



Research Paper

## Laboratory Investigating Role of Titanium Dioxide and Graphene Oxide Nanoparticles on Improving Flexibility and Removing Pollution in Porous Asphalt

Ramtin Sobhkhiz Fomani<sup>1\*</sup>, Esmail Fatehifar<sup>2</sup> and Taher Rajaei<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Scholar, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Chemical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran

<sup>3</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

### Article information

Received: October 30, 2022

Revised: January 02, 2023

Accepted: January 03, 2023

### Keywords:

Modulus of Elasticity

Nanoparticles

Quality Parameter

Porous Asphalt

\*Corresponding author:

[r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir](mailto:r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir)



### Abstract

Today, with the growth of the population and the increase in water, and air pollution, the issue of water purification and the use of nanomaterials has been the focus of many researchers. Considering that, environmental issues such as the reduction of pollutants in porous environments such as asphalt are important. Therefore, the aim of this research was to investigate the role of nanomaterials in improving flexibility and removing pollution in porous asphalt in urban surface runoff. For this purpose, titanium dioxide and graphene oxide nanoparticles were used to improve the mechanical performance of porous asphalt and to reduce the pollutants in the surface runoff. Hence, 11 samples were considered; first asphalt without nanomaterials was made, then 4 porous asphalt samples containing titanium dioxide nanoparticles and 4 porous asphalt samples containing graphene oxide nanoparticles with a concentration of 2-8% were made. The results of the flexible modulus test showed that the asphalt sample containing graphene oxide nanoparticles with a concentration of 6% performed best and was introduced as the optimal nano percentage, and in the environmental section, the asphalt sample containing titanium dioxide nanoparticles with a concentration of 8% was the best.

**How to cite this paper:** Sobhkhiz Fomani, R., Fatehifar, E., & Rajaei, T. (2024). Laboratory investigation of the role of titanium dioxide and graphene oxide nanoparticles on improving flexibility and removing pollution in porous asphalt. *Environ. Water Eng.*, 10(2), 196-211. <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.367763.1820> (In Persian)



© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The use of porous asphalt as a permeable bituminous macadam has increased significantly during the last decade and, like many innovations, has been the subject of many scientific discussions. The most obvious characteristics of this asphalt is its drainage ability. The main reason for paying attention to the use of this particular type of pavement on the road surface is the drainage characteristics of the top layer of the road. Drainage is possible due to the presence of a large percentage of empty space and connection between empty spaces, because these holes allow water and air to flow to sides of the road. Therefore, paying attention to the importance of investigating environmental issues such as the reduction of pollutants in porous environments such as asphalt, so the purpose of this research is to investigate the effect of nanomaterials such as titanium dioxide nanoparticles ( $\text{TiO}_2$ ) and graphene oxide nanoparticles (GO) on determining the condition It has been qualitatively and quantitatively porous in asphalt.

### Material and Methods

In this section, with the introduction of consumable materials and their characteristics, including stone materials and their granulation, bitumen, nanomaterials and asphalt mixture mixing plan, functional tests and environmental tests in relation to the percentage of pollutant absorption in porous asphalt mixture were investigated. Coarse and fine stone materials used in porous asphalt must be hard, strong, durable, clean and cube-shaped and 100% broken, with uniform quality characteristics, and free from any particles of clay, silt, shale and soil cover. The stone materials used in this research were made of limestone. On the other hand, for the granulation plan from the Malaysian regulation (PWD) with the percentage of free space in this plan, at least 19% was considered and the granulation of this plan had aggregates between 0 and 19 mm. Pure bitumen 60/70 was used in the porous asphalt mixture according to the conventional use in the pavement industry and literature.  $\text{TiO}_2$  and GO were used so that in each of 4 porous asphalt samples, 2, 4, 6, and 8% of optimal bitumen was added to it to make the sample. One of the most well-known and practical asphalt manufacturing methods, which is the Marshall method, was used on cylindrical samples with a diameter of 10 cm

and a height of 6.25 cm, and the compaction of the asphalt sample was made with a 4.5 kg hammer. It takes place from the fall of the hammer 45 cm. In this research, nine samples of porous asphalt, including one sample of porous asphalt without nanomaterials as a control, along with four samples of porous asphalt containing nanomaterials of graphene in different percentages and four samples of porous asphalt containing  $\text{TiO}_2$  nanoparticles in different percentages, were made. The assumption of the optimal bitumen percentage of 7% was made from the functional test samples by the gyratory device with the rotational compression method, which causes the application of a horizontal shear stress similar to the roller in reality. Meanwhile, the weight of the samples was equal to 1200 g to mix nanoparticles with bitumen from a high-speed mixer with a rotation speed of up to 5000 rpm, and Crozen was used as a solvent, and the percentage of nanomaterials was 0, 2, 4, 6, and 8% was used. 11 samples were taken into account, first the base asphalt (asphalt without nanomaterials) was made, then 4 porous asphalt samples containing titanium dioxide nanoparticles and 4 porous asphalt samples containing graphene oxide nanoparticles in percentages of 2-4-6-8% were made. Then, the basic pollutant solution, which is a combination of metal salts including dipotassium hydrogen phosphate, zinc chloride, lead nitrate and sodium sulfate, was formed in certain mineral water in different proportions according to Iran's water and sewage standards and passed 9 asphalt samples (Table 1).

Table 1 Specifications of pollutant solution (g/mol) in this research

Specification	Amount
Lead nitrate	60
Sodium sulfate	300
Zinc chloride	4.5
Dipotassium hydrogen phosphate	4.5

### Results

In this research,  $\text{TiO}_2$  and GO nanoparticles were used to improve the mechanical performance of porous asphalt and reduce the pollutants in surface runoff. These nanomaterials were added to the asphalt mixture and new porous asphalt samples were made. In order to check and evaluate the performance of the samples, functional tests of the yield modulus and the percentage of emission reduction were performed and analyzed. The results of the flexural modulus test showed that the porous asphalt samples modified with GO

have higher hardness values on average than the normal sample at all temperatures. It should be noted that the optimal percentage of GO nanoparticles in the test was equal to 6% among the percentages investigated in this research. At the same time, the porous asphalt containing as TiO<sub>2</sub> nanoparticles did not have much success over the asphalt samples in terms of flexibility. The comparison of the qualitative results regarding the effectiveness of as TiO<sub>2</sub> nanoparticles and GO nanoparticles in reducing pollution showed that TiO<sub>2</sub> nanoparticles have the role of reducing pollution in all qualitative parameters, and the largest reduction was in phosphate, zinc, TSS and nitrate. On the other hand, GO nanoparticles except in the cases of reduction of nitrate and lead emissions, in the rest of the cases, it showed either an unspecified behavior or an increase. Therefore, it has a significant advantage over GO nanoparticles, which increases with increasing concentration. In addition, in the performance of modulus test section of the performance test series, the asphalt sample containing GO nanoparticles with a concentration of 6% has performed best and was introduced as the optimal nano percentage, but in the environmental section, the asphalt sample containing TiO<sub>2</sub> nanoparticles with a concentration of 8% had the best performance. The results indicated the superiority of TiO<sub>2</sub> nanoparticles over GO, so that in reducing phosphate pollution for TiO<sub>2</sub> and GO nanoparticles was 33 and 7%, respectively, and in the lead parameter, the pollution reduction for TiO<sub>2</sub> and GO nanoparticles was 85 and 81%, respectively. For zinc, TDS, and nitrate parameters, the pollution for TiO<sub>2</sub> nanoparticles decreased by 34, 13.8, and 8%, respectively, but

for GO nanoparticle, it was associated with no specific behavior. Regarding the TSS parameter for TiO<sub>2</sub> nanoparticles, there was a 22% reduction in emissivity and for GO nanoparticles, it was associated with an increase of 54%.

### Conclusions

The results of the flexural modulus test showed that the porous asphalt samples modified with GO nanoparticles have higher hardness values on average than the normal sample at all temperatures. It should be noted that the optimal percentage of GO nanoparticles in the test was equal to 6% among the percentages investigated in this research. This is while the porous asphalt containing TiO<sub>2</sub> nanoparticle did not have much success over the asphalt samples in terms of flexibility. Moreover, the comparison of the qualitative results regarding the performance of TiO<sub>2</sub> and GO nanoparticles in reducing pollution showed that TiO<sub>2</sub> nanoparticles have the role of reducing pollution in all qualitative parameters, with the greatest reduction in phosphate, zinc, TSS and nitrate with reduction percentages of 33 and 34, and 22%. On the other hand, GO nanoparticles showed indeterminate or increased behavior in most cases. Therefore, it has a significant advantage over GO nanoparticles, which is increased with increasing concentration.

### Data Availability

The data used in this research are presented in the main text of the article.

### Conflicts of interest

The authors of this paper declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط‌زیست و مهندسی آب

Homepage: [www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

مقاله پژوهشی

## بررسی آزمایشگاهی نقش نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و گرافن اکسید بر بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری و حذف آلودگی در آسفالت متخلخل

رامتین صبح‌خیز فومنی<sup>۱\*</sup>، اسماعیل فاتحی‌فر<sup>۲</sup> و طاهر رجایی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران  
<sup>۲</sup>استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، سهند، ایران  
<sup>۳</sup>استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

## اطلاعات مقاله

## چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۱/۰۸/۰۸]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۱/۱۰/۱۲]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۱/۱۰/۱۳]

واژه‌های کلیدی:

آسفالت متخلخل

پارامتر کیفی

مدول انعطاف‌پذیری

نانوذرات

\*نویسنده مسئول:

[r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir](mailto:r.sobhkhiz@stu.qom.ac.ir)

امروزه با رشد جمعیت و افزایش آلودگی آب‌وهوا، موضوع تصفیه آب و استفاده از نانومواد مورد توجه همگانی قرار گرفته است. با توجه به اینکه مسائل محیط‌زیستی نظیر کاهش آلاینده‌های موجود در محیط‌های متخلخل نظیر آسفالت از اهمیت برخوردار است، لذا هدف این پژوهش تعیین آزمایشگاهی نقش نانومواد بر بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری و حذف آلودگی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری بود. بدین منظور برای ارتقای عملکرد مکانیکی آسفالت متخلخل و کاهش آلاینده‌های موجود در رواناب سطحی از نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و نانوذرات گرافن اکسید استفاده شد. لذا، ۱۱ نمونه در نظر گرفته شد که ابتدا آسفالت بدون نانومواد ساخته شد سپس ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات گرافن اکسید با غلظت ۲ الی ۸٪ ساخته شد. نتایج آزمایش مدول انعطاف‌پذیر نشان داد که نمونه آسفالتی حاوی نانوذرات گرافن اکسید با غلظت ۶٪ بهترین عملکرد داشته است و به‌عنوان درصد نانومواد بهینه معرفی شد و در بخش محیط‌زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید با غلظت ۸٪ بهترین عملکرد را داشت.

## نحوه استناد به این مقاله:

صبح‌خیز فومنی، رامتین، فاتحی‌فر، اسماعیل، & رجایی، طاهر. (۱۴۰۳). بررسی آزمایشگاهی نقش نانوذرات تیتانیوم دی‌اکسید و گرافن اکسید بر بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری و حذف آلودگی در آسفالت متخلخل. محیط‌زیست و مهندسی آب. ۱۹۶-۲۱۱ (2)10 <https://doi.org/10.22034/ewe.2023.367763.1820>



## ۱- مقدمه

کشورهای در حال توسعه و یا مکان‌های دور بدون دسترسی به برق نیز مناسب بود (Yu et al. 2020).

یکی از معایب فرایندهای متداول تصفیه فیزیکی و شیمیایی آلاینده‌ها مانند جداسازی شیمیایی آلاینده‌ها، انعقاد و لخته‌سازی جذب سطحی بر روی کربن فعال فیلتراسیون و موارد مشابه بود که این روش‌ها فقط باعث انتقال آلودگی از یک فاز به فاز دیگر، تغلیظ آن‌ها و در نتیجه تولید یک آلاینده جدید شد که نیاز به تصفیه بیش‌تری داشت و در واقع فرایندهایی غیرمخرب بود. در سال‌های اخیر فرایندهای اکسیداسیون پیشرفته به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های متداول تصفیه بکار رفت که این روش‌ها مبتنی بر تولید گونه‌های بسیار فعال مانند رادیکال‌های هیدروکسیل بود که گستره وسیعی از آلاینده‌های آلی را به‌سرعت اکسید کرد. (Ma et al. 2018; Slebi-Acevedo et al. 2020; Zhang et al, 2020 ; Arshad et al, 2016)

مسئله بهبود سلامت آب و نیز وجود ترکیبات مقاوم آلی که در برابر حل‌شدن از خود مقاومت نشان داد، یک عامل مزاحم برای فرایند تصفیه بود. فناوری‌های نوین تصفیه آب در حال حاضر بر روی فرایندهای جذب یا انعقاد آلاینده‌های موجود در آب متمرکز شد. اگرچه هنوز به‌طور کامل جذب و یا انعقاد صورت نگرفت و مواد از بین نرفت (West et al. 2018). سایر روش‌های تصفیه آب مثل رسوب‌دهی، فیلتراسیون و فناوری غشا و همچنین جداسازی شیمیایی شامل هزینه‌های عملیاتی بالایی شد و توانست آلاینده‌های فرعی سمی نیز تولید کنند که وارد بوم‌سازگان شدند (Jiang et al. 2015). آلاینده‌های سمی بسیار مضر بوده و به‌دلیل افزایش آگاهی محیط‌زیستی و قوانین مربوط به آن باعث نگرانی در سراسر جهان شده است. (Watson et al. 2004).

یکی از روش‌های حذف آلاینده‌ها فرایند اکسیداسیون پیشرفته می‌باشد. اساس این روش بر پایه تولید در جای گروه‌های انتقالی با قابلیت واکنش‌پذیری بالا مانند هیدروکسیل‌ها جهت معدنی‌سازی اجزای مقاوم آلی و عوامل بیماری‌زای آب و محصولات جانبی عملیات گندزدایی می‌باشد (Kandal and Mallick 1999). در میان روش‌های متفاوت اکسیداسیون

استفاده از آسفالت متخلخل به‌عنوان ماکادام قیری نفوذپذیر، در طول دهه گذشته به‌صورت چشمگیری افزایش یافت و نظیر بسیاری از ابداعات و نوآوری‌ها، موضوع بسیاری از مباحث علمی بود. بارزترین خصوصیات این آسفالت، قابلیت زهکشی آن است که به‌دلیل وجود درصد بالایی از فضای خالی و تخلخل‌ها و ارتباطات موجود بین این تخلخل‌ها صورت گرفت (Zhang et al. 2020). دلیل اصلی در توجه به کاربرد این نوع خاص از روسازی در سطح راه، خصوصیت زهکشی لایه رویه راه بود. زهکشی به خاطر وجود درصد زیادی فضای خالی (بیش از ۱۸٪) و ارتباط مابین این فضاهای خالی امکان‌پذیر بود، زیرا این حفره‌ها به آب‌وهوا اجازه می‌داد که به‌طرف کناره‌های راه جریان پیدا کنند (Arshad et al. 2016). همچنین آسفالت متخلخل برای سرعت‌های بالا، مسیرهای با حجم بالای ترافیک، بهبود سطح مقاومت، کاهش سطح آبیاری، بهبود دید و کاهش سر و صدا استفاده شد (Jiang et al. 2015). از طرف دیگر آسفالت متخلخل از جمله مخلوط‌های آسفالتی گرم با دانه‌بندی باز بود که این نوع دانه‌بندی، به علت وجود حجم زیاد مصالح درشت دانه نسبت به حجم مصالح ریزدانه بود. این دانه‌بندی باز در مخلوط آسفالتی متخلخل باعث ایجاد فضای خالی نسبتاً زیاد در این نوع مخلوط آسفالتی نسبت به دیگر مخلوط‌های آسفالتی گرم متداول شد (Ma et al. 2018). فضای خالی زیاد در روسازی آسفالتی متخلخل مزایای زیادی را به همراه داشت، از جمله افزایش مقاومت اصطکاکی بین سطح روسازی و لاستیک خودرو، کاهش صدای ترافیک، کاهش اثر پاشش و بازتاب نور در روزهای بارانی و به‌طور کلی باعث افزایش ایمنی تردد شد (Slebi-Acevedo et al. 2020). از طرفی در سال‌های اخیر بهره‌گیری از مواد فتوکاتالیست بر پایه نانوکاتالیست‌ها، راهکار بسیار نویدبخشی برای حذف کامل آلودگی‌ها از آب معرفی شد. دو سیستم فتوکاتالیست خورشیدی و فتوکاتالیستی اشعه ماورای بنفش مصنوعی توانست در دمای محیط به‌کار رفته و آلودگی‌های شیمیایی و زیستی گوناگون را در آب‌وهوا کاهش دهند با توجه به اینکه در فتوکاتالیست خورشیدی از نور خورشید استفاده شد. این فناوری ارزان سازگار با محیط‌زیست و به‌طور کلی تجهیزات مورد نیاز آن بسیار کم بود و برای

باعث تخریب آلاینده‌ها می‌شود که در اثر تخریب آلاینده‌ها توسط گونه هیدروکسیل فقط آب و کربن دی‌اکسید تولید می‌شوند (Kandal and Mallick 1999).

رواناب سطحی شهری به کمک آسفالت متخلخل حاوی نانومواد با عملیاتی نظیر جمع‌آوری یک‌لایه آب‌بند و جذب آلاینده ورود آنها به آب زیرزمینی قابل کنترل می‌باشد. با توجه به اینکه مسائل محیط‌زیستی نظیر کاهش آلاینده‌های موجود در محیط‌های متخلخل نظیر آسفالت از اهمیت برخوردار بود، لذا، هدف این پژوهش تعیین آزمایشگاهی نقش نانومواد بر بهبود قابلیت انعطاف‌پذیری و حذف آلودگی در آسفالت متخلخل در رواناب سطحی شهری بود. بدین منظور برای ارتقای عملکرد مکانیکی آسفالت متخلخل و کاهش آلاینده‌های موجود در رواناب سطحی از نانوذرات  $TiO_2$  و GO استفاده شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱ مصالح سنگی

مصالح سنگی مصرفی در این پژوهش از جنس آهکی بود که جدول (۱) مشخصات مصالح مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات مصالح مصرفی

Table 1 Specifications of Material

Specification (%)	Standard	Allowed range	large grain ( $<4.74$ mm)	fine grain ( $>4.74$ mm)
Wear Los Angeles smooth and stretched flat and stretched	AASHTOD96 ASTM D4791 ASTM D4791	$<30$ $<20$ $<5$	18 8 0.8	- - -
Absorb sodium sulfate	AASHTO T85 AASHTO T104	$<2$ $<15$	12 0.2	- 1
LL or DL limitation	AASHTO T89	$<25$	-	18
Plasticity index	AASHTO T90	NP	-	NP

متعدد از آن (Badroodi ; Mousavi Rad et al. 2021) et al, 2020; Tanzadeh et al, 2017 و در نظر گرفتن حداقل ۱۹٪ فضای خالی بود. لذا دانه‌بندی این طرح دارای سنگدانه‌های بین صفر تا ۱۹ mm بود.

جدول ۲- دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش

Table 2 Granulation used in this research

Sieve Size (%)	19	12.5	9.5	4.75	2.36	0.075	Filler	Total
Allowed passing percentage	100	85-100	55-75	12-25	5-10	2-4	0	-
passing percentage	100	92.5	65	17.5	7.5	3	0	-
Remaining percentage	0	7.5	27.5	47.5	10	4.5	3	100

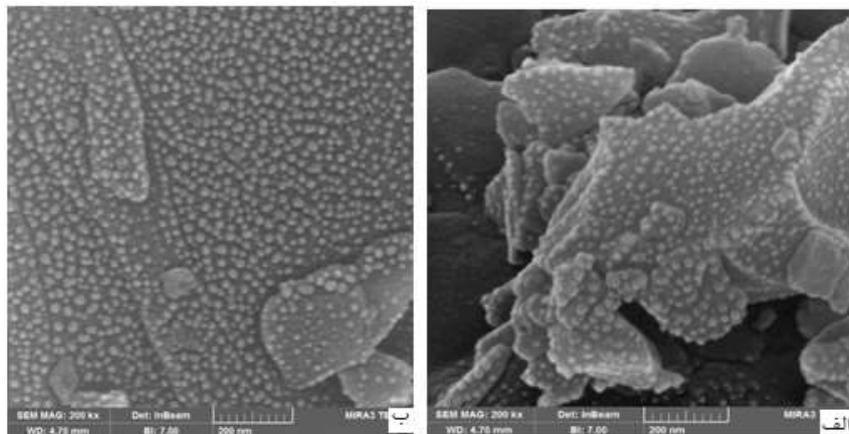
پیشرفته، فوتوکاتالیست‌های ناهمگن با به‌کارگیری کاتالیست‌هایی مانند ZnO، تیتانیوم دی‌اکسید ( $TiO_2$ )، گرافن اکسید (GO) کارایی خود را در تجزیه و کاهش سطح میزان مواد آلی موجود در ترکیبات زیست‌تخریب‌پذیر به خوبی نمایان ساختند. در نهایت به مواد معدنی بی‌ضرر مثل کربن دی‌اکسید و آب تبدیل شدند. فوتوکاتالیست‌ها اصول اولیه بسیار ساده‌ای دارند. کاتالیست بخش فرابنفش نور را دریافت و از انرژی حاصله برای شکستن پیوندهای موجود در مواد مختلف استفاده می‌نمایند. این فرآیند فوتوکاتالیستی می‌تواند در حذف گستره وسیعی از مواد استفاده شود (Kandal and Mallick, 1999).

اساس واکنش‌های فوتوکاتالیستی استفاده از مواد فوتوکاتالیستی همراه با نور UV برای تخریب مواد آلی غیرقابل تجزیه اسیدهای آلی می‌باشد. این فرآیند با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل تحت شرایط واکنشی ملایم توانایی تبدیل مواد غیرقابل تجزیه زیستی به مواد بی‌خطر را دارند. در فرآیندهای فوتوکاتالیکی متغیرهای زیادی همچون UV مقدار کاتالیست دما و pH بر روی فرآیند تأثیر گذاشتند. رادیکال هیدروکسیل نقش اساسی در فرآیند اکسیداسیون پیشرفته ایفا نموده و

### ۲-۲ دانه‌بندی طرح

در این پژوهش از طرح دانه‌بندی آیین‌نامه مالزی طبق جدول (۲) استفاده شد که علت انتخاب این دانه‌بندی، استفاده منابع

نموده و سبب بهبود قابلیت این فتوکاتالیست در انجام واکنش‌های شیمیایی می‌شود (Rocha Segundo et al. 2019). لذا، برای ساخت نانوکامپوزیت، ابتدا دو نانوماده را به نسبت وزنی موردنیاز وزن و داخل ظروف سرامیکی مخصوص دستگاه آسیاب ماهواره‌ای به همراه گوی‌های سرامیکی برای اختلاط بهتر ریخته شد و ظروف داخل دستگاه قرار داده شد (Shafabakhsh et al. 2021). سپس با توجه به روش آزمون و خطا، مدت‌زمان چرخش ۰/۵ hr با دور ۳۰۰ rpm برای محور کوچک و ۱۵۰ rpm برای محور بزرگ تنظیم شد (Shafabakhsh et al. 2021). بعد از انجام این مرحله محتویات ظروف سرامیکی داخل یک الک با شماره پایین ریخته شد تا گلوله‌های سرامیکی از نانومواد جدا شوند. سپس بعد از الک کردن نانومواد داخل یک گوتر سرامیکی ریخته‌شده و داخل کوره در دمای کوره ۱۲۰۰ °C به مدت ۴ hr قرار داده شد (Rocha Segundo et al. 2019; Dispat et al. 2020). بعد از اتمام این مدت نمونه‌ها داخل دستگاه به مدت ۱ day ماند تا به به صورت تدریجی به دمای محیط برسند. بعد از سرد شدن نمونه، نانوکامپوزیت آسیاب شد تا به حالت پودر حاصل شود. شکل (۱) تصویر SEM نانوکامپوزیت را نشان می‌دهد.



شکل ۱ تصویر SEM از نانومواد سنتز شده با بزرگنمایی KX 200 از الف- بدون بزرگنمایی و ب- بزرگنمایی  
Fig. 1 SEM image of synthesized nanomaterials with KX 200 magnification: a) without and b) with magnification

**۲-۵- الیاف سلولزی**  
در این پژوهش، الیاف سلولزی استفاده شده از نوع تاپسل بود. میزان مصرف این نوع الیاف در مخلوط آسفالتی باید ۰/۳٪ وزن کل مخلوط باشد. جدول (۳) مشخصات الیاف سلولزی مورد استفاده در پژوهش نشان داد.

**۲-۳- قیر مصرفی**  
در مخلوط آسفالتی متخلخل از قیر خالص ۶۰/۷۰ (قیر شل با درجه نفوذ ۶ تا ۷ mm) و ۱۰۰/۸۵ (قیر سنگین با درجه نفوذ ۸/۵ تا ۱۰ mm) می‌توان فقط برای راه‌های با ترافیک کم و متوسط استفاده نمود. همچنین در راه‌ها با ترافیک زیاد، این نوع قیرها به صورت اصلاح شده با افزودنی‌های مختلف استفاده شد. لذا در این پژوهش، به کاربرد مرسوم در صنعت روسازی و با توجه پژوهش‌های معتبر (Mousavi Rad et al. 2021) از قیر خالص ۶۰/۷۰ استفاده شد.

## ۲-۴- نانومواد

در این پژوهش از نانوذرات  $\text{TiO}_2$  و GO استفاده شد به طوریکه هرکدام در چهار نمونه آسفالت متخلخل، در درصد‌های مختلف ۲، ۴، ۶، و ۸ قیر بهینه بدان اضافه شد. در این پژوهش، نانوذرات  $\text{TiO}_2$  به سبب خصوصیات منحصر به فردی نظیر واکنش شیمیایی با آلاینده‌های مضر و تجزیه آنها به مواد بی‌ضرر و قابل شست‌شو بودن، توانست به‌عنوان یک ماده افزودنی مناسب در جهت کاهش آلاینده‌ها عمل نماید. همچنین نانوذرات GO به سبب خصوصیتی همچون میل ترکیبی بالا با نانوذرات  $\text{TiO}_2$  به صورت ترکیبی سطح جذب بالایی ایجاد

طبق تصویر SEM نانوکامپوزیت در شکل (۱) دریافت شد که سنتز نانوکامپوزیت با موفقیت انجام شده و ساختار هسته و پوسته تشکیل شد یا اصطلاحاً ذره‌ای بر ذره دیگر آرایش شد که این نتایج با پژوهش‌های مشابه (Mousavi Rad 2021) et al. همخوانی و تطابق دارد.

همگن نانوذرات در قیر از یک حلال استفاده شد که این حلال قابلیت نانومواد در دمای پایین و متوسط را داشت بدون اینکه بر خواص نانومواد تأثیر داشته باشد. برای اختلاط یکنواخت نانومواد در قیر، حلال باید دارای لزجیت کم در دمای اتاق باشد (Li et al. 2017). در این پژوهش از یک دستگاه همزن با دور بالا با دور چرخش تا ۲۰۰۰ rpm و همچنین از کروزن به عنوان حلال استفاده شد. از طرفی اختلاط قیر به مدت ۳۰ min با سرعت ۴۰۰۰ rpm و سپس به جهت تسریع در تبخیر شدن حلال کروزن با مدت ۱۰ min با سرعت ۲۰۰۰ rpm انجام شد. در نهایت، ظرف قیر اصلاح شده در حمام آب سرد (۲۰°C) به جهت خنک شدن سریع قیر و جلوگیری از ته نشین نانوذرات، قرار گرفت. با توجه به مطالعه‌های گذشته (Badroodi et al, 2020; Tanzadeh et al, 2017) درصد نانومواد به طور معمولی بین ۱ تا ۸ در قیر استفاده شد، به همین دلیل در این پژوهش درصدهای مورد بررسی ۰، ۲، ۴، ۶، و ۸٪ بود.

#### ۲-۸- میزان حذف آلودگی در نانوذرات TiO<sub>2</sub> و GO

آسفالت متخلخل به دلیل دارا بودن درصد فضای خالی نسبتاً زیاد (بالا ۳۰٪)، قدرت زهکشی بسیار بالایی داشت و سریعاً رواناب سطحی ناشی از بارندگی را از خود عبور می‌دهد. لذا، در این بخش به توضیحات در خصوص میزان حذف آلودگی در نانوذرات TiO<sub>2</sub> و GO در ۷ متغیر مختلف پرداخته شد. بدین منظور ۱۱ نمونه در نظر گرفته شد که ابتدا آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد) ساخته شد. سپس ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات GO در درصدهای ۲، ۴، ۶، و ۸ ساخته شد. محلول آلاینده پایه که ترکیبی از نمک‌های فلزی شامل دی پتاسیم هیدروژن فسفات، کلرید روی، نیترات سرب و سدیم سلفات است در آب معدنی مشخصی به نسبت‌های مختلف بر طبق استاندارد آب و فاضلاب ایران تشکیل و از ۹ نمونه آسفالتی عبور داده شد. جدول (۴) مشخصات محلول آلاینده پایه مورد استفاده در این پژوهش نشان داد.

جدول ۴- مشخصات محلول آلاینده

Table 4 Specifications of pollutant solution

Specification (g/mol)	Amount
Lead nitrate	60
Sodium sulfate	300
Zinc chloride	4.5
Dipotassium hydrogen phosphate	4.5

جدول ۳- مشخصات الیاف سلولزی مورد استفاده در این پژوهش  
Table 3 Characteristics of cellulosic fibers used in this research

Specification	Unit	Amount
Fiber	%	3+95
Natural wax	%	1.5 – 2.5
Average length of Fibers	mm	15
Average thickness of fibers	mm	4.5
Special Weight	g/mol	420-460
humidity	%	>6

#### ۲-۶- ساخت نمونه

یکی از شناخته شده‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های ساخت آسفالت، روش مارشال می باشد. هدف این روش پیدا کردن رابطه بین تراکم و درصد قیر و مقاومت فشاری بود. آزمایش مارشال بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ cm و ارتفاع ۶/۲۵ cm انجام شد و عمل تراکم نمونه آسفالت ساخته شد و با چکش ۴/۵ kg و ارتفاع سقوط چکش ۴۵ cm صورت پذیرفت (Moosavi Rad et al. 2021). بنابراین با توجه به این که روش مارشال از روش‌های متداول در جهت آزمودن مقاومت آسفالت بود، لذا در طرح اختلاط آسفالت متخلخل از روش مارشال استفاده شد. در این پژوهش، ۹ نمونه آسفالت متخلخل که شامل یک نمونه آسفالت متخلخل بدون نانو مواد به عنوان شاهد به همراه ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات GO در درصدهای مختلف و ۴ نمونه آسفالت متخلخل حاوی نانوذرات TiO<sub>2</sub> در درصدهای مختلف ساخته شد که با فرض درصد قیر بهینه ۷٪ از پژوهش‌های (2021) Mousavi Rad et al.، نمونه‌های آزمون‌های عملکردی توسط دستگاه ژیراتوری با روش تراکم چرخشی انجام شد که عمل چرخش باعث اعمال یک تنش برشی افقی مشابه غلتک در واقعیت شد. همچنین وزن نمونه‌ها برابر با ۱۲۰۰g بود.

#### ۲-۷- اختلاط نانومواد با قیر

اختلاط نانوذرات با قیر توسط یک دستگاه همزن با دور چرخش بالا حداقل ۲۰۰۰ rpm انجام شد. مدت زمان و دمای اختلاط مهم‌ترین موارد قابل توجه در بحث اختلاط نانوذرات در چسبنده قیری بود. بسیاری از پژوهش‌ها نشان دادند که دمای قیر در هنگام اختلاط نانو مواد باید بین ۱۳۰ تا ۱۵۵°C باشد و همچنین مدت زمان اختلاط باید بین ۳۰ تا ۴۰ min باشد (Moosavi Rad et al. 2021). همچنین برای اختلاط

که،  $\eta$  بازده فتوکاتالیستی،  $A_0$  میزان غلظت اولیه در زمان صفر بر حسب گرم بر لیتر، و  $At$  میزان غلظت در زمان  $t$  را نشان می‌دهد.

### ۳- یافته‌ها و بحث

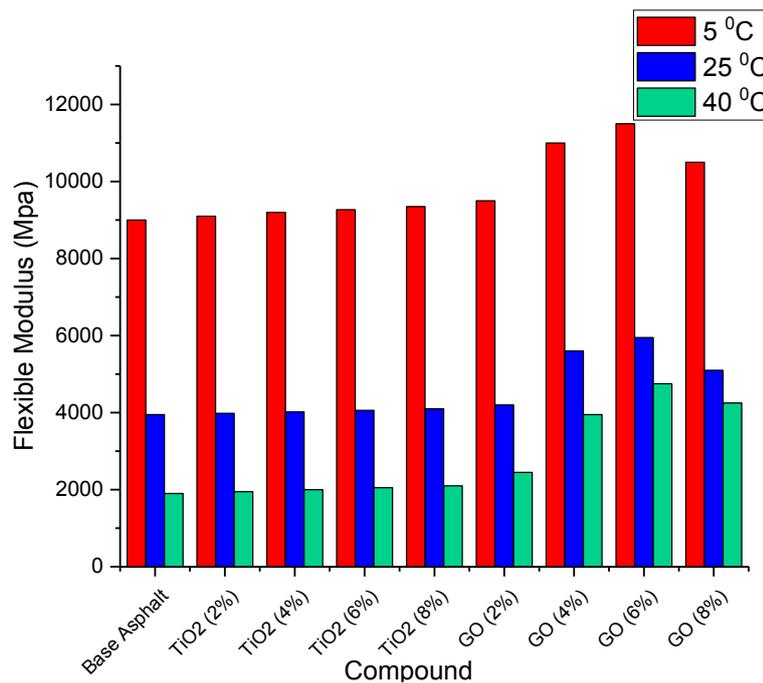
#### ۳-۱- مدول برجهندگی

در این پژوهش آزمایش مدول برجهندگی مطابق با استاندارد American Society for Testing & ASTM-D4123 (Materials, 1995) صورت گرفت. شکل (۲) نتایج مقادیر مدول برجهندگی یا مدول انعطاف‌پذیر MR را در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ °C نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقادیر مدول انعطاف‌پذیر مخلوط آسفالتی متخلخل با افزایش دما کاهش می‌یابد. علاوه بر این، می‌توان از نتایج استنباط کرد که نمونه‌های آسفالتی اصلاح شده با نانوذرات GO در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۰ °C به ترتیب مقدار مدول انعطاف‌پذیر بالاتری با میانگین ۱۰۶، ۱۱۳ و ۱۵۷٪ نسبت به نمونه‌های آسفالتی معمولی داشتند.

لازم به ذکر است که استفاده آب معدنی با یک برند مشخص در این پژوهش به دلیل بالاتر بردن دقت و وضوح بهتر در روند انجام آزمایش بود. در انتها ۱۱ نمونه آب عبوری از ۹ آسفالت متخلخل به همراه ۲ نمونه از معدنی (نمونه شاهد) و محلول آلاینده پایه جهت تعیین پارامترهای مختلف تحویل آزمایشگاه شیمی شد.

از طرفی در این پژوهش برای آزمودن کاهش آلاینده و اندازه‌گیری غلظت از دستگاه فتوراکتور و بر اساس استاندارد American Society for Testing & ASTM-D5116 (Materials, 2017) بهره گرفته شد. بدین منظور در یک سیستم آزمایشگاهی برای سنجش کارایی فوتوکالیستی، در مرحله اول، غلظت اولیه آلاینده‌های آب قبل از قرار دادن نمونه‌ها در راکتور توسط دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین شد و در گام بعد، غلظت آلاینده‌ها ارزیابی شد. برای تعیین کارایی فوتوکاتالیستی از فرمول بیر لامبرت (رابطه ۱) استفاده شد.

$$\eta = \frac{(A_0 * At)}{A_0} * 100 \quad (1)$$



شکل ۲- اثر دما و نوع نانومواد بر مدول انعطاف‌پذیر

Fig. 2 Effect of temperature and compound types on the flexible modulus

شد، سطح آن از آب‌دوست به آب‌گریز تبدیل شد و این امر باعث جذب بیشتر اجزای روغن سبک در قیر و افزایش حساسیت دمایی قیر شد، در نتیجه، سفتی مخلوط‌های

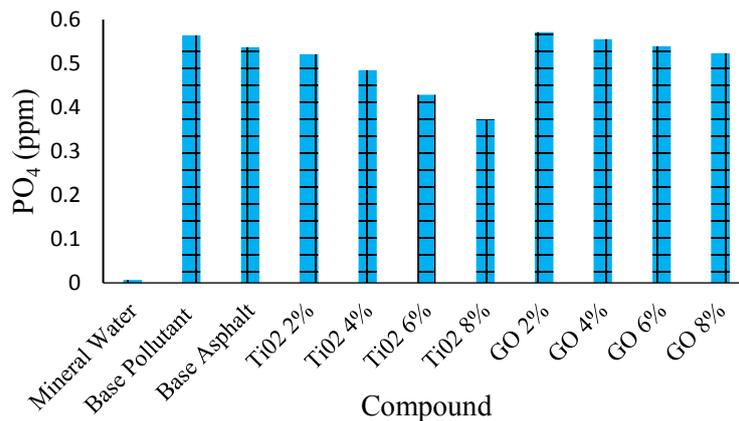
از شکل (۲) می‌توان مشاهده کرد که اثر نانوذرات GO بر افزایش مقادیر مدول انعطاف‌پذیر در دماهای بالاتر قوی‌تر بود. این امر به این دلیل بود که وقتی نانوذرات GO به قیر اضافه

مشاهده می‌شود حذف فسفات در آب معدنی بسیار ناچیز بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۵ ppm برآورد شد. با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان فسفات حدود ۰/۴۷٪ کاهش یافت. هم‌چنین در این شکل رابطه معکوس غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در آسفالت متخلخل با میزان حذف فسفات برقرار است. دلیل آن به عدم تأثیر این نوع نانومواد در کاهش فسفات بر می‌گردد. به‌طوریکه بیشینه کاهش میزان حذف فسفات مربوط به غلظت ۰/۸٪ با مقدار کاهش ۰/۳۳٪ همراه است. از طرفی این مقدار میزان حذف بیشینه فسفات در نانوذرات GO در غلظت ۰/۸٪ با مقدار ۰/۷٪ می‌باشد که با توجه به رفتار آسفالت پایه، مقداری ناچیز است. این میزان حذف فسفات در سایر پژوهش‌های پیشین برای نانوذرات  $TiO_2$  و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۲۶٪ و ۴٪ نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد (Mousavi Rad et al. 2021).

آسفالتی متخلخل اصلاح شده با نانوذرات گرافن اکسید بیش‌تر از مخلوط‌های معمولی بود، همان‌طور که در بسیاری از مطالعات گذشته (Badroodi Moosavi Rad et al. 2021) (Tanzadeh et al, 2017; et al, 2020) مشهود بود. روند افزایشی مقادیر مدول انعطاف‌پذیر با افزایش مقدار نانوذرات GO در مخلوط افزایش یافت. این امر بدین دلیل است که به دلیل مساحت سطح زیاد نانوذرات GO، تداخل بیش‌تری بین نانوذرات و قیر در مقادیر بیش‌تر نانوذرات وجود دارد. از شکل (۲) می‌توان استنباط کرد که نمونه‌های آسفالتی متخلخل اصلاح شده با ۰/۶٪ نانوذرات GO بالاترین مقادیر مدول انعطاف‌پذیر از لحاظ عددی در تمامی دماها داشتند.

### ۳-۲- حذف فسفات ( $PO_4$ )

شکل (۳) مقایسه اثر نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصد‌های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف فسفات را نشان می‌دهد. همان‌طور که



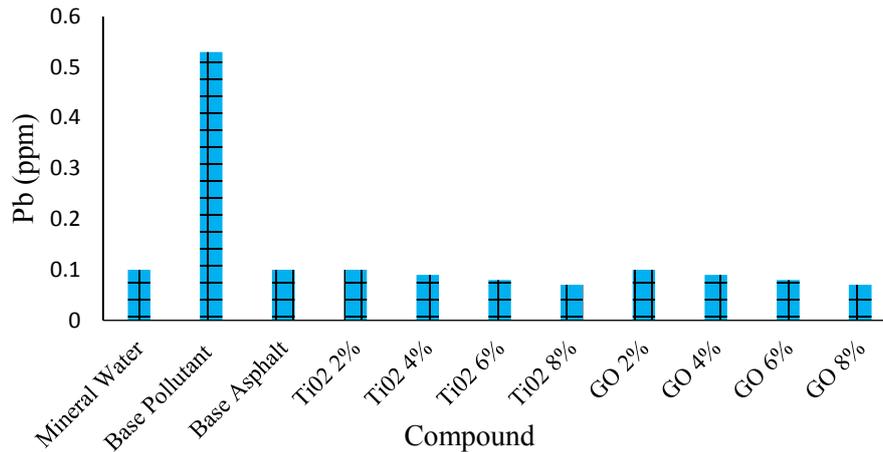
شکل ۳- اثر ترکیبات مختلف بر میزان حذف فسفات

Fig. 3 Effect of different compounds on the removal rate of phosphate

حذف سرب نشان می‌دهد. به‌طوریکه بیشینه میزان حذف سرب مربوط به غلظت ۰/۸٪ با مقدار کاهش ۸۵٪ و ۸۱٪ همراه است. البته این نکته قابل ذکر است که با توجه به جاذب آلاینده‌گی آسفالت پایه، نقش نانوآکسیدها جزئی بوده و در حد ۵٪ برای نانوذرات  $TiO_2$  و ۱٪ برای GO می‌باشد. این میزان حذف سرب در سایر پژوهش‌های پیشین (Tanzadeh (2017) et al. برای نانوذرات  $TiO_2$  و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۷۷٪ و ۲٪ نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد.

### ۳-۳- حذف سرب (Pb)

شکل (۴) مقایسه اثر نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصد‌های مختلف ۲ تا ۸٪ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف سرب را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر سرب در آب معدنی حدود ۰/۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۵۳ ppm برآورد شده است. با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه، میزان آلاینده‌گی فسفات حدود ۰/۸۰٪ کاهش یافت. هم‌چنین این شکل رابطه معکوس غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در آسفالت متخلخل با میزان



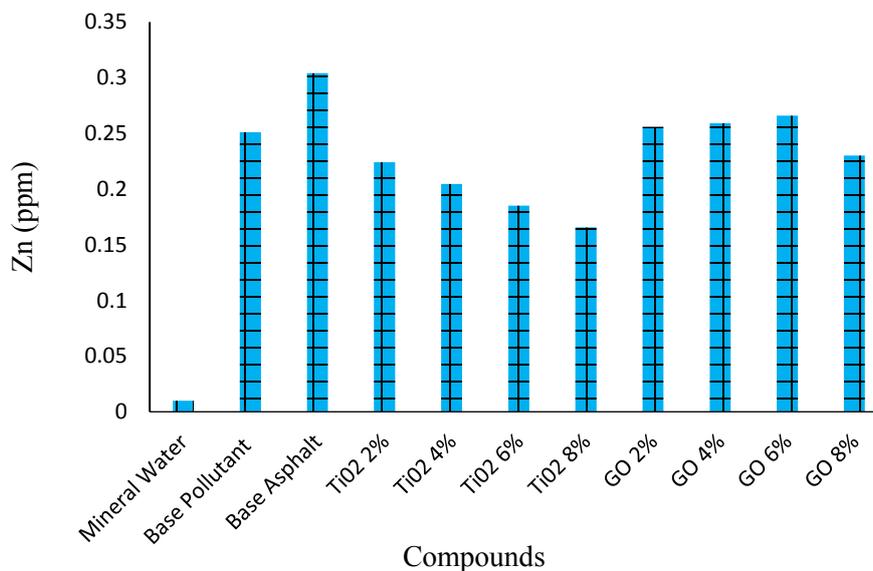
شکل ۴- اثر ترکیبات مختلف روی حذف سرب

Fig. 4 Effect of different compounds on Pb removal

همچنین این شکل رابطه معکوس غلظت نانوذرات TiO<sub>2</sub> در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی روی برقرار است به طوری که بیشینه میزان حذف آلودگی روی مربوط به غلظت ۰.۸٪ با مقدار کاهش ۳۴٪ همراه است. البته تغییرات میزان حذف روی با غلظت آسفالت حاوی نانوذرات GO رفتار مشخصی نشان نمی‌دهد. این میزان حذف آلودگی در سایر پژوهش‌های پیشین (Mousavi Rad et al. (2021) برای نانوذرات TiO<sub>2</sub> و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۲۹٪ و ۳٪ را نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد.

### ۳-۴- حذف روی

شکل (۵) مقایسه اثر نانوذرات TiO<sub>2</sub> و GO در درصد‌های مختلف ۲ تا ۸ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف روی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت روی در آب معدنی حدود ۰/۰۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۰/۲۵۱ ppm برآورد شد که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان حذف آلودگی روی حدود ۲۱٪ افزایش یافت.



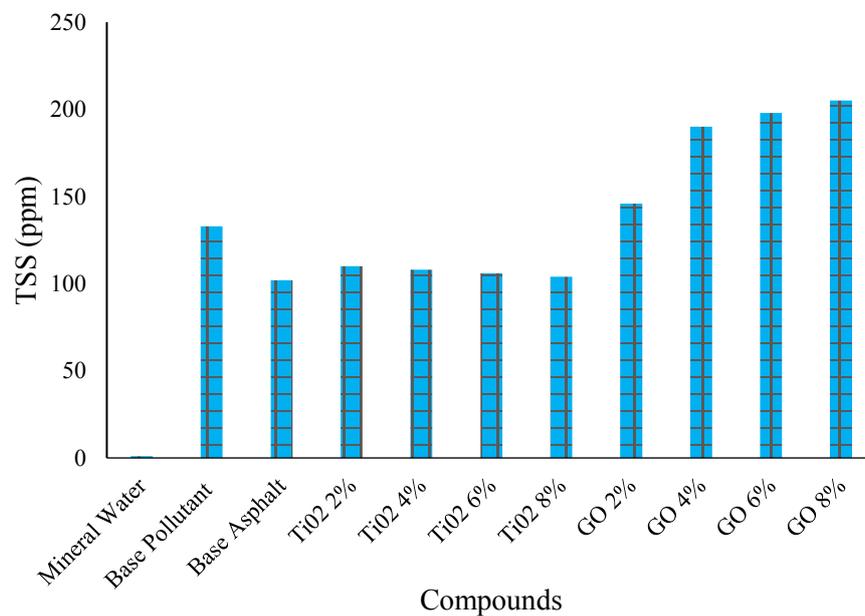
شکل ۵- اثر ترکیبات مختلف روی حذف روی

Fig. 5 Effect of different compounds on Zn removal

## ۳-۵- حذف کل مواد جامد معلق

شکل (۶) مقایسه اثر نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصد‌های مختلف ۲ تا ۸ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف کل مواد جامد معلق (TSS) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان TSS در آب معدنی حدود ۱ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۱۳۳ ppm برآورد شد که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه، میزان آلاینده‌گی TSS حدود ۲۳٪ کاهش یافت. همچنین این شکل رابطه معکوس غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی TSS برقرار است. به طوریکه بیشینه

میزان حذف TSS مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۲۲٪ همراه است. البته تغییرات میزان حذف TSS با غلظت آسفالت حاوی نانوذرات GO رفتار رابطه مستقیم و به شدت افزایشی دارد. به طوری که با افزایش درصد غلظت نانوذرات GO میزان TSS حدود ۵۴٪ افزایش یافته است. این میزان حذف آلودگی در سایر پژوهش‌های پیشین (Badroodi et al. (2020) برای نانوذرات  $TiO_2$  و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۶ و افزایش ۳٪ را نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد.



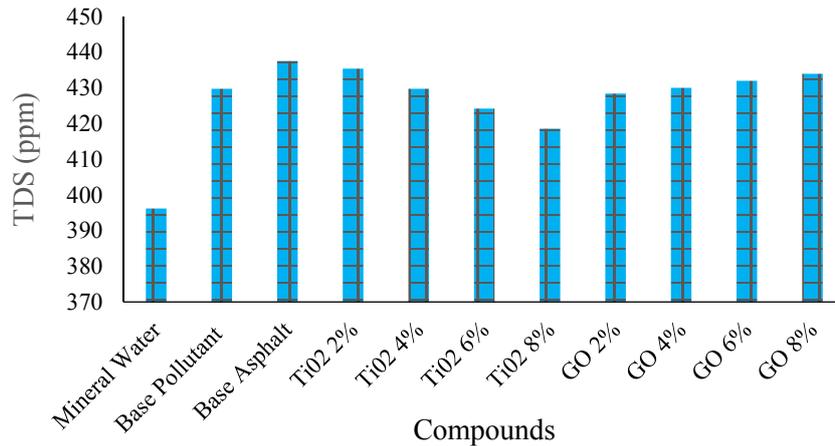
شکل ۶- اثر ترکیبات مختلف بر میزان حذف TSS

Fig. 6 Effect of different compounds on the removal rate of TSS

## ۳-۶- حذف TDS

شکل (۷) مقایسه اثر نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصد‌های مختلف ۲ تا ۸ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف TDS را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پارامتر TDS در آب معدنی حدود ۳۹۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۳۰ ppm برآورد شد که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانومواد)، میزان حذف آلودگی TDS حدود ۱۷٪ افزایش یافت. همچنین این شکل رابطه معکوس غلظت نانوذرات  $TiO_2$

در آسفالت متخلخل با میزان حذف TDS برقرار است به طوری که بیشینه میزان حذف TDS مربوط به نانوذره ۸٪ با مقدار کاهش ۱۳/۸٪ بود. البته تغییرات میزان حذف TDS با غلظت آسفالت حاوی نانوذرات GO رفتار رابطه مشخصی نشان نداده و به نظر عامل افزایش آلاینده‌گی بتوان قلمداد کرد. این میزان حذف TDS در سایر پژوهش‌های پیشین (Badroodi et al. (2020) برای نانوذرات  $TiO_2$  و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۸/۵ و افزایش ۲/۵٪ نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد.

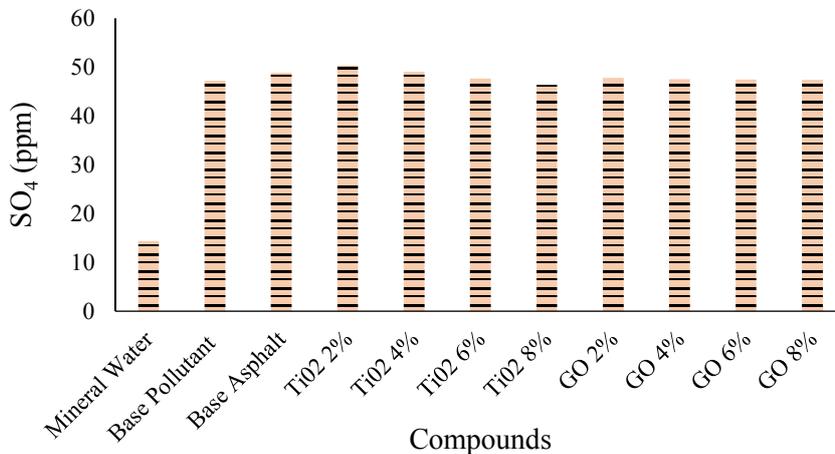


شکل ۷- اثر ترکیبات مختلف بر میزان حذف TDS  
Fig. 7 Effect of different compounds on TDS removal

معکوس ناچیزی برای غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در آسفالت متخلخل با آلاینده‌گی سولفات برقرار است به طوری که بیشینه میزان حذف سولفات مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۳٪/۲ بود. البته تغییرات میزان حذف آلودگی با غلظت آسفالت حاوی نانوذرات GO رفتار مشخصی نشان نمی‌دهد و بازه تغییرات آن کمتر از ۱٪ بود. این میزان حذف سولفات در سایر پژوهش‌های پیشین (Tanzadeh et al. 2017) برای نانوذرات  $TiO_2$  و GO به ترتیب مقادیر کاهش ۷ و ۳٪ را نشان می‌دهد که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می‌باشد.

### ۳-۷- میزان حذف سولفات

شکل (۸) مقایسه میزان حذف آلودگی در نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصدهای مختلف ۲ تا ۸ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف سولفات ( $SO_4$ ) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود متغیر سولفات در آب معدنی حدود ۱۴/۳۶ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۴۷/۲۱ ppm برآورد شده است. با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان حذف سولفات حدود ۴٪ افزایش یافت. همچنین این شکل تغییرات



شکل ۸- اثر ترکیبات مختلف بر میزان حذف سولفات  
Fig. 8 Effect of different compounds on  $SO_4$  removal

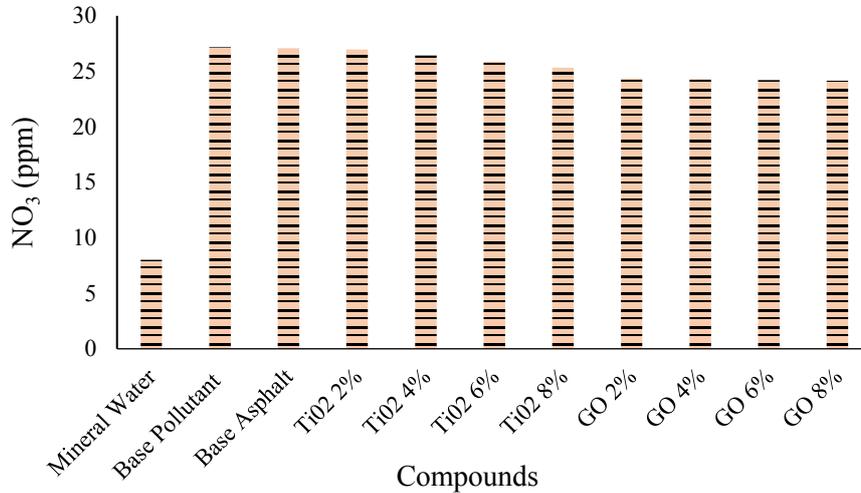
حدود ۸ ppm بوده و در محلول آلاینده پایه حدود ۲۷/۱۸ ppm برآورد شده است که با عبور این مقدار آلاینده از آسفالت پایه (آسفالت بدون نانو مواد)، میزان آلاینده  $NO_3$  حدود ۰/۴٪ کاهش یافت. همچنین این شکل رابطه معکوس ناچیز غلظت نانوذرات  $TiO_2$  در آسفالت متخلخل با  $NO_3$

### ۳-۸- میزان حذف $NO_3$

شکل (۹) مقایسه میزان حذف آلودگی در نانوذرات  $TiO_2$  و GO در درصدهای مختلف ۲ تا ۸ همراه با آسفالت پایه و محلول آلاینده و آب معدنی بر میزان حذف  $NO_3$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود  $NO_3$  در آب معدنی

بود. این میزان حذف آلودگی در سایر پژوهش‌های پیشین (Mousavi Rad et al. 2021) برای نانوذرات  $\text{TiO}_2$  و  $\text{GO}$  اکسید به ترتیب مقادیر کاهش ۱۲٪ و افزایش ۲٪ نشان که بیانگر نزدیکی به نتایج این پژوهش می باشد.

برقرار است به طوریکه بیشینه میزان حذف آلودگی مربوط به غلظت ۸٪ با مقدار کاهش ۸٪ همراه است. البته تغییرات میزان حذف آلودگی با غلظت آسفالت حاوی نانوذرات  $\text{GO}$  رفتار مشخصی نشان نمی دهد و بازه تغییرات آن کم تر از ۱۱٪



شکل ۹- اثر ترکیبات مختلف بر میزان نیترات

Fig. 9 Effect of different compounds on the  $\text{NO}_3$  removal

این در حالی است که نانوذرات  $\text{TiO}_2$  برتری محسوسی نسبت به نانوذرات  $\text{GO}$  داشت که این برتری با افزایش غلظت نیز بیش تر شد.

۴- نمونه آسفالتی حاوی نانوذرات  $\text{GO}$  با غلظت ۶٪ بهترین عملکرد را در مدول انعطاف پذیری داشت و به عنوان درصد بهینه معرفی شد.

۵- در بخش محیط زیستی، نمونه آسفالتی حاوی نانوذرات  $\text{TiO}_2$  با غلظت ۸٪ بهترین عملکرد را داشت طوری که مقایسه نتایج کیفی با در نظر گرفتن غلظت ۸٪، برای سولفات که تفاوت چشم گیری حاصل نشد. در سایر پارامترها نتایج حاکی از برتری نانوذرات  $\text{TiO}_2$  نسبت به  $\text{GO}$  بود.

#### دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده در این پژوهش در متن اصلی مقاله استفاده شده است

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که، هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش برای ارتقای عملکرد مکانیکی آسفالت متخلخل و کاهش آلاینده‌های موجود در رواناب سطحی و از نانومواد  $\text{TiO}_2$  و  $\text{GO}$  استفاده شد. این نانومواد به مخلوط آسفالتی اضافه و نمونه‌های آسفالتی متخلخل جدید ساخته شدند. برای بررسی و ارزیابی عملکرد نمونه‌ها بر روی آنها آزمایش‌های عملکردی مدول برجهندگی و درصد کاهش آلاینده‌ها انجام و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج کلی این پژوهش عبارت است از:

۱- نمونه‌های آسفالتی متخلخل اصلاح شده با نانوذرات  $\text{GO}$  به‌طور متوسط دارای مقادیر سختی بالاتری نسبت به نمونه معمولی در همه دماها هستند.

۲- درصد بهینه نانوذرات  $\text{GO}$  در آزمون برابر با ۶٪ بین درصد‌های مورد بررسی در این پژوهش بود و این در حالی است که آسفالت متخلخل حاوی نانو ذرات  $\text{TiO}_2$  اثر چندانی بر نمونه‌های آسفالتی از نظر انعطاف پذیری نداشت.

۳- نانوذرات  $\text{GO}$  به‌جز در موارد کاهش نیترات و سرب، در مابقی موارد یا رفتار غیرمشخص یا افزایشی از خود نشان داد.

## References

- American Society for Testing & Materials (ASTM). (1995). *American Standard test method for indirect tension test for resilient modulus of bituminous mixtures*. D4123. West Conshohocken, USA, <https://www.astm.org/standards/d4123>
- American Society for Testing & Materials (ASTM), (2017). *Standard guide for small-scale environmental chamber determinations of organic emissions from indoor materials/products*. D5116-17, West Conshohocken, USA, DOI: [10.1520/D5116-17](https://doi.org/10.1520/D5116-17)
- Arshad, A. K., Ahmad, J., & Masri, A. K. (2016). Rutting resistance of nanosilica modified porous asphalt. *Int. J. Civil Eng. Tech.*, 10(1), 2374-2284.
- Badroodi, S. K., Keymanesh, M. R. & Shafabakhsh, G. (2020). Experimental investigation of the fatigue phenomenon in nano silica-modified warm mix asphalt containing recycled asphalt considering self-healing behavior. *J. Construct. Build. Mater.*, 246, 117558, DOI: [10.22075/JRCE.2019.17478.1331](https://doi.org/10.22075/JRCE.2019.17478.1331)
- Cao, B., Zho, J., Li, A., & Sun. M. (2022). Laboratory investigation on influence of mixture parameters on noise reduction characteristics of porous asphalt concrete. *Int. J. Pavement. Eng.*, DOI: [10.1080/10298436.2022.2092619](https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2092619)
- Dispat, N. Poompradub, S. S. & Kiatkamjornwong, S. (2020). Synthesis modified starch-graft-polyacrylate superabsorbent polymer for agricultural application. *J. Carbohydr. Polymer*, 249, 116862. DOI: [10.1016/j.carbpol.2020.116862](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116862)
- Jiang, W., A. Sha, A., Xiao, J., Li, Y. & Huang, Y. (2015). Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *J. Construct. Build. Mater.*, 100, 102-110. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055)
- Kamboozia, N. & Mousavi Rad., 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. *J. Mater. Civil Eng.*, 34(5), DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.000418](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.000418)
- Kandhal, P. S. & Mallick, R. B. (1999). Design of new-generation open-graded friction courses. *National Center for Asphalt Technology*.
- Li, R., Xiao, F., Amirkhani, S., You, Z. & Huang, J. (2017). Developments of nano materials and technologies on asphalt materials-A review. *Construct. Build. Mater.*, 143, 633-648. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.158)
- Mousavi Rad, S., Ameri, M. & Kamboozia, N. (2021). Feasibility of simultaneously improving the ability to absorb pollutants from surface runoff and the mechanical performance of pavements by using porous asphalt mixture modified with photocatalyst nanomaterials. M.E. Dissertation. Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran [In Persian].
- Ma, X., Li, Q., Cui, Y. C. & Ni, A. Q. (2018). Performance of porous asphalt mixture with various additives. *Int. J. Pavement. Eng.*, 19(4), 355-361, DOI: [10.1080/10298436.2016.1175560](https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1175560)
- Parvin Nia, M., Rakhshandeh Rou, G. & Manjemi, P. (2007). Investigation of the quality and restoration of urban floods in Shiraz City, 2<sup>nd</sup> Conf. exhibition of environmental engineering of the university of Tehran, Tehran, Iran [In Persian].
- Rocha Segundo, I., Dias, E., Fernandez, F., Freitas, E., Costa, M., & Carneiro, J. O. (2019). Photocatalytic asphalt pavement: the physicochemical and rheological impact of TiO<sub>2</sub> nano/microparticles and ZnO microparticles onto the bitumen. *J. Road Mater. Pavement Design.*, 20(6), 1452-1467, DOI: [10.1080/14680629.2018.1453371](https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1453371)
- Rosen, R. M., Ballester, T. P., Houle, J. J. & Avellaneda, P. (2009). Seasonal performance variations for storm-water management systems in cold climate conditions. *J. Environ. Eng.*, 135, 128-137, DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(128\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(128))
- Shafabakhsh, G. Jafari Ani, O., & Mirabdolazimi, S. M. (2021). Rehabilitation of asphalt

- pavement to improve the mechanical and environmental properties of asphalt concrete by using of nanoparticles. *J. Rehabil. Civil Eng.*, 9(2), 1-20. DOI: [10.22075/JRCE.2019.17407.1326](https://doi.org/10.22075/JRCE.2019.17407.1326)
- Slebi-Acevedo, C. J., Lastra-González, P., Indacochea-Vega, I., & Castro-Fresno, D. (2020). Laboratory assessment of porous asphalt mixtures reinforced with synthetic fibers. *J. Construct. Build. Mater.*, 23(4), 117-224. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2019.117224](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117224)
- Tanzadeh, J., Tanzadeh, R., Nazari, H. & Kamvar, N. (2017). Fatigue evaluation of hot mix asphalt (HMA) mixtures modified by optimum percent of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *J. Adv. Eng. Forum*, 1, 55-62, DOI: [10.4028/www.scientific.net/AEF.24.55](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.24.55)
- Watson, D. E., Masad, E., Ann Moore, K., Williams, K., & Cooley, L. A. (2004). Verification of voids in coarse aggregate testing: determining stone-on-stone contact of hot-mix asphalt mixtures. *J. Transport. Res. Record.*, 1891(1), 182-190. DOI: [10.3141/1891-21](https://doi.org/10.3141/1891-21)
- West, R.C., Rodezno, C., Leiva, F., & Taylor, A. J. (2018). Regressing air voids for balanced HMA mix design [Final report]. Accessed on 12.02.2022 available at: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/40787>
- Yu, H, Dai, W, Qian, G., Gong, X., Zhou, D., Li, X. & Zhou, X. (2020) The NO<sub>x</sub> degradation performance of nano-TiO<sub>2</sub> coating for asphalt pavement. *J. Nanomater.*, 10(5), 897. DOI: [10.3390/nano10050897](https://doi.org/10.3390/nano10050897)
- Zhang, K., Anupam, A., Scarpas, C. & Kasbergen, S. (2020). Effect of stone-on-stone contact on porous asphalt mixes, micromechanical analysis. *Int. J. Pavement Eng.*, 21(8), 990-1001. DOI: [10.1080/10298436.2019.1654105](https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1654105)