Amirkabir Journal of Civil Engineering

Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 477-480
DOI: 10.22060/ceej.2023.21730.7809

Investigating the Freezing Strength and Durability of Lightweight Concrete With Different Weight Ratios of Nano Montmorillonite and Microsilica

B. Mansouri[1], H. Yousefinezhad[2], F. avaznezhad[3], A. h. Bazaee[4]*

[1] Department of Civil Engineering, Firoozabad Branch, Meymand Center, Islamic Azad University, Meymand, Iran
[2] Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran
[3] Department Of Architecture And Urban Planning, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran
[4] Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT: One of the effective ways to reduce the specific weight of concrete is to use mineral pumice instead of aggregate, which can reduce the specific weight of concrete. However, due to the high porosity of mineral pumice, the strength and durability of concrete decrease and increase its permeability. While some of the disadvantages of concrete can be specially corrected by using nanomaterials. Nano montmorillonite quickly swells and increases its volume by absorbing water. This property increases density in lightweight concrete. In this research, to make lightweight concrete from mineral pumice, and to increase its density, nano montmorillonite was used in different weight ratios of 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, and 2.5% cement. Also, to increase the quality and reduce the cost of consumable materials, micro silica was used in the amount of 10% by weight of the grade of cement used in concrete. The conducted tests include compressive strength, tensile strength, water absorption in hardened concrete, durability against the freezing cycle, economic index, and examination of concrete microstructure. The results of this research showed that the use of 2.5% nano montmorillonite instead of cement along with 10% micro silica in lightweight concrete can increase the 90-day compressive strength by 65% compared to the control sample. But due to the high cost of preparing nanomaterials, the optimal amount of using nano montmorillonite in lightweight concrete was determined to be 1.5% maximum. Because adding amounts more than that has no noticeable effect on increasing the compressive and tensile strength of concrete and the failure of concrete mainly occurs in the light-grained area.

Review History:
Received: Aug. 28, 2022
Revised: Sep. 02, 2023
Accepted: Nov. 13, 2023
Available Online: Nov. 15, 2023

Keywords:
Light concrete
freezing cycle
nano montmorillonite
microsilica
mineral pumice

1- Introduction

Light grains have a great effect in reducing the specific weight of concrete, but their type has an effect on the characteristics, durability, and strength of light concrete. The specific weight of lightweight concrete is approximately 70% of the specific weight of ordinary concrete. According to the definition of the ACI-213 standard, structural lightweight concrete should have at least 17 MPa compressive strength, and its specific weight should not exceed 1850 kg per cubic meter [1]. It is special for the bottom. According to the ASTM-C33 standard, the maximum specific weight of fine-grained and coarse-grained light stone materials in dry state is 1220 and 880 kg/m3, respectively [2]. One of the methods of making lightweight concrete is the use of porous aggregates and mineral pumice. But the high porosity of these aggregates reduces the compressive strength of concrete. So that it will not be able to be used in structural use [3]. Mineral pumice is a volcanic rock that consists of molten material (magma) with high temperature and has a low weight and many uses. The main property of mineral pumice is its light weight [4].

On the other hand, past research shows that the use of nano montmorillonite in concrete will increase compressive strength and density. This is due to the strong expansion of this material in contact with water. However, the amount of use of nano montmorillonite varies according to the type of concrete. So in some research, they have recommended a ratio of less or more than 1% by weight of cement [1-3]. Therefore, according to the type of concrete and the purity of montmorillonite, before using it in concrete, optimization should be done to determine the optimal and effective amount of this material according to the type of concrete. In this research, with the aim of reducing the specific weight of concrete, Qorveh mineral pumice was used instead of ordinary aggregate. Also, to prevent the reduction of compressive strength due to the use of pumice and increase the density of concrete, nano montmorillonite has been used in different weight ratios instead of part of cement. Therefore, due to the high porosity of mineral pumice and to reduce the use of nanomaterials, micro silica was used in lightweight concrete at the same time. This material in combination with cement increases the adhesion between concrete materials and increases the density and compressive strength of concrete

*Corresponding author's email: amirhosseinbazaee@gmail.com

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Physical characteristics of nano montmorillonite

Humidity (%)	Ion exchange coefficient (meg/100gr)	Hardship (mohes)	Electrical conductivity (mv)	Specific surface area (m^2/gr)	Particle size (nm)	Density (kg/m^3)	Name
1-2	48	< 2	25	220-270	2-1	300-370	Nano montmorillonite

Table 2. chemical characteristics of nano montmorillonite

L.O.I	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	K_2O (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	Na_2O (%)
15.45	5.62	0.62	1.97	0.86	50.95	19.6	3.29	0.98

[4]. In this research, slump tests, compressive strength, tensile strength, durability of concrete against freezing cycle, and microstructure of concrete have been examined and tested. Among the innovative aspects of the current research, we can mention the simultaneous use of nanomaterials with micro silica in lightweight concrete.

2- Materials and method

In this research, to reduce the specific weight of concrete, mineral pumice with a maximum size of 19 mm was used instead of sand. Despite its very low weight, the pumice stone has good resistance [2]. The sand used for making concrete was obtained from mines in the Kharameh region of Fars. Consumable sand has a maximum nominal size of 0-4.75mm and has a saturated specific weight with a dry surface (SSD state) of 2350kg/m^3. Aggregate grading was done by classified sieves according to ASTM-C136 standards. Also, micro silica was used in concrete with the aim of reducing the porosity of cement paste and improving the quality of the transition zone between cement and aggregate, as well as increasing the compressive strength. In this research, a fixed amount of 50 kg of micro silica was added per cubic meter of concrete. The cement used was type 2 of Fars. The consumable super lubricant is based on polycarboxylate ether model LK-PC8020, which is part of the newest generation of super lubricants. Nano montmorillonite is sodium-containing and its physical and chemical characteristics are in accordance with table no. 1 and 2.

3- Result

The results of this research show that the use of nano montmorillonite in concrete can significantly improve the mechanical properties of concrete. However, the optimal amount of using nano montmorillonite in concrete depends on various factors such as the type of concrete, the purity of nano montmorillonite, environmental conditions, and the type of use. Nano montmorillonite swells in contact with moisture and due to the absorption of water, the increase in its volume causes the porosity of concrete to decrease. This feature will increase the density and strength of concrete. Also, the results of the experiments showed that the use of nano montmorillonite in lightweight concrete increases the density due to the high porosity of mineral pumice. As a result, due to the increased density, the amount of water absorption and permeability of concrete decreases, and its compressive strength and durability against the freezing cycle increases. In this research, the optimal amount of using nano montmorillonite in lightweight concrete was between 1% and 1.5% by weight of cement grade along with 10% microsilica. While the results of other past research show that the optimal and effective amount of nano montmorillonite in ordinary concrete is about 0.5%, in self-compacting concrete it is about 0.75% and in cement composites, it is about 1% by weight of the grade of cement used. [5-7]. Also, using more than 1.5% of nanomontmorillonite along with 10% of micro silica in light concrete does not make a noticeable change in the results or in some cases causes weakness in the concrete. Therefore, the use of high amounts of nano montmorillonite will not be justified due to its high price and limited availability. Also, in order to increase the durability of light concrete against the freezing cycle, taking into account other economic criteria and the specific weight of concrete, it is recommended to use foaming additives in concrete.

4- Result

1. The use of at least 1.5% by weight of montmorillonite along with microsilica in light concrete will cause a weight loss of less than 5% and a strength loss of less than 10%, which is durable against the freezing cycle according to ASTM-C666-B standards. It is within the allowed range.

2. The final compressive strength (90 days) in plans is 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control plan,

a. Qorve mineral pumice b. Microsilica c. Nano montmorillonite d. super lubricant

Fig. 1. Some materials used in the experiment

respectively, by 13.9%, 32.3%, 57.1%, 62.4%, 65.8% increased.

3. The amount of slump in plans is 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control plan, respectively, by 15.9%, 26.1%, 31.8%, 34.1%, 37.5%, decreased.

4. Tensile strength in designs 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control design by 11.5%, 19.2%, 34.6%, 3% respectively. 42% has increased by 46.2%.

5. The amount of final water absorption (72 hours) in plans is 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control plan, respectively, by 0.26%, 48.5%, It has decreased by 69.7%, 83.5% and 92.0%.

6. The amount of concrete resistance after exposure to 300 freezing cycles in the designs is 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control design, respectively, by 28.1%. 51.4%, 77.4%, 80.8% and 82.2% have increased.

7. The amount of concrete weight loss after 300 freezing cycles in designs 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% compared to the control design by 17.1%, 9.9% respectively 32%, 47.4%, 59.2% and 67.1% decreased.

References

[1] M.samadi, n.moghaddam, z.mokhtari hosseini, study of nano-montmorillonite and its properties, fourteenth international congress of chemical engineering - tehran, iran, (2020) 18-34.

[2] S.baqerzadeh, m.akbari, study of the use of nanomaterials on construction materials technology case study of montmorinelite, master thesis in civil engineering, kashan university, iran, (2018) 1-20.

[3] A.habibi, a.vaziri, m.arman, relationship between compressive and tensile strength and specific gravity of lightweight concrete made with mineral pumice in kurdistan region, 7th national conference on applied research in civil engineering and architecture, khajeh university nasir al-din tusi-tehran, iran, (2016) 46-60.

[4] Z.mousavi, h.tavakoli, p.maaref vand, m.rezaei, evaluation of changes in density and durability index of schist rock under the influence of freeze-thaw cycles, journal of mining engineering - tehran, iran, (2018) 14-25.

[5] M.r.esfahani, n.baqiei, a.mousavi, effect of lightweight aggregate granulation of pumice faroog and additives on the durability of lightweight aggregate against frost, ninth national congress of technology in civil engineering, mashhad, iran (2018) 50-65.

[6] Zarinfar, rahbari, javadi, laboratory comparison of using glass fibers and steel fibers in concrete containing montmorillonite nanoclay. Concrete research, (2020) 125-136.

[7] A.saeidijam, a.azimi. Investigating the resistance and permeability parameters of plastic concrete reinforced with polypropylene fibers. Concrete research, (2017) 135-144.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

B. Mansouri, H. Yousefinezhad, F. avaznezhad, A. h. Bazaee, Investigating the Freezing Strength and Durability of Lightweight Concrete With Different Weight Ratios of Nano Montmorillonite and Microsilica, Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 477-480.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21730.7809

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر

نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۲، صفحات ۲۲۶۳ تا ۲۲۸۴
DOI: 10.22060/ceej.2023.21730.7809

بررسی مقاومت و دوام یخزدگی بتن سبک با نسبت‌های وزنی مختلف نانو مونت موریلونیت و میکروسیلیس

بابک منصوری[۱]، حامد یوسفی نژاد[۲]، فرهاد عوض نژاد[۳]، امیرحسین بازایی[۴*]

۱- گروه مهندسی عمران، واحد فیروزاباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران
۲- دانشکده مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، فارس، ایران
۳- گروه مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران
۴- گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

خلاصه: یکی از روش‌های موثر برای کاهش وزن مخصوص بتن استفاده از پوکه معدنی به جای سنگدانه می‌باشد که می‌تواند وزن مخصوص بتن را کاهش دهد. اما با توجه به تخلخل بالای پوکه معدنی، مقاومت و دوام بتن کاهش یافته و باعث افزایش میزان نفوذپذیری آن می‌شود. در حالیکه می‌توان با استفاده از نانو مواد برخی از معایب بتن را بطور ویژه اصلاح نمود. نانو مونت موریلونیت با جذب آب به سرعت متورم شده و افزایش حجم می‌دهد. این خاصیت باعث افزایش تراکم در بتن سبک می‌شود. در این تحقیق برای ساخت بتن سبک از پوکه معدنی قروه و جهت افزایش تراکم آن از نانو مونت موریلونیت در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪، ۲/۵٪ سیمان استفاده شد. همچنین برای افزایش کیفیت و کاهش هزینه مصالح مصرفی، از میکروسیلیس به میزان ۱۰٪ وزنی عیار سیمان مصرفی در بتن استفاده شد. آزمایش‌های انجام شده شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب در بتن سخت شده، دوام در برابر چرخه یخزدگی، شاخص اقتصادی و بررسی ریزساختار بتن می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۲/۵٪ نانو مونت موریلونیت بجای سیمان به همراه ۱۰٪ میکروسیلیس در بتن سبک می‌تواند مقاومت فشاری ۹۰ روزه را تا ۶۵٪ نسبت به نمونه کنترل افزایش دهد. اما با توجه به هزینه بالای تهیه نانو مواد، میزان بهینه استفاده از نانو مونت موریلونیت در بتن سبک حداکثر ۱/۵٪ تعیین گردید. زیرا افزودن مقادیر بیش از آن تاثیر محسوسی در افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن نداشته و شکست بتن عمدتاً از ناحیه سبک‌دانه رخ می‌دهد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۸/۲۴

کلمات کلیدی:
بتن سبک
چرخه یخزدگی
نانو مونت موریلونیت
میکروسیلیس
پوکه معدنی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر محققان با توجه به اهمیت بتن سبک جهت مصارف سازه‌ای، به دنبال روش‌هایی برای افزایش دوام و پایایی این نوع بتن بودند. بتن سبک سازه‌ای، همانند بتن معمولی است، با این تفاوت که در ساخت آن جهت کاهش وزن مخصوص بتن، از سبک‌دانه‌ها استفاده می‌شود[۱]. سبک‌دانه‌ها تاثیر زیادی در کاهش وزن مخصوص بتن دارند اما نوع آن‌ها بر روی ویژگی، دوام و مقاومت بتن سبک اثرگذار است. وزن مخصوص بتن سبک تقریباً ۷۰٪ وزن مخصوص بتن معمولی است. طبق تعریف استاندارد ACI-213، بتن سبک سازه‌ای باید حداقل دارای مقاومت فشاری ۱۷ مگاپاسکال بوده و وزن مخصوص آن از ۱۸۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب تجاوز نکند [۲]. برای ساخت بتن سبک، کاهش وزن مخصوص بتن نسبت به مقاومت فشاری آن از اهمیت بیشتری برخوردار است [۳]. متداول‌ترین روش ساخت بتن سبک استفاده از سبک‌دانه با وزن مخصوص پایین است. طبق استاندارد ASTM-C33، حداکثر وزن مخصوص مصالح سنگی سبک ریزدانه و درشت‌دانه در حالت خشک به ترتیب ۱۲۲۰ و ۸۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب است [۴]. همچنین در اکثر مراجع نیز توصیه شده است که برای ساخت بتن سبک از انواع سبک‌دانه با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر استفاده گردد [۴،۵]. یکی از روش‌های ساخت بتن سبک استفاده از سنگدانه‌های متخلخل و پوکه‌های معدنی می‌باشد. اما تخلخل بالای این سنگدانه‌ها مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد. بطوریکه قابلیت استفاده در کاربری سازه‌ای را نخواهد داشت [۶]. از طرفی اسلامپ بتن که با پوکه‌های معدنی ساخته شده، از اهمیت زیادی برخوردار است. بطوریکه اگر قوام بتن مناسب نباشد احتمال دارد در بتن‌ریزی حجیم، سبک‌دانه‌ها روی سطح بتن شناور شوند [۷]. برای جبران این عارضه در اکثر مواقع نیاز است تا حداکثر اسلامپ محدود شود و یا از سایر مواد افزودنی استفاده شود تا بدون آنکه آب انداختگی (جداشدگی سنگدانه‌ها) بوجود آید، میزان آب بتن کاهش یافته و اسلامپ مورد نظر تامین گردد [۸].

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Amirhosseinbazaee@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

پوکه معدنی، سنگ آتش‌فشانی است که از مواد مذاب (ماگما) با درجه حرارت بالا تشکیل شده و دارای وزن کم و کاربرد فراوانی می‌باشد. اصلی‌ترین خاصیت پوکه معدنی وزن کم آن می‌باشد. بطوریکه این سبک‌دانه روی آب شناور می‌ماند. عمدتاً از این پوکه برای پرکردن کف طبقات و بام‌ها استفاده می‌شود. پوکه معدنی از سیلیکات آلومینیوم (دی اکسید سیلیکون)، اکسید آلومینیوم و مقدار کمی از اکسیدهای دیگر مانند اکسید آهن، اکسید سدیم، اکسید کلسیم و اکسید منیزیم تشکیل شده است. منبع اصلی پوکه، فوران کوه‌های آتش‌فشانی و انفجاری است. میزان تخلخل پوکه‌های معدنی بالا است و عمدتاً بین ۵۰٪ تا ۸۵٪ می‌باشد [۸,۹]. شهرستان قروه از توابع استان کردستان از منظر علم زمین شناسی دارای بافت آتش‌فشانی می‌باشد. این شهرستان دارای معادن بزرگی از پوکه‌های معدنی است. بطوریکه نام پوکه قروه از نام این شهرستان برگرفته شده است. پوکه قروه بدلیل وزن مخصوص بسیار پایین می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب در سبک‌سازی بتن مورد استفاده قرار گیرد [۱۰].

اخیراً استفاده از مواد نانو در بتن به عنوان یک تکنولوژی پیشرفته مورد استقبال قرار گرفته. با پیشرفت علم نانو در سال‌های اخیر و کاربردهای متنوعی که برای این دسته از مواد ارائه شده، توجه بسیاری از محققان در حوزه‌های مختلف ازجمله تکنولوژی بتن به آن جلب شده است. تغییر خصوصیات ماده در مقیاس نانو مانند تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ماده، تولید مصالح ساختمانی چند منظوره با کارایی بالا را ممکن ساخته که این امر باعث ایجاد ارزش افزوده، افزایش دوام و کیفیت مصالح و همچنین پایداری محیط زیست می‌شود [۱۳]. نانو مواد می‌توانند یک یا چند ویژگی را در بتن اصلاح نمایند و خواص منحصربفردی را در آن ایجاد کنند. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مواد نانو باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش کیفیت بتن می‌شود. افزودن ذرات نانو می‌تواند منجر به تشکیل نانو کریستال‌ها در بتن شود [۱۱]. ابعاد و اندازه ذرات ریز نانو می‌توانند تراکم را در بتن بطور چشمگیری افزایش داده و با تشکیل نانو کریستال‌ها خصوصیات مکانیکی بتن را ارتقاء بخشند. فعالیت‌های تحقیقاتی اخیر در زمینه نانو تکنولوژی در بتن شامل بررسی ذاتی هیدراسیون در سیمان، تاثیر اضافه کردن نانو سیلیکا به بتن، اضافه کردن ذرات نانو به بتن و پوشش‌های سیمانی و بررسی تاثیرات آن‌ها بر رفتار و مشخصات آن می‌باشد [۴,۱۲,۱۸].

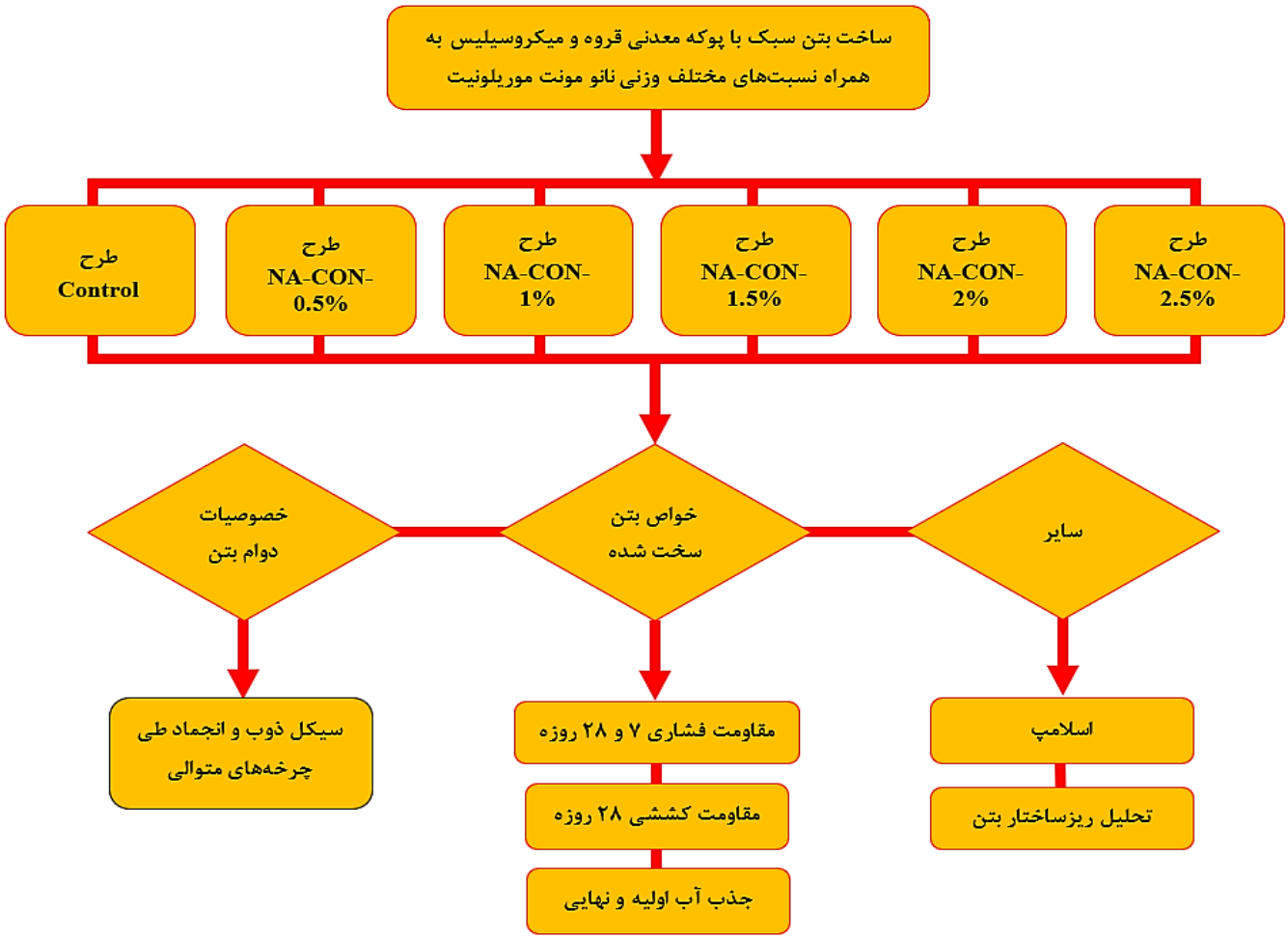
نانو مونت موریلنیت یکی از انواع مواد نانو ساختاری است که به عنوان یک ماده جاذب، کاتالیزور و منبسط شونده در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاکنون مطالعات محدودی در زمینه استفاده از نانو مونت موریلنیت در بتن انجام شده است. در بررسی‌هایی که صورت گرفته اذعان شده که نانو مونت موریلنیت در بتن اثر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری بتن خواهد داشت [۵,۸].

صمدی.ا و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی خصوصیات رئولوژی و مکانیکی بتن خودتراکم با نسبت‌های مختلف وزنی نانو مونت موریلونیت به همراه ضایعات آجر بازیافتی پرداختند. در این تحقیق از ضایعات آجر بازیافتی در نسبت‌های مختلف حجمی ۰٪، ۱۰٪ ، ۲۰ ٪و ۳۰٪ بعنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی استفاده شد. همچنین جهت ارتقای کیفیت دوام و مقاومت بتن از نانو مونت موریلونیت به میزان ۰٪، ۱٪ و ۲٪ وزنی سیمان در بتن استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزودن ۱٪ نانو مونت موریلونیت و ۲۰٪ ضایعات آجر بازیافتی می‌توان به مقاومت فشاری قابل قبولی دست یافت. اما با افزایش میزان ضایعات آجر نیز مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. همچنین افزودن نانو مونت موریلونیت باعث افزایش تراکم و کاهش ترک‌های مویینه بتن ناشی از افزودن ضایعات آجر در بتن می‌گردد [۱]. زرین‌فر.م و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی آزمایشگاهی استفاده از الیاف شیشه و الیاف فولادی در بتن حاوی نانو مونت موریلونیت پرداختند. در این تحقیق از نانو مونت موریلونیت در نسبت‌های ۰٪ تا ۲/۷٪ وزنی سیمان و از الیاف فولادی و شیشه‌ای در نسبت‌های ۰٪ تا ۴/۵٪ وزنی سیمان استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از نانو مونت موریلونیت مقاومت فشاری بتن الیافی فولادی را تا ۸٪ و مقاومت خمشی را تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد. همچنین نانو مونت موریلونیت مقاومت فشاری بتن الیافی شیشه‌ای را تا ۴۰٪ و مقاومت خمشی را تا ۱۹٪ افزایش می‌دهد. مقایسه تاثیر نانو مونت موریلونیت بر رفتار بتن الیافی شیشه‌ای و بتن الیافی فولادی نشان داد که نانو مونت موریلونیت نه تنها مقاومت بتن را افزایش می‌دهد بلکه روند کاهشی مقاومت با افزایش الیاف شیشه را به روند افزایشی تغییر می‌دهد [۶]. جاناتان.م و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی اثر نانو مونت موریلونیت بر روی خصوصیات مکانیکی بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که اسلامپ بتن با افزودن نانو مونت موریلونیت کاهش می‌یابد. بطوریکه اسلامپ بتن با افزودن ۵٪ نانو مونت موریلونیت به میزان ۵۰٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر آن افزودن ۳٪ نانو مونت موریلونیت در بتن باعث افزایش ۴۴٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌شود [۱۴]. باقرزاده.س و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی به بررسی اثر نانو مونت موریلونیت در بتن پرداختند. در این تحقیق ۵ طرح مخلوط بتن به همراه نانو مونت موریلونیت در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۲٪، ۰/۴٪،

۰/۶٪ و ۰/۸ ٪ سیمان در بتن اضافه گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری بدست آمده مربوط به طرح دارای ۰/۶٪ نانو مونت موریلونیت می‌باشد. همچنین در این تحقیق از نانو مونت موریلونیت به عنوان عاملی برای افزایش تراکم بتن و بهبود کیفیت واکنش هیدراسیون سیمان یاد شده است [۲]. فربودی.م و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی خصوصیات رئولوژی، مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی به همراه نسبت‌های وزنی مختلف نانو مونت موریلونیت پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که ترکیب کامپوزیت سیمانی همراه با نانو مونت موریلونیت به میزان قابل توجهی تراکم را افزایش خواهد داد. همچنین افزودن ۳٪ نانو مونت موریلونیت به مخلوط کامپوزیت سیمانی باعث افزایش چگالی و کاهش جذب آب به ترتیب به میزان ۳/۷۶٪ و ۳۶/۳۹٪ خواهد شد [۱۵]. اسبق.ا و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی تاثیر نانو مونت موریلونیت و خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های ملات ماسه سیمان دارای ۱٪ تا ۳٪ نانو مونت موریلونیت و نیز در طرح دیگری نمونه‌های دارای ۱٪ تا ۳٪ ترکیب نانو مونت موریلونیت به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی تهیه و مقایسه گردید. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از ۱٪ و ۱/۵٪ نانو مونت موریلونیت به تنهایی باعث افزایش ۱۵٪ و ۲۷٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه خواهد شد. در حالیکه نمونه‌های دارای نانو مونت موریلونیت و خاکستر بادی، به دلیل جذب آب بسیار بالا، باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۶٪ و ۴۵٪ در سن ۲۸ روز خواهد شد [۹]. قائدی.د و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر نانو مونت موریلونیت در بتن خودتراکم به عنوان جایگزین سیمان در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۵ ٪ ، ۱٪، ۱/۵ ٪و ۲٪ با نسبت آب به سیمان مختلف (۰/۳۸ و ۰/۴۲) پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که در تمامی نمونه‌های دارای نانو مونت موریلونیت خواص مکانیکی و رئولوژی بتن خودتراکم بهبود می‌یابد. همچنین بهینه‌ترین حالت ممکن، افزودن ۱٪ نانو مونت موریلونیت در بتن خودتراکم می‌باشد [۱۱]. مجد.م و همکاران در سال ۲۰۱۵ میلادی به بررسی اثر مونت موریلونیت بر خواص ملات سیمانی پرداختند. در این تحقیق از نسبت‌های وزنی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ مونت موریلونیت بعنوان جایگزین سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۵۵ استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۰/۵٪ و ۱٪ مونت موریلونیت در ملات سیمانی، مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد [۱۹].

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از نانو مونت موریلونیت در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و تراکم خواهد شد. این مهم در اثر انبساط شدید این ماده در تماس با آب صورت می‌گیرد. اما میزان استفاده از نانو مونت موریلونیت با توجه به نوع بتن متغیر اعلام شده. بطوریکه در برخی از تحقیقات نسبت کمتر یا بیشتر از ۱٪ وزنی سیمان را توصیه کرده‌اند [۸-۱]. لذا با توجه به نوع بتن و خلوص مونت موریلونیت قبل از استفاده در بتن باید عمل بهینه‌یابی صورت گیرد تا میزان بهینه و موثر این ماده با توجه به نوع بتن مشخص شود. استفاده از نانو تکنولوژی در بتن مانند تمامی تکنولوژی‌های جدید نیاز به توجیه اقتصادی دارد. در حال حاضر هزینه‌های بالای تهیه و تامین نانو مواد مانع از توسعه روزافزون این ماده و استفاده گسترده از آن در صنعت می‌گردد. به همین منظور بهره‌برداری از نانو تکنولوژی در صنعت بتن در مقیاس تجاری همچنان به چند محصول قابل عرضه در بازار محدود شده است [۸]. مشکل دیگر در زمینه استفاده از نانو تکنولوژی در بتن، توزیع یکنواخت آن‌ها در ساختار بتن است. معمولاً این مواد در حین اختلاط در بتن به صورت کلوخه در می‌آیند و در مخلوط به خوبی پخش نمی‌شوند [۱۲]. البته برای این حل مشکل می‌توان از دستگاه‌های مخلوط کن قوی و یا از انواع فوق روان کننده‌ها استفاده نمود [۱۵]. از معایب دیگر در این زمینه جذب آب بسیار بالای ذرات نانو است. نانو مواد به علت سطح ویژه بسیار بزرگی که دارند مقدار زیادی آب جذب می‌کنند و ممکن است روی اسلامپ بتن تاثیرگذار باشد [۱۰].

در این تحقیق با هدف کاهش وزن مخصوص بتن از پوکه معدنی قروه به جای سنگدانه معمولی استفاده شده است. همچنین برای جلوگیری از کاهش مقاومت فشاری در اثر استفاده از پوکه و افزایش تراکم بتن از نانو مونت موریلونیت در نسبت‌های مختلف وزنی بجای بخشی از سیمان استفاده شده است. نانو مونت موریلونیت به علت قیمت مناسب‌تر در مقایسه با سایر نانو مواد دیگر و بدلیل توانایی تولید انبوه در کشور انتخاب شده است. همچنین نانو مونت موریلونیت از خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر بفردی برخوردار می‌باشد. در حال حاضر استفاده از نانو مواد بدلیل فراگیر نبودن، دارای هزینه‌های بالایی می‌باشد. لذا با توجه به تخلخل بالای پوکه معدنی و برای صرف‌جویی در مصرف نانو مواد نیز همزمان از میکروسیلیس در بتن سبک استفاده شد. میکروسیلیس یکی از انواع پوزولان‌های طبیعی است که به وفور در کشور یافت می‌شود. این ماده در ترکیب با سیمان میزان چسبندگی بین



شکل ۱. فلوچارت ساختار تحقیق

Fig. 1. Flowchart of research structure

مصالح بتن را افزایش می‌دهد و باعث افزایش تراکم و مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۲]. در این تحقیق آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام بتن در برابر چرخه یخزدگی و ریزساختار بتن مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. از جمله جنبه‌ی نوآوری تحقیق حاضر می‌توان به استفاده همزمان از نانو مواد همراه با میکروسیلیس در بتن سبک اشاره نمود. شکل ۱ ساختار تحقیق و مراحل انجام آن را نشان می‌دهد.

۲- مواد و مصالح

۲- ۱- سنگدانه

در این تحقیق برای کاهش وزن مخصوص بتن از پوکه معدنی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر به جای شن استفاده شد. پوکه معدنی مصرفی از معادن شهرستان قروه تهیه گردید که به پوکه قروه شهرت دارد [۱]. پوکه قروه علرغم وزن بسیار کم دارای مقاومت مناسبی می‌باشد [۲]. سایر مشخصات فیزیکی این سبک‌دانه به شرح جدول ۱ می‌باشد.

ماسه مصرفی برای ساخت بتن از معادن موجود در منطقه خرامه فارس تهیه گردید. ماسه مصرفی دارای حداکثر اندازه اسمی۰- ۴/۷۵ میلیمتر و دارای وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (حالت SSD) ۲۳۵۰ کیلوگرم در متر مکعب می‌باشد. سایر مشخصات فیزیکی این ماسه مطابق با شرح جدول ۲ می‌باشد.

دانه‌بندی سنگدانه بوسیله الک‌های طبقه‌بندی شده طبق استاندارد ASTM-C136 انجام شد. در شکل ۲ شکل دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه سنگدانه مصرفی با استاندارد ASTM-C33 مقایسه و نمایش داده شده است [۲۱]. در این شکل دانه‌بندی ماسه با خط نقطه قرمز، الگوی دانه‌بندی شن با خط ممتد سبز و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 به ترتیب با خطوط خطچین کوچک و بزرگ آبی نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی پوکه معدنی قروه

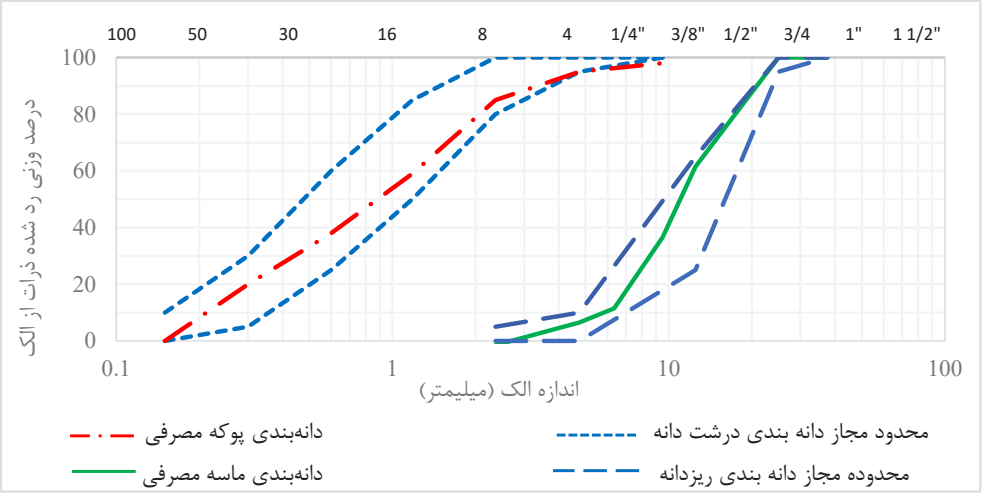
Table 1. Physical characteristics of QARVEH mineral pumice

وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص SSD	تخلخل	جذب آب ۳۰ دقیقه	جذب آب ۲۴ ساعته
kg/m³	kg/m³	٪	٪	٪
۸۰۰-۷۵۰	۱۰۲۰	۶۰	۲۰	۲۸

جدول ۲. مشخصات فیزیکی ماسه مصرفی

Table 2. Physical characteristics of used sand

نوع سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک	وزن مخصوص SSD	جذب آب
		kg/m³	kg/m³	٪
ماسه	۲/۶	۱۶۸۰	۲۳۵۰	۲/۴۵



شکل ۲. دانه بندی درشت‌دانه و ریزدانه مصرفی جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

Fig. 2. Grading of coarse and fine aggregate used for making concrete and its compliance with ASTM-C33 standard range

۲- ۲- مونت موریلونیت

مونت موریلونیت از مجموعه کانی‌ها و از خانواده اسمکتیت می‌باشد. یکی از معروف‌ترین سنگ‌هایی که از کانی مونت موریلونیت بدست می‌آید بنتونیت است. مطالعات زمین شناسی نشان می‌دهد که کانی مونت موریلونیت از طریق استحاله (دگرگونی) مذاب آتشفشان‌ها به وجود می‌آید [۱]. این ماده در اندازه نانو تولید شده و پس از جذب آب منبسط می‌شود و می‌تواند به چندین برابر اندازه اولیه خود افزایش حجم دهد. این ویژگی باعث می‌شود تا در صورت استفاده در بتن، میزان تخلخل را کاهش داده و با افزایش تراکم بتن مقاومت فشاری آن افزایش دهد [۲]. خاصیت نانو ذره مونت موریلونیت بسته به نوع ساختار کاتیون آن تغییر می‌کند. بعنوان

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانو مونت موریلنیت

Table 3. Physical characteristics of nano montmorillonite

نام تجاری	چگالی (kg/m^3)	اندازه ذرات (nm)	مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	هدایت الکتریکی (MV)	سختی (موهس)	ضریب تبادلی یونی (meg/100gr)	رنگ	رطوبت (٪)
نانو مونت موریلونیت	۳۷۰-۳۰۰	۲-۱	۲۷۰-۲۲۰	۲۵	۲ >	۴۸	زرد	۲-۱

جدول ٤. مشخصات شیمیایی نانو مونت موریلنیت

Table 4. chemical characteristics of nano montmorillonite

L.O.I	Fe_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	K_2O (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	Na_2O (%)
۱۵/۴۵	۵/۶۲	۰/۶۲	۱/۹۷	۰/۸۶	۵۰/۹۵	۱۹/۶	۳/۲۹	۰/۹۸

جدول ۵.ساختار شیمیایی میکروسیلیس مصرفی

Table 5. Chemical structure of consumable microsilica

Na_2O	K_3O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	C	SIC	SiO^2
٪ ۰/۱	٪ ۰/۱	٪ ۰/۵	٪ ۱/۳	٪ ۰/۹	٪ ۱/۳۲	٪ ۰/۳	٪ ۰/۵	٪ ۹۳/۶

مثال در نانو مونت موریلونیت وجود سدیم و کلسیم در لایه میانی، باعث تورم‌پذیری و افزایش جذب سطحی می‌شود. نانو مونت موریلونیت دارای مدول نرمی بالایی می‌باشد و باید قبل از ترکیب در بتن، بوسیله ارتعاش از کلوخه شدن ذرات این ماد جلوگیری شود و یا اینکه همراه با روان کننده به بتن اضافه شود و حداقل به مدت ۲ الی ۳ دقیقه در میکسر مخلوط شود [۳]. سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانو مونت موریلونیت به شرح جدول ۳ و ۴ می‌باشد که از اطلاعات مندرج بر روی بسته‌بندی محصول استخراج گردیده است.

۲- ۳- میکروسیلیس

بدلیل تخلخل بالای پوکه معدنی و هزینه بالای استفاده از نانو مواد در بتن، در این تحقیق برای کاهش میزان تخلخل بتن از ترکیب نانو مونت موریلونیت و پودر میکروسیلیس استفاده گردید. میکروسیلیس با داشتن بیش از ۹۰٪ سیلیس با حالت غیرکریستالی و با ذرات بسیار ریز خاصیت پوزولانی دارد و با استاندارد ASTM-C1240 مطابقت دارد [۱۸]. از میکروسیلیس در بتن با هدف کاهش میزان تخلخل خمیر سیمان و بهبود کیفیت ناحیه انتقال بین سیمان و سنگدانه و همچنین افزایش میزان مقاومت فشاری استفاده می‌شود [۱۲]. نتایج سایر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که افزودن مقدار بین ۵٪ الی ۱۰٪ میکروسیلیس در بتن با توجه به اندازه ذرات ریز آن، باعث افزایش دوام بتن در برابر انواع اثرات منفی ناشی از چرخه یخزدگی، محیط سولفاته و جلوگیری از نفوذ یون کلراید در بتن می‌شود [۱۶,۱۷]. در این تحقیق، مقدار ثابت ۵۰ کیلوگرم میکروسیلیس در هر متر مکعب بتن اضافه گردید. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس مصرفی به شرح جدول ۵ و ۶ می‌باشد.

جدول ۶. مشخصات فیزیکی پودر میکروسیلیس مورد استفاده

Table 6. Physical characteristics of microsilica powder used[11]

شکل ذرات	اندازه ذرات	وزن مخصوص	رنگ ماده
	μ	gr/cm³	
کروی و غیر کریستاله (آمورف)	۰/۱ – ۰/۵	۲۵	خاکستری روشن

جدول ۷. مشخصات شیمیایی سیمان تیپ ۲ فارس]۲۲[

Table 7. Chemical characteristics of Fars type 2 cement [22]

SiO_4	AL_2O_3	FE_2O_3	MgO	OS_3	L.O.I	I.R	C_3A
٪۲۰	٪۶	٪۶	٪۵	٪۳	٪۳	٪۰/۷۵	٪۸

جدول ۸. مشخصات فوق روان کننده LK-PC8020[۲۲]

Table 8. Specifications of super lubricant LK-PC8020 [22]

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
عسلی	۱/۱۳ gr/cm²	ASTM C1017	ندارد	حدود ۶	مایع	۱٪ تا ۲٪ عیار سیمان

۲- ۴- سیمان

سیمان مصرفی مورد استفاده از نوع تیپ ۲ فارس می‌باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب است. سایر مشخصات شیمیایی این سیمان به شرح جدول ۷ می‌باشد [۲۲].

۲- ۵- فوق روان کننده

در مطالعات گذشته، تاثیر مثبت استفاده از فوق روان کننده در پخش نانو مواد در بتن مورد بررسی قرار گرفته و توصیه شده است[۲۲]. بنابراین در این تحقیق برای رسیدن به پخش یکنواخت نانو مواد در بتن از فوق روان کننده استفاده شده است. همچنین استفاده از روان کننده‌ها یا کاهنده‌های آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و رئولوژی بتن و نیز دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. فوق روان کننده مصرفی در این تحقیق بر پایه پلی کربوکسیلات اِتر مدل LK-PC8020 می‌باشد که جزء جدیدترین نسل فوق روان کننده محسوب می‌شود. این نوع فوق روان کننده با داشتن زنجیره‌های بلند جانبی در ساختار مولکولی علاوه بر دافعه شدید ذرات سیمان و پخش و یکنواخت کردن آن درون بتن با ایجاد ممانعت فضایی بین ذرات مانع از نزدیک شدن و چسبیدن دوباره ذرات شده و بیشترین اثر روان کنندگی را ایجاد می‌کند [۱۰]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده مصرفی در جدول ۸ نمایش داده شده است. همچنین شکل ۳ برخی از مصالح مصرفی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

الف) فوق روان کننده ب) مونت موریلونیت ج) میکروسیلیس د) پوکه معدنی قروه

شکل ۳. برخی از مصالح مصرفی مورد استفاده در آزمایش

Fig. 3. Some materials used in the experiment

جدول ۹. نام و استاندارد آزمایش، نوع و تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش

Table 9. Test name and standard, type and number of samples for each test

ردیف	شرح آزمایش	نوع نمونه	ابعاد نمونه (میلیمتر)	سن نمونه (روز)	تعداد نمونه	شماره استاندارد
۱	مقاومت فشاری	مکعبی	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	۷-۲۸-۹۰	۳۶	BS EN 12390
۲	مقاومت کششی	استوانه‌ای	۳۰۰*۱۵۰	۲۸	۶	ASTM C496
۳	اسلامپ	-	-	-	-	ASTM C143
۴	جذب آب بتن سخت شده	مکعبی	۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰	۲۸	۶	ASTM C642
۵	چرخه یخزدگی	مکعبی	۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰	۲۸	۱۲	ASTM C666-B

۳- برنامه آزمایشگاهی و طرح اختلاط

در این تحقیق برنامه آزمایشگاهی مجموعاً متشکل از ۵۴ نمونه مکعبی و ۶ نمونه استوانه‌ای می‌باشد. آزمایشات انجام شده طبق جدول ۹ شامل اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی به روش دونیم شدن (برزیلی)، میزان جذب آب بتن سخت شده و نیز میزان دوام بتن در برابر چرخه یخزدگی می‌باشد.

مبنای طرح مخلوط در این تحقیق، ضوابط ACI-213، تجربه آزمایشگاهی و مطالعات پیشین سایر تحقیقات بوده که بر اساس نوع مصالح مصرفی عمل بهینه‌یابی صورت گرفته است. بطوریکه از پوکه معدنی قروه با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر و نسبت آب به سیمان ۰/۴ استفاده شد. نسبت فوق روان کننده به سیمان ۱٪ در نظر گرفته شد. در جدول ۱۰ مقادیر مصالح مصرفی برای تهیه یک متر مکعب بتن به ازای طرح مخلوط‌های مختلف نشان داده شده است. طرح مخلوط ردیف ۱ بدون افزودنی نانو بعنوان نمونه کنترل و طرح‌های ردیف ۲ تا ۶ با میزان مختلف پودر نانو مونت موریلونیت در نسبت‌های وزنی ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪، ۲/۵٪ جایگزین بخشی از سیمان شده است. در کلیه‌ی طرح مخلوط‌ها نسبت میکروسیلیس برابر با ۱۰٪ وزنی سیمان در نظر گرفته شد.

در این تحقیق ابتدا پوکه معدنی و ماسه بصورت اشباع با سطح خشک (حالت SSD) درآمد. سپس پوکه معدنی به همراه ماسه طبیعی به داخل میکسر ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه سیمان و نصف آب مصرفی اضافه و پس از ۳۰ ثانیه اختلاط، فوق روان کننده و نانو مونت موریلونیت اضافه و به مدت ۴ دقیقه دیگر مخلوط شدند. در پایان آزمایش

جدول ۱. طرح اختلاط مورد استفاده جهت آزمایش

Table 10. mixing plan used for testing

ردیف	نام	سیمان	پوکه معدنی	ماسه	مونت موریلونیت	میکروسیلیس	فوق روان کننده	آب
		kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	lit/m³
۱	Control	۵۰۰	۲۵۰	۸۰۰	۰	۵۰	۴	۱۹۰
۲	NA-CON-0.5%	۴۹۷/۵	۲۵۰	۸۰۰	۲/۵	۵۰	۴	۱۹۰
۳	NA-CON-1%	۴۹۵	۲۵۰	۸۰۰	۵	۵۰	۴	۱۹۰
۴	NA-CON-1.5%	۴۹۲/۵	۲۵۰	۸۰۰	۷/۵	۵۰	۴	۱۹۰
۵	NA-CON-2%	۴۹۰	۲۵۰	۸۰۰	۱۰	۵۰	۴	۱۹۰
۶	NA-CON-2.5%	۴۸۷/۵	۲۵۰	۸۰۰	۱۲/۵	۵۰	۴	۱۹۰

شکل ۴. مدت زمان و ترتیب اختلاط اجزای بتن

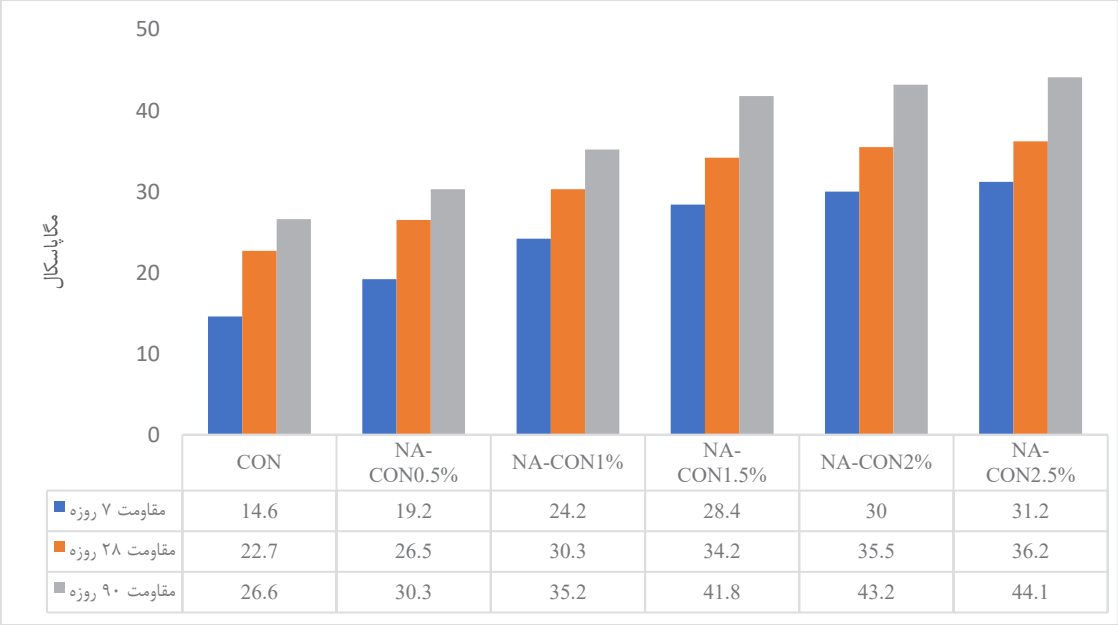
Fig. 4. Duration and order of mixing concrete components

اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه برای تمامی نمونه‌ها انجام شد. قابل ذکر است که سرعت دوران میکسر بتن بر روی ۱۵ دور در دقیقه تنظیم شد. به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جدار قالب، ابتدا جداره‌های داخلی قالب با یک لایه‌ی نازک روغن معدنی آغشته گردید و سپس بتن در چند لایه داخل قالب ریخته شد. تراکم بتن‌های ساخته شده نیز در سه لایه و با زدن ۲۵ ضربه به هر لایه توسط یک میله‌ی فلزی مخصوص انجام گردید. شکل ۴ مدت زمان و ترتیب اختلاط اجزای بتن را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱. مقایسه مقاومت فشاری تمامی‌نمونه‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

Table 11. Comparison of the compressive strength of all tested samples at different ages

سن نمونه بتن	CON	NA-CON0.5%	NA-CON1%	NA-CON1.5%	NA-CON2%	NA-CON2.5%
مقاومت ۷ روزه	۱۴/۶	۱۹/۲	۲۴/۲	۲۸/۴	۳۰	۳۱/۲
مقاومت ۲۸ روزه	۲۲/۷	۲۶/۵	۳۰/۳	۳۴/۲	۳۵/۵	۳۶/۲
مقاومت ۹۰ روزه	۲۶/۶	۳۰/۳	۳۵/۲	۴۱/۸	۴۳/۲	۴۴/۱



شکل ۵. مقایسه مقاومت فشاری تمامی‌نمونه‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

Fig. 5. Comparison of the compressive strength of all tested samples at different ages

٤- یافته‌ها

۴- ۱- مقاومت فشاری

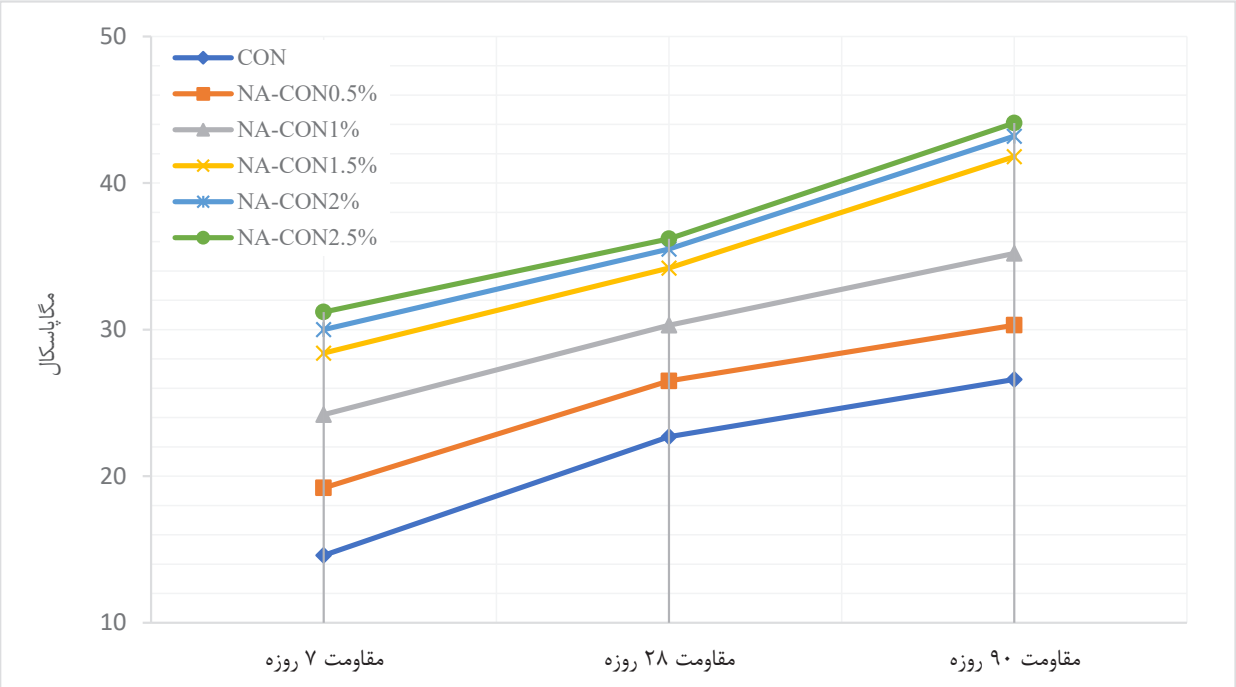
آزمایش مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد BS-EN-12390 بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلیمتر در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت و نتایج آن درجدول ۱۱ و شکل ۵ نمایش داده شده است. نتایج این آزمایش نشان داد که افزودن پودر نانو مونت موریلونیت در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری در بتن می‌گردد. میزان افزودن بهینه نانو مونت موریلنیت در بتن نیز ۱/۵٪ درصد وزنی معادل ۷/۵ کیلوگرم در هر متر مکعب تعیین گردید. طبق شکل ۵ که میزان افزایش ظرفیت فشاری بتن را نمایش می‌دهد، مشخص گردید که افزودن مقادیر بیش از ۱/۵٪ نانو در بتن سبک، تاثیر چندانی در رشد مقاومت نخواهد داشت. اما با این وجود افزودن پودر نانو به میزان ۲/۵٪ وزنی سیمان نیز بیشترین رشد مقاومتی را نشان می‌دهد. ممکن است که استفاده از مقادیر بالاتر از این محدوده، اثر سوء بر روی رشد مقاومت داشته باشد و علت آن را می‌توان به کلوخه شدن نانو ماده در بتن و ایجاد ناحیه ضعف نسبت داد [۶].

طبق نتایج بدست آمده از جدول ۱۲ مشخص گردید که کمترین، بهینه‌ترین و بیشترین میزان رشد مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط NA-CON به ترتیب ۰/۵٪, ۱/۵٪, ۲/۵٪ می‌باشد.

جدول ۱۲. مقایسه کمترین، بهینه‌ترین و بیشترین مقاومت فشاری بدست آمده در نمونه‌های مورد آزمایش

Table 12. Comparison of the lowest, the most optimal and the highest compressive strength obtained in the tested samples

عملکرد	نام طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (استوانه)	مقاومت فشاری ۹۰ روزه (استوانه)	درصد تغییرات مقاومت ۲۸ روزه نسبت به نمونه کنترل	درصد تغییرات مقاومت ۹۰ روزه نسبت به نمونه کنترل
کمترین مقاومت	NA-CON0.5%	۲۶/۵	۳۰/۳	۱۴/۳	۱۲/۲
بهینه ترین مقاومت	NA-CON1.5%	۳۴/۲	۴۱/۸	۳۳/۶	۳۶/۴
بیشترین مقاومت	NA-CON2.5%	۳۶/۲	۴۴/۱	۳۷/۳	۳۹/۷



شکل ۶. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

Fig. 6. Comparison of compressive strength of tested samples at different ages

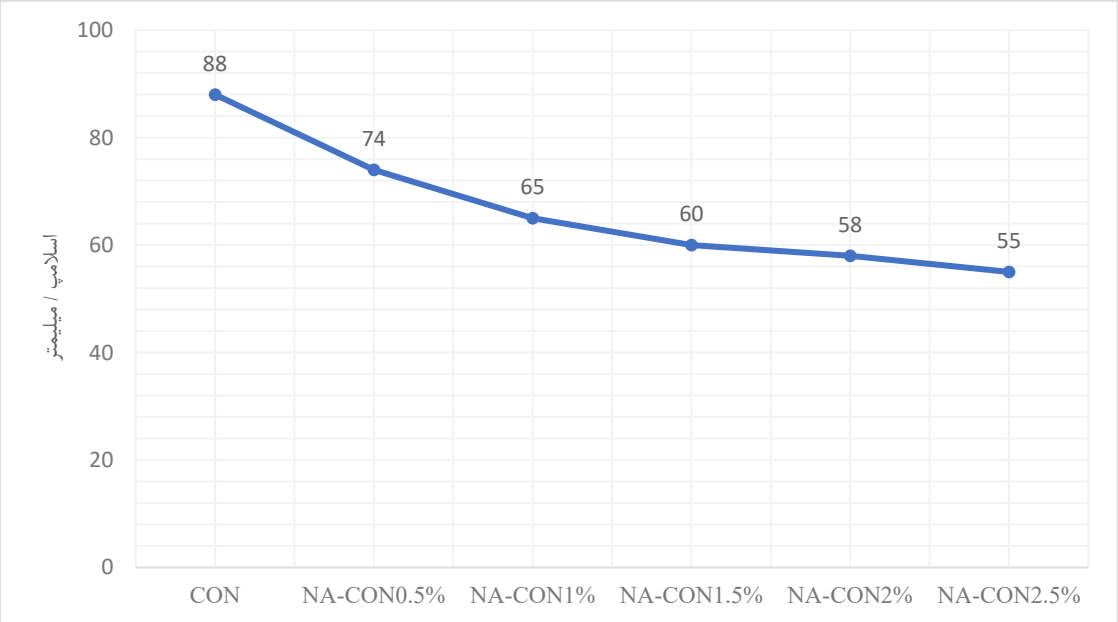
۴- ۲- آهنگ گیرش مقاومت

شکل ۶ آهنگ کسب مقاومت فشاری بتن را در سنین مختلف نشان می‌دهد. به استناد از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که آهنگ رشد مقاومت بتن در نمونه کنترل و نمونه دارای ۰/۵٪ وزنی نانو مونت موریلونیت بصورت عادی است. بطوریکه بتن عمده مقاومت خود را در سن قبل از ۲۸ روز کسب کرده است. در نمونه دارای ۱٪ نانو مونت موریلونیت در بتن نیز آهنگ گیرش مقاومت بتن تقریباً دیرگیر شده و نیز با روندی یکسان از ۷ تا ۹۰ روز در حال گیرش مقاومت می‌باشد. در نمونه‌های دارای ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ نانو مونت موریلونیت کاملاً روند کسب مقاومت فشاری بتن دیرگیر شده و عمده مقاومت فشاری بتن در سنین بالای ۲۸ روز بدست خواهد آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده هر چه بیشتر از نانو مونت موریلونیت باعث افزایش سن گیرش بتن یا بعبارتی باعث دیرگیر شدن بتن خواهد شد.

جدول ۱۳. مقایسه میزان اسلامپ نمونه‌های مورد آزمایش

Table 13. Comparing the amount of slump of the tested samples

نام طرح بتن	CON	NA-CON0.5%	NA-CON1%	NA-CON1.5%	NA-CON2%	NA-CON2.5%
اسلامپ بتن / mm	۸۸	۷۴	۶۵	۶۰	۵۸	۵۵



شکل ۷. مقایسه میزان اسلامپ نمونه‌های مورد آزمایش

Fig. 7. Comparing the amount of slump of the tested samples

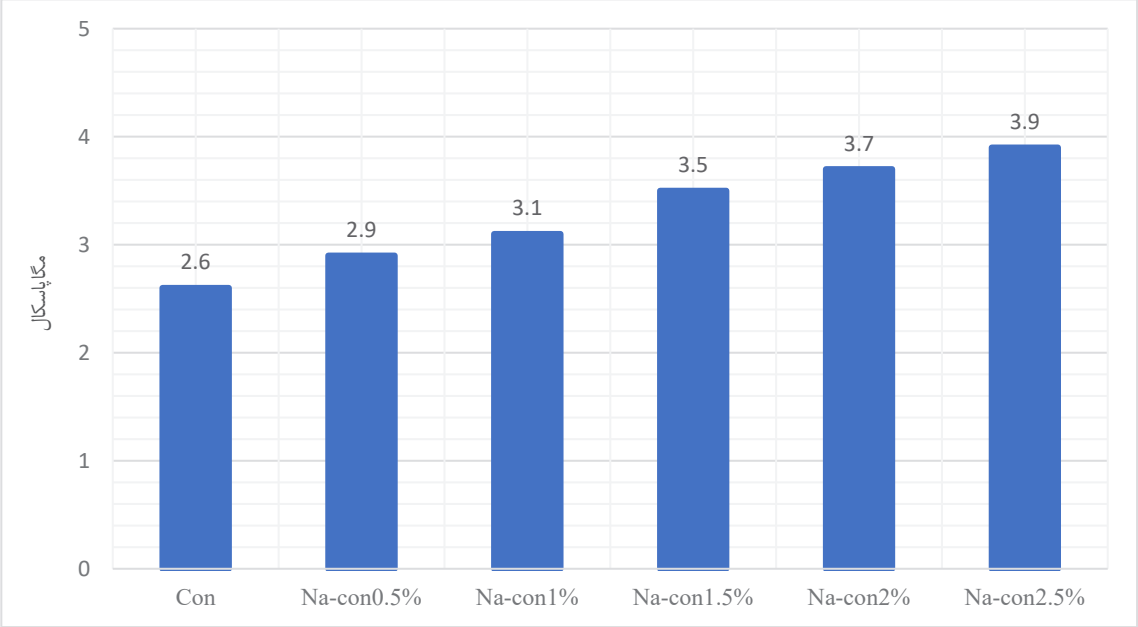
۴- ۳- اسلامپ بتن

اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی میزان روانی بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز است. در این تحقیق آزمایش اسلامپ طبق استاندارد ASTM-C143 بر روی بتن تازه انجام شد. میزان اسلامپ در نمونه‌های مورد آزمایش با افزودن ۰/۵ ٪ نانو مونت موریلونیت بدلیل جذب آب بالای ذرات آن، باعث اُفت ۱۶٪ اسلامپ بتن گردید. اما با افزایش مقادیر نانو مونت موریلونیت بدلیل بهبود توزیع بندی ذرات و همچنین بدلیل دارا بودن سطح مقطع و بافت نرم پودر نانو پس از تورم در اثر جذب آب نیز روند کاهش روانی بتن رفته رفته کاهش یافت. بطوریکه با افزودن بیش از ۱/۵٪ نانو مونت موریلونیت کاهش محسوسی در کاهش میزان اسلامپ بتن نخواهیم داشت. جدول ۱۳ و شکل ۷ میزان اسلامپ نمونه‌های مورد آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۴. مقایسه میزان مقاومت کششی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

Table 14. Comparison of tensile strength of all tested samples

سن نمونه بتن	CON	NA-CON0.5%	NA-CON1%	NA-CON1.5%	NA-CON2%	NA-CON2.5%
۲۸ روزه / MPA	۲/۶	۲/۹	۳/۱	۳/۵	۳/۷	۳/۸



شکل ۸. مقایسه میزان مقاومت کششی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

Fig. 8. Comparison of the tensile strength of all tested samples

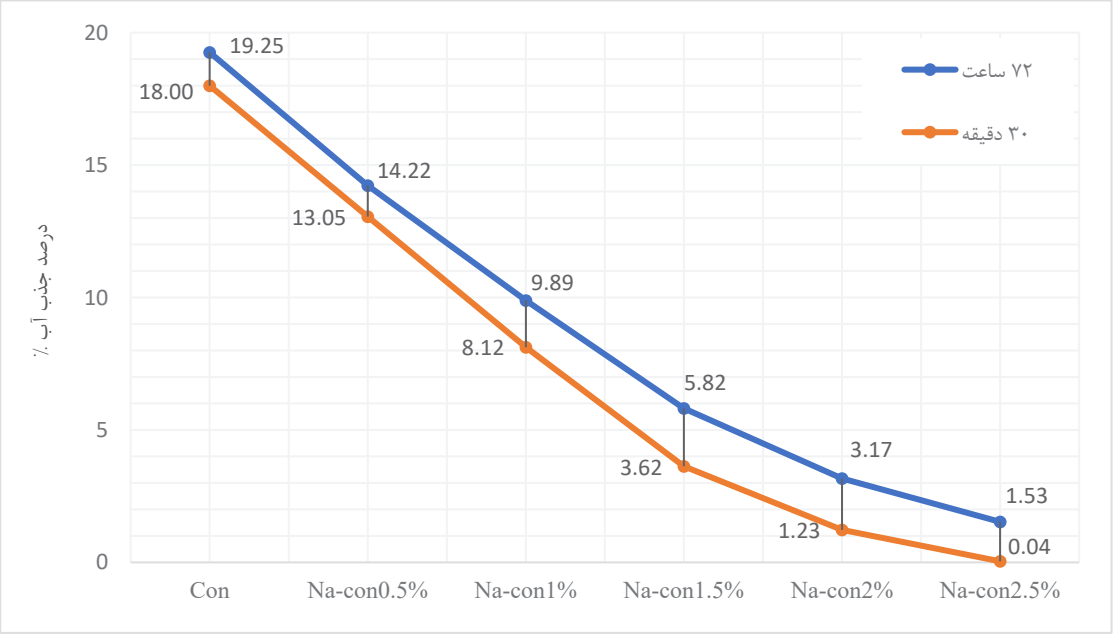
۴- ۴- مقاومت کششی

آزمون کشش بتن به روش دو نیم کردن (برزیلین)، روشی برای تعیین مقاومت کششی بتن می‌باشد. روش آزمایش طبق استاندارد ASTM-C496 بر روی نمونه استوانه‌ای ۲۸ روزه می‌باشد. به استناد از جدول ۱۴ میزان مقاومت کششی بتن کنترل ۲/۶ مگاپاسکال بدست آمده است. همچنین استفاده از مقادیر ۰/۵٪، ۱٪، ۱/۵٪، ۲٪ و ۲/۵٪ نانو مونت موریلونیت باعث افزایش مقاومت کششی بتن به میزان به ترتیب ۸٪، ۱۳٪، ۲۵٪، ۳۰٪ و ۳۳٪ نسبت به نمونه کنترل گردید. با توجه به اینکه مقاومت کششی و فشاری بتن رابطه‌ی مستقیمی با یکدیگر دارند، عواملی که باعث افزایش مقاومت کششی می‌شوند نیز همانند عواملی هستند که باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردند. یعنی می‌توان از جمله دلایل افزایش مقاومت کششی را به دلیل افزایش تراکم، چسبندگی بیشتر بین عناصر بتن و کاهش تخلخل موجود در پوکه معدنی مرتبط دانست. شکل ۸ مقایسه بین نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۵. مقایسه میزان جذب آب در بتن سخت شده در نمونه‌های مورد آزمایش

Table 15. Comparison of the amount of water absorption in hardened concrete in the tested samples

نام نمونه	Con		Na-con0.5%		Na-con1%		Na-con1.5%		Na-con2%		Na-con2.5%	
زمان جذب آب	30min	72hr	30min	72hr	30min	72hr	30min	72hr	30min	72hr	30min	72hr
وزن اشباع / گرم	۵۷۳۰	۵۷۹۰	۵۵۰۰	۵۵۵۰	۵۲۷۰	۵۳۵۰	۵۱۶۰	۵۰۶۰	۴۹۵۰	۵۰۴۵	۴۹۰۰	۴۹۷۳
وزن خشک / گرم	۴۸۵۶	۴۸۵۶	۴۸۶۲	۴۸۶۵	۴۸۷۴	۴۸۷۴	۴۸۸۳	۴۸۸۳	۴۸۹۰	۴۸۹۰	۴۸۹۸	۴۸۹۸
درصد رطوبت	۱۸/۰۰	۱۹/۲۳	۱۳/۰۵	۱۴/۰۸	۸/۱۲	۹/۷۷	۳/۶۲	۵/۶۷	۱/۲۳	۳/۱۷	۰/۰۴	۱/۵۳



شکل ۹. مقایسه میزان جذب آب در بتن سخت شده در نمونه‌های مورد آزمایش

Fig. 9. Comparison of the amount of water absorption in hardened concrete in the tested samples

۴- ۵- جذب آب بتن سخت شده

این آزمایش علاوه بر اندازه‌گیری میزان جذب آب نیز معیاری برای سنجش تخلخل در بتن می‌باشد [۲۲]. در این تحقیق آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده طبق استاندارد ASTM-C642 بر روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام شد. بدین ترتیب ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه آون و در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته تا رطوبت آن‌ها از بین رفته و کاملاً خشک شوند. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعت (جذب آب ثانویه) در حوضچه آب قرار گرفته و وزن هر کدام از آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده طبق جدول ۱۵ نشان می‌دهد با افزودن نانو مونت موریلونیت در بتن سبک میزان تخلخل کاهش می‌یابد. نمونه بتن کنترل ۱۹/۲۳٪ جذب آب داشته که این میزان متاثر از وجود تخلخل بالای پوکه معدنی می‌باشد. مجموعاً نمونه‌های بتنی دارای نانو مونت موریلونیت دارای کمترین میزان نفوذپذیری هستند. طرح دارای ۲/۵٪ نانو مونت موریلونیت به دلیل افزایش تراکم دارای کمترین میزان جذب آب نسبت به طرح کنترل می‌باشد. جدول ۱۵ و شکل ۹ مقایسه میزان جذب آب در بتن سخت شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱۶. مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش پس از چرخه یخزدگی

Table 16. Comparison of the decrease in the compressive strength of the tested samples after the freezing cycle

وضعیت نمونه بتن	CON		NA-CON0.5%		NA-CON1%		NA-CON1.5%		NA-CON2%		NA-CON2.5%	
	fc MPa	اُفت مقاومت٪	fc MPa	اُفت مقاومت٪	fc MPa	اُفت مقاومت٪	fc MPa	اُفت مقاومت٪	fc MPa	اُفت مقاومت٪	fc MPa	اُفت مقاومت٪
۰ چرخه	۲۲/۷	۰	۲۶/۵	۰	۳۰/۳	۰	۳۴/۲	۰	۳۵/۵	۰	۳۶/۲	۰
۳۰۰ چرخه	۱۹/۸	-۱۴/۶	۲۴/۲	-۱۰/۵	۲۸/۳	-7/1	۳۳/۱	-۳/۳	۳۴/۶	-۲/۸	۳۵/۲	-۲/۶

طبق دستورالعمل آبا، اگر میزان جذب آب اولیه بتن کمتر از ۲/۵٪ باشد، دوام آن مناسب ارزیابی می‌شود. همچنین حداکثر میزان جذب آب بتن در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید و در محیط‌هایی که سازه در معرض آب دریا قرار دارد تا ۵٪ مجاز اعلام شده [۲۷].

۴- ۶- دوام یخ زدگی

برای تعیین دوام بتن در برابر یخزدگی روش‌های متعددی وجود دارد که در این تحقیق از دستورالعمل ASTM-C666-B تبعیت شده است. در روش B نمونه‌های بتن به تعداد معینی در مجاورت یخزدگی با آب در دمای ۱۸- درجه سانتیگراد و ذوب با هوا در دمای ۴+ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرند. در انتها و پس از اتمام تکرار چرخه‌های یخزدگی میزان تخریب نمونه‌ها با معیارهای مختلفی سنجیده می‌شود که شامل موارد عمده زیر است [۳۱]:

۱- تغییر در مقاومت فشاری: اُفت بیش از ۱۰٪ نشان دهنده تخریب است.

۲- تغییر در وزن نمونه: اُفت بیش از ۵٪ نشان دهنده تخریب است.

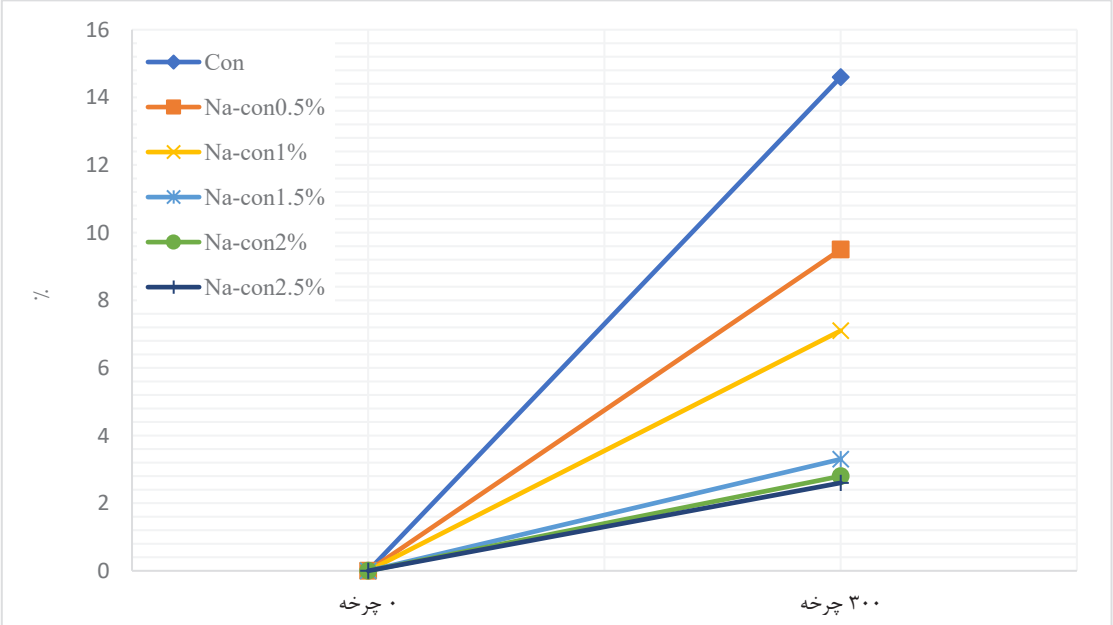
۳- تغییر در پاسخ امواج: با عبور امواج ماورای صوت از نمونه در قبل و بعد از آزمایش اگر به میزان ۴۰٪ اُفت در سرعت امواج عبوری ثبت شود، نمونه تخریب شده است.

۴- تغییر در طول ابعاد نمونه: کرنش‌های نمونه با ابزارهای دقیق سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار آن از میزان توصیه شده تجاوز کند، نمونه به تخریب شده است.

در این تحقیق نمونه‌ها تحت شرایط دمایی حداقل ۱۸- درجه سانتیگراد و حداکثر ۴+ درجه سانتیگراد در چرخه‌های ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ مرتبه تکرار قرار گرفتند. مدت زمان هر چرخه یخزدگی ۵ ساعته در نظر گرفته شد که نمونه‌های بتنی به مدت ۲/۵ ساعت به حالت انجماد (۱۸- درجه سانتیگراد) و ۲/۵ ساعت به حالت ذوب (۴+ درجه سانتیگراد) قرار گرفتند. در نهایت میزان تخریب نمونه‌ها با معیار اُفت وزن و اُفت مقاومت مورد سنجش و مقایسه قرار گرفتند.

جدول ۱۶ و شکل ۱۰ میزان کاهش مقاومت فشاری و جدول ۱۷ و شکل ۱۱ میزان کاهش وزن نمونه‌های مورد آزمایش پس از اتمام چرخه یخزدگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که نمونه کنترل پس از ۳۰۰ چرخه یخزدگی به میزان ۱۴/۶ ٪ اُفت مقاومت پیدا کرده که طبق استاندارد مرجع دچار خرابی و زوال گردیده است. اما با افزودن حداقل ۱٪ نانو مونت موریلونیت در بتن نیز این عارضه مرتفع گردیده و دوام بتن در برابر چرخه یخزدگی افزایش می‌یابد. بنابراین علت پایداری دوام در بتن در برابر یخزدگی، افزایش تراکم ایجاد شده توسط نانو مونت موریلنیت است. بطوریکه با افزایش تراکم و کاهش تخلخل در بتن، فضا برای انبساط و انقباض مکرر آب در بتن در اثر یخزدگی کاهش می‌یابد.

در ادامه میزان کاهش وزن نمونه‌های دارای حداقل ۱/۵٪ نانو مونت موریلونیت نشان می‌دهد که دوام آن‌ها در برابر چرخه یخزدگی پایدار بوده و میزان اُفت وزن آن‌ها در محدوده مجاز استاندارد مربوطه می‌باشد. در نتیجه با افزایش مقادیر وزنی نانو مونت موریلونیت در بتن سبک، دوام بتن در برابر چرخه یخزدگی افزایش خواهد یافت.



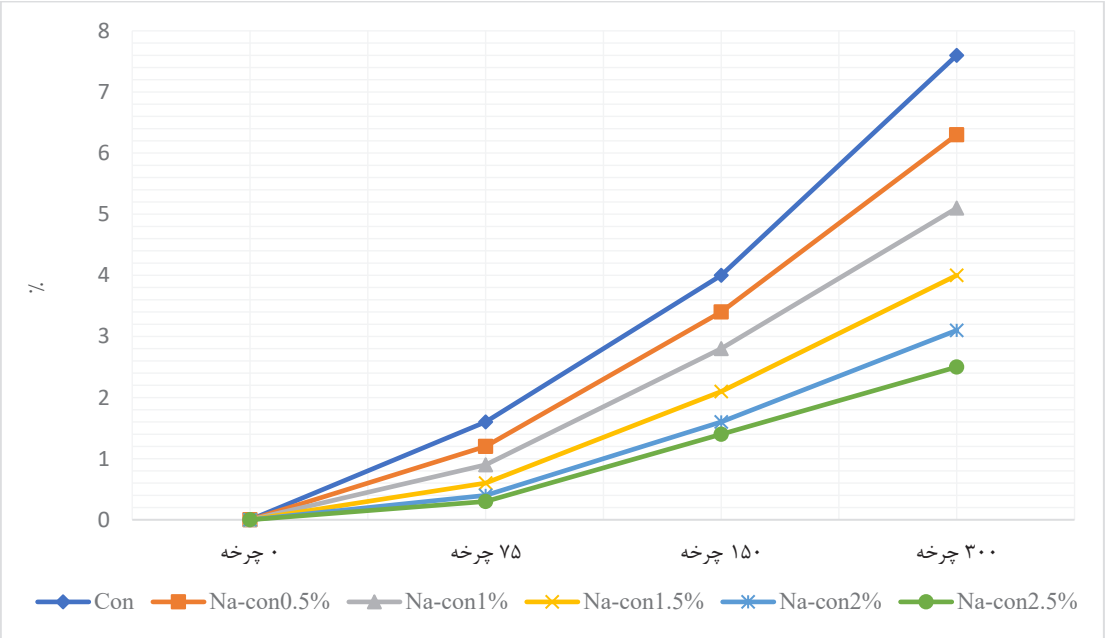
شکل ۱۰. مقایسه میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش پس از چرخه یخ‌زدگی

Fig. 10. Comparison of the decrease in the compressive strength of the tested samples after the freezing cycle

جدول ۱۷. مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌های مورد آزمایش پس از چرخه یخ‌زدگی

Table 17. Comparing the amount of weight loss of the tested samples after the freezing cycle

وضعیت نمونه بتن	CON		NA-CON0.5%		NA-CON1%		NA-CON1.5%		NA-CON2%		NA-CON2.5%	
	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪	وزن بتن gr	اُفت وزن ٪
۰ چرخه	۵۷۹۱	٪۰	۵۵۵۷	٪۰	۵۳۵۶	٪۰	۵۱۶۷	٪۰	۵۰۴۵	٪۰	۴۹۷۳	٪۰
۷۵ چرخه	۵۶۹۵	-٪۱/۶	۵۴۹۰	-٪۱/۲	۵۳۰۴	-٪۰/۹	۵۱۳۶	-٪۰/۶	۵۰۲۵	-٪۰/۴	۴۹۵۵	-٪۰/۳
۱۵۰ چرخه	۵۵۵۹	-٪۴	۵۳۶۴	-٪۳/۴	۵۲۰۶	-٪۲/۸	۵۰۵۸	-٪۲/۱	۴۹۶۴	-٪۱/۶	۴۹۰۰	-٪۱/۴
۳۰۰ چرخه	۵۳۴۶	-٪۷/۶	۵۲۰۶	-٪۶/۳	۵۰۸۰	-٪۵/۱	۴۹۶۰	-٪۴	۴۸۸۸	-٪۳/۱	۴۸۴۵	-٪۲/۵



شکل ۱۱. مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌های مورد آزمایش پس از چرخه یخ‌زدگی

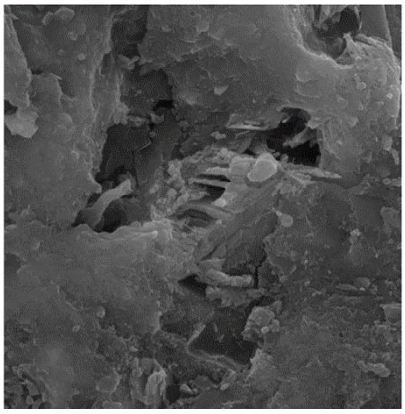
Fig. 11. Comparing the amount of weight loss of the tested samples after the freezing cycle

۵- تصویر SEM

شکل ۱۲ تا ۱۶ مربوط به تصاویر الکترونیکی روبشی نمونه‌های مورد آزمایش یعنی طرح مخلوطهای دارای نسبت وزنی مختلف نانو مونت موریلونیت می‌باشد. آنچه از تصاویر ۱۲ تا ۱۶ گواه است نیز استفاده از نانو مونت موریلنیت به همراه میکروسیلیس بطور قابل ملاحظه‌ای میزان تراکم بتن سبک را افزایش می‌دهد. زیرا با افزایش مقادیر نانو مونت موریلونیت در بتن، ناحیه انتقال ترک مسدود شده و فضای موئینه کاهش یافته و در نتیجه با کاهش تخلخل بتن و افزایش تراکم، مقاومت و دوام افزایش می‌یابد. مطابق آنچه در شکل ۱۲ نمایش داده شده، مشخص است که نمونه دارای ۰/۵٪ نانو مونت موریلونیت دارای تخلخل بیشتری می‌باشد که باعث شکست زودرس در بتن خواهد شد. اما استفاده از ۱/۵٪ و ۲٪ نانو مونت موریلونیت (شکل ۵۱ و ۶۱)، بطور چشمگیری منافذ موجود در بتن را کاهش می‌دهد. اما تراکم بیش از حد در بتن ممکن است میزان نفوذ آب را در بتن کاهش داده که باعث جلوگیری از رشد هیدروکسید کلسیم سیمان در طی عمل هیدراسیون و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری بتن و تصاویر MES (شکل ۱۳ و ۱۴) می‌توان نتیجه گرفت که میزان بهینه استفاده از نانو مونت موریلونیت در بتن سبک، بین ۱ ٪ تا ۱/۵٪ وزنی عیار سیمان مصرفی به همراه ۰/۱٪ میکروسیلیس می‌باشد.

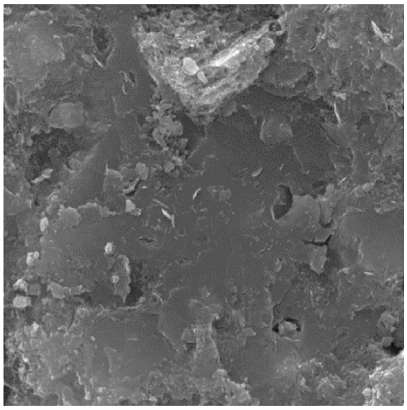
٦- شاخص اقتصادی

شاخص اقتصادی یک معیار برای بررسی توجیه اقتصادی جهت استفاده از یک طرح می‌باشد. در جدول ۱۸ هزینه ساخت یک متر مکعب از طرح مخلوطهای مورد آزمایش با فرض قیمت در زمان فعلی (تابستان سال ۱۴۰۲) برآورد گردید. البته بدیهی است که هزینه‌های ساخت بتن در محیط آزمایشگاهی بیشتر از ساخت همان بتن در مقیاس کارگاه یا کارخانه می‌باشد. شاخص اقتصادی از حاصل تقسیم هزینه ساخت یک مترمکعب بتن نسبت به معیار مقاومت یا دوام محاسبه می‌شود که در این تحقیق شاخص اقتصادی بر مبنای مقاومت فشاری ۹۰ روزه در نظر گرفته شده است. هر چه میزان شاخص اقتصادی بدست آمده عدد کمتری باشد، استفاده از آن طرح توجیه اقتصادی بیشتری خواهد داشت [۲۲]. نتایج این بخش نشان داد که با افزایش نانو مونت موریلونیت در بتن، هزینه‌های ساخت بشدت بالا می‌رود. بنابراین استفاده از این بتن در سطح کلان و گسترده توجیه اقتصادی ندارد. اما در مصارف کم و محدود یا در سازه‌های خاص که الزام به کسب مقاومت بالا و وزن کم می‌باشد، می‌تواند مفید و کاربردی باشد.



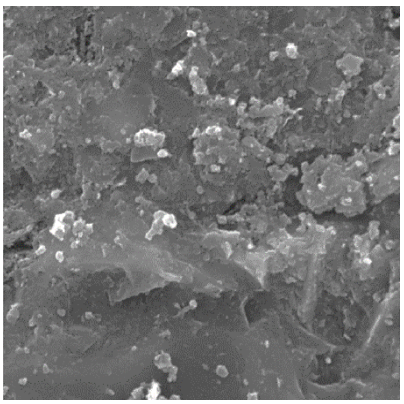
شکل ۱۲. طرح دارای ۰/۵ ٪ نانو مونت موریلونیت

Fig. 12. Design with 0.5% nano montmorillonite



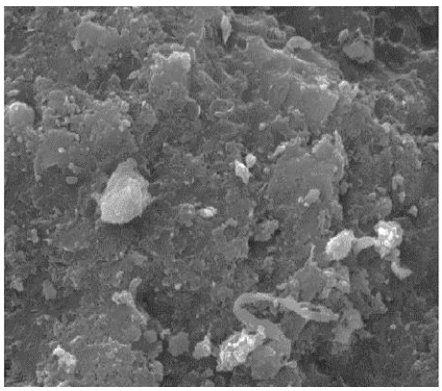
شکل ۱۳. طرح دارای ۱ ٪ نانو مونت موریلونیت

Fig. 13. Design with 1% nano montmorillonite



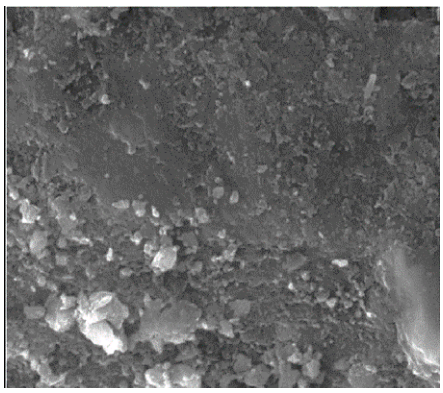
شکل ۱۴. طرح دارای ۱/۵ ٪ نانو مونت موریلونیت

Fig. 14. Design with 1.5% nano montmorillonite



شکل ۱. طرح دارای ۲ ٪ نانو مونت موریلونیت

Fig. 15. Design with 2% nano montmorillonite



شکل ۱۶. طرح دارای ۲/۵ ٪ نانو مونت موریلونیت

Fig. 16. Design with 2.5% nano montmorillonite

جدول ۱۸. مقایسه هزینه ساخت و شاخص اقتصادی طرح مخلوط‌های مورد آزمایش

Table 18. Comparing the construction cost and the economic index of the design of the tested mixtures

نام طرح مخلوط	هزینه ساخت هر متر مکعب بتن	مقاومت فشاری ۹۰ روزه	شاخص اقتصادی طرح
	تومان	MPa	
CONTROL	۲/۷۰۴/۰۰۰	۲۶/۶	۱/۰۲
NA-CON-0.5%	۵/۷۰۱/۰۰۰	۳۰/۳	۱/۸۸
NA-CON-1%	۸/۶۹۸/۰۰۰	۳۵/۲	۲/۴۷
NA-CON-1.5%	۱۱/۶۹۵/۰۰۰	۴۱/۸	۲/۸۰
NA-CON-2%	۱۴/۶۹۲/۰۰۰	۴۳/۲	۳/۱۹
NA-CON-2.5%	۱۷/۶۸۹/۰۰۰	۴۴/۱	۳/۴۶
قیمت هر کیلو سیمان ۱/۲۰۰ تومان		قیمت هر لیتر روان کننده ۱۰۸/۰۰۰ تومان	
قیمت هر کیلو پوکه ۱/۰۰۰ تومان		قیمت هر کیلو نانو مونت موریلونیت ۱/۲۰۰/۰۰۰ تومان	
قیمت هر کیلو ماسه ۲۱۵ تومان		قیمت هر کیلو میکروسیلیس ۲۵/۰۰۰ تومان	

۷- بحث و بررسی نتایج

تاکنون مطالعات محدودی بر روی استفاده از نانو مونت موریلونیت بر روی بتن و مواد سیمانی انجام شده. اما نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از نانو مونت موریلنیت در بتن می‌تواند بهبودهای قابل توجهی در خصوصیات مکانیکی بتن ایجاد کند. نانو مونت موریلونیت باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود و می‌تواند دوام بتن را در برابر خوردگی و حرارت افزایش دهد [۱،۲]. با این حال، میزان بهینه استفاده از نانو مونت موریلنیت در بتن بستگی به عوامل مختلفی مانند نوع بتن، خلوص نانو مونت موریلنیت، شرایط محیطی و نوع کاربری دارد. نانو مونت موریلنیت در تماس با رطوبت و بدلیل جذب آبی که دارد متورم شده و افزایش حجم آن سبب می‌شود تا میزان تخلخل بتن کاهش یابد. این ویژگی باعث افزایش تراکم و مقاومت در بتن خواهد شد [۱-۳].

در این تحقیق نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده از نانو مونت موریلونیت در بتن سبک باعث افزایش تراکم ناشی از تخلخل بالای پوکه معدنی می‌گردد. در نتیجه بدلیل افزایش تراکم ایجاد شده میزان جذب آب و نفوذپذیری بتن کاهش یافته و مقاومت فشاری و دوام آن در برابر چرخه یخزدگی افزایش می‌یابد. در این تحقیق میزان بهینه استفاده از نانو مونت موریلونیت در بتن سبک، بین ۱٪ تا ۱/۵٪ وزنی عیار سیمان به همراه ۱۰٪ میکروسیلیس بدست آمد. در حالیکه نتایج سایر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد میزان بهینه و موثر نانو مونت موریلونیت در بتن معمولی حدوداً ۰/۵٪، در بتن خودتراکم حدوداً ۰/۷۵٪ و در کامپوزیت‌های سیمانی حدوداً ۱٪ وزنی عیار سیمان مصرفی می‌باشد [۲۵-۲۳]. در این تحقیق نتایج آزمایشات نشان داد که استفاده بیشتر از ۱/۵٪ نانو مونت موریلونیت به همراه ۱۰٪ میکروسیلیس در بتن سبک، تغییر محسوسی در نتایج ایجاد نمی‌کند یا در برخی موارد باعث ایجاد ضعف در بتن می‌گردد. بنابراین استفاده از مقادیر بالای نانو مونت موریلونیت با توجه به قیمت بالا و دسترسی محدود آن نیز توجیه‌پذیر نخواهد بود. همچنین جهت افزایش دوام بتن سبک در برابر چرخه یخزدگی توام با در نظر گرفتن سایر معیارهای اقتصادی و وزن مخصو بتن، استفاده از افزودنی‌های حباب‌ساز در بتن توصیه می‌شود. برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق عبارتند از:

۱. با افزایش مقدار نانو مونت موریلونیت در بتن سبک، روند کسب مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و بعبارتی نانو مونت موریلونیت باعث دیرگیر شدن بتن می‌شود.

۲. استفاده از نانو مونت موریلنیت به همراه میکروسیلیس در بتن سبک باعث کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن شده و مقاومت فشاری و کششی را افزایش می‌دهد.

۳. استفاده از نانو مونت موریلنیت به همراه میکروسیلیس در بتن سبک باعث افزایش تراکم در بتن سبک شده و میزان دوام بتن را در برابر

نفوذ آب و چرخه یخزدگی افزایش می‌دهد.

۴. بدلیل جذب آب بالای ذرات نانو مونت موریلنیت و میکروسیلیس، برای حفظ اسلامپ بتن استفاده ازفوق روان کننده ضروری است.

۵. استفاده از مقادیر بیش از ۱/۵٪ وزنی نانو مونت موریلنیت در بتن سبک، اثر محسوسی در رشد مقاومت فشاری و کششی بتن نخواهد داشت.

۶. استفاده از حداقل ۱/۵٪ وزنی مونت موریلنیت به همراه میکروسیلیس در بتن سبک باعث اُفت وزن کمتر از ۵٪ و اُفت مقاومت کمتر از ۱۰٪ خواهد شد که دوام آن در برابر چرخه یخزدگی طبق ضوابط ASTM-C666-B در محدوده مجاز قرار می‌گیرد.

۷. مقاومت فشاری نهایی (۹۰ روزه) در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۱۳/۹٪، ۳۲/۳٪، ۵۷/۱٪، ۶۲/۴٪، ۶۵/۸٪ افزایش یافته است.

۸. میزان اسلامپ در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۱۵/۹٪، ۲۶/۱٪، ۳۱/۸ ٪ ، ۳۴/۱ ٪ ، ۳۷/۵ ٪ ، کاهش یافته است.

۹. مقاومت کششی در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۱۱/۵٪، ۱۹/۲٪، ۳۴/۶ ٪ ،۴۲/۳ ٪ ، ۴۶/۲ ٪ افزایش یافته است.

۱۰. میزان جذب آب نهایی (۷۲ ساعته) در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۲۶/۰٪، ۴۸/۵٪، ۶۹/۷٪، ۸۳/۵٪ و ۹۲/۰٪کاهش یافته است.

۱۱. میزان مقاومت بتن پس از قرارگیری در برابر ۳۰۰ چرخه یخزدگی در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۲۸/۱٪، ۵۱/۴٪، ۷۷/۴٪، ۸۰/۸٪ و ۸۲/۲٪ افزایش یافته است.

۱۲. میزان اُفت وزن بتن پس از ۳۰۰ چرخه یخزدگی در طرح‌های NA-CON0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% نسبت به طرح کنترل به ترتیب به میزان ۱۷/۱٪، ۳۲/۹٪، ۴۷/۴٪، ۵۹/۲٪ و ۶۷/۱٪ کاهش یافته است.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شهر شیراز و آزمایشگاه "سیوان لند" جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

M.samadi, n.moghaddam, z.mokhtari hosseini, study of nano-montmorillonite and its properties, fourteenth international congress of chemical engineering - tehran, iran, (2020) 18-34.

S.baqerzadeh, m.akbari, study of the use of nanomaterials on construction materials technology case study of montmorinelite, master thesis in civil engineering, kashan university, iran, (2018) 1-20.

A.habibi, a.vaziri, m.arman, relationship between compressive and tensile strength and specific gravity of lightweight concrete made with mineral pumice in kurdistan region, 7th national conference on applied research in civil engineering and architecture, khajeh university nasir al-din tusi-tehran, iran, (2016) 46-60.

Z.mousavi, h.tavakoli, p.maaref vand, m.rezaei, evaluation of changes in density and durability index of schist rock under the influence of freeze-thaw cycles, journal of mining engineering - tehran, iran, (2018) 14-25.

M.r.esfahani, n.baqiei, a.mousavi, effect of lightweight aggregate granulation of pumice faroog and additives on the durability of lightweight aggregate against frost, ninth national congress of technology in civil engineering - mashhad, iran (2018) 50-65.

Zarinfar, rahbari, javadi, laboratory comparison of using glass fibers and steel fibers in concrete containing montmorillonite nanoclay. Concrete research, (2020) 125-136.

A.saeidijam, a.azimi. Investigating the resistance and permeability parameters of plastic concrete reinforced with polypropylene fibers. Concrete research, (2017) 135-144.

B.rezaei, t.qadri, e.daneshfraz, laboratory investigation of the effect of montmorillonite clay and nanoclay on reducing scour downstream of grid plates. Engineering research of irrigation and drainage structures, (2019), 1-16.

Tavana amlishi.a “prediction of compressive and tensile strength of light concrete using data mining methods” - master thesis in civil engineering, structural orientation, sirjan university of technology, iran (2016) 33-54.

M.dehghan, n.sharifi sanjani, preparation and identification of phenolic-montmorillonite resin nanocomposite, journal of polymer science and technology, year 25, issue 2, iran (2015) 16-33.

M.majd, f.farmani, r.aghamajidi, various methods of extraction and preparation of nanoclay from natural earth minerals, third national congress of geology, ferdowsi university of mashhad, iran (2015) 101-119.

S.zeinali, m.rezaei, m.erfannejad, comparison of nano-montmorient and nano-alumina by organic matter analysis, 3rd national geological congress, ferdowsi university of mashhad, iran (2015) 122-140.

A.bazaei, b.mansouri, r.aghamjidi, m.gulshan. Investigating the mechanical properties and freezing durability of yellow colored concrete with different weight ratios of mush clay pigment (limonite). Structural engineering and construction, (2021) 47-65.

M.mousavi, a.sadeghinik, a.bahari, a.ashour, n.khayat, cement paste modified by nano-montmorillonite and carbon nanotubes. Aci materials journal, (2022) 173-185.

P.hosseini, a.afshar, b.vafaei, b.booshehrian, a.molaei raisi, e.esrafili, effects of nano-clay particles on the short-term properties of self-compacting concrete. European journal of environmental and civil engineering, (2017) 127-147.

E.aydin, m.kara, b.bundur, z.ozyurt, n.bebek, o.gulgun, a comparative evaluation of sepiolite and nano-montmorillonite on the rheology of cementitious materials for 3d printing. Construction and building materials, (2022) 350-370.

Topic 9 of iran’s national building regulations, edition of 2019.

Iranian concrete standard “aba” (2021).

Astm c136, standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, astm international, west conshohocken, u.s.a. (2017).

I.asbag, r.rahmani, the effect of chloride ions on the invasion rate of sulfate ions in dense concretes containing clay nanoparticles. Civil engineering (2017) 13-21.

F.albandi, study of lightweight concrete shrinkage and parameters affecting its resistance to glacial cycle, master thesis in civil engineering, yazd university, iran. (2018) 21-40.

B.ghaedi, a.hassani, m.hanzehnejad, effect of concrete durability containing different amounts of cemented carbon nanostructures on weight loss and flexural strength of concrete pavement under melt and ice cycle conditions, journal of transportation infrastructure engineering quoted. (2015) 33-50.

M.nili, a.moradi, m.majidim, monitoring the electrical resistance of concrete during a freeze-thaw cycle, a way to control the ratio of water to cement, journal of concrete research, seventh year, first issue, tehran , iran. (2017) 104-121.

A.daqiqi, a.nahvi, d.samadi, gh.farmanpour, comparison of electrical and compressive strength of concrete in freezing and water cycles, sixth annual concrete conference, tehran, iran (2015) 172-190.

S.janatan, m.omrani, b.behfrooz, effect of microsilica additive on compressive strength and water absorption of lightweight structural concrete, journal of structural and construction engineering, volume 5, special issue 4, tehran, iran (2017) 1-18.

M.farboodi, m. Ghasemi, k. Massoud. Application of taguchi method to optimize the mechanical properties of polyvinyl chloride-montmorillonite nanocomposite. New processes in materials engineering, (2018) 179-190.

A.a.ramezanianpour, a.m.ramezanianpour, a.zolfagharansnab, the role of silica fume and silica fume mixed cements in mechanical properties and durability of concrete, 7th annual concrete technology congress, tehran, iran (2016) 41-60.

M.zahrabi, study of mechanical properties and rheology of self-compacting concrete containing recycled aggregates with micro-silica pozzolan, master thesis in civil engineering, university of guilan, iran (2016) 75-92.

Astm c666, standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing, u.s.a. (2019).

Iran concrete standard, the sixth chapter, durability or reliability of concrete, (2021). 114-124.

Astm c33, standard specification for concrete aggregates., u.s.a. (2018).

Astm c496, standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, astm international, west conshohocken, u.s.a. (2017).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Mansouri, H. Yousefinezhad, F. avaznezhad, A. h. Bazaee, Investigating the Freezing Strength and Durability of Lightweight Concrete With Different Weight Ratios of Nano Montmorillonite and Microsilica, Amirkabir J. Civil Eng., 55(11) (2024) 2263-2284.

DOI: 10.22060/ceej.2023.21730.7809