

مطالعه‌ی اثر خواص بتن مادر در پارامترهای مکانیکی بتن بازیافتی

حسن صالحی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا، (ص)

نادر بیگلری جو (مربی)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه عمران توسعه‌ی همدان

هوشنگ برخوردار (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا، (ص)

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۱) ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۵۷۳-۴۷، (پژوهشی)

با وجود انجام مطالعات فراوان در زمینه‌ی بتن‌های بازیافتی، تاکنون درخصوص تأثیر مقاومت بتن مادر در بتن‌های بازیافتی مدلی ارائه نشده است. ارائه‌ی مدل در طرح‌های بتنی می‌تواند از صرف هزینه و زمان مازاد برای ساخت آن‌ها جلوگیری کند. هدف از مطالعه‌ی حاضر، ارائه‌ی یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی رفتار مکانیکی بتن بازیافتی با استفاده از روش طراحی آزمایش مرکب مرکزی و تحلیلی آماری سطح پاسخ است. پارامترهای مؤثر ورودی، شامل: مقاومت فشاری بتن مادر، درصد جایگزینی و عبار سیمان بوده است. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بتن‌های بازیافتی به شدت وابسته به مقاومت فشاری بتن مادر هستند. با افزایش مقاومت فشاری بتن بازیافتی از ۱۹ به ۳۶ مگاپاسکال، مقاومت فشاری بتن بازیافتی حدود ۴٪ افزایش و جذب آب آن حدود ۳٪ کاهش یافته است. زمانی که مقاومت فشاری بتن مادر بیش از ۲۸ مگاپاسکال است، می‌توان درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی را افزایش داد و بتن‌هایی با مقاومت بالاتر از بتن مادر تولید کرد.

واژگان کلیدی: بتن بازیافتی، مدل‌سازی، بتن مادر، خصوصیات مکانیکی، مدیریت مواد زائد.

۱. مقدمه

به‌طور کلی، مواد زائد تولیدی توسط جوامع انسانی به سه دسته‌ی: فاضلاب، مواد زائد جامد (پسماند) و گازهای آلاینده‌ی هوا تقسیم می‌شوند. براساس تعریف، پسماند شهری (MSW)^۱ به مواد زائد غیرخطرناکی اطلاق می‌شود که در مناطق مسکونی، تجاری، مؤسسات و صنایع سبک تولید می‌شوند.^۱ پیشرفت و توسعه‌ی کشورها معمولاً با اصلاح زیرساخت‌ها و احداث سازه‌های زیربنایی همراه است. این نوسازی همواره تخریب ساختمان‌های قدیمی را در پی خواهد داشت که حجم قابل‌توجهی از زباله‌های جامد را تولید می‌کنند. مطابق مطالعات پیشین، میزان زباله‌ی تولیدی ناشی از ساخت و تخریب در اروپا بیش از ۲۰۰ میلیون تن در سال گزارش شده است که حدود ۳۰٪ آن بازیافت می‌شود.^۲ اما متأسفانه، بیشتر مواد زائد ذکر شده به محل‌های دفن زباله یا زباله‌سوزی‌ها حمل می‌شوند که باعث به خطر افتادن محیط زیست، افزایش هزینه‌ی حمل زباله و هزینه‌های مرتبط با روش‌های دفن می‌شود.^۳ براساس آمار، در برخی کشورهای اروپایی مثل هلند و بلژیک حدود

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۷/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2021.57419.2909

h.salehi@sru.ac.ir
nader.biglary@gmail.com
h.barkhordari2016@gmail.com

پسماند جامد در مراکز دفن می‌پرداختند، امروزه باید مبلغ ۷۵ تا ۱۰۰ دلار به ازاء هر تن پرداخت کنند.^[۱۵-۱۱] علاوه بر صنعت ساخت‌وساز، حوادث طبیعی مانند زلزله و سیل نیز می‌توانند سبب تخریب بسیاری از ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و راه‌ها شوند. موارد ذکر شده، خود حجم بالایی از مصالح بتنی، فولادی، آسفالتی و سایر مصالح دارند که توده‌های عظیمی از زباله‌ی ساختمانی را تولید می‌کنند.^[۱۶] در بیشتر نقاط دنیا، بتن و محصولات بتنی، نیز حجم بالایی از مواد زائد ناشی از ساخت و تخریب را شامل می‌شوند. به عنوان نمونه، مقدار مواد زائد تولید شده در بخش ساختمانی در آمریکای شمالی حدود ۲۵ تا ۴۵ درصد از کل مواد زائد را شامل می‌شوند که فقط حدود ۲۵٪ آن بازیافت می‌شوند.^[۱۷] در ایران نیز پیش‌بینی می‌شود در سال‌های آتی، با توجه به استفاده از بتن و محصولات بتنی در سازه‌های مختلف، مراکز دفن با مشکل دفع مصالح زائد مواجه شوند.

بازیافت بتن تخریبی به عنوان جایگزین سنگ‌دانه‌ی بتن برای اولین بار بعد از جنگ جهانی دوم توسط هنسن^۲ مطرح شد.^[۹] پس از آن پژوهشگران شروع به جمع‌آوری اطلاعات در مورد سنگدانه‌های حاصل از بتن تخریبی کردند. در سال‌های اخیر، به دلیل سرعت بالای شهرنشینی و نیاز به توسعه‌ی پایدار، تعداد قابل توجهی از پژوهشگران به بررسی بتن بازیافتی پرداخته و دریافته‌اند که مقادیر سنگدانه‌ی بتن بازیافتی (RCA)^۳ تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن دارد. کو^۴ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۷] مقاومت فشاری بتن بازیافتی حاوی ۱۰۰٪ درشت‌دانه را پس از ۵ سال ارزیابی و مشاهده کردند که همچنان مقاومت فشاری نمونه‌های بازیافتی از مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد کمتر است، اما نرخ رشد مقاومت در بتن‌های بازیافتی بیشتر از بتن‌های معمولی بوده است. براساس مطالعات کابرال^۵ و همکاران (۲۰۱۰)،^[۱۸] تأثیر منفی جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی ریزدانه نسبت به درشت‌دانه بیشتر بوده است. در همین راستا، مطالعه‌ی خطیب^۶ (۲۰۰۵)،^[۱۹] نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۵ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی ریز در بتن، کاهش ۱۵ و ۳۰ درصدی مقاومت فشاری بتن را در پی دارد. دلایل مختلفی برای کاهش مقاومت فشاری بتن بازیافتی می‌توان برشمرد. از جمله‌ی موارد اخیر می‌توان به افزایش تخلخل بتن و چسبندگی ضعیف بین سنگ‌دانه و خمیر سیمان اشاره کرد. البته عوامل زیادی در مقاومت فشاری بتن بازیافتی تأثیر می‌گذارند. به‌گونه‌ی که طبق مطالعات زگا و مایو^۷ (۲۰۱۱)،^[۱۱] با جایگزینی ۲۰ و ۳۰ درصد از سنگدانه‌ی بازیافتی ریز به جای سنگدانه‌ی طبیعی، مقاومت فشاری بتن تغییرات ملموسی نخواهد داشت. گزارش باتلر^۸ و همکاران (۲۰۱۱)،^[۲۰] حاکی از افزایش مقاومت فشاری بتن بازیافتی حاوی RCA است که دلیل آن پیوند قوی‌تر میان ملات جدید با سنگدانه و ملات چسبیده به آن عنوان شده است. در همین راستا، نیلی و همکاران (۲۰۱۱)^[۲۱] نیز میزان ملات چسبیده به سنگدانه را با استفاده از روش کوره تعیین و بیان کردند که با افزایش درصد جایگزینی بتن بازیافتی با شن طبیعی، میزان ملات چسبیده به سنگدانه نیز افزایش یافته و با توجه به احتمال پدیده‌ی واکنش مجدد آب با ملات چسبیده به مصالح، مقدار ژل بیشتری از واکنش اخیر حاصل شده است. در نتیجه، این موضوع سبب افزایش مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰۰٪ شن بازیافتی نسبت به بتن حاوی ۳۳٪ شن بازیافتی شده است. بنابراین، یکی از عواملی که در نتیجه‌ی آزمایش‌های بتن بازیافتی بسیار مؤثر است، کیفیت و مقدار خمیر چسبیده به سنگدانه است.

همچنین زگا و مایو (۲۰۱۱)،^[۲۰] مقاومت در برابر کرناسیون بتن‌های حاوی RCA درشت‌دانه را بررسی کردند و دریافته‌اند که استفاده از RCA در مقاومت در برابر کرناسیون تأثیرگذار است.^[۱۱] طبق مطالعات ایشان، در بتن‌هایی با طرح مخلوط یکسان و حاوی مقادیر مختلف RCA ریزدانه در سنین ۳۱ و ۶۲ روز، عمق

کرناسیون بتن بازیافتی و بتن معمولی تقریباً یکسان است و دلیل آن، نسبت آب به سیمان مؤثر کمتر بتن حاوی RCA ریزدانه است. ایوانگلیستا^۹ (۲۰۰۷)،^[۲۱] بیان کرده است که با جایگزینی ۳۰٪ از ریزدانه‌ی طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری بتن بازیافتی تقریباً ثابت مانده و مقاومت کششی و مدول کشسانی آن نیز کاهش کمتر از ۵٪ داشته است؛ این در حالی است که مقاومت آن در برابر سایش افزایش یافته است. همچنین نیلی و همکاران، با انجام آزمایش مقاومت الکتریکی مشاهده کردند که در تمام درصدهای جایگزینی مصالح بازیافتی RCA به جای مصالح طبیعی، مقاومت الکتریکی کاهش یافته است؛ زیرا با افزایش حجم مصالح بازیافتی در داخل بتن بازیافتی، مقدار زیادی به حجم خلل و فرج و هوای داخل بتن نیز افزوده شده است. در نتیجه از آنجا که ماهیت آزمایش مقاومت الکتریکی به حجم حفره‌ها در بتن سخت شده ارتباط دارد، سبب می‌شود مقاومت الکتریکی بتن به میزان بیشتری کاهش پیدا کند.

از طرف دیگر، مدل‌سازی ویژگی‌های بتن می‌تواند به پژوهشگران کمک کند تا از انجام آزمون‌های غیرضروری در آزمایشگاه پرهیز کنند. این موضوع همچنین می‌تواند دید بهتری را برای پیش‌بینی رفتار بتن قبل از ساخت ایجاد کند.^[۲۲] وقتی نوبت به در نظر گرفتن متغیرهای مختلف و تأثیر آن‌ها در یکدیگر می‌رسد، روش سطح پاسخ (RSM)^{۱۰} هم برای فرایند طراحی آزمایش و هم برای مدل‌سازی آن روشی قابل اعتماد است. روش آماری - ریاضی RSM برای مدل‌سازی و تحلیل فرایند به‌کار می‌رود، به طوری که پاسخ تحت تأثیر متغیرهای مختلفی قرار می‌گیرد و هدف روش اخیر، بهینه‌سازی استفاده از پاسخ‌هاست.^[۲۳]

اگرچه در داخل و خارج از کشور مطالعات زیادی در ارتباط با استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی صورت گرفته است، ولی مطالعات کمتری به بررسی تأثیر مستقیم کیفیت سنگدانه‌ی بتن بازیافتی در ویژگی‌های مکانیکی بتن پرداخته‌اند. غالباً مطالعات پیشین، بتن مادری با مقاومت مشخص را جایگزین سنگدانه‌ی طبیعی در درصدهای مختلف کرده‌اند. به دلیل تنوع در نوع سنگدانه‌ی بتن مادر، مطالعات ذکر شده، دید کلی و جامعی از عملکرد بتن مادر چه از نظر مقاومت فشاری و چه درصد جایگزینی آن به ما نمی‌دهند. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا با طراحی اصولی آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی (CCD)^{۱۱} تأثیر پارامترهای مؤثر مانند: مقاومت بتن مادر، درصد جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی و عیار سیمان در مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بتن ساخته شده اندازه‌گیری شود. علاوه بر مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مدل‌سازی به روش سطح پاسخ نیز صورت پذیرفته است که کمک می‌کند تا برای سه پاسخ مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب، مدل چندجمله‌ی با ضریب همبستگی مناسب ارائه شود.

۲. مواد و روش

در بخش حاضر، به معرفی مصالح مصرفی و روش انجام پژوهش پرداخته شده است.

۲.۱.۲. مصالح مصرفی

۲.۱.۱.۲. سیمان مصرفی

در پژوهش حاضر از سیمان تیپ I کارخانه‌ی سیمان هگمتان همدان استفاده شده است که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

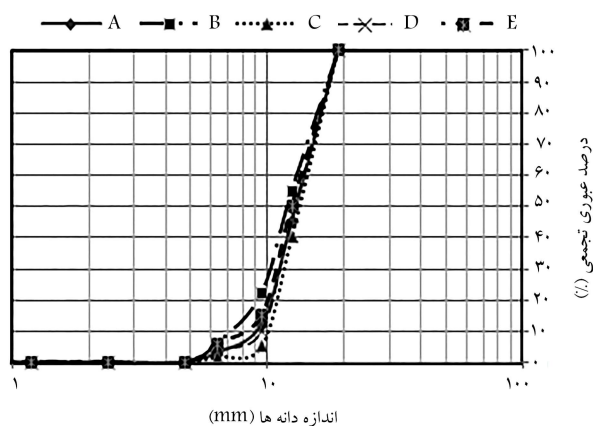
جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

ترکیب درصد	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ A
	۲۱/۳۷	۵/۰۳	۶۳/۱۵	۱/۵۵	۲/۱۷	۰/۶۵	۰/۴۴	۶/۷۶

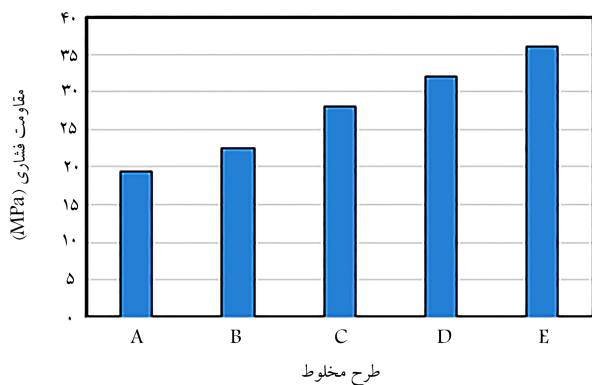
۶.۱.۲. شن بازیافتی

غالباً در پروژه‌های عملی از بتن‌های بدون کاربری که نیاز به تخریب دارند، به عنوان بتن مادر جهت تولید سنگدانه‌ی بازیافتی استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، جهت بررسی دقیق خواص بتن مادر بر بتن تولیدی، از ۵ نوع بتن که در آزمایشگاه با دقت و براساس برنامه‌ی از پیش تعیین شده ساخته شده بودند، استفاده و نام طرح‌های مذکور به ترتیب A، B، C، D، و E انتخاب شده است. برای خرد کردن بتن‌های مادر از دستگاه پیکور و سپس برای ریزکردن ذرات بتن از پتک استفاده شده است. پیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی شن‌های بازیافتی به ۱۹ میلی‌متر محدود شده است. بر روی سنگدانه‌ها، آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM C۱۳۶M [۲۵] و آزمایش‌های تعیین ظرفیت جذب آب و تعیین چگالی حجمی اشباع با سطح خشک طبق استاندارد ASTM C۱۲۸-۰۱ [۲۶] انجام شده است. در شکل ۳، نمودار دانه‌بندی شن بازیافتی مشاهده می‌شود که مطابق آن، نمودار دانه‌بندی ۵ دسته سنگدانه‌ی بازیافتی بعد از خرد شدن بسیار نزدیک به یکدیگر است.

مقاومت فشاری بتن‌های مادر اهمیت زیادی دارد، لذا یکی از اهداف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر مقاومت بتن‌های مادر در رفتار بتن بازیافتی بوده است. مقاومت فشاری ۵ بتن مادر در سن ۲۸ روزگی به دست آمد و نتایج مرتبط در شکل ۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن بتن‌های مادر از A به E طوری ساخته شده‌اند تا



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی شن بازیافتی.



شکل ۴. مقاومت فشاری بتن‌های مادر.

۲.۱.۲. آب مصرفی

آب مصرفی در ساخت طرح مخلوط‌ها از آب شرب شهر همدان تأمین شده است، که میزان pH آن حدود ۷/۵ بوده و غلظت یون کلرید آن نیز ۱۳۴٪/۰/۰ اندازه‌گیری شده است.

۳.۱.۲. فوق روان‌کننده

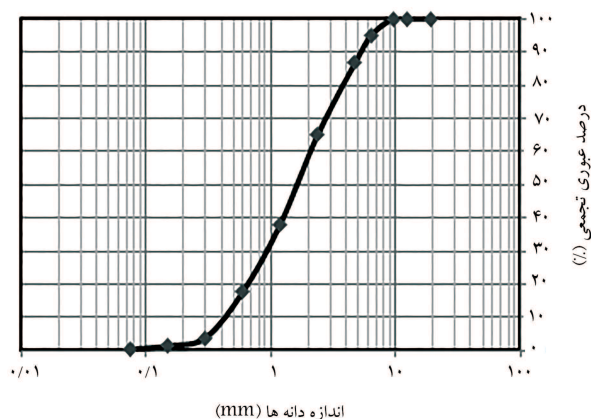
فوق روان‌کننده‌ی مصرفی جهت تنظیم کارایی و ایجاد همگنی مناسب مخلوط، از نسل سوم فوق روان‌کننده‌ها و از نوع پلی‌کربوکسیلات با نام تجاری GLENIUM ۱۱۰P بوده است.

۴.۱.۲. ماسه‌ی طبیعی

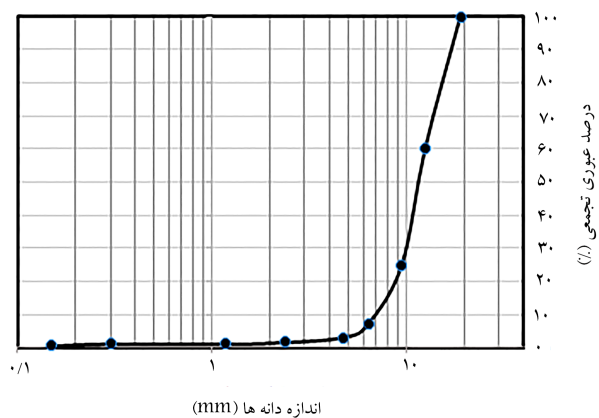
ماسه‌ی استفاده شده از نوع نیم شکسته بوده است که از کارخانه‌ی عبیدی بروجرد تهیه شده است. در شکل ۱، نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی طبیعی مصرفی در بتن مشاهده می‌شود.

۵.۱.۲. شن طبیعی

شن مصرفی از نوع شکسته بوده و از معدن قاسم‌آباد همدان تهیه شده است. پیشینه‌ی اندازه‌ی اسمی شن مصرفی ۱۹ میلی‌متر بود. در شکل ۲، نمودار دانه‌بندی شن طبیعی مصرفی در بتن مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی ریزدانه‌ی طبیعی (ماسه) در بتن.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه‌ی طبیعی (شن) در بتن.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی مصالح بازیافتی.

نوع سنگدانه	چگالی نسبی در حالت اشباع با سطح خشک	جذب آب
ماسه طبیعی	۲/۵۱	۰/۸۷
شن طبیعی	۲/۶۳	۰/۴۳
شن بازیافتی (A)	۲/۴۴	۴/۴۵
شن بازیافتی (B)	۲/۴۲	۴/۳۵
شن بازیافتی (C)	۲/۴۸	۳/۶۵
شن بازیافتی (D)	۲/۵۳	۳/۳۰
شن بازیافتی (E)	۲/۶۲	۳/۳۰

کسب مقاومت در آن‌ها صعودی باشد. در واقع، طرح A کمترین و طرح E بیشترین مقاومت فشاری را داشته‌اند. دلیل استفاده از بتن‌های با مقاومت‌های فشاری و طرح مخلوط‌های مختلف، داشتن بتن مادر از رده‌های متفاوت بوده است، تا بتوان در توسعه‌ی مدل از آن بهره برد.

در جدول ۲، مشخصات فیزیکی مصالح سنگی، شامل بازیافتی و طبیعی ارائه شده است که مطابق آن، چگالی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر بوده است که عمده‌ی دلیل آن مربوط به مقدار خمیر سیمان باقیمانده بر سنگدانه و احتمالاً خلل و فرج بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی بوده است. این موضوع همچنین در مطالعات نیلی و همکاران (۲۰۱۱) مشاهده شده است.^[۲۱] ایشان اشاره کرده‌اند که کاهش چگالی نسبی اخیر در سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش نسبی چگالی سازه شده است.

از طرفی براساس جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی بسیار بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی بوده است که جذب آب بالا می‌تواند به علت وجود لایه‌هایی از ملات چسبیده به سنگدانه و وجود خلل و فرج بیشتر در آن‌ها باشد که هر یک سبب جذب آب بیشتر می‌شوند. برخی پژوهشگران از جمله آقای کو و همکاران (۲۰۱۱)،^[۱۷] نیز به این موضوع اشاره کرده‌اند و این افزایش کلی در جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی را نقطه‌ضعفی برای آن‌ها بیان کرده‌اند. ایشان نیز علت افزایش جذب آب در سنگدانه‌های بازیافتی را عمدتاً وجود ملات چسبیده به سنگدانه معرفی کرده‌اند. البته با افزایش مقاومت فشاری بتن‌های مادر، جذب آب سنگدانه‌های خرد شده کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند کاهش خلل و فرج سنگدانه‌های خرد شده باشد.

۲.۲. روش انجام و طراحی آزمایش

۲.۲.۱. آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمایش

در تهیه‌ی نمونه‌ها، میزان آب موردنیاز جهت اشباع کردن سنگدانه‌ها با سطح خشک محاسبه و به آب مصرفی اضافه شده است. قبل از ریختن مصالح داخل مخلوطکن، ابتدا بدنه‌ی داخلی آن به کمک یک پارچه‌ی نمناک مرطوب و پس از آن ماسه و سیمان به شکل همزمان در مخلوطکن ریخته و به مدت یک دقیقه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس حدود نصف آب مصرفی به مصالح اضافه شد و عمل اختلاط به مدت ۲ دقیقه ادامه یافت. سپس سنگدانه‌های درشت به داخل مخلوطکن ریخته و باقیمانده‌ی آب نیز به مخلوط اضافه شد. عمل مخلوط کردن تا ۳ دقیقه‌ی دیگر ادامه یافت، تا بتنی با کیفیت و همگن حاصل شود. بعد از ساخت بتن، کارایی بتن تازه با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق با ASTM C ۱۴۳،^[۱۷] تعیین شد. بعد از آزمون مقدار روانی (کارایی) بتن، اگر اسلامپ کمتر از ۱۰ سانتی‌متر بود، به مخلوط

فوق روان‌کننده اضافه شد تا عدم کارایی تأثیری در نمونه‌گیری نداشته باشد. برای قالب‌گیری نمونه‌ها (مکعبی و استوانه‌یی)، نیز ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها به وسیله‌ی روغن چرب شد. سپس نمونه‌ها در سه لایه در قالب‌ها ریخته شدند و بعد از هر لایه از کوبه به تعداد ۲۵ ضربه استفاده شد تا تراکم مناسب به دست آید.

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری براساس استاندارد BS EN ۱۲۳۹۰،^[۲۸] و آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌یی با ابعاد ۳۰ × ۱۵۰ میلی‌متر و مطابق استاندارد ASTM C ۴۹۶-۱۷ انجام شده است. همچنین آزمایش جذب آب نیز بر روی نمونه‌های مکعبی و مطابق استاندارد ASTM C ۶۴۲-۲۱^[۳۰] انجام شد. برای تعیین مقادیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب هر یک از طرح‌ها، ۳ نمونه‌ی بتنی ساخته و میانگین نتایج آن‌ها استفاده شد. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در دمای حدود ۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در داخل حوضچه‌ی آب اشباع نگهداری و بعد آزمایش شدند. لازم به ذکر است تمامی امور مربوط به نمونه‌گیری و آزمایش‌ها در آزمایشگاه بتن و مکانیک خاک دانشگاه عمران توسعه‌ی همدان انجام شده است.

۲.۲.۲. طراحی آزمایش

برای بررسی تأثیر متغیری خاص در خصوصیات مکانیکی بتن، باید سایر عوامل تقریباً ثابت بمانند و فقط متغیر مرتبط تغییر کند. در مطالعه‌ی حاضر، اثر ۳ متغیر مختلف در مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بتن بازیافتی بررسی شده است. همچنین در صورتی که لازم باشد طرح مخلوط‌ها به‌طور سنتی تعیین شود، نیاز به آزمایش‌های فراوانی است که سبب صرف هزینه و زمان بسیار می‌شود؛ در عین حال ممکن است براساس آن‌ها نتوان به تفسیر و پیش‌بینی پاسخ‌ها پرداخت و یا تأثیر همزمان متغیرها را بررسی کرد. بنابراین لازم است از نرم‌افزاری بر پایه‌ی ریاضی و تحلیل آماری برای تعیین طرح مخلوط‌ها استفاده شود.

استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی و روش‌های طراحی آزمایش، سبب کاهش زمان، هزینه و مصالح مصرفی می‌شود، روند پژوهش را تسهیل می‌سازد و از طرفی دقت پیش‌بینی نتایج را افزایش می‌دهد. بنابراین در سال‌های اخیر، استفاده از نرم‌افزارهای مذکور و روش سطح پاسخ در کارهای بتنی رواج یافته است. در این خصوص می‌توان به مطالعه‌ی الیمک^[۱۲] و همکاران (۲۰۱۷)،^[۲۱] اشاره کرد که برای بررسی تأثیر پودر سنگ مرمر در خصوصیات مکانیکی و روانی بتن خودتراکم از روش سطح پاسخ (RSM) استفاده کرده‌اند. سان و همکاران (۲۰۱۹) نیز در بررسی تأثیر تخلخل سنگدانه در جمع‌شدگی بتن فوق توانمند، برای تعیین مقادیر بهینه‌ی استفاده از افزودنی‌های مرتبط، از روش سطح پاسخ استفاده کرده‌اند.^[۲۲] همچنین بیگلری‌جو^[۱۳] و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۴] برای مدل‌سازی استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی و شیشه در بتن، از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design Expert استفاده کرده‌اند.

لذا در مطالعه‌ی حاضر، به منظور پرهیز از انجام آزمایش‌های تکراری و زمان‌بر، که اصولاً مبنای علمی و ریاضی مستحکمی نیز ندارند، از روش مرکب مرکزی و نرم‌افزار مدل‌سازی Design Expert برای طراحی آزمایش و تحلیل داده‌ها استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار Design Expert می‌توان طرح مخلوط‌هایی را طراحی کرد که در آن بتوان تأثیر مجزا و نیز همزمان چند متغیر را در پارامترهای خروجی مشاهده کرد. طرح آزمایش‌های پیشنهادی روش CCD به نحوی است که حتی بدون تکرار آزمون نیز نتایج آماری قابل اعتمادی حاصل می‌شود و با معیار قراردادن تعداد متغیرها و حدود بیشینه و کمینه‌ی تعیین شده برای هر یک از متغیرها، طرح مخلوط‌های آزمایش را طراحی می‌کند. بدین ترتیب تعداد آزمون‌ها و نیز اندازه‌ی

جدول ۳. سطح عوامل در طراحی آزمایش CCD.

متغیرهای آزمایش	واحد	علامت	مقادیر کدها				
			+۱/۶۸	+۱	۰	-۱	-۱/۶۸
مقاومت بتن مادر	MPa	f_c	۳۶	۳۳	۲۸	۲۲/۵	۱۹
درصد جایگزینی سنگدانه	%	r	۹۲	۷۵	۵۰	۲۵	۸
عیار سیمان	kg/m^3	c_w	۴۱۰	۳۹۰	۳۶۰	۳۳۰	۳۱۰

متغیرها در هر آزمون مشخص می‌شود.

در روش CCD، دامنه‌ی انتخاب شده برای هر متغیر اهمیت زیادی دارد. از آنجایی که دامنه‌ی انتخاب متغیرهای مستقل یکسان نیست، دامنه‌های مذکور باید کدبندی شوند تا تحلیل رگرسیون به خوبی انجام شود. در پژوهش حاضر، سه عامل مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن مادر (شن بازیافتی)، درصد جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی و عیار سیمان مصرفی متغیرهای ورودی نرم‌افزار برای طراحی آزمایش بوده‌اند. با توجه به وجود سه متغیر ورودی برای نرم‌افزار، براساس الگوریتم پیشنهادی روش CCD و کدهای پیش‌تعریف شده در نرم‌افزار Design Expert، ۵ کد متغیر با اعداد +۱/۶۸، +۱، ۰، -۱، -۱/۶۸ در نظر گرفته شده است. در واقع، کدهای اخیر تنها اطلاعاتی هستند که براساس حدود هر متغیر باید در اختیار نرم‌افزار آماری قرار بگیرند.

برای نشان دادن مقاومت فشاری بتن مادر از متغیر f_c استفاده شده است. در مطالعه‌ی حاضر سعی شده است از بتن‌های مادر با مقاومت فشاری متعارف استفاده شود، تا بتوان در واقعیت نیز از نتایج به دست آمده استفاده کرد. از طرفی بتن‌هایی که نیاز به تخریب دارند، مانند جدول‌های بتنی و المان‌های سازه‌ی ساختمان‌ها، معمولاً در دامنه‌ی مقاومتی ۲۰ تا ۳۵ مگاپاسکال قرار دارند، لذا بازه‌ی ۵ باید به عنوان متغیرهای f_c در نرم‌افزار وارد شوند، بین ۱۹ تا ۳۶ مگاپاسکال انتخاب شده است. مقادیر مقاومت فشاری بتن‌های مادر ساخته شده در آزمایشگاه برابر ۱۹، ۲۲/۵، ۲۸، ۳۳ و ۳۶ مگاپاسکال به دست آمدند و مطابق جدول ۳ در نرم‌افزار وارد شدند. در بازه‌ی تغییر اخیر، مقاومت فشاری ۱۹ مگاپاسکال در نرم‌افزار با کد -۱/۶۸، ۲۲/۵ مگاپاسکال با کد -۱، ۲۸ مگاپاسکال با کد ۰، ۳۳ مگاپاسکال با کد +۱ و ۳۶ مگاپاسکال با کد +۱/۶۸ به نرم‌افزار معرفی شدند. درصد جایگزینی شن بازیافتی با متغیر r نشان داده شده است. برای درصد جایگزینی شن بازیافتی درصدهای ۸، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۹۲ در نظر گرفته شدند. در بازه‌ی تغییر ذکر شده نیز درصد جایگزینی ۸٪ با کد -۱/۶۸، ۲۵٪ با کد -۱، ۵۰٪ با کد صفر، ۷۵٪ با کد +۱ و ۹۲٪ با کد +۱/۶۸ مطابق جدول ۳ به نرم‌افزار معرفی شدند. از آنجایی که در مطالعه‌ی حاضر برای تعیین کدهای کمیته و بیشینه‌ی بازه‌ها از روش CCD استفاده شده است، طراحی آزمایش استفاده از بازه‌ی تغییرات ۸ تا ۹۲ درصد را برای جایگزینی شن بازیافتی پیشنهاد داده و به همین دلیل مقادیر ۰ و ۱۰۰ درصد در طرح اخیر لحاظ نشده‌اند.

برای عیار سیمان (c_w) مقادیر ۳۱۰، ۳۳۰، ۳۶۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است که عموماً عیار بتن‌هایی که در پروژه‌های عملی و پژوهشی ساخته می‌شوند، در محدوده‌ی اخیر قرار دارد. در بازه‌ی تغییر ذکر شده نیز مطابق جدول ۳، عیارهای ۳۱۰، ۳۳۰، ۳۶۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب با کد -۱/۶۸، -۱، ۰، +۱ و +۱/۶۸ به نرم‌افزار معرفی شده‌اند.

بعد از آنکه متغیرها با مقادیر تغییرشان مشخص شدند، نرم‌افزار Design Expert، طرح مخلوط‌های پیشنهادی را با توجه به کدهای مشخص شده برای هر متغیر ارائه می‌دهد. در مطالعه‌ی حاضر، نرم‌افزار مذکور، ۲۰ طرح مخلوط را

برای طراحی آزمایش پیشنهاد داده است. بعد از جایگزینی مقادیر واقعی در مقادیر کدگذاری شده، طرح مخلوط‌های مدنظر تعیین شدند. برای درک بهتر این مفهوم یکی از طرح مخلوط‌ها تشریح شده است. به عنوان نمونه، در طرح ۱ جدول ۴، برای مقدار شن بازیافتی کد (+۱) تخصیص داده شده است که برابر مقاومت فشاری بتن مادر ۳۳ مگاپاسکال است. همچنین، برای درصد جایگزینی شن بازیافتی کد (-۱) تخصیص داده شده است، که برابر ۲۵٪ است. به علاوه، برای عیار سیمان کد (+۱) تخصیص داده شده است که برابر ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. سایر طرح‌ها نیز مشابه این شماره‌ی آزمایش هستند. در ۲۰ طرح مخلوط ذکر شده، آب مصرفی به طور ثابت برابر ۱۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. چون در طرح مخلوط، وزن مخصوص بتن معادل ۲۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است، به هنگام تغییر در میزان سیمان مصرفی (۳۱۰، ۳۳۰، ۳۶۰، ۳۹۰ و ۴۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، وزن مخصوص بتن کاهش یا افزایش می‌یابد. این تغییر وزن به ماسه‌ی مصرفی اضافه یا کم می‌شود. در این سری طرح مخلوط، نام هر طرح ساخته شده کدگذاری شده است، تا آدرس‌دهی آن ساده‌تر شود. چون سه متغیر وجود دارد، بخش اول کد عیار سیمان، بخش دوم درصد جایگزینی و بخش سوم مقاومت فشاری شن بازیافتی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در طرح اول که کد معرف آن C۳۹۰S۲۵f۳۶ است، نشان‌دهنده‌ی عیار سیمان ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب، S۲۵ نشان‌دهنده‌ی درصد جایگزینی شن بازیافتی ۲۵٪ و f۳۶ نشان‌دهنده‌ی مقاومت فشاری ۳۶ مگاپاسکال است. از آنجا که عیار سیمان متغیر بوده و مقدار آب ثابت در نظر گرفته شده است، نسبت آب به سیمان متغیر شده است. نسبت‌های ذکر شده‌ی آب به سیمان در بازه‌ی ۴۳٪ تا ۶۰٪ متغیر است که در بیشتر پروژه‌های عملی نیز به همین شکل است.

پس از انتخاب طرح، معادله‌ی مدل تعیین و ضرایب آن پیش‌بینی می‌شوند. مدل استفاده شده در روش سطح پاسخ عموماً معادله‌ی مدل درجه دوم کامل یا فرم کاهیده‌ی آن است. مدل درجه دوم می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۱ بیان شود [۲۳]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + e(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (1)$$

که در آن، $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_{ij}, \beta_{jj}$ به ترتیب ضرایب ثابت، خطی، درجه‌ی دوم و اثر متقابل رگرسیون هستند. x_i و x_j نیز متغیرهای مستقل کدگذاری شده هستند. نمادسازی ماتریس در معادله‌ی ۲ ارائه داده است:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

جدول ۴. طرح مخلوط بتن‌های آزمایشگاهی ساخته شده.

طرح مخلوط	f_c MPa	r (%)	c_w (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	w/c	شن طبیعی (kg/m^3)	شن بازیافتی (kg/m^3)	ماسه طبیعی (kg/m^3)
C۳۹۰S۲۵F۳۳	۲۳	۲۵	۳۹۰	۳۹۰	۱۸۰	۰/۴۶	۶۱۷	۲۰۶	۹۰۸
C۳۹۰S۷۵F۳۳	۳۳	۷۵	۳۹۰	۳۹۰	۱۸۰	۰/۴۶	۲۰۶	۶۱۷	۹۰۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۶۰S۵۰F۳۶	۳۶	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۹۰S۲۵F۲۲	۲۲/۵	۲۵	۳۹۰	۳۹۰	۱۸۰	۰/۴۶	۶۱۷	۲۰۶	۹۰۸
C۳۹۰S۷۵F۲۲	۲۲/۵	۷۵	۳۹۰	۳۹۰	۱۸۰	۰/۴۶	۲۰۶	۶۱۷	۹۰۸
C۳۳۰S۲۵F۳۳	۲۳	۲۵	۳۳۰	۳۳۰	۱۸۰	۰/۵۵	۶۳۲	۲۱۱	۹۴۸
C۳۶۰S۹۲F۲۸	۲۸	۹۲	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۶۷	۷۶۶	۹۲۸
C۳۳۰S۷۵F۲۲	۲۲/۵	۷۵	۳۳۰	۳۳۰	۱۸۰	۰/۵۵	۲۱۱	۶۳۲	۹۴۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۳۰S۲۵F۲۲	۲۲/۵	۲۵	۳۳۰	۳۳۰	۱۸۰	۰/۵۵	۶۳۲	۲۱۱	۹۴۸
C۳۳۰S۷۵F۳۳	۳۳	۷۵	۳۳۰	۳۳۰	۱۸۰	۰/۵۵	۲۱۱	۶۳۲	۹۴۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۶۰S۸F۲۸	۲۸	۸	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۷۶۶	۶۷	۹۲۸
C۳۶۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۳۱۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۳۱۰	۳۱۰	۱۸۰	۰/۶۰	۴۲۶/۵	۴۲۶/۵	۹۵۸
C۳۶۰S۵۰F۱۹	۱۹	۵۰	۳۶۰	۳۶۰	۱۸۰	۰/۵۰	۴۱۶/۵	۴۱۶/۵	۹۲۸
C۴۱۰S۵۰F۲۸	۲۸	۵۰	۴۱۰	۴۱۰	۱۸۰	۰/۴۳	۴۰۶/۵	۴۰۶/۵	۸۹۸

وقتی عیار سیمان مقدار ثابت ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جایگزینی شن بازیافتی ۵۰٪ ثابت نگه داشته شده است، با افزایش مقاومت فشاری شن بازیافتی از ۱۹ مگاپاسکال به ۳۶ مگاپاسکال، مقدار مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده از ۲۷ مگاپاسکال به حدود ۳۸ مگاپاسکال افزایش یافته است. این افزایش مقاومت بیش از ۴۰٪ بوده است که در تکنولوژی بتن در رویکرد سازه‌یی بسیار مطلوب است. در همین جایگزینی، افزایش مقاومت مشابهی نیز برای مقاومت کششی بتن مشاهده شده است، به طوری که مقاومت کششی بتن‌های ساخته شده نیز حدود ۲۵٪ بهبود و از ۲/۷ به ۳/۴ مگاپاسکال افزایش یافته است. در مشاهده‌ی مشابه دیگری، وقتی عیار سیمان مقدار ثابت ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار درصد جایگزینی شن بازیافتی ۷۵٪ بوده است، با تغییر در مقاومت فشاری بتن بازیافتی از ۲۲/۵ به ۳۳ مگاپاسکال، مقدار مقاومت فشاری بتن ساخته شده‌ی جدید، از ۳۲/۵ به حدود ۳۵/۵ مگاپاسکال و در حدود ۱۰٪ افزایش یافته است. همچنین برای همین طرح‌ها، مقاومت کششی از ۳/۱ به ۳/۵ مگاپاسکال افزایش یافته است. مشاهده‌های اخیر نشان‌دهنده‌ی آن هستند که مقاومت فشاری بتن مادر (شن بازیافتی)، پارامتر کلیدی در تعیین مقاومت بتن‌های ساخته شده است. در این خصوص، روند مشابهی توسط برخی پژوهشگران پیشین نیز مشاهده شده است.^[۱۰،۹] در این راستا، بتایه ۱۴ و همکاران (۲۰۰۷)،^[۵] به بررسی تأثیر جایگزینی ریزدانه‌های زائد بتنی و شیشه‌یی در مقاومت فشاری بتن پرداختند و دریافتند که جایگزینی ریزدانه‌های شیشه‌یی تا ۲۰٪ وزن سنگدانه‌های طبیعی سبب افزایش مقاومت بتن بازیافتی می‌شود و این در حالی است که استفاده از ۲۰٪ ریزدانه‌های بتنی سبب کاهش ۱۳ درصدی مقاومت بتن بازیافتی می‌شود.

دلیل افزایش مقاومت‌های فشاری و کششی در طرح‌های اخیر می‌تواند به

دستگاه معادلات ۲، با استفاده از روش کمینه‌ی مربعات حل شده و ضرایب معادله به دست می‌آیند. بعد از اینکه ضرایب معادله به دست آمدند، با حل معادله‌ی ۲، پاسخ پیش‌بینی می‌شود.

پارامترهای خروجی مطالعه‌ی حاضر، شامل: مقاومت فشاری بتن (F_c)، مقاومت کششی (F_t) و جذب آب بتن (A) است. در تمام مراحل پژوهش حاضر، برای طراحی آزمایش‌ها از روش CCD و برای بررسی تأثیر پارامترهای ورودی در خروجی و مدل‌سازی، از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار Design Expert استفاده شده است. هر پارامتر خروجی حاصل از مدل‌سازی نیز تابعی از مقاومت بتن مادر (f_c)، درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی (r) و عیار سیمان (c_w) خواهد بود، که به شکل معناداری از ترکیب مرتبه‌ی اول، مرتبه‌ی دوم و تأثیر درونی آن‌ها تشکیل می‌شود. در ضمن برای تعیین آزمایشگاهی پارامترهای اخیر، تمامی نمونه‌ها در سن ۲۸ روز آزمایش شده‌اند.

۳. نتایج

۳.۱. نتایج آزمایشگاهی

در جدول ۵، نتایج آزمایشگاهی مربوط به بتن بازیافتی ساخته شده با سنگ‌دانه‌های بازیافتی مشاهده می‌شود. بر روی بتن‌های ساخته شده‌ی مذکور، سه آزمایش اصلی مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بتن انجام شده است. طبق جدول ۵، تأثیر مقاومت بتن مادر (سنگدانه‌ی بازیافتی) در هر سه آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و جذب آب بسیار محسوس است. به عنوان مثال،

جدول ۵. نتایج آزمایشگاهی بتن بازیافتی.

آزمایش	پارامترهای خروجی	
	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
C29°S25F22	31/8	3/1
C29°S75F22	35/4	3/4
C36°S5°F28	26/5	2/8
C36°S5°F28	26	2/7
C36°S5°F36	37/8	3/4
C29°S25F22	32/4	3
C29°S75F22	32/5	3/1
C23°S25F22	34	3/3
C26°S92F28	30	3/1
C23°S75F22	26/5	2/6
C26°S5°F28	26/3	2/7
C23°S25F22	28/2	2/8
C23°S75F22	36	3/5
C26°S5°F28	25/5	2/6
C26°S5°F28	25/8	2/8
C26°S84F28	26	2/8
C26°S5°F28	25/8	2/7
C21°S5°F28	22/5	2/4
C26°S5°F19	27	2/5
C41°S5°F28	28/7	2/8

مقاومت بتن مادر (شن بازیافتی) برابر ۳۳ مگاپاسکال و عیار سیمان ۳۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثابت فرض شده است، وقتی درصد جایگزینی از ۲۵ به ۷۵ افزایش یافته است، مقاومت فشاری از حدود ۳۲ به حدود ۳۵/۵ مگاپاسکال رسیده است. همین مشاهده برای مقاومت کششی بتن نیز صادق بوده و در این حالت مقاومت کششی از ۳/۱ به ۳/۴ مگاپاسکال افزایش یافته است. این موضوع بسیار حائز اهمیت است، زیرا این پدیده برای بتن‌های ساخته شده با مقاومت بتن مادر حدوداً ۲۲ مگاپاسکال صادق نیست. به بیان دیگر، وقتی مقاومت بتن بازیافتی حدود ۲۲ مگاپاسکال بوده و عیار سیمان ۳۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب ثابت فرض شده است، با افزایش درصد جایگزینی بتن بازیافتی از ۲۵ به ۷۵ درصد، مقاومت فشاری بتن ساخته شده از حدود ۲۸ به ۲۶/۵ مگاپاسکال و مقاومت کششی آن از ۲/۸ به ۲/۶ مگاپاسکال کاهش یافته است. در نتیجه، مقاومت فشاری بتن مادر (شن بازیافتی) پارامتری بسیار مهم است. در بتن‌های مادر با مقاومت متوسط به بالا، افزایش درصد جایگزینی، سبب افزایش مقاومت فشاری می‌شود که موجب نبود نگرانی در پروژه‌های عملی مهندسان از بابت جایگزینی کامل یا نسبتاً کامل بتن بازیافتی با شن طبیعی می‌شود. در مقابل برای سنگدانه‌هایی با بتن مادر کم مقاومت، افزایش درصد جایگزینی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. همان‌طور که در چکیده‌ی نوشتار ذکر شده است، پژوهشگران مختلف در خصوص جایگزینی RCA در بتن به نتایج مختلفی دست یافته‌اند.^[۲۱-۲۷] برخی آن را سبب افزایش مقاومت و برخی نیز سبب کاهش مقاومت بتن بازیافتی دانسته‌اند. نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر، وجود دیدگاه‌های مختلف در خصوص تأثیر جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی در خصوصیات مکانیک بتن را توجیه و دلیل اصلی آن را مقاومت متفاوت سنگدانه‌های به‌کار رفته در آزمایش‌ها عنوان می‌کند. از آنجا که در بیشتر پروژه‌های عملی، کسب مقاومت‌های فشاری یا کششی بالاتر مطلوب است، لذا با توجه به نتایج قابل مشاهده در جدول ۵ توصیه می‌شود که اگر بتن مادری با مقاومت کمتر از ۲۸ مگاپاسکال در اختیار است، درصد‌های جایگزینی به زیر ۵۰٪ محدود شود. اما هنگامی که مقاومت بتن مادر بالای ۲۸ مگاپاسکال است، می‌توان درصد‌های جایگزینی را تا بالای ۵۰٪ نیز افزایش داد و در عین حال مقاومت بتن را بالا برد. اما در مقابل، برای جذب آب منطقی به‌نظر می‌رسد که افزایش درصد جایگزینی (با هر مقاومت مادری)، سبب افزایش درصد جذب آب شود. این موضوع در نتایج آزمایشگاهی حاصل از مطالعه‌ی حاضر نیز مشاهده شده است. در واقع برای دو نمونه‌ی مذکور، با افزایش درصد جایگزینی (مقاومت بتن بازیافتی زیاد یا کم)، مقدار جذب آب افزایش یافته است که علت آن، تخلخل نسبی بیشتر سنگدانه‌ی بازیافتی نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی بوده است. همچنین مقدار ملات سیمان باقیمانده روی بتن بازیافتی خود جاذب قوی آب است، که سبب افزایش جذب آب بتن بازیافتی می‌شود.^[۹] مطالعات پیشین نیز علت اصلی افزایش جذب آب بتن‌های حاوی سنگ‌دانه بازیافتی را ملات چسبیده به سنگ‌دانه و خلل و فرج احتمالی آن دانسته‌اند.^[۱۰]

نکته‌ی مهم دیگری که در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر به چشم می‌خورد، مقدار تأثیر عیار سیمان است. به‌عنوان نمونه، وقتی دو پارامتر مقاومت فشاری بتن بازیافتی و درصد جایگزینی آن در دو مقدار ۲۸ مگاپاسکال و ۵۰٪ ثابت فرض شده‌اند، با افزایش عیار سیمان از ۳۱۰ به ۴۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب، مقدار مقاومت فشاری بتن‌ها از حدود ۲۶ به ۲۹ مگاپاسکال افزایش یافته است. غالباً افزایش اخیر مقاومت به علت نرخ بالاتر هیدراتاسیون و چسبندگی و اتصال بهتر اجزاء ماتریس بتن است. البته مقاومت کششی دو بتن مذکور تفاوت محسوسی نکرده است. با افزایش عیار سیمان، میزان جذب آب نیز به‌صورت جزئی افزایش یافته است، که

اتصال بهتر سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت بالا با ماتریس بتن مربوط باشد. همچنین سنگدانه‌های بازیافتی با بتن مادر مقاوم‌تر، تخلخل کمتری دارند، چون سیمان چسبیده شده روی آن‌ها یا کمتر بوده یا مقاومت مکانیکی قابل قبول‌تری داشته است. از طرفی دیگر، سطح زبر و تیز گوشه بودن سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت بالاتر باعث به وجود آمدن بتنی یکپارچه‌تر می‌شود. به‌علاوه، برای سنگدانه‌های بازیافتی امکان واکنش خمیر روی سنگدانه در بتن جدید وجود دارد، که به فرایند هیدراتاسیون کمک می‌کند. به پدیده‌ی اخیر در مطالعه‌ی نیلی و همکاران نیز اشاره شده است.^[۲۱] نکته‌ی مهم دیگر آن است که در دو طرح مذکور، با افزایش مقاومت فشاری بتن مادر (شن بازیافتی)، جذب آب بتن‌های ساخته شده کاهش یافته است. در مشاهده‌ی اول، وقتی مقاومت فشاری بتن بازیافتی از ۱۹ به ۳۶ مگاپاسکال رسیده است، جذب آب از عدد ۷/۶ به ۵/۲ درصد کاهش یافته است. همچنین در طرح دیگر، وقتی مقاومت فشاری بتن بازیافتی از ۲۲/۵ به ۳۳ مگاپاسکال رسیده است، جذب آب نیز از ۷/۵ به ۵/۸ درصد کاهش یافته است که دلیل اصلی آن، کاهش تخلخل سنگدانه‌های بازیافتی در مقاومت‌های بالای بتن مادر بوده است. مشاهده‌ی جالب دیگر در جدول ۵، زمانی است که درصد جایگزینی بتن بازیافتی متغیر قرار داده شده است. وقتی عیار سیمان به مقدار ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری بتن بازیافتی در عدد ۲۸ مگاپاسکال ثابت نگه داشته شود، با تغییر درصد جایگزینی بتن بازیافتی از ۸ تا ۹۲ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۲۶ به ۳۰ مگاپاسکال افزایش یافته است. مقدار مقاومت کششی بتن‌های مذکور نیز از ۲/۸ به ۳/۱ مگاپاسکال رسیده است. این نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت درصد جایگزینی بتن بازیافتی در بتن است. در مشاهده‌ی دیگر، زمانی که

جدول ۶. تحلیل واریانس برای مدل‌های پیشنهادی.

پاسخ	منبع	SS	DF	MS	F	P
F_c	مدل	۲۹۸/۸۸	۹	۳۳/۲۱	۷/۸۰	۰/۰۰۱۸
	باقیمانده	۴۲/۵۹	۱۰	۴/۲۶		
	کمبود تطبیق	۴۱/۹۲	۵	۸/۳۸	۶۲/۷۳	۰/۰۰۰۲
	خطای خالص	۰/۶۷	۵	۰/۱۳		
کل	۳۴۱/۴۵	۱۹				
F_t	مدل	۱/۶۳	۹	۰/۱۸	۶/۵۹	۰/۰۰۳۴
	باقیمانده	۰/۲۸	۱۰	۰/۰۲۸		
	کمبود تطبیق	۰/۲۵	۵	۰/۰۴۹	۸/۷۲	۰/۰۱۶۵
	خطای خالص	۰/۰۲۸	۵	۰/۰۰۵		
کل	۱/۹۱	۱۹				
A	مدل	۱۷/۱۵	۹	۱/۹۱	۱۲/۲۴	۰/۰۰۰۳
	باقیمانده	۱/۵۶	۱۰	۰/۱۶		
	کمبود تطبیق	۱/۴۵	۵	۰/۳۱		
	خطای خالص	۰	۵	۰		
کل	۱۸/۷۰	۱۹				

(SS : مجموع مربعات، DF : درجه آزادی، MS : میانگین مربعات، F : مقدار F-value، P : خطای احتمالی)

$$F_c = 257.88 + 2.62f_c + 0.79r + 1.31c_w + 0.90f_c r - 1.62f_c c_w + 0.43rc_w + 2.96f_c^2 + 1.40r^2 + 0.55c_w^2 \quad (3)$$

$$F_t = 2.71 + 0.24f_c + 0.066r + 0.079c_w + 0.075f_c r - 0.12f_c c_w + 0.50rc_w + 0.14f_c^2 + 0.14r^2 + 0.14c_w^2 \quad (4)$$

$$A = 7.11 - 0.78f_c + 0.59r + 0.66c_w - 0.25f_c r - 0.29f_c^2 - 0.46r^2 + 0.007c_w^2 \quad (5)$$

جدول ۷. پارامترهای آماری از تحلیل واریانس مدل‌های پیشنهادی.

پاسخ	R^2	$Adj.R^2$	CV	S.D.	A.P.	PRESS
F_c	۰/۸۸	۰/۷۶	۷/۰۶	۲/۰۶	۹/۵۶	۳۱۷/۷۳
F_t	۰/۸۶	۰/۷۳	۵/۷۱	۰/۱۷	۸/۶۴	۱/۹۱
A	۰/۹۲	۰/۸۴	۵/۹۸	۰/۳۹	۱۰/۷۹	۱۱/۸۲

(CV : ضریب واریانس، S.D. : انحراف معیار، A.P. : دقت کافی، PRESS :

باقیمانده پیش‌بینی شده از مجموع مربعات خطا)

مذکور در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. در جدول‌های مذکور، مقدار P برای همه‌ی مدل‌های پیشنهادی کمتر از ۰/۰۵ به دست آمده است که نشان می‌دهد سه متغیر انتخاب شده با سطح اطمینان بالای ۹۵٪ در پاسخ‌های مرتبط تأثیرگذار هستند. به منظور ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها، سه پارامتر ضریب همبستگی (R^2)، پارامتر R^2 اصلاح شده ($Adj.R^2$) و مقدار F معرفی شده‌اند.^[۲۴] ضریب همبستگی (R^2) روابط پیشنهادی برای مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب بتن باز یافتی به ترتیب برابر ۰/۸۸، ۰/۸۶ و ۰/۹۲ بوده است که مطلوب و نشانگر تطبیق‌پذیری مناسب بین مدل‌های پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی است.

طبیعی به نظر می‌رسد؛ زیرا سیمان موجود بالاتر در ماتریس بتن، نیاز به آب بیشتری دارد.

۲.۳. نتایج مدل‌سازی

روش سطح پاسخ به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در پیش‌بینی رفتار بتن باز یافتی معرفی شده است.^[۱۰] بنابراین همان‌طور که در بخش قبل نیز مطرح شد، در مطالعه‌ی حاضر برای مدل‌سازی رفتار بتن‌های باز یافتی از روش سطح پاسخ استفاده شده است. در روابط ۳ الی ۵ و جدول ۶، F_c برابر مقاومت فشاری (MPa)، F_t معادل مقاومت کششی (MPa) و A معادل جذب آب بتن (%) است. هر پاسخ در مدل اخیر، تابعی از متغیرهای مرتبه‌ی اول (f_c , r , c_w)، مرتبه‌ی دوم (f_c^2 و r^2 ، c_w^2) و تأثیر متقابل ($f_c r$, $f_c c_w$, $r c_w$) متغیرهاست. در معادلات پیشنهادی اخیر، f_c نشانگر مقاومت بتن مادر (MPa)، r نشانگر درصد جایگزینی مصالح باز یافتی (%)، c_w نشانگر عیار سیمان بر حسب (kg/m^3) است. معادلات پیشنهادی برای پیش‌بینی رفتار بتن باز یافتی در رابطه‌های ۳ الی ۵ ارائه شده است.

روابط اخیر با استفاده از روش تحلیل واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار Expert Design تحلیل شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده برای پاسخ‌های

ساختن میزان دقت، می‌توان معادلات فوق را با استفاده از جایگزینی مقادیری که در طرح آزمایش مطرح شده است، آزمایش کرد. به عنوان نمونه براساس رابطه ۳، وقتی درصد جایگزینی صفر، عیار سیمان معادل ۳۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب، و بتن مادر دارای مقاومت ۲۸ مگاپاسکال است، مقاومت فشاری بتن حاصل کمتر از ۲۶ مگاپاسکال و زمانی که درصد جایگزینی به ۱۰۰٪ برسد مقاومت فشاری کمی بیش از ۳۰ مگاپاسکال به دست می‌آید. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر مثبت جایگزینی بتن‌های مادر با مقاومت ۲۸ مگاپاسکال و بالاتر از آن است. براساس رابطه ۴، با افزایش همین درصد‌های جایگزینی، مقاومت کششی بتن بازیافتی از ۲/۸ به ۳/۱ مگاپاسکال می‌رسد. در مطالعات پیشین نیز جایگزینی درصد بالای شن بازیافتی در بتن مناسب ارزیابی شده است.^[۱۰] در شکل ۵، نمودارهای مربوط به مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی مشاهده می‌شوند، که مطابق آن‌ها، تطبیق قابل‌قبولی بین نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های پیش‌بینی وجود دارد. نمودارهای اخیر در واقع نشان می‌دهند که مدل‌های اخیر به خوبی قابلیت پیش‌بینی رفتار بتن بازیافتی را دارند.

۴. نتیجه‌گیری

به منظور دهن ایمن مواد زائد جامد در بتن، سنگدانه‌های طبیعی درشت با سنگدانه‌های بتن بازیافتی جایگزین شدند. برای مدل‌سازی رفتار بتن بازیافتی و انجام تحلیل حساسیت، از روش طراحی مرکب مرکزی به همراه روش آماری سطح پاسخ استفاده شده است. در پژوهش حاضر، تأثیر مقاومت فشاری بتن مادر (۱۹ تا ۳۶ مگاپاسکال)، تأثیر درصد جایگزینی (۸٪ تا ۹۲٪ درصد) و عیار سیمان (۳۱۰ تا ۴۱۰ kg/m^3) به عنوان پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند و مقاومت فشاری، مقاومت کششی، و درصد جذب آب به عنوان پارامترهای خروجی مدنظر قرار گرفتند. در ادامه، دستاوردهای مهم مطالعه حاضر ارائه شده است:

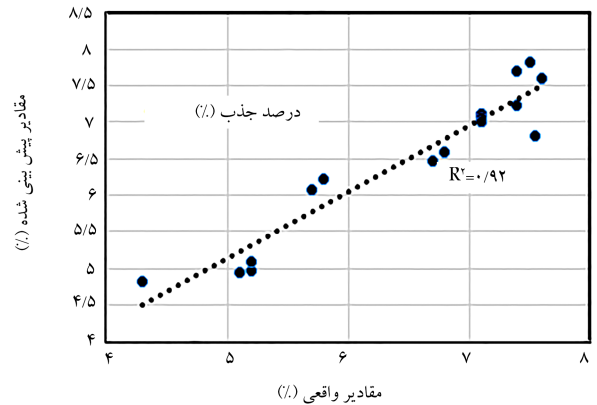
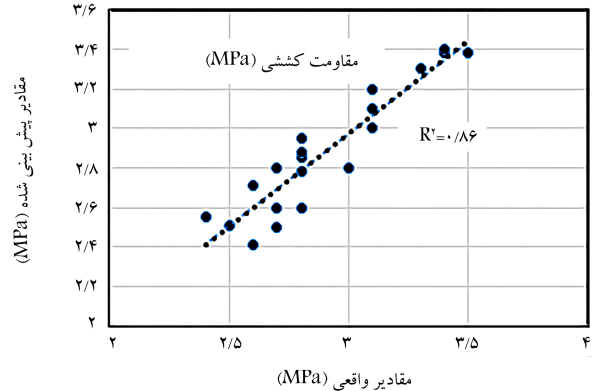
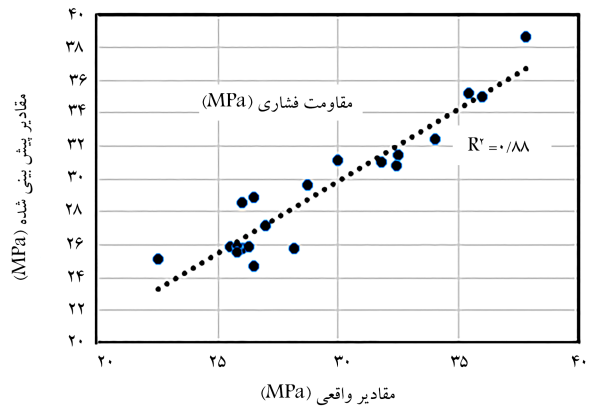
الف) مقاومت فشاری بتن مادر نقش به‌سزایی در تعیین ویژگی‌های مکانیکی بتن بازیافتی، شامل: مقاومت فشاری، مقاومت کششی و جذب آب دارد. به منظور ساخت بتن‌هایی با مقاومت فشاری بالاتر از مقاومت اولیه بتن مادر، بتن مادر با مقاومت بالای ۲۸ مگاپاسکال باید استفاده شود.

ب) با افزایش مقاومت فشاری بتن بازیافتی از ۱۹ تا ۳۶ مگاپاسکال، مقاومت فشاری بتن بازیافتی بیش از ۴۰٪ افزایش یافته است. در همین جایگزینی جذب آب بتن نیز بیش از ۳۰٪ کاهش یافته است.

ج) وقتی مقاومت فشاری بتن بازیافتی برابر ۲۸ مگاپاسکال ثابت نگه داشته شد، با تغییر درصد جایگزینی بتن بازیافتی از ۸ تا ۹۲ درصد، مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها از ۲۶ به ۳۰ مگاپاسکال افزایش و مقدار مقاومت کششی آن‌ها نیز از ۲/۸ به ۳/۱ مگاپاسکال رسیده است.

د) وقتی مقاومت فشاری بتن مادر بالای ۲۸ مگاپاسکال بوده است، درصد بالای جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی منطقی به‌نظر رسید. این نکته می‌تواند کمک کند تا حجم زیادی از مواد زائد در بتن دهن شود. اما برای بتن‌های مادر با مقاومت کم، درصد جایگزینی باید محدود شود تا رفتارهای نامطلوب کاهش یابد.

و) معادلات پیشنهادی برای پاسخ‌های هدف، پژوهشگران را قادر می‌سازد تا پیش‌بینی منطقی از عملکرد مقاومت بتن مادر بر خصوصیات بتن بازیافتی داشته باشند. با تحلیل آماری مدل‌های ارائه شده، مقادیر R^2 بین ۸۶٪ و ۹۲٪ به دست آمد که کاملاً مطلوب است.



شکل ۵. مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی.

شکل اصلاح شده R^2 نیز برای همه‌ی پاسخ‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. پارامتر R^2 اصلاح شده برای بررسی قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها استفاده می‌شود، که اصولاً از R^2 کمتر بوده و حساسیت بیشتری از آن داشته است. این پارامتر نیز در محدوده‌ی قابل‌قبولی قرار داشته است. پارامتر A.P. (دقت کافی)، از لحاظ آماری نشان‌دهنده‌ی سیگنال به نویز یا به عبارتی نسبت محدوده‌ی پاسخ پیش‌بینی شده به خطای متوسط آن است که مقدار آن در حال مطلوب باید بیش از ۴ باشد.^[۱۲] مطابق جدول ۷، مقدار پارامتر A.P. بین ۸/۶۴ تا ۱۰/۷۹ است و در محدوده‌ی مطلوب قرار دارد. مقدار F نیز در محدوده‌ی ۶/۵۹ تا ۱۲/۲۴ قرار دارد که نشان می‌دهد همه‌ی مدل‌های پیشنهادی از لحاظ آماری مناسب هستند. ضریب تغییرات (CV) در همه‌ی مدل‌ها کمتر از ۱۰٪ بوده است که نمایانگر دقت و قابلیت اطمینان پاسخ‌هاست. بنابراین براساس پارامترهای مطرح شده، روابط پیشنهادی کفایت لازم برای پیش‌بینی پاسخ‌ها را دارند. برای شفاف‌تر

پانوشتها

1. municipal solid waste (MSW)
2. Hansen
3. recycled concrete aggregates (RCA)
4. Kou
5. Cabral
6. Khatib
7. Zega & Maio
8. Butler
9. Evangelista
10. response surface methodology (RSM)
11. central composite design (CCD)
12. Alyamac
13. Biglarijoo
14. Batayneh

منابع (References)

1. Winkler, G., *Recycling Construction and Demolition Waste*, McGraw Hill, 1st Edition, pp. 256 (2010).
2. Tabsh, S. and Abdelfatah, A. "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete", *Construction and Building Materials*, **23**(2), pp. 1163-1167 (2009).
3. Shi, J. and Xu, Y. "Estimation and Forecasting of Concrete Debris Amount in China", *Resources, Conservation & Recycling*, **49**(2), pp. 147-158 (2006).
4. Laserna, S. and Montero, J. "Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties", *Construction and Building Materials*, **115**, pp. 78-86 (2016).
5. Batayneh, M., Marie, I. and Asi, I. "Use of Selected Waste Materials in Concrete Mixes", *Waste Management*, **27**(12), pp. 1870-1876 (2007).
6. Huda, S. and Alam, S. "Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, **65**, pp. 574-582 (2014).
7. Nili, M., Biglarijoo, N. and Razmara, M. "Effects of recycled concrete aggregate, waste glass and plastics on the durability and mechanical properties of concrete", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **31.2**(2.1), pp. 111-119 (2015).
8. Mostofinejad, D., Hosseini, M., Nosouhian, F. and et al. "Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste Magnesium sulfate environment", *Journal of Building glass in Engineering*, **29**, pp. 101182 (2020).
9. Hansen, T.C., *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, CRC Press, pp. 336 (1992).
10. Biglarijoo, N., Nili, M., Hosseini, M. and et al. "Modelling and optimisation of concrete containing recycled concrete aggregate and Waste glass", *Magazine of Concrete Research*, **69**(6), pp. 1-11 (2017).
11. Zega, C. and Maio, A. "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements", *Waste Management*, **31**(11), pp. 2336-2340 (2011).
12. Bostanci, S. "Use of waste marble dust and recycled glass for sustainable concrete production", *Journal of Cleaner Production*, **251**, pp. 119785 (2020).
13. Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. and Wirquin, E. "Frost resistance of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Research*, **34**(10), pp. 1927-1932 (2004).
14. Nili, N., Biglarijoo, N. and Mirbagheri, S.A. "A review on the use of various kinds of debris and demolitions in concrete and mortar mixes", 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical University, Ankara, Turkey (2011).
15. Mesgari, S., Akbarnezhad, A. and Xiao, J.Z. "Recycled geopolymer aggregates as coarse aggregates for portland cement concrete: Effects on mechanical properties", *Construction and Building Materials*, **236**, pp. 117571 (2020).
16. Bai, G., Zhu, C., Liu, C. and et al. "An Evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties", *Construction and Building Materials*, **240**, pp. 117978 (2020).
17. Kou, S.C., Poon, C.S. and Etxeberria, M. "Influence of recycled aggregates on long-term mechanical properties and pore size distribution of concrete", *Cement and Concrete Composites*, **33**(2), pp. 286-291 (2011).
18. Cabral, A., Schalch, V., Molin, D. and et al. "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, **24**(4), pp. 421-430 (2010).
19. Khatib, K. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", *Cement and Concrete Research*, **35**(4), pp. 763-769 (2005).
20. Butler, L., West, J.S. and Tighe, S.L. "The Effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement", *Cement and Concrete Research*, **41**(10), pp. 1037-1049 (2011).
21. Nili, M., Hosseini, S.M., Biglarijoo, N. and et al. "Assessing the influences of waste glass and recycled concrete aggregate on properties of concrete", FIB Symposium, Prague, Czech (2011).
22. Evangelista, B. "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates", *Cement and Concrete Composites*, **29**(5), pp. 397-401 (2007).
23. Biglarijoo, N., Mirbagheri, S.A., Ehteshami, M. and et al. "Optimization of fenton process using response surface methodology and analytic hierarchy process for landfill leachate treatment", *Process Safety and Environmental Protection*, **104:Part A**, pp. 150-160 (2016).
24. Amiri, A. and Sabour, M.R. "Multi-response optimization of fenton process for applicability assessment in landfill leachate treatment", *Waste Management*, **34**(12), pp. 2528-2536 (2014).
25. ASTM C136M-19, "Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM international, west conshohocken", PA (2019).
26. ASTM C128-01, "Standard test method for density, relative density (Specific Gravity), and absorption of fine aggregate", ASTM International, West Conshohocken, PA (2001).

27. ASTM C143M-15a, "Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA (2015).
28. "BSI, BS EN 12390, Testing hardened concrete, method of determination of compressive strength of concrete cubes: Part 3", BSI, London, UK (2000).
29. ASTM C496-17, "Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens", ASTM International, West Conshohocken, PA (2017).
30. ASTM C642-13, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA (2013).
31. Alyamac, K.E., Ghafari, E. and Ince, R. "Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method", *Journal of Cleaner Production*, **144**, pp. 192-202 (2017).
32. Sun, Y., Yu, R., Shui, Z. and et al. "Understanding the porous aggregates carrier effect on reducing autogenous shrinkage of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) based on response surface method", *Construction and Building Materials*, **222**, pp. 130-141 (2019).