

Investigating the properties of concrete containing pozzolan and porcelain ceramic waste under different curing conditions

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad^{1*}, Seyed Davood Rastad²

1- Associate Professor, Civil engineering dept., University of Guilan, Rasht, Iran

2- Master of Science, Department of Civil engineering., University Campus 2, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT

One of the important issues in many industries is how to reduce waste in different stages of the process of designing, producing and maintaining, transporting and supplying products. Due to the large volume of construction ceramics waste and their non-recyclability, the use of these materials in concrete has been considered. These wastes can be used as pozzolan or as aggregate in concrete. In this study, ceramic waste in three different forms of powder (substitute for cement), fine-grained (substitute for sand) and coarse-grained (substitute for sand) were used to make laboratory samples. Based on this, a total of 12 mixing designs were made, the control design does not contain ceramic waste and micro-silica. Also, three different methods of standard processing, plastic coating and open air were used to process all laboratory samples. The results of this study have shown that mixtures containing ceramic waste have higher compressive strength compared to the control design, although the amount of this increase is different for different processing methods. Using the plastic coating method to process the sample containing ceramic waste has reduced the bending strength by 5.6% compared to the standard processing method, while this value is 15.6% for the control design. Also, the results showed that in all three processing methods, the witness design had a greater drop in compressive strength than the design containing ceramic waste after being placed in the chloride environment.

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 February 2024

Revise Date: 22 June 2024

Accept Date: 24 July 2024

Keywords:

ceramics waste
processing
micro-silica
chloride environment
durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.432773.3314](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.432773.3314)

*Corresponding author: Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad

Email address: h.mosavi@guilan.ac.ir

بررسی خواص بتن حاوی پوزولان و ضایعات سرامیک پسران تحت عمل آوری‌های مختلف

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد^{۱*}، سید داود راستاد^۲

۱- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، پردیس دانشگاهی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

یکی از مسایل حائز اهمیت در بسیاری از صنایع، چگونگی کاهش ضایعات در مراحل مختلف فرایند طراحی، تولید و نگهداری، حمل و عرضه محصولات می‌باشد. با توجه به حجم وسیع ضایعات سرامیک‌های ساختمانی و غیرقابل بازیافت بودن آنها، استفاده از این مواد در بتن مورد توجه قرار گرفته است. این ضایعات را می‌توان به عنوان پوزولان و یا به عنوان سنگدانه در بتن مورد استفاده قرار داد. در این مطالعه از ضایعات سرامیکی در سه شکل مختلف پودر (جایگزین سیمان)، ریزدانه (جایگزین ماسه) و درشتدانه (جایگزین شن) برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است. بر این اساس در مجموع ۱۲ طرح اختلاط ساخته شده است، که طرح شاهد فاقد ضایعات سرامیکی و میکروسیلیس است. همچنین از سه روش مختلف عمل‌آوری استاندارد، پوشش پلاستیکی و هوای آزاد برای عمل‌آوری تمام نمونه‌های آزمایشگاهی طرح دوازدهم استفاده گردید. نتایج این مطالعه نشان داده است، مخلوط‌های حاوی ضایعات سرامیکی نسبت به طرح شاهد مقاومت فشاری بالاتری نتیجه داده‌اند که البته مقدار این افزایش برای روش‌های مختلف عمل‌آوری متفاوت است. استفاده از روش پوشش پلاستیکی برای عمل‌آوری نمونه حاوی ضایعات سرامیکی باعث شده تا مقاومت خمشی ۵/۶ درصد نسبت به روش عمل‌آوری استاندارد کاهش یابد، در حالی که این مقدار برای طرح شاهد ۱۵/۶ درصد است. همچنین نتایج نشان داد در هر سه روش عمل‌آوری طرح شاهد افت مقاومت فشاری بیشتری نسبت به طرح حاوی ضایعات سرامیکی پس از قرارگیری در محیط کلریدی نتیجه داده است.

کلمات کلیدی: ضایعات سرامیکی، عمل‌آوری، میکروسیلیس، محیط کلریدی، دوام

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.432773.3314	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
		۱۴۰۴/۰۱/۳۱	۱۴۰۳/۰۵/۰۳	۱۴۰۳/۰۵/۰۳	۱۴۰۳/۰۴/۰۲	۱۴۰۲/۱۲/۰۵
سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد h.mosavi@guilan.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از مسایل حایز اهمیت در بسیاری از صنایع، چگونگی کاهش ضایعات در مراحل مختلف فرایند طراحی، تولید و نگهداری، حمل و عرضه محصولات می‌باشد. تولید سیمان با انتشار مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای همچون دی اکسید کربن همراه است. این گازها عامل ایجاد گرمایش در جو زمین می‌باشند و عامل اصلی تغییرات آب و هوایی و گرمایش جهانی هستند. از این رو، تلاش‌هایی در جهت کاهش آثار منفی تولید سیمان بر محیط زیست در حال انجام است. بر اساس تحقیقات علمی، انرژی لازم برای تولید سیمان پرتلند که با سوخت‌های فسیلی فراهم می‌شود موجب رها شدن حدود ۰/۸ تن گاز دی اکسید کربن به طور متوسط به ازای تولید هر تن سیمان به جو کره زمین می‌شود و به صورت کلی حدود ۴ گیگاژول برای تولید هر تن سیمان مصرف می‌شود به طوری که صنعت سیمان سهم ۷ درصدی در تولید دی اکسید کربن دنیا را دارد. علاوه بر این میزان از آلودگی و آلاینده‌ها، هزینه‌های بالای تولید سیمان پرتلند نیز یکی دیگر از عواملی است که بشر به دنبال جایگزینی برای سیمان پرتلند در بتن و یا سایر موارد مصرفی می‌باشد. بنابراین، استفاده از مواد جایگزین سیمان از جمله مواد معدنی و غیرمعدنی و همچنین مواد قابل بازیافت در ساخت انواع بتن می‌تواند به شدت به کاهش آلودگی هوا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند [۱،۲].

بازیافت سنگدانه‌ها، به عنوان یکی از راهکارهای کاهش اثرات زیست محیطی در حوزه صنعت بتن، ناشی از پسماندهای ساختمانی و تخریب سازه‌ها از جمله ضایعات سرامیک‌های ساختمانی منجر به استفاده کمتر از منابع طبیعی می‌شود. امروزه، با توجه به حجم وسیع ضایعات سرامیک‌های ساختمانی و غیرقابل بازیافت بودن آنها، استفاده از این مواد در بتن مورد توجه قرار گرفته است، این ضایعات می‌توانند به عنوان پوزولان و یا به عنوان سنگدانه در بتن مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، برای استفاده موثر از سنگدانه‌های بازیافتی، لازم است استانداردها و روش‌های مربوط به استفاده از آنها در تولید بتن ارتقا یابند. همچنین، باید مشکلات فنی و فناوری مربوط به استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را حل کرده و روش‌هایی برای کاهش اثرات جانبی مرتبط با استفاده از این سنگدانه‌ها پیدا کرد [۳].

از جمله ویژگی‌های سرامیک ضایعاتی می‌توان به ساختار فیزیکی سخت و همچنین ساختار شیمیایی آمورف که در اثر حرارت پخت ایجاد می‌شود، اشاره کرد. از سوی دیگر این مواد دارای اکسیدهای خالص و مناسب جهت استفاده به عنوان پوزولان می‌باشند. معمولاً این ضایعات به چند صورت ایجاد می‌شود. بخشی از این ضایعات در کارخانه‌ها و در حین و بعد از فرایند تولید به علت خطا ساخت و یا اشتباهات انسانی و بخشی دیگر در مسیرهای حمل و نقل و بخش اعظم در هنگام ساخت و بازسازی و تخریب ساختمان‌ها ایجاد می‌شود [۴]. استفاده از این ضایعات چه به عنوان پودر جایگزین سیمان و چه به عنوان جایگزین سنگدانه، دفع زباله را کاهش می‌دهد و همچنین دوستدار محیط زیست است [۵]. بدین ترتیب با جایگزینی پودر ضایعات هم باعث کاهش مقدار مصرف سیمان و هم میزان دی اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن تولید شده در کارخانجات سیمان کاهش می‌یابد، از این رو بازیافت این پسماندها و استفاده مجدد از آنها، یکی از شاخه‌های بسیار جدی و پر طرفدار تحقیقاتی به ویژه در کشورهای توسعه یافته می‌باشد [۳].

استفاده از ضایعات سرامیکی در سال ۲۰۰۵ به عنوان جایگزینی برای سیمان توسط سنتامارای و مانوهران مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، ضایعات و زباله‌های سرامیکی به عنوان یک جایگزین احتمالی برای سنگ دانه‌های درشت استفاده شد. سنگدانه‌ها توسط دستگاه‌های مخصوص به اندازه حداکثر ۲۰ میلی متری تبدیل شدند. آن‌ها آزمون‌های بتنی را با درصد مختلف آب به سیمان ۰/۳۵ و ۰/۱۶ ساختند. نتایج نشان داد که کارایی ضایعات سرامیکی به عنوان درشت دانه در بتن مناسب است [۶]. لویز و همکاران (۲۰۰۷)، در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از ضایعات سرامیک در بتن به عنوان ریزدانه پرداختند، در این مطالعه پس از خرد کردن و دانه‌بندی سرامیک‌های ضایعاتی، از آنها به عنوان ماسه در ساخت بتن با درصد‌های مختلف (از ۱۰ تا ۵۰ درصد) استفاده شد. نتایج آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته شده نشان داد که استفاده از ضایعات سرامیک در بتن به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه باعث افزایش مقاومت می‌شود [۷]. همچنین در مطالعه انجام شده توسط گورا و همکاران در سال (۲۰۰۹)، استفاده از ضایعات سرامیک چینی بهداشتی به عنوان جایگزین بخشی از درشتدانه در بتن مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، از ضایعات چینی بهداشتی به میزان ۳ تا ۹ درصد به عنوان جایگزین برای درشتدانه در بتن استفاده شد و نتایج نشان داد که افزودن ضایعات چینی بهداشتی به بتن منجر به افزایش اندک مقاومت فشاری می‌شود [۸].

همچنین اندرسون و همکاران (۲۰۱۶)، طی مطالعه ای به تأثیر انواع مختلف سرامیک‌های کف و دیوار در ترکیبات بتن سیمانی پرداختند. در این تحقیق، انواع مختلفی از سرامیک‌ها با درصدهای مختلف نسبت به وزن کل مصالح سنگی (۲۰، ۲۵، ۳۵، ۵۰، ۶۵، ۷۵ و ۱۰۰ درصد) به عنوان سنگدانه مصرفی در ترکیبات بتن استفاده شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که سرامیک‌های با تخلخل بیشتر، توانایی جذب آب بیشتری داشتند، در حالی که سرامیک‌های متراکم توانایی جذب آب کمتری داشتند. علاوه بر این، سرامیک‌های متراکم معمولاً مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهند و مقدار مدول الاستیسیته بالاتری، نسبت به سرامیک‌های با تخلخل زیاد دارند [۹]. داناسکار و همکاران [۱۰] جایگزینی نسبی درصدهای مختلف سنگدانه ریز بازایفتی ضایعات سرامیک را در بتن پر مقاومت بررسی کردند و دریافتند که در ۲۰٪ جایگزینی بهترین عملکرد را در بتن فراهم کرد. چندرا پال و همکاران [۱۱] مقاومت مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن سازگار با محیط زیست را با استفاده از سنگدانه‌های بازایفتی سرامیک بررسی کردند و نشان دادند که ۱۰ تا ۲۰٪ سنگدانه بازایفتی سرامیک در تولید بتن تا ۲۰ مگاپاسکال برای کاهش هزینه و حفظ محیط زیست مناسب است. بعلاوه، افزایش سنگدانه بازایفتی منجر به افزایش جذب آب، تخلخل و ایجاد ناحیه انتقال ضعیف بین سنگدانه و خمیر سیمان می‌شود. هیکاشیاما و همکاران [۱۲] در یافتند که با افزودن پودر و سنگدانه ریز ضایعات سرامیک مقاومت فشاری و مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید این ملات افزایش می‌یابد.

راوال و همکاران [۱۳] در مطالعه ای به بررسی جایگزینی پودر سرامیک با درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰٪ با سنگدانه‌های ریزدانه و درشت دانه سرامیکی پرداختند. بعد از انجام آزمایش مقاومت فشاری نتایج حاکی از آن بود مقاومت فشاری به طور کلی به میزان ۵۰٪ افزایش یافت. وقلال و پیترودا [۱۴] پودر سرامیک را به عنوان پوزولان در درصدهای وزنی مختلف جایگزین سیمان کردند و نتایج نشان دادند که در ۱۰٪ جایگزینی دارای حداکثر افزایش مقاومت‌های مکانیکی و در ۱۵٪ بیشترین درصد کاهش نفوذ پذیری یون کلر را تجربه کرده‌اند. پاچتو و همکاران [۱۵]، در مطالعه ای به بررسی دوام و ویژگی‌های بتن‌های حاوی ضایعات سرامیکی پرداختند. در این مطالعه، چندین نمونه از مخلوط‌های بتن با هدف دستیابی به مقاومت ۳۰ مگاپاسکال تهیه شد و حداکثر ۲۰ درصد از ضایعات پودر سرامیک به جای سیمان در ترکیب بتن استفاده شد. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۲۰ درصد پودر سرامیک به جای سیمان، مقاومت فشاری بتن کمی کاهش می‌یابد، اما به دلیل پر کردن فضاهای متخلخل و خلل و فرج‌های موجود در بتن، دوام بتن به شدت بهبود می‌یابد و از بتن شاهد بهتر عمل می‌کند.

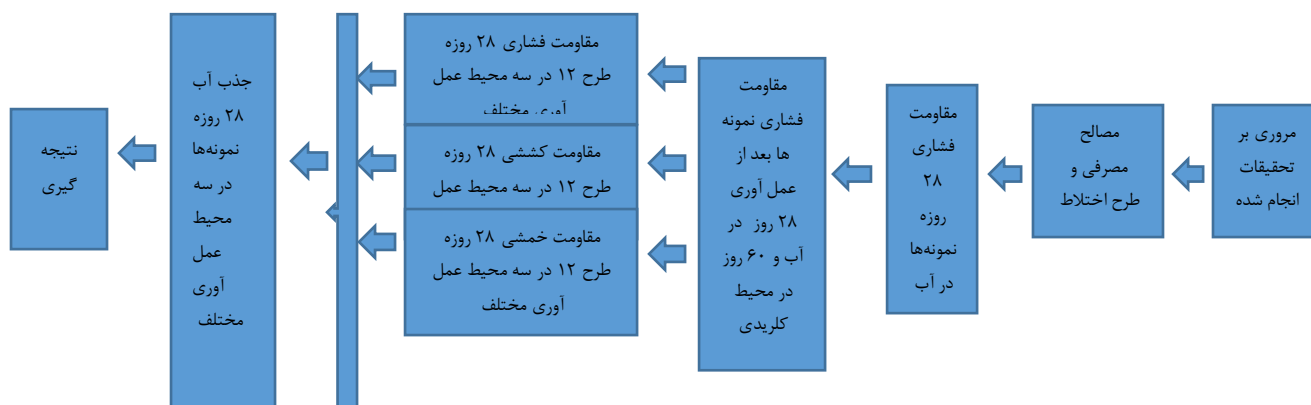
پاچیده و قلهکی [۱۶] در رتا پسا حرارتی ملات سیمان حاوی میکروسیلیس و سرباره آهنگدازی دریافتند که کلیه مقاومت‌های مکانیکی این نمونه‌ها در دماهای ۱۰۰ تا ۹۰۰°C افزایش یافت. همچنین، نمونه‌های حاوی پوزولان‌های مذکور افت وزنی کمتری را تجربه کردند. پاچیده و قلهکی [۱۷] در مطالعه‌ای تأثیر مواد پوزولانی میکروسیلیس، ژئولیت و سرباره آهنگدازی را بر خواص مکانیکی و جذب آب نمونه‌های بتن هوازایی شده در اتوکلاو به این نتیجه دست یافتند که مقاومت فشاری در این نمونه‌ها بسیار بالا ولی مقاومت کششی آنها حداکثر ۲۵٪ و جذب آب نمونه‌ها بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد که بسته به نوع پوزولان تا اندازه‌ای متفاوت است.

توفیق و پاچیده [۱۸] به بررسی تأثیر پوزولان‌های میکروسیلیس، سرباره آهنگدازی، ژئولیت و خاکستر بادی در دماهای از ۲۵ تا ۹۰۰°C پرداختند و نتایج نشان داد که در دماهای بالا سرباره آهنگدازی و ژئولیت عملکرد بهتری نسبت به دیگر پوزولان‌ها داشتند.

قلهکی و همکاران [۱۹] در بررسی عملکرد روسازی متخلخل حاوی انواع مختلف پوزولان‌ها با استفاده از چهار نوع الیاف پارچه‌ای دریافتند که با افزودن آستر الیافی پارچه‌ای به همراه مواد چسبی کامپوزیتی حاصل از ترکیب سیمان با انواع پوزولان در درصدهای ۱۰ و ۲۰ به طور مجزا با سیمان سبب افزایش درصد خستگی الیاف پارچه‌ای فارغ از جنس الیاف گردید.

طبق نتایج مطالعات صورت گرفته استفاده از سنگدانه‌های بازایفتی در تولید بتن می‌تواند یک راه حل موثر برای کاهش اثرات زیست محیطی و حفظ منابع طبیعی و بهبود عملکرد بتن باشد. گرچه استفاده از ضایعات سرامیک در بتن مطالعاتی انجام شده است با این وجود برای اجرائی شدن استفاده از این نوع بتن لازم است مطالعات گسترده‌تر و تحقیقات بیشتری در خصوص بهبود روش‌ها و استانداردهای مربوط به استفاده از این سنگدانه‌ها صورت گیرد.

از این رو، این مطالعه به بررسی خواص محدود مکانیکی و دوام بتن حاوی پوزولان و ضایعات سرامیک در محیط کلریدی تحت شرایط عمل آوری مختلف شکل ۱ صورت گرفت.



شکل ۱: فلوجارت روند انجام تحقیق

۲- مطالعه ی آزمایشگاهی

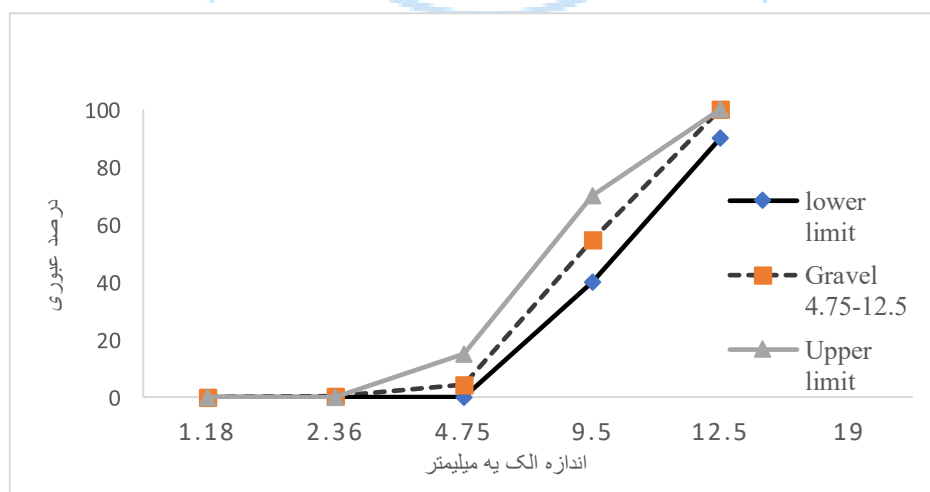
۱-۲ مصالح مصرفی

۱-۱-۲ سنگدانه

در این پژوهش شن مصرفی از نوع مخلوط رودخانه ای است به طوری که حداکثر اندازه دانه‌های آن ۱۲/۵ میلیمتر و جذب آب ۱/۱ درصد می‌باشد. شن مورد استفاده در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از کارخانه لوله سازی شمال رشت تهیه شده است. دانه بندی شن مصرفی در جدول ۱ و همچنین مطابقت آن با محدوده مورد تایید استاندارد ASTM C33 [۲۰] در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: دانه بندی شن مصرفی

اندازه الک	۱۹mm	۱۲/۵mm	۹/۵mm	۴/۷۵mm	۲/۳۶mm	۱/۱۸mm	۶۰۰µm
شن	۱۰۰	۹۱/۱	۶۷/۱۲	۴/۳۶	۰/۴۳	۰	۰

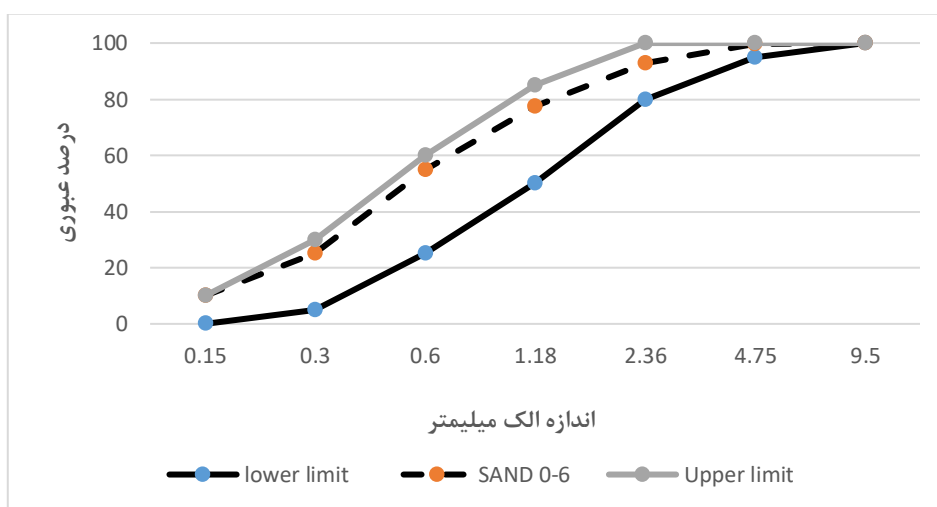


شکل ۲: منحنی دانه بندی شن مصرفی و مطابقت آن با استاندارد ASTM C33

ماسه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی با عنوان ماسه ۰-۶ و از نوع گرد گوشه می‌باشد. چگالی مخصوص ماسه مورد استفاده برابر 2611 kg/m^3 و جذب آب آن 2.4% است. دانه‌بندی ماسه مصرفی در جدول ۲ و شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۲: دانه بندی ماسه مصرفی

اندازه الک	۱۹mm	۱۲/۵mm	۹/۵mm	۴/۷۵mm	۲/۳۶mm	۱/۱۸mm	۶۰۰ μm	۳۰۰ μm	۱۵۰ μm
درصد عبوری	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹۷	۹۲/۹۶	۷۷/۳۵	۵۸	۲۲/۳۲	۳/۴۴



شکل ۳: منحنی دانه بندی ماسه مصرفی و مطابقت آن با استاندارد ASTM C33

۲-۱-۲ سیمان

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی^۱

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	NaO ₂	SO ₃	TiO ₂	LOI
درصد عناصر	۲۱/۳۲	۴/۸۱	۳/۸۳	۶۲/۸۵	۱/۴۸	۰/۶۹	۰/۴۷	۲/۳۲	-	۱/۰۴

۲-۱-۳ میکروسیلیس

میکروسیلیس یک پودر سیلیسی با اندازه ذرات بسیار ریز است که به عنوان یک جایگزین مناسب برای بخشی از مواد سیمانی در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این افزودنی باعث بهبود برخی خصوصیات مکانیکی، حرارتی و شیمیایی بتن می‌شود. به دلیل سطح مخصوص بالای ذرات میکروسیلیس، واکنش پذیری نسبتاً بالایی با مخلوط‌های سیمانی دارد. در پژوهش حاضر میکروسیلیس با 10% وزنی سیمان پرتلند (بر اساس توصیه [۲۱] و [۲۲]) جایگزین شده است. در جدول ۴ ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در این پژوهش ارائه شده است.

¹ <https://www.hegmatancement.com>

جدول ۴: ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی^۲

Materials	LOI	SO ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Silica fume	۲/۶۰	۰/۰۰	۱/۶۰	۱/۸۰	۲/۱۰	۱/۲۰	۸۹/۰۰

۴-۱-۲ آب

آب مورد استفاده در این پژوهش جهت ساخت و همچنین عمل آوری نمونه‌ها، آب شرب شهر می‌باشد که معیارهای توصیه شده توسط ASTM C1602 [۲۳] را رعایت می‌نماید.

۵-۱-۲ ضایعات سرامیک

ضایعات سرامیک استفاده شده در این پژوهش از نوع سرامیک پرسلان بوده است، که نسبت به سایر محصولات سرامیکی به دلیل کیفیت و ویژگی‌های منحصر به فرد خود، بسیار پرکاربرد می‌باشد. این نوع از سرامیک‌ها به علت نفوذ ناپذیر بودن و فرآیند تولید ویژه، استحکام و دوام بالا از پرکاربردترین و پرطرفدارترین سرامیک‌های موجود در بازار می‌باشد. به طور کلی سرامیک‌های پرسلان از خاک رس، فلدسپات یا گرانیت به همراه سیلیس در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد در کوره‌های مخصوص پخته و تولید می‌شوند. همچنین به منظور ایجاد سطح درخشنده، صاف، زیبا، ضدآب و ضد مواد شیمیایی بر روی سطح سرامیک پرسلان، پس از خنک شدن یک لایه نازک لعاب بر روی آن پوشانده می‌شود و سپس برای بار دوم در کوره پخته می‌شود. ضایعات سرامیکی استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها از نوع سرامیک پرسلان می‌باشد که نسبت به سایر سرامیک‌ها دارای کیفیت و ویژگی‌های بهتری نیز می‌باشد. بعد از فرایند خرد کردن ضایعات سرامیک، ضایعات باقیمانده روی الک ۴ به عنوان درشت دانه جایگزین نسبی شن مصرف شد. ضایعات عبوری از الک ۴ که بر روی الک ۲۰۰ مانده‌اند به عنوان ریز دانه جایگزین ماسه برای ساخت نمونه‌ها مصرف شد. ضایعات ریزتر از الک ۲۰۰ هم به عنوان پودر سرامیک جایگزین بخشی از سیمان مصرف شد.

۲-۲ نسبت‌های اختلاط

در این پژوهش در مجموع تعداد ۱۲ طرح اختلاط ساخته شده است. طرح شاهد فاقد ضایعات سرامیکی و میکروسیلیس است. همچنین طرح اختلاط S10 نیز فاقد ضایعات سرامیکی است و فقط ۱۰٪ از وزن سیمان با میکروسیلیس جایگزین شده است. پودر سرامیک با درصد‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ با سیمان پرتلند جایگزین می‌شود، همچنین در دو گروه دیگر از مخلوط‌های آزمایشگاهی از ضایعات سرامیکی در دو شکل ریزدانه (به عنوان جایگزین ماسه) و درشت دانه (به عنوان جایگزین شن) به طور مجزا استفاده شده است. در طرح اختلاط C-P5S10G10 حاوی ترکیبی از ضایعات سرامیکی در سه شکل مختلف است به طوری که در این طرح اختلاط پودر سرامیک با درصد جایگزینی ۵٪ استفاده شده است و ضایعات سرامیکی به شکل سنگدانه به عنوان جایگزین ۱۰٪ ماسه و جایگزین ۱۰٪ شن، استفاده شده است. در جدول ۵ جزئیات طرح اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. حرف S نشان دهنده میکروسیلیس است. همچنین CP نشان دهنده پودر سرامیک و عدد پس از آن نشان دهنده درصد جایگزینی این ماده با سیمان است. حروف CG و CS نیز به ترتیب نشان دهنده ضایعات سرامیک ریزدانه و درشت دانه و عدد بعد از این حروف نیز به ترتیب نشان دهنده درصد جایگزینی با ماسه و شن در مخلوط بتن است.

² <https://www.Iran-ifc.ir>

جدول ۵: نسبت‌های اختلاط نمونه‌های آزمایشگاهی

شماره	نام طرح‌ها	سیمان Kg/m ³	میکروسیلیس %	پودر سرامیک %	آب Kg/m ³	شن Kg/m ³	ماسه رودخانه ای Kg/m ³	ماسه سرامیکی %	شن سرامیکی %
۱	Ctrl	۴۸۸/۳۲	۰	۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۷۲/۲	۰	۰
۲	S10	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۷۲/۲	۰	۰
۳	CP5	۴۱۵/۰۷	۱۰	۵	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۷۲/۲	۰	۰
۴	CP10	۳۹۰/۶۵	۱۰	۱۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۷۲/۲	۰	۰
۵	CP15	۳۶۶/۲۴	۱۰	۱۵	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۷۲/۲	۰	۰
۶	CS10	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۷۰۸/۶	۱۰	۰
۷	CS20	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۶۴۵/۰	۲۰	۰
۸	CS30	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۹۴۵	۵۸۱/۴	۳۰	۰
۹	CG10	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۸۶۲/۷	۷۷۲/۲	۰	۱۰
۱۰	CG20	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۷۸۰/۵	۷۷۲/۲	۰	۲۰
۱۱	CG30	۴۳۹/۴۸	۱۰	۰	۱۹۵/۳۳	۶۹۸/۲	۷۷۲/۲	۰	۳۰
۱۲	C-P5S10G10	۴۱۵/۰۷	۱۰	۵	۱۹۵/۳۳	۸۶۲/۷	۷۰۸/۶	۱۰	۱۰

۳- آزمایش‌های انجام شده

۳-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری براساس استاندارد BS³ EN⁴ 12390-3 [۲۴] انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر انجام شده که از هر طرح اختلاط سه نمونه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است. آزمایش مقاومت فشاری پس از عمل آوری نمونه‌ها به سه روش مختلف، روش‌های استاندارد (قرارگیری در حوضچه آب با دمای معمولی)، روش پوشش پلاستیکی و قرارگیری در هوای آزاد انجام شد. این آزمایش همچنین پس از قرارگیری نمونه‌ها در محیط کلریدی انجام شده است. در آزمایش مقاومت فشاری، مکعب‌ها به نحوی در دستگاه فشاری قرار داده شد که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه قرار گرفته شود. نیروی قائمی از سوی جک فشاری با سرعتی ثابت به نمونه‌های مکعبی شکل اعمال شده تا نمونه‌ها در اثر بار فشاری وارد شده گسیخته گردد. نیروی لازم برای گسیخته شدن نمونه توسط دستگاه، مقدار بار فشاری P است. تنش فشاری مکعبی حاصل f مطابق رابطه (۱) نیز با تقسیم این نیرو بر سطح مقطع نمونه A بدست می‌آید.

$$f = \frac{P}{A} \quad (1)$$

۳-۲ آزمایش مقاومت کششی (شکافت استوانه)

آزمایش کشش بتن به روش غیرمستقیم یا برزیلی مطابق با استاندارد ASTM C496-90 [۲۵] انجام شد. برای انجام این آزمایش از نمونه استوانه ای با ابعاد ارتفاع L=۲۰۰ و قطر D=۱۰۰ میلی‌متر استفاده شد. نحوه انجام این آزمایش به این صورت است که نمونه استوانه‌ای به طور افقی در امتداد محور خود در دستگاه آزمایش قرار گرفت و بار عمودی به صورت پیوسته و با سرعت ثابتی تا هنگام شکست شدن نمونه به آن اعمال شد. تنش فشاری سبب ایجاد کشش یکنواختی در راستای عمود بر امتداد قطر قائم شد. مقاومت کششی T از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

³British Standard⁴Euro Norm

$$T = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

۳-۳ آزمایش خمشی سه نقطه ای

آزمایش مقاومت خمشی بر روی نمونه‌های مکعب مستطیل با ابعاد $280 \times 70 \times 70$ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM C348 [۲۶] انجام شد. برای انجام این آزمایش نمونه‌ها تا سن ۲۸ روز به سه روش مختلف عمل‌آوری شدند. نحوه انجام آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه ای به این صورت است که نمونه بر روی تکیه‌گاه‌ها قرار گرفته و بارگذاری از طریق تیغه بارگذار که عمود بر طول نمونه است، در وسط دهانه وارد می‌شود. در پایان آزمایش، مقاومت خمشی نمونه با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آید که P نیروی اعمالی در وسط دهانه بر حسب نیوتن، b عرض مقطع بر حسب میلی‌متر، h ارتفاع مقطع بر حسب میلی‌متر و l فاصله بین دو تکیه‌گاه بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

$$S_f = \frac{3pl}{2bh^2} \quad (3)$$

۳-۴ جذب آب

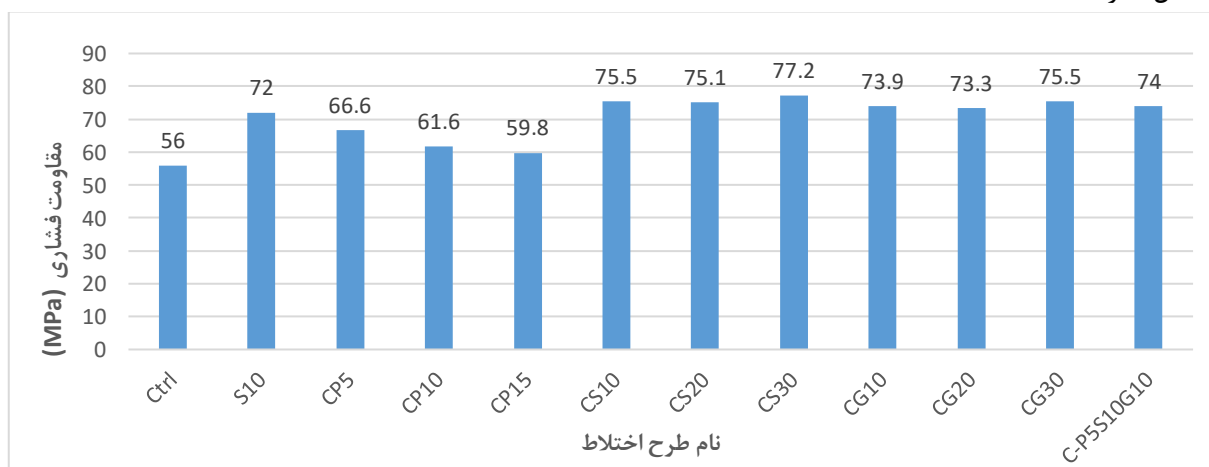
در این آزمایش از نمونه‌های مکعبی عمل‌آوری شده تا سن ۲۸ روز، استفاده شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌های آزمایشگاهی بر اساس ASTM C642 [۲۷] پس از عمل‌آوری در اون با دمای 110°C درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت، سپس وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که به عنوان وزن خشک اولیه W_d ثبت شد. با ثبت زمان به مدت تقریباً ۷۲ ساعت داخل آب غوطه‌ور شدند تا به یک وزن ثابت برسند. سپس نمونه‌ها از داخل آب خارج شدند، سطح آنها خشک و سپس وزن آن‌ها W_s ثبت گردید (وزن نمونه مرطوب). معمولاً پس از گذشت یک روز روند تغییرات وزن نمونه‌ها اندک است تا جایی که وزن نمونه‌ها نسبت به وزن قبلی آن تقریباً به کمتر از ۱٪ برسد ادامه می‌یابد. میزان درصد جذب آب نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$\left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100 = \text{جذب آب (\%)} \quad (4)$$

۴- نتایج و تحلیل‌ها

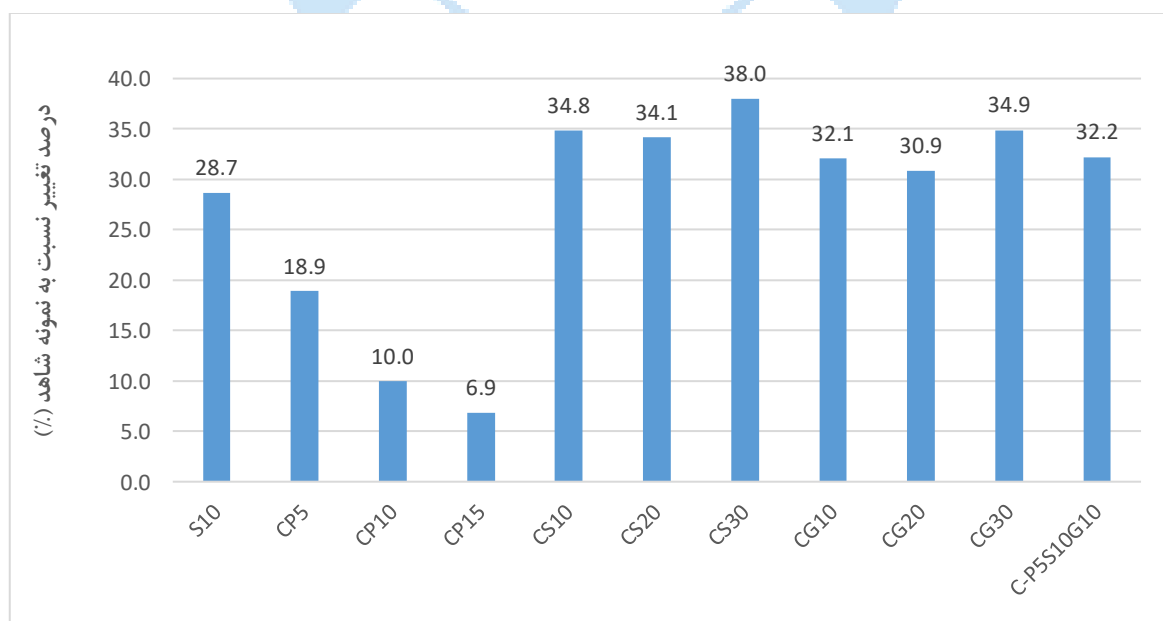
۴-۱ مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد 100 میلی‌متر پس از عمل‌آوری در سن ۲۸ روز انجام شد و نتایج بدست آمده در شکل ۴ ارائه شده است.



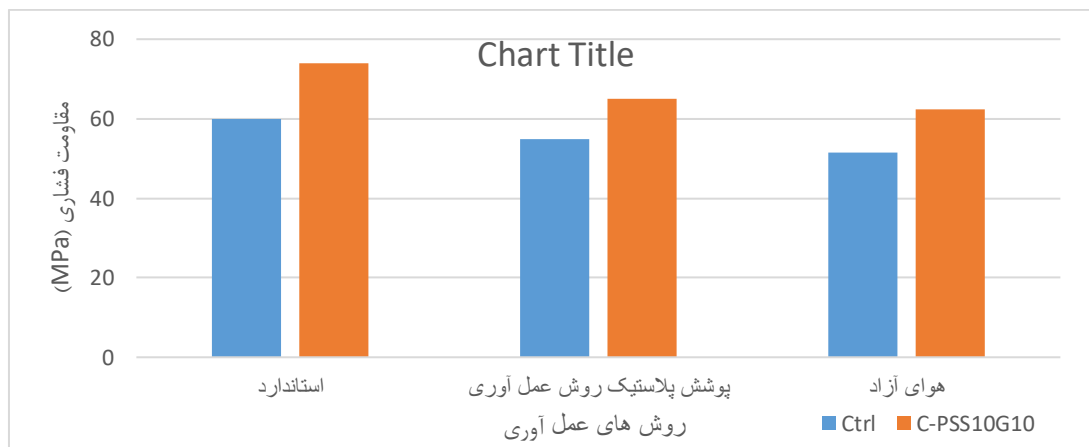
شکل ۴: مقاومت فشاری آزمونه‌های ساخته شده

در طرح سری S10 که فاقد ضایعات سرامیکی می‌باشد و در آن از ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان مصرف گردیده است منجر به افزایش ۲۸/۷٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه ی شاهد شده است. دلایل این اتفاق می‌تواند حاکی از قرارگیری میکروسیلیس در فضاهای خالی بین دانه‌های سیمان است و منجر به بالا رفتن مقاومت فشاری در این نمونه‌ها گردید. علاوه بر این موضوع، میکروسیلیس حاوی مقدار بسیار بالای دی اکسید سیلیسیم آمورف می‌باشد و این ماده بعد از واکنش سیمان در بتن از هیدروکسید کلسیم آزاد شده از سیمان، واکنش نشان داده و منجر به تولید نوعی چسب به نام هیدرات سیلیکات کلسیم می‌گردد که این می‌تواند خواص چسبندگی در بتن ایجاد کرده و باعث بالا رفتن مقاومت فشاری نسبت به نمونه ی فاقد میکروسیلیس شود و این روند در تحقیق هوکیو و همکاران [۲۸] نیز مشاهده گردید. جایگزینی ۵٪ از سیمان پرتلند با پودر سرامیک در مخلوط حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس سبب میشود مقاومت فشاری کاهش یابد اما همچنان نسبت به نمونه شاهد ۱۹٪ مقاومت فشاری بالاتری نتیجه داده است. افزایش درصد جایگزینی پودر سرامیک با سیمان باعث افت مقاومت فشاری شده است اما همچنان نتایج بدست آمده نسبت به نمونه شاهد بهتر است به طوری که در جایگزینی ۱۵٪ پودر سرامیک مقاومت فشاری ۷٪ نسبت به نمونه شاهد بیشتر است. خواص پوزولانی پودر سرامیک در حضور هیدروکسید کلسیم آزاد شده از سیمان به افزایش مقاومت منجر میشود و احتمالاً در جایگزینی پایین تر پودر سرامیک درصد افزایش مقاومت فشاری بیشتر خواهد شد. در نمونه‌های ساخته شده CS از ضایعات سرامیک در درصدهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ به عنوان جایگزین ماسه نتایج حاکی از آن است که با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه سرامیکی میزان مقاومت فشاری در نمونه‌ها نیز افزایش یافته است به نحوی که جایگزینی استفاده ۱۰٪ از سنگدانه سرامیکی با ۱۰٪ وزنی ماسه باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۳۴/۸٪ شده است. طبق شکل ۵ این روند با بالا رفتن درصد جایگزینی ۲۰٪ و ۳۰٪ نیز میزان مقاومت فشاری ثبت شده بهبود یافته است و منجر به افزایش ۳۴/۱ و ۳۸ درصدی در نمونه‌ها شده است که علت احتمالی آن را به گوشه دار بودن ذرات می‌توان نسبت داد. این نتایج هم راستا با پژوهش تورکیتیکول و چاینیچ [۲۹] است که در آن حداکثر مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی با استفاده از سنگدانه های ریز سرامیک تا ۵۰٪ جایگزینی گزارش کردند. در طرح‌های سری CG که اندازه ی ضایعات سرامیکی بزرگتر از ۴/۷۵ میلی متر می‌باشد و جایگزین بخشی از شن مصرفی برای ساخت نمونه‌ها گردید باعث بهبود عملکرد نمونه‌ها در مقاومت آزمایش فشاری نسبت به نمونه‌ی کنترل شده است به طوری که در جایگزینی ۳۰٪، مقاومت فشاری ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. طبق نتایج کلی آزمایش فشاری، تمامی نمونه‌های ساخته شده در شرایط عمل آوری استاندارد، مقاومت بالاتری نسبت به نمونه‌ی کنترل را نشان می‌دهد و بیانگر آن است که استفاده از سنگدانه‌های سرامیکی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، ماسه و شن می‌تواند باعث عملکرد بهتر شود.



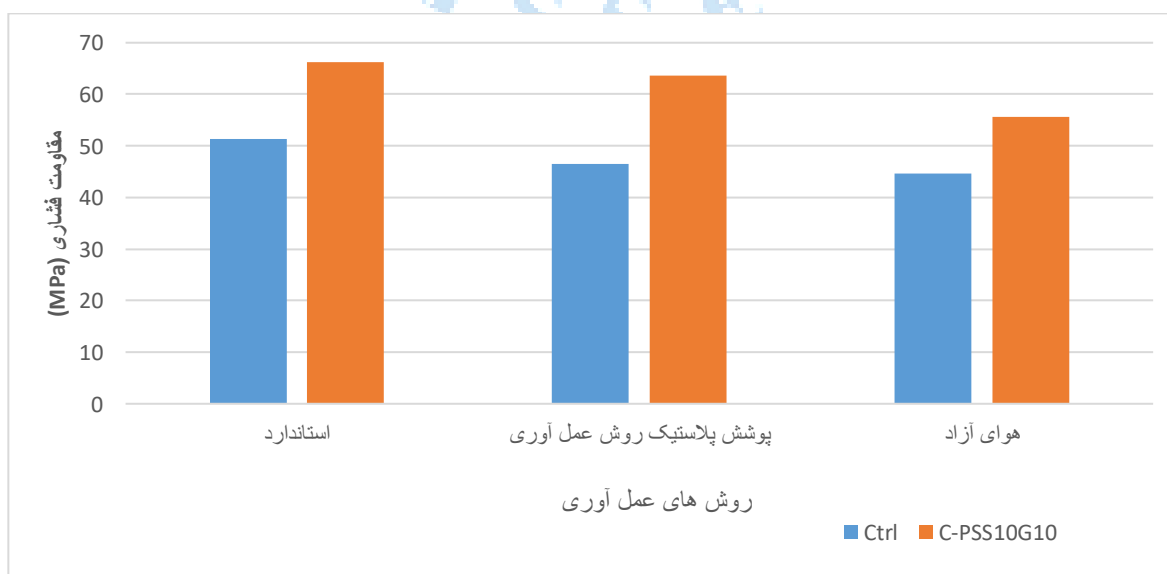
شکل ۵: درصد تغییر مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد در اثر حضور ضایعات سرامیک

همچنان برای طرح ۱۲ که حاوی ۵٪ پودر ضایعات سرامیک و ۱۰ درصد سنگدانه‌های سرامیکی را به همراه دارد، علاوه بر شرایط استاندارد، در پوشش پلاستیک و هوای آزاد عمل‌آوری نیز عمل‌آوری گردید و بعد از عمل‌آوری، آزمایش مقاومت فشاری برای نمونه‌های ساخته شده صورت گرفت و نتایج در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶: نتایج آزمایش مقاومت فشاری روش‌های مختلف عمل آوری

نتایج حاکی از آن است که استفاده از دو روش عمل‌آوری پوشش پلاستیک و هوای آزاد باعث افت مقاومت فشاری نسبت به روش عمل‌آوری استاندارد برای هر دو طرح شاهد و طرح حاوی ضایعات سرامیکی می‌شود. افت مقاومت فشاری نسبت به روش عمل‌آوری استاندارد برای هر دو طرح شاهد و طرح حاوی ضایعات سرامیکی در روش عمل‌آوری پوشش پلاستیک نسبت به روش هوای آزاد کمتر است، از اینرو می‌توان گفت روش عمل‌آوری پوشش پلاستیکی در مقایسه با روش عمل‌آوری در هوای آزاد تاثیر منفی کمتری بر نتایج آزمایش مقاومت فشاری دارد. علت این عملکرد بهتر را می‌توان در کامل شدن فرایند هیدراتاسیون در شرایط عمل‌آوری استاندارد دانست و مطالعات دیگر روی بتن معمولی [۳۰] و بتن فرا توانمند [۳۱] با اختلاف جزئی موید عملکرد بهتر این نوع عمل‌آوری است. در این مطالعه با هدف بررسی اثر محیط کلریدی بر مشخصات مکانیکی بتن حاوی ضایعات سرامیکی بعد از عمل‌آوری به سه روش مختلف استاندارد، پوشش پلاستیک و هوای آزاد، پس از قرارگیری نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز در محیط کلریدی آزمایش مقاومت فشاری نیز صورت گرفت و نتایج در شکل ۷ ارائه گردیده است.

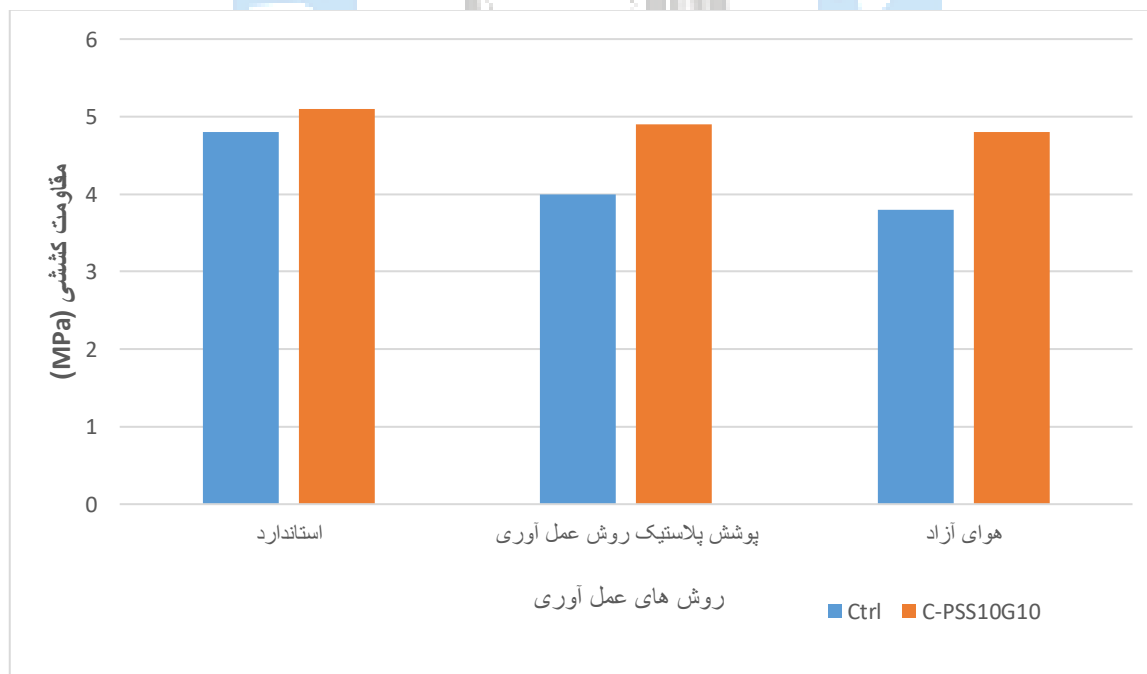


شکل ۷: نتایج آزمایش مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محیط کلریدی

بررسی نتایج حاکی از آن است طرح حاوی ضایعات سرامیکی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به طرح شاهد پس از قرارگیری در محیط کلریدی در هر سه روش عمل آوری نتیجه داد. نتایج پژوهش هیگاشیاما و همکاران [۱۲] و ژانگ و همکاران [۳۲] در محیط کلریدی مطابقت دارد ولی در در تحقیق دوم [۳۲] کاهش جزئی مقاومت با درشت دانه سرامیک در مقاومت فشاری گزارش گردید. بهترین عملکرد در آزمون مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در محیط کلریدی در روش عمل آوری استاندارد و کمترین مقدار در روش عمل آوری هوای آزاد بدست آمده است. بررسی نتایج بیانگر آن است که مقدار افزایش مقاومت فشاری طرح حاوی ضایعات سرامیکی پس از قرارگیری در محیط کلریدی نسبت به طرح شاهد برای روش‌های مختلف عمل آوری متفاوت است به طوری که بیشترین اختلاف در روش عمل آوری پوشش پلاستیک مشاهده می‌شود. استفاده از میکروسیلیس تاثیر بالایی بر بهبود ریزساختار و در نتیجه افزایش دوام در برابر محیط کلریدی دارد. مخلوط‌های حاوی ضایعات سرامیکی و میکروسیلیس میزان افت مقاومت فشاری کمتری پس از قرارگیری در محیط کلریدی نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده‌اند به طوری که در هر سه روش عمل آوری طرح شاهد افت مقاومت فشاری بیشتری نسبت به طرح حاوی ضایعات سرامیکی پس از قرارگیری در محیط کلریدی نتیجه داده است. اختلاف میان افت مقاومت فشاری طرح شاهد و طرح حاوی ضایعات سرامیکی پس از قرارگیری در محیط کلریدی در روش عمل آوری پوشش پلاستیکی نسبت به دو روش عمل آوری دیگر با شدت بیشتری همراه است.

۲-۴ مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت استوانه فقط بر روی طرح ۱۲، با قطر ۱۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۲۰۰ میلیمتر و پس از عمل آوری به سه روش مختلف و در سن ۲۸ روز انجام شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت کششی

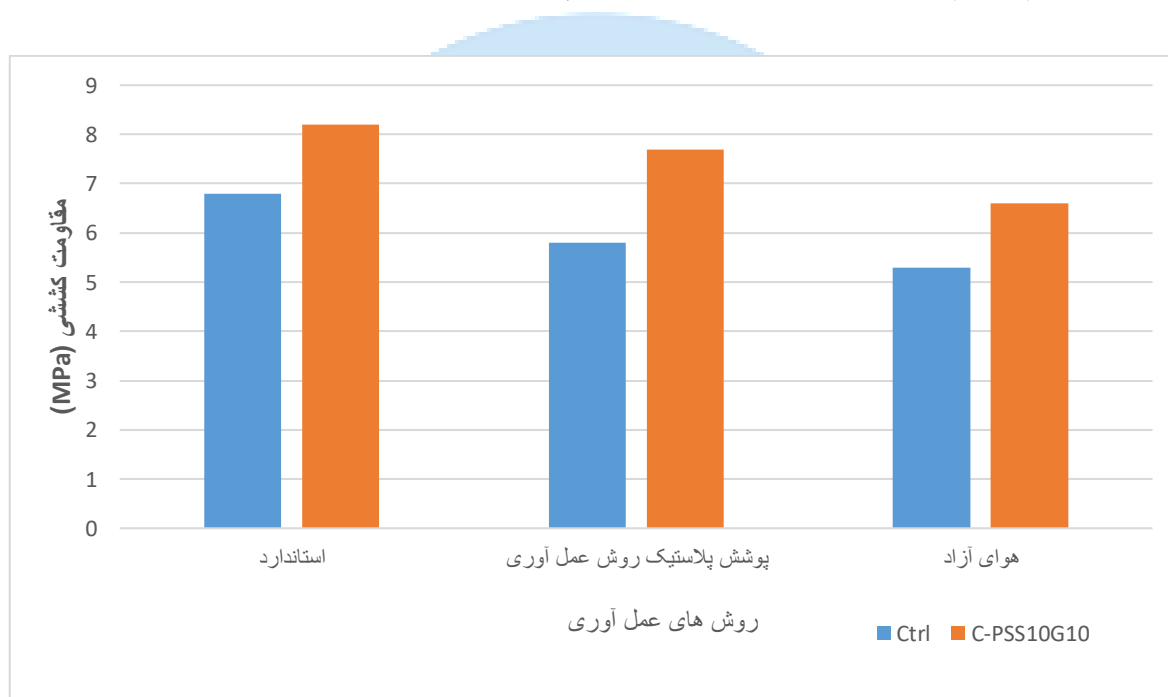
نتایج بدست آمده از مقاومت کششی به روش شکافت استوانه نشان میدهد بهترین عملکرد در آزمایش مقاومت کششی برای هر دو طرح شاهد و طرح حاوی ضایعات سرامیکی، در روش عمل آوری استاندارد بدست آمده است و پس از آن به ترتیب روش‌های عمل آوری

پوشش پلاستیک و هوای آزاد بیشترین مقاومت کششی را نتیجه داده‌اند. دلیل آن را می‌توان در تکمیل شدن فرایند هیدراتاسیون در رشد عمل آوری در شرایط استاندارد دانست. در این روش بتن با وجود آب شرایط بهتری نسبت به سایر روش‌های عمل‌آوری دارد لذا عملکرد بهتری نیز میتواند داشته باشد.

مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از طرح حاوی ضایعات سرامیک در هر سه شرایط عمل‌آوری نسبت به طرح کنترل همانند مقاومت فشاری، مقاومت کششی بالاتری را نشان میدهد به طوری که این اختلاف در روش عمل‌آوری هوای آزاد به بیشترین مقدار، ۲۶٪ رسیده است که بیانگر عملکرد بهتر طرح‌های حاوی ضایعات سرامیک می‌باشد. علت این پدیده را میتوان در پر شدن فضاهای خالی و تخلخل‌های موجود در نمونه‌های ساخته شده‌ی حاوی ضایعات سرامیکی دانست.

۲-۴ مقاومت خمشی سه نقطه ای

آزمایش مقاومت خمشی استوانه فقط بر روی طرح ۱۲، پس از عمل‌آوری نمونه‌های آزمایشگاهی تا سن ۲۸ روز به سه روش استاندارد، عمل‌آوری در پوشش پلاستیک و عمل‌آوری در هوای آزاد انجام شده و در شکل ۹ ارائه شده است.



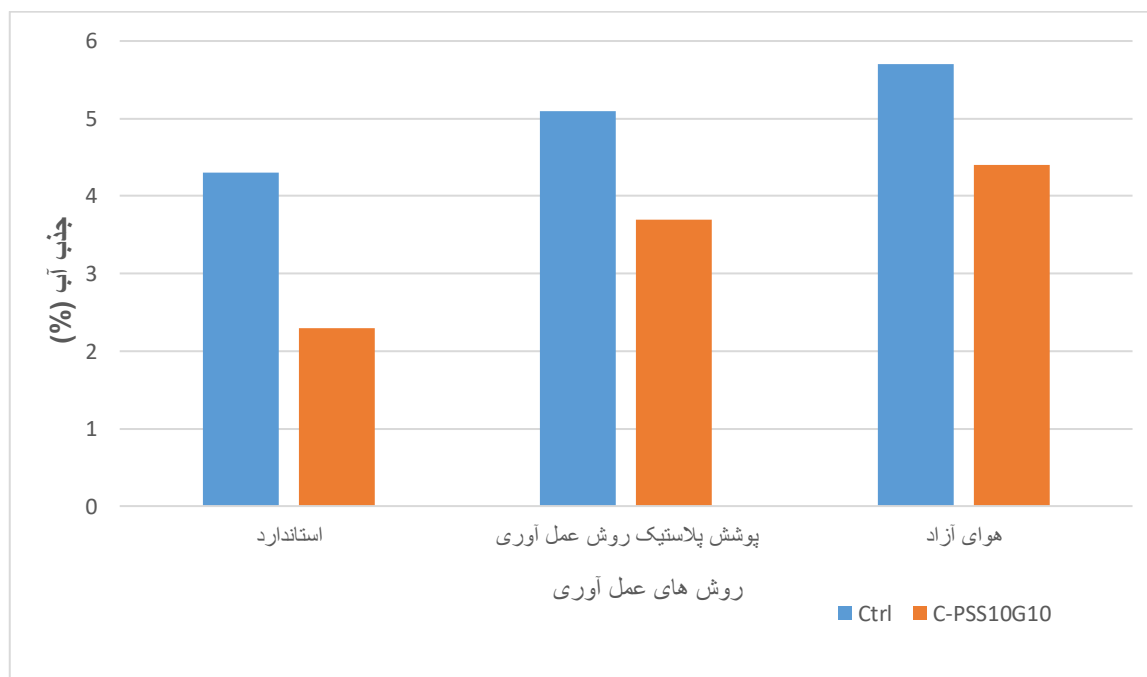
شکل ۹: نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی

نتایج حاکی از آن است که در هر سه روش عمل‌آوری نمونه حاوی ضایعات سرامیکی نسبت به نمونه شاهد مقاومت خمشی بالاتری نتیجه داده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد بهترین عملکرد مقاومت خمشی در روش عمل‌آوری استاندارد رخ داده و پس از آن نمونه‌ها در روش‌های عمل‌آوری پوشش پلاستیک و هوای آزاد عملکردهای بهتری نسبت به نمونه‌های کنترل نشان داده است. نتایج ارائه شده در شکل ۸ نشان می‌دهد استفاده از دو روش عمل‌آوری هوای آزاد و پوشش پلاستیک باعث افت مقاومت خمشی نسبت به روش عمل‌آوری استاندارد برای هر دو طرح شاهد و حاوی ضایعات سرامیکی می‌شود به طوری که این تاثیر بر طرح شاهد در مقایسه با طرح حاوی ضایعات سرامیکی بیشتر است و طرح شاهد افت مقاومت خمشی بیشتری در هر دو روش عمل‌آوری را نتیجه داده است و طبیعتاً این نتیجه همگام با مقاومت فشاری بتن تغییر میکند. استفاده از روش پوشش پلاستیکی برای عمل‌آوری نمونه حاوی ضایعات سرامیکی باعث شده تا مقاومت خمشی ۵/۶٪ نسبت به روش عمل‌آوری استاندارد کاهش یابد در حالی که این مقدار برای طرح شاهد ۱۵/۶٪ است. این نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های سرامیکی در هر سه شرایط عمل‌آوری مختلف مقاومت خمشی بالاتری را نسبت به نمونه‌ی شاهد

فاقد سنگدانه‌های سرامیکی نشان داده است. علت احتمالی عملکرد مطلوب نمونه‌ها در آزمایش مقاومت خمشی را می‌توان در چسبندگی عالی و شکل ذرات سنگدانه‌های سرامیکی دانست که منجر به بهبود عملکرد نمونه‌ها گردیده است.

۴-۴ جذب آب

آزمایش جذب آب برای هر دو طرح شاهد و نمونه ی ۱۲، پس از عمل آوری به سه روش مختلف انجام شده است. نتایج بدست آمده از این آزمایش در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰: نتایج آزمایش جذب آب

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد کمترین مقدار جذب آب در روش عمل آوری استاندارد برای هر دو طرح بدست آمده است و استفاده از روش‌های عمل آوری پوشش پلاستیکی و هوای آزاد باعث افزایش جذب آب شده است. در روش استاندارد بتن کاملاً در محیطی مرطوب عمل آوری شده است و از آب اشباع می‌باشد، در حالیکه در سایر نمونه‌ها بدین شکل نمی‌باشد و عمل آوری با کمبود رطوبت همراه بوده و بعد از قرارگیری در آب می‌توانند آب را به خود جذب کنند و این باعث روند افزایشی میزان جذب آب نسبت به سایر روش‌های عمل آوری می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد در هر سه روش عمل آوری طرح حاوی ضایعات سرامیکی جذب آب کمتری نسبت به طرح شاهد نتیجه داده است، این موضوع در روش عمل آوری استاندارد با شدت بیشتری مشاهده می‌شود و می‌تواند ناشی از تاثیر بیشتر روش عمل آوری استاندارد در تشکیل بلورهای C-S-H نسبت به دو روش دیگر، بر بهبود ریزساختار در طرح اختلاط حاوی مواد پوزولانی باشد.

۵- نتیجه گیری

در پژوهش انجام شده که به بررسی خواص بتن حاوی پوزولان و ضایعات سرامیک پرسلان پرداخته شد، نتایج زیر حاصل گردید:

- ۱- افزایش درصدهای جایگزینی پودر سرامیک با سیمان باعث افت مقاومت فشاری شده است اما همچنان نتایج بدست آمده نسبت به نمونه شاهد بهتر است، به طوری که جایگزینی ۱۵٪ پودر سرامیک باعث بهبود ۷ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است که به دلیل واکنش‌های شیمیایی میکروسیلیس استفاده شده می‌باشد.
- ۲- در طرح‌های ساخته شده از ضایعات سرامیک به عنوان جایگزین ماسه با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های سرامیکی به ۳۰٪ وزنی ماسه منجر به افزایش مقاومت فشاری و بهبود عملکرد گردید و منجر به افزایش ۳۸٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شد که حاکی از عدم رابطه مستقیم بین افزایش درصد ضایعات سرامیک با مقاومت فشاری است.
- ۳- اثر مثبت ضایعات سرامیک به عنوان جایگزین بخشی از شن بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های ساخته شده افزوده و در میزان جایگزینی ۳۰٪ بهترین عملکرد را داشته و باعث افزایش ۳۵٪ نسبت به نمونه کنترل شده است که دلیل آن را میتوان به نوع شکل و گوشه دار بودن ضایعات سرامیکی جایگزین با شن نسبت داد.
- ۴- مخلوط‌های حاوی ضایعات سرامیکی نسبت به طرح شاهد مقاومت فشاری بالاتری نتیجه دادند و بیشترین اختلاف با میزان ۲۳/۷٪ مربوط به روش عملآوری استاندارد است و علت این افزایش را میتوان به تکمیل شدن هیدراتاسیون نمونه‌های ساخته شده در شرایط استاندارد دانست.
- ۵- در روش عملآوری استاندارد بهترین عملکرد در آزمون مقاومت خمشی و کششی بدست آمده است و پس از آن به ترتیب روش عملآوری پوشش پلاستیک و هوای آزاد است.
- ۶- در طرح‌های حاوی ضایعات سرامیکی و میکروسیلیس میزان افت مقاومت فشاری کمتری پس از قرارگیری در محیط کلریدی نسبت به نمونه شاهد نتیجه داده است، به طوری که در هر سه روش عملآوری طرح شاهد افت مقاومت بیشتری نسبت به طرح حاوی ضایعات سرامیکی پس از قرارگیری در محیط کلریدی نتیجه داده است.
- ۷- درصد میزان جذب آب طرح ۱۲ بعد از عملآوری در شرایط استاندارد نسبت به نمونه شاهد و نمونه‌های عملآوری شده در شرایط مختلف عملکرد بهتری را داشت. علت آن میتواند ناشی از پر شدن تخلخل‌های موجود در نمونه‌های ساخته شده و جذب آب کافی در روش استاندارد باشد.

مراجع

- [۱] Davidovits, J. (1994), "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries", World Resource Review, Vol.6, No.2, PP.263-278.
- [۲] Davidovits, J. 4th edition, (2015), Geopolymer Chemistry and Applications, Institute Geopolymer, pp. 3-5.
- [۳] Yun-Chao Tang, Li-Juan Li, Wen-Xian Feng, Feng Liu, Ming Zhu, (2018), Study of seismic behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns, Journal of Constructional Steel Research, Volume 148, Pages 1-15, ISSN 0143-974X.
- [۴] Medina C. and Sánchez de Rojas, M.I. and Thomas, C. and Polanco, J.A. and Frías, M. (2016) Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships, Construction and Building Materials, Volume 105, 2016, Pages 480-486, ISSN 0950-0618.
- [۵] López-Gayarre, F. and Blanco Viñuela, R. and Serrano-López, M.A. and López-Colina, C. (2015) Influence of the water variation on the mechanical properties of concrete manufactured with recycled mixed aggregates for pre-stressed components, Construction and Building Materials, Volume 94, 2015, Pages 844-85.
- [۶] Senthamarai, R. and Manoharan, P. D. (2005) "Concrete with ceramic waste aggregate," Cement and concrete composites, vol. 27, pp. 910-913.

- [۷] Lopez, V. and Llamas, B. and Juan, A. and Moran, J. and Guerra, I. (2007) "Eco-efficient concretes: impact of the use of white ceramic powder on the mechanical properties of concrete," *Biosystems engineering*, vol. 96, pp. 559-564.
- [۸] Guerra, I. and Vivar, I. Llamas, B. and Juan, A. and Moran, J. (2009) "Eco-efficient concretes: The effects of using recycled ceramic material from sanitary installations on the mechanical properties of concrete," *Waste management*, vol. 29, pp. 643-646.
- [۹] Anderson, D. J. and Smith S. T. and Au, F. T. (2016) "Mechanical properties of concrete utilizing waste ceramic as coarse aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 20-28.
- [۱۰] Dhanasekar, S., Vinothraj, S., Ravichandran, P. T., Arvindan, A., (2018) " Experimental study on high strength concrete by partial replacement of fine aggregate by ceramic tile waste", *International Journal of engineering and technology*, 7(2.12), PP. 443-445.
- [۱۱] Chandra paul, S., Faruk, S. A. U., Babafemi, A. J., Miah, M. J., (2023) " Eco- friendly concrete with waste ceramic tile as coarse aggregate: mechanical strength, durability, and microstructural properties, *Asian journal of civil engineering*, vol. 24, pp. 3363-3373.
- [۱۲] Higashiyama, H., Yagishita, F., Sano, M. and Takahashi, o. (2012) "Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate", *construction and building materials*, Volume 26, Issue 1, , pp. 96-101.
- [۱۳] Raval, A. D. and Patel, D. I. N. and Pitroda, P. (2013) "Ceramic waste: Effective replacement of cement for establishing sustainable concrete", *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, vol. 4, pp. 2324-2329.
- [۱۴] Vaghelal, K. B., Pitroda, J. R., (2021), " To investigate the impact of ceramic tile powder on concrete properties", *International journal of engineering trends and technology*, vol. 69, Issue 8, pp. 11-16.
- [۱۵] Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2011) "Compressive strength and durability properties of ceramic wastes based concrete," *Materials and structures*, vol. 44, pp. 155-167.
- [۱۶] Pachideh, Ghasem and Gholhaki, Majid, (2020) "Assesment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag" *journal of fire engineering*, 11(2), pp. 221-246.
- [۱۷] Pachideh, Ghasem, Gholhaki, Majid, (2019) "Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete", *Journal of Building Engineering*, July, 26:100856.
- [۱۸] Toufigh, Vahab | Pachideh, Ghasem, (2022), "Cementitious mortars containing pozzolana under elevated temperatures", *structural concrete*, 23(5), pp. 3294-3312.
- [۱۹] Pachideha, G., Gholhaki, M., Moshatgh, A., (2019) "performance of porous pavement containing different types of pozzolans", *International journal of engineering*, 32 (9), pp. 1277-1283.
- [۲۰] ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregate, *West Conshohocken, PA* (2023).
- [۲۱] Rajenderan, S., (2019) "Silica fume as a partial replacement of cement in concrete", *International research journal of multidisciplinary technovation*, Nov., 1(6), PP. 325-333.

- [۲۲] Tayeh, B. A., Akeed, M. H., Qaidi, S., Abu Bakar, B. H., (2022) "Influence of microsilica and polypropylene fibers on the fresh and mechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHP-GPC) Case Studies in Construction Materials, vol. 17, Dec., 12 P.
- [۲۳] ASTM C1602, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete , West Conshohocken, PA (2022)
- [۲۴] BS EN 12390-3, Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, London, UK (2002)
- [۲۵] ASTM C496-96, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens (1996).
- [۲۶] ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars (2021)
- [۲۷] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2021).
- [۲۸] Hoque, M. M., Rahman, M. M., Islam, M. N., (2014) "Study on the Effect of Silica Fume on the Properties of Brick Aggregate Concrete, and Voids in Hardened Concrete", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 3 Issue 5, PP. 2436-2442.
- [۲۹] Torkittikul, P., Chaipanich, A., (2010) "Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes", Cement and Concrete Composites 32(6), PP.440-449.
- [۳۰] Rahimi, M. Z., Zhao, R., Sadozai, S., Zhu, F., Ji, N. and Xu, L., (2023) "Research on the influence of curing strategies on the compressive strength and hardening behaviour of concrete prepared with Ordinary Portland Cement", Case Studies in Construction Materials, vol., 18,
- [۳۱] Lu, D., Zhong, J., Yan, B., Gong, J., He, Z., Zhang, G. and Song, C., (2021) "Effects of Curing Conditions on the mechanical and Microstructural Properties of Ultra-High-Performance Concrete (UHPC) Incorporating Iron Tailing Powder", Materials (Basel). Jan; 14(1): 215.
- [۳۲] Zhang, Pen., Zhang, Pei., Wu, J., Guo, Z., Zhang, Y. and Zheng, Y., (2023) "Mechanical Properties and Durability of Sustainable Concrete Manufactured", Journal of renewable materials, vol.11, no.2, PP. 937-974.