Iranian Concrete Society

The Effect of Waste Brick Powder on the Resistance and Durability of Concrete Freezing With the Aim of Making Recycled Concrete in Sustainable Development

Leila Shahryari*
Assistant professor, Department of civil Engineering , Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, IranLeila.
shahryari@iau.ac.ir

Mahmoudreza golshan
Instructor, Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran

Farhad avaznezhad
Instructor, Department Of Architecture And Urban Planning, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran
Research paper

Abstract

Today, the issue of environment in Iran has become one of the critical problems. The production of pollutants and the release of carbon dioxide gas in the air and on the other hand the production of garbage and construction waste in the past years have caused a lot of damage to the environment and imposed a lot of costs on the municipalities. According to statistics, cement factories are the second producer of CO2 gas, which accounts for more than 5% of all pollution in the world. Also, the high volume of construction waste production due to the destruction of dilapidated buildings is very high. Therefore, recycling construction materials can be a good way to reduce construction costs and prevent environmental degradation. In this research, with the aim of producing environmentally friendly concrete to reduce the use of cement, reduce costs, recycle materials and reduce environmental pollution, the behavior of concrete was investigated using waste brick waste. For this purpose, waste brick from the destruction of the building was collected and pulverized to the size of 150 microns and used in weight amounts of 5%, 10%, 15% and 20% replacing part of cement in concrete. Further, slump tests, compressive strength, water absorption and freezing durability were conducted to investigate the behavior of this concrete. Also, to determine the chemical structure of the recycled brick powder, an XRD test was performed and an XRF test was performed to identify its phases. The results of this research showed that the use of 5% recycled brick powder in concrete only reduces the 90-day compressive strength by 2.4%, and its use in non-structural elements is justified.

Keywords: Green Concrete, Brick Powder, Environmentally Friendly Concrete, Construction Waste Recycling, Concrete Freezing Durability.

***Corresponding Auther:** Leila shahryari
shahryari, L., Golshan, M. R., yousefnezhad, F. The Effect of Waste Brick Powder on the Resistance and Durability of Concrete Freezing With the Aim of Making Recycled Concrete in Sustainable Development. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2023; 8(1): 139-118.
http://doi.org10.30478/jcsm.2023.400173.1324
2538-5828/ © 2023 The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۲-۰۳-۱۳
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲-۰۶-۱۲

تاثیر پودر آجر ضایعاتی بر مقاومت و دوام یخزدگی بتن با هدف ساخت بتن بازیافتی در توسعه پایدار

لیلا شهریاری*

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
Leila.shahryari@iau.ac.ir

(نویسنده مسئول)

محمودرضا گلشن

مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفهای، تهران، ایران
Mgolshan@tvu.ac.ir

فرهاد عوض نژاد

مربی، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران
Favaznezhad@tvu.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

امروزه مسئله محیط زیست در ایران تبدیل به یکی از مشکلات بحرانی شده. تولید آلاینده‌ها و انتشار گاز دی اکسید کربن در هوا و از طرف دیگر تولید زباله و پسماندهای ساختمانی طی سالهای گذشته باعث بروز آثار جبرانناپذیر به اکوسیستم و محتمل شدن هزینه‌های بالا به شهرداریها شده است. طبق آمار منتشر شده، کارخانجات سیمان دومین تولید کننده گاز CO_2 در دنیا بشمار میآیند که بیش از ۵٪ از سهم جهانی تولید آلاینده را به خود اختصاص دادهاند. از طرف دیگر تولید بالای پسماند ساختمانی ناشی از تخریب بناهای فرسوده حجم قابل توجهی را به خود تخصیص داده. بنابراین بازیافت مصالح ساختمانی می‌تواند روش مناسبی برای کاهش هزینه‌های ساخت و جلوگیری از تخریب محیط زیست باشد. در این تحقیق با هدف تولید بتن دوستدار محیط زیست در جهت کاهش استفاده از سیمان، کاهش هزینه‌ها، بازیافت مصالح و کاهش آلودگی محیط زیست اقدام به بررسی رفتار بتن با استفاده از پسماند آجر ضایعاتی گردیده. بدین منظور آجر ضایعاتی ناشی از تخریب بنای فرسوده جمعآوری گردید و تا اندازه ۱۵۰ میکرون پودر شد و در نسبت‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ بجای بخشی از سیمان در بتن استفاده گردید. در ادامه برای بررسی رفتار این بتن آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری، جذب آب و دوام یخ زدگی انجام شد. همچنین برای تعیین ساختار شیمیایی پودر آجر بازیافتی آزمایش XRD و برای شناسایی فازهای آن آزمایش XRF صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۵٪ پودر آجر بازیافتی در بتن تنها باعث کاهش ۴/۲ ٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه می‌گردد که استفاده از آن در المانهای غیرسازهای توجیهپذیر می‌باشد.

کلمات کلیدی: بتن سبز، پودر آجر، بتن دوستدار محیط زیست، بازیافت پسماند ساختمانی، دوام یخ زدگی بتن.

۱- مقدمه

استفاده بهنیه از معادن و منابع تجدیدناپذیر و در نظر گرفتن نیازهای آینده یکی از ارکانهای اصلی توسعه پایدار می‌باشد[۱]. بنابراین صنعت ساخت و ساز در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط زیست می‌تواند نقش اساسی داشته باشد. امروزه استفاده از بازیافت مصالح و بتن‌های سبز به یکی از مهمترین مسائل توسعه پایدار تبدیل شده. اصطلاح بتن سبز بدین معنا است که این بتن دوستدار محیط زیست می‌باشد. بتن سبز تحول انقلابی در تاریخ صنعت بتن محسوب می‌شود. بتن‌های سبز عمدتاً ارزانتر از بتن معمولی هستند و تولید آن به حداقل میزان انرژی نیاز دارد و کمترین آسیب را به محیط می‌رساند. بتنهای سبز با مواد ضایعاتی مانند انواع سرباره، سنگدانه بازیافتی، ضایعات شیشه، خاکستر دستگاه زباله سوز، خاک اره، آجر بازیافتی و غیره تولید می‌شوند[۲].

عمدتاً پروژه‌های ساختمانسازی در مراحل اولیه خود نیاز به عملیات تخریب بنای قبلی دارند. این فرآیند منجر به تولید حجم زیادی از پسماندهای ساختمانی می‌شود که معمولاً دپو یا دفن می‌شوند. در حالیکه بسیاری از این ضایعات، قابل بازیافت و استفاده مجدد هستند. بسیاری از اقلام ساختمانی نظیر فولاد، شیشه، مس و پلاستیک به چرخه بازیافت باز می‌گردند اما سایر پسماندهای ساختمانی نظیر آجر، بتن، کاشی و سرامیک که بیش از نیمی از حجم ضایعات را به خود اختصاص داده است به اطراف شهرها منتقل و دپو می‌شوند[۳]. در حالیکه این ضایعات می‌توانند بعنوان بخشی از سیمان یا سنگدانه در ساخت و تولید بتن جدید استفاده شوند. روند بازیافت پسماند ساختمانی متفاوت است و باید بر اساس جنس، شکل و اندازه آن روشی خاص در نظر گرفته شود[۴]. بازیافت مصالح ساختمانی می‌تواند به کاهش هزینه‌های ساخت کمک کند زیرا باعث صرفه‌جویی در استفاده از منابع طبیعی می‌شود. همچنین هزینه حمل و نقل پسماند را به محل دفن زباله کاهش می‌دهد. مهمترین مزیت در بازیافت پسماندهای ساختمانی، ملاحظات زیست محیطی آن است. به این معنا که مشکلات مربوط به تخریب محیط زیست توسط مواد شیمیایی (به ویژه برای سیمان) از بین رفته و بتن بازیافتی همیشه در چرخه ساخت و ساز قرار می‌گیرد[۵]. در حال حاضر بسیاری از کشورهای پیشرفته به دلیل مسائل زیست محیطی مانند کمبود منابع، کمبود محل دفن زباله و آلودگی محیط زیست، ضایعات مصالح ساختمانی را بازیافت می‌کنند. بازیافت ضایعات ساختمانی مزایای اقتصادی هم در پیش دارد. بطوریکه احداث و توسعه زیرساختهای لازم برای بازیافت مصالح اعم از تخصیص منابع انسانی در مراحل مختلف مانند تحقیقات، جداسازی و حمل پسماندها، احداث کارگاه یا کارخانه بازیافت مصالح و غیره باعث اشتغالزایی و سرمایه‌گذاری بخش خصوصی می‌شود[۶].

طبق گزارشهای منتشر شده، حجم ضایعات ساختمانی در میان سایر زباله‌ها بین ۱۳ تا ۲۶ درصد می‌باشد[۸]. در سال ۱۳۹۴ تخمین زده شد که شهر تهران به تنهایی روزانه ۵۰ هزار تن ضایعات ساختمانی حاصل از تخریب و نوسازی ساختمان تولید می‌کند. در سال ۱۳۹۶ تخمین زده شد که ۶ میلیون تن ضایعات ساختمانی حاصل از تخریب و نوسازی در ایران تولید شده است. آوار به جا مانده از زلزله بم حدود ۱۲ میلیون تن برآورد شد که برای جابجایی و انتقال این حجم از نخاله نزدیک به ۱۰۰۰ دستگاه کامیون بکارگیری شد[۹]. بنابراین حجم بالای تولید پسماندهای ساختمانی از یک طرف و از طرف دیگر حجم بالای مصرف بتن به عنوان پرمصرفترین محصول ساختمانی در حالیکه هر روز تعداد پروژه‌های عمرانی به خصوص در شهرهای در حال توسعه می‌باشد، مشکلات و نگرانیهایی را ایجاد کرده.

شکل ۱- آلودگی محیط زیست در اثر انتقال پسماندهای ساختمانی به محیط اطراف شهرها [۸,۹]

آجر به دلیل کاربردهای متنوع، مقاومت مناسب، سهولت در استفاده، دسترسی آسان، زیبایی و غیره بیشترین کاربرد را در بین مصالح ساختمانی دارد. آجر جزء مصالح مقاوم و با دوام و سبک است که معمولاً عمده ساختار تشکیل دهنده آن را خاک رُس تشکیل می‌دهد. در ایران کارگاه‌های متعدد تولید آجر وجود دارد که اکثراً محصول تولیدی آن‌ها آجر سنتی و آجر ماشینی می‌باشد[۱]. تنوع تولید آجر در کشور زیاد است ولی بیشترین سهم تولید آجر در ایران، آجرهای فشاری می‌باشد. در گذشته میزان استفاده آجر در ساخت ساختمانها بسیار بالا بوده و اکثر بناهای قدیمی و فرسوده که نیاز به نوسازی دارند دارای مقادیر بالایی از انواع آجر می‌باشند. آجر فشاری بدلیل مقاومت بالا معمولاً در کرسیچینی، دیوار چینی باربر، سقف طاق ضربی و غیره مورد استفاده قرار گرفته. آجرهای فشاری به انواع آجر قرمز، آجر ماشینی و آجر کورهای تقسیم می‌شوند. با توجه به مواد بکار رفته در ساخت آجر، عمدتاً دارای خواص فیزیکی و شیمیایی متنوعی می‌باشند[۲]. در بعضی از موارد آجر از خاک رس و خاکهایی که دارای ترکیبات سیلیسی هستند ساخته می‌شوند. میزان حرارت و زمان پخت برای تولید آجر به مواد اولیه و نوع خاک رس آن ارتباط دارد[۱۰]. همچنین رنگ آجر بیانگر شرایط پخت و ترکیبات اولیه آن می‌باشد. رنگ‌های قرمز و زرد رنگ‌هایی هستند که به وفور در آجرها دیده می‌شود و عمدتاً دارای مقادیر بالای خاک رس می‌باشند. عملیات بازیافت پودر آجر توسط آسیاب یا خُرد کن‌های صنعتی صورت می‌گیرد که توان پودر کردن پسماندهای ساختمانی را دارند و دارای بخش‌های تفکیک کننده می‌باشند. بطوریکه ابتدا با استفاده از جریان آب یا باد یا مکش، ذرات اضافی از آجر را پاک می‌کنند. سپس با وارد نمودن ضربه به آجر آن را خرد و پودر نموده و بعد وارد مرحله غربالگری می‌شود. در نهایت ذرات و پسماندهای ریز و سبک از پسماندهای درشت غربال و جدا می‌شوند[۱۱].

تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه تولید بتنهای سبز با پسماندهای ساختمانی صورت گرفته. براج.گ و همکاران در سال ۲۰۲۲ اقدام به بررسی رفتار و ساخت بتن با استفاده از پسماندهای بتن و آجرهای ناشی از تخریب ساختمانها در اثر زلزله بزرگ نپال پرداختند. در این تحقیق گزارش شد که زلزله نپال در سال ۲۰۱۵ باعث انباشته شدن حدود ۱۸/۸۵ میلیون تن آوار گشته که طرحی برای بازیافت و مدیریت پسماندهای ساختمانی وجود نداشته. بنابراین پسماندهای بتن و آجر از محل تخریب، جمع‌آوری گردید و به سنگدانه‌های درشت، سنگدانه‌های ریز و مواد پودری تجزیه و تفکیک گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از ۱۰٪ ریزدانه ضایعات آجر روی اسلامپ بتن تاثیری ندارد اما مقاومت فشاری را به میزان ۱۰/۱ ٪ کاهش می‌دهد. اما استفاده از پودر آجر بازیافتی اسلامپ را تا ۱۵٪ کاهش می‌دهد. همچنین گزارش شد که استفاده از ۱۰٪ و ۲۰٪ پودر آجر بازیافتی مقاومت فشاری ۲۸ روزه را به ترتیب به میزان ۲۴/۲ ٪ و ۲۷/۳ ٪ کاهش می‌دهد[۱۲]. لورن.د و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی و ساخت بتن بازیافتی با پودر آجر به عنوان مکمل سیمان برای تولید بتن سبز پرداختند. در این تحقیق برای بازیافت و تولید پودر آجر از آسیاب گلولهای (ساچمه فولادی) استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که پودر آجر بدلیل جذب آب بالاتر باعث کاهش تشکیل ژل هیدروکسید کلسیم در سیمان شده و واکنش هیدراتاسیون سیمان را به تاخیر میاندازد. اما مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه دارای ۲۰٪ پودر آجر برابر با ۷۵٪ مقاومت نمونه شاهد بود. همچنین گزارش شد که استفاده از پودر آجر با وجود فعالیت پوزولانی ضعیف در بتن می‌تواند بر خواص مکانیکی بتن تأثیر مثبت بگذارد و به طور بالقوه مسیر بازیافت را به عنوان مکمل یا جایگزین بخشی از مواد سیمانی را هموار کند[۱۳]. آریف.ر و همکاران در سال ۲۰۲۱ به تاثیر جایگزینی پودر آجر با بخشی از سیمان در بتن پرداختند. در این تحقیق نسبت جایگزینی پودر آجر بازیافت شده ۵٪ و ۱۰٪ وزنی سیمان انتخاب شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن پودر آجر در بتن باعث کاهش اسلامپ بتن می‌گردد. همچنین در این تحقیق گزارش شد که افزایش تراکم فضای موئینه بتن در اثر افزودن پودر آجر و دارا بودن خاصیت نیمه پوزولانی پودر آجر باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن می‌شود[۱۴]. دانگ.ج و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی رفتار و دوام بتن تولید شده با نسبت‌های مختلف آجر بازیافتی پرداختند. در این تحقیق با هدف جبران کمبود

سنگدانه طبیعی و کاهش پسماندهای ساختمانی، از آجرهای بازیافتی بعنوان جایگزین سنگدانه‌های ریز (ماسه) اقدام گردید. بدین ترتیب آجر بازیافتی در نسبت‌های حجمی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین ماسه در بتن گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که خُرده آجر ضایعاتی میزان جذب آب و انقباض و جمع شدگی پلاستیک بتن را افزایش می‌دهد. همچنین تصاویر ریزساختار بتن نشان داد که میزان تخلخل بتن با افزایش جایگزینی خرده آجر بازیافتی افزایش می‌یابد. اما بدلیل ایجاد واکنش پوزولانی، بلورهای هیدروکسید کلسیم افزایش یافته و منجر به افزایش چسبندگی خمیره سیمان به سطوح خرده آجر بازیافتی خواهد شد[۱۵]. هو.ک و همکاران در سال ۲۰۱۹ به چگونگی تفکیک بتن و آجر حاصل از پسماندهای ساختمانی تخریب شده پرداختند. در این تحقیق برای جداسازی و تفکیک پسماندهای ساختمانی با وزن مخصوص بین ۲/۵۲ و ۱/۹۷ گرم در سانتی‌متر مکعب از هوای فشرده استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که حذف آجر از سایر پسماندهای ساختمانی باعث کاهش میزان جذب آب می‌گردد که ممکن است استحکام سنگدانه‌های بازیافتی را کاهش دهد. همچنین استفاده از هوای فشرده برای غربالگری پسماند ساختمانی تا میزان ۹۵٪ موثر بوده و این روش قابلیت تفکیک پودر آجر بازیافتی برای تولید بتن محوطه‌سازی یا روسازی را فراهم می‌کند[۱۶]. العبدو.ع و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی استفاده از پودر آجر بازیافتی در تهیه ملات سیمانی پرداختند. در این تحقیق نسبت جایگزینی پودر آجر بازیافت شده ۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ وزنی سیمان در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که پودر آجر بازیافت شده دارای ویژگی پوزولانی است و استفاده از این ماده تاثیر ناچیزی بر زمان گیرش و انبساط سیمان دارد. بطوریکه استفاده از ۱۰٪ پودر آجر بازیافت شده مقاومت فشاری ملات را تا ۹٪ کاهش داد. همچنین گزارش شد که استفاده از حداکثر ۱۵٪ پودر آجر بازیافتی به عنوان جایگزین سیمان، اُفت کیفیت ناچیزی در خواص ملات دارد اما مزایای زیست محیطی بسیاری خواهد داشت[۱۷]. عشق دوست.غ در سال ۱۳۹۵ به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن پرمقاومت با زئولیت و پودر آجر ضایعاتی پرداختند. در این تحقیق، از نسبت‌های وزنی ۱۰٪، و ۲۰٪ زئولیت و پودر آجر ضایعاتی بصورت جداگانه یا ترکیبی به جای بخشی از سیمان استفاده شد. همچنین عیار سیمان مصرفی ۵۰۰ کیلوگرم در هر متر معکب و نسبت آب به سیمان ۰/۳ در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که زئولیت در مقایسه با پودر آجر عملکرد بهتری روی بتن خواهد داشت. همچنین درصد استفاده بهینه زئولیت و پودر آجر در بتن ۱۰٪ وزنی سیمان معرفی شد[۱۸]. عادلی.ح و همکاران در سال ۱۳۹۲ در تحقیقی به بررسی امکان استفاده از آجرهای رسی در ساخت بلوک سبک و مقاوم بتنی از دیدگاه محیط زیست پرداختند. برای این منظور ضایعات آجرهای رسی بازمانده از تخریب ساختمان تهیه و توسط آسیاب چکشی خرد شد و در محدوده اندازه ماسه دانه‌بندی گردید. نسبت‌های استفاده از آجر ضایعاتی به میزان حجمی ۰٪، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ جایگزین ماسه در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان داد که طرح دارای ۲۵٪ ضایعات آجر اثر سویی در بلوک بتنی نخواهد گذاشت اما مقادیر بیش از آن باعث کاهش روانی و اُفت محسوس مقاومت و کیفیت خواهد شد[۱۹].

نتایج سایر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که با توجه به نوع ساختار آجر ضایعاتی میزان استفاده از آن در تولید بتن جدید متغیر می‌باشد و باید قبل از استفاده حتماً با چند نمونه آزمایشگاهی عمل بهینه‌یابی صورت گیرد. این مهم می‌تواند ناشی از عدم شناخت دقیق ساختار شیمیایی پودر آجر ضایعاتی باشد. بنابراین لازم است تا بررسی دقیقتری روی ساختار شیمیایی و فازهای پودر آجر ضایعاتی صورت گیرد. همچنین با توجه به وضعیت اقلیمی و تغییرات دمایی در استانها و شهرهای ایران ضرورت دارد تا دوام این طرح در برابر تغییرات دمایی و اثریخ زدگی متوالی روی بتن مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق، بوسیله آزمایش XRD و XRF ساختار شیمیایی و فازهای پودر آجر ضایعاتی بطور دقیق تعیین می‌شود. همچنین آزمایش دوام یخزدگی بر روی بتن دارای پودر آجر ضایعاتی از دیگر جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌باشد. بطوریکه تاکنون نتیجه مشخصی برای آن گزارش نشده است.

۲- مواد و مصالح

۲-۱- سنگدانه

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از ماسه شکسته و شن مخلوط نخودی و بادامی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. ماسه مصرفی دارای وزن مخصوص خشک ۱۶۵۰ kg/m^3 و جـذب آب ۱/۵۷٪ و نیز مدول نرمی آن مطابق استاندارد ASTM-C136 نیز ۲/۹ بدست آمد. همچنین وزن مخصوص خشک درشتدانه، ۱۳۵۰ kg/m^3 و میزان جذب آب آن برابر با ۲/۲٪ اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- مشخصات شن مصرفی جهت ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص خشک
بادامی و نخودی	mm	٪	kg/m^3
	۱۹	۲/۳	۱۳۵۰
ماسه	۴/۷۵	۱/۵۷	۱۶۵۰

۲-۲- سیمان

در این تحقیق از سیمان تیپ ۲ سپاهان استفاده شد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ kg/m^3 است. آنالیز شیمیایی و مشخصات فیزیکی این سیمان به شرح جدول شماره ۲ و ۳ می‌باشد[۲۲].

جدول ۲ - ساختار شیمیایی سیمان سفید تیپ ۲ سپاهان [۲۲]

C_3A	I.R	L.O.I	SO_3	CI	MgO	CaO	Fe_2O_3	AL_2O_3	SiO_2
٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪	٪
۵/۷۰	۰/۳۰	۰/۸۰	۲/۳۵	۰/۰۲۵	۲/۲۵	۶۴/۲۰	۴/۱۰	۴/۷۰	۲۰/۸۰

جدول ۳ - خصوصیات سیمان سفید تیپ ۲ سپاهان [۲۲]

سطح مخصوص (بلین)	انبساط اولیه (اتوکلاو)	زمان گیرش دقیقه		مقاومت فشاری کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع			وزن مخصوص
gr/cm^2	٪	اولیه	نهایی	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	gr/cm^3
۲۹۰۰	۰/۸	۴۵	۶۰	۱۰۰	۱۷۵	۳۱۵	۳/۱۰

۲-۳- آجر بازیافتی

آجر بازیافتی مصرفی در این تحقیق از نوع آجر فشاری بوده که از تخریب بنای قدیمی بدست آمد. در ابتدا ملات سیمانی و سایر آلودگیهای سطحی چسبیده به آجر جدا گردید و جهت زدودن گرد و غبار، آجرها به مدت ۲۴ ساعت در درون آب قرار گرفتند. سپس به مدت ۲۴ ساعت در آون در درجه ۱۱۰+ سانتیگراد قرار گرفته تا آب آن کاملاً تبخیر شود. این روند برای آمادهسازی آجر برای

آزمایش XRD [1] و XRF [2] و تعیین میزان جذب آب صورت گرفته. بنابراین در بازیافت و مصرف انبوه، فقط عمل جداسازی ملات سیمانی از سطح آجر لازم است و سایر موارد ضرورتی ندارد. در نهایت آجرهای بازیافتی به مدت ۳۰ دقیقه توسط آسیاب صنعتی به شکل پودر درآمدند. پودر آجر بدست آمده از الک شماره ۱۰۰ عبور داده شد و حداکثر اندازه اسمی آن ۰/۱۵ میلی‌متر تعیین گردید. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر آجر به شرح جدول شماره ۴ می‌باشد. قابل ذکر است که میزان جذب آب آجر بازیافتی مورد استفاده نیز ۱۴/۵ درصد بدست آمد.

جدول ۴ - مشخصات فیزیکی پودر آجر بازیافتی جهت استفاده در بتن

نام ماده	رنگ	چگالی (gr/cm^3)	جذب آب ٪	حداکثر اندازه اسمی (میکرون)	حداکثر اندازه اسمی (مش)
پودر آجر	زرد	۱/۹	۱۴/۵	µ ۱۵۰	# ۱۰۰

شکل ۲ - روند بازیافت آجر ضایعاتی و تبدیل آن به پودر آجر در این تحقیق

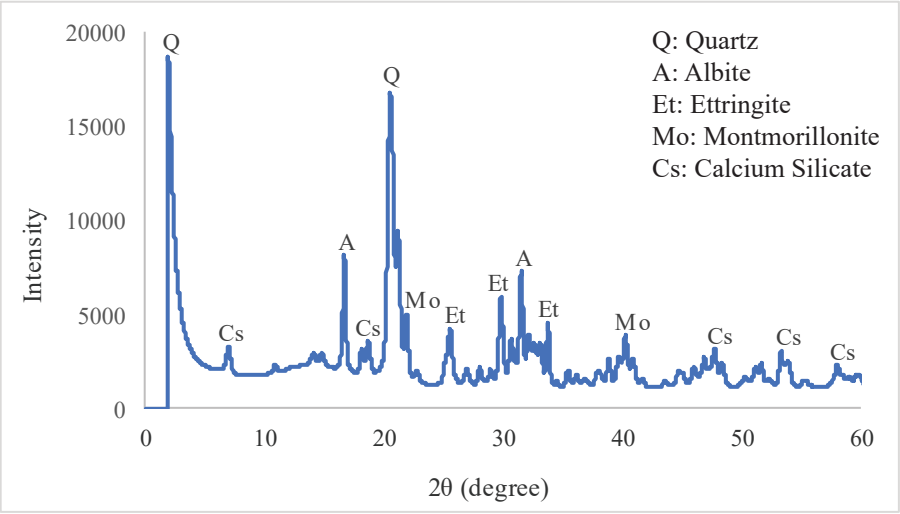
۲-۴- تعیین فازهای شیمیایی آجر بازیافتی

آنالیز XRD یا پراش پرتو X، روشی برای تعیین فازها و ساختار کریستالی مواد می‌باشد. پراش X یک روش غیرمخرب و کاربردی است که اطلاعات جامعی درباره ترکیبات شیمیایی و ساختار کریستالی مواد طبیعی و صنعتی را ارائه می‌دهد. هر کریستالی در برابر اشعه X، طرح (Pattern) منحصر به فرد خود را دارد. در این روش مکان (زاویه پیکها) و شدت آن‌ها هرکدام به نوبهی خود حاوی اطلاعاتی از نمونه می‌باشد که با استفاده از آن می‌توان ساختار اتمی و فاز صفحات پراش کننده را تعیین کرد و از این طریق به جنس و ساختار نمونه پی برد[۴۷]. آزمایش XRD در مرکز پژوهش متالورژی رازی شهر شیراز با دستگاه مدل MPD-3000 ساخت کشور چین انجام شد. لامپ اشعه ایکس از جنس مس بوده و از تابش با طول موج ۱/۵۴۰۶ انگستروم چشمه تابش اشعه استفاده می‌شود. دقت آنالیز دستگاه ۰/۰۲ درجه

[1] X-Ray Diffraction
[2] X-Ray Fluorescence

به ازای ۰/۵ ثانیه، ولتاژ و جریان مورد استفاده به ترتیب ۳۰ کیلوولت و ۲۰ میلیآمپر می‌باشد. پس از قرار گرفتن نمونه در داخل دستگاه، منبع اشعه X، روی محیط یک دایره از ۵ تا ۸۰ درجه نسبت به خط افق حرکت کرده و اشعه روی نمونه از زوایای مختلف میتابد. حرکت منبع اشعه به وسیله کامپیوتر و با استفاده از نرم افزار مربوطه حاصل میشود. اندازه‌گیریهای پراش در هر 2θ تکرار شده و حاصل اندازهگیری پراش در ۴۰۰۰ نقطه انجام گرفته. شکل و جدول شماره ۳ و ۵، فاز و ساختار تشکیل دهنده آجر بازیافتی را نشان می‌دهد.

طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که آجر بازیافتی مصرفی دارای ساختار سیلیکات کلسیم و اترینگایت سیمانی است که ناشی از چسبیدن ملات سیمانی بازمانده روی آجر می‌باشد. همچنین مونتموریلونیت که عمده ساختار خاک رس را تشکیل می‌دهد در آجر بازیافتی بدلیل نوع رسی بودن آن نشان داده شد. در واقع عمده ساختار تشکیل دهنده خاک رس را مونتموریلونیت تشکیل می‌دهد. مونتموریلونیت وقتی با آب ترکیب می‌شود، منبسط شده و حجم آن افزایش می‌یابد و نیز خاصیت چسبندگی پیدا می‌کند[۳۰]. به همین دلیل هنگام زنجاب کردن آجرهای رسی حجم آجر افزایش یافته و چسبندگی ملات به آن‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۳- گراف XRD جهت شناسایی فازهای پودر آجر بازیافتی

جدول ۵ - تعیین فازهای پودر آجر بازیافتی توسط تست XRD

نام اختصاری	نام مرکب	فرمول شیمیایی	کد شناسایی بین المللی پراش
Q	Quartz	SiO_2	0539-083-01
A	Albite	$NaAlSi_3O_8$	1616-083-01
Et	Ettringite	$Ca_6Al_2(SO_4)_3(oh)_{12}\ 26H_2O$	1451-041-00
Mo	Montmorillonite	$Al_{1.6}Mg_{0.33})\ [(OH)_2\ Si_4O_{10}]\ Na_{0.33})\ (H_2O)_4$	1932-092-01
Cs	Calcium Silicate	$Ca_2SiO_4\ 0.35H_2O$	0739-055-00

آنالیز XRF، روشی برای تعیین و اندازه‌گیری میزان عناصر تشکیل دهنده مواد می‌باشد که یک تجزیه غیرمخرب بوسیله اشعه X محسوب می‌شود. در واقع XRF، دستگاهی است برای اندازه‌گیری طول موج و شدت امواج فلورسانس ساطع شده از اتمهای مختلف در مواد که نتیجه آن شناسایی نوع و میزان عناصر ماده می‌باشد. به علت سرعت زیاد و عدم مصرف مواد شیمیایی روش ارزانی نسبت به بقیه روش‌های آنالیزی بوده و خطری برای محیط زیست ندارد. روش آنالیز XRF روش آنالیز سطحی است و می‌تواند تا عمق ۲۰ میکرومتری سطح را آنالیز کند. بنابراین برای شناسایی مواد یا عناصر مجهول، آنالیز XRF بسیار کاربردی است[۴۷].

برای آنالیز XRF نمونه باید تبدیل به پودر (حداکثر اندازه ذرات پودر ۱۵۰ میکرون) گردند. اپراتور این پودر را با پودر اسید بوریک مخلوط کرده و مخلوط پودرها را به وسیله دستگاه پرس به قرص تبدیل می‌کند. پودرهای قرص شده درون نگهدارنده مخصوص قرار می‌گیرند و درون دستگاه گذاشته می‌شوند. برای افزایش دقت آنالیز، هوای درون محفظه دستگاه تخلیه می‌شود. آنالیز در شرایط خلاء یا تحت گاز هلیم انجام می‌گیرد. جدول شماره ۶ ساختار شیمیایی پودر آجر بازیافتی مورد استفاده را نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان داد که عمده ساختار شیمیایی پودر آجر بازیافتی مورد استفاده از اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیس تشکیل شده. قابل ذکر است که این عنصر با کلسیم هیدروکسید موجود درسیمان واکنش نشان داده و منجر به تولید ژل آلومینات خواهد شد. بعبارتی این ماده خاصیت آمورف دارد[۲۵]. شکل شماره ۴ تصویری از محیط آزمایشگاه مرکز پژوهشی رازی شهر شیراز را نمایش می‌دهد.

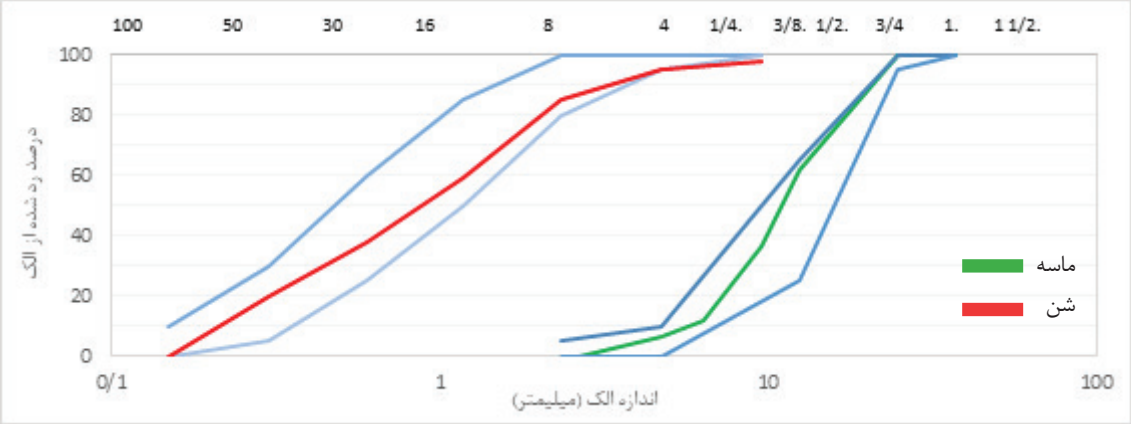
جدول ۶ - آنالیز ساختار شیمیایی پودر آجر بازیافتی توسط تست XRF

نماد عنصر	نام عنصر	میزان عنصر
Sio_2	اکسید سیلیس	۶۰/۳
Fe_2O_3	اکسید سوم آهن	۹/۲
Al_2O_3	اکسید سوم آلومینیوم	۱۴/۲
CaO	اکسید کلسیم	۴/۱
MgO	اکسید منیزیم	۱/۳
So_3	انیدرید سولفوریک	۸/۳
K_2O	اکسید پتاسیم	۱/۴
MnO	دی اکسید منگنز	۰/۹

شکل ۴ - تصویری از محیط آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی رازی شهر شیراز

۳- دانه‌بندی

در آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی با ایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شمارهبندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. البته قابل ذکر است که برای دانه‌بندی مصالح درشتدانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده سنگدانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM-C136 دانه بندی از الک‌های سیمی‌استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده گردید که در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفتهاند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود[۲۶]. در منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ها، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.



۴- برنامه آزمایشگاهی

در این تحقیق برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن با پودر آجر بازیافتی مجموعاً متشکل از ۶۰ نمونه می‌باشد. آزمایشات انجام شده روی بتن شامل اسلامپ، مقاومت فشاری (۷، ۲۸ و ۹۰ روزه)، مقاومت کششی (به روش برزیلین)، جذب آب اولیه (۳۰ دقیقه) و ثانویه (۷۲ ساعت) روی بتن سخت شده و در نهایت آزمایش چرخه ذوب و یخبندان (۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه) می‌باشد.

برای آزمایش مقاومت فشاری و سنجش دوام بتن در برابر چرخه انجماد، دو آزمونه مورد سنجش قرار گرفت و میانگین جواب آن بعنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شد. شکل شماره ۶ فرایند بازیافت آجر ضایعاتی به پودر و تبدیل آن به بتن سبز و جدول شماره ۷، استاندارد روش آزمایش، تعداد نمونه برای هر آزمایش، ابعاد و نوع نمونه را نشان می‌دهد.

شکل ۶ - فرآیند برنامه آزمایشگاهی ساخت بتن سبز با پودر آجر بازیافتی

جدول ۷- شرح و استاندارد آزمایش، نوع و تعداد نمونه به تفکیک هر آزمایش

ردیف	شرح آزمایش	نوع نمونه	ابعاد نمونه (میلی‌متر)	تعداد نمونه	سن نمونه (روز)	شماره استاندارد
۱	اسلامپ	-	-	-	بتن تازه	ASTM C143
۲	مقاومت فشاری	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۳۰	۷-۲۸-۹۰	12390 EN BS
۳	مقاومت کششی	استوانه‌ای	۳۰۰×۱۵۰	۵	۲۸	ASTM C496
۴	جذب آب بتن	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۵	۲۸	ASTM C642
۵	دوام یخ زدگی	مکعبی	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۲۰	۲۸	ASTM C666-B

۵- طرح مخلوط

در این تحقیق مبنای طرح مخلوط بتن شاهد، استاندارد ACI-211 در نظر گرفته شد. در ادامه از پودر آجر بازیافتی در نسبت‌های مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ وزنی، جایگزین سیمان در بتن شد. حداکثر اندازه درشت دانه ۱۹ میلی‌متر، عیار سیمان مصرفی ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ مفروض گردید. جدول شماره ۸ میزان مصالح مصرفی برای طرح مخلوط‌های مورد بررسی در مقیاس یک متر مکعب بتن نشان می‌دهد.

جدول ۸ - طرح مخلوطهای مورد آزمایش جهت تولید بتن با پودر آجر بازیافتی

طرح	ردیف	نام طرح مخلوط	سیمان	شن	ماسه	آب	پودر آجر	نسبت جایگزینی پودر آجر
			kg/m³	kg/m³	kg/m³	lit/m³	kg/m³	٪
شاهد	۱	CONTROL	۵۰۰	۷۵۰	۱۰۶۰	۲۲۵	-	-
بتن سبز بازیافتی	۲	%BR-5	۴۷۵	۷۵۰	۱۰۶۰	۲۲۵	۲۵	٪۵
	۳	BR-10%	۴۵۰	۷۵۰	۱۰۶۰	۲۲۵	۵۰	٪۱۰
	۴	BR-15%	۴۲۵	۷۵۰	۱۰۶۰	۲۲۵	۷۵	٪۱۵
	۵	BR-20%	۴۰۰	۷۵۰	۱۰۶۰	۲۲۵	۱۰۰	٪۲۰

برای ساخت بتن، ابتدا تمامی سنگدانه‌ها به مدت ۳ روز در دمای ۲۵+ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک و آب موجود در منافذ آن تبخیر شود. پس از آن شن و ماسه طبیعی به داخل میکسر ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط شدند. در ادامه سیمان و نیمی از آب اضافه و پس از ۳۰ ثانیه مخلوط، نصف دیگر آب به همراه پودر آجر بازیافتی اضافه و به مدت ۳ دقیقه دیگر با هم مخلوط شدند. قابل ذکر است که سرعت دوران میکسر بتن ۱۵ دور در دقیقه تنظیم شد.

به منظور جلوگیری از چسبندگی بتن به جداره قالب، ابتدا دیواره‌های داخلی قالب با یک لایه‌ی نازک روغن معدنی آغشته 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 با میله فلزی مخصوص انجام شد.

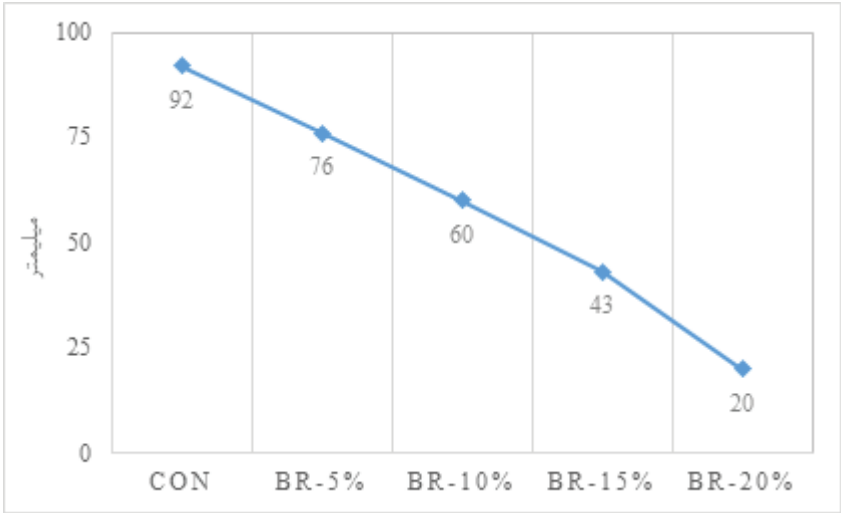
شکل ۷- ترتیب و مدت زمان مخلوط عناصر ساخت بتن در این تحقیق

۶- یافته‌ها

۶-۱- اسلامپ

اسلامپ بتن، معیاری برای بررسی میزان جریان‌پذیری بتن تازه پیش از استفاده در محل مورد نیاز است. با در نظر گرفتن اینکه بخش عمده پودر آجر از خاک رس تشکیل شده و نیز با توجه به آنکه پودر آجر ضایعاتی بصورت کاملاً خشک در بتن مورد استفاده قرار گرفت، طبیعتاً کاهش اسلامپ دور از انتظار نبود. نتایج این آزمایش نشان داد که افزودن ٪۵، ٪۱۰، ٪۱۵ و ٪۲۰ پودر آجر ضایعاتی به ترتیب ٪۱۵، ٪۳۲، ٪۴۷ و ٪۶۵ اسلامپ بتن را کاهش می‌دهد.

به استناد از استاندارد ACI میزان اسلامپ برای بتن ریزی در فونداسیون و دال بتنی باید بین ۲۵ تا ۷۵ میلی‌متر و برای ستون، تیر و دیوار برشی باید بین ۲۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر انتخاب شود[۲۵]. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده میزان اسلامپ طرح BR-20% خارج از محدوده مجاز بتن ریزی می‌باشد. البته تجربه آزمایشگاهی و نتایج سایر تحقیقات نشان داده که می‌توان با افزودن انواع روانکننده در بتن علاوه بر کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش کیفیت بتن نیز میزان اسلامپ را افزایش داد.



نمودار ۱ - مقایسه میزان روانی تمامی‌نمونه‌های مورد آزمایش

۶-۲- مقاومت فشاری و گیرش بتن

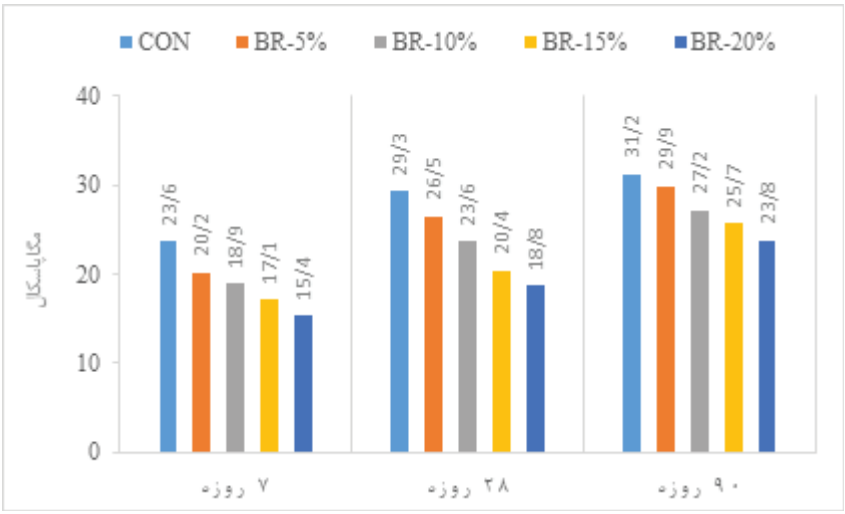
پیشینیه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از خُرده آجر بازیافتی (با اندازه بین ۰/۵ تا ۴ میلی‌متر) مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد.[۱-۴]. مقاومت فشاری بدست آمده در این تحقیق، صحت نتایج تحقیقات گذشته را تایید می‌کند. اما با توجه به اینکه در این تحقیق اندازه پودر آجر ضایعاتی به حداکثر اندازه ۱۵۰ میکرون درآمده باعث گردید تا میزان اُفت مقاومت فشاری بتن کمتر شود. بطوریکه مقاومت فشاری ۹۰ روزه طرحBR-5% فقط ۴/۲ ٪ در مقایسه با طرح شاهد کاهش یافته. از مهمترین دلایل این رخداد وجود مونتموریلونیت موجود در پودر آجر بازیافتی می‌باشد که با جذب آب متورم شده و تراکم بتن را افزایش می‌دهد. همچنین وجود اکسید سیلیس و اکسید آلومینیوم در پودر آجر، خاصیت نیمه پوزولانی دارد که می‌تواند تا حدودی عارضه ناشی از کاهش حجم سیمان را جبران نماید. همچنین افزودن مقادیر بیشتر پودر آجر ضایعاتی در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری در تمامی سنین می‌شود که این اُفت مقاومت به تناسب افزایش پودر آجر نیز بیشتر می‌شود. بنابراین افزودن ۵٪ پودر آجر بازیافتی با توجه به مزایای زیست محیطی که دارد می‌تواند توجیهپذیر باشد. قابل ذکر است که استفاده از پودر آجر ضایعاتی باعث می‌شود تا آب بتن تازه جذب شده و باعث ایجاد ترکهای سطحی ناشی از انقباض (خشک شدن اولیه) در بتن گردد. لذا با توجه به اینکه در پروژه‌ها و بتنریزیهای حجیم، عمل‌آوری بصورت آزمایشگاهی صورت نمی‌گیرد (در آب غرقاب نمی‌شود) ممکن است این عارضه بر روی کیفیت و پایایی بتن اثرات مخربی برجای بگذارد. بنابراین توصیه می‌شود در تولید این بتن از انواع محلول روان کننده به میزان لازم استفاده شود تا ضمن حفظ روانی و کیفیت بتن، ریسک تبخیر آب (در اثر حرارت) یا جذب آب بتن (در اثر جذب آب پودر آجر ضایعاتی) کاهش یابد.

به استناد از شکل شماره ۸ که مربوط به آهنگ گیرش مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف می‌باشد مشخص گردید که افزودن پودر آجر ضایعاتی باعث می‌شود تا سن گیرش مقاومت فشاری بتن افزایش یابد یا بعبارتی بتن دیرگیر شود. بطوریکه افزودن پودر آجر ضایعاتی

تاثیر مخربی روی شکفتن هیدروکسید کلسیم سیمان داشته و به نوعی واکنش هیدراتاسیون سیمان را کُند می‌کند. همچنین جذب آب بالای پودر آجر بازیافتی باعث می‌شود تا تشکیل و رشد اترینگایت سیمانی با مشکل مواجه شود و سن گیرش بتن را افزایش دهد.

جدول ۹ – مقایسه میزان مقاومت فشاری طرح مخلوطهای مورد آزمایش در سنین مختلف

طرح مخلوط	مقاومت فشاری ۷ روزه				مقاومت فشاری ۲۸ روزه				مقاومت فشاری ۹۰ روزه			
	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین	میزان تغییر	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین	میزان تغییر	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین	میزان تغییر
	MPa			%	MPa			%	MPa			%
CONTROL	۲۲/۴	۲۴/۸	۲۳/۶	-	۳۰/۱	۲۸/۶	۲۹/۴	-	۳۲/۱	۳۰/۳	۳۱/۲	-
%BR-5	۱۹/۱	۲۱/۲	۲۰/۲	-۱۴/۶	۲۶/۹	۲۶/۱	۲۶/۵	-۹/۷	۲۹/۴	۳۰/۴	۲۹/۹	-۴/۲
BR-10%	۱۸/۱	۱۹/۶	۱۸/۹	-۲۰/۱	۲۳	۲۴/۲	۲۳/۶	-۱۹/۶	۲۶/۷	۲۷/۸	۲۷/۳	-۱۲/۷
BR-15%	۱۶/۰	۱۸/۲	۱۷/۱	-۲۷/۵	۲۰/۷	۲۰/۱	۲۰/۴	-۳۰/۵	۲۳/۷	۲۷/۶	۲۵/۷	-۱۷/۸
BR-20%	۱۵/۱	۱۵/۷	۱۵/۴	-۳۴/۷	۱۸	۱۹/۵	۱۸/۸	-۳۶/۱	۲۳/۲	۲۴/۳	۲۳/۸	-۲۳/۹

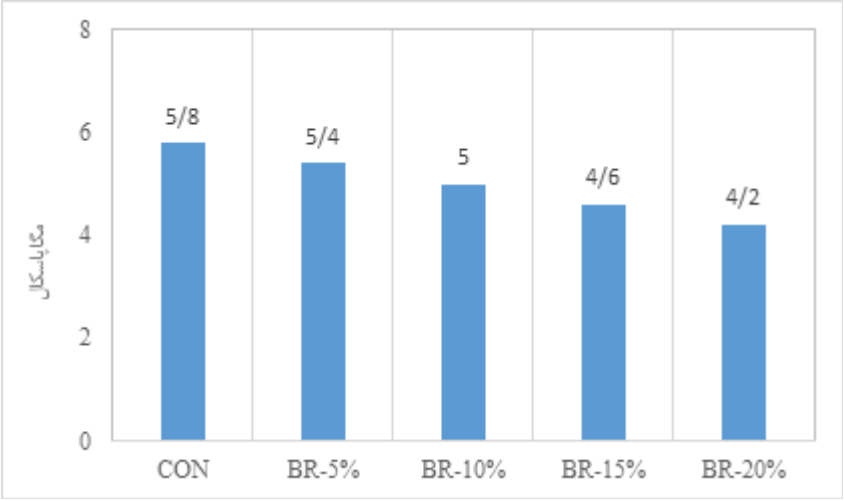


شکل ۸ – مقایسه میزان مقاومت فشاری طرح مخلوط‌های مورد آزمایش در سنین مختلف

۶-۳- مقاومت کششی

تاکنون ثابت شده که میزان مقاومت کششی بتن ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری آن دارد[۲۴]. بنابراین عوامل موثر و تاثیرگذار بر روی مقاومت فشاری بتن بر روی میزان مقاومت کششی اثرگذار خواهد بود. در این تحقیق میزان مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه به روش دونیم شدن (برزیلین) مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در شکل شماره ۹ نمایش

داده شده. به استناد از نتایج بدست آمده استفاده از پودر آجر ضایعاتی بجای سیمان در بتن باعث کاهش چسبندگی بین ساختار بتن گردیده و مقاومت کششی را کاهش می‌دهد. بطوریکه افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر آجر بازیافتی در بتن به ترتیب ۶/۸ ٪، ۱۳/۷ ٪، ۲۰/۶ ٪ و ۲۷/۵ ٪ مقاومت کششی بتن را کاهش خواهد داد.



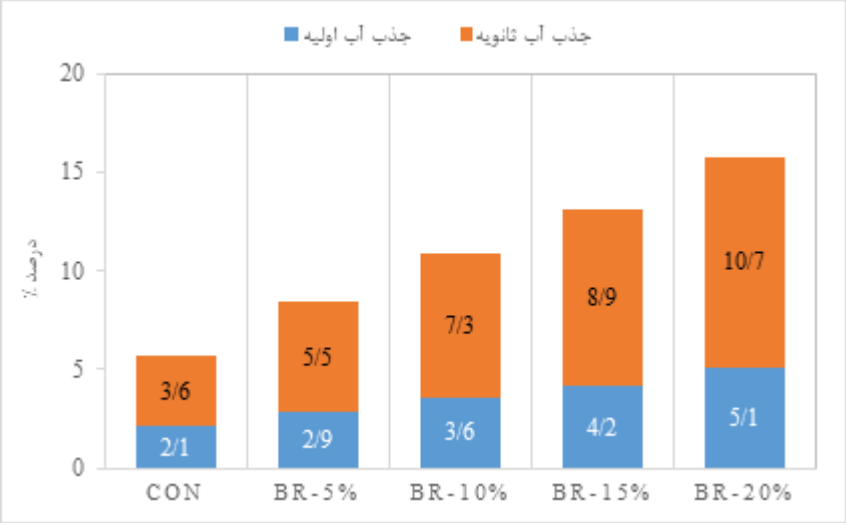
شکل ۹ - مقایسه میزان مقاومت کششی طرح مخلوطهای مورد آزمایش

۶-۴- جذب آب در بتن سخت شده

این آزمایش علاوه بر اندازه‌گیری میزان جذب آب نیز معیاری برای سنجش تخلخل در بتن می‌باشد[۲۶]. در این تحقیق آزمایش میزان جذب آب در بتن سخت شده مطابق استاندارد ASTM-C642بر روی نمونه مکعبی ۲۸ روزه انجام گرفت. بدین ترتیب ابتدا نمونه‌های بتنی به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه (جذب آب اولیه) و ۷۲ ساعت (جذب آب ثانویه) در حوضچه آب قرار گرفتند و وزن هر کدام از آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده به شرح جدول شماره ۱۰ می‌باشد. به استناد از نتایج بدست آمده، میزان جذب آب اولیه و ثانویه نمونه‌ها با افزایش پودر آجر بازیافتی افزایش می‌یابد. این افزایش تراکم می‌تواند ناشی از تورم مونت موریلنیت در اثر جذب آب بتن می‌باشد[۱۵]. بنابراین با افزایش پودر آجر ضایعاتی در بتن، روند جذب آب اولیه کاهشی اما شدت آن بیشتر خواهد شد. بطوریکه با افزودن ۵٪، ۱۰ ٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر آجر ضایعاتی در بتن میزان جذب آب اولیه به ترتیب ۲/۱ ٪، ۳/۲ ٪، ۴/۴ ٪، ۶/۰ ٪، ۷/۸ ٪ و میزان جذب آب ثانویه به ترتیب ۳/۶ ٪، ۵/۵ ٪، ۷/۳ ٪، ۸/۹ ٪، ۱۰/۷ ٪ افزایش خواهد داد. به استناد از سایر منابع، در صورتیکه میزان جذب آب اولیه بتن کمتر از ۲/۵ ٪ باشد دوام آن مطلوب ارزیابی می‌شود. همچنین به استناد از استاندارد آبا، حداکثر میزان جذب آب نهایی بتن، در شرایط محیطی فوق العاده شدید و در محیط‌هایی که سازه در معرض آب دریا می‌باشد حداکثر ۵٪ در نظر گرفته شده[۲۴-۲۶].

جدول ۱۰ - مقایسه میزان جذب آب اولیه و ثانویه در نمونه‌های سخت شده

نام طرح	نمونه خشک شده	۳۰ دقیقه	۷۲ ساعت	وضعیت
	گرم	گرم	گرم	
CONTROL	۲۵۳۵	۲۵۸۸	۲۶۲۶	وزن خشک
		۲/۱	۳/۶	درصد جذب رطوبت
%BR-5	۲۵۲۸	۲۶۰۲	۲۶۶۸	وزن خشک
		۲/۹	۵/۵	درصد جذب رطوبت
BR-10%	۲۵۲۰	۲۶۱۰	۲۷۰۵	وزن خشک
		۳/۶	۷/۳	درصد جذب رطوبت
BR-15%	۲۵۱۲	۲۶۱۸	۲۷۳۵	وزن خشک
		۴/۲	۸/۹	درصد جذب رطوبت
BR-20%	۲۵۰۴	۲۶۳۲	۲۷۷۳	وزن خشک
		۵/۱	۱۰/۷	درصد جذب رطوبت



شکل ۱۰- مقایسه میزان جذب آب اولیه و ثانویه در نمونه‌های سخت شده

۶-۵- دوام یخ زدگی

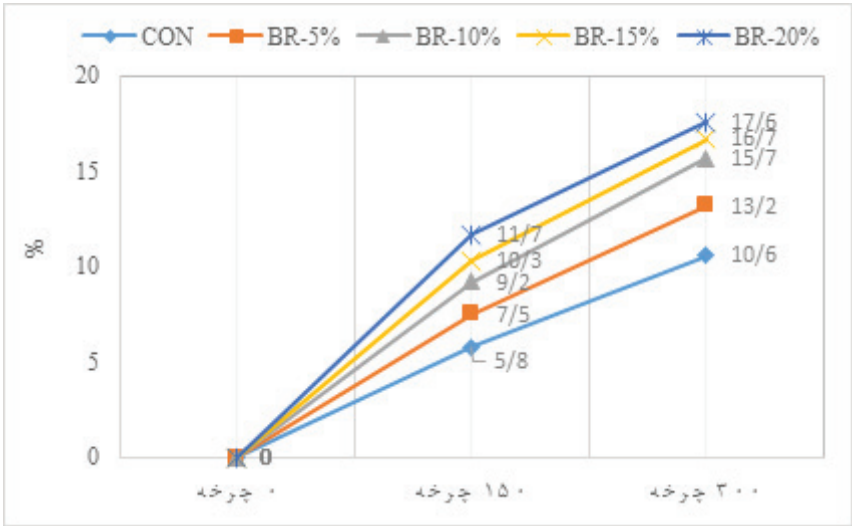
دوام نمونه‌های مورد مطالعه در برابر چرخه ذوب و انجماد از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا مساحت زیادی از کشور ایران در مناطق سردسیر قرار دارد و ممکن است استفاده از این بتن جهت ساخت و ساز در مناطق سردسیر مشکلات عدیده‌ای را بوجود آورد[۲۶]. بنابراین جهت سنجش میزان دوام بتن در برابر سیکل یخبندان، نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM-C666-B در دمای ۱۸- تا ۴+ در بازه ۵ ساعته مورد آزمایش قرار گرفتند. در ادامه پس از طی ۱۵۰ و ۳۰۰ چرخه متوالی میزان کاهش وزن و کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری و با نمونه شاهد مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از انجام این آزمایش به شرح

جدول شماره ۱۱ و ۱۲ می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که بدلیل میزان جذب آب بالای پودر آجر ضایعاتی، میزان انبساط و انقباض ناشی از چرخه ذوب و انجماد در بتن افزایش می‌یابد و در نتیجه نمونه‌ها دچار ترک و زوال زودرس می‌گردند. اما مونت موریلونیت موجود در رُس آجر خاصیت ارتجاعی یا پلاستیکی داشته و باعث ایجاد نرمی بتن می‌شود. به همین خاطر دوام پودر آجر در برابر یخبندان بیشتر از سیمان می‌باشد. زیرا با افزودن مقادیر بیشتر پودر آجر ضایعاتی در بتن، روند اُفت زوال مقاومت بتن کاهش می‌یابد. بطوریکه پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان میزان اُفت مقاومت فشاری طرحBR-20% در مقایسه با طرح BR-5% میزان خرابی کمتری دارد. نتایج نشان داد که با افزودن ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ پودر آجر بازیافتی در بتن میزان مقاومت فشاری پس از ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۵/۸ ٪، ۷/۵ ٪، ۹/۲ ٪، ۱۰/۳ ٪، ۱۱/۷ ٪ و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۱۰/۶ ٪، ۱۳/۲ ٪، ۱۵/۷ ٪، ۱۶/۷ ٪ و ۱۷/۶ ٪ کاهش می‌یابد. همچنین میزان وزن نمونه‌ها پس از ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۲/۱ ٪، ۳/۱ ٪، ۴/۲ ٪، ۵/۲ ٪، ۶/۴ ٪ و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۴/۳ ٪، ۵/۶ ٪، ۶/۶ ٪، ۷/۹ ٪ و ۹/۸ ٪ کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که تنها عامل خرابی بتن در برابر چرخه یخبندان، پودر آجر ضایعاتی نبوده. زیرا طرح مخلوط شاهد نیز دچار زوال گردیده که این مهم نشان از ضعف سایر عناصر بتن مانند سنگدانه‌ها هم می‌تواند باشد. بنابراین ایجاد تمهیداتی مانند استفاده از افزودنی‌های حبابزا یا ضدیخ می‌تواند کیفیت و دوام این بتن را در برابر چرخه یخبندان افزایش دهد.

به استناد از توصیه سایر مراجع[۲۶-۲۴]، معیار رد یا پذیرش دوام بتن در برابر چرخه ذوب و انجماد نیز حداکثر اُفت وزن بتن بیش از ۵ ٪ یا حداکثر اُفت مقاومت فشاری بتن بیش از ۱۰ ٪ مردود اعلام شده و در این صورت زوال و خرابی بتن اعلام می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان اذعان کرد که افزودن پودر آجر ضایعاتی در بتن بدلیل بالا بردن میزان جذب آب و احتمال انبساط و انقباض ناشی از یخ زدگی باعث زوال زودرس بتن می‌گردد. همچنین مشخص شد که میزان اُفت مقاومت و اُفت وزن تمامی نمونه‌ها پس از ۱۵۰ چرخه در حد مجاز استاندارد می‌باشد. بنابراین استفاده از این بتن در مناطق معتدل یا گرمسیری که روزهای سرد و یخبندان کمتری در طول سال دارند (نظیر نواحی جنوبی کشور) بلامانع است.

جدول ۱۱-مقایسه میزان اُفت مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از آزمایش چرخه ذوب و یخبندان

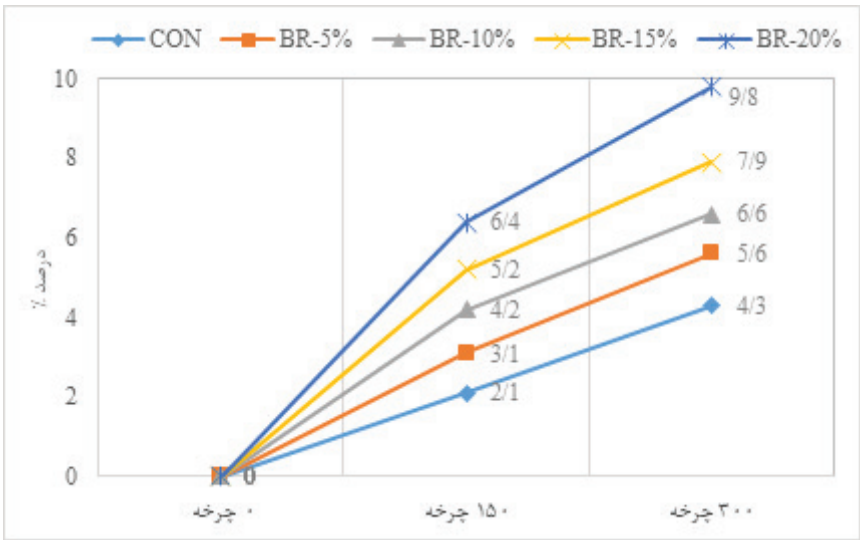
ردیف	نام طرح مخلوط	میانگین مقاومت فشاری پس از ذوب و انجماد				
		قبل از انجماد	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل
		مگاپاسکال	مگاپاسکال	مگاپاسکال	٪	٪
۱	CONTROL	۲۹/۳	۲۷/۶	۲۶/۲	-۵/۸	-۱۰/۶
۲	%BR-5	۲۶/۵	۲۴/۵	۲۳/۰	-۷/۵	-۱۳/۲
۳	BR-10%	۲۳/۶	۲۱/۶	۱۹/۹	-۸/۶	-۱۵/۷
۴	BR-15%	۲۰/۴	۱۸/۳	۱۷	-۱۰/۳	-۱۶/۷
۵	BR-20%	۱۸/۸	۱۶/۶	۱۵/۵	-۱۱/۷	-۱۷/۶



شکل ۱۱ – مقایسه میزان اُفت مقاومت فشاری نمونه‌ها پس از آزمایش چرخه ذوب و یخبندان

جدول ۱۲ – مقایسه میزان اُفت وزن نمونه‌ها پس از آزمایش چرخه ذوب و یخبندان

ردیف	نام طرح مخلوط	وزن نمونه پس چرخه ذوب و انجماد				
		قبل از انجماد	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل	۱۵۰ سیکل	۳۰۰ سیکل
		گرم	گرم	گرم	٪	٪
۱	CONTROL	۸۵۳۰	۸۲۶۵	۸۱۶۳	-۲/۱	-۴/۳
۲	%BR-5	۸۵۲۴	۸۱۹۱	۸۰۶۳	-۳/۱	-۵/۶
۳	BR-10%	۸۵۲۰	۸۱۱۹	۷۹۴۰	-۴/۲	-۶/۶
۴	BR-15%	۸۵۳۵	۷۹۵۴	۷۸۴۳	-۵/۲	-۷/۹
۵	BR-20%	۸۵۲۷	۷۸۳۵	۷۵۸۰	-۶/۴	-۹/۸



شکل ۱۲ – مقایسه میزان اُفت وزن نمونهها پس از آزمایش چرخه ذوب و یخبندان

۶-۶- شاخص اقتصادی

با توجه به رویکرد کاربردی این تحقیق، در این بخش اقدام به بررسی شاخص اقتصادی و مقایسه هزینه ساخت هر طرح مخلوط نسبت به مقاومت فشاری ۹۰ روزه گردید. در ابتدا هزینه ساخت یک متر مکعب بتن بازیافتی با فرض قیمت در زمان ساخت (زمستان سال ۱۴۰۰) به شرح جدول شماره ۱۳ برآورد شد. البته بدیهی است که هزینه‌های ساخت بتن در محیط آزمایشگاهی بیشتر از ساخت همان بتن در مقیاس کارگاه یا کارخانه می‌باشد. لازم به توضیح است که هر چه میزان شاخص اقتصادی طرح مخلوط کمتر باشد، استفاده از آن طرح مخلوط توجیه اقتصادی بیشتری خواهد داشت[۲۶]. نتایج این بخش نشان داد که طرح مخلوط BR-5% با شاخص اقتصادی ۲/۰۷ در مقایسه با سایر طرح مخلوطهای بازیافتی دیگر از توجیه اقتصادی بیشتری برخوردار است. علاوه برآن استفاده از پودر آجر ضایعاتی به جای بخشی از سیمان، مزایای زیست محیطی بسیاری دارد که در بخشهای مقدمه و بحث تا حدودی به آن اشاره شده.

جدول ۱۳ - مقایسه شاخص اقتصادی بر اساس هزینه ساخت هر متر مکعب بتن نسبت به مقاومت فشاری ۹۰ روزه

نام طرح مخلوط	هزینه ساخت هر متر مکعب بتن	مقاومت فشاری	شاخص اقتصادی طرح
	تومان	۹۰ روزه	
CONTROL	۶۳۹/۰۰۰	۳۱/۲	۲/۰۵
%BR-5	۶۲۰/۰۰۰	۲۹/۹	۲/۰۷
BR-10%	۶۰۱/۰۰۰	۲۷/۲	۲/۲۱
BR-15%	۵۸۲/۰۰۰	۲۵/۷	۲/۲۷
BR-20%	۵۶۴/۰۰۰	۲۳/۸	۲/۳۷

۷- بحث

در این تحقیق تلاش گردید تا مزایا و معایب استفاده از پودر آجر ضایعاتی که حجم زیادی از پسماندهای ساختمانی را به خود اختصاص داده، مورد بررسی قرار گیرد. امروزه در کشور، حجم زیادی از پسماندها و زباله‌های ساختمانی تولید می‌شود که سازوکاری برای ایجاد بازیافت این مصالح وجود ندارد. بارگیری و انتقال این پسماندها و سرانجام امحاء کردن آن برای شهرداریها هزینه‌های گزافی دارد. علاوه بر آن مشکلات زیست محیطی ناشی از تولید سیمان بعنوان یک مولد بزرگ گاز CO_2، آلودگی هوای کلانشهرها را بدنبال خواهد داشت. همچنین محدودیتهای تامین انرژی (برق و گاز) مورد نیاز کارخانجات تولید سیمان بعضاً باعث اخلال در روند تولید و افزایش مقطعی قیمت سیمان می‌گردد[۵۱]. بطوریکه گاز بسیاری از واحدهای سیمانی قطع شده و آن‌ها برای فعالیت خود از مازوت استفاده می‌کنند. متاسفانه بعضاً دیده می‌شود که هنگام کمبود یا کاهش تولید سیمان در اثر قطعی انرژی، سوداگران اقتصادی نسبت به احتکار و انبارداری غیراصولی آن اقدام می‌کنند. بطوریکه در سال ۱۴۰۰ گزارشهای زیادی از سراسر کشور مبنی بر احتکار چندین هزار تن سیمان در شرایط نامطلوب و غیراستاندارد در رسانه‌ها منتشر شد[۵۲،۵۳]. ادامه روند فعلی باعث از بین رفتن سرمایه‌های در گردش، زمینه سازی برای تولید رانت و احتکار، از بین رفتن فرصتهای شغلی و تولیدی، زمینه سازی برای گسترش دلالی و گران فروشی می‌شود. وجود این مشکلات و تهدیدها ایجاب می‌کند تا برای کاهش تولید سیمان و نیز کاهش حجم پسماندهای ساختمانی، به چرخه بازیافت مصالح روی آورده شود. 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 نمود. از طرفی شایسته است با انجام تحقیقات و سرمایه‌گذاری بیشتر در این حوزه، از محققین برای تهیه دستورالعملهای بکارگیری از پسماند ساختمانی برای تولید مصالح جدید حمایت شود. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از حداکثر ۵٪ پودر آجر بازیافتی به جای بخشی از سیمان در بتن تقریباً عملکرد رفتاری و دوام بتن مشابه با بتنهای معمولی دارد. همچنین استفاده از انواع روان کننده (کاهنده نسبت آب به سیمان) و حباب ساز (ضد یخ) یا سایر افزودنیهای چندمنظوره (مانند ژل نانوسیلیس) می‌توان برخی از ضعفهای موجود در بتن مانند اسلامپ پایین، ضعف در مقاومت فشاری و کاهش دوام یخ زدگی بتن را بهبود دهد. حتی اگر پودر آجر بازیافتی مناسب کاربری سازهای و استفاده در صنعت ساختمان نباشد اما بعنوان بتنی برای کفسازی، جداول بتنی، ساخت دیوارهای غیربابر، استفاده در محوطه سازی و یا ساخت نماد و سردرب ورودی و غیره می‌تواند بسیار مفید و توجیه‌پذیر باشد.

نتیجه‌گیری

برخی از مهمترین نتایج این تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

بیش از ۶۰٪ ساختار شیمیایی پودر آجر ضایعاتی را اکسید سیلیس تشکیل می‌دهد که می‌تواند نقش یک ماده پوزولانی را در بتن داشته باشد.

استفاده از پودر آجر ضایعاتی باعث جذب آب بتن تازه و کاهش اسلامپ بتن خواهد شد. بطوریکه طرح BR-5,10,15,20% به ترتیب ۱۵٪، ۳۲٪، ۴۷٪ و ۶۵٪ اسلامپ را کاهش می‌دهد.

استفاده از پودر آجر ضایعاتی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن در تمام سنین می‌شود. بطوریکه طرحBR-5,10,15,20% به ترتیب ۴/۲ ٪، ۱۲/۷ ٪، ۱۷/۸ ٪ و ۲۳/۹ ٪ مقاومت فشاری ۹۰ روزه را کاهش می‌دهد.

استفاده از پودر آجر ضایعاتی باعث کاهش مقاومت کششی در بتن خواهد شد. بطوریکه طرحBR-5,10,15,20% به ترتیب به ترتیب ۶/۸ ٪، ۱۳/۷ ٪، ۲۰/۶ ٪ و ۲۷/۵ ٪ مقاومت کششی را کاهش می‌دهد.

استفاده از پودر آجر ضایعاتی در بتن میزان جذب آب را افزایش می‌دهد. بطوریکه BR-5,10,15,20% میزان جذب آب اولیه را به ترتیب ۲/۱ ٪، ۳/۲ ٪، ۴/۴ ٪، ۶/۰ ٪، ۷/۸ ٪ و میزان جذب آب ثانویه به ترتیب ۳/۶ ٪، ۵/۵ ٪، ۷/۳ ٪، ۸/۹ ٪، ۱۰/۷ ٪ افزایش می‌دهد.

استفاده از پودر آجر ضایعاتی، مقاومت فشاری بتن را پس از قرارگیری در برابر چرخه یخبندان کاهش می‌دهد. بطوریکه میزان مقاومت فشاری طرح BR-5,10,15,20%پس از ۱۵۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۵/۸ ٪، ۷/۵ ٪، ۹/۲ ٪، ۱۰/۳ ٪، ۱۱/۷ ٪ و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان به ترتیب ۱۰/۶ ٪، ۱۳/۲ ٪، ۱۵/۷ ٪، ۱۶/۷ ٪ و ۱۷/۶ ٪ کاهش یافت

شاخص اقتصادی هزینه نسبت به مقاومت فشاری، نشان داد که استفاده از طرحBR-5% به میزان ۲/۰۷ بسیار نزدیک به بتن شاهد است ولی با توجه به مزایای زیست محیطی که استفاده از این روش دارد، توجیه اقتصادی خواهد داشت.

تشکر و قدردانی

قدردانی فراوان از آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز و مرکز پژوهش متالورژی رازی شیراز جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

[1] Taherkhani,h. (2014). Investigating and comparing the properties of asphalt concrete containing brick and glass powder fillers. Research Journal of Transportation, 12(2 (serial 43)), 0-0. SID. Https://sid.ir/paper/83587/fa

[2] Taghipour,h. Kavousi, f. (2018). Evaluation of the effect of brick powder in improving the fatigue behavior of asphalt mixture. Modares Civil Engineering, 17(6), 81-91.

[3] Jalilzadeh, Qudousi, J, Shamsi.Sh, (2018). Identification and ranking of effective factors in the management of civil and construction waste in urban areas using the FAHP method. Environmental Science and Technology Quarterly

[4] Khairkhah, Ghanbari. (2022). Laboratory investigation of the feasibility of reusing construction waste in construction projects. Journal of Engineering Geology, 15(4), 111-130.

[5] Elikayi.A, (1396), Assessment and analysis of construction waste recycling situation: a case study of District 4 of Tehran Municipality. (in persian)

[6] Motahari, F, Samadi, H. (2020). Identification and ranking of socio-cultural factors affecting urban waste management in Tehran (case study: civil and construction waste). Iranian Political Sociology Monthly, 3(3), 2915-2929.

[7] Moradi Kia.S, Omidre.B, Abdoli.M, Salehi.I, (2021). Investigating the relationship between independent economic variables and dependent variables of urban waste production (case example: Tehran). (in persian)

[8] Salamat news agency, (1401), Construction waste, https://www.salamatnews.com/news/345459/ (in persian)

[9] Islamic Republic News Agency, (1394), Hoarding of cement, https://irna.ir/xjddrb (in persian)

[10] Tang, D., Zhang, X., Hu, S., Liu, X., Ren, X., Hu, J., & Feng, Y. (2020). The reuse of red brick powder as a filler in styrene-butadiene rubber. Journal of Cleaner Production, 261, 120966.

[11] Zhao, Z., Grellier, A., Bouarroudj, M. E. K., Michel, F., Bulteel, D., & Courard, L. (2021). Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability. Journal of Building Engineering, 43, 102898.

[12] Beraj.G, Atyia, M. M., Mahdy, M. G., & Abd Elrahman, M. (2022). The effect of finely-grinded crushed brick powder on physical and microstructural characteristics of lightweight concrete. Minerals, 12(2), 159.

[13] Lorn.D, Li, B., Xiao, J., & Singh, A. (2022). Utilization potential of aerated concrete block powder and clay brick powder from waste. Construction and Building Materials, 238, 117721.

[14] Arif, R., Khitab, A., Kırgız, M. S., Khan, R. B. N., Tayyab, S., Khan, R. A., (2021). Experimental analysis on partial replacement of cement with brick powder in concrete. Case Studies in Construction Materials, 15, e00749.

[15] Dung.J, Lin, Z. H., Chen, G. M., Kwan, A. K. H., & Li, Z. H. (2020). Reutilization of clay brick waste in mortar: Paste replacement versus cement replacement. Journal of Materials in Civil Engineering, 31(7), 04019129.

[16] Hu, K., Chen, Y., Naz, F., Zeng, C., & Cao, S. (2019). Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. Waste Management, 85, 396-404.

[17] Abdullah, D. J., Abbas, Z. K., & Abed, S. K. (2016). Some Properties of Concrete Containing Waste Brick As Partial Replacement Of Coarse Aggregate And Addition Of Nano Brick Powder.

In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 961, No. 1, p. 012093). IOP Publishing.

[18] Eshg Dost.GH, (1395) Investigating the mechanical properties of high-strength concrete with zeolite and waste brick powder, Journal of Concrete Structures and Materials, 4(3), 60-76. (in persian)

[19] Adeli.h , mohamadi.f, (1392), The use of clay bricks in the construction of light and resistant concrete blocks from an environmental point of view, Journal of Concrete Structures and Materials, 1(2), 14-30. (in persian)

[20] He, Z., Shen, A., Wu, H., Wang, W., Wang, L., Yao, C. (2021). Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. Construction and Building Materials, 274, 122113.

[21] Shah, M. U., Usman, M., Hanif, M. U., Naseem, I., & Farooq, S. (2021). Utilization of solid waste from brick industry and hydrated lime in self-compacting cement pastes. Materials, 14(5), 1109.

[22] Bazaee, A., Alidadi Tassoji, H., Golshan, M. R., & Aghamajidi, R. (2022). Optimization Of The Reinforcement Method Of Short Concrete Column With Steel Sheet In Different Shape Patterns By Finite Element Method. Journal of Concrete Structures and Materials, 7(2), 159-187. (in persian)

[23] Homayoun, M. J., Aghamajidi, R., Bazaee, A., & Mansouri, B. (2022). 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. (in persian)

[24] Azad, B., & Bazaee, A. (2022). 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. (in persian)

[25] 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 (in persian)

[26] 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. (in persian)

[27] Sharif Tehrani.S., Hosseini Lavasani.H., Shirgir.B. (2016) "Investigating the effect of water flow and deicing materials on the damage of asphalt concrete under freezing and thawing cycles" Scientific Research Journal of Civil Engineering, Modares, Iran.

[28] Zahihi.A., Nahovi.A., Samadi.D., Farmanpour.G. (2014) "Comparison of electrical and compressive strength of concrete in freezing and water cycles" 6th Annual Concrete Conference, Tehran, Iran.

[29] Ge, Z., Gao, Z., Sun, R., & Zheng, L. (2012). Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. Construction and Building Materials, 31, 289-293.

[30] Kırgız, M. S. (2016). Fresh and hardened properties of green binder concrete containing marble powder and brick powder. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 20(sup1), s64-s101.

[31] Olofinnade, O. M., Ede, A. N., Ndambuki, J. M., & Bamigboye, G. (2016). Structural properties of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement. In Materials Science Forum (Vol. 866, pp. 63-67). Trans Tech Publications Ltd.

[32] Sinkhonde, D., Onchiri, R. O., Oyawa, W. O., & Mwero, J. N. (2021). Response surface methodology-based optimisation of cost and compressive strength of rubberised concrete incorporating burnt clay brick powder. Heliyon, 7(12), e08565.

[33] Sinkhonde, D., Onchiri, R. O., Oyawa, W. O., & Mwero, J. N. (2022). Durability and water absorption behaviour of rubberised concrete incorporating burnt clay brick powder. Cleaner Materials, 4, 100084.

[34] Heidari, A., & Hasanpour, B. (2013). Effects of waste bricks powder of gachsaran company as a pozzolanic material in concrete.

[35] Rani, M. U., & Jenifer, J. M. (2016). Mechanical Properties of Concrete with Partial replacement of Portland Cement by Clay brick powder. IJERT–International Journal of Engineering Research and Technology, 5(2), 2278-0181.

[36] Kumar, B. V., Ananthan, H., & Balaji, K. V. A. (2017). Experimental studies on cement stabilized masonry blocks prepared from brick powder, fine recycled concrete aggregate and pozzolanic materials. Journal of Building Engineering, 10, 80-88.

[37] Ma, Z., Tang, Q., Wu, H., Xu, J., & Liang, C. (2020). Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. Cement and Concrete Composites, 114, 103758.

[38] Xie, H., Dong, J., Deng, Y., & Dai, Y. (2022). Research and Model Prediction on the Performance of Recycled Brick Powder Foam Concrete. Advances in Civil Engineering, 2022.

[39] Prayuda, H., Monika, F., & Cahyati, M. D. (2020). Fresh properties and compressive strength of self compacting concrete with fines aggregate replacement using red brick powder and rice husk ash. World Journal of Engineering, 17(4), 473-480.

[40] Mohan, M., Apurva, A., Kumar, N., & Ojha, A. (2020, September). A review on use of crushed brick powder as a supplementary cementitious material. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 936, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

[41] Zheng, L., Ge, Z., Yao, Z. Y., Sun, R. J., & Dong, J. G. (2011). The properties of concrete with recycled clay-brick-powder. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 99, pp. 826-831). Trans Tech Publications Ltd.

[42] Sun, R., Huang, D., Ge, Z., Hu, Y., & Guan, Y. (2014). Properties of self-consolidating concrete with recycled clay-brick-powder replacing cementitious material. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 3(3-4), 211-219.

[43] Salman, M. M., & Yousif, M. Z. (2018). The effect of waste brick powder as cement weight replacement on properties of sustainable concrete. J. Econ. Sustain. Dev, 22(2), 116-130.

[44] Sinkhonde, D., Onchiri, R. O., Oyawa, W. O., & Mwero, J. N. (2023). Behaviour of rubberised concrete with waste clay brick powder under varying curing conditions. Heliyon, 9(2).

[45] Tuyan, M., Andiç-Çakir, (2018). Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer. Composites Part B: Engineering, 242-252.

[46] Zhou, L. A., Liu, Y., Lu, J., Zhou, W., (2021). Influence of Recycled Concrete Powder (RCP)

and Recycled Brick Powder (RBP) on the Physical/Mechanical Properties and Durability of Raw Soil. Coatings, 11(12), 1475.

[47] Nayak, P. S., & Sing, B. K. (2007). Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. Bulletin of materials science, 30

[48] Topic 9 of National Building Regulations .2019 Edition. (in persian)

[49] Iranian concrete standard .ABA. (in persian)

[50] Astm c666,(2019). Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing., u.s.a.

[51] Islamic Republic News Agency, (1400), Hoarding of cement, https://www.irna.ir/news/84811044/ (in persian)

[52] Tasnim News Agency, (1400), Hoarding of cement, https://tn.ai/2623748 (in persian)

[53] Iranian Labour News Agency, (1400), Hoarding of cement, https://www.ilna.ir/fa/tiny/news-1109815 (in persian)