

بررسی تأثیر چسب بتن پلیمر آکریلاتی بر رفتار مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های

بازیافتی

محسن باقری خلیلی^۱، محسن موسیوند^{۲*}

۱ گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران

۲ گروه مهندسی عمران، واحد گنبد کاووس، دانشگاه آزاد اسلامی، گنبد کاووس، ایران

نویسنده مسئول: محسن موسیوند mousivand@iau.ir

ORCID: 0000-0002-2232-2786

چکیده:

در این تحقیق، تأثیر استفاده همزمان از مصالح بازیافتی (شن و ماسه بازیافتی حاصل از خردایش بتن ضایعاتی) و امکان بهبود آن با پلیمر آکریلات مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور در ابتدا، نمونه‌های بتن با درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی (۱۲/۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) بصورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت. سپس نمونه بتن حاوی هر دو اندازه سنگدانه ریز و درشت مورد آزمایش قرار گرفت. در ادامه به منظور بررسی اثرات پلیمر بر روی بتن درصدهای مختلفی از آن (۰/۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد) مورد آزمایش قرار گرفت. در پایان اثرات هم‌افزایی پلیمر و سنگدانه بازیافتی بر روی رفتار مقاومتی بتن مورد مطالعه قرار گرفت. برای هر حالت مقاومت فشاری در سنین ۱۴، ۷ و ۲۸ روزه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که استفاده از ماسه و شن بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری به ترتیب به میزان ۳۷ و ۲۸ درصد شد. این موضوع برای بتن حاوی هردو سنگدانه ریز و درشت بازیافتی منجر به کاهش مقاومت بیشتری شد. پلیمر در نقطه بهینه ۴ درصد، منجر به افزایش چشمگیر مقاومت در تمام طرح‌ها گردید. حضور پلیمر در حالت بهینه به میزان ۴ درصد، منجر به افزایش ۱۱۴ درصدی نسبت به بتن شاهد شد. حضور پلیمر در بتن حاوی مصالح بازیافتی به میزان ۰/۲۵ درصد، توانست اثرات کاهنده سنگدانه بازیافتی را تا حد زیادی از بین ببرد. همچنین در حالت ۴ درصد پلیمر، خصوصیات مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌ها (شن، ماسه و شن و ماسه بازیافتی) به ترتیب با افزایش حدود ۱۰۹، ۱۰۷ و ۱۰۰ درصدی نسبت به نمونه شاهد مواجه شد.

کلمات کلیدی

بتن سبز، ماسه بازیافتی، شن بازیافتی، پلیمر، مقاومت فشاری

۱- مقدمه:

صنعت ساخت و ساز به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان منابع طبیعی و تولیدکنندگان پسماند در جهان شناخته می‌شود. رشد روزافزون جمعیت، شهرنشینی و توسعه زیرساخت‌ها منجر به افزایش تقاضا برای بتن به عنوان پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی پس از آب گردیده است. این تقاضای فزاینده از یک سو باعث استخراج بی‌رویه سنگدانه‌های طبیعی از معادن و بستر رودخانه‌ها شده و از سوی دیگر، حجم عظیمی از نخاله‌های ساختمانی را در پایان عمر سازه‌ها ایجاد می‌کند [۱، ۲]. بر اساس گزارش‌های موجود، سهم عمده‌ای از این نخاله‌ها را بتن تخریبی تشکیل می‌دهد که دفن غیراصولی آن‌ها پیامدهای زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری به همراه دارد. در همین راستا، مفهوم بتن سبز^۱ و توسعه پایدار در صنعت بتن مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است و استفاده مجدد از مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی، به یک راهبرد کلیدی در این حوزه تبدیل شده است [۱-۳]. استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی علیرغم مزایای زیست‌محیطی، به دلیل وجود خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سطح دانه‌ها که متخلخل و دارای جذب آب بالایی است، باعث تضعیف خواص مکانیکی بتن می‌شود [۴-۶]. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی مانند آماده‌سازی مصالح، اصلاح سطح دانه‌ها و استفاده از مواد افزودنی مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از مؤثرترین این روش‌ها، استفاده از پلیمرها به عنوان اصلاح‌کننده خواص بتن است. پلیمرها با نفوذ به درون منافذ، پر کردن ریزترک‌ها، تقویت ناحیه انتقال و ایجاد شبکه درهم‌تنیده با محصولات هیدراتاسیون سیمان، می‌توانند اثرات منفی ناشی از حضور مصالح بازیافتی و الیاف طبیعی را به طور چشمگیری کاهش داده و منجر به تولید بتنی با مقاومت بالا گردند [۷]. با توجه به تحقیقات محدود در زمینه بررسی همزمان تأثیر پلیمر بر بتن حاوی شن و ماسه بازیافتی، انجام مطالعه‌ای جامع در این حوزه ضروری به نظر می‌رسد.

۱-۱- سنگدانه‌های بازیافتی

سنگدانه‌های بازیافتی بتنی^۲ که از خردایش و فرآوری بتن‌های ضایعاتی حاصل از تخریب سازه‌ها، آزمایشگاه‌ها و ضایعات ساختمانی تولید می‌شوند، یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین انواع مصالح بازیافتی در صنعت بتن محسوب می‌گردند. فرآیند تولید این سنگدانه‌ها شامل مراحل خردایش، جداسازی ناخالصی‌ها، سرند کردن و دانه‌بندی می‌باشد. محصول نهایی می‌تواند در دو طیف درشت‌دانه (شن بازیافتی) با ابعاد ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر و ریزدانه (ماسه بازیافتی) با ابعاد کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر تولید شود. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی تفاوت‌های اساسی با سنگدانه‌های طبیعی دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: چگالی پایین‌تر به دلیل وجود خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سطح دانه‌ها، جذب آب بسیار بالاتر (تا ۹/۸ درصد در مقایسه با ۱/۲ درصد برای ماسه طبیعی)، تخلخل بیشتر، و وجود ریزترک‌ها و خمیر سیمان قدیمی در ساختار آن‌ها [۱، ۲، ۸-۱۰]. این تفاوت‌ها به ویژه در ماسه بازیافتی که سطح مخصوص بالاتری دارد و نسبت خمیر سیمان قدیمی در آن بیشتر است، بارزتر می‌باشد [۱۱-۱۳]. نتایج تحقیقات متعدد نشان داده است که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی تأثیر قابل توجهی بر خواص بتن تازه و سخت‌شده دارد. در بتن تازه، جذب آب بالای این سنگدانه‌ها باعث کاهش کارایی و روانی می‌گردد و نیاز به آب بیشتری برای دستیابی به روانی مطلوب ایجاد می‌کند. در بتن سخت‌شده، مهم‌ترین اثر، کاهش مقاومت‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری، کششی و خمشی است. با افزایش استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به عنوان ریزدانه و درشت‌دانه در بتن جدید، کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن بازیافتی، کاهش سرعت امواج فراصوتی، افزایش جذب آب و انقباض نمونه‌ها مشاهده می‌شود [۱۴-۱۶]. همچنین نتایج در مطالعه‌ای بر روی بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های بتنی ساخته شده با مصالح طبیعی همواره بیشتر از مصالح بازیافتی است. محققین با بررسی ویژگی‌های مکانیکی بتن حاوی مصالح بازیافتی نشان دادند که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد منجر به کاهش وزن مخصوص بتن می‌گردد، به طوری که در حضور ۴۰ درصد ماسه و شن بازیافتی، کاهش وزن مخصوص به ترتیب ۱/۰۲ و ۲/۳۸ درصد بوده است. در خصوص مقاومت فشاری،

¹ Green Concrete

² Recycled Concrete Aggregates

کمترین کاهش در ۱۰ درصد ماسه و شن بازیافتی و بیشترین کاهش در ۴۰ درصد ماسه و شن بازیافتی رخ داده است. همچنین مطالعه مروری بر خواص مکانیکی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی نتیجه داد که با افزایش درصد سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و این کاهش در مقاومت‌های کششی و خمشی و همچنین مقاومت در برابر خوردگی، ذوب شدن و یخ زدن بتن نیز مشاهده می‌شود [۱۱].

۲-۱- بتن پلیمری

پلیمرها نیز به‌عنوان اصلاح‌کننده بتن، تأثیر قابل توجهی بر ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی بتن دارند که در تحقیقات متعدد به آن‌ها پرداخته شده است. اولین و مهم‌ترین مکانیزم، تشکیل فیلم‌های پلیمری درون ماتریس سیمان است. ذرات پلیمر با اندازه کلونیدی در خلال هیدراتاسیون سیمان و با کاهش آب مویین، به تدریج بر روی سطوح دانه‌های سیمان هیدراته نشده و محصولات هیدراتاسیون رسوب کرده و در نهایت با پیوستن به یکدیگر، فیلم‌های پیوسته‌ای را تشکیل می‌دهند. این فیلم‌ها نقش پرکننده منافذ مویین را ایفا کرده و ساختار بتن را متراکم‌تر می‌سازند. دومین مکانیزم، بهبود ناحیه انتقال^۱ (ITZ) بین سنگدانه و خمیر سیمان است [۷]. ناحیه انتقال که به عنوان ضعیف‌ترین بخش بتن شناخته می‌شود، با حضور فیلم‌های پلیمری تقویت شده و چسبندگی بین سنگدانه و ماتریس سیمان افزایش می‌یابد. سومین مکانیزم، ایجاد شبکه درهم‌تنیده پلیمر-سیمان است. در این ساختار، زنجیره‌های پلیمری و محصولات هیدراتاسیون سیمان (ژل C-S-H) به صورت فیزیکی و شیمیایی در هم تنیده شده و یک شبکه سه‌بعدی یکپارچه ایجاد می‌کنند که انتقال تنش را تسهیل کرده و مقاومت را افزایش می‌دهد [۱۷]. همچنین رزین‌های پلیمری، می‌توانند تخلخل را کاهش داده، چسبندگی بین ذرات را بهبود بخشند و دوام بتن را افزایش دهند [۳، ۱۳، ۱۴]. و با تشکیل لایه‌ای نازک و مقاوم منجر به کاهش نفوذپذیری و بهبود مقاومت مکانیکی، دوام و کاهش جذب آب بتن شود [۱۸، ۱۹]. مطالعات نشان داده است که افزودن رزین اکریلیک باعث افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در سنین اولیه (۷ و ۱۴ روز) و ادامه این روند در ۲۸ روز می‌شود [۲۰، ۲۱]. در این میان، مطالعات جدیدتر نشان داده‌اند که استفاده از پلیمرها تنها محدود به بهبود بتن معمولی نبوده و در بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی نیز نقش مهمی در اصلاح ضعف‌های ناشی از ITZ و ملات چسبیده دارد [۲۲-۲۶]. در مطالعات انجام‌شده، اثر پلیمرها از جنبه‌های مختلفی بررسی شده است؛ از جمله بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن، اصلاح خواص سنگدانه‌های بازیافتی از طریق پوشش‌دهی پلیمری [۲۲] و افزایش عملکرد ناحیه انتقالی در بتن‌های حاوی مواد بازیافتی [۲۷]. همچنین بررسی ترکیب پلیمر با سنگدانه‌های بازیافتی در بهبود رفتار مکانیکی و کاهش ضعف‌های ناشی از ملات چسبیده مورد توجه قرار گرفته است [۲۸] در این میان، نوع پلیمر، درصد مصرف و نحوه تعامل آن با ریزساختار سیمان نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نهایی دارد [۲۰، ۲۴، ۲۹]. تحقیقات انجام‌شده بر روی بتن اصلاح‌شده با پلیمر استایرن-بوتادین رابر^۲ (SBR) با نسبت‌های ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی سیمان نشان داد که مقاومت فشاری بین ۷/۱۴ تا ۲۸/۷۹ درصد و مقاومت خمشی تا ۲۶/۶۴ درصد افزایش می‌یابد. همچنین این بتن‌ها در برابر دمای بالا مقاومت بیشتری از خود نشان دادند [۳۰-۳۲]. بررسی تأثیر پلیمر بر مقاومت فشاری بتن نشان می‌دهد که این پلیمر توانایی استثنایی در افزایش مقاومت دارد، اما رفتار آن وابسته به درصد مصرف است [۳۳، ۳۴]. تحقیقات پیشین نشان داده است که نقطه بهینه برای پلیمر معمولاً در محدوده ۳ تا ۷ درصد وزنی سیمان قرار دارد. در درصد‌های پایین، پلیمر با نفوذ به منافذ و تقویت ناحیه انتقال، منجر به افزایش سریع مقاومت می‌شود. با این حال، در درصد‌های بیشتر پلیمر، به دلیل تشکیل فیلم‌های ضخیم پلیمری که مانع از اتصال مستقیم محصولات هیدراتاسیون می‌شوند و کاهش نسبت سیمان مؤثر، مقاومت فشاری روند کاهشی پیدا می‌کند. این رفتار U شکل وارونه (شامل ناحیه افزایش و ناحیه کاهش) برای اکثر پلیمرهای مصرفی در بتن گزارش شده است [۳۵، ۳۶]. علاوه بر خواص مکانیکی، پلیمرها تأثیر قابل توجهی بر دوام بتن دارند. کاهش نفوذپذیری، افزایش مقاومت در برابر حملات سولفاتی و کلریدی، بهبود مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، و افزایش مقاومت در برابر سایش از مهم‌ترین مزایای استفاده از پلیمرها در بتن محسوب می‌شود [۳۷-۴۰].

علیرغم مزایای چشمگیر بتن‌های پلیمری، استفاده گسترده از آن‌ها در صنعت ساخت‌وساز با چالش‌ها و محدودیت‌هایی همراه است که در تحقیقات متعدد به آن‌ها اشاره شده است. مهم‌ترین این چالش‌ها عبارتند از: هزینه بالای اولیه پلیمرها (۱۰ تا ۱۰۰ برابر قیمت سیمان

¹ Interfacial Transition Zone

² Styrene-Butadiene Rubber

پرتلند)، پیچیدگی فرآیند تولید و اجرای پلیمر و نیز عدم تطابق خواص بین بتن پلیمری و بتن سنتی (مانند متفاوت بودن مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی بتن پلیمری با بتن سیمانی) و در نهایت کمبود داده‌های بلندمدت در مورد عملکرد و دوام بتن‌های پلیمری در شرایط واقعی است.

۳-۱- خلاءهای تحقیقاتی

با بررسی عمیق مطالعات پیشین مشخص شد که علی‌رغم وجود تحقیقات گسترده در زمینه رفتار مکانیکی بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی از یک سو [۱۵، ۲۷، ۲۹] و نیز بتن‌های پلیمری از سوی دیگر [۳۵، ۳۸] و نیز برخی مطالعات محدود در زمینه استفاده همزمان پلیمر و سنگدانه‌های بازیافتی در بتن [۲۲، ۲۵، ۲۹]، همچنان درک جامعی از رفتار مقایسه‌ای و اثرات متقابل پلیمر و انواع مختلف سنگدانه‌های بازیافتی (شن و ماسه) در سطوح مختلف جایگزینی وجود ندارد. با اینکه استفاده از مصالح بازیافتی می‌تواند به محیط زیست کمک بزرگی نماید و از آلودگی‌های زیست محیطی جلوگیری کند، با این حال، کاهش مقاومتی که به همراه دارد می‌تواند منجر به کاهش رغبت سازندگان به استفاده از آن در مباحث سازه‌ای و غیر سازه‌ای شود. از سوی دیگر، استفاده از مواد پلیمری در بتن نیز به علت چالش‌های پیش‌روی آن با محدودیت‌های زیادی مواجه است. بررسی دقیق مطالعات پیشین نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از پژوهش‌های موجود عمدتاً بر اصلاح یک نوع مشخص از سنگدانه بازیافتی، بهبود خواص سنگدانه‌های بازیافتی از طریق پوشش‌دهی پلیمری، یا استفاده از پلیمر در بتن‌های حاوی تنها یک نوع سنگدانه بازیافتی متمرکز بوده‌اند. در مقابل، مقایسه نظام‌مند رفتار شن و ماسه بازیافتی به صورت جداگانه و ترکیبی در حضور پلیمر، همراه با ارزیابی اثر برهم‌کنشی آن‌ها بر رفتار مقاومتی بتن، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، با وجود گزارش‌های متعدد درباره تأثیر پلیمرها بر بهبود عملکرد بتن‌های حاوی سنگدانه بازیافتی، تاکنون چارچوب روشنی برای تعیین ترکیب بهینه شن و ماسه بازیافتی تنها در درصد مؤثر پلیمر به منظور کنترل افت مقاومت و حفظ عملکرد مکانیکی بتن ارائه نشده است. بر این اساس، نوآوری پژوهش حاضر نه صرفاً در استفاده همزمان پلیمر و سنگدانه‌های بازیافتی، بلکه در بررسی مقایسه‌ای رفتار شن و ماسه بازیافتی به صورت جداگانه و ترکیبی، تعیین درصدهای بهینه جایگزینی، و ارزیابی اثر برهم‌کنشی پلیمر در جبران افت مقاومت ناشی از انواع مختلف سنگدانه‌های بازیافتی تعریف می‌شود.

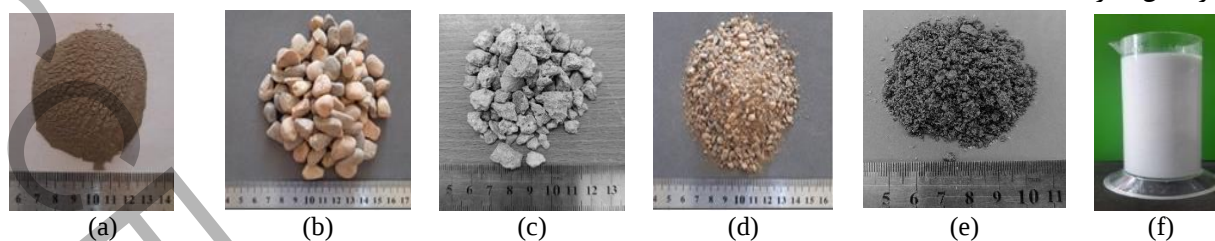
۱-۴- اهداف تحقیق

با توجه به چالش کاهش مقاومت مکانیکی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و محدودیت‌های استفاده گسترده از پلیمرها در بتن، هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان بهبود رفتار مقاومتی بتن سبز حاوی خرده‌بتن بازیافتی از طریق استفاده از مواد پلیمری بود. در این راستا، اثر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی شامل شن و ماسه بازیافتی به صورت جداگانه و ترکیبی در سطوح مختلف جایگزینی بر مقاومت فشاری بتن مورد ارزیابی قرار گرفت تا درصد بهینه استفاده از آن‌ها تعیین شود. همچنین، با بررسی عملکرد بتن‌های اصلاح‌شده با پلیمر، میزان بهینه مصرف پلیمر در بهبود رفتار مکانیکی بتن تعیین گردید. در نهایت، اثر همزمان و برهم‌کنشی سنگدانه‌های بازیافتی و پلیمر بر رفتار مقاومتی بتن مورد مطالعه قرار گرفت تا امکان کاهش اثرات منفی ناشی از استفاده از مصالح بازیافتی و دستیابی به ترکیبی با عملکرد مکانیکی مناسب و رویکردی پایدار در صنعت ساخت‌وساز فراهم شود. لازم به ذکر است که در این پژوهش، تمرکز اصلی بر ارزیابی مقاومت فشاری به عنوان شاخص کلیدی رفتار مکانیکی بتن بوده و سایر آزمون‌های دوام و مقاومت‌های غیرمستقیم به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی و تمرکز مطالعه در این مرحله مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

۲- مواد و روش

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

مصالح بکار رفته در این تحقیق سنگدانه طبیعی (شن و ماسه)، سنگدانه‌های بازیافتی (شن و ماسه) سیمان، آب و پلیمر بود که نمونه‌ای از آنها در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- مصالح بکار رفته در تحقیق حاضر: (a) سیمان تیپ II، (b) شن طبیعی، (c) شن بازیافتی، (d) ماسه طبیعی، (e) ماسه بازیافتی، (f) پلیمر
Figure 1. Materials used in the present study: (a) Type II cement, (b) natural coarse aggregate, (c) recycled coarse aggregate, (d) natural fine aggregate, (e) recycled fine aggregate, and (f) polymer.

سنگدانه

سنگدانه‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر از دو دسته کلی سنگدانه‌های درشت‌دانه (شن) و سنگدانه‌های ریز (ماسه) طبیعی و بازیافتی بود. مصالح سنگی طبیعی درشت دانه و ریزدانه طبیعی مورد استفاده در این پژوهش، از ترکیبی از مصالح شکسته و رودخانه‌ای با بزرگترین اندازه دانه به ترتیب ۱۹ و ۴/۷۵ میلیمتر بود. روند ساخت سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۲ نشان داده شده است. مصالح بازیافتی محصول فرآیند خردایش بتن‌های ضایعاتی ساختمانی (جمع‌آوری شده از ضایعات بتن تولیدی در کارخانه‌های تولید بتن آماده) بودند. این سنگدانه‌ها در دو طیف درشت‌دانه (شن بازیافتی) با ابعاد ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر و ریزدانه (ماسه بازیافتی) با ابعاد کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر طی فرآیند خردایش اولیه با سنگ‌شکن فکی، خردایش ثانویه با سنگ‌شکن ضربه‌ای، و سپس سرند کردن و دانه‌بندی مطابق استاندارد ASTM C136 بودند. ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی تفاوت اساسی با سنگدانه‌های طبیعی داشت. مهم‌ترین این تفاوت‌ها عبارتند از: چگالی پایین‌تر به دلیل وجود خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سطح دانه‌ها، جذب آب بسیار بالاتر (تا ۹/۸ درصد برای ماسه بازیافتی در مقایسه با ۱/۲ درصد برای ماسه طبیعی)، تخلخل بیشتر، و وجود ریزترک‌ها و خمیر سیمان قدیمی در ساختار آن‌ها. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها در جدول ۱ ارائه گردید.



شکل ۲- روند تولید سنگدانه بازیافتی در تحقیق حاضر

Figure 2. Production process of recycled aggregates used in the present study

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های (طبیعی و بازیافتی) مورد استفاده در تحقیق حاضر

Table 1. Physical properties of the natural and recycled aggregates used in the present study

Property	Unit	Natural Sand	Natural Gravel	FRCA	CRCA	Test Standard
Specific Density	g/cm ³	۲/۶۲	۲/۶۸	۲/۲۸	۲/۴۱	ASTM C127-C128
Bulk Density	kg/m ³	۱۶۵۰	۱۵۸۰	۱۴۲۰	۱۴۵۰	ASTM C29/C29M
Water Absorption	%	۱/۲	۱/۱	۹/۸	۴/۵	ASTM C127-C128
Fine Particles Content	%	۱/۵	۰/۵	۵/۲	۱/۸	ASTM C117

سیمان

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان تیپ II با وزن مخصوص ۳/۱۵۰ تن بر مترمکعب با سطح مخصوص ویژه ۲۹۰۰ سانتی‌متر مربع بر گرم بود که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ II

Table 2. Physical and chemical properties of Type II cement

Chemical Parameters	unit	Material Percentage (%)	Test Standard
CaO	%	۶۳	ASTM C114
SiO ₂	%	۲۰/۴	ASTM C114
Al ₂ O ₃	%	۴/۹	ASTM C114
Fe ₂ O ₃	%	۳/۹	ASTM C114
MgO	%	۱/۷	ASTM C114
SO ₃	%	۲	ASTM C114
NaO ₂ +K ₂ O	%	۰/۹	ASTM C114
Loss on ignition (LOI)	%	۱/۵	ASTM C114
Specific gravity	g/cm ³	۳/۱	ASTM C188
Blaine fineness	m ² /kg	۲۹۵	ASTM C204
Average particle size	μm	۲۶	ASTM C1070

پلیمر

پلیمر مورد استفاده در این تحقیق، پلیمر اکریلیک استایرن (SA-12) است که بصورت گسترده ای در صنعت ساخت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پلیمر که بر پایه رزین اکریلیک ساخته شده منجر به بهبود رفتار مکانیکی مصالح مختلفی از قبیل ماسه، بتن و .. شده است و توان مناسبی در برابر ترک‌های وارده دارد [۴۱-۴۴]. مشخصات فیزیکی و شیمیایی این پلیمر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و شیمیایی پلیمر مورد استفاده در این تحقیق

Table 3. Physical and chemical properties of the polymer used in this study

Parameters	Characteristics	Test Standard
Physical State	مایع لزج	ASTM D2196
Chloride Ion	-	ASTM D512
Specific Gravity (gr/cm ³)	۱/۰۵ ± ۰/۰۵	ASTM D1475
Color	سفید شیری	ASTM D2244
pH	۶/۵ ± ۱	ASTM D1293

۲-۲- طرح اختلاط و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

بتن‌های مورد استفاده در این تحقیق در پنج حالت مختلف ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است. بتن شاهد، بتن حاوی سنگدانه ریز بازیافتی، بتن حاوی سنگدانه درشت بازیافتی، بتن پلیمری، بتن پلیمری حاوی درصد‌های مختلف شن، ماسه و شن و ماسه بازیافتی. به عبارت

دیگر، طرح‌های اختلاط شامل حالات مختلفی از جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی (با اندازه‌های مختلف) به همراه تغییر درصد پلیمر بود که در قالب یک برنامه آزمایشگاهی منسجم مورد بررسی قرار گرفتند.

بتن شاهد

در گام نخست، بتن شاهد فاقد هرگونه افزودنی پلیمر و سنگدانه بازیافتی ساخته شد و در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج این آزمایش جهت مقایسه تغییر رفتار مکانیکی بتن‌های حاوی افزودنی‌های مورد بحث در این تحقیق بکار گرفته شد.

سنگدانه بازیافتی

به منظور بررسی اثرات حضور سنگدانه‌های بازیافتی ریز و درشت در بتن، این مرحله در سه حالت مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در ابتدا بتن حاوی مصالح ریزدانه بازیافتی در درصدهای مختلف ۱۲/۵ تا ۱۰۰ درصد جایگزینی با مصالح طبیعی ساخته شد و پس از عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفت. همین روند برای مصالح درشت‌دانه بازیافتی نیز انجام شده و در سنین مختلف ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت. در نهایت با درصدهای بهینه هریک، نمونه بتنی بصورت ترکیبی از هردو سنگدانه ریز و درشت ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن با بتن شاهد و هریک از بتن‌های حاوی سنگدانه‌های ریز و درشت بازیافتی مورد مقایسه قرار گرفت تا اثرات آنها قابل بررسی باشد.

بتن پلیمری

به منظور مطالعه میزان اثربخشی پلیمر بر رفتار بتن، در ابتدا درصدهای مختلف ۰٫۲ تا ۸ درصد پلیمر در بتن مورد استفاده قرار گرفت و نتایج مقاومت آن با نمونه‌های شاهد مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه به جهت بررسی اثرات همزمان پلیمر و سنگدانه‌های بازیافتی نمونه‌های مختلفی ساخته شد و در سنین مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، برنامه آزمایشگاهی به‌صورت مرحله‌ای (گام‌به‌گام) طراحی و اجرا شده است. در مرحله نخست، تأثیر مستقل سنگدانه‌های بازیافتی (ماسه بازیافتی و شن بازیافتی) در بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد جایگزینی با ماسه و شن طبیعی مورد بررسی قرار گرفت تا رفتار بتن و سطح بهینه مصرف این مصالح تعیین شود. در مرحله دوم، اثر مستقل چسب بتن پلیمری SA12 در بازه ۰ تا ۸ درصد وزنی سیمان بر روی مخلوط شاهد ارزیابی و مقدار بهینه آن مشخص گردید. در مرحله نهایی، اثر همزمان سنگدانه‌های (شن یا ماسه و ترکیب شن و ماسه) بازیافتی و پلیمر با استفاده از مقادیر بهینه به‌دست‌آمده از مراحل قبل مورد بررسی قرار گرفت. طرح‌های اختلاط مختلفی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- طرح‌های اختلاط مورد استفاده در تحقیق حاضر

Table 4. Mix designs used in the present study

Mixing Concrete	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	W/C	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Polymer (%)	RCA (%)
CC	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	۱۳۴۱	-	-
FRCA	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	(۰-۱۱۷۳/۴) *	-	۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰
CRCA	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	(۰-۴۱۶/۵) *	۱۳۴۱	-	۱۲/۵، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰
F-CRCA	۳۵۰	۱۷۵	۰/۵	۴۱۶/۵	۱۱۷۳/۴	-	۱۲/۵
PL	(۳۲۲-۳۴۹/۱) *	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	۱۳۴۱	۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸	-
PI-FRCA	۳۳۶	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	۱۳۴۱	۴	۱۲/۵
PI-CRCA	۳۳۶	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	۱۳۴۱	۴	۱۲/۵
PI-F-CRCA	۳۳۶	۱۷۵	۰/۵	۴۷۶	۱۳۴۱	۴	۱۲/۵

CC: بتن شاهد، CRCA: بتن حاوی سنگدانه درشت‌دانه بازیافتی (شن بازیافتی)، FRCA: بتن حاوی سنگدانه ریزدانه بازیافتی (ماسه بازیافتی)، PL: پلیمر آکریلات SA12

* مقادیر سیمان، شن و ماسه طبیعی براساس میزان جایگزینی آنها با به ترتیب با پلیمر، شن و ماسه بازیافتی

۳-۲- شرح آزمایش

آزمایش مورد استفاده در این تحقیق مقاومت فشاری محدود نشده بتن است که بصورت گسترده‌ای برای ارزیابی رفتار مکانیکی بتن سخت شده مورد استفاده قرار می‌گیرد بارگذاری برای این آزمایش بصورت کنترل شده با سرعت ۰/۲ تا ۰/۳ مگاپاسکال بر ثانیه صورت گرفته و این بارگذاری تا زمان شکست نمونه‌های بتنی ادامه یافت. نمونه‌های بتن در سنین عمل‌آوری مختلف ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شد. انجام این آزمایش براساس استاندارد ASTM C39 صورت گرفت [۴۵]. مقاومت فشاری براساس نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۱۵۰ در ۱۵۰ در ۱۵۰ میلیمتر انجام گرفت. مقاومت فشاری f_c براساس معادله زیر تعیین شد:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (۱)$$

که در آن f_c مقاومت فشاری بتن، P حداکثر نیروی وارد شده بر نمونه بتنی قبل از گسیختگی و A سطح مقطع عرضی نمونه بتن است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ و ۲۸ روز، برای هر طرح اختلاط در هر سن، سه نمونه مستقل ساخته و مورد آزمایش قرار گرفت. مقاومت فشاری گزارش شده برای هر طرح اختلاط بر اساس میانگین نتایج حاصل از سه نمونه ثبت گردید. به‌منظور ارزیابی قابلیت تکرارپذیری و میزان پراکندگی نتایج، انحراف معیار و ضریب تغییرات داده‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده سازگاری قابل قبول نتایج آزمایشگاهی بود.

۴-۲- ساخت نمونه‌های بتن

برای ساخت بتن پس از وزن کردن مصالح، اختلاط مواد در مخلوط‌کن اینگونه صورت گرفت که در ابتدا مصالح درشت دانه و ماسه (طبیعی و بازیافتی) به همراه یک سوم آب کل به مدت یک دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان اضافه شد که با یک سوم دیگر آب کل به مدت دو دقیقه مخلوط گردید و در نهایت آب باقیمانده اضافه شدند و پس از مدت زمان اختلاط دو دقیقه، ملات بتن مورد استفاده قرار گرفت. در طرح‌های حاوی الیاف بتن با سنگدانه‌ها درون مخلوط‌کن ریخته شد و در طرح‌های حاوی پلیمر، بتن با سیمان ترکیب شد و سپس به مخلوط کن اضافه گردید. سپس ملات آماده شده، در قالب‌ها ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه خشک می‌شوند. عمل آوری بتن با استفاده از روش غوطه‌ورسازی در حوضچه آب انجام شد. نمونه‌ها پس از خشک شدن در محیط آزمایشگاه درون حوضچه‌های مخصوص با دمای ۲۳ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. در سنین مورد نظر (۷، ۱۴ و ۲۸ روز) نمونه‌ها از حوضچه خارج شده و با یک دستمال نخی سطح آن‌ها خشک شده و پس از اندازه‌گیری ابعاد، تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفتند. روند انجام این آزمایش‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.

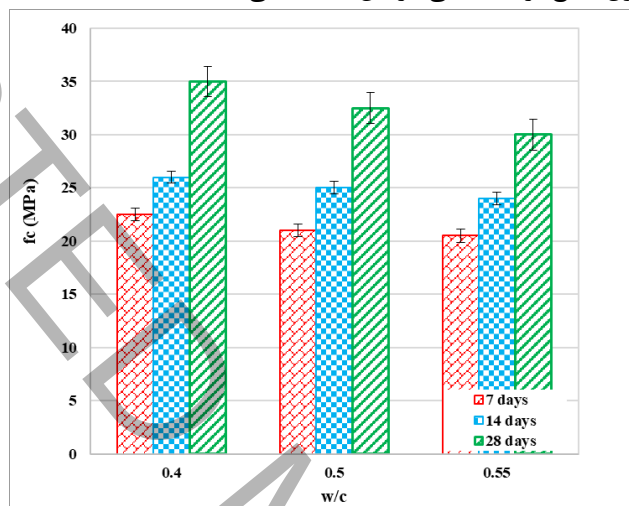


شکل ۳- روند انجام آزمایش‌ها

Figure 3. Experimental testing procedure

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

در آزمایش نمونه شاهد، بتن فاقد هرگونه افزودنی بود که با درصدهای آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۵۵ پس از ۱۴، ۲۸ و ۷۰ روز عمل‌آوری در آب با درجه حرارت استاندارد آزمایشگاهی (۲۴ درجه سانتیگراد) مورد آزمایش قرار گرفته است که نتایج آن بصورت ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر ارائه شده در این پژوهش بر اساس میانگین نتایج سه نمونه مستقل گزارش شده‌اند و خطاهای نمایش داده شده در نمودارها بیانگر انحراف معیار داده‌های آزمایشگاهی هستند. بررسی پراکندگی نتایج نشان می‌دهد که میزان انحراف معیار در تمامی طرح‌های اختلاط در محدوده قابل قبول بوده و مقدار ضریب تغییرات به‌طور متوسط بین ۳ تا ۵ درصد به‌دست آمده است. این موضوع بیانگر یکنواختی مناسب نمونه‌ها و تکرارپذیری قابل قبول نتایج آزمایشگاهی در این مطالعه می‌باشد.



شکل ۴- اثرات نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن

Figure 4. Effect of the water-to-cement ratio on the compressive strength of concrete

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، نسبت آب به سیمان اثرات قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت فشاری بتن دارد. مقاومت فشاری نمونه‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۵۵ نسبت به ۰/۴ دچار کاهش مقاومت به ترتیب به میزان ۸ و ۱۵ درصد شده است. این موضوع در زمانهای عمل‌آوری مختلف قابل مشاهده است. این موضوع در مطابقت با تحقیقات سایر محققین مانند آبرامز^۱ (۱۹۱۸) و چاندرآ^۲ و بجرنسترم^۳ (۲۰۰۲) و کپفر^۴ و گرستل^۵ (۱۹۷۳) است [۴۶-۴۸]. علت کاهش مقاومت با افزایش نسبت آب به سیمان را جایگزینی آب با سنگدانه دانست که با کاهش وزن مخصوص بتن منجر به افزایش تخلخل در بتن می‌شود. این موضوع منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود. همچنین آب اضافی بصورت لایه‌ای دور سنگدانه‌ها را می‌گیرد. این موضوع جلوی چسبیدن خوب خمیر سیمان و سنگدانه را گرفته و در مقابل نیروی وارده، مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهد بعلاوه وجود آب اضافی داخل بتن بیشتر از ۰/۲ تا ۰/۲۵ که برای هیدراتاسیون سیمان مورد نیاز است، مابقی آب وارد این فرآیند نشده و پس از خشک شدن بتن، تا حدی تبخیر شده و جای آن را فضای خالی می‌گیرد که این موضوع منجر به تخلخل بیشتر بتن و در نتیجه ضعف آن در برابر بارهای وارده و دوام بلندمدت بتن خواهد شد [۴۹-۵۱].

۳-۱- اثرات سنگدانه بازبافتی بر رفتار مکانیکی بتن

¹ Abrams

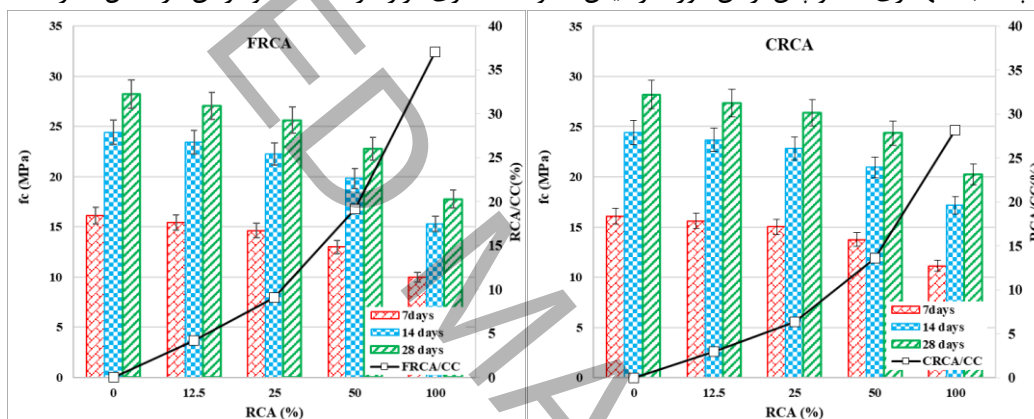
² Chandra

³ Björnström

⁴ Kupfer

⁵ Gerstle

با توجه به نتایج اولیه ارائه شده در شکل ۴، نسبت آب به سیمان ۰/۴ در بتن شاهد (حاوی سنگدانه طبیعی) عملکرد مناسبی از نظر خواص مکانیکی نشان داد و به عنوان نسبت بهینه اولیه قابل تشخیص بود. با این حال، در بتن های حاوی سنگدانه بازیافتی، استفاده از همین نسبت آب به سیمان به دلیل ویژگی های ذاتی این نوع سنگدانه ها با محدودیت هایی همراه بود. سنگدانه های بازیافتی به علت وجود ملات سیمانی چسبیده به سطح، تخلخل بیشتر و ظرفیت جذب آب بالاتر نسبت به سنگدانه های طبیعی، نیاز رطوبتی بیشتری داشته و می توانند بخشی از آب اختلاط را جذب کنند. در نتیجه، استفاده از نسبت آب به سیمان ۰/۴ موجب کاهش کارایی، افت روانی مخلوط و دشواری در فرآیند اختلاط و تراکم مناسب بتن می شد [۵۲، ۵۳]. همچنین این موضوع می تواند موجب توزیع غیریکنواخت افزودنی ها و کاهش قابلیت اطمینان نتایج آزمایش ها گردد. بر این اساس، برای ادامه آزمایش ها نسبت آب به سیمان بالاتری انتخاب شد تا ضمن حفظ کیفیت مکانیکی مناسب، کارایی لازم برای ساخت، اختلاط یکنواخت و اجرای صحیح نمونه های بتن حاوی سنگدانه بازیافتی فراهم شود. به منظور بررسی اثرات سنگدانه های بتن بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن از نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۵ با مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۱۶/۱، ۲۴/۴ و ۲۸/۲ مگاپاسکال بهره گرفته شد. درصدهای مختلفی از خرده بتن بازیافتی شامل ماسه^۱ و شن^۲ با درصدهای ۱۲/۵، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه مصرفی مورد استفاده قرار گرفت. نمونه های ساخته شده تا سنین مختلف ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، در حوضچه آب نگهداری شد و پس از آن مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت که نمودار آن در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- تأثیر سنگدانه های بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن: (FRCA) بتن حاوی سنگدانه ریزدانه بازیافتی/ماسه بازیافتی، (CRCA) بتن حاوی سنگدانه درشت دانه بازیافتی/شن بازیافتی)

Figure 5. Effect of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: (FRCA) concrete containing recycled fine aggregate/recycled sand; (CRCA) concrete containing recycled coarse aggregate/recycled gravel

بررسی نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی در سطوح جایگزینی مختلف، نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به نمونه شاهد با افزایش درصد شن و ماسه بازیافتی بود. در پایین ترین سطح جایگزینی یعنی ۱۲/۵ درصد، بتن حاوی ماسه بازیافتی تا ۴ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد را از خود نشان داد. افزایش جایگزینی ماسه بازیافتی با مصالح طبیعی به ۲۵ تا ۱۰۰ درصد منجر به افت مقاومت بتن به ترتیب تا حدود ۱۹۰/۹ و ۳۷ درصد شد. در درصدهای جایگزینی بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد، با توجه به شتاب گیری نرخ کاهش مقاومت بتن، امکان استفاده سازه ای از آن میسر نبوده و محدود به کاربردهای غیر سازه ای شد. این پدیده نشان دهنده آسیب های تجمعی ناشی از حضور مقادیر بالای ماسه بازیافتی است. ماسه بازیافتی به دلیل ابعاد کوچک تر ذرات (معمولاً کمتر از ۴/۷۵ میلی متر)، دارای سطح مخصوص بسیار بالایی است. این ویژگی منجر به افزایش چشمگیر نسبت خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سطح دانه ها می گردد. مقدار خمیر سیمان قدیمی چسبیده به ماسه بازیافتی می تواند به ۵۰ تا ۶۰ درصد وزن دانه نیز برسد. این خمیر قدیمی نه تنها چگالی پائینی دارد (حدود ۱/۴ تا ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب) و فوق العاده متخلخل است، بلکه دارای شبکه گسترده ای از

¹ FRCA

² CRCA

ریزترک‌های مویین می‌باشد که ناحیه انتقال (ITZ) بین خمیر جدید و دانه را به شدت تضعیف می‌کند [۱، ۸، ۱۱]. همچنین، ماسه بازیافتی جذب آب فوق‌العاده بالایی دارد (در این مطالعه ۹/۸ درصد در مقابل ۱/۲ درصد برای ماسه طبیعی). این جذب آب بالا باعث کاهش شدید آب مؤثر برای هیدراتاسیون سیمان شده و نسبت آب به سیمان موضعی در ناحیه انتقال را کاهش می‌دهد که منجر به هیدراتاسیون ناقص و تشکیل محصولات هیدراتاسیون با کیفیت پایین‌تر می‌گردد. جذب آب بالای ماسه بازیافتی را می‌توان مهم‌ترین عامل کاهش مقاومت فشاری دانست و تأثیر آن در درصدهای بالای جایگزینی تشدید می‌شود [۱۰، ۵۴]. علاوه بر این، ماسه بازیافتی حاوی مقادیر قابل توجهی مواد ریز (پودر) است (در این مطالعه ۵/۲ درصد در مقابل ۱/۵ درصد برای ماسه طبیعی). این ذرات ریز اگرچه می‌توانند در مقادیر کم به پر کردن منافذ کمک کنند، اما در مقادیر بالا باعث افزایش سطح مخصوص کل و نیاز به آب بیشتر شده و همچنین می‌توانند به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کنند [۵۵]. از منظر دانه‌بندی، ماسه نقش اساسی در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های درشت و ایجاد روانی و کارایی بتن تازه ایفا می‌کند. تغییر در ویژگی‌های ماسه (چگالی، جذب آب، شکل ذرات) تأثیر مستقیم و قابل توجهی بر تراکم‌پذیری و در نهایت مقاومت نهایی بتن دارد. استفاده از ماسه بازیافتی تا حدودی منجر به افزایش تخلخل مویرگی و کاهش کیفیت ناحیه انتقال می‌شود که این اثرات در درصدهای بالای جایگزینی تشدید می‌گردد [۲، ۱۵]. نکته دیگر، عدم یکنواختی در کیفیت ماسه بازیافتی است. به دلیل ابعاد کوچک ذرات، تفکیک و کنترل کیفیت ماسه بازیافتی دشوار بوده و احتمال حضور ناخالصی‌ها در آن بیشتر است. از نظر آماری، ضریب تغییرات برای نمونه‌های حاوی ماسه بازیافتی در درصدهای پایین (۱۲/۵ و ۲۵ درصد) حدود ۲/۸ درصد و در درصدهای بالا (۵۰ و ۱۰۰ درصد) به ۳/۲ درصد افزایش می‌یابد، که نسبت به نمونه‌های حاوی شن بازیافتی (با ضریب تغییرات حداکثر ۲،۸ درصد) بالاتر بوده و نشان‌دهنده پراکندگی بیشتر و قابلیت تکرارپذیری پایین‌تر در بتن حاوی ماسه بازیافتی، به ویژه در درصدهای بالا، می‌باشد. این یافته‌ها با تحقیقات پیشین از جمله ام سی نیل^۱ و کنگ^۲ (۲۰۱۳) و سافیدین^۳ و همکاران (۲۰۱۳) که نشان داده‌اند استفاده از ماسه بازیافتی تا ۳۰ درصد تأثیر محدودی بر مقاومت دارد اما فراتر از آن افت شدید ایجاد می‌کند، همخوانی کامل دارد [۱۵، ۵۶]. در نتیجه، ماسه بازیافتی^۴ نیازمند احتیاط بیشتری در کاربردهای سازه‌ای است؛ به‌طوری که برای بتن‌های سازه‌ای با مقاومت معمولی، جایگزینی حداکثر تا ۲۵ درصد توصیه می‌شود (با افت مقاومت حدود ۹ درصد)، برای بتن‌های با اهمیت کمتر و غیرسازه‌ای می‌توان تا ۵۰ درصد را پذیرفت (با افت مقاومت حدود ۱۹ درصد) و استفاده از ۱۰۰ درصد ماسه بازیافتی تنها برای مصالح بسیار کم‌اهمیت مانند پرکننده‌ها و بسترهای غیرباربر قابل توصیه است. این محدودیت‌ها لزوم توجه ویژه به نوع و کیفیت ماسه بازیافتی را در طرح‌های اختلاط بتن آشکار می‌سازد.

افزایش درصد شن بازیافتی منجر به کاهش تدریجی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شد. در پایین‌ترین سطح جایگزینی یعنی ۱۲/۵ درصد، بتن حاوی شن بازیافتی با کاهش مقاومت تا حدود ۳ درصد کاهش نسبت به نمونه شاهد است. این افت مقاومت ناچیز (کمتر از ۳ درصد) در محدوده خطای آماری آزمایش‌های بتن قرار داشته و از نظر مهندسی برای بسیاری از کاربردهای قابل چشم‌پوشی است. با افزایش جایگزینی ۲۵ تا ۱۰۰ درصد، افت مقاومت نمونه‌ها به ترتیب حدود ۶، ۱۴ و ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد بود. دلایل این رفتار نسبتاً مطلوب شن بازیافتی را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و مورفولوژیکی این نوع سنگدانه نسبت داد [۵۷]. شن بازیافتی به دلیل ابعاد درشت‌تر (معمولاً ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر)، دارای سطح مخصوص بسیار کمتری نسبت به ماسه بازیافتی است. این ویژگی منجر به کاهش نسبت خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سطح دانه‌ها در مقایسه با حجم کل دانه می‌گردد [۱۲، ۵۸]. مقدار خمیر سیمان قدیمی چسبیده به سنگدانه‌های درشت معمولاً بین ۲۰ تا ۳۵ درصد وزن دانه است. این خمیر قدیمی به عل چگالی کمتر (حدود ۱/۴ تا ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب) و متخلخل‌تر و وجود ریزترک‌ها منجر به تضعیف لایه بین خمیر جدید و دانه شده که اثر مستقیمی بر کاهش مقاومت بتن داشت. با این حال، به دلیل حجم کمتر این خمیر در شن بازیافتی، تأثیر منفی آن محدودتر است. همچنین، شن بازیافتی جذب آب بسیار پایین‌تری نسبت به ماسه بازیافتی دارد (در این مطالعه ۴/۵ درصد در مقابل ۹/۸ درصد)، که این امر باعث حفظ بهتر آب مؤثر برای هیدراتاسیون سیمان

¹ McNeil

² Kang

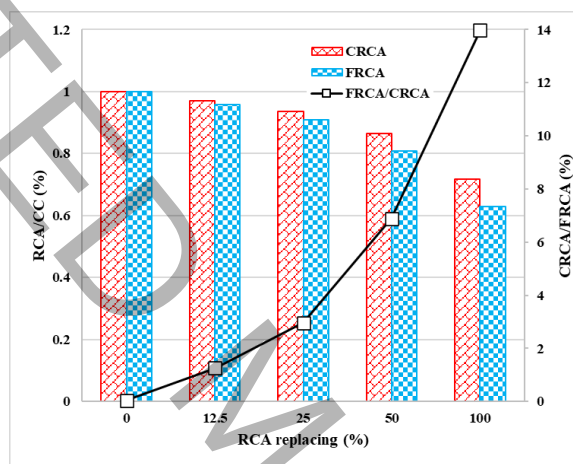
³ Safiuddin

⁴ FRCA

و کاهش اختلال در فرآیند هیدراتاسیون گردید [۱۲]. جذب آب بالای مصالح بازیافتی یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش مقاومت فشاری است، زیرا منجر به کاهش نسبت آب به سیمان مؤثر در ناحیه انتقال می‌شود. با این حال، شکل هندسی نامنظم و زاویه‌دار شدن بازیافتی ممکن است در برخی موارد به درگیری مکانیکی بهتر با ماتریس سیمان کمک کرده و تا حدودی اثرات منفی ناشی از تخلخل را جبران کند. نکته قابل توجه دیگر، تغییرات غیرخطی در نرخ کاهش مقاومت است. افت مقاومت بتن حاوی درصد‌های بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بسیار بیشتر از بتن حاوی کمتر از ۵۰ درصد شدن بازیافتی بود. این شتاب‌گیری جزئی در درصد‌های بالا را می‌توان به تجمع آسیب‌های ناشی از حضور همزمان چندین دانه بازیافتی در کنار یکدیگر و تضعیف بیشتر ناحیه انتقال در مقیاس کلان نسبت داد.

۳-۲- مقایسه شن و ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن

به منظور بررسی اثرات شن و ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن، آزمایش‌های متعددی صورت گرفت که نتایج آن بصورت شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- مقایسه تاثیر شن و ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن

Figure 6. Comparison of the effects of recycled coarse and fine aggregates on the compressive strength of concrete

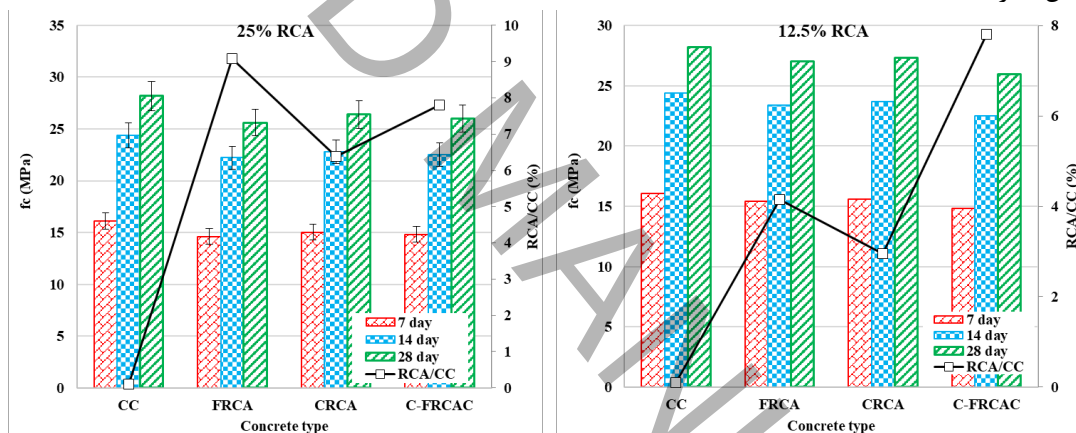
شکل ۶ به‌وضوح نشان می‌دهد که اگرچه هر دو نوع سنگدانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد می‌شوند، اما شدت این کاهش در ماسه بازیافتی به‌مراتب بیشتر از شن بازیافتی است و این تفاوت با افزایش درصد جایگزینی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، به‌طوری که در تمام سطوح جایگزینی، بتن حاوی شن بازیافتی مقاومت فشاری بالاتری نسبت به بتن حاوی ماسه بازیافتی از خود نشان می‌دهد. این موضوع در تطابق خوبی با تحقیقات صورت گرفته اخیر می‌باشد [۵۹، ۶۰]. در پایین‌ترین سطح جایگزینی یعنی ۱۲/۵ درصد، بتن حاوی شن بازیافتی نسبت به ماسه بازیافتی در حدود ۱/۵ درصد بهبود مقاومت از خود نشان داده است. با افزایش جایگزینی از ۲۵ تا ۱۰۰ درصد، عملکرد شن و ماسه بازیافتی شکاف بیشتری از خود نشان داد، مقاومت بتن حاوی شن بازیافتی به ترتیب در حدود ۳، ۷ و ۱۴ درصد بیشتر از بتن حاوی ماسه بازیافتی بود. این روند نشان‌دهنده حساسیت بیشتر بتن به جایگزینی ماسه بازیافتی نسبت به شن بازیافتی است [۶۱]. ماسه بازیافتی نرخ کاهش متوسط ۳/۷ مگاپاسکال به ازای هر ۱۰ درصد جایگزینی را نشان می‌دهد در حالی که این نرخ برای شن بازیافتی ۲/۸۲ مگاپاسکال به ازای هر ۱۰ درصد است، یعنی ماسه بازیافتی حدود ۳۱ درصد نرخ کاهش بیشتری نسبت به شن بازیافتی دارد. بررسی دقیق‌تر الگوی کاهش نشان می‌دهد که در هر دو نوع سنگدانه، افت مقاومت ماهیت غیرخطی دارد، به‌طوری که نرخ کاهش در درصد‌های پایین (۱۲/۵ تا ۲۵ درصد) ملایم‌تر و در درصد‌های بالا (۵۰ تا ۱۰۰ درصد) شتاب‌گیرنده‌تر است. با این حال شدت این شتاب‌گیری در ماسه بازیافتی به‌مراتب شدیدتر قابل مشاهده است. این رفتار غیرخطی با نتایج مطالعات اخیر همخوانی دارد [۶۲]. این تفاوت‌های اساسی در عملکرد را می‌توان به ویژگی‌های فیزیکی و مورفولوژیکی متفاوت این دو نوع سنگدانه بازیافتی نسبت داد. ماسه بازیافتی^۱ به دلیل ابعاد

^۱ FRCA

کوچک تر ذرات، دارای سطح مخصوص بسیار بیشتری نسبت به شن بازیافتی است، به این معنا که نسبت خمیر سیمان چسبیده به سطح دانه‌ها در ماسه بازیافتی به مراتب بیشتر از شن بازیافتی است؛ در حالی که در شن بازیافتی به دلیل حجم بیشتر دانه و سطح مخصوص کمتر، درصد خمیر چسبیده نسبت به کل دانه کمتر و در نتیجه تخلخل و جذب آب محدودتر است. از منظر دانه‌بندی، جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی تأثیر مستقیم‌تری بر روی کارایی و روانی بتن تازه دارد، زیرا ماسه نقش اساسی در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های درشت و ایجاد روانی ایفا می‌کند. در نتیجه، تغییر در ویژگی‌های ماسه تأثیر بیشتری بر تراکم‌پذیری و در نهایت مقاومت نهایی بتن دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که تأثیر منفی ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن به مراتب بیشتر از شن بازیافتی است و این تفاوت عمدتاً ناشی از سطح مخصوص بالاتر، جذب آب بیشتر، و محتوای خمیر سیمان قدیمی‌تر در ماسه بازیافتی می‌باشد، بنابراین در طرح‌های اختلاط بتن با مصالح بازیافتی، بایستی تمایز آشکاری بین این دو نوع سنگدانه قائل شد و درصد‌های مجاز جایگزینی را بر اساس نوع دانه تنظیم نمود تا ضمن دستیابی به اهداف زیست‌محیطی، عملکرد مکانیکی قابل قبولی نیز حاصل گردد.

۳-۳- تأثیر ترکیبی شن و ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن

پس از بررسی اثرات جداگانه حضور شن و ماسه بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن، اثرات حضور هم‌زمان هر دو سنگدانه (ریز و درشت) بازیافتی^۱ در بتن به میزان هر کدام ۱۲/۵ درصد مورد ارزیابی قرار گرفت. این امر، به منظور مقایسه با بتن‌های حاوی فقط ماسه (یا شن) بازیافتی در دو حالت مختلف صورت گرفت. در حالت اول، نمونه‌هایی با درصد جایگزینی ۱۲/۵ درصد، و حالت دوم، بتن‌های با درصد جایگزینی ۲۵ درصد که نتایج آن شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷- مقاومت فشاری بتن حاوی ترکیب هم‌زمان شن و ماسه بازیافتی

Figure 7. Compressive strength of concrete containing a combined proportion of recycled coarse and fine aggregates

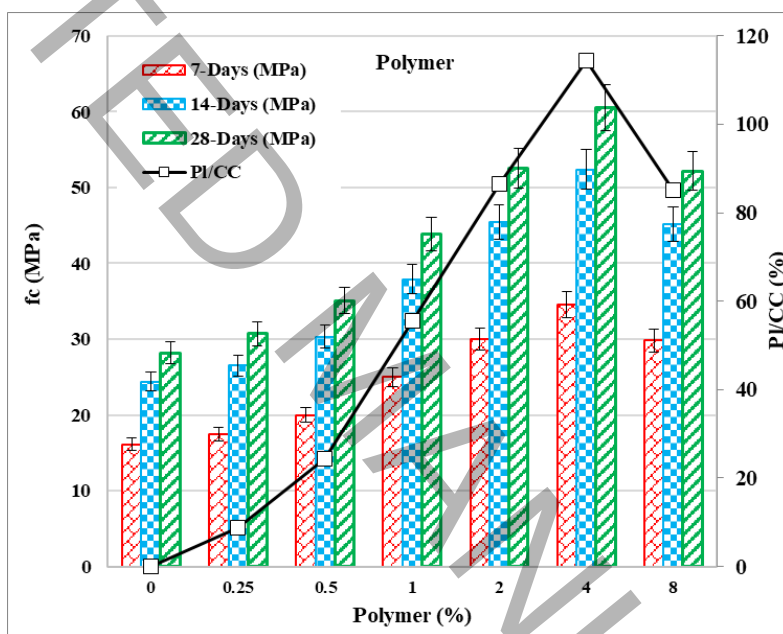
با بررسی نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌شود، بتن‌های حاوی ۱۲/۵ درصد شن/ماسه بازیافتی رفتار بسیار بهتری نسبت به بتن حاوی شن و ماسه بازیافتی هریک به میزان ۱۲/۵ درصد و در مجموع ۲۵ درصد مصالح بازیافتی از خود نشان می‌دهند. این نمونه‌ها (شن، ماسه و شن و ماسه بازیافتی) به ترتیب کاهش مقاومتی در حدود ۳، ۴ و ۸ درصد نسبت به بتن شاهد از خود نشان داد. با این حال در نمونه‌های حاوی شن، ماسه بازیافتی به میزان ۲۵ درصد در مقایسه با بتن حاوی شن و ماسه بازیافتی به میزان (شن ۱۲/۵ درصد و ماسه ۱۲/۵ درصد بازیافتی)، رفتاری متفاوت از خود نشان داد. این موضوع در مقایسه با بتن شاهد، به ترتیب در حدود ۶، ۹ و ۸ درصد کاهش مقاومت بود. این موضوع نشان دهنده این بود که جایگزینی بخشی از ماسه بازیافتی با شن بازیافتی توانسته اثرات منفی کمتری نسبت به ماسه تنها از خود نشان دهد. علت این رفتار را می‌توان به تفاوت در نقش عملکردی ماسه و شن بازیافتی در ریزساختار بتن نسبت داد [۶۳]. افزایش سهم ماسه بازیافتی موجب افزایش سطح ویژه کل ذرات و در نتیجه افزایش مقدار ملات قدیمی چسبیده و نواحی متخلخل در اطراف ذرات می‌شود که

^۱C- FRCAC

این موضوع به تضعیف ناحیه انتقالی و کاهش چگالی توده منجر می‌گردد [۶۴]. در مقابل، در حالت ترکیبی شن و ماسه بازیافتی، حضور سنگدانه‌های درشت‌تر باعث بهبود نسبی توزیع اندازه ذرات و کاهش فضاهای خالی بین دانه‌ای شده و از تمرکز تنش در نواحی ضعیف جلوگیری می‌کند، در نتیجه افت مقاومت نسبت به حالت صرفاً ماسه بازیافتی محدودتر می‌شود. به بیان دیگر، ماسه بازیافتی به دلیل نقش مستقیم در پرکنندگی فضاهای خالی و حساسیت بالاتر به تغییرات ریزساختاری، اثر منفی شدیدتری بر انسجام خمیر سیمان و توسعه ITZ ضعیف دارد، در حالی که شن بازیافتی به علت سطح مخصوص کمتر و سهم پایین‌تر ملات چسبیده، اثرات مخرب کمتری بر ساختار کلی بتن ایجاد می‌کند و در ترکیب با ماسه می‌تواند تا حدی تعادل ریزساختاری مخلوط را بهبود دهد.

۳-۴- تاثیر پلیمر بر مقاومت بتن

تاثیر پلیمر بر مقاومت فشاری بتن، در شکل ۸ مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور درصدهای مختلفی از این پلیمر شامل ۰، ۰،۵، ۱، ۲، ۴ و ۸ درصد مورد استفاده قرار گرفت. بتن‌های مذکور در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸- تاثیر پلیمر بر مقاومت فشاری بتن

Figure 8. Effect of polymer on the compressive strength of concrete

بررسی اثر افزودن پلیمر بر مقاومت فشاری بتن در محدوده ۰ تا ۸ درصد وزنی سیمان، بر اساس داده‌های تجربی نمونه شاهد و با استناد به مکانیزم‌های علمی مستند در تحقیقات پیشینیان (عبدالله^۱، ۲۰۲۳)، آبوکیف^۲ و مصطفی^۳ (۲۰۲۱)، آهانگران^۴ و همکاران (۲۰۱۹)، آل یوسف^۵ و همکاران (۲۰۲۳)، آمبروگی^۶ و همکاران (۲۰۱۷) و بیلدنس^۷ و همکاران (۲۰۰۵)، افزایش مقاومت فشاری به وضوح در همه درصدهای پلیمر نسبت به بتن شاهد (بدون پلیمر) قابل مشاهده است [۶۷-۶۵]. محدوده ۰ تا ۲ درصد پلیمر، افزایش سریع در مقاومت

¹ Abdalla

² Abokifa

³ Moustafa

⁴ Ahangaran

⁵ Alyousef

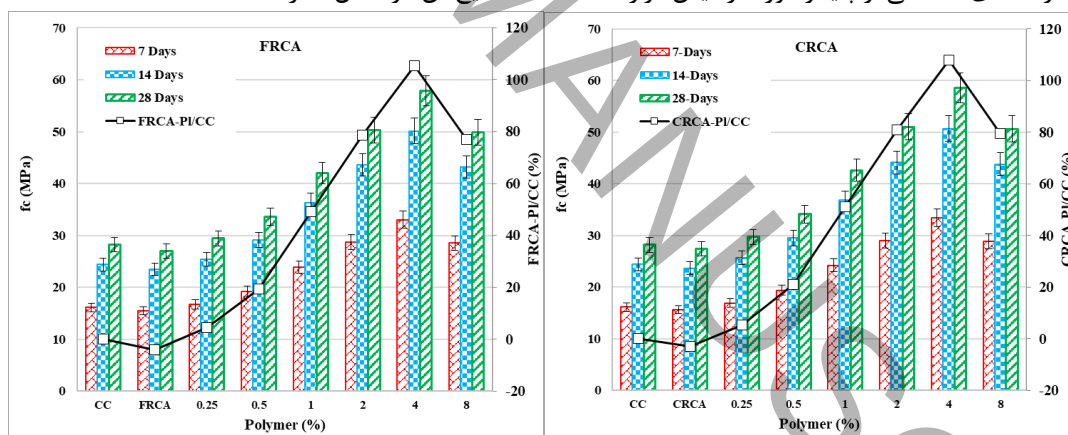
⁶ Ambrogi

⁷ Beeldens

فشاری تا حدود ۵۰ درصد از خود نشان داد. علت اصلی این افزایش چشمگیر در این محدوده، ویسکوزیته بسیار پایین پلیمر و کشش سطحی پایین آن در مقایسه با آب است که به آن اجازه می‌دهد به راحتی به عمق منافذ موئین بتن (به عمق ۰.۵ تا ۲ میلی‌متر) نفوذ کرده و دیواره منافذ را تقویت کند [۶۷]. همچنین تشکیل فیلم‌های نازک و پیوسته در سطح منافذ و ریزترک‌ها بود که تراکم بیشتر ناحیه انتقال (ITZ) بین سنگدانه و خمیر سیمان را می‌تواند در پی داشته و چسبندگی را افزایش دهد [۶۸]. بعلاوه، پلیمر به عنوان یک کاهنده آب مؤثر عمل کرده و نسبت آب به سیمان مؤثر را کاهش می‌دهد که این خود منجر به افزایش مقاومت می‌گردد. در محدوده ۴ درصد پلیمر (نقطه بهینه)، تعادل کاملی بین فاز سیمانی و فاز پلیمری برقرار شده و ماتریس بتن به حداکثر تراکم و یکپارچگی ساختاری دست یافته است. دلیل دیگر آنرا می‌توان ناشی از تشکیل فیلم‌های پلیمری با ضخامت بهینه (حدود ۰.۱ تا ۰.۵ میکرومتر) دانست که بدون ایجاد اختلال در پیوندهای سیمانی، نقش تقویت‌کنندگی ایفا می‌کنند. در محدوده ۴ تا ۸ درصد پلیمر، بتن با پدیده کاهش مقاومت مواجه شد [۶۹، ۲۰]. علت این کاهش را می‌توان به تشکیل فیلم‌های ضخیم پلیمری (با ضخامت بیش از ۱ میکرومتر) در فصل مشترک سنگدانه‌ها و خمیر سیمان مرتبط دانست [۳۳]. این فیلم‌های ضخیم به عنوان یک لایه جداکننده عمل کرده و مانع از اتصال مستقیم محصولات هیدراتاسیون سیمان می‌شوند. به عبارت دیگر، به جای آن که پلیمر نقش تقویت‌کننده داشته باشد، خود به یک فاز ضعیف و نرم در ماتریس بتن تبدیل می‌شود. همچنین، در درصدهای بالای پلیمر، نسبت سیمان مؤثر در واحد حجم کاهش یافته و سهم پیوندهای سیمانی که بخش عمده مقاومت فشاری را تأمین می‌کنند، کمتر می‌شود. در درصدهای بالای پلیمر، یک فاز پیوسته پلیمری جایگزین فاز پیوسته سیمانی شده و اگرچه این موضوع می‌تواند انعطاف‌پذیری را افزایش دهد، اما مقاومت فشاری را به شدت کاهش می‌دهد. نکته حائز اهمیت دیگر، پدیده پلیمریزاسیون ناقص یا تبخیر مونومرهای اضافی در درصدهای بالاست که می‌تواند منجر به ایجاد تخلخل‌های اضافی در ماتریس بتن شود.

۵-۳- تاثیر پلیمر بر بتن حاوی سنگدانه (شن / ماسه) بازیافتی

به منظور بررسی اثرات پلیمر بر بهبود عملکرد مقاومتی بتن حاوی مصالح بازیافتی ریز، با استفاده از درصد بهینه ۱۲/۵ درصد ماسه (یا شن) بازیافتی، درصدهای مختلفی از پلیمر مورد آزمایش قرار داده شد که نتایج آن در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- تاثیر پلیمر بر بتن حاوی سنگدانه بازیافتی (۱۲،۵ درصد)

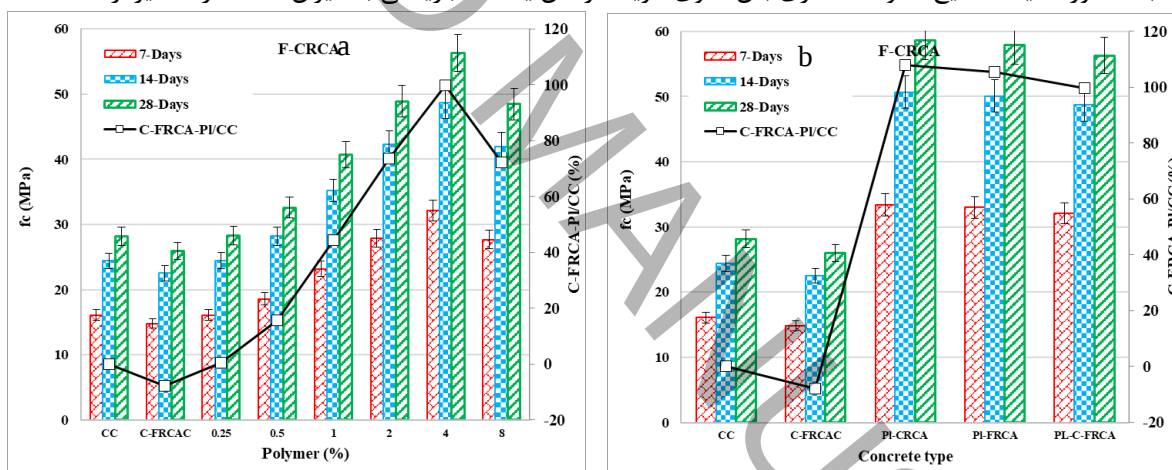
Figure 9. Effect of polymer on concrete containing 12.5% recycled aggregate

همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، حضور پلیمر توانسته است اثرات منفی سنگدانه بازیافتی را تا حدود زیادی از بین برده و تا حدی افزایش مقاومت را نیز به همراه داشته باشد. این موضوع در هر دو سنگدانه شن و ماسه بازیافتی قابل مشاهده است. با اینکه افزایش ۱۲،۵ درصدی جایگزینی شن و ماسه بازیافتی با مصالح طبیعی به تنهایی منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن به ترتیب به میزان ۳ و ۴ درصد شد، تنها افزودن ۰/۲۵ درصد پلیمر توانسته است نه تنها این اثرات منفی را از بین ببرد، بلکه افزایش مقاومتی نسبت به حالت بتن شاهد به ترتیب به میزان ۵ و ۴ درصد نیز از خود نشان داده است. با افزایش بیشتر میزان پلیمر از ۰/۲۵ درصد تا ۴ درصد، همچنان روند تغییرات مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد افزایشی بود و حداکثر افزایشی به ترتیب در حدود ۱۰۸ و ۱۰۵ درصد را از خود نشان داد. این

موضوع نشان دهنده نقش موثر پلیمر بهبود عملکرد مقاومت فشاری این نوع بتن‌ها است. با افزایش درصد پلیمر تا مقدار بهینه (۴ درصد)، مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی روند افزایشی نشان داد که می‌تواند ناشی از بهبود پیوستگی خمیر سیمان، کاهش ریزترک‌ها و اصلاح ناحیه انتقالی بین سنگدانه و خمیر سیمان (ITZ) باشد. با این حال، افزایش مقدار پلیمر از ۴ به ۸ درصد منجر به کاهش مقاومت فشاری شد. این رفتار را می‌توان مشابه بتن شاهد، به تشکیل فیلم‌های ضخیم‌تر پلیمری در ساختار بتن نسبت داد که در مقادیر بالا به جای ایفای نقش تقویت‌کننده، به عنوان یک فاز نسبتاً نرم و ضعیف در ماتریس سیمانی عمل می‌کنند. در این شرایط، پیوستگی مستقیم محصولات هیدراتاسیون سیمان کاهش یافته و بخشی از شبکه مقاوم سیمانی با فاز پلیمری جایگزین می‌شود که در نهایت موجب افت مقاومت فشاری خواهد شد. این پدیده در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند تشدید شود [۳۹]؛ زیرا وجود ملات چسبیده به سطح سنگدانه‌های بازیافتی، تخلخل بیشتر و جذب آب بالاتر، سبب افزایش جذب و تجمع موضعی پلیمر در نواحی متخلخل و فصل مشترک خمیر سیمان - سنگدانه می‌شود. در نتیجه، در درصد‌های بالای پلیمر (۸ درصد)، احتمال تشکیل نواحی غیریکنواخت پلیمری و افزایش تخلخل موضعی بیشتر شده که می‌تواند به کاهش پیوستگی ریزساختار و افت مقاومت فشاری منجر شود. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که حدود ۴ درصد پلیمر را می‌توان به عنوان مقدار بهینه برای بهبود عملکرد مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی در نظر گرفت، در حالی که مقادیر بالاتر اثر معکوس بر مقاومت فشاری ایجاد می‌کنند.

۳-۶- تاثیر پلیمر بر بتن سبز حاوی شن و ماسه بازیافتی

به منظور مطالعه اثرات پلیمر بر ساخت یک بتن سبز حاوی شن و ماسه بازیافتی، آزمایش‌هایی انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ ارائه شده است. به منظور مقایسه، نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی هریک از شن یا ماسه بازیافتی به میزان ۱۲/۵ درصد نیز ارائه شده است.



شکل ۱۰- تاثیر پلیمر بر بتن سبز حاوی شن و ماسه بازیافتی: (a) درصدهای مختلف پلیمر، (b) نوع بتن بازیافتی

Figure 10. Effect of polymer on recycled-aggregate concrete containing recycled coarse and fine aggregates: (a) different polymer contents; (b) types of recycled-aggregate concrete

با بررسی نتایج بدست آمده در شکل ۱۰a، مشاهده گردید که اثرات پلیمر بر بتن حاوی سنگدانه های شن و ماسه بازیافتی نیز توانسته است به خوبی نقش منفی ایجاد شده توسط سنگدانه را حذف نموده و در عین حال، منجر به بهبود عملکرد مقاومت فشاری بتن حاوی این سنگدانه‌ها نیز شود [۷۰] [۷۱]. علی‌رغم اینکه حضور همزمان هر دو نوع سنگدانه داخل بتن منجر به کاهش بیشتر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد در مقایسه با بتن حاوی شن یا ماسه بازیافتی به تنهایی بود. با این حال، پلیمر به خوبی توانسته است اثرات منفی آنرا حذف نموده و در عین حال، منجر به بهبود رفتار بتن حاصله نیز شود. بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی (۱۲/۵ درصد) در حدود ۸ درصد نسبت به بتن شاهد کاهش مقاومت نشان داد. با این حال، با افزایش پلیمر این روند کاهشی تغییر جهت داده و منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن حاصله شد. بتن سبز حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و ۰/۲۵ درصد پلیمر در حدودی اثرات منفی حضور سنگدانه‌های بازیافتی را از بین برده و

مقاومت آن تقریباً برابر با بتن شاهد شده است. این موضوع بدین معناست که در صورت استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در صورتیکه هدف، عدم افت مقاومت باشد، تنها استفاده از ۰/۲۵ درصد پلیمر در تهیه بتن کافی است. با این حال، در صورتیکه بهبود عملکرد مقاومت فشاری بتن حاصله مد نظر باشد، با افزایش پلیمر از ۰/۲۵ تا ۴ و ۸ درصد مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب به میزان ۱۱۴ و ۸۵ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌های شاهد بود. بررسی اثرات پلیمر بر نمونه‌های حاوی ۱۲/۵ درصد سنگدانه‌های ریز یا درشت در مقایسه با بتن حاوی هردو سنگدانه به میزان ۱۲/۵ درصد در شکل b ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، پلیمر به میزان ۴ درصد در نظر گرفته شد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، حضور سنگدانه بازیافتی ریز، درشت و ترکیبی آنها با پلیمر به میزان ۴ درصد، به ترتیب منجر به افزایش ۱۰۷، ۱۰۵ و ۱۰۰ درصدی مقاومت نسبت به بتن شاهد شد. این موضوع به خوبی نشان دهنده تاثیر بسیار خوب پلیمر بر بهبود عملکرد بتن حاوی مصالح بازیافتی است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر رفتار مکانیکی بتن سبز پرداخته شد به این منظور درصدهای مختلفی از هریک از سنگدانه‌های درشت و ریز مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور حل معضل کاهش مقاومت حاصله از این سنگدانه در بتن، از پلیمر استفاده شد که نتایج آن بصورت زیر ارائه شده است.

۱- بررسی نتایج مقاومت فشاری بتن حاوی درصدهای مختلف شن و ماسه بازیافتی در سطوح جایگزینی مختلف، نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد با افزایش درصد شن و ماسه بازیافتی بود. جایگزینی ۱۲/۵ درصد، بتن حاوی ماسه بازیافتی تا ۴ درصد کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد را از خود نشان داد. در درصدهای بیشتر از ۲۵ تا ۱۰۰ درصد منجر به افت مقاومت بتن به ترتیب تا حدود ۱۹، ۳۷ و ۳۷ درصد شد.

۲- افزایش درصد شن بازیافتی منجر به کاهش تدریجی مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد شد. در درصدهای کم (۱۲/۵ درصد)، کاهش مقاومت ناچیز حدود ۳ درصد نسبت به نمونه شاهد اتفاق افتاد. با این حال، با افزایش جایگزینی از ۲۵ تا ۱۰۰ درصد، افت مقاومت نمونه‌ها افزایش زیادی در حدود ۲۰ درصد نسبت به نمونه شاهد داشت.

۳- با مقایسه بتن حاوی شن و ماسه بازیافتی، مشاهده شد که شدت کاهش مقاومت بتن حاوی ماسه بازیافتی بسیار بیشتر از بتن حاوی شن بازیافتی بود. این موضوع با افزایش درصد از ۱۲/۵ تا ۱۰۰ درصد این سنگدانه‌ها در بتن چشمگیرتر شد.

۴- حضور ترکیبی سنگدانه ریز و درشت بازیافتی در بتن در دو حالت مختلف قابل بحث بود. مقاومت بتن حاصله نسبت به وضعیتی که سنگدانه‌های بازیافتی در حدود ۱۲/۵ درصد باشد افت پیدا کرد. با این حال، استفاده از این ترکیب سنگدانه بازیافتی دارای مقاومت بهتر نسبت به حالتی بود که فقط از همین درصد (۲۵ درصد) ماسه بازیافتی استفاده شد.

۵- حضور پلیمر تا ۴ درصد منجر به افزایش مقاومت بتن شاهد تا حدود ۱۱۴ درصد شد. استفاده از پلیمر توانست اثرات منفی کاهش مقاومت بتن حاصل از سنگدانه‌های بازیافتی را نیز به خوبی پوشش دهد. این موضوع تنها با استفاده از ۰/۲۵ درصد پلیمر اثرات مثبت خود را به خوبی نشان داد. اثرات کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۲/۵ درصد شن، ماسه و شن و ماسه بازیافتی با حضور ۰/۲۵ درصد پلیمر تا حدود زیادی از بین رفت و همچنین در بتن حاوی شن بازیافتی تا حدود ۴ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش مقاومت هم نشان داد. استفاده از ۴ درصد پلیمر توانست به ترتیب منجر به افزایش ۱۰۷، ۱۰۵ و ۱۰۰ درصدی مقاومت نسبت به بتن شاهد شود.

لازم به ذکر است که این پژوهش با وجود برنامه‌ریزی گسترده آزمایشگاهی، به بررسی رفتار بتن صرفاً از منظر مقاومت فشاری محدود شده است. این محدودیت ناشی از گستردگی دامنه طرح‌های اختلاط و زمان‌بر بودن فرآیند ساخت، عمل‌آوری و آزمایش نمونه‌های بتنی در سنین مختلف بوده است. با توجه به تعداد زیاد ترکیبات مورد بررسی شامل درصدهای مختلف سنگدانه‌های بازیافتی و چسب بتن پلیمری، امکان انجام هم‌زمان سایر آزمون‌های مکانیکی و دوام در چارچوب این مطالعه فراهم نبوده است. با این حال، این موضوع به عنوان یکی از محدودیت‌های تحقیق در نظر گرفته شده و پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، سایر ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و چسب بتن پلیمری مورد بررسی قرار گیرد.

- [1] A.D. Buck, Recycled concrete as a source of aggregate, (1976).
- [2] M.C. Limbachiya, T. Leelawat, R.K. Dhir, Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete, *Materials and structures*, 33(9) (2000) 574–580.
- [3] H. Esmaeili Malekabadi, S.B. Talaeitaba, The effect of using granite waste and combined granite-ceramic porcelain waste on the properties of reactive powder concrete (RPC), *AmirKabir Journal of Civil Engineering*, 57(9) (2025) 1571–1596.
- [4] B. Asgarian, H. Khazaee, M. Mirtaheri, Performance evaluation of different types of steel moment resisting frames subjected to strong ground motion through incremental dynamic analysis, *International Journal of Steel Structures*, 12(3) (2012) 363–379.
- [5] M. Nas, S. Kurbetci, Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite, *Comput. Concr*, 22(5) (2018) 449–459.
- [6] N.G. Sorum, P. Pradhan, J.R.D. Sangma, Modelling Unsoaked and Soaked California Bearing Ratio of Nano-Stabilised Sandy Subgrade Soil Using Machine Learning Algorithms, *International Journal of Pavement Research and Technology*, (2025) 1–22.
- [7] S.F. Sajedi, S.Q. Mirahmadi, Effect of Interfacial Transition Zone on Properties and Microstructure of Concrete, *AmirKabir Journal of Civil Engineering*, 57(2) (2025) 291–316.
- [8] A. Ahmed, S.K.H. Shah, N. Ahmad, U. Ali, A.A. Malik, M.J. Iqbal, Feasibility of utilizing recycled concrete aggregate blended with waste tire rubber and drywall waste as pavement subbase material, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(4) (2024) 2278–2293.
- [9] H.R. Karimi, M.R.M. Aliha, E. Khedri, A. Mousavi, S.M. Salehi, P.J. Haghighatpour, P. Ebneabbasi, Strength and cracking resistance of concrete containing different percentages and sizes of recycled tire rubber granules, *Journal of Building Engineering*, 67 (2023).
- [10] H.A. Dahish, Predicting the compressive strength of concrete containing crumb rubber and recycled aggregate using response surface methodology, *International Journal of GEOMATE*, 24(104) (2023) 117–124.
- [11] W. Ahmed, C.W. Lim, Production of sustainable and structural fiber reinforced recycled aggregate concrete with improved fracture properties: A review, *Journal of Cleaner Production*, 279 (2021) 123832.
- [12] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, Z. Xie, Performance enhancement of recycled concrete aggregate—a review, *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016) 466–472.
- [13] A. Zarei, H. Rooholamini, T. Ozbakkaloglu, Evaluating the properties of concrete pavements containing crumb rubber and recycled steel fibers using response surface methodology, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(2) (2022) 470–484.
- [14] M. Limbachiya, M.S. Meddah, Y. Ouchagour, Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete, *Construction and Building Materials*, 27(1) (2012) 439–449.
- [15] K. McNeil, T.H.K. Kang, Recycled concrete aggregates: A review, *International journal of concrete structures and materials*, 7(1) (2013) 61–69.
- [16] Y. Modarres, M. Ghalehnovi, The effect of recycled steel fibers from waste tires on concrete properties, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 56(1) (2023) 1–18.
- [17] S. Das, I. Singh, B. Singh, Autonomous Repair in Cementitious Material by Combination of Superabsorbent Polymers and Polypropylene Fibres: A Step Towards Sustainable Infrastructure, *arXiv, physics.app-ph* (2017).
- [18] L.E. Hing, Application of polymer in concrete construction, *University Technology Malaysia*, 2007.
- [19] R. Rawat, I. Bachheti, B. Pratap, Advancements in Geopolymer Concrete Technology: A Comprehensive Review of Fresh, Hardened and Microstructural Properties, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, (2024).
- [20] M. Faramarzi, M. Mousivand, Effects of Fibers on the Interfacial Shear Strength of a Two-Layer Bi-Material Polymer Concrete System, *AUT Journal of Civil Engineering*, (2026).
- [21] M. Faramarzi, M. Mousivand, Investigating the Effects of Polymer on Shear Behavior of Fiber-Reinforced Concrete, 5th International Conference on Seismic Strengthening and the International Conference on New Technologies in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning, (2025).

- [22] B.-W. Jo, S.-K. Park, J.-C. Park, Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 22(12) (2008) 2281–2291.
- [23] V. Spaeth, A. Djerbi Teggner, Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2) (2013) 143–152.
- [24] M. Kępiak, F. Chyliński, P. Łukowski, P. Woyciechowski, Recycled aggregate integration for enhanced performance of polymer concrete, *Materials*, 17(16) (2024) 4007.
- [25] S. Tobeia, M. Khattab, H. Khlaif, M. Ahmed, Enhancing recycled aggregate concrete properties by using polymeric materials, *Materials Today: Proceedings*, 42 (2021).
- [26] A. Borayek, A. Serag, K. Osman, W. Sofi, Influence of Polyester and Acrylic Polymer Coatings on the Mechanical, Physical and Microstructural Characteristics of Recycled Aggregate Concrete, *Egyptian Journal of Chemistry*, (2024).
- [27] S. Gao, J. Guo, Y. Zhu, Z. Jin, Study on the influence of the properties of interfacial transition zones on the performance of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 408 (2023) 133592.
- [28] Y. Liu, J. Wang, S. Hu, S. Cao, F. Wang, Enhancing the mechanical behaviour of concretes through polymer modification of the aggregate-cement paste interface, *Journal of Building Engineering*, 54 (2022) 104605.
- [29] J. Xiao, Y. Tang, H. Chen, H. Zhang, B. Xia, Effects of recycled aggregate combinations and recycled powder contents on fracture behavior of fully recycled aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 366 (2022) 132895.
- [30] P. Ghassemi, V. Toufigh, Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments, *Construction and Building Materials*, 234 (2020).
- [31] F. Heidarneshad, K. Jafari, T. Ozbakkaloglu, Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete, *Construction and Building Materials*, 260 (2020).
- [32] G.J. Liu, E.L. Bai, J.Y. Xu, N. Yang, T.j. Wang, Dynamic compressive mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios at high strain rates, *Construction and Building Materials*, 261 (2020).
- [33] H.A. Alyousef, M.F. Alotiby, S.A. Tijani, B.M. Alotaibi, A study on the use of PMMA-Bi₂O₃ polymer composites as a replacement for concrete and gypsum at diagnostic photon energies, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 16(4) (2023) 100707.
- [34] V. Ambroggi, C. Carfagna, P. Cerruti, V. Marturano, Additives in polymers, *Modification of polymer properties*, (2017) 87–108.
- [35] B. Tripathi, Effects of Polymers on Cement Hydration and Properties of Concrete: A Review, *ACS Omega*, 9(2) (2024) 2014–2021.
- [36] S.H. Babaee Moghadam, M. Mousivand, M. Bayat, Enhancing the Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete with Recycled Crumb Rubber: A Sustainable Approach, *Civil Engineering Infrastructures Journal*, (2026).
- [37] M. Abokifa, M.A. Moustafa, Experimental behavior of poly methyl methacrylate polymer concrete for bridge deck bulb tee girders longitudinal field joints, *Construction and Building Materials*, 270 (2021) 121840.
- [38] L. Qin, C. Guo, W. Sun, H. Guan, W. Yan, F. Wang, Experimental investigation on the interfacial shear bond performance of non-water reacting polymer and concrete, *Construction and Building Materials*, 331 (2022) 127351.
- [39] E. Roshani, M. Mousivand, M. Bayat, Enhancing Mechanical Properties of Concrete Using Polymer-Modified Recycled Carpet Fiber Composites, *International Journal of Engineering*, 38(10) (2025) 2321–2333.
- [40] W. Wu, X. He, Z. Yi, Z. Zhu, J. He, W. Wang, C. Zhao, Flexural fatigue behaviors of high-content hybrid fiber-polymer concrete, *Construction and Building Materials*, 349 (2022).
- [41] C.C. Astm, Standard Test Method for Bond Strength of Latex Systems Used with Concrete by Slant Shear, *American Society for Testing and Materials*, (2020).
- [42] C.C. Astm, Standard Specification for Latex Agents for Bonding Fresh to Hardened Concrete, *American Society for Testing and Materials*, (2020).
- [43] C. Astm, Standard Specification for Thermoplastic Elastomeric Sealants, *American Society for Testing and Materials*, (2020).

- [44] X. Zhang, G. Li, Z. Song, Influence of styrene-acrylic copolymer latex on the mechanical properties and microstructure of Portland cement/Calcium aluminate cement/Gypsum cementitious mortar, *Construction and Building Materials*, 227 (2019) 116666.
- [45] C.C.M. Astm, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, American Society for Testing and Materials, (2018).
- [46] D.A. Abrams, Design of Concrete Mixtures, Lewis Institute, 1918.
- [47] S. Chandra, J. Björnström, Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars—Part II, *Cement and Concrete Research*, 32(10) (2002) 1613–1619.
- [48] H.B. Kupfer, K.H. Gerstle, Behavior of concrete under biaxial stresses, *Journal of the engineering mechanics division*, 99(4) (1973) 853–866.
- [49] A. Elsharief, M.D. Cohen, J. Olek, Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone, *Cement and Concrete Research*, 33(11) (2003) 1837–1849.
- [50] A.M. Neville, J.J. Brooks, *Concrete technology*, Longman Scientific & Technical England, 1987.
- [51] D. Sun, W. Huang, K. Liu, R. Ma, A. Wang, Y. Guan, S. Shen, Effect of the moisture content of recycled aggregate on the mechanical performance and durability of concrete, *Materials*, 15(18) (2022) 6299.
- [52] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, A. Haddad, Deformation and permeability of recycled aggregate concrete - A comprehensive review, *Journal of Building Engineering*, 44 (2021) 103393.
- [53] M.E. Sosa, Y.A. Villagrán Zaccardi, C.J. Zega, A critical review of the resulting effective water-to-cement ratio of fine recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 313 (2021) 125536.
- [54] H.B. Choi, C.K. Yi, H.H. Cho, K.I. Kang, Experimental study on the shear strength of recycled aggregate concrete beams, *Magazine of Concrete Research*, 62(2) (2010) 103–114.
- [55] C.A. Issa, G. Salem, Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design, *Construction and Building Materials*, 42 (2013) 48–52.
- [56] M. Safiuddin, U.J. Alengaram, M.M. Rahman, M.A. Salam, M.Z. Jumaat, Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review, *Journal of civil engineering and management*, 19(6) (2013) 796–810.
- [57] P. Zhang, X. Sun, F. Wang, J. Wang, Mechanical properties and durability of geopolymer recycled aggregate concrete: A review, *Polymers*, 15(3) (2023) 615.
- [58] K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor, Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Research*, 31(5) (2001) 707–712.
- [59] G.A.F. Junior, J.C.T. Leite, G.d.P. Mendez, A.N. Haddad, J.A.F. Silva, B.B.F. da Costa, A review of the characteristics of recycled aggregates and the mechanical properties of concrete produced by replacing natural coarse aggregates with recycled ones—fostering resilient and sustainable infrastructures, *Infrastructures*, 10(8) (2025) 213.
- [60] B.K. Esmail, N.M. Saeed, S.R. Manguri, M. Gunal, Engineering properties of pervious concretes produced with recycled aggregate at different aggregate-to-cement ratio, *Advances in concrete construction*, 17(1) (2024) 13–26.
- [61] Y. Yu, J. Xu, J. Su, L. Xu, Y. Luo, Investigating specimen size and shape effects on compressive mechanical behaviors of recycled aggregate concrete using discrete element mesoscale modeling, *Construction and Building Materials*, 438 (2024) 137196.
- [62] M.H.R. Sobuz, S.D. Datta, A.S.M. Akid, V.W.Y. Tam, S. Islam, M.J. Rana, F. Aslani, Ç. Yalçinkaya, N.M. Sutan, Evaluating the effects of recycled concrete aggregate size and concentration on properties of high-strength sustainable concrete, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(3) (2024) 216–227.
- [63] N.D. Oikonomou, Recycled concrete aggregates, *Cement and concrete composites*, 27(2) (2005) 315–318.
- [64] Y. Gao, S. Zhang, S. Wang, H. Jiang, H. Sui, L. Zhao, Aggregate particle size distribution impact on the microstructure characteristics in the interface transition zone of recycled concrete, *Construction and Building Materials*, 510 (2026) 145294.
- [65] J.A. Abdalla, R.A. Hawileh, A. Bahurudeen, G. Jyothsna, A. Sofi, V. Shanmugam, B.S. Thomas, A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability, *Case Studies in Construction Materials*, 19 (2023) e02244.

- [66] F. Ahangaran, A.H. Navarchian, F. Picchioni, Material encapsulation in poly (methyl methacrylate) shell: A review, *Journal of applied polymer science*, 136(41) (2019) 48039.
- [67] A. Beeldens, D. Van Gemert, H. Schorn, Y. Ohama, L. Czarnecki, From microstructure to macrostructure: an integrated model of structure formation in polymer-modified concrete, *Materials and structures*, 38(6) (2005) 601–607.
- [68] A.A. Del Savio, D. La Torre Esquivel, J.M. García Landeo, Post-cracking properties of concrete reinforced with polypropylene fibers through the Barcelona test, *Polymers*, 15(18) (2023) 3718.
- [69] G. Martínez-Barrera, O. Gencel, M. Martínez-López, Polyester polymer concrete modified by polyester fibers and gamma rays, *Construction and Building Materials*, 356 (2022).
- [70] N. Algourdin, P. Pliya, A.L. Beaucour, A. Noumowé, D. di Coste, Effect of fine and coarse recycled aggregates on high-temperature behaviour and residual properties of concrete, *Construction and Building Materials*, 341 (2022) 127847.