Iranian Concrete Society

The Effect of Using Waste Brick and Recycled Concrete Aggregate on the Durability and Mechanical Properties of Concrete Pavement

Mohammad Dehghan Reykandeh[1], Mohsen Amouzadeh Omrani[2], Abdullah Davoudi-Kia[3], Rezvan Babagoli4*

1-M.Sc.Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad university, Amol, Iran
2-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.
E-mail: m_amouzadeh@yahoo.com, Mo.Omrani@iau.ac.ir
3-Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad university, Amol, Iran
4-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran
Received: 06 January 2024 Revised: 12 July 2024 Accepted: 20 August 2024

Research paper

Abstract

In this research, the mechanical properties of concrete in the conditions of using natural aggregates and comparing the results with the replacement of recycled aggregates with values of 10, 20, 30 and 40% have been investigated. Mechanical properties of ordinary concrete were compared with concrete containing coarse-grained brick with 7.5, 15, 22.5 and 30% of concrete volume and concrete containing fine-grained brick with 15, 30, 45 and 60% of concrete volume. In this regard, the results of the study indicate an increase in compressive strength of the samples in the presence of coarse and fine-grained bricks. This increase was up to 22.5% for coarse-grained bricks and up to 30% for fine-grained bricks in the presence of crushed bricks, and the trend of decreasing compressive strength was evident for higher percentages of crushed bricks. Also, in terms of flexural strength, the specimens have been reduced in the presence of coarse and fine-grained bricks. Finally, the results of the study of water absorption showed an increase in water absorption of samples up to 56.38% for coarse-grained bricks and 51.19% for fine-grained bricks.

Keywords: Recycled Concrete, Masonry Brick Waste, Compressive Strength, Flexural Strength, Durability.

*Corresponding Auther: Mohsen Amouzadeh Omrani

Dehghan Reykandeh, M., Amouzadeh Omrani, M., Davoudi-Kia, A., Babagoli, R. The Effect of Using Waste Brick and Recycled Concrete Aggregate on the Durability and Mechanical Properties of Concrete Pavement. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-30. http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.434272.1356

انجمن علمی بتن ایران

تأثیر استفاده از ضایعات آجر بنایی و خرده بتن بازیافتی بر دوام و خصوصیات مکانیکی روسازی بتنی

محمد دهقان ریکنده[۱]، محسن عموزاده عمرانی*[۲]، عبداله داودی کیا[۳]، رضوان باباگلی[۴]

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

۲-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

۳-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

۴-استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m_amouzadeh@yahoo.com, Mo.Omrani@iau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و مقایسه نتایج آن با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ درصد پرداخته شده است. خواص مکانیکی بتن معمولی با بتن حاوی خرده آجر درشت‌دانه با ۷٫۵، ۱۰، ۲۲٫۵ و ۳۰ درصد حجم بتن و بتن حاوی خرده آجر ریزدانه با ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد حجم بتن مقایسه شد. نتایج تحقیق حاکی از افزایش مقاومت فشاری نمونه ها در شرایط حضور خرده آجر درشت‌دانه و ریزدانه بوده است. این افزایش مقاومت فشاری برای خرده آجر درشت‌دانه تا ۲۲٫۵٪ حضور خرده آجر و برای خرده آجر ریز دانه تا ۳۰٪ حضور خرده آجر رخ داده است و روند کاهش مقاومت فشاری برای درصدهای بیشتر خرده آجر مشهود بود. همچنین در خصوص مقاومت خمشی، نمونه ها با حضور خرده آجر درشت‌دانه و ریزدانه، با کاهش مقاومت مواجه شدهاند. در پایان نیز نتایج بررسی میزان جذب آب، حاکی از افزایش میزان جذب آب نمونه ها تا ۵۶٫۳۸ ٪ برای خرده آجر درشت‌دانه و ۵۱٫۱۹٪ برای خرده آجر ریزدانه ضایعاتی بوده است.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، خرده آجر، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، دوام.

۱- مقدمه

یکی از متداول‌ترین نوع مصالح ساختمانی بتن می‌باشد و بدون تردید پرمصرف‌ترین و کاربردی‌ترین مصالح مورد استفاده در جهان است و بخاطر دارابودن خواصی از جمله شکل خمیری قبل از گیرش، مقاومت خوب در برابر آتش‌سوزی، دسترسی آسان به مصالح، مقاومت‌فشاری مناسب پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی می باشد.[۱]

استفاده فراوان در صنایعی از جمله: پل‌سازی، سدسازی، محوطه‌سازی، سازه‌های ساختمانی، ایجاد بنادر و اسکله‌ها و غیره باعث شده این ماده ارزشمند مرکز توجه بسیاری از دانشمندان و پژوهشگران قرار گیرد. کاهش زباله و بازیافت از فاکتورهای مهم مدیریت مواد زائد می‌باشد که در جهان به دلیل رشد جمعیت و پیشرفت صنایع نوع زباله و مقدار آن در حال افزایش است. سالانه حجم بسیار زیادی ضایعات آجر در نقاط مختلف دنیا و از جمله کشور ایران تولید می‌شود و به علت تخلیه این ضایعات در حوالی شهرها، مشکلات زیست محیطی بسیاری ایجاد شده است و نشان از هدر رفت مواد اولیه و به تبع آن متحمل شدن هزینه‌های بالای اقتصادی در سطح کلان می‌باشد.[۲]

صنعت ساختمان مصرف کننده بزرگ منابع طبیعی و در عین حال یکی از تولیدکنندگان بزرگ ضایعات می‌باشد. استفاده مجدد از ضایعات ساختمانی می‌تواند به ذخیره و نگهداری منابع طبیعی کمک کند. آلودگی زیست محیطی را کاهش دهد و مهم‌تر اینکه می‌تواند باعث کاهش هزینه ساخت بتن و در پی آن کاهش هزینه‌های ساخت سازه‌های بتنی گردد.[۳]

در روند ساخت آجرهای فشاری در کارگاه‌های آجرپزی و کارخانه‌های تولید آجر مقدار قابل توجهی از این مصالح شکل اصلی خود را از دست می‌دهند یا به عبارتی خرد می‌شوند و این مصالح به‌عنوان نخاله از چرخه تولید خارج شده و در عمل استفاده چندانی ندارد و باعث آلودگی زیست محیطی می‌گردد.

امروزه با توجه به بحران‌های اقتصادی در دنیا و با توجه به مقوله‌های محیط زیست، بهره وری و روند روبه رشد کاهش منابع تولید سنگ‌دانه، توجه به استفاده از بتن بازیافتی و استفاده از مواد ضایعاتی به‌عنوان سنگ‌دانه مورد توجه قرارگرفته است.

سالانه حجم بسیار زیادی ضایعات آجر در دنیا تولید می‌شود که مشکلات زیست محیطی را به دنبال دارد که این مورد نشان دهنده از بین رفتن مواد اولیه و صرف هزینه بالای اقتصادی می‌باشد. در نتیجه لازم است با انجام مدیریت صحیح این مشکلات را به حداقل ممکن کاهش داد. یکی از بهترین راه مواجهه با این ضایعات یافتن راه حل جهت فرآوری و بازیافت این مصالح می‌باشد.

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که تحقیقات در زمینه‌ی استفاده از مصالح خرد شده آجر بازیافتی جهت ساخت بتن در ابتدای راه می‌باشد و تحقیقات اندکی صورت گرفته است. درک مناسب از رفتار و خصوصیات بتن سبک ساخته شده با ضایعات آجر بازیافتی نیازمند انجام تحقیقات و آزمایش‌های بیشتر می‌باشد[۴] .

ایده استفاده از مواد جایگزینی به جای ذرات با توجه به اینکه ۶۰ تا ۷۰ درصد وزن بتن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهد، موضوع قابل توجهی در این صنعت مهم و پر استفاده در جهان می‌باشد. از جهتی وجود مواد بازیافتی در طبیعت که شامل ضایعات ساختمانی نیز می‌گردد مشکلات محیط زیست را افزون کرده و استفاده از این مواد بازیافتی می‌تواند جنبه‌های آلودگی محیط زیست و صرفه اقتصادی را به همراه داشته باشد.

بتن یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است. ویژگی اصلی بتن ارزان بودن و در دسترس بودن مواد اولیه است و نیز می‌توان گفت که تولید انواع بتن با استفاده از حرارت، بخار، اتوکلاو، تخلیه هوا، فشار هیدرولیکی ویبره و قالب انجام می‌گیرد. بتن بطور کلی محصولی است که از مخلوط آب با سیمان و سنگ‌دانه‌های مختلف در اثر واکنش آب با سیمان در شرایطی خاص حاصل می‌شود و دارای ویژگی‌های خاص است. بتن با گذشت بیش از ۱۷۰ سال از پیدایش سیمان پرتلند به صورت کنونی توسط یک بنّای لیدزی، دستخوش تحولات و پیشرفت شگرفی شده است. در دسترس بودن مصالح‌بتن، دوام نسبتاً زیاد و نیاز به ساخت و سازهای فراوان

شامل سازه‌های بتنی چون راه‌ها، تونل‌ها، پل‌ها، سدها، سازه‌ها و ساختمان‌ها این ماده را بسیار پرمصرف نموده است. حدود سه تا چهار دهه است که کاربرد این ماده در شرایط خاص مورد استقبال کاربران قرار گرفته‌است. امروزه با پیشرفت علم و تکنولوژی مشخص شده، که صرف توجه به مقاومت به‌عنوان یک معیار رای طراح بتن برای محیط‌ها و کاربرد مختلف نمی‌تواند جوابگوی مشکلاتی باشد که در دراز مدت در سازه‌های بتنی ایجاد می‌گردد. اخیراً، مسئله دوام بتن در محیط‌های مختلف مورد توجه قرار گرفته است. مشاهده خرابی‌هایی با عوامل فیزیکی و شیمیایی در بتن‌ها در اکثر نقاط جهان و با شدتی بیشتر در کشورهای در حال توسعه، افکار و اذهان را به سمت طرح بتن‌هایی با ویژگی خاص و با دوام لازم سوق داده‌است. در این راستا در پاره ای از کشورها دستورالعمل و استانداردهایی نیز برای طرح بتن با عملکرد بالا تهیه شده و طراحان و مجریان در بعضی از این کشورهای پیشرفته ملزم به رعایت این دستورالعمل‌ها گشته‌اند.[۵]

بتن در مفهوم بسیار وسیع به هر ماده یا محصولی که از یک ماده چسبنده با خاصیت سیمانی شدن تشکیل شده‌باشد اطلاق می‌شود.این ماده چسبنده عموماً حاصل فعل و انفعال سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. حتی امروز چنین تعریفی از بتن شامل طیف وسیعی از محصولات می‌شود. بتن ممکن است از انواع مختلف سیمان و نیز پوزولانها، سرباره کوره‌ها، مواد مضاف، گوگرد، مواد افزودنی، پلیمرها، الیاف و غیره تهیه شود. همچنین در نحوه ساخت آن ممکن است از حرارت، بخار آب، اتوکلاو، خلا، فشارهای هیدرولیکی و متراکم کننده‌های مختلف استفاده شود. در اینجا از بتنی صحبت می‌شود که مخلوطی از سیمان و آب و سنگ‌دانه و در نهایت مواد افزودنی می‌باشد.[۶]

۱.۱. مروری بر ادبیات

-استفاده از ضایعات در بتن

یکی از مسائل مورد اهمّیت در استفاده از مواد ضایعات در بتن مسائل محیط زیستی و امکان دفن این مواد در بتن می‌باشد.

حجازی و همکاران[۶] در تحقیق خود به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن خود متراکم با سنگ‌دانه‌های بازیافتی و به دست آوردن بهترین طرح از لحاظ مقاومت فشاری وکششی و آزمایش‌های بتن خود متراکم می‌باشد. برای این منظور مقدار مصالح بازیافتی، ۲۵ درصد مصالح ریز دانه جایگزین شده است. در این تحقیق ۱۰ طرح اختلاط با متغیر بودن ریزدانه‌ها، درشت‌دانه‌ها و پودر سنگ ساخته شده است. آزمایش‌های بتن سخت از قبیل مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷و۲۸ روزه مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. در نتیجه در طرح افزایش ریزدانه‌ها وکاهش درشت‌دانه‌ها و پودر سنگ نسبت به طرح‌های دیگر مطلوب‌تر بوده است. نتایج نشان داد بخش ریزدانه مصالح سنگی نسبت به درشت‌دانه اثرگذاری بیشتری روی رئولوژی بتن خود متراکم دارد. مطابق نتایج، با استفاده از سنگدانه درشت‌تر، لزجت خمیری افزایش یافته و به سبب آن احتمال جدا شدگی، انسداد و آب انداختگی افزایش می‌یابد، ولی با استفاده از مصالح سنگی ریزتر از مقدار تنش تسلیم کاسته شده که خود باعث بهبود رئولوژی می‌شود و همچنین سبب بهبود مقاومت‌های فشاری و کششی بتن خود متراکم نیز می‌گردد. کیفیت و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها تأثیر به سزایی در خواص تازه و سخت شده بتن خود متراکم دارد، به‌طوری که در برخی موارد بخش ریزدانه همانند فیلتر عمل کرده و سبب تنظیم لزجت خمیری بتن شده است. این کار باعث حذف قوام آور در ساخت بتن خود متراکم شده که منجر به اقتصادی شدن این بتن می‌گردد. استفاده از بتن ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی با میزان مشارکت تا ۲۵٪ تاثیر ناچیزی بر کارایی بتن حاصله خواهد داشت. باتوجه به محدودیت عمر سازه‌های بتنی و همچنین تخریب سازه‌های بتنی در اثر عوامل طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان وجود ضایعات بتنی مشکلات زیادی را برای محیط زیست به وجود آورده است. ازطرفی معادن تولید مصالح سنگی مورد استفاده در بتن محدود می‌باشد.

لذا استفاده مجدد از سنگ‌دانه‌های ضایعاتی بتنی باعث کاهش استفاده از مواد معدنی و همچنین کاهش تخریب زیست محیطی می‌شود. در نقاطی مانند دشت‌ها، مناطق ساحلی، شهری و غیر کوهستانی که پوشش سنگی جهت برداشت آن به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن وجود ندارد و یا در فاصله‌ی بسیار زیادی قرار دارد، به‌نحوی که حمل آن اقتصادی نیست و همچنین با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از حفاری در معادن، استفاده از بتن بازیافتی جهت تأمین سنگ‌دانه‌های بتن، به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است. در نقاطی مانند دشت‌ها، مناطق ساحلی، شهری و غیر کوهستانی که پوشش سنگی جهت برداشت آن به‌عنوان سنگ‌دانه در بتن وجود ندارد و یا در فاصله‌ی بسیار زیادی قرار دارد، به‌نحوی که حمل آن اقتصادی نیست و همچنین با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از حفاری در معادن، استفاده از بتن بازیافتی جهت تامین سنگدانه‌های بتن، به لحاظ اقتصادی توجیه پذیر است.

سالخورده و نوری قیداری[۷] به روش جدیدی از ترکیب بین بتن با مصالح بازیافتی و مصالح طبیعی به منظور بهبود کیفیت بتن جمع شده بازیافت شده و افزایش مقدار سنگ‌دانه‌های بازیافتی، دست یافتند. این پژوهش با استفاده از روش جدید و روش متداول در درصدهای مختلف جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی، خواص مکانیکی بتن بازیافتی را مورد بررسی قرارداده است. روش جدید در مقایسه با روش معمولی خواص مکانیکی بتن بازیافتی را بطور قابل توجهی افزایش داده است با استفاده از روش جدید مقدار سنگ‌دانه‌های بازیافتی می‌تواند تا ۵۰ درصد در بتن افزایش یابد در حالی که روش معمولی مقدار سنگ‌دانه‌های بازیافتی را باید کمتر از ۳۰ درصد در نظر گرفت. روش انجام آنها بدین صورت است که سنگ‌دانه‌های بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه با سنگ‌دانه‌های طبیعی با نسبت‌های جایگزینی متفاوت ترکیب شوند و سپس مخلوط گردند.

برنجیان و همکاران در سال ۱۳۹۵ از بین پارامترهای تاثیرگذار مصالح سنگی بر خواص بتن، به بررسی تاثیر سنگ‌دانه‌ها، بر خواص مقاومتی بتنِ مقاومت بالا پرداخته شده است. به همین منظور نمونه‌های بتنی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی با دانه‌بندی و طرح اختلاط هدفمند جهت مطالعه پارامتر متغییر ساخته شده است. سپس نتایج آزمایش‌های مقاومتی این بتن ارایه شده است. نتایج تحقیق نشان دهنده این است که با افزایش استفاده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی به‌عنوان ریزدانه و درشت‌دانه، کاهش در مقاومت فشاری و کششی مشاهده شد و هم چنین کاهش در اسلامپ نیز مشاهده گردید[۸].

در تحقیقی که توسط شربی نیازی و همکاران انجام شد، خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و لاستیک ضایعاتی به همراه میکروسیلیس ارزیابی شد. بدین منظور سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به میزان ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی جایگزین درشت‌دانه و میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد وزنی سیمان، جایگزین سیمان شده است. همچنین در دو نمونه ازمایشگاهی دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی بتنی، یکی در حالت بدون میکروسیلیس و دیگری با میکروسیلیس از لاستیک ضایعاتی به میزان ۳۰ درصد حجمی‌ماسه جایگزین سنگ دانه ریز، استفاده شده است. در گام بعدی مقدار اسلامپ، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، نمودار تنش-کرنش، چگالی و نفوذپذیری نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که وجود سنگدانه‌های بازیافتی سبب کاهش ۲/۳ تا ۵/۱۴ درصدی مقاومت فشاری و همچنین افزودن پودر لاستیک به نمونه دارای ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، سبب کاهش ۷۱ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع (نمونه با سنگدانه‌های طبیعی بدون میکروسیلیس) شده است. همه ی نمونه های دارای میکروسیلیس نسبت به نمونه های مشابه بدون میکروسیلیس، مقاومت فشاری بیشتری دارند. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی دارای ۲۵ درصد سنگدانه بازیافتی و میکروسیلیس است که نسبت به نمونه مرجع ۶/۹ درصد بیشتر است. نمونه حاوی ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی در حضور و در غیاب پودر لاستیک به ترتیب ۵۵ و ۷۲ درصد، مقاومت کششی کمتری و به ترتیب ۳۰ و ۶۷ درصد مقاومت خمشی کمتری نسبت به نمونه مرجع دارند. کمترین جذب اب، برای نمونه بدون سنگدانه‌های بازیافتی دارای میکروسیلیس و به میزان ۵/۰ درصد است.[۹]

- استفاده از ضایعات آجر در بتن

سالخورده و همکاران[۷]با انجام مطالعات و آزمایش‌هایی و با جایگزینی خرده آجر به‌عنوان درشت دانه و ریزدانه به مقدار ۲۵، ۵۰ ، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و انجام آزمایش‌های نفوذ پذیری و تخلخل و جذب آب و مقاومت‌فشاری و کششی را مورد بررسی قرار دادند. از نتایج یافتند بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی چگالی نسبتا کمتری و جذب آب بیشتری دارد که درصدهای پیشنهادی برای جایگزینی بصورت درشت دانه ۲۵ درصد و بصورت ریزدانه ۵۰ درصد پیشنهاد شده است.

دارپرنیان و همکاران در تحقیق انجام شده سنگ‌دانه‌های سبک موجود در آجر جوش را مورد بررسی قرار دادند بدلیل اینکه این سنگ‌دانه‌ها از خرد کردن آجرهای جوش کارگاه‌های آجرپزی بدست می‌آید در عین سبکی قابلیت تولید در تمام اندازه‌ها را دارا می‌باشند و در سطح این سنگ‌دانه‌ها حفره های بزرگ وجود ندارد که بعد از اختلاط با بتن حفره ها توسط خمیر سیمان پر شوند و چگالی افزایش یابد. نتایج نشان داد که بتن تولید شده با آجر جوش علی رغم کاهش بیست درصدی چگالی از مقاومت نهایی بالایی (حدود۹۰٪ بتن معمولی) برخوردار شد. این بتن با دانه‌بندی شن و ماسه شکسته معمولی و در ابعاد کارگاهی تولید گردید و تکرار نتایج در کارگاه به آسانی امکان پذیر خواهد بود.

سنگ‌دانه لیکا به علت سبکی بیش از حد و مقاومت پایین و نداشتن دیاگرام درست دانه‌بندی (عدم امکان تولید دانه‌های رد شده از الک ۳۰ به بعد و مقاومت پایین درشت‌دانه‌ها) امکان دستیابی به مقاومت‌های بالا را دارا نمی‌باشد. در بتن لیکا به علت سبکی بیش از حد سنگ‌دانه‌ها، جداشدگی امر غیر قابل اجتناب است[۱۰].

خواجوند و همکاران[۱۱] اثر جایگزین نمودن درشت دانه‌های بازیافتی آجر سفالی بجای شن بر روی مقاومت فشاری بتن را مورد بررسی قرار داده اند. به منظور رسیدن به طرح اختلاط بهینه و کاهش نمونه‌های آزمایشگاهی از روش تاگوچی استفاده شد. در این پژوهش فاکتور نسبت آب به سیمان در سه سطح ۳۰٪ و ۳۵٪ و ۴۰٪ و فاکتور بزرگترین اندازه اسمی سنگ‌دانه‌ها در سه سطح ۵.۹ و ۵.۱۲ و ۱۹ میلیمتر و فاکتور درصد جایگزین آجر بازیافتی در سه سطح ۰٪ و ۳۰٪ و ۵۰٪ به‌عنوان متغیر به نرم افزار مینی تب معرفی شد و براساس آن ۹ طرح اختلاط بدست آمد. با ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی مکعب مربع به ابعاد۱۰۰ میلیمتر براساس طرح های اختلاط و انجام آزمایش مقاومت‌فشاری، نتایج بدست آمده و اثر متغییر درصد جایگزین آجر بازیافتی در سه اندازه متفاوت توسط نرم افزار مینی تب و به روش تاگوچی مقایسه و بررسی شده است و برای تاثیر هرکدام از متغییر ها منحنی‌های لازم تهیه شده با استفاده از نتایج بدست آمده میزان کاهش مقاومت‌فشاری به نسبت افزایش درصد دانه‌های آجر بازیافتی مشخص گردید.

با توجه به اینکه در نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد آجر بازیافتی و با نسبت آب به سیمان ۳.۰ به اندازه اسمی ۵.۱۲ میزان کاهش مقاومت فشاری و افزایش جذب آب ناچیز می‌باشد لذا استفاده از آجر بازیافتی به‌عنوان بخشی از شن تا ۳۰ درصد توصیه می‌شود استفاده از آجر تا میزان ۵۰ درصد با توجه به نتایج بدست آمده قابل توجیه می‌باشد ولی باید توجه نمود استفاده از آن به میزان ۵۰ درصد با توجه به افزایش میزان درصد جذب آب، ضروری است آزمایش‌های پایایی و دوام بتن انجام شود. با توجه به این موارد درصد بهینه در حدود ۳۰ درصد تعیین می‌گردد.

مقایسه بین نتایج روش تاگوچی و نتایج روش آزمایشگاهی میزان اعتبار روش تاگوچی در بهینه‌سازی طرح‌های اختلاط بتن را نشان می‌دهد.

رضایی و همکاران[۱۲] اثرات مکانیکی و دوام استفاده از این آجر، بر روی مقاومت فشاری و کششی و دوام بتن‌های بازیافتی در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کردهاند آزمایش‌های انجام گرفته بر روی درصدهای مختلفی از جایگزین آجرهای شکسته به جای شن طبیعی مورد استفاده در بتن‌های بازیافتی و ارزیابی‌خواص مکانیکی و دوام آن بیانگر این نکته است که این مصالح با ملاحظاتی

می‌توانند در صنعت بتن قابل استفاده باشد. در این تحقیق مقدار روان کننده بصورت متغییر بوده و با جایگزینی آجر نسبت آب‌به خمیر افزایش یافته است. آزمایش جذب آب نیز انجام شد. نتایج نشان می‌دهند که علی رغم عایق کردن دانه‌ها، باز هم افزودن آجر به مخلوط بتن، باعث افزایش میزان جذب آب نمونه می‌شود. که این به دلیل متخلخل بودن دانه‌های آجری می‌باشد. گراف بالا بیانگر این است که مقدار آجر بیش از ۲۰ درصد، تخلخل بتن و جذب آب را به مقدار زیادی افزایش می‌دهد و نسبت آب به سیمان برای نیل به اسلامپ قابل قبول به همین دلیل افزایش یافته است.

منتیج نشان داد به دلیل سبک‌تر بودن دانه‌های آجری نسبت به دانه‌های شن طبیعی، با جایگزین کردن آجر به جای شن در مخلوط، چگالی نمونه‌ها کمتر شده است. با توجه به نتایج بدست آمده به نظر می‌رسد که استفاده از آجر به‌عنوان جایگزینی قسمتی از شن در مخلوط بتن تا میزان ۲۰ درصد مصالح سنگی درشت‌دانه، افت چشم گیری روی دوام و مقاومت بتن ایجاد نمی‌کند.

شیری بنمار و همکاران[۱۳] در تحقیقی‌خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا حاوی ضایعات آجر و سرامیک به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه مورد ارزیابی قرار دادند. ابتدا جهت تعیین ترکیب بهینه سرامیک و آجر ضایعاتی به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه، مخلوط‌های ۲۴ نمونه بتن با ۴۰ ، ۳۰ ، ۲۰ ، ۱۰ و ۵۰ درصد وزنی ماسه با سرامیک ضایعاتی خرد شده و مخلوط‌های بتن با ۲۰ ، ۱۵ ، ۱۰ و ۲۵ درصد وزنی ماسه با آجر ضایعاتی خرد شده ساخته شد. سپس مخلوط‌های ترکیبی سرامیک و آجر ضایعاتی مورد بررسی قرار گرفته است و با انجام آزمایش‌های بتن تازه و مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ و۴۲ روزه مقدار ۴۰ درصد وزنی ماسه از سرامیک ضایعاتی با ۱۰ درصد وزنی ماسه از آجر ضایعاتی به‌عنوان ترکیب بهینه تعیین شد. در ادامه خواص مهندسی بتن برای دو نوع مخلوط بتن معمولی و بتن حاوی ترکیب بهینه بدست آمده به‌عنوان جایگزین ماسه مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا نسبت به ساخت نمونه‌های مختلف بتن برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی در سنین مختلف و با دو شرایط محیطی خشک و شرایط نگهداری در آب ۲۲ درجه سانتیگراد اقدام شد. نتایج حاصل از بررسی‌های به‌عمل آمده نشان می‌دهد مقاومت کششی برای نمونه‌های بتن شاهد و بتن ضایعاتی با افزایش مقاومت فشاری، افزایش یافته است و مقاومت کششی نمونه‌های بتن شاهد با افزایش مقاومت فشاری تمایل به افزایش بیشتری از خود نشان دادند.

با توجه به بافت سطحی ریزدانه‌های سرامیک و آجر ضایعاتی مصرفی در این پژوهش، هنگامی که به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه استفاده می‌شوند سبب کاهش کارایی بتن می‌گردند. هنگامی که سرامیک ضایعاتی خرد شده جایگزین بخشی از ماسه می‌شود، با افزایش میزان جایگزینی، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در حالیکه با افزایش میزان جایگزینی آجر ضایعاتی به‌عنوان ماسه، کاهش در مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد نتیجه می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد ترکیب ۴۰٪ وزنی ماسه با سرامیک ضایعاتی به همراه ۱۰٪ وزنی ماسه با آجر ضایعاتی می‌تواند جایگزین مناسبی برای ریزدانه در بتن باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ضایعاتی در کلیه سنین و در شرایط عمل‌آوری خشک و مرطوب نسبت به نمونه‌های بتن شاهد بیشتر است. در شرایط نگهداری خشک، روند افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ضایعاتی بیشتر می‌باشد. بطوری‌که برای بتن ضایعاتی، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه بیشتر از بتن شاهد شده است.

دشتی و همکاران[۱۴] در تحقیق خود به بررسی نقش خرده آجر بازیافتی در مقاومت فشاری بتن پرداخته اند. و نتایج نشان داد جایگزین نمودن حدود ۲۰ درصد مصالح سنگدانه طبیعی با مصالح خردهآجر بازیافتی اثر چندانی در افت مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه های بتنی نشان نمی‌دهد. جایگزین نمودن حدود ۴۰ درصد مصالح سنگ‌دانه طبیعی با مصالح خرده آجر بازیافتی سبب افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه بتن بازیافتی نسبت به بتن شاهد می‌شود. علت اصلی این امر را می‌توان به زبر بودن بیشتر دانه‌های خردهآجر نسبت به دانه‌های سنگی طبیعی مرتبط نمود. با افزایش مصالح خردهآجر بازیافتی در بتن، مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه‌ی بتن

بازیافتی شدیداً افت می‌کند. علت این امر، پایین بودن مقاومت دانه‌های مصالح خردهآجر بازیافتی می‌باشد. با افزایش میزان مصالح خردهآجر بازیافتی در بتن(بیش از حدود ۶۰ درصد)، میزان افت مقاومت ۲۸ روزه‌ی نمونه‌های بتنی بازیافتی زیاد می‌باشد. به‌طورکلی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی کلیه‌ی نمونه‌های بتن بازیافتی که میزان مصالح خرده آجر در آنها بیشتر از حدود ۴۰ درصد می‌باشد، کمتر از مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی بتن با مصالح سنگ‌دانه طبیعی می‌باشد.

مدندوست و همکاران[۱۵] در تحقیق خود خواص مهندسی بتن حاوی ترکیب سرامیک و آجر ضایعاتی خرد شده به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه مورد ارزیابی قرار دادند. ابتدا جهت تعیین ترکیب بهینه سرامیک وآجر ضایعاتی به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه، مخلوط‌های بتن با ۱۰،۲۰،۳۰،۴۰و۵۰ درصد وزنی ماسه با سرامیک ضایعاتی خرده شده و مخلوط‌های بتن با۱۰،۱۵،۲۰و۲۵ درصد وزنی ماسه با آجر ضایعاتی خرد شده ساخته شده است. مخلوط‌های ترکیبی سرامیک و آجر ضایعاتی مورد آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷و۲۸ روزه مقدار ۴۰ درصد وزنی ماسه از سرامیک ضایعاتی با ۱۰ درصد وزنی ماسه از آجر ضایعاتی به‌عنوان ترکیب بهینه تعیین شده است. در این پژوهش با متغییر بودن مقدار روان کننده در همه طرح مخلوط‌ها اسلامپ ثابت نگه داشه شده است. نتیجه حاصل از این تحقیق، نشان می‌دهد که مقاومت‌فشاری نمونه‌های بتنی با افزایش میزان جایگزینی سرامیک ضایعاتی به‌عنوان ماسه افزایش یافته است و در مقایسه با بتن معمولی بیشتر می باشد. مقاومت فشاری بتن حاوی ترکیب ضایعاتی در تمام سنین و در هر دو شرایط نگهداری یاد شده، نسبت به بتن معمولی بیشتر شده است. در حالیکه برای مقاومت کششی این دو نوع بتن در شرایط نگهداری، تفاوت محسوسی دیده نشده است، ولی در محیط خشک مقاومت کششی بتن حاوی ترکیب ضایعاتی بیشتر از بتن معمولی است. میزان جمع شدگی بتن حاوی ترکیب ضایعاتی در تمام سنین با توجه به تخلخل بالای سنگ‌دانه‌های ضایعاتی در مقایسه با ماسه، بیشتر از بتن معمولی می‌باشد.

ژانک و همکاران در تحقیق خود ترکیبات بازیافت شده تولیدی بوسیله مکانیکی از بتن حذف شده آجرهای خاکی برای ساخت بتن پر از سیمان استفاده می‌شود شش گروه از ترکیبات بازیافتی بتن پیش ساخته با استفاده از شاخص خردشدگی مواد مختلف در شرایط بتن مشابه به طراحی شده است نسبت مخلوط خردشدگی دانه‌ها با جایگزینی افزایش ترکیبات بازیافتی افزایش می‌یابد. آزمایش‌ها در مورد مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، قدرت فلزیال، ضریب نفوذپذیری از جمله آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق می‌باشد. نتیجه آزمایش‌های این تحقیق نشان می‌دهد استحکام فشاری، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته ۲۸ روزه ۳۶٪، ۲۸٪ و ۲۱٪ به ترتیب زمانی که شاخص خردشدگی از ۹٪ به ۳۷٪ تغییر می‌کند به‌طور همزمان میزان خم شدن قدرت از ۶۶٪ به ۶.۱۸٪ افزایش می‌یابد[۱۶] .

طاهرخانی و همکاران[۱۷] در این تحقیق مشخصات فنی بتن آسفالتی که در آن پودر بدست آمده از آجر و شیشه ضایعاتی در درصدهای مختلف جایگزین فیلر طبیعی شده است مورد مطالعه قرار گرفته و مشخصات استقامت مارشال، روانی، درصد فضای خالی، فضای خالی مصالح سنگی و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف فیلر ضایعاتی با مشخصات بتن آسفالتی کنترل و مقایسه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی فیلر طبیعی با پودر آجر می‌توان به استقامت مارشال بیشتر و روانی کمتری نسبت به بتن آسفالتی رایج دست یافت، همچنین نشان داده می‌شود که درصد جایگزینی فیلر طبیعی با پودر آجر تاثیر چندانی بر درصد فضای خالی مخلوط و درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر ندارد. با افزایش درصد جایگزینی فیلر پودر شیشه، وزن مخصوص کاهش می‌یابد. اما، با افزایش درصد جایگزینی پودر آجر تا ۲۵ درصد وزن مخصوص افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد، ولی همواره دارای وزن مخصوصی بیشتر از ترکیب شاهد می‌باشد.

ـ استفاده از آجر ضایعاتی در بتن روسازی

در تحقیقی که توسط حسامیو همکاران انجام شد، از خرده آجر به‌عنوان جایگزین شن (صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) در ۵ طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی (RCCP) استفاده شده است. خصوصیات مکانیکی به کمک آزمون های مقاومت فشاری، کششی دونیم شدن و رفتار شکست در مود اول بارگذاری با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه ای بر روی ۶۰ نمونه نیم دیسک خمشی (SCB) با ترک اولیه به طول ۲۰ و ۲۵ میلیمتر و نرخ بارگذاری ۱ و ۵ میلیمتر بر دقیقه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که مقادیر مقاومت فشاری و کششی دونیم شدن نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش مقدار آجر کاهش می‌یابد. در نرخ بارگذاری ثابت چقرمگی شکست (KI) با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد و همچنین، با افزایش نرخ بارگذاری در طول ترک ثابت KI روند افزایشی پیش می‌گیرد.[۱۸]

در تحقیقی که توسط ویرانتی و همکاران[۱۹] انجام شد، استفاده از ضایعات آجر نسوز (RBW) را به‌عنوان یک جایگزین شن و ماسه طبیعی برای تولید بلوک‌های روسازی بتنی سازگار با محیط زیست (CPB) برای کاربردهای غیرترافیکی پیشنهاد کردند. از RBW برای جایگزینی ماسه طبیعی به میزان ۱۵، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد وزنی استفاده شد و خواص مهندسی آن‌ها (چگالی، مقاومت فشاری، جذب آب، سرعت پالس و مقاومت در برابر سایش)، ریزساختارها و مقرون به صرفه بودن با آن‌هایی که از CPB مرجع بدون RBW هستند. نتایج آزمایش نشان داد که خواص CPB با گنجاندن RBW در فرمول بهبود یافته است. عملکرد بهینه در ۱۰۰٪ RBW به دلیل ریزساختار متراکم تر و فشرده تر ناشی از واکنش پوزولانی ارائه شده توسط ذرات ریز RBW نسبت به CPB مرجع به دست آمد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل مقرون به صرفه نشان داد که زمانی که ۱۰۰٪ RBW به‌عنوان جایگزین شن و ماسه طبیعی در تولید CPB برای بار غیرترافیکی استفاده می‌شود، هزینه‌های مواد و تولید را می‌توان به ترتیب حدود ۱۹,۷۵ دلار در متر مکعب و ۱۰,۴۱ دلار در متر مکعب کاهش داد. برنامه های کاربردی. بنابراین، جایگزینی ماسه طبیعی با ۱۰۰٪ RBW در تولید CPB بهترین معیارهای فنی و اقتصادی را برای مصالح ساختمانی پایدار برآورده می‌کند و می‌تواند به حفظ منابع طبیعی کمک کند.

در تحقیقی که توسط بهات و همکاران[۲۰] انجام شد، استفاده از سنگدانه آجر خرد شده (CBA) را که به‌عنوان جایگزینی برای سنگدانه درشت طبیعی (NCA) در بتن به دست آمده است، بررسی شد. آزمایش‌های آزمایشگاهی بتن تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی قرار گرفتند، در حالی که سنگدانه‌ها تحت آنالیز غربال، ضربه، ساییدگی و آزمون‌های جذب آب قرار گرفتند. به‌طور مشابه، سیمان برای نسبت w/c، زمان گیرش و قوام مورد آزمایش قرار گرفت. با استفاده از نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی عددی، تجزیه و تحلیل چگونگی پاسخ بتن به فشارهای مختلف نیز انجام شده است. با جایگزینی NCA با CBA در ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪ و ۲۵٪ وزن، این مطالعه نشان می‌دهد که تا ۲۰٪ جایگزینی استحکام قابل مقایسه را حفظ می‌کند و کاربرد بالقوه ای را در ساخت و ساز ارائه می‌دهد. این تحقیق بر استفاده مجدد از آجرها در ساخت و ساز به جای دور انداختن آن‌ها تاکید می‌کند، که باعث کاهش ضایعات و افزایش بازیافت منابع و حفظ آن می‌شود و در نهایت باعث ارتقای پایداری جهانی می‌شود. این امر مهندسان و محققان را تشویق می‌کند تا بتن دوستدار محیط زیست را با استفاده از مواد بازیافتی توسعه دهند. محدودیت ها شامل نگرانی های دوام، جذب آب و هزینه پروژه می‌شود. علاوه بر این، محققان ممکن است بررسی کنند که چگونه ترکیب شیمیایی آجر بر مقاومت بتن تأثیر می‌گذارد.

با توجه به مروری بر ادبیات، بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی تاثیر جایگزینی مصالح بتن بازیافتی و آجر بازیافتی با بخشی از سنگدانه در بتن به تنهایی پرداخته اند و اثر توامان جایگزینی آجر و مصالح بتن بازیافتی تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است که در این تحقیق به بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و مقایسه نتایج آن با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ درصد پرداخته شده است. همچنین، تحقیقات قبلی عمدتا بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و

جذب آب بتن بازیافتی متمرکز بوده است؛ در حالیکه، مقاومت خمشی بتن نیز دارای اهمیت بالایی است؛ بنابراین، در این پژوهش، علاوه بر ویژگی‌های قبلی، به مقاومت خمشی بتن بازیافتی نیز پرداخته شد. به علاوه، درمورد درصد بهینه برای مصرف خرده آجر به‌عنوان سنگدانه اتفاق نظر وجود ندارد و مقادیر مختلفی به‌عنوان مقدار مناسب توصیه شد. این تحقیق تعیین مقدار بهینه خرده آجر برای مصرف در بتن بازیافتی را مورد توجه قرار داد و خواص مکانیکی بتن معمولی با بتن حاوی خرده آجر درشت‌دانه با ۷٫۵، ۱۰، ۲۲٫۵ و ۳۰ درصد نسبت به حجم بتن و بتن حاوی خرده آجر ریزدانه با ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد نسبت به حجم بتن مقایسه شد.

۲. مواد و مصالح

۱.۲.سیمان

در این پژوهش سیمان تیپ ۲ تهران مورد استفاده قرار گرفته، که ترکیبات شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان مصرفی در جدول ۱,۲ آورده شده است

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیبات شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	L.O.I.	In.R.	F.CaO	C_3A
سیمان	۲۱.۳۱	۴.۶۱	۳.۶	۶۳.۲	۲.۴	۱.۹۷	۲.۰۵	۰.۴۳	۰.۹۸	۵.۹

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

مشخصات	نتایج
انبساط	۰.۲
زمان گیرش	۱۶۰-۲۱۵
بلین	۳۰۰۷
مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm^2)	۲۱۱
مقاومت فشاری ۷ روزه(kg/cm^2)	۳۰۸
مقاومت فشاری ۲۸ روزه(kg/cm^2)	۴۲۷

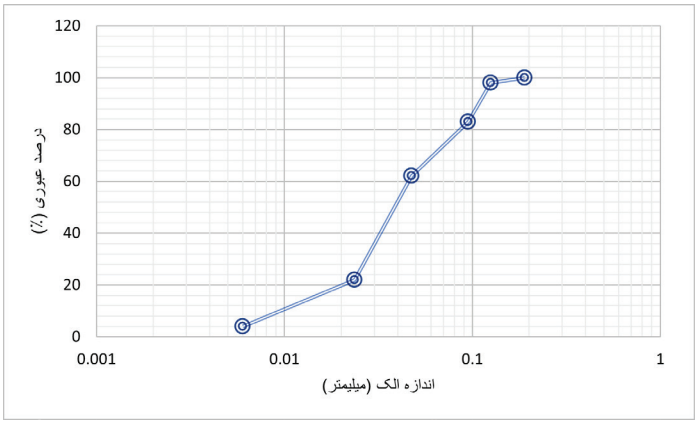
۲.۲. آب

در ساخت بتن می‌بایست از آبی که قابل آشامیدنی باشد، مزه و بوی مشخصی نداشته و تمیز و صاف باشد را می‌توان به‌عنوان آب اختلاط در ساخت بتن بکار برد. در این پژوهش از آب آشامیدنی شهر تهران جهت ساخت نمونه‌های بتن استفاده گردید.

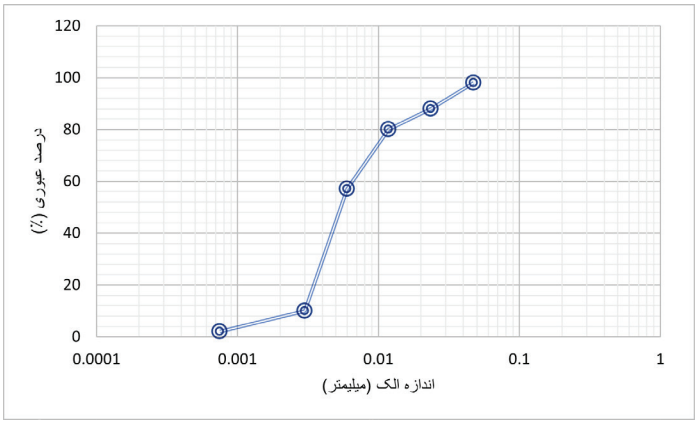
۳.۲. شن

در مورد دانه‌بندی در ساخت بتن به دلایل اقتصادی از همان دانه‌بندی استفاده شد که مصالح بعد از تهیه پس از کارخانه داشتند. در این تحقیق در ساخت بتن‌ها از دانه‌بندی‌های ریزدانه ۰-۴ میلی متر استفاده شده است. دانه‌بندی درشت‌دانه ۱۰-۴ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی در این تحقیق دارای حداکثر اندازه ۱۳ میلی‌متر و با چگالی ($2.6\ g/cm^3$) است. هم‌چنین ریزدانه ماسه مورد استفاده دارای چگالی ($2.6\ g/cm^3$) و مدول نرمی

۹۶.۲ می‌باشد. در همه طرح‌ها، دانه‌بندی شن و ماسه مطابق با استاندارد ASTM-C33 می‌باشند. در همه مخلوط‌ها نسبت وزنی درشت‌دانه به ریزدانه ثابت می‌باشد که این نسبت‌ها براساس محدوده‌های ارائه شده در دانه‌بندی مطلوب طرح مخلوط ملی ارائه شده است. شکل ۱و ۲ نمودار دانه‌بندی شن و ماسه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱. نمودار دانه بندی شن



شکل۲. نمودار دانه‌بندی ماسه

۴.۲. مواد ضایعاتی سنگ آجر

آجر مصارف زیادی در احداث بناها دارد. یکی از مصارف عمده آن در ساختمان‌ها و اماکن می‌باشد که در خصوص تولید آجر با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی، کارخانه‌های زیادی امروز در کشور فعالیت دارند. نتیجه می‌شود که ضایعات این صنعت نیز زیاد می‌باشد. در این تحقیق از ضایعات آجر که در کارخانه های اطراف تهران می‌باشد، استفاده شده است.

در این کارخانجات در مراحل تولید و جابجایی در کارخانه و بارگیری و حمل مقداری از این آجرها در اثر ضربه‌خوردگی خرد می‌شوند که در این تحقیق از این آجرها استفاده شده است.

این خرده آجرها به اشکال و اندازه‌های متفاوتی جمع‌آوری شد و برای یک دست شدن این آجرهای ضایعاتی با استفاده از دستگاه لس آنجلس به اندازه‌های دلخواه تبدیل شد و برای استفاده در جایگزینی به‌عنوان ریزدانه خرده آجرهای عبوری از الک نمره ۴ و برای جایگزینی به‌عنوان درشت‌دانه خرده آجرهای روی الک نمره ۴ مورد استفاده قرار گرفت. چگالی این مواد ۷/۱ گرم بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شده است (شکل ۳).

شکل ۳. نمونه آجر ضایعاتی خرد شده

۵.۲. روش ساخت نمونه های بتنی

برای انجام و رسیدن به طرح اختلاط مناسب ابتدا اختلاطی با جایگزینی ضایعات فقط به جای ماسه در بتن با مقاومت معمولی انجام شده است و با توجه به نتایج دست آمده برای رسیدن به نتایج قابل قبول جایگزینی به جای ماسه و شن در بتن انجام گردید.

۱.۵.۲. مشخصات نمونه‌ها

هر مخلوط شامل ۸ نمونه مکعبی ۱۰× ۱۰×۱۰ سانتی‌متر می‌باشد. نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش شدند. از نمونه‌ها جهت تعیین مقاومت فشاری، جذب مویینگی آب، درصد هوا، اسلامپ، چگالی و درصد هوا استفاده گردید.

در سنین ۷ روزه ۲ نمونه و در سن ۲۸ روزه ۲ نمونه برای آزمایش مقاومت فشاری مورد استفاده قرار گرفته است و در سن ۲۸ روزه ۲ نمونه مکعبی برای درصد جذب آب مویینگی و ۲ نمونه مکعبی برای درصد جذب آب حجمی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش طبق نشریه شماره ۴۷۹ طرح مخلوط بتن برای دستیابی به بتن با مقاومت فشاری مطلوب و نیز در نظر گرفتن پارامترهای دوامی، نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به یک بتن با کارایی مناسب، با ساخت مخلوط‌های آزمایشی مقدار سیمان ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب تعیین گردید و هم‌چنین با توجه به چگالی آب و سنگ‌دانه‌ها مقادیر آب و شن و ماسه به ترتیب ۱۸۰ و ۸۸۵ و ۸۸۵ کیلوگرم در متر مکعب تعیین شد. هم‌چنین برای تعیین خواص بتن با جایگزینی مواد ضایعاتی آجر و نیز تعیین مقدار بهینه مصرف آن در بتن، مقادیر جایگزینی ۵ و ۱۰ و ۲۰ درصد وزن شن و ماسه در نظر گرفته شد. نسبت‌های ترکیب مخلوط‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. نسبت‌های طرح مخلوط‌های ساخته شده مقادیر بر حسب (kg/m^3)

ردیف	طرح اختلاط	سیمان	ضایعات آجر	ماسه	شن	آب
۱	Z0	۴۰۰	۰	۸۸۵	۸۸۵	۱۸۰
۲	Zs5	۴۰۰	۴۴	۸۱۷	۸۸۵	۱۸۰
۳	Zs10	۴۰۰	۸۹	۷۴۸	۸۸۵	۱۸۰
۴	Zs20	۴۰۰	۱۷۷	۶۱۱	۸۸۵	۱۸۰
۵	Z5	۴۰۰	۴۴	۸۸۵	۸۱۷	۱۸۰
۶	Z10	۴۰۰	۸۹	۸۸۵	۷۴۸	۱۸۰
۷	Z20	۴۰۰	۱۷۷	۸۸۵	۶۱۱	۱۸۰

شکل۴. نحوه عمل‌آوری و نگه‌داری نمونه‌های بتنی در داخل حوضچه‌ی آب آزمایشگاه

۳. برنامه آزمایشگاهی

۱.۳. آزمایش مقاومت فشاری

پس از انجام عملیات ساخت بتن، مقداری از آن در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر مورد نظر ریخته شد و انجام آزمایش بر اساس آیین‌نامه BS 1881-116:1983[۲۱] انجام شد. پس از قالب‌گیری بتن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شوند سپس نمونه‌ها از قالب درآمده و در حوضچه‌ی آب، به مدت ۲۸ روز برای عمل‌آوری نگهداری می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها در بین جک‌های مخصوص و طوری قرار می‌گیرند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند. پس از بارگذاری با افزایش نیرو بر روی نمونه، شکست رخداده و عدد نهایی گیج ثبت می‌شود. در نهایت مقاومت فشاری از تقسیم نیرویی که سبب شکست شده بر سطح مقطع نمونه به دست می‌آید که فرمول آن در رابطه۱ نشان داده شده است. در رابطه زیر Fcu تنش فشاری، P بار شکست، A سطح مقطع نمونه می‌باشد.

$$F_{cu} = \frac{P}{A} \quad (۱)$$

بین نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با ابعاد استاندارد، اختلافی ناشی از اثر تنش ایجاد شده بین سطح تماس نمونه و صفحه دستگاه آزمایش فشاری دیده می‌شود. در این حالت اثر برش انتهایی را می‌توان به راحتی در یک استوانه استاندارد که تحت آزمایش فشاری یا گسیختگی قرار گرفته مشاهده کرد. در هر دو انتهای نمونه یک مخروط تقریباً سالم با ارتفاع برابر قطر استوانه به وجود می‌آید که بین مخروط‌ها کرنش جانبی می‌تواند به آزادی توسعه پیدا کند و دلیل آن متورم شدن و باد کردن نمونه در این قسمت می‌باشد. اما در یک نمونه مکعبی دو هرم سالم ایجاد می‌شود که نوک‌های آن‌ها داخل هم می‌باشند یعنی ناحیه‌ای که در مقابل متورم شدن مقید نباشد، وجود ندارد. نتیجتاً در یک مکعب فشار محوری خالص بدون برش نمی‌تواند وجود داشته باشد. به دو دلیل فوق مقاومت نمونه مکعبی‌معمولاً بالاتر از مقاومت نمونه‌ی استوانه‌ای است که از همان مخلوط ساخته شده باشد، به طوری که مقاومت نمونه استوانه‌ای حدود ۸۰ درصد نمونه مکعبی تخمین زده می‌شود[۲۲]. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری نمونه مکعبی و استوانه‌ای در رابطه ۲ نشان داده شده است[۷,۸]. یک نمونه دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۵ قابل مشاهده است.

$$F_c = 0.8F_{cu} \quad (۲)$$

شکل ۵. دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

۲.۳. آزمایش مقاومت کششی در خمش (مدول گسیختگی)

برای آزمایش مقاومت کششی در خمش (مدول گسیختگی یا مقاومت خمشی) از دو نوع آزمایش استفاده می‌شود:

۱ - یک بار متمرکز در وسط تیر، که یک نمودار خمشی مثلثی می‌دهد و حداکثر تنش تنها در یک مقطع تیر اتفاق می‌افتد.

۲ - بارگذاری دو نقطه ای متقارن، که یک لنگر خمشی یکنواخت بین دو نقطه ایجاد می‌کند.

در روش بار متمرکزشکست معمولاً وقتی اتفاق می‌افتد که تاری که زیر نیرو قرار می‌گیرد مقاومت خود را از دست بدهد این عبارت همیشه درست نیست زیرا ممکن است تاری ضعیف‌تر در تیر وجود داشته باشد که تنش کمتری از تنش حداکثر وارد بر تیر بشکند. به هر حال احتمال اینکه عنصری ضعیف‌تر در بارگذاری دو نقطه‌ای تحت تنش بحرانی وجود داشته باشد، خیلی بیشتر از حالت بارگذاری یک نقطه‌ای می‌باشد[۲۳].

در آزمایش خمشی طبق آیین‌نامه ASTM C293 [۲۴] از روش بار متمرکز یا همان سه نقطه‌ای استفاده شده است. نمونه منشوری دارای ابعاد ۷ × ۷ × ۲۸ میلی‌متری با سرعت بین ۱/۲۱-۰/۸۶ مگاپاسکال در دقیقه بارگذاری می‌شود و مقدار عددی مقاومت خمشی بار تک نقطه‌ای از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید. برای بار دو نقطه‌ای نیز می‌توان طبق آیین‌نامه (ASTM C 78-94)[۲۵] از رابطه ۳ استفاده نمود که در آن‌ها R مقاومت خمشی، P حداکثر بار در هنگام گسیختگی، L طول دهانه، B عرض نمونه و D ارتفاع مقطع نمونه می‌باشد.

$$R = \frac{3PL}{2BD^2} \qquad (۳)$$

۳.۳. آزمایش جذب آب

جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش بر طبق استاندارد ASTM C64 انجام گرفت. در حالی که تا رسیدن به سن مورد نظر برای گرفتن آزمایش جذب آب، نمونه‌ها داخل حوضچه آب در دمای اتاق قرار داشتند. بدین ترتیب در هر بار آزمایش جذب آب، میانگین سه نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری به‌عنوان جذب آب آن طرح معرفی گردید. در سن ۲۸ روزگی نمونه‌ها را از اب خارج کرده و به مدت ۱ دقیقه آنرا روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک می‌کنیم. سپس نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌کن قرار می‌دهیم. پس از گذشت ۲۴ ساعت و درآوردن نمونه از گرم‌کن به توزین آن می‌پردازیم. تا زمانی

که اختلاف بین دو قرائت که ناشی از افت وزن به دلیل قرارگیری در حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد است، بزرگ‌تر از ۰/۲٪ نباشد. آنگاه این عدد به‌عنوان وزن نمونه‌ی خشک (Wd) ثبت می‌گردد. حال نمونه را به مدت ۳۰ دقیقه در آب قرار داده و پس از بیرون آوردن به مدت ۱ دقیقه آن را روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک کرده و آن را وزن می‌کنیم و این عدد به‌عنوان وزن اشباع با سطح خشک نمونه (Ws) ثبت می‌شود. همین عمل را پس از ۲۴ ساعت که در آب قرار داده شده وزن کرده و پس از آن Ws را محاسبه می‌کنیم. این عمل باید آنقدر تکرار شود تا اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد. طبق تجربه محقق زمان مورد نیاز برای آنکه اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد، ۳ روز پس از رسیدن سن مورد نظر (۲۸ روزگی) می‌باشد.

$$\text{جذب آب}\ (\%) = \frac{(w_s - W_d)}{W_d} \times 100 \qquad (۴)$$

۴.۳. تعیین وزن مخصوص بتن تازه (چگالی)

با استفاده از رابطه زیر محاسبات انجام می‌شود.

$$D = \frac{(m2-m1)}{V} \qquad (۵)$$

D: چگالی بتن تازه برحسب (kg/m^3)

M_1: وزن قالب خالی برحسب (Kg)

M_2 : وزن قالب پر از بتن (kg)

V : حجم قالب برحسب (m^3)

۵.۳. جزئیات روش پژوهش

با توجه به حجم و تعدد آزمایشات صورت گرفته در این پژوهش، جزییات روش این پژوهش در جدول ۴ ارائه می‌گردد.

جدول ۴. جزئیات روش پژوهش حاضر

نوع بتن	شرح آزمایش‌های مربوطه				
CC	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	
10-RS	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
20-RS	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
30-RS	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
40-RS	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		

10-RG	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
20-RG	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
30-RG	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
40-RG	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن		
RS-30-Br-7.5	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-15	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-22.5	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-30	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30-Br-۱۵	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-۳۰	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-۴۵	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب
RS-30- Br-۶۰	وزن مخصوص بتن تازه	اسلامپ بتن تازه	مقاومت فشاری بتن	مقاومت خمشی بتن	جذب آب

۴. نتایج و بحث

۱.۴. مقایسه وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ در بتن با مصالح بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی درشت‌دانه

در این بخش، به بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و مقایسه نتایج آن با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد پرداخته خواهد شد. همچنین در ادامه خواص مکانیکی بتن بازیافتی با بتن حاوی ضایعات آجر بنایی در دو سری مورد بررسی قرار خواهد گرفت. که سری اول با حضور۷،۰۰، ۱۵، ۲۲،۵ و ۳۰ درصد خرده آجر درشت‌دانه و سری دوم شامل ۱۰، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد ریز دانه است. منظور از خواص مکانیکی بتن در این تحقیق، مقاومت فشاری و خمشی می‌باشد. دمای بتن تازه بین ۲۷ تا ۲۹ درجه سلسیوس و دمای آب عمل آوری در این تحقیق ۲۰ تا ۲۶ درجه سلسیوس می‌باشد.

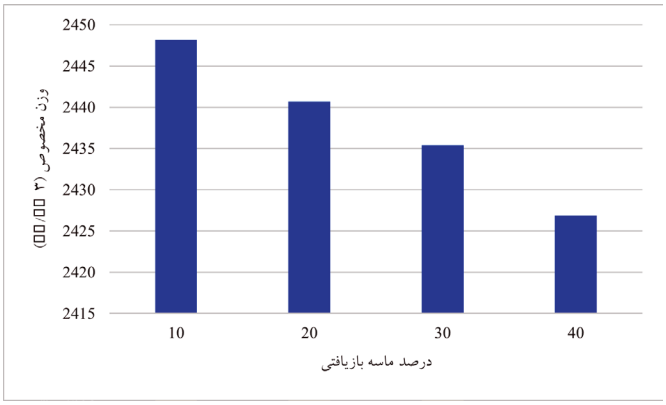
۲.۴. مقایسه وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ در بتن با مصالح بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی ریزدانه

در جدول ۵، CC[1] بتن با سنگدانه طبیعی(بتن شاهد) و RS[2] بتن با جایگزینی ماسه بازیافتی و RG[3] بتن با جایگزنی شن بازیافتی می‌باشد. جایگزینی در محدوده ی شن و ماسه به‌طور مجزا انجام شده است تا تاثیر سنگدانه قابل مقایسه باشد. در این جدول، به‌عنوان مثال منظور از بتن 10-RS، بتن با ۱۰ درصد جایگزنی ماسه می‌باشد. در جدول ۵، مقادیر وزن مخصوص بتن تازه و مقادیر اسلامپ بتن حاوی سنگدانه بازیافتی درج شده است.

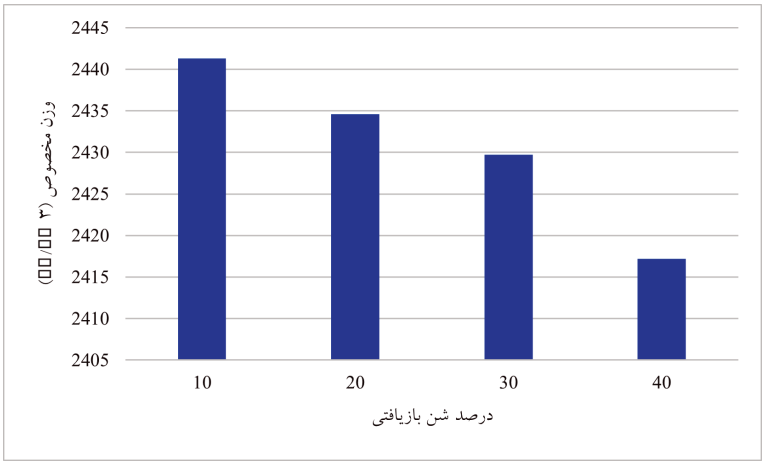
جدول ۵. مقایسه وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ در بتن با مصالح بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

نوع بتن	وزن مخصوص بتن تازه Kg/m^3	تغییر وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد	اسلامپ	تغییر اسلامپ نسبت به نمونه شاهد
CC	۲۴۷۷,۳	۰	۸	۰
10-RS	۲۴۷۱,۴	-۰,۲۲	۷,۹	۱,۲۷-
20-RS	۲۴۶۵,۲	-۰.۵۲	۷,۹	۱,۲۷-
30-RS	۲۴۵۹,۶	-۰,۷۴	۷,۸	۲,۵۶-
40-RS	۲۴۵۲,۴	-۱.۱	۷,۸	۲,۵۶-
10-RG	۲۴۴۷,۸	-۰.۵	۷,۹	۱,۲۷-
20-RG	۲۴۳۵,۲	۰,۷۸-	۷,۸	۲,۵۶-
30-RG	۲۴۲۸,۹	۹۸.-	۷,۷	۲,۹-
40-RG	۲۴۱۹,۷	۱,۵-	۷,۹	۲,۵۶-

در شکل‌های ۶ و ۷، کاهش وزن مخصوص بتن با افزایش سنگدانه بازیافتی، به دلیل چگالی پایین تر سنگدانه بازیافتی در مقابل سنگدانه طبیعی باشد. همانطور که از جدول ۴ مشخص است، کاهش وزن مخصوص در نمونه‌ی با شن بازیافتی بیشتر از نمونه‌ی با ماسه بازیافتی می‌باشد.



شکل ۶. نمودار تغییر وزن مخصوص بتن با ماسه بازیافتی



شکل ۷. نمودار تغییر وزن مخصوص بتن با شن بازیافتی

در شکل ۶ و ۷، کاهش وزن مخصوص بتن با افزایش سنگدانه بازیافتی شاید به دلیل چگالی پایین تر سنگدانه بازیافتی در مقابل سنگدانه طبیعی باشد. همانطور که از جدول ۷ مشخص است، کاهش وزن مخصوص در نمونه‌ی با شن بازیافتی بیشتر از نمونه‌ی با ماسه بازیافتی می‌باشد.

۳.۴. مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

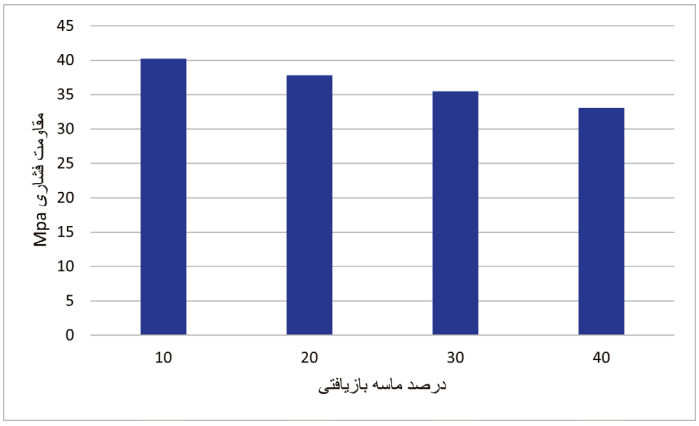
در جدول ۶، مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی نشان داده شده است.

جدول۶. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

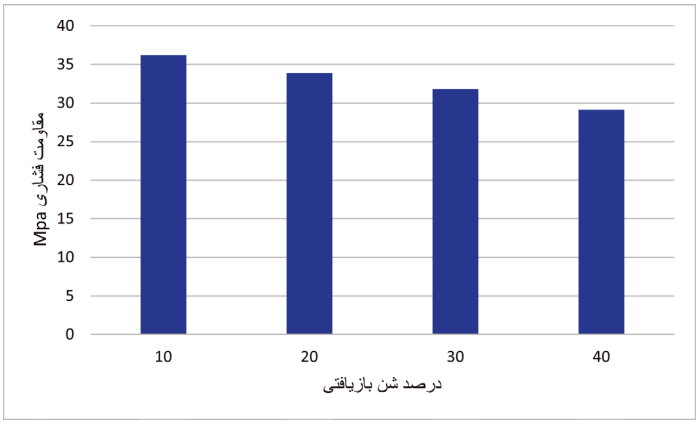
نوع بتن	مقاومت فشاری بتن MPa	تغییر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد
CC	۴۱,۱۱	۰
10-RS	۴۰,۲	-۲,۲۶
20-RS	۳۷,۸	-۸,۷۶
30-RS	۳۵,۵	-۱۵,۸
40-RS	۳۳,۱	-۲۴,۲
10-RG	۳۶,۲	-۱۳,۵۶
20-RG	۳۳,۹	-۲۱,۲۷
30-RG	۳۱,۸	-۲۹,۲۸
40-RG	۲۹,۱	-۴۱,۲۷

با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، مشاهده می‌شود که افزایش سنگدانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. این موضوع به

دلیل ساختار ناهمگن سنگدانه‌های بازیافتی و ضعف سنگدانه‌های بازیافتی در سطوح اتصال اجزای مختلف آن به هم است. با توجه به محدوده اعداد به دست آمده، بیشترین کاهش مقاومت، با جایگزینی شن بازیافتی رخ داده است. لذا افزودن ماسه بازیافتی نسبت به شن بازیافتی، اثر مطلوب تری برمقاومت فشاری دارد. هرچند کمترین کاهش مقاومت فشاری در مقدار ۱۰ درصد رخ داده است، اما هدف بدست آوردن مقدار بهینه است تا بتوان از مصالح جایگزین بیشتری استفاده نمود. لذا مقدار ۳۰ درصد ماسه بازیافتی (30-RS) به‌عنوان طرح اختلاط بهینه برای مرحله بعدی تحقیق انتخاب می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییر مقاومت فشاری بتن با ماسه بازیافتی



شکل ۹. نمودار تغییر مقاومت فشاری بتن با شن بازیافتی

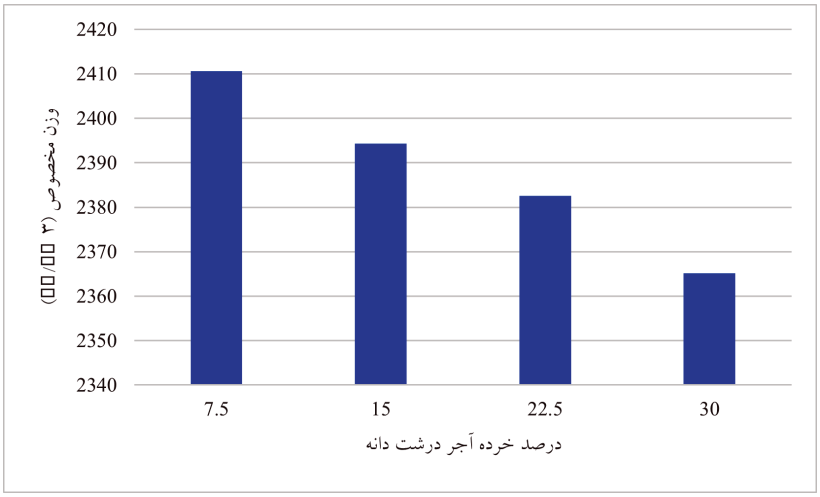
۴.۴. مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی درشت‌دانه

در این مرحله از تحقیق به بررسی اسلامپ و وزن مخصوص بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی درشت‌دانه خواهیم پرداخت. در جدول ۷، به‌طور مثال منظور از نماد Br^{4} -RS-30-7.5 به ترتیب، بتن با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی و حاوی ۷٫۵ درصد خرده آجر بنایی درشت‌دانه می‌باشد. در جدول ۷، مقادیر مربوط به مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی درشت‌دانه بیان شده است.

جدول ۷. مقادیر مربوط به مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی درشت‌دانه

نوع بتن	وزن مخصوص بتن تازه Kg/m^3	تغییر وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد	اسلامپ	تغییر اسلامپ نسبت به بتن شاهد
30-RS	۲۴۳۵,۴	۰	۷,۸	۰
RS-30-Br-7.5	۱۴۱۰,۶	۱,۰۳-	۷,۵	۴-
RS-30- Br-15	۲۳۹۴,۳	۱,۷۴-	۷,۴	۵,۴۱-
RS-30- Br-22.5	۲۳۸۲,۶	۲,۲۲-	۷,۱۵	۹,۰۹-
RS-30- Br-30	۲۳۶۵,۴	۲,۹۷-	۷	۱۱,۴۳-

همانطور که در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود، خرده آجر بنایی درشت‌دانه به دلیل وزن مخصوص کمتر، موجب کاهش وزن مخصوص بتن شده است. همچنین وجود خرده آجر بنایی درشت‌دانه به دلیل جذب آب بیشتر که ناشی از تخلخل آن است، موجب سفت تر شدن بتن و کاهش عدد اسلامپ شده است.



شکل ۱۰. نمودار مقادیر وزن مخصوص بتن با ماسه بازیافتی حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه

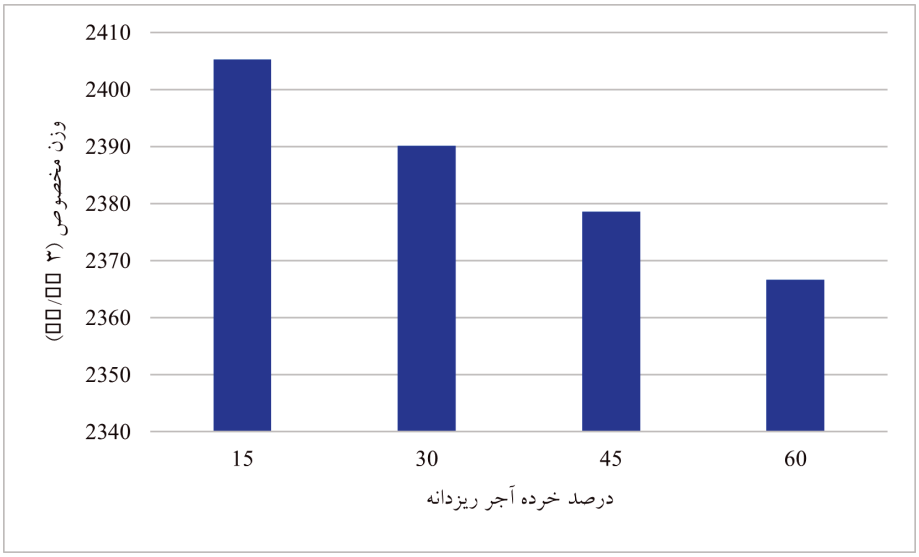
۵.۴. مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده آجر بنایی ریز

در این مرحله از تحقیق، به بررسی اسلامپ و وزن مخصوص بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی ریزدانه پرداخته خواهد شد. در جدول ۸، به‌طور مثال منظور از نماد RS-30- Br 15- به ترتیب، بتن با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی و حاوی ۱۵ درصد خرده آجر بنایی ریز دانه می‌باشد. در جدول ۸، مقادیر مربوط به مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی ریز دانه بیان شده است.

جدول ۸. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده اجر ریزدانه

نوع بتن	وزن مخصوص بتن تازه Kg/m^3	تغییر وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد	اسلامپ	تغییر اسلامپ نسبت به بتن شاهد
30-RS	۲۴۳۵.۴	۰	۷.۸	۰
RS-30-Br-۱۵	۲۴۰۵.۳	۱.۲۵-	۷.۴	۵.۴۱-
RS-30- Br-۳۰	۲۳۹۰.۰۲	۱.۸۹-	۷.۴	۵.۴۱-
RS-30- Br-۴۵	۲۳۷۸.۶	۲.۲۹-	۷.۳	۶.۸۵-
RS-30- Br-۶۰	۲۳۶۶.۷	۲.۹۰-	۷.۱	۸.۸۶-

همانطور که در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود، وجود خرده آجر بنایی ریز دانه به دلیل وزن مخصوص کم، موجب کاهش وزن مخصوص بتن شده است. همچنین وجود خرده آجر بنایی ریز دانه به دلیل جذب آب بیشتر و کمتر شدن کارایی بتن، موجب کاهش عدد اسلامپ شده است.



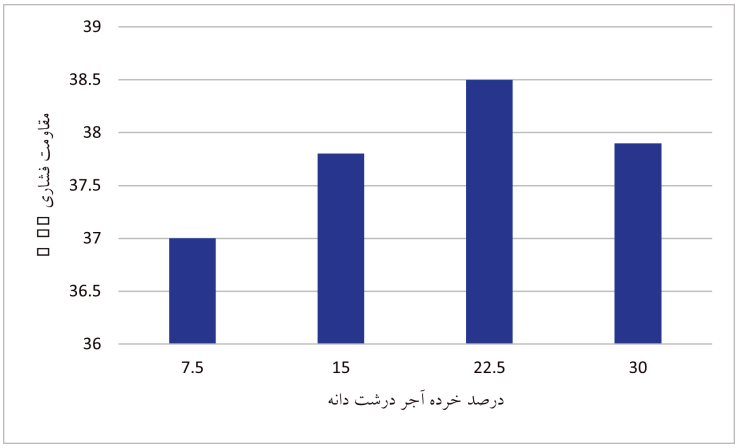
شکل ۱۱. نمودار مقادیر وزن مخصوص بتن با سنگدانه بازیافتی حاوی اجر بنایی ریزدانه

۶.۴. مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده آجر بنایی درشت‌دانه

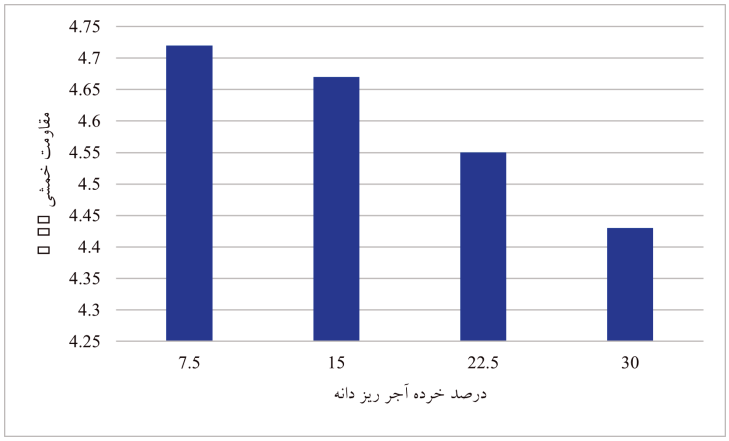
در این مرحله از تحقیق به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده آجر بنایی درشت‌دانه پرداخته شده است که مقادیر مربوط به آن در جدول ۹، آورده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نمودار مقادیر مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه نشان داده شده است.

جدول ۹. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده اجر

نوع بتن	مقاومت فشاری MPa	تغییر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد	مقاومت خمشی MPa	تغییرمقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد
CC	۴۱,۵۴	۰	۵,۱۱	۰
30-RS	۳۶,۷	۱۳,۱۹-	۴,۸۱	۶,۲۴-
RS-30-Br-7.5	۳۷	۰,۸۱	۴,۷۲	۱,۹۱-
RS-30- Br-15	۳۷,۸	۲,۹۱	۴,۶۷	۳-
RS-30- Br-22.5	۳۸,۵	۴,۶۸	۴,۵۵	۵,۷۱-
RS-30- Br-30	۳۷,۹	۳,۱۷	۴,۴۳	۸,۵۸-



شکل ۱۲. نمودار مقادیر مقاومت فشاری بتن حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه



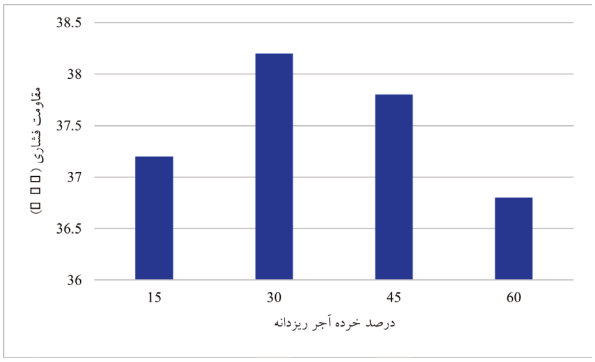
شکل ۱۳. نمودار مقادیر مقاومت خمشی بتن حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه

۷.۴. مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده آجر بنایی ریز دانه

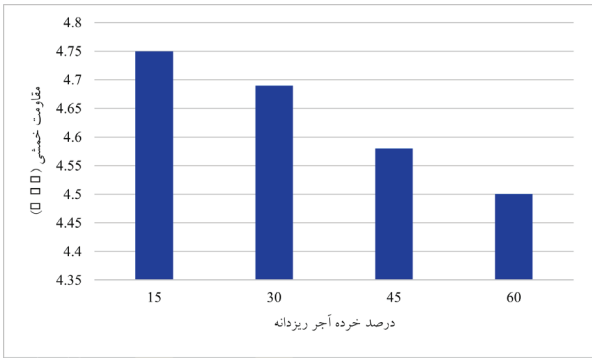
در این مرحله از تحقیق به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده آجر بنایی ریز دانه پرداخته شده است که مقادیر مربوط به آن در جدول ۱۰ آورده شده است. همچنین در شکل‌های ۱۴و ۱۵، نمودار مقادیر مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی خرده آجر بنایی ریز دانه نشان داده شده است.

جدول ۱۰. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده آجر ریزدانه

نوع بتن	مقاومت فشاری MPa	تغییر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد	مقاومت خمشی MPa	تغییرمقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد
CC	۴۱,۵۴	۰	۵,۱۱	۰
30-RS	۳۶,۷	۱۳,۱۹-	۴,۸۱	۶,۲۴-
RS-30-Br-۱۵	۳۷,۲	۱,۳۴	۴,۷۵	۱,۲۶-
RS-30- Br-۳۰	۳۸,۲	۳,۹۳	۴,۶۹	۲,۵۶-
RS-30- Br-۴۵	۳۷,۸	۲,۹۱	۴,۵۸	۵,۰۲-
RS-30- Br-۶۰	۳۶,۸	۲۷.	۴,۵۰	۶,۸۹-



شکل ۱۴. نمودار مقادیر مقاومت فشاری بتن حاوی خرده آجر ریزدانه



شکل ۱۵. نمودار مقادیر مقاومت خمشی بتن حاوی خرده آجر ریزدانه

با توجه به جدول ۱۰، در خصوص مقاومت فشاری بتن بهینه بازیافتی حاوی خرده آجر، افزودن خرده آجر درشت‌دانه، تا ۲۲٫۵ درصد، افزایش مقاومت فشاری مشهود است و پس از آن، شاهد کاهش مقاومت فشاری در مقادیر بیشتر خرده آجر هستیم. در خصوص افزودن خرده آجر ریزدانه به همین ترتیب تا ۳۰ درصد حضور ریزدانه شاهد افزایش مقاومت فشاری و بیش از آن شاهد کاهش مقاومت فشاری هستیم. تفسیر این اتفاق به این صورت است که سطح گسیختگی در نمونه های شکسته شده از ۲ ناحیه و به صورت ترکیبی می‌باشد. بخشی از سطح گسیختگی از درون چسب سیمان و سطح دیگر از سنگدانه‌ها می‌باشد[۲۶]. لذا با افزایش میزان خرده آجر در بتن بازیافتی و به دلیل تخلخل و ضعف بیشتر خرده آجر نسبت به مصالح سنگی، زودتر دچار شکست شده و مقاومت کمتری را تحمل می‌کند. همچنین با توجه به جدول ۱۰، در خصوص مقاومت خمشی نمونه ها، در هر دو مورد خرده آجر درشت‌دانه و ریزدانه شاهد کاهش مقاومت خمشی به دلیل ترد بودن مصالح خرده آجر بوده ایم.

۸.۴. مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده آجر بنایی

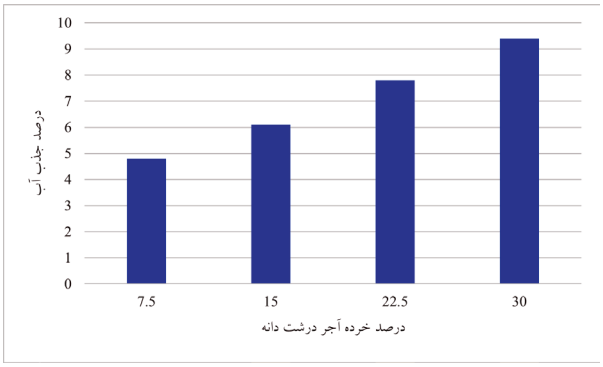
۱.۸.۴. مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه

در این مرحله از تحقیق به بررسی جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی درشت‌دانه پرداخته خواهد شد. در جدول ۱۱، نتایج بررسی بیان شده است.

جدول ۱۱. مقادیر مربوط به مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه

نوع بتن	جذب آب %	تغییر مقدار جذب آب نسبت به بتن شاهد
30-RS	۴٫۱	۰
RS-30- Br-7/5	۴٫۸	۱۴٫۵۸
RS-30- Br-15	۶٫۱	۳۲٫۷۹
RS-30- Br-22/5	۷٫۸	۴۷٫۴۴
RS-30- Br-30	۹٫۴	۵۶٫۳۸

در شکل ۱۶، نمودار مقادیر جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده آجر بنایی درشت‌دانه نشان داده شده است.



شکل ۱۶. نمودار مقادیر جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی حاوی خرده آجر بنایی درشت‌دانه

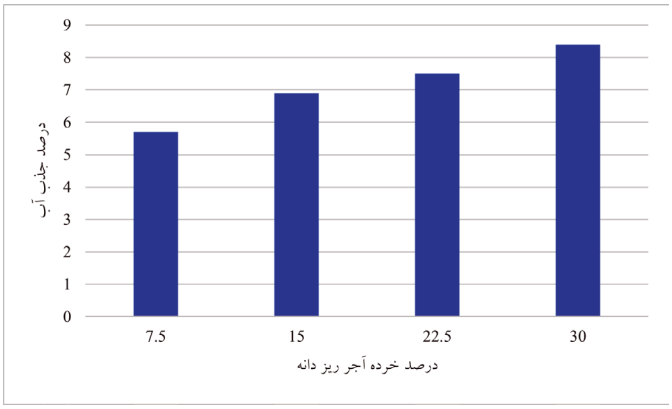
۲.۸.۴. مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده آجر بنایی ریز دانه:

در این مرحله از تحقیق به بررسی جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده آجر بنایی ریز دانه پرداخته خواهد شد. در جدول ۱۲، نتایج بررسی بیان شده است.

جدول ۱۲. -مقادیر مربوط به مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده آجر بنایی ریز دانه

نوع بتن	جذب آب %	تغییر مقدار جذب آب نسبت به بتن شاهد
30-RS	۴,۱	۰
RS-30- Br-۱۵	۵.۷	۲۸.۰۷
RS-30- Br-۳۰	۶.۹	۴۰.۵۸
RS-30- Br-۴۵	۷.۵	۴۵.۳۳
RS-30- Br-۶۰	۸.۴	۵۱.۱۹

در شکل ۱۷، نمودار مقادیر جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده آجر بنایی ریز دانه نشان داده شده است.



شکل ۱۷. نمودار مقادیر جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی حاوی خرده آجر بنایی ریز دانه

همانطور که در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مشاهده می‌شود، وجود خرده آجر در بتن موجب افزایش جذب آب بتن شده است. این موضوع به دلیل وجود تخلخل در خرده آجر رخ داده است. با توجه به نمودارها مشخص است که در خرده آجر درشت‌دانه به دلیل تخلخل بیشتر نسبت به خرده آجر ریزدانه، مقدار جذب آب نمونه ها بیشتر است.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و مقایسه نتایج آن با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۶۰ درصد پرداخته شده است. خواص مکانیکی بتن معمولی با بتن حاوی خرده آجر درشت‌دانه با ۷٫۵، ۱۰، ۲۲٫۵ و ۳۰ درصد حجم بتن و بتن حاوی خرده آجر ریزدانه با ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درصد حجم بتن مقایسه شد. با انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی، اسلامپ، وزن مخصوص و جذب آب روی نمونه‌های بتنی در حضور سنگدانه‌های بازیافتی و خرده آجر ضایعاتی درشت‌دانه و ریز دانه ، نتایج زیر کسب شده است:

● با افزایش میزان حضور ماسه و شن بازیافتی در نمونه ها، کاهش وزن مخصوص نمونه به دلیل پایین‌تر بودن وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی مشهود است. لازم به ذکر است بیشترین کاهش در RG-۴۰ و کمترین کاهش در RG-۱۰ رخ داده است. با افزایش میزان حضور ماسه و شن بازیافتی در نمونه ها، تغییر چشم گیری در میزان اسلامپ مشاهده نشد، اما روند تغییر با کاهش عدد اسلامپ مواجه شده است.

● مقاومت فشاری بتن شاهد ۴۱،۰۴ MPa بدست آمده است. همچنین در خصوص افزودن ماسه بازیافتی، کمترین کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۱۹،۱٪ و بیشترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۲۶،۳۷٪ ، به ترتیب در RS-۱۰ و RS-۴۰ رخ داده است. در خصوص افزودن شن بازیافتی، کمترین کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۱۸،۳۵٪ و بیشترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۶۲،۵٪ ، به ترتیب در RG-۱۰ و RG-۴۰ رخ داده است. کاهش مقاومت فشاری در نمونه های حاوی سنگدانه بازیافتی مشهود است و این روند کاهشی با افزایش حضور سنگدانه‌ها بیشتر شده است.

● با افزایش میزان حضور خرده آجر درشتدانه در نمونه‌ها، کاهش وزن مخصوص نمونه به دلیل پایین‌تر بودن وزن مخصوص خرده آجر مشهود است. لازم به ذکر است بیشترین کاهش در Br-۳۰-RS -۳۰ و کمترین کاهش در Br-۳۰-RS -۷،۵ رخ داده است. با افزایش میزان حضور خرده آجر ریزدانه در نمونه ها، کاهش وزن مخصوص نمونه به دلیل پایین‌تر بودن وزن مخصوص خرده آجر مشهود است. لازم به ذکر است بیشترین کاهش در Br-۳۰-RS-۶۰ و کمترین کاهش در Br-۳۰-RS-۱۵ رخ داده است.

● در خصوص تغییر مقاومت فشاری، نمونه‌های مورد نظر با افزایش حضور خرده آجر درشت‌دانه تا ۲۲،۵٪ افزایش مقاومت فشاری تا ۳۸،۵ MPa و پس از آن با افزودن خرده آجر درشت‌دانه، کاهش مقاومت فشاری را تجربه کرده اند. در خصوص تغییر مقاومت خمشی، نمونه های مورد نظر با افزایش حضور خرده آجر ریز دانه، کاهش مقاومت فشاری را تا ۱،۸۹٪ تجربه کرده اند.

● در خصوص تغییر مقاومت خمشی، نمونه‌های مورد نظر با افزایش حضور خرده آجر درشتدانه، کاهش مقاومت خمشی را تا ۸،۵۸٪ تجربه کرده اند. در خصوص تغییر مقاومت فشاری، نمونه‌های مورد نظر با افزایش حضور خرده آجر ریزدانه تا ۳۰ ٪ افزایش مقاومت فشاری تا ۳۸،۲ MPa و پس از آن با افزودن خرده آجر ریزدانه کاهش مقاومت فشاری را تجربه کرده اند.

● افزایش حضور خرده آجر درشت‌دانه، به علت بیشتر شدن تخلخل در بتن، موجب افزایش جذب آب بتن تا ۹،۴٪ شده است. افزایش حضور خرده آجر ریز دانه، به علت بیشتر شدن تخلخل در بتن، موجب افزایش جذب آب بتن تا ۸،۴٪ شده است. لازم به ذکر است کاهش جذب آب بتن با خرده آجر ریزدانه نسبت به خرده آجر درشت‌دانه به دلیل کمتر بودن تخلخل در دانه‌های ریز آجر نسبت به دانه‌های درشت آجر بوده است.

به‌طور خلاصه، این تحقیق نشان داده که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی (هم ماسه و هم شن) در بتن، کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها را به دنبال داشته، ولی در اسلامپ تغییر چشمگیری ایجاد نکرده است. همچنین، استفاده از خرده آجر (هم ریزدانه و هم درشت‌دانه) در بتن، باعث کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها شد. در آخر، استفاده از خرده آجر (هم ریزدانه و هم درشت‌دانه) موجب افزایش جذب آب بتن شده است.

در مبحث مقاومت، استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی (هم ماسه و هم شن) در بتن، به کاهش مقاومت فشاری انجامیده، که این کاهش، با افزایش حضور سنگدانه‌ها بیشتر شده است. همچنین استفاده از خرده آجر (هم ریزدانه و هم درشت‌دانه) در بتن، مقاومت فشاری را افزایش داده است. البته این افزایش، با افزودن بیشتر خرده آجر، کمی‌کاهش یافت. در نهایت، استفاده از خرده آجر (هم ریزدانه و هم درشت‌دانه)، باعث مقاومت خمشی شده است.

۶. پی نوشت‌ها

1- Cement Portland pavement concrete

2- Recycled sand

3- Recycled gravel

4-Brick

۷. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله حاضر، از پرسنل و کارشناسان محترم آزمایشگاه دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، جهت همکاری و راهنمایی صمیمانه در انجام آزمایش‌های مربوطه، کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایند.

۸. مراجع

[1] Aljassar, A. H., Al-Fadala, K. B., & Ali, M. A. (2005), "Recycling building demolition waste in hot-mix asphalt concrete: a case study in Kuwait". Journal of material cycles and waste management, 7(2), 112-115. 32.

[2] Altuncu, D., & Kasapseçkin, M. A. (2011), "Management and recycling of constructional solid waste in Turkey". Procedia Engineering, 21, 1072-1077.

[3] Ahmed, H. Y., Othman, A. M., & Mahmoud, A. A. (2006), "Effect of Using Waste Cement Dust as a Mineral Filler on. In the Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt", Assuit University.

[4] Agrela, F., Ramirez, A., Barbrado, A., & Galvin, A. P. (2010), "Real application of cement treated mixed recycled aggregates on road based in Malaga". In Transportation Research Board Annual Meeting.

[5] Chen, M. Z., Lin, J. T., Wu, S. P., & Liu, C. H. (2011), "Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture". Construction and Building Materials, 25(4), 1532-1536

[6] Hijazi, Mehrdad; Mahmoud Hashemi and Morteza Amini. (2015), "Mechanical properties of self-compacting concrete with recycled aggregates", 2nd International Conference on New Research Findings in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran International foundation of World Inventors, University of Applied Sciences. (in Persian).

[7] Salkhorde, Salar and Nouri Qidari. (2008), "investigation of compressive resistance of self-compacting concrete with different percentages of recycled concrete aggregates", 2nd International Conference on Seismic Resistance, Tabriz, National Center of Resistance Iran, 2008 (in Persian).

[8] Berenjian, Javad; Amid Lotfi Imran and Ismail Marz ara. (2015), "Laboratory evaluation of the replacement of recycled aggregates on the mechanical properties of high resistance concrete with the approach of sustainable development and environmental protection", the third international conference Research in Engineering, Science and Technology, Batumi - Georgia, Saramad Hamaish Institute Karin. (in Persian).

[9] Shorbi Niazi, H., & Khalilzadeh Vahidi, E. (2022), "Investigation of Properties of Concrete Containing Recycled Aggregates and Waste Rubber with Micro Silica". Amirkabir Journal of Civil Engineering, 54(3), 1151-1164. doi: 10.22060/ceej.2021.19279.7123. (in Persian).

[10] Darparnian, Piman and Kimia Kanaanzadeh. (2017), "Evaluation of the effect of brick powder in improving the moisture sensitivity of asphalt mixtures", International Conference on Construction, Architecture and Urban Development Management in Iran, Tehran, Mer Industrial University Yes, with the cooperation of Tabriz University - Shahid Madani University of Azerbaijan. (in Persian).

[11] Khajevand Mohammadi-Poul, Mohammad Reza and Malik Mohammad Ranjbar Takmeili. (2015), "investigation of the effect of recycled brick on the compressive strength of concrete by the Taguchi method", the second National Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Babol Scientific research of the Association of Knowledge Scientists. (in Persian).

[12] Razai, Mehdi; Abolfazel Ahmadi and Moin Razai Kerin. (2016), "investigation of the use of broken recycled bricks as sand in recycled concretes", the 6th National Conference and the 2nd International Conference on New Materials and Structures in Civil Engineering. Yazd, Yazd University. (in Persian).

[13] Shiri Benmar, Mehdi and Farhad Pirmohamdi Alisha. (2017), "Examining the modulus of elasticity of concrete containing crushed ceramic waste as a substitute for sand", the first international congress of the construction industry New Technologies in the Construction Industry, Tabriz, Young Engineers Complex East Azerbaijan province. (in Persian).

[14] Dashti Rahmat Abadi, Mohammad Ali and Nima Rasa. (2014), Examining the characteristics of concrete made of bricks, National Conference of Civil and Environmental Engineering, Qazvin, Research Assistantship of Civil Engineering and Knowledge Mapping, Qazvin Islamic Azad University. (in Persian).

[15] Madandoost, Rahmat; Hossein Qanadzadeh and Maitham Saadtmand. (2010), "Evaluation of the engineering properties of concrete containing ceramic and crushed waste brick as a replacement part of fine aggregate, First National Conference on Construction and Development, Rasht, Islamic Azad University Lasht Nesha Branch. (in Persian).

[16] Zong, L., Fei, Z., & Zhang, S. (2014), "Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste". Journal of Cleaner Production, 70, 175-182.

[17] Taherkhani, Hasan and Asker Askari Khovah. (2013), "investigation of the use of glass and brick waste in asphalt concrete, the third conference on environmental planning and management, Tehran, Tehran University. (in Persian).

[18] hesami, S., shirzad, S., & khamsi, R. (2024), "Experimental investigation of the fracture behavior of roller-compacted concrete pavement containing recycled crushed brick". Journal of Transportation Research, doi: 10.22034/tri.2024.406934.3175. (in Persian).

[19] Viranthy Dian Pertiwi, A., Muhammad Akbar Caronge, and M. W. Tjaronge. (2024), "Producing Eco-Friendly Concrete Paving Block Using Waste Refractory Brick Aggregates." International Journal of Pavement Research and Technology, 1-13.

[20] Bhatta, Naresh, Abhas Adhikari, Anubhav Ghimire, Nishant Bhandari, Aayushman Subedi, and Kameshwar Sahani. (2024), "Comparing Crushed Brick as Coarse Aggregate Substitute in Concrete: Experimental vs. Numerical Study." Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 1-20.

[21] BS 1881: Part 116: (1983). "Method For Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes", British Standard Department of Environmental (DOE), United Kingdom, "Standard for Design Concrete".

[22] Ghamari, A., & Khaloo, A., (2020). "An innovative infill wall utilizing light expanded clay aggregate: An experimental and numerical study." The Structural Design of Tall and Special Buildings, 29(15), e1791.

[23] Khaloo, A., Khoshnevis, A., & Yekrangnia, M., (2019). "On the vulnerability of the Shrine of Prophet Daniel through field observation and numerical simulation". Engineering Failure Analysis, 102, 237-259.

[24] ASTM C 293, (2002) "Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.

[25] ASTM C78–02, (2002). "Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)", Annual Book of ASTM Standard, Vol 04.02

[26] Amouzadeh Omrani, M. and Hasirchian, M. (2020), "Assessing the effect of steel slag and reclaimed asphalt pavement on mechanical properties and pollution of roller compacted concrete pavement". Journal of Transportation Infrastructure Engineering, 6(2): 87-108.