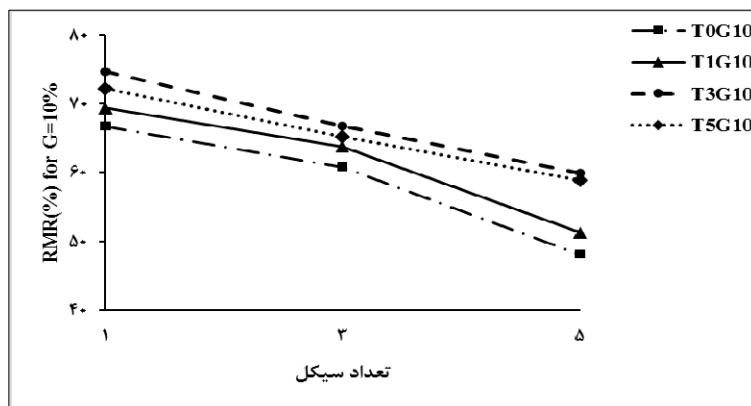
شکل ۹. نسبت مدول برجهندگی در سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان

ذوب و یخبندان، تنها ۳٪ و ۵٪ از نانو مواد خواهند توانست حداقل مقدار مورد نیاز برای شاخص حساسیت رطوبتی را طبق نشریه ۲۳۴ برآورده سازند. روند RMR برای طرح‌های مختلفی از درصد جایگزین گرانول‌های لاستیکی، یعنی ۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ ارائه شده است.

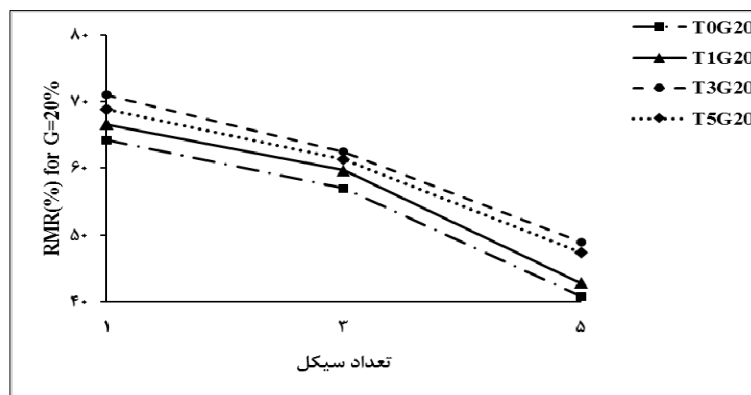
مطابق نتایج شکل ۹، اضافه کردن نانو  $TiO_2$  باعث افزایش پارامتر RMR و در نتیجه کاهش پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم شده است. مطابق این نتایج استفاده از حداقل مقدار افزودنی نانو  $TiO_2$ ، یعنی ۱٪، باعث شده تا مخلوط آسفالتی شرایط لازم برای کنترل حساسیت رطوبتی را کسب کند، به طوری که RMR آن در ۳٪ از نانو مواد بهترین پاسخ را ارائه کرده است. با افزایش تعداد سیکل



شکل ۱۰. نسبت RMR برای طرح‌های بدون گرانول لاستیکی



شکل ۱۱. نسبت RMR برای طرح‌های با ۱۰٪ گرانول لاستیکی



شکل ۱۲. نسبت RMR برای طرح‌های با ۲۰٪ گرانول لاستیکی

RMR در سیکل‌های مختلف ذوب-یخبندان مشاهده می‌شود و بیانگر این است که استفاده از گرانول لاستیکی، حساسیت رطوبتی بیش‌تری نسبت به تعدد دوره‌های ذوب و یخبندان دارد. این نتایج نشان می‌دهند که طرح حاوی ۱۰٪ گرانول نسبت به طرح ۲۰٪ روند نزولی کمتری دارد و نمی‌توان حتی با بکارگیری مواد اصلاح‌کننده مانند نانو  $TiO_2$ ، از ۲۰٪ گرانول لاستیکی استفاده کرد. همانند نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، کاهش مقدار RMR در

در طرح بدون گرانول یعنی شکل ۱۰، مخلوط آسفالتی حاوی ۳٪ و ۵٪ نانو  $TiO_2$  مقاومت بیش‌تری در برابر افزایش تعداد سیکل ذوب و یخبندان از خود نشان داده‌اند. این درحالی است که کاهش RMR برای مخلوط شاهد و ۱٪ نانو  $TiO_2$  دارای شیب اکیداً نزولی است. افزایش مقاومت در برابر شرایط رطوبتی مختلف، ناشی از افزایش ویسکوزیته و بهبود چسبندگی و پیوستگی قیر اصلاح‌شده می‌باشد. مطابق نتایج شکل‌های ۱۱ و ۱۲، روند نزولی شدید

-استفاده از نانو  $TiO_2$  باعث افزایش چشم‌گیر مقادیر ITS می‌شود. افزایش ویسکوزیته قیر اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  موجب افزایش پیوستگی قیر و همچنین بهبود چسبندگی قیر به مصالح سنگی شده است. از این رو با افزایش چسبندگی کل مخلوط آسفالتی، آن را در برابر سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان مقاوم کرده است.

-نتایج نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (TSR) در نمونه‌های اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  حد قابل قبول نشریه ۲۳۴ ایران را کسب کرده اما در طی سیکل سوم و پنجم، تنها مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح‌شده با ۳٪ و ۵٪ توانسته‌اند حد ۷۵٪ را کسب کنند.

-استفاده از گرانول لاستیکی موجب کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم شده و تنها در مخلوط ترکیبی با ۳٪ نانو مواد  $TiO_2$  (در سیکل اول) توانسته TSR معادل ۷۵٪ را کسب کند. بافت سطحی متفاوت با مصالح سنگی سیلیسی و همچنین صاف بودن سطوح این ماده باعث شده تا چسبندگی آن به قیر کاهش یابد. در نتیجه چسبندگی کل مخلوط کاهش یافته و منجر به کاهش مقاومت مخلوط در برابر رطوبت شده است. طبق نتایج TSR، جهت کاستن اثرات منفی گرانول لاستیکی بر عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی، استفاده از ۳٪ نانو  $TiO_2$  همراه با ۱۰٪ جایگزینی گرانول لاستیکی توصیه می‌شود.

-مدول برجهندگی ( $M_r$ ) مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با نانو  $TiO_2$  نسبت به مخلوط شاهد افزایش چشم‌گیری داشته که می‌تواند با کاهش ضخامت روسازی، هزینه افزودن نانو مواد به قیر را جبران کند. این درحالیست که استفاده از گرانول لاستیکی به دلیل ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تر (هرچند برگشت‌پذیر) مدول برجهندگی کمتری داشته است.

-بررسی نسبت مدول برجهندگی (RMR) به عنوان شاخص عملکردی دیگر مخلوط نشان می‌دهد که در طی سیکل اول، مخلوط‌های حاوی نانو  $TiO_2$  حداقل RMR یعنی ۷۵٪ را کسب کرده‌اند اما استفاده از گرانول لاستیکی تنها در یک طرح (۱۰٪ گرانول و ۳٪ نانو  $TiO_2$ ) توانسته به این مقدار برسد.

-بررسی نرخ کاهش TSR و RMR نشان می‌دهد که استفاده از گرانول لاستیکی موجب تسریع فرآیند اضمحلال در مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم شده است. میزان افت TSR و RMR برای طرح‌های ۰٪ و ۱۰٪ بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و می‌توان ادعا کرد که استفاده از ۱۰٪ گرانول از این دیدگاه قابل قبول است. بنابراین در مجموع ارزیابی عملکرد ۱۲ طرح مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم، بهترین ترکیب از نقطه‌نظر فنی-زیست محیطی، ترکیب ۱۰٪ گرانول و ۳٪ نانو  $TiO_2$  خواهد بود.

حالت ۰ و ۱۰٪ گرانول (یعنی ۱۹ و ۲۰ درصد) به یکدیگر بسیار نزدیک هستند. بنابراین مطابق نتایج بهبود RMR می‌توان استفاده از ۱۰٪ گرانول لاستیکی به همراه ۳٪ از نانو  $TiO_2$  را در ساخت مخلوط‌های آسفالتی نیمه‌گرم توصیه کرد. با در نظر گرفتن این رویکرد، هم مقدار افزودنی نانو مواد جهت اصلاح قیر در بهینه‌ترین حالت قرار می‌گیرد و هم عملکرد مطلوبی از آن حاصل خواهد شد. مضاف بر این‌که کاهش مصالح سنگی مصرفی و استفاده از لاستیک ضایعاتی، در حفظ منابع طبیعی و مباحث توسعه پایدار، کمک شایانی به صنعت روسازی خواهد کرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش جهت کاهش پتانسیل حساسیت رطوبتی مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم از دو ماده اصلاح‌کننده قیر (نانو مواد  $TiO_2$ ) و جایگزین مصالح سنگی (گرانول لاستیکی) استفاده شد. ابتدا قیر با استفاده از دستگاه برش بالا، توسط نانو مواد اصلاح گردید و میزان پراکندگی ذرات نانو در حجم قیر با تصویربرداری FESEM مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اصلاح قیر، به منظور تعیین دمای تراکم و اختلاط هر کدام از قیرها، آزمایش ویسکوزیته چرخشی (RV) در دو دما انجام شد. سپس براساس استاندارد مارشال ASTM D1559، درصد قیر بهینه طرح‌های مختلف حاوی قیر اصلاحی و گرانول‌های لاستیکی تعیین گردید. در انتها به منظور ارزیابی پتانسیل حساسیت رطوبتی، دو آزمایش متداول عملکردی یعنی مقاومت کششی غیرمستقیم طبق استاندارد لاتمن اصلاح‌شده (AASHTO T283) و مدول برجهندگی طبق استاندارد ASTM D4123-82 در طی سیکل‌های مختلف ذوب و یخبندان انجام گردید. دو شاخص نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم و نسبت مدول برجهندگی برای هر کدام از طرح‌ها محاسبه و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه خلاصه‌ای از دست‌آوردهای این پژوهش ارائه می‌گردد.

-طبق روش طرح اختلاط مارشال، اصلاح قیر با نانو  $TiO_2$  تاثیر چشم‌گیری بر طرح اختلاط مخلوط آسفالتی نیمه‌گرم نداشته ولی استفاده از گرانول لاستیکی، باعث تغییر درصد قیر بهینه می‌شود.

-اصلاح قیر با نانو  $TiO_2$  باعث افزایش ویسکوزیته قیر در دو دمای ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد شده که این باعث افزایش دمای تراکم و اختلاط مخلوط آسفالتی شده‌است. ارزیابی فرآیند اصلاح قیر نیز از طریق تصویربرداری FESEM نیز بیانگر پخش یکنواخت نانو مواد درون حجم قیر می‌باشد.

## ۶-مراجع

- Airey, G.D., Rahman, M.M. and Collop, A.C., (2003), "Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method", *International Journal of Pavement Engineering*, 4(2), pp.105-119.
- Akbari, A. and Modarres, A., (2017), "Effect of clay and lime nano-additives on the freeze-thaw durability of hot mix asphalt", *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), pp.646-669.
- Ayazi, M.J., Moniri, A. and Barghabany, P., (2017), "Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives", *Petroleum Science and Technology*, 35(9), pp.890-895.
- Azarhoosh, A., Moghaddas Nejad, F. and Khodaii, A., (2018), "Evaluation of the effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the adhesion between aggregate and asphalt binder in hot mix asphalt", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(8), pp.946-961.
- Cetin, A., (2013), "Effects of crumb rubber size and concentration on performance of porous asphalt mixtures", *International Journal of Polymer Science*.
- Cheng, D., Little, D.N., Lytton, R.L. and Holste, J.C., (2002), "Surface energy measurement of asphalt and its application to predicting fatigue and healing in asphalt mixtures", *Transportation Research Record*, 1810(1), pp.44-53.
- Chiu, C.T. and Lu, L.C., (2007), "A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber", *Construction and Building Materials*, 21(5), pp.1027-1033.
- D3513, (2003), "Gradation specification for dense asphalt mixtures", West Conshohocken, PA: ASTM International.
- EAPA European Asphalt Pavement Association, (2010), "The Use of Warm Mix Asphalt", EAPA position paper, pp.1-13.
- Filho, P.G.T.M., Rodrigues dos Santos, A.T., Lucena, L.C.D.F.L. and de Sousa Neto, V.F., (2019), "Rheological evaluation of asphalt binder 50/70 incorporated with titanium dioxide nanoparticles", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(10), p.04019235.
- Fontes, L.P., Trichês, G., Pais, J.C. and Pereira, P.A., (2010), "Evaluating permanent deformation in asphalt rubber mixtures. *Construction and Building Materials*, 24(7), pp.1193-1200.
- Ghaffarpour Jahromi, S. and Khodaii, A., (2009), "Identification effect of nanoclay on engineering properties of asphalt mixtures", *AUT Journal of Modeling and Simulation*, 41(1), pp.49-57.
- Gong, Y., Bi, H., Tian, Z. and Tan, G., 2018. Pavement performance investigation of nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and basalt fiber composite modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles, *Applied Sciences*, 8(12), p.2581.
- Gowda, G.V., Hall, K.D. and Elliott, R.P., (1996), "Arkansas experience with crumb rubber modified mixes using Marshall and strategic highway research program Level I design methods", *Transportation research record*, 1530(1), pp.25-33.
- Günay, T. and Ahmedzade, P., (2020), "Physical and rheological properties of nano-TiO<sub>2</sub> and nanocomposite modified bitumens", *Construction and Building Materials*, 243, p.118208.
- Hamed, G.H., Nejad, F.M. and Oveisi, K., (2016), "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide", *Materials and Structures*, 49, pp.1165-1174.
- Hassan, N.A., Airey, G.D., Yusoff, N.I.M., Hainin, M.R., Putrajaya, R., Abdullah, M.E. and Aziz, M.M.A., (2015), "Microstructural characterization of dry mixed rubberized asphalt mixtures", *Construction and Building Materials*, 82, pp.173-183.
- Hernández-Olivares, F., Witoszek-Schultz, B., Alonso-Fernández, M. and Benito-Moro, C., (2009), "Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process", *International Journal of Pavement Engineering*, 10(4), pp.277-288.
- Hu, D., Pei, J., Li, R., Zhang, J., Jia, Y. and Fan, Z., (2020), "Using thermodynamic parameters to study self-healing and interface properties of crumb rubber modified asphalt based on molecular dynamics simulation", *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14, pp.109-122.
- Kocak, S. and Kutay, M.E., (2020), "Fatigue performance assessment of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using viscoelastic continuum damage analysis and AASHTO Ware pavement ME design, *Construction and Building Materials*, 248, p.118658.
- Kumar, A., Choudhary, R. and Kumar, A., (2021), "Characterization of asphalt binder modified with ethylene-propylene-diene-

- monomer (EPDM) rubber waste from automobile industry”, *Road Materials and Pavement Design*, 22(9), pp.2044-2068.
- Lee, S.J., Akisetty, C.K. and Amirkhanian, S.N., (2008), “The effect of crumb rubber modifier (CRM) on the performance properties of rubberized binders in HMA pavements”, *Construction and Building Materials*, 22(7), pp.1368-1376.
- Lottman, R.P., (2001), “Predicting moisture induced damage to asphaltic concrete”, report No.192, transportation research board, and national research Council, Washington DC, NCHRP.
- Mahpour, A., Alipour, S., Khodadadi, M., Khodaii, A. and Absi, J., (2023), “Leaching and mechanical performance of rubberized warm mix asphalt modified through the chemical treatment of hazardous waste materials”, *Construction and Building Materials*, 366, p.130184.
- Mahpour, A., Khodadadi, M., Shahraki, M. and Moghadas Nejad, F., (2022), “Evaluation of Moisture Durability of Modified Asphalt Mixture with Nano-Titanium Dioxide Using Surface Free Energy Method”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(8), pp.2831-2850.
- Mohajerani, A., Burnett, L., Smith, J.V., Markovski, S., Rodwell, G., Rahman, M.T., Kurmus, H., Mirzababaei, M., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S. and Maghool, F., (2020), “Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review”, *Resources, Conservation and Recycling*, 155, p.104679.
- Pinheiro, J. and Soares, J., (2003), “The effect of crumb rubber and binder-rubber interaction time on the mechanical properties of asphalt-rubber mixtures (Dry process). In Proceedings asphalt rubber 2003 conference, Brasilia, Brazil, pp. 707-718.
- Plati, C., Cliatt, B. and Loizos, A., (2020), “Preliminary study on the mechanical properties of an asphalt mixture containing RAR modifiers. In Proceedings of the 5th International Symposium on Asphalt Pavements & Environment (APE) 5, Springer International Publishing, pp. 204-213.
- Poovaneshvaran, S., Hasan, M.R.M. and Jaya, R.P., (2020), “Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behavior”, bonding, and resistance to shear, *Construction and Building Materials*, 234, p.117357.
- Shafabakhsh, G.H., Mirabdolazimi, S.M. and Sadeghnejad, M., (2014), “Evaluation the effect of nano-TiO<sub>2</sub> on the rutting and fatigue behavior of asphalt mixtures”, *Construction and building materials*, 54, pp.566-571.
- Stroup-Gardiner, M., Chadbourn, B. and Newcomb, D.E., (1996), “Babbitt, Minnesota: case study of pretreated crumb rubber modified asphalt concrete”, *Transportation Research Record*, 1530(1), pp.34-42.
- Subrata K.D, (2004), “Evaluation of asphalt aggregate bond and stripping potential”, A thesis in civil engineering, Texas tech university, Texas, USA.
- Tajdini, M., Arjroodi, A.R. and Mahpour, A.R., (2019), “Investigation of Parameters Interface of Asphaltic Concrete and Sand”, *Journal of Transportation Research*, 16(2), pp.189-198.
- Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A. and Perveneckas, Z., (2009), “Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania”, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), pp.80-86.
- Wang, Q.Z., Wang, N.N., Tseng, M.L., Huang, Y.M. and Li, N.L., (2020), “Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China”, *Journal of cleaner production*, 249, p.119411.
- Xie, X., Hui, T., Luo, Y., Li, H., Li, G. and Wang, Z., (2020), “Research on the properties of low temperature and anti-UV of asphalt with nano-ZnO/nano-TiO<sub>2</sub>/copolymer SBS composite modified in high-altitude areas”, *Advances in Materials Science and Engineering*, pp.1-15.
- You, Z. and Goh, S.W., (2008), “Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study”, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 1(1), pp.34-40.
- Zaumanis, M., (2010), “Warm mix asphalt Investigation”, PhD Thesis, Riga Technical University, Kgs. Lyngby, Denmark.

# Investigation the Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Modified with Nano-TiO<sub>2</sub> and Waste Rubber Granules

*Alireza Mahpour, Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.*

*Mojtaba Khodadadi, Ph.D., Transportation Engineering Group, Department of Civil and Environment Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*Fereidoon Moghadas Nejad, Professor, Transportation Engineering Group, Department of Civil and Environment Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.*

*E-mail: a\_mahpour@sbu.ac.ir*

Received: March 2023- Accepted: August 2023

## **ABSTRACT**

Moisture damage is one of the disadvantages of warm mix asphalt. Recently, researchers use appropriate additives such as waste materials to address this issue. This study aims to overcome the moisture sensitivity of warm-mix asphalt (WMA) using additives such as nanomaterials as well as waste rubber granules. Bitumen (60/70) with a total weight of 1, 3, and 5% of Nano-TiO<sub>2</sub> as well as 0, 10, and 20% of rubber granules by total weight of granite aggregate. The mixing and compaction temperature of bitumens were determined using a rotational viscosity test (RV). The optimal bitumen percentage was determined using the Marshall method. The results showed that the Nano-TiO<sub>2</sub> has a small effect on this value, but the use of rubber granules has changed this percentage. To assess the moisture susceptibility of mixtures, indirect tensile strength test and resilient modulus test were used, and two criteria of indirect tensile strength ratio (TSR) and resilient modulus ratio (RMR) were calculated to compare the performance of the mixtures through the different freeze-thaw cycles. The results of experiments show that the addition of Nano-TiO<sub>2</sub> to bitumen alone improves moisture resistance, but the use of rubber granules reduces this resistance. According to the results of this study, to improve the efficiency of the mixture containing rubber granules from the perspective of the TSR index, Nano-TiO<sub>2</sub> should be used. For this purpose, the minimum required percentage of Nano-TiO<sub>2</sub>, to replace 10% of rubber granules, is 3%. From the RMR index point of view, all mixtures modified with Nano-TiO<sub>2</sub>, as well as the design containing 10% rubber granules, will pass the limit of Iranian regulation and will be acceptable in terms of moisture susceptibility.

**Keywords:** Warm-Mix Asphalt, Nano-Material, Rubber Granules, Rotational Viscosity Test, Different Freeze-Thaw Cycles