

Volume 25, Issue 2, 2025, 35-51 DOI: 10.22034/25.2.35



Evaluation of the effects of nano hydrated lime production method on physical properties of asphalt binders

Ahmed Sundus Mohammed¹, Amir Kavussi² * D, Mehrdad Manteghian³

- 1. Ph.D. Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- 2. Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- 3. Professor, Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract

Nanomaterials have been used in the recent years to improve rheological properties of the asphalt binders and increase mechanical properties of the asphalt mixtures. The high cost of producing nanomaterials is one of the major obstacles that has limited their application in road pavements. In this research, two methods of producing nanomaterials have been applied to produce nano hydrated lime (NHL). The first method was a mechanical process of milling hydrated lime with the application of a planetary ball mill, nano hydrated lime particles in powder form were produced. The second method was chemical processing of dissolving certain chemical materials (namely, calcium nitrate Ca(NO₃)₂, sodium hydroxide NaOH and sodium dodecyl sulfate SDS) into distilled water. The process resulted in the production of NHL solution that after drying in an oven resulted in NHL particles. The sizes of the NHL products were measured using two methods of Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and Dynamic Light Scattering (DLS). The size analysis was performed on NHL samples that were produced after different milling periods in the physical method; and at variation of the concentration of the solution, mainly calcium nitrate $(Ca(NO_3)_2)$ and sodium dodecyl sulfate SDS, in the chemical method. The average particle sizes in the physical method, after 6 hours of milling, were 211 nm, as measures in DLS and 114 nm as measured in FE-SEM. These in the chemical method, at concentration of 3 ml of calcium nitrate solution (Ca(NO₃)₂), were 379 and 124.615 nm respectively. With the chemical method, the nano particles were formed in the plate form with average thickness of 68.5 nm. In addition, X-Ray Diffraction (Nanomaterials have been used in the recent years to improve rheological properties of the asphalt binders and increase mechanical properties of the asphalt mixtures. The high cost of producing nanomaterials is one of the major obstacles that has limited their application in road pavements. In this research, two methods of producing nanomaterials have been applied to produce nano hydrated lime (NHL). The first method was a mechanical process of milling hydrated lime with the application of a planetary ball mill, nano hydrated lime particles in powder form were produced. The second method was chemical processing of dissolving certain chemical materials (namely, calcium nitrate Ca(NO₃)₂, sodium hydroxide NaOH and sodium dodecyl sulfate SDS) into distilled water. The process resulted in the production of NHL solution that after drying in an oven resulted in NHL particles. The sizes of the NHL products were measured using two methods of Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) and Dynamic Light Scattering (DLS). The size analysis was performed on NHL samples that were produced after different milling periods in the physical method; and at variation of the concentration of the solution, mainly calcium nitrate (Ca(NO₃)₂) and sodium dodecyl sulfate SDS, in the chemical method. The average particle sizes in the physical method, after 6 hours of milling, were 211 nm, as measures in DLS and 114 nm as measured in FE-SEM. These in the chemical method, at concentration of 3 ml of calcium nitrate solution ($Ca(NO_3)_2$), were 379 and 124.615 nm respectively. With the chemical method, the nano particles were formed in the plate form with average thickness of 68.5 nm. In addition, X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Fluorescence (XRF) analysis were performed in order to determine the composition of the produced nano materials. These indicated that with the physical method, a higher lime content material was produced. Physical properties of two bitumen types (60/70 and 85/100 penetration grade) that were modified with 2, 4, and 6% of

Review History

Received: Apr 15, 2024 Revised: May 07, 2024 Accepted: Jul 22, 2024

Keywords

Nano-Hydrated Lime (NHL)

Milling process (physical)

Dissolution process (chemical)

Nanoparticles size

Bitumen rheological properties

Corresponding Author Email: kavussia@modares.ac.ir - ORCID: 0000-0002-3195-7329

Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

Modares Civil Engineering Journal

NHL were determined using Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Rotational Viscometer (RV) tests. The results showed that adding 4% of nano hydrated lime (produced by physical method) improved the properties of bitumen to the best. At this percentage, the viscosity of bitumens modified with nano hydrated lime produced by physical and chemical methods improved by about 33% and 18% for the bitumen 60/70 pen and by about 20% and 16% for the bitumen 85/100 pen, respectively. The rutting resistance of modified bitumens increased by about 70% and 54% for the bitumen 60/70 pen and by about 30% and 17% for the bitumen 85/100 pen, respectively. The results also indicated that the addition of NHL (in physical production method) improved the best the bitumen physical properties, penetration was reduced and softening point was increased. In addition, the temperature susceptibility of the modified binders were reduced too. Assessing the change of the viscosity of the NHL modified binders, it resulted that 4% NHL would provide the optimum conditions. Finally, properties of the 60/70 pen bitumen, modified with NHL were better than those of the 85/100 pen bitumen.XRD) and X-Ray Fluorescence (XRF) analysis were performed in order to determine the composition of the produced nano materials. These indicated that with the physical method, a higher lime content material was produced. Physical properties of two bitumen types (60/70 and 85/100 penetration grade) that were modified with 2, 4, and 6% of NHL were determined using Dynamic Shear Rheometer (DSR) and Rotational Viscometer (RV) tests. The results showed that adding 4% of nano hydrated lime (produced by physical method) improved the properties of bitumen to the best. At this percentage, the viscosity of bitumens modified with nano hydrated lime produced by physical and chemical methods improved by about 33% and 18% for the bitumen 60/70 pen and by about 20% and 16% for the bitumen 85/100 pen, respectively. The rutting resistance of modified bitumens increased by about 70% and 54% for the bitumen 60/70 pen and by about 30% and 17% for the bitumen 85/100 pen, respectively. The results also indicated that the addition of NHL (in physical production method) improved the best the bitumen physical properties, penetration was reduced and softening point was increased. In addition, the temperature susceptibility of the modified binders were reduced too. Assessing the change of the viscosity of the NHL modified binders, it resulted that 4% NHL would provide the optimum conditions. Finally, properties of the 60/70 pen bitumen, modified with NHL were better than those of the 85/100 pen bitumen.



تاريخچه داوري

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

كلمات كليدى

نانو آهک هيدراته

فرآيند توليد فيزيكي

فرآيند توليد شيميايي

خواص قير اصلاح شده با

اندازه نانوذرات

نانوآهک

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۵، شماره ۲، سال ۱۴۰۴ – صفحات ۳۵ تا ۵۱ DOI: 10.22034/25.2.35



ارزیابی تاثیر روش تولید نانو آهک هیدراته بر خواص فیزیکی قیر

احمد سندس محمد'، امير كاووسي َّ 🍽، مهرداد منطقيان "

- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
 - ۲. استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
 - ۳. استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیدہ

نانومواد علاوه بر انواع کاربردها، برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر و افزایش مشخصات مکانیکی مخلوطهای آسفالتی نیـز مـورد استفاده قرار میگیرند. بالا بودن هزینههای تولید این مواد، از جمله موانعی است کـه اسـتفاده از آنهـا را محـدود کـرده اسـت. در ایـن تحقیق دو روش تولید نانومواد برای تولید نانوآهک هیدراته مورد استفاده قرار گرفت. یکی فرآیند مکانیکی با استفاده از دستگاه آسـیاب گلولهای سیارهای، و دیگری فرآیندی شیمیایی است که در آن از حل نمودن منتخبی از مواد شیمیایی در آب مقطر، شامل نیترات کلسیم، هیدروکسید سدیم و سدیم دودسیل سولفات، نانوآهک هیدراته تولید می شود. در بخش آزمایشگاهی، پـس از تولیـد نانوآهـک هیدراته به روش های فوق و در شرایط مختلف، اندازه نانوذرات تولید شده با استفاده از دو روش آزمایش، بـه نـامهـای میکروسـکوپ الکترونی روبشی میدانی و آزمایش دینامیکی پراکندگی نور تعیین شد. در روش فیزیکی، اندازه ذرات پـس از طـی زمـان.هـای مختلـف آسیاب و در روش شیمیایی با تهیه غلظتهای مختلف محلول نیترات کلسیم و سدیم دو دسیل سولفات تعیین شد. میانگین انـدازه نـانو ذرات پودری تولید شده به روش فیزیکی (پس از ۶ ساعت آسیاب)، ۲۱۱ نانومتر در آزمایش دینامیکی پراکنـدگی نـور، و ۱۱۴ نـانومتر در آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی بود. میانگین اندازه نانوپلیتهای محلول تولید شده بـه روش شـیمیایی، در غلظـت ۳ میلـی لیتر محلول نیترات کلسیم و در ضخامت پلیتها به میزان میانگین ۶۸/۵ نانومتر، در آزمایش دینامیکی پراکندگی نـور ۳۷۹ نـانومتر، و در آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی، ۱۲۴/۶۱۵ نانومتر بود. نانوآهکهای تولید شده در اندازههای ذکر شـده در فـوق، در مقـادیر ۲، ۴ و ۶ درصد، به دو نوع قیر خالص (۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰) اضافه و به صورت مناسب با آنها مخلوط و قیرهای اصلاح شده تهیـه شـدند. خواص فیزیکی قیرهای اصلاح شده با انجام آزمایشهای رئـومتر برشـی دینـامیکی و ویسـکومتر چرخشـی عـلاوه بـر آزمـایشهـای استاندارد قیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داده است که افزودن ۴ درصـد نانوآهـک هیدراتـه (تولیـد شـده بـه روش فیزیکـی) خواص قیر را به بهترین حالت بهبود بخشید. در این درصد، ویسکوزیته قیرهای اصلاح شده با نانوآهک هیدراتـه تولیـد بـه روش فیزیکی و شیمیایی به ترتیب حدود ۳۳، ۱۸ درصد برای قیر ۶۰٬۷۰ و برای قیر ۸۵٬۱۰۰ به حدود ۲۰ ۱۶ درصد بهبـود یافـت. مقاومـت شیارشیدگی قیرهای اصلاح شده به ترتیب در روش فیزیکی و شیمیایی حدود ۷۰ و ۵۴ درصد برای قیر ۶۰/۷۰ و برای قیر ۱۰۰/۸۵ ب حدود ۳۰ و ۱۷ درصد افزایش یافت. بهاینترتیب که درجه نفوذ قیر کاهش و نقطه نرمی آن افزایش یافت. عـلاوه بـر ایـن، حساسـیت حرارتی قیرهای اصلاح شده نیز در مقایسه با قیرهای خالص کاهش یافته است.

۱ – مقدمه

تمرکز برخی از پژوهشهای پیشین برکاهش مقیاس مواد ماکرو و ریز به ابعاد نانو بوده است کـه موجـب افـزایش کـاربرد آنهـا در

صنایع مختلف می شود، هر چند که به دلیل گرانی بیش از حد در برخی از صنایع مانند راهسازی کاربرد پیدا نکرده اند [1]. از جمله موارد افزایش قیمت این مواد، همانا گرانی روش تولید آن ها است.

* رايانامه نويسنده مسئول: ORCID - kavussia@modares.ac.ir. 0000-0002-3195-7329.

Creative کمی رایت © ۲۰۲۵ انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بینالمللی Creative کمی رایت © ۲۰۲۵ انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بینالمللی By NC و او دارد (Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (Nettps://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0). این مجوز، شما می توانید این مطلب را در هر قالب و رسانهای کمی، بازنشر و باز آفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیر تجاری استفاده کنید.

البته آثار مثبت نانومواد که توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است، میتواند هزینه بالای این مواد را توجیه کند. یکی از متداول ترین و موفق ترین روش ها در سال های اخیر برای دستیابی به این هدف، اصلاح قیر با استفاده از نانومواد بوده است. در این راستا نانوآهک هیدراته به دلیـل خـواص فیزیکـی خـوب و سـطح مخصوص زیاد، مشخصات قیر و مخلوطهای آسفالتی را به صورت ویژهای بهبود بخشیده است. نانومواد به دلیل اندازه کوچک ذرات آنها (در مقایسه با فیلرها و بسیاری از افزودنیهای رایج) ویژگیهای خاص و منحصر به فردی را به مخلوطهای آسفالتی داغ (HMA) میدهند [2]. در ایـن تحقیـق روش.هـای تولیـد نانوآهـک هیدراته و نقش این ماده در اصلاح خواص قیر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق بررسی و مقایسه بین دو روش فیزیکی و شیمیایی بـرای تولیـد نانوآهـک هیدراتـه اسـت. در روش فیزیکی در آزمایشگاه، فیلر آهک هیدراته (HL) ابا استفاده از آسیاب گلولهای دوار به نانوآهک هیدراته (NHL)^۳ تبدیل شد. در مقابـل، در روش شیمیایی، با فرآیند انحلال و رسوب مواد شیمیایی در آب حاوى نيترات كلسيم (Ca(NO₃)₂)، هيدروكسيد سديم (NaOH) و سدیم دودسیل سولفات (SDS) نانو ذرات تولید شدند. در پژوهش با هدف بررسی تاثیر این دو روش تولید در ویژگیهای قیر، خـواص فيزيكي قيرهاي اصلاح شده حاوى درصدهاي مختلف نانوآهك هیدراته تولید شده به دو روش مورد بررسی قرار گرفت.

۲- ادبیات فنی

۲-۱- روشهای تولید نانو آهک هیدراته

آهک هیدراته ترکیبی معدنی با فرمول شیمیایی 2(OH) است. این ماده پودری سفید رنگ است که از ترکیب اکسید کلسیم با آب به وجود میآید. دو مسیر اساسی برای سنتز نانوآهک بررسی شده است: سنتز ناهمگن و سنتز همگن [3]. اولی شامل روش سنتی تهیه 2(OH) به معنای آهک زدایی، و همچنین مسیرهای جدید بر اساس آلکواکسیدهای پیش ساز و کلسیم فلزی است. روش دوم شامل رسوب نانوآهک در محلول آبی از طریق واکنش شیمیایی گونههای محلول است. روش اول به فرآیندهای تولید

نانوذرات به روش فیزیکی-مکانیکی که مبتنی بر اصول فناوری میکروسیستم است، گفته میشود [4]. به کمک چند آسیاب با ابعاد مختلف، مواد به ابعاد نانو تبدیل میشوند. روش های دیگر این دسته عبارتند از لیتوگرافی، آنودایز و اچ پلاسما [5]. در پژوهشی، با بکارگیری دستگاه سایش لس آنجلس، نانوآهک هیدراته در ۹۰ دقیقه با اندازه متوسط ذرات ۶۰۰ نانومتر تولید شد [6]. ادامه عملیات آسیاب برای بیش از ۹۰ دقیقه تأثیر چندانی بر کاهش اندازه ذرات نانوآهک هیدراته نداشت.

آتار اندازه ذرات نانوآهک هیدراته تولید شده بر عملکرد خستگی قیر و مخلوط آسفالتی در تحقیقی بررسی شد [7]. در این پژوهش میانگین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته پس از ۶ ساعت آسیاب، بدون استفاده از عامل کنترل فرآیند، به میزان ۵۰۳ نانومتر اندازه گیری شد. با استفاده از عامل کنترل فرآیند، میانگین اندازه ذرات پس از ۶ ساعت آسیاب به ۲۸۱ نانومتر رسید. در هر دو مورد، با افزایش زمان آسیاب (بیش از ۶ ساعت) به دلیل چسبیدن ذرات به زمان ۶ ساعت به عنوان زمان بهینه عملیات آسیاب تعیین شد [7]. در مطالعه دیگری آثار اندازه نانوآهک هیدراته بر خواص مخلوط آسفالت داغ مورد بررسی قرار گرفت. در آن تحقیق از آسیاب مطالعه دیگری آثار اندازه متوسط ذرات آهک هیدراته بر خواص مناوط ریز استفاده شد. اندازه متوسط ذرات آهک هیدراته در این از آسیاب تعیین شد [8].

روش های دسته دوم (سنتز همگن) بر اساس اصول فیزیکی و شیمیایی مولکول ها یا تشکیلات اتمی استوار است. در این روش ها، نانومواد توسط واکنش های شیمیایی یا فرآیندهای فیزیکی از طریق دستکاری در مقیاس اتمی مولکول ها تولید می شوند [9]. این رویکرد منجر به ساختارهای انتخاب شده پیچیده تری از اتم ها یا مولکول ها و کنترل بهتر اندازه، شکل و محدوده ذرات شد. این روش ها که شامل فرآیندهای آئروسل، ته نشینی، سل-ژل، و سنتز هیدروترمال می باشند، زمانبر، پیچیده و پرهزینه هستند [4]. چندین گزینه برای روش سنتز پیشنهاد شده است. در یک تحقیق اثر تغییر منبع کلسیم مورد بررسی قرار گرفت [10]. آن ها از محلول 2(NO) استفاده کردند که به آن در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد، NaOH به صورت قطرهای اضافه شد. نانوذرات به دست آمده بسیار شبیه به آن هایی

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

¹ Hot Mix Asphalt

² Hydrated Lime Filler

³ Nano Hydrated Lime

آن نیز کاهش نشان داد. همچنین نتایج به دست آمده نشان دهند افزایش سختی قیر و شاخص نفوذ (IP) آن بود که به نوبه خود منجر به افزایش چسبندگی و انسجام قیر و مخلوط آسفالتی و همچنین امکان استفاده از قیر اصلاح شده با مواد نانو در مناطق با دما و بارهای ترافیکی بالا می شود. در این مطالعه بهینه ترین درصد نانوآهک هیدراته، ۵ درصد گزارش شد. در پژوهش دیگری تأثیر نانوآهک هیدراته تهیه شده از فیلر آهک هیدراته بر رفتار رئولوژیکی قیر بررسی شد [16]. در این پژوهش از نانوآهک هیدارته با درصدهای خواص رئولوژیکی قیر با افزایش درصد نانوآهک هیدارته به دو مییابد. استفاده از نانوآهک هیدراته برای اصلاح قیر، به ویژه به مییازان ۱۰ درصد وزنی قیر) استفاده شد. نتایج نشان داد که مییازان ۱۰ درصد وزن قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی را در میزان ۱۰ درصد وزن قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی را در میزان ۱۰ درصد وزن قیر، مقاومت در برابر شیارشدگی را در میزان داد می یوزشده و پیرشده افزایش داد. همچنین مقاومت در برابر ترکهای ناشی از خستگی و حرارتی نیز بهبود یافت.

۳– روش تحقيق

روش تحقیق شامل چهار مرحله مجزا بود. ابتدا مرحله آماده سازی مواد و افزودنی ها بود که شامل استفاده از دو نوع قیر (قیرهای ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰)، فیلر آهک هیدراته و مواد شیمیایی (نیترات کلسیم، هیدروکسید سدیم و سدیم دودسیل سولفات) برای تولید نانوآهک هیدراته بود. در مرحله دوم، ارزیابی اندازه ذرات نانوآهک هیدراته تولید شده با استفاده از آزمایش های میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی، و روش دینامیکی نانوآهک هیدراته با استفاده از مخلوط کن برشی با دور بالا ترکیب شدند. مرحله نهایی شامل انجام آزمایش های تعیین خواص فیزیکی قیرهای اصلاح شده حاوی درصدهای مختلف نانوآه که هیدراته تولید شده بود. شکل (۱) فلوچارت تحقیق را نشان می دهد.

۴– مواد و افزودنیها

مشخصات فیزیکی دو نوع قیر مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. همانطور که مشاده میشود، نتایج مربوط ه در محدوده مقادیر استاندارد این قیرها قرار داشتند.

فیلر آهک هیدراته برای تبدیل به نانوذرات آهک هیدراتـه از معادن آهکی شمال شرق تهران تهیه شد. لازم به ذکر است که این تجاری به نام Triton X-100 که یک ماده فعال کننده سطحی غیر يونی است برای جلوگیری از تشکیل بلورهای Ca(OH) استفاده كردند. آنها با هدف توليد مواد در اندازه نانو، محلول هاي غليظ کلرید کلسیم (CaCl₂) و هیدروکسید سدیم (NaOH) را بکار بردند [12]. پژوهشگران گزارش کردهاند که مواد فعال کننده سطحی از تجمع نانوذرات اوليه هيدروكسيد كلسيم (Ca(OH)₂) جلوگيري میکنند که نهایتاً منجر به تولید نانوآهکهای واکنش پذیرتر شده و با سرعت بسيار بالايي كربناته مي شوند. علاوه بر اين، حضور اين مواد فرآیند سنتز را تسریع میکند. در ایـن راسـتا در پژوهشـی دیگـر بـا استفاده از مواد فعال کننده سطحی به نانوذرات صفحه مانند بـا ابعـاد شش ضلعی ۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر دست یافتند. در این تحقیق نیازی به افزودن هیدروکسید سدیم (NaCl) به صورت قطرهای هم نبود [12]. با این وجود، شستشوی مکرر با آب برای از بین بردن محصولات جانبی تولید شده و شستن خود مواد فعال کننده سطحی مورد نیاز بود. البته با پذیرش آثار سوء زیست محیطی مواد فعال کننده سطحی به عنوان یک ماده جایگزین زیست محیطی، در برخی از تحقیقات از محلول ژلاتین حاوی مقداری کلرید کلسیم استفاده و محلول هیدروکسید سدیم به صورت قطرهای در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد به محلول اضافه شد [13]. در این مطالعه یک رسوب شیری رنگ پس از سانتریفیوژ ایجاد شد که با چندین بار شست و شو با آب مقطر تا از بین رفتن باقیمانده کلرید سدیم و مواد آلمی مشکل حل شد. این پژوهش نشان داد که نهایتاً نانوآهـک هیدراتـه تولیـد شـده، دارای اندازه ذرات ۶۵۰-۶۰۰ نانومتر می باشد.

۲-۲- نقش نانو آهک هیدراته در اصلاح قیر و آسفالت

از نانومواد برای بهبود خواص رئولوژیکی قیر و افزایش ویژگیهای مکانیکی مخلوطهای آسفالتی استفاده میشود. استفاده از نانومواد در بهبود خواص چسبندگی مخلوطهای آسفالتی نیز مؤثر است [14]. استفاده از نانومواد باعث افزایش کندروانی قیر و تغییر رفتار رئولوژیکی آن در دماهای مختلف میشود [2].

در پژوهشی، امکان بهبود خواص رئولوژیکی و ویژگیهای فیزیکی قیر و عملکرد مخلوط آسفالتی با استفاده از نانوآهک هیدراته در درصدهای ۱، ۳، ۵ و ۷ نسبت به وزن قیر بررسی شد [15]. نتایج حاکی از بهبود خواص قیر با کاهش درجه نفوذ و افزایش کندروانی و نقطه نرمی آن بود. در نتیجه سخت شدن قیر، حساسیت حرارتی فیلر قبل از استفاده از الک ۲۰/۰۷۵ میلی متر عبور داده شد. مشخصات آن در جدول (۲) و تصویر میکروسکوپ الکترونی آن در شکل (۲) آورده شده است. همانطور از این تصویر مشاهده می شود، شکل ذرات شش ضلعی یا کروی هستند. مواد شیمیایی مورد استفاده برای تولید نانوآهک هیدراته به روش شیمیایی، شامل ترکیب نیترات کلسیم، هیدروکسید سدیم، دودسیل سولفات سدیم و آب مقطر بودند. مشخصات این مواد در جدول (۲) آورده شده است. همه مواد ذکر شده بالا مواد صنعتی هستند که به وفور قابل دسترس می اشند.

جدول ۱. مشخصات قیرهای مورد استفاده

| Properties | A 60/70 | A 85/100 | Test Method |
|------------------------------------------------|---------|----------|-------------|
| Penetration (100 g, 5s, 25°C), 0.1 mm | 66.4 | 96.5 | ASTM D5 |
| Softening point, °C | 49.2 | 45.9 | ASTM D36 |
| Flash point, °C | 327 | 320 | ASTM D92 |
| Specific gravity at 25°C, g/cm ³ | 1.016 | 1.013 | ASTM D70 |
| Ductility (25°C, 5cm/min), cm | 109 | 108 | ASTM D113 |
| Viscosity at 135°C, cSt | 293 | 265.8 | ASTM D2170 |





Fig. 1. Flow chart of the research

جدول ۲. مشخصات فیلر آهک هیدراته و افزودنی های شیمیایی

| Specification | Hydrated lime filler (HL) | Calcium nitrate | Sodium hydroxide | Sodium dodecyl sulfate, SDS |
|------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| pH level | 12.4 | 6-7 | 14-13 | 6-9 |
| Source | Industrial | Industrial | Industrial | Industrial |
| Melting point (°C) | - | 561 | 318 | 204-207 |
| Boiling point (°C) | - | 132 | 1388 | >150 |
| Appearance | Powder | Powder | Soda perk granule | Powder |
| Color | White | Colorless | White | Light yellowish white |
| Particle shape | Hexagonal or spherical | Cubic | Crystal sugar particle size | Spherical |
| Chemical formula | Ca(OH) ₂ | $Ca(NO_3)_2$ | NaOH | CH ₃ (CH ₂) ₁₁ SO ₄ Na |
| Molecular weight (g/mol) | 74.093 | 164.088 | 40 | 288.38 |
| Density (g/cm ³) | 2.211 | 2.504 | 2.13 | 1.1 |
| Dissolvability | Low soluble in water in the form of suspension | Water, alcohol, Solubility in water at 20°C (121.2 g/100ml) | Solubility in water at 20°C (1110 g/l) | Solubility in water at 20°C (150 gm/l) and in ethanol (9.96 g/l) |

Table 2. Specifications of the HL filler and the chemical additives

دارند، عبارتند از: سرعت چرخش دستگاه، مدت زمان آسیاب، نسبت گلوله به پودر (BPR) و استفاده از ماده کنترل کننده ی فرآیند (PCA) . کنترل و بهینه سازی پارامترها موجب بر قراری تعادل برای

شکستن پیوند مواد و اتصال دوباره آن ها در فرآیند آسیاب و نهایتاً

۵- تولید نانوآهک هیدراته

۵-۱- روش فیزیکی

فرآیند فیزیکی تولید نانومواد عموماً استفاده از آسیاب است [17]. در این پژوهش از آسیاب گلولهای سیارهای مدل "Feritsch, Pulverisette 5 Classic Line" ساخت آلمان استفاده شد. پارامترهای اصلی که در این روش بر کاهش اندازه ذرات تأثیر

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

² Process Control Agent

شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی فیلر آهک هیدراته



Fig. 2. FE-SEM image of the HL filler

سبب ایجاد ساختاری پایدار در تولید نانوماده تحت آزمایش می شود [18]. براساس مطالعات پیشین، استفاده از ایزوپروپانول نیز به نسبت ۵ درصد وزنی آهک هیدراته، به عنوان ماده کنترل کننده موجب بهبود فرآیند می شود [19 و 20]. این ماده که از خانواده الکل ها می باشد، با ایجاد دافعه بین ذرات نانوآهک هیدراته، از به هم چسبیدن مجدد آن ها به یکدیگر جلوگیری می کند. پس از آزمایش شرایط مختلف، نهایتاً استفاده از گلولههای فولادی به نسبت گلوله به پودر ۱:۵، سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه و مدت زمان آسیاب تا ۱۰ ساعت به عنوان شرایط بهینه تعیین شد. در هنگام فرآیند عملیات آسیاب، برای تعیین اندازه ذرات، هر ۲ ساعت نمونه برداری صورت گرفت. انتخاب سرعت چرخش بیش از ۲۰۰ دور در دقیقه باعث به هم چسبیدن ذرات نانوآهک هیدراته

۵-۲- روش شیمیایی

کلیات روش شیمیایی تولید نانوآهک هیدراته همانا به رسوب رسانیدن مواد شیمیایی یا مواد نمکی تشکیل دهنده نانوذرات محلول در آب است. به عبارت دیگر، سنتز شیمیایی نانوذرات، ایجاد رسوب با روش های مختلف از محلول حاوی ماده مورد نظر است. در این تحقیق تولید نانوآهک هیدراته به روش شیمیایی پس از بهینه سازی به صورت مراحل زیر بود:

۱- نیترات کلسیم با وزن ۱/۴۸ g/mol و هیدروکسید سدیم با وزن ۰/۳۶ g/mol در ۱۰۰ میلی لیتر آب مقطر در دمای محیط ۲۵°C در بالن ژوژههای به حجم ۱۵۰ میلی لیتر حل شدند.

۲- با استفاده از استوانه مدرج (با حجم ۱۰۰ میلی لیتر)، ۵۰ میلی

لیتر از محلول نیترات کلسیم در بورت شیشهای (دارای ۵۰ میلی لیتر حجم) وارد شد. در این مرحله محلول نیترات کلسیم به صورت قطرهای به محلول هیدروکسید سدیم اضافه می شد. ۳- با استفاده از استوانه مدرج، ۲۰ میلی لیتر از محلول هیدروکسید سدیم در بشر با حجم ۱۵۰ میلی لیتر وارد شد. سپس سدیم دودسیل سولفات با وزن ۲/۰ گرم، به عنوان ماده فعال کننده سطحی (سرفکتانت)، و یک ماده پایدار کننده به وزن مولکولی بسطحی (سرفکتانت)، و یک ماده پایدار کننده به وزن مولکولی بسطحی اسرفکتانت)، و یک ماده پایدار کننده به وزن مولکولی بسطحی بشر، محلول به صورت همگن و بی رنگ تهیه شد.

۴- محلول نیترات کلسیم در بورت مدرج دارای حجم ۵۰ میلی لیتر، روی محلول هیدروکسید سدیم و سدیم دو دسیل سولفات به صورت قطره قطره و به آرامی ریخته شد. با این کار نانوذرات تشکیل شدند که با به هم زدن آرام بشر، رنگ محلول از شفاف و بی رنگ به حالت معلق و کدر تغییر کرد. در پایان با حل شدن نیترات کلسیم (Ca(NO₃)₂) در آب و اضافه شدن هیدروکسید سدیم، نانوپلیتهای آهک هیدراته تولید شد. فرمول شیمیایی روش فوق به صورت معادله زیر گزارش شده است [21].

(1)

 $Ca(NO_3)_2 \times 4H_2O + NaOH \rightarrow Ca(OH)_2 + 2NaNO_3 + 4 H_2O$

۶- آزمایشات تعیین اندازه نانو ذرات

چندین روش برای تعیین میانگین اندازه ذرات نانومواد وجود دارد که از آن جمله می توان به روش های آزمایش پر تو اشعه ایکس (XRD)^۱، و آزمایش پراکندگی دینامیکی نور (LJD^۲ اشاره نمود. برای تعیین اندازه نانوذرات، ترکیبی از حداقل دو روش، که یکی از آنها روش میکروسکوپی می باشد، توصیه شده است [22]. پس در این تحقیق علاوه بر روش پراکندگی دینامیکی نور، اندازه ذرات با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FE-SEM)^۳ نیز تعیین شد. برای اندازه گیری ذرات با آزمایش های میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی و طیف سنج فلوئورسانس اشعه ایکس (XRF)^{*}، باید نمونه به صورت پودر یا جامد تهیه شود. پس

[[] Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

¹ X-Ray Diffraction (XRD) ² Dynamic Light Scattering (DLS)

³ Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

⁴ X-Ray Fluorescence (XRF)

نمونهها به مدت حدود ۷۲ ساعت روی صفحهای تخت نگهـداری شدند تا خشک شوند. جزئیات اندازه گیریهای انجام شده به شرح زیر است.

۴–۱– پراکندگی دینامیکی نور

این آزمایش یک روش فیزیکی است که برای تعیین توزیع اندازه ذرات در محلولها و مواد معلق (سوسپانسیون) بکار می رود. آزمایش پراکندگی دینامیکی نور یک روش غیر مخرب و سریع برای تعیین اندازه ذرات در محدوده از چند نانومتر تا چند میکرون است. از مزایای استفاده از این روش می توان به زمان کوتاه آزمون، هزینه نسبتاً کم انجام آن، و عدم نیاز به انجام مراحل پیچیده و دشوار آماده سازی نمونه ها اشاره نمود [23]. برای تهیه نمونه آزمایش، پودر نانوآهک هیدراته که به روش فیزیکی تولید شده می شود و پس از همگن سازی به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک در معرض امواج فراصوت قرار گرفته و اندازه ذرات توسط میکروسکوپ دستگاه اندازه گیری می شود.

۶–۲– میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی

با استفاده از روش های میکروسکوپی، تصاویری با بزرگ نمایی بسیار بالا از ماده بدست می آید. یکی از این روش ها، اسکن میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۱ است. در این نوع میکروسکوپ، الکترون به سطح نمونه تابیده شده و منعکس می شود. سپس توسط سنسور دستگاه شناسایی^۲ شده و به فوتون نوری تبدیل شده، تا تصویر مرئی ایجاد شود. این نوع میکروسکوپ فقط از ساختار سطحی تصویر می دهد [24]. مهمترین تفاوت دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبش میدانی مهمترین تفاوت دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبش میدانی می باشد. در SEM از لامپ تنگستنی و در FE-SEM از تفنگ الکترونی گسیل میدانی استفاده می شود که به تبع آن سایر بخش ها از جمله لنزها برای عملکرد بهتر با تفنگ الکترونیکی سازگار شده اند. در نتیجه، در وضوح تصویر ایجاد شده با این بالاتر بوده و امکان بزرگنمایی بیشتر نیز فراهم می شود. در بالاتر بوده و امکان بزرگنمایی بیشتر نیز فراهم می شود. در

عمل، در FE-SEM به دلیل آثار بار کمتر در مقایسه با SEM، در برخی از نمونه های عایق، نیاز به استفاده از پوشش نمونه با رسانا نیست [25].

۶-۳- آزمایشات XRD و XRF

از آزمایشات طیف سنجی پراش اشعه ایکس (XRD) و فلورسانس اشعه ایکس (XRF) نیز برای تعیین ترکیب و درصد عناصر نانوآهک هیدراته تولید شده استفاده شد. آزمایش پراش اشعه ایکس یک روش غیرمخرب است و نیاز به نمونه سازی خاصي ندارد [26]. اين روش اطلاعـات جـامعي دربـاره تركيبـات شیمیایی و ساختار کریستالی مواد معدنی و صنعتی ارائـه مـیدهـد. هر ساختار کریستالی، الگوی اشعه X منحصر به فرد خود را دارد که مانند اثر انگشت می باشد و می توان با مراجعه به جدول های مربوطـه، مـاده مجهـول را شناسـایی کـرد. روش XRF روشـی غیرمخرب است که با آن میتوان ترکیب عناصر موجود در ماده را از نظر کیفی و کمی شناسایی نمود. اصول کار با دستگاه XRF، مانند دستگاه XRD، بر پایه تابش اشعه ایکس است. در ایـن روش اشعه ی ایکس به نمونه برخورد کرده و حاصل آن جدا شدن الكترون لايه داخلي و ايجاد چاله الكتروني است [27]. لازم به ذكر است که هر کدام از عناصر دارای یک تابش فلوئورسانس خاص میباشند که به عنوان اثر انگشت آن عنصر شناخته شده و منحصر به فرد است. در آزمایش XRF برای به دست آوردن مواد باقیمانده پس از سوختن (L.O.I)["]، نمونههای مورد آزمایش به مدت یک ساعت در کوره با دمای °۹۵۰ قرار گرفتند.

۷- آزمایشات تعیین خواص قیر

شرایط اختلاط قیرهای منتخب با نانومواد (شامل دما و مدت زمان اختلاط) بر اساس بررسیهای انجام شده در تحقیقات قبلی انتخاب شدند [7، 8 و 16]. نانوآهک هیدراته و قیر با استفاده از مخلوط کن با دور برشی زیاد (HSM)^۴ با سرعت چرخش ۵۲۰۰ دور در دقیقه، و در دمای ۲۰۰° به مدت ۴۰ دقیقه مخلوط شدند.

۷–۱– آزمایشات فیزیکی قیر

پس از اختلاط قیر و نانوآهک هیدراته آزمایش های استاندارد

 $[\]frac{1}{2}$ Scanning Electron Microscope (SEM)

² Detector

³ Loss On Ignition ⁴ High Shear Mixe

⁴ High Shear Mixer (HSM).

قیـر روی ترکیـب قیـر و نانواَهـک هیدراتـه، شـامل درجـه نفـوذ (ASTM D5) و نقطـه نرمـی (ASTM D36) انجـام و پـارامتر شاخص نفوذ (PI)^۱ تعیین شد.

۷-۲- آزمایش ویسکومتر چرخشی

آزمایش ویسکومتر چرخشی (RV)^۲ طبق استاندارد ASTM D4402، در حال حاضر به عنوان کاربردی ترین ابزار برای تعیین ویسکوزیته قیر در دمای اختلاط کارخانه در نظر گرفته می شود. عملکرد ویسکومتر چرخشی شامل دوران تیغه های عمودی است که با سرعت ۲۰ دور در دقیقه در داخل یک استوانه ثابت نمونه قیر را می چرخاند. نیروی لازم برای این چرخش به عنوان ویسکوزیته چرخشی یا ویسکوزیته دورانی تعیین می شود.

۷–۳– آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR)⁷ بر اساس استانداردهای AASHTO-TP5 و AASHTO-TP5 برای تعیین خواص رئولوژیکی قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده با نانوآهک هیدراته (NHL) انجام شده است. مدول برشی پیچیده (48)³, زاویه فاز (δ)⁶ و پارامتر شیارشدگی (G*/sinδ)⁵ در بالا مورد بررسی قرار گرفتند.

٨- نتايج و تحليل

نتایج بدست آمده از آزمایشات بر حسب روش تولیـد و نـوع آزمایش انجام شده، به شرح موارد زیر است.

۸-۱-۱ اندازه گیری ذرات نانو آهک هیدراته

اندازه گیری ذرات نانو آهک هیدراته بر حسب روش تولید آن تا اندازهای متفاوت بود که بر حسب نوع روش تولید در زیر شرح داده شده است.

الف) روش فیزیکی

در جدول (۳) میانگین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته بر حسب زمانهای مختلف آسیاب آورده شده است. این نتایج مربوط بـه دو

- ² Rotational Viscometer (RV)
- ³ Dynamic Shear Rheometer (DSR)
- ⁴ Complex Modulus (G^{*})
- ⁵ Phase Angle (δ)
- ⁶ Rutting parameter (G*/sinδ)

روش اندازه گیری FE-SEM (۶ نمونه) و DL (۲۴ نمونه) است. بر اساس تصاویر میکروسکوپی و تحلیل آن ها با نرمافزار Digimizer توزیع میانگین اندازه نانوذرات نیز تعیین که نتایج آن در شکل (۳) مشاهده میشود. اندازه هیدرودینامیکی نانوذرات با آزمایش DLS در مقایسه با اندازههای بدست آمده از تصاویر FE-SEM در تمامی نمونه ها بزرگتر بود. با استفاده از روش های میکروسکوپی اندازه دقیق تری از قطر نانوذرات بدست میآید. همان گونه که مشاهده میشود، در هر دو روش، کوچکترین میانگین اندازه ذرات در نمونه هایی که به مدت ۶ ساعت آسیاب شدند، در روش های DLS آسیاب، میانگین اندازه ذرات به علت افزایش انرژی سطحی و جذب ذرات توسط یکدیگر، افزایش یافته و پس از ۱۰ ساعت به ترتیب در روش های فوق اندازه ها به ترتیب ۲۸۷ و ۱۴۴ نانومتر بودند.

جدول ۳. میانگین اندازهی ذرات نانو آهک هیدراته پس از زمانهای مختلف آسیاب

| Average particle size of nano hydrated lime (nanometers) | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|---------|---------------------|-----|-----|-----|--------|--|
| Test type | Before | Milling Time (hour) | | | | | |
| Test type | Milling | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | |
| DLS^* | 794 | 433 | 307 | 211 | 274 | 287 | |
| FE-SEM ^{**} | 206 | 185 | 166 | 114 | 138 | 144 | |
| The total number of 30 samples (24^* DLS samples and | | | | | | es and | |
| samples 6 ^{**} FE-SEM samples) | | | | | | | |

 Table 3. Average NHL particle size after different milling times

شکل ۳. توزیع میانگین اندازهی ذرات نانوآهک هیدراته

پس از زمانهای مختلف آسیاب





| میانگین انـدازه ذرات تغییـر قابـل تـوجهی بعـد از ۱۰ سـاعت |
|---------------------------------------------------------------|
| آسیاب (در مقایسه با ۸ ساعت) از خود نشان ندادند. دلیل این امـر |
| می تواند به این موضوع نسبت داده شـود کـه ذرات ریـز نانو آهـک |

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2025-08-01

¹ Penetration Index (PI)

احمد سندس محمد، امير كاووسى، مهرداد منطقيان

هیدراته در حین آسیاب، پدیده جوش سرد یا بهم چسبندگی ذرات را تجربه می کنند. با ادامه آسیاب نمونه، انرژی سطحی و جذب ذرات توسط یکدیگر افزایش یافته و پس از ۱۰ ساعت در روش های اندازه گیری فوق به ترتیب ۲۸۷ و ۱۹۴ نانومتر اندازه گیری شد. در شکل (۴) تصاویر FE-SEM نانوآهک هیدراته پس از زمان های مختلف آسیاب نیز آورده شده است. همان گونه که مشاهده می شود گرچه در اثر افزایش زمان آسیاب اندازه ذرات ریزتر می شود، اما میزان بهم چسبندگی ذرات ریز نیز بیشتر می شود. در مقایسه با کارهای قبلی [6]، اندازه نانو آهک اه هیدراته تولید شده به روش فیزیکی حدود ۲۸ درصد کاهش یافت.

شکل ۴. تصاویر **FE-SEM** اندازهی ذرات نانوآهک هیدراته پس از زمانهای مختلف آسیاب



Fig. 4. FE-SEM images of the NHL particle sizes at different milling times

. نانوذرات آهک هیدراته در اندازهها و وزنهای مختلف (۰/۱ و ۱/۰۱) از وزن مواد اصلی تمامی ترکیبات (مـواد شـیمیایی) مـورد

ب) روش شيميايي

بررسی قرار گرفت که جزئیات کامل آنها در جدول (۴) آورده شده است. نمودار تغییرات ذرات نانو بر حسب غلظتهای مختلف محلول نیترات کلسیم در شکل (۵) آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود با افزایش غلظت محلول نیترات کلسیم اضافه شده به محلولهای هیدروکسید سدیم و SDS تا ۳ میلی لیتر، میانگین اندازه ذرات کاهش و پس از آن افزایش نشان می دهد. کوچکترین اندازه ذرات محلول ₂(NO) مولفات سدیم SDS (ماده پایدار کننده) تا حد ۲/۰ گرم، میانگین اندازه ذرات کاهش یافته و پس از آن اندازه ذرات کاهش یافته و پس از آن افزایش می یافت.

شکل ۵. نتایج DLS توزیع اندازهی ذرات نانوآهک هیدراته تولید شده به روش



Fig. 5. DLS results of particle size distribution of chemically produced NHL

در نمونه های دیگر برای تولید نانوذرات از روش کم شدن غلظت تمامی مواد شیمیایی اصلی تا ۱/۰ وزن مواد اصلی و ۰/۰۱ وزن مواد افزودنی بررسی شد. نمونه نانومواد محلول با حل شدن نیترات کلسیم در ۲۰ میلی لیتر محلول هیدروکسید سدیم و۲/۰ گرم SDS تهیه شد. همان گونه که ملاحظه می شود با افزایش غلظت محلول نیترات کلسیم (2(Ca(NO₃)) اضافه شده به محلول هیدروکسید سدیم (NaOH) در مقادیر به ترتیب ۲۲/۵ و ۵۰ میلی لیتر از محلول هیدروکسید سدیم و SDS میانگین اندازه ذرات تا مقادیر بین ۴۱۷ و ۴۸۰ نانومتر کاهش و پس از آن افزایش می یافت.

شکل ۶. نمونهای از تصویر FE-SEM ذرات نانوآهک هیدراته تولید شده به

روش شيميايي



Fig. 6. FE-SEM image of chemically produced NHL particles اما مقدار و غلظت محلول 2(NO₃)2 در مقایسه با روش اصلی خیلی بیشتر بود. نتیجه آن که کاهش وزن مولکولی نانوذرات با کاهش 2(NO₃)2 ارتباط مستقیم دارد. نمونه ای از تصویر میکروسکوپی FE-SEM در شکل (۶) آورده است. در این شکل

قطر و ضخامت ذرات نانوآهک هیدراته نیز آورده شده است. این نتایج با استفاده از نرمافزار Digimizer تعیین شده است. در خصوص اندازه نانوذرات بهینه (در غلظت ۳ میلی متر محلول نیترات کلسیم) در روش شیمیایی تولید شده، میانگین قطر اندازه ذرات ۱۲۴/۶۱ نانومتر و با ضخامت ۸/۸۵ نانومتر تعیین شد. نتایج آزمایش ZDL در مقایسه با نتایج تصاویر ME-SEM در تمامی نمونه ها بزرگتر بود. همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود ذرات سنتز شده در شرایط بهینه به شکل صفحهای می باشند. بیشتر این ذرات دارای مورفولوژی هگزاگونال و دارای ضخامت بسیار در حدود ۵۰ تا ۱۴۰ نانومتر است. اندازه گیری تعداد زیادی از آنها نشان داد که اندازه ضخامت متوسط این ذرات در حدود ۵/۸۶ نانومتر است. در مقایسه به کارهای گذشته [21]، اندازه نانوذرات نشان داد که اندازه ضرفامت متوسط این در مادور کاهش نورت است. در مقایسه به کارهای گذشته [21]، اندازه نانوذرات آهک هیدراته تولید شده به روش شیمیایی حدود ۲۷ درصد کاهش یافت.

جدول ۴. میانگین اندازه ذرات نانوآهک هیدراته در غلظتهای مختلف محلول نیترات کلسیم

| Sample | NHL particle sizes (nm) pro | oduced fi | rom Ca(l | $NO_3)_2$ at | nd NaO | H apply | ving ch | emical | metho | 1 |
|----------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------|--------------|--------|---------|---------|--------|-------|------|
| Einst attempt | Sadium Dadaaril Sulfata SDS (a) | Calcium Nitrate Ca(NO ₃) ₂ used (ml) | | | | | l (ml) | | | |
| First attempt | Sodiuli Dodecyl Sullate SDS (g) | 0.40 | 0.60 | 1.0 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 4.0 | 4.20 | 5.0 |
| 1 | 0.10 | | | 630 | 577 | 490 | 411 | 493 | 984 | 1607 |
| 2 | 0.20 SDS+H ₂ O | 6002 | 11065 | 983 | 6058 | 6134 | | | | |
| Second attempt | $\frac{\text{Ca(NO}_3)_2 \text{ (ml)}}{\text{SDS (g)}}$ | 0.50 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | |
| 3 | 0.4 | 12834 | 6023 | 3478 | 1674 | 1837 | 943 | 965 | 1322 | |
| 4 | 0.3 | | | 630 | 598 | 489 | 452 | 546 | | |
| 5* | 0.2 | | | 558 | 423 | 387 | 379 | 452 | 480 | |
| 6 | 0.15 | | | 605 | 552 | 540 | 397 | 517 | | |
| Third attampt | $Ca(NO_3)_2$ (ml) | attempt (0.1) from the weight of $(Ca(NO_3)_2)$ and $(NaOH)$ | | | | |) | | | |
| Third attempt | SDS (g) | 21.5 | 22.0 | 22.5 | 23.0 | 23.5 | | | | |
| 7 | 0.2 | 2224 | 494 | 417 | 432 | 593 | | | | |
| Fourth attempt | $Ca(NO_3)_2$ (ml) | attempt (0.01) from the weight of $(Ca(NO_3)_2)$ and $(NaOH)$ | | | | | | | | |
| | SDS (g) | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | | | | |
| 8 | 0.2 | 1261 | 715 | 480 | 551 | 947 | | | | |
| The t | otal number of samples | | | | | 45 | | | | |

Table 4. Average NHL particle size in different concentrations of Ca(NO₃)₂

۸-۲- نتایج آزمایش XRD

تا ۱۰۰ درصد می رسند که هر دو قلیایی بوده و ترکیب خوبی با مواد اسیدی دارند. بر اساس نتایج شکل (۸) نمونه تولید شده به روش فیزیکی، حاوی هیچگونه اکسید سیلیکات کلسیم Ca₃SiO₅ نبود. اما همان طورکه در شکل (۹) ملاحظه می شود، گوگرد، فسفات یا تری اکسید گوگرد و مواد نامطلوب دیگری با مقادیر کم در ترکیب نانوآهک هیدراته تولید شده به روش شیمیایی وجود دارند.

نتایج آزمون XRD در شکلهای (۷ تا ۹) ارائه شده است. نتایج شکل (۷) حاکی از آن است که مواد معدنی اصلی فیلر آهک هیدراته مورد استفاده در تحقیق برای تولید نانوآهک هیدراته در روش فیزیکی عبارتند از مقادیر زیادی هیدروکسید سدیم(Ca(OH))، کربنات کلسیم (CaCO3) و مقدار کمی اکسید سیلیکات کلسیم (Ca3SiO5). این دو ماده اصلی در برخی زوایا

شکل ۸. نتایج تحلیل XRD نانوآهک هیدراته (فرایند فیزیکی)



Fig. 8. XRD analysis of the composition of physically produced NHL

این نتایج حاکی از وجود مقادیر زیاد آهک (CaO) در فیلر آهک هیدراته (به میزان ۷۵٪) بود. مقادیر این ماده در نانوآهک هیدراته (CaOH₂) تولید شده به روش فیزیکی حدود ۷۴٪ بود. اما نسبت به نانوآهک هیدراته تولید شده به روش شیمیایی، حدود ۶۳٪ بود. بیشتر بودن آهک در ترکیب نانوآهک هیدراته سبب بهبود خواص عملکردی قیر اصلاح شده با این نانومواد می شود. همچنین نتایج جدول (۵) نشان می دهد که درصد گوگرد (S) و مواد نامرغوب در ترکیب نانوآهک هیدراته تولید شده به روش شیمیایی بیشتر از مواد متناظر در نانوآهک هیدراته تولید شده به روش فیزیکی است. افت وزنی مواد و عناصر در روش شیمیایی نیز بیشتر از روش فیزیکی است.



۸-۳- نتایج آزمایش XRF

نتایج تحلیل آزمایش XRF در جدول (۵) آورده شده است.

| Composition | | HL NHL produced by physical me | | od NHL produced by chemical method | | |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------|--------|---------------------------------------|--|--|
| Calcium Oxi | de (CaO) | 74.896 | 73.716 | 63.120 | | |
| Silicon Dioxi | de (SiO ₂) | 0.537 | 0.640 | 0.342 | | |
| Aluminum Oxi | de (Al2O ₃) | 0.175 | 0.216 | - | | |
| Hematite (| Fe2O ₃) | 0.205 | 0.217 | 0.328 | | |
| Magnesium Ox | tide (MgO) | 0.431 | 0.424 | 0.309 | | |
| Sodium Oxid | $e(Na_2O)$ | 0.017 | 0.022 | 2.765 | | |
| Manganese Ox | ide (MnO) | 0.036 | - | 0.023 | | |
| Zr (zircoi | nium) | 0.003 | - | - | | |
| Phosphate | (P_2O_5) | 0.101 | 0.118 | 0.024 | | |
| Potassium Ox | ide (K_2O) | - | 0.088 | - | | |
| Titanium Diox | ide (TiO ₂) | - | - | 0.018 | | |
| Sulfur Trioxi | $de(SO_3)$ | 0.046 | 0.052 | 0.061 | | |
| Sulfur | (S) | - | - | 0.732 | | |
| Chlorine | (Cl) | 0.017 | 0.018 | - | | |
| Strontiun | n (Sr) | 0.016 | 0.017 | 0.006 | | |
| Pb (Plum | bum) | - | - | 0.015 | | |
| Cerium | (Ce) | - | - | 0.004 | | |
| Vanadiur | n (V) | - | - | 0.003 | | |
| Zinc (Z | Zn) | - | 0.005 | - | | |
| Nickel | (Ni) | - | 0.007 | - | | |
| Weight percentage of | heat loss (L.O.I) | 23.52 | 24.46 | 32.25 | | |

جدول ٥. نتايج تحليل XRF فيلر آهكي و نانو آهك هيدراته

Table 5. Results of XRF analysis of the HL filler and NHL

۸–۴– خواص فیزیکی قیر اصلاح شده با نانو آهک هیدراته

نمونه های حاوی قیرهای خالص ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ و قیرهای اصلاح شده با مقادیر ۲، ۴ و ۶ درصد نانوآهک هیدراته که به دو روش فیزیکی و شیمیایی تهیه شده بودند، تحت آزمایشات استاندارد قیرهای خالص قرار گرفتند. نتایج آزمایشات درجه نفوذ، نقطه نرمی و شاخص نفوذ (IP) در شکل های (۱۰ تا ۱۲) آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد نانومواد، نقطه نرمی قیر افزایش یافته و موجب بهبود شاخص نفوذ قیر می شود. اما درجه نفوذ قیر کاهش مییابد. در نتیجه، قیر اصلاح شده با نانومواد سخت تر شده و نسبت به قیر خالص افزودن ۴ درصد نانوآهک هیدراته در روش فیزیکی حاصل شد که درجه نفوذ قیر دمقایسه با روش شیمیایی کمتر و از نظر نقطه نرمی بیشتر بود. همچنین نتایج نشان داد که قیر ۲۰/۹

۸-۵- رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با نانوآهک هیدراته

الف) نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی

نمونه های حاوی قیر های خالص ۶۰/۷۰ و ۸۵/۱۰۰ و قیر های اصلاح شده با مقادیر ۲، ۴، و ۶ درصد نانوآهک هیدراته (NHL) که به دو روش فیزیکی و شیمیایی تهیه شده بودند، در آزمایش ویسکوزیته دورانی در سه دمای مختلف ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ درجه سانتیگراد مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج در شکل های (۱۳ و ۱۴) گزارش شده است. این نتایج حاکی از آن است که ويسكوزيته قيرها با افزايش درصد NHL افزايش مي يافت. در نتیجه، قیرهای اصلاح شده با NHL سفت تر شدند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش دما، ویسکوزیته قیرهای خالص و قیرهای اصلاح شده کاهش می یابد. از این رو می توان نتیجه گرفت که افزودن NHL به عنوان یک اصلاح کننده در بهبود خواص قیر مفید است. علاوه بر این، دماهای اختلاط و تراکم مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با NHL افزایش مییافت (شکل ۱۴). با افزودن ۴ درصد NHL نتيجه بهينه به دست آمـد. بـا ايـن درصد در دمای C°۱۳۵۵، ویسکوزیته برای قیر ۶۰/۷۰ حدود ۳۳ درصد و برای قیر ۸۵/۱۰۰ حدود ۲۰ درصد افزایش یافت.

افزایش ویسکوزیته در روش شیمیایی به ترتیب حـدود ۱۸ و ۱۶ درصد بود. در نتیجه روش فیزیکی نسبت به روش شیمیایی نتایج بهتری را به دست داده است.

شکل ۱۰. نتایج درجه نفوذ قیرهای خالص و اصلاح شده با نانوآهک هیدراته تولید شده به روشهای فیزیکی و شیمی**ایی**



Fig. 10. Penetration of of the virgin and the NHL-modified bitumen in physical and chemical methods

شکل ۱۱. نتایج نقطه نرمی قیرهای خالص و اصلاح شده با نانوآهک هیدراته تولید شده به روشهای فیزیکی و شیمیایی



Fig 11. Softening point of the virgin and the NHL-modified bitumen in physical and chemical methods

شکل ۱۲. نتایج شاخص درجه نفوذ (PI) قیرهای خالص و اصلاح شده با

نانوآهک هیدراته تولید شده به روشهای فیزیکی وشیمیایی





قیرهای اصلاح شده با NHL به دو روش فیزیکی و شیمیایی تولید شده، در دمای ۶۴^۰°C برای قیر ۶۰/۷۰ به ترتیب فیزیکی و شیمیایی ۲/۳۷۱ و ۱/۵۹ کیلو پاسکال و برای قیر ۸۵/۱۰۰ مقادیر ۱/۴۸۱ و ۱/۳۹۳ کیلو پاسکال بود.

نتایج شکل (۱۶) حاکی از آن است که زوایه فاز (δ) با افزایش دما افزایش مییافت. این پارامتر با افزایش درصد NHL کاهش مییافت. زاویه فاز قیر ویژگیهای آن را با توجه به خواص کشسانی و ویسکوزیته قیر نشان میدهد. رفتار ویسکوالاستیک قیرهای اصلاح شده با NHL با افزایش مقدار NHL افزوده میشد. با افزایش مقدار از این حد بهینه، رفتار با دما به شدت تغییر کرده و خواص کشسانی قیر کاهش مییافت. بهترین نتیجه در سطح ۴ درصد JHL تولید شده به روش فیزیکی به دست آمد. با این درصد در دمای ⁶۶٬۶۰ زاویه فاز ۸۷/۷ درجه برای قیر ۴۰/۰۶ زاویه فاز ۹۲/۸ درجه و برای قیر ۱۰۰/۵۰ این زاویه ۱۸۲۸ درجه بود. بیشترین کاهش در مقدار δ با افزودن ۴ درصد MHL بود.

پارامتر شیارشدگی (G*/sinδ) در دماهای بالا شکل (۱۷)، با افزایش دما کاهش می یافت. مقادیر پارامتر G*/sinδ برای قیرهای اصلاح شده در درصد بهینه NHL (یعنی ۴ درصد) به دو روش فیزیکی و شیمیایی تولید تعیین شدند. در دمای C°۶۴ پارامتر شیارشدگی، برای قیر ۶۰/۷۰ به ترتیب برای روش های فیزیکی و شیمیایی ۲/۴۲۶ و ۱۹/۱ کیلو پاسکال و برای قیر ۱/۵۰۰ به ترتیب ۱/۵۰۱ و ۱/۴۰۸ کیلو پاسکال بود. با این درصد در دمای ۲۴۵۰ ، پارامتر شیارشدگی برای قیر ۶۰/۷۰ حدود ۹۰ درصد و پارای قیر ۱/۵۰۰ حدود ۵۴ درصد افزایش یافت. افزایش این پارامتر در روش شیمیایی به ترتیب حدود ۶۶ و ۱۷ درصد بود. استفاده از قیر ۶۰/۷۰ اصلاح شده با NHL به روش تولید فیزیکی مقاومت بیشتری در برابر شیارشدگی نشان داد. مقادیر G*/sin منخصات ASTM D7175 بود.

۹- نتیجه گیری

بر اساس بکارگیری دو روش فیزیکی و شیمیایی بـرای تولیـد نانوآهـک هیدراتـه و تحلیـل نتـایج آزمایشـات انجـام شـده، نتیجهگیریهای زیر حاصل شد: شکل ۱۳. نتایج ویسکوزیته چرخشی (RV) قیرهای خالص و اصلاح شده با NHL تولید شده به روشهای فیزیکی و شیمیایی



Fig. 13. Rotational viscosity (RV) results of the virgin and the NHL-modified bitumen in physical and chemical methods

شکل ۱۴ آثار نانوآهک هیدراته NHL تولید شده به روشهای فیزیکی و

شیمیایی بر دمای اختلاط و تراکم



Fig. 14. The effects of NHL on mixing and compaction temperatures

ب) نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی

روی نمونههای حاوی قیرهای خالص ۶۰/۰۹ و ۸۵/۱۰۰ و قیرهای اصلاح شده با مقادیر ۲، ۴، و ۶ درصد NHL که به دو روش فیزیکی و شیمیایی تهیه شده بودند، آزمایش DSR در دماهای ۸۵، ۵ ۶۴ و ۷۰ درجه سانتیگراد روی قیر ۶۰/۰۹ و در دماهای ۵۲، ۵۸ و ۶۴ درجه سانتیگراد روی قیر ۸۵/۱۰۰ انجام شد. نتایج در شکل های ۱۵ تا ۱۷) آورده شده است. در شکل (۱۵) نتایج آزمایش مدول برشی پیچیده نشان داد که با افزایش دما، *G کاهش و با افزایش اندازه ذرات کوچک، در مقایسه با فیلرها، ویسکوزیته قیرها را اندازه ذرات کوچک، در مقایسه با فیلرها، ویسکوزیته قیرها را منجر به تغییرات منفی در رفتار رئولوژیکی قیرها می شود. همان طور که مشاهده شد درصد بهینه NHL، ۴ درصد بود. مقادیر مدول *G







Fig. 15. Results of complex shear modulus (G*) of the virgin and the NHL-modified bitumen in physical and chemical methods

شکل ۱۶. نتایج زاویه فاز (δ) قیرهای خالص و اصلاح شده با NHL تولید شده به روشهای فیزیکی و شیمیایی





شکل ۱۷. نتایج پارامتر شیارشدگی (G*/sinδ) قیرهای خالص و اصلاح شده



- **Fig. 17**. The results of the rutting parameter (G*/sinδ) of the virgin and the NHL-modified bitumen in physical and chemical methods
- ۱- نانو ذرات تولید شده به روش شیمیایی به صورت نانو محلول
 و از نوع نانوپلیت بودند. این محصول دارای سطح مخصوص
 زیاد و ضخامت ذرات خیلی کوچک بود. در مقایسه، روش

فیزیکی تولید نانوذرات به صورت پودری و با شکلهای کروی یا شـش ضـلعی و بـا قطـر انـدازه ذرات کـوچکتر از ذرات نانوپلیتهای روش شیمیایی بودند.

- ۲- روش فیزیکی تولید با استفاده از فرآیند آسیاب گلولهای سیارهای که به صورت پودری بود، به دلیل مزایایی مانند زمان تولید کمتر، سهولت و کنترل اندازه ذرات، مناسب تر از روش شیمیایی تشخیص داده شد. با استفاده از این روش در شرایط فرآوری بهینه (زمان آسیاب ۶ ساعت و افزودن PCA ایزو پروپانول با وزن ۵ درصد فیلر آهک هیدراته، سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه و نسبت گلوله به پودر ۱۵۰)، ذرات به اندازه های میانگین ۲۱۱ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۴ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۴ نانومتر با آزمون Log و ۱۱۶ نانومتر با آزمون Log وش در شرای به اندازه نانو در دقیقه و نسبت گلوله به پودر ۱۰۵)، ذرات به اندازه های میانگین ۲۱۱ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۴ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۴ نانومتر با آزمون Log و ۱۱۶ نانومتر با آزمون Log و ۱۱۶ نانومتر با آزمون Log و ۱۱۶ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۶ نانومتر با آزمون SLG و ۱۱۶ نانومتر با آزمون Log و ۱۱۶ نانومتر Log و ۱۱۶ نانومتر Log و ۱۱۶ نانومتر Log و ۱۱۶ و ۱۱۶ نانومتر Log و ۱۱۶ و ۱۱۶ و ۱۱۶ نانومتر Log و ۱۱۶ و
- ۳- از طریق فرآیند شیمیایی، نانوآهک هیدراته با افزودن ۳ میلی لیتر محلول 2(NO₃) به محلول حاوی "۲۰ میلی لیتر لیتر محلول ۲۰/۰ گرم SDS" به صورت ذرات صفخه ای یا نانو پلیتی (با میانگین ضخامت ۶۸/۵ نانومتر در پلیتها) تولید شد. میانگین اندازه ذرات در آزمون SLG، ۳۷۹ نانومتر؛ و در آزمون میانگین اندازه ذرات در آزمون SDS، ۳۷۹ نانومتر؛ و در آزمون میوان ماده فعال کننده سطحی (سورفکتانت) برای جلوگیری از تجمع نانوذرات مفید بود. در مقایسه به کارهای گذشته، اندازه نانوذرات آهک هیدراته تولید شده به روش شیمیایی حدود ۲۷ درصد کاهش یافت.
- ۴- نتایج آزمونهای XRD و XRF حاکی از آن بود که ذرات تولید شده در فرآیند فیزیکی، حاوی مقادیر آهک بیشتری در مقایسه با فرآیند شیمیایی بود.
- ۵- از بررسی خواص فیزیکی قیر اصلاح شده با نانوآه کهای تولید شده مشخص شد که با افزودن ۴ درصد ماده تولید شده به روش فیزیکی بهترین نتیجه حاصل شد. با افزایش نسبت نانوآهک هیدراته، درجه نفوذ قیر کاهش و نقطه نرمی آن افزایش می یافت.
- ۶- نتایج آزمایش ویسکوزیته دورانی (RV) نشان داد که
 ویسکوزیته در دمای ۱۳۵ درجه سانتیگراد با بکارگیری ۴
 درصد NHL ، برای قیر ۶۰/۷۰ حدود ۳۳ درصد و برای قیر

فیزیکی در برابر شیارشدگی مقاوم تر شدند. با این درصد در دمای ۲۰۴۵ ، پارامتر شیارشدگی برای قیر ۶۰/۷۰ حدود ۷۰ درصد و برای قیر ۸۵/۱۰۰ حدود ۵۴ درصد افزایش یافت. افزایش این پارامتر در روش شیمیایی به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۷ درصد بود. ۸- با استفاده از قیر ۶۰/۷۰ در مقایسه با قیر ۸۵/۱۰۰ منایج بهتری از ترکیب قیر و نانوآهک هیدراته حاصل می شد. این نتایج هنگام استفاده از نانوآهک تولید شده به روش فیزیکی بیشتر بود.

References

- Kreyling, W.G., Semmler-Behnke, M. and Chaudhry, Q., 2010. A complementary definition of nanomaterial. *Nano today*, 5(3), pp.165-168. doi: 10.1016/j.nantod.2010.03.004.
- [2] Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z. and Huang, J., 2017. Developments of nano materials and technologies on asphalt materials–A review. *Construction and Building Materials*, 143, pp.633-648. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158.
- [3] Baglioni, P., Chelazzi, D. and Giorgi, R., 2014. Nanotechnologies in the conservation of cultural heritage: a compendium of materials and techniques. Springer.
- [4] Nentwich, A., 2011. Production of nanoparticles and nanomaterials. *Planet-Austria. At*, *6*, pp.1-4. http://planet-austria.at/0xc1aa500d_0x002544e3.pdf.
- [5] Trotta, F. and Mele, A. eds., 2019. *Nanosponges: synthesis and applications*. John Wiley & Sons.
- [6] Shen, J., Huang, B., Shu, X. and Tang, B., 2011. Size effect of sub nano-scaled hydrated lime on selected properties of HMA. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), p.252-257.
- [7] Kavussi, A. and Barghabany, P., 2016. Investigating fatigue behavior of nanoclay and nano hydrated lime modified bitumen using LAS test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), pp. 1–7. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001376.
- [8] Razavi, S.H. and Kavussi, A., 2020. The role of nanomaterials in reducing moisture damage of asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 239, p.117827. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117827.
- [9] Dornfeld, D.A. ed., 2012. *Green manufacturing: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media. doi: 10.1007/978-1-4419-6016-0.
- [10] Samanta, A., Chanda, D.K., Das, P.S., Ghosh, J., Mukhopadhyay, A.K. and Dey, A., 2016. Synthesis of nano calcium hydroxide in aqueous medium. *Journal* of the American Ceramic Society, 99(3), pp.787-795. doi: 10.1111/jace.14023.

۸۵/۱۰۰ حدود ۲۰ درصد به روش تولید فیزیکی بهبود یافت که نسبت به روش شیمیایی بهتر بود، و به ترتیب حدود ۱۸ و ۱۶ درصد بود. دماهای اختلاط و تراکم مخلوطهای آسفالتی اصلاح شده با NHL افزایش پیدا کرد. ۷- بررسی خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با NHL تولید شده به دو روش با آزمایش محاول نشان داد که رفتار ویسکوالاستیک قیر با افزایش مدول برشی پیچیده، موجب افزایش پارامتر شیارشدگی Sinδ چیمه زاویه فاز δ شد. قیرها به ویژه با استفاده از ۴ درصد NHL تولید شده به روش

- [11] Chelazzi, D., Poggi, G., Jaidar, Y., Toccafondi, N., Giorgi, R. and Baglioni, P., 2013. Hydroxide nanoparticles for cultural heritage: Consolidation and protection of wall paintings and carbonate materials. *Journal of colloid and interface science*, 392, pp.42-49. doi: 10.1016/j.jcis.2012.09.069.
- [12] Daniele, V. and Taglieri, G., 2012. Synthesis of Ca (OH) 2 nanoparticles with the addition of Triton X-100. Protective treatments on natural stones: Preliminary results. *Journal of Cultural Heritage*, 13(1), pp.40-46. doi: 10.1016/j.culher.2011.05.007.
- [13] Darroudi, M., Bagherpour, M., Hosseini, H.A. and Ebrahimi, M., 2016. Biopolymer-assisted green synthesis and characterization of calcium hydroxide nanoparticles. *Ceramics International*, 42(3), pp.3816-3819. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.11.045.
- [14] Fang, C., Yu, R., Liu, S. and Li, Y., 2013. Nanomaterials applied in asphalt modification: a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(7), pp.589-594. doi: 10.1016/j.jmst.2013.04.008.
- [15] Mahan, H.M., 2021, August. Investigation of Possible Improving of Bitumen Properties Using Nano-Materials. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1).
- [16] Azarhoosh, A. and Hamedi, G.H., 2019. Investigation of the rheological behavior and properties of modified asphalt binder with nano hydrated lime. *AUT Journal of Civil Engineering*, *3*(2), pp.187-192.
- [17] Tashan, E., Karakucuk, A. and Celebi, N., 2019. Optimization and in vitro evaluation of ziprasidone nanosuspensions produced by a top-down approach. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 52, pp.37-45. doi: 10.1016/j.jddst.2019.04.024.
- [18] Pilar, M., Sunol, J.J., Bonastre, J. and Escoda, L., 2007. Influence of process control agents in the development of a metastable Fe–Zr based alloy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 353(8-10), pp.848-850. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2006.12.054.
- [19] Shao, H.P., Wang, Z., Lin, T., Ye, Q. and Guo, Z.M., 2018. Preparation of TiAl alloy powder by high-

energy ball milling and diffusion reaction at low temperature. *Rare Metals*, *37*, pp.21-25. doi: 10.1007/s12598-015-0466-9.

- [20] Attar, H., Prashanth, K.G., Zhang, L.C., Calin, M., Okulov, I.V., Scudino, S., Yang, C. and Eckert, J., 2015. Effect of powder particle shape on the properties of in situ Ti–TiB composite materials produced by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(10), pp.1001-1005. doi: 10.1016/j.jmst.2015.08.007.
- [21] Mousavi, G. and Sarraf-Mamoory, R., 2016. Determination of Optimized Conditions for Precipitation Synthesis of Calcium Hydroxide Nanoparticles Using Central Composite Design Method (CCD). *Iranian Journal of Ceramic Science* & Engineering, 4(4), pp.1-10.
- [22] Gaumet, M., Vargas, A., Gurny, R. and Delie, F., 2008. Nanoparticles for drug delivery: the need for precision in reporting particle size parameters. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics*, 69(1), pp.1-9. doi: 10.1016/j.ejpb.2007.08.001.
- [23] Falke, S. and Betzel, C., 2019. Dynamic light scattering (DLS) principles, perspectives, applications

to biological samples. *Radiation in bioanalysis: Spectroscopic techniques and theoretical methods*, pp.173-193.

- [24] Inkson, B.J., 2016. Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In *Materials characterization using nondestructive evaluation* (*NDE*) methods (pp. 17-43). Woodhead publishing
- [25] Brodusch, N., Demers, H. and Gauvin, R., 2017. *Field emission* scanning electron microscopy: New perspectives for materials characterization. Springer.
- [26] Ali, A., Chiang, Y.W. and Santos, R.M., 2022. X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. *Minerals*, 12(2), p.205. doi: 10.3390/min12020205.
- [27] Ribeiro, B.T., Silva, S.H.G., Silva, E.A. and Guilherme, L.R.G., 2017. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. *Ciência e Agrotecnologia*, 41, pp.245-254. www.editora.ufla.br%7Cwww.scielo.br/cagrohttp://dx .doi.org/10.1590/1413-70542017413000117.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Sundus Mohammed, A., Kavussi, A. and Manteghian, M., 2025. Evaluation of the effects of nano hydrated lime production method on physical properties of asphalt binders. *Modares Civil Engineering journal*, 25(2), pp.35-51.

DOI: 10.22034/25.2.35