

The Effect of Nanographene and Nano Titanium Dioxide on the Mechanical Properties and Chloride Ion Penetration in Concrete

Leila Shahryari¹*, Mohammadamin Abedzadeh², Hossein Zarei¹

¹ Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

² Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology (Kish Campus), Kish, Iran.

Review History:

Received: May, 05, 2025

Revised: Jul. 10, 2025

Accepted: Aug. 09, 2025

Available Online: Aug. 13, 2025

Keywords:

Chloride Ion Penetration

RCMT Method

Nanographene

Nano Titanium Dioxide

Marine Structures

ABSTRACT: Reinforced concrete marine structures located in coastal and corrosive environments are subjected to the attack of destructive chloride ions. In addition, sea waves and coastal storms impose significant stresses on the concrete, resulting in corrosion, abrasion, repeated cycles of wetting and drying, and chemical reactions involving chloride and sulfate ions. One of the main challenges for concrete structures near the shore is their high permeability to moisture and water, which leads to issues such as deterioration and cracking throughout the concrete. In particular, chloride and sulfate ions, which are among the primary causes of corrosion in reinforced concrete, can easily penetrate the structure due to high permeability and cause extensive damage. Therefore, it is essential to employ methods to minimize the permeability of concrete. In this study, with the aim of reducing concrete permeability and improving its durability against chloride ion penetration, a combination of nanographene and nano titanium dioxide was used in the concrete mix. The tests conducted in this study included slump, compressive strength at different ages, water absorption in hardened concrete, and durability against chloride ion penetration using the RCMT method. The results demonstrated that the use of the nanographene and nano titanium dioxide combination did not significantly affect the concrete slump, but the addition of nanographene negatively impacted the cement hydration reaction and reduced the compressive strength of the concrete. Specifically, the addition of 1.5% nanographene decreased the 90-day compressive strength by up to 22.5%. However, this amount of nanographene reduced the chloride ion penetration area in the concrete by up to 47%.

1- Introduction

Marine concrete structures such as docks, breakwaters, and infrastructures related to the oil and gas industry are of great importance for coastal regions, especially in southern Iran. These structures, due to constant exposure to seawater, aggressive ions like chloride and sulfate, high humidity, and temperature fluctuations, are highly susceptible to corrosion, reduced durability, and substantial maintenance costs. In recent years, the use of nanotechnology and the incorporation of various nanoparticles have emerged as advanced solutions for improving the properties of concrete and enhancing its resistance to environmental threats. This research evaluates the effectiveness of graphene oxide nanocolloid and nano titanium dioxide in increasing the durability and reducing the permeability of marine concrete.

2- Methodology

In this study, local sand and gravel, type II cement, and a superplasticizer were employed to produce concrete samples. High-purity (above 99%) nano titanium dioxide

with nanometric dimensions and single-layer graphene oxide nanocolloid with a 70% concentration were used. To ensure uniform distribution of nanoparticles within the concrete mixture, these materials were first mixed with the superplasticizer and then added to the fresh concrete to secure homogeneous dispersion. To assess the performance of concrete containing nano-materials, six different mix designs were developed, and a total of 66 laboratory samples were prepared. The main experiments included slump (workability of fresh concrete), compressive strength at 7, 28, and 90 days, water absorption, and chloride ion penetration. In the various mixes, nano titanium dioxide was used at 0.4% by cement weight, and graphene oxide nanocolloid was tested at dosages from 0.25% to 1.5% by water weight.

Laboratory results indicated that although the use of graphene oxide nanocolloid led to a relative decrease in compressive strength, it significantly reduced water absorption and chloride ion permeability of concrete. Maximum reduction in permeability and absorption occurred at the highest dosage of nanocolloid; however, increasing

*Corresponding author's email: Leila.shahryari@iau.ac.ir

Table 1. Mixing plan and weight values of materials for making each cubic meter of concrete

Nano colloid Graphene	Nano TiO₃	Water	Superplasticizer	Sand	Gravel	Cement	Name
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
0	2	160	4	1200	600	400	G-T-C
0.4	2	160	4	1200	600	400	G-T-1
0.8	2	160	4	1200	600	400	G-T-2
1.2	2	160	4	1200	600	400	G-T-3
1.6	2	160	4	1200	600	400	G-T-4
2.4	2	160	4	1200	600	400	G-T-5

beyond this did not further improve performance and, in fact, resulted in a more pronounced drop in compressive strength. The reduction in strength was attributed to interference with cement hydration reactions and a decrease in the formation of essential cementitious phases. The simultaneous use of nano titanium dioxide and graphene oxide nanocolloid also had a remarkable positive effect on improving the watertightness and durability of the resulting concrete, so that their combined application led to substantial improvements compared to ordinary concrete.

Overall, the findings showed that the controlled and targeted use of graphene oxide nanocolloid and nano titanium dioxide can considerably decrease permeability, water absorption, and the passage of harmful ions such as chloride in marine concretes, thereby increasing the durability and lifespan of these structures. However, excessive use of graphene oxide nanocolloid leads to a notable reduction in compressive strength, and it is crucial that the quantities of these nano-materials be optimized and kept balanced in concrete design.

3- Results and Discussion

In this study, the results of concrete testing using nano titanium dioxide and graphene oxide nanocolloid were investigated. The findings showed that as the amount of liquid graphene oxide nanocolloid in the concrete increases, the compressive strength decreases. This is due to the fact that graphene oxide nanocolloid hinders the formation of calcium and ettringite in the cement within concrete, thereby interfering with the cement hydration reaction. In contrast, previous studies using solid graphene nanoparticles in powder form demonstrated increases in both compressive and flexural strength. It appears that the graphene used in this research, due to its higher photocatalytic activity compared to cementitious materials and the increased electrical conductivity from the presence of graphene sheets, generates semiconductor electrons in the material, which inhibits the cement hydration reaction. Moreover, apart from the form in which graphene oxide nanocolloid is used, it seems that the type of material based on the manufacturer can also be a determining factor in the results.

On the other hand, the graphene oxide nanocolloid used

in this study has effectively prevented the penetration of harmful chloride ions into the concrete and also significantly reduced the water absorption of the concrete. Thanks to its long, continuous chains, graphene creates a protective layer that, as long as the concrete is not subjected to extreme or heavy loads, can effectively maintain its hydrophobicity and impermeability. Therefore, it would be a good idea to develop a solution combining graphene oxide nanocolloid and nano titanium to be used for repairing and strengthening concrete surfaces, in order to create a hydrophobic, impermeable, and abrasion-resistant surface.

4- Conclusions

1. The use of graphene oxide nanocolloid and nano titanium dioxide has no significant effect on the slump of concrete and does not cause any changes in it.
2. The use of nano titanium dioxide and graphene oxide nanocolloid leads to a reduction in the compressive strength of concrete. Specifically, the addition of 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% and 1.5% results in a decrease in the final compressive strength (at 90 days) of concrete by 2.8%, 7.4%, 11.7%, 16.5%, and 22.5%, respectively.
3. The use of nano titanium dioxide and graphene oxide nanocolloid reduces the water absorption of concrete. In particular, adding 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% and 1.5% liquid graphene oxide nanocolloid into the concrete decreases the initial water absorption (at 30 minutes) by 1.05%, 0.99%, 0.76%, 0.53%, and 0.24%, respectively, and the final water absorption (after 72 hours) by 2.68%, 2.29%, 1.97%, 1.28%, and 0.86%, respectively.
4. The use of nano titanium dioxide and graphene oxide nanocolloid can reduce the chloride ion penetration in concrete. Specifically, adding 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% and 1.5% liquid graphene oxide nanocolloid decreases the chloride ion penetration area by 14%, 23%, 39%, 45%, and 47%, respectively.

References

- [1] H.Soo Lee, S. Galato, M. Peterson, H.G. Riella, A.M. Bernardin, Inorganic Pigments Made From The Recycling Of Coal Mine Drainage Treatment Sludge, J.Environ. Manag. 88 (2008) 1280–1284.

- [2] Nedad Naderi, G., Khoshkalam, K., & Rostami, M. (2021). Comparative application of titanium dioxide, nano-silica, and silicon fume in self-cleaning properties of concrete façade for sustainable development. *Structural Engineering and Construction*, 8(Special Issue 2), 44–58.
- [3] Yousefnia Nia, H., & Jabbari, M. M. (2022). Application of alumina nanoparticles to improve some mechanical properties and enhance wear resistance of concrete. *Civil Engineering Journal of Amirkabir University*, 54(11), 4343–4364. <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21040.7603>
- [4] Shokrani, M., & Naderi, M. (2021). Experimental study of the effect of graphene oxide nanoparticles on the mechanical behavior of cementitious composites and water transfer characteristics in concrete. *Structural Engineering and Construction*, 8(Special Issue 3), 39–56.
- [5] Shokrani, M., & Naderi, M. (2023). Evaluation of compressive strength and permeability of G-OX concrete using the ultrasonic method. *Civil Engineering Journal of Amirkabir University*, 55(2), 471–490.
- [6] Farhmandzadeh, D., & Dashti, M. (2023). Nanomaterials and their applications in concrete. *New Engineering Sciences Research*, 48(8), 9–16.
- [7] Madandost, R., & Deylami Pashtejoui, S. (2021). A study on the compressive strength and elastic modulus of self-compacting concrete containing nanomaterials. *Structural Engineering and Construction*.



تأثیر نانو کلئید اکسید گرافن و نانو دی اکسید تیتانیوم بر خواص مکانیکی و نفوذ یون کلراید در بتن

لیلا شهریاری^{۱*}، محمدمبین عابدزاده^۲، حسین زارعی^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی عمران، دانشگاه صنعتی شریف (پردیس کیش)، کیش، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۵/۲۲

کلمات کلیدی:

نفوذ یون کلراید

روش RCMT

نانو کلئید اکسید گرافن

نانو دی اکسید تیتانیوم

سازه‌های دریایی

خلاصه: سازه‌های دریایی بتن مسلح که در مناطق ساحلی و خورنده باشند مورد هجوم یون‌های مخرب کلراید قرار می‌گیرند. علاوه بر این، امواج دریا و وزش طوفان‌های ساحلی با وارد آوردن تنش‌های موثر به بتن، موجب بروز خوردگی، ساییدگی، تغییرات متوالی خیس و خشک شدن و همچنین واکنش‌های شیمیایی یون‌های کلراید و سولفات در بتن می‌شوند. یکی از معضلات اصلی سازه‌های بتنی نزدیک به ساحل، نفوذپذیری بالای آن‌ها در برابر رطوبت و آب است که این ویژگی سبب بروز مشکلاتی نظیر خرابی و ترک خوردگی در تمامی بخش‌های بتن می‌شود. به‌ویژه، یون‌های کلراید و سولفات که از مهم‌ترین عوامل خوردگی بتن مسلح به شمار می‌روند، می‌توانند به راحتی به دلیل نفوذپذیری بالا وارد سازه شده و موجب آسیب‌های گسترده گردند. بنابراین باید با اتخاذ روش‌هایی بتوان میزان نفوذپذیری بتن را به حداقل رساند. در این تحقیق با هدف کاهش نفوذپذیری بتن و افزایش دوام آن در برابر نفوذ یون کلراید از ترکیب نانو کلئید اکسید گرافن و نانو دی اکسید تیتانیوم در بتن استفاده شد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل اسلامپ، مقاومت فشاری در سنین مختلف، میزان جذب آب در بتن سخت شده و دوام بتن در برابر نفوذ یون کلراید به روش RCMT می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ترکیب نانو کلئید اکسید گرافن و نانو دی اکسید تیتانیوم تأثیر محسوسی بر روی اسلامپ بتن نداشت. اما افزودن نانو کلئید اکسید گرافن آثار مخربی بر روی واکنش هیدراتاسیون سیمان داشته و میزان مقاومت فشاری بتن را کاهش داد. بطوریکه افزودن ۱/۵٪ نانو کلئید اکسید گرافن مقاومت فشاری ۹۰ روزه بتن را تا ۲۲/۵٪ کاهش داد. در حالیکه این مقدار نانو کلئید اکسید گرافن در بتن تا ۴۷٪ میزان مساحت نفوذ یون کلراید را در بتن کاهش داد.

۱- مقدمه

بتن، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، نقش مهمی در ساخت سازه‌های دریایی ایفا می‌کند. اما تخلخل بالای بتن، چالش‌های متعددی را در برابر دوام و ماندگاری آن به‌ویژه در محیط‌های مهاجم به همراه داشته است [۱]. سازه‌های بتنی دریایی نظیر اسکله‌ها، سازه‌های موج‌شکن، تأسیسات نفت و گاز و پل‌های ساحلی، بخش مهمی از زیربنای اقتصادی و صنعتی مناطق ساحلی و دریایی، به‌ویژه خلیج فارس و دریای عمان را تشکیل می‌دهند. با این حال، محیط‌های دریایی یکی از مهاجم‌ترین و چالش‌برانگیزترین محیط‌ها برای سازه‌های بتنی محسوب می‌شوند. حضور مداوم یون‌های کلراید، سولفات‌ها، دی اکسید کربن، سیکل‌های تر و خشک شدن، تغییرات دمایی شدید و رطوبت بالا، باعث تشدید واکنش‌های شیمیایی و تسریع خوردگی فولاد مدفون در بتن می‌گردد [۲]. نفوذ یون‌های کلراید به

درون بتن، از اصلی‌ترین عوامل شروع و پیشرفت خوردگی میلگردهاست که منجر به کاهش دوام، ترک خوردگی، کاهش مقاومت، کاهش عمر مفید و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌ها می‌شود. دوام پایین سازه‌ها در این محیط‌ها هزینه‌های بسیار زیادی را در تعمیر و نگهداری ایجاد کرده و نیازمند نوآوری‌های پیشرفته در ترکیبات بتن است. نفوذ آب و سایر مواد شیمیایی به درون بتن، منجر به فرآیندهای تخریبی ساختار شده و کاهش عمر مفید آن را به دنبال دارد [۳]. در چنین شرایطی، سازه‌های بتنی دچار خوردگی فولاد مدفون، ترک‌های ریز و عمیق، واکنش‌های قلیایی-سیلیسی و کاهش تدریجی مقاومت فشاری می‌شوند که فرسایش سازه و هزینه‌های سنگین تعمیرات را به همراه دارد. در برخی موارد شدت تخریب ناشی از این عوامل چنان قابل توجه است که خسارت‌های حاصل، با آسیب‌های ناشی از جنگ مقایسه می‌شود [۴].

نفوذپذیری بتن یکی از مهم‌ترین عوامل مرتبط با دوام آن به شمار

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Leila.Shahryari@iau.ac.ir





شکل ۱. تخریب بتن ستون اسکله و کاور بتن یک سازه دریایی تحت شرایط خوردنده [۱،۲،۳]

Fig. 1. Deterioration of concrete pier columns and concrete cover of a marine structure under corrosive conditions [1,2,3]

بهبود تراکم، موجب افزایش مقاومت بتن در برابر مواد شیمیایی مخرب می‌شود [۱۰].

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات مختلف تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن دارد. لئو و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که چهار نوع نانو ذره شامل نانو اکسید تیتانیوم، سیلیس، روی و آلومینیوم با مقادیر بهینه و کنترل‌شده می‌توانند خواصی مانند زمان سخت‌شدگی، مقاومت فشاری و فرایند هیدراتاسیون را بهبود دهند، در حالیکه مصرف بیش از حد موجب کاهش سیالیت و کلوخه شدن می‌شود [۱۱]. ونگ‌کیو و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر اکسید گرافن را بررسی کردند و دریافتند که افزودن درصد کمی از این ماده باعث افزایش قابل‌توجه مقاومت مکانیکی می‌گردد [۱۲]. دوو هونجی یانگ و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که نانو کلئوید اکسید گرافن با مقادیر بهینه می‌تواند مدول الاستیسیته و مقاومت کششی را افزایش دهد، اما مقادیر بیش از حد نتایج معکوسی خواهد داشت [۱۳]. در مطالعات لی جی‌وای و همکاران (۲۰۲۱)، نانولوله‌های کربنی توانستند رفتار مکانیکی بتن را بهبود بخشند و عملکرد مطلوبی در پراکندگی و کاهش تخلخل داخلی بتن نشان دهند [۱۴]. پن ژو و همکاران (۲۰۲۱) نیز تأیید کردند که اکسید گرافن به میزان کم، باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری و خمشی بتن شده و فرایند هیدراتاسیون را ارتقا می‌دهد [۱۵]. مطالعات خزایی فیاض‌جهانی و همکاران (۲۰۲۱) و احسانی و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که دی‌اکسید تیتانیوم با درصدهای کم باعث بهبود قوام، یکنواختی و خودتمیزشوندگی بتن می‌شود. اما استفاده بیش از اندازه تأثیرات منفی بر استحکام بتن دارد [۱۶، ۱۷]. نظری و همکاران (۲۰۲۰) درصد بهینه‌ای برای دی‌اکسید تیتانیوم در بتن خودمترکم معرفی کردند که باعث

می‌رود. ساختار متخلخل بتن، شامل ترک‌ها، منافذ مویینه و مجراهای داخلی، شرایطی را فراهم می‌آورد که مواد مخرب به راحتی در آن جریان یافته و باعث آسیب دیدن سازه شوند. با توجه به اهمیت کاهش نفوذپذیری در دوام بتن، بررسی عوامل مؤثر بر آن نظیر انتخاب سنگدانه‌های مناسب، میزان نرمی و دانه‌بندی سیمان، نسبت آب به سیمان، عمل‌آوری بتن و ضخامت مناسب کاور بتنی، از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. از سوی دیگر، با رشد صنعتی شدن مناطق ساحلی مانند سواحل جنوبی ایران، افزایش غلظت آلاینده‌ها نظیر دی‌اکسید کربن، شرایط تخریبی بیشتری برای سازه‌های بتنی ایجاد کرده است. این امر، ضرورت یافتن راهکارهایی برای افزایش دوام سازه‌ها را دوچندان می‌کند [۶]. شکل شماره ۱ تخریب بتن ستون اسکله و کاور بتن یک سازه دریایی تحت شرایط خوردنده را نشان می‌دهد [۷، ۸].

یکی از مهم‌ترین راهکارهای مطرح در سال‌های اخیر برای مقابله با آسیب‌های محیط دریایی، بهبود ساختار داخلی بتن و کاهش نفوذپذیری به کمک فناوری‌های نوین، به‌ویژه فناوری نانو است. نانوذرات با اندازه بسیار کوچک و سطح فعال بالا، توانایی پرکردن منافذ ریز و ترک‌های مویینه در ماتریس سیمان را داشته و به‌واسطه ایجاد ساختار مترکم‌تر، مسیر حرکت مواد مهاجم همچون یون‌های کلراید را مسدود می‌کنند. این ویژگی منجر به کاهش چشمگیر نفوذپذیری و بهبود خواص مکانیکی بتن می‌شود [۹]. از جمله نانوذرات مورد توجه می‌توان به نانو ذرات گرافن و نانو دی‌اکسید تیتانیوم اشاره کرد. نانو ذرات گرافن به دلیل ساختار لایه‌ای و خواص مکانیکی ممتاز خود، افزون بر بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن، نقش موثری در کاهش ترک‌خوردگی و افزایش دوام داراست. نانو دی‌اکسید تیتانیوم نیز با ایجاد واکنش‌های شیمیایی اصلاح‌کننده و خواص فوتوکاتالیستی، علاوه بر

تغییرات در ساختار سیمانی بتن طراحی شده و به عنوان یک راهکار پیشرفته در مقابله با مشکلات دوام سازه‌های بتنی مورد آزمون قرار گرفته است. در نهایت، این تحقیق با بررسی روابط میان عواملی نظیر طراحی مناسب، انتخاب مصالح نانو، و شرایط محیطی خاص، تلاش دارد تا مسیرهایی کاربردی برای کاهش خسارت‌های ناشی از خوردگی و تخریب سازه‌های بتنی ارائه دهد. از مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق، می‌توان به ارائه راهکارهایی نوین برای طراحی سازه‌های آب‌بند و مقاوم در برابر خوردگی اشاره کرد که نقش عمده‌ای در کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌ها و توسعه پایدار در صنعت ساختمان خواهند داشت. شکل شماره ۲ فلوچارت روند انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- شن

شن مصرفی جهت ساخت بتن مورد آزمایش در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر بود و از معدن دوکوهک استان فارس تهیه گردید. وزن مخصوص ظاهری در حالت اشباع با سطح خشک، ۲۶۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و میزان جذب آب آن برابر با ۱/۵٪ تعیین گردید. جدول شماره ۱ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

۲-۲- ماسه

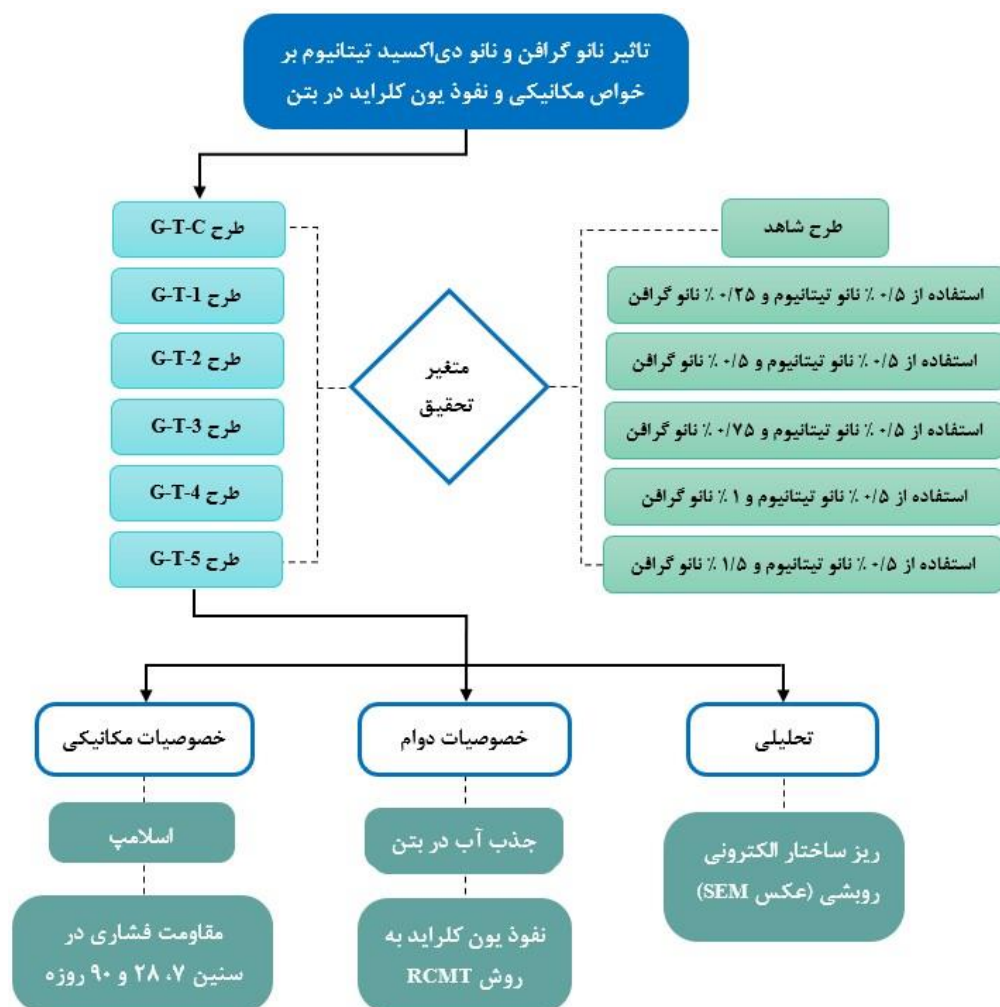
ماسه مصرفی جهت ساخت بتن در این تحقیق از معادن موجود در منطقه دوکوهک فارس تهیه گردید. حداکثر اندازه اسمی این ماسه ۰-۴/۷۵ میلی‌متر بود و وزن مخصوص ظاهری آن در حالت اشباع با سطح خشک، ۲۶۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و مقدار جذب آب ۲/۳٪ و مدول نرمی ۳/۱ تعیین گردید. جدول شماره ۲ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

۲-۳- دانه بندی

در آزمایش دانه بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی با ایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شماره‌بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. قابل ذکر است که برای دانه بندی مصالح درشت دانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده دانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM-C136 دانه بندی از الک‌های سیمی استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده گردید که در شکل شماره ۳ نشان داده شده

افزایش سرعت هیدراتاسیون و مقاومت خمشی در سنین اولیه می‌شود[۱۸]. سالمی و همکاران (۲۰۲۰) گزارش کردند که ترکیب نانو سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن موجب افزایش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد می‌گردد، که نانو سیلیس عملکرد بهتر نشان داد[۱۹]. مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۹) نشان داد که دی‌اکسید تیتانیوم در برابر نفوذ آب دریا، تجمع نمک کلرید و سایش مقاومت بتن را بهبود می‌بخشد[۲۰]. سنگیز و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی نانو الیاف گرافن، افزایش چشمگیر مقاومت خمشی بتن را تأیید کردند[۲۱]. دوی و همکاران (۲۰۱۹) برای درصدهای مختلف اکسید گرافن در بتن، بهبود مقاومت فشاری و کششی را گزارش کردند[۲۲]. اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر مکانیزم سه‌گانه نانو دی‌اکسید تیتانیوم در ماتریس بتن را بررسی کردند که موجب افزایش مقاومت فشاری و تراکم خمیر سیمان شد[۲۳]. محمدی و همکاران (۲۰۱۸) تأیید کردند که استفاده از نانو کلئوئید اکسید گرافن و اکسید گرافن مقاومت مکانیکی بتن را بهبود می‌دهد، اما نانو کلئوئید اکسید گرافن تأثیر بیشتری دارد[۲۴]. سنگلاکپام و همکاران (۲۰۱۷) نیز نشان دادند که استفاده از اکسید گرافن نفوذناپذیری بتن را در برابر حملات سولفاتی و کربونات افزایش می‌دهد[۲۵]. بیرقی و همکاران (۲۰۱۶) دریافتند که افزودن نانو اکسید تیتانیوم و پلی‌پروپیلن مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری را افزایش می‌دهد[۲۶]. به طور کلی، تحقیقات نشان می‌دهند که افزودن نانو اکسید گرافن و سایر نانوذرات در مقادیر بهینه می‌تواند خواص مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری و خمشی را به طور محسوسی تقویت کند، اما مصرف بیش از حد آن‌ها باعث کاهش عملکرد خواهد شد.

هدف این تحقیق، استفاده از نانو تکنولوژی جهت افزایش دوام و کاهش نفوذپذیری بتن با تأکید بر کاهش نفوذپذیری بتن است. این تحقیق تلاش دارد تا با استفاده از مواد و روش‌های جدید، به کاهش خسارت‌های ناشی از خوردگی، ترک‌خوردگی و عدم مقاومت بتن در برابر شرایط سخت محیطی کمک کند. از اهداف اصلی این تحقیق می‌توان به کاهش نفوذپذیری بتن، افزایش مقاومت مکانیکی و دوام آن برای طراحی سازه‌های مقاوم برای محیط‌های مهاجم اشاره کرد. با توجه به محدودیت‌های موجود در بتن‌های معمولی، بهره‌گیری از فناوری نانو امکان ارتقای خواص بتن و دستیابی به محصولاتی با عملکرد بهتر و چندمنظوره را فراهم می‌کند. یکی از نوآوری‌های این تحقیق، مطالعه مکانیزم تأثیر نانو کلئوئید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید تیتانیوم بر خواص بتن و ارزیابی تعامل این دو ماده در بهبود نفوذناپذیری و افزایش دوام سازه‌های بتنی است. این ترکیب نوین با هدف کاهش تخلخل، پر کردن منافذ مویینه و خنثی‌سازی عوامل مهاجم از طریق



شکل ۲. فلوچارت مراحل آزمایشگاهی در این تحقیق

Fig. 2. Flowchart of laboratory steps in this research

جدول ۱. مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

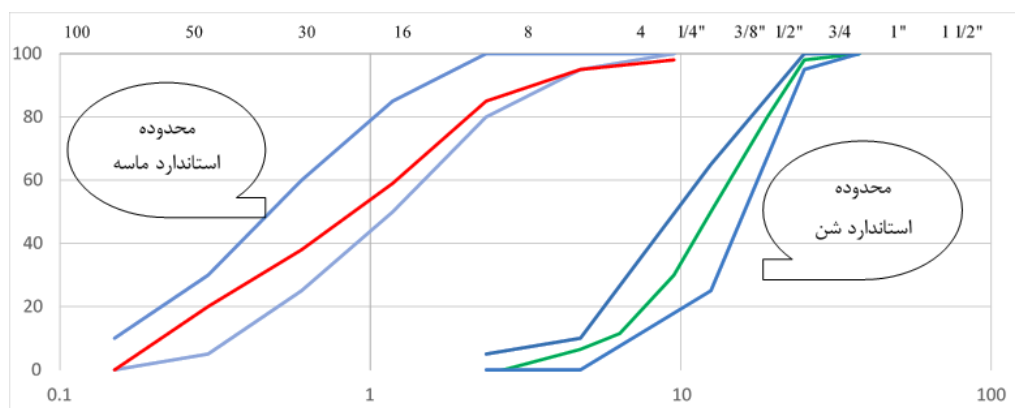
Table 1. Specifications of sand used in concrete production

وزن مخصوص SSD	میزان جذب آب	حداکثر قطر سنگدانه	نوع سنگدانه
kg/m ³	%	mm	شن
۲۶۳۰	۱/۵	۱۹	

جدول ۲. مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

Table 2. Specifications of sand used in concrete manufacturing

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه mm	مدول نرمی	وزن مخصوص SSD kg/m ³	جذب آب %
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۲۶۰۰	۲/۳



شکل ۳. دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

Fig. 3. Sand and gravel grading used to make concrete and its compliance with the ASTM-C33 standard range

جدول ۳. ساختار شیمیایی سیمان مصرفی

Table 3. Chemical structure of cement used

Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	C ₃ S	CaO	SO ₃	MgO
٪۳/۹۵	٪۴/۷۰	٪۲/۹۰	٪ ۲۲/۶۸	٪ ۶۰/۴۶	٪۱/۳۵	٪۲/۲۰

۴-۲- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق تیپ ۲ فارس می باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مربع است. ساختار شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر شناسه منتشر شده از طرف شرکت سازنده این سیمان می باشد ارائه شده است.

است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته اند، می توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود [۲۰]. در منحنی دانه بندی، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می باشد.

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی ابرروان کننده مصرفی

Table 4. Physical properties of the superlubricant used

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	pH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی رنگ	۱/۱ gr/cm ³	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱٪	۵/۵۸	مایع	۱٪ تا ۳٪ وزن سیمان

جدول ۵. مشخصات نانو دی اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق

Table 5. Specifications of titanium oxide nano powder used in this research

خلوص ماده	اندازه ذرات	pH	چگالی	مساحت سطح ویژه	رنگ	فاز
%	nm		gr/cm ³	gr/m ²	ظاهری	
۹۹	۱	۵/۵ - ۶	۰/۰۴ - ۰/۰۶	<۲۴۰	سفید	آناتاز

۲-۵- ابرروان کننده

استفاده از محصولات روان کننده یا کاهنده آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می گیرد [۲۷]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تامین روانی مدنظر از ابرروان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات، استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق جدول شماره ۴ می باشد.

۲-۶- نانو دی اکسید تیتانیوم

نانو مواد به کار رفته در این مطالعه، به صورت اکسید و به شکل پودری می باشد که توسط شرکت آمریکایی Us Research TInomaterials تولید شده است. این نانو اکسید تیتانیوم دارای خلوص بیش از ۹۹٪ است که دارای فاز آناتاز می باشد و حداکثر اندازه آن یک نانومتر است. بدلیل آنکه نانو دی اکسید تیتانیوم ماده ای آب دوست است و احتمال تشکیل کلوخه را در بتن افزایش می دهد، ابتدا آن را با روان کننده ترکیب و بوسیله همزن با دور تند مخلوط گردید تا ذرات آن با روان کننده حل شده و در ترکیب بتن بطور یکسان و یکنواخت پخش شود. سایر مشخصات فیزیکی این محصول مطابق با جدول شماره ۵ می باشد.



شکل ۴. نانو اکسید تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 4. Titanium oxide nano powder used in this research

جدول ۶. مشخصات فیزیکی نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی

Table 6. Physical characteristics of the graphene oxide nano colloid used

نماد	Graphene
شکل ظاهری	مایع
رنگ	سیاه
خلوص	۵٪
تعداد لایه	۱
هدایت حرارتی	۳۰۰۰ m/k
نام شرکت ارائه دهنده محصول	نوآوران نانو مقیاس برهان / ایران

جدول ۷. ساختار شیمیایی نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی

Table 7. Chemical structure of the consumed graphene oxide nanocolloid

C	O	S	H	N
۷۲٪	۲۶٪	۰/۵٪	۰/۹٪	۰/۶٪



۲-۷- نانو کلئوید اکسید گرافن

نانو کلئوید اکسید گرافن از اتم‌های کربن به صورت ساختار شش ضلعی تشکیل شده است. این ساختار به دلیل امکان تعامل بیشتر اتم‌ها با مولکول‌های اطراف، نسبت سطح به حجم بالا و استحکام کششی فوق العاده، برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها بسیار مناسب هستند. نانو کلئوید اکسید گرافن نیز با ویژگی‌هایی چون مقاومت بالا، هدایت حرارتی عالی، انعطاف‌پذیری، مدول الاستیسیته بالا و سازگاری با محیط زیست، ماده‌ای ارزشمند محسوب می‌شود. نانو کلئوید گرافن به طور خاص نماد شیمیایی استاندارد و مشخصی ندارد. زیرا شامل ذرات بسیار ریز گرافن است که در یک محیط مایع معلق هستند [۲۹]. در این تحقیق نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی از نوع تک لایه و بصورت مایع با غلظت ۵٪ استفاده شد که توسط شرکت دانش‌بنیان نانو مقیاس برهان / ایران ارائه می‌شود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی و تصویر این محصول به ترتیب به شرح جدول و شکل شماره ۶ و ۷ و ۵ می‌باشد.

شکل ۵. نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی بصورت مایع با غلظت ۵٪

Fig. 5. Graphene oxide nano colloid used as a liquid with a concentration of 5%.

جدول ۸. شرح آزمایش، نوع و تعداد نمونه و شماره استاندارد آزمایش بکار رفته در این تحقیق

Table 8. Description of the experiment, type and number of samples, and standard test number used in this study

ردیف	شماره استاندارد	تعداد نمونه	ابعاد نمونه (mm)	نوع نمونه	شرح آزمایش
۱	ASTM-C143	-	-	-	اسلامپ
۲	BS-EN-12390-3	۵۴	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	مکعبی	مقاومت فشاری
۳	ASTM-C642	۶	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مکعبی	جذب آب بتن
۴	ASHTO-T357	۶	۱۰۰×۵۰	استوانه‌ای (برش خورده)	نفوذ یون کلراید

۳- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن در این تحقیق مجموعاً متشکل از ۶ سری طرح مخلوط و ۶۶ آزمون می‌باشد. آزمایشات انجام شده شامل اسلامپ، مقاومت فشاری در سنین مختلف، میزان جذب آب اولیه و نهایی بتن سخت شده (۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت) و اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلراید در بتن به روش RCMT می‌باشد. آزمایش مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد و از هر رده طرح مخلوط ۳ آزمون مورد آزمایش قرار گرفت و میانگین نتایج آن بعنوان مقاومت فشاری نهایی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب جمعاً ۵۴ آزمون مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتری برای آزمایش مقاومت فشاری، تعداد ۶ آزمون مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتری ۲۸ روزه برای تعیین میزان جذب آب بتن سخت شده، تعداد ۶ آزمون استوانه‌ای برش خورده به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتیمتری برای آزمایش دوام در برابر نفوذ یون کلراید به روش RCMT تهیه و ساخته شد. جدول شماره ۸ استاندارد روش انجام آزمایش، تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش، ابعاد و نوع نمونه بتن و شرح آزمایش را نشان می‌دهد.

در این آزمایش برای ساخت بتن، کلیه سنگ دانه‌ها به حالت مرطوب با سطح خشک (SSD) درآمدند تا آب اضافی به بتن ندهد و آب بتن تازه را جذب نکند. سپس شن، ماسه و نیمی از آب به داخل میکسر ریخته و به مدت ۶۰ ثانیه مخلوط شدند. پس از آن سیمان و پودر سنگ اضافه و به مدت ۶۰ ثانیه دیگر مخلوط شدند. در انتها نانو دی‌اکسید تیتانیوم با آبر روان کننده مخلوط گردید و به همراه نانو کلئوید اکسید گرافن و باقیمانده آب مصرفی به آرامی به مخلوط بتن اضافه گردید و تمامی مصالح به مدت ۳ دقیقه دیگر با یکدیگر مخلوط شدند. قابل ذکر است که سرعت دوران میکسر بتن ۱۵ دور

در دقیقه تنظیم شد و در مجموع مصالح ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. در پایان، آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه برای تمامی طرح‌ها انجام شد. به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جدار قالب، ابتدا جداره‌های داخلی قالب با یک لایه نازک روغن معدنی آغشته گردید و سپس بتن در داخل قالب ریخته شد. بدین ترتیب بتن طی سه لایه درون قالب ریخته شد و به هر لایه ۲۵ ضربه دورانی شکل وارد شد تا تراکم لازم بدست آمد. سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از آن به در موعدهای مقرر در حوضچه آب عمل‌آوری شدند.

۴- طرح مخلوط

مبنای طرح اختلاط بکار گرفته شده برای ساخت بتن در این تحقیق، تجربه آزمایشگاهی و مطالعات پیشین سایر تحقیقات بوده که بر اساس نوع مصالح مورد استفاده اعم از سیمان و سنگدانه بهینه‌یابی شده است [۳-۵]. در این طرح مخلوط عیار سیمان مصرفی در نمونه شاهد ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب مفروض گردید. حداکثر اندازه سنگ‌دانه مورد استفاده ۱۹ میلیمتر و نسبت آب به سیمان ۰/۴ در نظر گرفته شد. میزان استفاده از آبروان کننده در بتن طبق دستورالعمل شرکت سازنده محصول و روش سعی و خطا آزمایشگاهی، ۱٪ وزنی عیار سیمان مصرفی در بتن تعیین شد. در ادامه جهت افزایش نفوذناپذیری بتن از نانو کلئوید اکسید گرافن و نانو دی‌اکسید تیتانیوم استفاده شد. بدین ترتیب ابتدا برای یافتن موثرترین دوز مصرفی نانو دی‌اکسید تیتانیوم در بتن از نسبت‌های ۰/۱٪، ۰/۳٪، ۰/۵٪ و ۰/۷٪ وزنی سیمان در بتن استفاده شد. سپس نمونه‌ها پس از ۷ روز

جدول ۹. طرح اختلاط و مقادیر وزنی مصالح برای ساخت هر متر مکعب بتن

Table 9. Mixing plan and weight values of materials for making each cubic meter of concrete

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	آبر روان کننده	آب	نانو تیتانیوم	نانو کلئید اکسید گرافن
		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
۱	G-T-C	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۰
۲	G-T-1	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۰/۴
۳	G-T-2	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۰/۸
۴	G-T-3	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۱/۲
۵	G-T-4	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۱/۶
۶	G-T-5	۴۰۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴	۱۶۰	۲	۲/۴

عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند و مشخص گردید که افزودن مقادیر بیش از ۰/۵٪ وزنی سیمان در بتن اثر محسوس و موثری بر روی مقاومت فشاری بتن نیز نخواهد داشت. بنابراین میزان استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم در بتن در تمامی طرح مخلوطها نسبت ۰/۵٪ وزنی سیمان بصورت ثابت در نظر گرفته شد. در ادامه برای افزایش نفوذناپذیری بتن از نانو کلئید اکسید گرافن بصورت محلول مایع (با غلظت ۵٪) با آب و روان کننده بتن ترکیب شده و به مخلوط بتن تازه اضافه گردید. دوز مصرفی این ماده به میزان ۰/۲۵٪، ۰/۵٪، ۰/۷۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ وزنی آب طرح مخلوط بتن در نظر گرفته شد که این نسبتها بر اساس سایر مطالعات صورت گرفته در تحقیقات قبلی و توصیه شرکت ارائه دهنده محصول تعیین و انتخاب شده است. جدول شماره ۹ میزان مصالح مصرفی برای طرح مخلوطهای مورد بررسی در مقیاس یک متر مکعب نشان می دهد.

۵- یافته ها

۵-۱- اسلامپ

آزمایش اسلامپ جهت مشخص نمودن روانی و شکل پذیری بتن تازه در قالب انجام می شود. با توجه به آنکه از نانو کلئید اکسید گرافن بصورت مایع در بتن استفاده شده، انتظار می رفت تا میزان اسلامپ طرح GT-4,5 بیشتر از GT-1,2 باشد. از طرفی نتیجه سایر تحقیقات گذشته نشان می دهد که استفاده از نانو مواد در بتن، موجب کاهش اسلامپ و روانی می شود [۳۰].

اما با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که استفاده از نانو کلئید اکسید گرافن به همراه نانو دی اکسید تیتانیوم در صورتی که با روان کننده به خوبی مخلوط شود و نسبت آب به سیمان کنترل شود، تاثیر محسوس بر روی اسلامپ بتن نخواهد داشت. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که میزان اسلامپ در تمامی طرح مخلوطهای مورد آزمایش در یک محدوده یکسان قرار دارد. میزان اختلاف اندکی که در نتایج این بخش وجود دارد می تواند ناشی از خطای انسانی، دستگاهی و مصالح آزمایشگاهی باشد. جدول شماره ۱۰ نتایج اسلامپ طرحها را نشان می دهد.

۵-۲- مقاومت فشاری

پیشینه تحقیق نشان می دهد که عمدتاً استفاده از پودر نانو ذرات گرافن در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می گردد [۳۱]. با توجه به سختی بالای گرافن و افزایش تراکم ناشی از افزودن نانو مواد در بتن انتظار می رفت با افزایش مقدار این ماده، میزان مقاومت فشاری بتن افزایش یابد. اما نتایج بدست آمده در این بخش از تحقیق، فرضیه افزایش مقاومت فشاری با افزودن نانو کلئید اکسید گرافن در بتن را رد کرد. بنظر می رسد استفاده از نانو کلئید اکسید گرافن مایع در کسب این نتیجه عامل تاثیر گذاری بوده است. در حالیکه در سایر تحقیقات گذشته استفاده از پودر نانو ذرات گرافن را دلیل افزایش مقاومت فشاری بتن گزارش کرده اند [۳۲]. لذا می توان دریافت که استفاده از نانو کلئید اکسید گرافن بصورت مایع در بتن بدلیل

جدول ۱۰. مقایسه روانی طرح مخلوط‌های مورد مقایسه

Table 10. Comparison of flowability of the compared mixtures

C	O	S	H	N
٪ ۷۲	٪ ۲۶	٪ ۰/۵	٪ ۰/۹	٪ ۰/۶

داد که با افزایش درصد نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع در بتن میزان جذب آب بتن کاهش می‌یابد. این مهم دلالت بر نفوذناپذیری بتن در اثر استفاده از نانو مواد در بتن دارد که به نوعی باعث آب‌بند شدن بتن شده است. بطوریکه بیشترین میزان درصد جذب آب اولیه و ثانویه پس از طرح کنترل، مربوط به طرح GT-1 و کمترین میزان جذب آب مربوطه به طرح GT-5 می‌باشد. این مهم به علت خاصیت آبریزی و جذب آب بسیار کم نانو کلئوئید اکسید گرافن است.

آبا به منظور سنجش کیفیت بتن در آزمایش جذب آب، بتن‌های با جذب آب ۵٪ و بالاتر را در رده ضعیف، ۳٪ تا ۵٪ را در رده متوسط و کمتر از ۳٪ را در رده خوب دسته‌بندی کرده است. همچنین در این آیین نامه، برای پایایی بتن در محیط‌های خورنده و دریایی مانند سازه‌های بتنی در تماس با خلیج فارس و دریای عمان، حداکثر میزان جذب آب را در قسمت‌هایی که در ناحیه جزر و مد و ناحیه پاشش فوق العاده شدید و سازه‌های نگهدارنده‌های آب و تصفیه خانه فاضلاب ۳/۵٪ تعیین کرده است [۳۴]. بنابراین با توجه به نتایج کسب شده از این آزمایش مشخص گردید که طرح‌های دارای نانو دی‌اکسید تیتانیوم و نانو کلئوئید اکسید گرافن می‌توانند در افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده نقش مهمی را ایفا کنند. جدول و شکل شماره ۱۲ و ۱۰ میزان جذب آب را در بتن سخت شده نشان می‌دهد.

۵-۴- نفوذ یون کلراید

این آزمایش با هدف توسعه مدلی برای پیش‌بینی خوردگی بتن و ارزیابی مقاومت آن در برابر نفوذ کلراید به روش شبیه‌سازی حالت ناپایدار (RCMT) انجام شد [۳۵]. در این روش، نمونه‌های بتنی استوانه‌ای با ابعاد ۱۰ سانتیمتر قطر و ۵ سانتیمتر ضخامت مطابق استاندارد ASHTO-T357 مورد آزمایش قرار گرفتند. مراحل آزمایش شامل شستشو و تمیز کردن نمونه‌ها، خشک کردن کامل سطح، قرار دادن در محفظه خلاء برای اشباع شدن با آب، قرار دادن در غلاف لاستیکی جهت ایزولاسیون سطح پیرامونی،

کاهش سطح مخصوص و کاهش پیوستگی و نیز ایجاد نا همگنی قطعاً در کاهش چسبندگی و اصطکاک بین عناصر بتن در مقایسه با نمونه شاهد نقش مخربی داشته است. از طرفی اندازه ریز ذرات پودر گرافن می‌تواند تراکم بتن را افزایش داده و موجب افزایش مقاومت فشاری بتن گردد. همچنین این احتمال وجود دارد که واکنش نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع در بتن باعث تخریب کلسیم سیمان شده و محتوای هیدروکسید کلسیم بتن را کاهش دهد. بر این اساس، می‌توان بخشی از کاهش مقاومت فشاری بتن را می‌توان به این واکنش مخرب نسبت داد.

نظر به آنچه از نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن و آهنگ گیرش سیمان در سنین مختلف بدست آمده، مشخص شد که با افزایش میزان نانو کلئوئید اکسید گرافن بصورت مایع در بتن، میزان مقاومت فشاری کاهش یافته است. در طرح کنترل مقادیر زیادی از سیلیکات کلسیم هیدراته تشکیل خواهد شد که موجب گیرش مقاومت بتن می‌شود. اما با افزایش مقدار نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع، میزان سیلیکات کلسیم هیدراته شده کاهش می‌یابد که این مهم در کاهش مقاومت فشاری بتن تاثیر زیادی دارد. جدول و شکل شماره ۱۱ و ۶ میزان مقاومت فشاری طرح‌های مختلف را در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. شکل شماره ۷ و ۸ و ۹ مربوط به شکست نمونه دارای ۱/۵٪ نانو کلئوئید اکسید گرافن مایع در بتن است که نشان می‌دهد بتن از ناحیه خمیره سیمان شکسته شده، در حالیکه از حداکثر ظرفیت باربری و مقاومت درشت‌دانه (شن) استفاده نشده است. این مهم دلالت بر ضعف در ناحیه خمیره سیمان به دلایلی که به آن اشاره شد، دارد. همچنین بیشترین اُفت مقاومت فشاری مربوط به طرح GT-5 در سن ۹۰ روز و کمترین اُفت مقاومت فشاری مربوط به طرح GT-1 در سن ۷ روز می‌باشد.

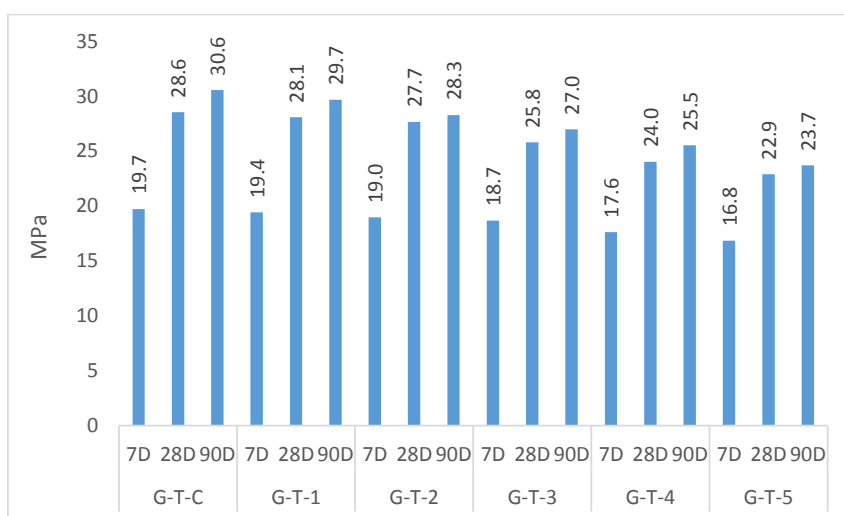
۵-۳- جذب آب بتن سخت شده

میزان جذب آب در بتن سخت شده معیاری برای تعیین تخلخل در ساختار بتن و فضای مویینه آن است [۳۳]. نتایج این بخش از تحقیق نشان

جدول ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

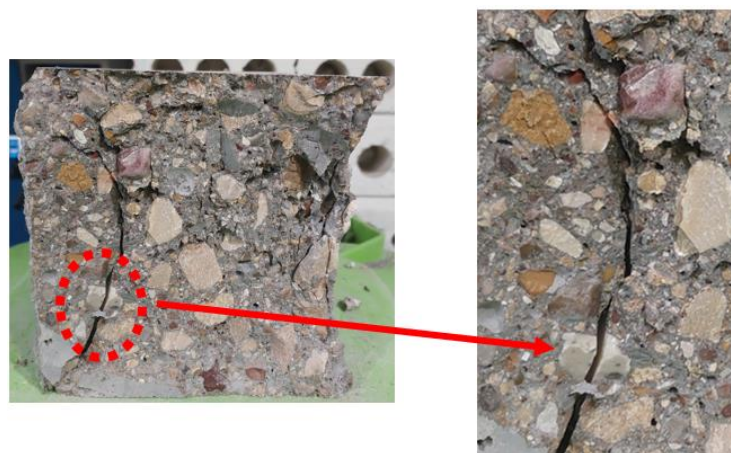
Table 11. Compressive strength test results

نام طرح	سن نمونه	مقاومت فشاری مکعبی (MPa)	میانگین مقاومت نمونه مکعبی	میانگین مقاومت نمونه استوانه‌ای	تغییرات %
G-T-C	۷ روزه	۲۰/۳	۱۹/۳	۱۹/۶	-
	۲۸ روزه	۲۷/۷	۲۸/۴	۲۹/۶	-
	۹۰ روزه	۳۰/۴	۳۱/۳	۳۰	-
G-T-1	۷ روزه	۱۸/۵	۱۹/۵	۲۰/۳	-۱/۵
	۲۸ روزه	۲۸/۸	۲۸/۲	۲۷/۳	-۱/۶
	۹۰ روزه	۳۰/۲	۲۸/۹	۳۰	-۲/۸
G-T-2	۷ روزه	۱۹/۱	۱۸/۲	۱۹/۶	-۳/۹
	۲۸ روزه	۲۷/۳	۲۷/۶	۲۸/۱	-۳/۲
	۹۰ روزه	۲۸/۵	۲۹	۲۷/۴	-۷/۴
G-T-3	۷ روزه	۱۹/۳	۱۸/۲	۱۸/۵	-۵/۴
	۲۸ روزه	۲۵	۲۵/۶	۲۶/۸	-۹/۷
	۹۰ روزه	۲۷/۶	۲۶/۲	۲۷/۲	-۱۱/۷
G-T-4	۷ روزه	۱۸/۱	۱۷/۲	۱۷/۶	-۱۰/۶
	۲۸ روزه	۲۳/۲	۲۴/۷	۲۴/۲	-۱۵/۹
	۹۰ روزه	۲۵/۴	۲۶/۲	۲۵	-۱۶/۵
G-T-5	۷ روزه	۱۶/۸	۱۷/۶	۱۶/۱	-۱۴/۷
	۲۸ روزه	۲۲/۸	۲۳/۸	۲۲/۱	-۱۹/۸
	۹۰ روزه	۲۳/۵	۲۳/۳	۲۴/۳	-۲۲/۵



شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

Fig. 6. Compressive strength test results



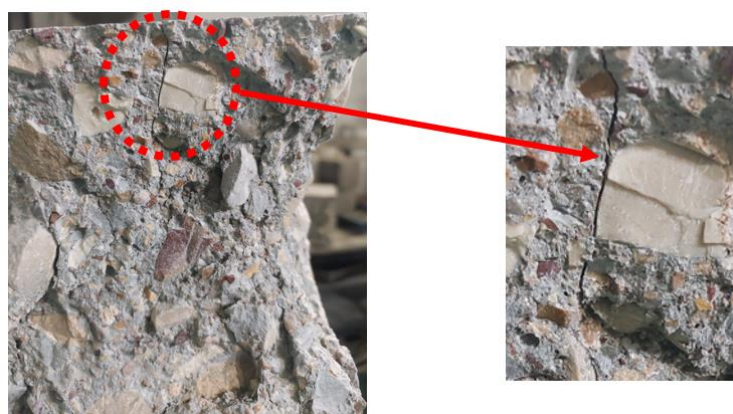
شکل ۷. شکست نمونه شاهد از سنگدانه

Fig. 7. Breaking of control sample of aggregate



شکل ۸. شکست نمونه دارای نانو کلئوئید اکسید گرافن از ناحیه خمیر سیمان و سالم ماندن درشت دانه

Fig. 8. Fracture of the sample containing graphene oxide nano colloid from the cement paste area and the coarse grain remaining intact.



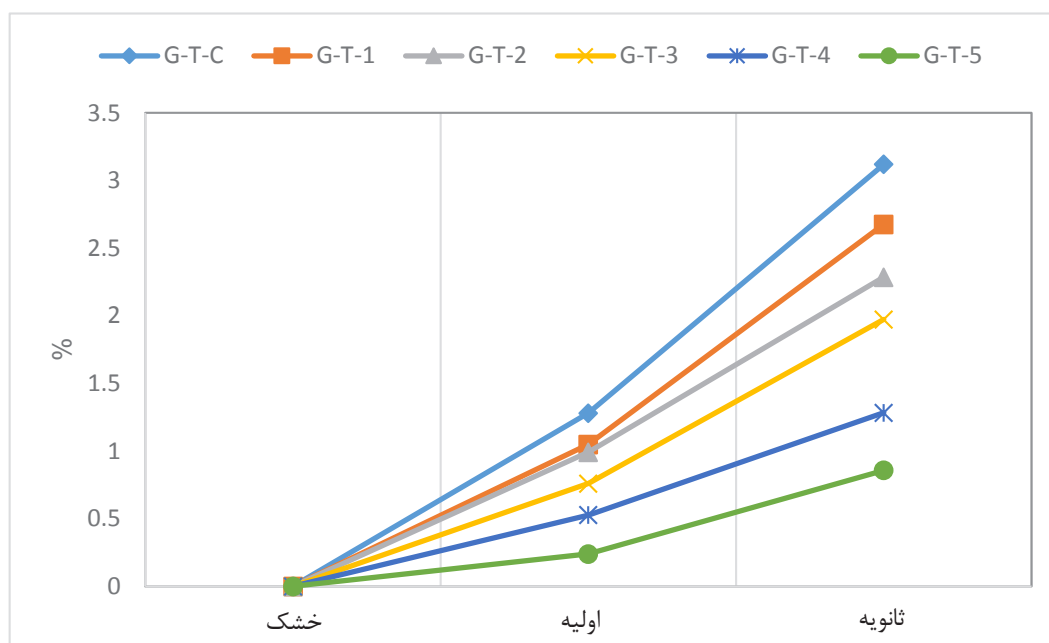
شکل ۹. شکست نمونه دارای دی اکسید گرافن از ناحیه خمیره سیمان و سالم ماندن درشت دانه بتن

Fig. 9. Failure of the sample containing graphene dioxide from the cement paste area and the coarse-grained concrete remaining intact.

جدول ۱۲. نتایج آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده

Table 12. Results of water absorption test in hardened concrete

نام طرح	وزن نمونه خشک	وزن نمونه اشباع		میزان جذب آب (%)	
		۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت	۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت
		گرم	گرم	%	%
G-T-C	۲۰۸۰	۲۱۰۷	۲۱۴۷	۱/۲۸	۳/۱۲
G-T-1	۲۰۷۳	۲۰۹۵	۲۱۳۰	۱/۰۵	۲/۶۸
G-T-2	۲۰۹۴	۲۱۱۵	۲۱۴۳	۰/۹۹	۲/۲۹
G-T-3	۲۰۸۶	۲۱۰۲	۲۱۲۸	۰/۷۶	۱/۹۷
G-T-4	۲۰۷۶	۲۰۸۷	۲۱۰۳	۰/۵۳	۱/۲۸
G-T-5	۲۰۸۰	۲۰۸۵	۲۰۹۸	۰/۲۴	۰/۸۶



شکل ۱۰. نتایج آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده

Fig. 10. Results of water absorption test in hardened concrete



شکل ۱۱. آزمایش تست نفوذ یون کلراید در بتن به روش RCMT

Fig. 11. Chloride ion penetration test in concrete using the RCMT method

برای آنکه عمق نفوذ کلراید اندازه‌گیری شود، نمونه‌ها را پس از اتمام آزمایش به دو نیم تقسیم کرده، سپس محلول نیترات نقره با غلظت ۱۰٪ بر روی سطح شکسته شده اسپری گردید. بدین ترتیب عمق بتن که تغییر رنگ پیدا می‌کند به عنوان عمق نفوذ کلراید با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$M = \frac{h}{V \times t} \quad (2)$$

در این رابطه M نرخ نفوذ یون کلر بر حسب میلیمتر بر ولت ساعت، h میانگین عمق نفوذ یون کلر بر حسب میلیمتر، V ولتاژ اعمال شده به آزمونه‌ها بر حسب ولت، t مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت می‌باشد. در این تحقیق میزان نفوذ یون کلراید در بتن بر اساس ضریب انتشار، نرخ نفوذ، حداکثر عمق نفوذ و میانگین عمق نفوذ ارزیابی شده است. نتایج بدست آمده به شرح جدول شماره ۱۳ می‌باشد. همچنین شکل شماره ۱۲ تا ۱۷ وضعیت نمونه‌ها را پس از نفوذ یون کلراید نمایش می‌دهد که در کنار آن از تصاویر دارای افکت نوری و هاشور خورده برای نمایش واضح‌تر استفاده شده است.

نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افزایش مقدار نانو کلئید اکسید گرافن در بتن، میزان نفوذ یون کلراید در بتن کاهش می‌یابد. این مهم بر دو عامل استوار است. اول آنکه با افزایش مقدار نانو کلئید اکسید گرافن در بتن میزان تراکم بتن افزایش یافته و یون کلراید با شار عبوری کمتری در بتن نفوذ پیدا می‌کند. دوم آنکه گرافن یک نوع عنصر فلز محسوب

افزودن محلول سدیم هیدروکسید یا آنولیت با غلظت ۳٪ به داخل غلاف و تماس با قسمت بالایی نمونه و در نهایت قرار دادن نمونه در ظرف حاوی محلول نمک ۱۰٪ به گونه‌ای که وجه پایینی نمونه با محلول نمک در تماس باشد. برای شروع آزمایش، الکترودها به مولد جریان مستقیم متصل شده و ولتاژ اعمالی اولیه ۶۰ ولت تنظیم می‌شود. جریان عبوری اندازه‌گیری شده و در صورت لزوم ولتاژ تنظیم می‌شود تا نرخ جریان کاهش یابد و از گرم شدن نمونه جلوگیری شود. پس از حدود ۱۸ ساعت، دستگاه خاموش و نمونه‌ها از غلاف خارج می‌شوند. شکل شماره ۱۱ آزمایش نفوذ یون کلراید در بتن به روش RCMT را نشان می‌دهد.

در پایان آزمایش می‌توان ضریب مهاجرت را مطابق رابطه (۱) محاسبه کرد [۳۶]:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \times (273 + T)^L}{(U - 2) \times t} \times \left[(X_d - 0.0238) \times \sqrt{\frac{(273 + T)T \times d}{U - 2}} \right] \quad (1)$$

D_{nssm} : ضریب مهاجرت حالت غیر پایدار

U : ولتاژ اعمال شده

T : مقدار میانگین دمای اولیه و نهایی در محلول آنولیت بر حسب سانتی

گراد

L : ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر

X_d : مقدار میانگین عمق نفوذ بر حسب میلیمتر

t : مدت زمان انجام آزمایش بر حسب ساعت

جدول ۱۳. نتایج آزمایش نفوذ یون کلراید در بتن به روش RCMT

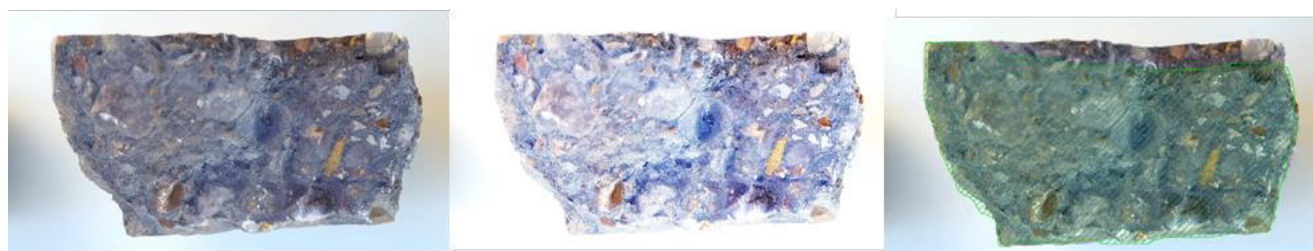
Table 13. Results of chloride ion penetration test in concrete using RCMT method

تغییرات	میانگین عمق نفوذ یون کلراید	حداکثر عمق نفوذ یون کلراید	نرخ نفوذ یون کلراید	ضریب انتشار یون کلراید	نام طرح
٪	cm ²	mm	mm/V hr	M ² /S (10 ⁻¹²)	
-	۴۴/۶۰	۵۰	۰/۰۶۹۲	۱۸/۳	G-T-C
۱۴/۳	۳۸/۲۰	۵۰	۰/۰۶۱۵	۱۶/۲	G-T-1
۲۳/۱	۳۴/۲۶	۳۷	۰/۰۵۷۶	۱۴/۵	G-T-2
۳۹/۳	۲۷/۰۶	۴۶	۰/۰۴۹۲	۱۲/۸	G-T-3
۴۵/۸	۲۴/۱۴	۵۰	۰/۰۴۰۲	۱۰/۶	G-T-4
۴۷/۶	۲۳/۳۵	۵۰	۰/۰۳۴۳	۹/۱	G-T-5



شکل ۱۲. نمونه GT-C پس از نفوذ یون کلراید تصاویر از سمت چپ به راست به ترتیب) تصویر واقعی، تصویر با افکت، تصویر هاشورخورده

Fig. 12. GT-C sample after chloride ion penetration (images from left to right in order) real image, image with effect, hatched image



شکل ۱۳. نمونه GT-1 پس از نفوذ یون کلراید

Fig. 13. Sample GT-1 after chloride ion penetration



شکل ۱۴. نمونه GT-2 پس از نفوذ یون کلراید

Fig. 14. GT-2 sample after chloride ion penetration



شکل ۱۵. نمونه GT-3 پس از نفوذ یون کلراید

Fig. 15. GT-3 sample after chloride ion penetration



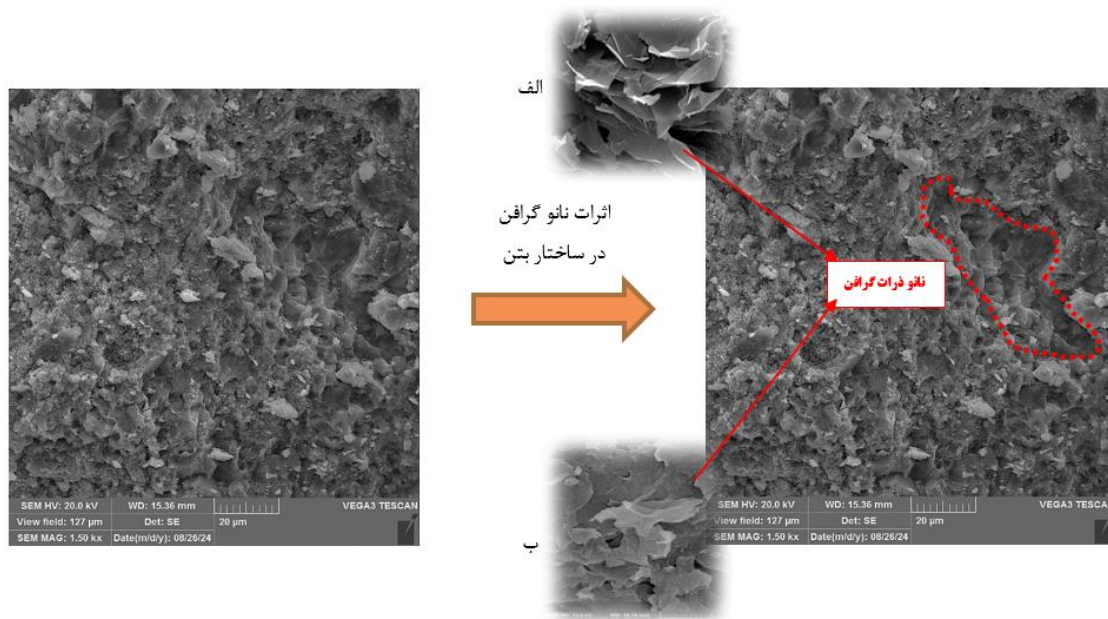
شکل ۱۶. نمونه GT-4 پس از نفوذ یون کلراید

Fig. 16. GT-4 sample after chloride ion penetration



شکل ۱۷. نمونه GT-5 پس از نفوذ یون کلراید

Fig. 17. GT-5 sample after chloride ion penetration



شکل ۱۸. تصویر الکترونی روبشی بتن با تمرکز بر روی اثر نانو کلونید اکسید گرافن روی واکنش هیدراتاسیون سیمان تصویر الف و ب مربوط به ریزساختار گرافن می باشد

Fig. 18. Scanning electron image of concrete focusing on the effect of graphene oxide nanocolloid on cement hydration reaction. Images a and b are related to the graphene microstructure

تصویر آثار نانو کلونید اکسید گرافن در ساختار بتن کاملاً مشهود است. همچنین تصویر الف و ب مربوط به ریز ساختار نانو کلونید اکسید گرافن می باشد که با شکل شماره ۱۸ انطباق داده شده. طبق آنچه در این تصویر مشاهده گردید، مشخص شد که در قسمت هایی که نانو کلونید اکسید گرافن پخش شده است، نشانی از تشکیل اترینگایت و کلسیم سیمانی وجود ندارد. درست است که محدوده توسط نانو کلونید اکسید گرافن کاملاً احاطه شده و تراکم حداکثری بوجود آورده اما این ناحیه در اثر ضعف مقاومت، باعث شکست زودرس بتن می شود.

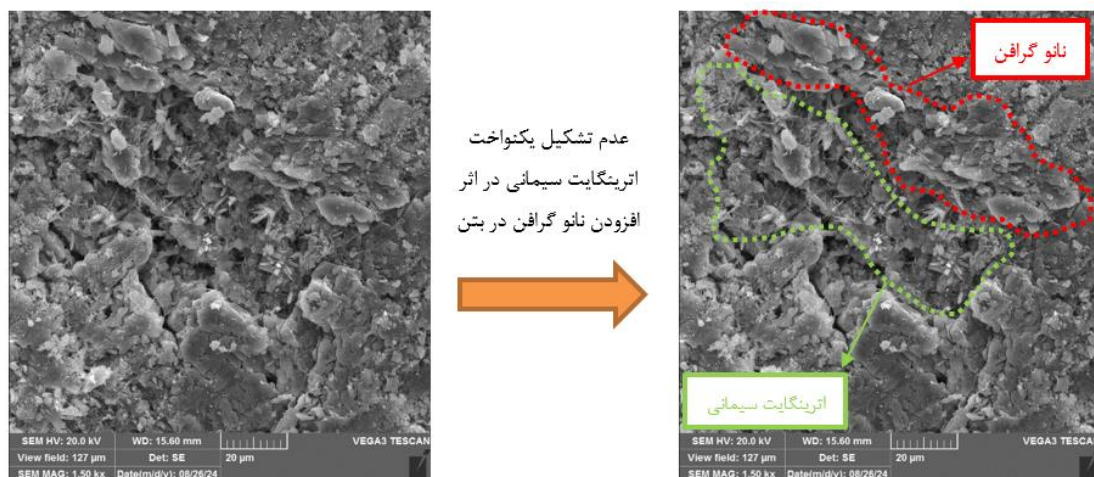
در شکل شماره ۱۹ کاملاً مشهود است که نانو کلونید اکسید گرافن مانع از رشد کلسیم سیمانی و تشکیل اترینگایت سیمان شده است که این عاملی موجب ضعف مقاومت فشاری در بتن می گردد. در حالی که در سایر نواحی که نانو کلونید اکسید گرافن وجود نداشته، اترینگایت سوزنی و کلسیم سیمانی کاملاً گسترش یافته اند.

تصویر شماره ۲۰ نشان می دهد که استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم در بتن باعث گردیده تا گسترش ناحیه انتقال ترک بهبود یابد. بطوریکه نانو مواد باعث کاهش رشد ترک و افزایش تراکم در بتن شده است.

می شود و عنصر فلز مانعی برای انتشار یون کلراید در بتن می شود. همچنین تغییرات بین نمونه ها نشان می دهد که استفاده به اندازه و بهینه نانو کلونید اکسید گرافن می تواند دارای اهمیت باشد. بطوریکه در طرح 1, 2, 3 GT-4 در مقایسه با طرح GT-C میزان مساحت نفوذ یون کلراید در بتن بطور محسوسی کاهش یافته است. اما در طرح GT-5 در مقایسه با طرح GT-4 که نیم درصد نانو کلونید اکسید گرافن بیشتری در آن استفاده شده، تنها ۲٪ شرایط را بهبود بخشیده است. بنابراین نمونه GT-5 در مقایسه با GT-4 علرغم آنکه میزان بیشتری نانو کلونید اکسید گرافن در آن مصرف شده اما تاثیر چندانی در مهار نفوذ یون کلراید نداشته است. لازم به ذکر است که میزان مساحت نفوذ یون کلراید در نمونه های 1, 2, 3, 4, 5 GT-1 در مقایسه با طرح GT-C به ترتیب ۱۴٪، ۲۳٪، ۳۹٪ و ۴۵٪ کاهش یافته است.

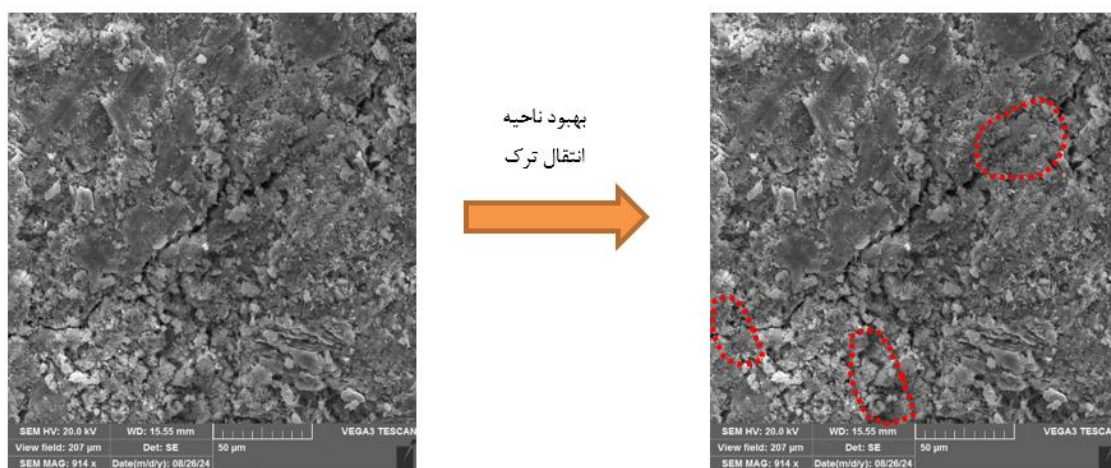
۵-۵- تصاویر الکترونی روبشی

شکل های شماره ۱۸ تا ۲۰ ریزساختار الکترونی روبشی (عکس SEM) بتن را پس از افزودن نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو کلونید اکسید گرافن را نمایش می دهند. شکل شماره ۱۸ مربوط به طرح GT-5 می باشد. در این



شکل ۱۹. تصویر الکترونی روبشی بتن با تمرکز بر روی اثر نانو کلئوئید اکسید گرافن روی واکنش هیدراتاسیون سیمان

Fig. 19. Scanning electron image of concrete focusing on the effect of graphene oxide nanocolloid on the cement hydration reaction



شکل ۲۰. تصویر الکترونی روبشی بتن با تمرکز بر روی بهبود ناحیه انتقال ترک

Fig. 20. Scanning electron image of concrete with focus on crack transition zone improvement

۶- بحث و بررسی

در این تحقیق نتایج آزمایش بتن با استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو کلئوید اکسید گرافن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد که هر چه از نانو کلئوید اکسید گرافن بصورت مایع در بتن بیشتر استفاده شود، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. این عامل ناشی از آن است که نانو کلئوید اکسید گرافن مانع تشکیل کلسیم و اترینگایت سیمان در بتن می‌شود و واکنش هیدراتاسیون سیمان را با مشکل مواجه می‌سازد. در حالیکه در تحقیقات گذشته که از نانو ذرات گرافن بصورت جامد و بصورت پودر در بتن استفاده شده، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی افزایش پیدا کرده است [۳۷، ۳۸]. به نظر می‌رسد گرافن مصرفی به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی بالاتر نسبت به مواد سیمانی و افزایش رسانایی الکتریکی ناشی از حضور صفحات گرافنی، باعث ایجاد الکترون‌های نیم‌رسانا در مواد می‌شود که این امر مانع از وقوع واکنش هیدراتاسیون سیمان می‌شود. همچنین علاوه بر حالت مصرفی نانو کلئوید اکسید گرافن، بنظر می‌رسد نوع ماده مصرفی بر اساس شرکت تولید کننده می‌تواند عامل تعیین کننده‌ای در نتایج باشد. از طرفی نانو کلئوید اکسید گرافن مصرفی در این تحقیق به خوبی توانسته مانع از نفوذ یون‌های مخرب کلراید در بتن شود و همچنین میزان جذب آب بتن را بطور محسوسی کاهش دهد. گرافن با داشتن زنجیره‌های پیوسته و بلند باعث تشکیل سطح محافظی شده که اگر بتن در معرض بارهای شدید و سنگین قرار نگیرد بخوبی می‌تواند آب‌گریزی و نفوذناپذیری را حفظ کند. بنابراین ایده خوبی است که بتوان محلولی با ترکیب نانو کلئوید اکسید گرافن و نانو تیتانیوم تهیه کرد تا برای ترمیم و مقاوم‌سازی سطح بتن جهت ایجاد سطحی آب‌گریز، نفوذناپذیر و مقاوم در برابر سایش استفاده کرد.

۷- نتیجه‌گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- ۱- استفاده از نانو کلئوید اکسید گرافن و نانو دی اکسید تیتانیوم اثر محسوسی بر روی اسلامپ بتن ندارد و تغییر در آن ایجاد نمی‌کند.
- ۲- استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو کلئوید اکسید گرافن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. بطوریکه طرح GT-1 تا GT-5 نسبت به طرح شاهد به ترتیب مقاومت فشاری نهایی (۹۰ روزه) بتن را به میزان ۲/۸٪، ۷/۴٪، ۱۱/۷٪، ۱۶/۵٪، ۲۲/۵٪ کاهش می‌دهد.
- ۳- استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو کلئوید اکسید گرافن باعث کاهش میزان جذب آب در بتن می‌شود. بطوریکه در طرح GT-1 تا GT-5

نسبت به طرح شاهد میزان جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) به میزان ۱/۰۵٪، ۰/۹۹٪، ۰/۷۶٪، ۰/۵۳٪، ۰/۳۴٪ و جذب آب نهایی (۷۲ ساعت) به میزان ۲/۶۸٪، ۲/۲۹٪، ۱/۹۷٪، ۱/۲۸٪، ۰/۸۶٪ کاهش یافت.

۴- استفاده از نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو کلئوید اکسید گرافن می‌تواند شار عبوری یون کلراید در بتن را کاهش دهد. بطوریکه در طرح GT-1 تا GT-5 نسبت به طرح شاهد میزان مساحت نفوذ یون کلراید به میزان ۲/۲۳٪، ۳/۳۹٪، ۴/۵٪ و ۴/۷٪ کاهش یافت.

۵- تصاویر الکترونی روبشی نشان داد که نانو کلئوید اکسید گرافن مانع تشکیل کلسیم و اترینگایت سیمانی در بتن می‌شود که این عامل واکنش هیدراتاسیون سیمان را با مشکل مواجه می‌سازد.

منابع

- [1] H.Soo Lee, S. Galato, M. Peterson, H.G. Riella, A.M. Bernardin, Inorganic Pigments Made From The Recycling Of Coal Mine Drainage Treatment Sludge, J.Environ. Manag. 88 (2008) 1280–1284.
- [2] Nedad Naderi, G., Khoshkalam, K., & Rostami, M. (2021). Comparative application of titanium dioxide, nano-silica, and silicon fume in self-cleaning properties of concrete façade for sustainable development. Structural Engineering and Construction, 8(Special Issue 2), 44–58.
- [3] Yousefnia Nia, H., & Jabbari, M. M. (2022). Application of alumina nanoparticles to improve some mechanical properties and enhance wear resistance of concrete. Civil Engineering Journal of Amirkabir University, 54(11), 4343–4364. <https://doi.org/10.22060/ceej.2022.21040.7603>
- [4] Shokrani, M., & Naderi, M. (2021). Experimental study of the effect of graphene oxide nanoparticles on the mechanical behavior of cementitious composites and water transfer characteristics in concrete. Structural Engineering and Construction, 8(Special Issue 3), 39–56.
- [5] Shokrani, M., & Naderi, M. (2023). Evaluation of compressive strength and permeability of G-OX concrete using the ultrasonic method. Civil Engineering Journal of Amirkabir University, 55(2), 471–490.

- of hydration and mechanical properties in concrete by low dosage graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 268, 121097. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121097>
- [16] Khazaei Fayyaz Jahan, S., Gholami, M., & Rahimi, H. (2021). Effect of nano-TiO₂ on the rheological and self-cleaning properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 275, 122176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122176>
- [17] Ehsani, M., Alizadeh, A., & Zarei, M. (2020). Influence of titanium dioxide nanoparticles on the strength and uniformity of concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101658. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101658>
- [18] Nazari, A., Riahi, S., & Bagheri, A. (2020). Optimum content of nano-TiO₂ for early-age flexural strength and hydration rate of self-compacting concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 784, 139262. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139262>
- [19] Salami, M., Yazdani, R., & Reisi, M. (2020). Durability performance of concrete with nano-silica and polypropylene fibers in freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 236, 117645. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117645>
- [20] Li, S., Qian, X., Wang, D., & Lin, Z. (2019). Effects of nano-TiO₂ on seawater resistance and durability of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 101, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.005>
- [21] Sengiz, R., & Tasdemir, M. A. (2019). Influence of graphene nanofiber addition on flexural strength of concrete composites. *Materials Research Express*, 6(8), 085618. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab22ba>
- [22] Dou, Y., Li, S., & Yu, J. (2019). Mechanical behavior of cement-based composites with various contents of graphene oxide. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107158. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107158>
- [23] Esmaeili, H., Gholhaki, M., & Yari, K. (2018). Effect of nano-TiO on mechanical properties and microstructure of cement mortar. *Advances in Concrete*
- [6] Farhmandzadeh, D., & Dashti, M. (2023). Nanomaterials and their applications in concrete. *New Engineering Sciences Research*, 48(8), 9–16.
- [7] Madandost, R., & Deylami Pashtejoui, S. (2021). A study on the compressive strength and elastic modulus of self-compacting concrete containing nanomaterials. *Structural Engineering and Construction*.
- [8] Ghorbani, A., Ghorbani, M., & Shokati, G. (2019). Comparative tests on fresh self-consolidating concrete containing nanoparticles. [Details incomplete].
- [9] Alizadeh Lasaki, R., & Ramazan. (2019). Comparative tests on fresh self-compacting concrete containing nanoparticles. *Civil Engineering and Projects Journal*, 1(3), 57–67.
- [10] Ramazani Pour, Y., Yadak Yiraghi, Y., Zolghadr Nseb, R., & Ramazani Pour, A. M. (2022). Mechanical properties and chloride ion permeability of concretes containing calcined clay. *Civil Engineering Journal of Amirkabir University*, 54(3), 1119–1132.
- [11] Liu, Y., Zhang, L., Wang, H., & Zhao, D. (2023). Effects of various nanoparticles on hydration process and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 341, 127892. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127892>
- [12] Wenqiu, L., Chen, F., & Zhao, Q. (2022). Influence of graphene oxide on mechanical performance of cement-based materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 34(6), 04022112. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003892)
- [13] Yang, D. H., Lee, S., & Kim, J. (2022). Optimal dosage and effects of nanographene on elasticity and tensile strength of concrete. *Materials Letters*, 307, 130988. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130988>
- [14] Li, J. Y., Wang, P., & Xu, X. (2021). Effects of carbon nanotubes on mechanical behavior and porosity of hardened cement paste. *Materials Today Communications*, 26, 101993. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101993>
- [15] Zhou, P., Xiong, L., & Huang, Y. (2021). Enhancement

- & Agwa, I. S. (2023). Effect of modified nano-titanium and fly ash on the properties of ultra-high-performance concrete. *Structural Concrete*, 24(5), 6815–6832.
- [33] Mohseni, E., Tang, W., & Wang, S. (2019). Investigation of the role of nano-titanium on corrosion and thermal performance of concrete with macro-encapsulated PCM. *Molecules*, 24(7), 1360.
- [34] Chinthakunta, R., Ravella, D. P., Chand, M. S. R., & Yadav, M. J. (2021). Performance evaluation of self-compacting concrete containing fly ash, silica fume, and nano titanium oxide. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2348–2354.
- [35] Elbelacy, A. N., Mohamed, A. G., & Sallam, E. A. (2022). Experimental investigation of nano concrete with nano silica, nano titanium, and nano aluminum. *NeuroQuantology*, 20(5), 3403.
- [36] Akarsh, P. K., Shrinidhi, D., Marathe, S., & Bhat, A. K. (2022). Graphene oxide as a nanomaterial in developing sustainable concrete: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 60, 234–246.
- [37] Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2014). Nano-reinforced cement and concrete composites and new insights from graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 73, 113–124.
- [38] Maglad, A. M., Zaid, O., Arbili, M. M., Ascensão, G., Șerbănoiu, A. A., Grădinaru, C. M., ... & de Prado-Gil, J. (2022). A study on the properties of geopolymer concrete modified with nano graphene oxide. *Buildings*, 12(8), 1066.
- [39] Seddighi, F., Pachideh, G., & Salimbahrami, S. B. (2021). Mechanical and microstructural properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene. *Journal of Building Engineering*, 43, 103106.
- [40] Dong, S., Wang, Y., Ashour, A., Han, B., & Ou, J. (2020). Nano/micro-structures and mechanical properties of ultra-high-performance concrete incorporating graphene with different lateral sizes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106011.
- [41] Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Effect of graphene Construction, 6(6), 659-675. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.6.659>
- [24] Mohammadi, Y., Tavakkolizadeh, M., & Ghasemi, H. (2018). Comparative study of nanographene and graphene oxide on mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 185, 595–604. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.092>
- [25] Sennglakpam, S., Singh, N., & Gurung, B. (2017). Resistance of concrete with graphene oxide to sulfate and carbonation attacks. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006>
- [26] Bairagi, N., Patel, J., & Shah, V. (2016). The impact of nano-TiO₂ and polypropylene on compressive strength of geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1864–1870. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.154>
- [27] Orakzai, M. A. (2021). Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on the mechanical properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00483.
- [28] Li, Z., Han, B., Yu, X., Dong, S., Zhang, L., Dong, X., & Ou, J. (2017). Effect of nano-titanium dioxide on the mechanical, electrical properties, and microstructure of reactive powder concrete. *Materials Research Express*, 4(9), 095008.
- [29] Rawat, G., Gandhi, S., & Murthy, Y. I. (2023). Durability aspects of concrete containing nano-titanium dioxide. *ACI Materials Journal*, 120, 25–36.
- [30] Abu El-Hassan, K., Hakeem, I. Y., Amin, M., Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., & Elsakhawy, Y. (2024). Effects of nano titanium and nano silica on properties of high-strength concrete incorporating heavyweight aggregate. *Structural Concrete*, 25(1), 239–264.
- [31] Sorathiya, J., Shah, S., & Kacha, S. (2017). Effect of adding nano titanium dioxide (TiO₂) on the compressive strength of cementitious concrete. *Kalpa Publications in Civil Engineering*, 1, 219–225.
- [32] Ghanim, A. A. J., Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A.,

134116.

[43] Dalal, S. P., & Dalal, P. (2021). Experimental investigation on strength and durability of graphene nanoengineered concrete. *Construction and Building Materials*, 276, 122236.

oxide on the mechanical and durability performance of concrete. *Journal of Building Engineering*, 27, 101007.

[42] Zhan, P., Xu, J., Wang, J., Zuo, J., & He, Z. (2022). A review of recycled aggregate concrete modified by nanosilica and graphene oxide: Materials, performance, and mechanisms. *Journal of Cleaner Production*, 375,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

L. Shahryari, M. A. Abedzadeh, H. Zarei, The Effect of Nanographene and Nano Titanium Dioxide on the Mechanical Properties and Chloride Ion Penetration in Concrete, Amirkabir J. Civil Eng., 57(6) (2025) 1047-1072.

DOI: [10.22060/ceej.2025.24129.8261](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.24129.8261)



