



Replacing Natural Filler with Foundry Waste Filler and Adding Nanosilver: Performance Enhancement of Asphalt Mastics for Slurry Seal

Research Article

Vahid Bagheri Mofrad¹, Mahmood Jazayeri Moghaddas², Amin Tohidi³ , Hassan Divandari⁴, Mehdi Mahdavi Adeli⁵
DOI: [10.22067/jfcej.2026.94593.1365](https://doi.org/10.22067/jfcej.2026.94593.1365)

1. Introduction

Growing environmental concerns related to the extraction of natural aggregates and the increasing volume of industrial waste have strongly motivated the use of alternative materials in pavement preservation. Slurry seal, as a highly effective cold preventive maintenance treatment, plays a crucial role in reducing life-cycle costs and mitigating environmental pollutants. However, distresses such as raveling, bleeding, stripping, and rutting are frequently observed in these overlays, primarily stemming from inappropriate mix design, poor adhesion between the bitumen and aggregates, and the selection of substandard mineral fillers. The mineral filler, comprising particles smaller than 0.075 mm, significantly affects the adhesion, abrasion resistance, and deformation behavior of the asphalt mastic. Simultaneously, the extraction of natural limestone aggregates leads to severe environmental consequences, including vegetation destruction, landscape alteration, and dust generation, while high-quality natural resources are becoming increasingly limited and expensive. Conversely, the rapid growth of urbanization and industrial activities has resulted in a massive accumulation of industrial wastes, exceeding landfill capacities. Foundry waste, particularly from CO₂ molding sand processes, represents a significant industrial by-product that is typically discarded. Utilizing such materials in pavement engineering not only conserves natural resources but also resolves waste disposal challenges. Furthermore, the incorporation of nanomaterials, specifically silver nanoparticles (Ag NPs), has emerged as a promising approach to enhance the microstructural integrity, thermal stability, and mechanical resistance of bituminous mastics due to their high surface area and unique physicochemical properties. Despite these potentials, limited research has addressed the combined effects of foundry waste fillers and nanosilver in cold

asphalt mastics. Therefore, this study evaluates the technical feasibility, microstructural characteristics, and functional performance of replacing natural limestone filler with foundry waste filler and improving the mastic behavior using nanosilver in slurry seal applications.

2. Methodology

A comprehensive laboratory matrix was designed to evaluate the combined effects of foundry waste filler and nanosilver on slurry seal mastics. The primary binder used was a cationic slow-setting emulsion (CSS-1h), selected for its excellent compatibility with slurry seal applications and ambient-temperature workability. The natural filler consisted of industrial limestone powder (calcium carbonate dominant), while the foundry waste filler was obtained from recycled CO₂ molding sand, processed, and sieved to pass the 0.075 mm sieve. Silver nanoparticles (Ag NPs) with an average particle size of 40–70 nm and >99% purity were utilized as the nano-modifier. The aggregate gradation was designed according to the ISSA TB-112 standard for Type II slurry seal. The experimental matrix included five levels of natural filler replacement with foundry waste filler (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) and three residual binder contents (8.0%, 8.5%, and 9.0%). In the nano-modified series, nanosilver was incorporated at a fixed dosage of 10% by the total weight of the filler. To ensure uniform dispersion, the nanosilver was pre-mixed with the dry filler in a high-speed mixer for 3 minutes, subsequently added to the emulsion at 60–70°C, and stirred using a hotplate magnetic stirrer for 10 minutes. Chemical and microstructural characterizations of the fillers and mastics were conducted using X-ray Fluorescence (XRF) for elemental composition, X-ray Diffraction (XRD) for crystalline phase identification, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) for

* Manuscript received July 23, 2025, Revised October 06, 2025, Accepted February 17, 2026.

¹ PhD Candidate, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Assistance Professor, Department of Civil Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran.

³ Corresponding author. Assistance Professor, Department of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. Email: a.tohidi@aut.ac.ir.

⁴ Associate Professor, Department of Civil Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

⁵ Associate Professor, Department of Civil Engineering, WT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran.

functional group analysis, and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) for surface morphology evaluation. Performance-related indicators were assessed through standardized slurry seal functional tests, including the Wet Track Abrasion Test (WTAT) for abrasion resistance, the Wet Cohesion Test for adhesion and setting time, and the Loaded Wheel Test (LWT) for deformation and rutting resistance, all consistent with ISSA and ASTM evaluation frameworks.

3. Results

XRF and XRD results confirmed a fundamental compositional and structural difference between the fillers. The natural filler exhibited a carbonate-dominant nature with highly crystalline Quartz and Calcite phases, indicating physical stability but lower chemical reactivity. In contrast, the foundry waste filler was highly rich in silica and iron-bearing phases (e.g., Magnetite and Hematite, with Fe_2O_3 reaching 45.3%), exhibiting a semi-amorphous structure that indicates a higher surface reactivity potential and stronger initial adhesion with the bitumen.

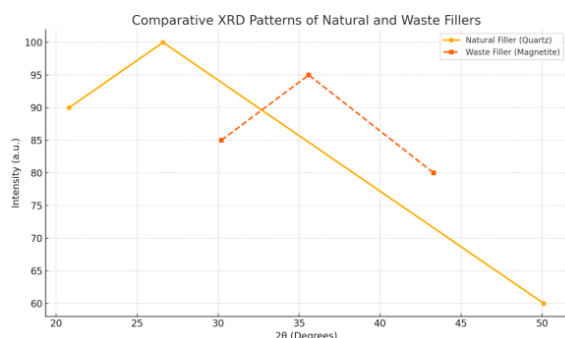


Figure 1: XRD patterns of natural and foundry waste fillers

FT-IR analysis revealed the presence of Fe-O bonds in the waste filler. More importantly, the combination of waste filler and nanosilver strengthened active functional interactions within the mastic, specifically enhancing the Si-O-Si networks and indicating the formation of a more stable structural matrix with increased hydrogen bonding potential. FESEM imaging showed that while the natural filler had a relatively smooth and uniform surface, the waste filler possessed rougher surfaces, higher texture irregularity, and micro-porosities resulting from the rapid cooling in the casting process. The addition of nanosilver

effectively filled these micro-voids, significantly improving particle distribution, reducing nano-scale agglomeration, and enhancing the overall structural integrity of the mastic. Overall, the mixture containing 50% waste filler with nanosilver (NWFP50) demonstrated the most balanced response. This optimal blend reflected improved wet cohesion, reduced deformation tendency in the LWT, and more favorable abrasion resistance in the WTAT compared to other replacement levels and the control sample.

4. Conclusion

Foundry waste filler, when used as a partial replacement of natural filler and combined with nanosilver, can significantly enhance the structural and functional performance of slurry seal mastics while strongly supporting sustainability goals. The microstructural analyses (XRF, XRD, FT-IR, and FESEM) proved that the siliceous and iron-rich semi-amorphous nature of the foundry waste provides excellent surface reactivity. The incorporation of silver nanoparticles effectively mitigated the potential drawbacks of the waste filler's heterogeneous surface by improving particle dispersion, filling micro-voids, and reinforcing the bitumen-filler interfacial transition zone. The optimum observed condition in this study corresponded to the mixture containing 50% foundry waste filler and 10% nanosilver, which yielded the highest resistance to abrasion, rutting, and moisture damage. These findings highlight the potential of utilizing industrial by-products in producing high-performance, environmentally sustainable cold-applied slurry seal asphalt, thereby reducing the ecological footprint of natural aggregate extraction and diverting industrial waste from landfills. However, this study was primarily conducted under controlled laboratory conditions. Future work is highly recommended to examine different nanosilver dosages and to validate the long-term durability of these nano-modified mastics under field-like cyclic loading, environmental exposure, and freeze-thaw cycles. Additionally, conducting a comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) and techno-economic analysis is suggested to fully quantify the environmental and financial benefits of scaling this sustainable pavement preservation technology for widespread industrial application.



جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و افزودن نانوقره بر عملکرد ماستیک‌های آسفالتی*

مقاله پژوهشی

وحید باقری مفرد^(۱) سید محمود جزایری مقدس^(۲) امین توحیدی^(۳) حسن دیوانداری^(۴) مهدی مهدوی عادل^(۵)

DOI: 10.22067/jfcej.2026.94593.1365

چکیده با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از استخراج سنگ‌دانه‌های طبیعی و افزایش ضایعات صنعتی، این پژوهش با هدف بررسی فنی و عملکردی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانوذرات نقره در ماست یک‌های قیری آسفالت حفاظتی نوع اسلاری سیل انجام شد. ترکیباتی با درصدهای مختلف جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی (۰ تا ۱۰۰٪) و با یا بدون نانوقره (۱۰٪ وزنی نسبت به فیلر کل) در سه سطح قیر باقی‌مانده طراحی گردید. ارزیابی ترکیبات شامل آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی و فلورسانس پرتو ایکس XRF، پراش پرتو ایکس XRD، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه FT-IR و میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل FESEM و نیز آزمون‌های عملکردی نظیر سایش مرطوب، چسبندگی مرطوب و چرخ بارگذاری بود. نتایج نشان داد فیلر ضایعاتی، به دلیل وجود ترکیبات سیلیسی و فازهای آهن‌دار، واکنش‌پذیری سطحی مناسبی دارد و افزودن نانوقره موجب بهبود توزیع ذرات، انسجام ساختاری و مقاومت سایشی شد. ترکیب حاوی ۵۰٪ فیلر ضایعاتی و نانوقره بهترین عملکرد را نشان داد. یافته‌ها بر قابلیت استفاده از پسماندهای صنعتی برای تولید آسفالت‌های حفاظتی سرد با عملکرد بالا و سازگاری زیست‌محیطی تأکید دارند.

واژه‌های کلیدی اسلاری سیل، پودر ضایعات ریخته‌گری، نانوذرات نقره، قیر امولسیون، آزمایش FESEM.

Performance Evaluation of Slurry Seal Mastics Containing Foundry Waste and Silver Nanoparticles

Vahid Bagheri Mofrad Mahmood Jazayeri Moghaddas Amin Tohidi Hassan Divandari Mehdi Mahdavi Adeli

Abstract Considering the growing environmental concerns associated with natural aggregate extraction and the increasing accumulation of industrial waste, this study aimed to evaluate the technical and functional performance of bituminous mastics used in slurry seal surface treatments incorporating foundry waste filler and silver nanoparticles. Mixtures were formulated with varying replacement levels of natural filler by waste filler (0–100%), with and without the addition of silver nanoparticles (10% by weight of total filler), across three residual bitumen contents. The prepared mixtures were subjected to physical, chemical, and microstructural characterization using X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), and Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM). Performance was assessed through Wet Track Abrasion, Wet Cohesion, and Loaded Wheel tests. Results showed that the waste filler, characterized by siliceous and iron-rich phases, provided good surface reactivity. The incorporation of silver nanoparticles enhanced particle dispersion, structural cohesion, and abrasion resistance. The optimal performance was achieved with the mixture containing 50% waste filler and silver nanoparticles. These findings highlight the potential of utilizing industrial by-products in producing high-performance, environmentally sustainable cold-applied slurry seal asphalt.

Key words Slurry seal, Foundry waste powder, Silver nanoparticles, Bitumen emulsion, FESEM test.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۵/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۱۱/۲۸ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

Email: a.tohidi@aut.ac.ir

(۳) نویسنده مسئول، استادیار، گروه مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۵) دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

مقدمه

با توجه به نقش مؤثر اسلاری سیل در کاهش هزینه‌های چرخه عمر روسازی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، و با در نظر گرفتن امکان اجرای این فناوری در کشور، آشنایی دقیق‌تر با آن می‌تواند زمینه بهره‌گیری از مزایای متعددش را فراهم کند [1]. با وجود این مزایا، خرابی‌هایی مانند شن‌زدگی، قیرزدگی، عریان‌شدگی و شیارشدگی در این نوع آسفالت حفاظتی مشاهده می‌شود [2] که عمدتاً ناشی از اجرای نادرست، شرایط نامناسب جوی، کیفیت پایین طراحی مخلوط، چسبندگی ضعیف قیر و سنگ‌دانه و انتخاب مصالح نامناسب است [3].

در ساخت اسلاری سیل پلیمری از مصالح سنگی شکسته با دانه‌بندی کنترل‌شده، قیر امولسیون کاتیونیک اصلاح‌شده با پلیمر، آب و فیلر معدنی فعال استفاده می‌شود [4]. فیلر، یکی از اجزای اصلی مخلوط آسفالتی، تأثیر قابل توجهی بر خواص عملکردی دارد [5]. این ماده که از ذرات کوچک‌تر از ۰٫۷۵ میلی‌متر تشکیل شده است، می‌تواند از منابع طبیعی یا مصنوعی مانند خاکستر بادی، آهک، فیلر ضایعاتی و پودرهای سرمایی بازیافتی تأمین شود [6].

استخراج سنگ‌دانه‌های طبیعی پیامدهای زیست‌محیطی جدی از جمله تخریب پوشش گیاهی، نابودی مناظر طبیعی و تولید گرد و غبار دارد. در بسیاری از مناطق، منابع سنگ‌دانه‌ای باکیفیت محدود و هزینه تأمین آن‌ها در حال افزایش است [7]. همزمان، رشد ساخت‌وساز و شهرنشینی موجب افزایش تولید ضایعات شده و ظرفیت دفن آن‌ها پاسخگوی نیاز نیست [8]. بنابراین، مدیریت بهینه منابع و انرژی در ساخت و نگهداری راه‌ها ضرورتی انکارناپذیر است [9].

در این راستا، افزایش هزینه‌های مواد خام و کاهش منابع طبیعی موجب شده که پژوهشگران بسیاری به بررسی امکان استفاده از ضایعات صنعتی به عنوان جایگزین مصالح مخلوط آسفالتی روی آورند، با هدف کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهره‌برداری بهینه‌تر از منابع موجود.

بخش زیادی از این پژوهش‌ها بر بهره‌گیری از پسماندهای صنعتی و مواد دورریز متمرکز بوده‌اند؛ رویکردی که ضمن کاهش مشکلات مرتبط با دفع زباله، به صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی و محدود نیز کمک می‌کند [10].

ارتقای دوام و عملکرد روسازی‌های آسفالتی از چالش‌های اصلی مهندسی حمل‌ونقل است. در این زمینه، بهره‌گیری از مصالح بازیافتی و ضایعات صنعتی با هدف کاهش هزینه،

صرفه‌جویی در منابع و بهبود ویژگی‌های مکانیکی، به ویژه در آسفالت‌های حفاظتی، اهمیت یافته است. یکی از این مصالح، پودر ضایعات ریخته‌گری است که می‌تواند جایگزین فیلر طبیعی در ماستیک‌های قیری شود. همچنین نانومواد به دلیل سطح ویژه بالا و ویژگی‌های منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی، موجب بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت حرارتی و مکانیکی مخلوط‌ها می‌گردند. با این حال، پژوهش‌های محدودی به بررسی همزمان اثر فیلر ضایعاتی و نانومواد بر عملکرد آسفالت سرد حفاظتی پرداخته‌اند.

در این پژوهش، استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری به عنوان جایگزین فیلر طبیعی و افزودن نانونقره با هدف ارتقای عملکرد مکانیکی، چسبندگی و دوام لایه‌های اسلاری سیل مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیر فیلر ضایعاتی و نانونقره بر عملکرد مکانیکی و رفتاری مخلوط‌های اسلاری سیل است. اهداف فرعی این مطالعه شامل ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ریزساختاری ترکیبات حاوی فیلر ضایعاتی و نانونقره با استفاده از آزمون‌های XRD، XRF، FT-IR و FESEM، و تحلیل عملکرد مکانیکی مخلوط‌ها شامل مقاومت سایشی، چسبندگی مرطوب و پایداری تحت بارگذاری بر اساس آیین‌نامه‌های ASTM و ISSA است.

مطالعات پیشین

جیانگ در پژوهشی به بررسی استفاده از ۳۰ درصد آسفالت خردشده در ترکیب مخلوط اسلاری سیل پرداخت. با این وجود، نتایج حاصل از آزمون پیوستگی نشان‌دهنده عملکرد ضعیف نمونه‌ها بود، به گونه‌ای که در آزمون پیوستگی ۶۰ دقیقه، هیچ یک از ترکیبات موفق به کسب حداقل الزامات آیین‌نامه نشدند. این موضوع نشان می‌دهد که حتی در حضور تنها ۳۰ درصد آسفالت خردشده، بهینه‌سازی بیشتر در طراحی مخلوط برای دستیابی به چسبندگی مناسب و عملکرد رضایت‌بخش ضروری است [11]. پورسلطانی و حسامی در پژوهشی جامع، عملکرد آسفالت خردشده را در ترکیب مخلوط‌های اسلاری سیل بررسی کردند؛ نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از آسفالت خردشده به عنوان جایگزین سنگ‌دانه طبیعی در اسلاری سیل می‌تواند الزامات آیین‌نامه‌ای را در بسیاری از موارد برآورده سازد [12]. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از فیلر ضایعاتی فولاد می‌تواند برخی خصوصیات فنی مخلوط آسفالت را بهبود دهد [13]. در مطالعه‌ای، پاستو و بالدو عملکرد مقاومت شیارشدگی

چسبندگی و دوام کمک کرده و الزامات عملکردی را برآورده می‌کند [18].

به‌کارگیری بهینه مواد پسماند به عنوان جایگزینی بخشی از سنگ‌دانه‌ها نه تنها مزایای زیست‌محیطی به همراه دارد، بلکه می‌تواند موجب ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالتی و بتنی نیز شود [19]. در همین راستا، پژوهشگران مطالعاتی را در زمینه استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین فیلر در ترکیبات آسفالتی انجام داده‌اند.

میستری و همکاران در مطالعه‌ای آزمایشگاهی، به بررسی خاکستر پوسته برنج و خاکستر بادی به عنوان فیلرهای جایگزین در مخلوط آسفالت گرم (HMA) پرداختند. یافته‌ها نشان داد که افزودن این فیلرهای ضایعاتی موجب بهبود خواص عملکردی HMA شده و در عین حال موجب کاهش مقدار بهینه قیر نسبت به مخلوط شاهد گردید [20].

افضلی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان «ارزیابی خواص آسفالت حفاظتی حاوی الیاف کورتاسیرجان» بیان کردند آسفالت حفاظتی الیافی نوعی جدید از زیرگروه آسفالت‌های حفاظتی است که در آن از خواص مثبت الیاف در بهبود عملکرد لایه حفاظتی کمک گرفته می‌شود. در این پژوهش مزایا و نکات اجرایی در خصوص آسفالت حفاظتی الیافی تشریح شده و همچنین نتایج عملکردی استفاده از الیاف مدول و مقاومت بالای کورتاسیرجان در آسفالت حفاظتی گزارش شده است [21].

جیانگ در پژوهشی به بررسی تأثیر به‌کارگیری ۳۰ درصد آسفالت بازیافتی در ترکیبات آسفالت حفاظتی پرداخت. نتایج حاصل از آزمون پیوستگی پس از ۶۰ دقیقه نشان داد که مقدار پیوستگی زیر حد قابل قبول آیین‌نامه قرار دارد. در مقابل، عملکرد نمونه‌ها در آزمون‌های سایش مرطوب و چسبندگی ماسه‌ای مطابق با معیارهای استاندارد ارزیابی شد [22].

گرفا و همکاران در پژوهشی به بررسی عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی حاوی ۱۰۰ درصد آسفالت بازیافتی در سه نوع دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد تمامی نمونه‌ها در آزمون پیوستگی نسبت به نمونه‌های شاهد ضعیف‌تر است و در اغلب موارد از حداقل الزامات آیین‌نامه کمتر است. هیچ یک از نمونه‌ها موفق به کسب معیارهای لازم برای آزمون پیوستگی در بازه زمانی ۶۰ دقیقه نشدند [23].

پورسلطانی و حسامی در پژوهشی، به بررسی استفاده از آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین کامل یا جزئی برای مصالح سنگی در مخلوط آسفالت حفاظتی پرداختند و عملکرد آن را با

مخلوط آسفالتی SMA حاوی فیلر ضایعاتی فولاد و خاکستر زغال‌سنگ را مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با نمونه‌هایی بر پایه سنگ‌دانه‌های آهکی مقایسه کردند. ارزیابی مقاومت در برابر تغییر شکل این مخلوط‌ها از طریق آزمون بارگذاری محوری تکرارشونده و آزمایش اثر چرخ صورت گرفت. یافته‌ها نشان داد که جایگزینی حداکثر ۴۰ درصد از سنگ‌دانه‌های طبیعی با فیلر ضایعاتی حاصل از کوره قوس الکتریکی، مقاومت شیارشدگی را نسبت به مخلوط‌های متداول افزایش می‌دهد [14].

حسامی و زال‌نژاد در پژوهشی به ارزیابی عملکرد آسفالت حفاظتی اسلاری سیل با استفاده از مصالح فیلر ضایعاتی فولادی پرداختند و نتایج را با نمونه‌های حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزایش درصد فیلر ضایعاتی فولاد منجر به افزایش مصرف قیر و همچنین افزایش وزن مخصوص مخلوط شد، که این عوامل باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل و اجرایی می‌شوند [15].

چنگ زنگ و همکارانش به بررسی تأثیر استفاده از پودر لاستیک بر ویژگی‌های کششی و شکست لایه اسلاری سیل پرداختند. آن‌ها عملکرد این مخلوط را به عنوان لایه‌ای محافظ بر روی روسازی آسفالتی در دو دمای متفاوت، یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۰- درجه سانتی‌گراد، مورد ارزیابی قرار دادند. هدف از این پژوهش، ارتقای عملکرد اسلاری سیل از نظر مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و افزایش دوام در شرایط دمایی مختلف با استفاده از مصالح بازیافتی همچون پودر لاستیک بود [16].

ژائو و همکاران پژوهشی را به منظور بررسی اثر افزودن پودر لاستیک به مصالح اسلاری سیل، با تمرکز بر مکانیزم‌های کاهش نویز و نظریه جذب و تعدیل ارتعاش، انجام دادند. نتایج نشان داد که به طور کلی عملکرد سطح روسازی تا حدی بهبود یافته است. با این حال، باید توجه داشت که اگرچه طرح اختلاط پایه استاندارد و بهینه بوده است، اما طرح جدید حاوی پودر لاستیک از منظر بهینگی بررسی نشده است [17].

حسامی و عطاءاللهی در پژوهشی به بررسی تأثیر استفاده از پودر لاستیک در مخلوط اسلاری سیل پرداختند. در این مطالعه، مقادیر ۵،۰ تا ۳ درصد پودر لاستیک نسبت به وزن مصالح سنگی به عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌ها در ترکیب مخلوط مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که بهترین عملکرد مخلوط مربوط به نمونه‌هایی است که حاوی ۵،۰ درصد پودر لاستیک هستند. استفاده از این مقدار به بهبود

بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی منجر شود و به عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت پسماند زغال‌سنگ مس محسوب می‌شود [28].

علیها و همکاران مقاومت شکستگی آسفالت اسلاری سیل رنگی را در دماهای پایین و حالت‌های بارگذاری مختلف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مقاومت شکست نمونه‌ها ابتدا کاهش یافت و سپس با افزایش بار برشی در حالت مختلط I/II افزایش یافت. از حالت خالص I تا III، مقاومت مخلوط‌های رنگی با رشد ترک با افزایش بخش حالت III در نوک ترک کاهش یافت. علاوه بر این، دماهای پایین‌تر منجر به عملکرد شکست بهتر بین مخلوط‌ها شد، به ویژه در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد. عملکرد شکست مخلوط‌ها تحت تأثیر کاهش دما به دلیل ویژگی‌های استحکام قیر به طور مثبت تأثیر پذیرفت [29].

زیاری و همکاران مقاله‌ای با موضوع تحلیل عملکرد آسفالت حفاظتی رنگی با استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین شن ارائه کردند. در این تحقیق، اثر استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی شن طبیعی در آسفالت حفاظتی رنگی بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی بررسی شد. نتایج نشان داد که استفاده از زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی رنگی می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر خستگی و آب شستگی و بهبود رنگ‌پذیری منجر شود و به عنوان یک راهکار پایدار برای استفاده از پسماند زغال‌سنگ فولاد قوس الکتریکی محسوب می‌شود [30].

ایزدی و همکاران پژوهشی را با هدف بررسی اثر فیلر ضایعاتی کوره آهن‌گدازی بر عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی اسلاری سیل انجام دادند. یافته‌ها نشان دادند که به‌کارگیری فیلر ضایعاتی کوره آهن‌گدازی می‌تواند موجب بهبود عملکرد مخلوط اسلاری سیل گردد. در این میان، مخلوط حاوی ۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی نسبت به نمونه شاهد عملکرد برتری داشت [31].

روش شناسی

فرایند طراحی و ارزیابی ترکیبات آسفالت حفاظتی، به ویژه اسلاری سیل، نیازمند یک برنامه آزمایشگاهی دقیق و ساختاریافته است که امکان بررسی اثرگذاری متغیرهای مختلف بر عملکرد

نمونه‌های متداول مقایسه کردند. در این مطالعه، مخلوط‌هایی با درصد‌های مختلف آسفالت بازیافتی شامل ۴۳، ۶۹ و ۹۵ درصد، همراه با یک نمونه مرجع حاوی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه تازه، و در ترکیب با مقادیر مختلف قیر امولسیون تهیه شده و تحت آزمون‌های طراحی مخلوط و ارزیابی عملکرد قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی آسفالت بازیافتی در آزمون‌های پیوستگی و سایش عملکرد ضعیف‌تری نسبت به نمونه شاهد از خود نشان دادند [24].

حسامی و زال‌نژاد در پژوهشی به ارزیابی عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی با استفاده از مصالح فیلر ضایعاتی فولادی پرداختند و نتایج آن را با مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های سیلیسی مقایسه کردند. یافته‌ها نشان داد که افزایش میزان فیلر ضایعاتی فولادی، به ویژه در حالت جایگزینی کامل با سنگ‌دانه طبیعی، منجر به بهبود پارامترهایی نظیر وزن مخصوص، مقاومت در برابر رطوبت و مقاومت لغزندگی سطحی می‌شود [25].

کی‌منش و همکاران در مطالعه‌ای به بررسی طرح اختلاط و عملکرد مخلوط آسفالت حفاظتی حاوی فیلر ضایعاتی فولادی حاصل از کوره قوس الکتریکی (EAF) پرداختند. در این پژوهش، پنج نوع مخلوط شامل مقادیر صفر، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی فولادی به عنوان جایگزین مصالح عبوری از الک ۰٫۰۷۵ میلی‌متر ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که مخلوط حاوی ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی فولادی بهترین عملکرد را در میان گزینه‌های مورد مطالعه داشته است [26].

ایزدی و همکاران مطالعه‌ای انجام دادند که هدف آن بررسی امکان‌پذیری استفاده از رنگ‌دانه‌های قرمز اکسید آهن طبیعی در طراحی مخلوط اسلاری سیل برای تغییر رنگ این نوع آسفالت و ارزیابی عملکرد آن بود. نتایج طراحی نشان داد که مخلوط حاوی ۹ درصد رنگ‌دانه بهترین عملکرد را در بین مخلوط‌ها داشت. بر اساس نتایج، رنگ‌دانه قرمز اکسید آهن بهبود چسبندگی امولسیون قیر به دانه‌بندی سنگی، مقاومت در برابر سایش و همچنین تغییر شکل عمودی را به همراه داشت [27].

زال‌نژاد و همکاران مقاله‌ای با عنوان «امکان‌سنجی استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین شن طبیعی در آسفالت حفاظتی برای بهبود کیفیت: تحلیل میکروسکوپی و مکانیکی» منتشر کردند. در این تحقیق، اثر استفاده از زغال‌سنگ مس به عنوان جایگزین ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی شن طبیعی در آسفالت حفاظتی بر روی خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی

می‌باشد. یکی از مراحل بنیادین در انجام مطالعات آزمایشگاهی مواد قیری، طراحی ترکیبات مخلوط‌ها بر مبنای متغیرهای اصلی تأثیرگذار است. جدول (۱) ترکیبات مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. در این پژوهش، هدف بررسی اثرات ترکیبی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری به جای فیلر طبیعی و همچنین افزودن نانومواد به ماستیک قیری در آسفالت حفاظتی از نوع اسلاری سیل است. به منظور انجام این ارزیابی، ترکیبات مختلفی بر اساس دو عامل کلیدی طراحی شدند:

۱. درصد جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی (در ۵ سطح)

۲. درصد قیر باقی‌مانده در مخلوط (در ۳ سطح)

علاوه بر این، به منظور تحلیل اثر نانوقره، برای هر ترکیب فوق، یک نمونه متناظر حاوی نانوقره نیز ساخته شده است. بنابراین ماتریسی کامل از ترکیبات شامل دو وضعیت نانویی و غیرنانویی ایجاد شد تا اثرات هر متغیر به صورت مجزا و ترکیبی بررسی گردد.

نهایی روسازی را فراهم آورد. در این بخش، چارچوب کامل آزمایشگاهی پژوهش ارائه می‌شود که شامل طراحی نمونه‌ها، معرفی مصالح مصرفی، شرح مراحل آماده‌سازی، توصیف آزمون‌های انجام‌شده و روش‌های تحلیل نتایج است. در این پژوهش، هدف اصلی بررسی اثر جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی حاصل از صنایع ریخته‌گری و افزودن نانومواد بر خواص عملکردی، ساختاری و مکانیکی ماستیک قیری در آسفالت حفاظتی اسلاری سیل می‌باشد. بر این اساس، نمونه‌های آزمایشی در دو گروه اصلی (دارای نانومواد و فاقد نانومواد) و با درصدهای مختلف فیلر جایگزین و قیر باقی‌مانده طراحی و ساخته شدند.

با توجه به تنوع متغیرهای تأثیرگذار، برای ارزیابی جامع خواص ترکیبات، مجموعه‌ای از آزمون‌های فیزیکی، شیمیایی، ریزساختاری، و عملکردی طراحی شد. این آزمون‌ها شامل تحلیل شیمیایی فیلرها (XRF)، شناسایی ساختار بلوری (XRD)، بررسی ساختار مولکولی (FT-IR)، تحلیل ریزساختار (FESEM)،

جدول ۱ ترکیبات مطالعه حاضر با دسته‌بندی درصد نانو، درصد فیلر ضایعاتی و درصد قیر باقی‌مانده

نوع مخلوط	درصد جایگزینی فیلر ضایعاتی	درصد نانو (%)	درصد قیر باقی‌مانده (%)
WFP0	فقط فیلر طبیعی	۰	۸,۰
	فقط فیلر طبیعی	۰	۸,۵
	فقط فیلر طبیعی	۰	۹,۰
NWFP0	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۸,۰
	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۸,۵
	فقط فیلر طبیعی	۱۰	۹,۰
NWFP25	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۷۵ درصد فیلر طبیعی و ۲۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP50	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۵۰ درصد فیلر طبیعی و ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP75	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۲۵ درصد فیلر طبیعی و ۷۵ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰
NWFP100	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۰
	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۸,۵
	۱۰۰ درصد فیلر ضایعاتی	۱۰	۹,۰

جدول ۲ مشخصات فیرومولسیون مطالعه حاضر با توجه به استانداردهای مختلف

آزمایش	روش آزمایش	نتیجه آزمایش
کندروانی سی بولت - فورل در دمای ۲۵°C، ثانیه	AASHTO T59	۲۱
نشست (پایداری) در انبار کردن قیر امولسیون، ۲۴ ساعت، %	ASTM D6930	۰,۱
تقطیر قیر امولسیون، جرم وزنی %	ASTM D7497	۶۲
الک، %	ASTM D244	۰,۱
اندود، %	AASHTO T59	۹۹
بار ذرات	AASHTO T59	مثبت
آزمایش‌های بر روی قیر باقی‌مانده از تقطیر قیر امولسیون		
نقطه نرمی قیر با آزمایش حلقه و گلوله، درجه سانتی‌گراد	ASTM D36	۵۵
درجه نفوذ در ۲۵°C، ۱۰۰ گرم، ۵ ثانیه	ASTM D5	۶۰

مصالح مصرفی

قیر امولسیون و مشخصات آن

قیر امولسیون مورد استفاده در این تحقیق از نوع کاتیونیک با تنظیم آهسته (CSS-1h) انتخاب شده است. این نوع امولسیون به دلیل سازگاری بالای آن با کاربردهای اسلاری‌سیل و مخلوط‌های سرد، و همچنین قابلیت پخش‌پذیری مناسب و کارایی مطلوب در دمای محیط، در پروژه حاضر مورد استفاده قرار گرفت. به‌کارگیری این قیر امولسیونی در راستای اهداف زیست‌محیطی پروژه است؛ چرا که نیازی به حرارت‌دهی بالا ندارد و موجب کاهش انتشار گازهای آلاینده می‌شود.

قیر امولسیون از نظر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی شامل درصد باقی‌مانده، درجه نفوذ، نقطه نرمی و طیف FT-IR مورد ارزیابی قرار گرفت. این خصوصیات به منظور سنجش مناسب بودن قیر برای اختلاط با فیلهای مختلف و افزودنی‌های نانویی ضروری بوده‌اند. جدول (۲) مشخصات اصلی قیر امولسیون را بر اساس استانداردهای رایج نشان می‌دهد.

فیلر طبیعی

فیلر طبیعی مورد استفاده در این تحقیق، پودر سنگ آهک با منشأ کربناته است که به صورت صنعتی از طریق آسیاب مصالح سنگی حاصل می‌شود. این نوع فیلر به دلیل در دسترس بودن، هزینه پایین و سازگاری با قیرهای امولسیونی، به طور گسترده در صنایع آسفالت حفاظتی و ریزدانه استفاده می‌شود.

هدف از استفاده این فیلر به عنوان مرجع پایه در پژوهش حاضر، بررسی عملکرد فیلهای جایگزین و اثرگذاری آن‌ها در حضور نانومواد بوده است. برای این منظور، فیلر طبیعی از جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری مورد ارزیابی قرار گرفت. تحلیل شیمیایی فیلر طبیعی با استفاده از آزمون XRF (طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس) انجام شد که نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی این فیلر عمدتاً شامل اکسید کلسیم و کلسیم کربنات است. حضور مقادیر بالای کلسید اکسید نشان‌دهنده طبیعت آهکی آن است که می‌تواند در ایجاد پیوند قوی‌تر با قیر امولسیونی مؤثر باشد.

تحلیل ساختاری فیلر طبیعی که با استفاده از آزمون پراش پرتو ایکس صورت گرفته است و نتایج آن نشان می‌دهد که فاز غالب در این فیلر، کلسیت (CaCO_3) می‌باشد. همچنین در طیف پراش، پیک‌های مشخص مربوط به دولومیت نیز مشاهده شد، که بیانگر حضور مقادیر جزئی از این کانی است.

برای شناخت دقیق‌تر ساختار مولکولی و گروه‌های عاملی سطح فیلر، از طیف‌سنجی FT-IR استفاده شد. طیف ثبت‌شده شامل پیک‌هایی در نواحی زیر بود:

۱. $1420-1470 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به کشش گروه‌های کربنات CO_3^{2-} .
۲. 875 cm^{-1} ارتعاش خمشی خارج صفحه کربنات.
۳. 710 cm^{-1} ارتعاش خمشی درون صفحه.

این ترکیب نشان‌دهنده ماهیت سیلیسی و شبه‌سرامیکی این فیلر است که با خواص قلیایی فیلر طبیعی تفاوت دارد.

آزمون XRD برای بررسی ساختار بلوری این فیلر که نتایج آن نشان می‌دهد الگوی پراش به دست آمده حضور کوارتز (SiO_2) را به عنوان فاز غالب تأیید کرد. همچنین پیک‌های مشخصی مربوط به کانی‌های فرعی مانند مولایت و آثار کائولینیت نیز در برخی نمونه‌ها مشاهده شد.

همچنین طیف FT-IR فیلر ضایعاتی دارای پیک‌های مشخص زیر بود:

۱. $\sim 1080 \text{ cm}^{-1}$: ارتعاش کششی Si-O-Si

۲. $\sim 795 \text{ cm}^{-1}$ و $\sim 470 \text{ cm}^{-1}$: ارتعاش خمشی Si-O

۳. $\sim 1630 \text{ cm}^{-1}$ و $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$: جذب آب سطحی و گروه‌های OH-

این نتایج تأیید می‌کند که ترکیب غالب فیلر از نظر مولکولی نیز از خانواده سیلیکاتی است و فاقد گروه‌های کربناتی فعال (مشابه فیلر طبیعی) است.

با توجه به ماهیت سیلیسی این فیلر، انتظار می‌رود که رفتار چسبندگی آن با قیر متفاوت باشد. تحلیل نتایج آزمایش‌های ماستیک نشان داد که در غیاب نانومواد، افزایش درصد جایگزینی فیلر ضایعاتی ممکن است موجب کاهش اولیه چسبندگی شود. اما در حضور نانومواد، این اثر بهبود یافت و فیلر ضایعاتی عملکرد مناسبی از خود نشان داد. در برخی نمونه‌ها مانند NWFP50، بهبود قابل توجهی در مقاومت سایشی و کاهش جابه‌جایی مشاهده شد.

در مجموع، فیلر ضایعاتی ریخته‌گری با دارا بودن ساختار سیلیکاتی، دانه‌بندی مناسب و در دسترس بودن به عنوان یک گزینه جایگزین پایدار و فنی برای فیلرهای سستی مطرح است. با اصلاح ساختار آن از طریق نانومواد، می‌توان به خواص مکانیکی و دوام بالاتری در ترکیبات آسفالت حفاظتی دست یافت.

نانومواد (نوع، درصد مصرف، نحوه اختلاط)

در راستای ارتقای عملکرد مخلوط‌های آسفالت حفاظتی و بهبود خواص مکانیکی و رئولوژیکی ماستیک قیری، در این تحقیق از نانونقره (Ag nanoparticles) به عنوان افزودنی اصلاح‌کننده

۴. $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ وجود گروه‌های OH سطحی ناشی از جذب رطوبت.

این طیف‌ها حضور غالب کربنات کلسیم و طبیعت معدنی غیرآلی فیلر را به خوبی تأیید می‌کند.

به طور کلی، نتایج نشان داد که اگر چه فیلر طبیعی عملکرد قابل قبولی دارد، اما در مقایسه با فیلر ضایعاتی اصلاح‌شده با نانو، در برخی پارامترها همچون مقاومت سایشی و جابه‌جایی، در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد.

در مجموع، فیلر طبیعی به عنوان ماده مرجع در این تحقیق، بستر مناسبی برای مقایسه با فیلرهای جایگزین فراهم کرده و نقش کلیدی در ارزیابی تأثیر نانوذرات و ضایعات صنعتی بر عملکرد ترکیبات آسفالت حفاظتی ایفا کرده است.

فیلر ضایعاتی ریخته‌گری

فیلر ضایعاتی مورد استفاده در این تحقیق، از پسماندهای ماسه قالب‌گیری CO_2 حاصل از فرایند ریخته‌گری فلزات استخراج شده است. این پسماندها که به طور معمول در صنایع فلزی به عنوان مواد دورریز تلقی می‌شوند، با فرآوری مناسب می‌توانند به عنوان جایگزینی برای فیلر طبیعی در ترکیبات آسفالت حفاظتی مورد استفاده قرار گیرند. به‌کارگیری این نوع فیلر، علاوه بر کاهش هزینه‌ها و مصرف منابع طبیعی، موجب ارتقاء پایداری زیست‌محیطی در صنعت راه‌سازی می‌گردد.

فیلر ضایعاتی پس از جمع‌آوری از کارگاه‌های ریخته‌گری، خشک، آسیاب و از الک 0.075 میلی‌متر عبور داده شد تا دانه‌بندی آن با مشخصات فیلر طبیعی هماهنگ گردد. این ماده دارای رنگ خاکستری روشن، سطح زبرتر و دانه‌بندی ناهمگن‌تری نسبت به فیلر کربناته طبیعی است.

آنالیز XRF نشان داد که ترکیب شیمیایی آن با فیلر طبیعی تفاوت قابل توجهی دارد. اجزای اصلی این فیلر شامل موارد زیر است:

۱. SiO_2 اکسید سیلیسیم (به میزان بالا، بیش از ۶۰٪).

۲. Fe_2O_3 و Al_2O_3 در مقادیر قابل توجه.

۳. مقادیر ناچیز از CaO ، MgO و سایر اکسیدهای فلزی.

باشد. به عبارت دیگر، در نمونه‌های حاوی نانومواد (مانند NWFP50، ۱۰٪ از وزن کل فیلر (شامل فیلر طبیعی و ضایعاتی) با نانونقره جایگزین شده است.

به‌منظور دستیابی به پراکنش یکنواخت نانونقره در مخلوط، فرایند اختلاط به شرح زیر انجام شد:

۱. پیش‌مخلوط کردن نانونقره با فیلر خشک در میکسر دور بالا به مدت ۳ دقیقه.

۲. افزودن این ترکیب به قیر امولسیون در دمای ۶۰-۷۰ درجه سانتی‌گراد.

۳. استفاده از همزن مغناطیسی (Hotplate Stirrer) به مدت ۱۰ دقیقه برای تسهیل پراکنش نانوذرات در ماتریس قیر.

این روش سبب شد تا نانونقره به صورت یکنواخت در ساختار ماستیک توزیع شود و پیوستگی و پایداری مخلوط بهبود یابد.

مصالح سنگی

مطابق با الزامات استاندارد ISSA TB-112 برای طراحی اسلاری‌سیل، مصالح باید عمدتاً در محدوده اندازه‌ای ریز (الکی عبوری: ۸) باشند. توزیع دانه‌بندی نهایی مصالح در جدول (۴) ارائه شده است. درصد فیلر عبوری از الک ۰,۰۷۵ میلی‌متر در این تحقیق، از ترکیب فیلر طبیعی و/یا ضایعاتی + نانوماده تشکیل شده و در بخش جداگانه‌ای بررسی شده است. ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی پس از نمونه‌برداری و تحلیل در آزمایشگاه مصالح به شرح جدول (۵) است.

جدول ۴ دانه‌بندی مصالح سنگی اسلاری‌سیل با توجه به آیین‌نامه ISSA

درصد حدود رواداری نسبت به دانه‌بندی کارگاهی	درصد عبور کرده از الک		اندازه الک
	نوع II محدود آیین‌نامه ISSA	نوع II مورد استفاده در این پژوهش	
۵±	۹۰-۱۰۰	۱۰۰	۴,۷۵ میلی‌متر (شماره ۴)
۵±	۶۵-۹۰	۷۷,۵	۲,۳۶ میلی‌متر (شماره ۸)
۵±	۴۵-۷۰	۵۷,۵	۱,۱۸ میلی‌متر (شماره ۱۶)
۵±	۳۰-۵۰	۴۰	۶۰۰ میکرون (شماره ۳۰)
۵±	۱۸-۳۰	۲۴	۳۰۰ میکرون (شماره ۵۰)
۴±	۱۰-۲۱	۱۵,۵	۱۵۰ میکرون (شماره ۱۰۰)
۳±	۵-۱۵	۱۰	۷۵ میکرون (شماره ۲۰۰)

استفاده شده است. جدول (۳) مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانونقره را نشان می‌دهد. استفاده از نانوذرات فلزی در مخلوط‌های قیری، به واسطه سطح فعال بالا، اندازه بسیار ریز و خواص ویژه فیزیکی و شیمیایی، موجب بهبود رفتار چسبندگی، افزایش مقاومت در برابر سایش و تغییر شکل و کاهش حساسیت دمایی می‌شود. نانوماده مورد استفاده در این پژوهش از نوع نانونقره با ویژگی‌های زیر است:

۱. رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا.

۲. قابلیت تعامل فیزیکی و شیمیایی با فاز قیر.

۳. پایداری بالا در دماهای میانی و بالا.

۴. اثر بخشی در بهبود استحکام کششی و پیوستگی مخلوط.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانونقره

ویژگی	مقدار تقریبی	واحد
میانگین اندازه ذره	40-70	نانومتر
چگالی	~8.9	g/cm ³
خلوص	>99	درصد وزنی
سطح ویژه (BET)	~50-80	m ² /g
ساختار	کروی و بلوری	—

در این مطالعه، درصد بهینه مصرف نانونقره ۱۰ درصد وزنی نسبت به فیلر کل تعیین شده است. این مقدار به نحوی انتخاب شد که ضمن حفظ کارایی در فرایند اختلاط، اثرگذاری قابل توجهی در بهبود رفتار مکانیکی و رئولوژیکی ماستیک داشته

جدول ۵ ویژگی‌های فیزیکی مصالح سنگی اسلاری سیل

ویژگی	مقدار اندازه‌گیری شده	واحد / مرجع
وزن مخصوص ظاهری (Bulk)	2.58	g/cm ³
وزن مخصوص اشباع - خشک سطحی (SSD)	2.61	g/cm ³
وزن مخصوص واقعی (Apparent)	2.65	g/cm ³
درصد جذب آب	1.2	درصد
درصد شکستگی سطحی	> 95	درصد (ISSA TB-112)
درصد خاک رس / ریزدانه مضر	< 1	درصد

آزمایش‌های انجام شده و استانداردها

طیف‌سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF)

آزمون XRF یکی از روش‌های دقیق و پرکاربرد برای تحلیل ترکیب شیمیایی عناصر موجود در مواد معدنی است. در این تحقیق، این آزمون برای تعیین نوع و درصد عناصر موجود در دو نوع فیلر مصرفی (فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری) به کار گرفته شد تا تفاوت‌های ساختاری و ترکیبی آن‌ها به صورت کمی و مقایسه‌ای تحلیل گردد. هدف اصلی از اجرای آزمون XRF در این تحقیق، شناسایی و مقایسه دقیق ترکیب شیمیایی اکسیدهای اصلی موجود در فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی بود. نتایج این تحلیل نقش کلیدی دارد:

۱. پیش‌بینی واکنش‌پذیری شیمیایی فیلرها با قیر امولسیون.

۲. ارزیابی توان بالقوه فیلرها در اصلاح خواص ماستیک.

آزمون XRF با استفاده از دستگاه طیف‌سنج فلورسانس پرتو ایکس انجام شد. نمونه‌ها به صورت پودر خشک و الک شده (کمتر از ۰.۰۷۵ میلی‌متر) تهیه شدند و پس از فشرده‌سازی در قالب استاندارد، در دستگاه مورد آزمایش قرار گرفتند [91]. پارامترهای کلیدی در اجرای آزمون به شرح زیر است:

۱. نوع تابش: اشعه X با آند رودیوم.

۲. زمان تحلیل: حدود ۱۰ دقیقه برای هر نمونه.

۳. دامنه تحلیل: عناصر با عدد اتمی ۱۱ (Na) تا ۹۲ (U).

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD)

آزمون پراش پرتو ایکس (X-ray Diffraction - XRD) یکی از تکنیک‌های ساختاری قدرتمند در شناسایی فازهای بلوری و ترکیبات معدنی در مواد جامد است. در این تحقیق، آزمون XRD با هدف بررسی ساختار بلوری و شناسایی کانی‌های غالب موجود

در دو نوع فیلر مصرفی (طبیعی و ضایعاتی) به کار گرفته شد [92]. هدف اصلی از اجرای آزمون XRD در این تحقیق عبارت است از:

۱. شناسایی فازهای معدنی غالب در فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی.

۲. مقایسه ساختار بلوری این دو فیلر به منظور تحلیل رفتار واکنشی و رئولوژیکی آن‌ها در ماستیک قیری.

۳. تعیین میزان بلورینگی (Crystallinity) و نوع ساختار (کریستالی یا آمورف).

آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)

آزمون طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR) یکی از روش‌های مهم برای شناسایی گروه‌های عاملی فعال در ساختارهای آلی و معدنی است. در این پژوهش، FT-IR برای بررسی ویژگی‌های شیمیایی فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی و قیر امولسיוنی به کار گرفته شد. این داده‌ها برای تحلیل تعاملات فیزیکی و شیمیایی بین قیر و فیلر در ماستیک قیری و تعیین سازگاری بین آن‌ها بسیار کلیدی هستند [93]. اهداف اصلی اجرای آزمون FT-IR در این تحقیق عبارت بودند از:

۱. شناسایی گروه‌های عاملی و باندهای فعال در ساختار شیمیایی هر یک از فیلرها و قیر.

۲. بررسی تفاوت در ترکیب شیمیایی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی.

۳. تحلیل قابلیت پیوند بین فاز جامد (فیلر) و فاز آلی (قیر).

۴. تعیین اثرات اصلاح ساختار با نانومواد در مرحله تحلیل نهایی.

آزمون میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل (FESEM)

آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان گسیل (FESEM) یک تکنیک پیشرفته در تصویربرداری با قدرت تفکیک بالا برای مشاهده ساختار سطحی، مورفولوژی و توزیع ذرات در مقیاس نانو تا میکرو است. در این تحقیق، از FESEM برای بررسی ویژگی‌های سطحی فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی، و نمونه‌های اصلاح‌شده با نانونقره استفاده شد [94]. اهداف اجرای آزمون FESEM به شرح زیر است:

۱. مشاهده مستقیم شکل، اندازه، و توزیع ذرات فیلرها.
 ۲. بررسی میزان تخلخل، ناهمواری، یا تراکم سطحی ذرات
 ۳. مقایسه مورفولوژی فیلر طبیعی و ضایعاتی برای ارزیابی تأثیر در رفتار مکانیکی.
 ۴. تحلیل تأثیر نانونقره بر سطح فیلرهای اصلاح‌شده.
- تصویربرداری با میکروسکوپ FESEM در شرایط خلأ بالا و ولتاژ شتاب‌دهنده پایین برای حفظ جزئیات سطحی انجام شد.

تحلیل نتایج

به منظور درک عمیق‌تر از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و ساختاری مصالح مورد استفاده در ترکیب ماستیک‌های قیری، در این بخش نتایج حاصل از آزمون‌های آزمایشگاهی تخصصی شامل آنالیز شیمیایی (XRF)، بررسی ساختار بلوری (XRD)، طیف‌سنجی مادون‌قرمز (FT-IR) و ریزساختار سطحی (FESEM) مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آزمون‌ها پیش‌نیاز تحلیل‌های عملکردی و مکانیکی هستند، چراکه بسیاری از رفتارهای کلان مصالح آسفالتی از جمله مقاومت به سایش، چسبندگی، و انسجام درونی، ریشه در خواص ریزساختاری و ترکیبات شیمیایی آن‌ها دارند. همچنین، این بررسی‌ها امکان مقایسه ویژگی‌های فیلر طبیعی، فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و ماستیک‌های اصلاح‌شده با نانونقره را فراهم می‌سازند. ساختار این بخش شامل چهار زیربخش اصلی است:

۱. آنالیز: XRF تعیین ترکیب اکسیدی فیلرها و مقایسه نقش مواد سیلیسی، کلسیمی و فلزی.
۲. آزمون: XRD شناسایی ساختارهای بلوری، تعیین فازهای معدنی و درجه بلورینگی.

۳. طیف‌سنجی: FT-IR شناسایی پیوندهای شیمیایی و گروه‌های عاملی در فیلر، قیر و ماستیک.

۴. تصاویر: FESEM تحلیل ریزساختار سطحی، توزیع ذرات، تخلخل و اثر نانومواد.

یافته‌های این بخش، نقشی کلیدی در توجیه رفتار متفاوت نمونه‌ها در آزمون‌های عملکردی دارند و زمینه‌ساز تحلیل‌های پیشرفته‌تر در ادامه خواهند بود.

آنالیز شیمیایی XRF فیلرها

آنالیز فلورسانس پرتو ایکس (X-Ray Fluorescence – XRF) یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها برای شناسایی ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل‌دهنده مصالح معدنی از جمله فیلرهاست. در این تحقیق، این آزمون با هدف تعیین درصد اکسیدهای اصلی تشکیل‌دهنده فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری انجام شده است تا امکان مقایسه دقیق رفتار شیمیایی و پتانسیل واکنش‌پذیری آن‌ها در ترکیب با قیر امولسیون‌ی فراهم شود. اهداف آزمون XRF در این مطالعه به شرح زیر است:

۱. تعیین درصد وزنی اکسیدهای اصلی Al_2O_3 ، CaO ، SiO_2 و Fe_2O_3 فیلرها.
۲. مقایسه میزان خلوص مواد معدنی موجود در فیلر طبیعی و ضایعاتی.
۳. بررسی تفاوت‌های شیمیایی مؤثر بر رفتار چسبندگی، واکنش‌پذیری و عملکرد نهایی ماستیک.
۴. ارزیابی تأثیر ترکیبات فلزی (آهن، منیزیم و غیره) در فیلر ضایعاتی بر روی خواص نهایی مخلوط.

برای انجام آزمون، نمونه‌هایی از فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی آسیاب‌شده و خشک‌شده به صورت پودر یکنواخت تهیه شدند. دستگاه XRF مورد استفاده از نوع پیشرفته با قابلیت تحلیل نیمه‌کمی و دقیق بود و نتایج بر حسب درصد وزنی (% wt) اکسیدها گزارش شده است. جدول (۶) نتایج XRF نمونه‌های مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده تفاوت شیمیایی قابل توجه بین دو نوع فیلر است:

۱. فیلر طبیعی دارای درصد بالایی از سیلیس (SiO_2) و آلومینا (Al_2O_3) است که آن را به ماده‌ای با رفتار نسبتاً خنثی و پایدار در برابر قیر تبدیل می‌کند.

پودر خشک و الک شده تهیه شدند. آزمون با دستگاه XRD پیشرفته در بازه زاویه 2θ بین ۱۰ تا ۸۰ درجه انجام شد. داده‌ها با استفاده از پایگاه‌های داده PDF-2 و نرم‌افزار تطبیقی تحلیل شدند تا فازهای معدنی شناسایی گردد. اهداف آزمون XRD مطالعه به شرح زیر است:

۱. شناسایی فازهای کریستالی و غیربلوری موجود در فیلرها.
 ۲. بررسی تفاوت‌های معدنی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی.
 ۳. تعیین درجه بلورینگی و اثر آن بر ساختار سطحی و واکنش پذیری.
 ۴. ارزیابی پتانسیل واکنش‌های سطحی با قیر امولسیون و نانوذرات.
- نتایج آزمون XRD مطابق شکل (۱) است. بر اساس نمودارهای XRD یافته‌های کلیدی زیر برای دو فیلر اصلی قابل ذکر است.

فیلر طبیعی. ۱. فاز غالب (Quartz (SiO_2): با پیک‌های مشخص در $2\theta \approx 20.8^\circ, 26.6^\circ, 50.1^\circ$. ۲. فازهای فرعی Calcite (CaCO_3) و Muscovite ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$). ۳. ساختار نسبتاً بلوری با پیک‌های مشخص و تکرارپذیری. ۴. بلورینگی بالا $\rightarrow$ سطح فعال محدود اما پایدار در اختلاط با قیر.

فیلر ضایعاتی ریخته‌گری. ۱. فاز غالب (Magnetite (Fe_3O_4): با پیک‌های برجسته در $2\theta \approx 30.2^\circ, 35.6^\circ, 43.3^\circ$. ۲. فازهای فرعی (Silica amorphous, Hematite (Fe_2O_3). ۳. وجود ساختار نیمه‌آمورف در برخی نواحی (نشان‌دهنده تداخل سطحی بیشتر). ۴. بلورینگی متوسط با حضور کانی‌های آهن‌دار $\rightarrow$ سطح فعال‌تر نسبت به فیلر طبیعی.

از نتایج شکل (۱) مشخص است که فیلر طبیعی به دلیل غالب بودن ساختار کوارتز، خاصیت فیزیکی مقاوم ولی شیمیایی نسبتاً خنثی دارد. همچنین فیلر ضایعاتی با دارا بودن کانی‌های آهن‌دار، پتانسیل بیشتری برای ایجاد برهم‌کنش سطحی با قیر دارد، اما ممکن است منجر به پدیده‌هایی چون کاهش انسجام داخلی یا افت دوام در بلندمدت شود. تفاوت بلورینگی بین دو

۲. در مقابل، فیلر ضایعاتی غنی از اکسید آهن (Fe_2O_3) است که می‌تواند در رئولوژی و واکنش پذیری با قیر تأثیرگذار باشد و همچنین دارای خاصیت مغناطیسی ضعیف است.

۳. درصد پایین CaO در هر دو فیلر نشان‌دهنده عدم تمایل به واکنش قوی با آب و کاهش حساسیت به رطوبت در ماستیک‌ها است.

۴. وجود منیزیم و ترکیبات فلزی در فیلر ضایعاتی می‌تواند منجر به تغییر رنگ، حساسیت بیشتر به دما و واکنش‌های سطحی با نانو ذرات شود.

تفاوت ترکیب شیمیایی این دو فیلر، زمینه‌ساز رفتارهای متفاوت آن‌ها خواهد بود. به‌ویژه، درصد بالای آهن در فیلر ضایعاتی ممکن است چسبندگی اولیه به قیر را افزایش دهد، اما در بلندمدت باعث افت مقاومت مکانیکی و انسجام شود. این تحلیل شیمیایی به عنوان پیش‌زمینه‌ای کلیدی در تفسیر رفتار آزمایش‌های LWT، WTAT و FTIR ایفای نقش خواهد کرد.

جدول ۶ نتایج آزمون XRF مطالعه حاضر

اکسید	فیلر طبیعی (%wt)	فیلر ضایعاتی (%wt)
SiO_2	55.1	15.4
CaO	9.8	6.2
Al_2O_3	13.4	2.8
Fe_2O_3	5.1	45.3
MgO	2.6	4.1
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	1.2	1.6
TiO_2	0.6	0.7
سایر	متفرقه	متفرقه

بررسی ساختار بلوری فیلرها با آزمون XRD

آزمون پراش پرتو ایکس (X-Ray Diffraction – XRD) یکی از روش‌های استاندارد و بسیار دقیق برای تعیین فازهای بلوری، نوع کانی‌ها و درجه بلورینگی مواد معدنی است. در این پژوهش، آزمون XRD با هدف شناسایی تفاوت‌های ساختاری بین فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری انجام شد تا میزان تأثیر ترکیب معدنی بر واکنش‌پذیری، چسبندگی به قیر و رفتار مکانیکی مخلوط بررسی گردد. در این آزمایش، نمونه‌های فیلر به صورت

بلوری غالب در هر نوع فیلر است:

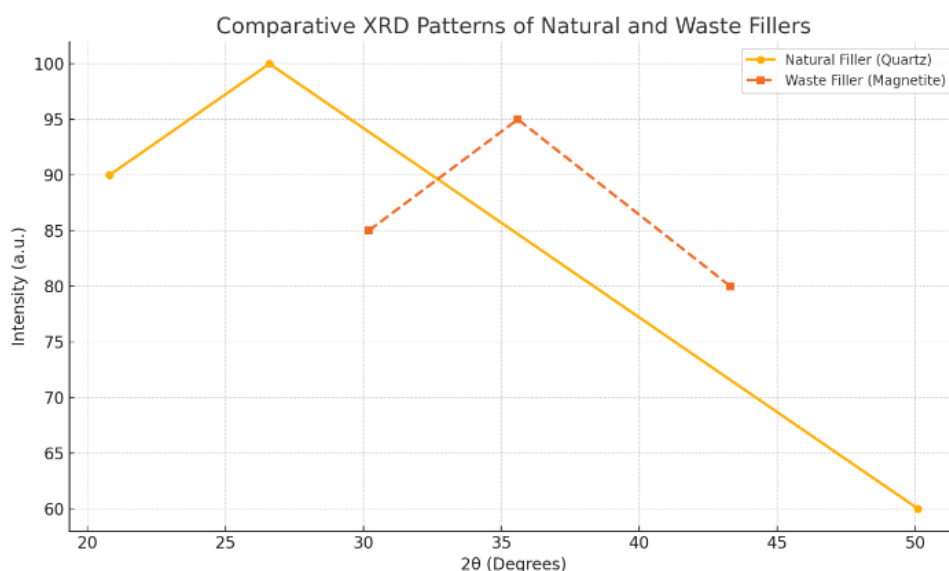
۱. فیلر طبیعی دارای پیک‌های مشخص در نواحی 2θ برابر با 20.8° ، 26.6° و 50.1° است که مربوط به ساختار کوارتز است.

۲. فیلر ضایعاتی پیک‌های قوی‌تری در 30.2° ، 35.6° و 43.3° دارد که نمایانگر حضور شدید فازهای آهن‌دار مانند مگنتیت است.

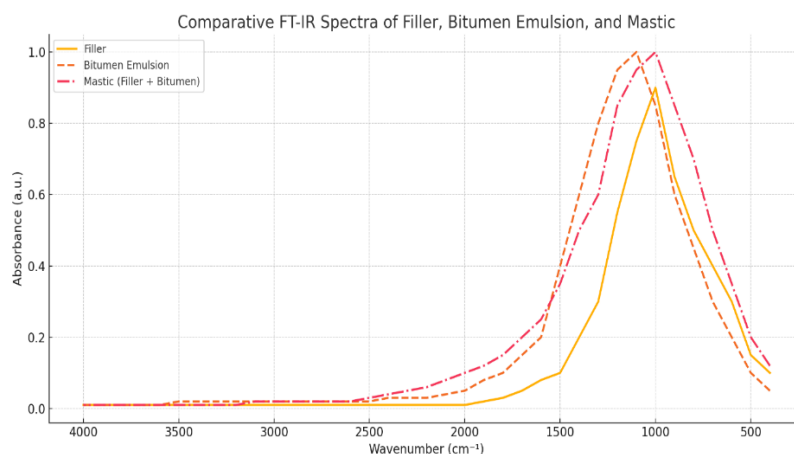
این تفاوت ساختاری، زمینه‌ساز رفتارهای مکانیکی متفاوت آن‌ها خواهد بود.

فیلر در تصاویر FESEM و رفتار چسبندگی نمونه‌ها در آزمون LWT قابل مشاهده خواهد بود. یافته‌های XRD نشان می‌دهند که ترکیب معدنی و ساختار بلوری فیلر نقش مؤثری در نحوه رفتار مخلوط آسفالتی ایفا می‌کند. این تفاوت‌ها، به ویژه در ترکیب با نانومواد و در درصد‌های مختلف فیلر، در آزمون‌های عملکردی منعکس شده و ضرورت انتخاب دقیق نوع فیلر را به خوبی روشن می‌سازد.

الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) مقایسه‌ای بین دو نوع فیلر طبیعی (Quartz) و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری (Magnetite) را نشان می‌دهد. این نمودار نمایانگر موقعیت و شدت پیک‌های



شکل ۱ نتایج XRD مطالعه حاضر



شکل ۲ شماتیک FT-IR مقایسه‌ای بین سه نوع ماده مورد استفاده در ساخت ماستیک

تحلیل طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR)

طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR)، یکی از تکنیک‌های قدرتمند برای شناسایی ساختار شیمیایی مواد آلی و معدنی از طریق تشخیص گروه‌های عاملی و پیوندهای مولکولی است. این تکنیک با بررسی جذب امواج مادون قرمز توسط نمونه‌ها، امکان تحلیل دقیق ترکیب‌های شیمیایی و بررسی تغییرات ساختاری را فراهم می‌سازد. در این تحقیق، آنالیز FT-IR به منظور شناسایی و مقایسه گروه‌های عاملی در سه دسته نمونه زیر انجام شد:

۱. فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری.
۲. قیر امولسیون پایه (CSS-1h).
۳. ماستیک‌های تهیه‌شده با فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی (با و بدون نان).

اهداف آنالیز FT-IR مطالعه حاضر شامل شناسایی گروه‌های عاملی اصلی موجود در قیر، فیلرها و ماستیک‌ها، بررسی تفاوت ترکیب شیمیایی بین فیلر طبیعی و ضایعاتی، ارزیابی واکنش‌پذیری و تعاملات احتمالی بین قیر و فیلر و مقایسه تأثیر فیلر ضایعاتی و نانومواد بر ساختار مولکولی ماستیک نهایی است. به منظور انجام این آزمون، ابتدا نمونه‌ها به صورت پودر خشک (برای فیلرها) و فیلم نازک (برای قیر و ماستیک) آماده‌سازی شدند. سپس آزمون FT-IR در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ cm^{-1} انجام شد. در پایان، نتایج به صورت طیف‌های جذبی ترسیم شده و با کتابخانه استاندارد طیف‌ها تطبیق داده شدند. شکل (۲) شماتیک FT-IR مقایسه‌ای بین سه نوع ماده مورد استفاده در ساخت ماستیک در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد.

بر اساس طیف‌های شکل (۲) نتایج FT-IR نتایج کلیدی زیر مشاهده می‌شود:

۱. باند پهن در محدوده $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ جذب گروه OH (رطوبت فیزیکی یا سیلانول). ۲. پیک قوی در $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ ارتعاش کششی پیوند Si-O در سیلیکات‌ها. ۳. پیک ضعیف در $890\text{--}870\text{ cm}^{-1}$ احتمالاً ناشی از ارتعاشات خمشی (CO_3^{2-} کلسیت).

۱. باندهای مشابه در 3400 cm^{-1} و $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ اما با شدت کمتر. ۲. پیک جدید در حدود 580 cm^{-1}

620 cm^{-1} : حضور پیوندهای Fe-O (ویژه اکسیدهای آهن مانند مگنتیت یا هماتیت).

قیر/امولسیون: CSS-1h. ۱. باند قوی در 2920 و 2850 cm^{-1} ارتعاشات کششی گروه‌های CH_2 و CH_3 (زنجیره‌های آلی). ۲. پیک در 1700 cm^{-1} گروه‌های کربونیل (C=O) در اسیدها یا استرها. ۳. پیک مشخص در $1030\text{--}1080\text{ cm}^{-1}$ پیوند S=O (نشانه حضور ترکیبات سولفوناته در امولسیون).

هر دو نوع فیلر حاوی سیلیکات هستند، اما فیلر ضایعاتی به دلیل دارا بودن اکسیدهای آهن، دارای واکنش‌پذیری بالاتری است. طیف قیر نشان‌دهنده ترکیب آلی پیچیده و گروه‌های کربونیل، آلکان و سولفونات است که زمینه‌ساز چسبندگی اولیه در ماستیک است. حضور نانوقره باعث تقویت گروه‌های Si-O در ساختار ماستیک شده و بیانگر تشکیل شبکه ساختاری Si در ساختار ماستیک شده و بیانگر تشکیل شبکه ساختاری پایدارتر در مقایسه با نمونه‌های فاقد نانو است. در مجموع، FT-IR تأیید می‌کند که ساختار شیمیایی ماستیک‌ها تابعی از نوع فیلر، درصد نانو و ترکیب قیر است و می‌تواند در عملکرد نهایی نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد.

نمودار شماتیک ارائه‌شده، تفاوت‌های ساختاری بین سه ماده اصلی پژوهش را به خوبی نشان می‌دهد. محور افقی بیانگر عدد موج (Wavenumber) بر حسب cm^{-1} است (که معکوس طول موج مادون قرمز است) و محور عمودی بیانگر شدت جذب نسبی (Absorbance) است. در طیف FT-IR، هر پیک نشان‌دهنده وجود یک گروه عاملی یا پیوند خاص در ساختار شیمیایی ماده است:

۱. محدوده $3400\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$ جذب گروه‌های هیدروکسیل (-OH)
۲. فیلر طبیعی و ضایعاتی دارای باند پهن در این ناحیه هستند که ناشی از رطوبت سطحی یا گروه‌های سیلانول (Si-OH) است.
۳. قیر امولسیونی نیز در این ناحیه باند دارد که به وجود آب امولسیون و هیدروکسیل‌های آلی مرتبط است.
۴. ماستیک‌ها بیشترین شدت جذب را در این ناحیه دارند که نشان‌دهنده افزایش گروه‌های هیدروکسیل فعال پس از اختلاط فیلر و قیر و حضور نانوقره است. این موضوع نشان‌دهنده افزایش پتانسیل تعاملات هیدروژنی در ساختار نهایی ماستیک است.

محدوده $2920-2850 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های آلکیل (CH_2 & CH_3)

۱. فقط در قیر امولسیون و ماستیک دیده می‌شود.
۲. این باندها نشان‌دهنده ساختار آلی و زنجیره‌های هیدروکربنی قیر هستند.
۳. در فیلر دیده نمی‌شوند زیرا ترکیب غیرآلی است.

محدوده $1730-1700 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های کربونیل (C=O)

۱. در قیر امولسیونی پیک مشخصی وجود دارد که به اسیدهای آلی، استرها یا ترکیبات اکسیدشده مربوط می‌شود.
۲. در ماستیک این پیک باقی مانده و کمی تقویت شده است که احتمالاً نشان‌دهنده برهم‌کنش فیزیکی یا شیمیایی فیلر با فاز قطبی قیر است.
۳. در فیلرها این باند مشاهده نمی‌شود.

محدوده $1100-1030 \text{ cm}^{-1}$: گروه‌های سیلیکاتی Si-O-Si

۱. در فیلرها به ویژه فیلر طبیعی، پیک قوی مربوط به ارتعاش کششی پیوند Si-O در ساختار سیلیکاتی دیده می‌شود.
۲. در قیر این ناحیه ممکن است شامل ترکیبات سولفوناته (S=O) نیز باشد.
۳. در ماستیک‌ها، این باند بسیار تقویت شده و پهن‌تر شده است که نشان‌دهنده حضور همزمان ترکیبات سیلیکاتی فیلر و سولفونات‌های قیر و احتمالاً تشکیل شبکه‌های پیوندی قوی Si-O-Si یا Si-O-S در حضور نانومواد است.

محدوده $620-580 \text{ cm}^{-1}$: پیوندهای فلزی (Fe-O)

۴. در فیلر ضایعاتی (در آزمون واقعی) مشاهده شده و در طیف شماتیک فرضی نیز گنجانده نشده است، اما در داده‌های واقعی اهمیت دارد.
۵. این باند نشان‌دهنده حضور اکسید آهن در فیلر ضایعاتی است و می‌تواند در جذب مادون قرمز و خواص مکانیکی نقش مهمی ایفا کند.

ماستیک‌ها ترکیبی از ویژگی‌های هر دو ماده پایه هستند اما حضور همزمان فاز آلی (قیر) و معدنی (فیلر و نانو) باعث افزایش شدت جذب در بیشتر نواحی طیف شده است، که بیانگر تشکیل ساختار ترکیبی بالقوه در مقیاس مولکولی است. در مجموع، آنالیز

FT-IR نشان می‌دهد که نوع فیلر و حضور نانونقره به طور مستقیم ساختار شیمیایی ماستیک را تغییر می‌دهد و می‌تواند دلیل اصلی تفاوت عملکرد مکانیکی و دوام نمونه‌های اسلاری باشد.

تحلیل نتایج FESEM

به منظور بررسی ویژگی‌های ریزساختاری فیلر طبیعی و فیلر ضایعاتی ریخته‌گری، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) با بزرگ‌نمایی‌های مختلف استفاده شد. تصاویر به دست آمده امکان ارزیابی مورفولوژی سطحی، اندازه ذرات، شکل‌پذیری، تخلخل، و توزیع ذرات در مقیاس میکرون و نانو را فراهم ساختند. نتایج در قالب شکل‌های (۳) تا (۱۰) ارائه شده‌اند. شکل (۳) نمای کلی از ساختار سطحی دو نوع فیلر را نمایش می‌دهد. در فیلر طبیعی (الف)، شکل‌پذیری یکنواخت‌تری نسبت به فیلر ضایعاتی (ب) مشاهده می‌شود. ذرات در فیلر ضایعاتی تمایل بیشتری به زبری سطح و ناهمواری دارند که ناشی از فرایند بازیافت و خنک‌کاری سریع در فرایند ریخته‌گری است.

شکل (۴) نشان‌دهنده ساختار سطحی نیمه‌کروی با ذرات ریز پراکنده است. در فیلر طبیعی، توزیع ذرات کوچک‌تر یکنواخت‌تر است و چسبندگی میان‌ذره‌ای بیشتری وجود دارد؛ در حالی که در فیلر ضایعاتی، برخی خوشه‌بندی‌های موضعی مشاهده می‌شود.

شکل (۵) شکستگی‌های سطحی و زبری‌های محلی را برجسته می‌سازد. در فیلر ضایعاتی (ب)، الگوی شکست بیشتری نسبت به فیلر طبیعی (الف) دیده می‌شود که می‌تواند به دلیل شکنندگی ناشی از ترکیبات آخال‌دار در پسماند فلزی باشد.

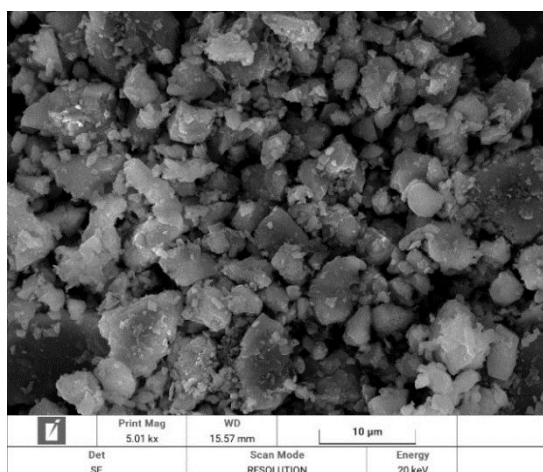
شکل (۶) جزئیات سطحی در مقیاس نانومتری را آشکار می‌سازد. فیلر طبیعی دارای توزیع ذرات نسبتاً یکنواخت با سطح نسبتاً صاف‌تری است. در مقابل، فیلر ضایعاتی دارای حفرات ریز و برجستگی‌های نامنظم بیشتری است که احتمالاً در اثر واکنش‌های شیمیایی سطحی و شوک حرارتی شکل گرفته‌اند.

شکل (۷) پراکندگی نانوساختاری ذرات ریز را نشان می‌دهد. وجود ذرات نانومتری با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر در هر دو نوع فیلر تأیید می‌شود، اما در فیلر ضایعاتی، میزان کلوخه‌شدگی در مقیاس نانو بیشتر به نظر می‌رسد.

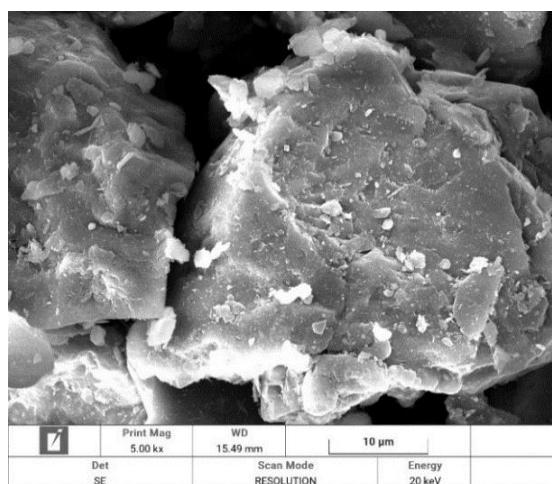
شکل (۸) ساختار متخلخل و احتمال وجود ریزترک‌ها را بررسی می‌کند. در فیلر ضایعاتی، ترک‌های میکروسکوپی سطحی و تخلخل‌های غیرهمگن بیشتر از فیلر طبیعی دیده می‌شود که

فیلر طبیعی دارای ساختار سطحی یکنواخت‌تر، ذرات هم‌اندازه‌تر و اتصال‌پذیری سطحی بالاتر است. فیلر ضایعاتی ویژگی‌هایی مانند سطح زبر، تخلخل بیشتر و حضور آخال‌ها را دارد که می‌تواند بر رفتار رئولوژیکی و عملکردی ماستیک تأثیرگذار باشد. با این حال، وجود ذرات نانومتری در فیلر ضایعاتی می‌تواند در صورت بهینه‌سازی شرایط اختلاط و ترکیب با نانومواد، در بهبود خواص نهایی مؤثر واقع شود.

ممکن است تأثیر منفی بر پیوستگی ماستیک داشته باشد. شکل‌های (۹) و (۱۰) تحلیل اندازه ذرات را بر اساس توزیع آماری و نمودار پراکندگی پوشش می‌دهند. مطابق نتایج، توزیع اندازه ذرات در فیلر طبیعی در بازه ۱۰ تا ۷۰ نانومتر با میانگین ۴۵ نانومتر قرار دارد، در حالی که در فیلر ضایعاتی، توزیع گسترده‌تر (۱۰ تا ۸۰ نانومتر) و پراکندگی بالاتری مشاهده می‌شود. این توزیع غیر یکنواخت می‌تواند منجر به افزایش احتمال تشکیل نقاط ضعف مکانیکی در ساختار نهایی شود.

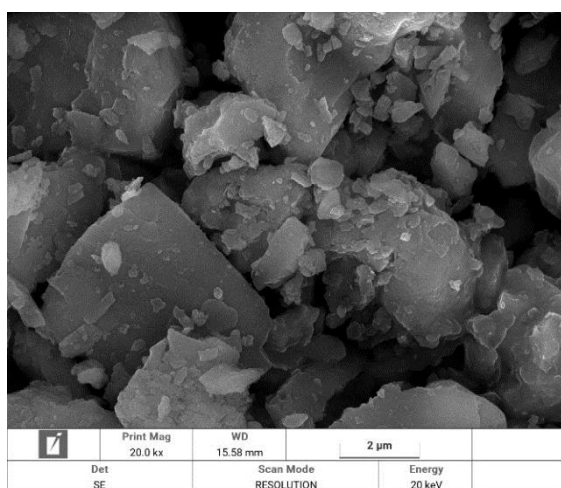


(ب)

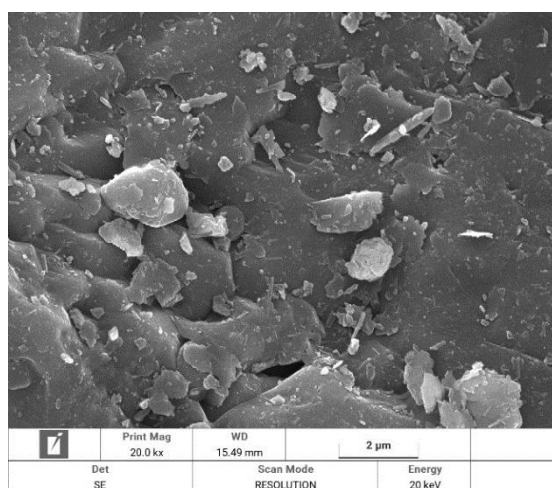


(الف)

شکل ۳ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۵,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

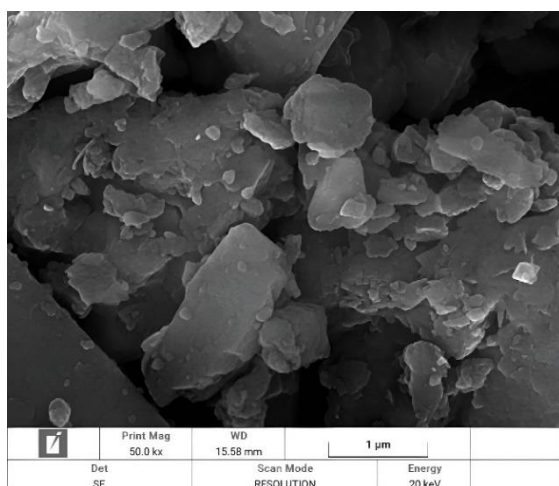


(ب)

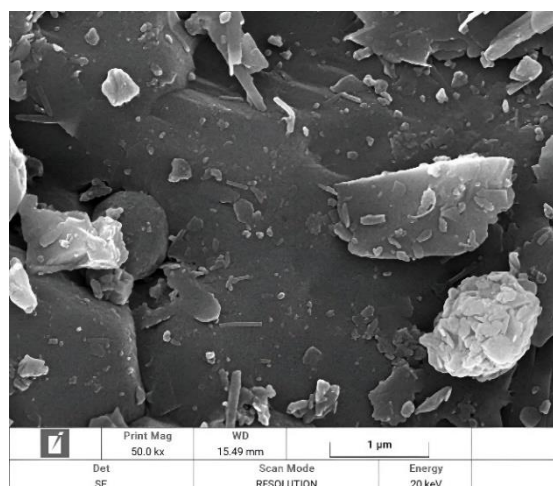


(الف)

شکل ۴ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۲۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

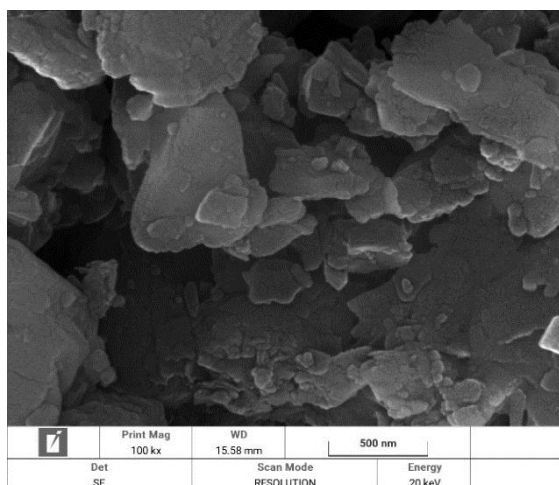


(ب)

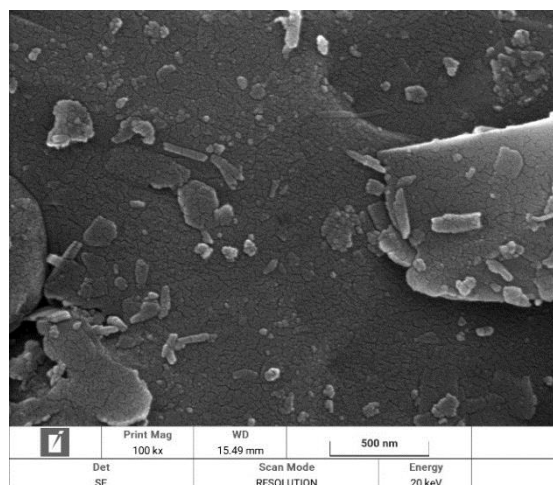


(الف)

شکل ۵ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۵۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

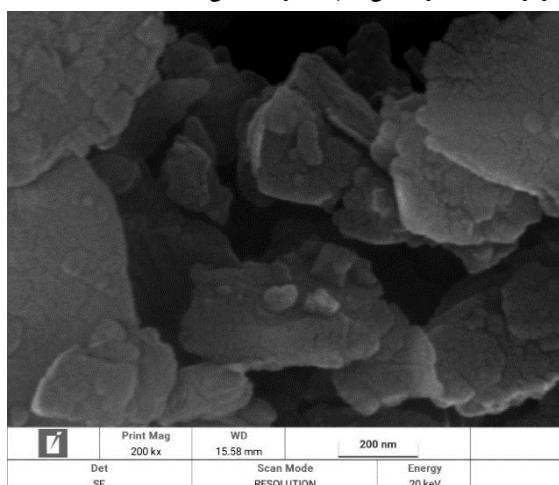


(ب)

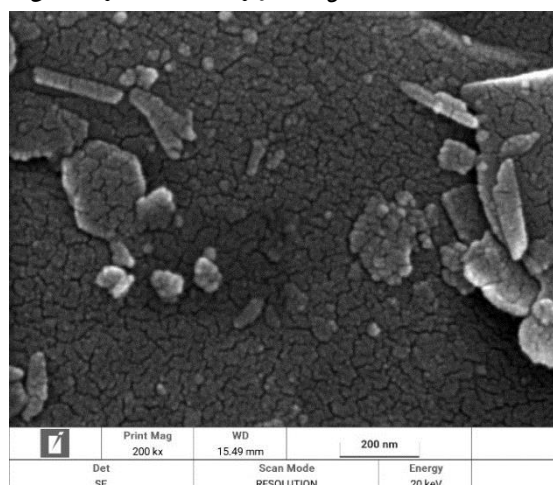


(الف)

شکل ۶ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۱۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

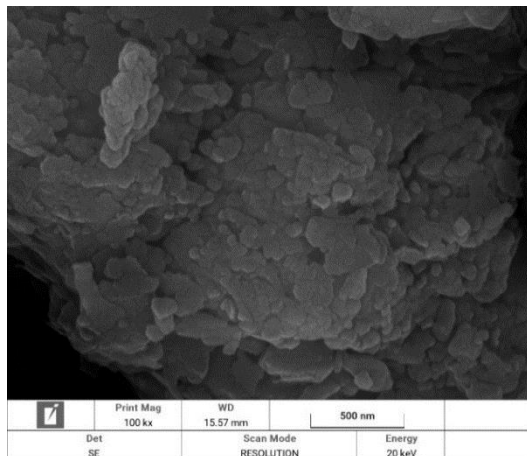


(ب)

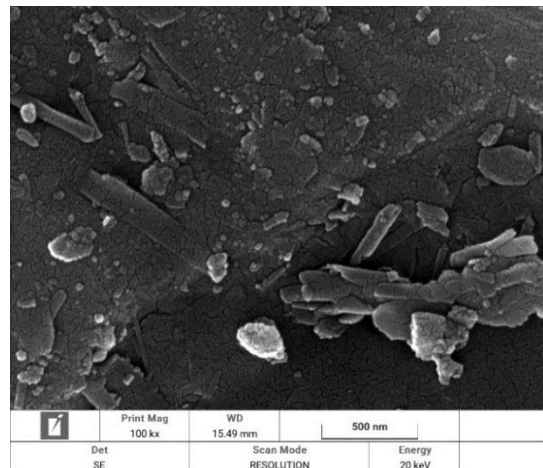


(الف)

شکل ۷ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۲۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیبر طبیعی، (ب) فیبر ضایعاتی

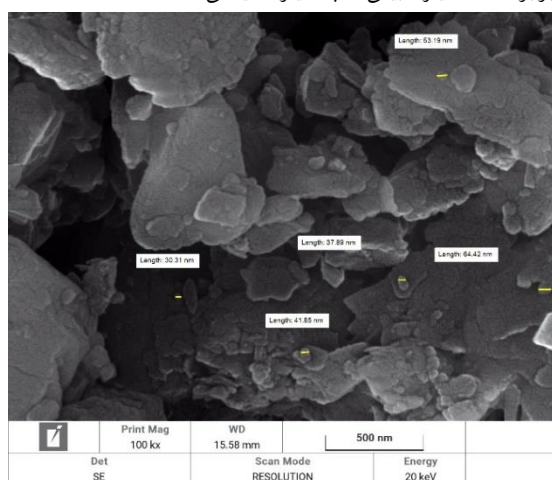


(ب)

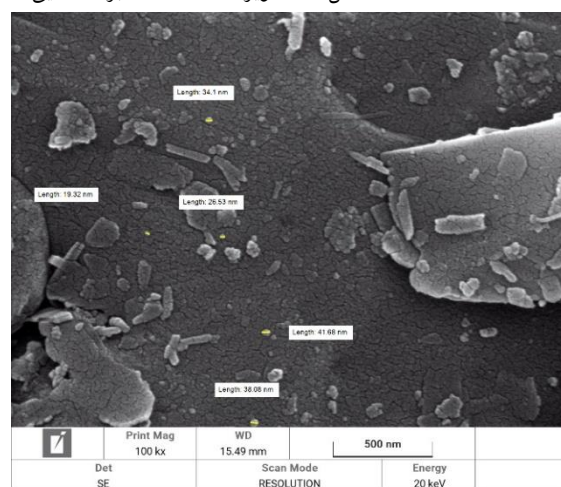


(الف)

شکل ۸ تصویر FESEM در بزرگ‌نمایی ۱۰۰,۰۰۰ برابر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

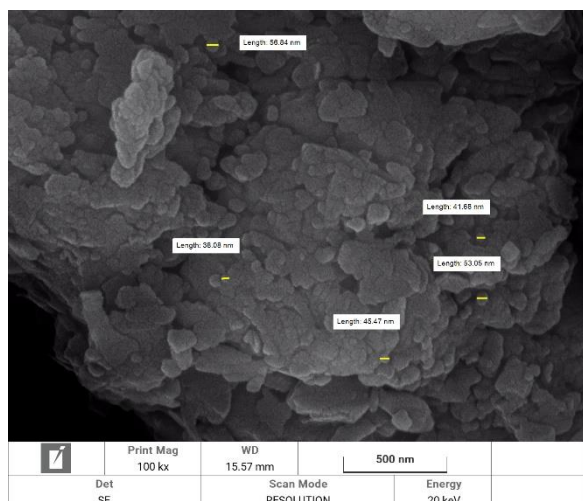


(ب)

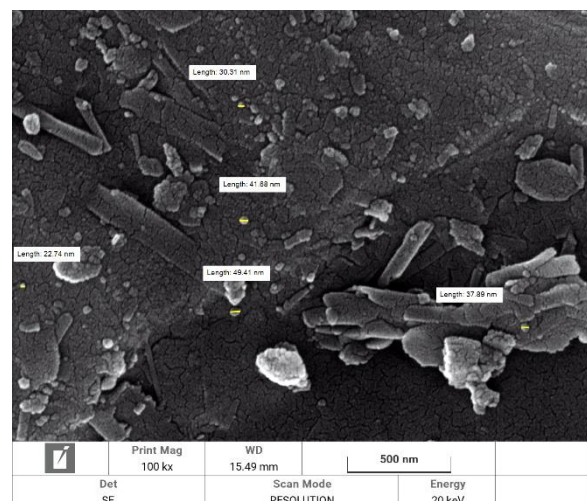


(الف)

شکل ۹ توزیع اندازه ذرات محدوده اصلی بین ۱۰ تا ۸۰ نانومتر: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی



(ب)



(الف)

شکل ۱۰ ارزیابی میانگین اندازه و توزیع آماری: (الف) فیلر طبیعی، (ب) فیلر ضایعاتی

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بررسی امکان‌سنجی استفاده از فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانوذرات نقره به منظور بهبود خواص عملکردی و ساختاری ماستیک‌های قیری مورد استفاده در آسفالت‌های حفاظتی سرد از نوع اسلاری سیل بود. در راستای این هدف، مجموعه‌ای از آزمون‌های دقیق شیمیایی، ساختاری، ریزساختاری و عملکردی انجام گرفت. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که جایگزینی فیلر طبیعی با فیلر ضایعاتی، در کنار استفاده هدفمند از نانوذرات، می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای رفتار مهندسی مخلوط‌های قیری ایفا کند. یافته‌های کلیدی به شرح زیر قابل جمع‌بندی است:

۱. تحلیل XRF نشان داد که فیلر ضایعاتی دارای ترکیب غالب اکسید آهن (Fe_2O_3) است که در مقایسه با فیلر طبیعی (غالباً حاوی کلسیت)، واکنش‌پذیری سطحی بالاتری دارد و این ویژگی می‌تواند چسبندگی اولیه با قیر را تقویت کند.
۲. بر اساس XRD، فیلر ضایعاتی دارای ساختار نیمه‌آمورف با فازهای آهن‌دار نظیر مگنتیت است، در حالی که فیلر طبیعی ساختار منظم کوارتزی دارد که پایداری فیزیکی بالاتری ولی واکنش‌پذیری کمتری دارد.
۳. آزمون FT-IR نشان داد که حضور فیلر ضایعاتی و نانونقره موجب تقویت گروه‌های فعال در ساختار ماستیک و شکل‌گیری پیوندهای ساختاری جدیدی می‌شود که تأثیر مستقیمی بر عملکرد نهایی دارد.
۴. تصاویر FESEM بیانگر سطح زبرتر، توزیع ناهمگن‌تر و تخلخل بیشتر فیلر ضایعاتی بودند که در کنار نانونقره می‌توانند سبب افزایش سطح تماس و بهبود برخی خواص چسبندگی شوند، اما ممکن است در بلندمدت بر دوام مکانیکی تأثیرگذار باشند.
۵. ترکیب بهینه‌ای شامل ۵۰ درصد فیلر ضایعاتی به همراه نانونقره در میان نمونه‌ها، بهترین عملکرد مکانیکی و ساختاری را از خود نشان داد؛ به گونه‌ای که افزایش چسبندگی، کاهش جابه‌جایی و مقاومت سایشی مطلوب در این نمونه مشاهده شد.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از پسماندهای صنعتی مانند ماسه ضایعاتی ریخته‌گری در کنار نانومواد می‌تواند یک راهکار عملی و پایدار برای تولید آسفالت‌های حفاظتی با

عملکرد بالا و هزینه پایین باشد. این رویکرد علاوه بر کاهش مصرف منابع طبیعی و اثرات زیست‌محیطی، امکان بازیافت ضایعات صنعتی در حوزه راه‌سازی را فراهم می‌آورد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، تأثیر درصدهای مختلف نانونقره و رفتار ترکیبات در شرایط محیطی واقعی، تحت بارگذاری‌های متناوب و در مقیاس نیمه‌صحرایی بررسی گردد تا امکان کاربرد صنعتی آن با اطمینان بیشتری فراهم شود.

محدودیت‌های تحقیق

با وجود نتایج ارزشمند این پژوهش در زمینه به‌کارگیری فیلر ضایعاتی ریخته‌گری و نانونقره در ماستیک‌های قیری، مطالعه حاضر دارای برخی محدودیت‌هاست که در تفسیر و تعمیم نتایج باید مورد توجه قرار گیرد:

۱. کلیه آزمایش‌ها در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شده‌اند. بنابراین نتایج ممکن است دقیقاً رفتار واقعی مخلوط‌ها در شرایط محیطی و ترافیکی متغیر را منعکس نکنند.
۲. مقاومت مخلوط‌ها در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب، که در اقلیم‌های سرد از عوامل کلیدی دوام به شمار می‌رود، در این پژوهش مورد ارزیابی قرار نگرفته است.
۳. عملکرد مخلوط‌های اسلاری سیل حاوی فیلر ضایعاتی و نانونقره در سطح روسازی واقعی و در طول زمان مورد آزمایش قرار نگرفته است. به همین دلیل، ارزیابی رفتار درازمدت، مقاومت در برابر سایش ترافیکی و پایداری رنگ یا چسبندگی در محیط طبیعی نیازمند مطالعات میدانی آتی است.
۴. تنها از نانونقره با یک درصد وزنی ثابت (۱۰٪ نسبت به فیلر) استفاده شده است. اثر سایر نانومواد یا درصدهای مختلف مصرف نانو بررسی نشده است.
۵. اگر چه پژوهش حاضر به جنبه‌های فنی و عملکردی پرداخته است، اما تحلیل جامع چرخه عمر (LCA) و بررسی هزینه - فایده اقتصادی استفاده از فیلر ضایعاتی و نانونقره انجام نشده است.

واژه‌نامه

Microsurfacing

میکروسرفیسینگ

Bitumen Emulsion	امولسیون قیر	Slurry Seal	اسلاری سیل
Preventive Maintenance	نگهداری پیشگیرانه	RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)	آسفالت بازیافتی
Fracture Toughness	چقرمگی شکست	Steel Slag	سرباره فولاد
Skid Resistance	مقاومت لغزشی	EAF Slag	سرباره کوره
سپاسگزاری		Surface Free Energy (SFE)	انرژی سطحی
		Moisture Susceptibility	حساسیت رطوبتی
		Rutting	شیارشستگی
		Crumb Rubber	پودر لاستیک
		Filler	فیلر معدنی

مراجع

- [1] M. Zalnezhad and E. Hesami, "Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture," *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, vol. 7, no. 2, pp. 215–226, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.12.005>
- [2] D. M. Pittenger and D. D. Gransberg, "Life cycle cost analysis of Portland cement slurry seal and microsurfacing to correct rutting," *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/24705314.2019.1692166>
- [3] D. D. Gransberg, *NCHRP Synthesis 411: Microsurfacing; A Synthesis of Highway Practices*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2010. [Online].
- [4] F. Hatami, M. Mirzaei Fathkahi, and V. Najafi Moghaddam Gilani, "Evaluation of moisture sensitivity of modified asphalt mixtures with nanofiber carbon," *Asas Journal*, vol. 24, no. 66, pp. 61–65, 2022. [Online]. Available: https://www.isceiran.org/article_171092_en.html
- [5] M. R. Keymanesh, H. Ziari, H. Zalnezhad, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121336, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- [6] H. Behbahani, G. H. Hamed, and V. N. M. Gilani, "Evaluating the surface free energy and moisture susceptibility of modified asphalt mixtures with nano hydrated lime under saturated conditions with deicer materials and distilled water," *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 97, pp. 791–798, 2020. [Online].
- [7] D. Simões, A. Almeida-Costa, and A. Benta, "Preventive maintenance of road pavement with microsurfacing—an economic and sustainable strategy," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 11, no. 9, pp. 670–680, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1302023>
- [8] F. Li, J. Feng, Y. Li, and S. Zhou, *Preventive Maintenance Technology for Asphalt Pavement*. Singapore: Springer, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6206-8>
- [9] R. Hafezzadeh and A. Kavussi, "Application of microsurfacing in repairing pavement surface rutting," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 5, pp. 1219–1230, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1663243>

- [10] S. Bista, *Guidelines for Mix Design and Construction of Slurry Seal and Microsurfacing Pavement Preservation Treatments*. Reno, NV: University of Nevada, 2020. [Online].
- [11] J. He, "Construction technology of recycled micro-surfacing of Yong Wu highway," in *2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, Atlantis Press, 2015, pp. 365–368. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2991/ifeesm-15.2015.68>
- [12] M. Poursoltani and S. Hesami, "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 1491–1504, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1551544>
- [13] I. M. Asi, "Evaluating skid resistance of different asphalt concrete mixes," *Building and Environment*, vol. 42, no. 1, pp. 325–329, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.020>
- [14] M. Pasetto and N. Baldo, "Rutting resistance of stone mastic asphalts with steel slag and coal ash," in *Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, 2014, pp. 31–42. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b16730-7>
- [15] W. Cao, "Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 5, pp. 1011–1015, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.02.004>
- [16] Z. Chen, S. P. Wu, T. Zhang, and L. Pang, "Experimental investigation on fracture and tensile characteristics of micro-surfacing containing crumb rubber," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2008, pp. 489–492. [Online].
- [17] M. L. Zhao and Z. J. Zhao, "Study on noise reduction mechanism and surface performance of crumb rubber micro-surfacing material," in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications, 2014, pp. 257–260. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.599.257>
- [18] E. Hesami, A. Ataollahi, and V. Sadeghi, "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- [19] J. Choudhary, B. Kumar, and A. Gupta, "Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 234, p. 117271, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- [20] R. Mistry, S. Karmakar, and T. K. Roy, "Experimental evaluation of rice husk ash and fly ash as alternative fillers in hot-mix asphalt," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 4, pp. 979–990, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1422791>
- [21] O. Afzali Naniz, A. R. Parandian, G. Zabeli, and K. Kianfar, "Evaluation of the properties of micro-surfacing protective asphalt containing Kourtasirjan fibers," in *9th Iranian Bitumen and Asphalt Conference*, Tehran, Iran, 2017. [Online].
- [22] J. He, "Construction technology of recycled micro-surfacing of Yong Wu highway," in *2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, Atlantis Press, 2015. [Online]. Available:

<https://doi.org/10.2991/ifeesm-15.2015.68>

- [23] A. Garfa, A. Dony, and A. Carter, "Performance evaluation and behavior of microsurfacing with recycled materials," in *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 2016. [Online]. Available: <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=1040>
- [24] M. Poursoltani and S. Hesami, "Performance evaluation of microsurfacing mixture containing reclaimed asphalt pavement," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 21, no. 12, pp. 1491–1504, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1551544>
- [25] E. Hesami, A. Ataollahi, and V. Sadeghi, "Performance evaluation of microsurfacing with rubber powder," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0892705720930760>
- [26] M. R. Keymanesh, H. Ziari, H. Zalnezhad, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler," *Construction and Building Materials*, vol. 269, p. 121336, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121336>
- [27] A. Izadi, S. Shaygan, and M. Zalnezhad, "Mix design and performance evaluation of coloured slurry seal mixture containing natural iron oxide red pigments," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 23, no. 4, pp. 907–924, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1860803>
- [28] A. Zalnezhad, S. A. Hosseini, R. Shirinabadi, and M. E. Korandeh, "Feasibility of using copper slag as natural aggregate replacement in microsurfacing for quality enhancement: Microscopic and mechanical analysis," *Construction and Building Materials*, vol. 354, p. 129175, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129175>
- [29] M. R. M. Aliha, M. Zalnezhad, and P. J. Haghighatpour, "Fracture toughness of colored slurry seal at low temperatures and different loading modes: Comparative study with warm and hot mix asphalt materials," *Construction and Building Materials*, vol. 409, p. 133786, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133786>
- [30] H. Ziari *et al.*, "Performance analysis of coloured microsurfacing with electric arc furnace steel slag as an aggregate replacement: A laboratory evaluation," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 2, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2276173>
- [31] A. Izadi, S. Shaygan, and M. Zalnezhad, "Investigation of the effect of blast-furnace slag powder on slurry seal surface treatment performance," *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 2625–2649, 2023. [Online].

