



Investigating The Microstructure of Geopolymer Concrete in Structures, With a Crisis Management Approach

Mohammadhossein Mansourghanaei ¹

Research Paper

Received:
14 December 2022
Revised:
31 January 2023
Accepted:
12 March 2023
Published:
30 March 2023
P.P: 149-169

ISSN: 2008-3564
E-ISSN: 2645-5285



Abstract

Crisis management is one of the indicators of creating national security in the country. In order to reduce the vulnerability of vital centers and civil infrastructures of the country against the occurrence of various crises, improving the mechanical properties and durability of concrete used in reinforced concrete structures of such centers will be an effective and practical solution. Was. In this laboratory research, a mixed design of ordinary concrete containing Portland cement with a grade of 500 kg/m³ and a mixed design of geopolymer concrete based on slag of the slag furnace were made. In order to investigate the microstructure of concrete, scanning electron microscope (SEM) images were analyzed on concrete samples at the age of 90 days, then in order to verify the SEM results, non-destructive water permeability test and destructive test were performed. The compressive strength was performed in concrete at the age of 7, 28 and 90 days. The results of SEM analysis indicate the superiority of compaction in the microstructure of geopolymer concrete due to the production of a high volume of hydrated gels compared to normal concrete. The results of the compressive strength and water permeability test show that a large part of the georecharge process has been completed at the age of 90 days in concrete. Normal concrete and geopolymer concrete were obtained in the compressive strength test by 48.79 and 10.93% respectively, in the permeability test, this superiority was obtained by 19.44 and 14.81% respectively.

Keywords: Crisis Management; National Security; Geopolymer Concrete; Concrete Microstructure; Compressive Strength.

Ph.D. in Civil, Department of Civil Engineering, Chalous Branch, Islamic Azad University, Chalous, Iran.
mhm.ghanaei@iauc.ac.ir

Cite this Paper: Mansourghanaei, M.H (2023). Investigating The Microstructure of Geopolymer Concrete in Structures, With a Crisis Management Approach. *Crisis Management and Emergency Situations*, 15(2), 149–169.



بررسی ریزساختار بتن ژئوپلیمری در سازه‌ها، با رویکرد مدیریت بحران

محمدحسین منصورقناعتی^۱ ID

چکیده

مدیریت بحران از شاخصه‌های ایجاد امنیت ملی در کشور است. به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری مراکز حیاتی و زیرساخت‌های عمرانی کشور در برابر بروز بحران‌های مختلف، بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن مصرفی در سازه‌های بتن‌آرمه این‌گونه از مراکز، راه‌کاری موثر و کاربردی خواهد بود. بهبود بخش ریزساختار بتن کمک شایانی به افزایش استحکام بتن در برابر بروز عوامل مختلف تخریب بتن دارد. در این پژوهش آزمایشگاهی، یک طرح مخلوط از بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند با عیار ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و یک طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمری بر پایه سرباره کوره آهنگدازی ساخته شد. به‌منظور بررسی ریزساختاری بتن، آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه بر روی نمونه‌های بتنی انجام گرفت، در ادامه به‌منظور بررسی و صحت‌سنجی نتایج SEM، آزمون غیرمخرب نفوذپذیری آب و آزمون مخرب مقاومت فشاری در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در بتن انجام گردید. نتایج حاصل از آنالیز SEM حاکی از برتری تراکم در بخش ریزساختار بتن ژئوپلیمری به‌واسطه تولید حجم بالایی از ژل‌های هیدراته نسبت به بتن معمولی است. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب، نشان از تکمیل بخش اعظمی از فرایند ژئوسپارش در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در بتن است، در این راستا بهبود نتایج در سن عمل‌آوری ۹۰ روز نسبت به سن عمل‌آوری ۷ روزه در بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در آزمون مقاومت فشاری به‌ترتیب به‌میزان ۴۸/۷۹ و ۱۰/۹۳ درصد کسب گردید، در آزمون نفوذپذیری، این برتری به‌ترتیب به‌میزان ۱۹/۴۴ و ۱۴/۸۱ درصد حاصل گردید.

کلیدواژه‌ها: مدیریت بحران، امنیت ملی، بتن ژئوپلیمری، ریزساختار بتن، مقاومت فشاری.

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

صص: ۱۶۹-۱۴۹

شابا چاپی: ۳۵۶۴-۲۰۰۸

الکترونیکی: ۵۲۸۵-۲۶۴۵



۱. دکتری تخصصی مهندسی عمران سازه، گروه مهندسی عمران، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، ایران.

Mhm.Ghanaei@iauc.ac.ir

استناد: منصورقناعتی، محمدحسین. (۱۴۰۲). بررسی ریزساختار بتن ژئوپلیمری در سازه‌ها، با رویکرد مدیریت بحران. فصلنامه

مدیریت بحران و وضعیت‌های اضطراری، ۱۵(۲)، ۱۶۹-۱۴۹.

مقدمه و بیان مسئله

بحران‌ها حاصل عملکرد نامطلوب در یک حوزه و یا بخشی از جامعه است که شرایط خارج از وضعیت عادی را به وجود می‌آورد و تحت این شرایط، منجر به بروز خسارت‌های انسانی، سرمایه‌ای و یا محیط‌زیستی برای افراد، گروه‌ها و یا سازمان می‌شود. مدیریت بحران که در حوزه مدیریت تعریف می‌گردد به مجموعه‌ای از اقدامات تلقی می‌شود که بتواند بحران و یا بحران‌های پیش‌آمده را در سازمان‌ها و یا نهادهای مربوطه کنترل نماید و طی این مراحل، اوضاع به قبل از بروز بحران بازگردد. به عبارتی دیگر، مدیریت بحران شامل اقداماتی است که در مواجهه (قبل، حین و بعد از بروز) با تهدیدات انجام می‌گیرد تا شرایط حاکم، به قبل از بروز بحران بازگردد (طیسی رهنایی^۱ و همکاران، ۲۰۲۳؛ افتخاری^۲ و همکاران، ۲۰۲۱؛ قریشی و نقیسی^۳، ۲۰۲۳؛ توحیدیان^۴ و همکاران، ۲۰۲۲؛ حسین‌پور^۵، ۲۰۲۱). این اقدامات شامل راه‌حل‌ها و فعالیت‌هایی است که می‌تواند بحران را مدیریت کند، می‌باشد. البته بین بحران و حادثه باید تفاوت قائل شد، برخلاف بحران، حوادث همواره به صورت پیش‌بینی نشده اتفاق می‌افتد و سازمان‌ها و یا نهادهای کنترل کمی بر روی آن‌ها دارند. بحران‌های فیزیکی معمولاً در ابعاد مختلفی نظیر بلایای طبیعی و حملات تروریستی ظهور پیدا می‌کند و می‌تواند آسیب‌های فراوان جانی و مالی را به دنبال داشته باشد. بخش اعظمی از بروز بحران‌ها، آسیب و تخریب سازه‌ها و ابنیه مراکز مهم و حیاتی کشور نظیر مراکز راهبردی و پایگاه‌های آمادی کشور است. در این راستا، بهبود استحکام سازه‌ها و ابنیه‌های بتن‌آرمه مختلف، نقش موثری در کاهش آسیب‌های وارده خواهد داشت.

اهداف و نوآوری در این پژوهش آزمایشگاهی به واسطه تولید بتن ژئوپلیمری، به چند مورد زیر خلاصه می‌گردد:

- ۱- خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی بهبود می‌یابد، در این راستا استفاده از بتن ژئوپلیمری در سازه‌های بتن‌آرمه با اهمیت زیاد جهت افزایش استحکام این نوع از سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

1 Tayyebi Rahani
2 Eftekhari
3 Ghoreishi & Naghibi
4 Towhidian
5 Hoseinpour

- ۲- در حوزه محیط‌زیستی، کمک به کاهش حجم انتشار گاز سمی دی‌اکسید کربن در مقایسه با تولید بتن معمولی، با توجه به گزارش ارایه شده توسط سایر محققین در این راستا.
- ۳- کمک به حفظ سلامت محیط‌زیست به واسطه مصرف (در ترکیب بتن ژئوپلیمری) سرباره‌های انباشته شده در کارخانه‌های ذوب آهن، شناخته شده به عنوان مواد مضر محیط‌زیستی.
- ۴- حفظ و کاهش مصرف منابع معدنی مصرفی که به عنوان مصالح اصلی در طی فرایند ساخت سیمان معمولی استفاده می‌گردد.
- ۵- حفظ و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی که به عنوان سوخت مصرفی در کارخانه‌های تولید سیمان معمولی استفاده می‌گردد.

۲- مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در راستای توسعه مدیریت بحران و پدافند غیرعامل در حوزه زیرساخت‌های مهندسی عمران، کارهای آزمایشگاهی زیادی جهت تولید بتن سازه‌ای مراکز راهبردی و حساس کشور، انجام شده است (منصورقناعتی^۱، ۲۰۲۳؛ منصورقناعتی^۲ و همکاران، ۲۰۲۲؛ منصورقناعتی^۳ و همکاران، ۲۰۲۲). استحکام سازه‌های بتن آرمه مراکز راهبردی و پایگاه‌های آمادی کشور نقش مهمی در برابر کاهش تخریب و آسیب‌های انسانی ناشی از بروز بحران‌های فیزیکی دارد. بتن به عنوان اصلی ترین مصالح مصرفی در سازه‌های بتن آرمه شناخته می‌شود. بهبود استحکام بتن از طریق نوع مصالح مصرفی در ترکیب مخلوط آن قابل دست‌یابی است (منصورقناعتی^{۴،۵،۶،۷،۸}، ۲۰۲۲؛ منصورقناعتی^{۹،۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲). در این پژوهش آزمایشگاهی، سعی گردیده تا با تولید و معرفی بتن قلیا فعال و مصرف آن در سازه‌های بتن آرمه مراکز حساس و سازه‌های با اهمیت بالا، نسبت به مدیریت و کاهش آسیب‌های ناشی از بحران‌های مختلف اقدام گردد. بتن معمولی به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی و دوام محدود، نتوانسته است نیازهای سازه‌های بتنی را پوشش دهد. از طرفی تولید و استفاده از سیمان به دلیل انتشار گازهای مختلف، محیط‌زیست را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، در این راستا استفاده از بتن ژئوپلیمری نقش حیاتی را در کاهش این معایب دارد (احمد^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). برای کاهش انتشار گاز سمی دی‌اکسید کربن (CO_2) به میزان ۵۵ درصد تا

1 Ahmad

سال ۲۰۳۰، استفاده از مواد پایدار و کم مصرف مانند بتن ژئوپلیمری که حاوی مواد تغییر فاز است، برای توسعه زیرساخت‌ها ضروری می‌باشد (اسدی^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). تحقیقات نشان داده است که بتن‌های ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی، انتشار CO₂ کمتری دارند (میمیس و بلال^۲، ۲۰۲۲؛ ساتیش کومار^۳ و همکاران، ۲۰۲۲؛ جیندال^۴ و همکاران، ۲۰۲۲؛ کانگارج^۵ و همکاران، ۲۰۲۲). از طرفی بتن ژئوپلیمری در مقایسه با بتن معمولی، خواص مکانیکی و دوام بالاتری دارد (سریویدیا^۶ و همکاران، ۲۰۲۲). در حال حاضر، با توجه به چالش‌های جهانی و همچنین اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد و طرح ESG^۷، توسعه اتصال دهنده‌های ژئوپلیمری برای تولید بتن ژئوپلیمری به یک حوزه فوری از علم ساختمان تبدیل شده است (بسکوپیلنی^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). در این راستا در سه دهه گذشته، تقاضای زیاد برای بتن پایدار و سازگار با محیط‌زیست جهت کاهش آسیب‌زیست‌محیطی، منجر به توسعه بتن‌های کم کربن مانند بتن ژئوپلیمری شده است (جندال^۹ و همکاران، ۲۰۲۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد که ژئوپلیمرها مواد سازگار با محیط‌زیست هستند که از زباله‌های جامد صنعتی با محتوای سیلیکون و آلومینیوم بالا، ساخته می‌شوند (نیو^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲). بتن ژئوپلیمری یک بتن دوستدار محیط‌زیست و یک ماده جدید در صنعت ساختمان است که در آن مواد پوزولانی (ضایعات صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده) که حاوی سیلیس و آلومینات بالا هستند، به‌عنوان مواد اتصال دهنده در مخلوط عمل می‌کند، بتن ژئوپلیمری مقرون به صرفه، با مصرف انرژی کم، از نظر حرارتی پایدار، به‌راحتی قابل اجرا، سازگار با محیط‌زیست، بدون سیمان و بادوام است (ساتیش کومار و همکاران، ۲۰۲۲؛ تاکور و باوا^{۱۱}، ۲۰۲۲؛ ورما^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۲). بایندهای ژئوپلیمری یا فعال شده با قلیایی به‌عنوان یک جایگزین بالقوه پایدار سبز برای سیمان پرتلند معمولی در حال ظهور هستند

1 Asadi

2 Memiş & Bilal

3 Sathish Kumar

4 Jindal

5 Kanagaraj

6 Srividya

7 Environmental, Social, and Governance

8 Beskopylny

9 Jindal

10 Niu

11 Thakur & Bawa

12 Verma

(آلبیدا^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). ژئوپلیمرها مواد سیمانی هستند که به دلیل مزایای محیط‌زیستی و ویژگی‌های قابل مقایسه با سیمان پرتلند معمولی شناخته شده‌اند (لیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). از این رو بتن ژئوپلیمری جایگزین مناسبی برای بتن سیمانی معمولی شناخته می‌شود (توماس^۳ و همکاران، ۲۰۲۲؛ لی^۴ و همکاران، ۲۰۲۲؛ ورما و دیو^۵، ۲۰۲۲). بتن ژئوپلیمری از فرآیند ژئوپلیمریزاسیون تولید می‌شود که در آن مولکول‌های معروف به الیگومرها با هم ادغام می‌شوند و شبکه‌های ژئوپلیمری با پیوند کووالانسی را تشکیل می‌دهند (وونگ^۶، ۲۰۲۲). مقاومت فشاری یکی از ویژگی‌های مهم تمام کامپوزیت‌های بتن از جمله بتن ژئوپلیمری است (احمد و همکاران، ۲۰۲۲). پارامترهایی که برای تاثیرگذاری بر روند افزایش مقاومت بتن ژئوپلیمری شناسایی می‌شوند شامل نوع مواد، نسبت مواد به محلول قلیایی، نسبت فعال‌کننده قلیایی، سن عمل‌آوری، دمای عمل‌آوری، مولاریته فعال‌کننده‌های قلیایی و نسبت سیلیس به آلومینات در مواد چسبنده و فعال‌کننده‌ها می‌باشد (آپادهیای^۷ و همکاران، ۲۰۲۲). در این راستا، تحقیقات نشان داده است که افزایش مولاریته و نسبت ماده فعال‌ساز به مواد چسباننده منجر به توسعه مقاومت بتن ژئوپلیمری تا حد مشخصی می‌شود (شیلار^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۹ حاصل از ریزساختار بتن ژئوپلیمری نشان می‌دهد که ماتریس ژئوپلیمری حاوی منافذ با اندازه کوچک پراکنده بیشتری نسبت به سایر بتن‌ها است که این مطلب نشان‌دهنده استحکام فشاری بالاتری این نوع از بتن است (امین^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲). متاکائولین، خاکستر بادی و عمدتاً سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده به‌طور سنتی در تولید بتن ژئوپلیمری به‌عنوان ماده چسبنده، همراه با محلول‌های هیدروکسید سدیم^{۱۱} و سیلیکات سدیم^{۱۲} به‌عنوان محلول‌های فعال‌کننده استفاده می‌شود (میمیس و بلال، ۲۰۲۲؛ ساتیش کومار و همکاران، ۲۰۲۲؛ جیندال و همکاران، ۲۰۲۲؛

1 Albidah

2 Lyu

3 Thomas

4 Li

5 Verma & Dev

6 Wong

7 Upadhyay

8 Shilar

9 Scanning Electron Microscope (SEM)

10 Amin

11 NaOH

12 Na₂SiO₃

کاناگاراچ^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). تحقیقات نشان داده است که استفاده از سرباره کوره آهنگدازی به جای سیمان می‌تواند مقاومت بتن را بهبود ببخشد و تقاضای فزاینده برای استفاده از سیمان در بتن را کاهش دهد (سدکیو و کومار، ۲۰۱۲؛ یوکسل^۲ و همکاران، ۲۰۱۱). فعال-سازی سرباره کوره آهنگدازی با محلول قلیایی برای تولید سیمان سرباره‌ای در چند دهه گذشته مورد مطالعه قرار گرفته است (اله‌وردی^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). ساختار بتن ژئوپلیمری در ابتدا توسط محقق فرانسوری بنام ژوزف داویدوویس در سال ۱۹۷۲ میلادی مطرح شد، نحوه تولید این نوع از بتن همانند تولید بتن معمولی است (دیویدوویس^۴، ۲۰۰۸). بتن‌های ژئوپلیمری دارای مقاومت و دوام بهتری نسبت به بتن‌های معمولی حاوی سیمان پرتلند معمولی هستند (رمزانیانپور^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). در تحقیق انجام شده توسط نوفلاح و همکاران گزارش شد که، روند رشد کسب مقاومت بتن فعال‌شده قلیایی بر پایه سرباره کوره آهنگدازی در روزهای نخستین بسیار سریع بوده و این نوع از بتن مقاومتی در حدود ۷۰ درصد مقاومت فشاری نهایی خود را در ۷ روزه ابتدایی استحکام بتن کسب می‌نماید (نوفلاح^۶، ۲۰۱۸). بتن به لحاظ ساختاری به دو بخش ریزساختار^۷ و کلان‌ساختار^۸ تقسیم می‌گردد. بخش کلان‌ساختار بتن اغلب شامل سنگدانه‌ها و خمیر سیمان هیدراته‌شده است که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده است، اما بخش ریزساختار بتن که اغلب شامل حفرات، ترک‌ها، منافذ مویینه بین‌لایه‌ای، ژل‌های هیدراته و سایر ذرات هیدراته نشده در ابعاد میکرومتر و کوچکتر است، تنها با میکروسکوپ الکترونی قابل رویت است. ژل‌های هیدراته شده به عنوان بیشترین حجم توده خمیر سیمان هیدراته را تشکیل می‌دهند. در فرایند بسپارش و ژئوبسپارش، مواد سیمانی در ترکیب شیمیایی با آب یا محلول‌های قلیایی از قبیل هیدرواکسیدسدیم و سیلیکات سدیم، ژل‌های متراکم هیدراته شده از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته^۹ و

1 Kanagaraj

2 Yüksel

3 Allahverdi

4 Davidovits

5 Ramezaniapor

6 Nofallah

7 Microstructure

8 Macrostructure

9 C-S-H

سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته^۱ و سیلیکات آلومینیوم سدیم هیدراته^۲ را در مخلوط بتن تولید می‌نمایند. این ژل‌ها عامل اصلی مقاومت و استحکام در بتن سخت شده هستند. در بتن معمولی حاوی سیمان پرتلند، ترکیب اکسید کلسیم، اکسید سیلیس با نسبت‌های متغیر با آب، منجر به تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته موسوم به ژل توبرمورایتی^۳ می‌گردد، این ژل با ساختاری متغیر و آمورف، بخش اعظمی (براساس نظر مهتا و مونته‌ئرو^۴ و مهتا و منته‌ئرو^۴، ۲۰۱۴؛ لین^۵ و همکاران، ۲۰۱۸)، ۵۰ الی ۶۰ درصد) از حجم خمیر سیمان هیدراته را تشکیل می‌دهد. و دلیل اصلی ایجاد خواص مکانیکی و دوام در بتن است (جینگر^۶ و همکاران، ۲۰۱۱؛ ریچاردسون^۷، ۲۰۰۸). ریزساختار خمیر سیمان سخت شده ژئوپلیمری سرباره‌ای براساس تحقیقات برنال^۸ و همکاران (برنال و همکاران، ۲۰۱۴) در سال ۲۰۱۳، مرس^۹ و همکاران (مرس و همکاران، ۲۰۱۳) در سال ۲۰۱۳ و لوکونن^{۱۰} و همکاران (لوکونن و همکاران، ۲۰۱۸) در سال ۲۰۱۸ و سایر مطالعات موردی انجام پذیرفته پیرامون این بحث، را می‌توان به شرح ذیل تقسیم‌بندی کرد.

- ۱- سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) موسوم به ژل توبرمورایتی
- ۲- سیلیکات آلومینیوم هیدراته (A-S-H) موسوم به ژل توبرمورایتی
- ۳- سیلیکات آلومینیم کلسیم هیدراته (C-A-S-H) موسوم به ژل شبه توبرمورایتی
- ۴- سیلیکات آلومینیم سدیم هیدراته (N-A-S-H) موسوم به ژل شبه توبرمورایتی
- ۵- سایر ذرات و اجزای شرکت نکرده در فرایند ژئوپلیمریزاسیون

۳- روش شناسایی تحقیق

در این پژوهش آزمایشگاهی، از سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه صنایع سیمان گیلان سبز (دیلمان) با چگالی ۳۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سطح مخصوص ۳۰۰۰ الی ۳۲۰۰ سانتی متر

1 C-A-S-H

2 N-A-S-H

3 Tobermorite

4 Mehta & Monteiro

5 Lin

6 Juenger

7 Richardson

8 Bernal

9 Myers

10 Luukkonen

مربع بر گرم که تحت استاندارد ISIRI 389 تولید شده است، استفاده گردید. سرباره کوره آهنگدازی، محصول کارخانه ذوب آهن اصفهان با چگالی ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، سطح مخصوص ۲۲۰۰ سانتی‌مترمربع بر گرم و چگالی ظاهری ۹۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تحت استاندارد ASTM C989/C989M مورد مصرف قرار گرفت، مشخصات شیمیایی این محصول در جدول ۱ نشان داده شده است. آب مصرف شده به‌منظور تهیه آب‌آهک و ساخت طرح مخلوط در تحقیق پیش‌رو از آب شرب شهر لاهیجان می‌باشد، این نوع از آب دارای pH محدوده ۶/۵ الی ۷/۵ و چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. براساس بند ۹-۱۰-۴-۳ ویرایش چهارم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان ایران، آبی که قابل آشامیدن است، مزه و بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است را می‌توان بدون آزمون در بتن استفاده کرد، مگر آنکه سوابق قبلی نشان دهنده نامناسب بودن این نوع از آب برای بتن باشد. سنگدانه مصرفی در تهیه طرح مخلوط بتن در این پژوهش آزمایشگاهی از نوع مصنوعی و براساس ملزومات استاندارد ASTM C33، تهیه شده از کارخانه‌های شن و ماسه شهرستان لاهیجان است، برخی از مشخصات سنگدانه مصرفی در این تحقیق در جدول ۲ به نمایش درآمده است. تحقیقات نشان داده است که بتن ژئوپلیمری تازه به علت لزجت بالای موجود در محلول قلیا فعال در مقایسه با بتن حاوی سیمان پرتلند معمولی تازه، کارایی ضعیف‌تری دارد، جهت حل این مشکل یک فوق‌روان‌کننده مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات، اغلب به‌علت پیوندهای قوی ما بین کلسیم با بار مثبت و پلی‌کربوکسیلات با بار منفی، بهترین گزینه است (پیلور^۱ و همکاران، ۲۰۱۸). در این راستا از ابرروان‌کننده نسل چهارم مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات نرمال محصولی از شرکت دوروچم خاورمیانه براساس ویژگی‌های جدول ۳ استفاده گردید. محلول قلیا فعال مصرفی در این تحقیق ترکیبی از محلول سیلیکات سدیم و هیدرواکسید سدیم با نسبت وزنی ۲/۵ می‌باشد که با چگالی ترکیبی برابر با ۱۴۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب مورد استفاده قرار گرفت، برخی از مشخصات محلول قلیا فعال مصرفی در این پژوهش در جدول ۴ نشان داده شده است.

استاندارد مجزایی برای طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری موجود نمی‌باشد، بنابراین به تبعیت برخی از پژوهش‌های آزمایشگاهی (دب^۱ و همکاران، ۲۰۱۵)، طرح مخلوط بتن ژئوپلیمری مطابق با استاندارد تهیه بتن معمولی تحت توصیه کمیته ACI 211.1-89 براساس جدول ۵ تهیه و تنظیم گردید.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	L.O.I
۳۶/۷۲	۳۵/۵	۹/۱۷	۷/۴۵	۶/۲۴	۰/۱۲	۱/۲۱	۰/۹۲	۲/۴۹	۰/۱۸	۰/۰۲

جدول ۲- مشخصات سنگدانه‌ها

مصلح دانه‌ای بتن	حداقل قطر	حداکثر قطر (mm)	مدول نرمی (mm)	چگالی (kg/m ³)	درصد جذب آب
شن	۴/۷۵ (mm)	۱۹	۵/۷	۲۷۵۰	۲/۲
ماسه	۷۵ (μm)	۴/۷۵	۲/۸۵	۲۶۵۰	۲/۹

جدول ۳- مشخصات ابر روان‌کننده پلی کربوکسیلات نرمال

فرمول شیمیایی	حالت	رنگ	چگالی	استاندارد	pH
پلی کربوکسیلات نرمال	مایع	قهوه‌ای	۱۱۰۰	ASTM C494	حدود ۷

جدول ۴- مشخصات محلول قلیا فعال

نوع محلول	فرمول مولکولی	رنگ	مولاریته (mol/m ³)	چگالی (kg/m ³)	دمای ذوب (C)	جرم مولی (gr/mol)
هیدرواکسید سدیم	NaOH	سفید	۱۲	۲۱۳۰	۳۱۸	۳۹/۹۹
سیلیکات سدیم	Na ₂ SiO ₃	سفید	۱۲	۲۴۰۰	۱۰۸۸	۱۲۲/۰۶

نسبت وزنی (مولار) سیلیکات به سدیم ۲/۴ است و نسبت وزنی (مولار) سیلیکات به آب ۴۷ می‌باشد.

جدول ۵- مشخصات طرح مخلوط بتن

نوع بتن	کمیت	سیمان	سرباره	آب	شن	ماسه	روان کننده
معمولی	kg/m ³	۵۰۰	۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۵	۷
	درصد	۲۰/۰۲	۰	۹/۰۱	۴۰/۰۴	۳۰/۶۳	۰/۰۰۲۸
ژئوپلیمری	kg/m ³	۰	۵۰۰	۲۲۵	۱۰۰۰	۷۶۲/۶۳	۷
	درصد	۰	۲۰/۰۴	۹/۱۹	۴۰/۰۸	۳۰/۵۷	۰/۰۰۲۸

- عمل آوری بتن معمولی در آب آهک و عمل آوری بتن ژئوپلیمری تحت حرارت و سپس محیط خشک است.
 - چگالی بتن معمولی ۲۴۹۷ کیلوگرم بر مترمکعب و چگالی بتن ژئوپلیمری ۲۴۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب است.
 - نسبت W/C برابر ۴۵ درصد است و در بتن ژئوپلیمری W/C ، نسبت محلول قلیایی به سرباره مصرفی است.

در ابتدا براساس جدول ۴ طرح مخلوط، مصالح مصرفی توزین شدند و در ادامه مصالح خشک شامل سیمان (یا سرباره) و سنگدانه در داخل دستگاه مخلوط کن برقی در حال گردش ریخته شد و فرایند ترکیب مصالح به مدت ۱/۵ دقیقه به طول انجامید. در ادامه، مصالح تر شامل آب (یا محلول قلیافعال) به مخلوط اضافه شدند و ترکیب مصالح به مدت ۲/۵ دقیقه دیگر به طول انجامید. سپس مخلوط بتن تازه در قالب‌های فلزی فویل دار و روغن کاری شده از قبل در سه مرحله ریخته شد، در این راستا به منظور اعمال تراکم در نمونه بتنی، در هر مرحله ۲۵ ضربه به وسیله میله مخصوص به ترکیب بتن وارد شد. در پایان، قالب‌ها حاوی نمونه‌های بتنی در محیط خشک و تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. پس از سپری شدن این زمان، قالب‌برداری نمونه‌ها انجام گرفت و نمونه‌های بتن معمولی در آب آهک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا سن انجام آزمون نگهداری و عمل آوری شدند. نمونه‌های بتن ژئوپلیمری پس از قالب‌برداری، به مدت ۴۸ ساعت درون کوره تحت عمل آوری حرارتی در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند تا استحکام در این نوع از بتن بهبود یابد، پس از سپری شدن این زمان، نمونه‌های بتنی از کوره خارج شدند و در محیط خشک تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس تا فرارسیدن زمان آزمون نگهداری و عمل آوری گردیدند. در راستای عمل آوری حرارتی در بتن ژئوپلیمری، تحقیقات نشان داده است که نمونه‌های بتن ژئوپلیمری تحت عمل آوری حرارتی در محدوده دمای ۵۰ الی ۷۰ درجه سلسیوس دارای استحکام بیشتر از نمونه‌های عمل آوری شده تحت دمای ۲۰ درجه سلسیوس هستند (مهتا و مونته‌ئرو، ۲۰۱۴). در این پژوهش آزمایشگاهی، آزمون مقاومت فشاری بتن در سن عمل آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS 12390-3 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متر انجام گرفت. در این راستا، نمونه‌ها به نحوی در دستگاه جک بتن شکن قرار داده شدند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند و پس از محکم شدن نمونه‌ها، بارگذاری نیرو در محدوده استاندارد با سرعت ۰/۹ مگاپاسکال بر ثانیه (۵۴ مگاپاسکال بر دقیقه) به صورت ثابت،

یکنواخت، بدون تغییرات ناگهانی و عمود بر جهت بتن ریزی تا لحظه شکست نمونه بتنی انجام پذیرفت، میزان حداکثر بار وارده، تعیین کننده مقدار مقاومت نمونه بتنی در برابر فشار وارده می‌باشد. آزمون نفوذپذیری آب در بتن در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مطابق با استاندارد BS EN 12390-8 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $20 \times 20 \times 12$ سانتی متر انجام گرفت. براساس این استاندارد در سن عمل‌آوری تعیین شده، نمونه‌ها از چهار وجه با چسب آکواریوم ضد آب شدند و تنها از دو وجه پایین و بالا به‌منظور انجام آزمایش آزاد باقی ماندند، پس از جانمایی نمونه‌ها در قالب دستگاه تعیین عمق نفوذ آب، مطابق استاندارد ذکر شده نمونه‌ها به مدت 72 ± 2 ساعت تحت فشار آب 50 ± 50 کیلوپاسکال قرار گرفتند. در طول دوره آزمایش، فشار آب بر نمونه‌ها کنترل گردید، پس از سپری شدن مدت زمان تعیین شده، نمونه‌ها شکسته شدند و عمق نفوذ آب در ارتفاع نمونه بتنی اندازه‌گیری گردید. آنالیز SEM در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در بتن تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل FEI Quanta200 انجام گرفت، در این راستا نمونه بتنی خرد شده در دستگاه قرار داده شد و تصاویر با بزرگ‌نمایی مورد نظر ضبط و در ادامه مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفت.

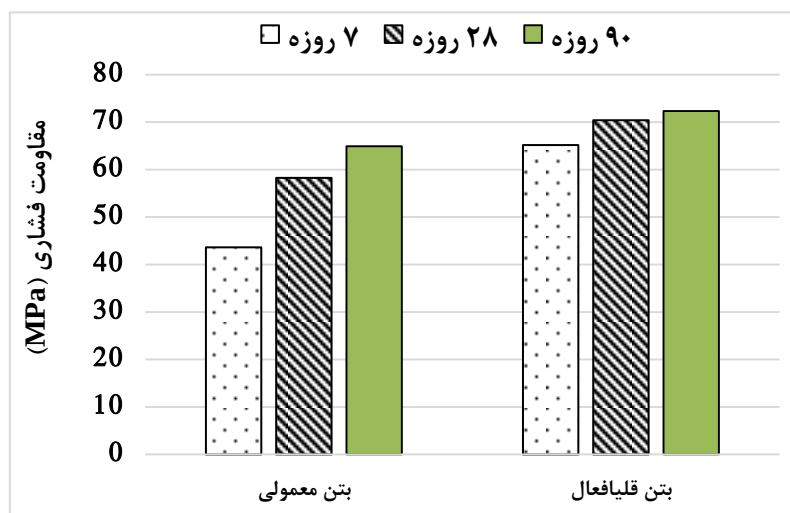
۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- تفسیر نتایج آزمون مقاومت فشاری

نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت دمای ۲۱ درجه سلسیوس در نمودار شکل ۱ به‌نمایش درآمده است. پیرو این نتایج مشاهده می‌گردد که با افزایش سن عمل‌آوری در بتن، مقاومت فشاری نمونه‌ها بهبود یافته است، به‌طوری‌که در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه نسبت به ۷ روزه، بهبود نتایج در بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری به‌ترتیب به‌میزان $48/79$ و $10/93$ درصد کسب گردید. حداکثر میزان مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در سن عمل‌آوری ۹۰ روز (به‌عنوان سن بهینه در عملکرد)، به‌ترتیب به‌میزان $64/92$ و $72/33$ مگاپاسکال کسب شده است. این موضوع به‌دلیل تکمیل بخش اعظمی از فرایند هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون در ترکیب بتن است که منجر به تولید حداکثری حجم ژل‌های هیدراته شده از قبیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H)،

سیلیکات آلومینیوم کلسیم هیدراته (C-A-S-H) و سیلیکات آلومینیوم سدیم هیدراته (N-A-S-H) در ترکیب بتن می‌گردد. در این راستا تحقیقات نشان داده است که در واکنش ژئوپلیمریزاسیون براساس مکانیسم ژئوسپارش، با تبدیل CH به ژل هیدراته شده نظیر C-S-H، ریزساختارها در بتن متراکم شده و موجب همگنی بتن می‌گردد (هونگجیان^۱ و همکاران، ۲۰۱۴).

براساس نتایج این بخش از مقاله، میزان مقاومت فشاری در بتن ژئوپلیمری بیش از بتن معمولی در سنین عمل‌آوری متناظر است، به‌طوری‌که در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مقدار مقاومت فشاری در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی به‌ترتیب به‌میزان ۴۹/۴۳، ۲۰/۸۲ و ۱۱/۴۱ درصد برتری را کسب کرد. این امر به دلیل فعالیت پوزولانی بالای ذرات سرباره کوره آهنگدازی در ترکیب بتن ژئوپلیمری است که منجر به تولید حجم بالاتری از ژل‌های هیدراته (در مقایسه با سیمان پرتلند در بتن معمولی) در ترکیب مخلوط بتن ژئوپلیمری شده است. این ژل‌ها با پر کردن حفرات و منافذ در ریزساختار و کلان‌ساختار بتن موجب ایجاد مقاومت در بتن سخت‌شده می‌گردند. در این راستا تحقیقات سایرین نشان می‌دهد که، توسعه مقاومت فشاری رابطه نزدیکی با تکامل ساختار حفره و ناحیه انتقال بین سطحی در بتن ژئوپلیمری سرباره‌ای دارد (دوان^۲ و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل ۱- نتایج آزمون مقاومت فشاری

1 Hongjian

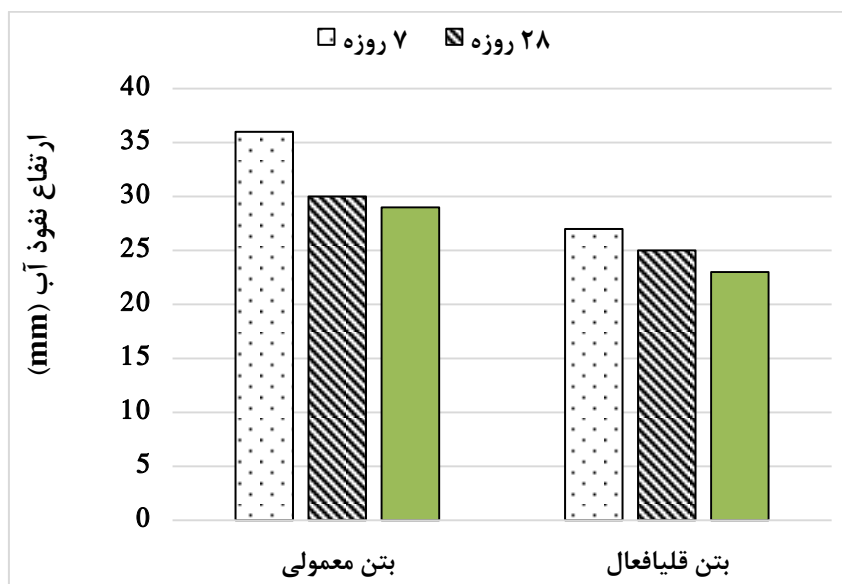
2 Duan

۴-۲- تفسیر نتایج آزمون نفوذپذیری آب

نتایج حاصل از آزمون نفوذپذیری آب در بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری حاصل از این تحقیق آزمایشگاهی در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در نمودار شکل ۲ به‌نمایش درآمده است. پیرو این نمودار، افزایش سن عمل‌آوری موجب بهبود نتایج در بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری به‌ترتیب به‌میزان ۱۹/۴۴ و ۱۴/۸۱ درصد شده است. در بتن معمولی، ضعیف‌ترین (بیشترین ارتفاع) و بهترین (کمترین ارتفاع) عملکرد بتن در آزمون نفوذپذیری به‌ترتیب متعلق به سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به‌میزان ۳۶ و ۲۹ میلی‌متر ارتفاع نفوذ آب در نمونه‌های بتنی کسب گردید. در بتن ژئوپلیمری، ضعیف‌ترین (بیشترین ارتفاع) و بهترین (کمترین ارتفاع) عملکرد بتن در آزمون نفوذپذیری به‌ترتیب متعلق به سن عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه به‌میزان ۲۷ و ۲۳ میلی‌متر ارتفاع نفوذ آب در نمونه‌های بتنی کسب گردید. این موضوع به‌دلیل پیشرفت در فرایند شیمیایی موسوم به هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون است که منجر به تراکم بیشتر در بتن همزمان با افزایش سن عمل‌آوری می‌گردد. نتایج حاصل از نفوذپذیری آب در سنین متناظر عمل‌آوری، حاکی از برتری در بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی می‌باشد، در این راستا در سن عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، بتن ژئوپلیمری نسبت به بتن معمولی به‌ترتیب به‌میزان ۲۵، ۱۰/۷۱ و ۲۰/۶۸ درصد نفوذ آب کمتری را تجربه کرده است. این موضوع به‌دلیل حضور ذرات چسباننده و پرکننده بیشتر در ترکیب سرباره کوره آهنگدازی نسبت به بتن پرتلند است که با ترکیب شیمیایی با محلول قلیایی، منجر به تولید بتن سخت‌شده با تراکم بالا و تخلخل و نفوذپذیری پایین شده است. در این راستا تحقیقات سایرین نشان داده است که، نفوذپذیری وابسته به تخلخل و اتصال منافذ موجود در خمیر سیمان و ریزترک‌های موجود در بتن، خصوصاً در سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌باشد (بانثیا^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). از طرفی مقدار مناسب عیار سیمان در مخلوط بتن، سبب تراکم بهتر و عدم جداشدگی دانه‌ها می‌گردد و در این راستا نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد (استاندارد نفوذپذیری، ۲۰۱۴). آزاد و لقلین (احمد و همکاران، ۲۰۰۵) و کاظمیان و غره (کاظمیان و غره^۲، ۲۰۱۷) در تحقیقات خود بهبود نفوذپذیری بتن را با افزایش عیار سیمان گزارش کرده‌اند.

1 Banthia

2 Kazemian & Ghareh



شکل ۲- نتایج آزمون نفوذپذیری آب

۳-۴- تفسیر و آنالیز SEM

در این مقاله، نتایج حاصل از تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی در مقیاس ۴۰ میکرومتر از ریزساختار بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه در شکل ۳ به‌نمایش درآمده است. به‌طور کلی تصاویر حاصل از ریزساختار خمیر بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری را می‌توان به چند بخش به‌شرح ذیل تقسیم‌بندی کرد.

(۱) شامل ژل‌های هیدراته شده ناشی از فرایند بسپارش و ژئوبسپارش، که به‌طور عمده به‌صورت نواحی با رنگ تیره در شکل‌ها مشاهده می‌گردند.

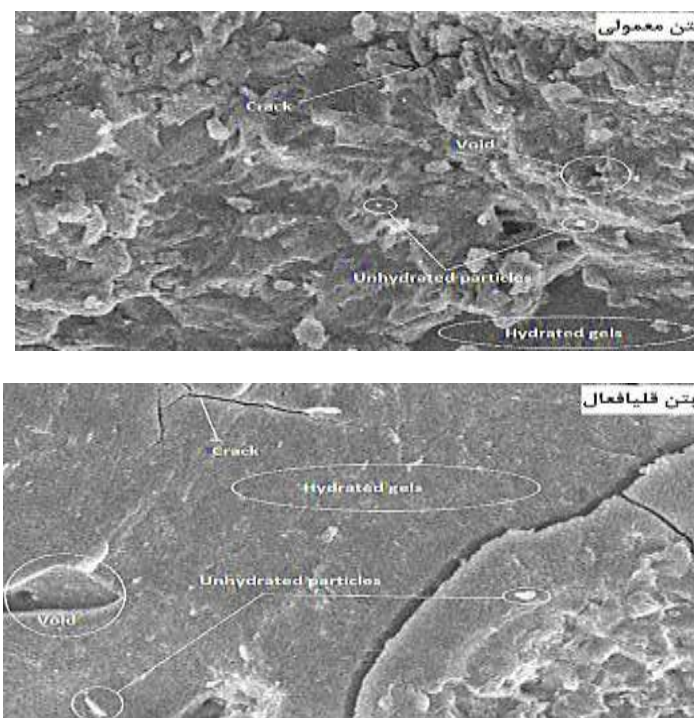
(۲) دانه‌های کلینکری هیدراته‌نشده و ذرات ناشی از وجود ناخالصی‌ها در مواد اولیه، که به‌طور عمده به‌صورت نواحی با رنگ سفید در شکل‌ها مشاهده می‌گردند.

(۳) ترک‌ها و ریز ترک‌های موجود در مخلوط به‌دلیل انقباض حرارتی ناشی از عمل‌آوری حرارتی و حرارت هیدراتاسیون و ژئوپلیمریزاسیون با توجه به عیار بالا از سیمان پرتلند و سرباره کوره آهن‌گدازی در ترکیب بتن.

(۴) حفرات و منافذ مویینه بین لایه‌ای در ساختار ژل‌های هیدراته و حفرات و منافذ مویینه بین - سطحی در نواحی انتقال.

(۵) سایر ذرات مشارکت نکرده در فرایند شیمیایی.

در تصاویر حاصل از ریزساختار نمونه بتن ژئوپلیمری، حجم ژل‌های هیدراته شده حاصل از فرایند شیمیایی بین مصالح سیمانی و محلول قلیا فعال، بیش از بتن معمولی مشاهده می‌گردد. این موضوع به دلیل حضور ذرات سیمانی چسباننده و پرکننده فراوان در ترکیب سرباره کوره آهنگدازی نسبت به سیمان پرتلند می‌باشد که توانسته است پس از فرایند ژئوبسپارش، حجم بیشتری از ژل‌های هیدراته نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) را تولید نماید. ساختار درختی ناشی از ضعف تراکم ترکیب بتن، به مقدار اندکی در بتن معمولی دیده می‌شود اما این ساختار در بتن ژئوپلیمری مشاهده نمی‌گردد. اندازه و حجم حفرات و منافذ در بتن معمولی بیش از بتن ژئوپلیمری است و وجود برخی از ریزترک‌های موجود در ماتریس بتن ژئوپلیمری، بیشتر ناشی از عمل‌آوری حرارتی این نوع از بتن تحت حرارت ۶۰ درجه سلسیوس می‌باشد. در این راستا تحقیقات سایر محققین نشان داده است که در بتن ژئوپلیمری به دلیل عمل‌آوری در محیط خشک کوره یک سری ریزترک‌هایی در بتن تشکیل می‌گردد که باعث می‌شود بتن از یکپارچگی کامل که باعث انتقال امواج اولتراسونیک با سرعت بالاتر گردد خارج شود و این امر باعث می‌گردد تا اندکی از سرعت‌های به دست آمده از مقادیر بتن معمولی کمتر باشد، البته وجود این ترک‌ها در ابعاد بسیار ریز بوده و تنها بر سرعت امواج اولتراسونیک تاثیر می‌گذارد و تاثیر چندانی بر سایر خواص بتن نخواهد داشت (رن ۱ و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۳- نتایج آنالیز SEM

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه آزمایشگاهی، یک طرح مخلوط از بتن معمولی و یک طرح مخلوط از بتن ژئوپلیمری به منظور بررسی ریزساختاری و تخمین میزان استحکام بتن جهت به کارگیری در سازه‌های با اهمیت بالا نظیر سازه‌های مراکز راهبردی و آمادی کشور ساخته شد. در این پژوهش آزمایشگاهی، بتن تولید شده تحت آنالیز تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه و دمای ۲۱ درجه سلسیوس، قرار گرفت و در ادامه آزمون مکانیکی مقاومت فشاری و آزمون دوام نفوذپذیری آب در بتن انجام گرفت تا نتایج ریزساختاری بتن مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار بگیرند. نتایج حاصل از آنالیز SEM حاکی از برتری تراکم در بخش ریزساختار بتن ژئوپلیمری به واسطه تولید حجم بالای ژل‌های هیدراته نسبت به بتن معمولی است.

ژل‌های هیدراته نظیر سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) با پر کردن حفرات، منافذ، ترک‌ها و ایجاد پیوند در نواحی انتقال بین سطحی در حد فاصل خمیر سیمان و سنگدانه‌ها موجب ایجاد استحکام و تراکم در بتن سخت‌شده می‌گردند. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و نفوذپذیری، نشان از تکمیل بخش اعظمی از فرایند ژئوبسپارش در سن عمل‌آوری ۹۰ روزه دارد، در این راستا بهبود نتایج در بتن معمولی و بتن ژئوپلیمری در آزمون مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۴۸/۷۹ و ۱۰/۹۳ درصد در سن ۹۰ روز عمل‌آوری نسبت به سن ۷ روز عمل‌آوری در بتن، کسب گردید. در آزمون نفوذپذیری، این برتری به ترتیب به میزان ۱۹/۴۴ و ۱۴/۸۱ درصد حاصل گردید. نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب در بتن در هماهنگی و هم‌پوشانی با بررسی‌های ریزساختاری بتن قرار گرفتند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، به منظور افزایش استحکام و توان دفاعی سازه‌های زیربنایی و راهبردی کشور در برابر اقدامات آفندی دشمن که همواره به صورت عامل و غیرعامل این گونه از ابنیه‌های بتن‌آرمه را تهدید می‌کند، به کارگیری از بتن ژئوپلیمری در این گونه از سازه‌ها می‌تواند راه‌کاری موثر به منظور کاهش خطرات و آسیب‌های پیش‌آمده باشد، بدیهی است در این راستا بحران‌های پیش‌آمده احتمالی قابل مدیریت و کنترل خواهد بود.

فهرست منابع

- Ahmad, A., Ahmad, W., Aslam, F., & Joyklad, P. (2022). Compressive strength prediction of fly ash-based geopolymer concrete via advanced machine learning techniques. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00840.
- Ahmad, S. Azad, A.K. and Loughlin, K.F. (2005). A study of permeability and tortuosity of concrete. 30th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 23 - 24 August.
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. S., Faraj, R. H., Qaidi, S. M., & Mohammed, A. A. (2022). Compressive strength of geopolymer concrete modified with nano-silica: Experimental and modeling investigations. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01036.
- Asadi, I., Baghban, M. H., Hashemi, M., Izadyar, N., & Sajadi, B. (2022). Phase change materials incorporated into geopolymer concrete for enhancing energy efficiency and sustainability of buildings: a review. *Case Studies in Construction Materials*, e01162.
- Albidah, A., Alqarni, A. S., Abbas, H., Almusallam, T., & Al-Salloum, Y. (2022). Behavior of Metakaolin-Based geopolymer concrete at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 317, 125910.
- Amin, M., Elsakhawy, Y., Abu el-hassan, K., & Abdelsalam, B. A. (2022). Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00976.
- Allahverdi, A. L. I., Kani, E. N., & Yazdanipour, M. (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement. *Ceramics-Silikáty*, 55(1), 68-78.
- Banthia, N. Biparva, A. and Mindess, S. (2005). Permeability of concrete under stress. *Cement and Concrete Research*, No. 35, pp. 1651 – 1655.
- Beskopylny, A. N., Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Mailyan, L. R., Meskhi, B., & El'shaeva, D. (2022). The Influence of Composition and Recipe Dosage on the Strength Characteristics of New Geopolymer Concrete with the Use of Stone Flour. *Applied Sciences*, 12(2), 613.
- Bernal, S. A., San Nicolas, R., Myers, R. J., de Gutiérrez, R. M., Puertas, F., van Deventer, J. S., & Provis, J. L. (2014). MgO content of slag controls phase evolution and structural changes induced by accelerated carbonation in alkali-activated binders. *Cement and Concrete Research*, 57, 33-43.
- Building and Housing Research Center, (2014), N. Issue: 428, National durability of concrete code in Persian Gulf and Oman Sea, P.P. 34-35.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and application 2nd ed. *Institut Géopolymère, France*.
- Deb, P., Nath, P., & Sarker, P. (2015). Drying shrinkage of slag blended fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Procedia Engineering*, 125, 594-600.
- Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52-59.
- Eftekhari, S. M., etemadi, L., & hoseini, M. (2021). Designing a Social Crisis Management Model in Earthquakes, and Modifying the Structure of Vital Arteries Distribution. 12(4), 7-35.
- Ghoreishi, F. S., & naghibi, F. (2023). Multi-criteria evaluation of the role of the pivotal neighborhood in the crisis management cycle (Case study: Bazarbash neighborhood of Urmia). 14(4), 119-150.

- Hoseinpour, R. (2021). The Importance and Role of Crisis Logistics in the Supply Chain and Support of Crisis Management (Emphasizing the Armed Forces' logistics). *13*(3), 33-58.
- Hongjian, D., Suhuan, D., & Liu, X. (2014). Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and building materials*, *73*, 705-712.
- Jindal, B. B., Alomayri, T., Hasan, A., & Kaze, C. R. (2022). Geopolymer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-26.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and concrete research*, *41*(12), 1232-1243.
- Kanagaraj, B., Anand, N., Alengaram, U. J., Raj, R. S., & Kiran, T. (2022). Exemplification of sustainable sodium silicate waste sediments as coarse aggregates in the performance evaluation of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, *330*, 127135.
- Kazemian, S., & Ghareh, S. (2017). Effects of cement, different bentonite, and aggregates on plastic concrete in Besh-Ghardash Dam, Iran. *Journal of Testing and Evaluation*, *45*(1), 242-248.
- Li, W., Shumuye, E. D., Shiyang, T., Wang, Z., & Zerfu, K. (2022). Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. *Case Studies in Construction Materials*, e00894.
- Lin, W., Zhang, C., Fu, J., & Xin, H. (2018). Dynamic mechanical behaviors of calcium silicate hydrate under shock compression loading using molecular dynamics simulation. *Journal of Non-Crystalline Solids*, *500*, 482-486.
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar. *Journal of cleaner production*, *187*, 171-179.
- Lyu, X., Robinson, N., Elchalakani, M., Johns, M. L., Dong, M., & Nie, S. (2022). Sea sand seawater geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, *50*, 104141.
- Mansourghanaei¹, M. (2023). Experimental Study of Impact Strength in Ordinary Concrete under High Temperature, Along with Validation by SEM and XRD. *Passive Defense Quarterly*, *14*(1), 1-10.
- Mansourghanaei², M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Investigation of the Impact Resistance, Microstructure and Weight Loss in Fibrous Pozzolan Concrete Containing Fibers, Under High Temperatures. *Passive Defense Quarterly*, *13*(3), 11-23.
- Mansourghanaei³, M., biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Comparing the Impact Strength of Alkali Activated Concrete and Normal Concrete Under High Heat Based on XRD and SEM Tests. *Passive Defense Quarterly*, *13*(1), 47-56.
- Mansourghanaei⁴, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of the effects of adding silica nanoparticles on the durability of geopolymer concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 1-13.
- Mansourghanaei⁵, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental study of properties of green concrete based on geopolymer materials under high temperature. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, (), -. doi: 10.22059/cej.2022.345402.1856
- Mansourghanaei⁶, M. (2022). Experimental evaluation of compressive, tensile strength and impact test in blast furnace slag based geopolymer concrete, under high temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, *4*(2), 12-21.
- Mansourghanaei⁷, M., & Biklaryan, M. (2022). Experimental study of compressive strength, permeability and impact testing in geopolymer concrete based on Blast furnace slag. *Journal of Civil Engineering Researchers*, *4*(3), 31-39.

- Mansourghanaei⁸, M., Biklaryan, M., & Mardookhpour, A. (2022). Experimental Study of Mechanical Properties of Geopolymer Concrete as Green Concrete with a Sustainable Development Approach in the Construction Industry, Under High Temperature. *Journal of Civil Engineering Researchers*, 4(4), 1-11.
- Mansourghanaei⁹, M. (2022). Evaluation of mechanical properties of reinforced concrete based on non-destructive test of ultrasonic waves, Under high heat. *NDT Technology*, 2(9), 52-62. doi: 10.30494/jndt.2022.333675.1085
- Mansourghanaei¹⁰ M. Laboratory study of mechanical properties of ordinary concrete under high heat consumption in hydraulic structures, along with validation by SEM and XRD tests. *Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant* 2022; 9 (32) :11-22
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Memiş, S., & Bilal, M. A. M. (2022). Taguchi optimization of geopolymer concrete produced with rice husk ash and ceramic dust. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 15876-15895.
- Nofallah, M. H. (2018). Effect of sodium Hydroxide solution concentration and sodium silicate to sodium hydroxide ratio on the compressive strength and water absorption of slag-based alkali-activated concrete. *Concrete Research*, 11(2), 95-103.
- Myers, R. J., Bernal, S. A., San Nicolas, R., & Provis, J. L. (2013). Generalized structural description of calcium–sodium aluminosilicate hydrate gels: the cross-linked substituted tobermorite model. *Langmuir*, 29(17), 5294-5306.
- Pilehvar, S., DuyCao, V., M.Szczotok, A., Carmona, M., Valentini, L., Lanzón, M., LenaKjønksen, A. (2018). Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials*, 173, 28-39.
- Ren, W., Xu, J., & Bai, E. (2016). Strength and ultrasonic characteristics of alkali-activated fly ash-slag geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(2), 04015124.
- Richardson, I. G. (2008). The calcium silicate hydrates. *Cement and concrete research*, 38(2), 137-158.
- Niu, M., Zhang, P., Guo, J., & Wang, J. (2022). Effect of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash on the Mechanical Properties and Microstructure of Geopolymer Concrete. *Gels*, 8(6), 341.
- Ramezaniapor, A., Bahman Zadeh, F., Zolfagharnasab, A., & Ramezaniapor, A. M. (2018). Studying the effect of the amount of source materials and water to binder ratio on chloride ions ingress in alkali-activated slag concretes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4), 673-684.
- Sathish Kumar, V., Ganesan, N., Indira, P. V., Murali, G., & Vatin, N. I. (2022). Flexural Behaviour of Hybrid Fibre-Reinforced Ternary Blend Geopolymer Concrete Beams. *Sustainability*, 14(10), 5954.
- Shilar, F. A., Ganachari, S. V., Patil, V. B., Khan, T. Y., & Dawood, S. (2022). Molarity activity effect on mechanical and microstructure properties of geopolymer concrete: A review. *Case Studies in Construction Materials*, e01014.
- Srividya, T., PR, K. R., Sivasakthi, M., Sujitha, A., & Jeyalakshmi, R. (2022). A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00812.
- Siddique, R., & Kaur, D. (2012). Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 45-51.

- Tayyebi rahani, A., niknam, O., & mohammadnejad, M. (2023). Dimensions of organizational culture in crisis management of industrial units. *14*(3), 101-132.
- Towhidian, A., Hosnavi, R., & jafarizad, A. (2022). The Crisis Management Model Based on Imam Ali's (AS) Governance Thought (A Case Study: Corona Virus). *14*(2), 121-151.
- Thakur, M., & Bawa, S. (2022). Self-Compacting geopolymer Concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*.
- Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Chinnu, S. N., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., ... & Hamada, H. M. (2022). Geopolymer concrete incorporating recycled aggregates: A comprehensive review. *Cleaner Materials*, 100056.
- Upadhyay, H., Mungule, M., & Iyer, K. K. (2022). Issues and challenges for development of geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*.
- Verma, M., Dev, N., Rahman, I., Nigam, M., Ahmed, M., & Mallick, J. (2022). Geopolymer Concrete: A Material for Sustainable Development in Indian Construction Industries. *Crystals*, *12*(4), 514.
- Verma, M., & Dev, N. (2022). Effect of liquid to binder ratio and curing temperature on the engineering properties of the geopolymer concrete. *Silicon*, *14*(4), 1743-1757.
- Wong, L. S. (2022). Durability performance of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, *14*(5), 868.
- Yüksel, İ., Siddique, R., & Özkan, Ö. (2011). Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*, *25*(2), 967-972.

