Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Evaluation of the effectiveness of adding nanominerals to improve the engineering characteristics of concrete

Zahra Soleimani[1], Ebrahim Rahimi[2]✉, Houshang Khairy[3]

1. Master of Science, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: z.soleimani@std.du.ac.ir
2. Assistant professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: rahimi_e@du.ac.ir
   Assistant professor, Department of Earth Sciences, School of Science, Shiraz University, Shiraz, Iran.
3. Assistant professor, School of Earth Sciences, Damghan University, Damghan, Iran. E-mail: h.khairy@du.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 17 March 2024
Received in revised form 12 May 2024
Accepted 19 May 2024

Keywords:
compressive strength of concete, ultrasonic pulse velocity, nanomineral, nanobarite, nanoflorite, nanocalcite.

ABSTRACT

This article deals with the strength evaluation of concrete obtained by adding different percentages of three types of nanominerals, including nanocalcite, nanobarite and nanofluorite. To measure the velocity of ultrasonic waves and compressive strength of concrete, 15×15×15 cm cube samples were prepared with 7-, 28- and 90-days curing. 10 types of mix designs with 0.39 water-cement ratio, including the control sample (without additives) and the samples with 0.5, 0.75 and 1% nanominerals were subjected to the mentioned tests. The results showed that the addition of nanocalcite, nanofluorite, and nanobarite with values of 0.75%, 1%, and 0.75%, respectively, have the highest compressive strength compared to the control sample. Although these do not have pozzolanic properties, they play a positive role in increasing the concrete strength by filling concrete voids and due to their high specific gravity, increasing concrete density.

Introduction

Recently, the field of concrete technology has embraced nanoscale knowledge. Incorporating minute amounts of nanomaterials into cement improves its functional properties. Traditional methods of mixing cement paste prove less effective due to the lack of crystalline order in the paste structure. Numerous studies indicate that the addition of nanoparticles to concrete results in improved mechanical properties and overall concrete quality.Nanomaterials are materials that have at least one dimension between 1 and 100 nm (Khan and Hossain, 2022). Despite the progress made, the use of natural resources, especially rocks and minerals, as abundant, accessible and cheap resources, in the field of concrete production has not been successful. Most research uses synthetically produced nanoparticles, which are mainly associated with energy-intensive processes.

However, limited efforts have been made to investigate the use of nanoparticles derived from rocks and minerals to improve the mechanical properties of concrete. In one study, Bakhoum et al. (2017) showed that replacing 5% of cement and 10% of sand with nanopowder produced from granite increased the strength of concrete by 41%. Other valuable research has been done in the field of using nanoparticles as additives in concrete, some of which are mentioned below.

Li et al (2006) observed an increase in the compressive strength and abrasion resistance of concrete by adding nano-titanium and nano-silica. By obtaining the relationship between the abrasion resistance indices and the compressive strength of concrete, they showed that the abrasion resistance of concrete increases as the compressive strength increases.

Cite this article: Soleimani, Z., Rahimi, E., & Khairy, H. (2024). Evaluation of the effectiveness of adding nanominerals to improve the engineering characteristics of concrete. Journal of Engineering Geology, 18 (1), 45-70. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1017883

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1017883

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]

[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

Mahmood and Kockal (2021) review previous researches regarding the effects of nanoparticles on concrete properties. They discuss the effect of different types of nanoparticles on the workability, mechanical properties and durability properties of concrete.

This research tries to reach a new approach in making concrete with improved strength characteristics by using natural minerals in nano dimensions. For this purpose, some mineral samples were nano-powdered and replaced with cement with certain percentages. The minerals used here are calcite, barite and fluorite.

Materials and Methods

The materials used include cement, water, sand aggregates and calcite, barite and fluorite nanomaterials. The moisture contents for sand and gravel aggregates were 3.96% and 0.813% respectively. The water absorption values were 1.98% for sand and 1.329% for gravel. Finally, the density of sand was 2.41 and that of gravel 2.61. For the production of concrete, purified drinking water from Damghan city and Portland cement type II with a Blain fineness of 3055 cm2/g from Shahrood cement were used.The nanomaterial used is the result of the powdering of three mineral samples, calcite, barite and fluorite, obtained from Imamzadeh Mohammad Baqer fluorite mine located in Damghan city.

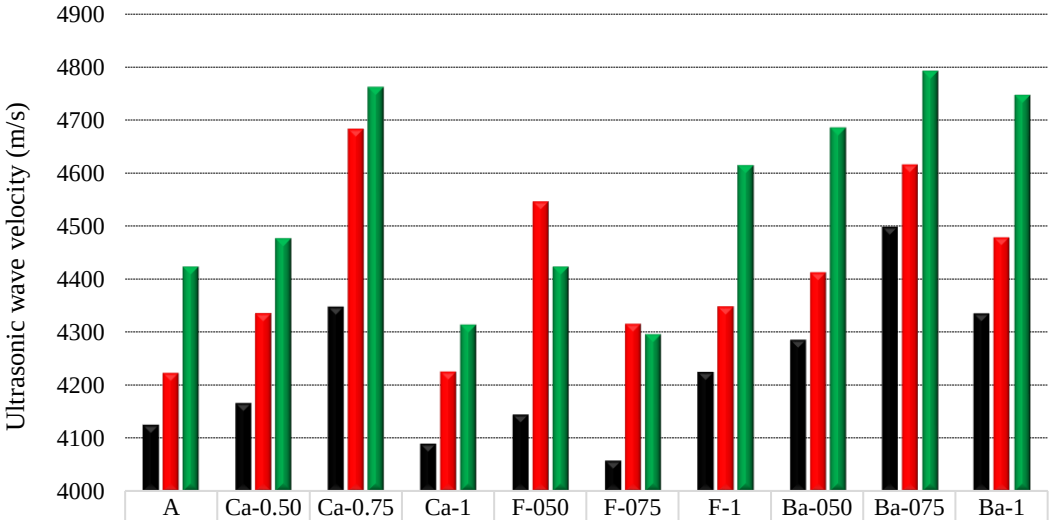
Ten concrete mix designs were prepared according to the British Standard (BS) regulations. Among these designs, one served as the control (referred to as Design A), while the remaining nine incorporated various nanomaterials:

- Three designs (Ca-0.5, Ca-0.75, and Ca-1) contained 0.5%, 0.75%, and 1% nanocalcite, respectively.
- Three other designs (Ba-0.5, Ba-0.75, and Ba-1) included 0.5%, 0.75%, and 1% nanobarite.
- The final three designs (F-0.5, F-0.75, and F-1) featured 0.5%, 0.75%, and 1% nanofluorite.

Results and Discussion

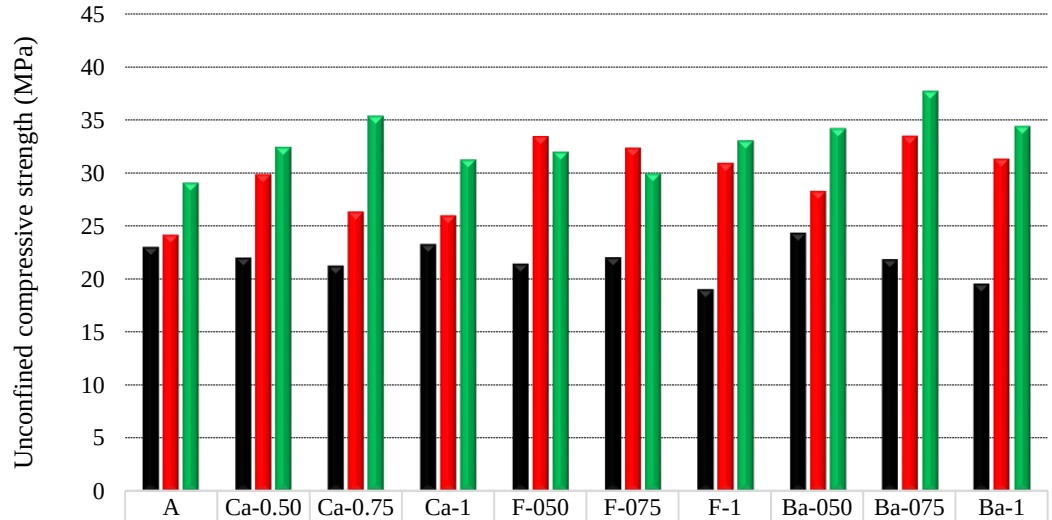
Ultrasonic wave velocity and compressive strength methods have been used to estimate and evaluate the properties of concrete. The lower the amount of porosity, the better the quality of concrete in terms of impermeability and concrete durability, and on the other hand, the wave velocity and its strength will be better. Tables 1 and 2 show a comparison between the ultrasonic wave velocity and the unconfined compressive strength of the concrete samples. This analysis sheds light on the relationship between these two critical properties and helps to understand concrete quality and performance.As observed, the ultrasonic wave velocity in samples containing nanominerals varies based on sample age and the type of additive. Figure 1a illustrates the comparative ultrasonic wave velocity samples. At 7 days, the Ba-0.75 sample has the highest velocity, while at 28 days, it's the Ca-0.75 sample. At 90 days, Ba-0.75 remains fastest, indicating better concrete properties at high ages.

Samples with different nanominerals and varying percentages show distinct compressive strength compared to the control sample. Figure 1b displays compressive strength for calcite, fluorite, barite nanominerals, and the control sample at 7, 28, and 90 days. The highest strength is achieved by replacing 0.75% nanobarite (Ba-0.75) and 0.75% nanocalcite (Ca-0.75) with cement in the 90-day sample.



	A	Ca-0.50	Ca-0.75	Ca-1	F-050	F-075	F-1	Ba-050	Ba-075	Ba-1
7 days	4125.81	4166.66	4347.82	4089.81	4145.16	4058.17	4225.35	4285.71	4497.99	4335.26
28 days	4223.18	4335.26	4682.12	4225.35	4545.45	4315.41	4347.82	4411.76	4615.3	4477.81
90 days	4424.77	4477.61	4761.9	4315.99	4424.77	4297.99	4615.3	4685.5	4792.33	4746.83

Table 1. Comparing the ultrasonic wave velocities of the samples with each other



	A	Ca-0.50	Ca-0.75	Ca-1	F-050	F-075	F-1	Ba-050	Ba-075	Ba-1
7 days	22.91	21.93	21.18	23.18	21.35	21.94	18.97	24.24	21.77	19.49
28 days	24.14	29.8	26.3	25.93	33.37	32.28	30.86	28.24	33.4	31.26
90 days	29.05	32.42	35.35	31.23	31.95	29.93	33	34.15	37.67	34.37

Table 2. Comparing the unconfined compressive strength of the samples with each other

Conclusions

This study investigated the effectiveness of improving the strength and physical properties of concrete by adding three nanominerals, calcite, barite and fluorite. Each of these three nanominerals was replaced by cement at different percentages. In order to measure the velocity of the ultrasonic waves and the compressive strength of the concrete, cubic specimens were prepared after 7, 28 and 90 days of curing. 10 types of mix designs were tested, including the control sample (without additives) and samples containing 0.5, 0.75 and 1% nanominerals.

As observed in this study, among the additive nanominerals tested, the greatest compressive strength and ultrasonic velocity are associated with the replacement of 0.75% nanobarite (Ba-0.75) as the top performer, followed by 0.75% nanocalcite (Ca-0.75).

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

These three nanominerals have a positive effect on concrete strength. They fill voids in the concrete and have a high specific gravity. Their abundance, natural origin and precision make them cost-effective for concrete production.
.

However, their lack of pozzolanic properties places them below micro- or nano-silica. Overall, research into different nanominerals could lead to materials that improve the mechanical properties and durability of concrete.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

ارزیابی اثربخشی افزودن نانوکانی‌ها در ارتقاء ویژگی‌های مهندسی بتن

زهرا سلیمانی[۱]، ابراهیم رحیمی[۲]✉، هوشنگ خیری[۳]

۱. کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: z.soleimani@std.du.ac.ir
۲. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: rahimi_e@du.ac.ir
استادیار، بخش علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز. ایران. رایانامه: rahimi_e@shirazu.ac.ir
۳. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران. رایانامه: h.khairy@du.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

کلیدواژه‌ها:
مقاومت فشاری بتن، سرعت موج برشی، نانوکانی، نانوباریت، نانوفلوریت، نانوکلسیت.

چکیده

این مقاله، به ارزیابی مقاومتیِ بتن حاصل از افزودن درصدهای مختلف سه نوع نانوکانی، شامل نانوکلسیت، نانوباریت و نانوفلوریت می‌پردازد. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت سیر امواج فراصوتی و مقاومت فشاری بتن، نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری با عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تهیه شدند. ۱۰ نوع طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۹ شامل نمونه شاهد (بدون افزودنی) و نمونه‌های واجد ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوکانی تحت آزمایش‌های مذکور واقع شدند. نتایج حاصل نشان داد، افزودن نانوکلسیت، نانوفلوریت و نانوباریت به ترتیب با مقادیر ۰/۷۵، ۱ درصد و ۰/۷۵ درصد، نسبت به نمونه شاهد دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند. چنین نانوکانی‌هایی علی‌رغم نداشتن خاصیت پوزولانی، با پرکردن حفرات بتن و دارا بودن وزن مخصوص بالا، با افزایش تراکم بتن، نقش مثبتی بر بالا بردن مقاومت بتن ایفا می‌کنند.

مقدمه

بهینه‌سازی و برطرف نمودن نقایص بتن، از مباحث مهم و ضروری تکنولوژی بتن است که توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است (Ramanathan et al., 2013؛ Uysal and Sumer, 2011). به لحاظ ویژگی‌های مکانیکی، بتنی مطلوب‌تر است که تراکم بالایی را دارا باشد. معمولاً برای دستیابی به بتن متراکم، آن را تحت ارتعاش قرار داده که این عمل مسائل و مشکلات اجرایی مختلفی در پی دارد. ارتعاش زیاد با درهم ریختن ساختار بتن، به‌ویژه تراکم ناهمگن آن، منجر به جدایش سنگ‌دانه‌های بتن از شیرابه (موسوم به پدیدهٔ Segregation) شده و اصطلاحاً باعث کرم‌خوردگی آن می‌شود. اخیراً دانش نانو به حیطه تکنولوژی بتن نیز وارد شده است. افزودن مقادیر اندک نانو مواد به سیمان، خصوصیات عملکردی آن را بهبود می‌بخشد. تکنیک‌های متداول یا سنتی ترکیب خمیر سیمان به دلیل عدم نظم بلوری در ساختار خمیر چندان کارایی ندارند.

استناد: زهرا سلیمانی، ز.، رحیمی، ا.، خیری، ه. (۱۴۰۳). ارزیابی اثربخشی افزودن نانوکانی‌ها در ارتقاء ویژگی‌های مهندسی بتن. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۱)، ۴۵-۷۰. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.1.1017883

CC BY NC
© نویسندگان.
ناشر: دانشگاه خوارزمی.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که افزودن ذرات در ابعاد نانو به بتن، ارتقاء ویژگی‌های مکانیکی و کیفیت بتن را به همراه دارد. به‌منظور دستیابی به بتنی با تراکم بالا، از سه روش شامل افزایش محتوای پودری بتن، استفاده از ماده روان کننده، و استفاده ترکیبی از دو مورد قبل، کمک گرفته می‌شود (Ramzanianpour et al., 2016). از جمله عیوب این روش‌ها، هزینه بالای آن است؛ به‌عنوان‌مثال، افزودن محتوای پودری یا همان سیمان بتن، در احجام بالا، بسیار پر هزینه خواهد بود. ازاین‌رو، برای کاستن هزینه‌های تولید بتن با تراکم بالا و با ویژگی‌های مطلوب، می‌توان سیمان را با درصدهای مختلف نانو مواد جایگزین کرد.

نانو مواد به موادی گفته می‌شود که حداقل یک بُعد آن، ۱ تا ۱۰۰ نانومتر باشد (Khan and Hossain, 2022). به‌طورکلی، زمانی که اندازهٔ ذرات کاهش می‌یابند «نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات» افزایش یافته، در نتیجه، واکنش‌پذیری آن‌ها در مقایسه با ابعاد بزرگ‌تر افزایش می‌یابد (Althoey et al., 2023; Du et al., 2014; Liu et al., 2018; Quercia et al., 2012; Thanmanaselvi and Ramasamy, 2023). نانو ذرات مورد استفاده در بتن، هم نقش پرکنندگی حفرات بسیار ریز در خمیر سیمان را داشته و هم باعث تغییراتی در فرآیند هیدراتاسیون می‌شوند (Ramzanianpour et al., 2016). نانو موادی با سطح مؤثر بالا، باعث افزایش مقاومت فشاری و انعطاف‌پذیری در سنین اولیه، بهبود هیدراتاسیون و کاهش تخلخل و جذب آب در قیاس با مواد سیمانی متداول می‌شوند (Mistry et al., 2014).

با وجود پیشرفت‌های صورت گرفته، استفاده از منابع طبیعی به‌ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها به عنوان منابع وسیع، قابل دسترس و ارزان، در زمینهٔ تولید بتن، رونقی نیافته است. عمدهٔ پژوهش‌ها از نانو ذراتی که به‌صورت سنتزی تولید شده‌اند، استفاده می‌کنند که عمدتاً با فرآیندهای انرژی بر همراه است. با این حال، تلاش‌های محدودی به منظور بررسی استفاده از ذرات نانو تولید شده از سنگ‌ها و کانی‌ها در بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن صورت گرفته است. در پژوهشی باخوم و همکاران (Bakhoum et al., 2017) نشان دادند که جایگزینی ۵ درصد سیمان و همچنین ۱۰ درصد از ماسه با پودر نانو تولید شده از گرانیت، مقاومت بتن را تا ۴۱ درصد افزایش می‌دهد. تحقیقات ارزشمندی دیگری نیز در زمینهٔ استفاده از نانو ذرات به عنوان افزودنی به بتن انجام شده است، که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.

بیات و استهلکی نشان دادند که افزودن ۱ تا ۲ درصد نانوذرهٔ رس به بتن باعث افزایش مقاومت فشاری تا ۴۳ درصد و مقاومت خمشی بتن می‌شود (Bayat & Estahlaki, 2018). آن‌ها خواص مکانیکی بتن دارای $Nano\text{-}Fe_2O_3$ و $Nano\text{-}SiO_2$ به‌صورت آزمایشی را مورد بررسی قرار دادند. با مشاهده نتایج تجربی دریافتند که مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ۷ و ۲۸ روزه بالاتر از نمونه شاهد است. بنابراین، امکان افزودن نانو ذرات برای بهبود خواص مکانیکی بتن امکان‌پذیر است. بررسی SEM ریزساختارهای درون بتن دارای نانوذره و نمونه شاهد نشان داد که $Nano\text{-}Fe_2O_3$ و $Nano\text{-}SiO_2$ منافذ را پر می‌کنند و ترکیبات $CaOH_2$ بتن را کاهش می‌دهند. جی (Ji, 2005) با مطالعه آزمایشگاهی رفتار نفوذپذیری و ریزساختار نمونه‌های بتنی حاوی نانو ذرات دی‌اکسید سیلیسیم و خاکستر بادی، دریافت که شدت و میزان واکنش پوزولانی ذرات نانو سیلیس نسبت به میکرو سیلیس بیشتر بوده و نانو سیلیس می‌تواند با بلورهای بزرگ هیدروکسید کلسیم که در نتیجهٔ واکنش هیدراسیون سیمان و آب در بتن و در ناحیه انتقال میان سنگ‌دانه‌ها و ساختار ملات سیمان تشکیل می‌شوند، واکنش داده، تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته نماید. ژل سیلیکات کلسیم نیز با

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

پر نمودن حفرات، تراکم ساختار ملات و ناحیه انتقال میان سنگ‌دانه‌ها و ملات سیمان را بهبود می‌دهد. بنابراین در این حالت، مقدار و ابعاد بلورهای هیدروکسید کلسیم به‌طور چشمگیری کاهش یافته، موجب افزایش مقاومت ملات سیمان در سنین اولیه خواهد شد. لی و همکاران (Li et al., 2006) افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش بتن را با افزودن نانو تیتانیوم و نانو سیلیس به آن، مشاهده کردند. آن‌ها با به دست آوردن رابطه بین شاخص‌های مقاومت سایشی و مقاومت فشاری بتن نشان دادند که مقاومت در برابر سایش بتن با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. محمود و کوکال (Mahmood and Kockal, 2021) به بررسی تحقیقات قبلی انجام شده در رابطه با اثرات نانو ذرات بر خواص بتن می‌پردازند. آن‌ها تأثیر انواع مختلف نانو ذرات را بر کارایی، خواص مکانیکی و خواص مربوط به دوام بتن مورد بحث قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش تلاش می‌کند تا با افزودن کانی‌های طبیعی به صورت ذرات پودری در ابعاد نانو، به رویکرد نوینی در ساخت بتن با ویژگی‌های مقاومتی ارتقاءیافته برسد. برای این منظور چند نمونه کانی در حد نانو پودر شده و با درصدهای معین جایگزین سیمان می‌شوند. کانی‌هایی که در این پژوهش برای ساخت نانو مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از کلسیت، باریت و فلوریت. کانی کلسیت با درجه سختی ۳ و وزن مخصوص ۲/۷ دارای فرمول شیمیایی $CaCO_3$ است و در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد تشکیل می‌شود و ۴۰ درصد پوسته زمین را شامل می‌گردد. کانی باریت با درجه سختی ۲/۵ تا ۳/۵ و وزن مخصوص ۳/۴ تا ۴/۶ دارای فرمول شیمیایی $BaSO_4$ و با سیستم تبلور ارتورومبیک است و در سنگ‌های آهکی و ماسه‌سنگ‌ها دیده می‌شود. کانی فلوریت با درجه سختی ۴ و وزن مخصوص ۳ تا ۳/۲۵ دارای فرمول شیمیایی CaF_2 و کریستال‌های شفافی را ایجاد می‌نماید (Mohammadi, 2008). دلایل مختلفی برای انتخاب این کانی‌ها وجود دارد. به عنوان مثال این کانی‌ها فراوان و در دسترس هستند و قابلیت پودر شدن آن‌ها در ابعاد نانو وجود دارد. کانی‌هایی نظیر سیلیس نیز توسط سایر محققین مورد ارزیابی واقع شده است.

مشخصات هر یک از مصالح به همراه جزئیات طرح اختلاط به‌کاررفته برای ساخت بتن و روش‌های ساخت نمونه در این قسمت معرفی می‌شوند.

سیمان: برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان شاهرود استفاده شده است. نرمی (برحسب سطح مخصوص یا بلین Blain) این سیمان، ۳۰۵۵ سانتیمتر مربع بر گرم بوده و عناصر اصلی ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. نتایج آزمایش XRF سیمان پرتلند تیپ ۲ شاهرود

Table 1. XRF test results of Shahrood type II Portland cement

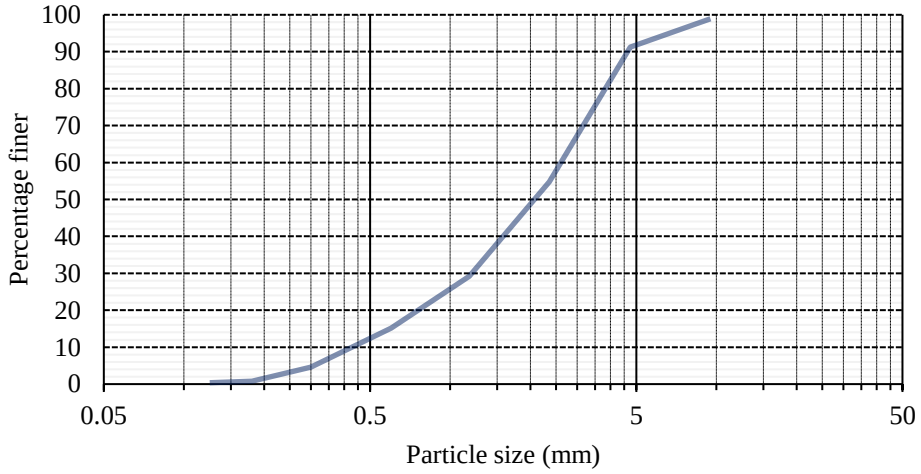
Oxides	Weight%
SiO_2	21.11
Al_2O_3	4.41
Fe_2O_3	3.96
CaO	63.36
MgO	1.51
SO_3	2.61
Na_2O	0.38
K_2O	0.51
L.O.I	2.02

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

سنگ‌دانه‌ها: حدود سه‌چهارم از حجم بتن را سنگ‌دانه‌ها شامل می‌شوند؛ بنابراین کیفیت آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. سنگ‌دانه‌های بزرگ‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر را سنگ‌دانه درشت یا شن و ریزتر از آن را سنگ‌دانه ریز یا ماسه می‌نامند. ماسه مصرفی، ماسه طبیعی دو بار شسته شده و شن مصرفی، شن شکسته با حداکثر قطر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد.

درصد رطوبت سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM C566-89 و درصد جذب آب و چگالی آن نیز طبق استاندارد ASTM-C127-88 محاسبه شدند. بر این اساس رطوبت برای سنگ‌دانه ماسه ۳/۹۶٪ و شن ۰/۸۱۳٪ به دست آمد. مقدار جذب آب برای ماسه ۱/۹۸٪ و برای شن ۱/۳۲۹٪ و به همین شکل مقدار چگالی برای ماسه ۲/۴۱ و برای شن ۲/۶۱ تعیین شدند.

دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها طبق استاندارد ASTM C136 به‌صورت شکل زیر به دست آمد.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها
Fig. 1. Gradation curve of the aggregates

آب مصرفی: در فرایند تولید بتن، به مقدار معینی آب نیاز است. درصورتی‌که این مقدار آب کمتر از حد مشخصی باشد، بخشی از سیمان، بدون واکنش بجا می‌ماند. درصورتی‌که این آب بیش از حد مجاز شود، اضافه آب به‌صورت آزاد در بتن باقی می‌ماند که پس از سخت شدن بتن، پوکی و در نتیجه کاهش مقاومت بتن را باعث می‌شود. همچنین اگر آب، کیفیت مطلوبی نداشته باشد، ناخالصی‌های موجود، گیرش سیمان را با اختلال مواجه می‌کند و نهایتاً کاهش مقاومت بتن را در پی دارد. در این پژوهش برای ساخت بتن، از آب شرب تصفیه شده و فاقد املاح معدنی شهر دامغان استفاده شد.

نانو مواد: نانو مواد مصرفی در این پژوهش حاصل پودر کردن سه نمونه کانی کلسیت، باریت و فلوریت می‌باشد. این کانی‌ها از معدن فلوریت امامزاده محمدباقر واقع شهرستان دامغان تهیه شدند. فرایند تولید نانو پودر در سه مرحله شامل خردایش اولیهٔ کانی‌ها به‌وسیله دستگاه سنگ‌شکن آزمایشگاهی، پودر کردن خرد کانی‌ها به‌وسیله دستگاه آسیاب سنگ و نهایتاً تبدیل پودر با ابعاد نانومتری به‌وسیله

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

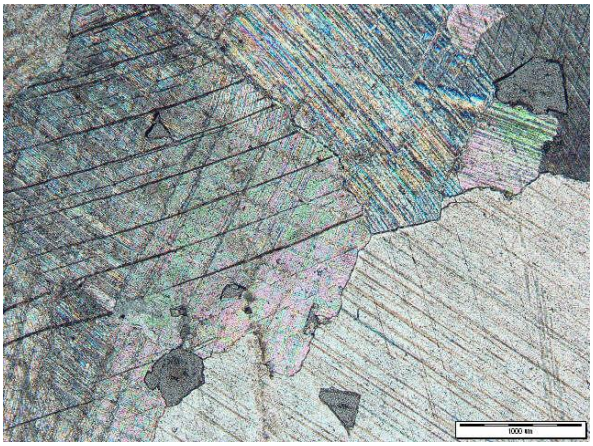
دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای انجام شد. تصاویر این ۳ دستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

نانو کلسیت: مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع به‌دست‌آمده از این کانی نشان‌دهندهٔ کلسیت‌های بزرگ و رخ‌دار است (شکل ۳).



شکل ۲. دستگاه‌های مورد استفاده در تولید نانو پودر کانی‌ها. از راست به چپ، دستگاه سنگ‌شکن، دستگاه آسیاب سنگ و دستگاه آسیاب سیاره‌ای

Fig. 2. Equipments used in the production of mineral nanopowder. From right to left, stone crushing machine, stone grinding machine and planetary grinding machine



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی نمونه کانی کلسیت

Fig. 3. Microscopic image of calcite mineral sample

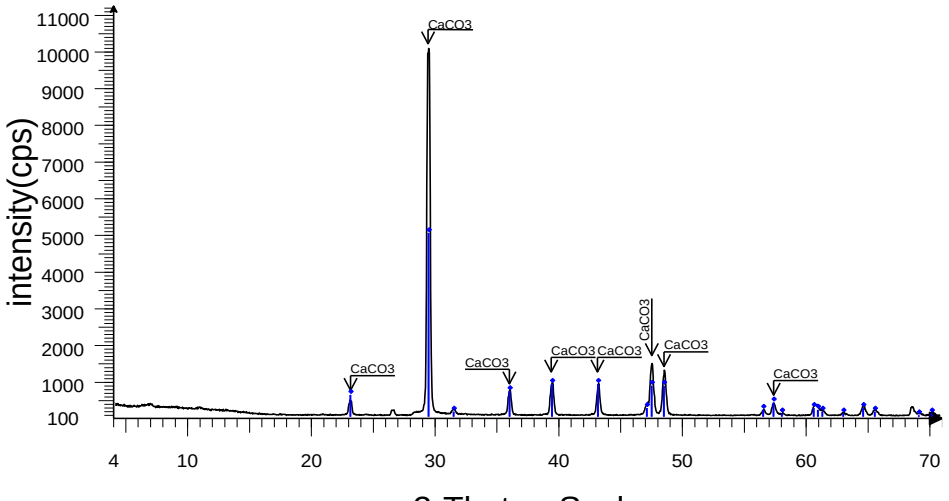
نتایج آنالیز XRF و XRD بر روی نانوکلسیت به ترتیب در جدول ۲ و شکل ۴ نمایش داده شده است. آنالیز XRF نانوکلسیت نشان می‌دهد که SiO_2 آن حدود ۰/۰۹۸درصد وزنی نمونه را شامل می‌شود.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

جدول ۲. نتایج XRF نانوکلسیت

Table 2. XRF results of nanocalcite

Oxides	Weight%
Na_2O	0.023
MgO	0.074
Al_2O_3	0.008
SiO_2	0.098
SO_3	0.028
Cl	0.023
CaO	56.201
MnO	0.087
Fe_2O_3	0.24
Zn	0.007
Sr	0.014
Ba	0.046
L.O.I (950C°, 1 hr) + moisture	43.15



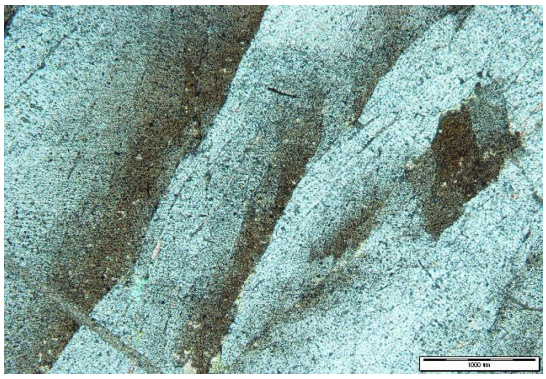
شکل ۴. نتایج حاصل از XRD نانوکلسیت

Fig. 4. XRD results of nanocalcite

نانوباریت: مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع به‌دست‌آمده از این کانی نشان‌دهنده بلورهای کشیده باریت است (شکل ۵).

نتایج آنالیز XRF و XRD بر روی نانوکلسیت به ترتیب در جدول ۳ و شکل ۶ نمایش داده شده است. آنالیز XRF نانوکلسیت نشان می‌دهد که SiO_2 حدود ۰/۱۷۱درصد وزنی نمونه را شامل می‌شود.

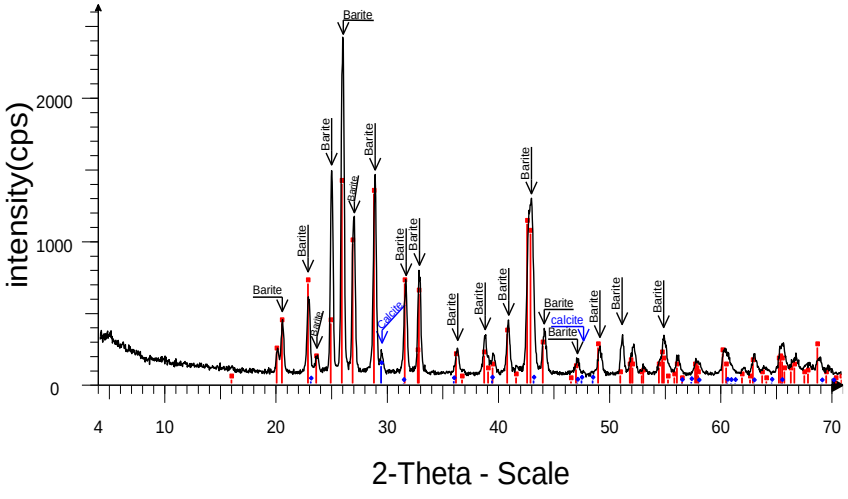
[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]



شکل ۵. تصویر میکروسکوپی نمونه کانی باریت
Fig. 5. Microscopic image of barite mineral sample

جدول ۳. نتایج XRF نانو پودر باریت
Table 2. XRF results of barite mineral nanopowder

Oxides	Weight%
Na_2O	0.428
MgO	0.058
Al_2O_3	0.236
SiO_2	0.171
SO_3	27.33
Cl	0.029
CaO	1.725
Fe_2O_3	0.034
Sr	1.713
Ba	67.219
L.O.I (950 C°, 1 hr) + moisture	1.03

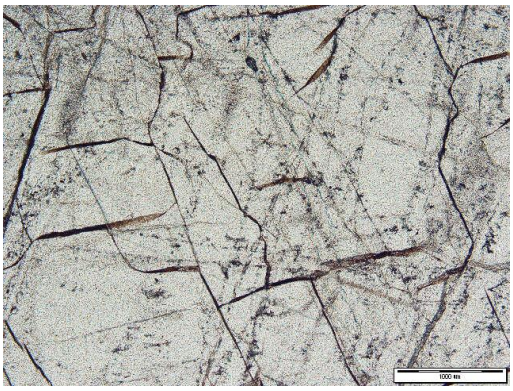


شکل ۶. نتایج حاصل از XRD نانو مواد باریت
Fig. 6. XRD results of barite nanomaterials

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

نانوفلوریت: مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع به‌دست‌آمده از این کانی نشان‌دهندهٔ رَخ در چند جهت است (شکل ۷).

نتایج آنالیز XRF و XRD بر روی نانوکلسیت به ترتیب در جدول ۴ و شکل ۸ نمایش داده شده است. آنالیز XRF نانوکلسیت نشان می‌دهد که SiO_2 حدود ۰/۱۷۱درصد وزنی نمونه را شامل می‌شود.

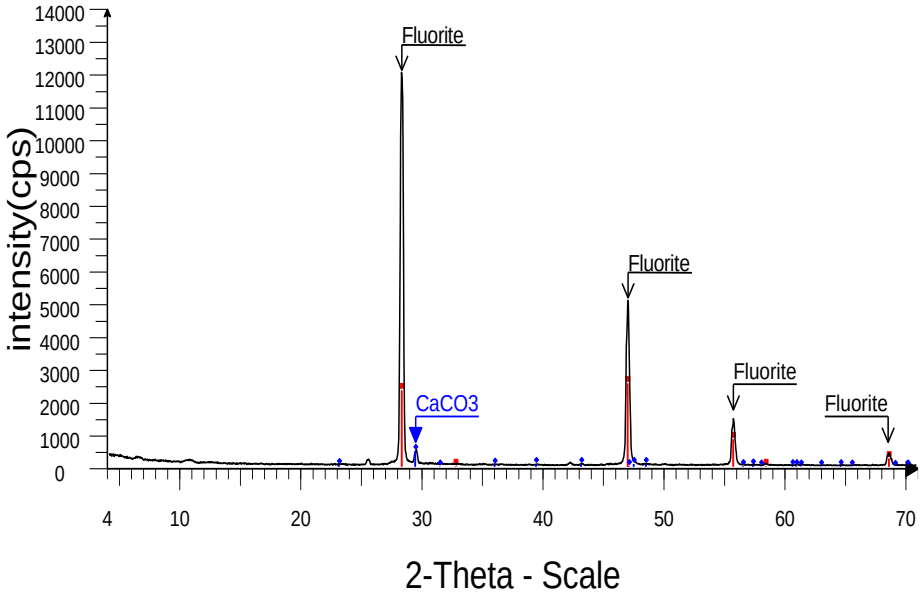


شکل ۷. تصویر میکروسکوپی نمونه کانی فلوریت
Fig. 7. Microscopic image of florite mineral sample

جدول ۴. نتایج XRF نانوفلوریت
Table 4. XRF results of nanoflorite

Oxides	Weight%
F	41.136
Na_2O	0.151
MgO	0.111
Al_2O_3	1.357
SiO_2	1.995
P_2O_5	0.013
SO_3	0.056
Cl	0.08
K_2O	0.226
CaO	52.001
TiO_2	0.081
MnO	0.069
Fe_2O_3	0.382
Ni	0.004
Cu	0.009
Zn	0.01
Sr	0.007
Ba	0.072
L.O.I (950C°, 1 hr) + moisture	2.24

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]



شکل ۸. نتایج حاصل از XRD نانوباریت
Fig. 8. XRD results of nanobarite

طرح اختلاط بتن: طرح اختلاط بتن بدین مفهوم است که به چه نسبتی اجزاء بتن (سیمان، آب، شن و ماسه) مخلوط شوند تا بتن ساخته شده به خواصی از پیش تعیین شده، دست یابند. معمولاً در طرح اختلاط، سه هدفِ رسیدن به مقاومت دلخواه، تأمین دوام کافی و رسیدن به اسلامپ مورد نظر است. دو مورد اول مرتبط با بتن سخت شده و مورد سوم به بتن تازه مربوط می‌شود.

امروزه روش‌ها و آئین‌نامه‌های مختلفی و متعددی برای طرح اختلاط بتن وجود دارد. از جمله این طرح‌ها می‌توان به ACI، PCA، طرح یونسکو، طرح B.S (آئین‌نامه انگلستان)، طرح فرانسه و طرح کانادا و غیره اشاره کرد. در اینجا طرح اختلاط B.S مورد استفاده قرار گرفته است. طرح اختلاط B.S نیز همانند ACI یکی از معتبرترین روش‌های طراحی محسوب می‌شود.

در این پژوهش ۱۰ طرح اختلاط فراهم شد که یک طرح به عنوان شاهد به نام A و ۹ طرح با نانوکانی‌ها می‌باشد. از این ۹ طرح، سه طرح به نام‌های Ca-0.5، Ca-0.75 و Ca-1 به ترتیب واجد ۰/۵، ۰/۷۵و ۱ درصد نانوکلسیت، سه طرح به نام‌های Ba-0.5، Ba-0.75 و Ba-1 به ترتیب واجد ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوباریت و سه طرح به نام‌های F-0.5، F-0.75 و F-1 به ترتیب واجد ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوفلوریت می‌باشند. جدول ۵ جزئیات هر یک را نشان می‌دهد. مقدار شن، ماسه و آب برای کلیه طرح‌ها ثابت و به ترتیب معادل ۱۱۶۰/۵۰، ۵۹۷/۸۲ و ۱۶۷/۳۴ می‌باشد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

جدول ۵. جزئیات طرح اختلاط نمونه‌ها

Table 5. Details of sample mixing designs

Mix design	Cement (kg/m^3)	Nanocalcite (kg/m^3)	Nanoflorite (kg/m^3)	Nanobarite (kg/m^3)
A	429	-	-	-
Ca-0.5	428.852	0.148	-	-
Ca-0.75	428.778	0.222	-	-
Ca-1	428.704	0.296	-	-
F-0.5	428.852	-	0.148	-
F-0.75	428.778	-	0.222	-
F-1	428.704	-	0.296	-
Ba-0.5	428.852	-	-	0.148
Ba-0.75	428.778	-	-	0.222
Ba-1	428.704	-	-	0.296

ساخت نمونه‌ها: نحوهٔ ساخت نمونه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است، به‌ویژه زمانی که از نانو مواد در آن استفاده می‌شود. زمانی که نانو مواد به بتن اضافه می‌شود، باید تلاش شود تا این مواد به طور یکنواخت در کل نمونه پخش شوند، در غیر این صورت تأثیر نانو مواد، در بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی بتن قابل ارزیابی نخواهد بود.

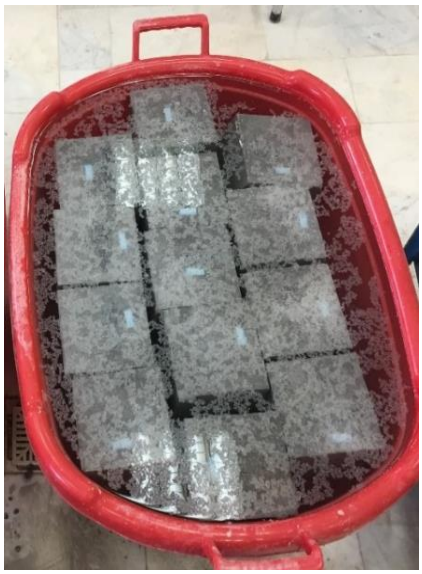
در مورد نمونهٔ شاهد (A) پس از اختلاط کامل مصالح، قالب‌گیری نمونه‌ها در قالب‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری به دقت انجام شد. قالب‌ها از قبل روغن‌کاری و آماده شده بودند و بتن در سه مرحله (لایه) درون قالب‌ها ریخته و ویبره شدند. سپس سطح نمونه‌ها با ماله‌کشی صاف شده و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند.

نمونه‌های حاوی نانوکانی‌ها با دقت مضاعفی ساخته شدند. بدین ترتیب که ابتدا مصالح شن و ماسه مخلوط شدند. سپس سیمان به آن اضافه و به‌خوبی مخلوط شد. در مرحله بعد، نانوکانی‌ها درون دستگاه میکسر (مخلوط‌کن) وارد و به مدت ۵ دقیقه با آب هم زده شد. این مخلوطِ حاوی نانوکانی به مصالح قبلی اضافه و با مقادیر محاسبه شدهٔ آب موردنیاز به‌خوبی مخلوط شد. نهایتاً بتن آمده شده در قالب‌های مکعبیِ روغن‌کاری شده، قالب‌گیری و ویبره شدند.

عمل‌آوری نمونه‌ها: عمل‌آوری نمونه‌ها بر اساس آئین‌نامه ASTM C 192-81 انجام شد. بعد از ۲۴ ساعت که نمونه‌ها از قالب خارج شدند، برای عمل‌آوری وارد حوضچه‌های آب شدند (شکل ۹). به طور مرسوم عمل‌آوری در مدت‌زمان ۷، ۲۸ و ۹۰ روز انجام می‌گیرد. شرایط عمل‌آوری از قبیل دمای محیط و دمای آب، برای کلیهٔ نمونه‌ها در شرایط استاندارد و ثابت نگه داشته شد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]



شکل ۹. نمونه‌های بتن ساخته شده در حوضچه عمل‌آوری
Fig. 9. Concrete samples in the curing tank

نتایج و بحث

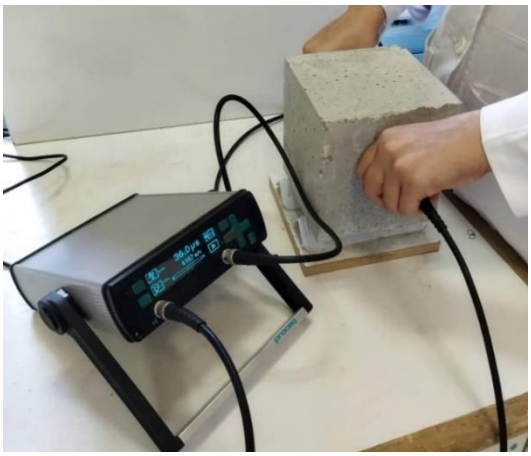
این پژوهش به بررسی تأثیر افزودن نانو کانی‌های کلسیت، باریت و فلوریت بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن پرداخته است. از روش‌های متعددی که برای تخمین و ارزیابی خواص بتن وجود دارد، می‌توان به تعیین سرعت سیر امواج اولتراسونیک و مقاومت فشاری اشاره کرد. هرچه مقدار تخلخل پایین‌تر باشد، کیفیت بتن به لحاظ نفوذناپذیری و دوام بتن بهتر و از طرفی سرعت سیر امواج و مقاومت آن نیز بهتر خواهد بود.

آزمایش تعیین سرعت امواج اولتراسونیک

آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک یا فراصوتی (استاندارد ASTM C597)، از آزمایش‌های غیر مخرب (Nondestructive) برای ارزیابی مقاومت بتن و درجهٔ همگنی آن به شمار می‌آید. این آزمایش به آسانی می‌تواند علاوه بر ارزیابی مقاومت بتن، نمودی از دانه‌بندی بتن و نیز کیفیت دانه‌بندی بتن در بخش‌های مختلف آن باشد. آزمایش سرعت اولتراسونیک بتن، راهی مؤثر در ارزیابی کیفیت و یکنواختی و عمق ترک است. این آزمایش، سرعت عبور پالس‌های ارتعاش گذرنده از بتن را اندازه‌گیری می‌کند. بر این اساس، اهداف عمدهٔ این آزمایش عبارت‌اند از شناسایی درزه‌ها و حفره‌ات و به عبارتی تغییراتی که در طول زمان در ساختار بتن شکل گرفته، تخمین کیفیت بتن، مقایسه کیفیت بخشی از بتن با سایر نقاط و تعیین مدول الاستیسیته بتن.

انجام آزمایش بدین‌گونه است که پس از آماده شدن نمونه‌های بتن (در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه)، فرستنده و گیرندهٔ دستگاه به دو انتهای نمونه‌ها (با طول مشخص) متصل (شکل ۱۰) و مدت زمان عبور پالس یادداشت می‌شود. در نهایت با تقسیم دو مقدار طول نمونه و زمان، سرعت موج ارسالی محاسبه می‌گردد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]



شکل ۱۰. نمایی از نحوهٔ تعیین سرعت موج با دستگاه اولتراسونیک بتن

Fig. 10. A view of how to determine the wave velocity with a concrete ultrasonic device

طبقه‌بندی کیفیت بتن بر اساس میزان سرعت عبور امواج فراصوتی مطابق جدول ۶ می‌باشد (Whitehurst, 1951). جدول ۷ نتایج انجام آزمایش سرعت امواج فراصوتی بر روی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این جدول و با بررسی نتایج بدست آمده از جدول ۶، نمونه‌ها در درجه کیفی خوب و عالی ارزیابی می‌شوند. در تمامی نمونه‌ها (به جزء نمونه‌های ۰/۵٪، ۰/۷۵٪ فلوریت) با افزایش سن، سرعت عبور امواج افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی اثربخشی هر یک از این نانوکانی‌ها پرداخته شده است.

جدول ۶. طبقه‌بندی کیفیت بتن بر اساس میزان سرعت عبور امواج فراصوتی (Whitehurst, 1951)

Table 6. Classification of concrete quality based on the ultrasonic wave velocity (Whitehurst, 1951)

Concrete quality	Pulse velocity (m/s)
Excellent	Above 4500
Generally good	4500-3500
Questionable	3500-3000
Generally poor	3000-2000
Very poor	Below 2000

جدول ۷. نتایج آزمایش اولتراسونیک کل نمونه‌ها

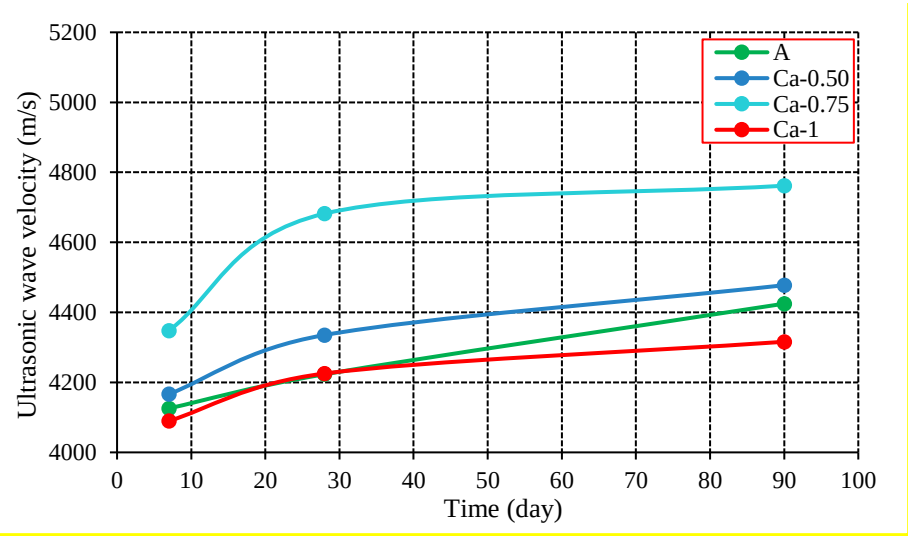
Table 7. Ultrasonic test results of all samples

Samples	Pulse velocity (m/s)		
	7 days	28 days	90 days
A	4125	4233	4425
Ca-0.5	4167	4335	4477
Ca-0.75	4348	4682	4762
Ca-1	4090	4225	4316
F-0.5	4145	4545	4425
F-0.75	4058	4315	4298
F-1	4225	4348	4615
Ba-0.5	4286	4412	4686
Ba-0.75	4498	4615	4793
Ba-1	4335	4478	4747

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

تأثیر افزودنی نانوکلسیت بر سرعت سیر امواج اولتراسونیک

شکل ۱۲ سرعت سیر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی نانوکلسیت و نمونه شاهد را ترسیم می‌کند. همان‌گونه که دیده می‌شود، نمونه‌های واجد ۰/۵۰٪ و ۰/۷۵٪ نانوکلسیت در بازۀ زمانی ۷ روز، سرعت موج فراصوتی بیشتری از نمونه شاهد (نمونه A بدون نانو مواد افزودنی) را کسب کرده است. در بتن واجد ۱٪ نانوکلسیت (Ca-1)، نمونه ۷ روزه، سرعت موج کمتری نسبت به نمونه شاهد را نشان می‌دهد و گرچه بتن در بازه زمانی حدود ۲۱ روز، سرعتی در حد نمونه شاهد کسب می‌کند، اما با افزایش زمان، سرعت موج در آن کاهش می‌یابد. در سن ۹۰ روز، بیشترین میزان سرعت موج مربوط به نمونه Ca-0.75 می‌باشد. در نتیجه جایگزینی سیمان با ۰/۷۵٪ نانوکلسیت، بهبود خواص بتن، بویژه کاهش تخلخل و افزایش تراکم بتن را در پی دارد.

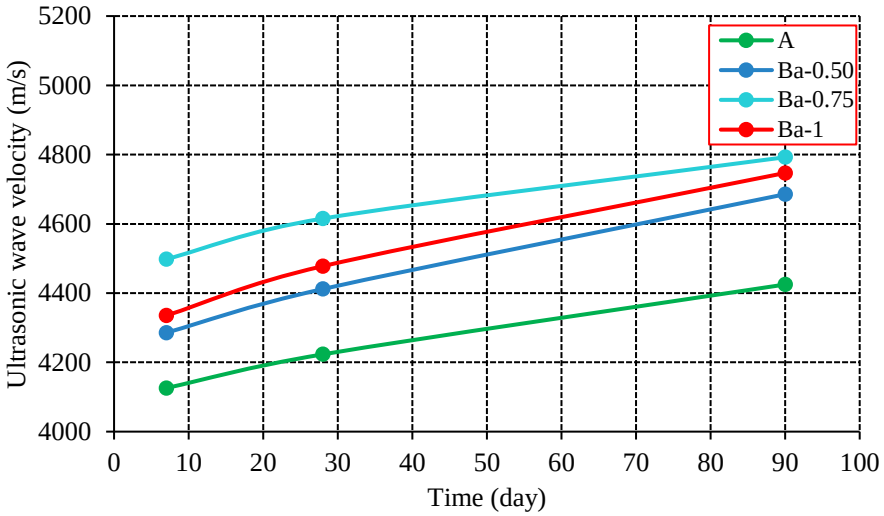


شکل ۱۲. سرعت سیر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی نانوکلسیت

Fig. 12. Ultrasonic wave velocities in samples having nanocalcite

تأثیر افزودنی نانوباریت بر سرعت سیر امواج اولتراسونیک

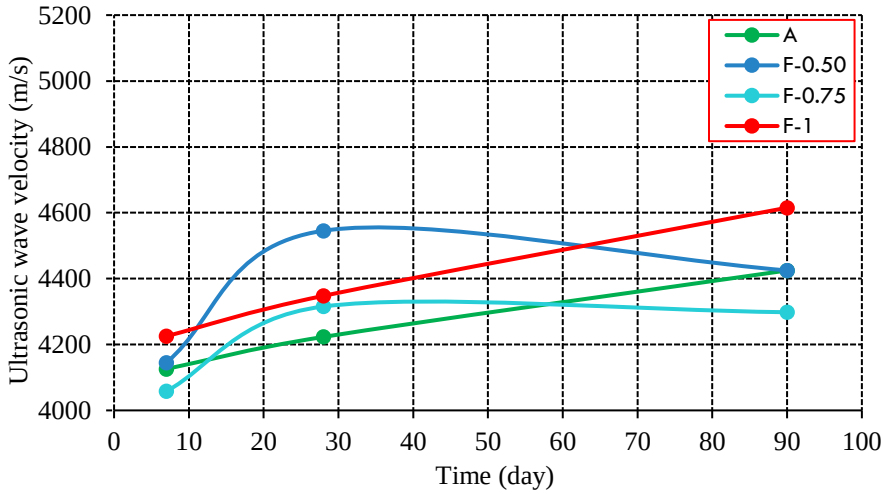
شکل ۱۳ سرعت سیر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی نانوباریت و نمونه شاهد را نشان می‌دهد. شیب منحنی نمونه‌های واجد نانو پودر در هر سه بازۀ زمانی روند صعودی داشته و از سرعت سیر امواج اولتراسونیک نمونه شاهد بیشتر است. در بین نمونه‌های واجد نانو پودر، نمونه واجد ۰/۷۵٪ درصد باریت (Ba-0.75) دارای بیشترین سرعت سیر موج اولتراسونیک می‌باشد. در نتیجه افزودن مواد باریت با سه میزان ذکر شده به خصوص ۰/۷۵٪ جایگزینی، باعث بهبود خواص بتن می‌شود.



شکل ۱۳. سرعت سیر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی نانوباریت
Fig. 13. Ultrasonic wave velocities in samples having nanobarite

تأثیر افزودنی نانوفلوریت بر سرعت سیر امواج اولتراسونیک

با توجه به شکل ۱۴، در سن ۷ روز بیشترین مقدار سرعت موج اولتراسونیک مربوط به نمونه واجد ۱٪ نانوفلوریت می‌باشد و با افزایش زمان در سن ۲۸ روز، سرعت سیر تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد بیشتر می‌باشد. با افزایش زمان در سن ۹۰ روز نمونه واجد ۱٪ نانوفلوریت روند افزایشی خود را حفظ کرده است، ولی نمونه‌های ۰/۵۰ و ۰/۷۵ درصد نسبت به ۲۸ روز روند کاهش داشته‌اند که حتی نمونه واجد ۰/۷۵٪ نانوفلوریت، سرعت کمتری از نمونه شاهد نشان می‌دهد. در نتیجه بهترین گزینه برای جایگزینی سیمان، ۱ درصد نانوفلوریت با سیمان می‌باشد.



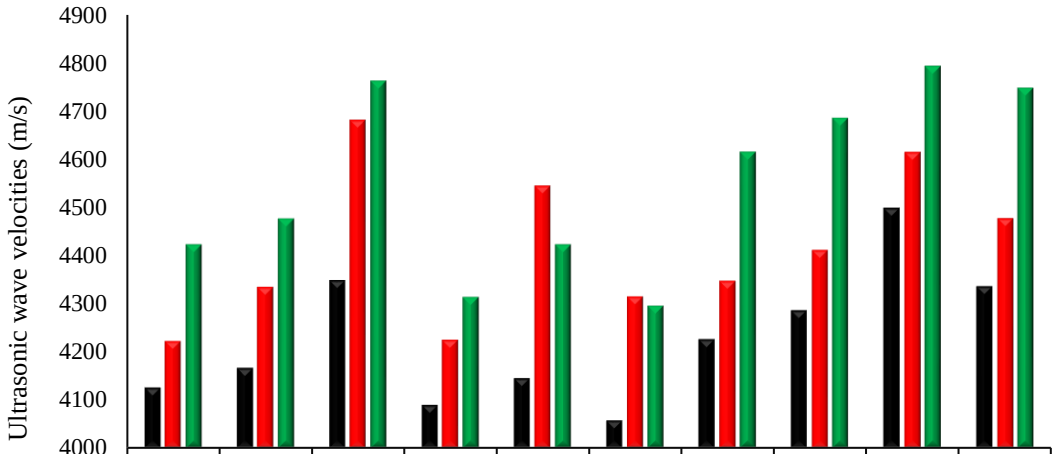
شکل ۱۴. سرعت سیر امواج اولتراسونیک در نمونه‌های حاوی نانوفلوریت
Fig. 14. Ultrasonic wave velocities in samples having nanoflorite

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

مقایسه سرعت امواج اولتراسونیک نمونه‌ها

سرعت سیر امواج در نمونه‌های واجد نانوکانی، همان‌گونه که مشاهده شد، بسته به سن نمونه‌ها و نوع ماده افزودنی، روندی کاهشی یا افزایشی از خود نشان داد. شکل ۱۵ نموداری مقایسه‌ای از سرعت موج اولتراسونیک نمونه‌های آزمایش شده را به تصویر می‌کشد. بیشترین مقدار سرعت در سن ۷ روز مربوط به نمونه Ba-0.75، در ۲۸ روز مربوط به نمونه Ca-0.75 و در ۹۰ روز مربوط به نمونه Ba-0.75 است. در نتیجه نمونه Ba-0.75، در سنین بالا خواص بتن بهتری را نشان می‌دهد.



	A	Ca-0.50	Ca-0.75	Ca-1	F-050	F-075	F-1	Ba-050	Ba-075	Ba-1
7 days	4125.81	4166.66	4347.82	4089.81	4145.16	4058.17	4225.35	4285.71	4497.99	4335.26
28 days	4223.18	4335.26	4682.12	4225.35	4545.45	4315.41	4347.82	4411.76	4615.3	4477.81
90 days	4424.77	4477.61	4761.9	4315.99	4424.77	4297.99	4615.3	4685.5	4792.33	4746.83

شکل ۱۵. نمودار مقایسه‌ای سرعت سیر امواج اولتراسونیک نمونه‌ها با یکدیگر

Fig. 15. Comparing the ultrasonic wave velocity of the samples with each other

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) بر اساس استاندارد BS EN 12390-3:2009 انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری معمول‌ترین آزمایش برای ارزیابی مقاومت نمونه‌های بتنی است. از هر بتن، یک مقاومت حداقل انتظار می‌رود، بنابراین آزمایشی مهم و اساسی است. مقاومت فشاری نمونه می‌تواند نمایانگر روند فعالیت‌های سیمانی و پوزولانی و کیفیت ماتریس سیمانی بتن و پیوستگی آن با سنگ‌دانه‌ها باشد. مقادیر مقاومت نمونه‌های مکعبی در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز با آزمایش بر روی ۳ نمونه از هر طرح بدست آمد. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری برای سنین مذکور در جدول ۸ ارائه شده است.

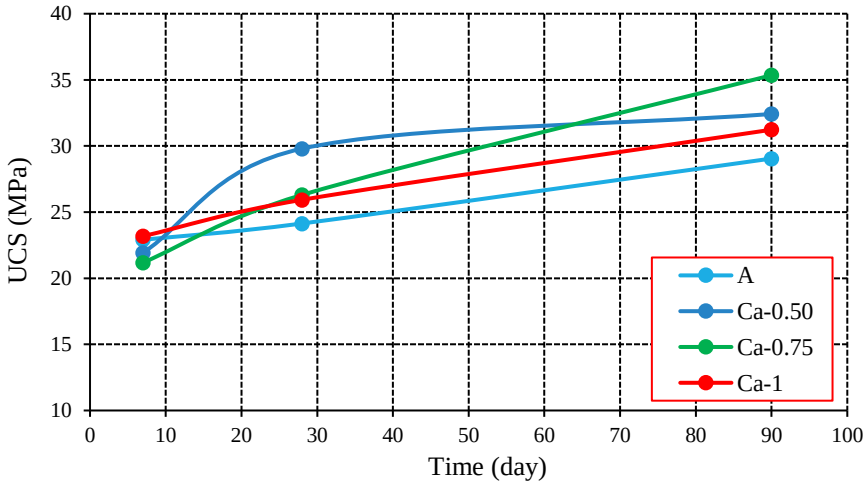
جدول ۸. نتایج آزمایش مقاومت فشاری کل نمونه‌ها

Table 8. Compressive strength test results of all samples

Samples	UCS (m/s)		
	7 days	28 days	90 days
A	22.91	24.14	29.05
Ca-0.5	21.93	29.80	32.42
Ca-0.75	21.18	26.30	35.35
Ca-1	23.18	25.93	31.32
F-0.5	21.35	32.37	31.95
F-0.75	21.94	32.28	29.93
F-1	18.97	30.86	33.00
Ba-0.5	24.24	28.24	34.15
Ba-0.75	21.77	23.40	37.67
Ba-1	19.49	31.26	34.37

تأثیر افزودنی نانوکلسیت بر مقاومت فشاری بتن

شکل ۱۶ روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌های واجد ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوکلسیت و نمونهٔ شاهد را در بازهٔ زمانی ۹۰ روزه نشان می‌دهد. مقاومت فشاری ۷ روزهٔ نمونه‌های واجد ۰/۵۰ و ۰/۷۵ درصد نانوکلسیت از نمونه شاهد کمتر است، در صورتی که نمونه واجد ۱ درصد نانوکلسیت، مقاومت بیشتری کسب کرده است. با افزایش زمان، پس از حدود ۱۷ روز، مقاومت فشاری همه نمونه‌های واجد نانوکلسیت، از نمونه شاهد بیشتر می‌گردد. بیشترین مقدار مربوط به جایگزینی ۰/۵٪ نانوکلسیت است. در بازه زمانی ۲۸ روزه نیز، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه ۰/۵۰٪ نانوکلسیت است، اما با طولانی شدن دورهٔ عمل‌آوری، از سرعت رشد آن کاسته شده، به‌نحوی‌که در بازهٔ زمانی ۹۰ روزه، بیشترین مقدار مقاومت را نمونهٔ ۰/۷۵٪ کسب می‌کند؛ در نتیجه، این میزان نانوکلسیت، بهترین درصد جایگزینی با سیمان، برای به دست آوردن مطلوب‌ترین مقاومت فشاری بتن، خواهد بود.



شکل ۱۶. مقاومت فشاری محصور نشدهٔ نمونه‌های واجد نانوکلسیت

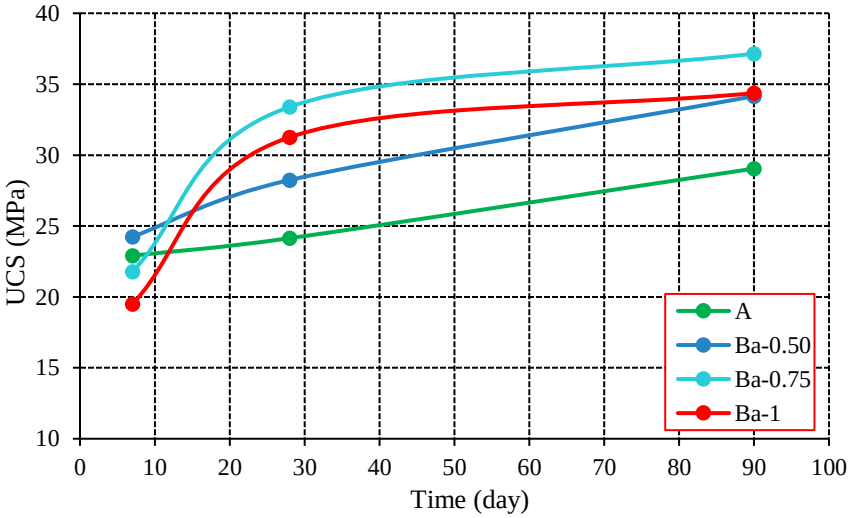
Fig. 16. Unconfined compressive strength results of samples containing nanocalcite

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

تأثیر افزودنی نانوباریت بر مقاومت فشاری بتن

شکل ۱۷ روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌های واجد ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوباریت و نمونهٔ شاهد را در بازهٔ زمانی ۹۰ روزه نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، بالاترین رشد صعودی یا نرخ کسب مقاومت فشاری نمونه‌های واجد نانوباریت، مربوط به بازهٔ زمانی حدود ۷ تا ۲۸ روز می‌باشد. اگرچه تا حدود ۱۲ روز ابتدایی، مقاومت نمونه‌های واجد نانوباریت، در قیاس با نمونه شاهد، کمتر است یا اختلاف چندانی نشان نمی‌دهد، اما با گذر زمان، تمام نمونه‌های تیمار شده، مقاومت بیشتری را کسب کرده‌اند. در بازهٔ زمانی ۹۰ روزه، نمونهٔ واجد ۰/۷۵٪ نانوباریت بیشترین مقدار مقاومت را نشان می‌دهد؛ در نتیجه بهترین درصد جایگزینی نانوباریت با سیمان خواهد بود.

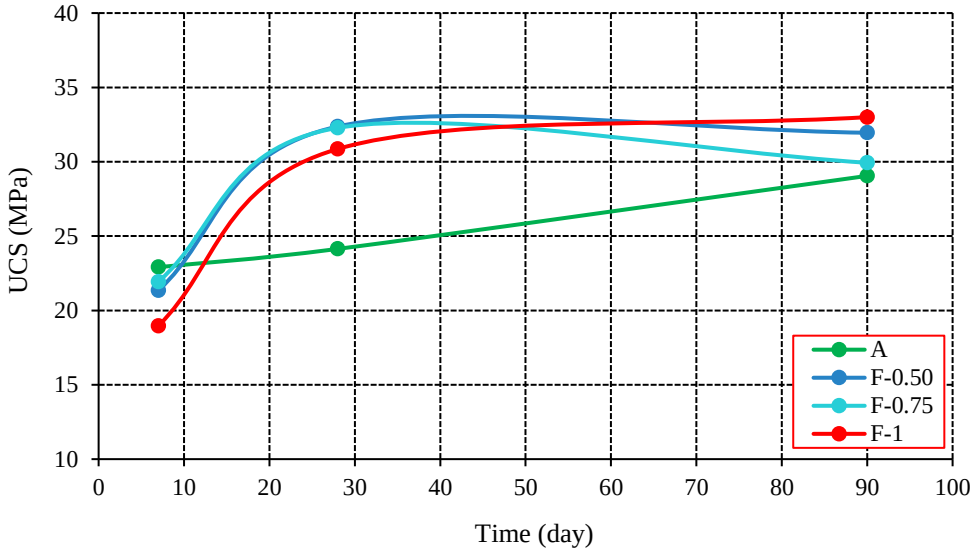


شکل ۱۷. مقاومت فشاری محصور نشدهٔ نمونه‌های واجد نانوباریت

Fig. 17. Unconfined compressive strength results of samples containing nanobarite

تأثیر افزودنی نانوفلوریت بر مقاومت فشاری بتن

شکل ۱۸ روند کسب مقاومت فشاری نمونه‌های واجد ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوفلوریت و نمونهٔ شاهد را در بازهٔ زمانی ۹۰ روزه نشان می‌دهد. با توجه به نمودار، بیشترین نرخ کسب مقاومت فشاری نمونه‌های واجد نانوفلوریت نیز مربوط به بازهٔ زمانی حدود ۷ تا ۲۸ روز است. در سن ۷ روز، مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها از نمونه شاهد کمتر می‌باشد. با افزایش زمان، در سن ۲۸ روز، مقاومت فشاری نمونه‌های تیمار شده، از نمونه شاهد بیشتر می‌شوند و نمونهٔ واجد ۰/۵۰٪ فلوریت، بیشترین مقاومت را بدست آورده است. در سن ۹۰ روز، نمونهٔ واجد ۱٪ فلوریت، دارای بیشترین مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد است؛ در نتیجه، بهترین درصد جایگزینی فلوریت با سیمان خواهد بود.



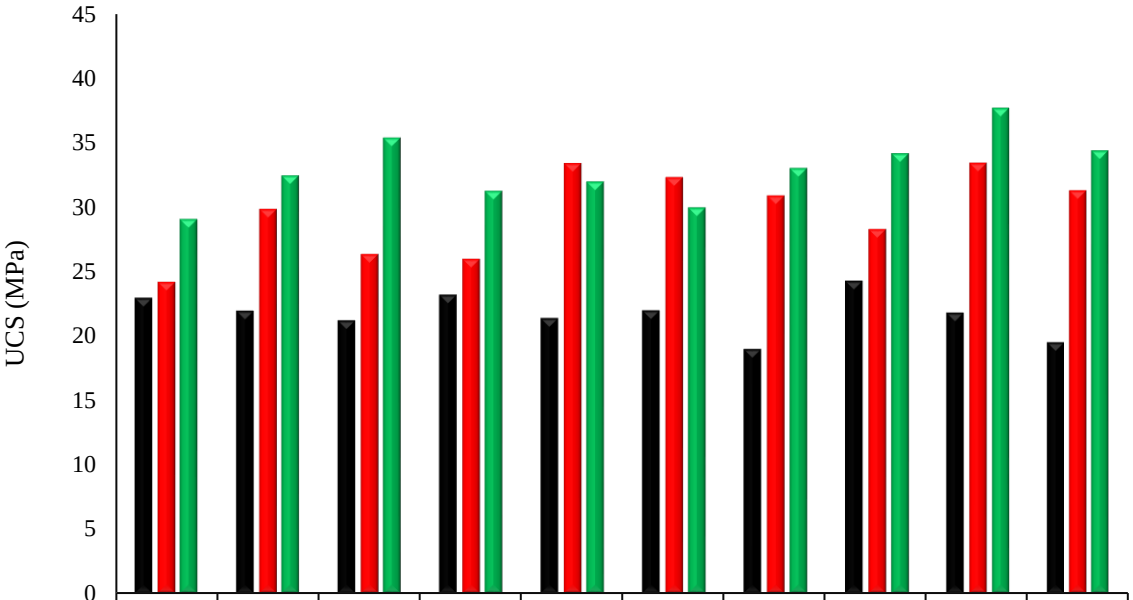
شکل ۱۸. مقاومت فشاری محصور نشدهٔ نمونه‌های واجد نانوفلوریت

Fig. 18. Unconfined compressive strength results of samples containing nanoflorite

مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها

همان‌گونه که مشاهده شد، نمونه‌های واجد نانو پودر مختلف با درصدهای متفاوت و در سنین مختلف، مقاومت فشاری متفاوتی نسبت به یکدیگر و نمونه شاهد نشان دادند. شکل ۱۹ مقاومت فشاری همه نمونه‌ها، شامل نمونه‌های واجد نانو پودرهای کلسیت، فلوریت و باریت و نمونهٔ شاهد، در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بیشترین مقاومت فشاری به دست آمده، در وهلهٔ نخست مربوط به جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوباریت (Ba-0.75) و در وهلهٔ دوم مربوط به جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوکلسیت (Ca-0.75) با سیمان در نمونه ۹۰ روزه می‌باشد.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]



	A	Ca-0.50	Ca-0.75	Ca-1	F-050	F-075	F-1	Ba-050	Ba-075	Ba-1
7 days	22.91	21.93	21.18	23.18	21.35	21.94	18.97	24.24	21.77	19.49
28 days	24.14	29.8	26.3	25.93	33.37	32.28	30.86	28.24	33.4	31.26
90 days	29.05	32.42	35.35	31.23	31.95	29.93	33	34.15	37.67	34.37

شکل ۱۹. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها با یکدیگر

Fig. 19. Comparing the unconfined compressive strength of the samples with each other

بحث

همان‌گونه که مشاهده شد، روند افزایش مقاومت بتن در طول ۹۰ روز ابتدایی ثابت نیست. مقاومت فشاری بتن معمولاً با گذشت زمان افزایش می‌یابد. این افزایش در ابتدا سریع است و پس از آن کند می‌شود. به طور معمول، مقاومت فشاری بتن در ۲۸ روز اول به بیش از ۹۰ درصد مقاومت نهایی خود می‌رسد. پس از ۲۸ روز، افزایش مقاومت کمتر می‌شود و در طول ۹۰ روز به تدریج به مقاومت نهایی نزدیک می‌شود (Fan et al., 2023; Obayes et al., 2020). این روند عمدتاً برای نمونه‌های بدون افزودنی است.

اگرچه بازهٔ زمانی ۲۸ روز بازه زمانی امکان تکمیل اکثر فرآیند هیدراتاسیون را فراهم می‌کند و برای توسعه مقاومت بتن بسیار مهم است، با این حال، توجه به این نکته مهم است که دوره ۲۸ روزه ممکن است برای همه انواع بتن، به ویژه آن‌هایی که حاوی سیمان کامپوزیت یا دارای مواد افزودنی هستند، مناسب نباشد، زیرا ممکن است بعد از این دوره تکامل مقاومت کمتری داشته باشند (Ionescu, 2019; Nandhini and Karthikeyan, 2021). امکان دارد در شرایط خاصی نیز مقاومت بتن پس از افزایش ابتدایی، کاهش یابد. این اتفاق می‌تواند به دلایل مختلفی باشد، مانند کیفیت بد مواد اولیه، تراکم ناکافی، نسبت آب به سیمان نامناسب، شرایط عمل‌آوری بد، و وجود واکنش‌های شیمیایی نامطلوب و به عبارتی حمله‌های شیمیایی به بتن. به عنوان مثال، اگر نسبت آب به سیمان بیش از حد معمول باشد، مقاومت بتن در طول زمان کاهش می‌یابد؛ نسبت آب به سیمان بیشتر می‌تواند منجر به افزایش فضاهای خالی شود که باعث ضعیف شدن بتن و کاهش مقاومت در طول زمان می‌شود. همچنین، استفاده از برخی مواد و وجود واکنش‌های شیمیایی نامطلوب

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

در بتن مثلاً استفاده از موادی مانند دوده سیلیس، سیمان سولفوآلومینات کلسیم و عوامل مقاومت اولیه می‌تواند بر رشد مقاومت بتن تأثیر بگذارد. در حالی که این مواد می‌توانند استحکام اولیه را افزایش دهند، اما تأثیر منفی آشکاری بر عملکرد طولانی مدت ندارند.

به نظر می‌رسد در تحقیق انجام شده بر روی نانوکانی‌ها، مورد اخیر نقش پر رنگ‌تری داشته باشد. گرچه استفاده از سه نانوکانی در نسبت‌های مشخص شده، باعث افزایش مقاومت نمونه‌ها شده، لیکن کنترل شرایط واکنش‌های شیمیایی به صرف زمان و هزینهٔ بیشتر و آنالیزهای شیمیایی وسیع‌تر و دقیق‌تری نیازمند است و می‌تواند زمینه تحقیقات مفصل‌تر بعدی باشد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی اثربخشی افزودن سه نانو کانی کلسیت، باریت و فلوریت بر بهبود خواص مقاومتی و فیزیکی بتن پرداخت. هر یک از این سه نانو کانی با درصدهای مختلف جایگزین سیمان شدند. به‌منظور اندازه‌گیری سرعت سیر امواج فراصوتی و مقاومت فشاری بتن، نمونه‌های مکعبی با عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تهیه شدند. ۱۰ نوع طرح اختلاط شامل نمونه شاهد (بدون افزودنی) و نمونه‌های واجد ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ درصد نانوکانی آزمایش شدند. یافته‌های کلیدی از نتایج آزمون‌ها را می‌توان به شرح زیر ترسیم کرد:

۱- در مورد افزودنی نانوکلسیت، در سن ۹۰ روز، بیشترین میزان مقاومت فشاری و سرعت موج اولتراسونیک مربوط به نمونه Ca-0.75 می‌باشد. در نتیجه جایگزینی سیمان با ۰/۷۵٪ نانوکلسیت، بهبود خواص بتن، بویژه کاهش تخلخل و افزایش تراکم بتن را در پی دارد.

۲- در بین نمونه‌های واجد نانوکانی باریت، نمونهٔ Ba-0.75، بیشترین میزان مقاومت فشاری سرعت و همچنین سیر موج اولتراسونیک را نشان می‌دهد، بنابراین باعث بهبود خواص بتن می‌شود.

۳- در نمونه‌های واجد نانوفلوریت، نمونهٔ F-1 بیشترین سرعت سیر موج اولتراسونیک و بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد، بنابراین باعث بهبود خواص بتن می‌شود.

۴- همان‌گونه که مشاهده می‌شود، از بین نانوکانی افزودنی آزمایش‌شده، بیشترین مقاومت فشاری و سرعت سیر موج اولتراسونیک به دست آمده، در وهلهٔ نخست مربوط به جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوباریت (Ba-0.75) و در وهلهٔ دوم مربوط به جایگزینی ۰/۷۵٪ نانوکلسیت (Ca-0.75) می‌باشد. همان‌طور که نشان داد شد، این سه نانوکانی با پرکردن حفرات در بتن و با داشتن وزن مخصوص بالاتر تأثیر مثبتی بر بالا بردن مقاومت بتن ایفا می‌کنند. فراوانی، طبیعی بودن و هزینهٔ تولید پایین آن‌ها باعث می‌شود تا برای تولید بتن مقرون به صرفه باشند. با این حال، به دلیل فقدان خاصیت پوزولانی، حائز رتبه پایین‌تری نسبت به میکرو یا نانو سیلیس هستند. به طور کلی، کاوش‌های بیشتر بر روی نانو مواد کانیایی مختلف می‌تواند در یافتن افزودنی‌های جدید در جهت تولید بتنی با خواص مکانیکی بهتر و طول عمر بالاتر، امیدبخش خواهد بود.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]

References

Althoey, F., Zaid, O., Martínez-García, R., Alsharari, F., Ahmed, M., & Arbili, M. M., (2023). Impact of Nano-silica on the hydration, strength, durability, and microstructural properties of concrete: A state-of-the-art review: Case Studies in Construction Materials, p. e01997.

Bakhoum, E., Garas, G. L. K., Allam, M., & Ezz, H., (2017). The role of nano-technology in sustainable construction: A case study of using nano granite waste particles in cement mortar: Engineering Journal. 21 (4), 217-227.

Bayat A., & Estahlaki, A. (2018). Investigating the effect of clay nanoparticles on the mechanical properties of concrete. International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran. (In Persian)

Du, H., Du, S., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica: Construction and building materials, 73, 705-712.

Fan, C., Qian, J., Sun, H. & Fan, Y. (2023). Development and Promotion of Concrete Strength at Initial 24 Hours. Materials, 16, 4452. https://doi.org/10.3390/ma16124452.

Ionescu, A., Apostu, A. & Georgescu, D. (2019). Identifying the Reference Time for Determining the Compressive Strength of Concrete Containing Different Types of Cements. Modelling in Civil Environmental Engineering, 15(1), 26-35. https://doi.org/10.2478/mmce-2019-0003.

Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO_2. Cement and Concrete Research, 35(10), 1943-1947. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004

Khan, S., & Hossain, M. K. (2022). Classification and properties of nanoparticles, Nanoparticle-based polymer composites, Elsevier, p. 15-54.

Lee, C., Lee, S. & Nguyen, N. (2016). Modeling of Compressive Strength Development of High-Early-Strength-Concrete at Different Curing Temperatures. Int J Concr Struct Mater 10, 205–219. https://doi.org/10.1007/s40069-016-0147-6.

Li, H., Zhang, M. H., & Ou, J. P. (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. Wear, 260(11-12), 1262-1266.

Liu, R., Xiao, H., Li, H., Sun, L., Pi, Z., Waqar, G. Q., Du, T., & Yu, L. (2018). Effects of nano-SiO_2 on the permeability-related properties of cement-based composites with different water/cement ratios: Journal of materials science, 53, 4974-4986.

Mahmood, R.A., & Kockal, N.U. (2021). Nanoparticles used as an ingredient in different types of concrete. SN Appl. Sci. 3, 529. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04461-3.

Mistry, J., Patel, I., & Shah, J. (2014). Study on Effect of Nano Materials on Various Properties of Concrete. Civil Eng. Environ. Technol, 1, 36-39.

Mohammadi, M. (2008). Fundamental of non-silicates mineralogy, Payam Noor Publications, author: James D. Dana. (In Persian)

Nandhini, K. & Karthikeyan, J. (2021). The early-age prediction of concrete strength using maturity models: a review. J Build Rehabil 6, 7. https://doi.org/10.1007/s41024-020-00102-1.

Obayes, O., Gad, E., Pokharel, T., Lee, J. & Abdouka, K. (2020). Evaluation of Concrete Material Properties at Early Age. CivilEng , 1, 326-350. https://doi.org/10.3390/civileng1030021.

Quercia, G., Hüsken, G., & Brouwers, H. (2012). Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste: Cement and concrete research, 42 (2), 344-357.

Ramanathan, P., Baskar, I., Muthupriya, P., & Venkatasubramani, R. (2013). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. KSCE journal of Civil Engineering, 17(2), 465-472.

Ramzanianpour, A., Firouzemkan, S., Ebadi, T., & Bahrami, H. (2016). Effect of nano silica on mechanical properties and durability of concrete, 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. (In Persian)

Thanmanaselvi, M., & Ramasamy, V. (2023). A study on durability characteristics of nano-concrete: Materials Today: Proceedings, 80, 2360-2365.

Uysal, M., & Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. Construction and building materials, 25(11), 4112-4120.

Whitehurst, E. A. (1951). Soniscope tests concrete structures. Journal American concrete institute, 47 (2), 433–444.

[Downloaded from c4i2016.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.1.3.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.1.1017883]