Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir/
Razi University

Investigating the mechanical properties of activated alkali high permeability concrete according to the ratio of alkaline activators

Amir Zohrabi[1], Rasoul Alipour[2]✉, Alireza Jahangiri[3]

1.Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: amir73zohrabi@gmail.com.
2.Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: r.alipour@sku.ac.ir.
3. Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: jahangiri@sku.ac.ir.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received
2024-03-11
Received in revised form
2024-04-22
Accepted
2024-06-06
Available online
2024-06-25

Keywords:
Porous concrete,
active alkali,
slag, sodium hydroxide,
sodium silicate

ABSTRACT

This research investigates the mechanical properties of alkali-activated porous concrete compared to cement-based porous concrete. In this regard, the slag of blast furnaces has been used as the base material for cement, and sodium hydroxide and sodium silicate have been used as alkalizing materials. Alkali-activated porous concrete was made with 8 Molar sodium hydroxide solution with ratios of sodium hydroxide to sodium silicate 1:2, 1:1, and 2:1. To check the mechanical properties, compressive strength and tensile strength tests (Brazilian test) were tested at the ages of 90, 28, 7, and 120 days according to the proposed standards. Compared to sample concrete, the compressive strength and tensile strength of porous concrete with active alkali in the ratio of 1 to 2 have been reduced by 75 and 69 percent. The same comparison shows a decrease of 51 and 41% in the ratio of 1:1, and in the ratio of 2:1 sodium hydroxide to sodium silicate, the compressive strength increases by 28% and the tensile strength by 12% compared to porous cement-based concrete at the age of 120 days.

Cite this article: Zohrabi, A., Alipour, R., Jahangiri, A. (2024). Investigating the mechanical properties of activated alkali high permeability concrete according to the ratio of alkaline activators. *Advanced Modeling in Civil Engineering* 1(1), 65-80. DOI: 10.22126/amcen.2024.3287

© The Author(s).
DOI: 10.22126/amcen.2024.3287
Publisher: Razi University

Introduction

In the global community, concrete is one of the most widely used construction materials, currently playing a significant role in the development of infrastructure and the economy worldwide. The reason for the extensive use of concrete lies in the abundance and availability of raw materials, as well as its valuable technical specifications such as workability, fire resistance, durability against weather factors, and cost-effectiveness. However, the high usage of concrete in the construction industry, and consequently the massive production of cement, has numerous detrimental environmental impacts. The production of cement consumes many natural resources and releases a significant amount of carbon dioxide into the environment. The energy consumed for producing each ton of cement is the highest after aluminum and steel, accounting for 5% of the total energy consumption in the world. One of the main technical challenges in producing Portland cement is the need for 1.5 tons of raw materials to produce 1 ton of Portland cement, which results in the emission of 0.94 tons of carbon dioxide into the environment. Cement production is an energy-intensive process, requiring between 1700 to 1800 megajoules of energy to produce each ton of clinker. On average, 120 liters of fuel and 117 kilowatt-hours of electricity are consumed in the cement production process. In the transportation system, 11.9% of the country's road freight is attributed to cement. Increasing the efficiency and performance of cement production kilns and replacing a portion of the consumed cement with pozzolanic materials such as blast furnace slag, fly ash, and metakaolin can help reduce cement consumption and its detrimental effects. Komljenović et al in 2013 placed alkali-activated concretes under sulfate conditions and compared them with Portland cement concrete, finding that alkali-activated concrete performed better. The reason for this is the absence of calcium hydroxide in alkali-activated concrete, which reacts with sulfates. Chow et al in 2010 concluded from various studies and results that the alkali activators for slag utilize a silicate and calcium system, and their geopolymer is a type of aluminosilicate powder, with metakaolin and fly ash being among the main geopolymeric materials. They also conducted various comparisons between the two cements and reported that metakaolin, due to its high fineness and plate-like structure, absorbs more water, which leads to cracking and shrinkage. This research investigates the mechanical properties of alkali-activated porous concrete compared to cement-based porous concrete.

Method

The compressive strength test of concrete is conducted according to the ASTM C39 standard. To determine the compressive strength, cubic samples measuring 10×10×10 cm are prepared and cured. According to the standard, the concrete is placed in cubic molds in two stages, with each stage being compacted to a thickness of 5 cm and subjected to 25 blows. After compaction, the surface of the sample is smoothed. The samples are kept in a suitable location for 24 hours without being disturbed. After 24 hours, the molds are removed, and the samples are placed in water for curing until they reach the desired age. Then, using a concrete testing machine, the compressive strength of the samples at 7, 28, 60, and 90 days is determined.

Results

According to the results obtained from the compressive strength tests on cubic specimens at all ages from 7 to 120 days, it can be observed that at sodium hydroxide to sodium silicate ratios of 1 to 1 and 1 to 2, there was a decrease in strength compared to the control lightweight concrete. However, at a ratio of 2 to 1, sodium hydroxide to sodium silicate, the alkali-activated lightweight concrete achieved higher strength than the control lightweight concrete at all ages. According to the results, the 2 to 1 sodium hydroxide to sodium silicate ratio is the optimal ratio

among the three ratios tested, exhibiting greater strength than the control concrete. The tensile strength results of the produced samples indicate that at the 2 to 1 sodium hydroxide to sodium silicate ratio, the alkali-activated lightweight concrete demonstrated better strength even compared to the control concrete. In contrast, at the other two ratios, the alkali-activated lightweight concrete exhibited lower tensile strength than the control concrete.

Conclusions

In this research, based on the tests that were designed and conducted, the following results regarding alkali-activated concrete were obtained:

● Alkali-activated lightweight concrete, in terms of mechanical properties including compressive strength and tensile strength (Brazilian test) at a sodium hydroxide to sodium silicate ratio of 2 to 1, outperformed the control lightweight concrete (cement-based) by 28% and 12%, respectively. This increase in strength is attributed to the higher amount of NaOH in the cement paste, which accelerates the setting time and allows the paste and concrete to reach strength more quickly, continuing to improve its mechanical resistance compared to other concretes. This factor is the main reason for the better performance of sample AA3.

● The mechanical properties of alkali-activated concrete at a ratio of 1 to 2 showed a decrease of 75% in compressive strength and 69% in tensile strength compared to the control concrete. Similarly, at a ratio of 1 to 1, there was a reduction of 51% and 41% in compressive and tensile strength, respectively, compared to the control lightweight concrete.

● The use of lightweight concrete with high water permeability significantly contributes to the enhancement of aquifers and the infiltration of water into the subsurface

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران
نشریه : https://amcen.razi.ac.ir/
دانشگاه رازی

بررسی خواص مکانیکی بتن با نفوذپذیری بالاقلیا فعال با توجه به میزان نسبت فعال‌سازهای قلیایی

امیر ظهرابی[۱]، رسول عالی پور[۲]✉، علیرضا جهانگیری[۳]

۱. گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد. رایانامه: amir73zohrabi@gmail.com.
۲. نویسنده مسئول، گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد. رایانامه: r.alipour@sku.ac.ir.
۳. گروه عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد. رایانامه: jahangiri@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۲/۱۲/۲۱

تاریخ بازنگری:
۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۳/۰۳/۱۷

تاریخ انتشار:
۱۴۰۳/۰۴/۰۵

کلیدواژه‌ها:
بتن متخلخل، قلیافعال، سـربـاره، سـدیم هیدروکسـید، سدیم سیلیکات، PSO

چکیده

در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی بتن متخلخل قلیافعال در مقایسه با بتن متخلخل بر پایه سیمان پرداخته شده است. در این راستا از سرباره کوره‌های آهن گدازی به عنوان ماده پایه سیمانی و سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات به عنوان مواد قلیا کننده استفاده شده است. بتن متخلخل قلیافعال با محلول سدیم هیدروکسید ۸ مولار با نسبت های سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات ۱به۲ ، ۱به۱ و ۲به۱ ساخته شد. جهت بررسی خواص مکانیکی آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت کششی (تست برزیلی) مطابق با استانداردهای مطرح شده در سنین ۷،۲۸،۹۰و۱۲۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن متخلخل قلیا فعال در نسبت ۱به ۲، ۷۵ و۶۹ درصد کاهش نسبت به بتن شاهد داشته است. همین مقایسه در نسبت ۱ به۱، اعداد ۵۱ و۴۱ درصد کاهش را نشان می‌دهد و در نسبت ۲به۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات مقاومت فشاری ۲۸درصد و مقاومت کششی ۱۲ درصد افزایش نسبت به بتن متخلخل پایه سیمانی در سنین ۱۲۰ روزه را نشان می‌دهد.

استناد: ظهرابی، امیر؛ عالی پور، رسول؛ و جهانگیری، علیرضا (۱۴۰۳). بررسی خواص مکانیکی بتن با نفوذپذیری بالاقلیا با توجه به میزان نسبت فعال سازهای قلیایی. *مجله مدلسازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۱(۱)، ۸۰-۶۵

DOI: 10.22126/amcen.2024.3287

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

در جامعه جهانی بتن از جمله پر مصرف ترین ماده ساختمانی می‌باشد که در حال حاضر نقش بسزایی در توسعه زیرساخت‌های عمرانی و اقتصادی جهان دارد. دلیل استفاده از بتن در این حجم وسیع، فراوانی و در دسترس بودن مواد اولیه و مشخصات فنی ارزنده‌ای همچون شکل‌پذیری، مقاوم در برابر آتش، پایداری در برابر عوامل جوی و ارزان بودن آن هست. با توجه به استفاده بالای بتن در صنعت ساختمان و به طبع آن تولید بسیار زیاد سیمان، اثرات مخرب محیط زیستی فراوانی دارد. در تولید سیمان منابع طبیعی بسیاری مصرف و حجم قابل‌توجهی از دی‌اکسید کربن به محیط‌زیست وارد می‌شود. انرژی مصرف‌شده برای تولید هر تن سیمان پس از آلومینیوم و فولاد بیش‌ترین مقدار هست، که این میزان انرژی معادل ۵ درصد کل انرژی مصرفی در جهان است.

از جمله مهم‌ترین مشکلات فنی تولید سیمان پرتلند نیاز به ۱.۵تن مواد اولیه جهت تولید ۱تن سیمان پرتلند هست که باعث انتشار ۰.۹۴ تن دی‌اکسید کربن در محیط‌زیست هست. تولید سیمان فرآیندی است که با مصرف بالای انرژی همراه است، به‌نحوی‌که برای تولید هر تن کلینکر ۱۷۰۰تا۱۸۰۰ مگاژول انرژی مصرف می‌شود. در فرآیند تولید سیمان به‌طور میانگین ۱۲۰ لیتر سوخت و ۱۱۷کیلووات ساعت برق مصرف می‌شود. در سیستم حمل و نقل نیز ۱۱.۹ درصد از حمل بار جاده‌ای کشور به سیمان اختصاص دارد.

بالا رفتن بازدهی و کارایی کوره‌های تولید سیمان و جایگزین کردن بخشی از سیمان مصرفی با مواد پوزولانی مانند سرباره‌ی کوره بلند، خاکستر بادی و متاکائولین می‌تواند باعث کاهش مصرف سیمان و اثرات مخرب آن شود. در این میان سرباره به عنوان ماده‌ای پوزولانی به دلیل درصد زیاد کلسیم که مانند ساختار شیمیایی سیمان پرتلند می‌باشد، مورد توجه قرارگرفته است. از سرباره می‌توان به تنهایی به‌عنوان چسباننده در بتن استفاده کرد، مشروط بر اینکه سرباره با یک محلول قلیایی با pH بالا وارد واکنش شده و فعال گردد. در ساخت و سازهای حال حاضر سیمان در بین دیگر مصالح بیشترین میزان مصرف را دارد که متأسفانه بتن ساخته شده باسیمان پرتلند عملکرد مناسبی در مواجه با حمله عوامل شیمیایی مانند حمله اسیدی و سولفاتی ندارد و اجزای سیمان پرتلند در تماس با محیط‌های خورنده و مهاجم دچار تجزیه باعث انحلال هیدروکسید کلسیم می‌شود. افزایش دوام مصالح در محیط های خورنده و همچنین مهاجم نیازی اساسی است. مصالح مورداستفاده در محیط‌های خورنده باید مقاومت کافی در برابر محیط‌های اسیدی را داشته باشد. بتن ساخته شده باسیمان پرتلند عملکرد مطلوبی در برابر محیط اسیدی ندارد.

انواع اسیدها به طور کم و زیاد برای بتن مضر می‌باشند، دلیل آن این است که هیدروکسید کلسیم وهمچنین C-S-H موجود در ملات خمیرسیمان در pH<۱۲.۵ ناپایدار هستند. تهاجم ناشی از گاز H_2S از معمول‌ترین حمله‌های اسیدی می‌باشد. نحوه عملکرد نوع اسید تاثیر بسزایی در تهاجم به بتن دارد و در دو حالت می توان طرح کرد، حالت۱ به این صورت می‌باشد که اسید با هیدروکسیدسدیم واکنش داده و نمک کلسیم تشکیل می‌شود و حالت۲ به این صورت می‌باشد که اسید به ژل سیمان نفوذ می کند که این زمانی رخ می‌دهد که هیدروکسیدکلسیم به صورت کامل مصرف شده باشد. ازجمله مواردی که در حمله های اسیدی رایج است می‌توان به فاضلاب دارای گاز سولفید هیدروژن، آب دریا و خاک که حاوی سولفات، اتمسفر شهرهای صنعتی که حاوی سولفور دی‌اکسید، باران اسیدی که حاوی ترکیبی از چند اسید مختلف و صنایع مرتبط با اسید که حاوی اسیدسولفوریک، اسید فلوریدریک و... است، اشاره کرد.

یکی از مسائل بسیار مهم جامعه جهانی مفهوم توسعه پایدار هست. توسعه پایدار به این مفهوم می‌باشد که در دراز مدت از محیط زیست در مقابل اهداف اقتصادی و اجتماعی محافظت گردد و همچنین آسایش و سلامتی انسان‌ها نیز تامین گردد. بتن متخلخل با توجه به خصوصیات قابل توجه آن می‌توان به آن عنوان محصولی با رویکرد توسعه پایدار نگاه کرد. مسئله رواناب‌ها از جمله اهم مسائل در محوطه‌سازی مناطق شهری می‌باشد. رواناب حاصله از بارندگی در مکان‌های شهری مسبب آب‌گرفتگی معابر می‌باشد و باعث بر هم زدن زیبایی و جلوه شهر شده و مشکلات زیادی را برای شهروندان ایجاد می‌کند. در جهت مدیریت رواناب‌های سطحی استفاده از بتن متخلخل گزینه بسیار مناسبی می‌باشد چرا که رواناب را به درون زمین هدایت می‌کند و این امر باعث تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و کاهش فرسایش می‌گردد. بتن متخلخل به دلیل حفرات بالا دارای نفوذپذیری بسیار بالایی هست که این

باعث جلوگیری از جاری شدن سیل می‌شود. بتن متخلخل در مواقع بارندگی آب را به داخل زمین هدایت می‌کند و آب جاری نمی‌گردد، و همین مسئله باعث زیبایی فضای شهری می‌شود.

بتن متخلخل محصولی از سیمان و سنگدانه درشت و مقدار اندکی سنگدانه ریز هست که ۱۵الی ۴۰ تخلخل دارد. بتن متخلخل به علت جذب و زهکشی بالا باعث کاهش حجم رواناب‌ها می‌شود. با استفاده از بتن متخلخل می‌توان مدیریت صحیح رواناب‌ها در مکان‌هایی مانند پارکینگ‌ها و پیاده‌روها ایجاد کرد. ازجمله موارد کاربرد بتن متخلخل استفاده به عنوان روسازی‌های بتنی هست. در سال‌های اخیر در راستای توسعه جوامع به جهت جلوگیری از هدر رفتن آب‌های حاصل از بارندگی و کاهش هزینه‌های بازسازی لایه‌های زهکش از بتن متخلخل استفاده شده است. بارزترین مشکل بتن متخلخل عدم مقاومت لازم در فشار و کشش می‌باشد که علت آن کاهش سیمان نسبت به بتن‌های دیگر می‌باشد.

تکنولوژی بتن متخلخل به‌طور گسترده در کشورهایی مورد استفاده قرار گرفته که بارندگی زیاد دارند و در ایران با توجه به اینکه اقلیم نیمه کویری تا کویری دارد و بارندگی کم اما با شدت است و موجب به وجود آمدن حجم زیادی رواناب در مدت بسیار کم می‌شود، این تکنولوژی باید مورد توجه مدیران قرار گیرد. در این تحقیق با توجه به رویکرد توسعه پایدار در استفاده از بتن متخلخل و همچنین کاهش استفاده از سیمان به علت انتشار آلودگی‌های فراوان و مصرف انرژی بسیار زیاد به طراحی و ساخت بتن متخلخل قلیا فعال پرداخته شده است که ازنظر زیست محیطی بسیار قابل توجه هست.

در ساخت بتن متخلخل قلیا فعال از سرباره، سنگدانه، آب و مواد فعال‌کننده قلیایی استفاده می‌شود. مواد فعال‌ساز قلیایی مورد استفاده سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات هست. به علت استفاده از مواد قلیا کننده و اهمیت آن در بحث دوام بتن به بررسی میزان غلظت‌های مواد قلیا کننده سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات بر مشخصات مکانیکی و دوام پرداخته شده است.

۲. مروری برتحقیقات گذشته

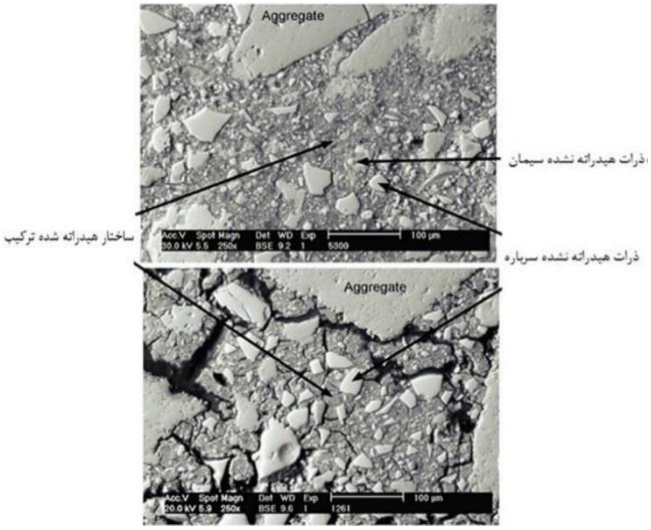
کهل نخستین بار از ماده‌ای که ساختار آن دارای آلومینوسیلیکات قلیا فعال است جایگزین سیمان پرتلند استفاده کرد. ایده‌ی تأثیر قلیاها بر سرباره در سال ۱۹۴۰ توسط پوردن مطرح شد و از سرباره‌ی خالص برای ساخت بتن استفاده کرد .او به وسیله فعال‌کردن سرباره‌ی کوره بلند با کمک محلول قلیایی و آهک، چسبی تولید نمود که مقاومت نهایی مناسبی داشت و از لحاظ خمش و کشش نیز از مقاومت خوبی برخوردار بود که در این فرآیندچسب سخت شده دارای انحلال پذیری کم و حرارت زایی پایینی بود[۱]. المو و همکاران خود در سال ۱۹۹۹ مکانیزم‌های قلیافعال را به دو دسته تقسیم کردند. دسته اول به این صورت عمل می کرد که سرباره کوره بلند (Ca+Si) توسط محلول‌های قلیاکننده که درآن ژلC-S-H تولید می‌شود و در دسته دوم فعال کننده‌ها موادی دارای سیلیس و آلومینا(Al+Si) با قلیاییت بالا مانند متاکائولین و خاکستر بادی F مناسب هستند[۲].

پال و همکاران در سال ۲۰۰۳ در پژوهشی بیان کردند که سرباره با فاز شیشه‌ای کم ٪(۳۰-۶۵) نیز می‌تواند نتیجه های نسبتاً خوبی را به دنبال داشته باشد[۳].

برنال و همکاران در سال ۲۰۱۱ تأثیر میزان خمیر در عملکرد بتن قلیا فعال سرباره‌ای را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که نفوذپذیری، جذب آب و مقاومت در برابر فرآیند کربناسیون بتن قلیا فعال، با افزایش مقدار فاز خمیری بهبود می‌یابد[۴]. دیامونی و همکاران در سال۲۰۱۲ دوام خمیرمحصول قلیا فعال ساخته شده با پودر سرباره و خمیر سیمان ضد سولفات در آب دریا را بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که بعد از قرار دادن آزمونه‌ها در شرایط عمل آوری آب دریا به مدت ۱۲ماه، خمیرهای ساخته شده به صورت قلیا فعال افت کمتری در مقاومت فشاری داشتند و این نشانگر کارایی بهتر سیستم قلیا فعال در مواجه با آب دریا می‌باشد[۵]. ماچیه چی در سال۲۰۱۲ تحقیقی را بر روی تأثیر درصد محلول قلیایی و عمل‌آوری بر روی مشخصات مکانیکی و دوام بتن قلیا فعال سرباره‌ای انجام داد. در این تحقیق از سرباره کوره بلند به‌عنوان ماده آلومینا-سیلیکاتی و از هیدروکسید سدیم و سدیم سیلیکات با نسبت SiO_2/NaO_2 دو، به‌عنوان محلول قلیا فعال استفاده‌شده است. نتایج این بررسی نشان داد که بتن قلیا فعال سرباره‌ای مقاومت

فشاری، مقاومت کششی، مقاومت در برابر دمای بالا و مقاومت در برابر حمله سولفاتی بهتری از بتن باسیمان پرتلند از خود نشان می‌دهد. همچنین در این تحقیق بیان‌شده است که بحث دوام بتن قلیا فعال سرباره‌ای به درصد مصرفی محلول قلیا فعال وابستگی نزدیکی دارد و عمل‌آوری بتن قلیا فعال سرباره‌ای در رطوبت نسبی ۸۰درصدی و دمای ۶۰درجه سانتی‌گراد، بهترین عملکرد در خواص مکانیکی و دوام این بتن‌ها را نتیجه می‌دهد[۶].

کوملجنویچ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بتن های قلیا فعال را در شرایط سولفاتی قرار دادند و نسبت به بتن با سیمان پرتلند مقایسه کردند و نتیجه حاکی از آن شد که بتن قلیا فعال عملکرد مناسب‌تری داشت و علت آن نبود هیدرکسید کلسیم در بتن قلیا فعال برای واکنش زایی با سولفات می‌باشد[۷]. چاو وهمکاران در سال ۲۰۱۰ بر اساس بررسی‌ها و نتایج مختلف به این موضوع دست یافتند که فعال‌کننده های قلیایی سرباره با استفاده از سیستم سلیسی و کلسیم می‌باشد و ژئوپلیمر آن یک نوع پودر سیلیسی الومینی است که متاکائولین و خاکستر بادی از جمله مصالح اصلی بر پایه ژئوپلیمری می‌باشند. آن‌ها همچنین مقایسه‌های متفاوتی میان دو سیمان انجام دادند و گزارش کردند که متاکائولین به علت بلین بالا و صفحه‌ای بودن درات تشکیل دهنده آن باعث جذب آب بیشتری می‌شود که باعث ترک خوردگی و انقباض می‌شود[۸]. اتکینسون و همکاران در سال ۲۰۰۲ با مطالعه و بررسی سیمان قلیا فعال سرباره‌ای در سنین اولیه به این موضوع دست یافتند که ترک‌های ریزی در اطراف سنگدانه‌ها وجود دارد ولی به مرور زمان با افزایش سن و کامل‌تر شدن هیدراتاسیون میزان ترک ها کاهش پیدا کرد و با توجه به تصاویر قسمت‌های میانی آزمونه‌ها رنگی تیره داشت[۹]. سانگ و همکاران طبق تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۰ بر روی ریزساختار بتن‌های قلیا فعال سرباره‌ای که به واسطه‌ی NaOH فعال‌شده‌اند، مستقل از غلظت محلول، به هم شباهت داشتند و تصاویر میکروسکوپ‌های الکترونی نشان می‌دهند که دارای ساختاری یکنواخت و مشابه هستند[۱۰].



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی بتن سرباره‌ای وبتن قلیا فعال سرباره‌ای[۱۱].

گلوخوفسکی و همکارانش در سال ۱۹۷۹ با بررسی نمودن خمیرهای قلیا فعال ساخته شده با سرباره‌ی کوره آهن گدازی با ۲۹ ماده پایه به این نتیجه رسیدند که بیشترین و حداکثر مقاومت برای خمیر قلیا فعال سرباره حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد Al_2O_3 بوده و بین ۴۰تا۵۰ درصد CaO که عمل آوری و ماهیت فعالسازی در این شرایط دخیل نمی‌باشد و به هر میزان این ترکیبات کاهش پیدا کند مقاومت نیز کاهش خواهد یافت[۱۲]. بر اساس تحقیقات تالینگ و براندستر در سال ۱۹۸۹ اگراز ترکیب شیمیایی انواع سرباره‌ها صرف نظر کرد، در صورتی می توان به خوبی ازسرباره برای تولید بتن قلیا فعال استفاده کرد که نسبت CaO به SiO_2 در سرباره بین۰.۲ تا ۰.۵ و نسبت Al_2O_3 به SiO_2 بین ۰.۱تا ۰.۶ باشد[۱۳]. باخاویار و همکارانش در سال ۱۹۹۹ تحقیقات خود را روی فعال‌سازی سرباره‌ی استرالیایی انجام دادند. آنها از هیدروکسید سدیم، کربنات سدیم، فسفات سدیم، سیلیکات سدیم و مخلوطی از این مواد برای فعال نمودن سرباره استفاده کردند و نسبت آب به مواد سیمانی را برابر ۰.۵ در نظر گرفتند و عمل‌آوری تمام نمونه ها در دمای اتاق انجام شد. نتایج به دست آمده از مقاومت فشاری نشان می‌دهد که سرباره‌ی فعال‌شده با

سیلیکات سدیم بیشترین مقاومت را دارد. آن‌ها ثابت نمودند زمانی که غلظت Na_2O ٪۴ باشد بهترین کارایی و راندمان در مدول ۰.۷۵ به دست می آید که با افزایش مدول، کارایی کاهش یافت، به‌طوری‌که در مدول ۱.۵ کمترین کارایی به دست آمد. علت آن این است که با افزایش غلظت Na_2O، افزایش مقاومت فشاری ناچیز بوده و سبب میشود کارایی کاهش یابد.توصیه می‌شود ازغلظت ۴٪ در مخلوط سرباره‌ی فعال‌شده با سیلیکات استفاده نمود[۱۴]. کربزان و زیوانوویچ در سال ۲۰۰۲ نیز نشان دادند که سیلیکات سدیم با مدول ۰.۶ تا ۱.۵ بیش‌ترین مقاومت نهایی را نتیجه می‌دهد[۱۵].

چنگ و چیو در سال ۲۰۰۳ در مورد خصوصیات سرباره مخلوط با متاکائولین و فعال شده با سیلیکات سدیم و هیدروکسید پتاسیم تحقیقاتی انجام دادند. آن‌ها زمان گیرش را با سوزن ویکات اندازه گرفتند و به این نتیجه رسیدند که زمان گیرش با غلظت هیدروکسید پتاسیم رابطه دارد. به این صورت که با افزایش غلظت هیدروکسید پتاسیم، زمان‌گیرش افزایش یافته وچیزی که بر مقاومت فشاری بتن قلیا فعال اثر دارد، غلظت هیدروکسید پتاسیم بوده و اگرغلظت تا ۱۰ مولار افزایش یابد ابتدا مقاومت افزایش و بعد کاهش می‌یابد که علت آن وجود مقدار زیادی از یون‌های پتاسیم است[۱۶].

محمدعامر و همکاران در سال ۲۰۱۳ در مطالعه‌ای به بررسی بتن متخلخل با استفاده از سنگدانه های بازیافتی پرداختند. نسبت مخلوط بهینه برای تهیه بتن متخلخل با استفاده از سنگدانه های معمولی و بازیافتی استفاده شد .با استفاده از آزمایش‌های نسبت فضای خالی، ضریب نفوذپذیری، مقاومت فشاری و خمشی اثر سنگدانه بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. پودر پلیمری و لاتکس مبتنی بر لاستیک استایرن بوتادین برای بهبود خواص مقاومتی به مخلوط بتن اضافه شد. نسبت فضای خالی کل بتن متخلخل حاوی سنگدلنه بازیافتی بزرگ‌تر از بتن متخلخل با سنگدلنه معمولی بود. افزودن اصلاح کننده پلیمری منجر به کاهش جزئی در نسبت فضای خالی شد. مقاومت فشاری بتن متخلخل با استفاده از سنگدانه بازیافتی کمتر از سنگدانه معمولی بود. بااین‌حال، مقاومت فشاری بتن‌های متخلخل با استفاده از سنگدانه‌های معمولی و بازیافتی به‌طور قابل‌توجهی به ترتیب ۵۷٪ و ٪۷۹ به دلیل اصلاح پلیمر بهبود یافت. استفاده از سنگدانه بازیافتی همراه با محتوای بهینه پلیمر می‌تواند بتن متخلخل قابل قبولی را با خواص زهکشی و مقاومت کافی تولید کند[۱۷].

توسعه مواد روسازی با استفاده از سنگ دانه‌های لاستیکی رویکردی مؤثر برای استفاده گسترده از لاستیک‌های زائد است. شن و همکاران در سال۲۰۱۳ در تحقیقی یک بتنی متخلخل اصلاح شده با خاک رس پلیمری به‌عنوان ماده مسیر اصطکاک روسازی ساختند که ازجمله خواص آن، مقاوم به فشار، مقاوم به سایش، مقاوم به ضربه است. نتایج نشان می‌دهد که بتن متخلخل اصلاح‌شده با سنگدانه های پلیمری با نسبت جایگزینی بهینه سنگدانه های لاستیکی به سنگدانه‌های معدنی، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن متخلخل اصلاح شده با سنگدانه های معدنی با پلیمر معمولی دارد. با توجه به مشاهداتSEM، ناحیه انتقال بین سطحی بین لاستیک و خمیر سیمان توسط پلیمر افزایش می‌یابد، مخلوط شدن پلیمر در بتن و جایگزینی ذرات لاستیکی شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری آن را افزایش می‌دهد[۱۸].

کیم و لی در سال ۲۰۱۰ تأثیر جریان سیمان و نوع سنگدانه بر ویژگی‌های مکانیکی و صوتی بتن متخلخل به‌طور سیستماتیک موردبررسی قراردادند. سه سطح جریان سیمان (۸۰ ٪، ۱۱۰ ٪ و ۱۴۰ ٪) و پنج نوع سنگدانه (سنگدانه های معمولی ۸ - ۱۳ mm و ۱۳ - ۱۹ mm و سنگدانه های سبک ۴ - ۸mm، ۸ - ۱۲ mm و ۱۲ - ۱۹mm) مورداستفاده قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این تحقیق، یک بتن متخلخل جاذب صدا با حداکثر ضریب جذب تقریباً ۱.۰۰ توسعه داده شده است و حداقل ضریب جذب ساختار بتن متخلخل دولایه‌ای با فرکانس ۴۰۰ هرتز یا بالاتر با در نظر گرفتن خطای تلورانس بیش از ۰.۶۰ نشان داده شده است[۱۹].

چینداپراسیرت و همکاران در سال ۲۰۰۸ ویژگی‌های خمیر سیمان و ویژگی‌های بتن متخلخل را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های خمیر سیمان به نسبت آب به سیمان(W/C) ، ترکیب و زمان مخلوط شدن بستگی دارد. خمیر سیمان با ویسکوزیته بالا و جریان بالا مناسب برای ساخت بتن متخلخل با استفاده از W/C پایین ۲۰ / ۰ - ۲۵ / ۰، ترکیب ۱ ٪ فوق روان‌کننده ساخته شد. بتن‌های با تخلخل خوب با نسبت تخلخل ۱۵ - ۲۵ ٪ و استحکام

۲۲ - ۳۹ MPa با اســـتفاده از خمیر با جریان ۱۵۰ - ۲۳۰ mm تولید می‌شوند. برای نسبت تخلخل پایین، بتن متخلخل با استحکام بالا با فشـــار ۳۹ MPa با اســـتفاده از خمیر با جریان کم به دســـت می‌آید. برای نسبت فضای خالی بالا، بتن متخلخل ۲۲ مگا پاسکال با استفاده از خمیر با جریان بالا به دست می‌آید. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که مقاومت بتن متخلخل را می‌توان از رابطه مقاومت ماده شکننده متخلخل تخمین زد[۲۰].

سارونو و همکاران در سال ۲۰۱۷ در مطالعه‌ای به بررسی روسازی ساخته‌شده با بتن متخلخل پرداختند. روسازی‌ها معمولاً به‌عنوان یک‌لایه غیرقابل نفوذ برای محافظت از سطح زیرین در برابر نفوذ آب برنامه‌ریزی می‌شدند که باعث تضعیف قابلیت باربری لایه زیرین می‌شود .بااین‌حال، هر چه مساحت بیشتری از ورود آب محافظت شود منجر به جریان سطحی فراوانی می‌شود که باعث کاهش مناطق سبز می‌شود که بر کاهش حوضه آبریز تأثیر می‌گذارد .برای پیش‌بینی این مشکل، استفاده از لایه روسازی قوی‌تر، اما سازگار با محیط‌زیست‌تر که به آب اجازه می‌دهد از لایه عبور کرده و به سطح زیرین جذب شود که می‌تواند جریان سطح را قطع کند اما قدرت لایه را حفظ کند، انتظار می‌رود. هدف از چنین لایه‌ای برای جاده‌های کم ترافیک امکان‌پذیر است. در این مطالعه طراحی مقاومت مناسب بتن متخلخل پرشده با خاک و ماسه برای جاده کم‌حجم موردبررسی قرارگرفته است. پس از ساخت نمونه‌های بتنی فضاهای خالی هر نوع بتن متخلخل با خاک، ماسه طبیعی و ماسه آتش‌فشانی پر شد. سپس نمونه‌های پرشده ازنظر نفوذپذیری آب، سرعت جذب و مقاومت فشاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. بالاترین نفوذپذیری عمودی و افقی با نمونه‌های پرشده با ماسه طبیعی به ترتیب با ۰.۳۸ سانتی‌متر در ثانیه و ۰.۳۶۴ سانتی‌متر در ثانیه به دست آمد. نرخ جذب بالاترین مقدار ۰.۳۳۷ را برای بتن متخلخل پرشده با ماسه طبیعی به دست می‌آورد .مقدار مقاومت فشاری بالا ۵.۷۱ MPa متعلق به بتن متخلخل پرشده با ماسه آتش‌فشانی است .بااین‌حال، توصیه می‌شود که بتن متخلخل پرشده فقط برای جاده‌های کم‌حجم مانند شانه‌های جاده، پارکینگ‌ها و مسیرهای عابر پیاده مناسب باشد[۲۱].

۳. بتن قلیا فعال

در روزگاران قدیم سازندگان بناها سعی می‌کردند موادی چسباننده پیدا کنند که سنگ‌ها و آجرها را به هم متصل نماید. استفاده از این مواد چسباننده برای سازندگان دارای اهمیت خاصی بود زیرا در بنا شکل پذیری بهتری در مقایسه با زمان‌های قدیم که صرفاً بلوک‌های سنگی را روی هم قرار می‌دادند، داشت. شاید یک نوع لجن ساده یکی از مواد چسباننده بوده است. ملات امروزه متشکل از سیمان، سنگدانه ریز و آب می‌باشد[۲۲].

در ســـال‌های اخیر مواد نوینی در صـــنعت شـــیمی ورود کرده اند، ازجملـه ژئوپلیمر کـه کـاربردهـای گونـاگون و مختلفی دارد. از کاربردهای آن در پزشـکی، سـاخت مواد سـرامیک در دمای زیاد و بالا، پوشش های مقاوم در برابرآتش با گرمای بالا، جایگزین کردن سـیمان در بتن‌های جدید و ... را نام برد. ژئوپلیم ها زیر مجموعه علم پلیمر در شـیمی می باشـد که بخش اعظمی از علم مواد را شـامل می‌گردد. پلیمرها به دو دسـته تقسـیم می‌شـوند: پلیمرهای معدنی کـه پلیمرهای بر پایـه کربن را گوینـد و پلیمرهـای غیر معدنی، پلیمرهایی که بر پایه سـیلیکن هسـتند. ژئوپلیمر ها نیز به دو گروه اصلی ژئوپلیمرهای کاملاً غیر معدنی و ژئوپلیمرهای شامل مواد معدنی که از مقادیر مصـنوعی از مولکول‌های طبیعی تشـکیل شده‌اند تقسیم می‌شوند[۲۳].

بتن قلیا فعال که به نوعی بتن ژئوپلیمری نیز به شمار می‌رود حاصل ترکیب مواد سیمانی مختلف، محلول ژئوپلیمری با سنگدانه می‌باشد.

۱.۳. کاربرد ژئوپلیمرها مورد استفاده در بتن قلیا فعال

در این قسمت به بررسی موارد استفاده از ژئوپلیمر با توجه به میزان و مقدار نسـبت سـیلیکون به آلومینیوم که متفاوت اسـت خواهیم پرداخت.

جدول ۱. کاربردهای مختلف ژئوپلیمرها[۲۴].

موارد استفاده	نسبت Si:Al
آجر- سرامیک- محافظت در برابر آتش	۱
بتن- کپسوله سازی مواد رادیواکتیو و دورریختنی های سمی	۲
کامپوزیت‌های فایبر گلاس مقاوم در برابر آتش- تجهیزات ریخته گری- کامپوزیت های مقاوم در برابر گرمای ۲۰۰ الی ۱۰۰۰ درجه- ابزار های تیتانیمومی ایرودینامیک	۳
صنعت مهر و موم بین ۲۰۰ الی ۶۰۰ درجه- ابزار الومینیومی ایرودینامیک	>۳
کامپوزیت‌های مقاوم در برابر آتش و گرما	۳۵-۲۰

۱.۳. مشخصات مصالح مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتنی مختلف مصالح مصرفی به طریقی که در ادامه توضیح داده شده است، آماده و مورد آزمایش قرار گرفته است.

۱.۲.۳. سیمان

ماده‌ای است چسبنده که قابلیت چسبانیدن ذرات به یکدیگر و به‌وجود آوردن جسم یکپارچه و محکم از ذرات متشکله را دارا می‌باشد و از ترکیب مصالح آهکی، رس، و اکسیدهای معدنی در دمای ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد ساخته می‌شود. به جسم ایجاد شده، پس از حرارت دادن کلینکر گویند و از آسیاب کردن آن به همراه مقدار مناسبی سنگ گچ سیمان تیپ‌های مختلف بدست خواهد آمد و همچنین اضافه کردن پوزولان به کلینکر و گچ، سیمان پوزولانی حاصل می‌گردد. اندازه دانه‌های کلینکر ۲۰–۵ میلی‌متر و رنگ آن سبز تیره می‌باشد.

شکل ۲. سیمان پرتلند

برای ساخت ملات شاهد در این پروژه از سیمان تیپ ۲ اردستان با مشخصات فنی زیر استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان استفاده شده (سیمان تیپ II اردستان) جهت تهیه نمونه‌های بتنی [۲۷].

آزمایش فیزیکی سیمان بر اساس استاندارد DIN 1164، ISIR 389		
مشخصات فیزیکی		
نرمی	بلین (سطح) (سانتیمتر مربع بر گرم)	۳۰۰۶
	آب مصرفی	۲۵
درصد انبساط اتوکلاو		± ۰/۰۲ ۰/۰۸۵
مقاومت فشاری (مگا پاسکال)	۳ روزه	۱۹ ± ۲
	۷ روزه	۲۹/۵ ± ۲
	۲۸ روزه	۴۶/۱ ± ۲
مقاومت خمشی (مگا پاسکال)	۳ روزه	۴۷
	۷ روزه	۶۶
	۲۸ روزه	۸۵
حرارت هیدراسیون ۷ روزه (کالری بر گرم)		۶
درصد افت اشتعال (٪)		-
سطح مخصوص (سانتیمتر مربع بر گرم)		۳۵۷۰
وزن مخصوص (گرم بر سانتیمترمکعب)		± ۰/۰۱ ۳/۱۳

جدول ۳. مشخصات شیمیایی سیمان استفاده شده (سیمان تیپ II اردستان) جهت تهیه نمونه‌های بتنی

آزمایش شیمیایی سیمان بر اساس استاندارد DIN 1164، ISIR 389			
ترکیب	درصد	ترکیب	درصد
L.O.I.[1]	۰/۵۵	Na_2O	۰/۳۱ ± ۰/۰۵
I.R.[2]	۰/۴۱ ± ۰/۱	K_2O	۰/۶۳ ± ۰/۰۶
SiO_2	۲/۹ ± ۰/۳	C_3S	۳۹/۳
Al_2O_3	۵/۰۵ ± ۰/۱۵	C_2S	۳۴/۷
Fe_2O_3	۴/۴۵ ± ۰/۲۵	C_3A	۵/۸۵
CaO	۶۲/۱۵ ± ۰/۵	C_4AF	۱۳/۵۴
MgO	۲/۲۷ ± ۰/۱۸	Free CaO	۰/۶۷
So_3	۲/۱۹ ± ۰/۱۵	Cl^-	۰/۰۰۷

[1] Loos of Ignition

[2] Insolouble Residue

۲.۲.۳. سرباره کوره ذوب آهن (GGBFS)

در کوره‌های ذوب آهن هنگام سرد شدن آهن یا فولاد، یک محصول جانبی تولید می‌شود که به آن سرباره کوره ذوب آهن گویند. ولی این سرباره به صورت خام قابل استفاده نیست. مواد تشکیل دهنده آن همانند خاکستر بادی بسته به مواد اولیه ورودی در کارخانه متغیر است.

جدول ۴. درصد مواد تشکیل دهنده سرباره کوره ذوب آهن [۲۵].

مواد	درصد موجود
SiO_2(%)	۳۸-۲۸
Al_2O_3(%)	۲۴-۸
MgO(%)	۱۸-۱
CaO(%)	۵۰-۳۰

در بتن می‌توان ۲۰ الی ۸۵ درصد سرباره کوره ذوب آهن را با سیمان یا دیگر مواد پوزولانی استفاده کرد. از خواص این ترکیبات می‌توان به افزایش دوام، سفید شدن رنگ بتن (در مناطقی که رنگ بتن جهت معماری مد نظر است) و کاهش نیاز به مراقبت بتن اشاره کرد. در مناطقی که بتن در معرض خورنده‌ها قرار دارد، می‌توان از این ماده استفاده کرد.

شکل ۳. سرباره کوره آهن گدازی

۳.۲.۳. سنگدانه

سنگدانه‌ها در بتن تقریباً سه چهارم حجم آن را تشکیل می‌دهند. ازاین جهت مقدار کیفیت آن‌ها از اهمیتی ویژه برخوردار می باشد. سنگدانه‌ها نه تنها در مقدار مقاومت بتن بسیار موثرند بلکه دوام و پایداری بتن نیز، تا حد بسیار زیادی تحت تأثیر ویژگی این مواد قرار دارد. از منظر اقتصادی مصرف هر چه بیشتر سنگدانه در بتن که نتیجه آن کم کردن مصرف سیمان سودمند است. جنبه اقتصادی میزان نسبت‌های اختلاط باید با ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده سازگار باشد. دانه‌های سنگ دانه‌ای طبیعی معمولاً در اثر هوازدگی و فرسایش یا به طور مصنوعی از طریق خرد کردن سنگ‌های مادر حاصل می‌گردند. از این رو بسیاری از خواص اثر سنگدانه در مقدارکیفیت بتن نظیر ترکیبات شیمیایی و کانی‌های تشکیل دهنده طبقه‌بندی و مشخصات از نظر سنگ شناسی، جرم واحد حجم، سختی و مقاومت، پایداری فیزیکی و شیمیایی، تخلخل و خواص دیگر بستگی به خصوصیات سنگ مادر دارد. به علاوه خواص و ویژگی‌های دیگری مانند شکل و اندازه دانه‌ها، بافت و جذب سطحی در سنگدانه‌ها مطرح می‌باشدکه ارتباطی به سنگ مادر ندارد.

شکل ۴. نمونه سنگدانه‌ها

جدول ۴: دانه‌بندی ریزدانه‌های تهیه‌شده بر اساس استانداردهای ASTM

اندازه الک (ASTM)	وزن مانده روی الک (گرم)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی عبوری از الک	ASTM C33 (max)	ASTM C33 (min)
۳/۸ اینچ	۶/۵۹	۰/۲۲	۰/۲۲	۹۹/۷۸	۱۰۰	۱۰۰
نمره ۴	۵۳۶/۶۰	۱۷/۹۶	۱۸/۱۸	۸۱/۸۲	۱۰۰	۹۵
نمره ۸	۷۵۲/۱۰	۲۵/۱۷	۴۳/۳۵	۵۶/۶۵	۱۰۰	۸۰
نمره ۱۶	۶۷۸/۶۰	۲۲/۷۱	۶۶/۰۶	۳۳/۹۴	۸۵	۵۰
نمره ۳۰	۳۷۹/۴۰	۱۲/۷۰	۷۸/۷۶	۲۱/۲۴	۶۰	۲۵
نمره ۵۰	۱۵۲/۳۰	۵/۱۰	۸۳/۸۶	۱۶/۱۴	۳۰	۵
نمره ۱۰۰	۳۱۹/۵۰	۱۰/۷۰	۹۴/۵۶	۵/۴۴	۱۰	۰
سینی	۱۶۲/۶۰	۵/۴۴	-	-	-	-
مجموع	۲۹۸۷/۶۹		۳۸۴/۹۹			

جدول ۵. میزان رطوبت کلی و جزئی و سطحی سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ‌دانه	میزان رطوبت کلی برحسب درصد	میزان رطوبت جزئی برحسب درصد	میزان رطوبت سطحی برحسب درصد
سنگ‌دانه ریز	۰.۷۷	۰.۳۳	۰.۶۴
سنگدانه درشت	۰.۳۲	۰.۱۵	۰.۳۸

جدول ۶. چگالی سنگ‌دانه های مورداستفاده در تهیه بتن

نوع مصالح	سنگ‌دانه ریز	سنگدانه درشت
دانسیته	۲/۵۷	۲.۶۱

۴.۲.۳. سیلیکات سدیم

نام عمومی و متداول ترکیب سدیم متا سیلیکات یا SiO_2Na_3، سیلیکات سدیم است و به آب شیشه یا شیشه مایع نیز شناخته می‌شود. این ماده به شکل محلول آبی و جامد در دسترس است و در صنعت سیمان، حفاظت غیر فعال آتش، دیر گدازها، نساجی، فرآوری الوار و اتومبیل‌ها کاربرد فراوانی دارد. سیلیکات سدیم نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی می‌باشد که در سال ۱۶۴۰ برای اولین بار توسط ون هلمونت کشف گردید. از این ماده به شکل محلول مایع در صابون سازی، پاک کننده‌های صنعتی، چسب، سیمان سازی، رنگ، قالب ریخته گری، پایدار سازی پراکسید و کنترل خوردگی در لوله‌های آب و پیش ماده‌ی سیلیس مخلوط زئولیت قابل استفاده هست.

شکل ۵: سدیم سیلیکات خشک پودری

شکل ۶. سدیم سیلیکات محلول

۵.۲.۳. سدیم هیدروکسید

سدیم هیدروکسید (sodium hydroxide) یا کاستیک سودا (caustic soda) و یا سود سوزآور که رابطه شیمیایی آن NaOH است، ماده‌ای جامد و سفیدرنگ با دمای ذوب ۱۳۹۰ درجه سانتی گراد و چگالی ۲/۱۳ است. این ترکیب به راحتی رطوبت هوا را جذب می‌کند به همین خاطر هنگام حمل و نقل باید دارای پوشش‌های حفاظتی لازم باشد. این ماده اگر در تماس با پوست قرار داده شود سبب خورندگی می‌شود به همین خاطر هنگام استفاده از آن، باید مورد توجه قرار گیرد. آبپوش‌های آن شناخته شده‌اند و محلول قلیایی قوی در آب به وجود می‌آورد، به این صورت که در آب کاملاً به یون‌های تشکیل دهنده‌اش (Na^+ و OH^-) جدا می‌شود. سدیم هیدروکسید، به دلیل آن که یک باز قوی می باشد، یکی از مواد شیمیایی صنعتی بسیار مهم بشمار می‌آید به طوری که تولید سود در سال ۱۹۸۰ درآمریکا، ۱۲ میلیون تن میزان آن بوده است. ازجمله کابردهای این ماده، تولید مواد شیمیایی، ابریشم مصنوعی، خمیر کاغذ وکاغذ، تولید رنگ، آلومینیوم، مواد پتروشیمی و پارچه، صابون و مواد شوینده است. در آزمایشگاه‌ها از محلول قلیایی سدیم هیدروکسید استاندارد برای تعیین غلظت اسیدهای مجهول درتیتراسیون اسید باز استفاده می‌گردد. در صنایع غذایی از این ماده متاسفانه جهت تلخی زدایی از زیتون استفاده می‌گردد که ممکن است اثرات نامطلوبی بر سلامت مصرف‌کنندگان اعمال نماید. سود سوزآور به شکل مایع و جامد در

کارخانه‌ها تولید می‌گردد لذا سود مایع با خلوص ۵۰ درصد و ۳۳ درصد وجود دارد و کیفیت بالایی دارا بوده و برای صادرات معمولاً

از سود مایع استفاده می‌گردد. سود مایع بخاطر قیمت نازلتر بیشتر مورد استقبال قرار می‌گیرد.

شکل ۷. سدیم هیدروکسید

۶.۲.۳. آب

آب نقش اساسی و بسیار مهمی در بتن دارد به همین منظور استفاده از آب مناسب در بتن همواره باید مورد توجه قرار گیرد. استفاده از آب نامناسب در بتن مسائل و مشکلاتی نظیر به تاخیر انداختن زمان گیرش سیمان، خوردگی تدریجی میلگردها، کاهش مقاومت نهایی بتن و ... می‌گردد.

۳.۳. طرح اختلاط

۱.۳.۳. طرح اختلاط بتن متخلخل پایه

طرح اختلاط بتن متخلخل طراحی شده بر پایه سیمانی می‌باشد که به‌عنوان نمونه شاهد جهت مقایسه با بتن های قلیا فعال متخلخل ساخته شده با سرباره کوره آهن گدازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طرح اختلاط این بتن برای ۱ متر مکعب به صورت جدول ۷ در نظر گرفته شده است.

جدول ۷. طرح اختلاط بتن متخلخل پایه (شاهد)

کد نمونه	آب(ml)	سیمان (gr)	ماسه (gr)	سنگدانه (gr)	نسبت آب به سیمان (٪)
OPC	۱۱۵	۳۵۰	۱۰۰	۱۴۱۰	۳۲.۸

۲.۳.۳. طرح اختلاط بتن متخلخل قلیا فعال

برای ساخت بتن متخلخل قلیا فعال در این پروژه از سرباره کوره آهن گدازی ذوب آهن، محلول سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات استفاده شده است. محلول سدیم هیدروکسید از ۲۴ ساعت قبل با مولار مشخص شده آماده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پروژه محلول سدیم هیدروکسید با مولاریته ۸ ساخته شده است. طرح اختلاط‌های بتن متخلخل قلیا فعال مطابق جدول ۸ در نظر گرفته شده است.

جدول ۸. طرح اختلاط بتن قلیافعال متخلخل

کدنمونه	سرباره gr	ماسه gr	درشت دانه	مولار محلول سدیم هیدروکسیدgr	محلول سدیم هیدروکسید gr	محلول سدیم سیلیکات gr	روان کننده gr	W/C
AA1	۳۵۰	۱۰۰	۱۴۱۰	۸	۴۶.۶۵	۹۳.۳۲	-	۳۲.۸
AA2	۳۵۰	۱۰۰	۱۴۱۰	۸	۷۰	۷۰	-	۳۲.۸
AA3	۳۵۰	۱۰۰	۱۴۱۰	۸	۹۳.۳۲	۴۶.۶۵	-	۳۲.۸

۳.۳.۳. نحوه اختلاط و عمل آوری

نحوه اختلاط مصالح به صورت زیر انجام شد:

ابتدا مصالح سنگی به صورت کامل در مخلوط کن ریخته سپس ۲/۳ آب طرح اختلاط را اضافه کرده و به مدت ۲دقیقه مخلوط کن را شروع نموده تا آب و مصالح سنگی با یکدیگر مخلوط شده و سنگدانه‌ها آب مورد نیاز جهت اشباع سطحی را استفاده کنند. در مرحله بعدی مواد سیمانی را اضافه کرده و بعد از آن محلول‌های سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید را به مخلوط اضافه کرده تا به مدت ۵ دقیقه با یکدیگر مخلوط شوند.

بعد از ۵ دقیقه مخلوط شدن مصالح و مواد سیمانی بتن را درون قلب های مکعبی و استوانه ای جهت انجام آزمایش های طراحی شده قالب گیری می‌کنیم.

شکل ۸. عکس قالب گیری بتن

عمل آوری فرآیندی است که طی آن از کاهش رطوبت بتن جلوگیری و دمای آن در حد دمای استلاندارد بتن در مدت زمان عمل آوری تقریباً ثلبت نگه داشته می‌شود .عمل آوری در بتن سخت شده بر میزان نفوذپذیری، مقاومت و دوام بتن تأثیر مثبتی دارد.

۴.۳. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی

۱.۴.۳ آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن طبق استاندارد ASTM C39 انجام می‌گیرد. برای تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ سانتی متر ساخته و عمل آوری می‌کنیم. بر طبق استاندارد بتن تهیه شده در قالب‌های مکعبی در دو مرحله و هر مرحله به ضخامت ۵ سانتی متر و ۲۵ ضربه کوبیده شود. بعد از کوبیدن سطح نمونه صاف شود. نمونه‌ها ۲۴ ساعت در محل مناسبی بدون اینکه تکان بخورند نگهداری می‌شوند. بعد از ۲۴ ساعت قالب هارا باز کرده و در آب جهت عمل آوری گذاشته می‌شود تا به سن مورد نظر برسد، سپس با استفاده از جک بتن شکن ملاحظه می‌کنید مقاومت فشاری ۷، ۲۸ ،۶۰ و ۹۰ روزه نمونه‌ها تعیین می‌شود[۲۵].

۲.۴.۳. آزمایش مقاومت کششی تست برزیلی

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن (splitting tensile strength) یا تست برزیلی در استاندارد ملی ایران ۶۰۴۷ و ASTM C496 شرح داده شده است[27].

اگر چه معمولا بتن به گونه ای طراحی نمی گردد که تنش کششی مستقیم را تحمل نماید، ولی دانستن مقاومت کششی بتن در تخمین باری که ترک ها در آن توسعه می یابند، با ارزش است. عدم وجود ترک در حفظ تداوم سازه های بتنی و در بسیاری موارد در جلوگیری از خوردگی میلگردهای فولادی حائز اهمیتی قابل توجه است.

مقاومت در کشش همچنین در سازه های بتنی غیر مسلح مانند سدها تحت شرایط زلزله مورد توجه می باشد. سازه های دیگر مانند جاده ها و فرودگاه ها بر اساس مقاومت خمشی که در برگیرنده مقاومت کششی می شود طراحی می گردند.

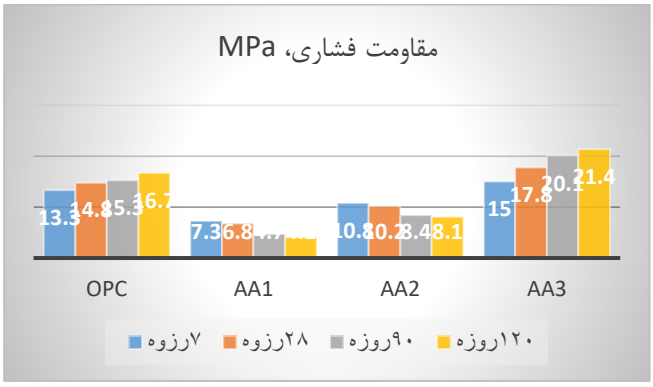
آزمایش تعیین مقاومت کششی معمولا بر روی نمونه استوانه ای (به ندرت مکعبی) انجام می گیرد. آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های مکعبی در بخش ۱۱۷ آیین نامه BS 1881-83 شرح داده شده است و نکته مهم اینکه نتایج بدست آمده در نمونه های استوانه ای و نمونه های مکعبی یکسان می باشد.

۴. نتایج

۱.۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری

با توجه به نتایج خروجی ازآزمایش مقاومت فشاری در آزمونه‌های مکعبی در تمامی سنین از ۷ تا ۱۲۰ روزه با توجه به شکل ۹ می توان دید که در نسبت های ۱به۱ و ۱به۲ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات در مقایسه با بتن متخلخل شاهد افت مقاومت داشته است ولی در نسبت ۲به ۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات نسبت به بتن متخلخل شاهد در تمامی سنین مقاومت بیشتری کسب کرده است.

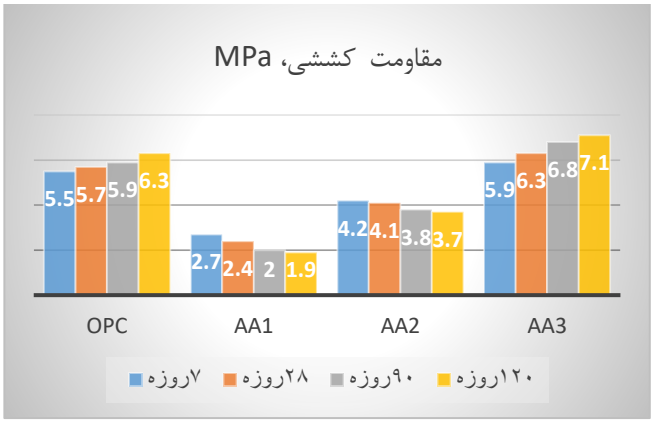
طبق نتایج به دست آمده نسبت ۲به ۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات نسبت بهینه در بین ۳ نسبت کلی می‌باشد که از بتن شاهد نیز مقاومت بیشتری داشته است.



شکل ۹. نمودار مقاومت فشاری ۷ ، ۲۸ ، ۹۰و۱۲۰ روزه

۲.۴. نتایج آزمایش مقاومت کششی تست برزیلی

نتایج مقاومت کششی نمونه‌های ساخته شده طبق شکل ۱۰ نشان می‌دهد که در نسبت ۲به ۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات بتن متخلخل قلیا فعال مقاومت بهتری حتی نسبت به بتن شاهد داشته است ولی در دو نسبت دیگر بتن قلیا فعال متخلخل از بتن شاهد مقاومت کششی کمتری داشته است.



شکل ۱۰. نمودار مقاومت کششی ۷ ، ۲۸ ، ۹۰و۱۲۰ روزه

با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ به این نتیجه می‌رسیم که بتن متخلخل قلیا فعال از لحاظ خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی شامل تست برزیلی در نسبت ۲ به ۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات از بتن متخلخل شاهد (بر پایه سیمان) به ترتیب دارای ۲۸ و ۱۲ درصد دارای عملکرد بهتری می باشد که این افزایش مقاومت به علت بیشتر شدن NaOH در خمیر سیمان و زودگیرتر شدن و زودتر به مقاومت رسیدن خمیر و بتن می‌شود و متناسب با بتن‌های دیگر به روند رشد مقاومت مکانیکی خود ادامه داده است. این عامل دلیل اصلی عملکرد بهتر نمونه AA3 می‌باشد.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش با توجه به آزمایش‌هایی که طراحی و انجام شد نتایج زیر درمورد بتن قلیا فعال حاصل گردید:

- بتن متخلخل قلیا فعال از لحاظ خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و مقاومت کششی شامل تست برزیلی در نسبت ۲ به ۱ سدیم هیدروکسید به سدیم سیلیکات از بتن متخلخل شاهد (بر پایه سیمان) به ترتیب دارای ۲۸ و ۱۲ درصد دارای عملکرد بهتری می‌باشد که این افزایش مقاومت به علت بیشتر شدن NaOH در خمیر سیمان و زودگیرتر شدن و زودتر به مقاومت رسیدن خمیر و بتن می‌شود و متناسب با بتن‌های دیگر به روند رشد مقاومت مکانیکی خود ادامه داده است. این عامل دلیل اصلی عملکرد بهتر نمونه AA3 می باشد.
- خواص مکانیکی بتن قلیا فعال در نسبت ۱ به ۲ در مقاومت فشاری ۷۵درصد و مقاومت کششی ۶۹ درصد افت نسبت به بتن شاهد داشته است همچنین در نسبت ۱به ۱ نیز مقاومت فشاری و کششی ۵۱ و ۴۱ درصد افت مقاومت در مقایسه با بتن متخلخل شاهد داشته است.
- به کارگیری بتن متخلخل با عبوردهی آب به میزان بالا (نفوذپذیری زیاد) کمک شایانی به تقویت آبخوان و نفوذ آب به زیر سطح زمین می‌نماید.

References

[1] Juenger, M.C.G., et al. (2011). “Advances in alternative cementitious binders.” Cement and Concrete Research Vol:41.
[2] Palomo, A., et al. (1999). “Alkali-activated fly ashes: a cement for the future.” Cement and concrete research Vol:29.
[3] Pal, S. C., et al. (2003). “Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete.” Cement and Concrete Research Vol: 33.

[4] Bernal, S.A., et al. (2011). “Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes.” Cement and Concrete Research Vol: 41.
[5] Didamony, H., et al. (2012). “Properties and durability of alkali-activated slag pastes immersed in sea water.” Ceramics International Vol: 38.
[6] Chi, M., (2012). “Effects of dosage of alkali activated solution and curing conditions on the properties and durability of aali activated slag concrete.” Construction and Building Materials Vol: 35.
[7] Komljenović, M., et al. (2013). “External sulfate attack on alkali-activated slag.” Construction and Building Materials Vol: 49.
[8] Li, C., et al. (2010). “A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements‖.” Cement and Concrete Research Vol:40.
[9] Brough, A.R. and A. Atkinson (2002). “Sodium silicate-based, alkali-activated slag mortars: Part I. Strength, hydration and microstructure‖.” Cement and Concrete Research Vol :32.
[10] Song, S., et al. (2000). “Hydration of alkaliactivated ground granulated blast furnace slag‖.” Journal of Materials Science vol: 35.
[11] Escalante-García, J. I., et al. (2003). “Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkali-activated slag cement mortars.” Cement and concrete research Vol:33.
[12] Glukhovsky, V.D. and V.A. Raksha (1979). “Alkaline and Alkaline–Alkali-Earth Hydraulic Binders and Concretes‖.” Higher School Publish., Kiev.
[13] Talling, B. and J. Brandstetr (1989). “Present state and future of alkali-activated slag concretes‖.” ACI Special Publication vol:114.
[14] Bakharev, T., et al. (1999). “Alkali activation of Australian slag cements‖.” Cement and Concrete Research vol:29.
[15] Krizan, D. and B. Zivanovic (2002). “Effects of dosage and modulus of water glass on early hydrat ion of alkali–slag cements‖.” Cement and Concrete Research vol:32.
[16] Cheng, T.W. and J.P. Chiu (2003). “Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag‖.” Minerals Engineering vol:16.
[17] Rafique Bhutta, M.A., et al. (2013). “Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate).” Construction and Building Materials.
[18] Shen, W., et al. (2013). “Investigation on polymer–rubber aggregate modified porous concrete.” Construction and Building Materials.
[19] Kim, H.K. and H.K. Lee (2010). “Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete.” Applied Acoustics.
[20] Chindaprasirt, P., (2008). “Cement paste characteristics and porous concrete properties.” Construction and Building Materials.
[21] Sarwono, d., et al. (2016). “The application of porous concrete filled with so il and sands for low volume traffic road.” Procedia Engineering.
[۲۲]شکرچی زاده م.۱۳۹۳. راهنمای کاربردی بتن سبکدانه سازه ای. چاپ اول. تهران: انتشارات علم و ادب، ۳۳۶ صفحه.
[23] Khale D, Chaudhary R. 2007. Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: A Review. Journal of Materials Science, 42: 729-746.
[۲۳]شوش م، عقابی م. ۱۳۸۸. سیمان ژئوپلیمر. چهل و هفتمین همایش مدیران تولید و بهینه سازی کارخانجات سیمان کشور، یزد، بهمن.
[۲۴]شرکت سیمان مدائن اصفهان، مشخصات فنی و نتایج آزمایشگاهی کنترل کیفی سیمان
[26] American Society for Testing and Materials, ASTM C39, Concrete Cylinder Compression Testing
[27] American Society for Testing and Materials, ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength
[۲۸] ظهرابی امیر، عالی پور رسول، جهانگیری علیرضا، ۱۴۰۱، بررسی میزان نسبت فعال‌سازهای قلیایی بر دوام بتن قلیا فعال متخلخل در شرایط محیطی مهاجم اسیدسولفوریک و اسیدکلریدریک، تز کارشناسی ارشد، دانشگاه شهرکرد