Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

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

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Investigation of Carbonate Aggregates and the Use of Petrography in Predicting Alkali-Aggregate Reaction (AAR)

Habib Rahimi menbar[1], Mohammad Fathollahy✉ [2]

1. Phd. student, Department of Engineering geology, Faculty of science, Tarbiat modares University, Tehran, Iran. E-mail: rahimi1370@yahoo.com
2. Assistant professor, Department of earth science, faculty of science, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran. E-mail: m.fathollahy@uok.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 15 November 2024
Received in revised form 27 November 2024
Accepted 28 December 2024

Keywords:
Carbonate aggregate including silica, Aggregate Alkali Reactivity (AAR), Petrography according to ASTM C 295.

ABSTRACT

In order to produce strong and durable concrete, it is essential to accurately assess the alkali reactivity potential of aggregates. Alkali reactions occur gradually over time and are therefore often overlooked in the early stages of a project.. This research investigates the alkali-aggregate reaction (AAR) potential of concrete aggregates. Petrographic analysis of aggregates, based on ASTM C295, is a simple and rapid method for identifyingminerals that may react with the alkalis in cement. In this study, susceptible aggregates were identified through petrography, and then the accuracy of the results and the importance of petrographic analysis were verified using laboratory methods (ASTM C586 and ASTM C1260) to select suitable materials with minimal cost and time before designing the concrete mix. The results indicate that carbonate aggregates may contain silica and have alkali reactivity potential, necessitating the use of ASR testing methods as well. In addition, the results demonstrate that petrographic analysis is an effective and valuable method for identifying minerals with alkali reactivity potential.

Introduction

Alkali Aggregate Reaction (AAR) is a chemical reaction between the active mineral components of some aggregates and the alkalis of cement, sodium oxide (Na2O) and potassium oxide (K2O). This reaction can cause concrete degradation and affect the performance of concrete structures. Although there are some standards for evaluating concrete aggregates based on their petrography are available, it is difficult to distinguish between the degradation potential and harmlessness of different types of aggregates (Fernandes et al., 2013). During the hardening process of concrete, some reactions, such as hydration, are beneficial, but others, such as abnormal internal expansion, which causes cracking and loss of strength, cause serious problems for concrete. This reaction occurs in two modes: the alkali-carbonate reaction (ACR) and the alkali-silicate reaction (ASR). Alkali silicate reaction is of greater concern than carbonate reaction because silicate-containing mineral aggregates are more common (Farny and Kosmatka, 1997). Signs of damage due to alkali reaction can manifest as a network of cracks, tight knots, delamination, and displacement of various parts of the structure. Damage due to alkali reaction of aggregates is a slow process. One of the methods to detect the presence of this reaction in aggregates is petrography, which predicts the probability of the presence or absence of the reaction is predicted (Fernandes et al., 2013).

In this study, the mineralogy of aggregates has been investigated by focusing on petrography of aggregates and geological description of thin sections. The petrographic studies have been specifically focused on carbonate aggregates and

Cite this article: Rahimi menbar, H., Fathollahy, M. (2024). Investigation of Carbonate Aggregates and the Use of Petrography in Predicting Alkali-Aggregate Reaction (AAR). Journal of Engineering Geology, 18 (4), 609-625. https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1015263

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1015263

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

their potential for reaction in concrete construction has been studied. Then, using supplementary tests such as the rock cylinder method (ASTM C586) and accelerated prism mortar (ASTM C1260), the reliability of petrography in the potential for reactivity was evaluated.

Materials and Methods

Aggregates are the most important natural materials used in concrete construction. These materials are often selected from natural deposits such as sand, gravel, or crushed stone, which constitute a large volume of concrete (Qemallaj and Golgota, 2015). One of the methods used to describe and classify materials is petrography, which is a method of identifying minerals and other compounds, usually performed on hand samples and thin sections.

In this study, eleven carbonate rock samples (limestone and dolomite) were prepared as parent rock from the quarry and crushed by a laboratory crusher and then screened to various sizes using laboratory sieves. Also, all materials were thoroughly washed before use and were in the S.S.D (saturated state with dry surface) condition. After being crushed by the device, the samples were separated by sieves of different sizes and then the percentage remaining on each sieve was examined by descriptive petrography. Thin microscopic sections were prepared and studied from each type of rock remaining on the sieves. As can be seen from the XRF analysis results of the samples (Table 1), the silica content of most of the samples is less than 5%, except for one sample which has a high silica content of about 21.1%, which may indicate the presence of active silica in aggregates (such as opal, chalcedony, tridymite, cristobalite, and volcanic glasses) (ASTM C295-08). These reactive materials may be present in rocks such as chert, argillite, phyllite, greywacke, schist, gneiss, mylonite, vein quartz, quartzite, sandstone, rhyolite, rhyolite tuffs, dacite, andesite, and other rocks (Gifford and Gillott, 1996).

Table 1. The amount of oxides of the main elements of the studied aggregates, measured by XRF.

XRF	Oxides	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	So_3	K_2O	CaO	V_2O_5	Fe_2O_3	LOI	Total
B1	%	0.076	8.3	0.42	1.7	0.061	0.3	0.2	45.01	0.008	0.33	43.4	99.805
B2	%	0.093	5.2	0.54	2.6	0.099	0.25	0.26	47.8	0.008	0.37	42.59	99.81
B3	%	0.063	3.9	0.36	1.4	0.055	0.24	0.19	50.2	0.007	0.42	43.01	99.845
B4	%	0.087	5.8	0.4	1.5	0.086	0.26	0.22	48.01	0.008	0.36	43.13	99.861
B5	%	0.1	5.9	2.3	21.1	0.33	0.33	0.42	32.2	0.02	2.08	34.19	98.97
RS1	%	0.07	0.76	0.8	3.7	0.09	0.023	0.33	53.1	0.008	0.83	39.9	99.611
RS2	%	0.053	0.85	0.75	4.5	0.087	0.026	0.3	52.1	0.006	0.78	40.1	99.552
RS3	%	0.056	0.75	0.45	2.7	0.063	0.061	0.19	52.9	N	0.64	40.36	98.17
RS4	%	0.055	1.23	0.3	3.1	0.41	0.071	0.19	53.01	0.012	1.06	40.37	99.808
RS5	%	0.087	1.13	0.4	4.6	0.58	0.054	0.2	53.7	0.011	0.95	36.84	98.552
RS6	%	0.23	1.41	2.04	21.1	0.1	0.017	0.59	37.5	0.008	2.09	34.3	99.385

Results and Discussion

The presence of at least 0.5% of aggregates containing active silica can cause ASR and concrete destruction. According to microscopic and petrological observations of carbonate mineral samples, the amount of active silica in the mixture of each sample has been estimated, and the amount of active silica in the samples is such that this reaction seems likely to occur. The general characteristics of rocks that are susceptible to alkali-carbonate reactivity (ACR) are: fine-grained dolomites, a significant amount of fine-grained calcite, insoluble materials such as clay and silica, homogeneous dispersion of dolomite and calcite within the clay matrix. According to microscopic observations of the mineral samples and considering the significant amount of fine-grained calcite in the texture of all samples and the presence of a very small amount of fine-grained dolomite in each sample, there is a possibility of alkali-carbonate reaction in all samples.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

Conclusions

According to petrographic observations using the ASTM C295 standard method, it is concluded that the aggregates of the borrowed resources does not have the potential to cause alkali-carbonate reaction. And the ASTM C586 and ASTM C1260 tests confirm the petrographic results. Also, alkali-silica reaction is possible due to the presence of microcrystalline chert in some rock groups, which do not have much effect due to their small percentage in the total materials. The results show that calcareous aggregates can contain amounts of silica, so it is necessary to simultaneously control the alkali-silicate reactivity potential when examining the alkali-carbonate reactivity potential. Considering the descriptive nature of the petrographic results and the errors in the experiments, it is generally recommended to use low-alkaline cement in aggregates with siliceous reactivity (equivalent alkalinity in terms of (Na2O+ 0.658* K2O) Na2O less than 0.6%) and in aggregates with carbonate reactivity (alkalinity of materials in cement in terms of Na2O should not exceed 0.4%).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

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

بررسی سنگدانه‌های کربناته و استفاده از پتروگرافی در پیش‌بینی واکنش قلیایی(AAR)

حبیب رحیمی‌منبر[1]، محمد فتح‌اللهی[2] ✉

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: rahimi1370@yahoo.com
۲. دکتری زمین‌شناسی‌مهندسی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: m.fathollahy@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸

کلیدواژه‌ها:
سنگدانه کربناته حاوی سیلیس ، واکنش‌زایی قلیایی(AAR)، پتروگرافی بر اساس استاندارد ASTM C 295.

چکیده

برای ساختن بتن مقاوم، ارزیابی دقیق پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی سنگدانه‌ها ضروری است. واکنش‌های قلیایی، به تدریج و بعد از گذشت زمان اتفاق می‌افتد به همین دلیل اکثراً در اوایل کار مورد توجه قرار نمی‌گیرد. در این تحقیق با تمرکز بر مطالعه مقاطع نازک و مطالعه پتروگرافی سنگدانه‌ها به بررسی و پتانسیل واکنش‌های قلیایی (AAR) سنگدانه‌های بتن پرداخته شد. پتروگرافی سنگدانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C295، یکی از روش‌های ساده و سریع است که برای شناسایی کانی‌هایی که ممکن است با قلیایی موجود در سیمان واکنش دهد، استفاده می‌شود. در این مورد مطالعاتی شناسایی سنگدانه‌های مستعد با پتروگرافی انجام و سپس با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی ASTM C586 و ASTM C1260 صحت نتایج و اهمیت انجام پتروگرافی به منظور انتخاب مصالح مناسب با صرف هزینه‌های اندک در مدت زمان کوتاه قبل از اجرای طرح اختلاط بتن بهره گرفته شد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که سنگدانه‌های کربناته می‌تواند حاوی سیلیس بوده و پتانسیل واکنش قلیایی داشته باشد بنابراین لازم است از روش‌های آزمایش ASR هم کمک گرفته شود. همچنین نتایج نشان داد که تشخیص پتروگرافی، روشی مناسب و کمک‌کننده برای تشخیص کانی‌های دارای پتانسیل واکنش قلیایی می‌باشد.

مقدمه

واکنش قلیایی سنگدانه‌ها (AAR) یک واکنش شیمیایی بین اجزاء معدنی فعال برخی از سنگدانه‌ها و قلیلیایی سیمان، اکسید سدیم (Na_2O) و اکسید پتاسیم (K_2O) می‌باشد. این واکنش می‌تواند موجب تخریب بتن شده و بر عملکرد سازه بتنی تأثیر بگذارد. اگرچه برخی استانداردهای ارزیابی سنگدانه‌های بتنی به واسطه پتروگرافی آن‌ها در دسترس است اما تمایز بین پتانسیل تخریب یا بی‌ضرر بودن انواع سنگ‌ها مشکل است (Fernandes et al., 2013). در فرایند سخت‌شدگی بتن، برخی واکنش‌ها مانند هیدراسیون سودمند هستند اما برخی دیگر مانند انبساط غیرعادی درونی که باعث ترک خوردگی و کاهش مقاومت می‌شود، باعث مشکلات جدی برای بتن می‌گردد. این واکنش در دو حالت اتفاق می‌افتد: واکنش قلیایی کربناته، Alkali-Carbonate Reaction (ACR) و واکنش قلیایی سیلیکاته، Alkali-Silica Reaction (ASR) . واکنش قلیایی سیلیکاته بیش از واکنش کربناته نگران کننده است زیرا سنگدانه‌های معدنی حاوی سیلیکات متداول‌تر هستند (Farny and Kosmatka, 1997). نشانه‌های وقوع آسیب در اثر واکنش قلیایی می‌تواند به صورت شبکه‌ای از ترک‌ها، گره‌های نزدیک، ورقه‌ای شدن و جابجایی قسمت‌های مختلف سازه نمایان شوند. آسیب ناشی از واکنش قلیایی سنگدانه‌ها یک پروسه آرام می‌باشد. یکی از راه‌های تشخیص وجود این واکنش در سنگدانه‌ها پتروگرافی است که در آن احتمال وجود یا عدم وجود واکنش پیش‌بینی می‌شود

استناد: رحیمی‌منبر، ح.، فتح‌اللهی، م. (۱۴۰۳). بررسی سنگدانه‌های کربناته و استفاده از پتروگرافی در پیش‌بینی واکنش قلیایی(AAR). مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۸ (۴)، ۶۰۹-۶۲۵. https://doi.org/10.22034/JEG.2024.18.4.1015263

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

(Fernandes et al., 2013). واکنش‌های قلیایی از نظر محققین مختلف حائز اهمیت بوده و به همین دلیل از زوایای مختلف مورد توجه قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. مطالعات واکنش‌های قلیایی سیلیکاته بتن (Figueira et al., 2019)، تأثیر مکمل‌های سیمانی بر واکنش‌های قلیایی سیلیکاته (Meesak and Sujjavanich, 2019; Leemann et al., 2015)، مقایسه روش‌های کاهش ASR (Islam, 2014) روش‌های تشخیص و پایش واکنش‌های قلیایی (Rivard and Saint-Pierre, 2009; Hanifehzadeh et al., 2019; Courtois et al., 2021; Kongshaug, 2020)، مطالعات موردی مانند نگاهی به فرایند واکنش‌های قلیایی در سد آلتو سیرا پرتقال (Custódio et al., 2025)، مدل‌سازی واکنش‌های قلیایی(Pourbehi, 2018; Gorga et al., 2020)، بکارگیری موادی مانند نانو سیلیکات در کاهش واکنش‌های قلیایی سیلیکاته (Majidi et al., 2023، Banik et al., 2024 ;Almakrab et al., 2024). اگرچه در بیشتر منابع استفاده از پتروگرافی به عنوان روشی سریع برای تشخیص پتانسیل واکنش قلیایی ذکر شده است اما به نظر می‌رسد در بیشتر موارد جنبه توصیفی داشته و حد مشخصی برای مقادیر کانی‌های واکنش‌زا دیده نمی‌شود و یا تعیین آن‌ها قطعی نیست و از طرفی حضور کانی‌های سیلیسی در سنگدانه‌های کربناته مورد بررسی قرار نگرفته است و تحلیل و توصیف پتروگرافی به خوبی انجام نشده است.

در این تحقیق با تمرکز بر پتروگرافی سنگدانه و توصیف زمین‌شناسی مقاطع نازک به بررسی کانی‌شناسی سنگدانه‌ها پرداخته شده است و بررسی‌های پتروگرافی به طور خاص بر روی سنگدانه‌های کربناته معطوف شده و احتمال واکنش آن‌ها در ساخت بتن مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از آزمایش‌های تکمیلی همچون روش استوانه سنگی (ASTM C586) و ملات منشوری تسریع شده (ASTM C1260) به ارزیابی اعتمادپذیری پتروگرافی در احتمال واکنش‌پذیری پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

سنگدانه‌ها به عنوان مصالح طبیعی، مهم‌ترین جزء در ساخت بتن بکار برده می‌شود. این مصالح اغلب از نهشته‌های طبیعی همچون شن، ماسه و یا خرده‌های سنگ انتخاب می‌شود که حجم زیادی از بتن را تشکیل می‌دهند (Qemallaj and Golgota, 2015). از جمله روش‌های توصیف و طبقه‌بندی مصالح، بررسی پتروگرافی است که روشی برای شناسایی کانی‌ها و دیگر ترکیبات است که معمولاً در نمونه‌های دستی و مقاطع نازک صورت می‌گیرد. هدف از مطالعه پتروگرافی به دست آوردن اطلاعاتی در مورد، محتوای سنگ و کانی‌های تشکیل‌دهنده آن است (Qemallaj and Golgota, 2015). منشأ مواد قلیایی شامل دو منبع درونی و بیرونی می‌باشند. منبع درونی می‌تواند شامل کلیه مصالح تشکیل-دهنده بتن از جمله سنگدانه‌ها، سیمان، آب و مواد افزودنی معدنی و شیمیایی باشد. آب حاوی املاح قلیایی در صورتی که در تماس با بتن قرار گیرد و بتواند به درون بتن نفوذ کند خود می‌تواند منبع بیرونی تأمین قلیایی‌ها در بتن تلقی شوند. این واکنش‌ها می‌توانند سبب انبساط مخرب، ترک خوردگی و خرابی بتن گردند. در این مطالعه بررسی‌های پتروگرافی و شیمیایی بر اساس استانداردهای موجود (ASTM) برای شناسایی واکنش‌زایی قلیایی - سیلیسی و قلیایی- کربناته سنگدانه‌ها برای تأیید حضور یا عدم حضور این ترکیبات در مصالح سازنده بتن بکار برده شده است.

در این مطالعه تعداد یازده نمونه سنگی کربناته (آهک و دولومیت) به صورت سنگ مادر از معدن تهیه و توسط دستگاه سنگ شکن آزمایشگاهی خردایش شده و سپس به وسیله الک‌های آزمایشگاهی در اندازه‌های مختلف دانه‌بندی شد. همچنین کلیه مصالح قبل از استفاده کاملاً شسته و در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

حالت S.S.D (حالت اشباع با سطح خشک) بوده است. نمونه‌ها پس از خرد شدن توسط دستگاه، توسط الک‌های با اندازه‌های متفاوت مورد جدایش قرار گرفته و سپس درصد باقیمانده بر روی هر الک، مورد بررسی پتروگرافی توصیفی قرار گرفته است. از هر نوع سنگ باقیمانده روی الک‌ها مقاطع نازک میکروسکوپی تهیه شده و مطالعه شده است. همانطور که در نتایج آنالیز XRF نمونه‌ها نیز مشاهده می‌شود (جدول ۱) مقدار سیلیس اغلب نمونه‌ها کمتر از ۵ درصد است به جز یکی از نمونه‌ها که دارای درصد زیاد سیلیس در حدود ۲۱/۱ درصد است که می‌تواند نشان‌دهنده وجود سیلیس فعال در سنگدانه‌ها (همچون اپال، کلسدونی، تریدیمیت، کریستوبالیت و شیشه‌های آتشفشانی) باشد (ASTM C295-08). این مواد واکنش‌زا در سنگ‌هایی مثل چرت، آرژیلیت، فیلیت، گریواک، شیست، گنایس، میلونیت، کوارتزهای رگه‌ای، کوارتزیت، ماسه سنگ، ریولیت، توف‌های ریولیتی، داسیت، آندزیت و نیز سنگ‌های دیگر می‌تواند وجود داشته باشد (Gifford and Gillott, 1996).

جدول ۱. مقدار اکسید عناصر اصلی سنگدانه‌های مورد مطالعه که به روش XRF اندازه‌گیری شده است.
Table 1. The amount of oxides of the main elements of the studied aggregates, measured by XRF.

	XRF	Oxide	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	So_3	K_2O	CaO	V_2O_5	Fe_2O_3	LOI	Total
Samples	B1	%	0.076	8.3	0.42	1.7	0.061	0.3	0.2	45.01	0.008	0.33	43.4	99.805
	B2	%	0.093	5.2	0.54	2.6	0.099	0.25	0.26	47.8	0.008	0.37	42.59	99.81
	B3	%	0.063	3.9	0.36	1.4	0.055	0.24	0.19	50.2	0.007	0.42	43.01	99.845
	B4	%	0.087	5.8	0.4	1.5	0.086	0.26	0.22	48.01	0.008	0.36	43.13	99.861
	B5	%	0.1	5.9	2.3	21.1	0.33	0.33	0.42	32.2	0.02	2.08	34.19	98.97
	RS1	%	0.07	0.76	0.8	3.7	0.09	0.023	0.33	53.1	0.008	0.83	39.9	99.611
	RS2	%	0.053	0.85	0.75	4.5	0.087	0.026	0.3	52.1	0.006	0.78	40.1	99.552
	RS3	%	0.056	0.75	0.45	2.7	0.063	0.061	0.19	52.9	N	0.64	40.36	98.17
	RS4	%	0.055	1.23	0.3	3.1	0.41	0.071	0.19	53.01	0.012	1.06	40.37	99.808
	RS5	%	0.087	1.13	0.4	4.6	0.58	0.054	0.2	53.7	0.011	0.95	36.84	98.552
	RS6	%	0.23	1.41	2.04	21.1	0.1	0.017	0.59	37.5	0.008	2.09	34.3	99.385

آب مصرفی در این طرح آب شهری (شهر تهران) است و سیمان مصرفی، سیمان تیپ ۲ آبیک منطبق بر استاندارد ASTM C 295 است که پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آن در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان
Table 2. Physical compound of cement

مشخصات فیزیکی	مقدار
Fineness (Blaine Test, cm2/gr)	3081
Retained on Sieve # 170 (90 µm)	5.7
Autoclave Expansion	0.21
Water or Normal Consistency	23
Initial Setting Time (Vicat Test, minutes)	153
Final Setting Time (Vicat Test, minutes)	212

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان
Table 3. Chemical compound of cement

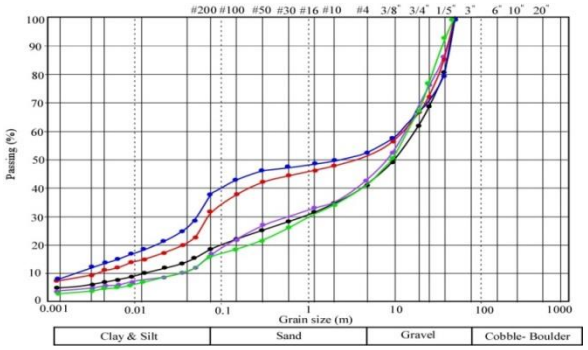
Chemical compound	Amount %	Chemical compound	Amount %
SiO_2	20.79	Na_2O	0.37
Al_2O_3	4.76	K_2O	0.68
Fe_2O_3	3.86	Free-CaO (CaO.f)	0.82
CaO	62.28	Cl	-
MgO	3.22	Loss on Ignition (LOI)	1.88
SO_3	1.89	Insoluble Residue (I.R)	0.51
Bouges compounds			
Tricalcium-silicate (C3S)	52.67		
Dicalcium-silicate (C2S)	19.89		
Tricalcium-aluminate (C3A)	6.09		
Tetracalcium-aluminoferrite (C4AF)	11.74		

مراحل انجام تحقیق

برای بررسی و شناخت سنگدانه‌های مستعد واکنش قلیایی، آزمایش پتروگرافی (ASTM C295) و آزمایش‌های شیمیایی XRF ، ASTM C586 و ASTM C1260 صورت گرفته است که در زیر شرح داده می‌شود:

پتروگرافی، استاندارد ASTM C295

این روش، از روش‌های مؤثر و سریع جهت تعیین پتانسیل واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها است (French, 1991). این آزمایش روشی ساده، تکرارپذیر و سریع است. برای این آزمایش ابتدا مصالح قرضه بتن اعم از مصالح شن و ماسه‌ای و یا سنگی بر طبق استاندارد ASTM C117 و ASTM C136 دانه‌بندی می‌شود. در مرحله دوم دانه‌های باقیمانده روی هر الک با توجه به نوع سنگ، هوازدگی و استحکام شمارش شد. همچنین دانه‌ها از لحاظ شکل آن‌ها بررسی شده و با شمارش شکل‌های موجود در هر جنس، درصد شکلی سنگدانه‌ها (دیسکی- تیغه‌ای- کروی) برای هر الک محاسبه می‌شود. از مصالح روی الک‌ها نمونه اخذ می‌شود و پس از تهیه مقطع نازک، درصد کانی‌ها با پتانسیل واکنش-زایی قلیایی- سیلیسی (عموماً شامل کوارتز آزاد، چرت، اپال، کلسدونی و...) و درصد کانی‌ها با پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی-کربناته (کلسیت دولومیتی شده) محاسبه می‌شود. مراحل انجام مطالعات بر اساس استاندارد ASTM C295 به شرح زیر است:



Sample	Clay & Silt (%)	Sand (%)	Gravel (%)
B1	18.72	22.04	59.24
B2	17.06	25.06	57.87
B3	31.71	19.29	49.00
B4	37.64	14.49	47.87
B5	15.66	24.91	59.43

شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌ها و مقدار اجزاء تشکیل دهنده

Fig. 1. The grain size distribution of aggregate

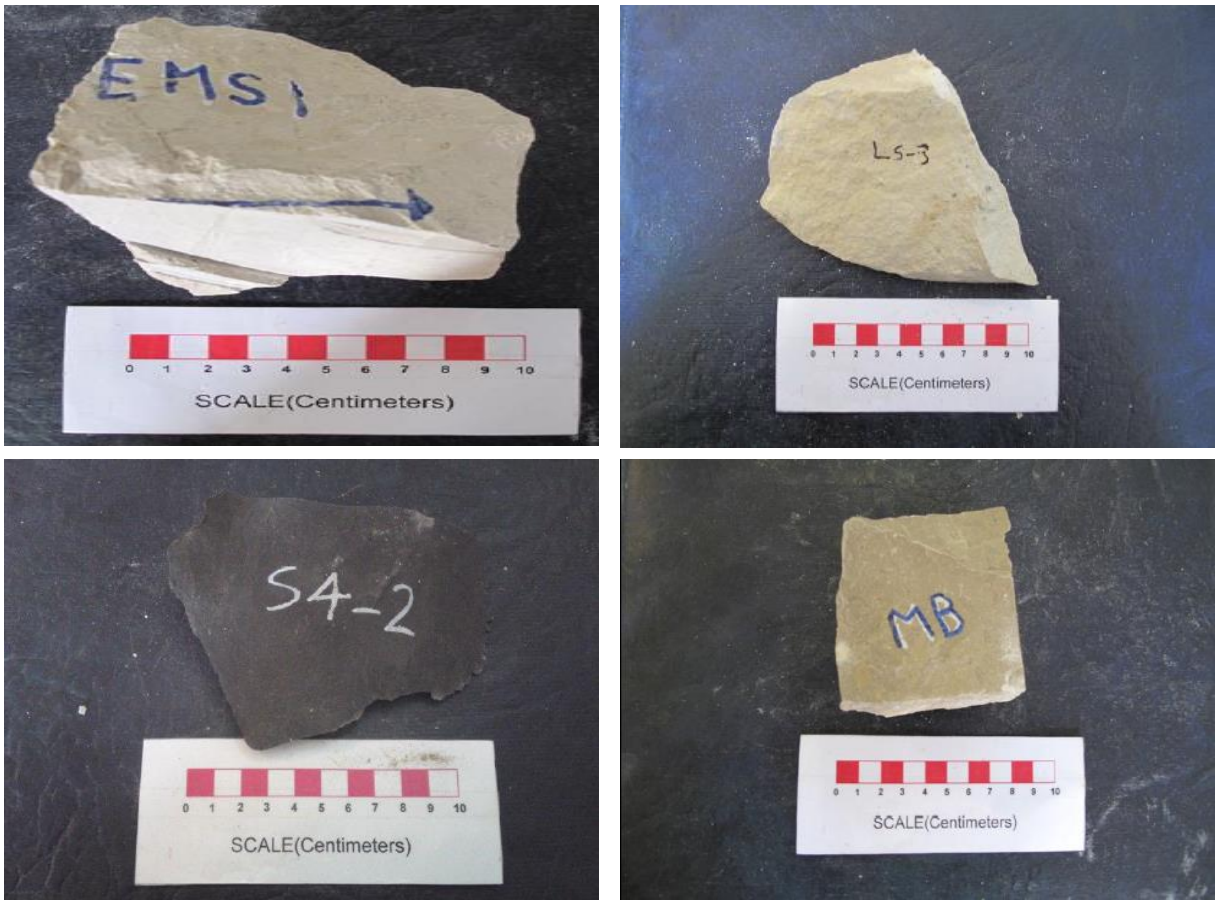
همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود گراول حجم عمده دانه‌ها را تشکیل داده است. با توجه به مطالعات نظری انجام شده، منابع قرضه مورد مطالعه، عمدتاً در سه گروه الف) سنگ آهک دولومیتی، ب) ماسه سنگ آهکی و ج) چرت دسته‌بندی شده است. سنگدانه‌های گروه الف بطور میانگین ۹۲/۸۵ درصد از کل مصالح را شامل می‌شود که در حقیقت اصلی‌ترین سنگدانه در کل منابع قرضه است. سنگدانه‌های این بخش شامل سنگ آهک‌های متنوعی است که در آن‌ها بیوکلاست (فسیل) با زمینه‌های میکرایتی و کلسیتی مشاهده می‌شود. همچنین در این میان سنگ‌های آهکی دولومیتی نیز مشاهده شده است. سنگدانه‌های گروه ب با سیمان آهکی در مجموع ۰/۶۵ درصد از کل مصالح را به خود اختصاص داده است. توصیفات ماکروسکوپی و نتایج مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک سنگدانه‌های باقیمانده بر روی الک‌ها در ادامه ارائه می‌شود.

توصیف ماکروسکوپی نمونه‌ها

با توجه به شکل ۲، اغلب نمونه‌ها به رنگ کرم روشن متمایل به خاکستری روشن تا تیره و دارای آثار درزه‌های بسیار ریز و موازی و بافت ریزدانه، همگن و متراکم هستند. در سطح برخی از نمونه‌ها آثار جلبکی دیده می‌شود که در برخی نواحی به شکل نوارهای متحدالمرکز کاملاً قابل مشاهده است. همچنین آثار میکروفسیل نیز در بافت زمینه دیده می‌شود. آثار دندریتی منگنز در برخی سطوح سنگ‌ها به همراه پوشیدگی‌های گچی و کانی‌های اپاک قابل مشاهده هستند. ریز درزه‌هایی به موازات هم و با پرشدگی‌های تیره-رنگ که به احتمال زیاد کانی‌های اپاک هستند دیده می-شوند. نمونه‌ها با اسید کلریدریک جوشش دارند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]



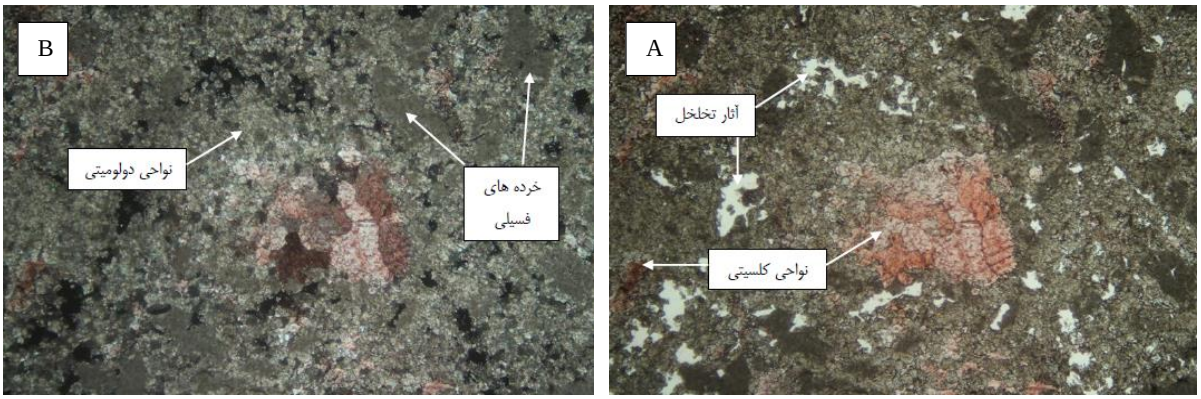
شکل ۲. نمونه‌های ماکروسکوپی که دارای رنگ کرم روشن تا تیره و متمایل به خاکستری روشن تا تیره هستند

Fig. 2. The specimens that are light to dark cream in color and tend toward light to dark gray

توصیف میکروسکوپی

کانی کلسیت (**Error! Reference source not found.**- A) به مقدار فراوان و پس از آن کوارتز، دولومیت (**Error! Reference source not found.**- B) و کانی‌های اپاک در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. ازآنجایی‌که بیش از ۵۰٪ نمونه از کانی‌های کربناته تشکیل شده جزو سنگ‌های کربناته محسوب می‌شود و بر اساس تعریف صورت گرفته برای اجزای تشکیل دهنده سنگ‌های کربناته، شامل اسکلت (دانه‌های اسکلتی و غیر اسکلتی) و سیمان پرکننده فضای خالی بین دانه‌ها می‌باشد. سنگ‌ها دارای زمینه میکرایتی، اسپارایتی و میکرواسپارایتی هستند که آثار فسیلی در آن‌ها قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۴- A). قطعات فسیلی عمدتاً خرده‌های فسیلی پلاژیک، رادیولار و کلسی-اسفر و روزن‌داران (از خانواده میلیولیدها) و آثار جلبکی می‌باشند (شکل ۴- B). تراکم آثار فسیلی در برخی نواحی از بافت زمینه بیشتر و آثار دولومیتی شدن در متن زمینه دیده می‌شود (شکل ۴- C). بلورهای دولومیت ریز و دانه شکری هستند که در سیمان زمینه دیده می‌شوند البته به دلیل ریزدانه بودن سیمان و همچنین بلورهای دولومیت، چندان قابل تشخیص نمی‌باشند. اما در برخی نواحی پدیده دولومیتی شدن پیشرفت داشته و بلورهای لوزوجهی دولومیت به خوبی قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۴- D). در نواحی مختلف زمینه می‌توان ریز درزه‌هایی را مشاهده نمود که با بلورهای کلسیت متبلور پرشده‌اند. همچنین آثار درزه-های استیلولیتی نیز در برخی نمونه‌ها دیده می‌شود که

توسط کانی‌های اپاک پر شده‌اند (شکل۴- E). در برخی نقاط پرکردگی حفرات فسیلی توسط متبلور قابل مشاهده است (شکل ۴- F). آثار تخلخل هم در بافت زمینه به صورت پراکنده و اندک مشاهده می‌شود که بخشی از آن‌ها حجرات فسیلی می‌باشند که فاقد هرگونه پرکردگی هستند (شکل ۴- F). آثار کانی‌های اپاک و هم‌چنین بلورهای ریز کوارتز تخریبی نیز در برخی نواحی دیده می‌شود (شکل ۴- G). آثار گلوکونیت نیز در برخی نمونه‌ها به صورت پراکنده دیده می‌شود (شکل ۴- H). با توجه به احتمال وجود دولومیت در بافت زمینه، نمونه با محلول آلیزارین قرمز رنگ‌آمیزی شد و با توجه به رنگ گرفتن غالب سنگ می‌توان نتیجه گرفت که آثار چندانی از دولومیت در بافت زمینه وجود ندارد. اما در برخی نمونه‌ها با توجه به رنگ نگرفتن و قرمز نشدن برخی از سنگ می‌توان نتیجه گرفت که آثاری از دولومیت دانه شکری در سیمان سنگ وجود دارد.

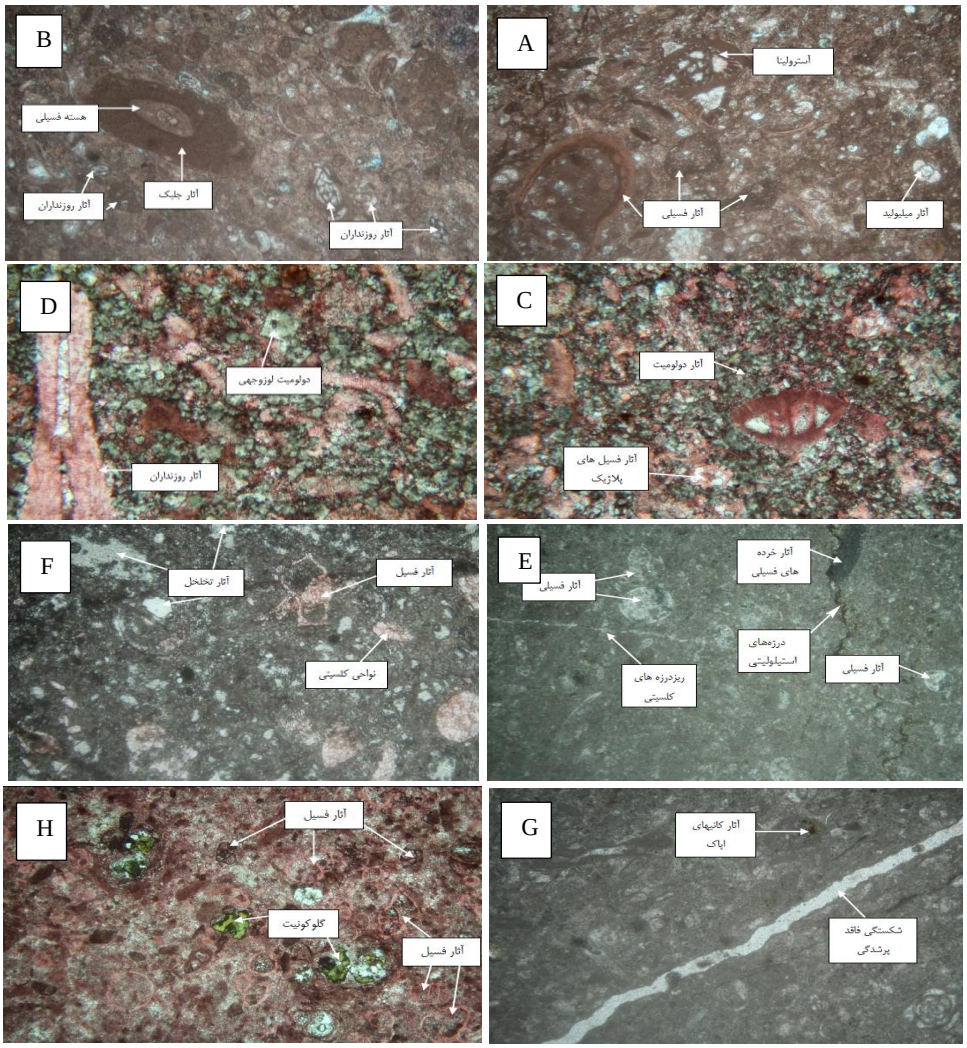


شکل ۳. نمونه‌های رنگ‌آمیزی شده توسط آلیزارین، a- نواحی کلسیتی با بزرگنمایی EA4 (PPL)، b- نواحی دولومیتی با بزرگنمایی EA4 (XPL).

Fig. 3. A. Calcite at EA4 magnification (PPL), B: Dolomite at EA4 magnification (XPL)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]



شکل ۴. A- سنگ با زمینه اسپارایتی و آسترولینا در نمونه رنگ‌آمیزی شده توسط آلیزارین، با بزرگنمایی AE4 (PPL)، B- آثار جلبک در نمونه رنگ‌آمیزی شده توسط آلیزارین، با بزرگنمایی AE4 (XPL)، C و D- آثار دولومیت در نمونه رنگ آمیزی شده توسط آلیزارین، با بزرگنمایی EA10 (XPL) و دولومیت لوزوجهی با بزرگنمایی EA4 (PPL)، E- درزه‌های استیلولیتی و ریز درزه‌های کلسیتی، بزرگنمایی AE4 (XPL)، F- آثار حفرات خالی، G- شکستگی فاقد پرشدگی و آثار کانی‌های اپاک با بزرگنمایی AE4 (PPL)، H- گلوکونیت در نمونه رنگ آمیزی شده توسط آلیزارین، با بزرگنمایی EA4 (PPL).

Fig. 4. A. A sample with a matrix of sparite and astrolina in an alizarin-stained specimen, at magnification AE4 (PPL), B: Traces of algae in a sample stained with alizarin, at magnification AE4 (XPL), C & D: Traces of dolomite in the alizarin stained specimen, at EA10 magnification (XPL) and dolomite lozenges at EA4 magnification (PPL), E: Stylolite joints and calcite microjoints, AE4 magnification (XPL), F: pore spaces, G: Unfilled fracture and traces of opaque minerals at AE4 magnification (PPL), H: Glauconite in an alizarin-stained specimen, at magnification EA4 (PPL).

روش استوانه سنگی ASTM C586

در این روش استوانه سنگی به قطر 9mm و طول 35mm یا منشورهای به ابعاد 9*9*35mm ، در محلول NaOH ۱ نرمال و دمای 23°C غوطه‌ور گردیده و در فواصل زمانی معین طولشان اندازه‌گیری می‌شود (Berube and Fournier, 1992). این آزمایش برای تشخیص سنگ‌های کربناتی واکنش‌پذیر با قلیا، که مطابق با حد انبساط ۰/۱۰ درصد می‌باشد ارائه شده است. حد انبساط ۰/۱۰ درصد در ۴ هفته و ۰/۲۰ درصد در ۱۶ هفته پیشنهاد شده است. نتایج این آزمایش برای تشخیص سنگ‌های فعال قلیایی- سیلیسی رضایت بخش نیست (Tavakoli shirazi and azizian, 2012). قبول یا رد منابع سنگدانه تنها با استفاده از نتایج این آزمایش توصیه نمی‌شود (ASTM C586).

روش ملات منشوری تسریع شده ASTM C1260

در این روش سنگدانه‌ها را بر اساس دانه‌بندی توصیه شده جدا نموده و آن را با سیمان پرتلند تیپ ۲، برای تهیه نمونه-های منشوری مخصوص به کار می‌برند. پس از نمونه‌گیری با آب ۲۳ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌ها را در محلول سود نرمال ۸۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌کنند. پس از ۲۴ ساعت، قرائت اولیه را یادداشت کرده و بعد از آن مقدار انبساط ایجاد شده را تا ۲۵ روز قرائت می‌کنند. سپس با توجه به انبساط به دست آمده، محدوده مضر بودن یا بی‌ضرر بودن سنگدانه‌ها به شرح زیر خواهد بود (Grattan-Bellew et al., 2010):

-اگر انبساط کمتر از ۰/۱ درصد نمونه باشد، در بیشتر حالات سنگدانه‌ها بی‌ضررند.

-اگر انبساط بیشتر از ۰/۲ درصد نمونه باشد، سنگدانه‌ها در محدوده زیان آور قرار دارند.

-اگر مقدار انبساط بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد نمونه باشد، سنگدانه‌ها هم در محدوده مشکوک قرار دارند.

برای تشخیص دسته سوم، به اطلاعات دیگری مانند آزمایش پتروگرافی ASTM C295 که برای تعیین درصد مقدار سنگدانه‌های مستعد می‌باشد، نیاز است. نتایج به دست آمده از آزمایش ASTM C1260 تأییدی بر صحت نتایج و اهمیت انجام آزمایش پتروگرافی (ASTM C295) به‌منظور انتخاب مصالح مناسب با صرف هزینه‌های اندک در مدت زمان کوتاه قبل از اجرای طرح اختلاط بتن است.

نتایج و بحث

پیش‌بینی واکنش‌زایی قلیایی بر اساس استاندارد ASTM C295

وجود حداقل ۰/۵ درصد سنگدانه‌های واجد سیلیس فعال می‌تواند باعث ایجاد واکنش (ASR) و تخریب بتن گردد. با توجه به مشاهدات میکروسکوپی و سنگ‌شناسی نمونه‌های معدنی کربناته حاوی سیلیس در نمونه‌ها تخمین زده شده است. خصوصیات کلی سنگ‌هایی که مستعد واکنش‌زایی قلیایی-کربناته (ACR) هستند عبارت‌اند از: دولومیت‌های ریزدانه، مقدار قابل توجهی کلسیت ریزدانه، مواد غیر قابل حل از قبیل رس و سیلیس، پراکندگی همگن دولومیت و کلسیت در داخل زمینه رسی. مشاهدات میکروسکوپی نشان دهنده کلسیت ریزدانه و وجود میزان بسیار ناچیز دولومیت ریزدانه در نمونه‌ها می‌باشد که احتمال وقوع واکنش قلیایی-کربناته در نمونه‌ها بصورت کم وجود دارد. در نتیجه روش-هایی نظیر روش ASTM C586 و ASTM C1260 به تشخیص بهتر این واکنش‌ها کمک می‌کند.

پیش‌بینی واکنش‌زایی قلیایی بر اساس استاندارد ASTM C586

خلاصه نتایج مربوط به ۶ سنگدانه مختلف در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

جدول ۴. میزان انبساط نمونه سنگ کربناتی به روش استوانه سنگی (ASTM C586)

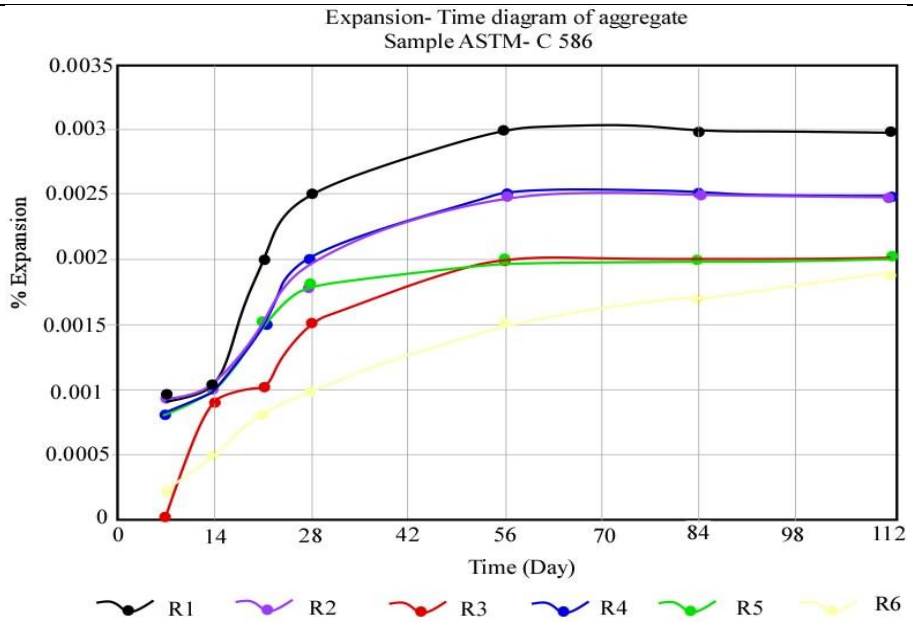
Table 4. Expansion rate of carbonate rock sample by rock cylinder method (ASTM C586)

آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود میانگین انبساط تمام نمونه‌ها از ۰/۱ درصد کمتر است. بنابراین تمام نمونه‌ها غیرفعال ارزیابی می‌شود. همانطور که در نمودار **Error! Reference source not found.** دیده می‌شود، در بازه زمانی کوتاه مدت (۲۱روز) نتایج آزمایش نزدیک به هم بوده و اختلاف چندانی بین نتایج آن مشاهده نمی‌شود. بنابراین براساس نتایج مطالعات (Tavakoli shirazi and azizian, 2012) زمان یک ماه برای ارزیابی سنگ مناسب نیست و این میزان در این تحقیق در حدود ۱۱۲ روز ادامه یافت که دیده شد نتایج در این ماه‌ها از یکدیگر کاملاً متمایز شده که نشان-دهنده وجود نوع و کانی‌های مختلف در سنگدانه‌های موجود است.

جدول ۴. میزان انبساط نمونه سنگ کربناتی به روش استوانه سنگی (ASTM C586)

Table 4. Expansion rate of carbonate rock sample by rock cylinder method (ASTM C586)

Samples	initial length (cm)	Average percentage of changes of 3 samples using the stone cylinder method						
		7 days	14 days	21 days	28 days	56 days	84 days	112 days
R1	3.73	0.0009	0.0010	0.0020	0.0025	0.0030	0.0030	0.0030
R2	3.68	0.0009	0.0010	0.0015	0.0020	0.0025	0.0025	0.0025
R3	3.67	0.0000	0.0009	0.0010	0.0015	0.0020	0.0020	0.0020
R4	3.72	0.0008	0.0010	0.0015	0.0020	0.0025	0.0025	0.0025
R5	3.72	0.0008	0.0010	0.0015	0.0018	0.0020	0.0020	0.0020
R6	3.66	0.0002	0.0005	0.0008	0.0010	0.0015	0.0017	0.0019



شکل ۵. میزان انبساط نمونه‌ها در طول۱۱۲ روز به روش استوانه سنگی

Fig. 5. The rate of expansion of samples over 112 days using the cylinder method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

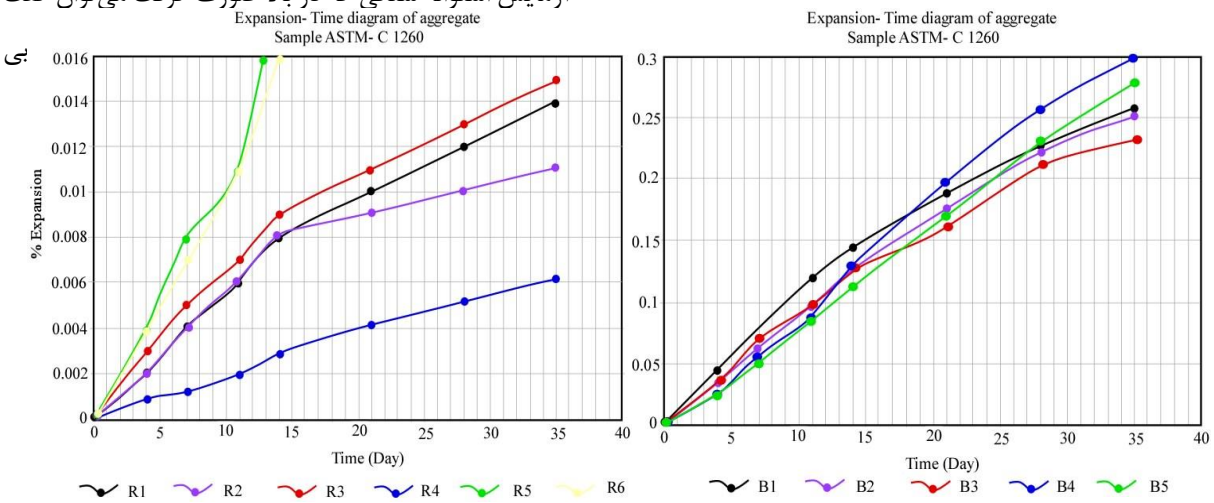
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263] [DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9] [Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

پیش‌بینی واکنش‌زایی قلیایی بر اساس استاندارد ملات منشوری ASTM C1260

در اولین گام جهت ارزیابی واکنش‌زایی سنگدانه‌ها، تعداد ۱۱ نمونه از سنگ‌ها در فواصل زمانی مختلف، نمونه‌برداری شد و آزمایش تسریع شده انبساط نمونه‌های منشوری ملات مطابق با استاندارد انجام شد. نتایج این آزمایش برای سنگدانه‌های B و R به ترتیب در **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** بی

شکل ۶. A- میزان انبساط سنگدانه‌های گروه B به روش استاندارد (ASTM C1260)، B- میزان انبساط سنگدانه-های گروه R به روش استاندارد (ASTM C1260).

(الف و ب) قابل ملاحظه است. با بررسی نتایج که در مدت ۳۵ روز جمع آوری شد، ملاحظه می‌شود میزان انبساط در نمونه‌های B بعد از گذشت ۱۳ روز بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد قرار می‌گیرد که از نظر قابلیت واکنش‌زایی قلیایی در رده مشکوک قرار می‌گیرند. اما در نمونه‌های R پراکندگی زیادی دیده می‌شود و با میزان انبساط کمتر از ۰/۱ درصد و نتایج آزمایش استوانه سنگی که در بالا صورت گرفت می‌توان گفت



جدول ۵. میزان انبساط نمونه سنگ کربناتی (نمونهB) به روش منشور ملات به روش تسریع شده (ASTM C1260)

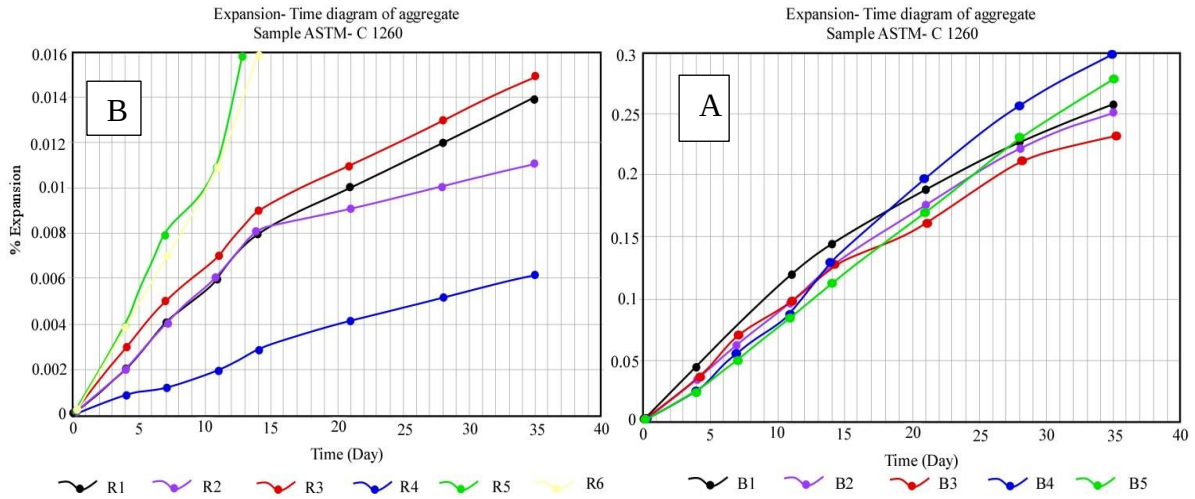
Table 5. Expansion rate of carbonate rock sample (B) by accelerated mortar prism method (ASTM C 1260)

Samples	initial length (cm)	Average percentage of changes of 3 mortar prisms using the accelerated method						
		4 days	7 days	11 days	14 days	21 days	28 days	35 days
B1	28.49	0.045	0.077	0.120	0.145	0.189	0.229	0.257
B2	28.47	0.034	0.063	0.097	0.128	0.175	0.223	0.250
B3	28.49	0.034	0.069	0.097	0.125	0.159	0.210	0.230
B4	28.48	0.025	0.057	0.089	0.130	0.199	0.259	0.301
B5	28.49	0.025	0.050	0.084	0.112	0.169	0.230	0.278

جدول ۶. میزان انبساط نمونه سنگ کربناتی (نمونه R) به روش منشور ملات به روش تسریع شده (ASTM C1260).

Table 5. Expansion rate of carbonate rock sample (R) using the accelerated mortar prism method (ASTM C1260).

Samples	initial length (cm)	Average percentage of changes of 3 mortar prisms using the accelerated method						
		4 days	7 days	11 days	14 days	21 days	28 days	35 days
R 1	28.48	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014
R 2	28.47	0.002	0.004	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011
R 3	28.48	0.003	0.005	0.007	0.009	0.011	0.013	0.015
R 4	28.48	0.009	0.012	0.019	0.029	0.041	0.051	0.061
R 5	28.48	0.004	0.008	0.011	0.018	0.028	0.034	0.046
R 6	28.48	0.004	0.007	0.011	0.016	0.024	0.035	0.046



شکل ۶. A- میزان انبساط سنگدانه‌های گروه B به روش استاندارد (ASTM C1260)، B- میزان انبساط سنگدانه‌های گروه R به روش استاندارد (ASTM C1260).

Fig. 6. A. Expansion rate of Group B aggregates by standard method (ASTM C 1260), B. Expansion rate of group R aggregates by standard method (ASTM C 1260).

نتیجه‌گیری

طبق مشاهدات پتروگرافی به روش استاندارد ASTM C295 چنین برداشت می‌شود که سنگدانه‌های منابع قرضه پتانسیل ایجاد واکنش قلیایی-کربناتی را دارا نمی‌باشند. و آزمایش‌های ASTM C586 و ASTM C1260 موید نتایج پتروگرافی می‌باشند. همچنین واکنش قلیایی- سیلیسی به دلیل دارا بودن چرت‌های میکروکریستالین در برخی گروه سنگ‌ها محتمل است، که به علت اندک بودن درصد آن‌ها در کل مصالح تأثیر چندانی ندارند. نتایج نشان می‌دهد که سنگدانه‌های آهکی می‌توانند حاوی مقادیری سیلیس باشند بنابراین لازم است در بررسی پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی کربناته، همزمان پتانسیل واکنش‌زایی قلیایی سیلیکاته هم کنترل شود. با توجه به توصیفی بودن نتایج پتروگرافی و خطاهای موجود در آزمایش‌ها، پیشنهاد می‌شود بصورت کلی برای جلوگیری از واکنش‌های قلیایی، استفاده از سیمان کم قلیا در سنگدانه با قابلیت واکنش‌پذیری سیلیسی(میزان قلیایی معادل آن بر حسب Na_2O (Na_2O+ 0.658* K_2O)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

کمتر از ۰/۶ درصد) و در خصوص سنگدانه‌های با قابلیت واکنش‌پذیری کربناتی (میزان قلیای مواد موجود در سیمان بر حسب Na_2O نباید از ۰/۴ درصد تجاوز نماید)، توصیه می‌شود.

References

Almakrab, A., Elshazli, M. T., Ibrahim, A., & Khalifa, Y. A. (2024). Assessment of Various Mitigation Strategies of Alkali-Silica Reactions in Concrete Using Accelerated Mortar Test. Materials, 17(20), 5124.

ASTM C117, (1995). Standard Test Method for Materials Finer than.

ASTM C136, (2005). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Annual Book of Standards, 4(02).

ASTM C295-98, (2007). Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete, 187-194.

ASTM C1260-94, (1994). Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), Annual Book of ASTM Standards, 4, 650-653.

ASTM C586-99, (2004). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks for Concrete Aggregate (Rock Cylinder Method). Annual book of ASTM standards, 282-285.

Banik, D., He, R., Lu, N., & Feng, Y. (2024). Mitigation mechanisms of alkali silica reaction through the incorporation of colloidal nanoSiO2 in accelerated mortar bar testing. Construction and Building Materials, 422, 135834.

Bérubé, M. A., & Fournier, B. (1992). Accelerated test methods for alkali-aggregate reactivity. Advances in Concrete Technology: 583-627.

Courtois, A., Giannini, E. R., Boule, A., Hénault, J. M., Jacobs, L., Masson, B., ... & Vautrin, D. (2021). Field Assessment of ASR-Affected Structures. Diagnosis & Prognosis of AAR Affected Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 259-ISR, 41-93.

Custódio, J., Mata, J., Serra, C., Ribeiro, A. B., Tavares de Castro, A., & Batista, A. L. (2025). Insights into the Diagnosis and Prognosis of the Alkali–Silica Reaction (ASR) in Concrete Dams, Highlighting the Case of the Demolished Alto Ceira Dam in Portugal. Buildings, 15(3), 460.

Farny, J. A., & Kosmatka, S. H., (1997). Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete. Portland Cement Association.

Fernandes, I., Broekmans, M. A., Nixon, P., Sims, I., dos Anjos Ribeiro, M., Noronha, F., & Wigum, B. (2013). Alkali–silica reactivity of some common rock types. A global petrographic atlas. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(2), 215-220.

Figueira, R. B., Sousa, R., Coelho, L., Azenha, M., De Almeida, J. M., Jorge, P. A. S., & Silva, C. J. R. (2019). Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. Construction and Building Materials, 222, 903-931.

French, W. J. (1991). Concrete petrography: a review. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 24(1), 17-48.

Gifford, P. M., & Gillott, J. E. (1996). Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete. Cement and concrete research, 26(1), 21-26.

Gorga, R. V., Sanchez, L. F. M., Martín-Pérez, B., Fecteau, P. L., Cavalcanti, A. J. C. T., & Silva, P. N. (2020). Finite element assessment of the ASR-affected Paulo Afonso IV dam. Journal of Performance of Constructed Facilities, 34(4), 04020065.

Grattan-Bellew, P. E., Mitchell, L. D., Margeson, J., & Min, D. (2010). Is alkali–carbonate reaction just a variant of alkali–silica reaction ACR= ASR?. Cement and Concrete Research, 40(4), 556-562.

Hanifehzadeh, M., Ebad Sichani, M., Gencturk, B., & Padgett, J. E. (2019). Destructive and non-destructive evaluation of reinforced concrete dry casks affected by alkali-silica reactivity damage. Structure and Infrastructure Engineering, 15(10), 1404-1418.

Islam, M. S. (2014). Comparison of ASR mitigation methodologies. International Journal of Concrete Structures and Materials, 8, 315-326.

Kongshaug, S. S., Oseland, O., Kanstad, T., Hendriks, M. A., Rodum, E., & Markeset, G.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]

(2020). Experimental investigation of ASR-affected concrete–The influence of uniaxial loading on the evolution of mechanical properties, expansion and damage indices. Construction and Building Materials, 245, 118384.

Leemann, A., Bernard, L., Alahrache, S., & Winnefeld, F. (2015). ASR prevention—Effect of aluminum and lithium ions on the reaction products. Cement and Concrete Research, 76, 192-201.

Majidi, F., Fathollahy, M., & Rahimi menbar, H., (2023). Changes in alkaline silicate reaction (ASR) by changing the amount of silica aggregates and controlling the reaction. Journal of Engineering Geology; 17 (3) :321-334. (In Persian)

Meesak, T., & Sujjavanich, S. (2019). Effectiveness of 3 different supplementary cementitious materials in mitigating alkali silica reaction. Materials Today: Proceedings, 17, 1652-1657.

Pourbehi, M. S. (2018). Numerical modelling of alkali silica reaction in concrete dams (Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University).

Qemallaj, R., & Golgota, A. (2015). Petrographic mineralogical analysis of aggregates from devoll hydropower projects. 3(2).

Rivard, P., & Saint-Pierre, F. (2009). Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive methods: From the lab to the field. Construction and Building Materials, 23(2), 902-909.

Tavakoli shirazi, N., & Azizian, Gh. R., (2001). Investigation of the effects of alkali-silica reactions on some concrete dams in Iran. 4th Annual National Iranian Concrete Conference, Tehran, Iran. (In Persian)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1403.18.4.7.9]
[DOI: 10.22034/JEG.2024.18.4.1015263]