



University Of Qom



Effect of Crushed Aggregates on Strength and Durability of Concrete Containing Metakaolin and Air Entrace Subjected to Freezing and Thawing Cycles

Mohammad Kazem Sharbatdar^{1✉}, Mohammad Najafinasab², Omid Rezayfar³

1. Corresponding author, Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: msharbatdar@semnan.ac.ir
2. MSc, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: mnajafi.nasab1379@gmail.com
3. Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: orezayfar@semnan.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 09 May 2026
Revised 20 Jul 2026
Accepted 02 Aug 2026
Published 06 Aug 2026

Keywords:
Aggregate Grading,
Metakaolin,
Air Entrace,
Freeze-thaw Cycles,
Strength,
Durability.

ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used construction materials, and aggregates play an important role in its strength and durability. The quality of aggregates affects the compressive strength and permeability of concrete. This research has investigated the effect of aggregate grading, metakaolin, and air entrace on the compressive strength and durability of concrete. Concrete samples were prepared with two types of aggregate grading, including single fine gravel and a fine-coarse gravel combination, with different sand-to-gravel ratios, and their compressive strength was tested at 7 and 28 days of age. It is worth noting that these aggregates originate from the sand and gravel mines in Darband, Semnan. In addition, the samples were subjected to 300 freeze-thaw cycles to assess the durability of the concrete under cold conditions. The results indicated that the use of 12.5% metakaolin helped to increase strength and reduce permeability, but the application 5% air entrace reduced the minor strength amount but increased the durability subjected to freezing and thawing cycles. Overall, the highest strength and internal density were observed in samples with fine gravel (5-10 mm) aggregate only, a gravel-to-sand ratio of 60:40, and 12.5% metakaolin. The simultaneous use of metakaolin and air entrace creates a good balance between the strength and durability of concrete, and a reduction of cement by about 18-23%.

Cite this article: Sharbatdar MK, Najafinasab M, Rezayfar O. Effect of Crushed Aggregates on Strength and Durability of Concrete Containing Metakaolin and Air Entrace Subjected to Freezing and Thawing Cycles. Civil Infrastructure Researches. 2026; 12(1): 183-198. <https://doi.org/10.22091/cer.2026.15703.1679>



Introduction

Concrete, as the most widely used construction material, plays a key role in infrastructure development due to its characteristics such as ease of production, reasonable cost, and adequate strength. However, its durability under environmental conditions- particularly in cold climates with repeated freeze-thaw cycles- is considered one of the fundamental challenges. This phenomenon causes internal pressure, cracking, spalling, and a reduction in the service life of structures. One approach to improving concrete durability is modifying the mix design through optimizing aggregate gradation, replacing a portion of cement with pozzolanic materials, and using air-entraining admixtures. Since high cement consumption has significant environmental and economic impacts, replacing a portion of it with metakaolin can, in addition to improving concrete properties, help reduce long-term maintenance and repair costs. The importance of this issue is twofold in Semnan Province, where the Darband sand and gravel quarries serve as the primary source of aggregate supply.

Experimental Work

In this study, the simultaneous effect of three factors, aggregate gradation, the addition of metakaolin (shown in Figure 1) as a mineral admixture, and air-entraining chemical admixtures along with cement, on the strength and durability of concrete was investigated. The cement replacement percentages with metakaolin were 0, 10, and 15. XRF analysis was performed on the metakaolin.



Fig. 1. Metakaolin

High-quality crushed fine and coarse aggregates were extracted from the Darband quarries in Mahdishahr, and their gradation was determined in accordance with ASTM C136 (shown in Fig. 2.). Two selected gradation types were used: pea gravel gradation (4.75 to

9.5 mm) and a combined pea-almond gradation (4.75 to 19 mm). The mixes GF60S40 (60% pea gravel and 40% sand) and GG30S70 (30% almond gravel and 70% sand) exhibited the highest compressive strength.

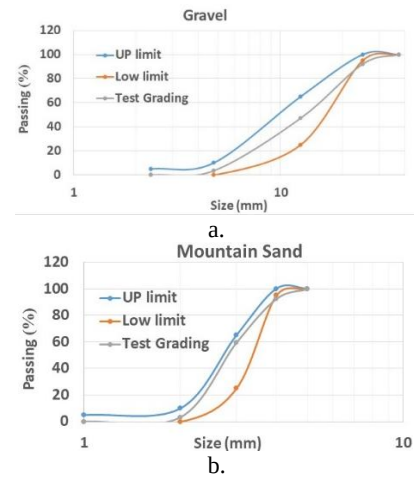


Fig. 2. Aggregate Grading. a) Gravel, b) Mountain Crushed sand

In the first phase, 10 concrete mix designs without admixtures were prepared with an equal cement content. Based on the best compressive strength results, the optimal aggregate combination was selected in the second phase, and the cement content was reduced incrementally. The compressive and tensile strengths of the concrete specimens were obtained at various ages. In the third phase, durability testing against freeze-thaw cycles was conducted to evaluate concrete resistance to deterioration caused by repeated temperature changes and the transition of water between liquid and solid states.

Results

The compressive strength results of cylindrical concrete specimens from the baseline mix designs without admixtures at 7 and 28 days are presented in Table. 1. The results showed that aggregate gradation and the gravel-to-sand ratio had a significant effect on both the early 7-day and final 28-day strength development. The results indicated that by reducing the cement content by up to 28% in concrete containing 60% pea gravel, the target compressive strength of approximately 30 MPa was achieved, demonstrating the effectiveness of these aggregates. With the addition of metakaolin to each of these mix design types,

compressive strength increased by approximately 10%. The highest strength was recorded in the GF60S40 specimen containing an 18% cement reduction and metakaolin (39.46 MPa).

Table. 1. Compressive strength results of cylindrical concrete specimens without admixtures (MPa)

Name	28 Day	7-Day
GG60 S40	31.4	29.2
GF60 S40	36.50	28.27
GG70 S30	28.05	26.2
GF70 S30	30.545	27.755
GG50 S50	30.625	27.99
GF50 S50	29.61	30.2
GG30 S70	37.50	31.05
GF30 S70	36.35	25.58
GG40 S60	31.17	26.7
GF40 S60	33.985	32.05

The compressive strength results of the concrete specimens after 95 days of curing are presented. The results showed that all baseline specimens with pea gravel aggregate (GF60S40), at cement reductions of 18, 23, and 28%, were able to meet the target strength of 30 MPa- although the specimen with an 18% cement reduction exhibited approximately 30% higher strength than the required value. The freeze-thaw cycle results are presented in Table. 2. and were compared with the results of specimens that were not subjected to freeze-thaw cycles. The results in Tables 1 and 2 demonstrate the direct influence of aggregate composition, cement content reduction, and the use of admixtures on the durability and mechanical performance of concrete.

Conclusion

The use of 12.5% metakaolin as a partial cement replacement led to increased compressive strength and improved concrete durability. In the GF60S40 mix, the specimen containing metakaolin showed approximately 12% higher strength compared to the control specimen, while in the GG30S70 mix, the strength increase was only about 4%. Furthermore, the addition of metakaolin was able to compensate for the negative effect of cement reduction, whereby at a 23% cement reduction, the strength increase observed in GF60S40 was approximately 38%, and in GG30S70 it ranged between 9 and 19%.

Table. 2. Compressive strength results of cylindrical concrete specimens subjected to freezing and thawing cycles (MPa)

Name	After Cycles	Before Cycles	Reduce (%)
GF60 S40 C1	32.25	35.43	9.9
GF60 S40 C2	25.67	31.19	21.5
GF60 S40 C3	22.96	28.35	23.5
GF60 S40 C1M	34.33	39.46	14.9
GF60 S40 C2M	36.58	37.34	2.1
GF60 S40 C3M	29.31	33.01	12.6
GF60 S40 C1A	31.27	29.34	-6.2
GF60 S40 C2A	25.33	26.54	4.8
GF60 S40 C3A	22.77	24.81	9.0
GG30 S70 C1	29.93	36.80	23.0
GG30 S70 C2	25.52	31.69	24.2
GG30 S70 C3	21.51	27	25.5
GG30 S70 C1M	30.27	37.61	24.2
GG30 S70 C2M	29.31	32.71	11.6
GG30 S70 C3M	24.90	28.56	14.7
GG30 S70 C1A	29.17	28.34	-2.8
GG30 S70 C2A	25.15	25.23	0.3
GG30 S70 C3A	20.82	22.83	9.7

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

The authors declare the following regarding potential conflicts of interest:

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Mohammad Kazem Sharbatdar:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing– original draft; Writing– review & editing.

Mohammad Najafinasab:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Resources; Software; Validation; Visualization; Roles/Writing– original draft.

Omid Rezayfar:

Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Methodology; Project administration; Resources; Software; Supervision; Roles/Writing – original draft.

تأثیر سنگدانه‌های شکسته بر مقاومت و دوام بتن حاوی متاکائولین و حباب هوا در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن

محمد کاظم شریب‌تدار^۱، محمد نجفی نسب^۲، امید رضایی‌فر^۳

۱. نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: msharbatdar@semnan.ac.ir

۲. کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: mnajafi.nasab1379@gmail.com

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: orezayfar@semnan.ac.ir

چکیده

بتن به دلیل ویژگی‌های مقاومتی و دوام، نقشی کلیدی در توسعه زیرساخت‌ها دارد. با این حال، دوام آن در برابر شرایط محیطی، به‌ویژه در اقلیم‌های سرد با چرخه‌های مکرر یخ‌زدگی و ذوب، از چالش‌های اساسی محسوب می‌شود. اصلاح طرح اختلاط و جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی یا افزودنی‌های حباب‌زا، از راهکارهای بهبود دوام می‌باشند. در این پژوهش اثر سنگدانه‌ها، متاکائولین و حباب هوا بر مقاومت فشاری و دوام بتن بررسی شد. برای این منظور، نمونه‌هایی با دو نوع دانه‌بندی نخودی و ترکیب نخودی-بادامی و نسبت‌های مختلف شن به ماسه با استفاده از سنگدانه‌های معادن دربند سمنان ساخته و مقاومت آن‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۵ روز و پس از ۳۰۰ سیکل یخ‌زدگی و ذوب ارزیابی گردید. نتایج نشان داد استفاده از ۱۲/۵ درصد متاکائولین موجب افزایش تا ۱۵ و ۴۳ درصدی مقاومت فشاری بعد از ۲۸ و ۹۵ روز شدند، در حالی‌که افزودن ۵ درصد حباب هوا با وجود کاهش نسبی مقاومت فشاری، دوام بتن در برابر یخ‌زدگی را به طور محسوسی افزایش داد و افت کمتر از ۵٪ از خود نشان داد. بهترین عملکرد مکانیکی و دوام در نمونه‌های با سنگدانه نخودی و نسبت شن به ماسه ۴۰:۶۰ مشاهده شد. در مجموع، استفاده هم‌زمان از متاکائولین و حباب هوا تعادل مطلوبی میان مقاومت و دوام ایجاد کرده و امکان کاهش مصرف سیمان تا حدود ۱۸-۲۳ درصد را فراهم می‌سازد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۵

کلیدواژه‌ها:

دانه‌بندی سنگدانه‌ها،

متاکائولین،

چرخه‌های یخ زدن و آب شدن،

مقاومت،

دوام.

استناد: شریب‌تدار محمدکاظم، نجفی نسب محمد، رضایی‌فر امید. تأثیر سنگدانه‌های شکسته بر مقاومت و دوام بتن حاوی متاکائولین و حباب هوا در معرض چرخه‌های یخ زدن و آب شدن. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*، ۱۴۰۵: (۱)۱۲: ۱۸۳-۱۹۸.

<https://doi.org/10.22091/cer.2026.15703.1679>

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی، به دلیل ویژگی‌هایی همچون سهولت تولید، قیمت مناسب و مقاومت مطلوب، نقشی کلیدی در توسعه زیرساخت‌ها دارد. با این حال، دوام آن در برابر شرایط محیطی، به‌ویژه در اقلیم‌های سرد با چرخه‌های مکرر یخ‌زدگی و ذوب، از چالش‌های اساسی محسوب می‌شود. این پدیده، موجب ایجاد فشار داخلی، ترک‌خوردگی، پوسته‌پوسته شدن و کاهش عمر مفید سازه‌ها می‌گردد. یکی از راهکارهای بهبود دوام بتن، اصلاح طرح اختلاط از طریق بهینه‌سازی دانه‌بندی سنگدانه‌ها، جایگزینی بخشی از سیمان با مواد پوزولانی و استفاده از افزودنی‌های حباب‌زا است [۱]. دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها با کاهش فضای خالی، تراکم و مقاومت بتن را افزایش و نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهد. متاکائولین، به‌عنوان پوزولانی بسیار فعال، با واکنش پوزولانی خود ساختار خمیر سیمان را متراکم‌تر کرده و موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش دوام در برابر عوامل مخرب می‌شود [۲]. همچنین افزودنی‌های حباب‌زا با ایجاد حباب‌های ریز و یکنواخت هوا، فشار ناشی از یخ‌زدگی را کاهش داده و از تخریب بتن جلوگیری می‌کنند، هرچند ممکن است موجب افت جزئی مقاومت فشاری گردند [۳] و [۴]. مواد افزودنی بتن به دو گروه اصلی افزودنی‌های شیمیایی و افزودنی‌های معدنی (پوزولانی) تقسیم می‌شوند. افزودنی‌های شیمیایی شامل روان‌کننده‌ها و فوق‌روان‌کننده‌ها برای افزایش کارایی بدون افزایش آب، زودگیرکننده‌ها برای تسریع گیرش، کندگیرکننده‌ها برای کنترل زمان گیرش، افزودنی‌های حباب‌زا برای افزایش دوام در برابر یخبندان و کاهنده‌های آب برای بهبود مقاومت فشاری هستند [۵]. افزودنی‌های معدنی یا مواد مکمل سیمانی ($SCMs$)، مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی، سرباره و متاکائولین، نقش مهمی در افزایش مقاومت،

کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام بتن دارند [۶ و ۷]. پوزولان‌ها با واکنش با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان، ژل $C-S-H$ تولید کرده و موجب پر شدن خلل و فرج، افزایش تراکم خمیر سیمان و بهبود دوام می‌شوند [۲]. متاکائولین، حاصل فعال‌سازی حرارتی رس کائولن در دمای ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتیگراد، یکی از پوزولان‌های نوین و مهندسی‌شده محسوب می‌شود که از دهه ۱۹۹۰ به‌طور تجاری در بتن کاربرد یافته است [۴]. این ماده با داشتن ترکیب غنی از SiO_2 و Al_2O_3 ، واکنش‌پذیری بالایی دارد و علاوه بر تولید ژل $C-S-H$ ، فازهای آلومیناتی پایدار نیز ایجاد می‌کند. استفاده از متاکائولین به میزان ۵-۱۵ درصد جایگزین سیمان موجب افزایش مقاومت فشاری به‌ویژه در سنین اولیه، کاهش نفوذپذیری در برابر یون‌های مهاجم (کلرید، سولفات)، بهبود دوام در چرخه‌های یخ‌زدگی-آب‌شدگی و کاهش خزش در بلندمدت می‌شود [۱ و ۳]. با این حال، افزودن متاکائولین می‌تواند کارایی بتن تازه را کاهش دهد، زیرا ذرات بسیار ریز آن بخشی از آب اختلاط را جذب می‌کنند. بنابراین، برای حفظ روانی، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها ضروری است [۸]. به‌طور کلی، متاکائولین در مقایسه با سایر پوزولان‌ها عملکردی مشابه یا حتی برتر از دوده سیلیسی داشته و به دلیل تولید هدفمند و یکنواخت، کیفیت بالاتری را تضمین می‌کند [۹ و ۱۰]. مقدار بهینه جایگزینی سیمان با متاکائولین معمولاً بین ۸ تا ۱۵ درصد وزنی سیمان است. در این محدوده، ترکیبی از افزایش مقاومت مکانیکی، بهبود دوام و کاهش نفوذپذیری حاصل می‌شود. رنگ روشن متاکائولین همچنین آن را برای بتن‌های معماری و سفید مناسب می‌سازد. کاربردهای اصلی متاکائولین شامل بتن‌های با عملکرد بالا (HPC^3)، بتن‌های خودتراکم (SCC^3)، سازه‌های مقاوم در برابر یخ‌زدگی و ذوب، سازه‌های در معرض حملات شیمیایی کلرید و سولفات و عناصر معماری نمایان است [۱۱-۱۵].

³- Self-compacting concrete

¹- Supplementary Cementitious Materials

²- High-Performance Concrete

متاکائولین با ذرات ریز و ساختار آمورف، دو نقش مهم در بتن ایفا می‌کند: اول، با واکنش پوزولانی و تولید ژل ثانویه C-S-H مقاومت فشاری و دوام بتن را افزایش می‌دهد؛ دوم، با اثر پرکنندگی و کاهش حجم حفرات مویینه، نفوذپذیری و آسیب‌پذیری بتن را کاهش می‌دهد [۱۳]. افزودن آن همچنین باعث کاهش جمع‌شدگی و خزش در بلندمدت شده و پایداری بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب را تقویت می‌کند. به دلیل جذب آب توسط ذرات ریز، استفاده از فوق‌روان‌کننده‌ها برای حفظ کارایی بتن ضروری است [۱۴]. استفاده از پوزولان‌ها، از جمله متاکائولین، علاوه بر بهبود خواص مکانیکی و دوام، نقش مهمی در کاهش اثرات زیست‌محیطی بتن دارد. جایگزینی بخشی از سیمان با پوزولان‌ها موجب صرفه‌جویی در انرژی تولید کلینکر و کاهش انتشار CO₂ می‌شود و همزمان با افزایش عمر مفید سازه و کاهش تعمیرات، به توسعه پایدار کمک می‌کند [۱۵]. مطالعات نشان داده‌اند که متاکائولین با کاهش تخلخل و مشارکت در هیدراتاسیون، مقاومت فشاری، پایداری حجمی، مقاومت در برابر نفوذ آب و چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب بتن را افزایش می‌دهد [۱۶]. دوام بتن تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نسبت آب به سیمان، کیفیت و نوع سیمان، سنگدانه‌ها و شرایط اجرا قرار دارد. کاهش نسبت آب به سیمان موجب کاهش تخلخل و افزایش چگالی می‌شود و مسیر نفوذ یون‌ها و آب را محدود می‌کند. دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها با توزیع یکنواخت و پر کردن فضای خالی بین ذرات، تراکم و مقاومت بتن را افزایش می‌دهد و نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهد. شکل و جنس سنگدانه نیز بر کارایی، چسبندگی و دوام بتن اثرگذار است؛ ذرات گرد یا نیمه‌گرد کارایی بهتر و یکنواختی بیشتری ایجاد می‌کنند [۱۷].

چرخه‌های ذوب و یخ‌زدگی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب بتن در مناطق سردسیر می‌باشند. هنگام یخ زدن آب در منافذ، حجم آن تقریباً ۹ درصد افزایش می‌یابد و فشار داخلی ایجاد می‌کند که اگر تخلیه نشود، ترک‌های

ریز و پوسته‌شدگی ایجاد می‌شود. استفاده از حباب‌های هوای ریز و پایدار، کاهش نسبت آب به سیمان و افزودنی‌های پوزولانی مانند متاکائولین و دوده سیلیسی، اثرات این چرخه‌ها را کاهش می‌دهند. حباب‌های هوا به عنوان فضای خالی عمل کرده و فشار ناشی از انبساط آب یخ‌زده را جبران می‌کنند. عمل‌آوری مناسب، حفظ رطوبت و کنترل دما نیز به تکمیل هیدراتاسیون و افزایش تراکم و مقاومت بتن کمک می‌کند [۱۸ و ۱۹]. معادن شن و ماسه دربند سمنان به دلیل ویژگی‌های خاص سنگدانه‌های تولیدی، از جمله میزان پایین گل‌ولای میان ذرات و شکسته بودن دانه‌ها، ظرفیت بالقوه‌ای برای استفاده در صنعت ساخت‌وساز دارند. دانه‌های شکسته باعث افزایش اصطکاک داخلی و پیوستگی با خمیر سیمان شده و مقاومت فشاری بتن را بهبود می‌بخشند، که این امر امکان کاهش مصرف سیمان و به تبع آن کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی را فراهم می‌کند [۲۰ و ۲۱]. مقایسه میان این دو نوع مصالح نشان می‌دهد که ماسه شکسته مقاومت بالاتر، مصرف سیمان کمتر و اثرات زیست‌محیطی مثبت‌تری دارد، در حالی که ماسه طبیعی روانی بالاتری ارائه می‌کند و برداشت آن از رودخانه‌ها پیامدهای منفی زیست‌محیطی دارد [۲۲].

در زمینه دوام بتن، مطالعات نشان داده‌اند که دانه‌بندی پیوسته و یکنواخت سنگدانه‌ها موجب کاهش تخلخل، افزایش تراکم و بهبود مقاومت بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب می‌شود [۱۷ و ۲۳]. استفاده از مواد پوزولانی مانند متاکائولین، با جایگزینی بخشی از سیمان، ترکیبات زیان‌آور را کاهش داده و مقاومت و دوام بتن را افزایش می‌دهد [۲۴ و ۹]. علاوه بر آن، افزودنی‌های حباب‌زا با ایجاد حباب‌های ریز هوا در بتن، موجب کاهش ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی و افزایش مقاومت در برابر یخ‌زدگی و نفوذپذیری می‌شوند [۲۵ و ۲۶].

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب دانه‌بندی مناسب، متاکائولین و مواد حباب‌زا به صورت هم‌زمان عملکرد بتن

را به شکل چشمگیری بهبود می‌بخشد و مقاومت فشاری، دوام و کاهش نفوذپذیری بتن معمولی و همچنین بتن خودتراکم را افزایش می‌دهد [۲۹-۲۷]. مطالعات داخلی و بین‌المللی، از جمله پژوهش‌های سلطانی و همکاران، همگی بر اهمیت بهینه‌سازی دانه‌بندی، استفاده از متاکائولین و افزودنی‌های حباب‌زا در بهبود عملکرد مکانیکی و دوام بتن تأکید کرده‌اند [۳۰]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که بهره‌گیری از مصالح محلی، به‌ویژه ماسه شکسته، همراه با مواد مکمل سیمانی و افزودنی‌های مناسب، می‌تواند علاوه بر افزایش کیفیت و مقاومت بتن، باعث کاهش مصرف سیمان، کاهش هزینه‌های ساخت و توسعه پایدار در مناطق مختلف گردد. قدوسی و همکاران در خصوص عملکرد ریزساختاری بتن‌های حاوی متاکائولین تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند [۳۱]. محمد^۴ و همکاران هم اثر اضافه کردن متاکائولین به عنوان مصالح سبز در بتن‌های با عملکرد بسیار بالا بررسی آزمایشگاهی و جامعی انجام دادند [۳۲]. ژونگ^۵ و همکاران نیز بر روی بتن‌های حاوی متاکائولین و سنگدانه‌های بازیافتی تحقیقات آزمایشگاهی انجام دادند و خصوصیات مقاومتی به‌همراه دوام بتن‌ها را به‌دست آوردند [۳۳].

از آنجا که مصرف بالای سیمان اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی قابل‌توجهی دارد، جایگزینی بخشی از آن با متاکائولین می‌تواند علاوه بر بهبود خواص بتن، به کاهش هزینه‌های بلندمدت تعمیر و نگهداری کمک کند. اهمیت این موضوع در استان سمنان، که معادن شن و ماسه در بند به‌عنوان منبع اصلی تأمین سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، دوچندان است. این معادن با کیفیت مطلوب و حجم ذخایر بالا، نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها و توسعه پایدار منطقه ایفا می‌کنند. در این تحقیق فرض بر این است که دانه‌بندی پیوسته سنگدانه‌ها باعث افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن در برابر چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن می‌شود. همچنین، افزودن متاکائولین تا درصد بهینه‌ای

مانند ۱۰ درصد جایگزین سیمان می‌تواند مقاومت فشاری را بهبود بخشد، جذب آب را کاهش داده و دوام بتن را افزایش دهد. استفاده از افزودنی حباب‌زا نیز با وجود کاهش مقاومت اولیه، موجب بهبود عملکرد بتن در برابر تخریب ناشی از یخ‌زدگی خواهد شد. علاوه بر این، ترکیب هم‌زمان سه عامل یعنی دانه‌بندی مناسب، متاکائولین و حباب هوا اثر هم‌افزایی مثبت‌تری نسبت به استفاده منفرد هر کدام داشته و طرح اختلاط حاصل از نظر اقتصادی نیز نسبت به بتن‌های سنتی مقرون‌به‌صرفه‌تر خواهد بود. به صورت فرعی نیز پیش‌بینی می‌شود که متاکائولین با کاهش نفوذپذیری و افزایش چگالی خمیر سیمانی، دوام بتن را بهبود دهد؛ حباب‌های هوا میزان افت جرم و مقاومت را کاهش دهند؛ دانه‌بندی پیوسته نسبت آب به سیمان را کم کرده و مقاومت مکانیکی را بالا ببرد؛ و اثرگذاری متاکائولین وابسته به سن نمونه و نسبت آب به سیمان باشد. در نهایت، استفاده هم‌زمان از سه عامل مذکور منجر به افزایش عمر مفید و کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌های بتنی خواهد شد.

۲- نوآوری تحقیق

گرچه تحقیقات گذشته بر عملکرد ریزساختاری افزودن مواد افزودنی مانند متاکائولین و حباب هوا در ترکیب با سیمان متمرکز شدند، اما هدف تحقیق حاضر، بررسی آزمایشگاهی و اقتصادی اثر دانه‌بندی سنگدانه‌های خاص یک منطقه در ایران به‌همراه افزودن متاکائولین و حباب هوا به‌طور هم‌زمان بر مقاومت فشاری ۲۸ یا ۹۰ روز و همچنین دوام بتن در چرخه‌های یخ‌زدن و آب‌شدن است. بنابراین، مسئله اصلی تحقیق حاضر، بررسی اثر هم‌زمان دانه‌بندی سنگدانه‌ها، میزان متاکائولین و افزودنی‌های حباب‌زا بر مقاومت، دوام و توجیه اقتصادی بتن در شرایط یخبندان است. نتایج این پژوهش برای یک منطقه خاص در استان سمنان می‌تواند به شناسایی ترکیب بهینه‌ای منجر شود که علاوه بر افزایش عمر مفید و دوام سازه‌ها،

⁴- Mohamed

⁵- Zhong

شاهرود با سطح مخصوص ۳۲۰۰ سانتی مترمربع بر گرم استفاده شد.

متاکائولین مورد استفاده، پوزولانی با فعالیت بالا و رنگ سفید مایل به کرم بوده که از کلسینه کردن کائولن خالص در دمای حدود ۷۵۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد به دست آمده است. این ماده با داشتن سطح ویژه بالا و واکنش پذیری زیاد، موجب بهبود ریزساختار خمیر سیمان و کاهش نفوذپذیری بتن می شود. درصد جایگزینی سیمان با متاکائولین در این تحقیق در سطوح مختلف (به عنوان مثال صفر، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیمان) بررسی شده است. نمونه متاکائولین مورد استفاده در طرح مخلوط های بتنی از شرکت جهان پودر دلیجان می باشد که نتایج آنالیز XRF آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- آنالیز XRF متاکائولین آماده شرکت جهان پودر دلیجان (%)

Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃
۲/۲۶	۰/۸۹	۱/۵۳	۳/۰۹	۰/۰۴	۰/۴۴	۷۴/۳۲	۱۴/۲۳	۱/۲۰	۰/۷۶	۰/۰۸
SrO	PbO	BaO	ZrO ₂	ZnO	CuO	MnO	LOI	Etc	SUM	
۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۹۳	۰/۰۱	۱۰۰/۰۰	

GG30 S70 بیشترین مقاومت فشاری را نشان دادند. منحنی دانه بندی سنگدانه ها در شکل ۲ نشان داده شده اند. آب اختلاط از نوع آشامیدنی شهری و مطابق استاندارد ASTM C1602 استفاده شد [۳۵].

ماده حبابزا از نوع سورفکتانت مصنوعی مطابق ASTM C494 به منظور افزایش مقاومت بتن در برابر فشار هیدرولیکی ناشی از یخ زدگی به طرح اختلاط اضافه گردید [۳۶]. نمونه ها با میکسر پن تایپ ۳۰ لیتری آماده شدند و مراحل اختلاط شامل مخلوط خشک سنگدانه ها، سیمان و متاکائولین، افزودن آب و ماده حبابزا، استراحت کوتاه و اختلاط نهایی بود. کارایی و میزان هوای بتن تازه با روش ASTM C143 و ASTM C231 کنترل شد [۳۷ و ۳۸]. طرح های اختلاط برای یک مترمکعب بتن مطابق جداول ۳ و ۴ براساس درصدهای مختلف سنگدانه ها، کاهش سیمان، میزان متاکائولین

هزینه های اجرایی و نگهداری را کاهش داده و راهکارهایی عملی برای صنعت ساخت و ساز در مناطق سردسیر فراهم آورد.

۳- برنامه آزمایشگاهی

با توجه به اهمیت دوام و کیفیت بتن در شرایط اقلیمی سرد و مناطق مستعد چرخه های یخ زدگی و ذوب، انتخاب طرح اختلاط مناسب و استفاده از مواد افزودنی معدنی و شیمیایی نقش تعیین کننده ای در عملکرد طولانی مدت سازه های بتنی دارد. در این پژوهش، اثر همزمان سه عامل دانه بندی سنگدانه ها، افزودن متاکائولین و ایجاد حباب هوا بر مقاومت و دوام بتن مورد بررسی قرار گرفت. برای تهیه نمونه ها از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه

نمونه ای از متاکائولین استفاده شده در این تحقیق در شکل ۱ مشاهده می شود.



شکل ۱- نمونه متاکائولین مصرفی

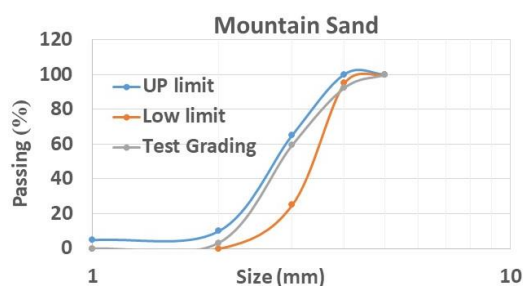
سنگدانه های ریز و درشت از معادن دربند سمنان استخراج و دانه بندی آن ها مطابق استاندارد ASTM C136 تعیین شد [۳۴]. دو نوع دانه بندی منتخب شامل دانه بندی نخودی (۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی متر) و ترکیبی نخودی- بادامی (۴/۷۵ تا ۱۹ میلی متر) بودند که اطلاعات دانه بندی در جدول ۲ داده شده است و نمونه های GF60 S40 و

S40 نشان‌دهنده بتن با ۴۰٪ ماسه و ۶۰٪ شن نخودی و GG30 S70 نشان‌دهنده نمونه با ۷۰٪ ماسه و ۳۰٪ شن ترکیب نخودی و بادامی می‌باشند.

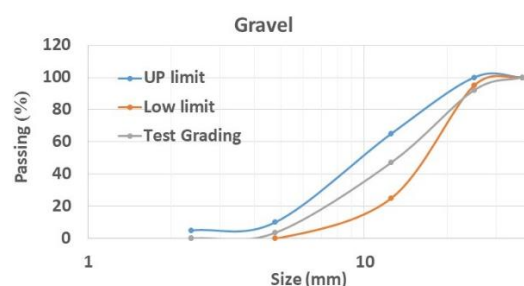
(۱۲/۵ درصد وزن سیمان) و ماده حباب‌زا (۵ درصد وزن سیمان) طراحی و نمونه‌ها آماده شدند. با کاهش مقدار سیمان، مقدار آب ثابت می‌ماند. بنابراین نسبت آب به سیمان نیز افزایش می‌یابد. طرح اختلاط‌های مینا، GF60

جدول ۲- اطلاعات دانه‌بندی‌های مختلف

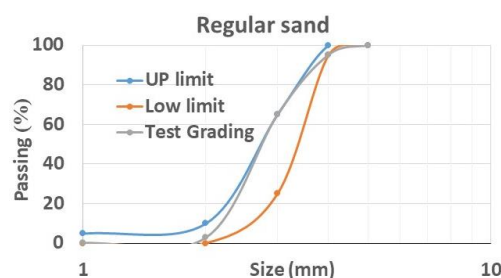
اندازه الک (میلیمتر)	درصد عبوری ماسه (%)	درصد عبوری شن (%)	۶۰٪ شن + ۴۰٪ ماسه	۷۰٪ شن + ۳۰٪ ماسه
۷۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۵۰	۱۰۰	۹۰	۹۴	۹۵
۲۵	۱۰۰	۶۰	۷۶	۸۵
۱۲/۵	۹۵	۳۰	۵۷	۷۰
۴/۷۵	۸۵	۵	۴۱	۷۰
۲	۶۵	صفر	۲۶	۶۰
۱	۴۵	صفر	۱۸	۵۰
۰/۵	۲۵	صفر	۱۰	۴۰
۰/۲۵	۱۰	صفر	۴	۳۰
۰/۰۷۵	۲	صفر	۰/۸	۱۰



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۲- منحنی‌های دانه‌بندی، (الف) شن، (ب) ماسه کوهی شکسته و (ج) ماسه معمولی

نشان داده شده در جدول ۳، به میزان ۱۸ درصد کاهش داده شد و برابر ۴۷۰ کیلوگرم بود. بنابراین، اختلاط‌های پایه فاز اول با کاهش ۱۸ درصدی سیمان مطابق جدول ۳ طراحی گردیدند و در مراحل بعدی و در فاز دوم و بعد از انجام آزمایشات مقاومت فشاری فاز اول، مقدار سیمان اولیه ۵۷۰ کیلو به میزان ۲۳ و ۲۸ درصد مطابق جدول ۴ کاهش

در فاز اول آزمایشات، براساس طرح ملی اختلاط بتن و با فرض استفاده از شن و ماسه رودخانه‌ای، مقدار سیمان موردنیاز برای دستیابی به مقاومت فشاری ۲۸ روزه معادل ۳۰ مگاپاسکال برابر با ۵۷۰ کیلوگرم در مترمکعب تعیین شده است. با این حال، به دلیل به کارگیری سنگدانه‌های شکسته در این مطالعه، مقدار سیمان در طرح‌های مینا

یافت. به این ترتیب، کدهای C1، C2 و C3 به ترتیب نشان‌دهنده بتن‌های دارای کاهش سیمان ۱۸، ۲۳ و ۲۸ درصد با مقادیر ۴۷۰، ۴۴۰ و ۴۱۰ کیلوگرم هستند. پارامترهای M و A مخفف به‌کارگیری متاکائولین یا مواد حباب‌زا می‌باشند.

جدول ۳- طرح اختلاط نمونه‌های مینا بدون افزودنی مورد تحقیق

نام نمونه	آب نهایی (kg)	سیمان (kg)	شن خشک (kg)	ماسه خشک (kg)
GG60 S40	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰
GF60 S40	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰
GG70 S30	۲۴۸/۸	۴۷۰	۱۰۲۰	۴۴۰
GF70 S30	۲۴۸/۸	۴۷۰	۱۰۲۰	۴۴۰
GG50 S50	۲۵۰/۸	۴۷۰	۷۳۰	۷۳۰
GF50 S50	۲۵۰/۸	۴۷۰	۷۳۰	۷۳۰
GG40 S60	۲۵۲	۴۷۰	۵۸۴	۸۷۶
GF40 S60	۲۵۲	۴۷۰	۵۸۴	۸۷۶
GG30 S70	۲۵۳/۵	۴۷۰	۴۳۸	۱۰۲۲
GF30 S70	۲۵۳/۵	۴۷۰	۴۳۸	۱۰۲۲

جدول ۴- طرح اختلاط نمونه‌های ترکیبی مورد تحقیق

نام نمونه	آب نهایی (kg)	سیمان (kg)	شن خشک (kg)	ماسه خشک (kg)	درصد کاهش سیمان (%)	متاکائولین (kg)	مواد حباب‌زا (kg)
GF60 S40 C1	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰	۱۸	-	-
GF60 S40 C2	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰	۲۳	-	-
GF60 S40 C3	۲۴۹/۵	۴۱۰	۸۸۰	۵۸۰	۲۸	-	-
GF60 S40 C1M	۲۴۹/۵	۴۱۰	۸۸۰	۵۸۰	۲۸	۶۰	-
GF60 S40 C2M	۲۴۹/۵	۳۸۵	۸۸۰	۵۸۰	۳۳	۵۵	-
GF60 S40 C3M	۲۴۹/۵	۳۵۹	۸۸۰	۵۸۰	۳۸	۵۱	-
GF60 S40 C1A	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰	۱۸	-	۰/۲۴
GF60 S40 C2A	۲۴۹/۵	۴۷۰	۸۸۰	۵۸۰	۲۳	-	۰/۲۲
GF60 S40 C3A	۲۴۹/۵	۴۱۰	۸۸۰	۵۸۰	۱۸	-	۰/۲۱
GG30 S70 C1	۲۵۳/۵	۴۷۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۱۸	-	-
GG30 S70 C2	۲۵۳/۵	۴۲۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۲۳	-	-
GG30 S70 C3	۲۵۳/۵	۴۱۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۲۸	-	-
GG30 S70 C1M	۲۵۳/۵	۴۱۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۲۸	۶۰	-
GG30 S70 C2M	۲۵۳/۵	۳۸۵	۴۳۸	۱۰۲۲	۳۳	۵۵	-
GG30 S70 C3M	۲۵۳/۵	۳۵۹	۴۳۸	۱۰۲۲	۳۸	۵۱	-
GG30 S70 C1A	۲۵۳/۵	۴۷۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۱۸	-	۰/۲۴
GG30 S70 C2A	۲۵۳/۵	۴۴۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۲۳	-	۰/۲۲
GG30 S70 C3A	۲۵۳/۵	۴۱۰	۴۳۸	۱۰۲۲	۲۸	-	۰/۲۱

می‌باشد که درصد جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۱ و ۱/۸ درصد در نظر گرفته شده است. بنابراین مقدار سیمان در

مقدار آب اولیه و نهایی براساس نسبت w/c و در نظر گرفتن مقدار آب جذب شده در سنگدانه خشک

نگهداری شد تا یخ‌های موجود در ساختار بتن کاملاً ذوب شوند. این فرآیند به‌گونه‌ای تنظیم شد که تغییرات دما شبیه‌سازی شرایط محیط‌های سرد و واقعی باشد و نمونه‌ها در حالت اشباع نسبی باقی بمانند تا فشار هیدرولیکی ناشی از انجماد آب اعمال شود.

در طول آزمایش، اثر چرخه‌های یخ‌زدن و ذوب بر بتن با اندازه‌گیری کاهش جرم، بررسی ظاهری ترک‌ها و پوسته‌ریزی سطحی و همچنین تعیین مقاومت فشاری پس از اتمام ۳۰۰ چرخه ارزیابی شد. کاهش وزن نمونه‌ها و ایجاد ترک‌های سطحی، نشان‌دهنده آسیب ناشی از چرخه‌های حرارتی بود و افت مقاومت فشاری میزان تخریب داخلی بتن را مشخص کرد.

اجرای این آزمایش به پژوهشگران امکان می‌دهد تا تأثیر ترکیب سنگدانه‌ها، حباب هوا و سایر عوامل سازنده بتن بر دوام و مقاومت مصالح در شرایط محیطی سرد و چرخه‌های یخ و ذوب را به‌طور دقیق و قابل مقایسه بررسی کنند.



شکل ۳- یخچال جهت انجام آزمایش ذوب و یخبندان

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های

مبنا

آزمایش مقاومت فشاری یکی از معیارهای اصلی ارزیابی عملکرد مکانیکی بتن است و توانایی آن در تحمل بارهای فشاری را نشان می‌دهد. نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتنی طرح‌های اختلاط مبنا بدون مواد

طرح اختلاط اولی، ثابت و برابر ۴۷۰ کیلوگرم و آب اولیه ۲۳۰ کیلوگرم بودند؛ ولی مقادیر شن و ماسه و مقدار آب نهایی مربوطه نیز تغییر کرد. گرچه براساس تحقیقات گذشته و تحقیقات قبلی نویسندگان، افزایش متاکائولین ممکن است کارایی بتن را کاهش دهد، از آنجا که افزایش روانی از اهداف این تحقیق نبوده است هیچ ماده روان‌کننده در طرح مخلوط‌ها استفاده نشده است.

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در روزهای ۷، ۲۸ و ۱۲۰، از نمونه‌های استوانه‌ای در مرحله اول بتن بدون مواد افزودنی و نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر استفاده شد که دو نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری در روز ۷ و سه نمونه برای آزمایش در روز ۲۸ برای هر طرح اختلاط در نظر گرفته شد. آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد ASTM C39 برای تمامی طرح‌های اختلاط بتن انجام گردید که مقدار مقاومت نمونه‌های مکعبی بتنی با استفاده از رابطه $F_{cu} = \frac{P_{max}}{A}$ محاسبه شد که P_{max} و A به ترتیب ماکزیمم نیروی تحمل شده (N) و سطح مقطع نمونه (mm^2) می‌باشد و F_{cu} نیز مقاومت فشاری مکعب برحسب مگاپاسکال (MPa) است.

آزمایش دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان (مطابق دستگاه نشان داده شده در شکل ۳)، با هدف ارزیابی مقاومت بتن در برابر تخریب ناشی از تغییرات مکرر دما و عبور آب از حالت مایع به جامد و بالعکس در فاز سوم انجام شد. در این فرآیند، وجود رطوبت در منافذ بتن و انبساط حجمی آب هنگام یخ‌زدن می‌تواند تنش‌های داخلی ایجاد کرده، باعث شکل‌گیری ریزترک‌ها و در نهایت کاهش مقاومت و از دست رفتن یکپارچگی بتن گردد. در این تحقیق، نمونه‌های منتخب پس از عمل‌آوری استاندارد ۲۸ روز، تحت آزمایش ذوب و یخبندان با ۳۰۰ چرخه کامل حدوداً ۲ ماه قرار گرفتند. هر چرخه شامل دو مرحله اصلی بود، ابتدا نمونه‌ها تا دمای حدود ۱۸- درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و در این دما نگهداری شدند تا آب موجود در منافذ به‌طور کامل یخ بزند. سپس دما به‌طور تدریجی تا حدود ۴+ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و در این وضعیت

افزودنی ۷ و ۲۸ روز در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. نتایج قابل توجهی بر رشد مقاومت اولیه ۷ روز و نهایی ۲۸ روز نشان داد که دانه‌بندی سنگدانه‌ها، نسبت شن به ماسه تأثیر داشتند.

جدول ۵- مقاومت فشاری متوسط ۷ و ۲۸ روز بتن‌های بدون مواد افزودنی در فاز اول (MPa)

نام نمونه	۷ روز	۲۸ روز
GG60 S40	۲۹/۲	۳۱/۴
GF60 S40	۲۸/۲۷	۳۶/۵
GG70 S30	۲۶/۲	۲۸/۰۵
GF70 S30	۲۷/۷۵	۳۰/۵۵
GG50 S50	۲۷/۹۹	۳۰/۶۳
GF50 S50	۳۰/۲	۲۹/۶۱
GG30 S70	۳۱/۰۵	۳۷/۵
GF30 S70	۲۵/۵۸	۳۶/۳۵
GG40 S60	۲۶/۷	۳۱/۱۷
GF40 S60	۳۲/۰۵	۳۴

رشد متفاوت بودند، که ناشی از تکامل ریزساختار بتن و ادامه هیدراتاسیون سیمان است.

گرچه نمونه GF40S60 دارای بیشترین مقاومت در سن ۷ روزه بود، اما در سن ۲۸ روزه، ترکیبات GF60S40 و GG30S70 بهترین مقاومت فشاری در فاز اول را نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به مقاومت استاندارد ۲۸ روزه، طرح‌های GF60S40 و GG30S70 گزینه‌های مناسب‌تری در فاز اول بدون استفاده از مواد افزودنی محسوب می‌شوند.

۴-۲- بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی مواد افزودنی

در این پژوهش، دو نوع دانه‌بندی سنگدانه بررسی شد، بتن با تنها سنگدانه نخودی و بتن با ترکیب نخودی و بادامی. قبل از افزودن مواد جایگزین در فاز دوم، درصد سیمان در مخلوط‌ها به ترتیب ۱۸، ۲۳ و ۲۸ درصد کاهش یافته و مقاومت فشاری نمونه‌ها ارزیابی شد. سپس برای جبران افت مقاومت و بهبود دوام، ۱۲/۵ درصد وزنی متاکائولین و ۰/۰۵ درصد حباب هوا به مخلوط‌ها اضافه شد. پس از ۳۵ روز عمل‌آوری، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی

در سن ۷ روزه، بالاترین مقاومت مربوط به نمونه GF40S60 با حدود ۳۲ مگاپاسکال بود که نشان‌دهنده تراکم بهتر و عملکرد سریع این ترکیب است. پس از آن، نمونه‌های GF50S50 و GG30S70 با مقاومت حدود ۳۰ مگاپاسکال قرار داشتند، در حالی که نمونه‌های GF70S30 و GF60S40 مقاومت متوسط ۲۷-۲۸ مگاپاسکال و کمترین مقاومت‌ها مربوط به GG70S30 و GG30S70 با حدود ۲۵-۲۶ مگاپاسکال بود.

در سن ۲۸ روزه، بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه GF60S40 با مقدار حدود ۴۲ مگاپاسکال بود که نشان‌دهنده دانه‌بندی مناسب و پرشدن کامل فضای خالی بین سنگدانه‌ها است. نمونه GG30S70 با مقاومت حدود ۳۸ مگاپاسکال در رتبه دوم قرار گرفت که حضور همزمان سنگدانه‌های نخودی و بادامی باعث بهبود قفل‌وبست و کاهش تخلخل شده است. سایر نمونه‌ها مانند GF70S30، GF50S50 و GF40S60 مقاومت متوسط ۳۰-۳۳ مگاپاسکال و کمترین مقاومت‌ها مربوط به GG70S30 و GF60S40 کمتر از ۳۰ مگاپاسکال بودند. مقایسه مقاومت‌های ۷ و ۲۸ روزه نشان داد که همه ترکیبات با گذشت زمان مقاومت بالاتری کسب کردند که دارای درصد

افزایش یافته است. بالاترین مقاومت در نمونه GF60S40 حاوی ۱۸٪ کاهش سیمان و با متاکائولین ثبت شد (۳۹/۴۶ مگاپاسکال).

در نمونه‌های با حتی ۲۸٪ کاهش سیمان به‌همراه متاکائولین، مقاومت هدف برابر ۳۰ مگاپاسکال تأمین شد. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که هدف از افزودن متاکائولین، عمدتاً افزایش دوام بتن در محیط آسیب‌رسان و کاهش نفوذپذیری می‌باشد و انتظار افزایش قابل‌توجه در افزایش مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز وجود ندارد و البته انتظار کاهش زیاد در مقاومت هم نباید اتفاق بیفتد.

مکعبی تحت تأثیر دانه‌بندی، درصد کاهش سیمان و افزودنی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری ۳۵ روز نمونه‌های مکعبی و معادل نمونه استوانه‌ای در جداول ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقدار مقاومت نمونه استوانه مطابق آئین‌نامه آبا معادل مقاومت نمونه مکعبی منهای ۵ مگاپاسکال است [۳۹]. نتایج نشان داد که با کاهش تا ۲۸٪ مقدار سیمان در بتن حاوی ۶۰٪ نخودی، مقاومت فشاری هدف تا حدود ۳۰ مگاپاسکال تأمین شد که تاثیرگذاری این سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد. با افزودن متاکائولین به هریک از این نوع طرح اختلاط‌ها، تا حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری

جدول ۶- مقاومت فشاری ۳۵ روز نمونه‌ها با ترکیب‌های بتنی با درصد بیشتر شدن و مواد افزودنی در فاز دوم (MPa)

نام نمونه	متوسط مکعبی	استوانه ای معادل
GF60 S40 C1	۴۰/۴۳	۳۵/۴
GF60 S40 C2	۳۶/۲	۳۱/۲
GF60 S40 C3	۳۳/۳۵	۲۸/۳۵
GF60 S40 C1M	۴۴/۴۶	۳۹/۴۶
GF60 S40 C2M	۴۲/۳	۳۷/۳۴
GF60 S40 C3M	۳۸/۰	۳۳/۰
GF60 S40 C1A	۳۴/۳۴	۲۹/۳۴
GF60 S40 C2A	۳۱/۵۴	۲۶/۵۴
GF60 S40 C3A	۲۹/۸	۲۴/۸

جدول ۷- مقاومت فشاری ۳۵ روز نمونه‌ها با ترکیب‌های بتنی با درصد بیشتر ماسه و مواد افزودنی در فاز دوم (MPa)

نام نمونه	متوسط مکعبی	استوانه ای معادل
GG30 S70 C1	۴۱/۸	۳۶/۸
GG30 S70 C2	۳۶/۷	۳۱/۷
GG30 S70 C3	۳۲/۰	۲۷/۰
GG30 S70 C1M	۴۲/۶	۳۷/۶
GG30 S70 C2M	۳۷/۷	۳۲/۷
GG30 S70 C3M	۳۳/۵۶	۲۸/۵
GG30 S70 C1A	۳۳/۳۴	۲۸/۳۴
GG30 S70 C2A	۳۰/۲۳	۲۵/۲۳
GG30 S70 C3A	۲۷/۸۳	۲۲/۸۳

آن ناشی از پرکردن خلل و فرج و تقویت واکنش‌های پوزولانی بود. نمونه‌های حاوی حباب هوا کمترین مقاومت را داشتند که مقاومت نمونه با ۱۸٪ کاهش سیمان به‌همراه حباب هوا (GF60 S40 C1A) مقاومت حدود ۳۰

بنابراین، افزودن متاکائولین باعث افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی شن بیشتر و افزایش جزئی کمتر از ۵٪ در نمونه‌های حاوی ماسه بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه بعد از ۲۸ روز شدند و اثر مثبت

انتخاب نوع سنگدانه، میزان سیمان و افزودنی‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به مقاومت و دوام بتن دارد و افزودن متاکائولین می‌تواند به‌طور مؤثری مقاومت فشاری را افزایش دهد، در حالی که حباب هوا باعث افت مقاومت می‌شود و باید با دقت مدیریت شود. بنابراین، استفاده از سنگدانه نخودی به‌تنهایی و حضور متاکائولین بهترین ترکیب برای دستیابی به مقاومت بالا در فاز دوم است، کاهش سیمان افت مقاومت را ایجاد می‌کند، اما متاکائولین اثر جبرانی دارد و حباب هوا کاهش مقاومت را تشدید می‌کند، به ویژه در طرح‌هایی با کاهش سیمان بیشتر.

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی پس از ۹۵ روز عمل‌آوری در جدول ۸ نشان داده شده‌اند. گرچه افزایش قابل‌توجه در مقاومت فشاری بعد از ۲۸ روز وجود نداشت ولی با افزودن متاکائولین، مقاومت ۹۰ روزه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت و افزودن متاکائولین باعث افزایش تا ۴۳ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی شن بیشتر و افزایش ۲۲٪ در نمونه‌های حاوی ماسه بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه شدند.

نتایج نشان داد که همه نمونه‌های مینا با سنگدانه نخودی (GF60S40)، با کاهش ۱۸ و ۲۳ و ۲۸٪ توانستند مقاومت هدف ۳۰ مگاپاسکال را تأمین کنند اگرچه نمونه با ۱۸٪ کاهش سیمان، افزایش حدود ۳۰٪ مقاومت نسبت به مقاومت لازم نشان داده است. افزودن متاکائولین به مخلوط‌ها موجب افزایش قابل‌توجه مقاومت شد؛ نمونه‌های C1M تا C3M به ترتیب ۴۶/۶، ۴۵/۶ و ۴۲/۴ مگاپاسکال مقاومت نشان دادند که بیشترین افزایش مربوط به C1M با ۱۷٪ نسبت به C1 و C2M با ۴۳٪ افزایش نسبت به کاهش سیمان ۱۸٪ است. در مقابل، نمونه‌های حاوی حباب هوا (C1A-C3A) کمترین مقاومت را داشتند و مقاومت آنها از ۳۲/۶ در C1A به ۲۹/۴ و ۲۷/۹ مگاپاسکال در C2A و C3A کاهش یافت. در بتن‌های با سنگدانه نخودی-بادامی (GG30S70)، نمونه‌های پایه C1 تا C3 نیز با کاهش سیمان مقاومت کمتری نشان دادند؛ مقاومت‌ها به

مگاپاسکال داشت گرچه افت ۱۰٪ نسبت به نمونه مرجع را داشت. با کاهش بیشتر درصد سیمان به ۲۳ و ۲۸٪، افت مقاومت فشاری هم تا ۲۰٪ اتفاق افتاد. نتایج نشان داد که در بتن حاوی ۷۰٪ ماسه و ۳۰٪ شن نخودی-بادامی، با کاهش ۱۸، ۲۳ و ۲۸٪ مقدار سیمان، مقاومت فشاری به ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۱۸ درصد کاهش یافته است که تا کاهش ۲۳٪ سیمان، مقاومت لازم تأمین گردید ولی کاهش ۲۸٪ اثر منفی در افت مقاومت فشاری لازم داشت. با افزودن متاکائولین به هریک از این نوع طرح اختلاط‌ها، تا حدود ۳٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه مشابه با سیمان یکسان ولی بدون متاکائولین افزایش یافته است. بالاترین مقاومت در نمونه GG30S70 حاوی ۱۸٪ کاهش سیمان و با متاکائولین ثبت شد (۳۷/۶۲ مگاپاسکال). در نمونه‌های تا ۲۳٪ کاهش سیمان به‌همراه متاکائولین، مقاومت هدف برابر ۳۰ مگاپاسکال تأمین شد. نمونه‌های حاوی حباب هوا کمترین مقاومت را داشتند که مقاومت نمونه با ۱۸٪ کاهش سیمان به‌همراه حباب هوا (GF60S40 C1A) مقاومت تقریباً ۳۰ مگاپاسکال داشت و با کاهش درصد سیمان، افت تا ۲۰٪ در مقاومت فشاری اتفاق افتاد.

مقایسه بین نتایج و اثر دانه‌بندی‌ها نشان داد که بتن حاوی تنها شن نخودی مقاومت بالاتری نسبت به بتن حاوی شن مخلوط نخودی-بادامی داشت، در نمونه‌های دارای ۱۸٪ کاهش سیمان حاوی متاکائولین. اختلاف ۱۶ درصد در مقاومت فشاری مشاهده شد، در حالی که در نمونه‌های با کاهش ۲۳ درصد سیمان، اختلاف کاهش به ۷٪ رسید و در نمونه‌های با کاهش ۲۸٪ سیمان، بیشترین کاهش ۱۹٪ مشاهده شد. در کل، متاکائولین باعث بهبود مقاومت فشاری، تراکم ریزساختار، کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن شد. اثر آن با توزیع متراکم‌تر سنگدانه‌ها بیشتر بود. کاهش سیمان بدون افزودنی موجب افت مقاومت شد، اما حضور متاکائولین این افت را جبران کرد. حباب هوا باعث کاهش مقاومت فشاری شد و شدت اثر آن با افزایش درصد کاهش سیمان بیشتر بود. این نتایج نشان می‌دهد که

ترتیب ۳۷/۷، ۳۲/۹ و ۲۸/۶ مگاپاسکال بودند که کاهش حدود ۱۱ تا ۲۱ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۸- مقاومت فشاری ۹۵ روز نمونه‌ها با ترکیب‌های بتنی با درصد بیشتر ماسه و مواد افزودنی فاز دوم (MPa)

نام نمونه	متوسط مکعبی	استوانه ای معادل	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع
GF60 S40 C1	۴۴/۷۴	۳۹/۷۴	-
GF60 S40 C2	۳۶/۶	۳۱/۶	-
GF60 S40 C3	۳۴/۸	۲۹/۸	-
GF60 S40 C1M	۵۱/۶	۴۶/۶	۱۸
GF60 S40 C2M	۵۰/۶	۴۵/۶	۴۴
GF60 S40 C3M	۴۷/۴	۴۲/۴	۴۲
GF60 S40 C1A	۳۷/۴	۳۲/۴	-۱۹
GF60 S40 C2A	۳۴/۴	۲۹/۴	-۷
GF60 S40 C3A	۳۲/۹	۲۷/۹	-۷
GG30 S70 C1	۴۲/۷	۳۷/۷	-
GG30 S70 C2	۳۷/۹	۳۲/۹	-
GG30 S70 C3	۳۳/۶	۲۸/۶	-
GG30 S70 C1M	۴۶/۸	۴۱/۸	۱۰
GG30 S70 C2M	۴۲/۸	۳۷/۸	۱۵
GG30 S70 C3M	۳۹/۹	۳۴/۹	۲۲
GG30 S70 C1A	۳۵/۹	۳۰/۴	-۱۹
GG30 S70 C2A	۳۲/۸	۲۷/۸	-۱۵
GG30 S70 C3A	۳۰/۲	۲۵/۲	-۱۲

استفاده از متاکائولین موجب افزایش مقاومت شد؛ نمونه‌های C1M تا C3M به ترتیب مقاومت ۴۱/۸، ۳۷/۸ و ۳۴/۹ مگاپاسکال داشتند که افزایش آن نسبت به نمونه‌های پایه به ترتیب ۹/۷، ۱۳ و ۱۹ درصد بود و همگی مقاومت هدف ۳۰ مگاپاسکال را تأمین کردند. نمونه‌های حاوی حباب هوا در این گروه ضعیف‌ترین عملکرد را داشتند و مقاومت آنها از ۳۰/۳ تا ۲۵/۲ مگاپاسکال گزارش شد. مقایسه کلی نشان می‌دهد که بتن‌های نخودی در تمام شرایط مقاومت بالاتری نسبت به ترکیب نخودی- بادامی دارند و متاکائولین بیشترین اثر مثبت را در افزایش مقاومت فشاری داشته است، به‌ویژه در نمونه‌هایی با توزیع متراکم‌تر سنگدانه مانند GF60 S40 حضور حباب هوا مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد، به طوری که در نمونه‌های C1A افت تقریباً ۱۶-۱۷٪ مشاهده شد، هرچند این افزودنی برای

افزایش دوام مفید است. بهترین عملکرد در بین تمامی نمونه‌ها مربوط به GF60 S40 C1M با مقاومت ۴۶/۶ مگاپاسکال و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به GG30 S70 C3A با مقاومت ۲۵/۲ مگاپاسکال بود. در نتیجه، متاکائولین اثر مثبت پایدار داشته و کاهش سیمان را جبران می‌کند، در حالی که دانه‌بندی نخودی و تراکم بالای ذرات کارایی این ماده پوزولانی را افزایش می‌دهد و حباب هوا، اگرچه مقاومت را کاهش می‌دهد، برای دوام بتن در شرایط محیطی خاص مفید است.

۴-۳- بررسی نتایج آزمایش مقاومت فشاری ترکیب‌های بتنی تحت ۳۰۰ سیکل ذوب و یخبندان

مطالعه و نتایج مقاومت فشاری بتن پس از ۳۰۰ سیکل ذوب و یخبندان در فاز سوم در جدول ۹ نشان داده

شده‌اند و با نتایج نمونه‌هایی که در معرض سیکل‌های یخ زدن و آب شدن قرار نگرفتند مقایسه شدند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ترکیب سنگدانه، کاهش درصد سیمان و استفاده از افزودنی‌ها بر دوام و عملکرد مکانیکی بتن است. در بتن با ۶۰٪ سنگدانه نخودی، نمونه‌های پایه بدون افزودنی با کاهش سیمان، افت بیشتری در مقاومت فشاری نشان داشتند به طوری که مقاومت نمونه با ۱۸ و ۲۳ و ۲۸٪ به ترتیب ۱۰، ۲۱ و ۲۳/۵ درصد افت مقاومت مشاهده شد. این افت مقاومت در نمونه‌ها با ۶۰٪ ماسه، بین ۲۳ تا ۲۵ درصد بود. افزودن متاکائولین بهترین تأثیر بر

افزایش دوام نمونه‌ها با شن نخودی تنها داشتند که افت متوسط حدود ۱۰٪ نشان دادند. در حالی که نمونه‌های مرجع افت متوسط ۱۸/۵٪ تجربه کردند ولی تأثیر متاکائولین در نمونه‌های حاوی نخودی و بادامی، کمتر بوده است. اگرچه نمونه‌های حاوی متاکائولین هم افت ۱۰ درصد متناسب با درصد کاهش سیمان داشتند ولی حتی در ۲۸٪ کاهش سیمان هم مقاومت لازم ۳۰ مگاپاسکال بعد ۳۰۰ سیکل تأمین شده است. بنابراین متاکائولین قادر است افت مقاومت ناشی از کاهش سیمان را جبران کرده و دوام بتن در شرایط یخبندان را بهبود بخشد.

جدول ۹- مقاومت فشاری نمونه‌ها تحت ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان فاز سوم (MPa)

نام نمونه	استوانه ای معادل اولیه	متوسط مکعبی	استوانه ای معادل بعد از ۳۰۰ سیکل	درصد کاهش (%)
GF60 S40 C1	۳۵/۴	۳۷/۳	۳۲/۳	۹/۹
GF60 S40 C2	۳۱/۲	۳۰/۷	۲۵/۷	۲۱/۵
GF60 S40 C3	۲۸/۴	۲۸	۲۳	۲۳/۵
GF60 S40 C1M	۳۹/۵	۳۹/۳	۳۴/۳	۱۴/۹
GF60 S40 C2M	۳۷/۴	۴۰/۶	۳۶/۶	۲/۱
GF60 S40 C3M	۳۳	۳۴/۳	۲۹/۳	۱۲/۶
GF60 S40 C1A	۲۹/۴	۳۶/۳	۳۱/۳	-۶/۲
GF60 S40 C2A	۲۶/۵	۳۰/۳	۲۵/۳	۴/۸
GF60 S40 C3A	۲۴/۸	۲۷/۸	۲۲/۸	۹
GG30 S70 C1	۳۶/۸	۳۴/۹	۲۹/۹	۲۳
GG30 S70 C2	۳۱/۷	۳۰/۵	۲۵/۵	۲۴/۲
GG30 S70 C3	۲۷	۲۶/۵	۲۱/۵	۲۵/۵
GG30 S70 C1M	۳۷/۶	۳۵/۳	۳۰/۳	۲۴/۲
GG30 S70 C2M	۳۲/۷	۳۴/۳	۲۹/۳	۱۱/۶
GG30 S70 C3M	۲۸/۶	۲۹/۹	۲۴/۹	۱۴/۷
GG30 S70 C1A	۲۸/۴	۳۴/۲	۲۹/۲	-۲/۸
GG30 S70 C2A	۲۵/۲	۳۰/۲	۲۵/۲	۰/۳
GG30 S70 C3A	۲۲/۸	۲۵/۸	۲۰/۸	۹/۷

اگرچه نمونه‌های حاوی ۵ درصد حباب هوا دارای مقاومت پایین‌تری در شرایط نرمال نسبت به دیگر نمونه‌ها بودند ولی افت مقاومت بعد از سیکل‌های یخ زدن و آب شدن در همه نمونه‌ها با دانه‌بندی متفاوت با ۱۸٪ کاهش سیمان، کمتر از ۵ درصد بود که اثرپذیری بسیار بالای این

ماده در برابر سیکل‌های یخ زدن و آب شدن را نشان می‌دهد. با افزایش کاهش سیمان، درصد افت مقاومت بعد از ۳۰۰ سیکل تا ۲۰ درصد افزایش یافت. بنابراین حباب‌های هوا موجب افزایش دوام و کاهش شدت تخریب

در سیکل‌های یخ‌زدگی- ذوب می‌شوند و اثرپذیری در نمونه با ۱۸٪ کاهش سیمان، بهترین عملکرد را دارا است. نتایج نشان داد که متاکائولین مؤثرترین عامل در افزایش مقاومت فشاری و دوام بتن تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان به‌طور همزمان بود، به ویژه در نمونه‌های با کاهش متوسط سیمان که بیشترین مقاومت مشاهده شد. حباب هوا مقاومت فشاری را کاهش داد ولی باعث کاهش شدت تخریب و بهبود دوام بتن در سیکل‌های یخ‌زدگی شد بتن‌های نخودی مقاومت بیشتری نسبت به بتن‌های نخودی- بادامی داشتند که به دلیل تراکم بالاتر و پیوستگی بهتر سنگدانه‌ها است. کاهش شدید سیمان حتی با حضور افزودنی‌ها نمی‌تواند افت مقاومت را کاملاً جبران کند، بنابراین انتخاب ترکیب مناسب سیمان و افزودنی ضروری است. به‌طور کلی، ترکیب GF60 S40 C2M با کاهش متوسط سیمان و افزودن متاکائولین بهترین عملکرد در دوام در فاز سوم را نشان داد و ترکیب GF60 S40 C1A با حباب هوا و بدون کاهش شدید سیمان بیشترین دوام در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان در فاز سوم داشت. این نتایج تأکید می‌کند که متاکائولین می‌تواند هم در بهبود مقاومت و هم در صرفه‌جویی سیمان نقش مؤثری ایفا کند، در حالی که حباب هوا دوام را در شرایط یخبندان افزایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر دانه‌بندی سنگدانه‌ها، افزودنی متاکائولین و حباب هوا بر مقاومت و دوام بتن در سه فاز جداگانه بررسی گردید. آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۳۵ و ۹۵ روز انجام و رشد مقاومت اولیه و نهایی نمونه‌ها در فاز اول و دوم مشخص شد. همچنین، نمونه‌ها تحت ۳۰۰ سیکل ذوب و یخبندان در فاز سوم قرار گرفتند تا دوام بتن در شرایط سردسیر ارزیابی شود. نتایج زیر براساس آزمایشات انجام شده به‌دست آمدند:

(الف) بررسی نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین ۲۸ و ۹۵ روز و همچنین پس از ۳۰۰ سیکل ذوب و

یخبندان نشان داد که نوع سنگدانه، نسبت شن به ماسه، کاهش سیمان و استفاده از افزودنی‌ها تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر عملکرد مکانیکی و دوام بتن دارند. در میان انواع سنگدانه‌ها، بتن با سنگدانه نخودی تنها و نسبت ۶۰ به ۴۰ (GF60S40) همواره مقاومت بیشتری نسبت به بتن ترکیبی نخودی- بادامی و نسبت ۷۰ به ۳۰ (GG30S70) در فازهای دوم و سوم نشان داد. علت این برتری، تراکم بالاتر دانه‌بندی و کاهش فضای خالی میان سنگدانه‌ها است که موجب بهبود چسبندگی خمیر سیمان به سنگدانه، افزایش تراکم داخلی و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود.

(ب) استفاده از ۱۲/۵ درصد متاکائولین به عنوان جایگزین بخشی از سیمان موجب افزایش ۱۰ تا ۱۵ درصدی در مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی شن بیشتر و افزایش جزئی کمتر از ۵٪ در نمونه‌های حاوی ماسه بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه بعد از ۲۸ روز شدند ولی مقاومت ۹۰ روز تا ۴۳ درصد در نمونه‌های حاوی شن بیشتر و ۲۲٪ در نمونه‌های حاوی ماسه بیشتر نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافت.

(پ) در ترکیب GF60S40، نمونه حاوی متاکائولین، مقاومت نسبت به نمونه شاهد حدود ۱۲ درصد افزایش نشان داد، در حالی که در ترکیب GG30S70، افزایش مقاومت تنها حدود ۴ درصد بود. همچنین افزودن متاکائولین توانست اثر منفی کاهش سیمان را جبران کند که با کاهش ۲۳ درصد سیمان، افزایش مقاومت در GF60S40 حدود ۳۸ درصد و در GG30S70 بین ۹ تا ۱۹ درصد مشاهده شد.

(ت) گرچه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی حباب هوا با ۱۸، ۲۳ و ۲۸٪ کاهش سیمان در نمونه GF60 S40 C1A به میزان ۱۰ تا ۲۰٪ کاهش یافت و در نمونه‌های حاوی ۷۰٪ ماسه و ۳۰٪ شن نخودی-

دقیق ترکیب بتن با توجه به دانه‌بندی سنگدانه‌ها، افزودنی‌های معدنی و کنترل حجم حباب هوا می‌تواند مقاومت فشاری و دوام بتن را در شرایط محیطی سخت به حداکثر برساند و راهنمایی علمی برای تولید بتن مقاوم و پایدار در مناطق سردسیر فراهم کند.

(چ) بهره‌برداری از منابع سنگدانه و ماسه با کیفیت و دسترسی مناسب، علاوه بر جنبه‌های فنی، اثرات اقتصادی و توسعه پایدار منطقه‌ای را نیز تأمین می‌کند.

قدردانی: از مدیر محترم و پرسنل محترم موسسه معادن همیار تولید (سازمان همیاری شهرداری‌های استان سمنان) بابت حمایت و همکاری در انجام آزمایشات این تحقیق قدردانی می‌گردد.

بادامی، به ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۱۸ درصد کاهش یافتند، ولی کمترین افت مقاومت در آزمایش دوام، کمتر از ۵٪، از خود نشان دادند.

(ث) نتایج پس از ۳۰۰ سیکل ذوب و یخبندان نشان داد که کاهش سیمان به تنهایی موجب افت مقاومت و افزایش آسیب‌پذیری بتن می‌شود. با این حال، افزودن متاکائولین توانست این کاهش را جبران کرده و مقاومت بتن را در شرایط سخت محیطی حفظ کند. به‌طور کلی، ترکیب کاهش سیمان، متاکائولین و حباب هوا تعادلی میان مقاومت و دوام ایجاد کرده و برای بتن در مناطق سردسیر بهینه است.

(ج) کاهش سیمان تا حدود ۲۳ درصد با افزودن ۱۲/۵ درصد متاکائولین امکان‌پذیر است، به طوری که مقاومت فشاری و دوام بتن حفظ می‌شود. طراحی

References

- [1] Ahmad S, Al-Amoudi OS, Khan SM, Maslehuddin M. Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2022 Dec 1; 17: e01255. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01255
- [2] Antoni M, Rossen J, Martirena F, Scrivener K. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*. 2012; 95: 36-45. doi: 10.1016/j.cemconres.2012.09.006
- [3] Mermerdaş K, Gesoğlu M, Güneyisi E, Özturan T. Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. *Construction and Building Materials*. 2012 Dec 1; 37: 766-774. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.077
- [4] Jagan S, Kiruthiga N, Ramya R, Hariharan SS, Jagadeesh S. Investigation of metakaolin utilization as a supplement to cement in sustainable high-performance concrete production. *Journal of Environmental Nanotechnology*. 2025 Mar 30; 14(1): 433-443. doi: 10.13074/jent.2025.03.2441152
- [5] Siddique R, Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*. 2009 Mar 1; 43(3-4): 392-400. doi: 10.1016/j.clay.2008.11.007
- [6] Monteiro P. Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill Publishing; 2006.
- [7] Rashad AM. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview. *Construction and building materials*. 2013 Apr 1; 41: 303-318. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001
- [8] Alharbi YR, Abadel AA, Mayhoub OA, Kohail M. Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*. 2021 Feb 1; 269: 121344. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121344
- [9] Sabir BB, Wild S, Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and concrete composites*. 2001 Dec 1; 23(6): 441-454. doi: 10.1016/S0958-9465(00)00092-5
- [10] Homayoonmehr R, Ramezaniapour AA, Mirdarsoltany M. Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. *Journal of Building Engineering*. 2021 Dec 1; 44: 103011. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103011
- [11] El Inaty F, Nasreddine H, Djerbi A, Gautron L, Marchetti M, Quiertant M, Metalssi OO. Mechanical and durability performance of metakaolin and fly ash-based geopolymers compared to cement systems. *Results Eng*. 2025; 27: 105788. doi: 10.1016/j.rineng.2025.105788

- [12] Mohamed AM, Tayeh BA. Metakaolin in ultra-high-performance concrete: a critical review of its effectiveness as a green and sustainable admixture, *Case Stud. Constr. Mater.* 2024; 21: e03967. **doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03967**
- [13] Zhang J, Guo Zh, Zhang G, Zhang T, Song X. The effect of metakaolin on the properties of MSWI fly ash-slag binder: Compressive strength and chloride ion immobilization, *J. Environ. Manage.* 2026; 403: 129267.
- [14] Siddique R, Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, *Appl. Clay Sci.* 2009; 43: 392-400. **doi: 10.1016/j.clay.2008.11.007**
- [15] Rong Z, Jiang G, Sun W. Effects of metakaolin on mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cement-based composites. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials.* 2018; 7(5): 296-310. **doi: 10.1080/21650373.2018.1496860**
- [16] Al-Hashem MN, Amin MN, Ajwad A, Afzal M, Khan K, Faraz MI, Qadir MG, Khan H. Mechanical and Durability Evaluation of Metakaolin as Cement Replacement Material in Concrete. *Materials.* 2022; 15: 7868. **doi: 10.3390/ma15227868**
- [17] Neville AM. *Properties of Concrete.* 5th Edition. Pearson Education. 2016; ISBN: 8177585878, 9788177585872.
- [18] Powers TC. Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Concrete Institute.* 1968; 41(1): 1-6. **doi: 10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x**
- [19] Mindess S, Young F, Darwin D. *Concrete* 2nd editio. Technical Documents. 2003 Jan 1; 585.
- [20] Parastegari N, Mostofinejad D. Influence of bacteria on performance of air entrained concrete. *Amirkabir Journal Civil Engineering.* 2019 Feb 20; 50(6): 1103-1112. **doi: 10.22060/ceej.2018.12371.5188** [In Persian]
- [21] Abbasi Dezfooli A. Experimental investigation into the metakaolin used in concrete. *Journal of Civil Engineering and Materials Application.* 2021 Jun 1; 5(2): 67-80. **doi: 10.22034/jcema.2020.253922.1041** [In Persian]
- [22] Afshar M, Ghanbari A. Comparison of Compressive and Tensile Strength of High-Strength Self-Compacting Concrete with High-Strength Normal Concrete. 2nd International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development Management in Iran, Tehran. 2019. [In Persian]
- [23] Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.* 3rd ed. McGraw-Hill. 2006; ISBN: 0-07-158919-8.
- [24] Badogiannis E, Tsivilis S, Papadakis V. The effect of metakaolin on concrete properties, *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction.* 2002; 81-89.
- [25] Du L, Folliard KJ. Mechanisms of air entrainment in concrete, *Cem. Concr. Res.* 2005; 35: 1463-1471. **doi: 10.1016/j.cemconres.2004.07.026**
- [26] Kamel A, Lezgi M, Tayebinia M. Investigation of the Effect of Air-Entraining Admixture on the Permeability and Durability of Concrete Materials Made of Portland Cement Type 1-525. *Journal of Concrete Research.* 2023; 16(3): 93-104. **doi: 10.22124/jcr.2023.23698.1609** [In Persian]
- [27] Malhotra VM, Zhang MH, Read PH, et al. Long-term mechanical properties and durability characteristics of high-strength high-performance concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions. *ACI Mater J.* 2000; 97(5): 518-525.
- [28] Hemmati MD. Evaluation of Mechanical Properties, Impact Resistance, and Freeze–Thaw Durability of Concrete Containing Metakaolin and Polypropylene Fibers Made with Municipal Wastewater. Master of Science Thesis, Semnan University, Semnan. 2025. [In Persian]
- [29] Shariatipour, S, Sharbatdar, MK. Improving the durability under freeze-thaw cycles and compressive strength of self-compacting concretes by replacing cement with metakaolin. 15th National Concrete Conference, Tehran, Iran, 2023. [In Persian]
- [30] Soltani H. Investigation of the Effect of Nano-Bubbles on Cellular Lightweight Concrete (Foam Concrete). Master's Thesis, Shahrood University of Technology, 2017. [In Persian]
- [31] Ghoddousi P, Adelzade Saadabadi L. The effect of the pores physical microstructure on water transport and compressive strength in self-compacting concretes containing silica fume and metakaolin. *Concrete Research.* 2021 Mar 21; 14(1): 5-19. **doi: 10.22124/jcr.2021.17493.1453**
- [32] Mohamed AM, Tayeh BA. Metakaolin in ultra-high-performance concrete: A critical review of its effectiveness as a green and sustainable admixture. *Case Studies in Construction Materials.* 2024 Dec 1; 21: e03967. **doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03967**
- [33] Zhong C, Zhang L, Mao W, Xing S, Chen J, Zhou J. An investigation on mechanical properties and durability of metakaolin reinforced modified recycled concrete. *Case Studies in Construction Materials.* 2024 Jul 1; 20: e02978. **doi: 10.1016/j.cscm.2024.e02978**
- [34] ASTM C494/C494M-19. *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.* ASTM International. 2019.