



University Of Qom



Investigation of the Combined Effect of Nano Copper Oxide and Polypro-Pylene Fibers in Asphalt Mixtures to Prevent Rutting

Reza Jalal Kamali^{1✉}, Nima Roosta², Mohammad Hossain Jalal Kamali³

1. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: r.jalalkamali@uk.ac.ir
2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran. E-mail: nimaros33@gmail.com
3. Department of Civil and Mining Engineering, University of Gonabad, Razavi Khorasan, Iran. E-mail: jalalkamali@gonabad.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 08 Oct 2024
Revised 30 Jan 2025
Accepted 16 Feb 2025
Published 17 Feb 2025

Keywords:
Rutting,
Nano Copper Oxide,
Polypropylene Fiber,
Hot Mix Asphalt.

ABSTRACT

Rutting is one of the most common failures in asphalt pavements, typically caused by inadequate compaction, loss of materials, or insufficient shear resistance of the asphalt mixture. In this study, the effect of combining nano-copper oxide and polypropylene fibers on improving the resistance of asphalt mixtures to rutting was investigated. First, the optimal percentage of nano-copper oxide was determined using resilient modulus and dynamic creep tests. The results showed that adding 2% nano-copper oxide increased the resilient modulus of the asphalt mixture by up to 50%. Subsequently, 0.1, 0.3 and 0.5% polypropylene fibers were added to the asphalt mixture containing 2% nano-copper oxide. The results indicated that adding 0.3% polypropylene fibers improved the Marshall stability of the asphalt mixture by up to 5.2%. However, increasing the fiber content beyond 0.3% negatively impacted the Marshall stability due to reduced adhesion between the bitumen and aggregate. Additionally, the addition of polypropylene fibers decreased the Marshall flow of the asphalt mixture. Nano-copper oxide alone also increased the flow of the mixture. Overall, the combination of 2% nano-copper oxide and 0.3% polypropylene fibers increased the resistance of the asphalt mixture by up to 8.1% and created a balance between flow and stiffness. These results suggest that the simultaneous use of these two additives can be an effective solution for enhancing the performance of asphalt mixtures against rutting and improving mechanical resistance.

Cite this article: Jalal Kamali R, Roosta N, Jalal Kamali MH. Investigation of the Combined Effect of Nano Copper Oxide and Polypro-Pylene Fibers in Asphalt Mixtures to Prevent Rutting. Civil Infrastructure Researches. 2025; 11(1): 185-201. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.11451.1582>



Introduction

Rutting is a common form of asphalt pavement deterioration that affects both the surface and the underlying base and subbase layers. In impermeable pavements designed with effective drainage systems, most of the damage, around 85 to 90%, occurs within the upper asphalt layers themselves due to accumulated plastic deformation. Typically, rutting manifests as permanent surface depressions along wheel tracks, particularly in high-stress zones like bus stops, frequent braking zones, and vehicle acceleration lanes, where repetitive shear forces generate significant horizontal stresses.

This pavement distress phenomenon is heavily influenced by regional climate conditions and traffic loading patterns. Heavy commercial vehicles moving at slow speeds, when combined with prolonged high summer temperatures, tend to accelerate rutting development, especially in conventional asphalt mixes that exhibit insufficient shear resistance and poor elastic recovery. To address this engineering challenge, current mitigation strategies primarily focus on material modifications, including polymer or nanomaterial additives to enhance the bitumen's rheological performance, as well as synthetic fiber reinforcement to improve the mixture's tensile strength and crack resistance. These solutions aim to optimize the balance between stiffness and flexibility in asphalt pavements.

Problem Statement

The use of nanomaterials to modify bitumen properties, along with the incorporation of fibers to enhance asphalt mixture characteristics, are among the most effective strategies for preventing rutting. However, the combined effect of these two modifications on asphalt performance has not yet been investigated.

Methodology

In this study, multiple asphalt mixtures were initially prepared by incorporating copper oxide nanoparticles at varying concentrations (1, 1.5, 2 and 2.5%). Through

comprehensive dynamic creep and resilient modulus testing, the 2% nanoparticle concentration demonstrated optimal performance and was consequently selected as the base mixture for fiber modification. Subsequently, polypropylene fibers were added to this optimal nano-modified mixture (containing 2% CuO nanoparticles) at proportions of 0.1, 0.3 and 0.5%, with all fiber-reinforced specimens undergoing Marshall testing for performance evaluation.

Results

The two key parameters evaluated for the asphalt mixtures modified with copper oxide nanoparticles and polypropylene fibers were Marshall Stability and Marshall Flow, with the corresponding test results presented in Figures 1 and 2, respectively. The red line in these figures indicates the properties of the unmodified asphalt mixture (control sample).

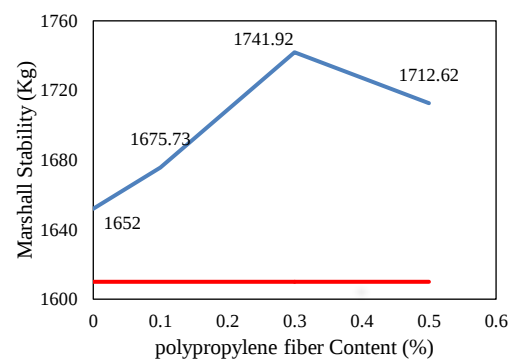


Figure 1. Marshall Stability of modified asphalt mixtures

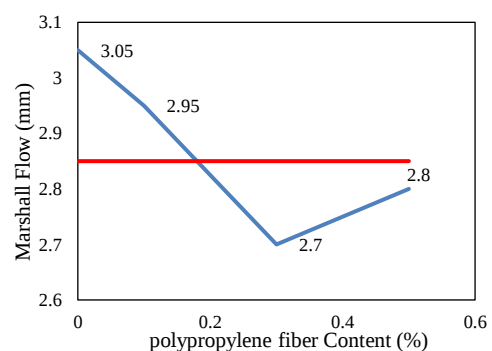


Figure 2. Marshall Flow of modified asphalt mixtures

As illustrated in Figure 1, adding 0.3% fibers to the nano-copper oxide modified asphalt mixture can improve Marshall stability by more than 5%. However, exceeding this fiber content shows no further positive effect

on Marshall Stability. This is primarily attributed to excessive fibers reducing bitumen-aggregate adhesion, ultimately decreasing stability in fiber-rich mixtures.

Figure 2, demonstrates that incorporating 0.3% polypropylene fibers reduces Marshall Flow by over 11% compared to fiber-free mixtures, achieving an optimal deformation resistance range.

Conclusion

The results of this study indicate that the combination of copper oxide nanoparticles and polypropylene fibers can serve as an effective solution for improving asphalt mixture performance against rutting. The increased resilient modulus and rutting resistance observed with copper oxide nanoparticles demonstrate enhanced viscoelastic behavior of the asphalt mixture. This improvement results from the filling effect of nanoparticles and strengthened bitumen-aggregate adhesion, leading to better stress distribution and reduced stress concentration at weak points in the mixture.

On the other hand, adding polypropylene fibers to the asphalt mixture creates a fiber network within the asphalt matrix, increasing crack resistance and improving plastic deformation behavior. This is particularly important under long-term loading conditions (such as creep), as fibers absorb energy and prevent crack propagation, thereby enhancing mixture performance. However, excessive fiber content (above 0.3%) may negatively affect mixture strength due to reduced bitumen-aggregate adhesion, highlighting the importance of maintaining proper additive proportions.

Furthermore, the simultaneous effect of copper oxide nanoparticles and polypropylene fibers on mixture flowability reveals the complex interaction between these two additives. While nanoparticles increase flowability and improve workability, fibers decrease flowability, enhancing stiffness and deformation resistance. This balance between flowability and stiffness enables the design of asphalt mixtures with optimal performance under various climatic and loading conditions.

In conclusion, the combined use of copper oxide nanoparticles and polypropylene fibers not only enhances the mechanical properties of asphalt mixtures but also optimizes overall performance by achieving a balance between flowability and stiffness under real-world conditions. These findings can serve as a foundation for future research on using nanoparticles and fibers to improve asphalt performance.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

No competing interests: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Reza Jalalkamali:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Resources; Supervision; Validation; Review & Editing.

Nima Roosta:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Validation.

Mohammad Hossain Jalal Kamali:

Investigation; Methodology; Validation; Original draft; Review & Editing

بررسی تأثیر توأمان نانواکسید مس و الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط آسفالتی به منظور جلوگیری از شیارشدگی

رضا جلال کمالی^۱، نیما روستنا^۲، محمدحسین جلال کمالی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: r.jalalkamali@uk.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: nimaros33@gmail.com

۳. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، خراسان رضوی، ایران. رایانامه: m.jalalkamali@gmail.com

چکیده

شیارشدگی یکی از خرابی‌های رایج روسازی‌های آسفالتی است که معمولاً ناشی از تراکم نامناسب، از دست‌دادن مصالح یا مقاومت برشی ناکافی مخلوط آسفالتی ایجاد می‌شود. در این پژوهش، تأثیر ترکیب نانواکسید مس و الیاف پلی‌پروپیلن بر بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بررسی شد. ابتدا با استفاده از آزمایش‌های مدول برجهندگی و خزش دینامیکی، درصد بهینه نانواکسید مس تعیین گردید. نتایج نشان داد که افزودن دو درصد نانواکسید مس، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. در مرحله بعد، مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط آسفالتی حاوی دو درصد نانواکسید مس اضافه شد. نتایج نشان داد که افزودن ۰/۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت مارشال مخلوط آسفالتی را تا ۵/۲ درصد بهبود می‌بخشد. با این حال، افزایش میزان الیاف به بیش از ۰/۳ درصد، به دلیل کاهش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی، تأثیر منفی بر مقاومت مارشال داشت. همچنین، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن روانی مارشال مخلوط آسفالتی را کاهش می‌دهد. نانواکسید مس به‌تنهایی نیز موجب افزایش روانی مخلوط شد. به‌طور کلی، ترکیب دو درصد نانواکسید مس و ۰/۳ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت مخلوط آسفالتی را تا ۸/۱ درصد افزایش داد و تعادلی بین روانی و سختی مخلوط ایجاد کرد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از این دو افزودنی می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی و افزایش مقاومت مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

کلیدواژه‌ها:

شیارشدگی،

نانواکسید مس،

الیاف پلی‌پروپیلن،

روسازی آسفالتی.

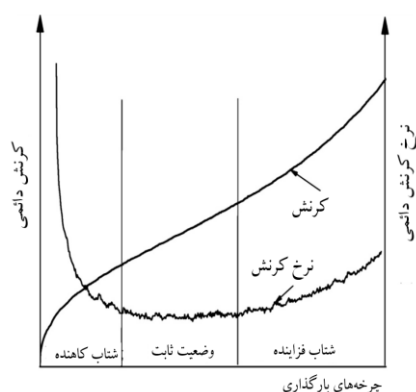
استناد: جلال کمالی رضا، روستنا نیما، جلال کمالی محمدحسین. بررسی تأثیر توأمان نانواکسید مس و الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط آسفالتی به منظور جلوگیری از شیارشدگی. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۱): ۱۸۵-۲۰۱.

<https://doi.org/10.22091/cer.2025.11451.1582>

۱- مقدمه

روسازی، تراکم حین فرآیند بهره‌برداری و جابه‌جایی مصالح به دلیل مقاومت برشی نامناسب. از دست دادن مصالح روسازی، معمولاً در روسازی‌هایی که از دوام کمتری برخوردار هستند اتفاق می‌افتد و به صورت شن‌زدگی در مسیر چرخ‌ها خود را نشان می‌دهد که البته عمق بسیار کمی از شیارشدگی مربوط به از دست دادن مصالح روسازی است. روسازی‌هایی که درصد هوای بیشتری داشته باشند در اثر عبور ترافیک سنگین در طول دوره بهره‌برداری نیز متراکم می‌شوند و به این ترتیب در محل چرخ وسایل نقلیه شیارشدگی ایجاد می‌شود. ضعف برشی روسازی نیز می‌تواند در درازمدت به جابه‌جایی مصالح از محل زیر بار چرخ به طرفین منجر شود که در نتیجه آن شیارشدگی سطح روسازی تشدید شود [۵].

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، رابطه بین کرنش و چرخه‌های بارگذاری در سه بخش شتاب کاهنده، وضعیت ثابت و شتاب فزاینده کرنش و به تبع آن خرابی، قابل مشاهده و بررسی است. این سه بخش تغییرات کرنش در مورد نتایج آزمایش عبور چرخ هامبورگ^۳ و یا آزمایش‌های میدانی تسریع شده نیز به صورت مشابه مشاهده می‌شود.



شکل ۱- رابطه بین کرنش دائمی و چرخه‌های بارگذاری [۲]

در مرحله شتاب کاهنده، کرنش دائمی تجمعی به صورت سریع اما با شتابی کاهنده منجر به شیارشدگی ناشی از تراکم می‌شود و یک اسکلت سخت از مصالح

شیارشدگی^۱ که یکی از خرابی‌های رایج در روسازی‌های آسفالتی است معمولاً در هر دو لایه آسفالتی و لایه زیرین آن اتفاق می‌افتد. در روسازی‌هایی که آب نمی‌تواند به لایه‌های زیرین لایه آسفالتی نفوذ کند حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد خرابی در لایه آسفالتی اتفاق می‌افتد [۱]. خرابی شیارشدگی معمولاً به صورت متراکم شدن روسازی در زیر محل چرخ‌های وسیله نقلیه در محل‌هایی مثل ایستگاه‌های اتوبوس و همچنین محل‌های ترمزگیری و شتابگیری وسایل نقلیه که تنش برشی زیادی به روسازی وارد می‌شود، اتفاق می‌افتد [۲].

وقوع پدیده شیارشدگی به شدت به شرایط آب و هوایی و ترافیکی منطقه وابسته است. عبور بارهای سنگین با سرعت‌های کم و همچنین دمای بالا در حالتی که مقاومت مخلوط آسفالتی کم باشد، می‌تواند منجر به بروز پدیده شیارشدگی شود [۳].

یکی از راه‌هایی که برای کاهش احتمال وقوع خرابی شیارشدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اصلاح مشخصات رئولوژی^۲ قیر است که این اصلاح می‌تواند به وسیله اضافه کردن یک یا چند افزودنی به قیر مورد استفاده باشد. از جمله روش‌های دیگری که برای مقاوم‌سازی روسازی در برابر شیارشدگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به استفاده از تقویت‌کننده‌هایی همچون الیاف در مخلوط آسفالتی اشاره کرد [۴].

۱-۱- مکانیزم وقوع پدیده شیارشدگی

در این بخش، ابتدا مکانیزم پدیده شیارشدگی بیان شده و سپس انواع راهکارهای موجود جهت جلوگیری از این پدیده شرح داده می‌شود.

به صورت کلی، فرآیند ایجاد خرابی شیارشدگی از سه عامل اصلی نشأت می‌گیرد؛ از دست دادن مصالح

^۱- Rutting

^۲- Rheological properties

^۳- Hamburg Wheel Tracking Test

نمونه آسفالتی و مقاومت آن در برابر رطوبت نیز افزایش یافت [۸].

پژوهشگران یافته‌اند به جز افزودنی‌های ذکر شده، امروزه استفاده از الیاف به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن نیز کاربرد بیشتری پیدا کرده است. اضافه کردن مقدار مناسب الیاف، موجب بهبود در مشخصات قیر از جمله کاهش نفوذپذیری و همچنین افزایش نقطه نرمی آن می‌شود. همچنین الیاف می‌توانند خواص ویسکوالاستیک قیر را نیز تحت تأثیر قرار دهند [۹].

تحقیقات همچنین نشان داده است که اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های آسفالتی، موجب افزایش مدول دینامیکی^۶، کاهش حساسیت دمایی^۷ و همچنین افزایش مقاومت آن در برابر خستگی می‌شود. الیاف می‌توانند موجب ایجاد مخلوطی با مدول بالاتر، مقاومت و دوام و قابلیت شکل‌پذیری بیشتر شوند. انواع مختلفی از الیاف وجود دارند که می‌توان با استفاده از آنها برخی مشکلات اساسی مخلوط‌های آسفالتی را از جمله شیارشدگی، ترک‌خوردگی خستگی و حرارتی و همچنین شن‌زدگی را مرتفع کرد [۱۰].

الیاف مورد استفاده در روسازی، موادی طبیعی یا مصنوعی هستند که توسط چسباننده‌های روسازی (قیر یا سیمان) احاطه می‌شوند و وجود آنها در روسازی‌ها، خصوصاً روسازی آسفالتی، می‌تواند موجب بهبود مقاومت، پایداری حرارتی و همچنین بهبود مشخصات اصطکاکی روسازی شوند. الیاف عموماً براساس ماده تشکیل‌دهنده آنها به دو دسته کلی آلی و معدنی تقسیم می‌شوند. از مهمترین الیاف آلی می‌توان به الیاف سلولزی و الیاف لیگنیت اشاره کرد که خصوصیت ویژه این الیاف، جذب بالای آنها است. از جمله الیاف معدنی نیز می‌توان به الیاف آزبستی اشاره کرد که به گروهی از کانی‌های سیلیکاتی اطلاق می‌شود. این الیاف، نرم و انعطاف‌پذیر بوده و در

سنگی تشکیل می‌گردد. در مرحله وضعیت ثابت، کرنش دائمی روسازی با نرخ تقریباً ثابت افزایش می‌یابد که این کرنش با تغییر شکل پلاستیک جانبی مصالح همراه است که می‌توان از آن به عنوان تلفیقی از متراکم شدن و تغییر شکل برشی یاد کرد. نهایتاً در مرحله شتاب فزاینده، روسازی تحت تأثیر شکست برشی قرار گرفته و مصالح با سرعت بیشتر جابه‌جا شده و کرنش دائمی روسازی، نرخ افزایشی به خود می‌گیرد [۲].

۱-۲- استفاده از الیاف و اصلاح‌کننده‌های قیر جهت بهبود مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی

تحقیقات نشان داده‌اند که مشخصات قیر مورد استفاده در مخلوط آسفالتی می‌تواند تا حدود ۴۰ درصد بر مقاومت روسازی در برابر شیارشدگی تأثیر بگذارد. پارامترهایی همچون ویسکوزیته قیر به‌دست آمده از رئومتر، پارامتر شیارشدگی $(G^*/\sin\delta)$ ، کامپلیانس غیربازگشتی^۴ (J_{nr}) و درصد ریکاوری^۵ (R) در آزمایش خزش با سطح تنش‌های چندگانه به‌عنوان شاخص‌هایی از مشخصات رئولوژی قیر که با پدیده شیارشدگی ارتباط دارند، معرفی شده‌اند. یکی از رایج‌ترین راه‌هایی که برای بهبود خواص رئولوژی قیر پیشنهاد شده است، افزودن موادی همچون پلیمرها، رزین‌ها، نانو مواد، پودر لاستیک و امثال اینها به قیر است [۲]. جدول ۱، برخی مواد افزودنی و نحوه تأثیر آنها در مقابله با شیارشدگی را نشان می‌دهد [۲، ۶ و ۷].

تحقیقات نشان داده است افزودن نانو مواد می‌تواند موجب بهبود عملکرد روسازی آسفالتی شود. به عنوان مثال، افزودن نانو اکسید کبالت (Co_3O_4) خواص رئولوژیکی و مکانیکی قیر را بهبود بخشیده است. این افزودنی موجب شده است مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی بالاتر رود. همچنین استقامت مارشال

⁶- Dynamic Modulus

⁷- Temperature sensitivity

⁴- Non-Recoverable Creep Compliance

⁵- Recovery Ratio

برابر گرما، الکتریسیته و خوردگی شیمیایی نسبتاً مقاوم می‌باشند [۱۰].

جدول ۱- برخی از اصلاح‌کننده‌های قیر و نحوه و میزان تأثیرگذاری آنها [۲، ۶ و ۷]

نحوه عملکرد	مؤلفه تأثیرپذیر	مقدار (درصد)	افزودنی
افزایش تقریباً دو برابری	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد	۰/۱-۰/۲	نانو تیوب کربن
افزایش بیش از ۲۰ برابر	ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد	۲۰	خرده لاستیک
افزایش بیش از ۱۰ برابری در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد	$G^*/\sin\delta$	۶-۲	پلیمرها
افزایش حدود ۶۳ درصدی	$G^*/\sin\delta$	۲۰-۵	آهک هیدراته
افزایش حدود صددرصدی در دمای ۶۴ درجه سانتیگراد	$G^*/\sin\delta$	۶-۱	افزودنی‌های حاوی بور
افزایش بیش از ۷۵ درصد در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد	$G^*/\sin\delta$	۵۰	ضایعات لنت ترمز
کاهش پنج میلی‌متری بعد از ۲۰۰۰ عبور	عمق شیار	۱۰	خرده لاستیک
افزایش بیش از دو برابری	پایداری دینامیکی	۳۳/۳	پسماند روغن خوراکی
افزایش حدود ۴۸ درصدی	پایداری دینامیکی	۰/۲ - ۰/۱	قطعات کوچک کاه
افزایش دو برابری	روانی آسفالت	۱۰-۲	قیر طبیعی

علاوه بر موارد ذکر شده، الیاف فلزی و شبه‌فلزی (که حدود ۵۰ درصد مواد تشکیل‌دهنده آن فلز می‌باشد)، و الیاف مصنوعی از دیگر انواع الیاف هستند که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف مصنوعی از صنایع پتروشیمی به‌دست می‌آیند و می‌توان از رایج‌ترین آنها به نایلون^۸، پلی‌استر^۹، پلی‌پورتان^{۱۰} و پلیمرهای آروماتیک^{۱۱} اشاره کرد. انواع دیگری از الیاف نیز وجود دارند که در دسته‌بندی‌های الیاف فایبرگلاس^{۱۲} و الیاف کربنی طبقه‌بندی می‌شوند [۱۰].

جدول ۲، به صورت مختصر برخی از انواع الیاف که در روسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند را با توجه به ماده خام تشکیل‌دهنده آنها طبقه‌بندی و ارائه کرده است [۱۱-۱۳].

۳-۱- استفاده از نانواکسید مس در مخلوط آسفالتی

استفاده از نانو اکسید مس به عنوان افزودنی بهبوددهنده مشخصات قیر به میزان یک و دو درصد وزنی قیر موجب بهبود مشخصات مخلوط آسفالتی شده است. یک درصد نانواکسید مس موجب کاهش حدود ۲۰ درصدی کرنش ماندگار روسازی بعد از ۲۰۰۰ سیکل بارگذاری ۲۰۰ کیلوپاسکال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد شد. اما افزایش میزان نانواکسید مس از یک درصد به دو درصد تنها حدود پنج درصد بیشتر به مقاومت در برابر کرنش دائمی کمک کرد. نانواکسید مس همچنین در بارگذاری ۱۰۰ الی ۳۰۰ کیلوپاسکال عمر خستگی را به شدت افزایش داده، ولی با افزایش میزان بار وارده از تأثیر آن اندکی کاسته شد [۱۴].

در تحقیق دیگری که بر روی تأثیر نانواکسید مس بر مقاومت آسفالت متخلخل در برابر شیارشدگی انجام شد، مشخص گردید که استفاده از این نانو ذره می‌تواند مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر شیارشدگی افزایش دهد. این امر به دلیل تشکیل شبکه‌ای در ساختار قیر پس از افزودن نانواکسید مس به مخلوط آسفالتی است که در آن برهم‌کنش قوی بین نانو ذرات و ساختار مولکولی قیر ایجاد می‌شود. در این تحقیق همچنین نشان داده شد که

^۸- Nylon

^۹- Polyester

^{۱۰}- Polyurethane

^{۱۱}- Aromatic Polymers

^{۱۲}- Fiberglass Fibers

افزایش نانو اکسید مس به میزان بیش از ۶ درصد وزنی قیر
تأثیر منفی گذاشته و در واقع، مقاومت مخلوط آسفالتی
حاوی ۶ درصد نانو اکسید مس از همان مخلوط با ۸ درصد
نانو اکسید مس بیشتر بود [۱۵].

جدول ۲- برخی از الیاف متداول و مشخصات آنها [۱۱-۱۳]

نوع الیاف	خصوصیات
معدنی	الیاف تهیه شده از آذیت، بازالت و بروسیت معمولاً به عنوان محبوبترین الیاف معدنی شناخته می‌شوند که مواد اولیه آنها از سطح و یا عمق زمین به دست می‌آید. عموماً ماده خام این الیاف سیلیکات است و این الیاف از روش‌های الکتریکی-حرارتی به دست می‌آیند.
پلی استر	الیاف پلی استر که از پلیمریزاسیون اتیلن به دست آمده‌اند یکی بیشترین الیاف مصنوعی هستند که مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الیاف به راحتی قابلیت ذوب و قالب‌گیری مجدد را دارند و بنابراین به راحتی مورد بازیافت قرار می‌گیرند.
پلی اکریلونیتریل (Polyacrylonitrile)	الیاف پلی اکریلونیتریل که عموماً با نام PAN شناخته می‌شوند از نتیجه پلیمریزاسیون اکریلونیتریل در حضور کاتالیزور به دست می‌آیند و بیشتر در صنایع نظامی و ساخت هواپیماها کاربرد دارند.
کربن	الیاف PAN معمولاً به عنوان مواد اولیه الیاف کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف کربن مشخصات بهتری (مقاومت کششی، مقاومت در برابر خستگی) در مقایسه با الیاف دیگر دارند. همچنین این الیاف مشخصات قابل توجه دیگری از جمله رسانایی الکتریکی و حرارتی را نیز دارا هستند.
شیشه	الیاف شیشه‌ای، که فایبرگلاس هم خوانده می‌شوند، به عنوان الیاف معدنی شناخته می‌شوند که با انجام عملیاتی بر روی مصالحی چون سنگ آهک، رس کائولین، فلدسپار، دولومیت و سایر مواد معدنی به دست می‌آیند.
فولاد	الیاف فولادی شامل الیاف کوتاه از فولاد می‌باشند که در فرآیند تولید از روش‌های مختلفی همچون افزودن کربن یا گوگرد به دست آمده‌اند.
نارگیل	الیاف نارگیل که از مواد اطراف میوه نارگیل به دست می‌آیند یکی از نمونه‌های صد در صد طبیعی الیاف می‌باشند.

دهد که به افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی و عدد روانی مخلوط آسفالتی کمک می‌کند [۱۷].

۴-۱- استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط آسفالتی

استفاده از الیاف پلی پروپیلن در مخلوط آسفالتی موجب بهبود قابل توجه در رفتار مخلوط آسفالتی می‌شود. به عنوان مثال، افزودن یک درصد الیاف، موجب افزایش ۵۸ درصدی مقاومت مارشال نمونه آسفالتی شده است. همچنین افزودن این مقدار الیاف، عمر خستگی نمونه‌ها را به میزان ۲۷ درصد افزایش داده است [۱۸].

در تحقیق دیگری که الیاف پلی پروپیلن به میزان ۰/۵ و یک درصد وزنی به مخلوط آسفالتی اضافه شد، مشخص گردید که افزودن این الیاف، تأثیرات به‌سزایی روی مشخصات مخلوط آسفالتی می‌گذارند. به عنوان مثال، پلی پروپیلن موجب افزایش استقامت مخلوط آسفالتی تا ۱۴ درصد می‌شود. همچنین درصد قیر بهینه حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد؛ اما درصد فضای خالی،

برخی از محققین برای بررسی تأثیر نانو اکسید مس بر شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی، به جای مخلوط آسفالتی به سراغ خواص رئولوژیکی قیر رفته و پارامتر $G^*/\sin\delta$ را به عنوان مشخصه قیر در برابر شیارشدگی مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR^{13}) روی قیر پیر نشده و قیر تحت آزمایش پیرشدگی کوتاه‌مدت نشان داد افزودن نانو اکسید مس می‌تواند موجب افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی و تغییر شکل‌های دائم شود [۱۶].

در برخی تحقیقات گزارش شده است که بیشترین مقاومت در برابر ترک‌های دمای پایین در کمترین مقدار سختی خزشی در مخلوط آسفالتی حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید مس اتفاق می‌افتد. استفاده از مقدار نانو کمتر همچنین می‌تواند اتصال بین قیر و سنگدانه‌ها را افزایش

13- Dynamic Shear Rheometer

وزن مخصوص و روانی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد [۱۹].

افزودن الیاف پلی پروپیلن به مخلوط آسفالتی، به شدت فرآیند شکست و ترک خوردگی نمونه‌های آسفالتی را متأثر کرده و سختی مخلوط آسفالتی را زیاد می‌کند، ولی اگر این الیاف با الیاف شیشه‌ای ترکیب شود و به صورت توأمان به میزان یک درصد در مخلوط آسفالتی قرار گیرد بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند [۴].

در تحقیق دیگر که الیاف پلی پروپیلن در مقادیر ۲ تا ۱۰ درصد وزنی قیر بهینه به مخلوط آسفالتی اضافه شد، مشخص گردید افزودن الیاف تا ۸ درصد می‌تواند موجب کاهش ۵۰ درصدی عمق شیار شود. همچنین در این مقدار، الیاف موجب افزایش ۱۵/۲ کیلونیوتنی استقامت مارشال نمونه آسفالتی شد. مقادیر ITS^{۱۴} اندازه‌گیری شده با افزایش مقادیر الیاف تا ۸ درصد افزایش پیدا کرده و پس از آن روند کاهشی در پیش گرفت [۲۰]. این در حالی است که در تحقیق دیگری، مقدار بهینه الیاف برای دستیابی به بیشترین مقاومت مارشال برابر ۵ درصد تعیین شده بود [۲۱].

پژوهشی دیگر، به بررسی بهبود خواص بتن آسفالت از طریق افزودن الیاف پلی پروپیلن پرداخته است که در این مطالعه، ۶۰ نمونه آسفالت با درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن (صفر، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد وزنی قیر آسفالت) با استفاده از روش طراحی مخلوط مارشال تهیه شد. آزمون‌های فیزیکی بر روی قیر آسفالت شامل نفوذپذیری، نرمی و نقطه ذوب انجام گردید که نشان داد افزودن الیاف موجب بهبود ثبات و ویژگی‌های مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که افزایش میزان الیاف باعث افزایش استقامت مارشال و کاهش عدد روانی مخلوط آسفالتی می‌شود و بهترین عملکرد با ۵٪ الیاف مشاهده شد. این تحقیق نشان داد که الیاف پلی پروپیلن می‌تواند به عنوان عوامل تقویت‌کننده مؤثر

در مخلوط‌های آسفالت استفاده شوند و به بهبود دوام و عملکرد آنها در شرایط مختلف محیطی کمک کنند [۲۲].

۱-۵- جمع‌بندی مطالعات پیشین

مطابق آنچه در قسمت‌های قبل آورده شد، استفاده از نانواکسید مس و الیاف پلی پروپیلن در مخلوط آسفالتی می‌تواند به‌طور قابل توجهی ویژگی‌های مکانیکی مخلوط آسفالتی و مشخصات رئولوژیکی قیر را بهبود بخشد. افزودن نانواکسید مس می‌تواند کرنش ماندگار روسازی را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد و در واقع، موجب سخت‌شدگی بیشتر مخلوط آسفالتی می‌شود. از طرف دیگر، الیاف پلی پروپیلن به افزایش استحکام کششی و دوام کمک کرده، پایداری مارشال را بهبود بخشیده و ترک خوردگی را کاهش می‌دهد. این افزودنی‌ها به‌طور کلی، مقاومت مخلوط آسفالتی را در برابر تنش‌های محیطی افزایش داده و عمر مفید آن را طولانی‌تر می‌کنند.

بنابراین به نظر می‌رسد استفاده توأمان از نانواکسید مس و الیاف پلی پروپیلن به‌طور همزمان می‌تواند منتج به مخلوط آسفالتی سخت‌تر و بادوام‌تری شود. در واقع، الیاف پلی پروپیلن تأثیرات منفی نانواکسید مس را تلطیف می‌کند. قابل ذکر است که این موضوع به این نحو تاکنون در تحقیقات پیشین مورد بررسی قرار نگرفته است.

این تحقیق به منظور به‌دست آوردن میزان بهینه استفاده توأمان از نانواکسید مس و الیاف پلی پروپیلن به منظور بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط آسفالتی به ویژه در برابر شیارشدگی انجام شده است.

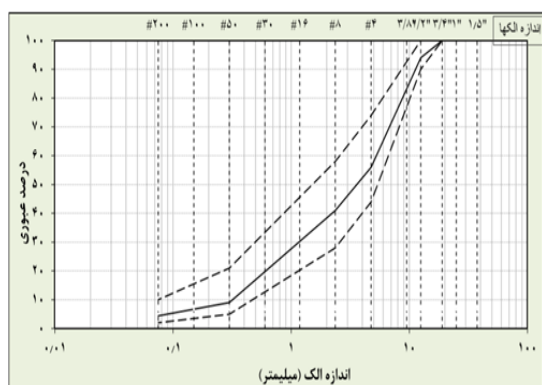
۲- رویه آزمایشگاهی

در این بخش، ابتدا مشخصات مصالح مورد استفاده در این تحقیق بیان شده و سپس فرآیند ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها شرح داده شده است.

¹⁴- Indirect Tensile Strength

۱-۲- مصالح مورد استفاده

انتخاب شده و منحنی دانه‌بندی مصالح و همچنین حدود بالا و پایین در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۳].



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی و حدود بالا و پایین نشریه ۱۰۱ [۲۳]

وزن مخصوص مصالح سنگی و همچنین میزان جذب آب آنها مطابق جدول ۳ می‌باشد. همچنین آزمایش‌های متداول مصالح سنگی بر روی سنگدانه‌ها انجام و نتایج آن در جدول ۴ ذکر شده است.

جدول ۳- وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح (ASTM C127 و ASTM C128) [۲۴]

جذب آب (درصد)	وزن مخصوص		مشخصه
	حقیقی	ظاهری	
۱/۶	۲/۵۷۴	۲/۶۸۵	مصالح مانده روی الک شماره ۴
۲/۴	۲/۵۶۹	۲/۷۴۰	مصالح رد شده از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۲۰۰
	۲/۵۷۷		وزن مخصوص حقیقی مخلوط مصالح سنگی

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های متداول روی سنگدانه‌ها

مشخصه/ آزمون		روش استاندارد	مقدار/ نتیجه	حداقل	حداکثر
مصالح سنگی درشت‌دانه					
افت وزنی در مقابل سایش به روش لس‌آنجلس (درصد)		ASTM C131	۲۵	-	۲۵
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)		ASTM C88	۷	-	۸
سنگدانه‌های پهن و دراز، نسبت ۵ به ۱ (درصد)		ASTM D4791	صفر	-	۱۵
شکستگی مصالح سنگی (درصد)	در یک جبهه	ASTM D5821	۱۰۰	۹۵	-
	در دو جبهه		۹۸	۹۰	-
مصالح سنگی ریزدانه					
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد)		ASTM C88	۰/۹	-	۱۲
ارزش ماسه‌ای مصالح (درصد)		ASTM D2419	۶۳	۵۰	-
گوشه‌داری مصالح سنگی ریزدانه، روش آزمون A (درصد)		ASTM C125	۴۷/۱	۴۵	-
وجود مواد ناخالصی آلی (دارای ناخالصی یا بدون ناخالصی آلی)		ASTM C40	بدون ناخالصی	بدون ناخالصی	

۲-۱-۲- قیر

تحقیق از پالایشگاه شیراز تهیه شده است. جدول ۵،

مشخصات قیر مصرفی در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۱-۳- نانو اکسید مس

نانو اکسید مس مورد استفاده با فرمول شیمیایی

CuO بوده که مشخصات آن در جدول ۶ و شکل ظاهری

و میکروسکوپی آن در شکل ۳ آورده شده است.

قیر مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها در این

تحقیق از نوع قیر عملکردی با رده‌بندی PG 64-16 است،

که به دلیل شرایط آب‌وهوایی، در پروژه‌های استان فارس

و کرمان بیشترین استفاده را دارد. قیر مورد نیاز این

جدول ۵- مشخصات قیر مورد استفاده

۱۳۵	دمای آزمایش (° C)	ویسکوزیته چرخشی RV (AASHTO T 316)
۰/۳۵۱	ویسکوزیته (Pa.s)	
۶۴	دمای آزمایش (° C)	رئومتر برشی دینامیکی (DSR) (AASHTO T315)
۱/۱۶	G*/ Sinδ (kPa) حداقل ۱/۰	
۲۹۹	دمای اشتعال (° C) AASHTO T48	
قیر باقیمانده آزمایش RTFO پیرشدگی أون لایه نازک متحرک قیر AASHTO T 240		
۰/۲۲۰	تغییر حجم قیر در آزمایش پیرشدگی RTFOT (%)	
۶۴	دمای آزمایش (° C)	رئومتر برشی دینامیکی (DSR) (AASHTO T315)
۳/۶۵	G*/ Sinδ (kPa) حداقل ۲/۲	
قیر باقیمانده آزمایش PAV تسریع پیرشدگی قیر AASHTO R 28		
۱۰۰	دمای پیرشدگی آزمایش PAV (درجه سلسیوس)	
۲۸	دمای آزمایش (° C)	رئومتر برشی دینامیکی (DSR) (AASHTO T315)
۳۹۲۰	G* Sinδ (kPa) حداکثر ۵۰۰۰	
-۶	دمای آزمایش (° C)	رئومتر تیر خمشی (BBR) (AASHTO T313)
۱۲۶	سختی خزشی S (MPa) حداکثر ۳۰۰	

جدول ۶- مشخصات فیزیکی نانو اکسید مس مورد استفاده

CuO	فرمول شیمیایی
٪۹۹	درصد خلوص
سیاه	رنگ
تقریباً کروی	ساختار سازه ای
۰/۷۹gr/cm ³	دانسیته فله ای
۶/۴gr/cm ³	دانسیته نمونه
۴۰nm	اندازه ذرات
۲۰m ² /gr	سطح ویژه

۲-۱-۴- الیاف پلی پروپیلن

همچنین شکل ظاهری آن نیز در شکل ۴ نشان داده شده

است.

۲-۲- آماده سازی نمونه‌ها

دانه‌بندی مصالح سنگی همانگونه که پیشتر توضیح

داده شد براساس نشریه ۱۰۱ انجام شد. در ادامه با توجه

الیاف پلی پروپیلن (PP) مورد استفاده در این

تحقیق از شرکت نگین رز اصفهان با طول برش ۱۸

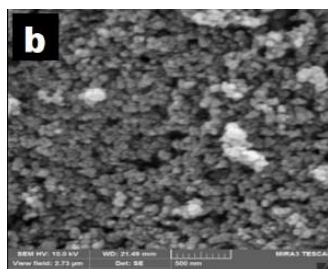
میلیمتر تهیه شده است. مشخصات فیزیکی این الیاف که

توسط آزمایشگاه‌های شرکت سازنده انجام و به همراه

محصول ارائه شده، در جدول ۷ آورده شده است.

به بندهای دیگر این نشریه درصد قیر بهینه مصالح برابر ۴/۸ درصد به دست آمد. با توجه به نتایج تحقیقات پیشین میزان نانو اکسید بهینه برای استفاده در مخلوط آسفالتی بین ۰/۵ الی ۴/۵ درصد وزنی قیر می باشد. در این تحقیق

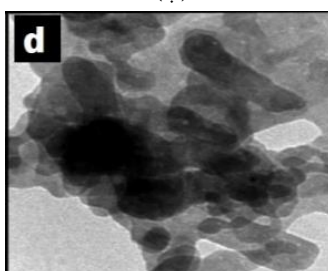
پنج سری، هر سری شامل سه نمونه مختلف آسفالتی ساخته شد (جمعا ۳۰ نمونه) که شامل مخلوط آسفالتی با ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد نانو اکسید مس و یک نمونه شاهد (صفر درصد نانو اکسید مس) بود.



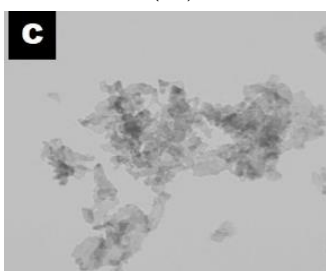
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۳- شکل ظاهری و زیر میکروسکپ نانو ذرات مس (CuO) مورد استفاده. (الف) شکل ظاهری، (ب) تصویر SEM^{۱۵}، (پ و ت): تصویر TEM^{۱۶}

جدول ۷- مشخصات الیاف پلی پروپیلن استفاده شده

مشخصات	مقدار	واحد
وزن مخصوص	۰/۹۱	گرم بر سانتی متر مکعب (g/cm ³)
استحکام	۲/۵- ۳/۵	گرم بر دنیر (g/den)
نقطه ذوب	۱۶۰-۱۷۰	درجه سلسیوس (°C)
دمای نرم شدگی	۱۵۰-۱۴۰	درجه سلسیوس (°C)
قطر	۱۷-۱۹	میکرون (μ)
نمره	۲/۲	دی تکس (dTex)
ازدیاد طول	۸۰-۱۰۰	درصد (%)
نوع تکمیل	آب دوست	-
زمان غوطه وری	۳-۵	ثانیه
طول برش	۱۸	میلی متر (mm)
بار الکتریکی ساکن	۱/۲- ۱/۵	کیلوولت بر متر (KV/m)

15- Scanning Electron Microscopy

16- Transmission Electron Microscopy



شکل ۴- الیاف پلی پروپیلن

و به منظور اختلاط بهتر، تصمیم گرفته شد که فرآیند اختلاط به صورت دستی انجام شود.

نهایتاً در این تحقیق با توجه به آزمون و خطاهای انجام شده، که پیشتر به آن اشاره شد، ابتدا قیر حاوی ۲٪ نانومواد با مصالح سنگی به صورت دستی حدود ۱۰ تا ۱۵ ثانیه ترکیب شده، سپس الیاف به آن اضافه می‌شود که پس از اضافه شدن الیاف به مخلوط، ترکیب فوق به مدت ۶۰ ثانیه هم زده می‌شود. با این روش، الیاف به طور همگن با مخلوط آمیخته می‌شوند. همچنین در این پژوهش برای حصول نتایج بهتر و ترکیب یکنواخت‌تر، الیاف‌ها به سه قسمت تقسیم شده و در سه نوبت به مخلوط قیر و مصالح سنگی اضافه گردید. به عنوان مثال، برای ساخت نمونه‌ها با ۰/۱ درصد الیاف، بعد از ترکیب قیر و مصالح سنگی، الیاف رشته رشته شده و به سه قسمت تقسیم گردیدند. در هنگام اختلاط، هر ۱۵ ثانیه یک قسمت از الیاف به مخلوط اضافه شد، تا الیاف به طور یکنواخت در تمام مخلوط پخش شود و یک ترکیب تا حد ممکن همگن به دست آید.

به منظور بررسی تأثیر درصدهای مختلف الیاف بر مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با نانواکسید مس، با توجه به اینکه در مطالعات پیشین بازه استفاده از الیاف بین ۰/۱ الی ۰/۶ درصد بوده است، درصدهای الیاف برای ساخت نمونه‌ها ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزن کل مخلوط آسفالتی انتخاب شد [۹، ۱۰، ۱۸، ۱۹ و ۲۵].

به منظور اختلاط مناسب نانو مواد و قیر از دستگاه همزن با تنش برشی بالا^{۱۷} استفاده شد که با توجه به پیشینه تحقیق، سرعت دستگاه برابر ۳۵۰۰ دور در دقیقه، دمای اختلاط ۱۶۰ درجه سانتیگراد و زمان اختلاط نیز برابر ۴۵ دقیقه انتخاب گردید [۱۴ و ۱۶].

پس از آنکه درصد بهینه نانواکسید مس مشخص شد (که در ادامه نمودارهای مربوط به آن آورده شده است)، الیاف پلی پروپیلن در درصدهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ وزنی قیر به مخلوط آسفالتی اضافه شدند (مجموعاً ۱۲ نمونه). برای افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی، روش‌های مختلفی وجود دارد که در تحقیقات مختلف از آنها استفاده شده است.

در صورتی که الیاف به یکباره به مخلوط آسفالتی اضافه شوند به یکدیگر می‌چسبند و تشکیل کولونی‌های الیاف را می‌دهند که به سختی می‌توان آنها را از یکدیگر جدا کرد. برای اختلاط الیاف پلی پروپیلن چندین حالت مختلف از نحوه اختلاط، مورد آزمون قرار گرفت و نتیجه آنها با یکدیگر مقایسه شد. در هنگام اختلاط مصالح با همزن مشاهده گردید که بخش عمده‌ای از الیاف پس از آغشته شدن به قیر به جداره‌های ظرف می‌چسبند و برای اختلاط بهتر لازم بود الیاف چسبیده به جداره‌های ظرف از آن جدا شوند و عملیات اختلاط مجدداً از سر گرفته شود. بنابراین با توجه به مقدار مورد نیاز مخلوط آسفالتی

17- High Shear Mixer

۲-۳- رویه انجام آزمایش‌ها

در تحقیق حاضر، ابتدا نمونه‌های حاوی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد مواد نانو و نمونه شاهد (صفر درصد مواد نانو)، تحت آزمایش‌های دینامیکی قرار گرفتند. با توجه به نتایج، مقدار ۲ درصد مواد نانو به عنوان درصد بهینه انتخاب شد. سپس برای آزمایش مارشال نمونه‌های حاوی ۲ درصد مواد نانو با (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵) درصد وزن کل مخلوط آسفالتی، به روش مختلط ترکیب شده تا تأثیر مواد نانو توأمان با درصد مختلف الیاف بررسی گردد.

۲-۳-۱- آزمایش مارشال

آزمایش مارشال یکی از رایج‌ترین آزمایش‌ها برای کنترل و طراحی بتن آسفالتی است که عموماً برای مخلوط آسفالتی با دانه‌بندی مصالح کمتر از ۲۰ میلی‌متر انجام می‌شود. مهمترین هدف آزمایش مارشال به‌دست آوردن بار نهایی قابل تحمل (استقامت) و همچنین تغییرشکل در هنگام اعمال بار بیشینه (روانی) نمونه آسفالتی می‌باشد [۲۶].

۲-۳-۲- آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق برای محاسبه مدول برجهندگی از دستگاه UTM^{18} مطابق استاندارد ASTM D4123 با بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه به صورت نیمه سینوسی در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد استفاده شده است. به دلیل حذف اثرات نحوه ساخت و تراکم، هر نمونه باید دو بار تحت آزمایش مدول برجهندگی قرار گیرد. به این صورت که بر روی یک نمونه، تست مدول انجام می‌شود و بعد همان نمونه، ۹۰ درجه در دستگاه UTM چرخانده شده و باز تست مدول بر روی همان نمونه انجام می‌گیرد و میانگین عدد مربوطه به عنوان نتیجه آزمایش در نظر گرفته می‌شود. همچنین مدول به‌دست آمده در مرتبه دوم، کمتر از مرتبه اول است و این اختلاف، زمانی

مشهودتر است که از مواد با سختی پایین استفاده شود و یا آزمایش در دمای خیلی بالا انجام گیرد. این تفاوت به دلیل این است که پس از بارگذاری مرحله اول تغییرشکل الاستیک در نمونه‌ها به کلی از بین نرفته است.

۲-۳-۳- آزمایش خزش دینامیکی

در این تحقیق برای تست خزش دینامیکی از دستگاه UTM استفاده شده است. نمونه‌ها تحت یک بارگذاری نیمه سینوسی با بارگذاری ۰/۵ ثانیه و زمان استراحت ۱/۵ ثانیه، براساس استاندارد Australian AS2891 قرار گرفته‌اند. تغییرشکل‌ها به طور پیوسته توسط دو حسگر اندازه‌گیری شده است. نمونه‌ها به ابعاد ۱۰۱ در ۶۵ میلیمتر به مدت ۳۰۰ میلی‌ثانیه، تحت یک پیش بارگذاری قرار می‌گیرند. سپس این پیش بارگذاری حذف شده و نمونه‌ها تحت یک بار دینامیک ۴۵۰ کیلوپاسکالی در دمای ۵۰ درجه قرار می‌گیرند. واحد این آزمایش $\mu\epsilon$ میکرو کرنش^{۱۹} است. در این پژوهش برای ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد نانواکسید مس و نمونه شاهد، آزمایش خزش دینامیکی انجام شده است.

آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها به صورت مختصر در جدول ۸ بیان شده‌اند. شکل ۵ نیز فلوجارت روند انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

۳- نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های انجام شده به تفکیک بیان می‌شود.

۳-۱- نتایج آزمایش ضریب برجهندگی

در این پژوهش، همانگونه که پیشتر بیان شد، برای محاسبه مدول برجهندگی از دستگاه UTM مطابق استاندارد ASTM D4123 استفاده شده و چهار سری نمونه برای ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد نانواکسید مس و

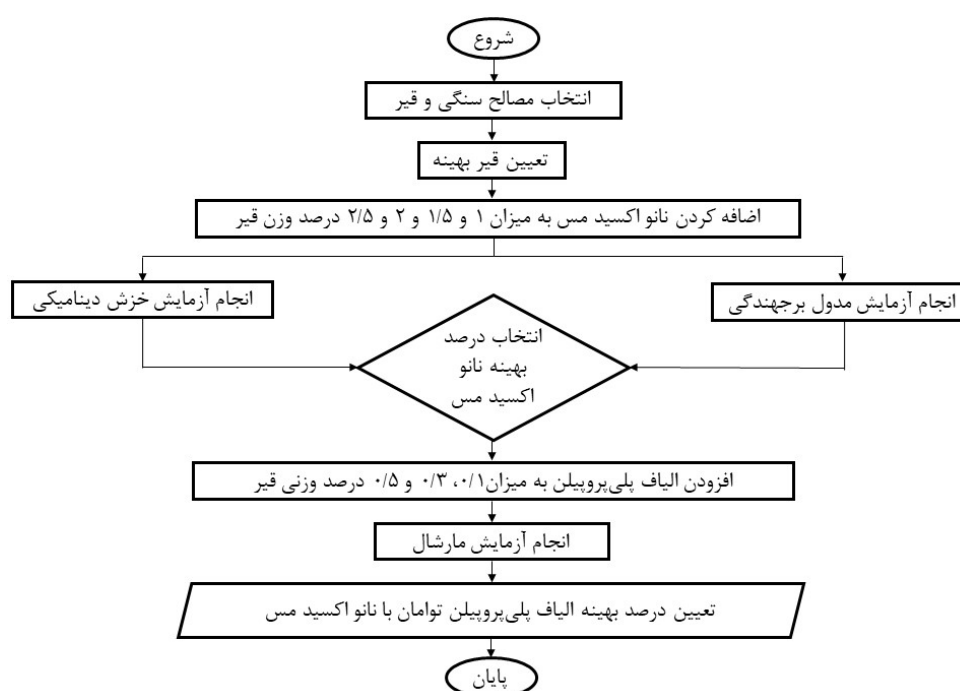
19- Microstrain

18- Universal Testing Machine

همچنین یک نمونه شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند. برای درک بهتر روند تغییرات مدول برجهندگی، نتایج در نتایج این آزمایش در جدول ۹ آورده شده است. همچنین شکل ۶- الف نیز نشان داده شده‌اند.

جدول ۸- خلاصه آزمایش‌های انجام شده

نام آزمایش	افزودنی مورد استفاده	درصد افزودنی	درصد قیر	دستگاه مورد استفاده
مدول برجهندگی	نانواکسید مس CuO	۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزن قیر	درصد قیر بهینه اولیه (بدون افزودنی)	UTM
خزش دینامیکی	نانواکسید مس CuO	۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزن قیر	درصد قیر بهینه اولیه (بدون افزودنی)	UTM
مارشال	الیاف پلی پروپیلن PP و نانواکسید مس CuO	۲ درصد نانواکسید مس و ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد مخلوط آسفالتی الیاف پلی پروپیلن	قیر بهینه اولیه	جک مارشال



شکل ۵- فلوچارت روند انجام پژوهش

جدول ۹- نتایج آزمایش مدول برجهندگی

شماره نمونه	مدول برجهندگی (MPa)
نمونه شاهد	۱۲۵۸/۳۳
نمونه حاوی ۱ درصد نانو اکسید مس	۱۵۳۷/۸۳
نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید مس	۱۸۲۵/۳۳
نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسید مس	۱۹۴۴/۸۳
نمونه حاوی ۲/۵ درصد نانو اکسید مس	۱۷۷۴/۱

۳-۲- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

نانواکسید مس، با استفاده از دستگاه UTM تحت

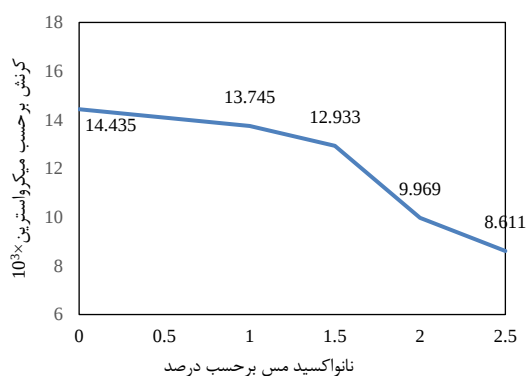
آزمایش قرار گرفتند. نتایج این آزمایش در جدول ۱۰ آورده شده است. همچنین برای درک بهتر روند تغییرات

در این تحقیق برای تست خزش دینامیکی، نمونه‌های حاوی ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ درصد وزنی قیر

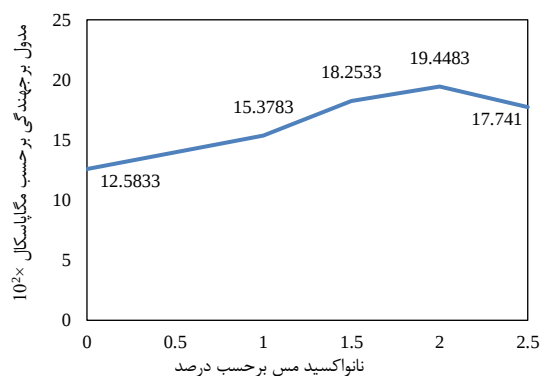
خزش دینامیکی، نتایج در شکل ۶- ب نیز نشان داده شده‌اند.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش خزش دینامیکی

شماره نمونه	مقدار خزش دینامیکی (μE)
نمونه شاهد	۱۴۴۳۵
نمونه حاوی ۱ درصد نانو اکسید مس	۱۳۷۴۵
نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانو اکسید مس	۱۲۹۳۳
نمونه حاوی ۲ درصد نانو اکسید مس	۹۹۶۹
نمونه حاوی ۲/۵ درصد نانو اکسید مس	۸۶۱۱



(ب)



(الف)

شکل ۶- تغییرات (الف) مدول بر جهندگی و (ب) خزش دینامیکی در برابر نانو اکسید مس

و شکل ۷- الف نشان داده شده‌اند. در این شکل، خط قرمز رنگ مقاومت مارشال نمونه‌ای را نشان می‌دهد که هیچگونه افزودنی به آن اضافه نشده است. همانطور که مشخص است و پیشتر نیز بیان شد افزودن دو درصد نانو اکسید مس به مخلوط آسفالتی، موجب افزایش حدود سه درصدی مقاومت مارشال نمونه‌ها می‌شود.

۳-۳- نتایج آزمایش سختی مارشال

در این پژوهش، قیر با دو درصد نانو اکسید مس براساس وزن قیر، ترکیب شده و سپس برای ساخت نمونه‌های مختلف (۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵) درصد وزن کل مخلوط آسفالتی، الیاف پلی پروپیلن به مخلوط اضافه شده است. نتایج و روند تغییرات سختی مارشال، در جدول ۱۱

جدول ۱۱- مقاومت مارشال بر حسب کیلوگرم

نام نمونه	مقاومت مارشال (Kg)
بدون افزودنی	۱۶۱۰
CuO ۲٪	۱۶۵۲
PP ۰/۱ و CuO ۲٪	۱۶۷۵/۷۳
PP ۰/۳ و CuO ۲٪	۱۷۴۱/۹۲
PP ۰/۵ و CuO ۲٪	۱۷۱۲/۶۲

نتایج آزمایش روانی مارشال در جدول ۱۲ آورده شده است. همچنین برای درک بهتر روند تغییرات روانی،

۴-۳- آزمایش روانی مارشال

که عبارت است از نسبت استحکام مارشال به روانی آسفالت که مقداری تجربی برای بیان مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییر شکل دائمی است. نتایج این شاخص در جدول ۱۳ و در شکل ۷-پ آورده شده است. در این شکل نیز خط قرمز مربوط به سختی مارشال نمونه‌ای است که به آن هیچ افزودنی اضافه نشده است.

نتایج در شکل ۷-ب نیز نشان داده شده‌اند. خط قرمز مربوط به روانی نمونه آسفالتی بدون افزودنی می‌باشد.

۳-۵- آزمایش ضریب سختی مارشال

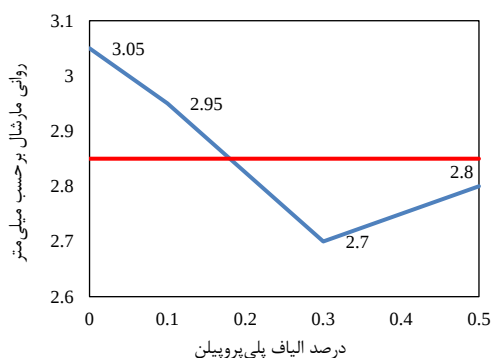
پارامتر دیگری که برای تعیین پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شود، نسبت مارشال است

جدول ۱۲- روانی مارشال برحسب میلی‌متر

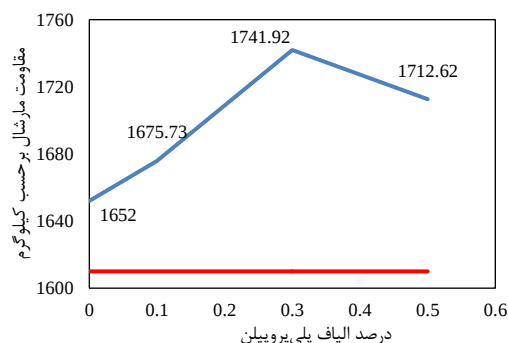
نام نمونه	روانی مارشال (mm)
CuO ۲٪	۳/۰۵
۲٪ CuO و ۱٪ PP	۲/۹۵
۲٪ CuO و ۳٪ PP	۲/۷۰
۲٪ CuO و ۵٪ PP	۲/۸۰

جدول ۱۳- ضریب سختی مارشال برحسب کیلوگرم بر میلی‌متر

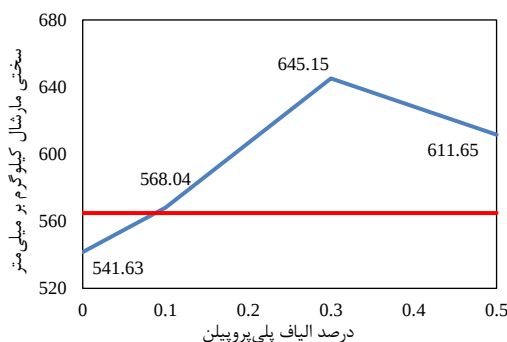
نام نمونه	سختی مارشال (Kg/mm)
بدون افزودنی	۵۶۴/۹
۲٪ نانو اکسید مس	۵۴۱/۶۳
۲٪ CuO و ۱٪ PP	۵۶۸/۰۴
۲٪ CuO و ۳٪ PP	۶۴۵/۱۵
۲٪ CuO و ۵٪ PP	۶۱۱/۶۵



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۷- (الف) مقاومت، (ب) روانی و (پ) سختی مارشال در برابر درصد الیاف پلی پروپیلن

۴- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، ابتدا با استفاده از آزمایش‌های خزش دینامیکی و مدول برجهندگی، درصد بهینه نانواکسید مس تعیین شد. همانگونه که در شکل ۶-الف مشاهده می‌شود با افزایش میزان نانواکسید مس تا مقدار دو درصد، مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش می‌یابد.

در تست خزش دینامیکی هم نتایج، حاکی از آن است که نانواکسید مس باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر شیارشدگی می‌شود که بیشترین ضریب رشد مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی دو درصد نانواکسید مس و بالاترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۲/۵ درصد نانواکسید مس است.

مطابق آنچه توضیح داده شد، درصد بهینه استفاده از نانواکسید مس در مخلوط آسفالتی برابر ۲ درصد تعیین شد. سپس با ثابت نگه داشتن این میزان نانواکسید مس، درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط آسفالتی اضافه گردید تا تأثیر این الیاف در حضور نانواکسید مس مورد بررسی قرار داده شود.

همانطور که در شکل ۷-الف ملاحظه می‌شود، افزودن الیاف به میزان ۰/۳ درصد به مخلوط آسفالتی حاوی نانواکسید مس می‌تواند مقاومت مارشال آن را بیش از پنج درصد بهبود بخشد. همچنین نتایج این آزمایش نشان داد افزودن الیاف بیش از این مقدار نمی‌تواند تأثیر مثبتی بر مقاومت مارشال نمونه‌های آسفالتی بگذارد (که یکی از دلایل اصلی این موضوع این است که الیاف زیاد باعث کاهش چسبندگی قیر و مصالح سنگی می‌شود که این موضوع باعث کاهش مقاومت مارشال نمونه‌های حاوی الیاف زیاد است).

افزودن میزان الیاف پلی‌پروپیلن به مقدار ۰/۳ درصد همچنین می‌تواند روانی مارشال مخلوط آسفالتی را بیش از ۱۱ درصد نسبت به حالتی که الیاف وجود ندارد کاهش دهد و میزان روانی به محدوده‌ای می‌رسد که بهترین

عملکرد را در برابر تغییر شکل از خود نشان دهد. این موضوع از شکل ۷-ب نیز قابل تحقیق است. همانگونه که مشاهده می‌شود افزودن الیاف به مخلوط آسفالتی موجب افزایش حدود ۲۰ درصدی سختی مارشال نمونه‌ها می‌شود.

به‌طور کلی، نانواکسید مس باعث افزایش مقاومت مارشال می‌شود اما مقدار آن ناچیز است به طوری که با دو درصد نانواکسید مس حدود ۲/۵ درصد مقاومت افزایش می‌یابد. همچنین استفاده از دو درصد نانواکسید مس و سه درصد الیاف در درصد قیر بهینه، مقاومت مخلوط را حدود ۸/۱ درصد افزایش داده است. افزودن نانواکسید مس باعث افزایش روانی مخلوط آسفالتی می‌شود و از طرف مقابل، افزودن الیاف باعث کاهش روانی می‌شود. در نتیجه، استفاده هم زمان از این دو افزودنی یک تعادل در مخلوط آسفالتی به‌وجود می‌آورد.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب نانواکسید مس و الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیارشدگی مورد استفاده قرار گیرد. افزایش مدول برجهندگی و مقاومت در برابر شیارشدگی در حضور نانواکسید مس، نشان‌دهنده بهبود رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی است. این بهبود ناشی از پرکنندگی نانوذرات و افزایش چسبندگی بین قیر و مصالح سنگی است که منجر به توزیع بهتر تنش‌ها و کاهش تمرکز تنش در نقاط ضعیف مخلوط می‌شود.

از سوی دیگر، افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط آسفالتی، با ایجاد شبکه‌ای از الیاف در ماتریس آسفالت، موجب افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و بهبود رفتار خمیری مخلوط می‌شود. این موضوع به ویژه در شرایط بارگذاری طولانی‌مدت (مانند خزش) اهمیت دارد، زیرا الیاف با جذب انرژی و جلوگیری از گسترش ترک‌ها، عملکرد مخلوط را بهبود می‌بخشند. با این حال، افزایش بیش از حد الیاف (بیش از ۰/۳ درصد) می‌تواند به دلیل

عملکرد بهینه در شرایط مختلف آب و هوایی و بارگذاری کمک کند.

در نهایت، می توان نتیجه گرفت که استفاده هم زمان از نانواکسید مس و الیاف پلی پروپیلن نه تنها خواص مکانیکی مخلوط آسفالتی را بهبود می بخشد، بلکه با ایجاد تعادل بین روانی و سختی، عملکرد کلی مخلوط را در شرایط واقعی بهینه سازی می کند. این یافته ها می تواند به عنوان پایه ای برای تحقیقات آینده در زمینه استفاده از نانوذرات و الیاف در بهبود عملکرد آسفالت مورد استفاده قرار گیرد.

کاهش چسبندگی قیر و مصالح سنگی، اثرات منفی بر مقاومت مخلوط داشته باشد. این پدیده نشان دهنده

اهمیت تعادل در میزان افزودنی ها است. همچنین، تأثیر هم زمان نانواکسید مس و الیاف پلی پروپیلن بر روانی مخلوط آسفالتی، نشان دهنده تعامل پیچیده بین این دو افزودنی است. نانواکسید مس با افزایش روانی، کارایی مخلوط را بهبود می بخشد، در حالی که الیاف با کاهش روانی، موجب افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل می شوند. این تعادل بین روانی و سختی، می تواند به طراحی مخلوط های آسفالتی با

References

- [1] Coleri E, Tsai B-W, Monismith CL. Pavement rutting performance prediction by integrated Weibull approach. *Transportation Research Record*. 2008; 2087(1): 120-130. doi: 10.3141/2087-13
- [2] Du Y, Chen J, Han Z, Liu W. A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*. 2018; 168: 893-905. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.151
- [3] Domingos MDI, Faxina AL. Susceptibility of asphalt binders to rutting: literature review. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2016; 28(2): 04015134. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000136
- [4] Akram H, Hozayen HA, Abdelfatah A, Khodary F. Fiber Showdown: A Comparative Analysis of Glass vs. Polypropylene Fibers in Hot-Mix Asphalt Fracture Resistance. *Buildings*. 2024; 14(9): 2732. doi: 10.3390/buildings14092732
- [5] Ali Y, Irfan M, Ahmed S, Ahmed S. Empirical correlation of permanent deformation tests for evaluating the rutting response of conventional asphaltic concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017; 29(8): 04017059. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001888
- [6] Jahanian H, Shafabakhsh G, Divandari H. Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) containing bitumen modified with Gilsonite. *Construction and Building Materials*. 2017; 131: 156-164. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.069
- [7] Rahi M, Fini EH, Hajikarimi P, Nejad FM. Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2015; 27(4): 04014154. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001102
- [8] Hamed GH, Pakenari MM, Tabrizi MT, Pirbasti ZR. Effect of Nano-Cobalt Oxide on the Rheological Behavior of Asphalt Binder and Mechanical Characteristics of Hot Mix Asphalt. *Advances in Civil Engineering*. 2023; 2023(1): 7. doi: 10.1155/2023/7353949
- [9] Mohammed M, Parry T, Grenfell JJ. Influence of fibres on rheological properties and toughness of bituminous binder. *Construction and Building Materials*. 2018; 163: 901-911. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.146
- [10] Slebi-Acevedo CJ, Lastra-González P, Pascual-Muñoz P, Castro-Fresno D. Mechanical performance of fibers in hot mix asphalt: A review. *Construction and Building Materials*. 2019; 200: 756-769. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.171
- [11] Costa R, Orriols R. Man-made mineral fibers and the respiratory tract. *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*. 2012; 48(12): 460-468. doi: 10.1016/j.arbr.2012.04.004
- [12] Fasanella N. *Mechanical characterization of advanced polyacrylonitrile derived carbon fibers reinforced with carbon nanotubes*. Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [13] Grishanov S. Structure and properties of textile materials. *Handbook of textile and industrial dyeing*: Elsevier; 2011; 28-63. doi: 10.1533/9780857093974.1.28
- [14] Hamed GH. Evaluating the Rheological and Mechanical Properties of Asphalt Mixtures Modified with Nano Copper Oxide. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 2021; 53(10): 4161-4182 doi: 10.22060/ceej.2020.18119.6773 [In Persian]
- [15] Sobhkhiz Foumani R, Rajae T, Fatehifar E. A Laboratory Study of the Effect of ZnO Nanooxide and CuO Nanooxide on the Rutting Resistance and Absorption of Pollutants in Porous Asphalt in Urban Surface

- Runoff. Journal of Water and Wastewater Science and Engineering. 2023; 8(3): 59-69. **doi: 10.22112/jwwse.2023.367762.1329** [In Persian]
- [16] Shafabakhsh G, Sajadib S. Evaluation of rheological behavior of bitumen modified with Nano Copper Oxide. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018; 7(4): 13-18. **doi: 10.14419/ijet.v7i4.7.20370**
- [17] Debbarma K, Debnath B, Sarkar PP. A comprehensive review on the usage of nanomaterials in asphalt mixes. Construction and Building Materials. 2022; 361: 129634. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129634**
- [18] Tapkın S. The effect of polypropylene fibers on asphalt performance. Building and Environment. 2008; 43(6): 1065-1071. **doi: 10.1016/j.buildenv.2007.02.011**
- [19] Rashid MF, Ahmed N, Ahmed A. The Effect of Using Polypropylene Fiber on Deformation Resistance of Asphalt Concrete. In Proceedings of the 2nd Conference on Sustainability in Civil Engineering (CSCE'20), Islamabad, Pakistan 2020 Aug 12; 1-6.
- [20] Karim F. Alleviating Permanent Deformation and Moisture Damage in Hot Mix Asphalt Using Polypropylene Fibers. Technical Journal. 2024; 29: 8.
- [21] Moubark S, Khodary F, Othman A. Evaluation of mechanical properties for polypropylene modified asphalt concrete mixtures. International Journal of Scientific Research and Management. 2017; 5(12): 7797-7801. **doi: 10.18535/ijserm/v5i12.28**
- [22] Abdullh M. Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture Using Polypropylene Fibers. Syrian Journal for Science and Innovation. 2024; 2-2: 1-8.
- [23] Management and Planning Organization of Iran. General Technical Specifications for Road Construction. Tehran. 2013; 2nd rev: Table 1-20, 505. [In Persian]
- [24] Astm standards. International Standards Worldwide. West Conshohocken, United States. 1995.
- [25] Karahancer S. Investigating the performance of cuprous oxide nano particle modified asphalt binder and hot mix asphalt. Construction and Building Materials. 2019; 212: 698-706. **doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.041**
- [26] Department RaH. STANDARD TEST PROCEDURES. Bangladesh: Government of the People's Republic of Bangladesh, Ministry of Communications. 2001 May; 2001.