

Effect of CNT/Al₂O₃ Nanocomposite on the Improvement of Safety-Enhanced Concrete under Harsh Conditions and its Microstructural Analysis

Seyed Ali Haji Seyed Abutorabi^a, Amin Honarbakhsh^{a*}, Rahele Zhiani^b
Seyed Mojtaba Movahedifar^a, Mahdi Nobahari^a

^aDepartment of Civil Engineering, Ne.C, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran;
ali.abotorabi@iaiu.ac.ir; seyedmojtaba.movahedifar@iaiu.ac.ir; mehdinobahari@iaiu.ac.ir;
amin_honarbaksh@iaiu.ac.ir

^bDepartment of Chemistry, Ne.C, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran. zhiani@iaiu.ac.ir

<https://www.doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2043888.1145>

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords:

Concrete
Nanocomposite
Compressive Strength
Acidic Environment
High Temperatures

Received:

7 March 2025

Received in revised form:

29 August 2025

Accepted:

27 September 2025

pp.171-186

The use of nanotechnology in the construction industry, particularly to improve the mechanical properties and durability of building materials such as concrete, has garnered significant attention. This study investigates the impact of CNT/Al₂O₃ nanocomposites on the durability of nanoconcrete. The use of nanoparticles improves the compressive, tensile, and flexural strength of concrete, reduces its permeability to water and harmful chemicals, and also mitigates the effects of temperature. These improvements contribute to reduced raw material consumption and CO₂ emissions, which are beneficial both economically and environmentally. Research has shown that adding 2% of the CNT/Al₂O₃ nanocomposite to concrete maintains compressive strength at 33.7 MPa, and after 300 freeze-thaw cycles, the reduction in strength was only 10.8%. Moreover, in tests at 600°C, the samples exhibited less cracking and discoloration compared to control samples. Tests using FTIR, EDX, and SEM techniques indicated improvements in the microstructure and confirmed the formation of dense C-S-H gel, which helps fill voids and improve hydration reactions. In acid resistance tests, the samples containing 2% of the nanocomposite lost only 1% of their mass after 16 weeks, while the samples with lower percentages exhibited greater mass loss. Therefore, the optimal use of 2% CNT/Al₂O₃ nanocomposite significantly enhances the durability and strength of concrete and can play a crucial role in constructing structures resistant to harsh environmental conditions while reducing maintenance costs. This research demonstrates that nanotechnology can address environmental challenges and longevity in concrete structures.

Corresponding author(amin_honarbaksh@iaiu.ac.ir)

Extended Abstract:

Introduction

The modern world faces challenges such as the low durability of construction materials under harsh environmental conditions. Concrete, as one of the most widely used construction materials, is prone to cracking, reduction in compressive strength, and degradation when exposed to acidic environments, extreme temperature changes, and freeze-thaw cycles. Nanotechnology, particularly nanocomposites based on carbon nanotubes (CNT) and alumina (Al_2O_3), offers new opportunities to produce materials with enhanced performance and extend the service life of structures.

This paper focuses on the use of CNT/ Al_2O_3 nanocomposites in concrete, aiming to evaluate their effects on the physical, mechanical, and durability properties of concrete under harsh environmental conditions. The specific choice of these composites is motivated by the unique mechanical property-enhancing abilities of carbon nanotubes and the chemical and thermal resistance provided by Al_2O_3 nanoparticles.

Methodology

Materials and Fabrication of Nanocomposites

Portland Cement Type II: Selected for its superior sulfate resistance and performance in corrosive conditions.

Nanocomposite CNT/ Al_2O_3 : Fabricated using the electrospinning technique, where a polyacrylonitrile (PAN) polymer solution combined with Al_2O_3 precursor was spun into nanofibers. The carbonization process at temperatures above 800°C resulted in a stabilized nanocomposite structure

1. Concrete Mix Design

Concrete mixtures were designed with a water-to-cement ratio of 0.45 under laboratory conditions. The weight percentage of nanocomposites varied between 1%, 2%, 3%, and 4% of the cement weight, and specimens were cast in standard cubic dimensions ($15 \times 15 \times 15$ cm).

Laboratory Testing Freeze-Thaw Cycles: Samples underwent repeated cycles of freezing at -20°C and thawing at $+15^\circ\text{C}$, following ASTM C666 standards, to mimic extreme temperature

variations.

High-Temperature Resistance: Samples were tested for their resilience at various elevated temperatures (200°C , 400°C , and 600°C).

Acidic Environment: Concrete samples were continuously submerged in sulfuric acid (low pH of 1) for 16 weeks to evaluate their resistance against acid-induced degradation.

Structural and Microstructural Analysis: Techniques like Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) were used to analyze structural and chemical changes.

Results and Discussion

1. Compressive Strength

–Samples without nanocomposites (control) showed a 15% loss in compressive strength under freeze-thaw cycles, indicating significant weakness from repeated thermal stress.

–Concrete samples containing 2% CNT/ Al_2O_3 nanocomposites exhibited only a 10.8% reduction in compressive strength, proving their enhanced resistance and durability.

–At elevated temperatures (600°C), control samples experienced strength losses up to 25%, whereas the 2% nanocomposite samples showed a reduced loss of only 10%.

2. Resistance in Acidic Environments

–After 16 weeks submerged in sulfuric acid, control samples lost up to 10% of their weight due to severe matrix degradation caused by chemical reactions with acid.

–In contrast, 2% CNT/ Al_2O_3 -modified concrete showed only a 1% weight loss, demonstrating the nanocomposites' significant effect in mitigating acid-induced deterioration.

3. Microstructural Observations

–Analysis revealed that the addition of nanocomposites increased the density of the concrete matrix. C-S-H gels (calcium-silicate-hydrate) were formed in higher volumes, significantly reducing voids and porosity.

–SEM imaging showed a highly cohesive microstructure in samples containing nanocomposites, indicating reduced permeability

and higher compactness compared to control samples.

1. Final Discussion and Analysis

This research highlights the significant advantages of incorporating CNT/Al₂O₃ nanocomposites into concrete. With the optimal addition of 2% by weight, major improvements were observed in the compressive strength, freeze-thaw resistance, and thermal performance of concrete. However, exceeding this percentage ($\geq 3\%$) led to particle aggregation and slight reductions in homogeneity, affecting the performance gains.

Key observations:

- Enhanced durability under cyclic freeze-thaw conditions.
- Improved structural integrity at elevated temperatures up to 600°C.
- Substantially reduced cracking and degradation in acidic environments.

Moreover, advanced analytical techniques (FTIR, XRD, and SEM) provided detailed insights into the chemical and structural improvements in concrete. The observed densification of the matrix and reduction in porosity make nanocomposites a viable solution for combatting durability challenges in the construction industry.

Conclusion

This study underscores the importance of applying nanotechnology in the construction industry, particularly in high-performance concrete. The results indicate that CNT/Al₂O₃ nanocomposites

can:

1. Significantly improve the mechanical properties of concrete.
2. Enhance its durability under harsh environmental stresses, including freeze-thaw cycles and acidic degradation.
3. Maintain structural performance at high temperatures.

The optimal addition ratio of 2% CNT/Al₂O₃ nanocomposites demonstrated the best balance between cost-effectiveness and performance. The use of these nanocomposites holds immense potential for applications in major infrastructure projects, such as bridges, tunnels, and other structures subject to severe weather or chemical exposure.

Furthermore, implementing such technologies can help reduce maintenance costs and environmental impact, making this approach both eco-friendly and economically viable.

Keywords: Concrete, Nanocomposites, Carbon Nanotubes, Alumina, Compressive Strength, Acidic Environment, High Temperatures

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بر بهبود بتن ایمن تحت شرایط سخت و تحلیل ریزساختار آن

سیدعلی حاجی سیدابوترابی^۱، امین هنر بخش^{۱*}، راحله ژبانی^۲، سید مجتبی موحدی فر^۱، مهدی نوبهار^۱

۱- گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران؛ ali.abotorabi@iau.ac.ir؛ seyedmojtaba.movahedifar@iau.ac.ir؛ mehdinobahari@iau.ac.ir؛ amin_honarbakshsh@iau.ac.ir
۲- گروه شیمی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی، نیشابور، ایران. zhiani@iau.ac.ir

<https://www.doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2043888.1145>

چکیده	واژگان کلیدی
استفاده از نانو فناوری برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این مطالعه به بررسی تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al ₂ O ₃ بر دوام نانوبتن می‌پردازد. استفاده از نانوذرات باعث بهبود مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود و نفوذپذیری آن را در برابر آب و مواد شیمیایی مخرب، و همچنین تأثیرات دمایی کاهش می‌دهد. این بهبودها به کاهش مصرف مواد خام و انتشار CO ₂ کمک می‌کنند، که از لحاظ اقتصادی و محیطی سودمند است. تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al ₂ O ₃ به بتن، باعث حفظ مقاومت فشاری تا ۳۳/۷ مگاپاسکال می‌شود و پس از ۳۰۰ سیکل یخبندان، کاهش مقاومت فقط ۱۰/۸٪ بوده است. همچنین، در آزمایش‌های مقاومت در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها ترک‌خوردگی و تغییر رنگ کمتری نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. آزمایش‌ها با استفاده از تکنیک‌های EDX، FTIR و SEM، نشان‌دهنده بهبود در میکروساختار و تأیید تولید ژل متراکم C-S-H است که به پر کردن فضای خالی و بهبود واکنش‌های هیدراتاسیون کمک می‌کند. در آزمون‌های مقاومت اسیدی، ترکیبات حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت پس از ۱۶ هفته تنها ۱٪ از جرم خود را از دست دادند، در حالیکه ترکیبات با درصدهای کمتر کاهش جرم بیشتری داشتند. در نتیجه، استفاده بهینه از ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al ₂ O ₃ ، به طور قابل‌توجهی دوام و استحکام بتن را افزایش می‌دهد و می‌تواند نقش بسزایی در ساخت سازه‌های مقاوم در برابر شرایط سخت محیطی و کاهش هزینه‌های نگهداری به همراه داشته باشد. این تحقیق نشان می‌دهد که فناوری نانو می‌تواند پاسخگوی چالش‌های محیطی و ماندگاری در سازه‌های بتنی باشد.	بتن نانوکامپوزیت مقاومت فشاری محیط اسیدی دمای بالا
	تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۲/۱۷
	تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۶/۰۷
	تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۷/۰۵
	صص: ۱۷۱-۱۸۶

۱- مقدمه:

در سال‌های اخیر، فناوری نانو در صنعت ساخت و ساز به طور چشمگیری مورد توجه قرار گرفته است، به ویژه در زمینه بهبود ویژگی‌های مکانیکی و دوام مصالح ساختمانی مانند بتن (Zhang et al., 2023:61, Ashby & Jones, 2012: 1). نانوذرات با ویژگی‌های خاصی همچون سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی فوق‌العاده، این امکان را فراهم کرده‌اند که مواد سنتی تقویت شوند (Dhir & Dyer, 2015: 2).

افزودن نانوذرات به بتن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی از جمله مقاومت فشاری، کششی و خمشی کمک کند. این خواص برای افزایش عمر مفید سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، حیاتی هستند (Abdalla et al., 2023: 18). نانوذرات می‌توانند دوام بتن را در برابر عوامل مخرب محیطی مانند نفوذ آب، مواد شیمیایی خورنده، و تغییرات دمایی افزایش دهند. این ویژگی برای مناطق با شرایط آب و هوایی سخت و پروژه‌هایی که نیاز به طول عمر بیشتر دارند، بسیار مهم است (Silvestre et al., 2015: 4). نانوذرات با بهبود کارایی بتن، می‌توانند به کاهش نیاز به مواد خام کمک کنند، که این امر هم از نظر اقتصادی و هم از نظر زیست‌محیطی سودمند است. کاهش مصرف سیمان و خودروهای تولید CO₂ مرتبط با تولید سیمان می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی ساخت و ساز یاری رساند (Zhang et al., 2021:34). نانوذرات می‌توانند عملکرد بتن را در زمینه‌هایی مانند رسانایی الکتریکی، خاصیت خودترمیمی و خواص فتوکاتالیستی بهبود بخشند. این ویژگی‌ها در کاربردهای نوین مانند بتن‌های هوشمند یا سازه‌های زیست‌محیطی بسیار حائز اهمیت هستند (Konsta-Gdoutos et al., 2010: 6). استفاده از فناوری نانو در بتن می‌تواند به افزایش رقابت‌پذیری در صنعت ساخت و ساز منجر شود. به دلیل افزایش نیاز به سازه‌های با کارایی بالا و کاهش هزینه‌های مرتبط با تعمیرات و نگهداری، به‌کارگیری فناوری‌های نانو در بتن یک نقطه قوت برای شرکت‌های سازنده محسوب می‌شود (Bartos, year not specified: 8). فناوری‌های جدید در تولید و استفاده از نانوذرات باعث بهبود فرآیندهای پراکندگی و اثربخشی آن‌ها در بتن شده‌اند (Farvizi et al., 2013: 9). این پیشرفت‌ها نه تنها خواص مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشند، بلکه به کاهش هزینه‌های تولید نیز کمک می‌کنند. با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، استفاده از نانوذرات برای تولید بتن‌های با کارایی بالا و مصرف کمتر مواد خام، موضوعی حیاتی باقی مانده است. این امر به‌ویژه در پروژه‌های شهری و زیرساخت‌های دارنده معیارهای سبز بسیار موثر بوده است. در پروژه‌های بزرگ و مهم بین‌المللی مانند پل‌ها، تونل‌ها و ساختمان‌های بلند، نیاز به مواد

با دوام بالا و خاصیت‌های منحصر به فرد افزایش یافته است. نانوذرات می‌توانند این نیازها را برآورده کنند و به بهبود ایمنی و طول عمر ساختارها یاری رسانند. بتنی که مجهز به نانوذرات خاص با توانایی سنجش و پاسخ‌دهی به تغییرات محیطی است، همچنان مورد توجه است. این بتن‌ها می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که تغییرات ساختاری و محیطی را تشخیص داده و به آن واکنش نشان دهند، که این امر در ایمنی و کارایی سازه‌ها مؤثر است (Li et al., 2023: 10). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات می‌تواند به طور قابل توجهی مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و نفوذپذیری را کاهش دهد و در نتیجه طول عمر سازه‌های بتنی را افزایش دهد. استفاده گسترده از فناوری نانو در بتن به صنعت ساخت و ساز کمک می‌کند تا با هزینه‌های کمتر و کارایی بیشتر به رشد اقتصادی برسد. شرکت‌هایی که از این فناوری استفاده می‌کنند، می‌توانند موقعیت رقابتی بهتری در بازار جهانی داشته باشند (Du et al., 2021: 11). تحقیقات متعددی نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به بتن می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و دوام آن منجر شود. در یک مطالعه، وانگ و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر نانوذرات سیلیکا بر مقاومت فشاری و کاهش انقباض بتن را بررسی کردند. نتایج آنها نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری و کاهش انقباض ناشی از استفاده از نانوذرات بود (Wang et al., 2020: 12). نیو و همکاران (۲۰۲۱) میزان تأثیر نانوذرات سیلیکا را بر روی مقاومت مکانیکی و دوام بتن‌های پرکننده با اعضای نانو بررسی کردند. یافته‌ها حاکی از آن بود که این ترکیب می‌تواند مقاومت کششی و فشاری بتن را افزایش دهد، در حالی که مقاومت در برابر نفوذ آب نیز بهبود می‌یابد (Niu et al., 2021: 13).

در پژوهش دیگر، لی و همکاران (۲۰۱۹) اثرات نانوذرات تیتانیا را بر روی بتن‌های پلیمری مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که این نانوذرات می‌توانند به بهبود مقاومت در برابر خزش و افزایش دوام در برابر اشعه فرابنفش کمک کنند (Li et al., 2019: 14). کاستور و همکاران (۲۰۲۲) درباره تأثیر نانوذرات تیتانیا (TiO₂) بر ویژگی‌های فتوکاتالیستی بتن تحقیق کردند. این پژوهش دریافت که بتن اصلاح‌شده با نانو TiO₂ توانایی بهتری در تجزیه آلاینده‌های آلی هوا و سطح دارد، که باعث افزایش طول عمر سازه‌های بتنی در محیط‌های شهری می‌شود (Castro-Hoyos et al., 2022: 15).

همچنین، آلومینا (Al₂O₃) نیز به دلیل مقاومت بالا در برابر سایش و خزش، به عنوان یکی دیگر از نانو افزودنی‌های ارزشمند مطرح است (Kingery et al., 1976: 16). نانوذرات آلومینا به دلیل سختی بالا، می‌توانند مقاومت سایشی بتن را افزایش دهند و به طور مؤثری بر دوام آن در شرایط محیطی سخت مؤثر

تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بر بهبود بتن ایمن تحت شرایط سخت و تحلیل ...

بخشد، که در کاربردهای خاص مانند حفاظ الکترومغناطیسی یا اجزای الکترونیکی قابل استفاده است (Chung, 2004: 28).

یکی از چالش‌های عمده استفاده از CNT، پراکنده‌سازی یکنواخت آنها در ماتریس بتنی به دلیل تجمع ذرات است، که می‌تواند منجر به عدم یکنواختی در خواص شود (Kishore et al., 2024: 29).

تولید و استفاده از CNT نسبت به مواد دیگر هزینه‌برتر است، که ممکن است استفاده گسترده آن را محدود کند (El-Feky & El-Rayes, 2019: 30).

باتیستون و همکاران (۲۰۲۱)، در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از نانوذرات نانولوله‌های کربنی (CNT) در بتن‌های خودتراز پرداختند. نتایج نشان دادند که CNTs نه تنها مقاومت مکانیکی بتن را افزایش می‌دهند بلکه موجب بهبود چقرمگی و کاهش ترک‌خوردگی نیز می‌شوند (Batiston et al., 2021: 31).

استفاده از نانوکامپوزیت مانند نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوذرات آلومینا (Al₂O₃) در بتن دارای اهمیت زیادی در صنعت ساخت و ساز و مهندسی مواد است. هدف این پژوهش بررسی اثرات ترکیبی نانو ذرات CNT و Al₂O₃ بر خواص مکانیکی و دوام بتن است.

نانوبتن با قابلیت ترکیب ویژگی‌های انعطاف‌پذیری پلیمر و استحکام ساختاری بتن، یکی از مصالح ساختمانی بسیار پرکاربرد به شمار می‌روند (Ohama, 1995: 32).

با این وجود، بهبود بیشتر در مقاومت مکانیکی و دوام آنها در برابر شرایط سخت محیطی همچنان چالش‌هایی را در این زمینه ایجاد می‌کند (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011: 33).

آنچه این پژوهش را متمایز می‌کند، استفاده هم‌زمان از نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوذرات آلومینا (Al₂O₃) به صورت نانوکامپوزیت سنتز شده به روش الکتروریسی و به کارگیری آن در بتن تحت شرایط سخت محیطی است. تاکنون بیشتر مطالعات، هر یک از این نانوذرات را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند، در حالی که این تحقیق اثرات ترکیبی آنها را بر بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و مقاومت بتن در محیط‌های اسیدی و سیکل‌های ذوب-یخبندان ارزیابی می‌کند. علاوه بر این، تحلیل دقیق ریزساختار با استفاده از تکنیک‌های FTIR، SEM و EDX امکان شناسایی سازوکارهای بهبود را فراهم آورده است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای طراحی بتن‌های ایمن و بادوام برای پروژه‌های زیرساختی در شرایط اقلیمی و شیمیایی نامطلوب باشد. بنابراین، تحقیق حاضر با تمرکز بر ارزیابی تجربی و مقایسه ویژگی‌های مکانیکی و دوام نانوبتن اصلاح شده با نانو ذرات، تلاش دارد تا بهینه‌ترین ترکیب و درصد وزنی این نانو افزودنی‌ها را برای دستیابی به بهترین نتایج ممکن معرفی کند.

باشند (Rajput & Pimplikar, 2022: 17). نانو Al₂O₃ می‌تواند مقاومت حرارتی بتن را تقویت کرده و از ایجاد ترک‌های ناشی از شوک حرارتی جلوگیری کند (Humad et al., 2023: 18). نانوذرات آلومینا نیز ممکن است چالش‌های پراکنده‌سازی را به همراه آورند و نیاز به افزودنی‌ها یا تکنیک‌های خاصی برای دستیابی به توزیع یکنواخت داشته باشند (Nazari et al., 2009: 19).

در مورد واکنش‌پذیری شیمیایی Al₂O₃ در بتن وجود دارد که ممکن است در ترکیبات خاص بتن باعث واکنش‌های غیرمطلوب شود. (Alazemi, 2018: 20). همچنین، تحقیقات انجام شده توسط چوشاقنی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است که استفاده از نانوذرات متال اکسید، نظیر آلومینا، می‌تواند به افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص حرارتی بتن کمک کند (Joshaghani et al., 2020: 21). در تحقیقی دیگر، لی و همکاران (۲۰۲۳) اثر بخشی نانوذرات آلومینا (Al₂O₃) در افزایش مقاومت سایشی و کاهش نفوذپذیری بتن را تحلیل نمودند. نتایج آنها نشان داد که این مواد می‌توانند دوام بتن را در شرایط محیطی شدید افزایش دهند (Li et al., 2023: 22). در تحقیق دیگری، ارکازی (۲۰۲۱) به اثرات نانوذرات آلومینا بر رفتار حرارتی و مقاومت در برابر تغییرات دمایی بتن پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که این نانوذرات می‌توانند پایداری حرارتی بتن را بهبود بخشند و از شکل‌گیری ترک‌های حرارتی جلوگیری کنند (Orakzai, 2021: 23).

در مطالعه‌ای که توسط دوی و همکاران (۲۰۲۰) انجام شد، تأثیر افزودن نانوذرات گرافن به مخلوط بتن بررسی گردید. نتایج نشان داد که این نانوذرات به طور قابل توجهی مقاومت فشاری و خواص الکتریکی بتن را بهبود می‌بخشند (Devi & Khan, 2020: 24).

از میان این نانوذرات، نانولوله‌های کربنی (CNT) به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و خواص الکتریکی ویژه، به عنوان افزودنی‌های مؤثر در بتن پیشنهاد شده‌اند (Shanov et al., 2006: 25).

نانولوله‌های کربنی به دلیل نسبت ناهمسانی سطح به حجم بالا و استحکام مکانیکی عالی، می‌توانند موجب بهبود مقاومت فشاری و کششی بتن شوند (Li et al., 2007: 26).

CNTs به کاهش ترک‌خوردگی و افزایش چقرمگی بتن کمک می‌کنند که ناشی از توانایی آنها در توزیع تنش به صورت یکنواخت در ساختار بتن است (Konsta-Gdoutos et al., 2010: 27).

افزودن CNT به بتن می‌تواند خواص الکتریکی آن را بهبود

۲۰	ذرات جامد(%)
خاکستری تیره	رنگ
پودر	وضعیت فیزیکی
۷/۲	pH محلول پراکندگی
۲/۴۰	وزن مخصوص (g/cm ³)
۸۵۰	ویسکوزیته (در محلول، mPa·s)
۱۲	عمر نگهداری (ماه)
۲۰۰°C	دمای تغییر شکل گرمایی (HDT)
مشخصات شیمیایی	
۷۲٪	درصد اتمی C
۱۸٪	درصد اتمی O
۱۰٪	درصد اتمی Al
مشخصات مکانیکی	
	(Vickers microhardness tester)
۱۴-۱۸ GPa	سختی
۳۲۰-۳۷۰ GPa	مدول یانگ (Nanoindentation)
۸۰۰-۱۲۰۰ MPa	مقاومت فشاری (ASTM C1424)

خواص فیزیکی شامل رنگ، pH، چگالی، ویسکوزیته و دمای تغییر شکل گرمایی (HDT) با روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شده‌اند. آنالیزهای شیمیایی به وسیله EDX انجام شده و درصد وزنی عناصر اصلی C، O، Al گزارش شده است. خواص مکانیکی، از جمله سختی ویکرز، مدول یانگ و مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های مترکم شده و استانداردهای ASTM و ISO مربوطه تعیین گردیده است. این مقادیر بیانگر پتانسیل بالای نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ برای بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن در کاربردهای آبی است.

۲-۲- مواد اولیه و مصالح مصرفی در آزمایش‌ها

سیمان: در این تحقیق از سیمان پرتلند مقاوم در برابر سولفات متوسط (نوع II) به عنوان ماده اصلی چسباننده استفاده شده است. این سیمان یکی از محصولات کارخانه سیمان شرق است که به خاطر کاربرد گسترده آن، به ویژه در پروژه‌های شهری و محیط‌های حساس به سولفات، انتخاب شده است. محصولات این کارخانه عمدتاً از نوع II سیمان تولید می‌شوند که به ویژه در شرایطی که تماس با سولفات‌ها یا شرایط مرطوب وجود دارد، خواص مناسبی از خود نشان می‌دهند.

مصالح سنگی: برای این تحقیق از دو نوع مصالح سنگی استفاده شده است:

سنگدانه‌های درشت (شن): سنگدانه‌های آهکی شکسته از معادن نیشابور که از الک ۱۹ میلی‌متری عبور کرده‌اند، به عنوان

۲- مواد و روش‌ها

مواد شیمیایی با خلوص بالا از شرکت‌های Merck و Fluka تهیه شدند. طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) برای تمامی پودرها با استفاده از طیف‌سنج VERTEX 70 (ساخت Bruker) و در قالب قرص‌های KBr ثبت شد. داده‌های پراش اشعه ایکس با دستگاه Bruker D8 Advance و با استفاده از تابش CuK α جمع‌آوری گردید. تحلیل حرارتی (TGA) بر روی دستگاه NETZSCH STA449F3 انجام شد، که برای این منظور از گرمایش با سرعت ۱۰ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تحت اتمسفر نیتروژن استفاده شد. برای مشاهده تصاویر بتن از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) از شرکت TESCAN، مدل MIRA III بهره گرفته شد.

۲-۱- سنتز کامپوزیت های CNT/Al₂O₃ با استفاده از الکتروریسی

برای سنتز کامپوزیت CNT/Al₂O₃ به روش الکتروریسی، ابتدا محلول پلیمر و پیش‌ماده آلومینا تهیه می‌شود. یکی از روش‌های رایج در این زمینه استفاده از پلی‌آکریلونیتریل (PAN) به همراه محلول سل-ژل حاوی پیش‌ماده آلومینا است. برای تهیه محلول اولیه، ۱۰ گرم پلی‌آکریلونیتریل در ۹۰ میلی‌لیتر دی‌متیل فرم‌امید (DMF) حل شده و سپس پیش‌ماده آلومینا، مانند آلکوکسید آلومینیوم، به آن اضافه می‌شود تا غلظت مطلوب آلومینا حاصل گردد. این محلول با استفاده از الکتروریسی و با ولتاژی در حدود ۱۵ تا ۲۰ کیلوولت و فاصله‌ای بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر میان نازل و بستر جمع‌آوری، به فیبرهای نازک تبدیل می‌شود. فیبرهای تولید شده بر روی بستر، ابتدا در دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت برای فرآیند پایدارسازی حرارتی در معرض هوا قرار می‌گیرند. سپس، برای کربنیزه کردن فیبرها و تولید نانولوله‌های کربنی همراه با ذرات آلومینا، آنها در دمای ۸۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تحت گاز نیتروژن یا آرگون در کوره قرار می‌گیرند. این فرآیند منجر به تولید کامپوزیت CNT/Al₂O₃ با ویژگی‌های منحصر به فرد می‌شود.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نانوکامپوزیت سنتزی CNT/Al₂O₃ را نشان می‌دهد که پیش از استفاده در بتن، به صورت آزمایشگاهی و در حالت زینتر شده (پودری که با حرارت بالا و فشار به یک قطعه جامد فشرده و یکپارچه تبدیل شده، بدون اینکه کاملاً ذوب شود) ارزیابی شده است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃

مشخصات فیزیکی

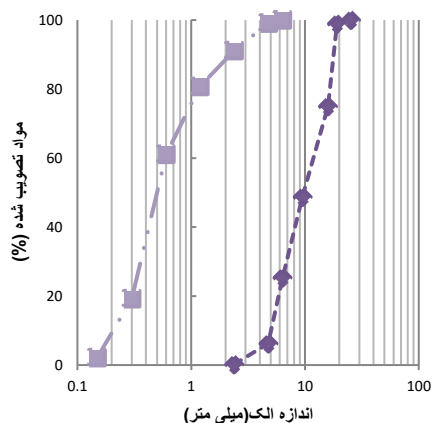
تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 بر بهبود بتن ایمن تحت شرایط سخت و تحلیل ...

سنگدانه‌های درشت انتخاب شدند.

مترمکعب است.

- مقدار روان‌کننده استفاده‌شده در طرح اختلاط ۱/۱۵ درصد از مقدار سیمان مصرفی بوده است. از روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اثر استفاده شده و افزودن آن تا رسیدن به اسلامپ ۱۰ سانتی‌متر ادامه پیدا کرده است که مقدار آن حدود ۲ درصد از وزن سیمان بوده است.

- سنگدانه‌های ریز (ماسه): ماسه رودخانه‌ای که از الک ۴.۷۵ میلی‌متری عبور کرده، به‌عنوان سنگدانه‌های ریز استفاده شد. توزیع اندازه سنگدانه‌های ریز و درشت مطابق با استاندارد ASTM C33 در شکل ۱ نمایش داده شده است (ASTM, 2003: 1).



شکل ۱: توزیع اندازه سنگدانه های ریز و درشت

به‌منظور ارزیابی اثر افزودن نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 بر کارایی مخلوط‌های بتنی، آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM C143 انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوکامپوزیت تا سطح ۲ درصد وزنی سیمان تغییر محسوسی در کارایی ایجاد نکرد و اسلامپ در حدود ۱۰ سانتی‌متر حفظ شد. با افزایش مقدار نانوکامپوزیت به بیش از ۳ درصد، کاهش جزئی در اسلامپ مشاهده گردید که با افزایش جزئی مقدار روان‌کننده قابل جبران بود. این موضوع نشان می‌دهد که در صورت تنظیم صحیح میزان روان‌کننده، استفاده از نانوکامپوزیت اثر نامطلوبی بر کارایی بتن ندارد.

- نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 به‌عنوان جایگزین سیمان در مخلوط بتن استفاده شده‌اند. مقدار این نانوکامپوزیت بین ۱ تا ۴ درصد از وزن کل سیمان در نظر گرفته شده است. پراکندگی اولیه نانوکامپوزیت در آب انجام شد تا از تجمع اولیه ذرات جلوگیری گردد و یکنواختی توزیع در بتن افزایش یابد. این روش بنا بر نتایج پیشین، کارایی بالاتری نسبت به افزودن مستقیم پودر به مخلوط بتن دارد.

برای تهیه مخلوط‌های بتنی حاوی نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 ، ابتدا مقدار مورد نیاز نانوکامپوزیت بر اساس طرح اختلاط توزین شد. سپس این نانوکامپوزیت به همراه بخشی از آب مخلوط (۳۰٪ از کل آب طرح) در دستگاه همزن با دور 4000 rpm به مدت ۱۵ دقیقه همراه با ۵/۰ درصد وزنی روان‌کننده، پیش‌پراکنده شد. این فرآیند منجر به تشکیل سوسپانسیون همگنی از نانوکامپوزیت گردید که در مرحله بعد به سایر اجزای خشک (سیمان و سنگدانه‌ها) اضافه و عمل اختلاط طبق روش استاندارد ASTM C192 ادامه یافت.

سه نمونه مکعبی به ابعاد $15 \times 15 \times 15$ سانتی‌متر برای هر طرح اختلاط در آزمایشگاه تهیه شد. سپس، برای هر طرح اختلاط، سه نمونه آزمایش شده و میانگین نتایج این سه نمونه به‌عنوان نتایج نهایی در نظر گرفته شد. طرح‌های اختلاط این نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌ها بر اساس طرح اختلاط کدگذاری شدند؛ به عنوان مثال، کد CA2 نشان‌دهنده وجود ۲ درصد نانو کامپوزیت (CNT/Al_2O_3) (CA2) در بتن است. این کدگذاری‌ها و ترکیبات، راهنمایی برای درک نسبت اجزای مختلف در نمونه‌های آزمایشی فراهم می‌آورند.

جدول ۲: مصالح مورد نیاز برای طرح اختلاط مورد بررسی

(کیلوگرم بر متر مکعب)

آب مورد استفاده در این مطالعه، آب آشامیدنی نیشابور است. ویژگی‌های این آب شامل مقادیر سولفات و کلرید به ترتیب ۱۷ و ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به همراه pH برابر با ۷ می‌باشد. این پارامترها مطابق با استانداردهای لازم برای آب مورد استفاده در بتن‌ریزی بوده و اطمینان از ماندگاری و دوام سازه‌های بتنی را فراهم می‌آورند. روان‌کننده مورد استفاده در این تحقیق یک روان‌کننده خنثی با نام اختصاری N102 از محصولات شیمیایی بتن است. این روان‌کننده مایع به رنگ قهوه‌ای تیره بوده و مطابق با استاندارد ASTM C1017 است. این روان‌کننده با سیمان و میکروسیلیس سازگاری دارد، طبق اطلاعات موجود در کاتالوگ شرکت شیمیایی بتن.

۳.۲. طرح اختلاط

مواد صرفی در مخلوط‌های بتنی و نسبت‌های آن‌ها به شرح زیر است:

- نسبت آب به سیمان در نمونه‌های بتنی برای دستیابی به بتن بادوام، مطابق با استاندارد ACI318-83 در نظر گرفته شده است (ACI, 1983: 1). در این تحقیق، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۵ است.

- مقدار سیمان مصرفی در نمونه‌های آزمایشگاهی ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

- مقدار شن و ماسه به ترتیب ۱۲۲۵ و ۵۲۵ کیلوگرم بر

صورت تدریجی اعمال گردد.

انتخاب بازه‌های زمانی و تعداد سیکل‌های آزمون بر اساس ماهیت آزمایش‌های دوام و استانداردهای معتبر انجام شده است. در آزمون ذوب-یخبندان، تعداد ۳۰۰ سیکل مطابق با استاندارد ASTM C666 نوع B انتخاب گردید تا اثرات تجمیعی تنش‌های دمایی به‌طور کامل بررسی شود. در آزمون محیط اسیدی، سنجش‌ها در بازه‌های ۰.۴، ۰.۸، ۱.۲ و ۱.۶ هفته طبق استاندارد ASTM C1012 صورت گرفت تا روند تدریجی کاهش جرم و مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت حمله سولفوریک مشخص شود. انتخاب این بازه‌ها با هدف ارزیابی عملکرد بلندمدت بتن حاوی نانوکامپوزیت در شرایط واقعی فرسایشی انجام گردید، زیرا تغییرات مقاومت پس از ۲۸ روز در محیط‌های مهاجم همچنان معنادار بوده و امکان تحلیل مکانیسم‌های تخریب و دوام را فراهم می‌سازد.

شکل ۲ تصاویری از نمونه‌های ساخته شده و آزمایشات را نشان می‌دهد.



شکل ۲: عکس نمونه‌ها در حال انجام آزمایش‌های مختلف

۳- نتایج

برای تحلیل ساختار نانوکامپوزیت، از مجموعه‌ای از تکنیک‌های تحلیلی شامل طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR) برای شناسایی گروه‌های عاملی شیمیایی و بررسی اتصالات مولکولی به کار می‌رود و در تعیین واکنش‌های شیمیایی بین نانوکامپوزیت و ماتریکس مؤثر است. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تعیین ساختار و مورفولوژی نانوذرات استفاده می‌شود. که روشی برای درک ساختار و ویژگی‌های نانوکامپوزیت فراهم می‌آورد و اطلاعات ارزشمندی برای کاربردهای صنعتی ارائه می‌دهد.

نمونه	سیمان Kg/m ³	نانوکامپوزیت CNT/Al ₂ O ₃ Kg/m ³
شاهد	۴۰۰	-
CA1	۳۹۶	۴
CA2	۳۹۲	۸
CA3	۳۸۸	۱۲
CA4	۳۸۴	۱۶

۲-۴- آزمایش‌های بتن

۲-۴-۱- آزمایش ذوب-یخبندان

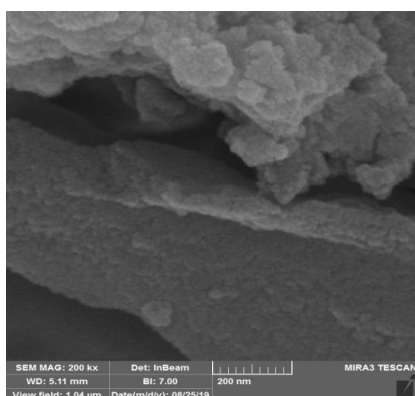
در این آزمایش، نمونه‌های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C666 نوع B، در یک سیستم سرمایشی تحت شرایط یخ‌زدگی قرار می‌گیرند. سپس، این نمونه‌ها در آب گرم غوطه‌ور می‌شوند تا فرآیند ذوب کامل شود. برای هر روز، سه سیکل ذوب-یخبندان انجام می‌شود. پس از تکمیل تعداد معینی از سیکل‌های آزمایشی، کاهش وزن نمونه‌ها به دقت اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. این فرآیند به‌منظور ارزیابی دوام بتن در شرایط ذوب-یخبندان انجام می‌شود (ASTM, 1997: 31).

۲-۴-۲- محیط اسیدی

برای بررسی تأثیر محیط اسیدی بر روی نمونه‌های بتنی، اسید سولفوریک به آب اضافه شد تا pH به ۱.۰ (غلظت ۱ درصد) برسد. نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری در محلول اسید، به دقت وزن شدند. پس از آن، میانگین وزن نمونه‌ها پس از قرارگیری در محلول اسیدی در فواصل زمانی ۰.۴، ۰.۸، ۱.۲ و ۱.۶ هفته مطابق با استاندارد ASTM C1012 اندازه‌گیری شد. در نهایت، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز جهت ارزیابی کاهش احتمالی مقاومت ناشی از خوردگی اسیدی اندازه‌گیری شد (ASTM, 2004: 32).

۲-۴-۳- دماهای بالا

نمونه‌های بتنی در دماهای بالا جهت بررسی رفتار آن‌ها در شرایط حرارتی قرار داده شده‌اند. نمونه‌ها به مدت ۴ ساعت در کوره‌هایی با دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. تغییرات رنگ و شروع یا رشد ترک‌ها در این نمونه‌های بتنی پس از آزمایش به دقت ارزیابی و ثبت شد. این آزمایش‌ها برای شناسایی میزان مقاومت حرارتی بتن و تأثیر حرارت بالا بر روی خصوصیات فیزیکی آن انجام شدند (Hager, 2013: 33). نرخ گرمایش نمونه‌ها تا رسیدن به دماهای هدف، معادل ۵°C در دقیقه بوده است. این نرخ مطابق با روش‌های مرجع و با هدف کاهش شوک حرارتی ناگهانی انتخاب شد تا اثرات تخریبی ناشی از دمای بالا به

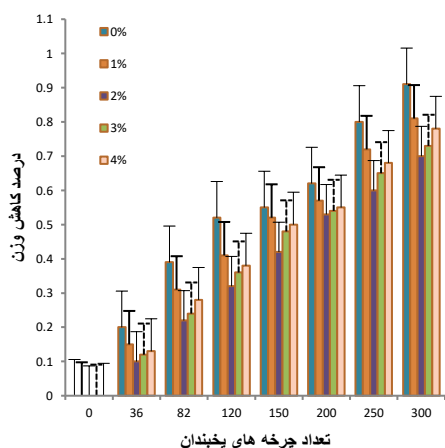


شکل ۴- تصاویر SEM نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃

۲-۳- نتایج آزمایش‌های بتن

۱-۲-۳- آزمایش ذوب- یخبندان

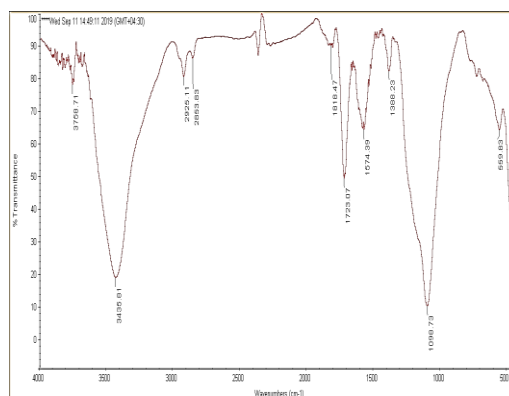
در آزمایش ذوب- یخبندان طبق استاندارد ASTM C666 نوع B، نمونه‌های بتنی در معرض سیکل‌های پی در پی ذوب- یخبندان قرار گرفتند (شکل ۵). این آزمون شامل سه سیکل روزانه بود و هدف آن بررسی تأثیر نانوکامپوزیت بر دوام بتن در شرایط سخت محیطی است. نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ نسبت به نمونه شاهد، کاهش وزن کمتری داشتند، که این امر بهبود مقاومت در برابر آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی را نشان می‌دهد. در شکل ۶ تفاوت در کاهش وزن بین نمونه‌های شامل نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ به وضوح مشاهده می‌شود، که بیانگر کارایی بالای ترکیب GO/Al₂O₃ در افزایش دوام و پایداری بتن تحت شرایط آسیب‌رسان محیطی است.



شکل ۵: مقایسه وزن کاهش نمونه‌های بتنی

۱-۲- تجزیه و تحلیل نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃

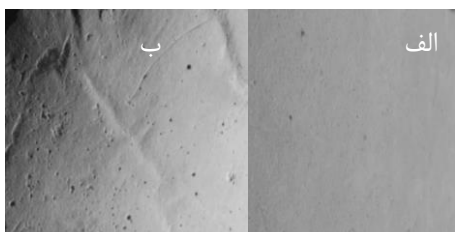
تحلیل طیف‌سنجی تبدیل فوریه نزدیک به مادون قرمز (FTIR) نانوکامپوزیت از انواع مختلف می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ترکیب شیمیایی و انواع پیوندهای شیمیایی موجود ارائه دهد (شکل ۳). پیوندهای C=C معمولاً در محدوده ۱۵۰۰ cm⁻¹ تا ۱۶۰۰ مشاهده می‌شوند و این پیوندها برای کربن-کربن در ساختار گرافیتی معمولی هستند. فرکانس‌های کشش C-H معمولاً در حدود ۲۸۵۰-۲۹۲۰ cm⁻¹ قرار دارند که نشان‌دهنده وجود گروه‌های عملکرد هیدروکربنی است. گروه‌های حاوی اکسیژن (OH, C-O, C=O) معمولاً در ناحیه ۱۰۰۰-۱۷۵۰ cm⁻¹ یافت می‌شوند و نشان‌دهنده وجود گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل هستند که ممکن است در فرآیند تولید یا اکسیداسیون سطحی به وجود آمده باشند. ارتعاشات کشش Al-O معمولاً در ناحیه ۱۰۰۰-۵۰۰ cm⁻¹ مشاهده می‌شوند. همچنین، هیدروکسیل‌های سطحی که در بازه ۳۲۰۰-۳۷۰۰ cm⁻¹ قرار دارند، ممکن است به وابستگی‌های O-H اشاره داشته باشند که نشان‌دهنده رطوبت یا گروه‌های هیدروکسیل سطحی هستند.



شکل ۳- تجزیه و تحلیل FT-IR از CNT/Al₂O₃

در این بخش، ساختار نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این نانوکامپوزیت دارای ساختارهای یکنواختی هستند که نشان‌دهنده یک فرآیند سنتز کنترل شده و مؤثر است. این یکنواختی در توزیع نانوذرات می‌تواند به بهبود ویژگی‌های بتن، مانند دوام و مقاومت، کمک کند و کاربردهای مهندسی مختلفی داشته باشد. ابزار SEM برای مشاهده و تحلیل دقیق ویژگی‌های سطحی و مورفولوژی این نانوکامپوزیت استفاده شده است و نتایج حاکی از کیفیت بالای فرآیند تولید است.

بود که نشان‌دهنده کاهش ۲۲/۴۷٪ در مقایسه با N10G1 است (Liu et al., 2021: 34). این نتایج نشان می‌دهد که نسبت زمان خشک‌شدن به مرطوب‌شدن بر افزایش آسیب و خرابی بتن تأثیر قابل توجهی دارد.

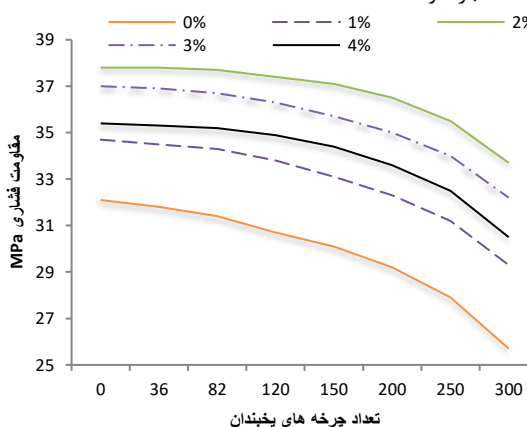


شکل ۷: تغییرات ظاهری بتن در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد (الف) نمونه کنترل، (ب) نمونه حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت

۴-۳-۳- آزمایش بتن در محیط اسیدی

بررسی تغییرات وزنی نمونه‌های بتنی در محلول اسید سولفوریک نشان داد که وزن نمونه‌ها در هفته‌های ابتدایی افزایش می‌یابد که این افزایش احتمالاً به دلیل واکنش اسید با هیدروکسید کلسیم موجود در بتن و تشکیل لایه‌ای از گچ بر سطح نمونه است. اما با گذشت زمان، این لایه سطحی تحت تخریب و شست‌وشو توسط محلول اسید قرار گرفته و کاهش وزن آغاز می‌شود. به‌طور خاص، نمونه حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت و کاهش وزن آن پس از ۱۲ هفته شروع شد، به‌طوری که تا پایان هفته ۱۶ تنها ۱٪ از وزن خود را از دست داد که بهترین مقاومت در برابر اسید سولفوریک را نشان می‌دهد. در مقابل، نمونه‌های حاوی ۱٪ و ۳٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ کاهش وزن بیشتری را تجربه کردند که مبین مقاومت کمتر این ترکیبات در برابر شرایط اسیدی است (شکل ۸).

در آزمایش مقاومت فشاری تحت سیکل‌های ذوب-یخبندان که نتایج آن در شکل ۶ نمایش داده شده است، تأثیر نانوکامپوزیت‌های CNT/Al₂O₃ با درصد‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بهترین عملکرد را در شرایط سخت محیطی دارند، به‌طوری که پس از ۳۰۰ سیکل ذوب-یخبندان، بالاترین مقاومت فشاری معادل ۳۳/۷ MPa را حفظ کرده و کمترین کاهش مقاومت فشاری، در حدود ۱۰/۸٪، را تجربه کرده‌اند. این موضوع بر اهمیت انتخاب دقیق و متناسب مقدار نانوکامپوزیت برای افزایش دوام و مقاومت بتن تأکید دارد و نشان می‌دهد که افزودن مقدار متناسب نانوکامپوزیت می‌تواند به بهبود چشمگیر عملکرد بتن در شرایط نامساعد منجر شود.



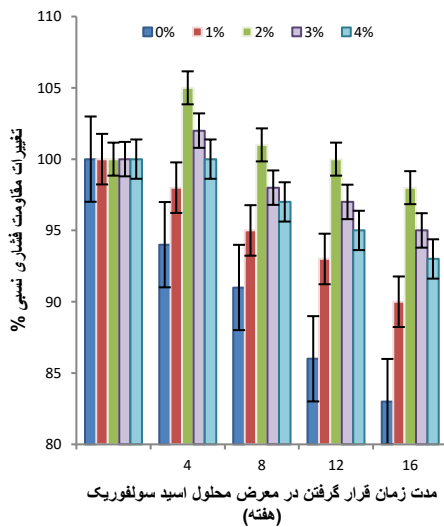
شکل ۶: مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت سیکل‌های ذوب-یخبندان

۴-۳-۲- آزمایش بتن در دماهای بالا

بررسی اثرات دماهای بالا بر روی ظاهر بتن نشان داد که نمونه‌های بتنی در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تغییر رنگی ندارند، ولی با افزایش دما به بالای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به تدریج زرد و در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد سفید می‌شوند، که این تغییرات با افزایش رشد ترک‌ها نیز همراه است. در شکل ۷، نمونه‌های حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ در مقایسه با نمونه کنترل در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد کمتر ترک خورده و تغییر رنگ بیشتری دارند، که نشان از تأثیر مثبت نانوکامپوزیت در کاهش ترک‌خوردگی دارد. علاوه بر این، طبق مطالعه‌ای از Liu و همکاران، درجه آسیب‌پذیری نمونه‌های بتنی N10G2 که مشابه N10G1 بودند، ولی آسیب‌پذیری کمتر و دیرتر ظاهر شد. پس از ۹۰ سیکل خشک‌شدن و مرطوب‌شدن، درجه آسیب N10G2 برابر با ۰/۱۵۷

تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بر بهبود بتن ایمن تحت شرایط سخت و تحلیل ...

تجربه کرد و عملکرد بهتری نسبت به سایر نمونه‌ها داشت. این نتایج بیانگر آن است که افزودن ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ به بتن، بهترین عملکرد را در کاهش اثرات مخرب حمله اسیدی اسید سولفوریک داشته و درصد بهینه جهت مقاومت در برابر شرایط اسیدی تعیین می‌شود.

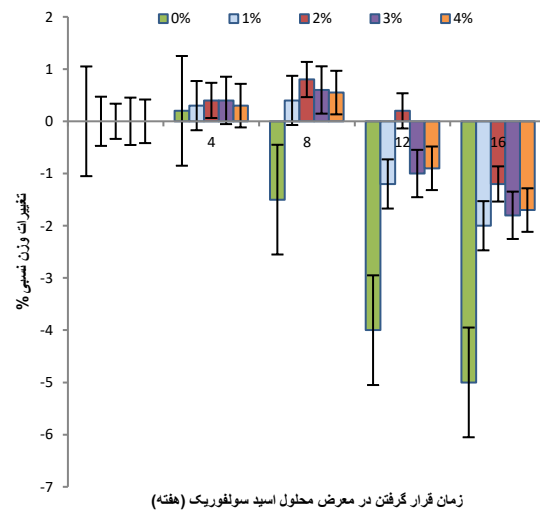


شکل ۱۰: تغییرات مقاومت فشاری نسبی نمونه‌های بتنی

۴-۳-۴- تحلیل نتایج مقاومت فشاری

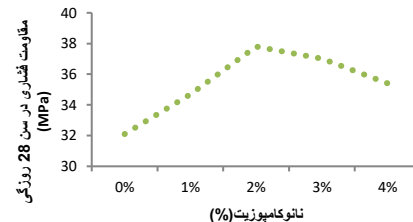
نتایج ارائه شده در جدول ۳ نشان می‌دهد که افزودن نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ در تمامی درصدهای مورد بررسی، منجر به بهبود مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روزه شده است. بیشترین افزایش در نمونه حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت (CA2) مشاهده شد که مقاومت فشاری آن به ۳۳/۷ MPa رسید؛ این مقدار حدود ۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد بالاتر است. در آزمون سیکل‌های ذوب-یخبندان، نمونه شاهد کاهش ۱۵٪ مقاومت را تجربه کرد در حالی که نمونه CA2 تنها ۱۰/۸٪ افت مقاومت داشت که نشان‌دهنده پایداری بالاتر ساختاری و کاهش آسیب ناشی از تنش‌های حرارتی است.

بررسی اثر دمای بالا (۶۰۰°C) نیز بیانگر عملکرد مطلوب نانوکامپوزیت بود؛ در این شرایط، نمونه شاهد ۲۵٪ افت مقاومت نشان داد، اما نمونه CA2 تنها حدود ۱۰٪ کاهش داشت. این نتیجه به دلیل بهبود ریزساختار و کاهش ترک‌های حرارتی در حضور نانوکامپوزیت حاصل شد. در محیط اسیدی با pH=1، پس از ۱۶ هفته غوطه‌وری، کاهش مقاومت فشاری نمونه شاهد حدود ۱۰٪ بود، در حالی که نمونه CA2 تنها کاهش بسیار ناچیز (کمتر از ۵٪) نشان داد. این امر ناشی از تشکیل ماتریسی متراکم و غنی از C-S-H و کاهش نفوذپذیری بتن است که از خوردگی اسیدی جلوگیری



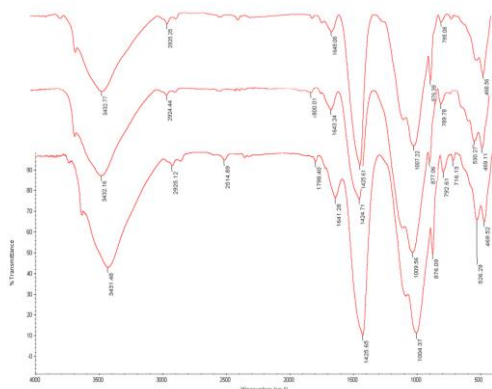
شکل ۸: تغییرات وزنی نسبی نمونه‌های بتنی شامل نانوکامپوزیت در اسید سولفوریک

بررسی تأثیر اسید سولفوریک بر مقاومت فشاری بتن نشان داد که میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه (پیش از غوطه‌وری در محلول) مبنای مقایسه در این تحقیق قرار گرفته است (شکل ۹).



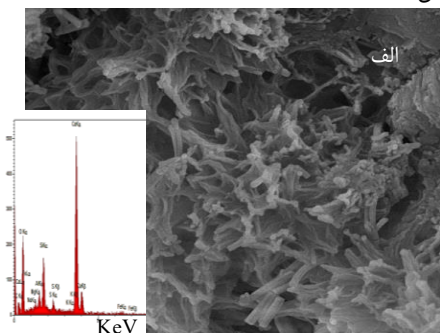
شکل ۹: مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی شامل نانوکامپوزیت

آزمون‌های مقاومتی در بازه‌های زمانی ۴، ۸ و ۱۶ هفته پس از قرارگیری نمونه‌ها در محلول انجام شد و نتایج مقاومت نسبی آن‌ها در مقایسه با مقاومت اولیه گزارش شد (شکل ۱۰). در هفته چهارم، نمونه‌های حاوی ۲٪ و ۳٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ افزایش مقاومت فشاری نشان دادند که احتمالاً به دلیل پر شدن شکاف‌های بتن توسط محصولات واکنش اسید با اجزای تشکیل‌دهنده بتن بود. پس از گذشت زمان، در هفته هشتم، تنها نمونه حاوی ۲٪ از این نانوکامپوزیت مقاومت فشاری بیشتری از خود نشان داد، در حالی که سایر نمونه‌ها با افت مقاومت مواجه شدند. در هفته شانزدهم، هرچند تمامی نمونه‌ها کاهش مقاومت داشتند، اما نمونه حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ کمترین میزان کاهش مقاومت را



شکل ۱۱: طیف (الف) FT-IR نمونه شاهد، (ب) بتن حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت، (ج) بتن حاوی ۳٪ نانوکامپوزیت

ترکیب نانوکامپوزیت، به‌ویژه CNT/Al_2O_3 ، تأثیر بسزایی در بهبود میکروساختار و خواص مکانیکی سیمان دارد. تصاویر SEM تأیید کردند (شکل ۱۲)، که افزودن ۲٪ CNT/Al_2O_3 به خمیر سیمان، منجر به کاهش قابل توجه منافذ و ایجاد ساختاری فشرده و یکنواخت می‌شود. نتایج EDX نیز کاهش کلسیم در این نمونه‌ها را نشان داد که حاکی از مصرف بیشتر $Ca(OH)_2$ در واکنش‌های پوزولانی و تولید ژل‌های متراکم C-S-H است. این نانوکامپوزیت با تسریع واکنش‌های هیدراتاسیون و بهبود کیفیت محصولات آن، ساختاری متراکم‌تر فراهم می‌کنند که به افزایش مقاومت مکانیکی منجر می‌شود. علاوه بر این، در سن ۲۸ روز، رشد بلورهای اترینگیت و تولید مداوم ژل C-S-H حفرات داخلی سیمان را کاملاً پر کرده و انسجام بیشتری به ساختار می‌بخشد. اترینگیت‌های سوزنی‌شکل که توسط ژل‌های C-S-H پوشیده شده‌اند، تراکم و کاهش نفوذپذیری را بهبود می‌بخشند و در نهایت، این تحول منجر به افزایش دوام و مقاومت بتن در برابر عوامل تخریبی مختلف می‌شود. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده نقش اساسی نانوکامپوزیت و ژل C-S-H در ایجاد ساختار متراکم و پایدار در سیمان و بتن است.



می‌کند. به‌طور کلی، یافته‌ها حاکی از آن است که نسبت بهینه ۲٪ وزنی نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 ، بهترین توازن میان بهبود مقاومت مکانیکی، افزایش دوام و کاهش نفوذپذیری را فراهم می‌آورد؛ به‌گونه‌ای که هم در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان و هم در محیط‌های با دما و اسیدیته بالا، عملکرد بهتری نسبت به دیگر درصدهای مورد بررسی دارد.

جدول ۳- نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی نانوکامپوزیت

CNT/Al_2O_3				
مقاومت پس از ۱۶ هفته محیط اسیدی (MPa)	مقاومت پس از دمای ۶۰۰°C (MPa)	مقاومت پس از ۳۰۰ سیکل ذوب-یخبندان (MPa)	مقاومت فشاری در ۲۸ روز (MPa)	شماره
۲۵/۳	۲۱/۱	۲۳/۹	۲۸/۱	شاهد
۲۷	۲۴	۲۷	۳۱	CA1
۳۱/۵	۳۰/۳	۳۰/۱	۳۳/۷	CA2
۲۹	۲۵/۵	۲۸	۳۲/۵	CA3
۲۷/۵	۲۴	۲۶	۳۱	CA4

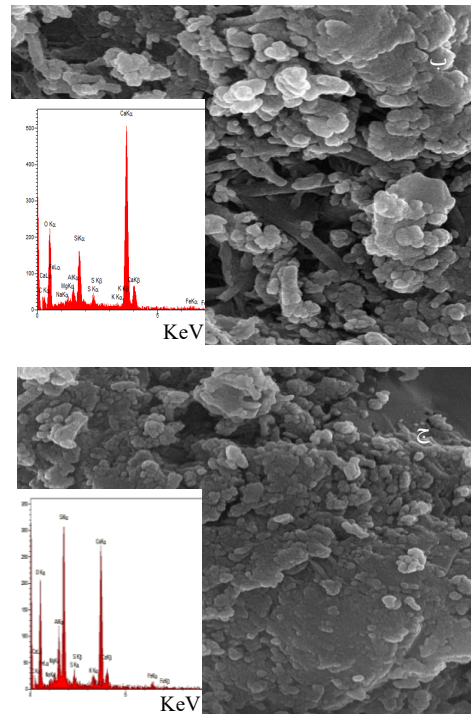
۳-۴- تجزیه و تحلیل ساختار بتن

آنالیزهای FT-IR، EDX و SEM جهت بررسی دقیق نمونه‌های بتنی حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت پس از تعیین به‌عنوان نمونه بهینه از نظر دوام انجام شد و نتایج این تحلیل‌ها استفاده مؤثر از نانوکامپوزیت و افزایش دوام بتن را تأیید کردند. طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR)، که نتایج آن در شکل ۱۱ ارائه شده، نشان‌دهنده حضور و اثرگذاری نانوکامپوزیت در ساختار بتن است. پروفایل‌های انتقال نشان دادند که کشش‌ها و ارتعاشات مرتبط با پیوندهای OH و HOH در محدوده طول موج ۳۷۰۰-۳۲۰۰ سانتی‌متر بر عکس (مرتبط با آب شیمیایی و مولکولی) و در ۱۶۴۸ سانتی‌متر بر عکس (مربوط به آب پیوندی) قابل شناسایی است. همچنین باندهای کربنات در ۱۴۲۵ سانتی‌متر بر عکس، ناحیه‌های هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) در ۱۰۰۷-۱۰۰۴ سانتی‌متر بر عکس و Al-O در ۸۷۶ سانتی‌متر بر عکس، اجزای اصلی ساختار سیمان پرتلند در تمامی نمونه‌ها بودند. بررسی دقیق‌تر نمونه‌های حاوی ۲ و ۳ درصد از نانوکامپوزیت CNT/Al_2O_3 نشان داد که قله‌های مربوط به سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) در این نمونه‌ها واضح‌تر بوده و در محدوده ۱۰۰۴-۱۰۱۰ سانتی‌متر بر عکس قابل شناسایی هستند که مبین بهبود واکنش‌های هیدراتاسیون در حضور نانوکامپوزیت است. این فرآیند ناشی از تبدیل هیدروکسید کلسیم $(Ca(OH)_2)$ به منافذ ریزتر ژل C-S-H که بهبود تراکم ماتریس بتن و در نتیجه افزایش مقاومت و دوام بتن را به همراه داشته است.

تأثیر نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بر بهبود بتن ایمن تحت شرایط سخت و تحلیل ...

همزمان این دو نانوذره اثر هم‌افزایی ایجاد کرده و توانسته مقاومت بتن را در برابر چرخه‌های ذوب-یخبندان، حرارت‌های بالا و محیط اسیدی به‌طور معناداری بهبود دهد. این امر به‌ویژه برای سازه‌های زیربنایی در مناطق با اقلیم شدید و محیط‌های خورنده، اهمیت عملی بالایی دارد. با این حال، افزایش بیش از حد مقدار نانوکامپوزیت منجر به توده‌ای شدن ذرات و کاهش یکنواختی ماتریس شد که می‌تواند بخشی از بهبودهای مکانیکی را محدود کند. بنابراین، کنترل دقیق مقدار و روش پراکنش نانوکامپوزیت در مخلوط بتن، شرط اساسی دستیابی به عملکرد مطلوب است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی بتن‌های ایمن و بادوام در پروژه‌های حساس مانند پل‌ها، تونل‌ها و سازه‌های دریایی مورد استفاده قرار گیرد. بررسی رفتار این بتن‌ها در مقیاس سازه‌ای و در شرایط بارگذاری واقعی، و همچنین مطالعه برهم‌کنش آن‌ها با سایر افزودنی‌های معدنی و شیمیایی، می‌تواند مسیر تحقیقات آتی را شکل دهد.

از نظر اقتصادی، مقدار بهینه‌ی استفاده از نانوکامپوزیت در این تحقیق ۲٪ وزنی سیمان مشخص شد. گرچه قیمت نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ بالاتر از مصالح معمول است، ولی با توجه به، افزایش دوام و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در طول عمر سازه، کاهش مصرف سیمان در طرح اختلاط (به دلیل بهبود عملکرد مکانیکی)، کاهش خسارت ناشی از خرابی زود هنگام در شرایط محیطی سخت، استفاده از این ترکیب در پروژه‌های حساس مانند پل‌ها، اسکله‌های دریایی و تونل‌ها از نظر هزینه-فایده قابل توجهی است. محاسبات مالی ساده نشان می‌دهد که افزایش هزینه اولیه کمتر از ۵٪ کل پروژه، اما صرفه‌جویی در هزینه تعمیر و جایگزینی بیش از ۲۰٪ در طول عمر سازه خواهد بود.



شکل ۱۲: طیف (ا) SEM نمونه کنترل، (ب) بتن حاوی ۳٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃، (ج) بتن حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت؛ (د) EDX نمونه کنترل، (ه) بتن حاوی ۳٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃، (و) بتن حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃

۴- نتیجه گیری

پژوهش حاضر نشان داد که استفاده بهینه از نانوکامپوزیت CNT/Al₂O₃ در بتن می‌تواند راهکار مؤثری برای افزایش دوام و عملکرد سازه‌ها در شرایط محیطی سخت باشد. افزودن ۲ درصد وزنی از این نانوکامپوزیت موجب ایجاد ریزساختاری متراکم، کاهش نفوذپذیری و بهبود واکنش‌های هیدراسیون شده که در نهایت، عملکرد مکانیکی و پایداری شیمیایی بتن را ارتقا می‌دهد. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که تنها به استفاده جداگانه از نانولوله‌های کربنی یا نانوذرات آلومینا پرداخته بودند (Li et al., 2024:152)

Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Bahurudeen, A., Jittin, V., Syed Ahmed Kabeer, K. I., & Thomas, B. S. (2023). Influence of synthesized nanomaterials in the strength and durability of cementitious composites. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02197.

Alazemi, A. (2018). Investigate the effects of nano aluminum oxide on compressive, flexural strength, and porosity of concrete (Master's thesis, University of Dayton). OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center.

American Concrete Institute (ACI). (1983). ACI 318-83: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. American Concrete Institute, Michigan.

Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering materials 1: An introduction to properties, applications and design*. Retrieved from <https://books.google.com>

ASTM International. (1997). ASTM C666-97: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2003). ASTM Standard C33: Specification for Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2004). ASTM C1012: Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bartos, P. J. M. (2009). Nanotechnology in Construction: A Roadmap for Development. *Conference paper*, 15-26.

Batiston, E., Gleize, P. J. P., Mezzomo, P., Pelisser, F., & de Matos, P. R. (2021). Effect of Carbon Nanotubes (CNTs) aspect ratio on the rheology, thermal conductivity and mechanical performance of Portland cement paste. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(5), e14506.

Castro-Hoyos, A. M., Rojas Manzano, M. A., & Maury-Ramírez, A. (2022). Challenges and Opportunities of Using Titanium Dioxide Photocatalysis on Cement-Based Materials. *Coatings*, 12(7), 968.

Chung, D. D. L. (2004). Electrically conductive cement-based materials. *Advances in Cement Research*, 16(4), 167–176.

Devi, S. C., & Khan, R. A. (2020). Compressive strength and durability behavior of graphene oxide reinforced concrete composites containing recycled concrete aggregate. *Journal of Building Engineering*, 32, 101800.

Dhir, R. K., & Dyer, T. D. (2015). *Modern concrete materials: Binders, additions and admixtures*. Published online: July 07, 2015.

Du, Y., Gao, P., Yang, J., Shi, F., & Shabaz, M. (2021). [Retracted] Experimental Analysis of Mechanical Properties and Durability of Cement-Based Composite with Carbon Nanotube. *Advances in*

Materials Science and Engineering.

El-Feky, M. S., & El-Rayes, M. (2019). The effect of nano cellulose synthesized from rice straw on the performance of cement composite reinforced with carbon nanotubes. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(10), 2401–2405.

Farvizi, M., Ebadzadeh, T., Vaezi, M. R., Kim, H. S., & Simchi, A. (2013). Effect of nano Al₂O₃ addition on mechanical properties and wear behavior of NiTi intermetallic. *Materials & Design*, 51, 375–382.

Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, *Technical Sciences*, 61, 1, 145–154.

Huang, Z., Zhang, C., Li, X., & Wang, Y. (2025). Multiscale performance and environmental impact assessment of slag and Portland blended cement for optimum carbonation curing. *CEMENT*, 14, 100088.

Humad, A. M., Dakhil, A. J., Al-Mashhadi, S. A., AlKhafaji, Z., Mohammed, Z. A., & Jabr, S. F. (2023). Improvements of mechanical and physical features of cement mortar by nano Al₂O₃ and CaCO₃ as additives. *Res. Eng. Struct. Mater.* 10(3),857-871.

Joshaghani, A., Balapour, M., Mashhadian, M., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Effects of nano-TiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on rheology, mechanical and durability properties of self-consolidating concrete (SCC): An experimental study. *Construction and Building Materials*, 245, 118444.

Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). Introduction to Ceramics..

Kishore, K., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2024). Doped multi-walled carbon nanotubes and nanoclay based-geopolymer concrete: An overview of current knowledge and future research challenges. *Cement and Concrete Composites*, 154, 105774.

Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 40(7), 1052–1059.

Konsta-Gdoutos, M. S., Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010). Multi-scale mechanical and fracture characteristics and early-age strain capacity of high performance carbon nanotube/cement nanocomposites. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 110–115.

Li, C., Li, G., Chen, D., Gao, K., Mao, Y., Fan, S., Tang, L., & Jia, H. (2023). Influencing mechanism of nano-Al₂O₃ on concrete performance based on multi-scale experiments. *Construction and Building Materials*, 384, 131402.

Li, G., Cui, H., Zhou, J., & Hu, W. (2019). Improvements of Nano-TiO₂ on the Long-Term Chloride Resistance of Concrete with Polymer Coatings. *Coatings*, 9(5), 323.

Li, H., Zhang, M.-h., & Ou, J.-p. (2007). Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement. *International Journal of Fatigue*, 29(7), 1292–1301.

Li, Y., Chen, B., & Wang, F. (2024). Synergistic effect of carbon nanotubes and nano-Al₂O₃ on the durability and mechanical performance of cementitious composites under chloride and sulfate

environments. *Cement and Concrete Composites*, 152, 105058.

Liu, F., You, Z., Xiong, R., & Yang, X. (2021). Effects of sodium sulfate attack on concrete incorporated with drying-wetting cycles. *Advances in Civil Engineering*, vol.2021, Article ID 5393504, 12 pages.

Nazari, A., Riahi, S., Riahi, S., Shamekhi, S. F., & Khademno, A. (2009). Mechanical properties of cement mortar with Al₂O₃ nanoparticles. *Journal of American Science*, 5(7), 94.

Niu, J., Li, D., Zhou, Z., Zhang, J., Liu, D., Zhao, W., Zhao, C., & Liu, X. (2021). The incorporation of phosphorylated chitosan/amorphous calcium phosphate nanocomplex into an experimental composite resin. *Remineralization, Dentin, Composite resin, Amorphous calcium phosphate*, 40(2), 422-430.

Ohama, Y. (1995). Handbook of polymer-modified concrete and mortars: Properties and process technology. *William Andrew Publishing*.

Orakzai, M. A. (2021). Hybrid effect of nano-alumina and nano-titanium dioxide on mechanical properties of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00483.

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2011). Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and Building Materials*, 25(2), 582–590.

Rajput, B. L., & Pimplikar, S. S. (2022). Abrasion and impact resistance of concrete produced with nano-silica. *Materials Today: Proceedings*, 59(1), 115–119.

Shanov, V., Yun, Y.-H., & Schulz, M. J. (2006). Synthesis and characterization of carbon nanotube materials (Review). *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 41(4), 377–390.

Silvestre, J., Silvestre, N., & de Brito, J. (2015). Review on concrete nanotechnology. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(4), 455–485.

Wang, J., Cheng, Y., Yuan, L., Xu, D., Du, P., Hou, P., & Zhou, Z. (2020). Effect of nano-silica on chemical and volume shrinkage of cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 247, 118529.

Zhang, A., Ge, Y., Du, S., Wang, G., Chen, X., Liu, X., & Li, H. (2023). Durability effect of nano-SiO₂/Al₂O₃ on cement mortar subjected to sulfate attack under different environments. *Journal of Building Engineering*, 64, 105642.

Zhang, A., Yang, W., Ge, Y., Du, Y., & Liu, P. (2021). Effects of nano-SiO₂ and nano-Al₂O₃ on mechanical and durability properties of cement-based materials: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 34, 101936.