

Research Paper

مقاله پژوهشی

A Laboratory Study of the Effect of ZnO Nanooxide and CuO Nanooxide on the Rutting Resistance and Absorption of Pollutants in Porous Asphalt in Urban Surface Runoff

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر نانو اکسید روی و نانو اکسید مس بر مقاومت شیارشدگی و جذب آلاینده‌گی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری

Ramtin Sobhkhiz Fomani^{1*}, Taher Rajaei² and Esmail Fatehifar³

رامتین صبح خیز فومنی^{۱*}، طاهر رجایی^۲ و اسماعیل فاتحی‌فر^۳

1- Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

2- Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

۲- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

3- Professor, Environmental Engineering Department, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran.

۳- استاد گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران.

* Corresponding Author, Email: r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir

* نویسنده مسئول، ایمیل: r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir

Received: 02/11/2022

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱

Revised: 02/12/2022

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۱/۰۹/۱۱

Accepted: 27/12/2022

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶

© IWWA

© انجمن آب و فاضلاب ایران

Abstract

چکیده

The use of porous asphalt has been the subject of many inventions and innovations during the last decade. The most obvious characteristics of this asphalt is its drainage ability, which is due to the presence of a high percentage of empty space and pores and connections between these pores. Therefore, it is very important to pay attention to environmental issues such as the reduction of pollutants in porous environments such as asphalt, and therefore the purpose of the research is to investigate the effect of different concentrations of nanomaterials such as nano copper oxide (CuO) and nano zinc oxide (ZnO) on resistance and absorption. The pollutant was in porous asphalt. In this study, durable porous asphalt pavement with the ability to absorb pollutants from water was introduced, and it was built for dynamic creep testing in the asphalt laboratory, and the state of pollutants was investigated in the chemical laboratory. The results of the dynamic creep test showed that the addition of CuO nano oxide to the porous asphalt mixtures significantly increased the bearing capacity and Mental Number (FN), which was useful for rutting resistance. The FN values of porous asphalt mixtures increased by an average of 15% in all loads, and in all loads, asphalt samples modified with 6% copper nano oxide had higher FN values, but insignificant changes were observed in asphalt samples containing ZnO nano oxide. Also, the comparison of the qualitative results regarding the effectiveness of zinc oxide and copper nanomaterials in reducing pollution showed that zinc oxide (ZnO) had the role of reducing pollution in all qualitative parameters, and the biggest reduction was in phosphate, TSS and sulfate. Finally, in the mechanical test section, the asphalt sample containing copper nanooxide with a concentration of 6%, and in the environmental section, the asphalt sample containing zinc nanooxide with a concentration of 8% had the best performance.

استفاده از آسفالت متخلخل در طول دهه گذشته موضوع بسیاری از ابداعات و نوآوری‌ها بوده است. بارزترین خصوصیات این آسفالت، قابلیت زهکشی آن است که به دلیل وجود درصد بالایی از فضای خالی و تخلخل‌ها و ارتباطات بین این تخلخل‌ها صورت می‌گیرد. لذا توجه به مسائل محیط‌زیستی نظیر کاهش آلاینده‌های موجود در محیط‌های متخلخل نظیر آسفالت از اهمیت زیادی برخوردار است و لذا هدف پژوهش بررسی تاثیر درصد غلظت مختلف نانوموادهایی نظیر نانو اکسید مس (CuO) و نانو اکسید روی (ZnO) بر مقاومت و جذب آلاینده در آسفالت متخلخل بوده است. در این مطالعه روسازی آسفالتی متخلخل با دوام و با قابلیت جذب آلاینده‌ها از آب معرفی و برای آزمایش خزش دینامیکی در آزمایشگاه آسفالت ساخته شد و بررسی وضعیت آلاینده‌ها در آزمایشگاه شیمی انجام شد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که افزودن نانو اکسید CuO به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و عدد روانی (FN) شد که برای مقاومت در برابر شیارشدگی مفید بود. مقادیر FN مخلوط‌های آسفالتی متخلخل در تمام بارها به‌طور متوسط ۱۵ درصد افزایش یافته و در کل بارها، نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با نانو ۶ درصد نانو اکسید مس دارای مقادیر FN بالاتری بود. اما در نمونه‌های آسفالتی حاوی نانو اکسید ZnO تغییرات ناچیزی مشاهده شد. هم‌چنین مقایسه نتایج کیفی در خصوص نقش نانو مواد اکسید روی و مس در کاهش آلاینده‌گی نشان داد که نانو اکسید روی (ZnO) در تمامی پارامترهای کیفی نقش کاهنده آلاینده را به‌عهده داشته که بیشترین کاهش در فسفات، TSS و سولفات بوده است. در نهایت در بخش آزمایش مکانیکی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید مس با غلظت ۶٪ و در بخش محیط‌زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید روی با غلظت ۸٪ بهترین عملکرد داشتند.

Keywords: Porous Asphalt, Resistance, Pollutant Absorber, Zno Nano Oxide, Cuo Nano Oxide.

کلمات کلیدی: آسفالت متخلخل، خزش دینامیکی، جذب آلاینده، نانو اکسید روی، نانو اکسید مس.

از حوزه در هنگام بارندگی و با زمان خشک، نتیجه‌گیری شد که مواد جامد معلق، فلزات سنگین دارای غلظت بیشتری در هنگام بارندگی در مقایسه با حالت خشک دارند. با مقایسه بار آلودگی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۷، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تغییرات فلزات سنگین در دو دوره با هم مشابه است. بارهای جامدات معلق، اکسیژن‌خواهی شیمیایی و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی در سرتاسر ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ بالاتر بودند. تفاوت‌های موجود در این پارامترها را می‌توان به مشخصات رویداد بارش، به‌طور عمده دوره هوای خشک قبل از هر بارندگی نسبت داد.

Thomas et al. (2008) حذف فلزات سنگین از آسفالت متخلخل را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که آسفالت متخلخل، پتانسیل بالایی در حذف روی و مس دارد. هم‌چنین نتایج نشان داد که به ترتیب ۹۲ و ۹۳ درصد روی و مس حذف شده و این روسازی توانسته نیترات و فسفات را به میزان ۲۷ درصد حذف نماید.

Klenzedrof et al. (2012) مزایای کیفیت آب و روش اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی را به‌طور خاص برای دوره اصطکاک نفوذپذیری (PFC) بررسی کردند. PFC لایه‌ای از آسفالت متخلخل است که از ۲/۵ تا ۵ سانتی‌متر ضخامت دارد و به‌عنوان روکش در جاده‌های معمولی غیرقابل نفوذ قرار می‌گیرد. مطالعات تحقیقاتی نشان داد که میزان کل مواد معلق و فلزات کل در رواناب‌های سطوح PFC در مقایسه با رواناب‌های آسفالت معمولی کاهش یافته است. استفاده از آسفالت متخلخل در یک محیط شهری نه تنها شرایط رانندگی را بهبود بخشید، بلکه به کاهش تأثیرات سوء شهرنشینی بر کیفیت سطح آب و سطح زیرزمینی نیز کمک کرد.

Roseen et al. (2012) عملکرد یک سیستم مدیریت آب طوفان روسازی متخلخل در مناطق ساحلی را بررسی کردند که در آن ۶ ماه دمای انجماد معمولاً رخ می‌داد. استفاده از روسازی‌های متخلخل برای مدیریت آب - طوفان در آب و هوای شمالی چالش‌های بسیاری دارد که بیشتر آن‌ها مربوط به سرمای شدید و نفوذ قابل توجه یخ‌بندان در محیط متخلخل است. سیستم روسازی متخلخل برای عملکرد هیدرولیکی و کیفیت آب از سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ هیدرولوژیکی مشاهده شده، شبیه به زهکشی عمق کم آب زیرزمینی است. از طرفی عملکرد تصفیه با کیفیت آب استثنایی برای هیدروکربن‌های نفتی، روی و کل جامدات معلق با تقریباً هر مقدار کم‌تر از حد تشخیص وجود داشت و تنها حذف متوسط برای فسفر مشاهده شد و نیترات منفی بود.

امروزه با رشد روز افزون جمعیت و افزایش آلودگی آب و هوا و همین‌طور نیاز به منابع آب قابل استفاده، موضوع تصفیه آب مورد توجه همگانی قرار گرفته است. با توجه به صرف هزینه و زمان زیاد، محققان درصدد آن هستند که روش‌های جایگزین و کارآمد را ابداع و مورد استفاده قرار دهند. بهبود در عملکرد بخش‌های مختلف صنعتی که به‌شدت با پیشرفت در نانو تکنولوژی در ارتباط است، کارایی برخی مواد خاص را به‌طور قابل توجهی افزایش داده است، به‌همین دلیل برای بازدهی بیشتر از نانو مواد استفاده می‌شود (Wang et al., 2017). از آنجایی‌که نزولات آبی یا بارندگی‌ها منشأ اصلی حیات کلیه موجودات زنده محسوب می‌شوند، اما بعضی موارد این نزولات به تدریج باعث از بین رفتن اکوسیستم خشکی‌ها و دریاها از جمله جنگل‌ها و موجودات آبی شده و تنوع زیستی کاهش می‌یابد. علت این امر اضافه شدن بیش از حد مواد آلاینده از جمله مواد آلی فرار از دودکش نیروگاه‌ها، کارخانجات صنعتی و آگزوز خودروها، مواد آلی فرار (VOC) و فلزات سنگین است. اسیدهای موجود در آب باران عمدتاً اسید سولفوریک و اسید نیتریک هستند (نیک نژاد، ۱۳۹۲). از طرفی امروزه علاوه بر مشکلات تکنیکی و فنی راه‌ها و جاده، نگرانی‌های شدید در رابطه با مسائل محیط‌زیستی منجر به تعریف و ساخت مصالح جدید با کیفیت بالا می‌شود. با توجه به وجود آلاینده‌ها در رواناب‌های سطحی که ریشه در بارندگی‌های اسیدی دارند، محققان دریافته‌اند که در مناطق توسعه‌یافته این رواناب‌های آلوده می‌توانند ذخایر آب‌های زیرزمینی و دریاچه‌های شیرین را آلوده کنند که برای انسان مضر است. از طرفی آسفالت متخلخل اگرچه مزیت‌های فراوانی در رابطه با ایمنی جاده‌ها و زهکشی آب دارد اما به دلیل دوام کم و عمر کوتاه‌تر نسبت به دیگر مخلوط‌های آسفالتی متداول، کمتر مورد توجه متصدیان راه برای روسازی راه‌های با ترافیک سنگین قرار می‌گیرد (نیک نژاد، ۱۳۹۲).

پروین‌نیا و همکاران (۱۳۸۷) مشخصات کیفی رواناب در شهر شیراز مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نمونه‌هایی از رواناب از سه زیرحوزه شهری بزرگ، متوسط و کوچک در این شهر بررسی شد. نتایج نشان داد که بسیاری از آلاینده‌های رواناب جذب مواد معلق می‌شوند و غلظت مواد معلق در رواناب شهری بالاتر از حد مجاز تخلیه به آب‌های سطحی است. هم‌چنین بالاترین مقدار فلزات سنگین در رواناب شهری شیراز آهن و روی بوده است.

Kafi et al. (2007) تغییرات غلظت رواناب‌های شهری در پاریس را در ۶ حوزه بررسی کردند. از مقایسه آلاینده‌های خروجی

را با قیر عیار ۶۰/۷۰ بررسی کرد. نتایج نشان داد که آسفالت آستر^۲ اصلاح شده با نانومواد تیتانیوم بالاترین درصد بهبود را از نظر خواص شیمیایی و خواص مورفولوژیکی آن انجام می دهد. علاوه بر این، خواص حجمی نیز با افزودن نانو تیتانیوم به طور قابل توجهی بهبود یافته و افزودن آن توانست خواص کلی قیر را افزایش دهد.

با توجه به اهمیت بررسی مسائل محیط زیستی نظیر کاهش آلاینده های موجود در محیط های متخلخل نظیر آسفالت و همچنین مطالعات محدود در زمینه تاثیر نانومواد بر خصوصیت هم زمان کمی و کیفی موجود، هدف از این تحقیق بررسی تاثیر درصد غلظت های مختلف نانومواد موجود در بازار نظیر نانو اکسید مس و نانو اکسید روی بر وضعیت مقاومت و جاذب آلاینده در آسفالت متخلخل است.

۲- مواد و روش ها

در این بخش با معرفی مصالح مصرفی و مشخصات آنها شامل مصالح سنگی و دانه بندی آن، قیر، نانومواد و طرح اختلاط مخلوط آسفالتی؛ آزمایش های عملکردی و آزمایش های محیط زیستی در رابطه با درصد جذب آلاینده ها در مخلوط آسفالتی متخلخل مورد بررسی قرار می گیرد. اولین گام در طرح اختلاط، انتخاب مصالح مناسب برای مخلوط های متخلخل است. مصالح سنگی، قیر و اصلاح کننده هایی مانند پلیمر و نانومواد و افزودنی در طراحی آسفالت متخلخل به کار گرفته می شوند.

مصالح سنگی درشت دانه و ریز مصرفی در آسفالت متخلخل باید سخت، محکم، بادوام، تمیز و مکعبی شکل و صددرد صددرصد شکسته و با خصوصیات کیفی یکنواخت بوده و عاری از هرگونه ذرات رس و لای و شستگی و پوشش حاکی باشد. مصالح سنگی مصرفی در این تحقیق از جنس آهکی بود. جدول ۱ مشخصات مصالح مصرفی را نشان می دهد.

در این تحقیق از طرح دانه بندی آیین نامه مالزی^۳ طبق شکل ۱ استفاده شد. علت انتخاب این دانه بندی، آن است که در بسیاری از مقالات از آن استفاده شده و درصد فضای خالی این طرح حداقل ۱۹ درصد در نظر گرفته شد. این نوع دانه بندی تقریباً شبیه دانه بندی شماره ۱ آیین نامه روسازی متخلخل بود. همچنین دانه بندی این طرح دارای سنگدانه های بین ۰ تا ۱۹ میلی متر بود. در خصوص قیر مصرفی نیز در مخلوط آسفالتی متخلخل از قیر خالص ۶۰/۷۰ (قیر شل با درجه نفوذ ۶ تا ۷ میلی متر) و ۸۵/۱۰۰ (قیر سنگین با درجه نفوذ ۸/۵ تا ۱۰ میلی متر) می توان

(Lopes Afonso et al. (2017) عملکرد مخلوط های روسازی متخلخل را با افزودن الیاف سلولزی ارزیابی کردند که به خاطر ظرفیت چسبندگی آنها بین سنگدانه ها و چسب مورد توجه بوده است. این امر به جلوگیری از حذف چسبندگی حاصل از زهکشی کمک می کرد، که یکی از مشکلات اصلی آسفالت متخلخل است، زیرا مقدار مصالح ریز کاهش می یابد. در مقایسه با آسفالت متخلخل معمولی، افزودن الیاف سلولزی باعث بهبود عملکرد تغییر شکل دائمی می شود.

(Sabmito et al. (2021) در پژوهش خود، روش های تجزیه و تحلیل عملکرد هیدرولوژیکی و محیطی سیستم های روسازی متخلخل نظیر آسفالت متخلخل در زمینه زهکشی شهری را با توجه به دوام آنها بررسی کردند. هدف آنها ارائه مروری بر مطالعات دهه گذشته در این زمینه بود. شواهد حاصل از دانش مبتنی بر این سند، تفسیرهای انتقادی مفیدی از مطالعات موجود برای پیشرفت درک فعلی در مورد عملکرد هیدرولوژیکی و تأثیرات محیطی از نظر کارایی معمول حذف آلاینده ها و سیستم های روسازی نفوذ پذیر کنونی ارائه داد.

(Shafabakhsh et al. (2021) خواص فوتوکاتالیستی نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید مس در آسفالت را به منظور جذب مواد آلاینده از جو بررسی کردند. ترکیب فوق با نور UV و اکسید کننده و ذرات آلاینده از جمله اکسیدهای نیتروژن و همچنین ترکیبات آلی فرار را اکسید می کند. نتایج آزمایش ها نشان داد که افزودن اصلاح کننده نانو اکسید تیتانیوم و نانو اکسید مس به طور موثر ذرات اکسیدهای نیتروژن را از هوا حذف و خواص رئولوژیکی قیر را افزایش می دهد. همچنین نتایج حاصل از پاشش نانومواد به عنوان یک پوشش مبتنی بر آب، بیانگر کاهش ۴۱-۶۳٪ اکسیدهای نیتروژن بود.

(Kamboozia et al. (2022) بررسی آزمایشگاهی اثر نانو اکسید روی بر مقاومت شکست و شیار مخلوط آسفالت متخلخل در شرایط خستگی و چرخه یخ-ذوب را انجام دادند. این مطالعه با هدف ارزیابی رفتار شیاردار و ترک خوردگی در دمای متوسط مخلوط های آسفالتی اصلاح شده بر شرایط خستگی آزمایشگاهی و انجماد انجام شد. نتایج حاکی از تاثیر منفی بر چرخه خستگی و مقاومت ترک خوردگی مخلوط بود. علاوه بر این، افزودن نانو اکسید روی، عملکرد مخلوط های آسفالتی را در برابر تغییر شکل دائمی و ترک خوردگی بهبود بخشید.

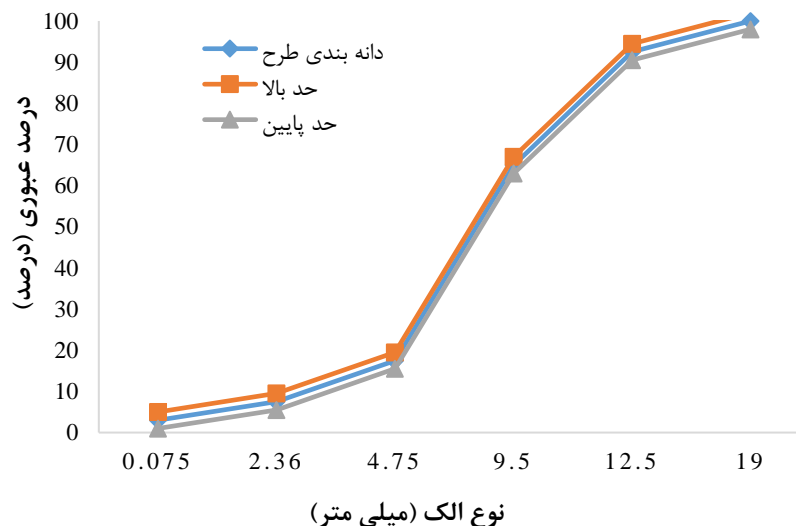
(Masri et al. (2022) تاثیر نانو تیتانیوم را به عنوان اصلاح کننده قیر در آسفالت متخلخل ماستیک سنگی بررسی کردند. این مطالعه تأثیر چسب و مخلوط اصلاح شده نانو تیتانیوم

کاربرد مرسوم در صنعت روسازی و مقالات معتبر (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰) از قیر خالص ۶۰/۷۰ استفاده شد.

فقط برای راه‌های با ترافیک کم و متوسط استفاده نمود. اما در راه‌های با ترافیک زیاد، این نوع قیرها باید به صورت اصلاح شده با افزودنی‌های مختلف استفاده شود. لذا در این تحقیق، با توجه به

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی

مشخصه	واحد	استاندارد	محدوده مجاز	بزرگ‌دانه (بزرگ‌تر از ۴/۷۴ میلی‌متر)	ریزدانه (کوچک‌تر از ۴/۷۴ میلی‌متر)
سایش لس آنجلس	درصد	AASHTOD96	> ۳۰	۱۸	-
صاف و کشیده		ASTM D4791	> ۲۰	۸	-
تخت و کشیده		ASTM D4791	> ۵	۰/۸	-
جذب		AASHTO T85	> ۲	۱۲	-
سولفات سدیم		AASHTO T104	> ۱۵	۰/۲	۱
محدودیت روانی		AASHTO T89	> ۲۵	-	۱۸
شاخص پلاستیسیته		AASHTO T90	NP	-	NP
سایش لس آنجلس		AASHTOD96	> ۳۰	۱۸	-



شکل ۱- دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش

۱-۲ - ساخت نمونه

یکی از شناخته‌شده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های ساخت آسفالت، روش مارشال است که نخستین بار توسط مهندسی به نام بروس مارشال ارائه شد. هدف این روش پیدا کردن رابطه بین تراکم و درصد قیر و مقاومت فشاری است. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۲۵ سانتی‌متر انجام می‌شود و عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته شده با چکش ۴/۵ کیلوگرمی و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد. (Li et al., 2017) بنابراین با توجه به این که روش مارشال از روش‌های متداول برای تست مقاومت آسفالت است، لذا در طرح اختلاط آسفالت متخلخل از روش مارشال استفاده شد. در این تحقیق، ۹ نمونه آسفالت متخلخل که شامل یک نمونه آسفالت متخلخل بدون نانومواد به عنوان شاهد به همراه

با توجه به این که در مطالعات گذشته (Tanzadeh et al., 2021; Anand et al., 2017; موسوی‌راد و همکاران، ۱۴۰۰) به طور معمول درصد نانومواد در مخلوط آسفالتی ۱ تا ۸ درصد از قیر استفاده شده است، در این تحقیق نیز درصد نانومواد به صورت ۰/۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و ۰/۱۰ مدنظر قرار گرفت. هم‌چنین از انواع نانومواد اکسید روی (ZnO) و مس (CuO) استفاده شد، به طوری که هر کدام در ۴ نمونه آسفالت متخلخل، در درصدهای مختلف ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ قیر بهینه به آن اضافه شد. از طرفی آسفالت متخلخل به دلیل دارا بودن میزان کم مصالح ریزدانه نسبت به درشت‌دانه، بیشتر در معرض پدیده فرونشست قیر خواهد بود. در این تحقیق، از الیاف سلولوزی از نوع تاپسل استفاده شد. با توجه به آیین‌نامه راه و ترابری ایران، میزان مصرف این نوع الیاف در مخلوط آسفالتی باید برابر با ۰/۳٪ وزن کل مخلوط باشد.

در قیر، حلال باید دارای ویسکوزیته کم در دمای اتاق باشد (Badroodi et al., 2020). در این تحقیق از یک دستگاه همزن با دور بالا با دور چرخش تا ۵۰۰۰ rpm و همچنین از کروزن به عنوان حلال استفاده شد. از طرفی اختلاط قیر به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ۴۰۰۰ rpm و سپس برای تسریع در تبخیر شدن حلال کروزن با مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۲۰۰۰ rpm انجام شد. در نهایت، ظرف قیر اصلاح شده برای خنک شدن سریع قیر و جلوگیری از ته نشینی نانو ذرات، در حمام آب سرد (۲۰ درجه) قرار گرفت.

۳- تحلیل نتایج

در این بخش ابتدا وضعیت تخلخل و مقاومت نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسیدهای روی و مس بررسی می شود. سپس نمودارهای کیفی مربوط به تاثیر غلظت نانو اکسیدهای روی و مس بر کاهش آلاینده‌گی پارامترهای محیط‌زیستی نیترات، سولفات، جامد معلق، کل مواد جامد معلق در آب، مجموع مواد آلی و غیر آلی در محلول آب، فسفات، سرب، روی ارائه می شود. در انتها کاهش آلاینده‌گی دو نانو اکسید اشاره مقایسه می شود. همچنین لازم به ذکر است که ساخت و آزمایش مقاومتی آسفالت در آزمایشگاه آژماگستر پی و آزمایش‌های محیط‌زیستی در آزمایشگاه پیرایه‌زیست کاسپین در شهرستان رشت انجام شده است.

۳-۱- نتایج آزمایش خزش دینامیکی از عملکرد آسفالت

در این تحقیق برای آزمایش خزش دینامیکی از دستگاه UTM استفاده شد که تحت بارگذاری نیمه سینوسی با تکرار ۰/۵ هرتز و براساس استاندارد AS 2891-12 Australian code انجام شد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب پاسخ‌های مربوط به بار ترکیبات و عدد روانی (FN) مخلوط‌های آسفالتی متخلخل با نانو ذرات اکسید مس و روی را نشان می دهند. از شکل ۴ استنباط می شود که افزودن نانو اکسید مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل معمولی باعث شده است که مقدار FN آن‌ها به طور متوسط ۱۵٪ در کل بارگذاری‌ها افزایش یابد. این روند در درصد‌های بالاتر نانومواد بیشتر نمایان می شود، اما با افزودن نانو اکسید مس مقدار حدود ۳٪ ناچیز بود. این امر به دلیل بهبود قابلیت تحمل بار مخلوط‌های آسفالتی متخلخل اصلاح شده با نانوذرات مس رخ داد، زیرا مخلوط‌های اصلاح شده، نیاز به تحمل سیکل‌های بیشتری از تغییر شکل نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمولی دارند.

۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانومواد مس در درصد‌های مختلف و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانومواد روی در درصد‌های مختلف ساخته شد. با فرض درصد قیر بهینه ۶/۴٪ (موسوی و همکاران، ۱۴۰۰)، نمونه‌های آزمایش‌های عملکردی توسط دستگاه مارشال ساخته شدند. هم‌چنین وزن نمونه‌ها برابر با ۱۲۰۰ گرم بود. شکل ۲ کوبیدن مخلوط آسفالتی متخلخل در روش مارشال و جدول ۲ طرح اختلاط آسفالت متخلخل را نشان می دهند.



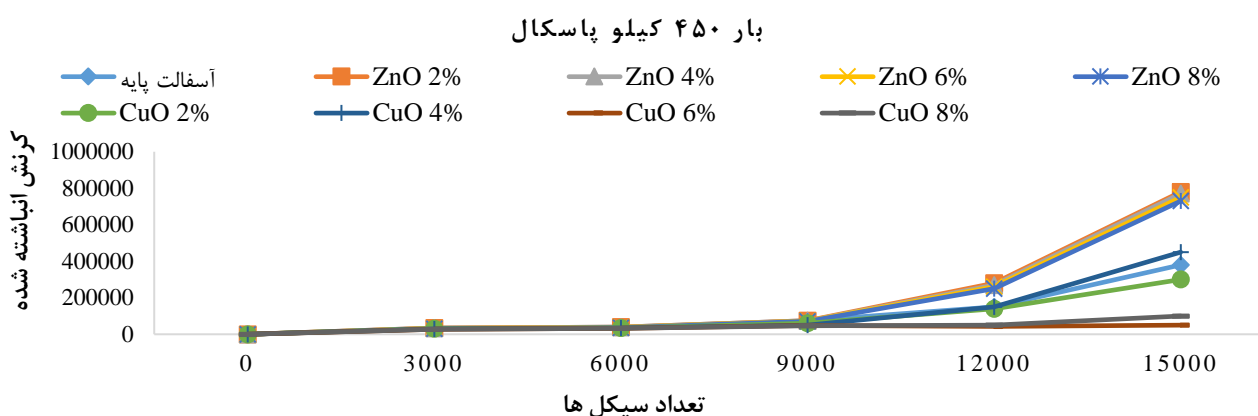
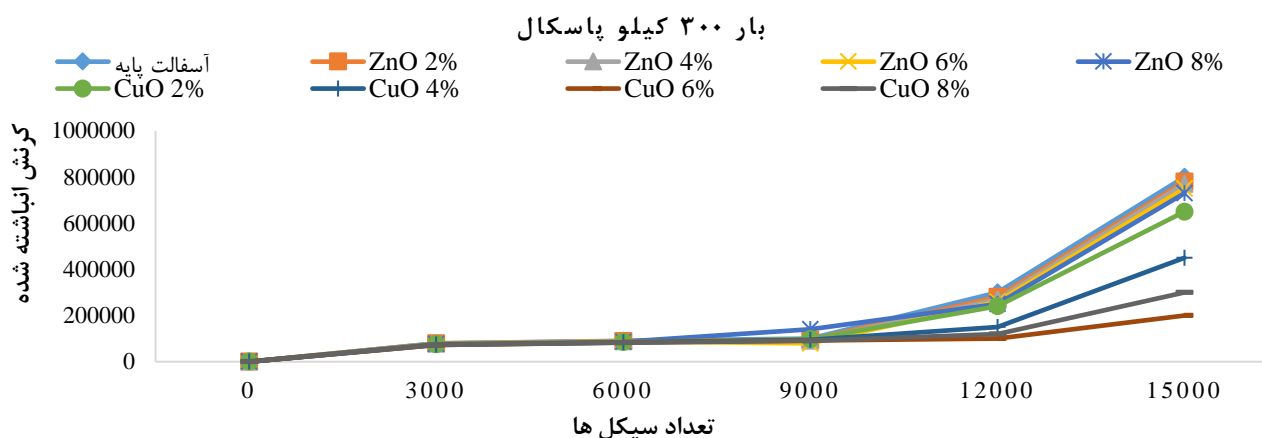
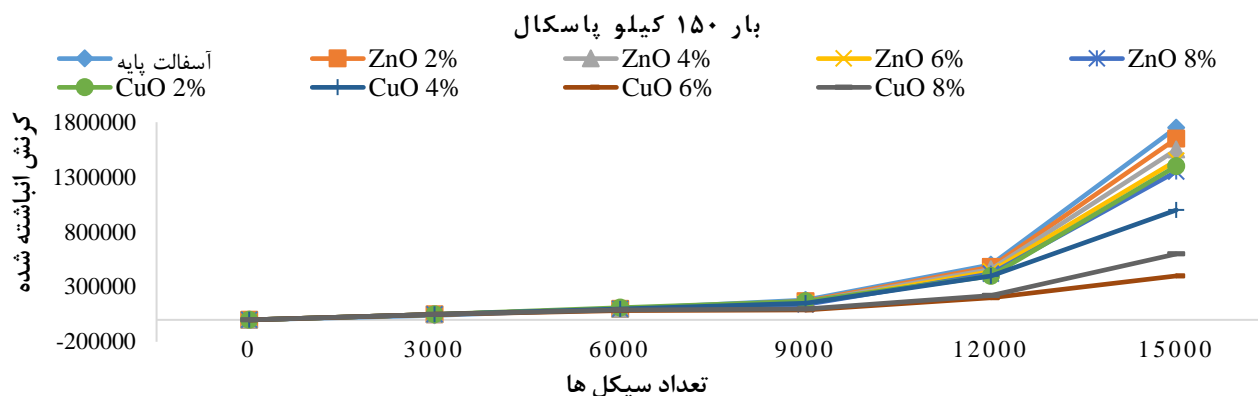
شکل ۲- کوبیدن مخلوط آسفالتی متخلخل به روش مارشال

جدول ۲- طرح اختلاط مخلوط آسفالتی متخلخل استوانه‌ای

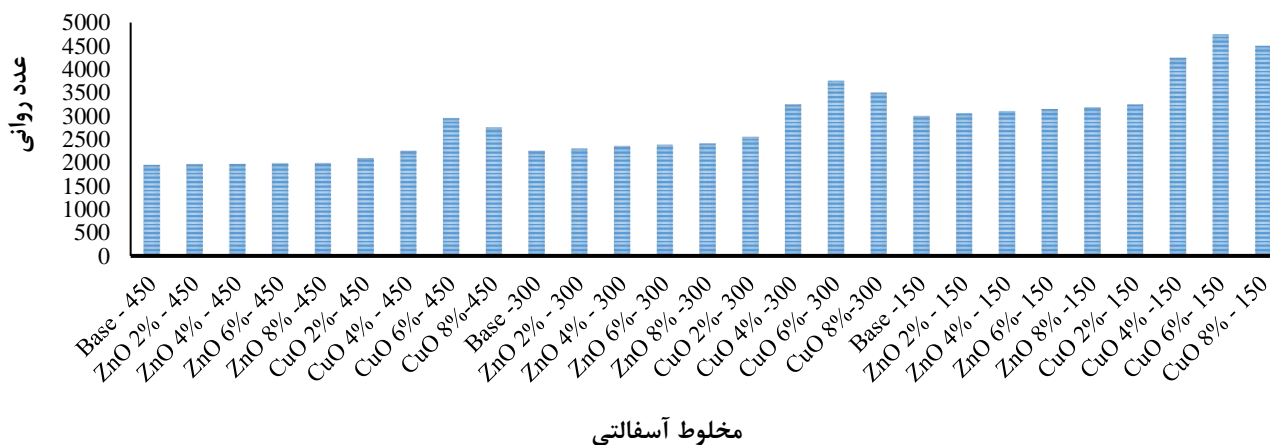
مشخصات	شرح
۵۰	تعداد ضربه نمونه مارشال
حداقل ۲۰	درصد فضای خالی
حداقل ۰/۳	درصد ریزش قیر
حداکثر ۲۵	درصد افت وزنی
حداقل ۸۰	نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم

۲-۲- اختلاط نانو مواد با قیر

اختلاط نانو ذرات با قیر باید توسط یک دستگاه همزن با دور چرخش بالا، حداقل ۲۰۰۰ rpm انجام شود. مدت زمان و دمای اختلاط مهم‌ترین موارد قابل توجه در بحث اختلاط نانوذرات در چسبندگی قیری است. بسیاری از تحقیقات نشان داده‌اند که دمای قیر در هنگام اختلاط نانومواد باید بین ۱۳۰ تا ۱۵۵ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان اختلاط باید بین ۳۰ تا ۴۰ دقیقه باشد (Badroodi et al., 2020). هم‌چنین برای اختلاط همگن نانوذرات در قیر از یک حلال استفاده می کنند که این حلال باید قابلیت نانو مواد در دمای پایین و متوسط را داشته باشد بدون این که بر خواص نانومواد تاثیر داشته باشد. برای اختلاط یکنواخت نانومواد



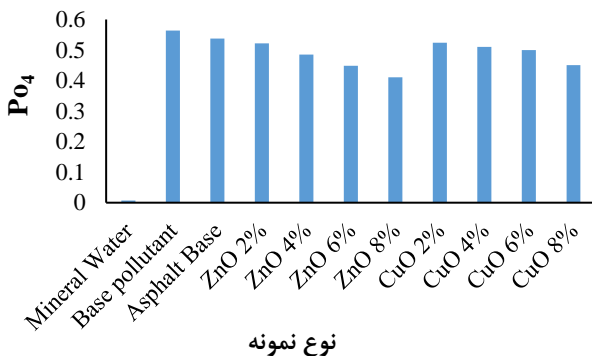
شکل ۳- پاسخ‌های مربوط به بار ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی متخلخل با بارهای مختلف



شکل ۴- نتایج عدد روانی

۳-۲-۱- پارامتر فسفات

شکل ۵ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده پایه و آب معدنی در پارامتر فسفات را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای شفافیت در مقایسه‌ها، آب معدنی با برند مشخص به‌عنوان نمونه شاهد برای جلوگیری از اعمال نقش املاح آب شهری و هم‌چنین محلول آلاینده پایه برای درک بهتر تغییرات قبل و بعد از عبور از نمونه آسفالتی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر فسفات در آب معدنی بسیار ناچیز بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۵ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلاینده‌گی فسفات حدود ۴/۷ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی فسفات برقرار است، به‌طوری‌که بیشتر کاهش آلاینده‌گی فسفات مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۲۷٪ همراه است. از طرفی این مقدار کاهش آلاینده‌گی حداکثر در نانو اکسید مس در غلظت ۸٪ با مقدار ۲۰٪ است.



شکل ۵- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر فسفات

۳-۲-۲- پارامتر سرب

شکل ۶ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر سرب را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پارامتر سرب در آب معدنی حدود ۰/۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۳ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلاینده‌گی سرب حدود ۸۰ درصد کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی و مس در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی فسفات برقرار است، به‌طوری‌که بیشتر کاهش آلاینده‌گی سرب مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۸۴ و ۸۱ درصدی همراه است.

می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانو اکسید مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل، مقاومت آن‌ها را در برابر شیارشدگی افزایش می‌دهد، اما افزودن نانو اکسید روی چندان موفق‌آمیز نبوده است. این امر به دلیل تشکیل شبکه‌ای در ساختار قیر پس از افزودن نانو اکسید مس رخ داده است، که در آن برهم‌کنش قوی بین نانوذرات و ساختار مولکولی قیر ایجاد می‌شود. تاثیر افزودن نانو مواد مس به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌ها در ۸٪ نانومواد کمتر از ۶٪ بود. این بدین علت است که در درصدهای زیاد نانومواد افزودن نانومواد باعث می‌شود ذرات نانومواد مابین ذرات قیر قرار گیرند و در نتیجه تاثیر افزودن نانو مواد اکسید مس به مخلوط‌های آسفالت متخلخل بر افزایش مقاومت در برابر شیارشدگی مخلوط‌ها در ۸٪ نانومواد کمتر از ۶٪ بود.

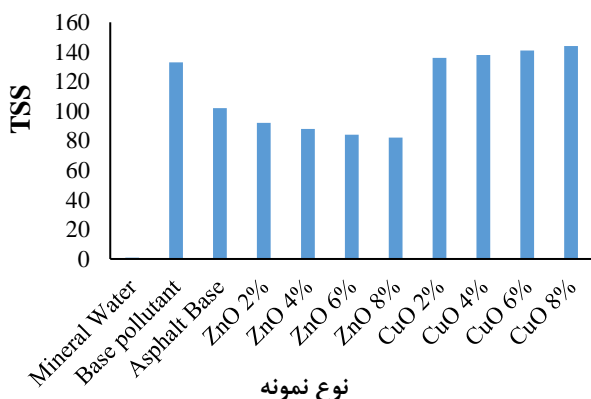
۳-۲-۳- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس

در این تحقیق برای آزمایش کاهش آلاینده از دستگاه فوتو راکتور براساس استاندارد ASTM-D5116 استفاده شد. از طرفی آسفالت متخلخل به دلیل دارا بودن درصد فضای خالی نسبتاً زیاد (بالای ۲۰٪)، قدرت زهکشی بسیار بالایی دارد و سریعاً رواناب سطحی ناشی از بارندگی را از خود عبور می‌دهد. لذا در این بخش میزان جذب آلاینده‌گی در نانو اکسیدهای روی مس در ۷ پارامتر مختلف مقایسه شد. بدین منظور ۱۱ نمونه در نظر گرفته شد که ابتدا آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد) ساخته شد. سپس ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسید روی و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانو اکسید مس در درصدهای ۲-۴-۶-۸ ساخته شد. هم‌چنین محلول آلاینده پایه برای درک بهتر میزان تغییرات جذب آلاینده‌گی توسط نانومواد با ترکیبی از نمک‌های فلزی شامل سدیم کلراید، پتاسیم دی هیدروژن فسفات، کلرید روی، نیترات سرب و سدیم سولفات در آب معدنی مشخصی به نسبت‌های مختلف برطبق استاندارد آب و فاضلاب ایران تشکیل و از ۹ نمونه آسفالتی عبور داده شد. لازم به ذکر است که استفاده آب معدنی با یک برند مشخص در این تحقیق به دلیل بالاتر بردن دقت و وضوح بهتر در روند انجام آزمایش بوده است. بنابراین ۱۱ نمونه آب عبوری از ۹ آسفالت متخلخل به همراه ۱ نمونه آب معدنی (نمونه شاهد) و ۱ نمونه محلول آلاینده پایه برای تعیین پارامترهای مختلف تحویل آزمایشگاه محیط‌زیست شد.

۳-۲-۴- پارامتر مجموع کل مواد آلی و غیر آلی محلول در

آب (TSS)

شکل ۸ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسیدهای روی و نانو اکسید مس در درصد های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر مجموع کل مواد آلی و غیر آلی محلول در آب را نشان می دهد. مشاهده می شود که پارامتر TSS در آب معدنی حدود ۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۱۳۳ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان آلاینده‌گی TSS حدود ۲۳ درصد کاهش یافت. هم چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی TSS برقرار است، به طوری که حداکثر کاهش آلاینده‌گی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۳۸٪ همراه است. البته تغییرات آلاینده‌گی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس روند افزایشی دارد، به طوری که تا درصد آلاینده‌گی ۸/۲ درصد نیز خواهد رسید.

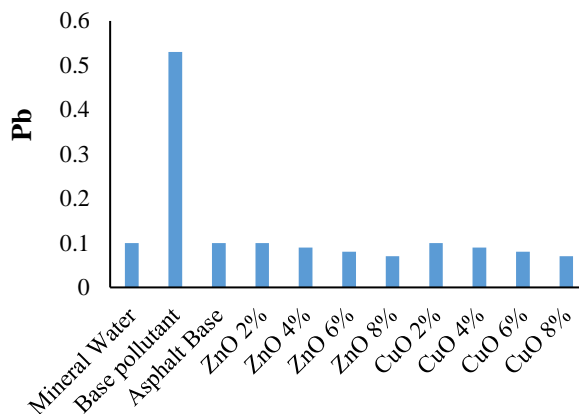


نوع نمونه

شکل ۸- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر مجموع کل مواد آلی و غیر آلی محلول در آب

۳-۲-۵- پارامتر کل مواد جامد معلق در آب

شکل ۹ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصد های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر کل مواد جامد معلق در آب را نشان می دهد. مشاهده می شود که پارامتر TDS در آب معدنی حدود ۳۹۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۳۰ ppm برآورد شده است و با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان آلاینده‌گی TDS حدود ۱/۷ درصد افزایش یافت. هم چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی TDS برقرار است، به طوری که حداکثر کاهش آلاینده‌گی مربوط به غلظت ۸٪

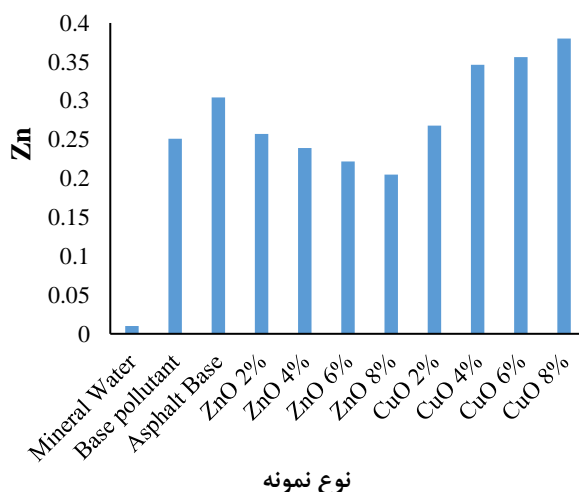


نوع نمونه

شکل ۶- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر سرب

۳-۲-۳- پارامتر روی

شکل ۷ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصد های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر روی را نشان می دهد. مشاهده می شود که پارامتر Zn در آب معدنی حدود ۰/۰۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۲۵۱ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان آلاینده‌گی Zn حدود ۲۱ درصد افزایش یافت. هم چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی Zn برقرار است، به طوری که حداکثر کاهش آلاینده‌گی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۱۸٪ همراه است. البته تغییرات آلاینده‌گی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار رابطه مستقیم دارد، به طوری که با افزایش درصد غلظت نانو اکسید مس میزان آلاینده‌گی حدود ۵۱٪ افزایش یافته است.

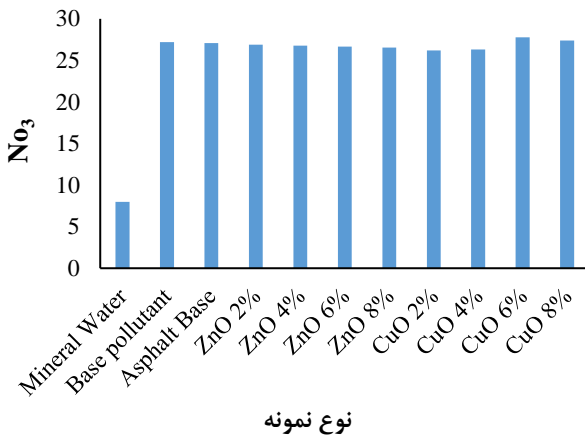


نوع نمونه

شکل ۷- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر روی

۳-۲-۷- پارامتر نیترات

شکل ۱۱ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر نیترات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود پارامتر نیترات در آب معدنی حدود ۸ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۲۷/۱۸ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلاینده‌گی نیترات حدود ۰/۴ درصد کاهش یافت. همچنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی نیترات برقرار است، به طوری که حداکثر کاهش آلاینده‌گی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۲/۴٪ همراه است. البته تغییرات آلاینده‌گی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار مشخصی نشان نمی‌دهد و بازه تغییرات آن کمتر از ۱ درصد است.



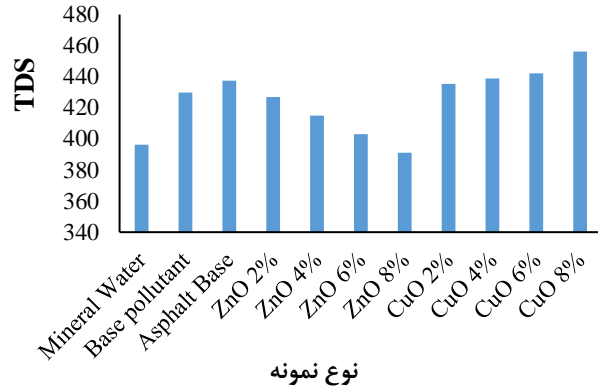
نوع نمونه

شکل ۱۱- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر نیترات

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای ارتقای عملکرد مکانیکی آسفالت متخلخل و کاهش آلاینده‌های موجود در رواناب سطحی از نانومواد CuO و ZnO استفاده شد. این نانوموادها به مخلوط آسفالتی اضافه و نمونه‌های آسفالتی متخلخل جدید ساخته شدند. برای بررسی و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها بر روی آن‌ها آزمایش‌های عملکردی شیارشدگی و درصد کاهش آلاینده‌گی انجام شد و مورد تحلیل قرارگرفت. از طرفی شاخص‌های اندازه‌گیری جاذب آلاینده‌گی گسترده‌ای نظیر نیترات، فسفات، سولفات، TSS، TDS، روی، سرب مطرح شدند که دلیل به‌کارگیری این تعداد شاخص، ضرورت و اهمیت رواناب سطحی شهری است، به طوری که با

با مقدار کاهش ۳۹/۵٪ همراه است. البته تغییرات آلاینده‌گی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار افزایشی را تجربه می‌کند، به طوری که در بیشترین غلظت، مقدار آلاینده‌گی ۶٪ افزایش نشان می‌دهد.

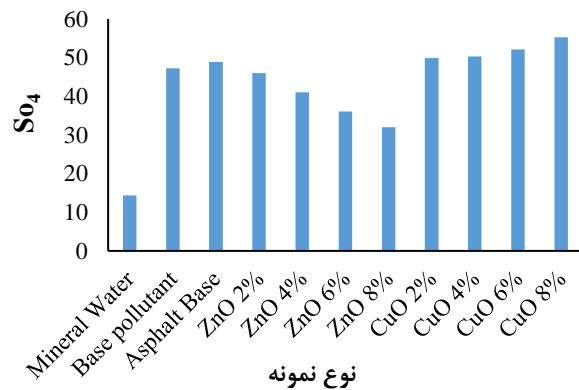


نوع نمونه

شکل ۹- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر کل مواد جامد معلق در آب

۳-۲-۶- پارامتر سولفات

شکل ۱۰ مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در درصدهای مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی در پارامتر سولفات را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود پارامتر سولفات در آب معدنی حدود ۱۴/۳۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۷/۲۱ ppm برآورد شد که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان آلاینده‌گی سولفات حدود ۴ درصد افزایش یافت. همچنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانو اکسید روی در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی سولفات برقرار است، به طوری که حداکثر کاهش آلاینده‌گی مربوط به درصد غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۳۱٪ همراه است. البته تغییرات آلاینده‌گی با غلظت آسفالت حاوی نانو اکسید مس رفتار افزایشی را تجربه می‌کند، به طوری که در بیشترین غلظت، مقدار آلاینده‌گی ۵۵٪ افزایش را نشان می‌دهد.



نوع نمونه

شکل ۱۰- مقایسه میزان کاهش آلاینده‌گی در نانو اکسید روی و نانو اکسید مس در پارامتر سولفات

۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Volatile Organic Compound (VOC)
- 2- Binder
- 3- Persons with Disabilities

۶- مراجع

پروین‌نیا، م.، رخشنده‌رو، غ.، و منجمی، پ.، (۱۳۸۷)، "بررسی کیفیت و احیای سیلاب‌های شهری در شهر شیراز"، دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

موسوی‌راد، س.، عامری، م.، و کامبوزیا، ن.، (۱۴۰۰)، "امکان‌سنجی بهبود هم‌زمان قابلیت جذب آلاینده‌ها از رواناب سطحی و عملکرد مکانیکی روسازی‌ها با کاربرد مخلوط آسفالتی متخلخل اصلاح‌شده با نانومواد فوتوکاتالیست"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

نیک‌نژاد، د.، (۱۳۹۲)، "آلودگی منابع آب و خاک و محیط‌زیست بر اثر باران اسیدی"، اولین همایش ملی توسعه پایدار کشاورزی با کاربرد الگوی زراعی، همدان، ایران.

ASTM D5116-17, (2017), *Standard guide for small-scale environmental chamber determinations of organic emissions from indoor materials/products*, ASTM International, West Conshohocken, USA.

Anand, R., Raina, A., Haq, M., Mir, M., Gulzar, G., and Wani, M., (2021), "Synergism of TiO₂ and graphene as nano-additives in bio-based cutting fluid, An experimental investigation", *Journal of Tribology Transactions*, 64(2), 350-366, <https://doi.org/10.1080/10402004.2020.1842953>.

Badroodi, S.K., Keymanesh, M.R., and Shafabakhsh, G., (2020), "Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior", *Journal of Construction and Building Materials*, 246, 117558, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117558>.

Kafi, M., Gasperi, J., Moilleron, R., Gromaire, M.C., and Chebbo, G., (2008). "Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris", *Journal of Water Research*, 42(3), 539-549, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.08.008>.

Kamboozia, N. Mousavi Rad, S., and Saed, S., (2022), "Laboratory Investigation of the effect of nano-znO on the fracture and rutting resistance of porous asphalt mixture under the aging condition and freeze-thaw cycle", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(5), 04022052, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-)

شناخت هرچه بیشتر و اندازه‌گیری دقیق‌تر آب‌های عبوری از معابر آسفالتی در سطح شهر، بتوان رفتار و خصوصیات آن‌ها را بهتر شناسایی کرد. نتایج موردی تحقیق عبارت است از:

- با توجه به نتایج آزمایش خزش دینامیکی، افزودن نانو اکسید CuO به مخلوط‌های آسفالتی متخلخل باعث افزایش قابل توجه ظرفیت باربری و عدد روانی (FN) شد که برای مقاومت در برابر شیارشدگی مفید بود. مقادیر FN مخلوط‌های آسفالتی متخلخل در تمام بارها به‌طور متوسط ۱۵٪ افزایش یافت.

- تأثیر نانو CuO بر بهبود قابلیت تحمل بار مخلوط‌ها در قسمت‌های سوم نمودار عملکرد خزش دینامیکی آشکارتر بود. لازم‌به ذکر است که در کل بارها، نمونه‌های آسفالتی اصلاح‌شده با نانو ۶ درصد نانو اکسید مس دارای مقادیر FN بالاتری بود. اما در نمونه‌های آسفالتی حاوی نانو اکسید ZnO تغییرات ناچیزی مشاهده شد.

- مقایسه نتایج کیفی با در نظرگیری غلظت ۰.۸٪، برای پارامتر نیترات تفاوت چشمگیری حاصل نشد. اما در سایر پارامترها نتایج حاکی از برتری نانو اکسید روی نسبت به مس بود به‌طوری‌که در کاهش آلاینده‌گی فسفات برای نانو اکسید روی و مس به ترتیب ۲۷٪ و ۲۰٪ بود. در پارامتر سرب نیز کاهش آلاینده‌گی برای نانو اکسید روی و مس ۸۴٪ و ۸۱٪ بود. برای پارامتر روی نیز آلاینده‌گی برای نانو اکسید روی با ۱۸٪ کاهش و نانو اکسید با ۵۱٪ افزایش همراه بود.

- پارامتر TSS برای نانو اکسید، کاهش آلاینده‌گی ۳۸٪ و برای نانو اکسید مس نیز با افزایش ۸٪ همراه بود. هم‌چنین نتایج در پارامتر TDS نیز برای نانو اکسید روی با مقدار کاهش ۳۹/۵ درصد و برای نانو اکسید مس ۶٪ افزایش نشان داد. برای پارامتر سولفات نیز نانو اکسید، آلاینده‌گی مقدار ۳۱٪ کاهش و برای نانو اکسید مس افزایش ۱۷٪ را نشان داد.

- در مجموع در بخش آزمایش مکانیکی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید مس با غلظت ۰.۶٪ بهترین عملکرد را داشته و در بخش محیط‌زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانو اکسید روی با غلظت ۰.۸٪ بهترین عملکرد را داشت.

محدودیت‌های این تحقیق مربوط به پارامترهایی نظیر دما بود که با توجه به شرایط حاکم بر تحقیق به‌صورت ثابت در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای پیشنهادات در تحقیقات آتی می‌توان به بررسی سایر نانوموادهای موجود در زمینه بهبود مقاومت و کاهش آلاینده‌گی و بررسی تغییرات پارامترهای محیط‌زیستی نظیر میزان اسیدی و دما اشاره کرد.

- (2017), "Durability of epoxy-bonded titanium-modified aggregate as a photocatalytic coating layer for asphalt pavement under vehicle tire polishing", *Journal of Wear*, 382(1), 1-7, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.004>.
- Winter, M., and Breitsamter, Ch., (2016), "Efficient unsteady aerodynamic loads prediction based on nonlinear system identification and proper orthogonal decomposition", *Journal of Fluids and Structures*, 67(1), 1-21, <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.08.009>.
- Klenzedrof, B., Eck, B., Charbeneau, J., and Barrbeet, M., (2012), "Quantifying the behavior of porous asphalt overlays with respect to drainage hydraulics and runoff water quality", *Journal of Environmental & Engineering Geoscience*, 10(1), 99-111, <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.18.1.99>.
- Li, R., Xiao, F., Amirkhanian, S., You, Z., and Huang, J., (2017), "Developments of nano materials and technologies on asphalt materials-A review", *Journal of Construction and Building Materials*, 143(1), 633-648, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158>.
- Lopes Afonso, M., Almeida, M., and Sena Fael, C., (2017), "Study of the porous asphalt performance with cellulosic fibers", *Journal of Construction and Building Materials*, 135, 104-111, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.222>.
- Masri, Kh., Zali, N., Jaya, R., and Hasan, M., (2022), "The influence of nano titanium as bitumen modifier in stone mastic asphalt", *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 22(1), 1-19, <https://doi.org/10.1155/2022/4021618>.
- Roseen, R., Ballesterro, T., Houle, J., Briggs, J., and Houle, K., (2012), "Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate", *Journal of Environmental Engineering*, 138(1), 81-89, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000459](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000459).
- Sambito, M., Severino, A., Freni, G., and Neduzha, L.A., (2021), "Systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems", *Journal of Sustainability*, 13(8), 4509, <https://doi.org/10.3390/su13084509>.
- Shafabakhsh, Gh., Jafari Ani, O., and Mirabdolazimi, S.M., (2021), "Rehabilitation of asphalt pavement to improve the mechanical and environmental properties of asphalt concrete by using of nano particles", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(2), 1-20, <https://doi.org/10.22075/JRCE.2019.17407.1326>.
- Standards Australia, (1995), *Methods of sampling and testing asphalt determination of the permanent compressive strain characteristics of asphalt*, Dynamic Creep Test, AS 2891.12.1, Sydney, Australia
- Tanzadeh, J., Tanzadeh, R., Nazari, H., and Kamvar, N., (2017), "Fatigue evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures modified by optimum percent of Tio nanoparticles", *Journal of Advanced Engineering Forum*, 24(1), 55-62, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.5>.
- Thomas, B.B., Mark, H.S., Janelle, A., Brian, B., (2008), "Potential for localized groundwater contamination in a porous pavement parking lot setting in Thode Island", *Journal of Environmental Geology*, 55(3), 571-582, <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1008-z>.
- Wang, Z. Leng, H., Yu, M., Hüben, J., and Kollmann, M.,



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.