

Evaluating Compressive, Tensile Strength and Water Absorption of Geopolymer Mortar Containing Slag (GGBFS) in Comparison with Pozzolan Metakaolin

Reza Farokhzad^{1*}, Aylar Mohammadbeigi¹

1- Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

ABSTRACT

Geopolymers are aluminosilicate materials that can be a good alternative to various types of concrete, because they help protect the environment by removing pollutants such as CO₂ resulting from cement manufacturing process and significantly increase concrete durability by reducing concrete permeability. This study aims to investigate the mechanical properties and durability of geopolymer mortar cured at different temperatures. Therefore, metakaolin and ground-granulated blast-furnace slag (GGBFS) were used as the raw materials for making geopolymer mortar. Sodium hydroxide (caustic soda) with the concentration of 12 M and sodium silicate (water glass) were employed as the activator. In total, 12 curing regimes including three temperatures of 60, 75, and 90 °C and four durations of 8, 12, 18, and 24 h were applied to the samples and its impact on compressive and tensile strength and water absorption of geopolymer mortars was examined. Compressive and tensile strength and water absorption of geopolymer samples were determined after 3, 7, and 14 days. The results indicated the compressive and tensile strength of the samples increased and water absorption of the samples decreased with increasing the curing temperature and duration. Compressive strength of the samples cured at 90 °C for 24 h was at the highest level (62.4 MPa).

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 September 2020

Revise Date: 02 July 2021

Accept Date: 04 July 2021

Keywords:

Geopolymer

GGBFS

Curing temperature

NAOH concentration

Compressive strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.230158.2258>

*Corresponding author: Reza Farokhzad

Email address: r.farokhzad@qiau.ac.ir

بررسی مقاومت فشاری، کششی و جذب آب ملات ژئوپلیمر حاوی از ماده

سرباره (GGBFS) در مقایسه با پوزولان متاکائولن

رضا فرخ زاد^{۱*}، آیلار محمدیگی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران .

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران .

چکیده

ژئوپلیمرها مواد آلومینوسیلیکاتی هستند که می توانند جایگزین مناسبی برای انواع بتن می باشند، چراکه از طرفی با حذف آلاینده هایی نظیر CO_2 ناشی از فرآیند تولید سیمان، به حذف محیط زیست کمک نموده و از طرفی دیگر با کاهش میزان نفوذپذیری بتن، دوام بتن به شدت افزایش می یابد. در این تحقیق خواص مکانیکی و دوام ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از متاکائولن و سرباره کوره آهن (GGBFS) به عنوان ماده اولیه ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شده است. همچنین از سدیم هیدروکسید (سود) با غلظت ۱۲ مولار و سدیم سیلیکات (آب شیشه) به عنوان فعال کننده استفاده شده است. ۱۲ رژیم عمل آوری شامل سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت به نمونه ها اعمال شد و تاثیر آن بر مقاومت فشاری و کششی و جذب آب ملات های ژئوپلیمری مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت فشاری، کششی و جذب آب نمونه های ژئوپلیمری در سنین ۳، ۷ و ۱۴ روزه تعیین گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری مقاومت فشاری و کششی نمونه ها افزایش می یابد و میزان جذب آب نمونه ها کاهش می یابد. مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت، بالاترین مقدار معادل ۶۲/۴ مگاپاسکال را، دارا می باشد.

کلمات کلیدی: ژئوپلیمر، سرباره، دمای عمل آوری، غلظت سود، متاکائولن، مقاومت فشاری.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.230158.2258	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.230158.2258	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۱۳	۱۴۰۰/۰۴/۱۱	۱۳۹۹/۰۷/۰۹
			نویسنده مسئول:		رضا فرخ زاد	
			پست الکترونیکی:		r.farokhzad@qiau.ac.ir	

۱- مقدمه

بتن یکی از رایج ترین مصالح در صنعت ساختمانی به شمار می رود که مصالح اولیه آن در تمام جهان وجود دارد. سیمان یکی از اجزای بتن می باشد که در ساخت و توسعه زیر ساختها به کار می رود. عمده ترین گاز گلخانه ای که نقش بسزایی در گرم شدن جهانی زمین دارد دی اکسید کربن می باشد که صنعت سیمان نیز نقش مهمی در نشر آن دارد. بتن ژئوپلیمری، بتنی سازگار با محیط زیست است که قابلیت جایگزینی کامل با بتن سیمانی را دارد که از این رو به این بتن، بتن سبز نیز می گویند؛ زیرا علاوه بر این که خود آسیب کمتری به محیط زیست وارد می کند از نیاز به تولید سیمان بیشتر هم می کاهد. راجینی در سال ۲۰۱۴ بر روی خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری با پایه خاکستر بادی و GGBFS کار کرد و دریافت که مقاومت فشاری و کششی بتن ژئوپلیمر با افزایش مقدار خاکستر بادی کاهش می یابد [۱]. چاندر کومار و همکارانش در سال ۲۰۱۷ بر روی دوام و پایداری بتن های ژئوپلیمری ساخته شده از متاکائولن و GGBFS کار کردند نتایج بررسی آن ها نشان می دهد که، بتن های ژئوپلیمری با قرار گرفتن در معرض سدیم سولفات ۵٪ و اسیدسولفوریک و سدیم کلراید کاهش مقاومت و کاهش وزن، کمتری نسبت به بتن های سیمانی در شرایط مشابه داشتند [۲]. ویگنش در سال ۲۰۱۵ بر روی پارامترهای مقاومتی بتن ژئوپلیمر ساخته شده از خاکستر بادی و GGBFS مطالعه کرد. نتایج نشان داد با افزایش میزان GGBFS در نمونه مقاومت فشاری و کششی و خمشی افزایش پیدا می کند. همچنین آن ها بیان کردند در بتن ژئوپلیمر ۷۰ درصد مقاومت نهایی در چهار ساعت اول بدست می آید و بتن ژئوپلیمری جذب آب کمتری از بتن معمولی دارد [۳]. شارمارک و همکارانش در سال ۲۰۱۵ بر روی تاثیر نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمری ساخته شده از GGBFS کار کردند و به این نتیجه رسیدند که نسبت سدیم سیلیکات به سدیم هیدروکسید تاثیر کمی در مقاومت فشاری ۱ تا ۷ روزه دارد [۴]. دب و همکارانش در سال ۲۰۱۴ دریافتند که افزودن GGBFS به خاکستر بادی، تاثیر قابل توجهی در ثبات و توسعه پیوندهای ژئوپلیمر دارد [۵]. پادماکار و همکارانش در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی دریافتند که بتن ژئوپلیمری بر پایه GGBFS و متاکائولن، مقاومت بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. در این مطالعه اثبات شده است که با بالا رفتن مقادیر متاکائولن، مقاومت های فشاری، خمشی و کششی بتن ژئوپلیمری نیز افزایش یافته است [۶]. موبینگ و همکارانش بر روی دما و زمان های مختلف عمل آوری ژئوپلیمرها کار کردند. آن ها دریافتند که افزایش دما سبب افزایش واکنش، افزایش حل شدن متاکائولن و گیرش سریع ژئوپلیمرها می شود [۷]. رووانیک بر روی تاثیر دمای عمل آوری بر ژئوپلیمرها کار کرد و دریافت که عمل آوری در دماهای بالا باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی در سنین اولیه می شود؛ که این امر می تواند سبب شود که نمونه در مدت یک روز به مقاومت نهایی خود برسد [۸]. ونگ و همکاران بر روی ژئوپلیمرهای ساخته شده از متاکائولن و فعال سازی شده با سود مطالعه کردند و بیان کردند که مشخصات مکانیکی ژئوپلیمرها تا حد زیادی به غلظت محلول سود وابسته است؛ با افزایش غلظت مقاومت فشاری و خمشی ژئوپلیمرها افزایش می یابد [۹].

هدف اصلی در این تحقیق، بررسی تغییرات درجه حرارت و میزان سن عمل آوری، بر خواص مکانیکی و دوامی ملات ژئوپلیمر ساخته شده با سرباره کوره آهن گدازی و متاکائولن می باشد. در این راستا از سرباره کوره آهن (GGBFS) و متاکائولن به عنوان مواد اولیه ساخت ملات ژئوپلیمری استفاده شده است. این تحقیق دارای چندین شاخص بارز می باشد. اولین مولفه نوآوری در این تحقیق، استفاده از سرباره کوره با میزان کلسیت بالا و آلومینات پایین می باشد که در تحقیقات قبلی سرباره های مورد استفاده در ژئوپلیمر، دارای آلومینات بالا بوده و در نتیجه پیوند های ناشی از آن نیز در ژئوپلیمراسیون بسیار قوی بوده و بتن ژئوپلیمر ناشی از آن نیز دارای خواص بالایی بوده است، ولیکن سرباره مورد استفاده در این تحقیق با توجه به میزان پایین آلومینات در دمای های مختلف، موجب تقویت پیوندهای ژئوپلیمراسیون شده که در ادامه به بررسی این مطالب پرداخته می شود. دومین مولفه، بررسی همزمان دو ماده متاکائولن و سرباره کوره آهن (GGBFS) می باشد که با توجه به میزان آلومینات بالای متاکائولن نسبت به سرباره، خواص خوبی در ژئوپلیمر از خود نشان نداده است. که در این راستا از سدیم هیدروکسید با غلظت ۱۲ مولار و سدیم سیلیکات به عنوان فعال کننده استفاده شده است. ۱۲ رژیم عمل آوری شامل سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت به نمونه ها اعمال شد و تاثیر آن بر مقاومت فشاری و کششی و جذب آب ملات های ژئوپلیمری بررسی شد. مقاومت فشاری و کششی نمونه های ژئوپلیمری در سنین ۳، ۷ و ۱۴ روزه تعیین گردید.

۲- مصالح مورد استفاده

۱-۲ - سدیم هیدروکسید (سود)

سدیم هیدروکسید یا سود سوزآور با فرمول شیمیایی NaOH که ماده ای جامد و سفید رنگ با دمای ذوب ۳۱۸ درجه سانتی گراد و چگالی ۲,۱۳ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد. در این پروژه از محلول سود ۱۲ مولار برای ساخت ملات های ژئوپلیمری استفاده شده است. در جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی سود ذکر شده است که بر اساس آن با توجه به جرم مولی سود جامد مقدار استفاده از این ماده برای ساخت یک لیتر محلول از رابطه شماره (۱) محاسبه می شود:

$$12 \text{ mol/lit} \times 40 \text{ gr/mol} = 480 \text{ gr/lit} \quad (1)$$

جدول ۱: مشخصات هیدروکسید سدیم مصرف

هیدروکسید سدیم (NaOH)	آزمایش فیزیکی
۱,۳۴	وزن مخصوص محلول با غلظت ۱۲ مولار (gr/cm ³)
٪۹۸-۹۹	در صد خلوص

۲-۲ - سدیم سیلیکات (آب شیشه)

سدیم سیلیکات نوعی سیلیکات قلیایی حل شدنی است که اولین بار توسط ون هلمونت در سال ۱۶۴۰ کشف شد. سدیم سیلیکات محلول، مایعی شفاف و بی رنگ است؛ که از آن در صابون سازی، مواد شوینده، پاک کننده های صنعتی، چسب، سیمان سازی، رنگ، کاغذ، قالب ریخته گری، سرامیک و کنترل خوردگی در لوله های آب کاربرد دارد. [۱-۴] در جدول شماره ۲ مشخصات سدیم سیلیکات مصرفی نشان داده شده است.

جدول ۲: مشخصات سیلیکات سدیم مصرف شده

مشخصات	محلول سیلیکات سدیم
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۱,۵۴
نسبت مولی SiO ₂ /Na ₂ O	۲,۳

۳-۲- سرباره

سرباره فولاد سازی، محصول جانبی صنعت تولید آهن خالص و فولاد است. در صنعت تولید فولاد برای تولید آهن خالص از سنگ آهن استفاده می‌شود. در این مقاله از سرباره (GGBFS) به عنوان ماده اولیه حاوی مواد آلومینوسیلیکاتی استفاده شده است که دارای خواص مکانیکی مناسبی از جمله واکنش پذیری بالا می‌باشد. مشخصات فیزیکی و ترکیب شیمیایی سرباره در جدول شماره ۳ و ۴ آمده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی پودر سرباره مصرف شده

نمونه	نرمی بلین cm^2/gr	درصد فاز آمورف	در صد باقی مانده روی الک ۵۰	در صد باقی روی الک نمره ۳۰
سرباره پودر شده	۳۵۰۰	۸۷	۱۴	۲۷

جدول ۴: آنالیز شیمیایی سرباره مصرف شده

نمونه	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Total ALK
سرباره (%)	۳۵/۶	۹/۵	۳۶	۰/۵	۹/۵	۸

تولید آهن خالص از بالای کوره سنگ آهن، کک و سنگ آهک را وارد کرده و از پایین کوره جریان هوای گرم دمیده می‌شود. هوای گرم ورودی از پایین کوره موجب افزایش دمای کوره و در نتیجه تجزیه مواد خام ورودی و به مرور ذوب شدن آن‌ها می‌شود. حدود ۶۰٪ سنگ آهن ورودی از مگنتیت (Fe_3O_4) و هماتیت (Fe_2O_3) تشکیل شده است. واکنش شیمیایی انجام شده در کوره که منجر به تولید آهن خالص و نیز سرباره می‌شوند

۴-۲- متاکائولن

متاکائولن یک سیلیکات آلومینیوم آمورف است؛ که به رنگ سفید می‌باشد و دارای خواص پوزولانی است. متاکائولن از کلسینه شدن کائولن در درجه حرارت زیاد بدست می‌آید. این حرارت دادن ساختار کریستالی آن را از بین می‌برد و آن را تبدیل به یک سیلیکات آلومینیوم آمورف می‌کند. در این مقاله از متاکائولن به عنوان ماده اولیه حاوی آلومینوسیلیکات استفاده شد. مشخصات فیزیکی پودر متاکائولن در جدول شماره ۵ آمده است. با استفاده از آنالیز XRF متاکائولن ترکیب شیمیایی آن در جدول شماره ۶ آمده است.

جدول ۵: مشخصات فیزیکی پودر متاکائولن مصرف شده

پودر متاکائولن	آزمایش فیزیکی
۲/۷	وزن مخصوص gr/cm^3
۶۸۵۶	نرمی بلین (cm^2/gr)

جدول ۶: آنالیز شیمیایی متاکائولن مصرف شده

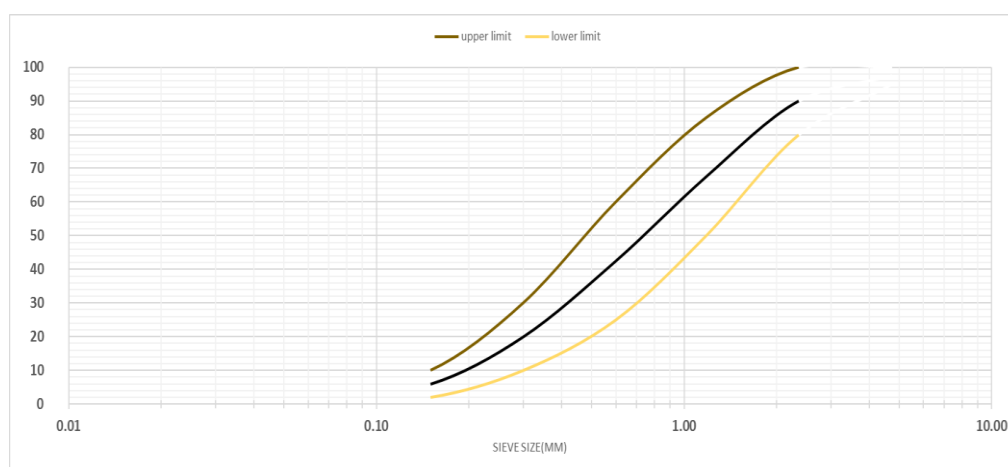
نمونه	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	Fe_2O_3	MgO
متاکائولن (%)	۵۵,۹	۴۲,۸	۰,۰۹	۰,۱۰	۰,۳۸	۰,۸۹

۲-۵- ماسه

ماسه مصرفی با بزرگترین اندازه اسمی ۴٫۷۵ میلی متر می باشد؛ که مشخصات آن در جدول شماره ۷ آمده است. شکل شماره ۱ نمودار دانه بندی ماسه مصرفی را نشان می دهد.

جدول ۷: مشخصات فیزیکی ماسه مصرف شده

ماسه (۴٫۷۵)	آزمایش فیزیکی
۲٫۶۴	چگالی (در حالت اشباع با سطح خشک (SSD)
۰٫۷	جذب آب (%)



شکل ۱: نمودار دانه بندی ماسه مصرف شده بر اساس ASTM C33

۳- طرح مخلوط های ساخته شده توسط متاکائولن و سرباره

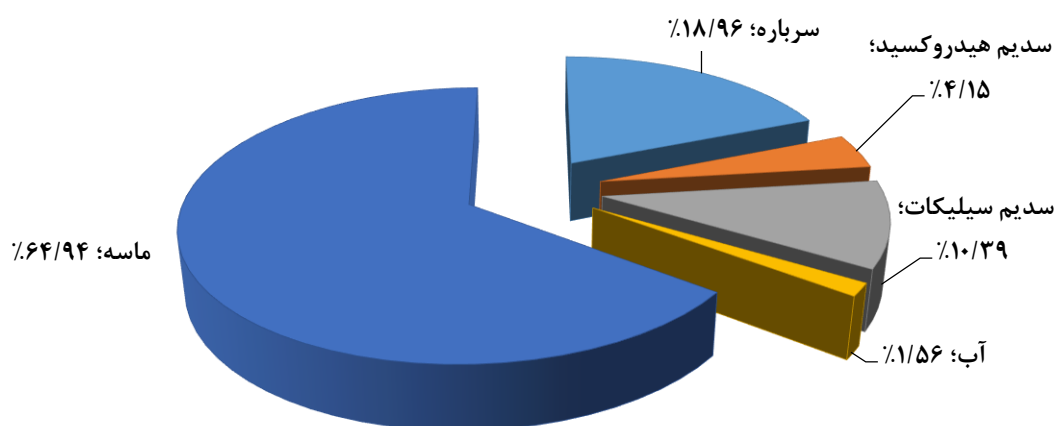
در جدول شماره ۸ طرح اختلاط های مختلف برای ماده متاکائولن بر اساس تجربیاتی مندرج در مرجع شماره [۱۰] بدست آمده توسط نگارنده، تعیین گردید و از همین نتایج و مرجع [۱۴] برای تعیین مقدار سرباره، جهت رسیدن به طرح اختلاط نهایی استفاده گردید. نام گذاری نمونه ها به این شکل است که بعد اول دمای عمل آوری به مدت ۲۴ ساعت است. M برگرفته از متاکائولن نشان دهنده نوع ملات و G برگرفته از GGBFS نشان دهنده نوع ملات ساخته شده و عدد بعدی شماره طرح اختلاط است.

جدول ۸: طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

نمونه	سرباره (gr)	متاکائولن (gr)	سدیم هیدروکسید (gr)	سدیم سیلیکات (gr)	آب (gr)	ماسه (gr)
60M1	۰	۳۶۰	۹۰	۲۶۸	۳۰	۱۸۰۰
60M2	۰	۳۶۰	۱۵۰	۲۶۸	۲۰	۱۸۰۰
60M3	۰	۳۶۰	۹۰	۲۵۰	۳۰	۱۸۰۰
60M4	۰	۳۶۰	۱۰۰	۲۵۰	۳۰	۱۸۰۰
60M5	۰	۳۶۰	۴۰	۹۰	۲۰	۱۷۰۰
60M6	۰	۴۰۰	۸۰	۱۰۰	۴۰	۱۷۰۰
60M7	۰	۴۵۰	۹۵	۲۸۰	۲۰	۱۷۰۰
60M8	۰	۴۵۰	۶۰	۱۵۰	۲۰	۱۷۰۰
60M9	۰	۴۵۰	۸۰	۲۰۰	۲۰	۱۸۰۰
60G10	۳۶۵	۰	۳۷	۹۱	۳۰	۱۲۵۰
60G11	۳۶۵	۰	۴۰	۱۰۰	۳۰	۱۲۵۰
60G12	۳۶۵	۰	۶۰	۱۵۰	۳۰	۱۲۵۰
60G13	۳۶۵	۰	۸۰	۲۰۰	۳۰	۱۲۵۰

در جدول شماره ۸ طرح اختلاط، وزن ماسه مورد استفاده در دو حالت متاکائولن و سرباره با توجه به نحوه عملکرد پیوندهای A-S-A دارای تفاوت زیادی محاسبه گردید. با توجه واکنش پذیری بالای سرباره از یک طرف و میزان ریزی آن از طرف دیگر، میزان مصرف ماسه را نسبت به حالت قبلی (متاکائولن) کاهش داد.

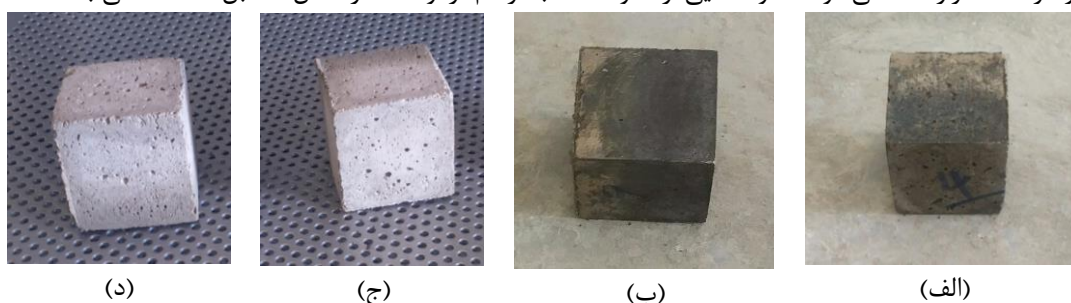
از آن جا که مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ژئوپلیمری ساخته شده از متاکائولن بسیار پایین بود و با تغییر طرح اختلاط نیز تأثیری در افزایش مقاومت فشاری حاصل نشد؛ تصمیم گرفته شد به جای متاکائولن از سرباره استفاده شود. در طرح اختلاط استفاده شده از سرباره نیز با افزایش مقدار سدیم سیلیکات و سدیم هیدروکسید مقاومت فشاری بهتری بدست آمد. در نهایت نمونه 60G13 به عنوان طرح اختلاط نهایی انتخاب شد. طرح اختلاط نهایی در شکل شماره ۲ آمده است. علت انتخاب طرح اختلاط 60G13 از بین تمام طرح اختلاط ها، به عواملی شامل: ۱- تخلخل، ۲- افزایش حجم پس از گیرش اولیه ملات، ۳- میزان چسبندگی، ۴- زمان گیرش در مقایسه با سایر طرح اختلاط های ملات بستگی داشت. به عنوان مثال در دو طرح اختلاط اول، تخلخل نمونه ها به صورت محسوسی با بقیه طرح اختلاط های سرباره، تفاوت فاحشی داشت. به طور کلی در بتن ژئوپلیمر معیار چشمی و مقایسه طرح اختلاط ها باهم بسیار تاثیرگذار خواهد بود. که علت آن تشکیل نشدن پیوندهای ژئوپلیمراسیون در طرح اختلاط های معیوب به دلیل رئولوژی نامناسب می باشد.



شکل ۲: طرح اختلاط نهایی ملات ژئوپلیمری

۳-۱- روش اجرای طرح اختلاط ملات ژئوپلیمری

ابتدا مصالح طبق طرح اختلاط نهایی اندازه گیری شده، سپس ماسه درون میکسر ریخته و به مدت ۱-۲ دقیقه مخلوط می شود و بعد سرباره به میکسر اضافه می شود، ۲-۳ دقیقه مخلوط شده تا سنگدانه و سرباره به خوبی مخلوط شوند. محلول سود (سدیم هیدروکسید) و آب شیشه (سدیم سیلیکات) را با هم مخلوط کرده و به میکسر ملات اضافه کرده ۲-۳ دقیقه فرصت داده می شود تا با یکدیگر به خوبی ترکیب شوند در نهایت آب را اضافه کرده ۱-۲ دقیقه به مخلوط فرصت داده تا مخلوط همگن و یکنواختی بدست آید. داخل قالبها را روغن کاری کرده تا از چسبیدن مواد به قالب جلوگیری شود؛ ملات بدست آمده در سه مرحله درون قالب ریخته شده و هر بار با چکش مخصوص کوبش انجام می شود. با توجه به نوع قالب های مورد استفاده، قرارگیری ملات تازه در قالب در چند سعی و خطای اولیه دارای تخلخل زیادی مشاهده گردید که علت آن در چسبندگی بالای ملات و دیواره قالب تخمین زده شد و در نتیجه بر آن سدیم با استفاده از دستگاه ویبره حباب های هوای محسوس در داخل و اطراف قالب را بهتر خارج نماییم. در نتیجه نمونه ها را روی دستگاه ویبره برده و به مدت ۱ دقیقه ویبره زده می شود و پس از آن قالبها طبق شرایط عمل آوری مربوطه (دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت) در گرمخانه قرار داده می شوند. نمونه هایی از نحوه مناسب تراکم آزمونه ها در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۳: نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از سرباره (الف و ب) و متاکائولن (ج و د)

۴- آزمایش های انجام گرفته

۴-۱- آزمایش مقاومت فشاری

یکی از رایج ترین آزمون های بتن و ملات، آزمایش مقاومت فشاری، بر روی نمونه های ملات می باشد که نشان دهنده کیفیت بتن از نظر خصوصیات مکانیکی می باشد. آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد ASTM C109 روی آزمونه های مکعبی به ضلع

۵ سانتی متر انجام شد. مدت زمان و دمای عمل آوری آزمونه‌ها متفاوت می‌باشد. آزمونه‌ها در سه دمای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت در اون عمل آوری شدند پس از پایان زمان عمل آوری به مدت ۲۴ ساعت در داخل اون باقی ماندند تا کاملاً سرد شوند پس از آن از اون خارج شدند؛ و بعد از قالب‌ها خارج و در محیط آزمایشگاه تا سن آزمایش مقاومت فشاری نگه داری شدند. سنین شکست نمونه‌ها ۳، ۷ و ۱۴ روز می‌باشد. در شکل شماره ۴ نمونه‌هایی از شکست آزمونه‌ها قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴: نحوه شکست نمونه ملات ژئوپلیمر ساخته شده از متاکائولن (الف) و سرباره (ب-ج-د)

۴-۲- آزمایش جذب آب

این آزمایش طبق استاندارد ASTM C642 انجام شده است؛ هدف از این آزمایش سنجش میزان کیفیت سطحی بتن و خصوصیات دوام آن می‌باشد. برای آزمایش جذب آب، ابتدا نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۵ سانتی متر ساخته شده که پس از عمل آوری در اون خارج و از قالب باز شدند و وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. سپس نمونه‌ها برای حداقل ۴۸ ساعت در داخل آب غرقاب شده سپس وزن شده و مجدداً ۲۴ ساعت در داخل آب قرار خواهد گرفته و مجدداً وزن می‌گردد. در صورتی که تغییرات وزن کمتر از ۰/۵ درصد گردد، نمونه به حالت اشباع رسیده و می‌توان عدد نهایی را گزارش نمود.

۴-۳- آزمایش کشش به روش برزیلی یا دو نیم شدن

آزمایش کشش بتن به سه روش صورت می‌گیرد که کاربردی‌ترین روش آن روش غیرمستقیم یا برزیلی است که بر اساس استاندارد ASTM C496 صورت می‌گیرد که نمونه‌ای از این آزمایش، در شکل شماره ۵ قابل مشاهده است. نمونه‌های استوانه‌ای مطابق استاندارد ASTM C192 ساخته و نگهداری می‌شود. نمونه‌ها طوری بین صفحات دستگاه جک بتن شکن قرار می‌گیرد که محور آن افقی باشد و سپس بار افزایش می‌یابد تا گسیختگی به صورت دو نیم شدن در صفحه شامل قطر قائم نمونه به وجود آید. بار گذاری به صورت مداوم و با سرعت یکنواخت اعمال می‌شود تا تنش کششی موجب گسیختگی نمونه شود.

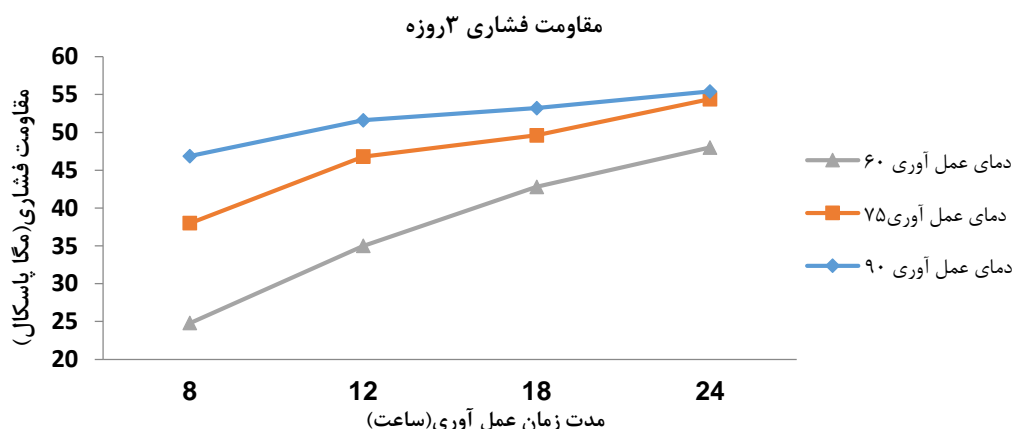


شکل ۵: نمونه استوانه‌ای تحت آزمایش کشش برزیلی

۵- بحث و بررسی نتایج بدست آمده

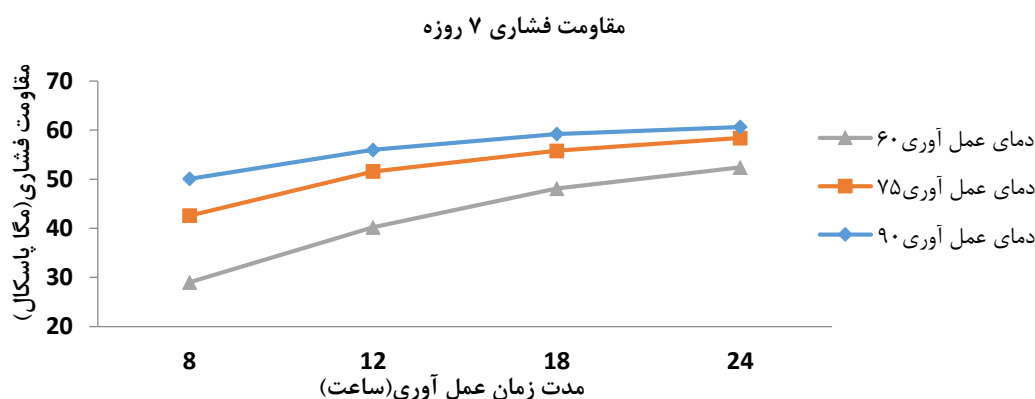
۵-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

آزمونه‌های مکعبی حاوی ملات ژئوپلیمری پس از قالب گیری، در معرض عمل آوری با دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت قرار داده شدند. سپس آزمون‌ها از قالب خارج شدند و در سنین ۳، ۷ و ۱۴ روزه مقاومت فشاری آن‌ها با قرار دادن زیر جک بدست آمد. نتایج مقاومت فشاری سنین مختلف در زیر آمده است.



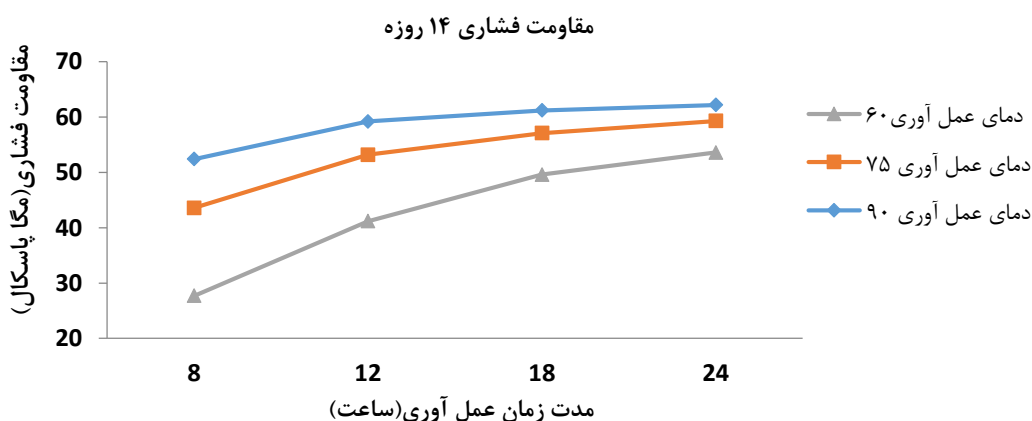
شکل ۶: نمودار مقاومت فشاری ۳ روزه ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دماهای مختلف

طبق نتایج بدست آمده از نمودار شکل شماره ۶ مقاومت فشاری سه روزه، عمل آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸ ساعت عملکرد ضعیفی نسبت به حالت‌های متناظر آن در دماهای بالاتر را نشان می‌دهد. آهنگ افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل آوری ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد از سایر دماهای عمل آوری بیشتر است. همچنین شیب افزایش مقاومت فشاری در بازه زمانی ۸ تا ۱۲ ساعت در همه‌ی دماهای عمل آوری بیشتر از شیب افزایش مقاومت فشاری در بازه زمانی ۱۸ تا ۲۴ ساعت است. با افزایش مدت زمان عمل آوری مقاومت فشاری در همه دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد و مدت زمان ۲۴ ساعت نزدیک به مقاومت فشاری نمونه عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت است. با افزایش دمای عمل آوری ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد مقاومت فشاری متناظر با آن افزایش می‌یابد بنا بر این هرچه دما و مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز بیشتر می‌شود و عمل آوری در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت دارای بیشترین مقاومت فشاری است (۵۵/۴ مگا پاسکال). به نظر می‌رسد که انجام فرآیند عمل آوری در دماهای بالاتر باعث افزایش سرعت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون شده و موجب افزایش استحکام فشاری نمونه‌ها می‌شود. علت این موضوع، در افزایش میران واکنش پذیری هیدروکسید سدیم و سدیم سیلیکات می‌باشد به طوری که پلیمرها با تعداد بیشتر تشکیل شده و پیوند آن‌ها مستحکم تر می‌باشد [۱۱]. همچنین هر چه مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد پیوند بین ذرات و تشکیل ژل بیشتر می‌شود.



شکل ۷: نمودار مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دماهای مختلف.

بررسی نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های ژئوپلیمری در شکل شماره ۷ نشان می‌دهد کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸ ساعت است و بیشترین مقاومت مربوط به نمونه عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار داده شده و بعد از آن، آزمون‌ها در آب قرار داده گرفته اند (۶۰/۶۵ مگا پاسکال). هر چه مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد، که این مساله در همه دماهای عمل آوری ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه صادق است. آهنگ افزایش مقاومت فشاری در بازه زمانی ۸ تا ۱۲ ساعت در همه دماها از بازه ۱۸ تا ۲۴ ساعت بیشتر است. در دمای ۶۰ درجه شیب افزایش مقاومت فشاری با افزایش مدت زمان عمل آوری از سایر دماها بیشتر است. همچنین مقاومت فشاری نمونه عمل آوری شده در دمای ۷۵ درجه و مدت زمان ۱۸-۲۴ ساعت نزدیک به مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری در دمای ۹۰ درجه در همین بازه دمایی است. هر چه دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری بیشتر می‌شود مقاومت فشاری نیز بیشتر می‌شود. نمونه‌های عمل آوری در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت دارای بیشترین مقاومت فشاری هستند (۶۰/۶۵ مگا پاسکال). نتایج نشان می‌دهد عمل آوری در دماهای بالا باعث افزایش سرعت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل و افزایش پیوند بین ذرات می‌شود و استحکام فشاری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد.

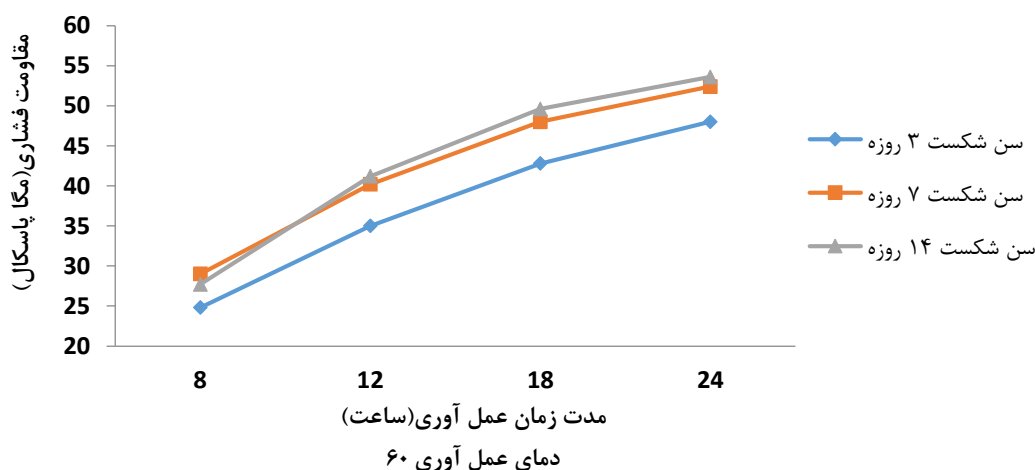


شکل ۸: نمودار مقاومت فشاری ۱۴ روزه ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دماهای مختلف.

بررسی نمودار شکل شماره ۸ نشان می‌دهد، ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه و به مدت ۸ ساعت دارای کمترین مقاومت فشاری است (۲۷/۹ مگاپاسکال) و بیشترین مقاومت فشاری مربوط به دمای عمل آوری ۹۰ درجه و مدت زمان عمل آوری ۲۴ ساعت است (۶۲/۲ مگاپاسکال). هرچه دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری افزایش می‌یابد مقاومت فشاری متناظر با آن نیز افزایش می‌یابد. بیشترین شیب افزایش مقاومت فشاری در بازه زمانی ۸ تا ۲۴ ساعت مربوط به عمل آوری در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد است و کمترین شیب افزایش مقاومت مربوط به عمل آوری در دمای ۹۰ درجه و در بازه زمانی یاد شده است. همچنین افزایش مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه و در بازه زمانی ۱۸ تا ۲۴ ساعت محسوس نبوده و بهینه ترین حالت عمل آوری را می توان عمل آوری در دمای ۹۰ درجه و به مدت ۱۸ ساعت اعلام کرد. نتایج نشان می‌دهد عمل آوری در دماهای بالا باعث افزایش سرعت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و تشکیل ژل و افزایش پیوند بین ذرات می شود و استحکام فشاری نمونه‌ها را افزایش می‌دهد.

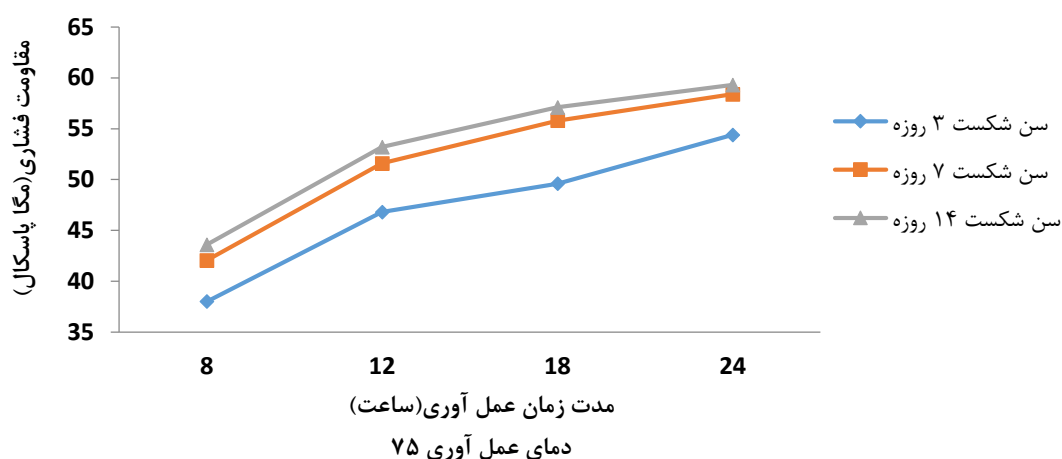
۵-۲- بررسی تاثیر سن شکست در مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی ۵×۵، عمل آوری شده در دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت زمان ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت انجام گرفت. سنین شکست نمونه ها ۳، ۷ و ۱۴ روز می‌باشد.



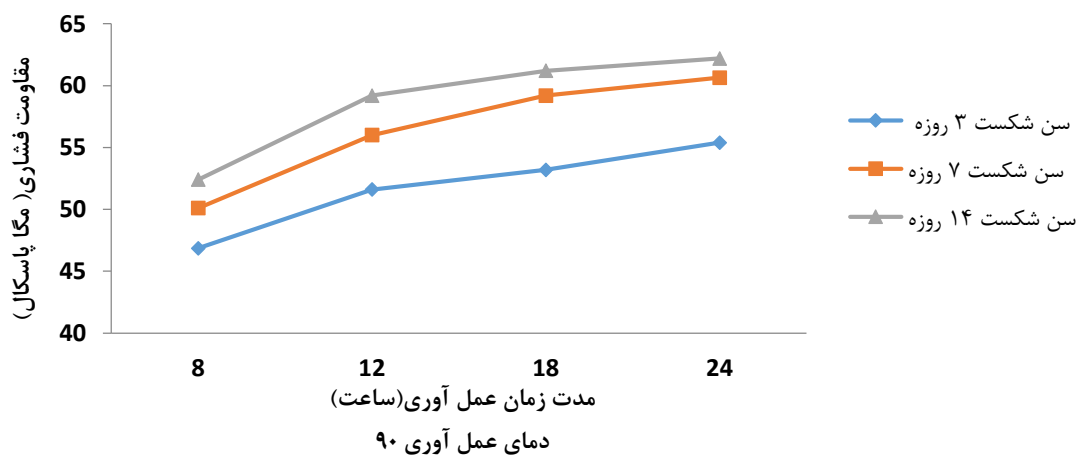
شکل ۹: نمودار تاثیر سن شکست بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد.

بررسی نمودار شکل شماره ۹ مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد در سنین مختلف نشان می‌دهد مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده به مدت ۸ ساعت در هر سه سن شکست (۳، ۷، ۱۴ روزه) بسیار به یکدیگر نزدیک است. کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های شکسته شده در سومین روز است. همچنین نمودار مقاومت فشاری نمونه های ۷ و ۱۴ روزه تقریباً روی هم منطبق هستند. عمده مقاومت کسب شده ملات ژئوپلیمری در سنین اولیه است و قسمت اعظم مقاومت فشاری تا سن ۷ روز کسب شده است و بین سن ۷ تا ۱۴ روز رشد مقاومت بسیار کمی مشاهده شده است. بنابراین بیشترین مقاومت فشاری در سنین اولیه (تا ۷ روز) کسب شده که علت این امر ناشی از پیشرفت ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات می‌باشد، کریستال‌های ژئوپلیمری تشکیل شده پیوستگی کامل پیدا کرده و موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود.



شکل ۱۰: نمودار تاثیر سن شکست بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد.

مطابق نمودار شکل شماره ۱۰ مقاومت فشاری در دمای عمل آوری ۷۵ درجه سانتی گراد، در سن ۳ روز از مقاومت فشاری ۷ و ۱۴ روزه کمتر است. در مدت زمان عمل آوری ۸ ساعت مقاومت فشاری در هر سه سن شکست (۳، ۷، ۱۴ روزه) به یکدیگر نزدیک هستند. نمودار مقاومت فشاری در سن ۷ و ۱۴ روزه تقریباً بر هم منطبق بوده و می‌توان نتیجه گرفت عمده مقاومت کسب شده ملات ژئوپلیمری در سنین اولیه (۷ روزه) است. که علت این امر، ناشی از پیشرفت ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات می‌باشد که کریستال-های ژئوپلیمری تشکیل شده پیوستگی کامل داشته و موجب تکمیل فرآیند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود و سبب افزایش مقاومت فشاری تا سن ۷ روز می‌شود.



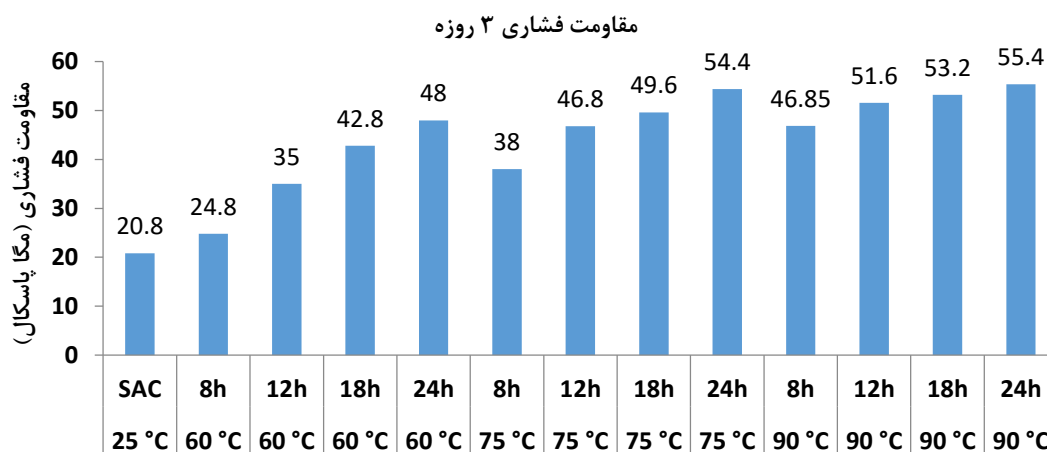
شکل ۱۱: نمودار تاثیر سن شکست بر مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد.

نمودار شکل شماره ۱۱ مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد در سنین مختلف نشان می‌دهد؛ کمترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های شکسته شده در سومین روز است. همچنین نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ و ۱۴ روزه در بازه زمانی ۱۸ تا ۲۴ ساعت تقریباً روی هم منطبق هستند و در بازه زمانی ۸ تا ۱۸ ساعت مقاومت فشاری ۱۴ روزه کمی بیشتر است. عمده مقاومت کسب شده ملات ژئوپلیمری در سنین اولیه است و قسمت اعظم مقاومت فشاری تا سن ۷ روز کسب شده است و بین سن ۷ تا ۱۴ روز رشد مقاومت بسیار کمی مشاهده شده است. بنابراین با افزایش سن شکست از ۳ به ۱۴ روز مقاومت فشاری ملات

ژئوپلیمری افزایش می یابد؛ به نظر می رسد علت این امر، ناشی از پیشرفت ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات می باشد؛ کریستال های ژئوپلیمری تشکیل شده پیوستگی کامل پیدا کرده و موجب افزایش مقاومت فشاری می شود.

۵-۳- بررسی مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر عمل آوری شده در گرمخانه با نمونه عمل آوری شده در محیط

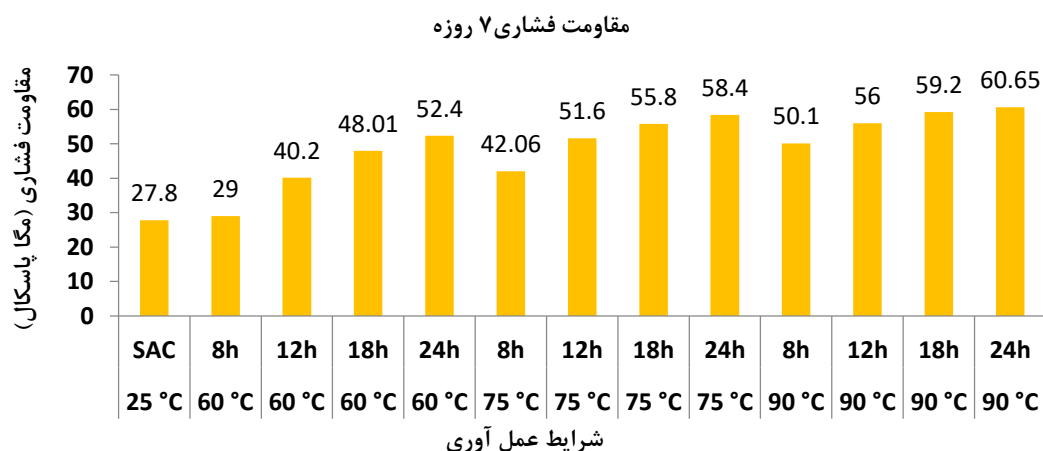
نتایج حاصل از بررسی نمودار در شکل شماره ۱۲ نشان می دهد نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط دارای کمترین مقاومت فشاری ۳ روزه هستند (۲۰/۸ مگاپاسکال). با افزایش دمای عمل آوری از ۶۰ تا ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و افزایش مدت زمان عمل آوری (۸ تا ۱۲، ۱۲ تا ۱۸، ۱۸ تا ۲۴) ساعت مقاومت فشاری نمونه ها افزایش می یابد.



شرایط عمل آوری

شکل ۱۲: نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در دماهای مختلف در گرمخانه و در دمای محیط (۳ روزه).

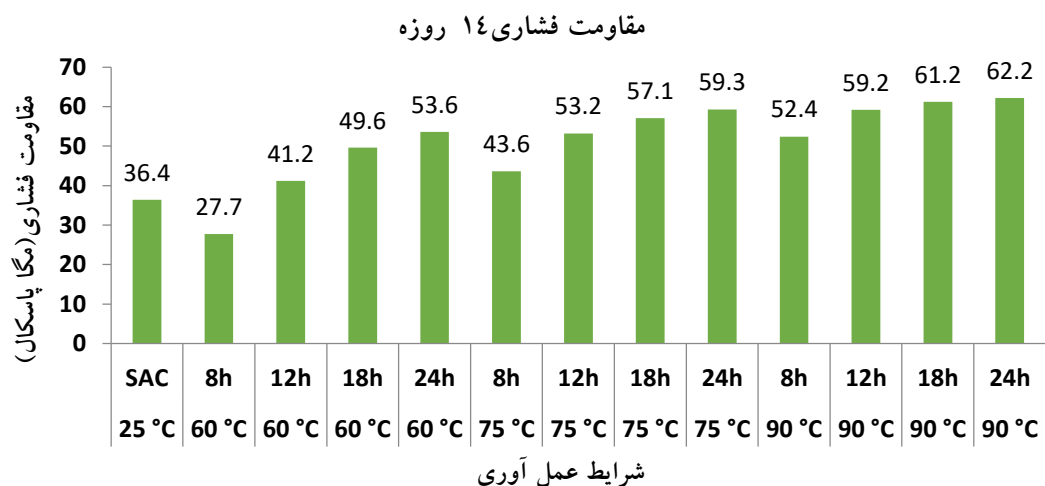
بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت می باشد (۵۵/۴ مگاپاسکال). بنابراین عمل آوری در دماهای بالا موجب افزایش سرعت فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و افزایش مقاومت فشاری نمونه ها می شود. عمل آوری در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی گراد) سبب می شود ژئوپلیمریزاسیون به طور کامل انجام نمی گیرد و پیوند بین ذرات به درستی تشکیل نمی شود و مقاومت فشاری افزایش نمی یابد.



شرایط عمل آوری

شکل ۱۳: نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در دماهای مختلف در گرمخانه و در دمای محیط (۷ روزه).

بررسی نمودار شکل شماره ۱۳ نشان می‌دهد؛ مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر عمل آوری شده در محیط کمتر از مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در اون است. هرچه دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری بالا می‌رود مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد؛ به عنوان مثال، میانگین مقاومت فشاری ۷ روزه، نمونه های عمل آوری شده در دمای محیط ۲۷/۸ مگا پاسکال می‌باشد؛ در حالی که نمونه‌های ۷ روزه عمل آوری شده در اون به مدت ۲۴ ساعت و دمای ۹۰ درجه سانتی گراد دارای مقاومت ۶۰/۶۵ مگا پاسکال می‌باشند. به نظر می‌رسد که دلیل امر این است که حرارت موجب تکمیل شدن فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود و پیوند بین ذرات به درستی تشکیل می‌شود و مقاومت نمونه‌ها را بالا می‌برد.

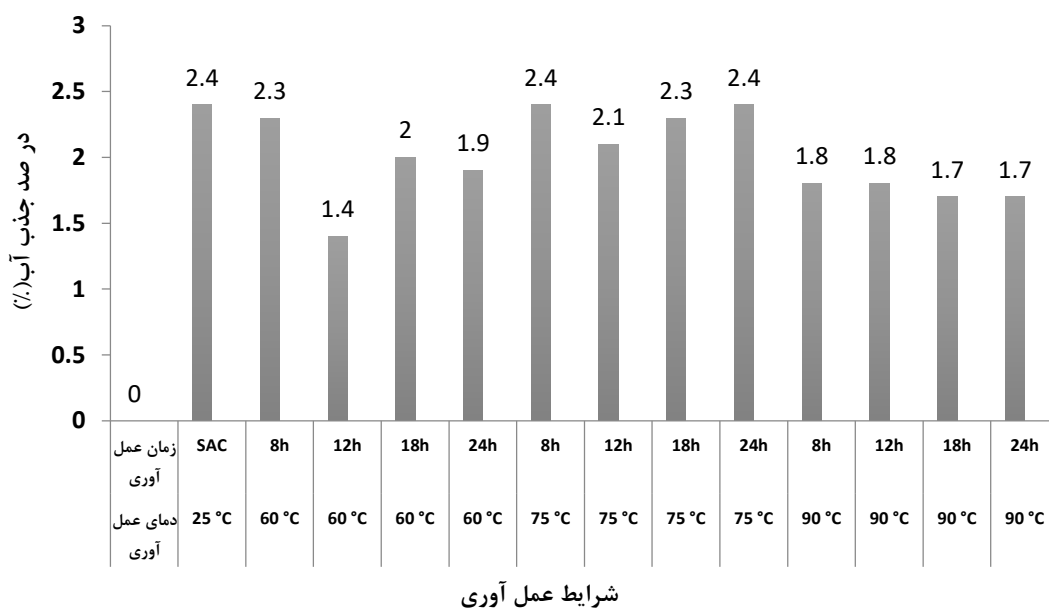


شکل ۱۴: نمودار مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در دماهای مختلف در گرمخانه و در دمای محیط (۱۴ روزه).

بررسی نمودارهای شکل شماره ۱۴ نشان می‌دهد؛ مقاومت فشاری ملات ژئوپلیمر عمل آوری شده در محیط بسیار کمتر از مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در اون است که دلیل امر این است که حرارت موجب تکمیل شدن فرایند ژئوپلیمریزاسیون می‌شود و مقاومت نمونه‌ها را بالا می‌برد. هرچه دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری در اون بالا می‌رود شاهد افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شویم؛ به عنوان مثال، میانگین مقاومت فشاری ۱۴ روزه، نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط ۳۶/۴ مگا پاسکال می‌باشد در حالی که نمونه های ۱۴ روزه عمل آوری شده در اون به مدت ۲۴ ساعت و دمای ۹۰ درجه سانتی گراد دارای مقاومت ۶۲/۲ مگا پاسکال می‌باشند.

۵-۴- بررسی نتایج آزمایش جذب آب

نمونه‌های مکعبی ۵×۵ ملات ژئوپلیمری پس از قالب ریزی عمل آوری شدند در دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت در گرمخانه و همچنین عمل آوری شدند در دمای محیط. سپس نمونه‌ها از قالب خارج شدند و وزن شدند و به مدت ۴۸ ساعت درون مخزن آب قرار داده شدند و زمانی که تغییرات وزن نمونه‌ها در حالت اشباع کمتر از ۰/۵ درصد بود از آب خارج و در صد جذب آب آن‌ها محاسبه شد.

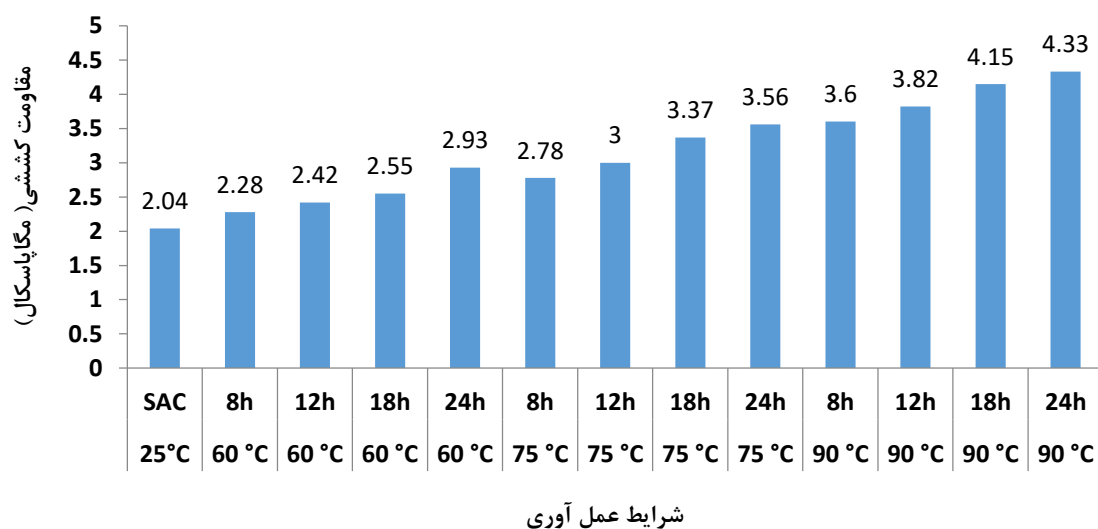


شکل ۱۵: نمودار جذب آب نمونه‌های ملات ژئوپلیمری عمل آوری در دماهای مختلف در اون و در محیط.

طبق نمودار شکل شماره ۱۵ ژئوپلیمرها دارای جذب آب بسیار پایینی هستند (۱/۴-۲/۴ درصد) که این مساله نشان دهنده دوام خوب این نوع بتن‌ها می باشد. وضعیت نامناسب عمل آوری، مانند عمل آوری در درجه حرارت کمتر از ۹۰ درجه سانتی گراد و عمل آوری در دمای محیط، همچنین مدت زمان کمتر از ۱۸ ساعت حجم حفره‌های قابل نفوذ را افزایش می دهد؛ به طور کلی نرخ بالای فرایند ژئوپلیمریزاسیون منجر به تشکیل ماتریس ژئوپلیمر دارای منافذ و نفوذ پذیری کم می‌شود که این فرایند خود به دمای عمل آوری بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد؛ نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد دارای کمترین میزان جذب آب هستند بنابراین بهینه ترین حالت کمترین میزان جذب آب مربوط به نمونه‌های، عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۸ و ۲۴ ساعت است. در دماهای ۶۰ و ۷۵ درجه، مقاومت به واکنش ژئوپلیمراسیون وابستگی زیادی دارد، به طوری که با واکنش دما، واکنش ژئوپلیمراسیون افزایش یافته و میزان نفوذپذیری آن کاهش یافته که البته این کاهش، میزان زیادی مشاهده نگردید. از طرفی دیگر با افزایش دما، میزان آلومینات‌های موجود، تمایل بیشتری به واکنش با سود و آب شیشه از خود نشان می دهد و در نتیجه تغییرات مشاهده شده در دمای ۶۰ و ۷۵ رخ می دهد.

۵-۵- بررسی نتایج آزمایش مقاومت کششی

نمونه‌های استوانه ای ۱۰×۲۰ ملات ژئوپلیمری پس از قالب ریزی عمل آوری شدند در دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۸، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ساعت در گرمخانه و همچنین عمل آوری شدند در دمای محیط. سپس از قالب خارج شدند و شکست برزلی روی آن‌ها انجام گرفت.



شکل ۱۶: نمودار مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده در دماهای مختلف در گرمخانه و در دمای محیط

نتایج نمودار شکل شماره ۱۶ نشان می‌دهد کمترین مقاومت کششی مربوط به مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط است (۲/۰۴ مگاپاسکال) و بیشترین مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه و به مدت ۲۴ ساعت است (۴/۳۳ مگاپاسکال). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش دما و مدت زمان عمل آوری مقاومت کششی نمونه‌های ژئوپلیمری افزایش می‌یابد؛ که علت این امر کامل شدن فرآیند ژئوپلیمریزاسیون و بهبود خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمر و در نتیجه افزایش مقاومت کششی نمونه‌ها می‌شود.

۶- نتیجه گیری

با توجه به بررسی مقاومت فشاری و کششی ملات ژئوپلیمری عمل آوری شده در دماهای مختلف، نتایج و نمودارها نشان می‌دهد، با افزایش دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۲۴ ساعت است. با افزایش سن شکست، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافته، که این افزایش مقاومت، تا ۷ روز بیشترین مقدار را دارا می‌باشد. از سن ۷ تا ۱۴ روز تغییر محسوسی در مقاومت فشاری نمونه‌ها مشاهده نگردید. ملات ژئوپلیمری بیشترین مقاومت خود را در ۷ روز نخست بدست می‌آورد. درصد جذب آب نمونه‌های ژئوپلیمری عمل آوری شده در گرمخانه، از نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط کمتر است. با افزایش دمای عمل آوری و مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها، درصد جذب آب کاهش می‌یابد، به طوری که نمونه‌های عمل آوری شده در دمای ۹۰ درجه و به مدت ۲۴ ساعت در آن، کمترین میزان جذب آب را داشتند. مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده در گرمخانه، از مقاومت کششی نمونه‌های عمل آوری شده در دمای محیط بیشتر است. با افزایش دما و مدت زمان عمل آوری، مقاومت کششی نیز افزایش می‌یابد. فرآیند ژئوپلیمریزاسیون با افزایش دمای عمل آوری افزایش یافته و باعث بهبود خواص مقاومتی و دوام ژئوپلیمرها می‌شود.

۷- سپاسگزاری

در پایان از آزمایشگاه مرکز تحقیقات بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین، بابت ارائه تجهیزات و همکاری‌های ارزنده، کمال تشکر را می‌نمایم.

۸- مراجع

- 1- Rajini, B. and Rao, A.N., 2014. Mechanical properties of geopolymer concrete with fly ash and ggbs as source materials. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(9), pp.15944-15953.
- 2- Kumar, B.S.C., Ramesh, K. and Poluraju, P., 2006. An experimental investigation on flexural behavior of GGBS and metakaolin based geopolymer concrete. *ARN journal of engineering and applied sciences*, 12(7), pp.2052-2062
- 3- Vignesh, P. and Vivek, K., 2015. An experimental investigation on strength parameters of flyash based geopolymer concrete with GGBS. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(02).
- 4- Omer, S.A., Demirboga, R. and Khushfati, W.H., 2015. Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 94, pp.189-195.
- 5- Deb, P.S., Nath, P. and Sarker, P.K., 2014. The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design (1980-2015)*, 62, pp.32-39.
- 6- Padmakar, K.C. and Kumar, B.S.C., 2017. An Experimental Study on Metakaolin and GGBS Based Geopolymer Concret. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1), pp.544-557.
- 7- Mo, B.H., Zhu, H., Cui, X.M., He, Y. and Gong, S.Y., 2014. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, pp.144-148.
- 8- Rovnaník, P., 2010. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*, 24(7), pp.1176-1183.
- 9- Wang, H., Li, H. and Yan, F., 2005. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 268(1-3), pp.1-6
- 10- Yaseri, S., Hajiaghahi, G., Mohammadi, F., Mahdikhani, M. and Farokhzad, R., 2017. The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste. *Construction and Building Materials*, 157, pp.534-545.
- 11- Lee WH, Wang JH, Ding YC, Cheng TW. A study on the characteristics and microstructures of GGBS/FA based geopolymer paste and concrete. *Construction and Building Materials*. 2019 Jun 30;211:807-13.
- 12- Alomayri T. Experimental study of the microstructural and mechanical properties of geopolymer paste with nano material (Al₂O₃). *Journal of Building Engineering*. 2019 Sep 1;25:100788.
- 13- Li F, Liu L, Yang Z, Li S. Physical and mechanical properties and micro characteristics of fly ash-based geopolymer paste incorporated with waste Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs). *Journal of Hazardous Materials*. 2020 Jul 2;401:123339.
- 14- Peng, Hui, et al. "Microstructure and microhardness property of the interface between a metakaolin/GGBFS-based geopolymer paste and granite aggregate." *Construction and Building Materials* 221 (2019): 263-273.
- 15- Kishore, K., & Gupta, N. (2021). Mechanical characterization and assessment of composite geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 58-62.
- 16- Yaseri, Sajad, et al. "The role of synthesis parameters on the workability, setting and strength properties of binary binder based geopolymer paste." *Construction and Building Materials* 157 (2017): 534-545.
- 17- Padmakar, M., Barhmaiah, B., & Priyanka, M. L. (2021). Characteristic compressive strength of a geo polymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2219-2222.
- 18- Vishnu, N., Kolli, R., & Ravella, D. P. (2021). Studies on Self-Compacting geopolymer concrete containing flyash, GGBFS, wollastonite and graphene oxide. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2422-2427.