

Investigating the Combined Effects of Acid Pre-soaking, Slag/Metakaolin Replacement, and Three-Stage Mixing on Recycled Concrete Properties

Mahdi Panah¹, Alireza Pachenari^{2*}

1- M.Sc., Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2 -Assistant professor, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

ABSTRACT

The accumulation of demolition waste in landfills and high contamination of the cement industry are significant environmental hazards that can be mitigated by recycling concrete aggregates and using other binder materials, respectively. This study aimed to investigate the combined effects of corrective methods of the replacement of 40% supplementary materials (metakaolin and blast furnace slag powder), pre-soaking of recycled coarse aggregates in sulfuric acid, and a three-stage mixing approach on the recycled concrete properties. Different mixtures containing 0%, 33% and 66% recycled coarse aggregate were fabricated, and the specimens were divided into three categories: untreated, treated with two methods (using supplementary materials and three-stage mixing), and treated with three methods. The compressive strength, slump, and rapid chloride penetration of mixtures were then tested. The results showed that the second set of samples not only had better resistance against chloride ion penetration but also achieved a 91-day compressive strength comparable to non-recycled samples. However, the evidence from the interpretation of the compressive strength results, X-Ray diffraction analysis, and surface survey indicated that pre-soaking of coarse aggregates in acid had a negative effect on the performance of the slag/metakaolin replacement method. Overall, the findings of this study on the combined effects of treatment methods could be considered as a step towards the development of effective and sustainable recycling practices in the construction industry.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 May 2023

Revise Date: 26 October 2023

Accept Date: 17 November 2023

Keywords:

Recycled Concrete

Acid Pre-soaking

GGBFS

Metakaolin

Compressive Strength

Durability

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.397843.3121>

*Corresponding author: Alireza Pachenari.

Email address: pachenaria@kashanu.ac.ir

ارزیابی اثرات ترکیب روش‌های اسیدشویی درشت‌دانه، جایگزینی مخلوط سرباره - متاکائولن و اختلاط سه مرحله‌ای بر خواص بتن بازیافتی

مهدی پناه^۱، علیرضا پاچناری^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

انباشت نخاله‌های حاصل از تخریب ساختمان در سایت‌های دفن زباله و آلاینده‌گی زیاد صنعت سیمان، دو مخاطره مهم زیست محیطی هستند که به ترتیب می‌توان با بازیافت بتن و جایگزینی سایر مواد چسباننده از اثراتشان کاست. این مطالعه با هدف بررسی اثر ترکیب روش‌های اصلاحی شستشوی درشت‌دانه‌های بازیافتی با اسید سولفوریک، جایگزینی ۴۰ درصد وزنی سیمان با مواد مکمل (متاکائولن و پودر سرباره کوره آهن گدازی) و نیز اختلاط سه مرحله‌ای بر بهبود خواص بتن بازیافتی انجام شد. بدین منظور ابتدا مخلوط‌های بتنی مختلفی با ۰، ۳۳ و ۶۶ درصد درشت‌دانه بازیافتی و در قالب سه دسته کلی شامل نمونه‌های بدون اصلاح، دارای ۲ روش بهبود (با مواد مکمل و اختلاط ۳ مرحله‌ای) و دارای هر ۳ روش بهبود ساخته شدند. سپس مجموعه‌ای از آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری، بررسی دوام در برابر نفوذ یون کلر و تعیین اسلامپ صورت پذیرفت. نتایج نشان داد که نمونه‌های دسته دوم نه تنها عملکرد بهتری در برابر نفوذ یون کلر داشتند بلکه به مقاومت فشاری ۹۱ روزه‌ای در حد نمونه بدون سنگدانه بازیافتی رسیدند. ضمناً شواهد حاصل از تحلیل نتایج مقاومت فشاری، آنالیز پراش اشعه ایکس و بررسی سطح ظاهری نمونه‌ها حکایت از اثر منفی اسیدشویی سنگدانه‌ها بر کارکرد مناسب روش جایگزینی ترکیب سرباره-متاکائولن داشت. به طور کلی، یافته‌های این مطالعه درباره تأثیرات ترکیب روش‌های بهبود می‌تواند به عنوان گامی در توسعه شیوه‌های بازیافت موثر و پایدار در صنعت ساخت و ساز مورد توجه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، اسیدشویی سنگ‌دانه، سرباره کوره آهن گدازی، متاکائولن، مقاومت فشاری، دوام

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.397843.3121	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.397843.3121	۱۴۰۳/۰۴/۳۱	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۸/۲۶	۱۴۰۲/۰۸/۰۴	۱۴۰۲/۰۲/۳۰
علیرضا پاچناری pachenaria@kashanu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

با افزایش رشد اقتصادی و سرعت‌گیری فرآیند نوسازی شهرهای صنعتی در سراسر دنیا، تولید ضایعات ساختمانی به عنوان یک محصول جانبی نامطلوب اجتناب‌ناپذیر است [۴-۱]. بر طبق برآوردهای ارائه شده توسط عبدلی و همکاران [۵] چنین تخمین زده شده که قریب به نیمی از ضایعات جامد تولید شده در برخی از نواحی شهری ایران مربوط به نخاله‌های ساختمانی باشد. بنابراین به منظور حفظ محیط زیست، بازیافت ضایعات حاصل از تخریب ساختمان‌ها برای استفاده در بتن‌های جدید ضروری است [۶]. از سوی دیگر الیویر و همکاران [۷] نشان دادند که سهم فرآیند تولید سیمان از میزان انتشار جهانی کربن دی‌اکسید قابل توجه بوده و استفاده از مواد چسباننده جایگزین سیمان در بتن ضروری است. سیلوا و همکاران [۸] به ارزیابی خواص مصالح بازیافت شده از تخریب پرداخته و آنها را بر اساس ترکیبات و آلاینده‌ها طبقه‌بندی نمودند. ایشان تلاش کردند تا ارتباط معناداری بین کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی و عملکرد بتن ساخته شده ارائه نمایند. نواکوا و میکولیکا [۹] سنگدانه‌های موجود در مجموعه‌ای از قطعات بتنی پیش ساخته معیوب را بازیافت نموده و مجدداً در ساخت قطعات جدید به کار گرفتند. بررسی‌های ایشان اثبات نمود که جایگزینی تا ۲۰ درصد از سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی توانست فاقد هرگونه اثر منفی بر مقاومت مکانیکی بتن پیش ساخته باشد. اگرچه لیمباچیا و همکاران [۱۰] با تنظیم نسبت آب به سیمان و کاربرد تا ۳۰ درصد سنگدانه بازیافتی موفق به تولید بتن توانمند با مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ای در حدود ۵۰ مگاپاسکال شدند اما موارد متعددی از کاهش مقاومت و دوام بتن‌های بازیافتی در مطالعات گذشته به چشم می‌خورد. به عنوان مثال، هویدی و همکاران [۱۱] نشان دادند که با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، مقاومت فشاری نمونه‌های ۷ روزه به ترتیب در حدود ۱۲ و ۴۵ درصد افت کرد که در قیاس با مقاومت ۲۸ روزه کاهش شدیدتری به حساب می‌آید. لی و همکاران [۱۲] با بررسی ریزساختار ناحیه انتقال بین سطحی در بتن‌های بازیافتی ساخته شده با روش‌های اختلاط مختلف بر نقش آفرینی نامطلوب ملات چسبیده قدیمی موجود بر روی سنگدانه‌ها تاکید کردند. لیو و همکاران [۱۳] نیز با بهره‌گیری از روش‌های متنوع بهبود خواص سنگدانه به ارزیابی تغییرات ایجاد شده در ریزساختار ناحیه انتقال بین سطحی پرداخته و بیان نمودند که برای اطمینان از ارتقای مقاومت و دوام نمونه‌ها ضروری است تا ترکیب صحیحی از روش‌ها به کار بسته شود. تام و همکاران [۱۴] روش‌های متنوع بهبود خواص سنگدانه حاصل از بازیافت بتن را در دو دسته اصلی "بهبود با افزودن" و "بهبود با حذف" دسته‌بندی کردند. شیوه بهبود با افزودن، شامل روش‌های متنوعی مثل کربناسیون، خود ترمیمی، پوشش و نفوذ، اختلاط پی در پی و افزودن مواد مکمل به بتن بازیافتی است. راهکار بهبود با حذف نیز مبتنی بر حذف ملات چسبیده به سطح سنگدانه بوده و این پاکسازی را می‌توان با شیوه‌هایی از جمله پیش خیس‌اندن در یک محیط اسیدی، استفاده از آسیاب گلوله‌ای، عبور جریان الکتریکی، حرارت دادن و ... انجام داد.

شبان و همکاران [۱۵] خواص سنگدانه‌های بتن بازیافتی را با انواع مختلفی از پوزولان تقویت نمودند. کوزیلوا و همکاران [۱۶] و قاسم زاده و درویشعلی نژاد [۱۷] نیز اثر جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با متاکائولن^۱ و پودر سرباره کوره آهن‌گدازی^۲ را به ترتیب در فرآیند هیدراتاسیون چسباننده‌های پایه سیمانی و خواص مکانیکی ملات ژئوپلیمری مورد بررسی قرار دادند. اگرچه صدیق و کلوس [۱۸] و رشیدداداش و همکاران [۱۹] درصد وزنی بهینه برای مصرف متاکائولن در بتن معمولی و بتن الیافی را به ترتیب تا ۱۵ و حدود ۱۵ درصد ذکر نموده‌اند اما در حیطه بتن‌های با سنگدانه بازیافتی نیز اعداد تقریباً مشابهی ذکر گردیده است. از جمله این موارد می‌توان به مقالات مدولی و مخارجی [۲۰] در مورد بررسی تاثیر متاکائولن و درشت‌دانه بازیافتی بر خواص بتن، ناندانام و همکاران [۲۱] با هدف ارزیابی اثر خاکستر بادی، پودر سرباره و متاکائولن بر بتن خودتراکم بازیافتی و یونس و همکاران [۲۲] در رابطه با تغییرات خواص مکانیکی بتن بازیافتی حاوی درصد‌های مختلف متاکائولن اشاره نمود که در همه آنها بازه مصرف بهینه ۱۵ الی ۲۰ درصد برای متاکائولن ذکر گردیده است. ضمناً یافته‌های مقاله مدولی و مخارجی [۲۳] نشان داد که اگرچه بتن ساخته‌شده با ۱۰۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری تا حدود ۲۰٪ گردید اما استفاده از ۱۵ درصد متاکائولن به دلیل مصرف پرتلندیت^۳ و تولید ژل مقاومت‌زای کلسیم سیلیکات

¹ Metakaolin² Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)³ Portlandite

هیدراته^۴ طی واکنش پوزولانی به طور موثری کاهش مقاومت مذکور را جبران نموده است. در مقالات مروری ازبی و همکاران [۲۴] و احمد و همکاران [۲۵]، درصد وزنی بهینه مصرف پودر سرباره برای رسیدن به مقاومت فشاری مطلوب بتن به میزان حدود ۴۰ و در برخی موارد خاص با لحاظ نمودن شیوه‌های متنوع عمل آوری و اختلاط بعضاً تا ۶۰ درصد ذکر شده است. ضمناً خطیب و هیبرت [۲۶] نشان دادند که در صورت جایگزینی ۴۰ درصد از سیمان مصرفی با ترکیب سرباره-متاکائولن مقاومت فشاری بتن معمولی با کاهش چشمگیری مواجه نمی‌گردد.

به منظور استفاده از راهکار بهبود سنگدانه بازیافتی با حذف ملات چسبیده از طریق پیش خیساندن در یک محیط اسیدی، در مقالات یوناسا و همکاران [۲۷] و کظمی و همکاران [۲۸] انواع مختلفی از اسیدها در ترکیب با سایر روش‌های اصلاح حرارتی و شیمیایی با روش اسیدشویی به نتایج قابل قبول منجر شدند. با این وجود، تام و همکاران [۲۹] برای حالتی که فقط از روش غوطه وری سنگدانه‌های بازیافتی در اسیدهای گوناگون با غلظت‌های متفاوت استفاده شود تاثیر بهینه استفاده از اسید سولفوریک در ارتقای خواص مکانیکی بتن بازیافتی را گزارش نمودند. همچنین یافته‌های پورشوتامان و همکاران [۳۰] تایید نمود که اسید سولفوریک در قیاس با اسید هیدروکلریک می‌تواند بهبود بیشتری در خواص سنگدانه‌های بازیافتی ایجاد نماید.

تام و تام [۳۱] کارآمدی روشی تحت عنوان "شیوه اختلاط دو مرحله‌ای" در ارتقای دوام بتن‌های بازیافتی از طریق تقویت پیوندهای ضعیف در منطقه انتقال بین سطحی را اثبات نمودند. روش اختلاط مذکور به دوغاب سیمان اجازه می‌داد تا اطراف سنگدانه بازیافتی را برای مدتی پوشانده و خواص فیزیکی و دوام را بهبود دهد. کونگ و همکاران [۳۲] با تکمیل روش اختلاط مذکور و استفاده از پودر سرباره، روش جدیدی موسوم به اختلاط سه مرحله‌ای پیشنهاد دادند که در آن مواد با فعالیت پوزولانی، قبل از افزودن سیمان به مخلوط، کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی را ارتقا می‌بخشند. همچنین کیسکو و همکاران [۳۳] نشان دادند که تغییر در روش اختلاط مصالح می‌تواند تاثیر به‌سزایی نیز در بهبود ریزساختار بتن‌های بازیافتی ایفا نماید.

با توجه به مطالعات انجام شده، در مقاله حاضر از یک روش حذف ملات (اسیدشویی)، یک روش افزودن (کاربرد مواد مکمل با پتانسیل فعالیت پوزولانی) و یک روش اختلاط بهبود یافته به صورت همزمان استفاده شد. برای اسیدشویی از اسید سولفوریک، برای بهبود با افزودن از ترکیب ۲۵ درصد پودر سرباره و ۱۵ درصد متاکائولن و برای ارتقای روش اختلاط، از شیوه پیشنهادی کونگ و همکاران [۳۲] استفاده گردید. از آنجا که در مقالات قبلی، هر یک از این روش‌های اصلاح مذکور به تنهایی نتایج قابل قبولی داشته‌اند ترکیب همزمان ۲ یا ۳ مورد از آنها با یکدیگر مورد بررسی قرار داده شد تا میزان اثربخشی آن ارزیابی گردد. همچنین با انتخاب و جایگزینی درصد‌های مختلفی از درشت‌دانه بازیافتی به جای سنگدانه بکر و استفاده از روش‌های مختلف اختلاط، اقدام به ساخت مجموعه‌ای از نمونه‌ها گردیده و آزمایش‌های مختلفی از قبیل تعیین مقاومت فشاری، آزمون تسریع شده نفوذ یون کلراید^۵، اندازه‌گیری اسلامپ و XRD^۶ (پراش اشعه ایکس) بر روی نمونه‌های ساخته شده صورت گرفت.

۲- مصالح مورد استفاده

۲-۱- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های استفاده شده در این مقاله مطابق شکل ۱ به ۳ دسته مختلف سنگدانه طبیعی، سنگدانه بازیافتی اسیدشویی نشده و سنگدانه بازیافتی اسیدشویی شده تقسیم می‌شوند. شن و ماسه طبیعی از معادن کاشان تهیه شده و حداکثر اندازه‌ی اسمی مورد استفاده آن ۱۹ میلی‌متر است. جهت تهیه درشت‌دانه‌های بازیافتی، بتن‌های برگشتی میکسرهای یک شرکت تولید بتن آماده واقع در شهر قم پس از گذشت حدود ۱۸۰ روز شکسته و الک گردیدند. لازم به توضیح است که توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌های مصرفی مطابق شکل ۲، حدود

^۴ Calcium Silicate Hydrate

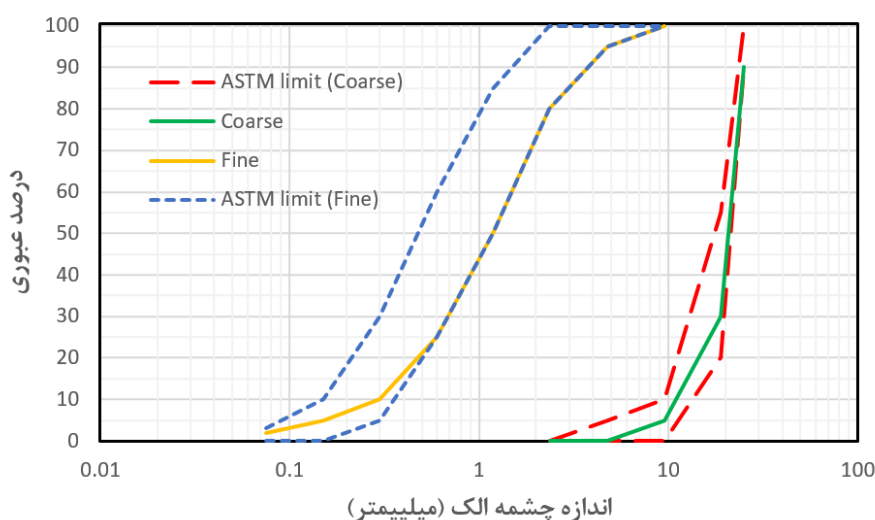
^۵ Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)

^۶ X-Ray Diffraction (XRD)

ذکر شده در استاندارد ASTM C 33 [۳۴] را تامین می‌نماید. در جدول ۱، درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌های مصرفی ارائه گردیده است.



شکل ۱: انواع سنگدانه استفاده شده در این مقاله: (الف) سنگدانه بازیافتی اسیدشویی شده (ب) سنگدانه بازیافتی اسیدشویی نشده (ج) سنگدانه طبیعی



شکل ۲: مشخصات دانه‌بندی سنگدانه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های استاندارد ASTM C 33 [۳۴]

جدول ۱: خواص اندازه‌گیری شده سنگدانه‌های مصرفی بر طبق ASTM C128 [۳۵] و ASTM C127 [۳۶]

	درصد جذب آب	وزن مخصوص (gr/cm^3)	اصلاح شده با اسید
ریزدانه طبیعی	۳/۳	۲/۶۲	--
درشت‌دانه طبیعی	۱/۹۹	۲/۶۸	--
درشت‌دانه بازیافتی	۲/۹۳	۲/۶۵	خیر
	۲/۷۵	۲/۶۵	بله

۲-۲- مواد چسباننده

در این مقاله از سیمان پرتلند تیپ ۱ تولید شده در شرکت سیمان دلیجان استفاده شده است. زمان گیرش اولیه و نهایی این سیمان به ترتیب برابر ۱۱۵ و ۲۳۵ دقیقه بوده و دارای مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات ۴۷ مگاپاسکال و وزن مخصوص ۳۰۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

سرباره محصول جانبی کوره‌های ذوب آهن است که به هنگام جداسازی ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن تولید می‌شود. چنانچه سرباره به آهستگی سرد شود، بلوری شده و برای ساختن سیمان مناسب نیست ولی اگر به وسیله جریان پرفشار آب سرد گردد می‌تواند با برخی از محصولات حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش شیمیایی بدهد. سرباره مصرفی در ساخت نمونه‌های این مقاله، حاصل از فرایند تولید فولاد در شرکت ذوب آهن اصفهان بوده و در شرکت سیمان کویر کاشان تهیه فرآوری شده است.

متاکائولن یک ماده سفید رنگ، آمورف و دارای قابلیت واکنش‌زایی با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان است [۳۷]. متاکائولن مصرفی در ساخت نمونه‌ها از شرکت نامیکاران تهیه گردیده است. خواص شیمیایی چسباننده‌های مذکور در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲: خواص و ترکیبات سیمان، متاکائولن و پودر سرباره مصرفی

	سیمان	متاکائولن	پودر سرباره
ترکیبات شیمیایی (%)			
SiO ₂	۲۰/۴	۸۰/۸	۳۷/۸۸
Al ₂ O ₃	۴/۵۸	۱۵/۶۹	۱۳/۲۹
CaO	۶۴/۰۱	۱/۴۶	۳۶/۷۶
MgO	۱/۰۹	۰/۰۵	۷/۶۳
Na ₂ O	۰/۵۴	۰/۰۱	۰/۶۲
K ₂ O	۰/۷۴	۰/۴	۰/۷۶
TiO ₂	-	۰/۳۸	۱/۵۲
Fe ₂ O ₃	۴/۲۸	۰/۰۴	۰/۵۴
SO ₃	۱/۷۴	۰/۱۲	۰/۱۲
LOI	-	۰/۵۱	-
سطح مخصوص (cm ² /gr)	۳۳۸۵	۲۵۴۰	۴۶۰۰
وزن مخصوص (gr/cm ³)	۳/۰۸	۲/۶	۳/۲۲

۳-۲- اسید سولفوریک

اسید سولفوریک یکی از محصولات جانبی در برخی صنایع معدنی از جمله مس است. در این مقاله از اسید سولفوریک صنعتی با درصد خلوص ۲۵ و PH به میزان ۱/۰۲ استفاده شده و غلظت آن برای اسیدشویی سنگدانه‌ها ۰/۱ مولار در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۴- فوق روان کننده

فوق روان کننده‌ها جهت بهبود کارایی بتن و ملات بر اساس درصدی از وزن سیمان مصرفی استفاده می‌شوند. فوق روان کننده مصرفی در این مقاله بر پایه کربوکسیلات و با نام تجاری Super Viscose-01 بوده و از شرکت نامیکاران تهیه شد. این افزودنی به میزان ۰/۳٪ وزنی مواد چسباننده مورد استفاده قرار گرفت.

۳- روش پژوهش

۳-۱- طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های مورد استفاده برای ساخت یک متر مکعب از نمونه‌های مورد نظر در جدول ۳ ذکر شده است. این طرح‌ها به سه دسته کلی بدون هر گونه اصلاح (R)، دارای سنگدانه اسیدشویی نشده (PT) و نیز دارای سنگدانه بازیافتی اسیدشویی شده (APT) تقسیم می‌شوند. شایان توجه است که به جز دسته اول، سایر نمونه‌ها حاوی مواد مکمل با خاصیت پوزولانی هستند.

سه عبارت R۰، R۳۳، R۶۶ در ابتدای نامگذاری کلیه طرح‌ها بیانگر میزان درصد درشت‌دانه بازیافتی مورد استفاده در ساخت هر نمونه است. وجود حرف P در نام نمونه نیز بیانگر وجود ترکیبی از مواد با خاصیت پوزولانی به جای سیمان می‌باشد. در این موارد، ۲۵ درصد سرباره کوره آهن‌گدازی و ۱۵ درصد متاکائولن مجموعاً جایگزین ۴۰ درصد از وزن سیمان شده است. ضمناً حرف T بیانگر استفاده از روش اختلاط سه مرحله‌ای و حرف A نیز نشانگر انجام فرآیند اسیدشویی بر روی سنگدانه‌های بازیافتی مصرفی در ساخت نمونه می‌باشد.

جدول ۳: وزن مواد مصرفی استفاده شده برای ساخت طرح‌های اختلاط مورد نظر

نام طرح	سیمان (kg/m ³)	آب به سیمان*	متاکائولن (kg/m ³)	پودر سرباره (kg/m ³)	درشت دانه (kg/m ³)			ریزدانه (kg/m ³)
					بازیافتی	بازیافتی اسیدشویی شده	طبیعی	
R۰	۳۵۰	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۹۴۵	۸۳۰
R۳۳	۳۵۰	۰/۵	۰	۰	۰	۳۱۲	۶۳۳	۸۳۰
R۶۶	۳۵۰	۰/۵	۰	۰	۰	۶۲۴	۳۲۱	۸۳۰
R۰PT	۲۱۰	۰/۵	۵۲/۵	۸۷/۵	۰	۰	۹۴۵	۸۳۰
R۳۳PT	۲۱۰	۰/۵	۵۲/۵	۸۷/۵	۰	۳۱۲	۶۳۳	۸۳۰
R۶۶PT	۲۱۰	۰/۵	۵۲/۵	۸۷/۵	۰	۶۲۴	۳۲۱	۸۳۰
R۳۳APT	۲۱۰	۰/۵	۵۲/۵	۸۷/۵	۳۱۲	۰	۶۳۳	۸۳۰
R۶۶APT	۲۱۰	۰/۵	۵۲/۵	۸۷/۵	۶۲۴	۰	۳۲۱	۸۳۰

* نسبت وزن آب به مجموع اوزان متاکائولن، پودر سرباره و سیمان.

۲-۳- برنامه آزمایش‌ها

آزمایش مقاومت فشاری بر اساس استاندارد BS EN 12390-3 [۳۸] بر روی سه نمونه مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر برای هر یک از ۸ طرح اختلاط و در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز انجام شده است. بارگذاری با سرعت بارگذاری ۰/۵۵ مگاپاسکال بر ثانیه توسط جک شرکت کنترلرز مدل FR/C0900-5 صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که نظر به اهمیت کافی بودن تعداد نمونه‌ها به منظور جلوگیری از عدم اطمینان در نتایج حاصله، در مقاله حاضر، همواره نمونه‌های با نتایج پرت با نمونه‌های جدید جایگزین گردیدند تا در نهایت مقادیر مقاومت گزارش شده برای هر طرح اختلاط از متوسط گیری ۳ نمونه قابل قبول به دست آید.

آزمون تسریع شده نفوذ یون کلراید برای نمونه‌های استوانه‌ای مربوط به طرح‌های اختلاط حاوی ۶۶ درصد درشت‌دانه بازیافتی، در دو سن ۲۸ و ۹۱ روز مطابق استاندارد ASTM C1202 [۳۹] و با استفاده از دستگاه ساخته شده توسط شرکت آژند پژوهان توس انجام پذیرفته است. دستگاه مذکور دارای دماسنج در سلول‌های خود بوده و بدین ترتیب دمای نمونه‌ها در حین عبور جریان پایش شد چرا که دمای آزمایش می‌تواند بر نتایج حاصله اثرگذار باشد. ضمناً در طول آزمایش، سلول‌ها از نظر نشتی و میزان محلول داخل سلول‌ها به طور منظم کنترل گردیدند تا دما از محدوده قابل قبول فراتر نرود. بدین منظور، نمونه‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی متر آماده‌سازی شدند. اگرچه دستگاه مورد استفاده دارای قابلیت جمع زدن خودکار میزان جریان عبوری است اما نتایج حاصله به صورت دستی نیز کنترل گردید. همچنین نمونه‌هایی با همین قطر برای بررسی سطح ظاهری و حفرات به کار رفت.

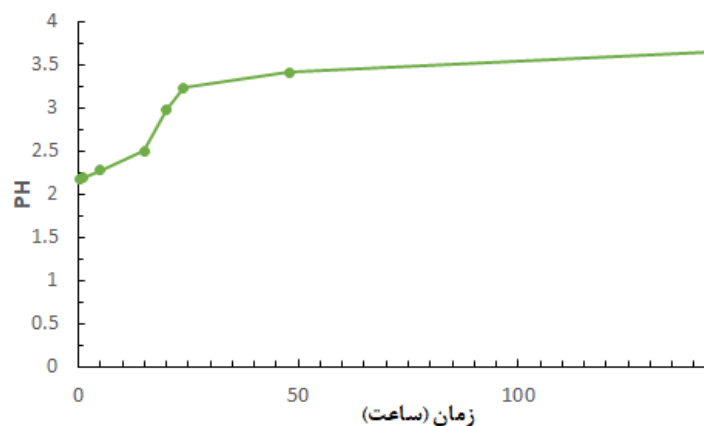
اندازه‌گیری اسلامپ بر طبق ASTM C143 [۴۰] بر روی نمونه‌های دارای ۶۶ درصد درشت‌دانه بازیافتی انجام شد.

ضمناً جهت بررسی میزان پیشرفت واکنش‌های سیمانی و پوزولانی و نیز تفسیر نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری، بر روی مقادیر ثابتی از پودر تراشیده شده از ۳ نمونه ۹۱ روزه (عبوری از الک ۲۰۰ میکرون) آنالیز XRD صورت پذیرفت.

۳-۳- آماده سازی نمونه‌ها

گام اول برای آماده سازی و ساخت نمونه‌ها، توزین مصالح مصرفی است. در مواردی که نیاز به اصلاح سنگدانه بازیافتی از طریق شستشو با اسید سولفوریک باشد لازم است تا مدت زمان مناسب جهت غوطه‌وری سنگدانه‌ها در اسید انتخاب گردد. بدین منظور، میزان

PH مخلوط حاوی سنگدانه و اسید ۰/۱ مولار توسط PH متر دیجیتال طی زمان‌های مختلف اندازه‌گیری گردید. نظر به اینکه بر طبق داده‌های شکل ۳، درصد قابل توجهی از کل واکنش اسید و ملات چسبیده به سنگدانه بازیافتی در همان ۲۴ ساعت اولیه صورت گرفت، مدت زمان مذکور برای غوطه‌وری سنگدانه‌ها در اسید انتخاب شد.



شکل ۳: مقادیر PH مخلوط حاوی سنگدانه بازیافتی، اسید سولفوریک و آب در زمان‌های مختلف بر حسب ساعت

ضمناً پس از اتمام دوره غوطه‌وری در اسید، درشت‌دانه‌های بازیافتی به مدت ۲۴ ساعت در آب با PH نزدیک به هفت قرار داده شدند تا اسید از سطح آنها شسته شود. در شکل ۴، نمایی از مخلوط حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و محلول اسیدی در زمان‌های مختلف ارائه شده است.

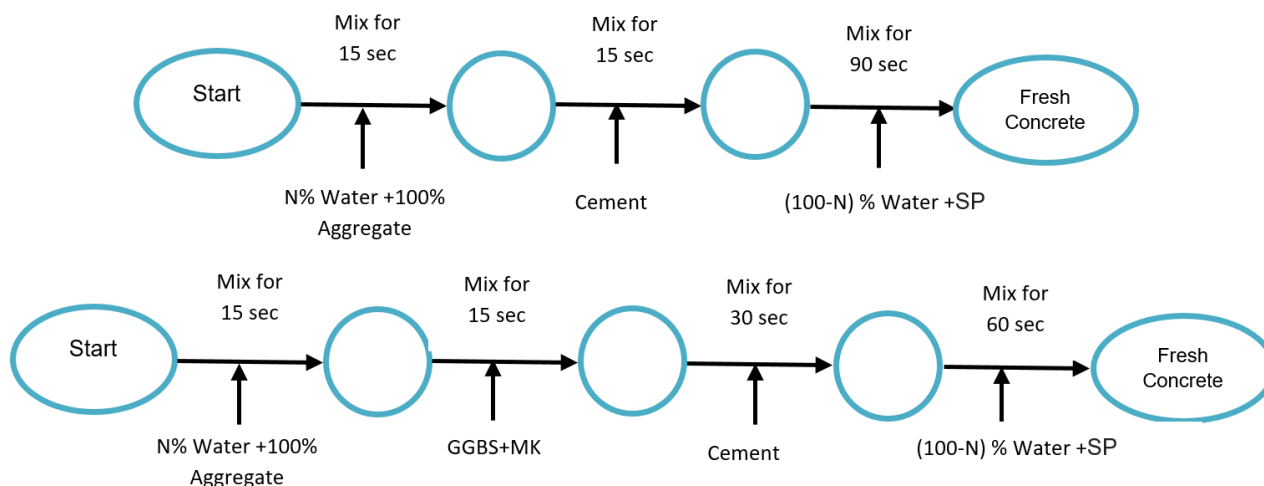


شکل ۴: نمایی از مخلوط حاوی سنگدانه بازیافتی و محلول اسیدی به ترتیب از راست به چپ: در حین افزودن اسید، چند لحظه پس از افزودن اسید، بعد از ۲ ساعت غوطه‌وری در اسید، پس از تخلیه اسید در پایان ۲۴ ساعت غوطه‌وری (شکل آخر بیانگر ملات و ریزدانه‌های جدا شده در پایان شستشو است)

گام دوم در ساخت نمونه‌ها، اختلاط مصالح با یکدیگر است. در این مقاله دو روش اختلاط مختلف به کار رفت. در روش اول که به روش ۲ مرحله‌ای موسوم بوده و برای سه طرح فاقد پودر سرباره و متاکائولن (R۰، R۳۳ و R۶۶) به کار رفت، ابتدا مقداری از آب مورد نیاز سنگدانه‌ها برای رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک (SSD) به کل سنگدانه‌ها افزوده شد تا از کلوخه شدن سیمان حین افزودن آب جلوگیری شود. بعد از ۱۵ ثانیه اختلاط، کل سیمان اضافه شده و ۱۵ ثانیه با سنگدانه‌ها مخلوط شد تا یک مخلوط تقریباً یکنواخت بدست بیاید. سپس مقدار باقیمانده آب و در ادامه فوق روان کننده به مخلوط اضافه شده و تمامی مصالح بمدت ۹۰ ثانیه دیگر با هم مخلوط شدند تا بتن تازه یکنواخت بدست بیاید.

در روش دوم موسوم به روش اختلاط سه مرحله‌ای [۳۳] که برای بقیه طرح‌ها استفاده شد ابتدا ۱/۲ برابر آب کل مورد نیاز سنگدانه‌ها برای رسیدن به حالت SSD به آنها افزوده شد و به مدت ۱۵ ثانیه با هم مخلوط شدند تا آب به خلل فرج سنگدانه‌های بازیافتی نفوذ کرده و لایه‌ای نازک از آب دور آنها را فرا بگیرد. سپس کل سرباره و متاکائولن که از قبل با هم ترکیب شده بودند به مخلوط اضافه شده و ۱۵ ثانیه دیگر با سایر مصالح موجود مخلوط شدند. در این مرحله، مقداری از مخلوط پوزولانی جذب سنگدانه‌ها شده و لایه-

ای نازک حول آنها ایجاد می‌نماید. این لایه توانایی پر کردن خلل و فرج موجود در لایه های سست چسبیده به مصالح بازیافتی را نیز دارد. در ادامه کل سیمان مورد نیاز طرح اضافه و به مدت ۳۰ ثانیه با بقیه مصالح مخلوط گردید تا ترکیبی نسبتاً یکنواخت بدست آید. در نهایت باقیمانده آب و فوق روان کننده اضافه شده و کل مصالح ۶۰ ثانیه با هم مخلوط گردید. در شکل ۵ مراحل دو روش اختلاط مورد بحث نمایش داده شده است.



شکل ۵: روشهای اختلاط مورد استفاده: روش دو مرحله‌ای برای نمونه‌های بدون مواد مکمل (بالا) و روش ۳ مرحله‌ای برای نمونه‌های حاوی مخلوط سرباره-متاکائولن (پایین)

گام سوم در ساخت نمونه‌ها مربوط به ریختن در قالب و عمل آوری می‌باشد. بدین منظور، هر یک از این نمونه‌ها در سه لایه در قالب ریخته و در هر لایه با ۲۵ ضربه کوبیده شد. سپس با چکش پلاستیکی ضربه‌هایی به بدنه قالب زده شد تا هوای موجود در آن خارج گردد. پس از اتمام قالب ریزی و تراکم، سطح نمونه‌های بتنی با گونی‌های مرطوب پوشانده شد تا از تبخیر آب بتن جلوگیری به عمل آید. نهایتاً نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج و به حوضچه عمل آوری منتقل گردید.

۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج مربوط به آزمایش‌های مقاومت فشاری، دوام در برابر نفوذ یون کلر، اسلایپ و XRD همراه با بررسی سطح ظاهری نمونه‌ها ارائه گردیده است.

۴-۱- مقاومت فشاری

در این بخش نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های مکعبی (در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز) در حالات مختلف ارائه گردیده است. بدین منظور ابتدا اثر کاربرد همزمان ۲ روش اصلاحی (شامل جایگزینی ترکیب سرباره-متاکائولن و اختلاط ۳ مرحله‌ای) و سپس تاثیر میزان درشت‌دانه بازیافتی مصرفی (در ۳ حالت صفر، ۳۳ و ۶۶ درصد) بر مقاومت فشاری بتن ارزیابی شده است. نهایتاً با مقایسه اثر ترکیب همزمان ۲ و یا ۳ روش اصلاحی، عملکرد روش اسیدشویی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار داده شده است.

۴-۱-۱- اثر کاربرد همزمان ۲ روش جایگزینی ترکیب سرباره-متاکائولن و اختلاط ۳ مرحله‌ای

در شکل ۶ خلاصه‌ای از تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه برای کلیه آزمایش‌های مکعبی نمایش داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود نمونه‌های دارای ۴۰ درصد وزنی مواد مکمل (۲۵ درصد سرباره و ۱۵ درصد متاکائولن) و اختلاط ۳ مرحله‌ای (با پسوند PT در انتهای نامگذاری) دارای مقاومت فشاری ۷ روزه بسیار کمتری در قیاس با نمونه‌های متناظر فاقد پوزولان سری

R (نمونه های R0, R33, R66) هستند (در حدود ۶۰ درصد). البته با رسیدن به سن ۲۸ روز (میله های سفید در شکل ۶) و پیشرفت واکنش های پوزولانی، اختلاف مقاومت فشاری با نمونه های شاهد به حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است.

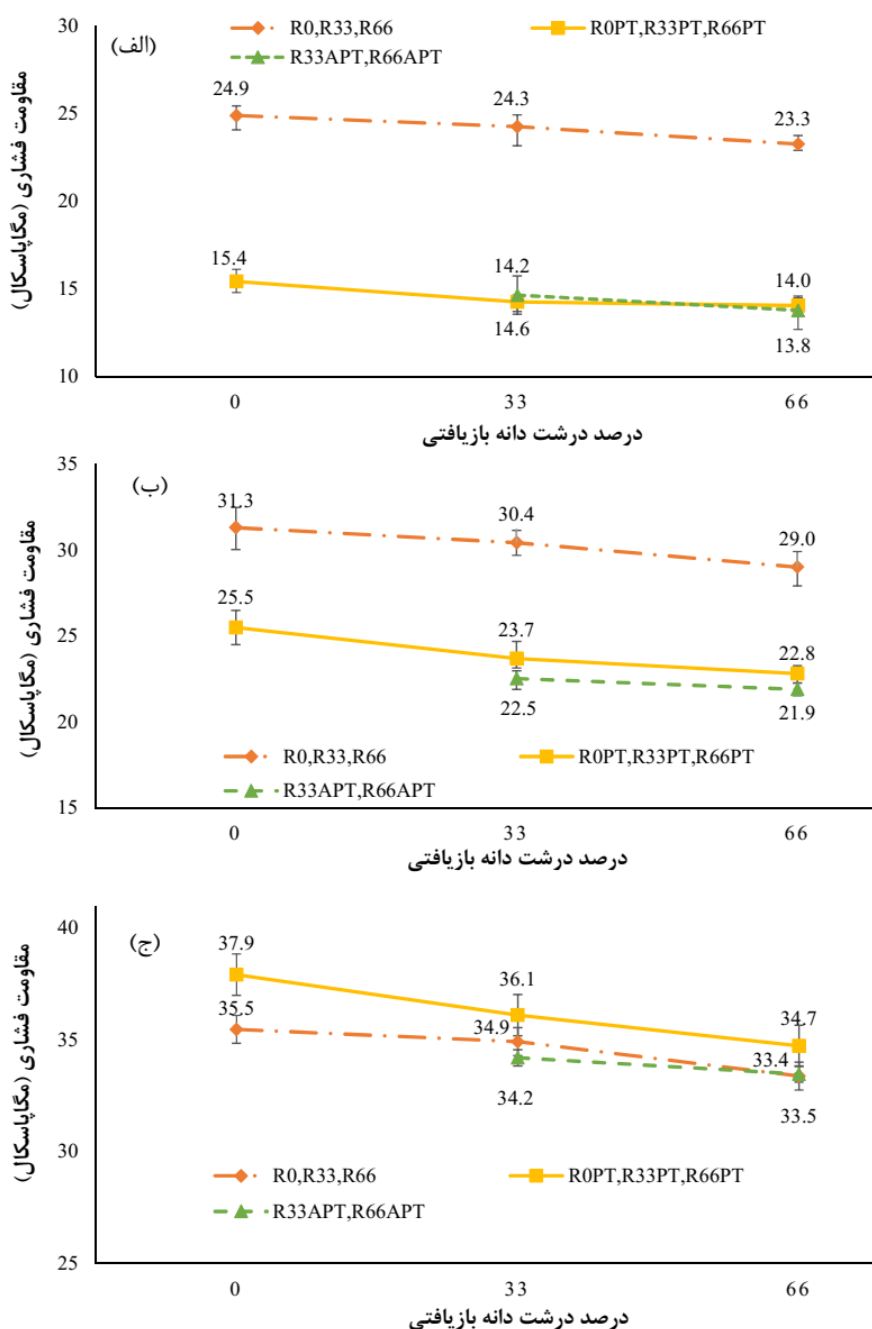
همچنین مقایسه مقاومت فشاری نمونه های ۹۱ روزه در ۶ سری طرح سمت چپ شکل ۶ نشان داد که کاربرد همزمان مواد مکمل و روش اختلاط ۳ مرحله ای همواره توانسته است مقاومت فشاری نمونه های شاهد سری R با درصد سنگدانه مشابه را تامین نماید. به طور خاص نمونه های R66PT با مقدار قابل توجه ۶۶ درصد سنگدانه بازیافتی در برخی موارد به مقاومت فشاری بالغ بر ۹۸ درصد مقدار متناظر در نمونه های فاقد سنگدانه بازیافتی R0 دست یافته اند که با توجه به ضعف ذاتی سنگدانه های بازیافتی، مقاومت قابل ملاحظه ای به شمار می رود.



شکل ۶: مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز

۲-۱-۴- اثر درصد درشت دانه بازیافتی مصرفی

همانطور که در شکل ۷ دیده می شود با افزایش درصد درشت دانه بازیافتی مصرفی، در همه سنین، کاهش مقاومت فشاری اتفاق می افتد که چنین عملکردی با توجه به حضور ملات چسبیده و جذب آب بالاتر سنگدانه های بازیافتی کاملاً مطابق انتظار است. ضمناً با افزایش درصد بازیافتی از ۳۳ به ۶۶ درصد، افت مقاومت فشاری در نمونه های دارای مواد مکمل کمی کمتر از نمونه های دیگر بوده است. به بیان دیگر، اگرچه در مجموع با افزودن مقدار درشت دانه بازیافتی (از ۳۳ به ۶۶ درصد) میزان افت مقاومت فشاری چندان چشمگیر نبوده است اما افت مذکور در نمونه های فاقد پوزولان (سری R) با شیب بیشتری اتفاق افتاده است. بروز این اتفاق را می توان به پر شدن بخش مهمی از خلل و فرج موجود در ملات چسبیده به سنگدانه توسط مواد مکمل نسبت داد چرا که خصوصاً در نمونه های ۲۸ و ۹۱ روزه تفاوت شیب محسوس تر بوده است.

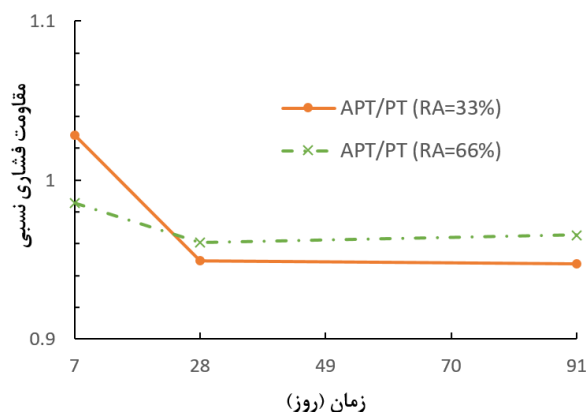


شکل ۷: اثر درصد درشت دانه بازیافتی بر مقاومت فشاری نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه

۳-۱-۴- اثر اسیدشویی سنگدانه‌های بازیافتی (مقایسه اثر ترکیب همزمان ۲ و ۳ روش)

شکل ۸ نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب ۳ روش به مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب ۲ روش در سنین مختلف را نمایش داده است. همانگونه که مشاهده می‌شود نمونه‌های اسیدشویی شده (APT) در سن ۷ روز دارای مقاومت فشاری کمابیش برابر با نمونه‌های اسیدشویی نشده (PT) بوده و حتی در نمونه‌های دارای ۳۳ درصد سنگدانه بازیافتی، اسیدشویی به بهبود مقاومت فشاری انجامیده است. علت این امر را می‌توان در کاهش جذب آب سنگدانه‌ها و حذف مواد چسبیده پس از اسیدشویی جستجو نمود. از سوی دیگر، با افزایش سن نمونه‌ها به ۲۸ و ۹۱ روز، افت قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه‌های اسیدشویی شده مشاهده می‌

گردد. از آنجا که در هر ۲ سری از این نمونه‌ها، مواد با خاصیت پوزولانی به کار رفته است به نظر می‌رسد که در نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب ۳ روش، واکنش پوزولانی نتوانسته تکمیل شود. به بیان دیگر، اسید باقی مانده بر روی سنگدانه‌های بازیافتی پس از شستشو نیز به طور کامل حذف نشده و با بخشی از $Ca(OH)_2$ حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش داده است. بدین ترتیب بخشی از ماده اولیه لازم برای انجام واکنش پوزولانی از دسترس خارج شده است. ضمناً با توجه به شکل ۸ می‌توان چنین نتیجه گرفت که کاربرد همزمان ۳ روش بهبود شامل استفاده از مواد مکمل پوزولانی، اختلاط ۳ مرحله‌ای و اسیدشویی به اندازه کاربرد همزمان فقط ۲ روش مذکور (بدون انجام اسیدشویی) در ارتقای مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های بازیافتی اثربخش نبوده است. شواهد بیشتری از علت کاهش مقاومت فشاری بتن در صورت انجام اسیدشویی درشت دانه‌ها در بخش ۴-۴ ارائه گردیده است.



شکل ۸: نسبت مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب ۳ روش به مقاومت فشاری نمونه‌های اصلاح شده با ترکیب ۲ روش در سنین مختلف

۲-۴- دوام در برابر نفوذ یون کلر

در این بخش نتایج آزمون RCPT برای هر یک از ۲ طرح اختلاط R۶۶ و R۶۶PT ارائه گردیده است. بدین ترتیب شاخصی از دوام بهترین نمونه اصلاح شده دارای سنگ‌دانه بازیافتی از نظر مقاومت فشاری یعنی R۶۶PT با نمونه مشابهی که فاقد هرگونه اصلاح است مقایسه شده است. در جدول ۴ میزان شار عبوری برای هر آزمون بر حسب کولمب آورده شده است.

جدول ۴: مجموع جریان عبوری در نمونه‌های R۶۶ و R۶۶PT

نمونه	مجموع شار عبوری (کولمب)	
	روز ۲۸	روز ۹۱
R۶۶	سری ۱	۷۶۳۶
	سری ۲	Reject
R۶۶PT	سری ۱	۱۹۷۸
	سری ۲	۲۵۷۲

همانطور که دیده می‌شود از لحاظ دوام، نمونه R۶۶PT به میزان قابل توجهی نسبت به نمونه R۶۶ عملکرد بهتری از خود نشان داده است. در واقع در سن ۲۸ روزگی نمونه اول R۶۶ با فاصله‌ی زیاد از سقف محدوده، در بازه میزان شار عبوری زیاد (بزرگتر از ۴۰۰۰) قرار گرفته و نمونه دوم نیز بدلیل ازدیاد دمای محلول و ذوب شدن اتصالات داخلی و عدم توانایی عبور جریان الکتریکی در آزمون مردود شد حال آنکه نمونه اول R۶۶PT در همین سن در محدوده شار عبوری متوسط (۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰) قرار گرفته و نمونه دوم با فاصله‌ی کمی در محدوده شار عبوری زیاد طبقه بندی گردید. همچنین در سن ۹۱ روزگی مجدداً هر دو نمونه‌ی R۶۶ با فاصله از سقف در محدوده‌ی عبور شار زیاد اما در طرح R۶۶PT نمونه اول در محدوده عبور شار کم (۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰) و نمونه دوم در محدوده شار عبوری متوسط قرار

گرفتند. از این رو با توجه به نتایج بدست آمده، استفاده همزمان از ۲ روش اصلاحی مشکل دوام نمونه‌های شاهد را تا حدود زیادی برطرف کرده است. شایان ذکر است که این نتیجه با یافته‌های سایر مطالعات مربوط به کاربرد پوزولان‌ها و نیز مطالعات قبلی در مورد متاکائولن همخوانی دارد [۱۴ و ۴۱].

۳-۴- اسلامپ

در بررسی‌های اولیه، طرح اختلاط‌ها بدون استفاده از فوق روان کننده ساخته شدند که به دلیل داشتن اسلامپ بسیار کم در محدوده کارایی مورد پذیرش قرار نگرفتند. در ادامه با افزودن فوق روان کننده به میزان ۰.۳ درصد وزنی مواد چسباننده (شامل سیمان، متاکائولن و پودر سرباره) آزمایش برای طرح‌های اختلاط تکرار شده و کارایی قابل قبول ۲۵ میلی‌متر برای طرح R۶۶PT و ۲۹ میلی‌متر برای طرح R۶۶APT بدست آمد (شکل ۹). هر دوی این نمونه‌ها در قیاس با نمونه R۶۶ (با اسلامپ حدود ۱۸ میلی‌متر) از کارایی بیشتری برخوردار بودند که این موضوع با توجه به حضور پودر سرباره قابل توجیه می‌باشد. لازم به توضیح است که با توجه به محدوده پیشنهادی ذکر شده بر روی ظرف حاوی فوق روان کننده، دسترسی به اسلامپ‌های بالاتر نیز قابل حصول بود که انجام آن به پژوهش‌های آتی موکول گردید.

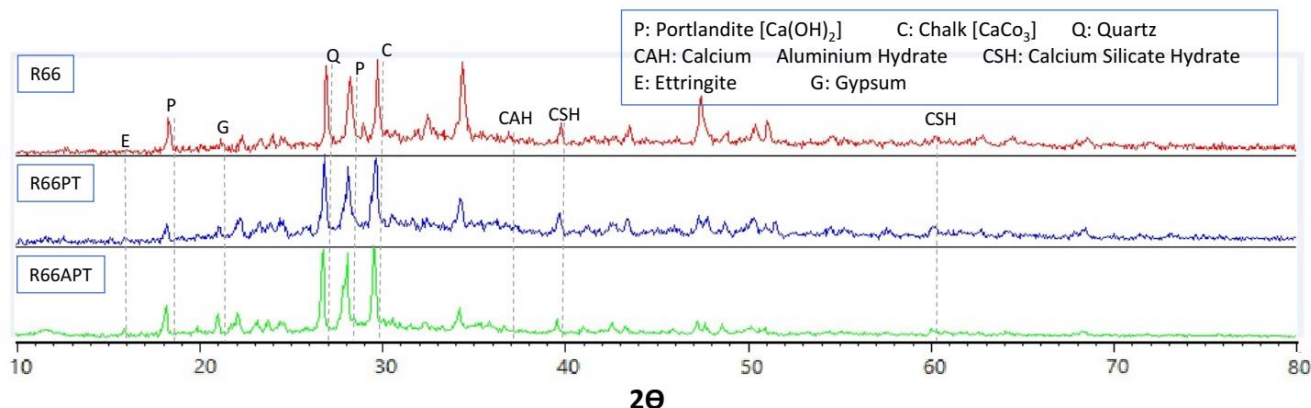


شکل ۹: اندازه گیری اسلامپ برای طرح R۶۶PT

۴-۴- آنالیز XRD

کمتر بودن مقاومت فشاری نمونه‌های اسیدشویی شده و حاوی مواد مکمل سری APT در قیاس با نمونه‌های اسیدشویی نشده سری PT را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش XRD تفسیر نمود. آزمایش مذکور بر روی سه نمونه R۶۶، R۶۶PT و R۶۶APT انجام شده و نتایج حاصل از آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی الگوهای مربوط به مخلوط‌های مورد آزمایش، تشکیل فازهای کریستالی از جمله پرتلندیت و ژل C-S-H را به اثبات رساند. این ژل که می‌تواند ناشی از واکنش سیمان با آب (رابطه ۱) و یا واکنش سیلیس غیربلوری موجود در مخلوط سرباره-متاکائولن با پرتلندیت (رابطه ۲) باشد نقش اصلی را در ایجاد مقاومت فشاری بتن ایفا می‌کند. برخلاف نمونه R۶۶APT، پیک C-S-H نسبتاً بلندی در حدود زوایای ۳۹.۵ و ۶۰ درجه در نمونه R۶۶PT مشاهده می‌شود که این موضوع بیانگر پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و پوزولانی در نمونه اسیدشویی نشده می‌باشد. از سوی دیگر باید توجه داشت که به علت بروز واکنش پوزولانی و مصرف شدن پرتلندیت، پیک آن در زاویه‌ی حدود ۱۸ درجه در نمونه R۶۶PT نسبت به نمونه‌های دیگر کمی کوتاهتر است. ضمناً کم بودن مقدار ژل تولید شده در نمونه R۶۶APT مرتبط با ممانعت اسید باقیمانده بر روی سنگ‌دانه‌های باز یافتی از پیشرفت واکنش پوزولانی و تولید محصول اضافی CSH می‌باشد. این نتایج با یافته‌های حاصل از آزمون مقاومت فشاری همخوانی دارند.

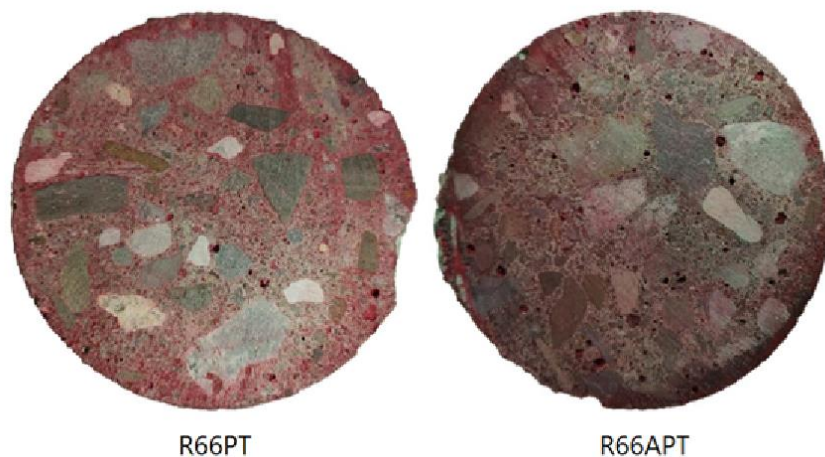




شکل ۱۰: نتایج آنالیز XRD در نمونه‌های R66، R66PT و R66APT در سن ۹۱ روزگی

۵-۴- بررسی سطح ظاهری

برای بررسی سطح ظاهری، مقطع نمونه‌های استوانه‌ای ۹۱ روزه حاوی درشت‌دانه بازیافتی اسیدشویی شده و اسیدشویی نشده ابتدا با اره سنگ‌بری رومیزی برش خورده و سپس با قلم‌مو رنگ زده شد. شکل ۱۱ نمایی از مقطع نمونه‌های مذکور را پس از پاک کردن رنگ سطحی نمایش داده است تا به طور نسبی وضعیت حفرات عمیق مقایسه گردد. اگرچه این حفره‌ها ممکن است در وهله اول به وجود هوای محبوس در بتن و یا جداسدن ریزدانه‌ها در طی فرآیند برش زدن ارتباط داده شوند اما در عین حال، مقایسه تصاویر مذکور شواهدی از اثربخشی واکنش‌های پوزولانی در کاهش تخلخل نمونه‌ها را نیز عیان می‌سازد. در واقع چنین به نظر می‌رسد که حفرات عمیق موجود در نمونه R66APT به مراتب بیشتر بوده و واکنش‌های پوزولانی در آن نتوانسته‌اند به اندازه نمونه R66PT خلل و فرج موجود را خصوصاً در اطراف درشت‌دانه‌های بازیافتی کاهش دهند.



شکل ۱۱: سطح ظاهری و حفرات نمونه‌های برش خورده ۹۱ روزه (پس از پاک کردن رنگ روی لایه سطحی برش خورده)

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر به بررسی تأثیر کاربرد همزمان ۲ یا ۳ روش بهبود شامل استفاده از جایگزینی ۴۰ درصد مواد مکمل (۱۵ درصد متاکائولن و ۲۵ درصد سرباره)، اسیدشویی درشت‌دانه‌های بازیافتی و اختلاط سه مرحله‌ای بر خواص بتن بازیافتی دارای ۰، ۳۳ و ۶۶ درصد

درشت‌دانه بازیافتی پرداخته شد. بدین منظور با تعریف ۸ طرح اختلاط مختلف، نتایج آزمون مقاومت فشاری و آزمون تسریع شده نفوذ یون کلراید در نمونه‌های بتنی ارزیابی گردید. بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های حاصله، نتایج زیر به دست آمد:

(۱) به ازای درصد مشخصی از سنگدانه بازیافتی، استفاده همزمان از ۲ یا ۳ راهکار بهبود همواره منجر به دستیابی به مقاومت فشاری ۹۱ روزه‌ای در حد نمونه شاهد (فاقد روش اصلاحی) متناظر گردید. با این حال، در سنین ۷ و ۲۸ روز به دلیل عدم تکمیل واکنشهای پوزولانی، به ترتیب حداکثر تا حدود ۶۰ و ۸۰ درصد از مقاومت نمونه‌های شاهد حاصل گردید.

(۲) اگرچه با افزایش درصد درشت‌دانه بازیافتی، مطابق انتظار، افت مقاومت فشاری در همه نمونه‌ها به وقوع پیوست اما روند کاهشی مذکور در نمونه‌های اصلاح شده با ۲ یا ۳ روش نسبت به نمونه‌های شاهد، خصوصاً در نمونه‌های ۲۸ و ۹۱ روزه، با شیب کمتری صورت گرفت.

(۳) مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های حاوی ۶۶ درصد سنگدانه بازیافتی در حالت ترکیب هر ۳ روش بهبود، کمی بیشتر از مقادیر مربوط به حالت استفاده همزمان از ۲ روش (اسیدشویی درشت‌دانه‌های بازیافتی و اختلاط سه مرحله‌ای) بدست آمد. با این وجود، با افزایش سن نمونه‌ها به ۲۸ و ۹۱ روز، از اثر بخشی ترکیب ۳ روش کاسته و ارتقای کمتری در مقاومت فشاری مشاهده شد. بر پایه شواهد حاصل از آنالیز XRD، این موضوع می‌تواند به وجود اسید باقی مانده بر روی سنگدانه‌های بازیافتی و ممانعت آن از پیشرفت واکنش‌های پوزولانی مرتبط گردد.

(۴) مقاومت فشاری ۹۱ روزه نمونه‌های اصلاح شده با ۲ راهکار و دارای مقدار قابل توجه ۶۶ درصد درشت‌دانه بازیافتی به حدود ۹۸ درصد مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد فاقد سنگدانه بازیافتی بالغ گردید. علاوه بر این، کاهش شار عبوری و برخورداری از اسلامپ بیشتر همین نمونه‌های اصلاح شده نشان داد که ترکیب روش‌های بهبود با اسیدشویی و جایگزینی سرباره-متاکائولن می‌تواند در توسعه شیوه‌های نوین بازیافت بتن مورد توجه بیشتری قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند تا از مدیران محترم شرکت سیمان کویر کاشان و شرکت نامیکاران به دلیل مساعدت در تامین مصالح مورد نیاز قدردانی نمایند. همچنین از آقایان مهندس امید بابایی (مسئول محترم آزمایشگاه گروه مهندسی عمران) و مهندس علی احمدیان بابت همکاری در روند انجام آزمایش‌ها تشکر می‌گردد.

مراجع

- [1] Martínez, P. S., Cortina, M. G., Martínez, F. F., and Sánchez, A. R. (2016). Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of cleaner production*, 118, 162-169.
- [2] Poon, C. S., and Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, conservation and recycling*, 50(3), 293-305.
- [3] Bamigboye, G. O., Ademola, D., Kareem, M., Orogbade, B., Odetoyan, A., & Adeniyi, A. (2022). Durability assessment of recycled aggregate in concrete production. In *The Structural Integrity of Recycled Aggregate Concrete Produced with Fillers and Pozzolans*. Woodhead Publishing, 445-467.
- [4] Sobuz, M. H. R., Datta, S. D., and Akid, A. S. M. (2022). Investigating the combined effect of aggregate size and sulphate attack on producing sustainable recycled aggregate concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 2022, 1-16.
- [5] Abdoli, M. A., Samieifard, R., and JALILI, G. M. (2008). Rural solid waste management, *International Journal of Environmental Research*, 2(4), 425-430.
- [6] Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview. *Construction and building materials*, 41, 303-318.

- [7] Olivier, J. G., Schure, K. M., and Peters J. A. H. W. (2017). Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, 1-11.
- [8] Silva, R. V., De Brito, J., and Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- [9] Nováková, I., and Mikulica, K. (2016). Properties of concrete with partial replacement of natural aggregate by recycled concrete aggregates from precast production. *Procedia Engineering*, 151, 360-367.
- [10] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., and Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and structures*, 33, 574-580.
- [11] Hewayde, E., Pachenari, A., and Al-Eleaj, H. (2020). Resistance of recycled aggregate concrete (RAC) subjected to drying-wetting cycles to attack of magnesium and sodium sulfates. *Journal of Engineering*, 2020, 1-9.
- [12] Li, W., Xiao, J., Sun, Z., Kawashima, S., and Shah, S. P. (2012). Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. *Construction and Building Materials*, 35, 1045-1055.
- [13] Liu, J., Ma, K., Shen, J., Zhu, J., Long, G., Xie, Y., and Liu, B. (2023). Influence of recycled concrete aggregate enhancement methods on the change of microstructure of ITZs in recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 371, 130772.
- [14] Tam, V. W., Wattage, H., Le, K. N., Buteraa, A., and Soomro, M. (2021). Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review. *Construction and Building Materials*, 270, 121490.
- [15] Shaban, W. M., Yang, J., Su, H., Liu, Q. F., Tsang, D. C., Wang, L., and Li, L. (2019). Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 216, 632-647.
- [16] Kuzielová, E., Žemlička, M., Novotný, R., and Palou, M. T. (2019). Simultaneous effect of silica fume, metakaolin and ground granulated blast-furnace slag on the hydration of multicomponent cementitious binders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136, 1527-1537.
- [17] Ghasemzadeh mousavinejad, S. H., & Darvishalinezhad, A. (2022). Evaluation of mechanical properties and durability of geopolymer mortar based on the granulated blast furnace slag replaced with partial replacement of kaolin in different molarity. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (), -. doi: 10.22065/jsce.2022.351034.2872.
- [18] Siddique, R., and Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
- [19] Rashiddadash, P., Ramezani-pour, A., and Mahdikhani, M. (2014). Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice. *Construction and Building Materials*, 51, 313-320.
- [20] Muduli, R., and Mukharjee, B. B. (2019). Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. *Journal of cleaner production*, 209, 398-414.
- [21] Nandanam, K., Biswal, U. S., and Dinakar, P. (2021). Effect of fly ash, GGBS, and metakaolin on mechanical and durability properties of self-compacting concrete made with 100% coarse recycled aggregate. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 25(2), 04021002.
- [22] Younis, K. H., Amin, A. A., Ahmed, H. G., and Maruf, S. M. (2020). Recycled aggregate concrete including various contents of metakaolin: mechanical behavior. *Advances in materials science and engineering*, 2020, 1-17.
- [23] Muduli, R., and Mukharjee, B. B. (2020). Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach. *Construction and Building materials*, 233, 117223.
- [24] Özbay, E., Erdemir, M., and Durmuş, H. İ. (2016). Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. *Construction and Building Materials*, 105, 423-434.
- [25] Ahmed, S., Al-Dawood, Z., Abed, F., Mannan, M. A., and Al-Samarai, M. (2021). Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete—A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 103238.
- [26] Khatib, J. M., and Hibbert, J. J. (2005). Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. *Construction and building materials*, 19(6), 460-472.
- [27] Yunusa, M., Zhang, X., Cui, P., and Tian, X. (2022). Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*, 15(16), 5792.
- [28] Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y. F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2019). Influence of different treatment methods on the mechanical behavior of recycled aggregate concrete: A comparative study. *Cement and concrete composites*, 104, 103398.
- [29] Tam, V. W., Tam, C. M., and Le, K. N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 82-101.
- [30] Purushothaman, R., Amirthavalli, R. R., and Karan, L. (2015). Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(5), 04014168.
- [31] Tam, V. W., and Tam, C. M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Materials Science*, 42, 3592-3602.

- [32] Kong, D., Lei, T., Zheng, J., Ma, C., Jiang, J., and Jiang, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 24(5), 701-708.
- [33] Kisku, N., Rajhans, P., Panda, S. K., Pandey, V., & Nayak, S. (2020). Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach. *Structures*, 24, 2020.
- [34] ASTM C33. (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society for Testing and Materials. *American Society for Testing and Materials*.
- [35] ASTM C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. *American Society for Testing and Materials*.
- [36] ASTM C127. (2015). Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. *American Society for Testing and Materials*.
- [37] Farokhzad, R., and Mohammadbeigi, A. Y. L. A. R. (2022). Evaluating Compressive and Tensile Strength and Water Absorption of Geopolymer Mortar Containing Slag (GGBFS) in Comparison with Pozzolan Metakaolin. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(11), 292-309.
- [38] Standard, British. BS EN: 12390-3. (2009). Testing hardened concrete. Compressive Strength of Test Specimens.
- [39] ASTM C1202. (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *American Society for Testing and Materials*.
- [40] ASTM C143. (2020). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. *American Society for Testing and Materials*.
- [41] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., and Shen, C. (2013). Enhancing microstructure and durability of concrete from ground granulated blast furnace slag and metakaolin as cement replacement materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 2(1), 52-59.