

Investigating the Composition of Zeolite and Ceramic Waste on the Resistance and Durability of SCC Concrete

Mahmoudreza golshan^{1*}, Farhad avaznezhad², Amirhossein bazae³

1- Instructor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Instructor, Department of Architecture and Urban Planning, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

3- Instructor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

In Iran, the increase in migration in the cities and the increase in the construction of buildings has caused a lot of extraction of natural stone mines for the production of concrete. Also, repairing or demolishing dilapidated buildings increases the production of waste and construction waste, especially in big cities. Unfortunately, a large amount of these construction wastes are transferred to the surroundings of the cities as waste and buried. These two causes cause the sustainability of the environment to face a serious risk. The use of recyclable materials and their reuse in the construction of new materials has many advantages, which include economic savings, reducing the amount of waste and preserving natural resources such as stone mines. In this research, with the aim of recycling and reusing construction waste, ceramic waste in different volume ratios of 25%, 50%, 75% and 100% was used instead of natural sand in self-compacting concrete. Also, in order to increase the quality of rheology and consistency of SCC concrete, zeolite powder was used instead of stone powder. The tests performed include slump flow, V funnel, L box, compressive strength at different ages, concrete durability check against freezing, and concrete failure SEM check. The results of this research showed that adding up to 25% of ceramic waste in concrete reduces the 28-day compressive strength by less than 10%. Also, the amount of weight loss and resistance of this design after exposure to 300 cycles of melting and freezing were measured as 3.2% and 5.9%, respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 10 May 2023

Revise Date: 22 July 2023

Accept Date: 31 August 2023

Keywords:

Ceramic Waste

Zeolite

Green Concrete

Recycled Concrete

SCC Concrete

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.396699.3112>

*Corresponding author: Mahmoudreza Golshan

Email address: Mgolshan@tvu.ac.ir

بررسی ترکیب ژئولیت و ضایعات سرامیک بر مقاومت و دوام یخزدگی بتن خودتراکم

محمودرضا گلشن^{۱*}، فرهاد عوض نژاد^۲، امیرحسین بازایی^۳

۱- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- مربی، گروه مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۳- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

در ایران گسترش شهرنشینی و رشد روز افزون ساخت و ساز ساختمان باعث استخراج بی‌رویه از معادن سنگ طبیعی برای تولید بتن شده است. از سوی دیگر بازسازی یا تخریب بناهای فرسوده منجر به تولید انبوه ضایعات و پسماندهای ساختمانی بخصوص در کلانشهرها می‌شود. متأسفانه حجم عمده‌ای از این ضایعات ساختمانی بعنوان زباله به محیط اطراف شهرها منتقل شده و دیو یا دفن می‌گردند. این دو عامل سبب گردیده تا پایداری محیط زیست با خطری جدی مواجه شود. استفاده از مصالح قابل بازیافت و استفاده مجدد آن‌ها در ساخت مصالح جدید منافع بسیاری به دنبال دارد که صرفه‌جویی اقتصادی، کاهش حجم پسماند و حفظ منابع طبیعی مانند معادن سنگ بخشی از آن است. در این تحقیق با هدف بازیافت و استفاده مجدد از پسماند ساختمانی، از ضایعات سرامیکی در نسبت‌های مختلف حجمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ به جای شن طبیعی در بتن خودتراکم استفاده شد. همچنین جهت افزایش کیفیت رئولوژی و قوام بتن خودتراکم از پودر ژئولیت به جای پودر سنگ استفاده گردیده. آزمایش‌ها انجام شده شامل جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی، جذب آب بتن سخت شده، دوام بتن در برابر چرخه یخبندان و بررسی ریزساختار شکست بتن می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن حداکثر ۲۵٪ ضایعات سرامیک در بتن، کمتر از ۱۰٪ مقاومت فشاری ۲۸ روزه را کاهش می‌دهد. همچنین میزان کاهش وزن و مقاومت این طرح پس از قرارگیری در معرض ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۳/۲٪ و ۵/۹٪ اندازه‌گیری شد.

کلمات کلیدی: ضایعات سرامیک، ژئولیت، بتن سبز، بتن بازیافتی، بتن خودتراکم.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ
doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2023.396699.3112	۱۴۰۲/۰۲/۲۰	۱۴۰۲/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۶/۰۹	۱۴۰۲/۰۶/۰۹	۱۴۰۲/۰۲/۳۱
	محمودرضا گلشن mgolshan@tvu.ac.ir				
	*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:				

۱- مقدمه

امروزه استفاده از بتن‌های بازیافتی به یکی از مهم‌ترین مسائل توسعه پایدار تبدیل شده است. اصطلاح بتن سبز^۱ بدین معنا است که این بتن دوستدار محیط زیست می‌باشد. ساخت بتن سبز به حداقل میزان انرژی نیاز دارد و کمترین آسیب را به محیط می‌رساند [۱]. پسماندهای ساختمانی شامل تمامی مصالحی است که در حین تخریب و نوسازی تولید می‌شوند. اگر چه از این مواد اغلب به عنوان یک آلاینده زیست محیطی یاد می‌شود اما سال‌هاست که تولید ثروت از طریق مدیریت بازیافت پسماندهای ساختمانی، مورد توجه کارشناسان صنعت ساختمان و فعالان این حوزه می‌باشد. صنعت ساختمان حدود ۴۰٪ از کل مواد خام کره زمین و ۱۲٪ آب جهان را مصرف می‌کند. همچنین حدود ۴۰٪ از کل منابع انرژی جهان برای فعالیت‌های ساختمانی استفاده می‌شود [۲]. تحقیقات نشان می‌دهد حجم پسماندهای ساختمانی در بین سایر زباله‌های دنیا، حدود ۱۳٪ تا ۲۹٪ است که آمار بالایی محسوب می‌شود. پسماندهای ساختمانی از لحاظ وزنی، حدود ۱۵٪ تا ۳۰٪ از کل ضایعات جامد را تشکیل می‌دهند. براساس تحقیقات منتشر شده، حدود ۴۰٪ تا ۵۰٪ پسماندهای ساختمانی را بتن، آجر، بلوک، سنگ، کاشی و سرامیک، ۲۰٪ تا ۳۰٪ آن را چوب و محصولات مرتبط با آن و ۲۰٪ تا ۳۰٪ را پسماندهای متفرقه مانند فلزات، گچ، شیشه، آزبست، سایر مواد عایق و پلیمری، تاسیسات آب و فاضلاب و برق تشکیل می‌دهند. بطور تقریبی به ازای تخریب هر متر مربع زیربنای ساختمان، حدود ۱/۷۵ متر مکعب پسماند و ضایعات ساختمانی تولید می‌شود. گفته می‌شود که حدود ۵۰٪ تا ۸۰٪ پسماندهای ساختمانی را می‌توان دوباره بازیافت و استفاده مجدد کرد. در این میان، بعضی از انواع مصالح ساختمانی مانند بتن، آجر، کاشی و سرامیک نسبت به سایر مصالح ساختمانی از نظر وزن و حجم درصد بیشتری از ضایعات را شامل می‌شوند [۳، ۴، ۵، ۶].

در بسیاری از کشورهای توسعه یافته قبل از استفاده از منابع اولیه، از منابع بازیافتی استفاده می‌شود. استراتژی کشورهای توسعه یافته، استفاده کمتر از منابع در برابر استفاده بیشتر از مصالح بازیافتی است. بدین معنا که قبل از ساخت و ساز با استفاده از روش‌های علمی و کنترل‌های موثر، میزان پسماند و ضایعات ساختمانی را کاهش می‌دهند [۷]. امروزه تحقیقات زیادی برای بازیافت پسماند ساختمان صورت می‌گیرد و تجهیزات، ابزار و ماشین‌آلات بسیاری هم در این راستا تولید و ساخته شده است. در آمریکا آژانس حفاظت از محیط زیست (EPA)^۲ نقش مهمی در بازیافت ضایعات ساختمانی دارد و به منزله حلقه اتصال نهادهای دست اندرکار در این زمینه است و برای سهولت دریافت نخاله‌ها و بازیافت حداکثری آن، بسترسازی می‌کند [۸]. در اروپا، انجمن تخریب اروپا (EDA)^۳ وظایف مشابهی دارد. اهمیت بازیافت نخاله‌های ساختمانی در کشورهای اروپایی به حدی است که طبق گزارش انجمن تخریب اروپا در سال ۱۹۹۲، در قسمت زیر سازی جاده‌های اروپایی، حدود ۹۰٪ از ضایعات بازیافت شده ساختمانی استفاده شده است [۹]. متأسفانه آمار دقیق و منظمی درباره بازیافت پسماندهای ساختمانی در کشور ما وجود ندارد. با این وجود، بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان بازیافت مصالح ناشی از تخریب در ایران، طی سال‌های گذشته، کمتر از ۱٪ است. طبق آمار منتشر شده در برخی از رسانه‌ها در اواسط دهه ۱۳۹۰، سالانه ۱۷ میلیون تن و روزانه ۴۶ هزار تن پسماند ساختمانی فقط در تهران تولید شده که این رقم در کشور به حدود ۶۰ میلیون تن نخاله ساختمانی در سال می‌رسد. به گفته این منبع، روزانه حدود ۴۰ تا ۵۰ هزار تن نخاله ساختمانی در تهران تولید می‌شود [۱۱]. آمار دیگری نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۵، برداشت حدود ۲۹۷ هزار تن مواد تجدید ناپذیر از منابع، موجب تولید ۵۰ میلیون تن نخاله در کشور شده است [۱۲]. بر اساس اظهارات اعضای شورای شهر تهران، در سال ۱۳۹۵، روزانه ۵۰ هزار تن نخاله و پسماند ساختمانی و عمرانی در زمان رکود تولید می‌شود که این رقم در زمان رونق ساخت و ساز به ۱۰۰ هزار تن در روز افزایش می‌یابد [۱۳]. اگر این آمار مبنا قرار گیرد، سالانه بین ۱۸ تا ۳۶ میلیون تن نخاله ساختمانی فقط در پایتخت تولید می‌شود. بدیهی است این ارقام در سال‌های اخیر دلیل گسترش شهرنشینی، افزایش یافته است. اما به دلیل عدم ارائه آمار رسمی، گمانه زنی‌های متفاوتی درباره میزان بازیافت پسماندهای ساختمانی منتشر می‌شود. بطوریکه پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۵، میزان جمع‌آوری ضایعات ساختمانی در تهران نسبت به میزان دیو ضایعات در سال ۱۳۹۵، دو برابر خواهد شد و به تعبیر دیگر بیش از ۱۰۰٪ افزایش خواهد یافت. هر چند نخستین کارخانه بازیافت و پردازش پسماندهای ساختمانی، سال ۱۳۹۷ در تهران افتتاح شد که به گفته کارشناسان، سالانه میلیاردها تومان سود نصیب شهرداری و سرمایه‌گذار می‌کند، اما با توجه به شرایط اقتصادی کشور، عدم

¹ Green Concrete

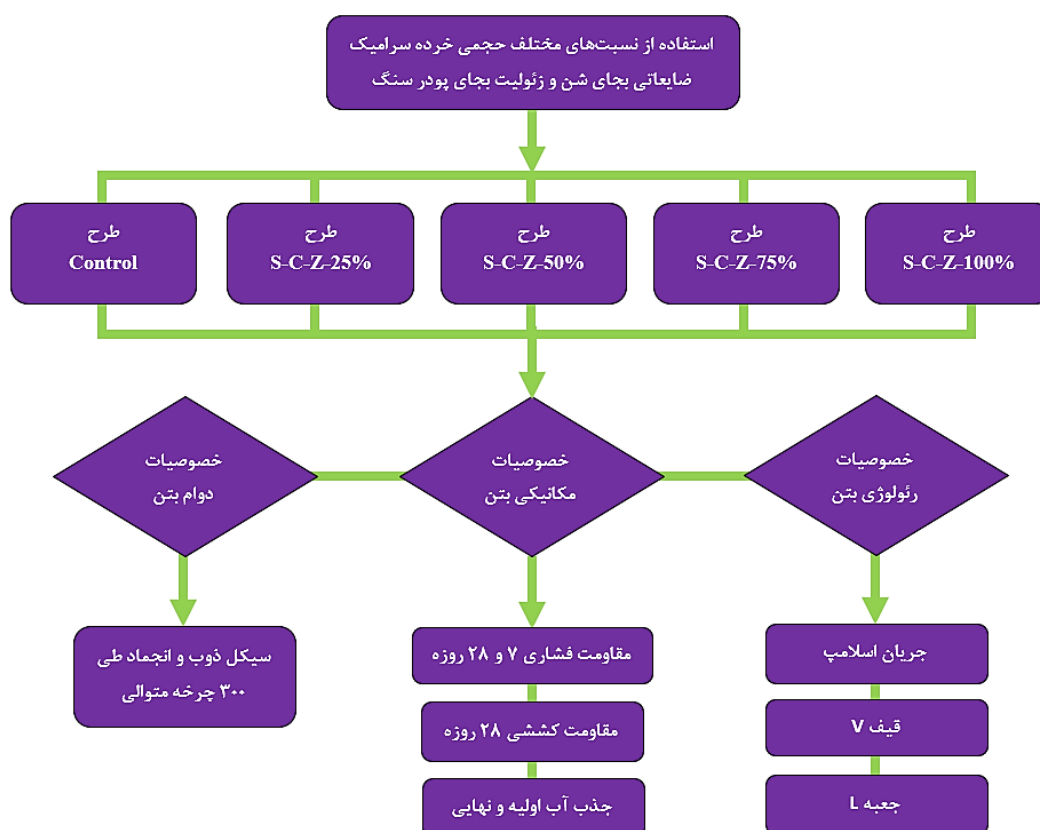
² United States Environmental Protection Agency

³ European Demolition Association

ارائه تسهیلات مناسب و عدم تضمین‌های لازم به سرمایه‌گذاران از سوی دولت و نهادهای فعال در این عرصه، وضعیت بازیافت نخاله‌های ساختمانی در ایران، چندان امید بخش به نظر نمی‌رسد [۱۴]. از جمله دلایل اتلاف مصالح و ضایعات ساختمانی در ایران می‌توان به عدم تطابق طراحی با ابعاد مصالح موجود در بازار، ضعف دانش مدیریت پروژه، عدم وجود قوانین حمایتی برای نهادها و شرکت‌های فعال در این زمینه، نبود زیرساخت‌ها و تجهیزات مناسب برای استفاده از روش‌های مدرن بازیافت، عدم نگهداری مناسب مصالح و بی‌توجهی سازندگان به اتلاف مصالح با توجه به سود سرشار صنعت ساختمان اشاره کرد. با توجه به نرخ رشد کنونی نگرانی‌هایی از بابت تخریب و فرسایش معادن سنگ که تجدیدناپذیرند بوجود آمده است. بنابراین استفاده از پسماندهای ساختمانی فرسوده جهت ساختن بتن بازیافتی برای کاربری‌های غیرسازه‌ای می‌تواند از اتلاف حجم بزرگی از معادن و منابع تجدیدناپذیر جلوگیری کند. با توجه به چالش‌ها و دلایل عدم بهره‌وری مناسب از بازیافت نخاله‌های ساختمانی در کشور، شیوه‌های نظیر الگوبرداری از تجربیات کشورهای موفق، استفاده از ماشین‌آلات و دستگاه‌های بازیافت خارجی، تولید داخلی آن‌ها، شناسایی فرصت‌های سرمایه‌گذاری، احداث مراکز بازیافت نخاله‌های ساختمانی با تجهیزات و امکانات مناسب و حمایت از آن، پذیرفتن مسئولیت بازیافت نخاله‌های تخریبی توسط پیمانکاران و ترغیب کارآفرینان و سرمایه‌گذاران برای ورود به صنعت بازیافت پسماندهای ساختمانی با توجه به سوددهی آن، از جمله راه‌کارهای جلوگیری از اتلاف ضایعات و بهبود مدیریت پسماندهای ساختمانی، حفظ محیط زیست و ایجاد بستر شغلی به شمار می‌رود.

در کشور ما ضایعات سرامیکی معمولاً به عنوان نخاله ساختمانی در حاشیه شهرها و روستاها انباشته می‌شوند و در هیچ فرآیند تولیدی و مصرفی استفاده نمی‌شود. انباشته شدن این ضایعات با حجم وسیع باعث آسیب به محیط زیست می‌شود [۲]. در این تحقیق با هدف توسعه پایدار و حفظ محیط زیست استفاده از سرامیک حاصل از تخریب ساختمان بصورت خرد شده در نسبت‌های حجمی مختلف جایگزین مقداری از شن موجود در بتن خودتراکم خواهد شد. این مهم برای کاهش حجم مصرف سنگدانه طبیعی در بتن و کمک به حفظ معادن سنگ طبیعی کشور می‌باشد. تاکنون در سراسر دنیا تلاش‌های زیادی برای تولید بتن‌های بازیافتی با عملکردی مشابه با بتن‌های معمولی شده است. سوچیتراس و همکاران در سال ۲۰۲۲ میلادی به مروری بر تاثیر ضایعات کاشی و سرامیک بر پارامترهای مقاومت بتن پرداختند. در این تحقیق گزارش شد که استفاده از کاشی و سرامیک خرد شده به جای درشت دانه در بتن می‌تواند هزینه خرید مصالح و ساخت و ساز را کاهش دهد [۱۵]. فینگمینگ، ز و همکاران در سال ۲۰۲۲ میلادی به بررسی اثرات سنگدانه‌های سرامیکی بازیافتی بر عمل‌آوری بتن توانمند پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص بتن تا حد زیادی تحت تأثیر تخلخل و نسبت جایگزینی سنگدانه‌های سرامیکی قرار می‌گیرد. در حالیکه مقاومت فشاری بالاتر زمانی به دست می‌آید که از سرامیک ضایعاتی کمتری استفاده شود. همچنین استفاده از ضایعات کاشی دیواری با نسبت جایگزینی ۲۰٪ به جای سنگدانه بهترین عملکرد را نشان داد [۱۶]. والدس. آ و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن‌های بازیافتی تهیه شده با سیمان، سرامیک و سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که بتن‌های بازیافتی که از ضایعات سرامیک به عنوان درشت‌دانه استفاده شده، دارای عملکردی مشابه با بتن معمولی ۲۸ روزه هستند [۱۷]. دریک، ج و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی خواص مکانیکی بتن با استفاده از ضایعات سرامیک به عنوان سنگدانه درشت پرداختند. در این تحقیق سه ماده مختلف کاشی و سرامیک ضایعاتی در نسبت‌های جایگزینی ۲۰٪، ۲۵٪، ۳۵٪، ۵۰٪، ۶۵٪، ۷۵٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ به جای سنگدانه درشت (شن) استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ضایعات سرامیک به عنوان یک ماده جایگزین طبیعی درشت دانه با حداقل تغییرات در خواص مکانیکی عملی ممکن است [۱۸]. موسوی، ا و همکاران در سال ۱۴۰۱ به بررسی تاثیر ضایعات خاک کاشی به عنوان جایگزین سیمان بر خصوصیات بتن سازه‌ای پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با نسبت آب به سیمان ۰/۵، کاهش در مقاومت فشاری و خمشی بتن تا ۴۰٪ جایگزینی سنگدانه با ضایعات کاشی مشاهده نمی‌شود. اما در تمام درصدهای جایگزینی، کاهش تخلخل، کاهش نفوذ یون کلراید، کاهش جمع‌شدگی و افزایش مقاومت الکتریکی نسبت به نمونه کنترل مشاهده شد [۱۹]. صفی‌خانی، ف و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی خواص مکانیکی بتن خودمترکم ساخته شده از ضایعات کاشی شکسته شده پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که به طور کلی با افزایش درصد جایگزینی کاشی شکسته شده با سنگدانه طبیعی، کارایی بتن تازه و مقاومت فشاری بتن سخت شده کاهش و دوام بتن سخت شده افزایش یافته است و به طور ویژه در ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه طبیعی با کاشی شکسته شده تغییرات به طور محسوس مشخص شد ولی تا ۷۵٪ جایگزینی تغییرات عمده‌ای مشاهده نشد [۲۰].

نتایج سایر تحقیقات گذشته نشان داده که میزان مقاومت فشاری بتن تا حد زیادی به اندازه، جنس و کیفیت درشت‌دانه بستگی دارد. بنابراین استفاده از سرامیک ضایعاتی بجای بخشی از شن در بتن، مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد [۱۵-۲۰]. در این تحقیق با هدف جلوگیری از افت شدید کیفیت و مقاومت فشاری بتن از ژئولیت بجای پودر سنگ بعنوان ماده قوام دهنده بتن خودتراکم استفاده گردید. ژئولیت یکی از انواع پوزولان‌های طبیعی است که به وفور در کشور یافت می‌شود. این ماده در ترکیب با سیمان میزان چسبندگی عناصر اختلاط بتن را افزایش می‌دهد و باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [۳۷]. در این تحقیق آزمایش‌های جریان اسلامپ، ویسکوزیته یا قوام بتن خودتراکم، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت کششی به روش دو نیم شدن (برزیلین)، میزان جذب آب در بتن سخت شده، دوام بتن در برابر چرخه یخبندان و ریزساختار بتن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. از جمله جنبه‌ی نوآوری تحقیق حاضر می‌توان به استفاده همزمان از خرده سرامیک ضایعاتی و پودر ژئولیت در بتن خودتراکم اشاره کرد. شکل ۱ ساختار این تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ فلوجارت ساختار تحقیق

۲- مواد و مصالح

۲-۱- سنگدانه

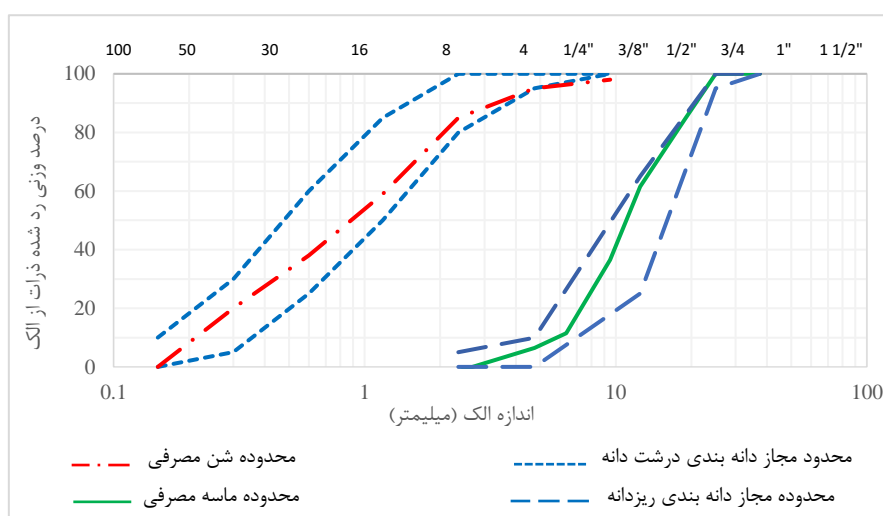
در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از ماسه شکسته و درشت‌دانه مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی سنگدانه مصرفی نمایش داده شده.

جدول ۱ مشخصات شن و ماسه مصرفی جهت ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه mm	مدول نرمی	چگالی SSD kg/m ³	جذب آب %
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۲۴۸۰	۲/۸
شن	۱۹	-	۲۱۳۰	۲/۳

۲-۱-۱- دانه بندی

دانه بندی سنگدانه و طبقه بندی الک های شماره بندی شده، مطابق با استاندارد ASTM-C136 انجام و در شکل ۲ نمایش داده شده است [۲۱]. همچنین میزان وزن و اندازه سنگدانه ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد [۲۵]. در شکل ۲ الگوی دانه بندی ماسه با خط نقطه قرمز رنگ، الگوی دانه بندی شن با خط ممتد سبز رنگ و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 به ترتیب با خطوط خط چین کوچک و بزرگ آبی رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۲ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

۲-۲- خرده سرامیک

سرامیک یک ماده معدنی جامد و غیرفلزی است که به عنوان کفپوش و یا جهت پوشش دیوارها در برخی فضاهای داخلی استفاده می شود. رنگ سرامیک نیز از جمله مواردی است که به شرایط پخت و ترکیبات اولیه آن بستگی دارد. این ماده به دلیل کاربردهای متنوع، مقاومت بالا، سهولت در اجرا، دسترسی فراوان و زیبایی یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی محسوب می شود [۲۹]. در این تحقیق از ضایعات سرامیک بدون مواد زائد (ملات سیمانی) که از تخریب بنای قدیمی بدست آمده، استفاده شد. برای خرد کردن سرامیک توسط دستگاه لس آنجلس با ۷ ساچمه فولادی که وزن هر کدام به ۵ کیلوگرم می رسد تحت ۵۰۰ دور دوران قرار گرفتند. سپس مطابق با استاندارد ASTM-C136 با اندازه بین ۴/۷۵ تا ۱۹ میلیمتر (به اندازه ذرات شن مصرفی) سرتند شدند. همچنین طبق استاندارد ASTM-C127 وزن مخصوص آن محاسبه گردید. جدول ۲ برخی از خصوصیات شیمیایی سرامیک خرده شده طبق سایر مستندات علمی و جدول ۳ برخی از خصوصیات فیزیکی را نمایش می دهند.

جدول ۲ خصوصیات شیمیایی خرده سرامیک ضایعاتی به استناد از سایر مستندات علمی و آزمایشگاهی

مرجع	اکسید سیلیسیم	اکسید آلومینیوم	اکسید آهن	اکسید کلسیم	اکسید منیزیم	اکسید سدیم	اکسید پتاسیم	اکسید تیتانیوم
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
[۲۶]	۵۱/۷	۱۸/۲	۶/۱	۶/۱	۲/۴	۰/۲	۴/۶	۰/۸
[۲۷]	۶۱/۲	۱۸/۶	۵	۵/۸	۱/۸	۰	۳/۳	۰
[۲۸]	۶۹/۹۳	۱۵/۸	۱/۹۸	۳/۳۵	۳/۳۵	۳/۴۴	۲/۶۸	۰/۰۳۹
[۲۹]	۶۸/۸۵	۱۸/۵۳	۴/۸۱	۱/۵۷	۰/۷۲	۲/۰۱	۱/۶۳	۰/۷۳۷
[۳۰]	۶۷/۶۳	۲۴/۰۵	۰/۵۵	۰	۰/۳۶	۱/۲۵	۳	۰
[۳۱]	۷۰/۹	۲۱/۱	۰/۸۱	۰/۷۶	۰/۲۴	۱/۴۷	۳/۵۷	۰/۳۳
[۳۲]	۶۸/۴۱	۲۴/۴۶	۰/۹۴	۰/۶۳	۰/۱۹	۱/۶۵	۲/۸	۰/۵۵

جدول ۳ خصوصیات فیزیکی خرده ضایعات سرامیک مصرفی

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD
	mm	%	kg/m ³
خرده سرامیک ضایعاتی	۱۹	۰/۳	۲۰۸۵

شکل ۳-الف، ب، ج به ترتیب خرد کردن سرامیک ضایعاتی را توسط دستگاه لس آنجلس، سرامیک سرنده شده با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و مقایسه حجمی سرامیک با شن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بدلیل یکسان نبودن چگالی شن و سرامیک ضایعاتی در طرح مخلوط بتن از روش جایگزینی حجمی استفاده شده است.



ج) جایگزینی خرده سرامیک بجای



ب) خرده سرامیک



الف) دستگاه لس آنجلس

۳-۲- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق، از نوع سیمان تیپ ۲ سپاهان می‌باشد. چگالی این سیمان $3/10 \text{ g/cm}^3$ است. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول ۴ که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد ضمیمه شده است [۱۶].

جدول ۴ ساختار شیمیایی سیمان تیپ ۲ سپاهان [۴۳]

SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	Cl %	SO ₃ %	L.O.I %	I.R %	C ₃ A %
۲۰/۸۰	۴/۷۰	۴/۱۰	۶۴/۲۰	۲/۲۵	۰/۰۲۵	۲/۳۵	۰/۸۰	۰/۳۰	۵/۷۰

۲-۴- زئولیت

لازمه ساخت بتن خودتراکم پودر سنگ می‌باشد. زیرا پودر سنگ به حفظ قوام و ویسکوزیته بتن خودتراکم کمک کرده و باعث جلوگیری از آب انداختگی بتن می‌شود [۲۱]. در این تحقیق با هدف کاهش استفاده از معادن سنگ در ساخت بتن، به جای استفاده از پودر سنگ از پودر زئولیت استفاده شد.

زئولیت یک پوزولان طبیعی است که به دو دسته معدنی و رسوبی تقسیم می‌شوند. نوع معدنی عموماً جزء سنگ‌های آذرین یا آتشفشانی می‌باشد و زئولیت رسوبی نوع صنعتی آن است که نسبت سیلیسیم به آلومینیوم آن بیشتر از نوع آتشفشانی می‌باشد. زئولیت منبع غنی از اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس است که با کلسیم هیدروکسید موجود در سیمان واکنش داده و منجر به تولید ژل آلومینات خواهد شد (خاصیت آمورف دارد). این پوزولان در ایران به وفور یافت می‌شود و به راحتی قابل استخراج و فرآوری است [۲۲]. زئولیت مصرفی در این تحقیق از نوع معدنی و در اندازه بین ۷/۵ تا ۱۵ میکرون می‌باشد. زئولیت مصرفی مستخرج از معادن زئولیت منطقه آفر استان سمنان می‌باشد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت مصرفی که توسط کارخانه اعلام شده به شرح جدول ۵ و ۶ می‌باشد.

جدول ۵ مشخصات فیزیکی زئولیت

رنگ ماده	مدول نرمی	سختی موهس	چگالی	اندازه	حالت فیزیکی
			gr/cm ³	میکرون	
سفید	۰/۹	۳	۲/۳	۱۵	پودر جامد
	۰/۶			۷/۵	

جدول ۶ ساختار شیمیایی پودر زئولیت مصرفی

نام عنصر	نماد شیمیایی	درصد
اکسید سیلیس	SiO ₂	٪ ۷۵/۳۳
اکسید آلومینیوم	Al ₂ O ₃	٪ ۱۰/۴۹
اکسید آهن	Fe ₂ O ₃	٪ ۲/۶۸
اکسید کلسیم	CaO	٪ ۳/۳
اکسید پتاسیم	K ₂ O	٪ ۶/۰۵
اکسید منیزیم	MgO	٪ ۱/۴۲

۲-۵- آبر روان کننده

بدلیل آنکه زئولیت جاذب شدید آب بوده، باید نسبت آب به سیمان افزایش یابد. اما افزایش نسبت آب به سیمان می‌تواند موجب کاهش استحکام بتن شود [۲۲]. همچنین در صورتیکه عناصر ساخت بتن به خوبی مخلوط نگردد، زئولیت در بتن کلوخه شده و باعث ایجاد ناحیه ضعیف در بتن خواهد شد. بنابراین استفاده از مواد کاهنده آب مانند انواع روان کننده جهت حفظ روانی و حفظ کیفیت بتن ضرورت دارد. در این تحقیق برای رسیدن به پخش یکنواخت افزودنی و حفظ روانی بتن از آبر روان کننده SP400 پایه پلی کربوکسیلات، استفاده گردید [۲۳]. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق و به شرح جدول ۷ می‌باشد.

جدول ۷ مشخصات فیزیکی ابر روان کننده SP400 [۱۵]

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی رنگ	۱/۱ gr/cm ³	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۵/۵۸	مایع	۰/۷ تا ۰/۳٪ وزن سیمان

۴- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی این تحقیق مجموعاً متشکل از ۵ طرح مخلوط شامل ۴۰ نمونه می‌باشد. جدول ۸ تعداد نمونه‌ها به تفکیک هر آزمایش، ابعاد نمونه‌ها، شرح و استاندارد هر آزمایش را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای آزمایش ردیف ۴ و ۷ در تمامی طرح مخلوط‌ها و تمامی سنین، ۲ نمونه شکسته شد و میانگین مقاومت بدست آمده بعنوان مقاومت فشاری نهایی در نظر گرفته شد.

جدول ۸ شرح و استاندارد آزمایش، تعداد و ابعاد نمونه‌ها برای برنامه آزمایشگاهی این تحقیق

ردیف	شرح آزمایش	شماره استاندارد	تعداد نمونه ۷ روزه	تعداد نمونه ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتیمتر)
۱	جریان اسلامپ (روانی)	ASTM-C1611	-	-	-
۲	قیف V	BS-EN-12350-9	-	-	-
۳	جعبه L	BS-EN-12350-10	-	-	-
۴	مقاومت فشاری بتن	BS-EN-12390	۱۰	۱۰	۱۵×۱۵×۱۵ مکعبی
۵	مقاومت کششی بتن	ASTM-C496	-	۵	۳۰×۱۵ استوانه‌ای
۶	میزان جذب آب بتن سخت شده	ASTM-C642	-	۵	۱۰×۱۰×۱۰ مکعبی
۷	تعیین دوام یخ زدگی	ASTM-C666-B	-	۱۰	۱۵×۱۵×۱۵ مکعبی

شکل شماره ۴ فرایند برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن سبز با خرده سرامیک ضایعاتی را نشان می‌دهد. بطوریکه برای انجام این تحقیق ابتدا از سرامیک موجود در ساختمان تخریب شده جمع‌آوری گردیده و سپس بوسیله ضربات مکانیکی به اندازه متناسب با گسترده درشت‌دانه (شن) تبدیل شد. در نهایت در نسبت‌های مختلف حجمی جایگزین بخشی از شن گردیده و در تولید بتن دوست‌دار محیط زیست استفاده شد.



شکل ۴ فرآیند برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن دوستدار محیط زیست با خرده سرامیک ضایعاتی

۵- طرح مخلوط

مبنای طرح مخلوط شاهد برای ساخت بتن خودتراکم در این تحقیق، تجربه آزمایشگاهی و مطالعات پیشین سایر تحقیقات بوده که بر اساس نوع مصالح مصرفی بهینه‌یابی شده است [۳۷،۳۶]. طبق نتایج منتشر شده از سایر تحقیقات گذشته میزان استفاده از ژئولیت در بتن عمدتاً کمتر از ۱۰٪ وزنی سیمان گزارش شده اما توصیه شده که با توجه به نوع و ساختار شیمیایی ژئولیت مصرفی، بهینه‌یابی صورت گیرد [۲۴]. بنابراین در این تحقیق مطابق با خواص رئولوژی بتن خودتراکم (آزمایش جریان اسلامپ) از نسبت‌های مختلف وزنی ژئولیت به میزان ۲/۵٪، ۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪ استفاده شد و بهترین آن یعنی استفاده از ۵٪ ثابت وزنی در تمامی طرح مخلوط‌ها، در نظر گرفته شد. عیار سیمان مصرفی در نمونه شاهد ۴۰۰ کیلوگرم در هر متر مکعب در نظر گرفته شد. همچنین حداکثر اندازه سنگ دانه مصرفی ۱۹ میلی‌متر تعیین شد که در طرح‌های مخلوط‌های مورد تحقیق از سرامیک خرد شده به جای شن در نسبت‌های مختلف حجمی ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ استفاده شد. در ادامه جهت افزایش کیفیت و قوام بتن خودتراکم از پودر ژئولیت به میزان ثابت ۵٪ وزنی سیمان استفاده گردید. نسبت آب به سیمان در تمامی طرح مخلوط‌ها ۰/۵ در نظر گرفته شد و نیز جهت حفظ کارایی بتن خودتراکم از محلول آبر روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات به میزان ۳٪ ثابت وزنی سیمان استفاده شده است. جدول ۹ میزان عناصر مصرفی برای طرح مخلوط‌های مورد بررسی در مقیاس یک متر مکعب نشان می‌دهد. شکل ۵ تصاویر برخی از آزمایش‌های انجام شده روی بتن مورد تحقیق را نشان می‌دهد (از سمت راست به چپ به ترتیب آزمایش جعبه L، آزمایش مقاومت فشاری نمونه مکعبی و آزمایش مقاومت کششی به روش برزیلین).



شکل ۵ برخی از آزمایش‌ها صورت گرفته بر روی نمونه‌ی دارای خرده سرامیک ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه

جدول ۹ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

نام	سیمان	زئولیت	ماسه	شن	سرامیک	آب	آبر روان کننده	میزان جایگزینی سرامیک
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%
CONTROL	۴۰۰	۲۰	۹۰۰	۹۰۰	۰	۲۰۰	۱۲	۰
S-Z-C-25%	۴۰۰	۲۰	۹۰۰	۶۷۵	۲۲۸	۲۰۰	۱۲	۲۵
S-Z-C-50%	۴۰۰	۲۰	۹۰۰	۴۵۰	۴۵۶	۲۰۰	۱۲	۵۰
S-Z-C-75%	۴۰۰	۲۰	۹۰۰	۶۷۵	۲۳۰	۲۰۰	۱۲	۷۵
S-Z-C-100%	۴۰۰	۲۰	۹۰۰	۰	۹۱۲	۲۰۰	۱۲	۱۰۰

۶- یافته‌ها

۶-۱- رئولوژی بتن

جریان اسلامپ یا میزان روانی بتن، معیاری برای تعیین روانی و جزیان پذیری بتن خودتراکم قبل از استفاده در محل بتن‌ریزی است. قطر جریان اسلامپ معمولاً باید بین ۵۰ تا ۷۵ سانتیمتر باشد [۳۳]. مقدار بیشتر نشانه حرکت بیشتر بتن خودتراکم تحت وزن خود بوده که می‌تواند قالب را سریع‌تر پر کند اما ممکن است جداشدگی سنگدانه از خمیره سیمان هم رخ دهد. همچنین آزمایش T₅₀ میزان گرانیوی بتن خودتراکم را نشان می‌دهد. زمان بیشتر در این آزمایش نشانه زیاد بودن گرانیوی^۴ بتن است. اگر مقدار T₅₀ مساوی یا کمتر از ۲ ثانیه باشد، به مفهوم گرانیوی کم مخلوط و بیشتر از ۵ ثانیه به معنی گرانیوی زیاد مخلوط است. گرانیوی خیلی کم احتمال جداشدگی را افزایش می‌دهد [۳۴].

با در نظر گرفتن این نکته که سرامیک ذاتاً جذب آب پایین‌تری در مقایسه با سنگدانه طبیعی دارد طبعاً افزایش میزان جریان اسلامپ بتن دور از انتظار نبود. همچنین با توجه به سطح مخصوص دانه‌ها و ذرات خرده سرامیک مورد استفاده که کاملاً همگن هستند نیز باعث جاری شدن سریع‌تر خواهند شد که این پدیده میزان زمان آزمایش T₅₀ بتن را کاهش خواهد داد. لذا مجموع این عوامل باعث گردید

^۴ مقاومت اصطکاکی یک مایع یا گاز در برابر شارش یا لغزیدن لایه‌ها، هنگامی که تحت تنش برشی قرار گیرد.

تا در نمونه‌های دارای مقادیر بیشتر خُرده سرامیک ضایعاتی، کنترل افزایش جریان اسلامپ و بعضاً آب انداختگی بتن باشیم. قابل ذکر است که میزان جریان اسلامپ تمامی طرح مخلوط‌های مورد بررسی به استثنای طرح S-Z-C-100% در حد مجاز استاندارد می‌باشد.

نتیجه آزمایش جعبه L میزان انسداد و روانی در جریان بتن خودتراکم را در میان انبوه شبکه آرماتور مشخص می‌نماید. نسبت به دست آمده در آزمایش جعبه L نباید کمتر از ۰/۸ باشد. لازم به ذکر است که محدوده قابل قبول برای نسبت (h_2/h_1) بین ۰/۸ تا ۱ قابل قبول می‌باشد. بنابراین هرچه این نسبت به عدد یک نزدیکتر باشد بیانگر برابری ارتفاع بتن در دو ناحیه است که این بدین معنی است که بتن قابلیت عبور از آرماتور و کارایی مطلوبی دارد [۳۴]. با توجه به نتایج بدست آمده از لحاظ توانایی عبور بتن خودتراکم بین میلگردها، مشخص گردید که نسبت انسداد تمامی نمونه‌های مورد آزمایش بالای ۰/۸ می‌باشد که این عدد طبق مراجع موجود، قابل قبول است. با افزایش درصد جایگزینی خُرده سرامیک ضایعاتی کنترل روند صعودی در نسبت انسداد خواهیم بود به گونه‌ای که در طرح مخلوط S-Z-C-25% و S-Z-C-50% نسبت انسداد ۰/۹۳ و ۰/۸۷ اما در طرح مخلوط S-Z-C-75% و S-Z-C-100% نسبت انسداد با اختلاف ۰/۶۶ و ۰/۶ می‌باشد. دلیل این افزایش نسبت انسداد، آب انداختگی طرح دارای مقادیر بالاتر خُرده سرامیک ضایعاتی در میزان جریان پذیری بتن خودتراکم در پشت میلگردهای جعبه L است.

نتیجه آزمایش قیف V بیانگر ویسکوزیته یا جریانپذیری مخلوط بتن خودتراکم است. زمان مناسب تخلیه بتن خودتراکم از قیف V بین ۶ تا ۱۲ ثانیه است. اگر زمان تخلیه بتن بیشتر از ۱۲ ثانیه باشد، بیانگر ویسکوزیته خمیری زیاد بتن است و اگر زمان تخلیه بتن کمتر از ۶ ثانیه باشد، نشان دهنده ویسکوزیته کم بتن است که در این حالت احتمال وقوع پدیده جداسازی وجود دارد [۳۵]. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که طرح مخلوط S-Z-C-75% و S-Z-C-100% دارای ویسکوزیته نامناسب می‌باشد که احتمال وقوع جداسازی سنگدانه‌ها و خُرده سرامیک را در بتن ریز حجیم افزایش می‌دهد. بنظر می‌رسد عدم چسبندگی مناسب بین خُرده سرامیک با خمیره سیمان از جمله دلایل مهم بروز این عارضه تلقی می‌گردد. بنابراین می‌توان اذعان داشت که هر چه از خُرده سرامیک ضایعاتی بیشتری در بتن استفاده گردد احتمال افزایش روانی و کاهش ویسکوزیته و احتمال آب انداختگی و جداسازی ذرات افزایش یافته که ناشی از میزان جذب آب پایین سرامیک در مقایسه با شن می‌باشد.

جدول ۱۰ نتایج مربوط به آزمایش جریان اسلامپ، جعبه L و قیف V را نشان می‌دهد.

جدول ۱۰ مقایسه میزان روانی و ویسکوزیته تمامی طرح مخلوط‌های مورد آزمایش

ردیف	نام طرح مخلوط	جریان اسلامپ		قیف V
		قطر اسلامپ سانتیمتر	T ₅₀ ثانیه	
۱	Control	۶۰	۴	۸
۲	S-Z-C-25%	۶۲	۴	۷
۳	S-Z-C-50%	۶۴	۲/۵	۶
۴	S-Z-C-75%	۶۸	۳/۵	۵
۵	S-Z-C-100%	۷۱	۳/۵	۵

۶-۲- مقاومت فشاری

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که عمدتاً استفاده و بکارگیری مصالح بازیافتی در بتن سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد [۲۰، ۱۹، ۱۶]. نتایج بدست آمده از میزان مقاومت فشاری نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق نیز موید این موضوع است. بطوریکه استفاده هر چه بیشتر خُرده سرامیک ضایعاتی بجای شن بدلیل مقاومت کمتر نیز باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. اما کاهش این میزان مقاومت در برخی از طرح مخلوط‌ها توجیه‌پذیر است. بطوریکه در طرح مخلوط S-Z-C-25% میزان مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه، فقط

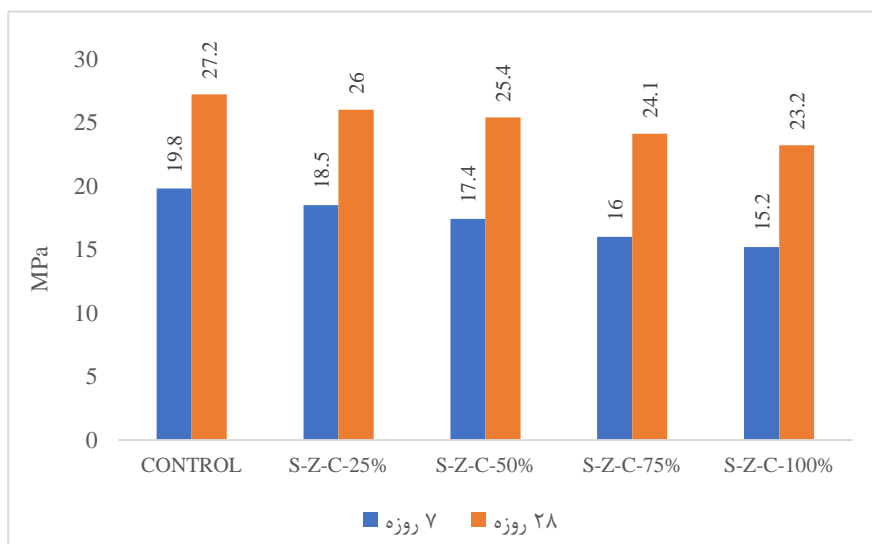
۴/۵٪ و ۶/۷٪ کاهش یافته که اُفت مقاومت فشاری آن در مقایسه با نمونه کنترل کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. اما مهم‌ترین دلیل کاهش مقاومت

نمونه‌های دارای خرده سرامیک نیز کاهش میزان سنگدانه طبیعی در بتن می‌باشد که باعث کاهش میزان چسبندگی بتن می‌گردد. از طرفی افزودن پودر زئولیت در بتن بدلیل اندازه بسیار ریز باعث افزایش تراکم و کاهش تخلخل بتن گردید که این مهم می‌تواند در حفظ کیفیت و افزایش مقاومت فشاری بتن موثر واقع گردد. واکنش زئولیت با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان موجب تشکیل مقادیر زیادی از سیلیکات کلسیم هیدراته خواهد شد که حفرات بیشتری از بتن پر شده و موجب بهبود ریز ساختار آن می‌شود و مقاومت فشاری بتن را افزایش می‌دهد.

جدول ۱۱ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی شکل و میزان تغییرات آن را نسبت به نمونه کنترل نشان می‌دهد. همچنین برای تبدیل مقاومت فشاری نمونه مکعبی به استوانه‌ای به استناد آبا^۵ از ضریب تبدیل T_3 استفاده گردید. در آبا برای تبدیل مقاومت فشاری نمونه مکعبی به استوانه‌ای برای مقاومت کمتر از 250 kg/cm^2 ، ضریب $1/25$ و برای مقاومت فشاری کمتر از 300 kg/cm^2 ، ضریب $1/20$ توصیه شده است [۳۴]. همچنین شکل ۶ میزان مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی را به تفکیک طرح مخلوط‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد.

جدول ۱۱ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین مختلف و تبدیل آن به مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای و مقایسه میزان تغییرات آن

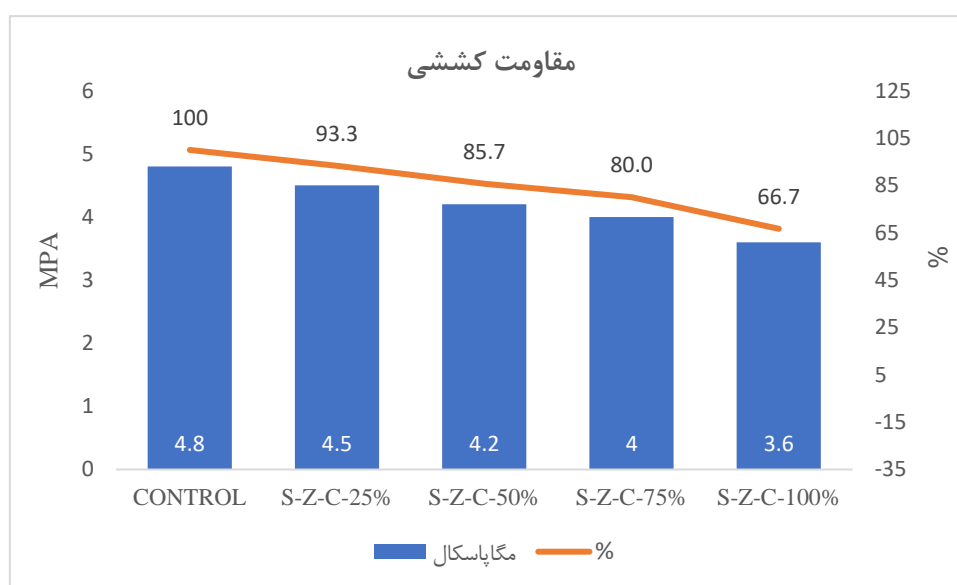
ردیف	نام طرح مخلوط	مقاومت فشاری نمونه مکعبی		تبدیل مقاومت فشاری به نمونه استوانه‌ای		میزان تغییرات	
		۷ روزه	۲۸ روزه	MPa	MPa	٪	٪
۱	Control	۱۹/۸	۲۷/۲	۱۵/۸	۲۲/۷	-	-
۲	S-Z-C-25%	۱۸/۵	۲۶/۰	۱۵/۴	۲۱/۷	۶/۷	۴/۵
۳	S-Z-C-50%	۱۷/۴	۲۵/۴	۱۴/۵	۲۱/۲	۱۲/۱	۶/۷
۴	S-Z-C-75%	۱۶/۰	۲۴/۱	۱۲/۸	۲۰/۱	۱۹/۲	۱۱/۴
۵	S-Z-C-100%	۱۵/۲	۲۳/۲	۱۲/۲	۱۹/۳	۲۳/۲	۱۴/۷



شکل ۶ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین مختلف

۳-۶- مقاومت کششی

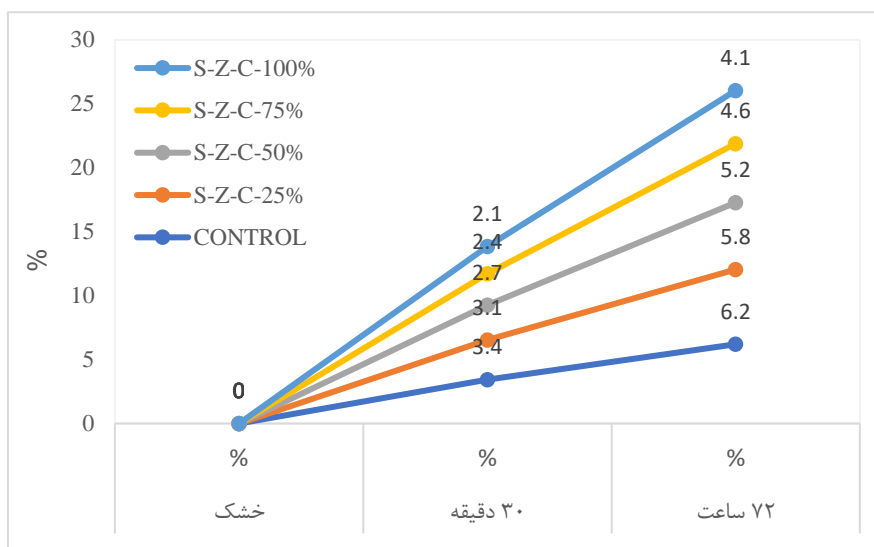
تاکنون ثابت شده که میزان مقاومت کششی بتن ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری آن دارد [۳۶]. بنابراین عوامل موثر و تاثیر گذار بر روی مقاومت فشاری بتن بر روی میزان مقاومت کششی اثر خواهد داشت. در این تحقیق میزان مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵*۳۰ سانتیمتر و در سن ۲۸ روزه به روش برزلی مورد سنجش قرار گرفته است و نتایج آن به شرح شکل ۷ می‌باشد. نتایج این آزمایش مشخص نمود که عدم چسبندگی مناسب بین درشت دانه ناشی از جایگزین نمودن خرده سرامیک ضایعاتی به جای شن و عدم چسبندگی مناسب و سطح مخصوص سرامیک باعث کاهش پیوستگی و چسبندگی و در نتیجه کاهش مقاومت کششی بتن خواهد شد. بطوریکه افزودن ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰٪ خرده سرامیک ضایعاتی باعث کاهش مقاومت کششی به ترتیب به میزان ۱۴/۳، ۲۰/۰ و ۳۳/۳٪ در مقایسه با نمونه کنترل خواهد شد.



شکل ۷ مقایسه مقاومت کششی تمامی نمونه‌های مورد آزمایش

۴-۶- جذب آب بتن سخت شده

میزان جذب آب در بتن سخت شده معیاری برای تعیین تخلخل در ساختار بتن و فضای مویینه آن است. در این تحقیق روش انجام آزمایش میزان جذب آب سخت شده در سنین ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت انجام شده که نتایج آن به شرح شکل ۸ می‌باشد. آزمایش مذکور بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه مکعبی پس از ۲۴ ساعت قرار گیری در دمای ۱۱۰ درجه انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که میزان جذب آب بتن در نمونه‌های دارای خرده سرامیک ضایعاتی نیز به مراتب کمتر از نمونه کنترل می‌باشد که علت آن هم باید به میزان جذب آب پایین سرامیک موجود در بتن نسبت داد. البته قابل ذکر است که استفاده از پودر زئولیت بدلیل خاصیت جذب آب بسیار بالا می‌تواند در میزان افزایش جذب آب اولیه بتن موثر واقع شود. از طرفی ذرات بسیار ریز پودر زئولیت بدلیل دانه بندی خود باعث افزایش تراکم و کاهش فضای مویینه بتن می‌گردد. همچنین بدیهی است که واکنش زئولیت با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان موجب تشکیل مقادیر زیادی از سیلیکات کلسیم هیدراته خواهد شد که حفرات بیشتری از بتن پر شده و باعث می‌شود که فضای خالی و مویینه بتن پر شده و تراکم بتن افزایش می‌یابد. بنابراین آب دوست بودن زئولیت باعث گردید تا میزان جذب آب اولیه بتن (بدلیل وجود زئولیت) افزایش یابد اما بعد از اشباع شدن آن، میزان جذب آب ثانویه بتن نسبتاً با روند کندی پیش رود [۱۹،۷].



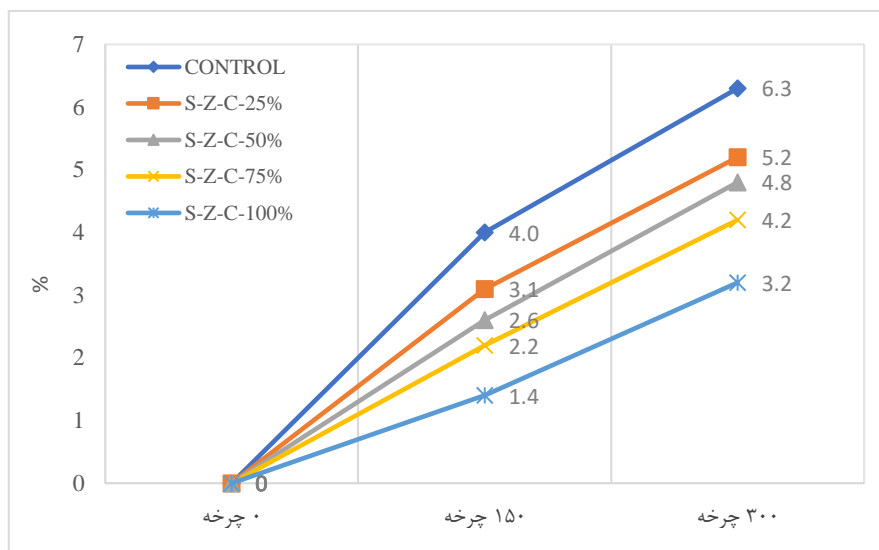
شکل ۸ مقایسه میزان درصد آب جذب شده بتن سخت شده در تمامی طرح‌های مورد آزمایش

۶-۵- دوام یخ زدگی

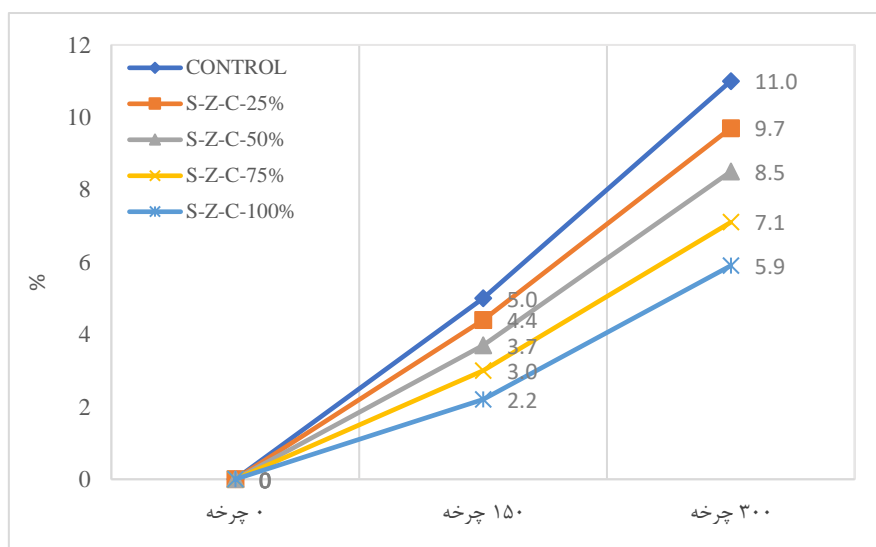
دوام یخ زدگی نمونه‌های مورد مطالعه که دارای نسبت‌های مختلف حجمی خرده سرامیک ضایعاتی هستند در برابر چرخه ذوب و انجماد از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مساحت زیادی از کشور ایران در مناطق سردسیری قرار دارد و ممکن است استفاده از این بتن جهت ساخت و ساز در مناطق سردسیر مشکلات عدیده‌ای را بوجود آورد. بنابراین جهت سنجش میزان دوام طرح مخلوط‌های مورد مطالعه در برابر یخ‌زدگی نیز بر اساس استاندارد ASTM-C666-B در دمای ۱۸- تا ۴+ در بازه ۵ ساعته مورد آزمایش قرار گرفتند [۳۶]. در ادامه پس از سپری نمودن ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه تکرار شونده نیز میزان آفت وزن و آفت مقاومت فشاری آن اندازه‌گیری و با نمونه کنترل مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح شکل ۹ و ۱۰ می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده مشخص شد که با افزودن خرده سرامیک ضایعاتی در بتن میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت در اثر چرخه یخبندان در مقایسه با نمونه کنترل کمتر می‌باشد یا عبارتی دوام بتن دارای خرده سرامیک ضایعاتی در برابر یخ‌زدگی بیشتر است.

واضح است که دلیل این آفت وزن بتن در نمونه کنترل ناشی از جذب بالای آب توسط شن و نیز تخلخل بیشتر شن در مقایسه با سرامیک ضایعاتی می‌باشد. بطوریکه وجود این حفرات پر از آب در هر چرخه یخ زدن و آب شدن، باعث انبساط و انقباض بتن گردیده و نیز زوال و خرابی بتن را در پی خواهد داشت. طبیعتاً انتظار می‌رفت با افزایش تراکم ناشی از افزودن زئولیت در بتن و در پی آن کاهش تخلخل بتن میزان دوام یخ‌زدگی بتن افزایش یابد اما بدلیل آنکه این ماده جذب آب بالایی دارد سبب افزایش نسبت آب در منافذ بتن و کاهش دوام یخ‌زدگی خواهد شد.

به استناد از توصیه سایر مراجع، معیار رد یا پذیرش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد نیز حداکثر آفت وزن بتن بیش از ۵٪ یا حداکثر آفت مقاومت فشاری بتن بیش از ۱۰٪ مردود اعلام شده و در این صورت زوال و خرابی بتن اعلام می‌شود [۳۷، ۳۶]. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان ادعان نمود که افزودن سرامیک ضایعاتی در بتن بدلیل سختی بیشتر و جذب آب کمتر باعث پایداری دوام بتن در برابر انجماد خواهد شد.



شکل ۹ مقایسه میزان کاهش وزن نمونه‌ها پس از قرار گیری در برابر چرخه انجماد



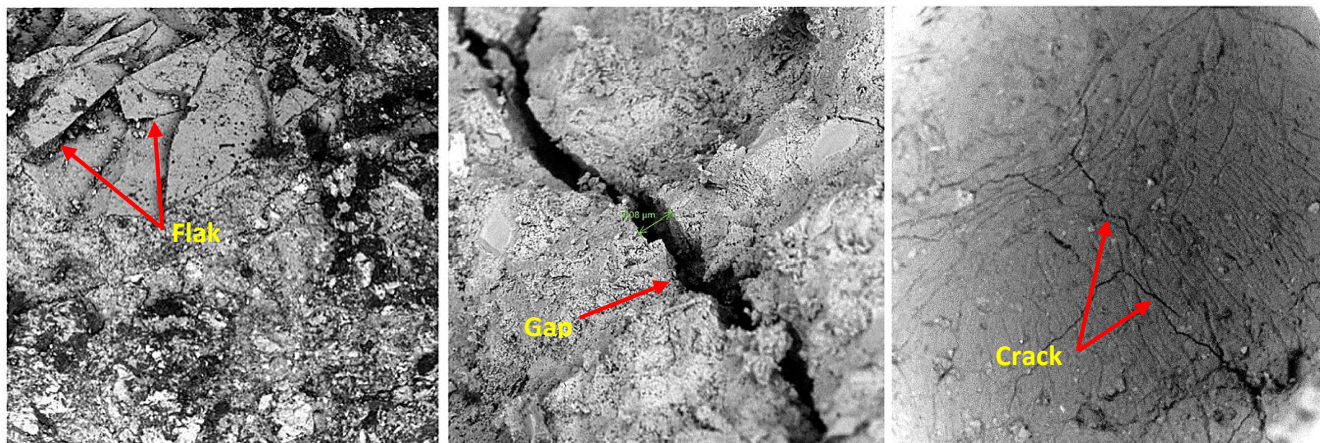
شکل ۱۰ مقایسه میزان کاهش مقاومت نمونه‌ها پس از قرار گیری در برابر چرخه انجماد

۶-۶- تصویر SEM

جهت عکس برداری الکترونی روبشی (SEM) نیز قطعات بتنی شکسته شده در ابعاد حدود ۲ سانتیمتر جمع‌آوری و برای حفظ هیدراسیون سیمان نیز در محلول پروپانل نگهداری و سپس عکس‌برداری شدند. شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ وضعیت سرامیک موجود در بتن و شکل‌های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ وضعیت بتن موجود در بتن را نشان می‌دهند.

شکل ۱۱ وضعیت دانه سرامیک پس از بارگذاری و شکست نشان می‌دهد. تصویر مذکور نشان می‌دهد که شکست زود هنگام بتن در نمونه‌های دارای سرامیک ضایعاتی بدلیل ضعف مقاومت سرامیک بوده که باعث بروز ترک‌های متعددی در سطح سرامیک خواهد شد. شکل ۱۲ مربوط به نحوه شکست دانه سرامیک می‌باشد. این تصویر نشان می‌دهد که در سرامیک شکست کامل رخ داده و مقاومت آن کمتر از خمیره سیمان بوده. به همین دلیل با افزایش میزان خرده سرامیک ضایعاتی در بتن مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. شکل ۱۳ وضعیت

شکست سرامیک موجود در بتن را پس از قرارگیری در معرض چرخه ذوب و یخزدگی نمایش می‌دهد. استفاده از سرامیک بدلیل تراکم بیشتر و حجم منافذ آب کمتر، از دوام و وضعیت پایدارتری برخوردار است که در نتیجه باعث افزایش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد خواهد شد. دانه سرامیک دارای ساختاری فشرده است و همچنین تعداد منافذ هوا یا آب آن کمتر می‌باشد. بنابراین فرآیند خرابی آن بصورت پوسته شدن خواهد بود که در نتیجه زوال آن در توالی چرخه ذوب و یخبندان با سرعت کمتری ایجاد می‌شود. بر اساس مشاهدات فوق مشخص شد که دلیل اصلی کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های دارای مقادیر بالایی از درشت دانه‌های سرامیکی پس از بارگذاری، ریزترک‌های موجود در ساختار این ماده ناشی از ضعف مقاومت و سختی آن می‌باشد. اما در مواجهه با دوام یخ زدگی بدلیل حجم کمتر منافذ آب و هوا از دوام بهتری در مقایسه با دانه‌های شن برخوردار است.



شکل ۱۳ اثر یخبندان روی سرامیک

تنگنا - ۴۸۰ با

شکل ۱۲ شکست دانه سرامیک

تنگنا - تصویر - ۲۶۰۰ با

شکل ۱۱ ترک‌های ایجاد شده روی سطح دانه

سرامیک

شکل ۱۴ وضعیت سنگدانه (شن) پس از بارگذاری و شکست را نشان می‌دهد. ترک‌های ایجاد شده روی سطح شن در مقایسه با سرامیک کمتر می‌باشد. اما حفرات موجود روی سطح شن نشان می‌دهد که از پتانسیل بیشتری برای انفصال در اثر یخبندان برخوردار است. همچنین در این شکل تاثیر افزودن زئولیت در بتن بخوبی مشخص است. بطوریکه ذرات ریز زئولیت باعث کاهش حجم تخلخل و افزایش تراکم در بتن می‌شود. شکل ۱۵ پیوند مناسب بین سنگدانه و ماتریس سیمان را نشان می‌دهد. بطوریکه اترینگایت سیمانی و کریستال‌های هیدروکسید کلسیم موجود در خمیره سیمان بدلیل زبری سطح شن از چسبندگی بیشتری برخوردار می‌باشند. نتایج بدست آمده از مقاومت فشاری نمونه کنترل صحت این ادعا را تایید می‌نماید. شکل ۱۶ ریزساختار شن پس از قرارگیری در برابر چرخه ذوب و یخبندان را نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات فوق، در طی فرآیند ذوب شدن و یخزدگی، حفرات آب موجود در شن به دلیل تغییرات دمایی گسترده تحت انقباض و انقباض شدید قرار گرفته و پس از توالی چرخه ذوب و یخبندان حجم حفرات افزایش می‌یابد. تکرار این چرخه در توالی مستمر باعث ایجاد تنش در دانه شن می‌شود و در نهایت این ترک تا انتهای دانه شن یا به نزدیک‌ترین حفره دارای هوا یا آب گسترش می‌یابد. این حفرات باعث ایجاد ترک شده و اتصال ترک‌ها باعث ایجاد گسیختگی روی سطح شن و انفصال بتن خواهد شد. به همین دلیل دوام نمونه کنترل در آزمایش ذوب و یخبندان کمتر از سایر نمونه‌های مورد آزمایش بود.

۳. طرح‌های S-C-Z-25%,50%,75%,100% باعث کاهش میزان جذب آب ثانویه در بتن سخت شده به میزان به ترتیب ۶/۲٪، ۵/۸٪، ۵/۲٪، ۴/۶٪، ۴/۱٪ خواهد شد.
۴. طرح‌های S-C-Z-25%,50%,75%,100% پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد باعث آفت وزن بتن به میزان به ترتیب ۶/۳٪، ۵/۲٪، ۴/۸٪، ۴/۲٪ و ۳/۲٪ خواهد شد.
۵. طرح‌های S-C-Z-25%,50%,75%,100% پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد باعث آفت مقاومت فشاری بتن به میزان به ترتیب ۱۱/۰٪، ۹/۷٪، ۸/۵٪، ۷/۱٪، ۵/۹٪ خواهد شد.
۶. استفاده از خرده سرامیک ضایعاتی در مقادیر بالا باعث افزایش جریان اسلامپ، کاهش ویسکوزیته (قیف V)، احتمال انسداد بتن پشت میلگرد (جعبه L)، احتمال وقوع آب انداختگی و جداسازی شیره سیمان را بدنبال دارد.
۷. سرامیک دارای سختی و مقاومت کمتری نسبت به شن است. همچنین بخاطر عدم چسبندگی مناسب سرامیک به خمیره سیمان و سطح مخصوص صاف و یکدست سرامیک باعث کاهش مقاومت خواهد شد.
۸. واکنش ژئولیت با هیدروکسید کلسیم موجود در سیمان موجب تشکیل مقادیر زیادی از سیلیکات کلسیم هیدراته خواهد شد که حفرات بیشتری از بتن پر شده و باعث می‌شود که فضای خالی و مویینه بتن پر شده و تراکم بتن افزایش یابد.
۹. نمونه‌های دارای مقادیر بالای سرامیک بدلیل جذب آب پایین دچار آفت یا کاهش وزن کمتری خواهند شد و دوام مناسبی در برابر یخ زدگی از خود نشان خواهند داد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز جهت همکاری و کوشش‌های موثری که جهت ثمربخش بودن نتایج این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

- [1] Philsoph.k, shariatmadar.h, (2019). A systematic review of construction waste management researches. In the third international conference on applied research in structural engineering and construction management
- [2] Shokohian,.n, razavi.k, (2011). Management and solutions to reduce environmental pollution of construction waste and their recycling. In the 6th national congress of civil engineering
- [3] Philsoph.k, shariatmadar, h. (2021). Ranking of construction waste creation factors according to project success criteria. In the 12th international congress of civil engineering
- [4] Mohiyapur.r (2019). Investigating factors affecting the reduction of construction waste production in mass construction projects using fuzzy logic. Imran and project journal, 1(1), 39-52.
- [5] Amini tousi.a, torabi.m (2015). Relative advantages of the light steel frame (lsf) construction system in reducing the production of construction waste and the resulting environmental hazards. In the first national green house conference
- [6] Ahmedpur.m (2021). Optimal design and construction management on construction and operational waste landfills. Structural and construction engineering, 8(1), 111-130.

- [7] Morthab.k, (2019). Production and organization of construction waste in developing countries, a case study of tehran metropolis. *Civil engineering*, (51.1), 25-32.
- [8] Vejmelková, E., Keppert, M., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Keršner, Z., & Černý, R. (2012). Properties of high performance concrete containing fine-ground ceramics as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 55-61.
- [9] Zimbili, O., Salim, W., & Ndambuki, M. (2014). A review on the usage of ceramic wastes in concrete production. *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(1), 91-95.
- [10] Meena, R. V., Jain, J. K., Chouhan, H. S., & Beniwal, A. S. (2022). Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review. *Cleaner Materials*, 4, 100085. Asgari, a., ghorbanian, t., yousefi, n., dadashzadeh, d., khalili, f., bagheri, a., mahvi, a. H. (2017). Quality and quantity of construction and demolition waste in tehran. *Journal of environmental health science and engineering*, 15, 1-8.
- [11] Hijrati.l, vafamher.f, elahi.r, (2022). Identification and ranking of indicators effective in preventing waste production in residential buildings in line with regional sustainable development. *Quarterly journal of geography (regional planning)*, 12(3), 523-508.
- [12] Islamic republic news agency (1401) , <https://irna.ir/xnvcn>
- [13] Tehran municipality news base, (1401), shahr.ir/x6tr
- [14] Suchithra, s., sowmiya, m., & pavithran, t. (2022). Effect of ceramic tile waste on strength parameters of concrete-a review. *Materials today: proceedings*.
- [15] Xu, f., lin, x., zhou, a., liu, q. F. (2022). Effects of recycled ceramic aggregates on internal curing of high performance concrete. *Construction and building materials*, 322, 126484.
- [16] Juan-valdés, a., rodriguez-robles, d., (2021). Mechanical and microstructural properties of recycled concretes mixed with ceramic recycled cement and secondary recycled aggregates. A viable option for future concrete. *Construction and building materials*, 270, 121455.
- [17] Anderson, d. J., smith, s. T., & au, f. T. (2016). Mechanical properties of concrete utilising waste ceramic as coarse aggregate. *Construction and building materials*, 117, 20-28.
- [18] Mousavi, e, murshid, r, & eslami, a. (1401). Investigating the effect of tile soil waste as a substitute for cement on the properties of structural concrete. *Concrete research*, 15(1), 71-83. Doi: 10.22124/jcr.2022.20712.1518
- [19] Safi khani, f, khani, m. (2018). Investigating the mechanical properties of self-compacting concrete made from broken tile waste. *New approaches in civil engineering*, 3(3), 1-18. Sid. <https://sid.ir/paper/266201/fa>
- [20] Qudousi p, salehi am. Investigating the waterproofing of self-compacting concrete containing limestone powder based on rheological parameters
- [21] Saadat khosh, m, arzoomandi, a, shagaig. (2021). Laboratory study of mechanical characteristics and durability of concrete containing recycled concrete aggregate and zeolite. *Ferdowsi civil engineering*, 33(4), 15-32
- [22] Mansouri, b, aghamejidi, r, bazaei, a, ghadoumizadeh, gh. (1401). The use of ocher soil and nano aluminum oxide in the colorability of concrete and the investigation of some mechanical properties and wear durability of concrete. *Structural engineering and construction*, doi: 10.22065/jsce.2023.375610.2986
- [23] Safai, a, amiri, gh, razavi, m, begi,ha, hamid r. (1400). The effect of microsilica and zeolite on the medium-term behavior of expanding self-compacting concrete. *Structural engineering and construction*, 8(12), 184-207. Doi: 10.22065/jsce.2021.216035.2050

- [24] Ray, s., haque, m., sakib, (2021). Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: a review. *Journal of building engineering*, 43, 102567.
- [25] Pacheco-torgal, f., & jalali, s. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and building materials*, 24(5), 832-838.
- [26] Pitarch, a. M., reig, l., tomás, a. E., & lópez, f. J. (2019). Effect of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware recycled aggregates on structural concrete properties. *Waste and biomass valorization*, 10, 1779-1793.
- [27] Elçi, h. (2016). Utilisation of crushed floor and wall tile wastes as aggregate in concrete production. *Journal of cleaner production*, 112, 742-752.
- [28] Halicka, a., ogrodnik, p., & zegardlo, b. (2013). Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate. *Construction and building materials*, 48, 295-305.
- [29] Reig, l., tashima, m. M., soriano, l., borrachero, m. V., monzó, j., & payá, j. (2013). Alkaline activation of ceramic waste materials. *Waste and biomass valorization*, 4, 729-736.
- [30] Higashiyama, h., yagishita, f., sano, m., & takahashi, o. (2012). Compressive strength and resistance to chloride penetration of mortars using ceramic waste as fine aggregate. *Construction and building materials*, 26(1), 96-101.
- [31] Medina, c., de rojas, m. S., & frías, m. (2012). Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. *Cement and concrete composites*, 34(1), 48-54.
- [32] Astm-c1611, (2021). Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. Usa.
- [33] Iran concrete standard, (1400), sixth chapter, durability or reliability of concrete, 114-124.
- [34] Iran concrete standard, (1400), chapter eight, acceptance of concrete strength, 204.
- [35] Bs en 12350-9:2010, testing fresh concrete self-compacting concrete. V-funnel test. European standard
- [36] Bazaei, a, mansouri, b, aghamjidi, r, gulshan, m. (1401). Investigating the mechanical properties and freezing durability of yellow colored concrete with different weight ratios of mush clay pigment (limonite). *Structural engineering and construction*, . Doi: 10.22065/jsce.2023.368634.2967
- [37] Shahriari, Leila, Azimi, Abbas, & Ghadoumizadeh, Ghazaleh. (1402). The effect of simultaneous use of bentonite and zeolite on the behavior and durability of self-compacting concrete. *Structural engineering and construction*, -. Doi: 10.22065/jsce.2023.390580.3071