Journal of Structural and Construction Engineering, 11(8), 2024, pp. 213-230

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

The Behavior and Durability of the Frost of White Concrete with Different Weights of Calcium Carbonate Oxide

Ali Mohammad Sazegar[1], Roozbeh Aghamajidi[2], Babak Mansouri[3]*

1- Master's degree in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sepidan Branch, Sepidan, Iran
2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sepidan, Islamic Azad University, Sepidan, Iran.
3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Firoozabad Branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran.

ABSTRACT

The use of mineral waste to produce new concrete is one of the important issues in the construction industry, which can have many environmental benefits and economic savings. Today, excessive production of cement has become a crisis in human societies, especially in iran. Because the production of cement will cause the release of carbon dioxide gas and the production of pollutants in the air of cities, which has irreparable consequences. On the other hand, the supply of electricity or gas energy for the fuel cycle of cement factories faces many challenges in some days of the year, which will cause a shortage of cement and an increase in the price of cement and, of course, an increase in the price of housing. In this research, calcium carbonate oxide powder was used in different weight ratios of 5%, 10%, 15% and 20% to reduce the amount of white cement used to make white concrete. The tests performed include slump, compressive strength, tensile strength, water absorption and checking the durability of concrete against the melting and freezing cycle. The results of this research showed that the use of calcium carbonate oxide will increase the compressive and tensile strength of concrete due to the increase in the production of calcium hydroxide in cement but using 15% calcium carbonate will increase the compressive strength of concrete by 20%. Due to the increased water absorption of calcium carbonate, the durability of concrete against frost decreases. The use of 20% calcium carbonate can reduce the durability of concrete by 11.7% against the cycle of melting and freezing.

ARTICLE INFO

Receive Date: 06 December 2023
Revise Date: 02 February 2024
Accept Date: 14 March 2024

Keywords:
Calcium Carbonate Oxide
Freeze-Thaw Cycle
Green Concrete
White Cement

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.429062.3295

*Corresponding author: Babak Mansoori
Email address: Babak.mansoori@iau.ac.ir

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

های مختلف وزنی کلسیم بررسی رفتار و دوام یخ زدگی بتن با سیمان سفید و نسبت کربنات

علی محمد سازگار[۱]، روزبه آقامجیدی[۳]، بابک منصوری[۳*]

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان، سپیدان، ایران

۲-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سپیدان، سپیدان، ایران

۳-استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد فیروزآباد مرکز میمند، میمند، ایران

چکیده

امروزه تولید بیش از حد سیمان در جوامع بشری بخصوص در ایران به یک بحران تبدیل شده. چرا که تولید سیمان مسبب نشر گاز دی اکسید کربن و تولید آلاینده در هوای شهرها خواهد شد که تبعات جبران ناپذیری دارد. استفاده از کربنات کلسیم در تولید بتن موجب بازیافت مقادیر زیادی از مواد و ضایعات و یک مزیت بزرگ است. کربنات کلسیم یک ماده بسیار پایدار است و یک ماده ساختمانی بادوام را ایجاد می‌کند. از این رو ایجاد دوام در پروژه‌های عمرانی و ساختمانی را می‌توان مهم‌ترین نقش کربنات کلسیم در بتن قلمداد کرد. در این تحقیق برای کاهش حجم مصرفی سیمان سفید جهت ساخت بتن از پودر کلسیم کربنات در نسبت‌های مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی سیمان استفاده گردید. آزمایشات انجام شده شامل اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، جذب آب و بررسی دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از کلسیم کربنات بدلیل افزایش تولید هیدروکسید کلسیم در سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن خواهد شد. بطوریکه استفاده از ۱۵٪ کلسیم کربنات باعث افزایش ۲۰٪ مقاومت فشاری بتن خواهد شد. اما بدلیل افزایش جذب آب این ماده نیز دوام بتن در برابر جذب آب و دوام در برابر چرخه یخبندان کاهش می‌یابد. استفاده از ۲۰٪ کلسیم کربنات می‌تواند تا ۱۱/۷٪ دوام بتن را در برابر چرخه ذوب و انجماد کاهش دهد.

کلمات کلیدی: کلسیم کربنات، چرخه ذوب انجماد، بتن سبز، سیمان سفید.

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.429062.3295	doi:
۱۴۰۲/۰۹/۱۵	۱۴۰۲/۱۱/۱۳	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۲/۱۲/۲۴	۱۴۰۳/۰۸/۳۰	10.22065/jsce.2024.429062.3295	

**نویسنده مسئول*: بابک منصوری

پست الکترونیکی: Babak.mansoori@iau.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از معضلات امروزه جامعه بشری حفاظت از محیط زیست و نیز بازیافت نمودن مصالح تجدیدناپذیر می‌باشد. با توجه به افزایش دمای کره زمین و سیاست گذاری دولت‌های دنیا مبنی بر کنترل آلودگی، ضرورت دارد که چرخه بازیافت در صنعت ساختمان و مصالح توسعه یابد. سالانه حدود ۷٪ از دی‌اکسید کربن جهان ناشی از تولید سیمان منتشر می‌شود که آسیب جدی به محیط زیست وارد می‌کند. صنعت ساخت و ساز در حدود ۵۰ نوع ماده خام طبیعی و ۸۴۰ نوع منبع انرژی را مصرف و نیمی از زباله‌های صنعتی جهان را تولید می‌کند، که تولید سیمان با مصرف حدود ۲۱۵ منبع انرژی، یکی از بزرگترین صنایع مصرف کننده و تولید کننده زباله و آلودگی به شمار می‌رود. بطور متوسط در فرآیند تولید سیمان، به ازای هر تن تولید نیز حدود ۱ کلیوگرم دی اکسید کربن منتشر می‌شود[۱]. تقریباً نیمی‌از دی اکسیدکربن حاصل از کارخانه‌های سیمان در فرآیند کلسینه شدن آزاد شده و بقیه آن از سوخت‌های فسیلی مانند ذغال، گاز طبیعی و سوخت مایع آزاد می‌شود[۲]. بنابراین استفاده از مواد مکمل سیمانی برای مدیریت گرمایش جهانی و کمبود انرژی به دلیل استفاده بیش از حد از منابعی که تجدید ناپذیر هستند و باعث انتشار بی رویه گازهای گلخانه‌ای می‌شود و هزینه‌های گزافی که استفاده از سیمان دارد، در دهه‌های اخیر بسیار افزایش یافته است.

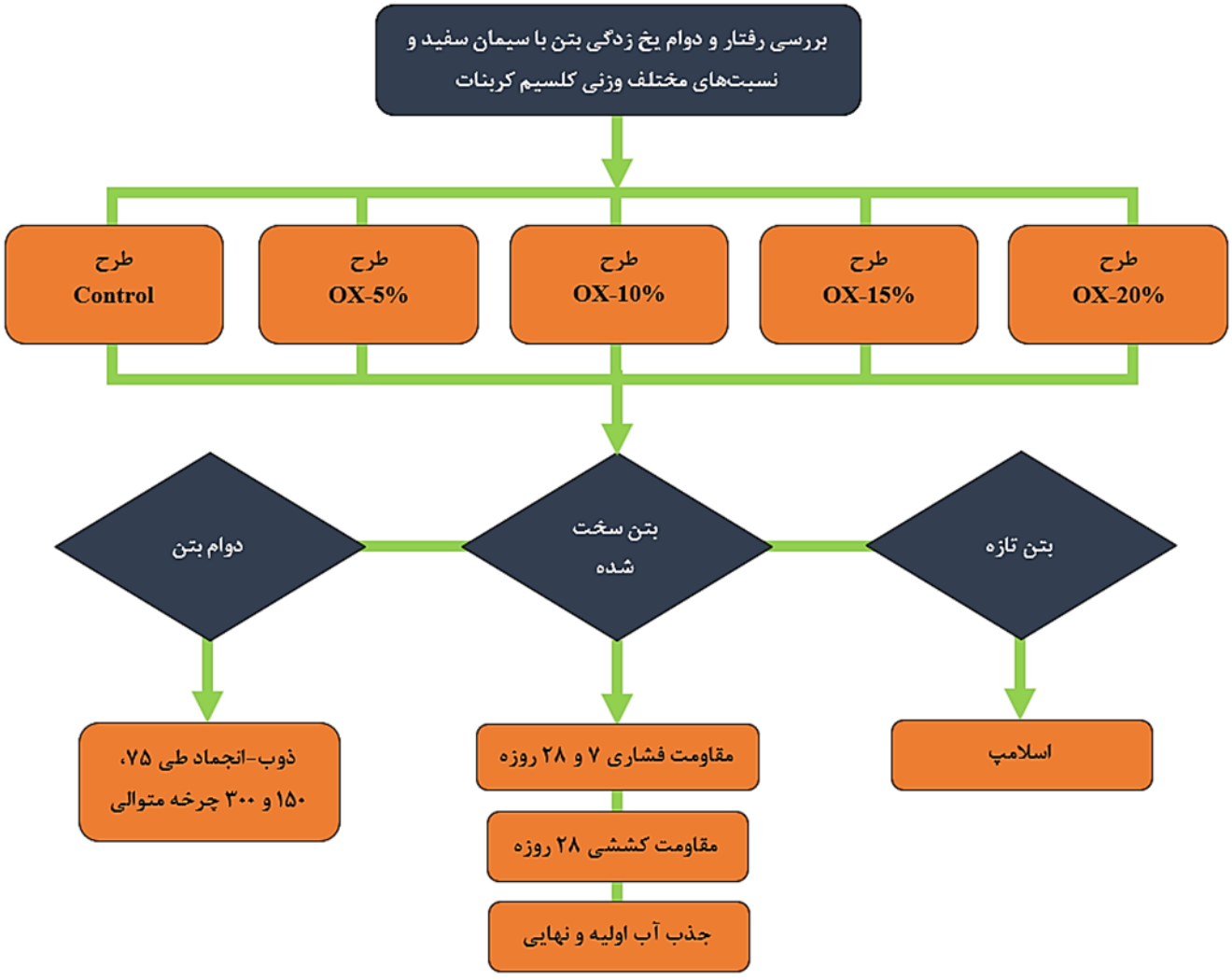
همچنین گاهی ضرورت دارد تا بتنی با رنگ روشن جایگزین بتن معمولی گردد. در مناطق کویری و گرمسیری استفاده از رنگ-های روشن مانند رنگ سفید می‌تواند در کاهش دمای محیط اطراف موثر باشد. همچنین در ساخت المان‌ها و مبلمان شهری، سردرب ورودی، جداول خیابانی، نیوجرسی و سایر المان‌های بتنی که تحت بارگذاری‌های شدید قرار نمی‌گیرند و بیشتر جنبه رنگ روشن آن مد نظر می‌باشد، استفاده از سیمان یا بتن با رنگ سفید در اولویت قرار می‌گیرد[۳]. تفاوت سیمان سفید و خاکستری در مواد تشکیل دهنده، مقاومت، سوخت کوره و قیمت آن است. قیمت این سیمان به دلیل مواد اولیه گران‌تر، مراحل پیچیده‌تر تولید و همچنین استفاده از سوخت بدون دوده گران‌تر از سیمان خاکستری می‌باشد[۴]. در ساخت یک پروژه ساختمانی با توجه به مصرف بسیار زیاد سیمان، این تفاوت قیمت بسیار محسوس است. همچنین سوخت مورد استفاده در ساخت سیمان سفید باید بدون دوده باشد، تا رنگ آن تیره نشود. اما در تولید سیمان خاکستری از سوخت معمولی استفاده می‌شود که بسیار ارزان‌تر است. این سوخت معمولاً با ایجاد دوده همراه است که در تولید سیمان خاکستری اشکالی ایجاد نمی‌کند. هرچند که مواد کلی تشکیل‌دهنده این دو نوع سیمان مشابه است، اما در مواد تشکیل دهنده سیمان سفید، گچ، سنگ آهک، خاک کائولن و سوخت بدون دوده استفاده می‌شود که در تولید سیمان خاکستری از مقادیر کمتر از این مواد استفاده می‌شود و یا اصلاً استفاده نمی‌شود. سیمان سفید به دلیل داشتن آهک، از مقاومت کم‌تری برخوردار است[۵]. به همین دلیل از سیمان سفید، بیشتر برای زیباسازی فضاهای داخلی و نمای ساختمانی استفاده می‌شود.

کلسیم کربنات یک سنگ معدنی است که در انواع مختلفی از جمله سنگ آهک، سنگ مرمر، گچ و گرانیت وجود دارد. معادن کلسیم کربنات به صورت گسترده‌ای در مناطق مختلف جهان وجود دارد و تقریباً فراوان‌ترین سنگ رسوبی محسوب می‌شود. این ماده را می‌توان به صورت سنگ و کلوخ، پودر و یا ذرات میکرونیزه مورد استفاده قرار داد[۶]. بکارگیری کلسیم کربنات در بتن خواص و فواید قابل توجهی دارد. از جمله اینکه باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود. اما باید میزان مصرف آن به صورت تخصصی و دقیق محاسبه شود. چنانچه بیش از حد لازم از کلسیم کربنات استفاده شود، نتیجه معکوس می‌دهد و مقاومت بتن را کاهش می‌دهد[۷]. همچنین این ماده می‌تواند مقاومت بتن در برابر سایش و عوامل شیمیایی مانند یون کلراید و سولفات را افزایش دهد و از بتن محافظت نماید. کاربرد پودر اکسید کربنات در تولید سیمان و بتن بیشتر به عنوان پرکننده است. استفاده از اکسید کربنات در ساخت بتن می‌تواند مزایای زیادی داشته باشد که کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای یکی از آن‌ها می‌باشد[۸].

قلهکی و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی تجربی عملکرد مکانیکی و ریزساختار ملات سیمانی حاوی مواد زائد بازیافتی در معرض محیط‌های مختلف پرداختند. مواد زائد بازیافتی شامل شیشه، پوسته تخم مرغ، آهن و پودر لاستیک در مقادیر مختلف یعنی ۷، ۱۴ و ۲۱ درصد حجمی به عنوان جایگزین سیمان پرتلند معمولی (OPC) گردید. برای بررسی عملکرد مکانیکی نمونه‌ها، آزمون‌های مقاومت فشاری، کششی و خمشی و همچنین آزمون جذب آب در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزگی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که جایگزینی

سیمان با پودرهای شیشه، آهن و پوسته تخم‌مرغ، عرض ترک‌ها و حجم منافذ بتن را به میزان سه برابر کاهش می‌دهد و پیوند بین خمیر سیمان و مواد افزودنی را تقویت می‌کند[۳۲]. کالیس و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی و بهینه‌سازی فوم بتن حاوی کربنات کلسیم آسیاب شده و الیاف شیشه پرداختند. در این تحقیق از کربنات کلسیم معدنی (GCC) و الیاف شیشه در نسبت‌های مختلف وزنی سیمان برای ساخت بتن استفاده شد و آزمایشات مقاومت خمشی، فشاری و دوام حرارتی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن کربنات کلسیم در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری و افزایش تراکم در بتن خواهد شد. علاوه بر این، افزودن الیاف شیشه در مخلوط بتن، مقاومت خمشی بتن را بهبود بخشید[۹]. چو و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار بتن تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف فولادی و نانو کربنات کلسیم پرداختند. در این تحقیق گزارش شد که افزودن همزمان نانو ذرات و الیاف فولادی باعث افزایش خواص رئولوژیکی بتن می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانو کربنات کلسیم به همراه الیاف شیشه در بتن تاثیر بهتری در افزایش مقاومت فشاری و کششی در بتن دارد[۱۱]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی رفتار ملات سیمانی حاوی دوده سیلیس و سرباره در برابر حرارت پرداختند. در این تحقیق ملات‌های سیمانی حاوی سرباره کوره بلند دانه بندی شده (GBFS) و دود سیلیس (SF) در برابر دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که در دماهای تا ۲۵۰ و ۵۰۰ درجه سانتیگراد یا بیشتر، GBFS و SF می‌توانند به طور موثری عملکرد ملات را بهبود بخشند. از نظر کمی، مقاومت فشاری، کششی و خمشی به ترتیب ۷۳ و ۱۸۰، ۴۵ و ۱۰۰، ۱۰۶ و ۱۱۲ درصد در مواجهه با دماهای پایین و بالا افزایش یافت. علاوه بر این با افزایش دما، ذرات نمونه‌های حاوی SF یا GBFS در مقایسه با نمونه شاهد، از نظر اندازه کمتر کوچک می‌شوند[۳۱]. پاچیده و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی اثر ضایعات پوزولانی بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار ملات سیمانی پرداختند. ضایعات مصرفی در این تحقیق شامل پودرهای آهن، لاستیک، شیشه و پوسته تخم مرغ با نسبت جایگزینی به ترتیب ۷، ۱۴، ۲۱ و ۲۸ درصد وزنی سیمان بوده است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از پوزولان‌ها تا نسبت جایگزینی ۱۴ درصد، مقاومت فشاری را نزدیک به ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، مشاهده شد که تا ۲۸ درصد جایگزینی، مقاومت کششی بیشتر از نمونه شاهد است. بطورکلی استفاده از پوزولان تا ۷ درصد می‌تواند مقاومت کششی را افزایش دهد. اما میزان جذب آب نمونه‌های حاوی پودر شیشه و پوسته تخم مرغ ۳۵ درصد کمتر از سایر نمونه‌های دیگر است[۳۳]. گرابیک و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی و اصلاح سنگدانه بتن بازیافتی با رسوب کربنات کلسیم پرداختند. در این تحقیق با هدف کاهش تخلخل ناشی از افزودن سنگدانه بازیافتی در بتن از ضایعات رسوبی کربنات کلسیم استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۱۰٪ رسوب کربنات کلسیم به جای سیمان در بتن بهترین نتیجه را در کسب میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه خواهد داشت[۱۲]. یوسف نژاد و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی کاربرد نانواکسید آلومین در بهبود برخی خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر سایش بتن پرداختند. در این تحقیق مقادیر نانو اکسید آلومین بکار رفته در نسبت های وزنی ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد جایگزین بخشی از سیمان می‌باشد. همچنین با هدف کاهش هزینه و اجرای راحت‌تر، پاشش محلول نانو اکسید آلومین به صورت رقیق شده طی یک الی چهار لایه بر روی سطح بتن مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۰/۵ ٪ پودر نانو اکسید آلومین در بتن می‌تواند ضمن بهبود نسبی برخی از خواص مکانیکی مورد آزمایش، مقاومت سایشی بتن را نیز تا ۷۷ ٪ افزایش دهد. همچنین نتایج تست سایش نشان داد که ایجاد لایه نانو اکسید آلومین بر روی سطح بتن با وجود بهبود اثربخشی با افزایش تعداد لایه پوشش، در مقایسه با طرح مخلوط ترکیبی از اثرگذاری کمتری برخوردار است[۱۳]. فرخ زاد و همکاران در سال ۱۳۹۹ به بررسی مقایسه تاثیر نانو اکسید کربنات و نانو سیلیس بر خواص بتن خودتراکم پرداختند. در این تحقیق طرح مخلوط‌های مختلف دارای ۰٪، ۱٪، ۲٪، ۳٪ با نانو اکسید کربنات و نانو سیلیس ساخته شد. نتیجه این تحقیق نشان داد که استفاده از نانو اکسید کربنات موجب افزایش مقاومت و دوام در بتن خودتراکم می‌گردد[۱۴]. احسانی و همکاران در سال ۱۳۹۴ به بررسی تاثیر نانو کربنات کلسیم بر مقاومت فشاری سنین اولیه بتن پرداختند. در این تحقیق اثرات افزودن نانو کربنات کلسیم خالص با پوشش کربن و پلیمر بر روی اسلامپ و مقاومت فشاری ۳ و ۷ روزه بتن بررسی شده است. درصد جایگزینی نانو کربنات کلسیم به منظور دستیابی به محدوده مصرف این مواد، ۱، ۳، ۱۰ و ۱۵ درصد وزن سیمان می‌باشد. نسبت آب به سیمان ۰/۴ و عیار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی نانوکربنات کلسیم با پوشش کربن خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد. به طور کلی استفاده از این مواد تا ۱۰ درصد وزن سیمان پیشنهاد شده است[۱۵].

امروزه از اکسید کربنات در مقادیر مختلف به عنوان فیلر در تولید انواع سیمان و بتن استفاده می‌شود. طبق تحقیقات انجام شده مشخص گردیده که اکسید کربنات چسبندگی مواد سیمانی را افزایش می‌دهد[۱۴-۱۱-۱۰]. همچنین در برخی تحقیقات دیگر گزارش شده که کربنات کلسیم خاصیت فوتوکاتالیستی دارد و در ساخت بتن‌های خودتمیزشونده کاربرد دارد[۲۹]. البته میزان مصرف کلسیم کربنات نیز اهمیت زیادی دارد زیرا در صورت استفاده بیش از حد از این ماده، ابتدا مقاومت سیمان افزایش پیدا می‌کند ولی بعد از گذشت مدت زمانی، مقاومت بتن کاهش می‌یابد[۱۲]. از طرف دیگر در صورت افزودن اکسید کربنات، نرخ واکنش آبگیری اولیه سیمان تسریع خواهد یافت. با افزایش مقدار اکسید کربنات، ضریب مقاومت سایشی به صورت تدریجی بیشتر می‌شود و مقاومت در برابر سایش سولفات نیز به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد[۱۱]. همچنین برخی از انواع کلسیم کربنات دارای مقادیر ناچیز کلسیم و یا ناخالصی زیاد می‌باشند که این امر می‌تواند نتیجه معکوس داشته و کیفیت سیمان را کاهش دهد[۹]. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، تاکنون پاسخی برای اثر کربنات کلسیم به همراه سیمان سفید بر روی خصوصیات مکانیکی بتن یافت نشده. همچنین دوام آن در برابر چرخه ذوب-انجماد جز ابهامات مسئله است. بنابراین بررسی تاثیر این ماده در بتن در مناطق مختلف سردسیری یکی از نوآوری‌های این تحقیق است که در ادامه به بررسی آن خواهیم پرداخت.



شکل ۱ روندنما انجام تحقیق

شکل شماره ۱ مراحل انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- سنگدانه

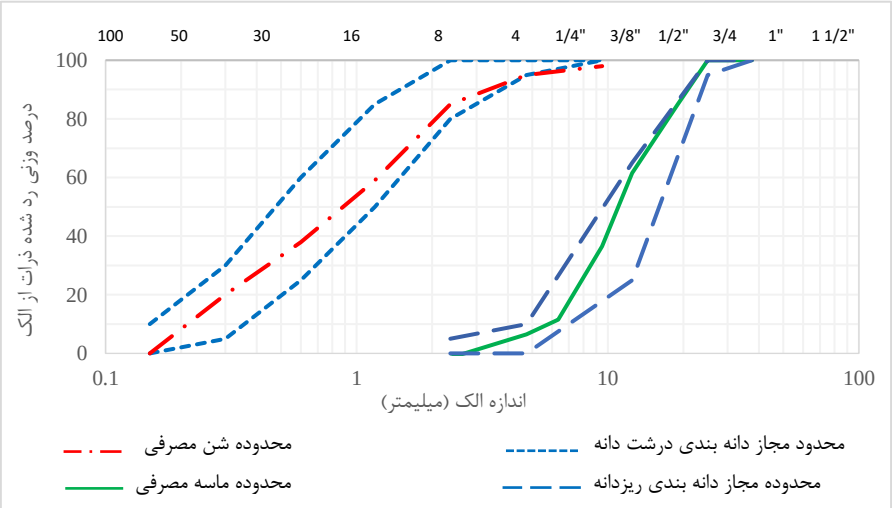
سنگدانه مورد استفاده جهت ساخت بتن در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر می‌باشد که از معادن منطقه دوکوهک استان فارس تهیه گردید. مشخصات فیزیکی این سنگدانه مطابق با شرح جدول شماره ۱ می‌باشد. مدول نرمی ماسه مصرفی مطابق با استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ بدست آمد.

جدول ۱ مشخصات سنگدانه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص خشک	جذب آب
	mm		kg/m^3	%
ماسه	۴/۷۵	۲/۹	۱۶۵۰	۱/۵۷
شن	۱۹	-	۱۳۵۰	۲/۳

۲-۲- دانه‌بندی

در این تحقیق دانه‌بندی سنگدانه و طبقه‌بندی الک‌های شماره‌بندی شده، مطابق با استاندارد ASTM-C136 انجام و در شکل شماره ۲ نمایش داده شده است[۲۱]. میزان وزن و اندازه سنگدانه‌ها با الگوی پیشنهادی استاندارد ASTM-C33 مقایسه و تطبیق داده شد[۲۵]. در شکل شماره ۲ الگوی دانه‌بندی ماسه با خط نقطه قرمز رنگ، الگوی دانه‌بندی شن با خط ممتد سبز رنگ و تعیین حداقل یا حداکثر میزان مجاز دانه‌بندی شن و ماسه طبق استاندارد ASTM-C33 به ترتیب با خطوط خط چین کوچک و بزرگ آبی رنگ نمایش داده شده است.



شکل ۲ منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی

۲-۳- سیمان سفید

برای ساخت نمونه‌ها در این تحقیق از سیمان سفید پرتلند نی‌ریز استفاده شد. آنالیز شیمیایی این سیمان که منطبق بر شناسه فنی شرکت سازنده این محصول می‌باشد در جدول شماره ۲ تشریح شده. سیمان سفید همان سیمان معمولی (خاکستری) است با این

تفاوت که در فرآیند ساخت و تولید میزان آهن و منیزیم آن به میزان کمتر از هشت درصد کاهش یافته و درنتیجه به رنگ سفید متمایل می‌شود[۱۶].

جدول ۲ ساختار شیمیایی سیمان سفید نی‌ریز [۴۳]

نماد شیمیایی	درصد
SiO_2	٪ ۲۲/۷
AL_2O_3	٪ ۴/۱
FE_2O_3	٪ ۶/۳
MgO	٪ ۰/۹
SO_3	٪ ۲/۷
CaO	٪ ۶۶/۷
K_2O	٪ ۰/۵
Na_2O	٪ ۰/۵
LOI	٪۳

۲-۴- فوق روان‌کننده

بدلیل آنکه کلسیم کربنات جاذب آب بوده و بصورت پودر در بتن استفاده می‌شود، باید نسبت آب به سیمان افزایش یابد. از این رو افزایش نسبت آب به سیمان می‌تواند موجب اُفت استحکام بتن شود. در صورتیکه عناصر ساخت بتن به خوبی مخلوط نگردد، کلسیم کربنات ته‌نشین شده و باعث اختلال در کیفیت و دوام بتن خواهد شد. بنابراین استفاده از مواد کاهنده آب مانند انواع روان‌کننده جهت حفظ روانی و حفظ کیفیت ضروری است. در این تحقیق برای رسیدن به پخش یکنواخت افزودنی و حفظ روانی بتن از فوق‌روان‌کننده پایه پلی‌کربوکسیلات[۱]، استفاده گردید. این ماده جزء جدیدترین نسل فوق‌روان‌کننده به حساب می‌آید که با داشتن زنجیره‌های بلند جانبی در ساختار مولکولی علاوه بر دافعه شدید ذرات سیمان با ایجاد فضایی بین ذرات مانع از نزدیک شدن و چسبیدن دوباره ذرات شده و بیشترین اثر روان‌کنندگی را ایجاد می‌کند[۱۳]. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق و به شرح جدول شماره ۳ می‌باشد.

جدول ۳ مشخصات فیزیکی فوق روان کننده [۱]

وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
۱/۱ gr/cm^3	ASTM-C1017	٪ ۰/۱	۵/۵۸	مایع	۰/۱ تا ۱ ٪ وزن سیمان

۲-۵- کلسیم کربنات

کلسیم کربنات یک باز معدنی است که ساختار کریستالی دارد. این ماده غیر سمی و بی‌بو است و معمولاً به صورت پودر کرکی سفید رنگ یافت می‌شود. کربنات کلسیم مستقیماً از معدن استحصال شده و در صنایع مختلف استفاده می‌شود. این ماده به طور طبیعی در پوسته زمین بصورت سنگ گچ، سنگ آهک و سنگ مرمر یافت می‌شود[۱۴]. فرمول شیمیایی این محصول $CaCO_3$ و با نام‌های تجاری گچ فرنگی، سنگ آهک، کلسیت، آراگونیت هم یافت می‌شود[۱۱]. در صنعت ساخت و ساز از کلسیم کربنات به عنوان پرکننده بتن استفاده

[۱] فوق‌روان‌کننده مصرفی مدل Super Plast PC5000 محصول شرکت رزین سازان فارس.

می‌شود که باعث افزایش دوام و زیبایی ظاهری جهت استفاده در محوطه‌سازی ساختمانی می‌شود[۱۲]. کلسیم کربنات مصرفی در این تحقیق از نوع معدنی بوده که از معادن استان سمنان استخراج گردیده و دارای خلوص حدود ۹۹٪ می‌باشد. ساختار شیمیایی و فیزیکی این ماده مطابق با جدول شماره ۴و ۵ می‌باشد.

شکل ۳ پودر کلسیم کربنات مصرفی

جدول ۴ ساختار شیمیایی کلسیم کربنات]مأخذ:نگارندگان[

نماد شیمیایی	درصد
SiO_2	٪ ۰/۹
Al_2O_3	٪ ۰/۰۶
Fe_2O_3	٪ ۰/۰۳
CaO	٪ ۵۴/۷
Na_2O	٪ ۰/۰۳
MgO	٪ ۰/۸
TiO_2	٪ ۰/۰۱۹
P_2O_5	٪ ۰/۱۴
L.O.I	٪ ۴۳/۹

جدول ۵ مشخصات فیزیکی کلسیم کربنات]مأخذ:نگارندگان[

حالت فیزیکی	اندازه ذرات	وزن مخصوص	چگالی ظاهری	رطوبت طبیعی	رنگ ماده
	µ	gr/cm^2	gr/cm^3	٪	
پودر جامد	۵۰ - ۴۵	۲/۷۱	۰/۷ - ۰/۵	۰/۳ - ۰/۲	سفید

۳- برنامه آزمایشگاهی

برنامه آزمایشگاهی در این تحقیق شامل ساخت ۴۵ نمونه بتن با نسبت‌های مختلف وزنی اکسید کربنات می‌باشد. برای سنجش مقاومت فشاری هر طرح مخلوط دو آزمونه تهیه گردید و میانگین آن، بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. همچنین برای تعیین دوام بتن

در برابر سیکل یخ زدگی، پس از تکرار ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد، میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت آن اندازه‌گیری شد. تعداد، سن، ابعاد نمونه‌ها و استاندارد مربوط به آن‌ها مطابق جدول شماره ۶ می‌باشد.

جدول ۶ مبنای استاندارد و تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

شرح آزمایش	شماره استاندارد	نمونه ۷ روزه	نمونه ۲۸ روزه	ابعاد نمونه (سانتیمتر)
تعیین اسلامپ	ASTM C143	-	-	-
تعیین مقاومت فشاری بتن	BS-EN-12390	۱۰	۱۰	۱۵X۱۵X۱۵ مکعبی
تعیین مقاومت کششی	ASTM-C496	-	۵	۳۰X۱۵ استونه‌ای
جذب آب بتن	ASTM-C642	-	۵	۱۵X۱۵X۱۵ مکعبی
دوام در برابر سیکل ذوب و یخبندان	ASTM-C666-B	-	۱۵	۱۵X۱۵X۱۵ مکعبی

۴- طرح اختلاط

مبنای طرح اختلاط بکار گرفته شده برای ساخت بتن در این تحقیق، استاندارد ACI-211 به روش وزنی و تجربه آزمایشگاهی بوده که بر اساس نوع مصالح مصرفی بهینه‌یابی شد. در طرح مخلوط شاهد، عیار سیمان مصرفی ۴۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب تعیین شد. سنگدانه مورد استفاده بصورت کاملاً خشک و با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و نسبت آب به سیمان ۰/۵ مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه جهت کاهش حجم مصرفی سیمان و افزایش کیفیت و رنگ پذیری بتن، از پودر کلسیم کربنات در نسبت‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به جای بخشی از سیمان سفید استفاده شد. قابل ذکر است که جهت حفظ اسلامپ بتن از افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات به میزان ثابت ۱٪ وزنی سیمان استفاده گردید. جدول شماره ۷ میزان عناصر مصرفی برای طرح مخلوط‌های مورد بررسی، در مقیاس یک متر مکعب را نشان می‌دهد.

جدول ۷ طرح مخلوط مورد استفاده جهت انجام آزمایش

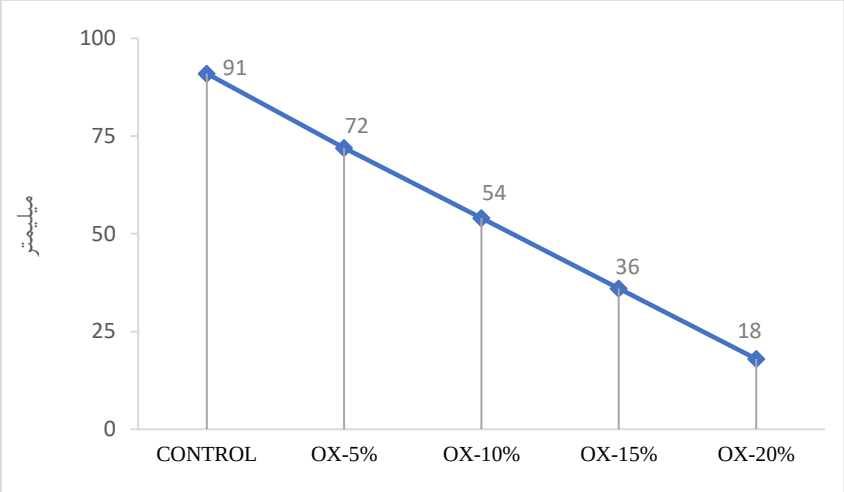
نام	سیمان سفید	ماسه	شن	اکسید کربنات	آب	فوق روان کننده
	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³	kg/m³
CONTROL	۴۵۰	۱۲۸۰	۷۲۰	۰	۲۲۵	۴/۵
OX-5%	۴۲۷/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۲۲/۵	۲۲۵	۴/۵
OX-10%	۴۰۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۴۵	۲۲۵	۴/۵
OX-15%	۳۸۲/۵	۱۲۸۰	۷۲۰	۶۷/۵	۲۲۵	۴/۵
OX-20%	۳۶۰	۱۲۸۰	۷۲۰	۹۰	۲۲۵	۴/۵

در این تحقیق سنگدانه‌های مورد استفاده اعم از شن و ماسه به مدت ۷ روز در دمای محیط بالای ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و بصورت کاملاً خشک و بدون رطوبت در بتن استفاده شد. برای افزایش کیفیت رنگ بتن ابتدا شن، ماسه، نیمی از آب و نیمی از کلسیم کربنات اضافه و به مدت ۲ دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. این کار باعث می‌شود تا سنگدانه‌ها از ابتدا رنگ مربوطه را به خود جذب

نمایند و باعث افزایش کیفیت رنگ پذیری و یکنواختی رنگ در بتن گردد. در ادامه سیمان، باقیمانده کلسیم کربنات و باقیمانده آب طرح مخلوط اضافه و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. در انتها فوق روان کننده به آرامی‌اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر مخلوط شدند. پس از آن آزمایش وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و سپس قالب گیری شدند. به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جدار قالب، ابتدا جداره‌های داخلی قالب با یک لایه‌ی نازک روغن معدنی آغشته گردید و سپس بتن در چند لایه داخل قالب ریخته شد. تراکم بتن‌های ساخته شده نیز در سه لایه و با زدن ۲۵ ضربه به هر لایه توسط یک میله‌ی فلزی مخصوص انجام گردید. در نهایت نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتیگراد قرار داده شد و بعد از آن به مدت ۷ و ۲۸ روز در حوضچه آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند.

۵- یافته‌ها

۵-۱- اسلامپ



یکی از ارکان مهم و اساسی بتن مناسب نیز میزان روانی یا اسلامپ آن می‌باشد بطوریکه با در نظر گرفتن نوع کاربری بتن، اسلامپ یا روانی آن باید بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلیمتر تنظیم گردد[۱۶]. شکل شماره ۵ مقایسه نتایج بدست آمده از اسلامپ هر طرح مخلوط را نشان می‌دهد. بطورکلی کلسیم کربنات جاذب آب است و بدیهی است که در ترکیب با بتن، میزان زیادی از آب بتن را به خود جذب نماید. این پدیده با افزایش میزان استفاده از کلسیم کربنات تصاعدی افزایش می‌یابد. بطوریکه افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ کلسیم کربنات در بتن باعث کاهش به ترتیب ۲۰٪، ۴۱٪، ۵۹٪ و ۸۰٪ اسلامپ بتن خواهد شد. از طرفی استفاده از فوق روان کننده جهت حفظ کارایی بتن بسیار موثر بوده. در غیراینصورت و در صورت عدم استفاده از فوق روان کننده قطعاً میزان روانی نمونه‌های دارای کلسیم کربنات از محدوده مجاز خارج خواهد بود.

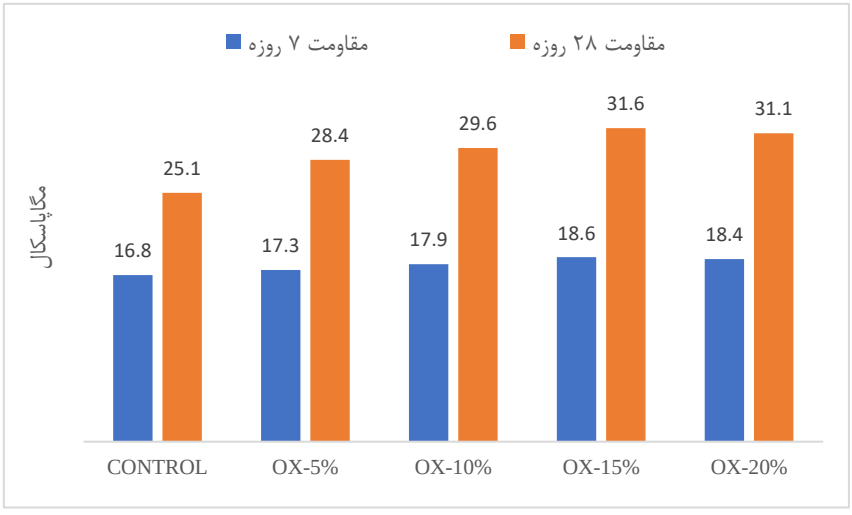
شکل ۴ آزمایش اسلامپ بر روی برخی از نمونه های تحقیق

شکل ۵ مقایسه اسلامپ نمونه‌های بتنی

۵-۲- مقاومت فشاری

بدیهی است که استفاده از اکسید کربنات در بتن بدلیل اندازه ریز باعث کاهش تخلخل، افزایش تراکم و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. همچنین عمده ساختار تشکیل دهنده کلسیم کربنات نیز کلسیم می‌باشد که این ماده نیز باعث تشکیل هیدروکسید کلسیم در فرایند هیدراسیون سیمان شده و چسبندگی سیمان را افزایش می‌دهد. پیشینیه تحقیق نشان می‌دهد که عمدتاً استفاده و بکارگیری اکسید کربنات باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود[۱۴,۱۲,۹]. نتایج بدست آمده از میزان مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش در این تحقیق موید این ادعا است. بنابراین استفاده از حداکثر ۱۵٪ وزنی کلسیم کربنات بجای بخشی از سیمان، میزان مقاومت فشاری را افزایش می‌دهد. اما استفاده از مقادیر بیش از آن ممکن است اثر سوء بر مشخصات مکانیکی بتن داشته باشد. افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ اکسید کلسیم کربنات در بتن باعث افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه به ترتیب ۳ ٪، ۶ ٪، ۱۰ ٪ و ۸ ٪ و افزایش مقاومت ۲۸ روزه به میزان به ترتیب ۱۲ ٪، ۱۵ ٪، ۲۰ ٪ و ۱۹ ٪ گردید.

شکل ۶ تصویری از روند انجام آزمایش مقاومت فشاری بتن

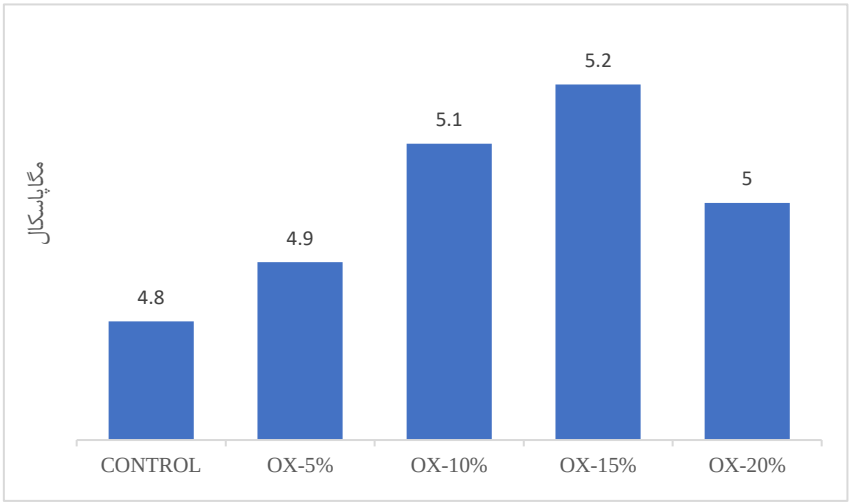


شکل ۷ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روزه

۵-۳- مقاومت کششی

تاکنون ثابت شده که میزان مقاومت کششی بتن ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری آن دارد. بنابراین عوامل موثر و تاثیرگذار بر روی مقاومت فشاری بتن بر روی میزان مقاومت کششی اثرگذار خواهد بود[۱۷]. در این تحقیق میزان مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه به روش دونیم شدن (برزیلین) مورد آزمایش قرار گرفت[۲۲] و نتایج آن در جدول شکل ۹ ضمیمه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که استفاده از کلسیم کربنات به میزان حداکثر ۱۵٪ وزنی بجای سیمان سفید در بتن می‌تواند باعث افزایش چسبندگی بین مصالح شود. بطوریکه افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ کلسیم کربنات در بتن باعث افزایش به ترتیب ۲٪، ۶٪، ۸٪ و ۴٪ اسلامپ بتن خواهد شد.

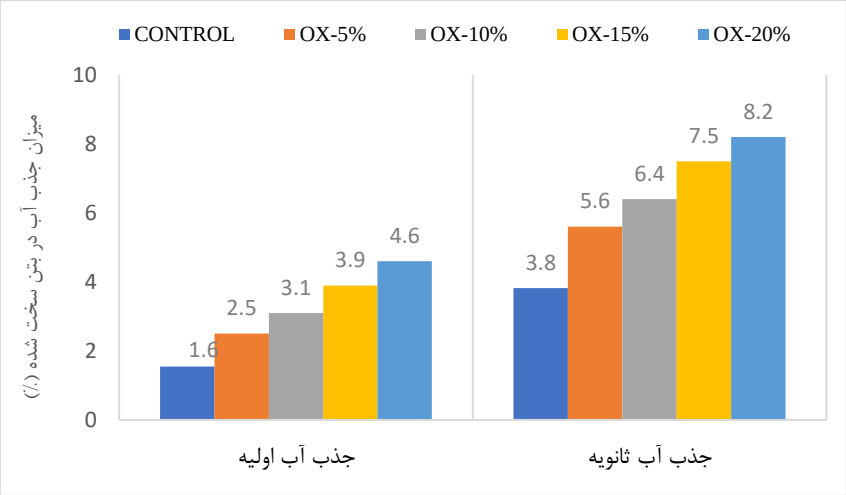
شکل ۸ آزمایش مقاومت کششی و شکست نمونه استوانه‌ای پس از آزمایش تعیین مقاومت کششی



شکل ۹ مقایسه نتایج مقاومت کششی نمونه‌های بتنی

۵-۴- جذب آب بتن سخت شده

در این تحقیق آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده در سنین ۳۰ دقیقه و ۷۲ ساعت انجام شد که نتایج آن به شرح شکل شماره ۱۰ می‌باشد. آزمایش مذکور بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه پس از ۲۴ ساعت قرار گیری در دمای ۱۱۰ درجه انجام گرفت[۲۶]. نتایج



شکل ۱۰ مقایسه میزان جذب آب اولیه و ثانویه نمونه‌ها

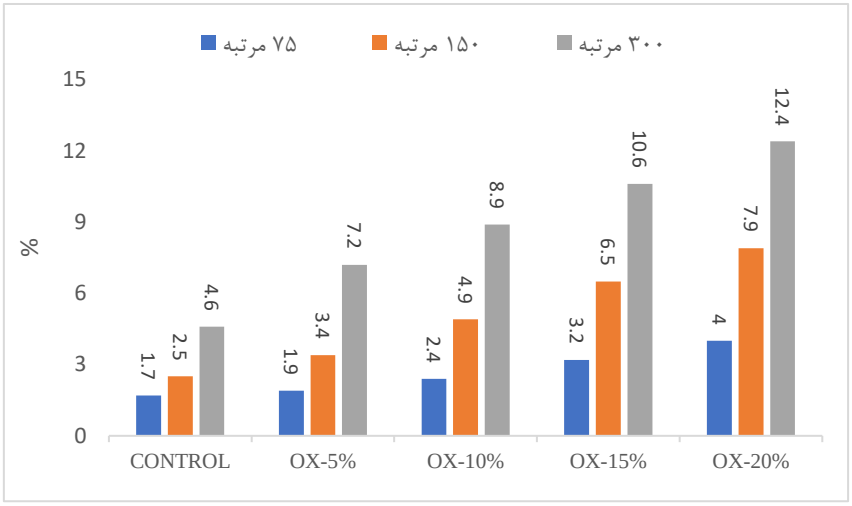
بدست آمده نشان می‌دهد که میزان جذب آب بتن در نمونه‌های دارای کلسیم کربنات به مراتب بیشتر از نمونه شاهد می‌باشد که علت آن هم باید به میزان جذب آب بالای کلسیم کربنات در بتن نسبت داد. بطوریکه افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ کلسیم کربنات در بتن باعث افزایش به ترتیب ۲/۵٪، ۳/۱٪ و ۳/۹٪ و ۴/۶٪ جذب آب اولیه و ۵/۶٪، ۶/۴٪، ۷/۵٪ و ۸/۲٪ جذب آب ثانویه در بتن گردید.

شکل ۱۱ توزین نمونه مکعبی خشک شده پس از جذب آب در بتن

۵-۵- دوام یخزدگی

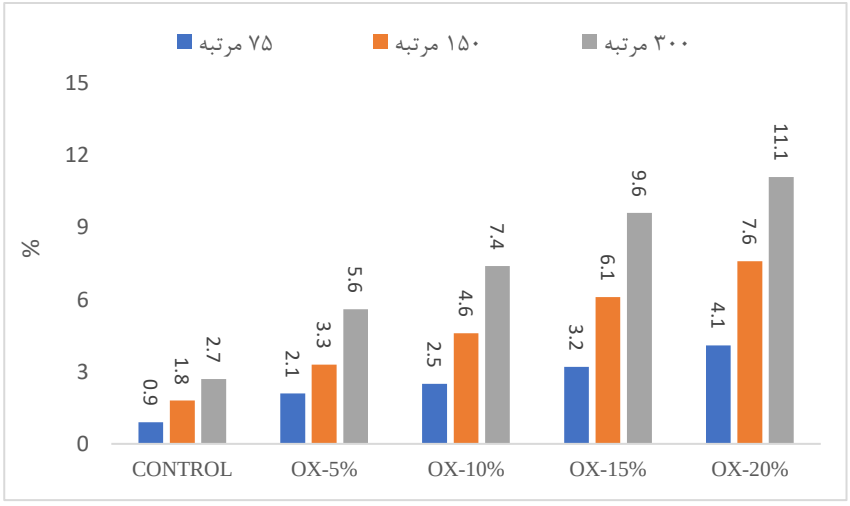
دوام یخ زدگی نمونه‌های دارای نسبت‌های مختلف کلسیم کربنات از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مساحت زیادی از کشور ایران در مناطق سردسیری قرار دارد و ممکن است استفاده از این بتن جهت ساخت و ساز در مناطق سردسیر مشکلات عدیده‌ای را بوجود

آورد[۱۹]. در این تحقیق جهت سنجش میزان دوام بتن در برابر چرخه یخبندان از استاندارد ASTM-C666-B تبعیت شده است[۲۳]. نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح شکل شماره ۱۲ و ۱۳ می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده مشخص گردید که افزودن ٪۵، ٪۱۰، ٪۱۵ و ٪۲۰ کلسیم کربنات در بتن پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و انجماد باعث کاهش مقاومت فشاری به میزان به ترتیب ٪۷/۲، ٪۸/۹، ٪۱۰/۶ و ٪۱۲/۴ و کاهش وزن به میزان به ترتیب ٪۵/۶، ٪۷/۴، ٪۹/۶ و ٪۱۱/۱ می‌گردد. واضح است که دلیل اُفت مقاومت و وزن بتن، ناشی از جذب بالای آب توسط این ماده افزودنی می‌باشد. بطوریکه وجود این حفرات پر از آب در هر سیکل ذوب و انجماد باعث



شکل ۱۲ مقایسه میزان اُفت مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها پس از قرارگیری در معرض چرخه انجماد

انبساط و انقباض در بتن گردیده و نیز زوال و خرابی بتن را در پی خواهد داشت. انتظار می‌رفت با افزایش تراکم ناشی از افزودن کلسیم کربنات در بتن، میزان دوام بتن در برابر چرخه یخبندان افزایش یابد اما بدلیل آنکه این ماده جذب آب بالایی دارد سبب افزایش نسبت آب در منافذ بتن و کاهش دوام یخ زدگی خواهد شد. به استناد از معیار استاندارد مذکور نیز کاهش وزن بتن بیش از ۵ ٪ یا اُفت مقاومت فشاری بتن بیش از ۱۰ ٪ در اثر چرخه یخبندان نشانه‌ی زوال و خرابی بتن می‌باشد[۱۹]. بنابراین می‌توان اذعان داشت که افزودن کلسیم کربنات در بتن در نواحی سردسیر باعث خرابی یا زوال زودرس بتن می‌گردد. اما استفاده از این ماده در نواحی معتدل یا گرمسیر بلامانع است.



شکل ۱۳ آزمایش دوام بتن در برابر سیکل ذوب و انجماد بتن و فرایند انجام آن

شکل ۱۴ مقایسه میزان اُفت وزن تمامی نمونه‌ها پس از قرار گیری در معرض چرخه انجماد

۵-۶- شاخص اقتصادی

یکی از پارامترهای حساس در بهینه سازی طرح اختلاط بتن، بدست آوردن طرحی اقتصادی و در عین حال با عملکرد مطلوب می‌باشد. بتن جزء مصالحی است که به صورت گسترده در ساخت و سازها مورد استفاده قرار می‌گیرد. بتن دارای مزیت‌های زیادی از جمله سختی بالا، قیمت ارزان (نسبت به سایر مصالح)، مقاومت بالا و دوام قابل قبول است[۲۰]. مطابق جدول شماره ۸ شاخص اقتصادی طرح بر اساس هزینه تمام شده هر طرح اختلاط نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه محاسبه گردیده (بر اساس قیمت در زمستان ۱۴۰۱). همچنین میزان شاخص مقاومت نسبت به هزینه ساخت با پارامتر شاخص نمایش داده شده که این معیاری برای توجیه اقتصادی حالت مصرفی را نشان می‌دهد. هر چه عدد شاخص کمتر باشد بیانگر غیر اقتصادی بودن طرح مخلوط مذکور می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده ازیافته‌های این بخش محرز شد که طرح مخلوط دارای ۱۵٪ و ۲۰٪ اکسید کلسیم کربنات دارای توجیه اقتصادی بالایی می‌باشند. همچنین ضمن در نظر گرفتن مزایایی مانند توسعه پایداری و حفظ محیط زیست و کاهش استفاده سیمان، استفاده از این طرح نیز می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد.

جدول ۸ شاخص اقتصادی بدست آمده به ازای هزینه ساخت/ مقاومت فشاری

نام طرح مخلوط	هزینه ساخت‌یک متر مکعب بتن	مقاومت فشاری	شاخص اقتصادی طرح
	تومان	۲۸ روزه	
CONTROL	۱/۴۴۰/۰۰۰	۲۵/۱	۱۷/۴۰
OX-5%	۱/۴۱۷/۰۰۰	۲۸/۴	۲۰/۰۴
OX-10%	۱/۳۹۵/۰۰۰	۲۹/۶	۲۱/۲۱
OX-15%	۱/۳۷۲/۰۰۰	۳۱/۶	۲۳/۰۳
OX-20%	۱/۳۵۰/۰۰۰	۳۱/۱	۲۳/۰۳

۶- بحث

در این تحقیق تلاش گردید تا مزایا و معایب استفاده از کلسیم کربنات که نوعی پسماند معدنی تلقی می‌شود در بتن مورد بررسی قرار گیرد. کشور ایران دارای حجم زیادی از پسماندهای معدنی و زباله‌های صنعتی می‌باشد. متاسفانه در حال حاضر سازوکاری برای ایجاد بازیافت و بازآوری این مصالح وجود ندارد[۲۸]. علاوه بر آن مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان باعث تولید دی اکسید کربن و آلودگی هوای کلانشهرها می‌شود. همچنین محدودیت‌های تامین انرژی (برق و گاز) مورد نیاز کارخانجات تولید سیمان بعضاً باعث اختلال در روند تولید و افزایش مقطعی قیمت سیمان می‌گردد. بنابراین لازم است تا تدابیری برای کاهش حجم سیمان مصرفی بکار گرفته شود. وجود این مشکلات و تهدیدها امروزه ایجاب می‌کند تا برای کاهش تولید سیمان و نیز کاهش حجم پسماندهای معدنی به چرخه بازیافت مصالح روی آوریم و بوسیله بازیافت این پسماند در تولید بناهای جدید اقدامات موثری صورت گیرد. لذا با توجه به منافع اقتصادی و زیست محیطی بلند مدت با بهره‌گیری از سرمایه‌گذاری بخش خصوصی، می‌توان در جهت توسعه بازیافت نیز قوانینی وضع گردیده و اجرا می‌شود.

اولین و مهم‌ترین علت استفاده از پودر کربنات کلسیم در تولید بتن افزایش مقاومت فشاری سیمان و بتن است. البته میزان کربنات کلسیم مصرفی در تولید بتن برای رسیدن به این امر حائز اهمیت فراوانی است. زیرا در صورت مصرف بیش از اندازه کربنات کلسیم مقاومت سیمان کاهش پیدا خواهد کرد. پیشینیه تحقیق نشان می‌دهد که عمدتاً استفاده و بکارگیری اکسید کربنات باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌شود و میزان مصرف آن بین ۱۰٪ تا ۱۵٪ وزنی سیمان توصیه شده است[۱۴,۱۲,۹]. بنابراین باید میزان کربنات کلسیم مصرفی در تولید بتن با دقت و به صورت تخصصی محاسبه شود. بر اساس آزمایشات انجام شده در این زمینه، بهترین میزان مصرف کربنات کلسیم در تولید بتن در حدود ۱۵٪ وزنی سیمان تعیین شد. همچنین استفاده از پودر کربنات کلسیم در تولید بتن بهبود رنگ سطح آن برای کاربردهای معماری است. استفاده از کربنات کلسیم در تولید بتن باعث می‌شود تا بتوان از رنگ‌های مختلف برای تزئین آن استفاده کرد.

۷- نتیجه گیری

برخی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

۱. استفاده از کلسیم کربنات بدلیل اندازه ریز ذرات، سبب افزایش تراکم بتن می‌شود که این مهم منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن خواهد شد. بطوریکه استفاده از ۱۵٪ کلسیم کربنات باعث افزایش ۲۰٪ مقاومت فشاری بتن خواهد شد.

۲. استفاده از کلسیم کربنات باعث تشکیل هیدروکسید کلسیم در سیمان می‌شود که این مهم منجر به افزایش مقاومت فشاری و کششی بتن خواهد شد. بطوریکه افزودن ۱۵٪ کلسیم کربنات در بتن باعث افزایش ۷/۷ ٪ مقاومت کششی خواهد شد.

۳. استفاده از کلسیم کربنات باعث افزایش میزان جذب آب بتن خواهد شد که این مهم میزان اسلامپ یا روانی بتن را کاهش می‌دهد. بطوریکه استفاده از ۲۰٪ کلسیم کربنات می‌تواند تا ۸۰٪ میزان اسلامپ را کاهش دهد.

۴. استفاده از کلسیم کربنات در بتن، باعث زوال زودرس بتن در برابر چرخه انجماد خواهد شد. بطوریکه استفاده از ۲۰٪ کلسیم کربنات می‌تواند تا ۱۲/۴٪ مقاومت فشاری بتن و تا ۱۱/۱٪ وزن بتن را کاهش دهد.

۵. استفاده از ۱۵٪ و ۲۰٪ کلسیم کربنات با شاخص اقتصادی ۲۳/۰۳ بعنوان اقتصادی‌ترین طرح اختلاط بتن در این تحقیق شناخته شد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شهر شیراز جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

[1] Farshchi, Rafia. (1388). Architecture In The Era Of Climate Change. Safa, 18(48), 65-78. Sid. Https://Sid.Ir/Paper/94344/Fa

[2] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global Strategies And Potentials To Curb Co_2 Emissions In Cement Industry. Journal Of Cleaner Production, 51, 142-161.

[3] 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

[4] Martínez-Ramírez, S., & Frías, M. (2009). The Effect Of Curing Temperature On White Cement Hydration. Construction And Building Materials, 23(3), 1344-1348.

[5] Kulanthaivel, P, Soundara, B, Velmurugan, S, & Naveenraj, V. (2021). Experimental Investigation On Stabilization Of Clay Soil Using Nano-Materials And White Cement. Materials Today: Proceedings, 45, 507-511.

[6] Ehsani, H, Dehghani, A, Labafzadeh, R, Saleh, M. (2014). The Effect Of Calcium Nanocarbonate On The Compressive Strength Of Concrete At Early Ages. National Conference Of New Materials And Structures. Sid. Https://Sid.Ir/Paper/891599/Fa

[7] Farrokhzad, R, Divan Dari, J. (2019). Comparison Of The Effect Of Nano Calcium Carbonate And Nano Silica On The Properties Of Self-Compacting Concrete. Structural And Construction Engineering, 7(4), 187-201. Doi: 10.22065/Jsce.2018.143253.1624

[8] Seifan, M, Ebrahiminezhad, A, Ghasemi, Y, Berenjian, A. (2019). Microbial Calcium Carbonate Precipitation With High Affinity To Fill The Concrete Pore Space: Nanobiotechnological Approach. Bioprocess And Biosystems Engineering, 42, 37-46.

[9] Calis, G., Yildizel, S. A., Erzin, S., Tayeh, A. (2021). Evaluation And Optimisation Of Foam Concrete Containing Ground Calcium Carbonate And Glass Fibre (Experimental And Modelling Study). Case Studies In Construction Materials, 15, E00625.

[10] Khalaf, M. A., Cheah, C. B., Ramli, M., Ahmed, N. M., Al-Asady, A. M. A., Ali, A. M. A, Tangchirapat, W. (2021). Engineering And Gamma-Ray Attenuation Properties Of Steel Furnace Slag Heavyweight Concrete With Nano Calcium Carbonate And Silica. Construction And Building Materials, 267, 120878.

[11] Chu, S. H., Li, L, & Kwan, A. K. H. (2021). Development Of Extrudable High Strength Fiber Reinforced Concrete Incorporating Nano Calcium Carbonate. Additive Manufacturing, 37, 101617.

[12] Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D., & Krupa, D. (2012). Modification Of Recycled Concrete Aggregate By Calcium Carbonate Biodeposition. Construction And Building Materials, 34, 145-150.

[13] Yousefinejad, H, Jabari, M. (1401). Application Of Aluminum Nanooxide In Improving Some Mechanical Properties And Increasing The Wear Resistance Of Concrete. Amirkabir Civil Engineering Journal, 54(11), 16-16. Doi: 10.22060/Ceej.2022.21040.7603
[14] Farrokhzad, R, Divan Dari, J. (2019). Comparison Of The Effect Of Nano Calcium Carbonate And Nano Silica On The Properties Of Self-Compacting Concrete. Structural And Construction Engineering, 7(4), 187-201. Doi: 10.22065/Jsce.2018.143253.1624
[15] Ehsani, H, Dehghani, A, Labafzadeh,R Saleh.M (2014). The Effect Of Calcium Nanocarbonate On The Compressive Strength Of Concrete At Early Ages. National Conference Of New Materials And Structures. Sid. Https://Sid.Ir/Paper/891599/Fa
[16] 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
[17] Zargar, Z, Rezaeifar, O, Qalehaki, M. (1401). Evaluation Of The Effectiveness Of Straw Fibers On The Mechanical Characteristics Of Concretes Containing Zeolite And Bentonite. Amirkabir Civil Engineering Journal, 54(3), 811-830. Doi: 10.22060/Ceej.2021.18986.7034
[18] Ramzanianpour. A. A., Ramzanianpour. A. M., Zulfiqaranseb. A. (2014) .The Role Of Silica Fume And Silica Fume Mixed Cements In The Mechanical Properties And Durability Of Concrete. - 7th Annual Congress Of Concrete Technology, Tehran, Iran.
[19] Homayoun, M. J., Aghamajidi, R., Bazaee, A, & Mansouri, B. (2020). Studying The Behavior And The Freezing Endurance Of Heavy Concrete With Nano-Silica Gel And Ilmenite Powder In Different Volume Ratios. Journal Of Concrete Structures And Materials, 7(2), 89-110.
[20] Azad. B, Bazaee. A, (2020). Comparison Of Cost And Time Of Construction Rccp And Asphalt Surface (Case Study Of Shiraz). Journal Of Concrete Structures And Materials, 7(1), 114-136.
[21] Astm C136, (2014). Standard Test Method For Sieve Analysis Of Fine And Coarse Aggregates, Astm International, West Conshohocken, U.S.A.
[22] Astm C496,(2017). Standard Test Method For Splitting Tensile Strength Of Cylindrical Concrete Specimens, Astm International, West Conshohocken, U.S.A.
[23] Astm C666,(2019). Standard Test Method For Resistance Of Concrete To Rapid Freezing And Thawing, U.S.A.
[24] Iran Concrete Standard, (1400), The Sixth Chapter, Durability Or Reliability Of Concrete, 114-124.
[25] Astm C33,(2018). Standard Specification For Concrete Aggregates., U.S.A.
[26] Astm C33,(2022). Standard Test Method For Density, Absorption, And Voids In Hardened Concrete., U.S.A.
[27] Camiletti, J., Soliman, A. M., Nehdi, M. L. (2013). Effect Of Nano-Calcium Carbonate On Early-Age Properties Of Ultra-High-Performance Concrete. Magazine Of Concrete Research, 65(5), 297-307.
[28] Akhundi, M, Ramsht, M Hassan, Pour R, Gulsurat Pahlaviani, A. (1400). Presenting A New Method For The Production Of Environmentally Friendly Concrete Using Waste Plastic (Pet) And Silica Fume And Examining Its Mechanical Characteristics And Durability In Roller Concrete Pavement. Amirkabir Civil Engineering Journal, 53(3), 1107-1116. Doi: 10.22060/Ceej.2020.16789.6346
[29] Diamanti, M. V., Luongo, N., Massari, S., Spagnolo, S. L., Daniotti, B., Pedeferri, M. P. (2021). Durability of self-cleaning cement-based materials. Construction and Building Materials, 280, 122442.
[30] Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. Journal of Structural Fire Engineering, 11(2), 221-246.
[31] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or Granulated Blast-Furnace Slag. Journal of Building Engineering, 24, 100757.
[32] Gholhaki, M., Sharbatdar, M., & Pachideh, G. (2022). An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments. Journal of Building Engineering, 61, 105275.
[33] Pachideh, G., Gholhaki, M., & Ketabdari, H. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. Journal of Building Engineering, 29, 101178.