Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir
Online ISSN : 3060-7620
Razi University

Investigating the effect of nanoclay on the mechanical properties of asphalt cold recycling using bitumen emulsions

Seyed Sadegh Nasseralavi[1]✉, Mohammad Reza Nozari Gilan[2]

1.Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Vali Asr Rafsanjan University, Kerman, Iran, E-mail: ss.naseralavi@vru.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Electronic Department, Tehran, Iran.
E-mail: ssna60@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2024-08-16
Received in revised form
2024-11-08
Accepted
2024-11-22
Available online
2024-12-23

Keywords:
asphalt cold recycling,
nano additives,
bitumen emulsions,
fatigue resistance,
asphalt quality

ABSTRACT

To investigate the effect of nano-clay on the fatigue properties of cold recycled asphalt mixtures and explore its potential to enhance the mechanical performance of these materials. The study involved adding nano-clay to cold recycled asphalt mixtures in varying proportions. A four-point bending test was employed to evaluate the fatigue properties and assess the impact of different nano-clay percentages on the performance of the mixtures.

The addition of nano-clay significantly enhanced the fatigue properties of cold recycled asphalt mixtures when used in appropriate amounts. However, percentages exceeding one percent led to a reduction in fatigue resistance, highlighting the importance of optimizing additive proportions. Nano-clay is a promising additive for improving the mechanical properties of cold recycled asphalt mixtures, particularly fatigue resistance. However, precise control over the additive quantity is crucial, as excessive amounts may adversely affect performance. These findings provide valuable insights for optimizing cold recycling processes and guiding future research.

Cite this article: Nasseralavi, Seyed Sadegh, & Nozari Gilan, Mohammad Reza. (2024). Investigating the effect of nanoclay on the mechanical properties of asphalt cold recycling using bitumen emulsions. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 1(2), 34-46. DOI: 10.22126/amcen.2024.11397.1033

© The Author(s).
Publisher: Razi University
DOI: 10.22126/amcen.2024.11397.1033

Introduction

Cold in-place recycling (CIR) is a sustainable and innovative technique for rehabilitating asphalt pavements. This method addresses environmental concerns by significantly reducing the consumption of natural resources, project costs, energy use, and air pollution. CIR involves milling and pulverizing existing asphalt layers, with or without underlying base layers, and then processing the materials directly on-site. The reclaimed material is mixed with bituminous binders such as emulsion or foamed bitumen, and additives like cement, lime, or fly ash may be introduced to enhance the mixture's mechanical properties. The resulting recycled mixture is laid and compacted without the need for heating, creating a structurally sound pavement layer. CIR is often completed with a final asphalt or surface seal layer to accommodate traffic demands.

One of the primary challenges in CIR is achieving optimal performance in terms of durability and mechanical properties. Traditional bitumen binders may not always provide the desired results, especially in recycled mixtures that often have compromised material properties. To address these issues, researchers have explored the use of additives that can improve the performance of both the binder and the recycled asphalt mixture.

Nanotechnology, with its ability to manipulate materials at the molecular level, has introduced promising solutions to these challenges. Nano additives, such as nano-clay, nano-silica, and nano-lime, are increasingly being studied for their effectiveness in modifying asphalt binders and mixtures. Nano-clay, in particular, has gained attention due to its unique ability to improve mechanical properties like fatigue resistance, stiffness, and resistance to deformation. The interaction between nano-clay particles and the asphalt matrix enhances compatibility and performance, even with minimal quantities of the additive.

Studies on nano-clay in asphalt mixtures have demonstrated improvements in fatigue resistance, stiffness, and rutting performance. However, the effect of nano-clay in CIR mixtures remains an area of interest. This study aims to evaluate the mechanical performance of CIR mixtures modified with nano-clay, focusing on key properties such as fatigue resistance, dynamic creep, resilient modulus, and Marshall Stability. By identifying the optimal dosage of nano-clay, this research seeks to contribute to more durable, sustainable, and cost-effective pavement rehabilitation methods.

Method

This study investigates the impact of nano-clay on the mechanical properties of cold-recycled asphalt using bitumen emulsion. The materials used include reclaimed asphalt aggregate, nano-clay, limestone aggregate, and anionic bitumen emulsion (SS-1). Detailed properties of each material and the methodologies for their evaluation are as follows:

- Moisture Content of Recycled Aggregates: The moisture content of reclaimed asphalt aggregates was measured following ASTM C136 and ASTM C137 standards. Samples were dried and weighed at specific intervals, and the moisture

content was calculated using the formula and the average moisture content was 0.684%.

- Binder Content of Recycled Aggregates: The binder content was determined following AASHTO TP53-95 and calculated as 6.03%.
- Aggregate Gradation: After binder removal, gradation was analyzed per ASTM C117 and C136. The gradation results (Table 2) were evaluated against standard requirements. Limestone aggregates were used to correct the gradation when necessary.
- Bitumen Emulsion Properties: An SS-1 anionic bitumen emulsion was used, offering long-term workability without requiring solvents. Its viscosity, stability, and residual binder penetration values are detailed in Table 3. While effective, its slow breaking time was noted as a disadvantage.
- Nano-Clay Characteristics: Montmorillonite nano-clay (Cloisite 15A) with specific structural properties (1 nm thickness and 70-150 nm width) was employed. Detailed specifications are summarized in Table 4.
- Dynamic Creep Test: This test evaluates the rutting performance of asphalt mixtures by analyzing accumulated strain under repeated loading. The UTM5 device was used with semi-sinusoidal loading at 0.5 Hz. The results highlighted three strain phases: initial, stabilized, and accelerated deformation.
- Resilient Modulus Test: Resilient modulus was assessed using the UTM5 device following ASTM D4123. This parameter indicates the elastic response of asphalt mixtures under loading conditions.

The findings provide a comprehensive evaluation of material properties and performance metrics, forming a basis for understanding the influence of nano-clay on the durability and mechanical performance of cold-recycled asphalt mixtures.

Results

This study used Marshall Stability, dynamic creep, and resilient modulus tests to evaluate the mechanical properties of cold-recycled asphalt mixtures with nano-clay additives. Key findings include:

Optimal Bitumen and Water Content: The optimal bitumen content for the control sample was determined to be 3.4%, with an optimal water content of 3.51%. For mixtures containing 2%, 4%, and 6% nano-clay, optimal bitumen and water contents slightly increased (Tables 8 & 9).

Marshall Stability Results: Adding nano-clay up to 4% enhanced Marshall stability. A 2% addition increased stability by 1.6%, while 4% resulted in a 4.4% improvement. Beyond 4%, no further improvement was observed, indicating 4% as the optimal nano-clay dosage.

Dynamic Creep Test (Flow Number): The addition of 2% nano-clay increased the flow number by 41.2%, demonstrating significant improvement in resistance to permanent deformation. However, higher dosages (4% and 6%) reduced the flow number by 12.1% and

17.1%, respectively, compared to 2% nano-clay. Despite this, all mixtures with nano-clay performed better than the control sample.
Resilient Modulus Results: The resilient modulus increased with higher nano-clay percentages. A 2% addition resulted in a 6.8% increase, 4% yielded a 10% increase, and 6% achieved an 18.6% improvement compared to the control sample. This indicates that nano-clay enhances the stiffness and elasticity of asphalt mixtures.

Conclusions

Nano-clay improves the mechanical properties of recycled asphalt mixtures. The optimal performance is achieved at 4% nano-clay for stability and at 2% for creep resistance. Increasing nano-clay consistently enhances the resilient modulus, suggesting its potential for structural applications in pavement layers. Based on the conducted experiments, the effects of nano-clay addition on the mechanical properties of cold-recycled asphalt with bitumen emulsions are summarized as follows:
Marshall Stability: Adding up to 4% nano-clay increases Marshall stability. However, further increases beyond 4% do not enhance stability.
Resilient Modulus: The resilient modulus significantly improves with increasing nano-clay content. At 6% nano-clay, the resilient modulus increases by approximately 18% compared to the control sample.
Flow Number (Dynamic Creep): Adding more than 2% nano-clay reduces the rate of increase in the flow number. Nevertheless, any amount of nano-clay results in an improvement in the flow number compared to the control sample.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران
وبگاه نشریه : https://amcen.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی : ۷۶۲۰-۳۰۶۰
دانشگاه رازی

بررسی تأثیر نانو رس بر خواص مکانیکی بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های قیر

سید صادق ناصرعلوی[1]✉، محمدرضا نوذری گیلان[2]

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر رفسنجان، کرمان، ایران. رایانامه: ss.naseralavi@vru.ac.ir
۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الکترونیکی، تهران، ایران. رایانامه: ssna60@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۳/۰۵/۲۶

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۱۰/۰۳

کلیدواژه‌ها:
بازیافت سرد آسفالت،
نانو افزودنی‌ها،
امولسیون‌های قیر،
مقاومت خستگی،
کیفیت آسفالت.

چکیده

بازیافت سرد آسفالت به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از ساخت و بهره‌برداری از آسفالت شناخته می‌شود. این روش به کاهش مصرف منابع طبیعی و سوخت‌های فسیلی کمک می‌کند و در عین حال انتشار آلاینده‌های گلخانه‌ای را نیز کاهش می‌دهد. با این حال، آسفالت بازیافتی معمولاً با چالش‌هایی مواجه است که می‌تواند بر عملکرد آن تأثیر منفی بگذارد. یکی از نقاط ضعف عمده آسفالت بازیافتی، نازک شدن، کنده شدن و کاهش مقاومت در برابر خستگی است. برای بهبود خواص مکانیکی این مواد، استفاده از افزودنی‌ها یا الیاف به عنوان راهکارهایی مؤثر مطرح شده است. نانوتکنولوژی به عنوان یک رویکرد نوین، امکان استفاده از نانو مواد مانند نانو رس را فراهم می‌کند که می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی آسفالت کمک کند. در این تحقیق، تأثیر نانو-خاک بر خواص خستگی مخلوط‌های سرد بازیافتی با استفاده از آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها نشان دادند که افزودن نانو-خاک در مقادیر مناسب می‌تواند خواص خستگی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. با این حال، نتایج همچنین نشان دادند که مقادیر بالاتر از یک درصد نانو-خاک ممکن است اثر معکوس داشته باشد و مقاومت خستگی آسفالت بازیافتی سرد را کاهش دهد. این یافته‌ها اهمیت دقت در انتخاب مقادیر مناسب افزودنی‌ها را در فرآیند بازیافت سرد آسفالت نشان می‌دهند و می‌توانند راهنمایی برای تحقیقات آینده در این زمینه باشند.

استناد: ناصرعلوی، سید صادق؛ نوذری گیلان، محمدرضا؛ (۱۴۰۳). بررسی تأثیر نانو رس بر خواص مکانیکی بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های قیر. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۲)،۴۶-۳۴. DOI: 10.22126/amcen.2024.11397.1033

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.
CC BY NC

۱. مقدمه

یکی از روش‌های تهیه و تولید روسازی، توسعه روش بازیافت سرد درجای آسفالت CIR (Cold in place recycling) است که نه تنها استفاده از مصالح و سنگدانه‌ها را کم می‌کند بلکه هزینه، زمان انجام پروژه و مصرف انرژی و آلودگی هوا را کاهش می‌دهد. بازیافت سرد آسفالت عملیات کندن، شخم زدن، تراشیدن و خرد کردن مصالح لایه آسفالتی با یا بدون قشرهای اساس و زیراساس موجود را شامل می‌شود. این مصالح بعد از فرآوری مجدد در محل پروژه و در سطح راه و یا در یک کارخانه آسفالت مرکزی و اختلاط با مواد قیری نظیر امولسیون قیر و یا کف قیر با یا بدون موادی مانند سیمان، آهک و یا خاکستر بادی و در صورت لزوم مصالح سنگی جدید، در دمای محیط و بدون استفاده از حرارت و نهایتاً تولید محصولی که عملکرد سازه‌ای دارد در سطح راه پخش و متراکم می‌شود. این قشر معمولاً به تناسب شرایط ترافیکی محور با بتن آسفالتی یا آسفالت سطحی روکش می‌شود. افزودنی‌های قیر موادی هستند که قبلاً به قیر افزوده‌شده و تحت شرایط معینی کاملاً با آن مخلوط گردیده‌اند و یا در حین تهیه مخلوط‌های آسفالتی و در جریان اختلاط قیر و مصالح سنگی به واحد مخلوط کننده کارخانه آسفالت اضافه می‌شوند. هدف از این کار بهبود خواص و یا عملکرد قیر حاوی افزودنی و یا مخلوط آسفالتی تولیدشده است. همچنین افزودنی‌ها در جریان بازیافت آسفالتهای فرسوده و بهمنظور احیای قیر موجود در این آسفالت‌ها نیز کاربرد دارند [۱]، [۲] و [۳]. در سال‌های اخیر با توجه به رشد روزافزون تکنولوژی در سطح جهان، ساخت و استفاده از افزودنی‌های نوین رشد چشم‌گیری داشته است که ازجمله آن می‌توان به نانو ذرات و الیاف اشاره کرد. مواد اصلاح کننده نانو و نانوکامپوزیت‌ها جزو مؤثرترین اصلاح کننده‌های قیر و آسفالت به شمار می‌روند. با گسترده شدن علم نانوتکنولوژی و شناخت ویژگیهای مواد در ابعاد نانو، نیاز به بررسی و استفاده از این علم در صنعت راهسازی و بالأخص روسازیهای آسفالتی احساس می‌شود. از طرفی، گرچه بایندرهای اصلاح شده با پلیمر از محبوبیت زیادی برخوردارند، اما هزینه بالا و ناپایداری حرارتی این بایندرها محققین را بر آن داشته تا موادی جدید برای اصلاح عملکرد بایندرها بیابند. انگیزه اخیر برای استفاده از انواع مختلف نانومواد یعنی نانورس، نانوسیلیکا، نانو اکسید روی و نانوآهک برای اصلاح بایندرهای آسفالت، نویسندگان را بر آن داشته که استفاده از این افزودنی‌ها در مخلوط‌های بازیافتی سرد برای بالا بردن دوام و مقاومت را مطالعه کرده تا بتوان مخلوطی مقاوم و بادوام تولید شود. در این پژوهش سعی خواهد شد با افزودن نانو رس بر آسفالت بازیافتی سرد با استفاده از امولسیون‌های قیر خواص مکانیکی آن، از جمله: تغییر شکل، مقاومت در برابر رطوبت، استقامت مارشال و مدول برجهندگی، مورد ارزیابی قرارگرفته و نتایج حاصل از آن ارائه گردد.

در سال ۲۰۱۰ مطالعه‌ای بر نقش سیمان در مخلوط‌های بازیافت شده با قیر امولسیون انجام گرفت که به نتایجی همچون: افزایش قابل توجه سختی، کاهش حساسیت رطوبتی، کاهش حساسیت حرارتی و کاهش تغییرشکل‌های ماندگار منجر شد [۴].

در تحقیقی مشابه با مورد قبل که توسط سازمان حمل‌ونقل ایالت نیومکزیکو انجام گرفت، مشخص شد که برای از بین بردن مشکل‌های شیارشدگی، ترکهای انعکاسی و خرابی رطوبتی بجای استفاده از قیرهای SS-1 و CMS-2s از قیر امولسیون کند شکن Hight Float پلیمری استفاده شود. همچنین مشخص گردید که اکثر ایالت‌های آمریکا نوعی از قیرهای امولسیونی High Float را استفاده می‌کنند که بیشتر آنها نیز از نوع کندگیر هستند و تعداد کمی از ایالت‌ها از نوع دیرشکن یا کندشکن کاتیونی را ترجیح می‌دهند [۵].

نانو کامپوزیت‌ها مهمترین مصالح ازنظر ساختمانی در مقیاس نانو هستند که اجزای اصلی آنها طولی در مقیاس نانو دارند. به عبارتی نانو کامپوزیت دلالت بر هر نوع مادهای با محتوایی در اندازه نانومتر در حداقل یک بعد دارد. نانو کامپوزیت‌های پلیمری یکی از بیشترین مواد مورد توجه در سال‌های اخیرند، به طوریکه می‌توان مشخصات فیزیکی پلیمرها را با مقدار بسیار اندکی مواد نانو چون نانو رس و پخش ذرات رس در سطح نانو بهبود داد. متغیرهای زیادی بر مشخصات نانو کامپوزیت‌ها اثرگذارند که بسیاری از آنها قابل کنترل هستند.

این متغیرها به طورکلی شامل نوع ذرات رس، روش آماده‌سازی ذرات رس، انتخاب ترکیبات پلیمر و روش ترکیب کردن پلیمر در

نـانو کامپوزیـت هسـتند [۶]. گیـل آزمایش‌هـای مکـانیکی روی مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده بـا نـانو رس cloisite انجـام داد. نتایج حاصل از آن نشان دهنده بهبود در خـواص مکـانیکی ازجملـه مقاومت کششی غیرمستقیم، خزش و خستگی است [۷].

سورشکومار و همکاران در سال ۲۰۱۰ در خصوص تأثیر افزودنی رس در مخلوط‌های آسفالتی پلیمری، دریافتند که رس یک تأثیر سازگار با آسفالت و پلیمر دارد و سازگاری زیادی بین رس و پلیمر می‌تواند منجر به پراکندگی بهتر پلیمر در آسفالت شود، بنابراین بر خصوصیات نهایی رئولوژیکی سیستم‌های تحت مطالعه تأثیر می‌گذارد [۸].

در سال ۲۰۱۴ زیاری و همکارانش تأثیر افزودنی بنتونیت بر رفتار خستگی در مخلوط‌های آسفالتی گرم را مورد ارزیابی قراردادند. آنها در تحقیق خود قیر با طبقه‌بندی درجه نفوذ ۶۰ - ۷۰ را با درصدهای مختلف بنتونیت اصلاح کرده و از آن نمونه‌های آسفالتی گرم تهیه کردند. رفتار این نمونه‌ها توسط آزمایش‌های مختلف ازجمله آزمایش مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم، آزمایش مدول برجهندگی و آزمایش خستگی مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش خستگی از روش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای در شرایط کرنش کنترل‌شده با بارگذاری سینوسی صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی قیر اصلاح‌شده تا حداکثر ۲۰ درصد بنتونیت مقادیر بیشتری را نسبت به نمونه شاهد دارا است. افزودن ۱۰ ٪ و ۱۵ ٪ بنتونیت به قیر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی را افزایش می‌دهد اما اصلاح قیر با بیش از این مقادیر تأثیری در عمر خستگی ندارند [۹]. همچنین آنها در تحقیق دیگری با انجام آزمایش‌های خزش دینامیکی و اثر چرخ، تأثیر افزودنی بنتونیت بر رفتار شیار شدگی در مخلوط‌های آسفالتی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که اصلاح قیر مخلوط‌های آسفالتی گرم با بنتونیت تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش مقاومت شیار شدگی و کاهش تغییر شکل‌های دائمی در دماهای بالا می‌شود [۱۰].

مطالعه یو و همکاران به آماده‌سازی و مشخصه‌یابی قیرهای اصلاح‌شده با نانو رس پرداخته است. محققان تأثیر افزودن نانو رس را بر خواص رئولوژیکی قیر و همچنین پایداری حرارتی و عملکرد مکانیکی آن بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نانو رس سختی و مقاومت قیر در برابر تغییر شکل را بهبود می‌بخشد و آن را برای شرایط مختلف دمایی مقاوم‌تر می‌کند. این پژوهش بر پتانسیل نانو رس در بهبود خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های آسفالتی تأکید دارد [۱۱].

مطالعه لی و همکاران روش طراحی مخلوط منطقی برای مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی سرد درجا (CIR) و مدلی برای پیش‌بینی عملکرد آن‌ها ارائه داده است. نویسندگان با استفاده از ارزیابی‌های آزمایشگاهی و مطالعات میدانی، روابط بین خواص مخلوط و شاخص‌های عملکردی مانند پایداری، حساسیت به رطوبت و سختی را مشخص کرده‌اند. این مطالعه چارچوب جامعی برای بهینه‌سازی طراحی مخلوط‌های CIR با هدف بازسازی مقرون‌به‌صرفه و بادوام روسازی‌ها ارائه می‌دهد [۱۲].

تحقیق ال-شفیع و همکاران اثرات افزودنی‌های ماکرو و نانو رس را بر عملکرد قیر مورد بررسی قرار داده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن این مواد، عملکرد قیر در دماهای بالا و مقاومت در برابر شیارشدگی را به طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد و انعطاف‌پذیری قیر را در دماهای پایین حفظ می‌کند. این پژوهش بر پتانسیل افزودنی‌های مبتنی بر رس در ارتقای خواص حرارتی و مکانیکی قیر تأکید دارد و آن را برای شرایط آب‌وهوایی متنوع مناسب می‌داند [۱۳].

مطالعه فیروزئی و همکاران ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های بازیافتی آسفالتی با استفاده از امولسیون قیر حاوی افزودنی‌های سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن را بررسی کرده است. آزمایش‌های انجام شده شامل تعیین ویژگی‌های مارشال، مدول برجهندگی و مقاومت کششی غیرمستقیم است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند دوام و مقاومت مخلوط‌های بازیافتی آسفالتی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد [۱۴].

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر نانو رس بر خواص مکانیکی بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های قیر است که با انجام آزمایشات مختلف مقدار تاثیر بر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. آزمایش‌های صورت گرفته در این مطالعه

شامل آزمایش‌های اسقامت مارشال، خزش دینامیکی، مدول برجهندگی و درصد قیر بهینه است.

۲. مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تاثیر نانو رس بر خواص مکانیکی بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های قیر مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها در این پژوهش شامل: مصالح خرده آسفالتی، نانو رس، مصالح آهکی و قیر امولسیون آنیونی SS-1 است. مشخصات هر یک از مصالح در ادامه معرفی می‌گردد.

برای تعیین دانه‌بندی مصالح خرده آسفالت‌های فرسوده از استاندارد ASTM C136,137 استفاده شده است. همچنین برای تعیین درصد رطوبت، مصالح خرد آسفالتی به چهار گروه تقسیم شدند و از هر قسمت یک نمونه ۱۵۰۰ گرمی با دانه‌بندی بدست آمده در فوق، تهیه و به مدت یک ساعت در گرمخانه و در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار داده و نمونه‌ها را وزن می‌کنیم و پارامتر w_{wet} بدست می‌آید. سپس نمونه‌ها را به مئت ۲۴ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده تا به وزن ثابت برسند نمونه‌ها را مجددا وزن کرده و با استفاده از رابطه ۱ درصد رطوبت خرده آسفالتی را تعیین می‌نماییم. نتایج این آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

$$w = \frac{w_{wet} - w_{dry}}{w_{dry}} \qquad (۱)$$

w_{wet} = وزن اولیه نمونه برحسب گرم

w_{dry} = وزن ثانویه نمونه برحسب گرم

جدول ۱. درصد رطوبت نمونه‌های مصالح خرده آسفالتی

شماره نمونه	وزن تر نمونه	وزن خشک	میزان رطوبت	درصد رطوبت
۱	۱۵۰۰	۱۴۹۰	۱۰	۰/۶۶۶
۲	۱۵۰۰	۱۴۸۹/۵	۱۰/۵	۰/۷
۳	۱۵۰۰	۱۴۸۹/۷	۱۰/۳	۰/۶۸۶
میانگین	۱۵۰۰	۱۴۶۲/۶	۱۰/۲۶	۰/۶۸۴

۲-۱. تعیین درصد قیر موجود در مصالح

برای تعیین درصد قیر موجود در مصالح بازیافتی از استاندارد AASHTO TP53-95 استفاده شد و درصد قیر با استفاده از رابطه ۲ به میزان ۶/۰۳ درصد محاسبه گردید.

$$\text{درصد قیر موثر} = \frac{\text{وزن قیر موثر}}{\text{وزن اولیه مصالح}} \times 100 \qquad (۲)$$

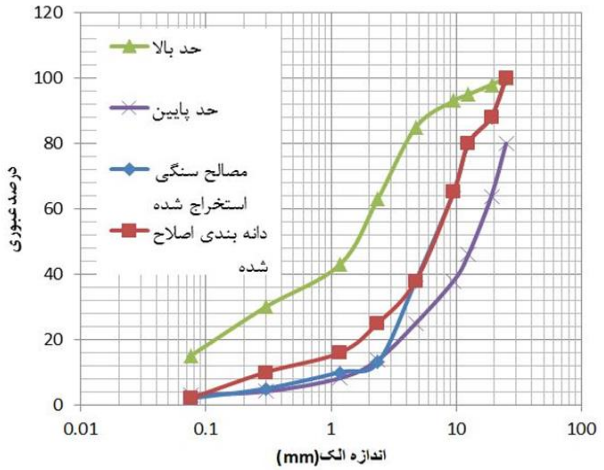
۲-۲. دانه‌بندی مصالح خرده آسفالتی و ارزیابی اصلاح دانه‌بندی

برای دانه‌بندی مصالح بعد از جدا کردن قیر از سنگدانه‌ها از استاندارد STM C117,136 استفاده شده که نتایج این ارزیابی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲. دانه‌بندی مصالح سنگی به دست آمده از مصالح خرده آسفالتی

اندازه الک (mm)	درصد عبوری
۱۹	۸۸
۱۲/۵	۸۰
۴/۷۵	۶۵
۲/۳۶	۳۸
۱/۱۸	۱۳
# ۵۰	۱۰
# ۲۰۰	۵
فیلر	۲

با توجه به نتایج، اگر دانه‌بندی حاصله در رده‌بندی مورد قبول استانداردها قرار نگرفت، برای اصلاح آن از مصالح آهکی استفاده می‌شود.



شکل ۱. دانه‌بندی مصالح سنگی

۲-۳. مشخصات امولسیون قیر

در این تحقیق بر اساس نوع مصالح سنگی جدید در مخلوط‌های با مصالح آهکی، امولسیون قیر آنیونیک SS-1 مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات این نوع امولسیون قیر در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. مشخصات امولوسیون قیر

نام آزمایش	SS-1
کندروانی سی بولت-فیورل در دمای ۲۵°C (ثانیه)	۵۵
پایداری(درصد نشست پس از ۲۴ ساعت)	۰/۵
درصد قیر شکسته شده (آزمایش اختلاط با سیمان)	۲
درصد وزنی قیر	۶۵
درجه نفوذ قیر پس مانده در دمای ۲°C	۱۵۰

از مزایای این نوع امولسیون این است که در حین اجرای بازیافت، نیازی به حلال برای مخلوط کردن ندارد و به مدت طولانی کارایی خود را حفظ می‌نماید. اما عیب این نوع امولسیون، زمان نسبتاً طولانی شکستن آن است که در اجرای پروژه تأخیر ایجاد می‌نماید.

۲-۴. مشخصات نانو رس

در این پژوهش از نانو ذرات خاک رس مونتموریلونیت ساخت شرکت Southern Clay با نام تجاری lohsite 15 A استفاده گردیده. این صفحات سیلیکاتی ۱ نانو متر ضخامت و ۷۰ تا ۱۵۰ نانو متر عرض دارند که در جدول ۴ خواص این ماده آمده است.

جدول۴. مشخصات نانو رس مصرف شده

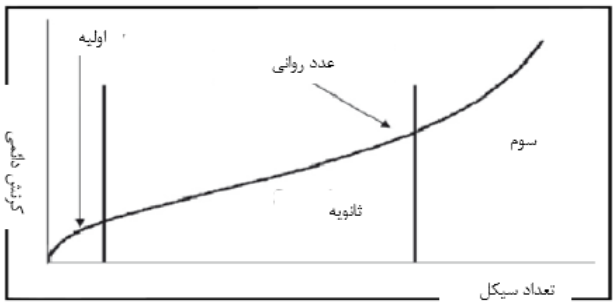
رنگ	سفید و شیری رنگ
فاصله بین لایه‌ای	۳۱/۵
چگالی	۱/۶۶
غلظت اصلاح کننده	۱۲۵
وزن باقی مانده پس از آزمون سوختن	۵۷٪
دمای ذوب اصلاح کننده	۴۶
دمای تخریب اصلاح کننده	۳۰۰

۲-۵. آزمایش خزش دینامیکی

مهمترین هدف آزمایش خزش، مطالعه عملکرد مخلوط آسفالتی در برابر شیارافتادگی است و مهمترین پارامتر بدست آمده از این آزمایش، کرنش تجمعی است که به نوعی به مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی بستگی دارد. نکته مهم در مورد این آزمایش این است که از مقادیر تغییرمکان تجمعی حاصل نمی‌توان به‌عنوان عمق شیار استناد نمود و در واقع این آزمایش جهت مقایسه بین انواع مختلف نمونه آسفالتی کاربرد دارد. دلیل آن این است که مخلوط آسفالتی در این آزمایش، از شرایط مهار جانبی که در حالت واقعیت از آن برخوردار است، بهره نمی‌برد و لذا تغییر مکان بیشتری در مقابل اعمال بار از خود نشان می‌دهد.

نرم‌افزار آزمایش خزش دینامیکی با روش‌ها و استانداردهای تست‌های بین‌المللی مختلفی مطابقت می‌کند. در تحقیق حاضر، این آزمایش با استفاده از دستگاه UTM5 انجام شده است. داده‌های ورودی شامل ابعاد نمونه‌ها، مدت زمان بارگذاری و باربرداری، تنش تماسی و تنش اعمالی است. در این تحقیق از بارگذاری نیمه سینوسی با تکرار ۰/۵ هرتز (با ۵۰۰ میلی‌ثانیه بارگذاری و ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه استراحت) بر اساس استاندارد Australian code AS 2891-12 انتخاب شده است. بار اعمالی ۴۵۰ کیلونیوتن انتخاب گردید.

شکل ۲ منحنی کرنش تجمعی کل در برابر چرخه بارگذاری را نشان می‌دهد. منحنی کرنش تجمعی به ۳ ناحیه تقسیم می‌شود: ناحیه اول، ناحیه دوم و ناحیه سوم. تعداد چرخه در شروع ناحیه سوم به عدد روانی شناخته می‌شود. در ناحیه اول تغییرشکل‌های دائم بطور ناگهانی روی هم انباشته می‌شوند، در ناحیه دوم افزایش روند (شیب) تغییرشکل دائم کاهش می‌یابد تا به مقدار ثابتی می‌رسد و در ناحیه سوم شیب تغییرشکل دائم دوباره افزایش می‌یابد و مقدار تغییرشکل دائم به شدت روی هم انباشته می‌شود.



شکل۲. منحنی کرنش تجمعی کل در برابر چرخه بارگذاری در آزمایش خزش

خزش بصورت رفتار تغییر شکل وابسته به زمان برای مصالح ویسکوالاستیک تحت بارگذاری تعریف می‌شود. آزمایش خزش دینامیکی که یکی از توصیه‌شده‌ترین روش‌ها به منظور ارزیابی شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی است.

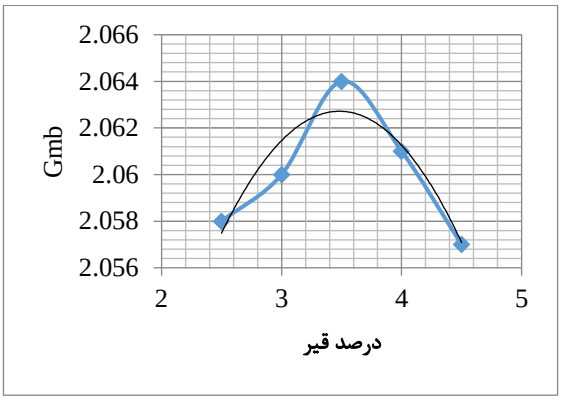
۲-۶. آزمایش مدول برجهندگی

در استاندارد ASTM D4123 تعیین مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از آزمایش کشش غیرمستقیم بیان شده است. در این تحقیق جهت تعیین مدول برجهندگی از دستگاه UTM5 استفاده شده است.

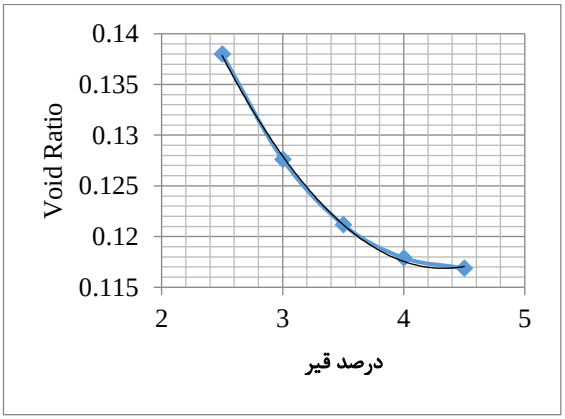
۳. نتایج

در این تحقیق باتوجه به هدف اولیه از آزمایش‌های تعیین درصد قیر بهینه، استقامت مارشال، خزش دینامیکی و مدول برجهندگی استفاده شده است.

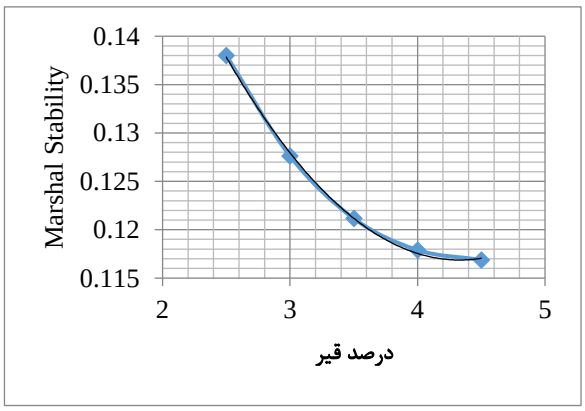
جهت تعیین درصد قیر بهینه در این تحقیق نمونه‌ها با روش مارشال ساخته شد. درصد قیر بهینه برای هر گروه از نمونه‌ها تعیین شد و درصد آب بهینه محاسبه شد. جهت تعیین تعیین وزن مخصوص حقیقی نمونه‌ها از روش استاندارد ASTM D2726 استفاده گردید که نتایج حاصل از آن برای نمونه شاهد در شکل ۳ آمده است. جهت تعیین درصد فضای خالی نمونه می‌بایست از حداکثر وزن مخصوص نمونه‌ها استفاده کرد که به این منظور از استاندارد ASTM D2041 استفاده شد آزمایش مارشال بر اساس استاندارد ASTM D1559 و توسط دستگاه مارشال انجام شد که در آن نمونه‌های ساخته‌شده را یک هفته بعد از ساخت به مدت ۴۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار دادیم چراکه دمای ۲۵ درجه که آیین‌نامه توصیه کرده برای انجام آزمایش مشکل‌ساز است و نمونه‌ها مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهند. در نهایت با استفاده از نمودارهای ۳ تا ۶ میزان درصد قیر بهینه برابر ۳.۴ درصد انتخاب می‌شود. برای انتخاب درصد آب بهینه با درصدهای مختلف نمونه ساخته می‌شود و در نهایت میزان آب بهینه برابر ۳.۵۱ درصد انتخاب می‌شود.



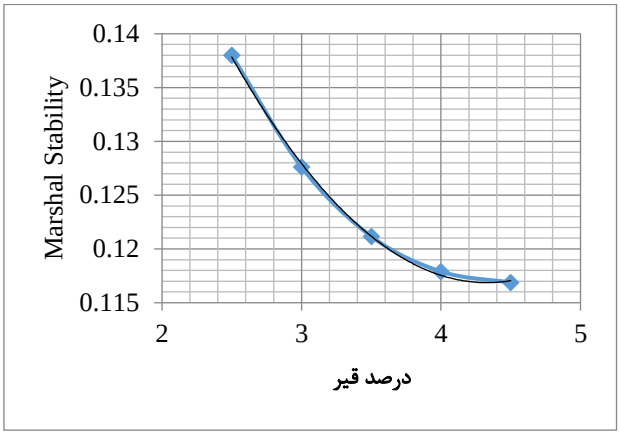
شکل۳. وزن مخصوص نمونه



شکل۴. فضای خالی نمونه شاهد



شکل۵. استقامت مارشال برای تعیین درصد امولسیون قیر بهینه برای نمونه شاهد



شکل۶. روانی مارشال برای تعیین درصد امولسیون قیر بهینه برای نمونه شاهد

به منظور رعایت اختصار و مشابهت روند تعیین درصد قیر و آب بهینه برای نمونه‌های با درصد افزودنی نانو رس ۲، ۴ و ۶ درصد نتایج درصد قیر بهینه و آب بهینه برای این نمونه‌ها در جداول ۸ و ۹ ارائه شده است:

جدول۸. درصد قیر بهینه نمونه‌های با افزودنی نانو رس

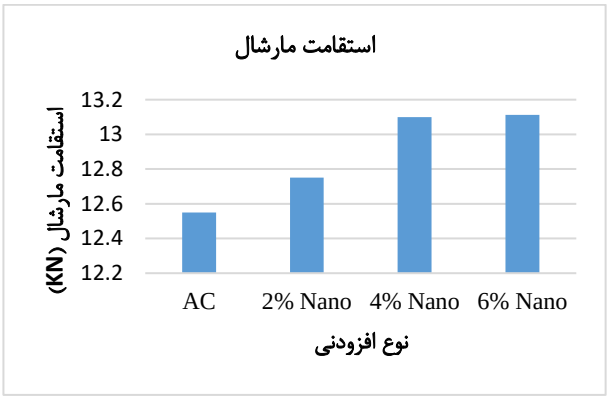
نمونه	قیر بهینه ٪	فضای خالی ٪
۲ درصد نانو رس	۳/۵۴	۱۱/۸۳
۴ درصد نانو رس	۳/۷۱	۱۰/۶۸
۶ درصد نانو رس	۳/۸۹	۹/۸

جدول۹. درصد آب بهینه نمونه‌های با افزودنی نانو رس

نمونه	آب بهینه ٪	فضای خالی ٪
۲ درصد نانو رس	۳/۶۲	۱۲/۸۷
۴ درصد نانو رس	۳/۸	۱۱/۹۴
۶ درصد نانو رس	۳/۹۷	۱۰/۵۹

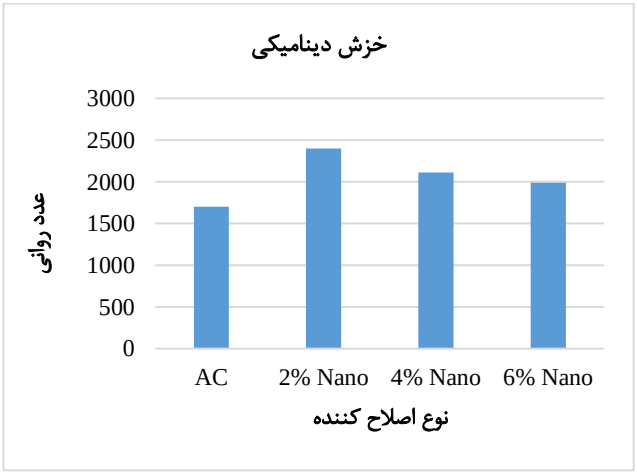
همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود با افزودن ۲ درصد نانو رس به مخلوط آسفالتی استقامت مارشال۱/۶ درصد افزایش می‌یابد. با دو برابر کردن درصد نانو رس استقامت مارشال ۴/۴ درصد نسبت به حالت بدون افزودنی افزایش می‌یابد. اما با سه برابر کردن درصد نانو رس مشاهده می‌شود که استقامت مارشال نمونه‌ها تغییری نمی‌کند.

بنابراین افزودن نانو رس تا ۴ درصد باعث افزایش استقامت مارشال شده و افزودن مقادیر بیشتر نانو رس استقامت مارشال را تغییر نمی‌دهد. بنابراین ۴ درصد افزودن نانو رس بهینه ترین درصد افزودنی است.



شکل۷. تاثیر درصد نانو رس بر استقامت مارشال

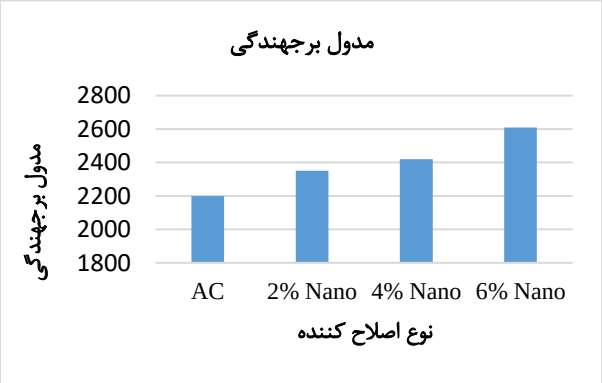
با توجه به منحنی چرخه-کرنش تجمعی که از آزمایش خزش دینامیکی به دست می‌آید و با بررسی سه ناحیه رفتاری در تغییر شکل‌های دائمی، عدد روانی به عنوان شاخص خزش دینامیکی بدست می‌آید. شکل ۸ تاثیر درصد نانو رس بر تغییرات عدد روانی را نشان می‌دهد.



شکل۸. تاثیر درصد نانو رس بر عدد روانی

همانگونه که مشاهده می‌شود افزودن ۲ درصد نانو رس عدد روانی را ۴۱/۲ درصد نسبت به حالت شاهد افزایش می‌دهد که نشان دهنده تاثیر چشمگیر نانو رس بر عدد روانی مخلوط آسفالتی است. اما با دو برابر و سه برابر کردن درصد نانو رس مشاهده می‌شود که عدد روانی نسبت به حالت ۲ درصد افزودنی نانو رس به ترتیب ۱۲/۱ درصد و ۱۷/۱ درصد کاهش می‌دهد و در واقع افزایش بیشتر از ۲ درصد نانو رس، نرخ افزایش عدد روانی را کاهش می‌دهد. اما همانگونه که از نمودار ملاحظه می‌شود وجود هر مقدار از نانو رس باعث افزایش عدد روانی نسبت به نمونه شاهد خواهد شد.

در آزمایش خزش دینامیکی نمونه آسفالتی ابتدا به کمک قاب مخصوصی تنظیم گردید تا در هنگام بارگذاری در زیر دستگاه، کاملا متقارن قرار گیرد و بار به مرکز نمونه وارد شود. با اعمال بار به اندازه ۴۰۰ نیوتن، به صورت نیمه سینوسی با ۰/۵ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه باربرداری، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی تعیین گردید. مدول برجهندگی یکی از مشخصه‌های مکانیکی مهم مخلوط آسفالتی در تعیین ضخامت لایه‌های روسازی است که شکل ۹ تغییرات آن را برحسب تغییر درصد نانو رس نشان می‌دهد.



شکل۹. تاثیر درصد نانو رس بر مدول برجهندگی

همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش درصد نانو رس باعث افزایش مدول برجهندگی می‌شود. و هر چه میزان نانو رس بیشتر باشد شیب یا به عبارتی نرخ افزایش مدول برجهندگی بیشتر می‌شود. افزودن ۲ درصد نانو رس باعث افزایش ۶/۸ درصدی مدول برجهندگی نسبت به نمونه شاهد شده و با دوبرابر کردن درصد نانو رس این افزایش به ۱۰ درصد می‌رسد. از طرفی با سه برابر کردن درصد نانو رس افزایش مدول برجهندگی به ۱۸/۶ درصد نسبت به نمونه شاهد خواهد رسید. بنابراین هرچه درصد نانورس افزایش یابد، مدول برجهندگی افزایش چشمگیری خواهد داشت.

۴. نتیجه گیری

با توجه به آزمایشات انجام شده، نتایج اثر افزودن نانو رس بر خواص مکانیکی بازیافت سرد آسفالت با استفاده از امولسیون‌های قیر را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

- افزودن نانو رس به مخلوط آسفالتی تا ۴ درصد باعث افزایش استقامت مارشال شده و افزودن مقادیر بیشتر نانو رس استقامت مارشال را تغییر نمی‌دهد.
- هرچه درصد نانورس افزایش یابد، مدول برجهندگی افزایش چشمگیری خواهد داشت. و این افزایش در ۶ درصد افزودنی نانو رس به میزان تقریبی ۱۸ درصد نسبت به نمونه بدون افزودنی خواهد بود.
- افزایش بیشتر از ۲ درصد نانو رس، نرخ افزایش عدد روانی را کاهش می‌دهد. اما وجود هر مقدار از نانو رس باعث افزایش عدد روانی نسبت به نمونه شاهد خواهد شد.

مراجع

[۱] بیژن بهرام نژاد،"امکان اختلاط قیرهای پایه ایران باپلیمرهای خانواده SBS وبررسی خواص فیزیکی- مکانیکی و رئولوژیکی آنهاجهت مصارف راهسازی " پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۲.

[2] Goh, S. W., Akin, K., You, Z. and Shi X., "Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro or nano-modified asphalt mixture", Construction and Building Materials, No 25, pp. 195-200, 2011.

[3] Sadeghpour, S., Galooyak, B., Dabir, A. Nazarbeygi, E. and Moeini, A. "Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillon it ecomposites". Construction and Building Materials 24, pp. 300–307, 2010.

[4] Kavussi, A., & Modarres, A. A model for resilient modulus determination of recycled mixes with bitumen emulsion and cement from ITS testing results. Construction and Building Materials, 24(11), 2252-2259, 2010.

[5] Kim, Y., Lee, H. D., & Heitzman, M. Validation of new mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt. Journal of materials in civil engineering, 19(11), 1000-1010, 2007.
[6] Pinnavaia, T.J. and Beall, G.W. eds., "Polymer-clay Nano composites". John Wiley. USA, ISBN 047163700, 2000.
[7] Ghile, D.B., "Effects of nanoclay modification on rheology of bitumen and on performance of asphalt mixtures". Delft, the Netherlands: Delft University of Technology, 2006.
[8] Sureshkumar, M.S., Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J. and Zanzotto, L., "Internal structure and linear viscoelastic properties, 2010.
[9] Ziari, H., Babagoli, R., Ameri, M. and Akbari, A., "Evaluation of fatigue behavior of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite modified bitumen". Construction and Building Materials, 68, pp.685-691, 2014.
[10] Ziari, H., Babagoli, R. and Akbari, A., "Investigation of fatigue and rutting performance of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite-modified bitumen". Road Materials and Pavement Design, 16(1), pp.101-118, 2015.
[11] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q. and Goh, S.W., "Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization". Construction and Building Materials, 25(2), pp.1072-1078, 2011.
[12] Lee, K.W., Brayton, T.E., Mueller, M. and Singh, A., "Rational mix-design procedure for cold in-place recycling asphalt mixtures and performance prediction". Journal of Materials in Civil Engineering, 28(6), p.04016008, 2016.
[13] El-Shafie, M., Ibrahim, I. M. and El Rahman, A. M. M., "The addition effects of macro and nanoclay on the performance of asphalt binder", Egyptian Journal of Petroleum, Volume 21, Issue 2, pp. 149-154, 2012.
[۱۴] فیروزئی، محمدزاده مقدم، قاضی زاده، "بررسی ویژگی‌های مارشال، مدول برجهندگی و کشش غیر مستقیم مخلوط‌های بازیافتی با امولسیون قیر حاوی افزودنی‌های سیمان و الیاف پلی‌پروپیلن " جاده شماره ۶۸ پاییز ۱۳۹۰.