Journal of Structural and Construction Engineering, 12(02), 2025, pp. 05-23

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Feasibility of producing a novel product using red mud waste generated in the alumina processing to create added value and prevent waste disposal.

Gholamreza Havaei[1*], Seyed Ali Mohseni[2]

2- Ph.D. student, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT

This research investigates the use of red mud from the alumina plant as a partial replacement for slag in alkali-activated concrete. The main objective of this study is to produce high-performance products while reducing the environmental impacts associated with industrial waste. In this regard, various percentages of red mud (up to 40%) were incorporated into alkali-activated concrete, and its effects on properties such as setting time, compressive strength, flexural strength, and water absorption were examined. The results showed that adding up to 20% red mud increased the setting time of the concrete, which can be beneficial in specific projects. The highest compressive strength was observed in samples containing 20% red mud, with 40 MPa at 7 days and 55 MPa at 28 days, which is suitable for structural applications. Additionally, the use of 30% and 40% red mud also resulted in acceptable compressive strength. This research demonstrated that red mud can serve as an effective replacement for slag in alkali-activated concrete without significantly reducing the concrete's strength. Overall, this study presents an innovative solution for the reuse of industrial waste, particularly in the production of precast concrete and concrete components, and improves the durability and sustainability of concrete under various environmental conditions.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 December 2024
Revise Date: 03 March 2025
Accept Date: 09 April 2025

Keywords:
Bauxite residue
red mud
geopolymer concrete
alkali-activated

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.523805.3731

*Corresponding author: Gholamreza Havaei
Email address: Havaei@aut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

امکان‌سنجی تولید محصول نوین با استفاده از پسماند گل قرمز تولیدی در فرآوری آلومینا به منظور تولید ارزش افزوده و جلوگیری از هدردهی پسماند

غلامرضا هوائی[1*]، سید علی محسنی[2]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

ین تحقیق به بررسی استفاده از گل قرمز آلومینا به‌عنوان جایگزین بخشی از سرباره در بتن‌های قلیایی فعال پرداخته است. هدف اصلی تحقیق تولید محصولاتی با عملکرد فنی بالا و در عین حال کاهش تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از مواد زائد صنعتی است. در این راستا، درصدهای مختلف گل قرمز (تا ۴۰ درصد) در ترکیب بتن قلیایی فعال به‌کار گرفته شد و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌هایی همچون زمان گیرش، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و جذب آب بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن گل قرمز تا ۲۰ درصد، زمان گیرش بتن را افزایش داد که می‌تواند در پروژه‌های خاص مفید باشد. بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌هایی با ۲۰ درصد گل قرمز مشاهده شد که در سن ۷ روز حدود ۴۰ مگاپاسکال و در سن ۲۸ روز ۵۵ مگاپاسکال بود، که برای کاربردهای سازه‌ای مناسب است. همچنین، استفاده از ۳۰ و ۴۰ درصد گل قرمز نیز به مقاومت فشاری قابل قبولی منجر شد. این تحقیق نشان داد که گل قرمز می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای سرباره در بتن‌های قلیایی فعال استفاده شود، بدون اینکه مقاومت بتن به‌طور چشمگیری کاهش یابد. به‌طور کلی، این تحقیق به‌عنوان یک راهکار نوآورانه برای استفاده مجدد از مواد زائد صنعتی، به‌ویژه در تولید بتن‌های پیش‌ساخته و قطعات بتنی، پیشنهاد می‌دهد و موجب بهبود دوام و پایداری بتن در شرایط محیطی مختلف می‌شود.

کلمات کلیدی: پسماند سنگ بوکسیت، گل قرمز، بتن ژئوپلیمر، قلیافعال

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.523805.3731
۱۴۰۳/۰۹/۲۱	۱۴۰۳/۱۲/۱۳	۱۴۰۴/۰۱/۲۰	۱۴۰۴/۰۱/۲۰	۱۴۰۴/۰۲/۳۱	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2025.523805.3731

*نویسنده مسئول: غلامرضا هوائی
پست الکترونیکی: Havaei@aut.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشر مسائل زیست‌محیطی است. با افزایش جمعیت و رشد صنعت، آلودگی محیط‌زیست به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است. یکی از وظایف مهندسان، کاهش و کنترل این آلودگی‌ها است. تولید زباله‌های صنعتی در کشورهای در حال توسعه امری اجتناب‌ناپذیر است و به همین دلیل مدیریت صحیح و اصولی این زباله‌ها اهمیت زیادی دارد که نیازمند توجه ویژه مسئولین است.

استفاده مداوم از منابع طبیعی، به‌ویژه منابع تجدیدناپذیر، یکی از موضوعات مهم در راستای توسعه پایدار است. در سال‌های اخیر، استفاده مجدد از ضایعات صنعتی به‌عنوان جایگزین مصالح مختلف بتن، به‌ویژه برای کاهش آلودگی، حفظ محیط‌زیست و رشد اقتصادی، به یک موضوع مهم تبدیل شده است. از آنجا که بتن یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی است، استفاده از آن در پروژه‌های ساختمانی نیاز به منابع مختلفی مانند آب شیرین و سنگدانه دارد که با توجه به مشکلات زیست‌محیطی تولید سیمان، استفاده از جایگزین‌ها اهمیت زیادی پیدا می‌کند. برای تولید هر تن سیمان پرتلند حدود یک تن دی‌اکسید کربن به هوا آزاد می‌شود که اثرات مخربی بر گرم شدن کره زمین دارد [۱].

در این راستا، استفاده از ضایعات صنعتی مانند خاکستر بادی، سرباره و گل قرمز می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان و سنگدانه‌ها در بتن‌ها عمل کند. گل قرمز به‌عنوان یک باطله صنعتی از فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت تولید می‌شود. این فرآیند شامل شستن و خرد کردن بوکسیت با محلول هیدروکسید در دما و فشار بالا است که آلومینا را بازیابی می‌کند و باقی‌مانده آن به‌عنوان گل قرمز شناخته می‌شود. گل قرمز به‌دلیل مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع آن، از جمله آلودگی رودخانه‌ها، قلیایی شدن آب‌های زیرزمینی، آلودگی خاک و کاهش حاصلخیزی آن، نیاز به مدیریت ویژه دارد. همچنین، این مواد معمولاً دارای مقادیر قابل توجهی از اکسیدهای سیلیسیوم، آلومینیوم، کلسیم و آهن هستند که می‌توانند در تولید سیمان پرتلند استفاده شوند[۲].

گل قرمز به‌عنوان یک محصول فرعی از فرآیند بایر در تولید آلومینا، معمولاً دارای pH بین ۱۰ تا ۱۲ و ذرات ریز با نرمی ۱۰ تا ۳۰ m^2/gاست. تخمین زده می‌شود که سالانه حدود ۱۴۲ میلیون تن گل قرمز در جهان تولید می‌شود. این ضایعات نه تنها مشکلات زیست‌محیطی بزرگی ایجاد می‌کند، بلکه هزینه‌های زیادی نیز برای دفع آن به همراه دارد. با توجه به اینکه برای تولید هر تن آلومینا حدود دو تن گل قرمز تولید می‌شود، برآورد می‌شود که سالانه حدود یک میلیون تن گل قرمز در مجتمع آلومینا جاجرم تولید می‌شود. دفع این مقدار زیاد ضایعات هزینه‌بر است و نیاز به فضایی وسیع برای ذخیره‌سازی آن دارد [۳].

با توجه به مشکلات زیست‌محیطی دفع گل قرمز و ویژگی‌های سیمانی آن، استفاده از گل قرمز به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن‌های قلیایی فعال می‌تواند یک راهکار مؤثر باشد. این تحقیق نشان می‌دهد که گل قرمز می‌تواند در ترکیب بتن به‌عنوان جایگزینی مناسب برای سرباره استفاده شود و از این طریق، علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، عملکرد بتن را بهبود بخشد.

گل قرمز یکی از محصولات جانبی فرآیند بایر در تولید آلومینا از بوکسیت است که ترکیب آن شامل اکسیدهای آهن، آلومینیوم، تیتانیوم، سدیم، کلسیم و سیلیس می‌باشد. رنگ قرمز آن ناشی از اکسیدهای آهن است. این ماده خاصیت قلیایی بالایی دارد و pH آن بین ۱۰ تا ۱۲ است. گل قرمز از ذرات ریزی با اندازه ۷۵ میکرومتر به پایین تشکیل شده و سطح مخصوص آن بین ۲۰ تا ۳۰ مترمربع بر گرم می‌باشد. به ازای هر تن آلومینا تولید شده، حدود دو تن گل قرمز تولید می‌شود. سالانه در حدود ۷۰ تا ۹۰ میلیون تن گل قرمز در جهان تولید می‌شود و در مجتمع آلومینا جاجرم به‌طور خاص سالانه حدود یک میلیون تن گل قرمز تولید می‌گردد [۶-۴].

این ماده در بسیاری از کشورها به‌عنوان یک ضایعه صنعتی شناخته شده و مشکلات زیست‌محیطی متعددی را ایجاد می‌کند. به‌ویژه در صورت تماس گل قرمز با آب‌های سطحی، خاصیت قلیایی آب افزایش می‌یابد که می‌تواند به آلودگی گسترده محیط زیست منجر شود. همچنین نفوذ قلیایی به لایه‌های خاک و آب‌های زیرزمینی موجب آلودگی منابع آبی و کاهش کیفیت خاک‌ها می‌شود. گل قرمز حاوی فلزات

سنگین سمی است که در آب‌های قلیایی به‌راحتی حرکت کرده و می‌تواند به لایه‌های پایین‌تر خاک منتقل شود [۱۰-۷]. این ویژگی‌ها همچنین منجر به محدودیت رشد گیاهان در مناطقی که گل قرمز در آن ذخیره شده است، می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیب گل قرمز با خاک حاصلخیز موجب کاهش حاصلخیزی خاک و آسیب‌های جدی به گیاهان می‌شود.

علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی، گل قرمز به دلیل تولید زیاد آن و هزینه‌های بالا برای دفع، به‌عنوان یک چالش جدی در صنایع آلومینیوم‌سازی شناخته می‌شود. برخی از محققین پیشنهاد داده‌اند که این ماده را می‌توان به‌عنوان محصول جانبی برای بازیافت فلزات مانند آهن و آلومینیوم یا حتی استفاده در ساخت سرامیک‌ها و سنگدانه‌های بتن به‌کار برد. در این راستا، تحقیقات نشان داده است که گل قرمز می‌تواند به‌عنوان یک ماده پوزولانی برای تولید بتن استفاده شود. برای مثال، مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر، نشان داده‌اند که با استفاده از گل قرمز به‌عنوان جایگزین سیمان و مواد دیگر، می‌توان بتن‌هایی با خواص مقاومتی مناسب تولید کرد. برای مثال، در پروژه‌های تحقیقاتی، ترکیب گل قرمز با خاکستر بادی به‌منظور ساخت فوم‌سرامیک‌ها نتایج مثبتی در زمینه عایق‌کاری حرارتی و صوتی داشته است [۱۲-۱۱].

محققین همچنین موفق به ساخت سنگدانه‌هایی با استفاده از گل قرمز شده‌اند که توانایی جذب آب و جرم مخصوص مورد نیاز برای استفاده در بتن‌های سبک را دارند. همچنین در زمینه استفاده از گل قرمز برای ساخت آجر، ترکیب این ماده با رس طبیعی و بوکسیت کائولنی موجب کاهش مصرف رس طبیعی و کاهش دمای پخت آجرها شد که بهینه‌سازی مصرف انرژی را در پی داشته و از جنبه محیط‌زیستی نیز مفید است [۱۳].

یکی از کاربردهای دیگر گل قرمز، استفاده در تولید ژئوپلیمرهاست. ژئوپلیمرها که از مواد آلومینوسیلیکات مصنوعی تولید می‌شوند، به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند در بتن استفاده می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از گل قرمز در ترکیب با فلزات قلیایی تحت شرایط خاص، می‌تواند ساختار پلیمری جامد و قوی‌ای ایجاد کند که از آن در ساخت بتن‌های مقاوم و با دوام استفاده می‌شود [۱۴]. همچنین، در تحقیقاتی دیگر، تأثیر گل قرمز در تولید پوشش‌های ژئوپلیمری برای بلوک‌های بتنی نشان داده شد که این پوشش‌ها موجب افزایش دوام بتن‌های بتنی در برابر شرایط سخت می‌شوند.

علی‌رغم تمام کاربردهای بالقوه گل قرمز، هنوز استفاده گسترده از آن در صنایع مختلف با محدودیت‌هایی روبرو است. اکثر روش‌های استفاده مجدد از گل قرمز مقدار کمی از این ضایعات را مصرف می‌کنند و مقادیر زیادی از آن همچنان به‌عنوان ضایعات صنعتی در حال انباشت است. تلاش‌های زیادی برای یافتن راه‌حل‌های جدید برای استفاده از گل قرمز انجام شده است، اما تا به امروز هیچ‌کدام از این روش‌ها به‌طور قابل‌توجهی از حجم تولید آن کاسته‌اند [۱۰]. در این راستا، تحقیقات جدید همچنان بر روی بهبود فرآیندهای بازیافت و استفاده مجدد از گل قرمز متمرکز است تا بتوان از این ماده به‌طور مؤثر در صنایع مختلف استفاده کرد.

در نهایت، استفاده از گل قرمز به‌عنوان یک ماده جانبی برای تولید بتن، سیمان، سرامیک و سایر مواد ساختمانی، می‌تواند راهی مؤثر برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از این ضایعات باشد. اما به‌منظور بهره‌برداری کامل از این ماده، نیاز به تحقیقات بیشتر و توسعه تکنولوژی‌های مناسب برای استفاده از آن در مقیاس صنعتی وجود دارد [۱۴].

ژئوپلیمر یکی از نوآوری‌ها در صنعت بتن است که به دلیل ویژگی‌های خاص خود در کاهش آلودگی‌ها و همچنین بهبود خواص بتن، توجه زیادی را جلب کرده است. یکی از راه‌های کاهش آلودگی‌های ناشی از سیمان، کاهش میزان مصرف سیمان در تولید بتن است و ژئوپلیمرها به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان، می‌توانند به طور قابل‌توجهی در کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی مؤثر باشند. ژئوپلیمرها از ترکیب مواد آلومینوسیلیکاتی با فعال‌سازهای قلیایی یا اسیدی تولید می‌شوند و در شرایط خاص، به خصوص در دماهای محیطی تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد خاصیت سیمانی و چسبندگی پیدا می‌کنند. این ترکیب شیمیایی به طور کلی شبیه مواد زئولیتی است اما ساختار میکروسکوپی آن‌ها بستگی به دمای عمل‌آوری، از حالت آمورف تا نیمه بلورین تغییر می‌کند [۱].

مفهوم ژئوپلیمر برای نخستین بار توسط داویدویتس در سال ۱۹۷۸ مطرح شد. او دریافت که یک محلول قلیایی می‌تواند با سیلیسیم و آلومینیوم موجود در مواد طبیعی یا محصولات جانبی مانند خاکستر بادی واکنش داده و ماده‌ای چسباننده تولید کند. پالمو و همکاران [۲]

ژئوپلیمرها را به دو مدل تقسیم کردند: در مدل اول، سرباره کوره بلند با محلول‌های قلیایی واکنش داده و ژل C-S-H تولید می‌کند و در مدل دوم، مواد حاوی سیلیکات و آلومینیم مانند متاکائولین و خاکستر بادی واکنش می‌دهند که ساختار پلیمری ژئوپلیمر را ایجاد می‌کند.

فرآیند تولید ژئوپلیمر شامل دو مرحله است: اول فعال‌سازی حرارتی و سپس فعال‌سازی قلیایی. در برخی موارد، ماده پایه آلومینوسیلیکاتی ممکن است نیاز به فعال‌سازی حرارتی نداشته باشد، زیرا برخی از مواد آمورف به طور مستقیم در محیط‌های قلیایی فعال می‌شوند [۴]. مواد اولیه ژئوپلیمر در دسترس هستند و هر منبع آلومینوسیلیکاتی که قابلیت انحلال در محلول‌های قلیایی را داشته باشد، می‌تواند به‌عنوان منبع ژئوپلیمر استفاده شود.

مواد اولیه ژئوپلیمر شامل خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی، متاکائولین، زئولیت و حتی خاکستر پوسته برنج است [۷ و ۱۵]. از بین این مواد، خاکستر بادی و سرباره به دلیل دسترسی آسان‌تر و خواص مناسب‌تر نسبت به سایر مواد، پرکاربردتر هستند. ژئوپلیمرهایی که بر پایه متاکائولین تولید می‌شوند، از نظر دوام و پایداری در برابر شرایط سخت بهتر از سایر انواع هستند، اما به دلیل تخلخل بالای متاکائولین، نیاز به مقدار بیشتری آب برای تولید بتن با خواص مشابه سایر ژئوپلیمرها دارند.

از سوی دیگر، ژئوپلیمرهای مبتنی بر خاکستر بادی دارای خواص دوامی بهتری هستند و در برابر اسید و شرایط سخت محیطی مقاومت بالایی دارند [۸]. به‌طور کلی، فرآیند فعال‌سازی در دماهای پایین‌تر باعث فعال‌سازی خاکستر بادی می‌شود، در حالی که در دماهای بالاتر، هر دو خاکستر بادی و سرباره فعال می‌شوند. به علاوه، سرباره به دلیل فشرده بودن ریزساختار خود به استحکام بیشتر ژئوپلیمرها کمک می‌کند [۱۶].

در تولید ژئوپلیمرها، انتخاب ماده فعال‌ساز نیز نقش مهمی در تعیین خواص نهایی دارد. به‌طور معمول از هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم به‌عنوان فعال‌ساز استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داده است که درصد بالای اکسید پتاسیم در خاکستر بادی می‌تواند به افزایش مقاومت اولیه و فعال‌سازی ژئوپلیمر کمک کند [۱۷].

در نهایت، ژئوپلیمرها به‌عنوان جایگزینی برای سیمان می‌توانند علاوه بر کاهش آلایندگی‌ها و مصرف انرژی، خواص مقاومتی و دوام بتن را نیز بهبود بخشند. با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتر برای بهینه‌سازی فرآیند تولید و تعیین ترکیبات مناسب برای کاربردهای مختلف در صنعت ساخت‌وساز وجود دارد [۱۸].

۲- روش تحقیق

در این تحقیق، گل قرمز آلومینای جاجرم به‌عنوان جایگزینی برای برخی از مواد تشکیل‌دهنده بتن مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این تحقیق بررسی فرآیندهای آماده‌سازی گل قرمز به‌منظور استفاده در تولید بتن و سیمان است. فرآیندهای مختلف برای آماده‌سازی گل قرمز شامل خشک‌کردن، فرآوری حرارتی و آسیاب کردن بودند. در این بخش، تمامی مراحل و تجهیزات مورد استفاده برای آماده‌سازی گل قرمز به‌طور دقیق توضیح داده می‌شود.

۲-۱ خشک‌کردن

یکی از مهم‌ترین مراحل آماده‌سازی گل قرمز، خشک‌کردن آن است. این ماده در حالت مرطوب مشکلات متعددی را به‌دنبال دارد؛ از جمله تغییرات در خصوصیات بتن و افزایش وزن آن که منجر به مشکلات حمل و نقل می‌شود. علاوه بر این، رطوبت موجود در گل قرمز ممکن است با ذرات سیمان واکنش داده و باعث هیدراته شدن پیش از استفاده از سیمان شود که خاصیت چسبندگی آن را از بین می‌برد. بنابراین، پیش از استفاده از گل قرمز در فرآیند بتن‌سازی، باید آن را به‌طور کامل خشک کرد.

برای خشک‌کردن گل قرمز در این تحقیق، از آون آزمایشگاهی با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. نمونه‌های گل قرمز به مدت ۲۴ ساعت در آون نگهداری شدند تا کاملاً خشک شوند.

۲-۲ فرآوری حرارتی

یکی دیگر از مراحل مهم آماده‌سازی گل قرمز، فرآوری حرارتی آن است که به‌عنوان فرآیند کلسینه کردن شناخته می‌شود. این فرآیند می‌تواند اثرات مثبتی بر واکنش‌پذیری گل قرمز داشته باشد. با کلسینه کردن گل قرمز در دماهای بالا (حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، ساختار آن تغییر کرده و به حالت آمورف در می‌آید. مواد آمورف دارای واکنش‌پذیری بیشتری هستند و بنابراین در واکنش‌های شیمیایی سریع‌تر وارد عمل می‌شوند، که باعث بهبود خواص مقاومتی و دوام بتن می‌شود.

در این تحقیق، نمونه‌های گل قرمز در دماهای مختلف ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت کلسینه شدند. سپس آزمون XRD برای بررسی تغییرات ساختاری پیش و پس از کلسینه کردن انجام شد. نتایج این آزمون نشان داد که در دماهای بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات بیشتری در ساختار کریستالی گل قرمز ایجاد می‌شود. بنابراین، دماهای بین ۶۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد برای فرآوری حرارتی گل قرمز انتخاب شدند.

۲-۳ آسیاب کردن

گل قرمز به دلیل نحوه جمع‌آوری و دپو، معمولاً دارای ذرات نسبتاً درشت است. این ذرات در اندازه‌های بزرگ تجمع یافته‌اند که مانع از واکنش‌پذیری سریع آن‌ها می‌شود. بنابراین، برای افزایش واکنش‌پذیری و بهبود خواص بتن، لازم است که اندازه ذرات گل قرمز کاهش یابد.

در این تحقیق، پس از فرآیند کلسینه کردن، ذرات گل قرمز خرد شدند تا به اندازه نرمال و مورد نیاز برای استفاده در بتن برسند. برای این منظور، از آسیاب گلوله‌ای استفاده شد. در ابتدا، یک خردایش اولیه برای کاهش اندازه ذرات تا حدود ۲ میلی‌متر انجام شد. سپس پس از کلسینه کردن، آسیاب کردن مجدد برای دستیابی به نرمی مطلوب انجام شد.

۲-۴ انجام آزمایشات اولیه پسماند سنگ بوکسیت به‌عنوان یک ماده پوزولانی

پسماند سنگ بوکسیت، که به عنوان گل قرمز شناخته می‌شود، در این تحقیق به‌عنوان یک ماده پوزولانی بررسی شده است. طبق آیین‌نامه ASTM C618-94a ، پوزولان به موادی اطلاق می‌شود که خود خاصیت چسبندگی ندارند یا چسبندگی کمی دارند، اما در شرایط رطوبت و حرارت معمولی، در حضور هیدروکسید کلسیم، با انجام واکنش‌های شیمیایی ترکیباتی با خاصیت سیمانی به وجود می‌آورند.

در استاندارد ملی ایران نیز، پوزولان‌ها به‌عنوان مواد سیلیسی یا آلومینو سیلیسی تعریف می‌شوند که خاصیت چسبندگی کم یا هیچ ندارند، اما در صورت پودر شدن به‌صورت بسیار نرم، در حضور رطوبت و هیدروکسیدهای قلیایی واکنش داده و ترکیبات سیمانی به‌وجود می‌آورند.

در مقررات ملی ساختمان نیز پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که با هیدروکسید کلسیم واکنش می‌دهند و ترکیباتی را تولید می‌کنند که ساختار آن‌ها شبیه ترکیبات حاصل از سیمان پرتلند است.

برای آنکه یک ماده به‌عنوان پوزولان شناخته شود، لازم است مشخصات مختلف آن مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق، گل قرمز به‌عنوان پوزولان برای استفاده در بتن مورد ارزیابی قرار گرفته است و در این بخش، مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن از طریق آزمایشات مختلف بررسی شده است.

۲-۵ تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی گل قرمز

آزمون‌های مختلف برای تعیین مشخصات فیزیکی و شیمیایی گل قرمز انجام شد. این آزمایش‌ها در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی امیرکبیر صورت گرفت و شامل آزمون‌های پراش پرتو ایکس[1] فلورسانس اشعه ایکس[2]، اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات[3] و شاخص فعالیت

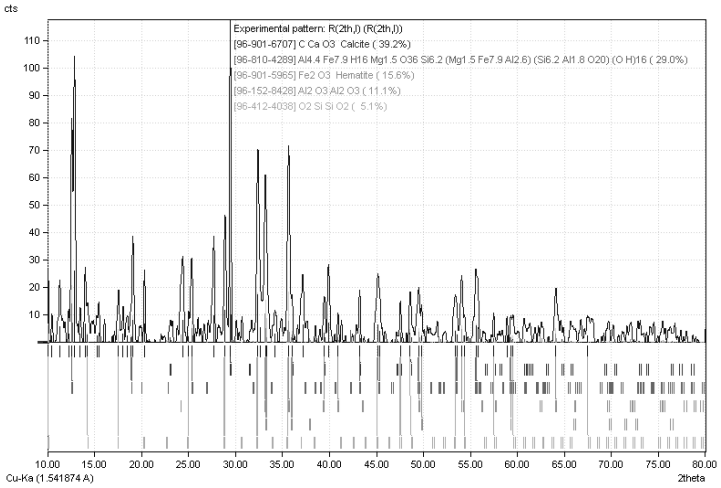
[1] XRF
[2] XRF
[3] PSD

پوزولانی بود. نتایج این آزمایش‌ها به‌منظور تعیین ویژگی‌های پوزولانی گل قرمز و ارزیابی قابلیت آن به‌عنوان یک جایگزین مناسب برای مواد سیمانی در بتن استفاده شده است.

در ادامه، این نتایج به‌طور دقیق تحلیل می‌شود تا نشان‌دهنده خواص پوزولانی گل قرمز و پتانسیل آن برای بهبود خواص بتن باشد.

۲-۵-۱ آزمون XRD

نتایج آزمون XRD انجام گرفته در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی امیرکبیر بر روی نمونه گل قرمز آلومینای جاجرم در شکل شماره یک آمده است. با توجه به نمودار XRD، مشاهده می‌شود که گل قرمز دارای فازهای کلسیت، هماتیت، کوارتز و سایر فازهای متفرقه می‌باشد. این فازها همگی در سیمان معمولی نیز وجود دارد و می‌تواند در فرایند پلیمریزاسیون و هیدراسیون شرکت کنند و تشکیل ژل دهند. بنابراین گل قرمز می‌تواند به عنوان یک ماده پوزولانی مورد قبول باشد.



شکل ۱- نمودار XRD گل قرمز آلومینای جاجرم

۲-۵-۲ آزمون XRF

نتایج آزمون XRF گل قرمز آلومینای جاجرم در جدول زیر آمده است. با توجه به جدول زیر مشاهده می‌شود که بخش عمده گل قرمز آلومینای جاجرم حاوی آلومین، سیلیس، کلسیم اکسید و اکسید آهن می‌باشد. این نشان می‌دهد که گل قرمز می‌تواند به عنوان ماده پایه در مواد ژئوپلیمری به کار رود و همچنین به جهت درصد نسبتا بالای CaO، این ماده می‌تواند واکنش هیدراسیون نیز داشته باشد و ژل C-S-H نیز تولید کند..

جدول ۱- نتیجه آزمون XRF نمونه گل سرخ آلومینای جاجرم

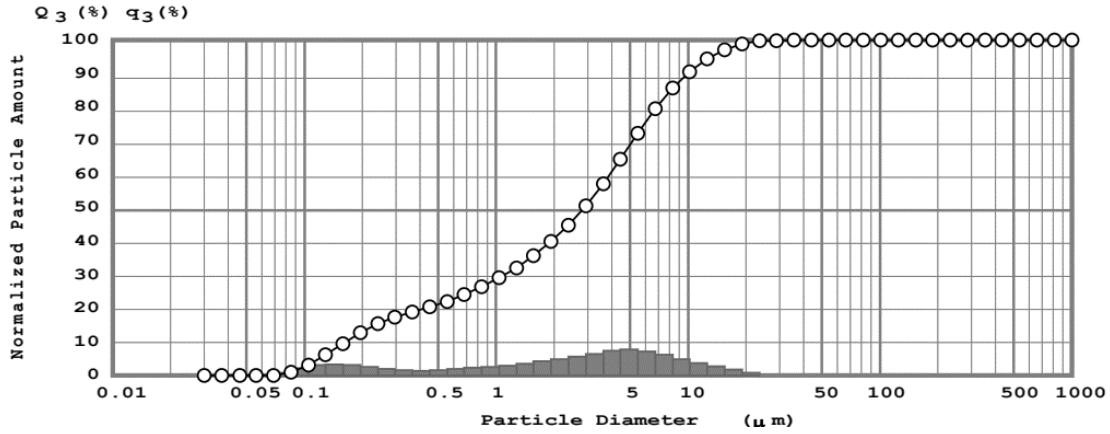
اکسیدهای تشکیل دهنده	Al2O3	SiO2	Fe2O3	CaO	MgO	TiO2	Na2O
درصد	22.67	19.3	28.19	19.14	1.76	4.43	4.42
	70.16						

۲-۵-۳ آزمون PSD

در این نمونه که با استفاده از دستگاه mastersizer 2000 به دست آمده، اندازه ذرات را در یک گراف و همچنین چند ستون نمایش میدهد. در قسمت گراف دو ستون داریم که در ستون عمودی درصد حجم مواد و در ستون افقی اندازه مواد نمایش داده شده است.

به طور کلی هر چقدر این گراف به شکل U برعکس نزدیکتر باشد، نشان دهنده یکنواختر بودن اندازه ذرات نمونه است. همچنین هر چقدر دهانه U تنگتر باشد، یکنواختی بیشتر خواهد بود.

همچنین در دو طرف U یا سمت راست آن اگر خط به کف گراف چسبیده باشد، نشان دهنده عدم وجود سایزهای درشتر است. فاصله داشتن این خط در سمت چپ اما نشان دهنده وجود ذرات ریزتر در نمونه است. برای تعیین اندازه ذرات و دانه‌بندی ذرات پودر گل قرمز مورد استفاده، آزمون PSD[4] مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع ذرات حالت مناسبی دارد و از طرفی اکثر ذرات، در اندازه بین ۰/۵ تا حدود ۱۰ میکرون می‌باشد.



شکل ۲- نمودار دانه‌بندی (PSD) گل قرمز آلومینای جاجرم

۲-۵-۴ شاخص فعالیت پوزولانی

یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر واکنش‌های پوزولانی، شاخص فعالیت پوزولانی می‌باشد. این شاخص به کمک روش‌های مختلف مورد ارزیابی و محاسبه است که در این تحقیق از روش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی به کمک آزمون TGA استفاده می‌شود. در این روش نمونه‌های رس کلسینه به همراه آهک با نسبت مساوی با هم مخلوط شده و به کمک دستگاه آزمون TGA در دمای و مدت زمان مشخص حرارت داده می‌شود و میزان مصرف آهک توسط پوزولان در طول آزمایش مشخص می‌شود. هرچه میزان مصرف آهک توسط پوزولان بیش‌تر باشد، شاخص فعالیت پوزلانی بیش‌تر خواهد بود.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر بر واکنش‌های پوزولانی، شاخص فعالیت پوزولانی می‌باشد. این شاخص به کمک روش‌های مختلف مورد ارزیابی و محاسبه است که در این تحقیق از روش تعیین شاخص فعالیت پوزولانی به کمک آزمون TGA استفاده می‌شود. در این روش نمونه‌های گل قرمز به همراه آهک با نسبت مساوی با هم مخلوط شده و به کمک دستگاه آزمون TGA در دمای و مدت زمان مشخص حرارت داده می‌شود و میزان مصرف آهک توسط پوزولان در طول آزمایش مشخص می‌شود. هرچه میزان مصرف آهک توسط پوزولان بیشتر باشد، شاخص فعالیت پوزلانی بیشتر خواهد بود. با توجه به آزمون انجام شده، میزان شاخص پوزولانی گل قرمز در حدود ۲۸ درصد می‌باشد.

۲-۶ مشخصات فیزیکی ماسه

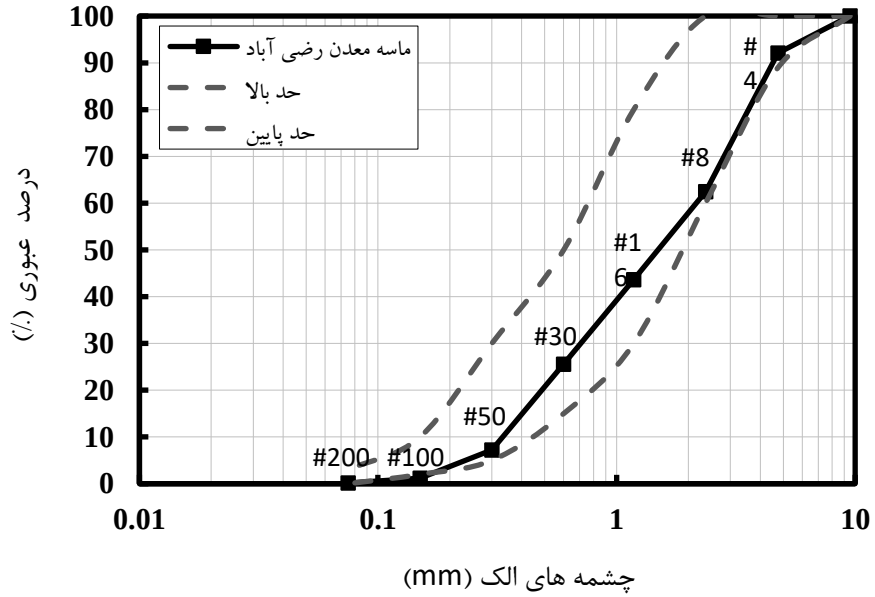
[4] Particle size distribusion

یکی از مواردی که در کیفیت ملات و بتن تهیه شده موثر است، ویژگی‌های سنگدانه مورد استفاده است. در صورتی که سنگدانه دارای کیفیت مناسب نباشد با دانه‌بندی مناسبی نداشته باشد، می‌تواند بر روی خواص محصول نهایی تاثیرگذار باشد. همچنین میزان رطوبت و جذب آب سنگدانه می‌تواند در طرح مخلوط تاثیرگذار باشد که باید مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین آزمایشات مربوط به مصالح سنگی بر روی نمونه‌های ماسه مورد استفاده در ادامه آمده است. لازم به ذکر است که ماسه مورد استفاده در این تحقیق، ماسه معدن رضی آباد بوده است. ماسه مورد استفاده در این تحقیق، ماسه معدن رضی آباد است که در جدول شماره دو، مشخصات فیزیکی آن آمده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده

نوع مصالح	چگالی در حالت اشباع با سطح خشک (gr/cm^3)	چگالی ظاهری (gr/cm^3)	جذب آب (٪)	درصد رطوبت (٪)
ماسه	2.39	2.45	3.1	3

نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ ('استاندارد ملی ایران، شماره ۳۰۲، "سنگدانه‌های بتن-ویژگی‌ها"، تجدید نظر سوم-۱۳۹۴، سازمان ملی استاندارد ایران', no date) در شکل شماره سه ارائه شده است. نمودارهایی که با نقطه‌چین مشخص شده است، حد کمینه و بیشینه استاندارد ملی ۳۰۲ ایران می‌باشد.



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی ماسه رضی آباد

۲-۷ طرح اختلاط

با توجه به نتایج تحقیقات پیشین، مشاهده می‌شود که درصد بهینه استفاده از گل قرمز در حالت استفاده به همراه سرباره بین ۲۰ تا ۴۰ درصد متغیر بوده است. همچنین در اکثر تحقیقات مختلف، از مدول سیلیکات برابر یک و درصد قلیایی بین ۴ تا ۸ درصد استفاده شده

است. بنابراین با توجه به نتایج تحقیقات پیشین و موارد عنوان شده در قسمت‌های پیشین، طرح‌های اختلاط در این تحقیق مطابق با جدول زیر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که نسبت آب به سیمان در تمامی نمونه‌ها برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

در نام‌گذاری نمونه‌ها، دو حرف اول نشان‌دهنده نام ماده پایه و عدد بعد از خط تیره اول، نشان دهنده درصد گل قرمز و عدد پس از خط تیره دوم، نشان دهنده درصد قلیایی است. در صورتی که ماده فعال‌ساز سدیم سیلیکات به صورت پودر مورد استفاده قرار گرفته باشد، در آخر نام طرح، یک حرف P قرار خواهد گرفت. برای مثال، AAS-40-8P نشان دهنده طرح قلیافعال حاوی ۴۰ درصد گل قرمز با درصد قلیایی ۸ درصد است که به صورت پودر اضافه شده است. لازم به ذکر است که جهت مقایسه نتایج، یه نمونه بتن شاهد نیز در نظر گرفته شده است که در جدول با عبارت OPC نمایش داده شده است.

جدول ۳- طرح‌های اختلاط (Kg/m^3)

نام طرح	مقدار آب	سیمان	سرباره	گل قرمز	ماسه	درصد Na2O	مدول سیلیکات
OPC	250	500	0	0	1362	-	-
AAS-0-6	213	-	500	0	1362	6	1
AAS-10-6	213	-	50	450	1362	6	1
AAS-20-6	213	-	100	400	1362	6	1
AAS=30-6	213	-	150	350	1362	6	1
AAS-40-6	213	-	200	300	1362	6	1
AAS-0-8	213	-	500	0	1362	8	1
AAS-10-8	213	-	50	450	1362	8	1
AAS-20-8	213	-	100	400	1362	8	1
AAS=30-8	213	-	150	350	1362	8	1
AAS-40-8	213	-	200	300	1362	8	1
AAS=30-8-P	250	-	150	350	1362	8	1
AAS-40-8-P	250	-	200	300	1362	8	1

برای تهیه نمونه‌های قلیافعال، ابتدا یک روز پیش از ساخت نمونه‌ها، محلول سدیم هیدروکسید و سدیم سیلیکات تهیه و در محیط آزمایشگاه نگهداری شد تا دمای آن به دمای محیط برسد. سپس سرباره، گل قرمز، محلول فعال‌ساز و آب با یکدیگر ترکیب و به مدت ۲ دقیقه به کمک همزن آزمایشگاهی مخلوط شدند. سپس ماسه به آن اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت تا اطمینان حاصل شود که ملات تهیه شده همگن و یکنواخت است. در نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید، ابتدا تمامی مواد خشک با یکدیگر ترکیب و سپس آب اضافه شد. نمونه‌ها پس از ریخته شدن در قالب، به مدت یک روز در محیط با رطوبت نسبی ۹۵ درصد و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها از قالب خارج و در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج

۳-۱ زمان گیرش و خواص رئولوژی

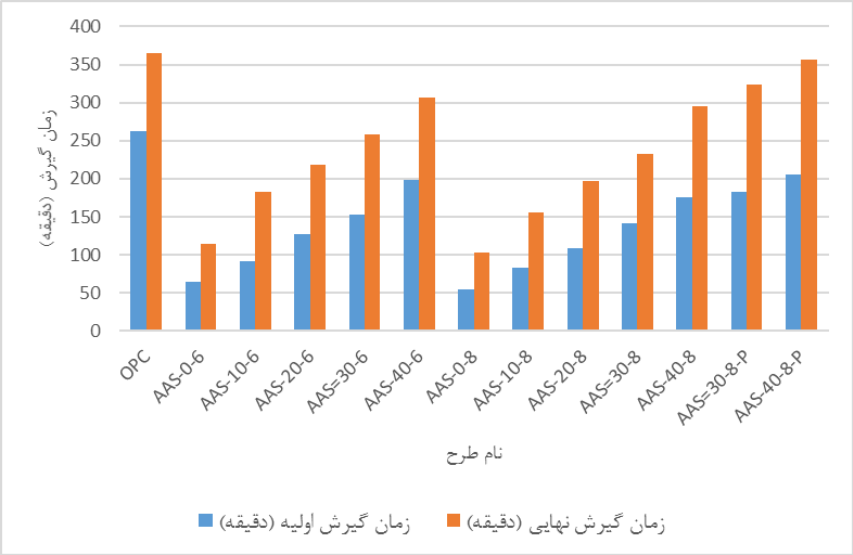
زمان گیرش سیمان یکی از پارامترهای مهم در خواص سیمان به شمار می‌رود. زمان گیرش سیمان شامل زمان گیرش اولیه و زمان گیرش نهایی می‌باشد. این آزمایش نیز به کمک سوزن دستگاه ویکات قابل انجام است. این آزمون مطابق با استاندارد EN 196-3 (BS EN 196-3:2016 Methods of testing cement Determination of setting times and soundness', no date) انجام می‌شود.

نتایج زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های ملات در جدول شماره چهار آمده است. همچنین برای مقایسه و بررسی ساده‌تر نتایج، مقادیر زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌ها در نمودار شکل شماره چهار آمده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با فزایش درصد گل قرمز، زمان گیرش افزایش می‌یابد. با افزایش درصد گل قرمز، میزان واکنش‌زایی و سرعت تشکیل ژل C-S-H کاهش می‌یابد و به همین دلیل زمان گیرش افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت قلیایی، زمان گیرش کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت قلیایی، میزان قلیایی موجود افزایش می‌یابد که این باعث حل شدن مقدار بیش‌تر گل قرمز و سرباره می‌شود و به این ترتیب، زمان گیرش کاهش می‌یابد. با مقایسه زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های قلیافعال با سیمان معمولی، مشاهده می‌شود که نمونه‌های قلیافعال، زمان‌های گیرش کم‌تری در مقایسه با سیمان معمولی دارند که این می‌تواند در تولید قطعات پیش‌ساخته حائز اهمیت باشد. نتایج بدست آمده در این بخش با نتایج تحقیقات پیشین مشابهت و همپوشانی خوبی دارد. زمان گیرش در نمونه‌های حاوی پودر فعال‌ساز، بیش از نمونه‌های حاوی محلول فعال‌ساز است. در نمونه‌های حاوی محلول فعال‌ساز، ماده فعال‌ساز قلیایی به سرعت وارد واکنش شده و مواد پایه را در خود حل می‌کند. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی پودر، ابتدا آب اضافه شده با پودر فعال‌ساز ترکیب می‌شود تا محلول فعال‌ساز تشکیل شود و سپس این محلول فعال‌ساز در واکنش شرکت می‌کند و باعث حل شدن ذرات گل قرمز و سرباره می‌شود. بنابراین زمان گیرش افزایش می‌یابد.

جدول ۴- زمان گیرش نمونه‌های ملات

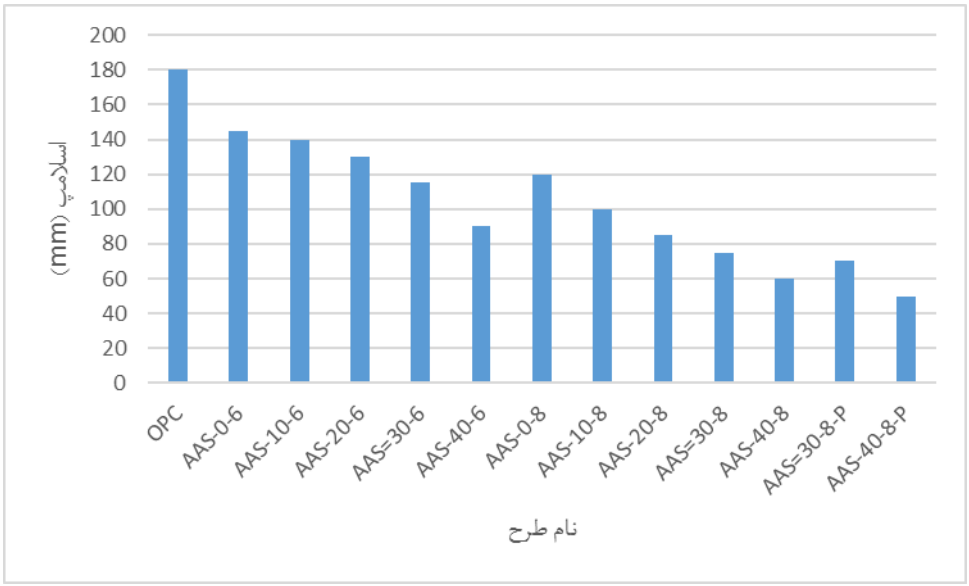
نام طرح	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
OPC	262	365
AAS-0-6	64	115
AAS-10-6	92	183
AAS-20-6	127	219
AAS=30-6	153	258
AAS-40-6	198	307
AAS-0-8	55	103
AAS-10-8	83	155
AAS-20-8	108	197
AAS=30-8	141	233
AAS-40-8	176	295
AAS=30-8-P	183	324
AAS-40-8-P	205	357

با توجه به نمودار، مشاهده می‌شود که زمان گیرش نمونه حاوی ۴۰ درصد گل قرمز و پودر سدیم سیلیکات، دارای زمان گیرش نهایی مشابه با سیمان معمولی است و در مواردی که نیاز به زمان گیرش بالا است، می‌توان از این طرح استفاده کرد.



شکل ۴- نمودار زمان گیرش اولیه و نهایی نمونه‌های ملات

نتایج کارایی (اسلامپ) نمونه‌ها در نمودار شکل شماره پنج آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با افزایش درصد گل قرمز، میزان روانی کاهش می‌یابد. دلیل این رخداد، اندازه بسیار ریز ذرات گل قرمز با توجه به آزمون PSD است که در بخش‌های پیشین به آن اشاره شد. ذرات گل قرمز به جهت ریزی بالا، سطح ویژه بالایی دارند که این باعث افزایش جذب آب و کاهش روانی می‌شود. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که روانی تمامی نمونه‌های قلیافعال کم‌تر از نمونه حاوی سیمان معمولی است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت قلیایی، میزان روانی کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت قلیایی، محلول قلیایی غلیظ‌تر و لزجت آن افزایش می‌یابد. بنابراین روانی کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات دارای روانی کم‌تر در مقایسه با نمونه‌های مشابه خود هستند که دلیل آن، استفاده از ماده فعال‌ساز به صورت پودر است که این باعث جذب آب بیش‌تر و کاهش کارایی می‌شود. جهت افزایش روانی نمونه‌های قلیافعال حاوی سرباره و گل قرمز، با توجه به تحقیقات پیشین می‌توان از روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده کرد تا روانی افزایش یابد.



شکل ۵- نتایج اسلامپ نمونه‌های ملات (mm)

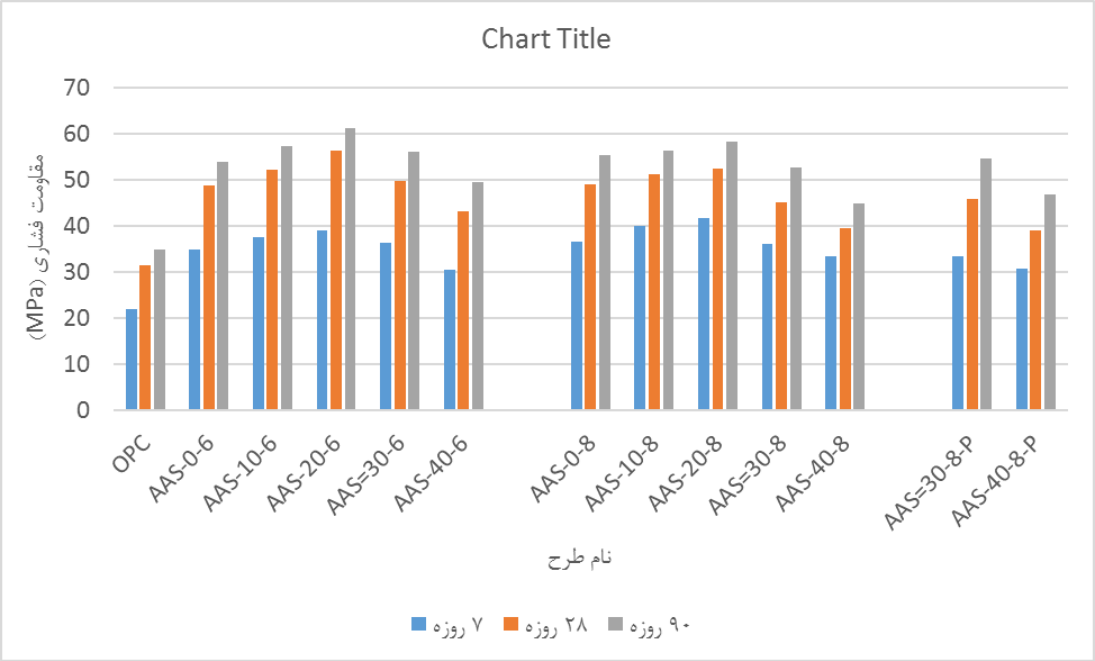
۳-۲ مقاومت فشاری

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مواد پایه سیمانی مانند ملات و بتن، مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری نشان دهنده بار قابل تحمل به صورت فشاری است که مبنای طراحی سازه‌های بتنی قرار می‌گیرد. همچنین در بسیاری از موارد می‌توان گفت که نمونه با مقاومت فشاری بالاتر، دارای خواص دوامی بهتری نیز هست. افزایش مقاومت فشاری به معنی افزایش تراکم نمونه است. نمونه متراکم‌تر، توانایی بالاتری در جلوگیری از ورود آب و سایر مواد مخرب به داخل نمونه ملات و بتن را داراست.

این آزمون طبق استاندارد EN 196-1 (EN 196-1, "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength", 2016', no date) انجام می‌شود. برای انجام این آزمایش، نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۶۰*۴۰*۴۰ میلی‌متر تهیه و به کمک دستگاه جک فشاری مورد آزمایش قرار می‌گیرند و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای انجام این آزمون، نمونه‌های ملات در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد استفاده قرار گرفته است. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر سن، از هر طرح ۳ نمونه مورد آزمایش قرار گرفته است و مقاومت فشاری گزارش شده، میانگین این سه مقدار است.

نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف در نمودار شکل شش آمده است. با توجه به نمودار در ابتدا مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان تا ۹۰ روز، افزایش می‌یابد. با افزایش سن نمونه، میزان ژل تشکیل شده افزایش می‌یابد که این می‌تواند باعث بهبود ساختار و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شود. با توجه به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ روز مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های ملات تا درصد گل قرمز ۲۰ درصد افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت قلیایی در سن ۷ روز، مقادیر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با افزایش درصد گل قرمز تا ۲۰ درصد، قلیایی لازم جهت حل کردن گل قرمز موجود است و از طرفی سیلیس موجود در سرباره می‌تواند با مقدار کافی کلسیم موجود در سرباره واکنش دهد. با افزایش درصد گل قرمز، نمقدار سیلیس افزایش می‌یابد که بخشی از این سیلیس در ساختار باقی می‌ماند و بنابراین مقادیر مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

با توجه به مقادیر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز، مشاهده می‌شود که همچنان تا ۲۰ درصد گل قرمز مقاومت افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار مقاومت فشاری ۲۸ روزه در این سن در نمونه حاوی ۲۰ درصد گل قرمز و درصد قلیایی ۶ بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت قلیایی، مقادیر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز کاهش می‌یابد. با افزایش درصد قلیایی، واکنش‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد. با افزایش سرعت واکنش، ساختار منظم شکل نمی‌گیرد و از طرفی ژل تشکیل شده دارای ساختاری ضعیف‌تر است که این باعث کاهش مقاومت فشاری در سنین بالاتر شده است. بنابراین می‌توان گفت در صورتی که مقاومت بلندمدت مد نظر باشد، درصد قلیایی ۶ می‌تواند عملکرد مناسب‌تری داشته باشد. همچنین در این حالت به جهت استفاده از قلیایی کم‌تر، طرح اقتصادی‌تر می‌شود. نتایج مقاومت فشاری در سن ۹۰ روز نیز روندی مشابه با سن ۲۸ روز دارد و نمونه‌های با درصد قلیایی بالاتر، مقاومت فشاری کم‌تری دارند. نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات مقادیر مقاومت فشاری ۷ روزه کم‌تر از نمونه‌های مشابه خود و مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه بیش‌تری را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها با توجه به استفاده از سدیم سیلیکات جامد به عنوان فعال‌ساز، در سن ۷ روز فرصت کافی برای حل شدن فعال‌ساز و شرکت در واکنش و در نهایت تشکیل ژل وجود ندارد و مقادیر مقاومت فشاری به همین علت افت جزئی را نشان می‌دهند. این در حالی است که در سن ۲۸ و ۹۰ روز به علت وجود زمان کافی جهت انجام واکنش، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد و بیش از نمونه‌های مشابه فعال شده با محلول سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید است.



شکل ۶- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات

۳-۳ مقاومت خمشی

برای انجام این آزمون، مطابق با استاندارد ASTM C293/C293M (‘ASTM C293, “Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) 1.” pp. 9–11, 2009.’, no date) نمونه‌های منشوری با ابعاد ۱۶۰*۴۰*۴۰ میلی‌متر مطابق تصویر بالا تهیه و تحت آزمون قرار گرفتند. این آزمون در سن ۷ و ۲۸ روز انجام گرفته است.

نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های ملات در نمودار شکل هفت آمده است. با توجه به نتایج مقاومت خمشی مشاهده می‌شود که مقادیر مقاومت خمشی از مقادیر مقاومت فشاری پیروی می‌کند. با توجه به نمودار در ابتدا مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان تا ۹۰ روز، افزایش می‌یابد. با افزایش سن نمونه، میزان ژل تشکیل شده افزایش می‌یابد که این می‌تواند باعث بهبود ساختار و افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها شود. با توجه به نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۷ روز مشاهده می‌شود که مقاومت خمشی نمونه‌های ملات تا درصد گل قرمز ۲۰ درصد افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت قلیایی در سن ۷ روز، مقادیر مقاومت خمشی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد گل قرمز تا ۲۰ درصد، قلیایی لازم جهت حل کردن گل قرمز موجود است و از طرفی سیلیس موجود در سرباره می‌تواند با مقدار کافی کلسیم موجود در سرباره واکنش دهد. با افزایش درصد گل قرمز، نمقدار سیلیس افزایش می‌یابد که بخشی از این سیلیس در ساختار باقی می‌ماند و بنابراین مقادیر مقاومت خمشی کاهش می‌یابد.

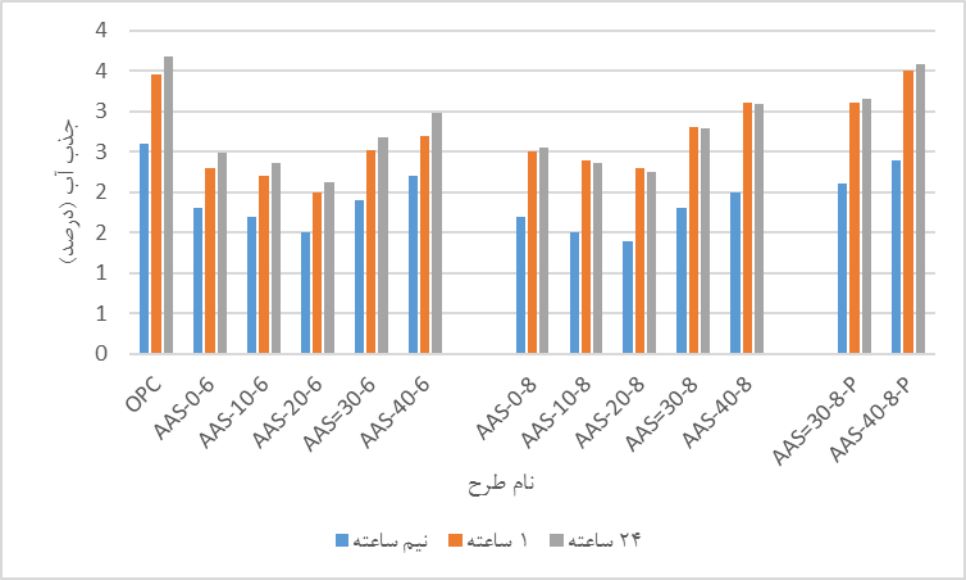
با توجه به مقادیر مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز، مشاهده می‌شود که همچنان تا ۲۰ درصد گل قرمز مقاومت افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. با افزایش درصد قلیایی، واکنش‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد. با افزایش سرعت واکنش، ساختار منظم شکل نمی‌گیرد و از طرفی ژل تشکیل شده دارای ساختاری ضعیف‌تر است که این باعث کاهش مقاومت خمشی در سنین بالاتر شده است. نتایج مقاومت خمشی در سن ۹۰ روز نیز روندی مشابه با سن ۲۸ روز دارد و نمونه‌های با درصد قلیایی بالاتر، مقاومت خمشی کم‌تری دارند. نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات مقادیر مقاومت خمشی ۷ روزه کم‌تر از نمونه‌های مشابه خود و مقاومت خمشی ۲۸ و ۹۰ روزه بیش‌تری را نشان می‌دهد.

شکل ۷- مقاومت خمشی نمونه‌های ملات

۳-۴ جذب آب

یکی از مشخصات مهم بتن در مواجهه با شرایط محیطی و مبحث دوام، جذب آب بتن می‌باشد. هرچه جذب آب بتن کم‌تر باشد، امکان نفوذ یون‌های مضر به داخل بتن کم‌تر شده و در نهایت خوردگی آرماتور و یا تخریب کاهش می‌یابد. برای انجام این آزمایش، مطابق با استاندارد ASTM C642 (ASTM International, "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete," Astm C642, vol. i. pp. 1–3, 2021.', no date)، نمونه‌های مکعبی ۱۰۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری ابتدا به مدت ۷۲ ساعت در گرمکن با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شده است. پس از این مدت و خنک شدن آزمونه‌ها در محیط آزمایشگاه، ابتدا وزن آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و سپس آزمونه‌ها داخل آب قرار داده شده می‌شود و وزن خیس آن‌ها پس از نیم، یک و ۲۴ ساعت اندازه‌گیری می‌شود و جذب آب نمونه‌ها در زمان‌های ذکر شده محاسبه می‌شود.

نتایج جذب آب نمونه‌های ملات در نمودار شکل هشت آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که جذب آب نمونه‌های ملات با افزایش درصد گل قرمز تا ۲۰ درصد کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش درصد قلیایی به ۸ درصد، مقادیر جذب آب افزایش می‌یابد. با این حال می‌توان مشاهده کرد که جذب آب تمامی نمونه‌های ملات کم‌تر از نمونه شاهد است و از این نظر تمامی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد عملکرد بهتری را داشته است. نکته دیگری که دارای اهمیت است، افزایش جذب آب در نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات می‌باشد. در این نمونه‌ها به جهت حضور پودر سدیم سیلیکات و تاخیر در واکنش، ساختار دارای منافذ بیش‌تری است که باعث افزایش درصد جذب آب می‌شود.



شکل ۸- جذب آب نمونه‌های ملات

۳-۵ انتخاب درصد بهینه جایگزینی پسماند پودر سنگ بوکست با در نظرگیری خواص تازه و مکانیکی ملات استاندارد

با توجه به موارد عنوان شده در بخش‌های قبلی و آزمون‌های انجام شده در قسمت سوم و نتایج بدست آمده، در این قسمت، درصد بهینه گل قرمز جهت استفاده در ملات و بتن‌های قلیافعال بررسی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده در بخش زمان گیرش، مشاهده شد که با افزایش درصد گل قرمز، زمان گیرش همواره افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان عنوان داشت که استفاده از درصدهای بالای گل قرمز برای مواردی مناسب است که در آن نیاز به زمان گیرش بالایی است. برای مثال، در شرایطی که فاصله محل تهیه ملات تا محل استفاده زیاد باشد، می‌توان با افزایش درصد گل قرمز زمان گیرش را افزایش داد. این در حالی است که برای برخی مصارف دیگر مانند ساخت قطعات بتنی پیش‌ساخته، زمان گیرش کوتاه‌تر می‌تواند مطلوب باشد. با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت مقاومت فشاری و خمشی، مشاهده شد که استفاده از ۲۰ درصد گل قرمز می‌تواند بیش‌ترین میزان مقاومت فشاری را نسبت به سایر درصدها نتیجه دهد. در این نمونه‌ها، مقاومت فشاری ۷ روزه در حدود ۴۰ مگاپاسکال و ۲۸ روزه در حدود ۵۵ مگاپاسکال بدست آمده است که برای مصارف سازه‌ای عدد مناسبی است. بنابراین بیش‌ترین میزان مقاومت فشاری در این درصد بدست آمده است و درصد بهینه استفاده از گل قرمز ۲۰ درصد می‌باشد. با این حال، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد گل قرمز نیز نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت فشاری همچنان مقادیر قابل توجهی است. به صورتی که در حالت استفاده از ۴۰ درصد گل قرمز، مقاومت فشاری حدود ۳۰ مگاپاسکال در سن ۷ روز و حدود ۴۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز بدست آمده است. بنابراین می‌توان گفت، تا ۴۰ درصد جایگزینی گل قرمز نیز نتایج مقاومت فشاری مطلوبی داشته است. نتایج جذب آب نیز موارد ذکر شده را تایید می‌کند. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت نمونه گل قرمز آلومینای جاجرم می‌تواند به عنوان جایگزین بخشی از سرباره در ترکیبات قلیافعال سرباره‌ای مورد استفاده قرار گیرد و نتایج مقاومتی مطلوبی را نتیجه دهد. در این حالت بالاترین مقاومت فشاری در درصد ۲۰ و غلظت قلیایی ۶ درصد بدست آمده است. در صورتی که نیاز به تولید محصول تک جزئی باشد، می‌توان از مواد فعال‌ساز پودر استفاده کرد. این مواد با وجود کاهش مقاومت فشاری، همچنان مقادیر مقاومت فشاری مناسبی را نشان می‌دهد که این در کنار سایر مشخصات آن‌ها از جمله زمان گیرش، روانی، سادگی استفاده و ... می‌تواند استفاده از آن را توجیه کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، هدف اصلی بررسی استفاده از گل قرمز آلومینای جاجرم به‌عنوان جایگزین بخشی از سرباره در بتن‌های قلیایی فعال بود. گل قرمز، یک محصول جانبی از فرآیند تولید آلومینا از بوکسیت است که معمولاً به‌عنوان یک ضایعه زیست‌محیطی محسوب می‌شود. با توجه به مشکلات زیست‌محیطی ناشی از دفع این ماده و نیاز به استفاده بهینه از مواد زائد صنعتی، این تحقیق به‌عنوان یک راهکار نوآورانه

برای بهره‌برداری از گل قرمز و بهبود ویژگی‌های فنی بتن انجام شده است. این مطالعه به‌طور خاص بر روی ارزیابی تأثیر درصدهای مختلف گل قرمز در ترکیب با سرباره و مواد قلیایی فعال در بتن متمرکز بود.

۱. **زمان گیرش:**

- با افزایش درصد گل قرمز آلومینای جاجرم در ترکیبات ملات، زمان گیرش اولیه و نهایی افزایش یافت. این به دلیل کاهش سرعت واکنش و تشکیل ژل C-S-H بود که باعث افزایش زمان گیرش در ملات‌ها شد.
- افزایش غلظت قلیایی در ملات‌ها زمان گیرش را کاهش داد، زیرا افزایش قلیاییت باعث افزایش سرعت واکنش‌ها و حل شدن سریع‌تر گل قرمز و سرباره می‌شود.
- در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، نمونه‌های ملات قلیایی فعال دارای زمان گیرش کوتاه‌تری بودند که این ویژگی در تولید قطعات پیش‌ساخته کاربرد دارد.

۲. **کارایی (اسلامپ):**

- با افزایش درصد گل قرمز، روانی نمونه‌ها کاهش یافت. این کاهش روانی به دلیل اندازه ریز ذرات گل قرمز و جذب آب بالا بود.
- نمونه‌های ملات قلیایی فعال حاوی گل قرمز و سرباره از نظر روانی پایین‌تر از نمونه‌های سیمان معمولی بودند.
- استفاده از مواد فعال‌ساز پودر (سدیم سیلیکات) منجر به کاهش روانی می‌شود، که به دلیل جذب بیشتر آب و لزجت بالاتر این ترکیب است.
- پیشنهاد می‌شود برای افزایش روانی در این نوع ملات‌ها از روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شود.

۳. **مقاومت فشاری:**

- مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها با گذشت زمان افزایش یافت. در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه، نمونه‌هایی که حاوی ۲۰ درصد گل قرمز بودند، بیشترین مقاومت فشاری را نشان دادند.
- افزایش درصد گل قرمز تا ۲۰ درصد باعث بهبود مقاومت فشاری می‌شود، ولی با افزایش بیشتر درصد گل قرمز (تا ۴۰ درصد)، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.
- غلظت قلیایی نیز تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری دارد. افزایش غلظت قلیایی باعث تسریع در واکنش‌ها شده و باعث کاهش کیفیت ساختار ژل تشکیل‌شده می‌شود که در نتیجه مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

٤. **مقاومت خمشی:**

- مقاومت خمشی نیز مشابه مقاومت فشاری از افزایش درصد گل قرمز تا ۲۰ درصد پیروی می‌کند.
- نمونه‌های حاوی گل قرمز تا ۲۰ درصد به دلیل بهبود واکنش‌ها و تشکیل ژل مناسب‌تر، مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های با درصدهای بالاتر از ۲۰ درصد داشتند.
- افزایش غلظت قلیایی باعث کاهش مقاومت خمشی نمونه‌ها شد، زیرا واکنش‌ها سریع‌تر رخ داده و ساختار ژل ضعیف‌تری به‌وجود آمد.

۵. جذب آب:

- جذب آب بتن‌های قلیایی فعال با افزایش درصد گل قرمز کاهش یافت تا زمانی که درصد گل قرمز به ۲۰ درصد رسید. بعد از این مقدار، جذب آب دوباره افزایش یافت.
- نمونه‌های حاوی پودر سدیم سیلیکات دارای جذب آب بیشتری بودند، که این به دلیل تاخیر در واکنش‌ها و ساختار دارای منافذ بیشتر است.
- به‌طور کلی، تمام نمونه‌ها از لحاظ جذب آب عملکرد بهتری نسبت به نمونه شاهد داشتند.

۶. انتخاب درصد بهینه جایگزینی گل قرمز:

- درصد بهینه جایگزینی گل قرمز در ملات‌های قلیایی فعال ۲۰ درصد است، که در این حالت بالاترین مقاومت فشاری و خمشی به‌دست آمد.
- در صورت نیاز به زمان گیرش طولانی‌تر یا استفاده در شرایط خاص، می‌توان از درصدهای بالاتر گل قرمز مانند ۳۰ یا ۴۰ درصد استفاده کرد، که با وجود کاهش مقاومت فشاری، همچنان مقاومت مناسبی را نشان دادند.
- در شرایطی که نیاز به تولید محصولات تک‌جزئی باشد، استفاده از پودرهای فعال‌ساز می‌تواند مناسب باشد، چرا که با وجود کاهش مقاومت فشاری، سایر ویژگی‌های آن‌ها مانند زمان گیرش و روانی مناسب‌تر است.

مراجع

[1] Bandar, D., Hassani, N., & Khodaparast, M. M. (1390). Jupolymer concrete and its applications, the first international conference on Natrava concretes, drinking water storage tanks, Rasht, Golestan Urban Water and Sewerage Company. *In Persian.*

[2] Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and Concrete Research, 29*(8), 1323-1329.

[3] Naik, T. R., & Singh, S. S. (1995). Use of high-calcium fly ash in cement-based construction materials. *Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1–44.

[4] Wang, S. D., Scrivener, K. L., & Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement and Concrete Research, 24*(6), 1033-1043.

[5] Tchakoute, H. K., & Ruscher, C. H. (2017). Mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements from sodium waterglass and phosphoric acid solution as hardeners: a comparative study. *Applied Clay Science, 140*, 81–87.

[6] Ma, C., Zhao, B., Guo, S. L., et al. (2019). Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators. *Journal of Cleaner Production, 220*, 188-199.

[7] Singh, N. B., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials, 237*, 117455.

[8] Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials, 85*, 78–90.

[9] Xu, H., Provis, J. L., van Deventer, J. S., & Krivenko, P. V. (2008). Characterization of aged slag concretes. *ACI Materials Journal, 105*(2), 131-139.

[10] Bakharev, T., Sanjayan, J. G., & Cheng, Y. B. (1999). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research, 29*(1), 113-120.

[11] Zhang, B., Guo, H., Yuan, P., et al. (2020). Novel acid-based geopolymer synthesized from nanosized tubular halloysite: the role of precalcination temperature and phosphoric acid concentration. *Cement and Concrete Composites, 110*, 103601.

[12] Bazant, Z. P., & Wittmann, F. H. (1982). Creep and shrinkage in concrete structures.

[13] Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, 1, 131-149.
[14] Krizan, D., & Zivanovic, B. (2002). Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research, 32*(8), 1181-1188.
[15] Naik, T. R., & Singh, S. S. (1995). Use of high-calcium fly ash in cement-based construction materials. *Proceedings of Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1–44.
[16] Kumar, S., Kumar, R., & Mehrotra, S. P. (2010). Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure, and properties of fly ash-based geopolymer. *Journal of Materials Science, 45*(3), 607-615.
[17] Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites, 32*(2), 142–147.
[18] Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO2 and Al2O3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science, 47*(12), 4876–4883.