

تأثیر ناحیه انتقال بر خواص و ریزساختار بتن بازیافتی

سید قاسم میراحمدی

دانشجوی دکتری، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

سید فتح اله ساجدی *

استاد گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

سید وحید رضوی طوسی

استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن‌های بازیافتی ساخته شده از سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و سرباره درشت فولاد ارزیابی گردید. سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و سرباره به ترتیب به میزان ۲۵٪، ۵۰٪، ۱۰۰٪ و ۲۵٪ جایگزین سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی شدند و همین‌طور میکروسلیس به میزان ۵٪ و ۱۰٪ جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در ساخت بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ گردید. به منظور بررسی تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن‌ها، ۲۱ طرح اختلاط ساخته شدند و با روش تاگوچی ۱۰ طرح انتخاب و مجموعاً ۸۰۰ نمونه در محدوده سنی ۷ تا ۱۸۰ روزه بررسی گردیدند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان میکروسلیس، خواص مکانیکی بهبود یافته و به تبع آن کاهش در جذب آب غوطه‌وری، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ تسریع‌شده یون کلراید و افزایش قابل توجه در مقاومت الکتریکی نمونه‌ها رخ داده است. همچنین در میزان فاز بلوری هیدروکسید کلسیم و تعداد منافذ بزرگ کاهش و در فاز سیلیکات کلسیم هیدراته ناحیه انتقال افزایش حاصل شد که این منجر به بهبود کیفیت ریزساختار گردید. با افزایش سن نمونه‌ها، فازهای سیلیکات کلسیم هیدراته و هیدروکسید کلسیم به ترتیب ۲۲٪ افزایش و ۴۱٪ کاهش و به تبع آن مقاومت فشاری و مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب ۳۰٪ و ۶۰٪ افزایش و نفوذ تسریع یون کلراید ۷۲٪ کاهش پیدا کرد. بررسی محدوده ۵۰ میکرومتری از مرز سنگ‌دانه با طیف‌سنجی انرژی اشعه ایکس نشان داد که در فاصله ۲۰ میکرومتری، بیشترین همبستگی بین نسبت‌های عناصر ناحیه انتقال با خواص بتن برقرار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ناحیه انتقال، خواص بتن بازیافتی، ریزساختار، طیف‌سنجی، اشعه ایکس، نسبت اتمی عناصر، ریزنگار الکترونی روبشی.

* نویسنده مسئول: f_sajedi@yahoo.com

۱- مقدمه

می‌شود [۲۰]. غلظت اترینگایت و هیدروکسید کلسیم در این ناحیه بیشتر است، درحالی که محتوای ژل سیلیکات کلسیم هیدراته کمتر است [۲۱]. سطح ناهموار و تخلخل زیاد سنگ‌دانه‌های درشت بازیافتی، پیوندهای قوی با خمیر سیمان جدید ایجاد می‌کند و خواص مکانیکی بتن بازیافتی را افزایش می‌دهد [۲۲].

تحقیقات پلیگرنو و همکاران [۲۳، ۲۴] نشان داد که سرباره درشت به دلیل جذب آب پایین با حفظ نسبت آب به سیمان (W/C) و با استفاده از میکروسیلیس، بتن با مقاومت مطلوبی ارائه می‌دهد. امکان استفاده رضایت‌بخش از سرباره‌های درشت به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در تولید بتن وجود دارد [۱۰، ۲۵].

در اکثر مطالعات استفاده از سرباره به جای سنگ‌دانه طبیعی، بررسی‌ها بر روی خواص مکانیکی مانند مقاومت و ضریب ارتجاعی متمرکز شده‌اند و کمتر به تأثیر سرباره بر خواص دوام پرداخته شده است [۲۶]. طبق مطالعات واگیه و همکاران، آگموتو و مهتا [۲۷-۲۹] تضرس و ناصاف بودن سطح سنگ‌دانه‌های بازیافتی باعث درهم تنیدگی مکانیکی نامطلوب سنگ‌دانه‌ها در مخلوط بتنی شده و با ایجاد حفره‌های زیاد در بتن، باعث کاهش مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی تا حداکثر ۱۶٪ و ۲۲٪ می‌شود. عدم تغییر تا کاهش ۴۰٪ خواص مکانیکی و کاهش ۴۰٪ نفوذ یون کلراید بتن بازیافتی در مقایسه با بتن معمولی نیز گزارش شده است [۳۰-۳۴].

خواص ژئوشیمیایی سنگ‌دانه‌ها در تولید ریزترک‌ها و افزایش قدرت پیوندی ناحیه انتقال مطالعه شده است [۳۵، ۳۶]. پیوند در این ناحیه می‌تواند تحت تأثیر هر دو ویژگی فیزیکی (زبری، شکل، زاویه) و شیمیایی (واکنش‌پذیری) سنگ‌دانه‌ها قرار گیرد [۳۷]. برای مطالعه ریزساختار بتن از پتروگرافی بتن ASTM C856 [۳۸] استفاده شده که جنبه کمی ندارد. همچنین امروزه با استفاده از ریزنگار الکترونی روبشی بررسی کیفی انجام می‌شود. در تحقیقات پیشین [۳۹] ریزساختار ناحیه انتقال بر مقاومت بتن با سنگ‌دانه‌های بازیافتی تأثیر می‌گذارد و اثرات متفاوتی از خود نشان می‌دهد. تحلیل اشعه ایکس کانی‌های فلدسپات را با عناصر Si, Al, Ca, Na, Fe نشان داد [۴۰، ۴۱]. برای بررسی تأثیر نسبت حجمی ناحیه انتقال بر خواص بتن در برخی از مطالعات از شبکه‌های عصبی، طراحی آزمایش یا روش‌های طراحی فاکتوریل استفاده شده است [۴۲]. ماسو [۴۳] اذعان دارد تعیین خواص

بخش عمده‌ای از بتن را شن و ماسه تشکیل داده و یافتن جایگزین برای کاهش مصرف سنگ‌دانه‌های معدنی و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست اهمیت پیدا کرده است. امروزه میزان تولید نخاله‌های ساختمانی در آمریکا به حدود ۳۰۰ میلیون تن رسیده است، [۱] اتحادیه اروپا میزان تولید زباله‌های ساختمانی در هر سال را برابر ۹۷۰ میلیون تن، معادل ۲ تن به ازای هر شهروند اعلام کرده است [۲]. صنعت ساخت‌وساز به تنهایی مسئول مصرف بیش از ۵۰٪ از منابع طبیعی، ۴۰٪ از منابع انرژی و تولید ۵۰٪ از زباله‌های موجود در جهان است [۳]. وانگ و همکاران [۴] بیان نمودند که در کشور چین صنعت ساخت‌وساز حدود ۴۰٪ از تمام منابع طبیعی و حدود ۴۰٪ از منابع انرژی را مصرف می‌کند. طی یک قرن اخیر، میزان مصرف مواد و مصالح طبیعی موجود در جهان به ۸ برابر افزایش یافته و سالانه تقریباً ۶۰ میلیارد تن مواد خام موجود در طبیعت مصرف می‌شوند [۵]. در عین حال، مصرف سنگ‌دانه‌های معدنی طبیعی منجر به تخریب محیط زیست شده و بازسازی ساختمان‌های فرسوده باعث کمبود زمین برای تخلیه ضایعات شده است [۶]. با تولید سالانه فولاد در چین، معادل ۷۴۰ میلیون تن سرباره فولاد در سال ۲۰۰۹ تولید گردید [۷]. در حال حاضر، قوانین خاصی برای استفاده از سرباره فولاد به‌عنوان سنگ‌دانه بتن وجود ندارد، اما محققان در حال بررسی مزایای بالقوه آن هستند [۸-۱۰]. سنگ‌دانه‌های بازیافتی با ایجاد دو ناحیه انتقال حاوی ترک‌های ریز، بتن را ضعیف می‌کنند [۱۱، ۱۲]. با کاهش مقاومت بتن مادر، شاخص تخلخل سنگ‌دانه بازیافتی آشکارتر شده و منجر به ضعف بتن بازیافتی می‌شود [۱۳]. به عقیده پدرو و همکاران [۱۴] و ماتایاس و همکاران [۱۵] افزایش جذب در بتن با جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به دلیل ساختار متخلخل و اتصال ناکافی در ناحیه انتقال است [۱۶].

برخی محققان [۱۷، ۱۸] ادعا می‌کنند چون ناحیه انتقال ضعیف‌ترین ناحیه سیستم ریزساختاری است و مکانی برای شروع ترک است، لذا نقش مهمی بر خواص مکانیکی و دوام بتن دارد. از طرف دیگر، برخی از پژوهشگران [۱۹] اظهار داشتند مراجع مختلف استدلال‌های متناقضی را در مورد تأثیر ناحیه انتقال بر خواص بتن ارائه می‌دهند. ضخامت این ناحیه بین ۳۰ تا ۵۰ میکرون متغیر است که به دلیل ترک‌های لایه‌ای منحنی تنش-کرنش غیرخطی

مکانیکی ناحیه انتقال، علیرغم روش‌های تصویربرداری پیشرفته، به دلیل نوسان نسبت کلسیم به سیلیسیم و توزیع هیدروکسید کلسیم، چالش برانگیز است [۴۴]. در این مقاله با توجه به اهمیت و نقشی که ناحیه انتقال در تعیین خواص مکانیکی و عملکرد بلندمدت بتن دارد؛ به بررسی تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی و دوام بتن از طریق مطالعات آزمایشگاهی پرداخته شد. جنبه‌های نوآوری این تحقیق شامل شناخت ریزساختار، فازهای بلوری و عناصر سازنده ناحیه انتقال مخلوط‌های بتن بازیافتی با استفاده همزمان از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و درشت‌دانه‌های سرباره کارخانه فولاد اهواز است. به علاوه معادلات ریاضی برای بررسی فرآیند شکست بتن و رابطه

ریزساختار بتن با خواص مکانیکی و دوام آن نیز ارائه شد. همچنین تأثیر میزان سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و سرباره درشت فولاد و میکروسلیس بر نسبت‌های وزنی و اتمی عناصر و خواص مکانیکی و دوام بتن‌ها بررسی شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق پرتلند نوع ۲ کارون در استان خوزستان است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان نوع ۲ کارون در استان خوزستان

ترکیب	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
درصد	۲۱/۹	۴/۹	۴	۶۴/۶	۳/۹	۰/۷	۰/۳	۰/۹	۰/۴	۰/۴۵

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

نوع سیمان	وزن مخصوص (g/cm ³)	سطح مخصوص (cm ² /g)	گیرش اولیه (دقیقه)	گیرش نهایی (ساعت)	انقباض در آزمایش اتوکلاو
۲	۳/۱	۳۰۰	۳۰	۶	≤ ۰/۸٪

۲-۱-۲- سنگ‌دانه‌ها

۲-۱-۲-۱- سنگ‌دانه‌های درشت مصرفی

سنگ‌دانه‌های درشت با حداکثر اندازه اسمی ۱۹mm و از نوع شکسته از معادن شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه شد. وزن مخصوص و جذب آب آن‌ها در حالت SSD به ترتیب ۲/۶g/cm³ و ۱/۱٪ تعیین گردید. نتایج تجزیه شیمیایی سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی در سه نقطه (P1, P2, P3) مطابق جدول ۳ به دست آمد. همچنین نتایج درصد افت وزنی سنگ‌دانه‌ها در برابر سولفات‌های سدیم و منیزیم به دست آمده [۴۵] و در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

سنگ‌دانه‌های درشت با حداکثر اندازه اسمی ۱۹mm و از نوع شکسته از معادن شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه شد. وزن مخصوص و جذب آب آن‌ها در حالت SSD به ترتیب ۲/۶g/cm³ و ۱/۱٪ تعیین گردید. نتایج تجزیه شیمیایی سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی در سه نقطه (P1, P2, P3) مطابق جدول ۳ به دست آمد. همچنین نتایج درصد افت وزنی سنگ‌دانه‌ها در برابر سولفات‌های سدیم و منیزیم به دست آمده [۴۵] و در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۳- تجزیه شیمیایی سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی

اکسید	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOI
P1	۵۷/۲۳	۲/۰۷	۲/۲۶	۱۹/۴۳	۰/۲۸	۰/۷۲	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۰۶۲	۰/۰۵۷	۱۷/۱
P2	۵۵/۰۱	۱/۸۲	۲/۴۷	۱۸/۹۰	۰/۱۹	۱/۶۶	۰/۴۲	۰/۲۲۶	۰/۰۳۹	۰/۱۷۴	۱۹/۲۲
P3	۵۸/۱۴	۲/۰۴	۲/۳۶	۱۷/۹۳	۰/۳۵	۱/۵۴	۰/۳۹	۰/۲۰۸	۰/۰۴۵	۰/۰۶۷	۱۷/۰۳

جدول ۴- سلامت سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی مصرفی

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	حداکثر مجاز(٪)
افت وزنی آزمایش سلامت با سولفات سدیم (٪)	۰/۳۴	۰/۴۷	۰/۲۱	۰/۱	۰/۲	۰/۴	۱۲
افت وزنی آزمایش سلامت با سولفات منیزیم (٪)	۰/۶۸	۰/۸۴	۰/۴	۰/۲	۰/۴	۰/۷	۱۸

۲-۲-۱-۲- سنگ‌دانه‌های درشت بتن بازیافتی

سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی از سازه فنداسیون مسکن مهر شوشتر به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های درشت با رعایت دانه‌بندی استاندارد، به‌میزان ۲۵٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ استفاده گردید. رده مقاومتی بتن مادر C25 بوده و وزن مخصوص اشباع با سطح خشک سنگ‌دانه‌های درشت بتن بازیافتی 2.2 g/cm^3 و جذب آب ۴/۸٪ به‌دست آمد.

۳-۲-۱-۲- سرباره درشت کارخانه فولاد اهواز

سرباره درشت کارخانه فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی به‌میزان ۲۵٪ و ۵۰٪ استفاده گردیدند. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک سرباره درشت فولاد اهواز 2.8 g/cm^3 و جذب آب ۰/۸٪ به‌دست آمد. مشخصات شیمیایی سرباره فولاد مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است.

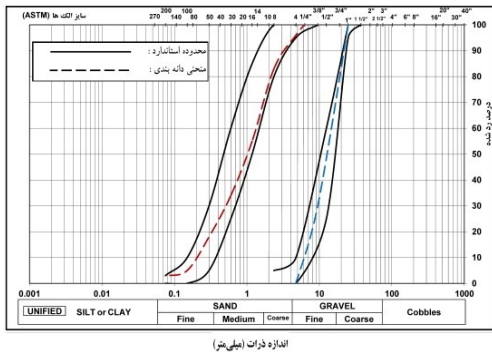
جدول ۵- مشخصات شیمیایی سرباره کارخانه فولاد اهواز

LOI	Na2O	K2O	SO3	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	ترکیب شیمیایی
۱/۲	۰/۲	۰/۳۵	۰/۲۱	۸/۸۲	۳۳/۲۸	۳۳/۲۲	۵/۷۲	۱۸/۱۴	میزان تشکیل‌دهنده (%)

استفاده شد.

۴-۲-۱-۲- سنگ‌دانه‌های ریز مصرفی

وزن مخصوص و جذب آب سنگ‌دانه‌های ریز در حالت SSD به ترتیب 2.56 g/cm^3 و ۱/۲۷٪ تعیین گردید. همچنین هم‌ارز ماسه‌ای آن‌ها نیز ۹۱٪ به‌دست آمد. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در نمودار ۱ ارائه شده است.



نمودار ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ریز و درشت مصرفی

۳-۱-۲- فوق روان کننده:

در این تحقیق از فوق روان کننده استراپلاست N410 بر پایه ترکیبی پلی کربوکسیلات و لیگنوسولفونات مطابق جدول ۶

جدول ۶- مشخصات فوق روان کننده مصرفی

ترکیب شیمیایی	طبیعت یونی	رنگ	pH	حالت فیزیکی	وزن مخصوص (kg/lit)	کلراید (ppm)
پلی کربوکسیلات و لیگنوسولفونات	آنیونی	قهوه‌ای	۶-۸	مایع	۱/۰۷	فاقد یون کلر

۴-۱-۲- آب مصرفی

آب شرب شهر اهواز برای ساخت و عمل‌آوری بتن استفاده شد. مشخصات شیمیایی آن در جدول ۷ داده شده است.

۳- آزمایش‌ها

۱-۳- آزمایش‌های بتن تازه

۱-۱-۳- آزمایش اسلامپ بتن

اسلامپ بر اساس ASTM C143/C143M-07 [۴۶] انجام شد.

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

برای رسیدن به اهداف تحقیق، با استفاده از روش تاگوچی از بین ۲۱ طرح اختلاط مقدماتی ۱۰ طرح انتخاب و ساخته شدند. جزئیات

جدول ۷- مشخصات شیمیایی آب شرب اهواز مصرفی در تحقیق

عنصر	CaCO3	So4	Cr+	Na+	K+	Ca ²⁺	Mg	pH
mg/lit	۳۶۰۰۰	۳۸۴	۴۱۶	۲۲	<۱	۸۰۰۰	۲۹۰۰	۷/۱۳

جدول ۸- جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق و نتایج آزمایش اسلامپ

نشانه طرح	سیمان Kg/m ³	آب Kg/m ³	ریزدانه Kg/m ³	درشت‌دانه Kg/m ³	درشت‌دانه بازیافتی Kg/m ³	سربراره درشت Kg/m ³	میکرو سیلیس Kg/m ³	فوق روان کننده Kg/m ³	افت بتن cm
RC0Fs0Sf0	۳۵۰	۱۷۹	۹۷۱	۸۷۲	۰	۰	۰	۱/۸	۱۰
RC0Fs25Sf5	۳۳۲	۱۷۹	۹۷۱	۶۵۴	۰	۲۱۸	۱۸	۱/۸	۹
RC0Fs50Sf5	۳۳۲	۱۷۹	۹۷۱	۴۳۶	۰	۴۳۶	۱۸	۴/۲	۹
RC25Fs0Sf5	۳۳۲	۱۷۹	۹۷۱	۶۵۴	۲۱۸	۰	۱۸	۴/۲	۵
RC25Fs25Sf5	۳۳۲	۱۷۹	۹۷۱	۴۳۶	۲۱۸	۲۱۸	۱۸	۴/۲	۴
RC25Fs50MSf10	۳۱۵	۱۷۹	۹۷۱	۲۱۸	۲۱۸	۴۳۶	۳۵	۴/۲	۴
RC50Fs0Sf5	۳۳۲	۱۷۹	۹۷۱	۴۳۶	۴۳۶	۰	۱۸	۴/۲	۳
RC50Fs25Sf10	۳۱۵	۱۷۹	۹۷۱	۲۱۸	۴۳۶	۲۱۸	۳۵	۴/۲	۳
RC50Fs50Sf10	۳۱۵	۱۷۹	۹۷۱	۰	۴۳۶	۴۳۶	۳۵	۴/۶	۳
RC100Fs0Sf10	۳۱۵	۱۷۹	۹۷۱	۰	۸۷۲	۰	۳۵	۴/۲	۲

جدول ۹- آزمایش‌ها و مشخصات نمونه‌ها

نام آزمایش	نام استاندارد	شکل و ابعاد نمونه	تعداد
مقاومت فشاری	116 BS1881:Part	مکعبی استاندارد	۱۲۰
ضریب ارتجاعی استاتیکی	C469 ASTM	استوآن‌های استاندارد	۶۰
جذب آب غوطه‌وری نیم ساعته	BS1881:Part122	مغزه ۳ اینچی استاندارد	۳۰
جذب آب غوطه‌وری بلندمدت	ASTM C642	مکعبی استاندارد	۳۰
دوام	EN BS12930-8	مکعبی استاندارد	۳۰
نفوذ آب تحت فشار	C1202 ASTM	مکعبی استاندارد	۶۰
نفوذ تسریع شده یون کلراید	AASHTO T398	مکعبی استاندارد	۶۰
مقاومت الکتریکی			
روش پراش اشعه ایکس (XRD)		مکعب به ابعاد ۱۰mm	۶۰
تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی (SEM)		مکعب به ابعاد ۱۰mm	۱۲۰
طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس (EDS)		مکعب به ابعاد ۱۰mm	۱۲۰

۳-۱-۲- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

۳-۲-۲- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

وزن مخصوص بر مبنای استاندارد ASTM C138 [۴۷] انجام شد. آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن طبق برنامه آزمایشگاهی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد.

۳-۲-۳- آزمایش‌های بتن سخت شده

۳-۲-۳- آزمایش جذب آب غوطه‌وری

۳-۲-۱- وزن مخصوص و مقاومت فشاری بتن سخت شده
برای بررسی کیفیت سطحی بتن آزمایش جذب آب غوطه‌وری نیم‌ساعته برای سن ۲۸ روزه انجام گرفت. جذب آب نیم‌ساعته بتن پیش‌ساخته نباید از ۲٪ بیشتر باشد [۴۸]. در کمیته بتن برای مناطق حاشیه خلیج فارس، حداکثر جذب آب کوتاه‌مدت ۲٪ توصیه [۴۹] شد.

۳-۲-۲- تحلیل تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی و

طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس

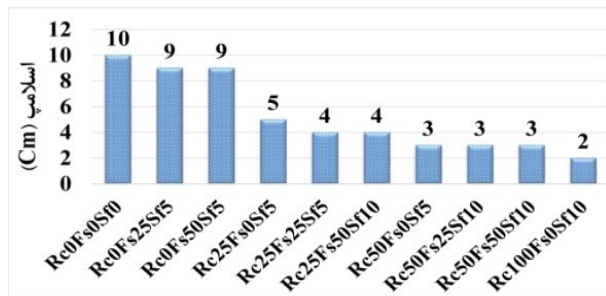
در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه علاوه بر تهیه تصاویر از سطح نمونه با ریزنگار الکترونی روبشی نوع TESCAN Vega II، تحلیل EDS روش خطی برای عناصر Si, Ca, Fe, Al و O انجام گرفت.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- ارائه و تفسیر نتایج رئولوژی بتن

۴-۱-۱- اسلامپ بتن تازه

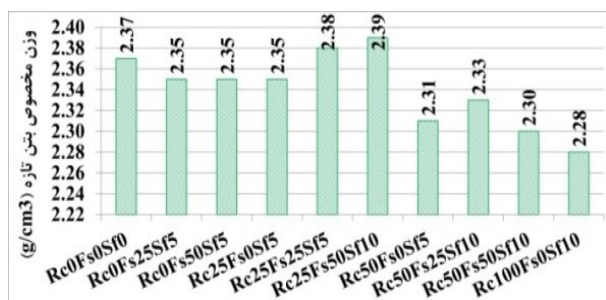
نتایج اسلامپ مخلوط‌های بتنی در نمودار ۲ آمده است.



نمودار ۲- تغییرات اسلامپ در طرح‌های اختلاط تحقیق

۴-۱-۲- وزن مخصوص بتن تازه

در این تحقیق وزن مخصوص بتن تازه بر مبنای استاندارد ASTM C138 به دست آمده و نتایج در نمودار ۳ ارائه شده است.



نمودار ۳- تغییرات وزن مخصوص بتن تازه در طرح‌های اختلاط

۴-۲- مقاومت فشاری بتن سخت شده

آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه بر اساس استاندارد BS1881:Part116 انجام شده است. نتایج مقاومت فشاری و وزن مخصوص در جدول ۱۲ ارائه شده است.

و مطابق آیین‌نامه پایایی در جدول ۱۰ ارائه شده است. علاوه بر جذب آب نیم‌ساعته، جذب آب بلندمدت در نمونه‌های مکعبی ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه بر اساس ASTM C642 تعیین شد. درصد مجاز جذب آب بلندمدت در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول ۱۰- مقادیر مجاز درصد جذب آب نیم‌ساعته [۵۰]

شرایط محیطی	A	B و C	D, E و F
جذب آب (%)	≤ ۴	≤ ۳	≤ ۲

جدول ۱۱- درصد مجاز جذب آب بلندمدت در شرایط محیطی

مختلف [۵۱]

شرایط محیطی	A	B و C	D	E و F
حداکثر جذب آب بلندمدت (%)	۶	۵	۴	۳/۵

۳-۲-۴- آزمایش تعیین نفوذ آب تحت فشار

آزمایش تعیین نفوذ آب مطابق استاندارد EN BS12930 [۵۲] انجام گرفت. همچنین میزان نفوذپذیری در برابر یون کلراید بر اساس میزان جریان عبوری [۵۳] بررسی شد.

۳-۲-۵- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

نمونه‌های مکعبی سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بر اساس استاندارد ASTM C470 آزمایش شده‌اند. احتمال خوردگی میلگرد [۵۴] و کیفیت بتن بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی [۵۵] بررسی گردیدند.

۳-۲-۶- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۵۶] انجام گرفت.

۳-۲-۷- مطالعات ریزساختاری مخلوط‌های بتنی

۳-۲-۷-۱- تحلیل فازها و بلورها

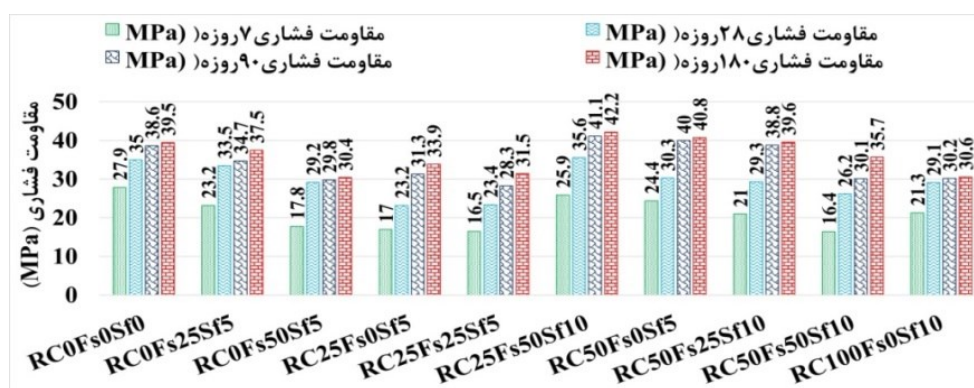
تحلیل‌های XRD با نرم افزار X'Pert high score plus بر روی نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی دانشگاه صنعتی اصفهان انجام شد. از طبقه‌بندی تراگارده [۵۷] و اردیم و همکارن [۵۸] برای تشخیص هیدرات‌های غنی از CSH و CH و AFm استفاده شد.

جدول ۱۲- وزن مخصوص و مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه

وزن مخصوص بتن سخت شده (g/cm ³)	مقاومت فشاری (MPa)				کد طرح
	سن نمونه (روز)				
	۱۸۰	۹۰	۲۸	۷	
۲/۳۳	۳۹/۵	۳۸/۶	۳۵	۲۷/۹	RC0Fs0Sf0
۲/۳۲	۳۷/۵	۳۴/۷	۳۳/۵	۲۳/۲	RC0Fs25Sf5
۲/۳۳	۳۰/۴	۲۹/۸	۲۹/۲	۱۷/۸	RC0Fs50Sf5
۲/۳۲	۳۳/۹	۳۱/۳	۲۳/۲	۱۷	RC25Fs0Sf5
۲/۳۴	۳۱/۵	۲۸/۳	۲۳/۴	۱۶/۵	RC25Fs25Sf5
۲/۳۵	۴۲/۲	۴۱/۱	۳۵/۶	۲۵/۹	RC25Fs50Sf10
۲/۳۱	۴۰/۸	۴۰	۳۰/۳	۲۴/۴	RC ₅₀ Fs ₀ Sf ₅
۲/۳۱	۳۹/۶	۳۸/۸	۲۹/۳	۲۱	RC ₅₀ Fs ₂₅ Sf ₁₀
۲/۲۹	۳۵/۷	۳۰/۱	۲۶/۲	۱۶/۴	RC ₅₀ Fs ₅₀ Sf ₁₀
۲/۲۸	۳۰/۶	۳۰/۲	۲۹/۱	۲۱/۳	RC ₁₀₀ Fs ₀ Sf ₁₀

سرباره است؛ همچنین محتوای بالای اکسید آهن به اثرات تاخیری کمک می‌کند. در مخلوط‌های بتنی حاوی همزمان سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی و سرباره درشت فولاد با افزودن ۱۰٪ میکروسیلیس، مقاومت فشاری بهبود یافته است. طرح RC25Fs50Sf10 به دلیل افزایش چسبندگی و اصطکاک، بیشترین افزایش مقاومت را به میزان ۲۱٪ داشت. این یافته‌ها می‌تواند به بهینه‌سازی مخلوط‌های بتن با سرباره فولاد کمک کند. تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی محدوده سنی ۷ تا ۱۸۰ روزه در نمودار ۴ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره به ترتیب به میزان ۱۰۰٪ و ۵۰٪، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بطور مشابه معادل ۱۶/۷٪ کاهش یافته است. این کاهش مقاومت ناشی از ناحیه انتقال ضعیف در سنگ‌دانه‌های بازیافتی، شکل نامنظم و عدم درهم‌تنیدگی مکانیکی سرباره فولاد، حفرات ناشی از دانه‌بندی نامناسب است. با جایگزینی ۲۵ درصد سرباره فولاد به جای سنگ‌دانه‌های درشت طبیعی، مقاومت فشاری در ۱۸۰ روزه ۷ درصد نسبت به مقاومت هدف افزایش یافت. این افزایش به دلیل واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و سیلیس فعال در

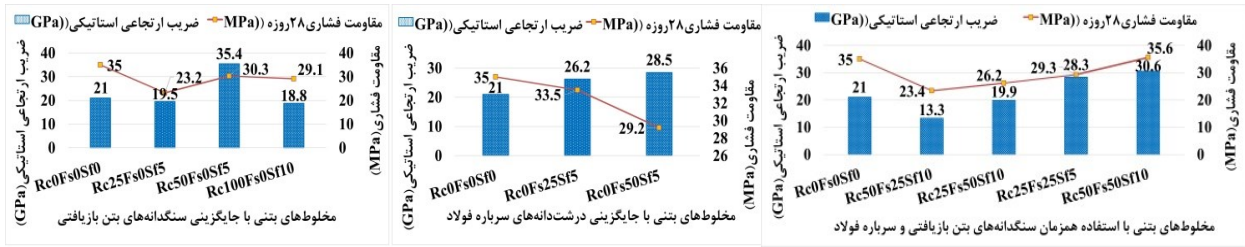


نمودار ۴- مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در محدوده سنی ۷ تا ۱۸۰ روزه

۳-۴- ضریب ارتجاعی استاتیکی

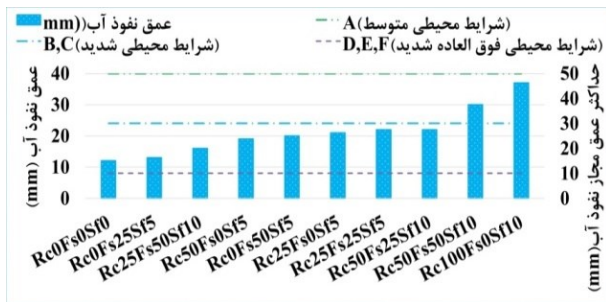
ضریب ارتجاعی، مقاومت فشاری ۵۲٪ رشد داشته است نمودارهای ۵ نتایج مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی را در ۲۸ سن روزه نشان می‌دهند.

مخلوط‌های بتنی حاوی سرباره فولاد مقاومت فشاری بهبود یافته را با افزایش ضریب ارتجاعی نشان داد که با افزایش ۲/۳ برابری



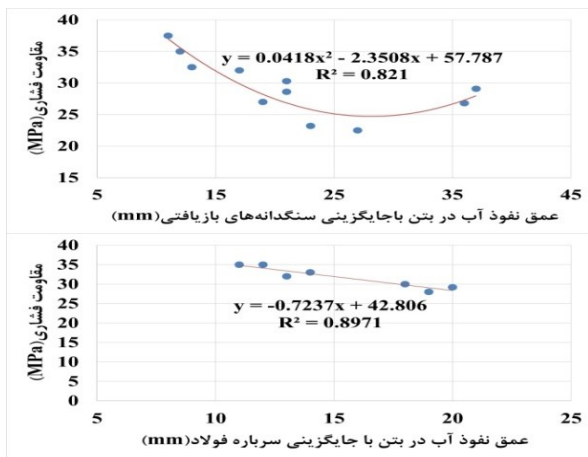
نمودار ۵- تغییرات ضریب ارتجاعی و مقاومت فشاری بتن بازیافتی در سن ۲۸ روزه

به دست آمد. عمق نفوذ آب نمونه‌ها در نمودار ۸ ارائه شده است.



نمودار ۸- عمق نفوذ آب مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روزه

همبستگی بین مقاومت فشاری و نفوذ آب، با روابط چند جمله‌ای و خطی در مخلوط با سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد مشاهده شد. نمودارهای ۹ و ۱۰ روابط در بتن ۲۸ روزه نشان می‌دهند. عمق نفوذ آب با مقاومت فشاری رابطه چند جمله‌ای درجه دو با ضریب تعیین ۰/۶۵ برقرار شد، به طوری که با کاهش عمق نفوذ به میزان ۶۷٪، مقاومت فشاری ۲۰٪ رشد پیدا کرده است.



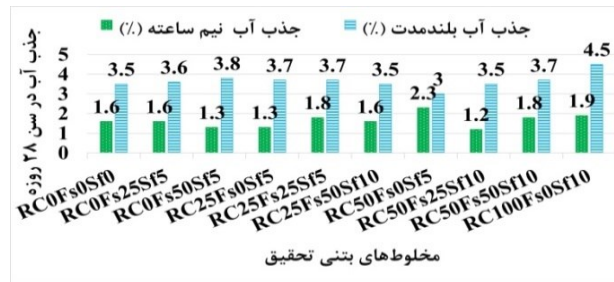
نمودار ۹- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب عمق نفوذ آب

۴-۶- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید و خواص بتن در جدول ۱۳ ارائه شده است. مطالعات نشان می‌دهد که جریان الکتریکی

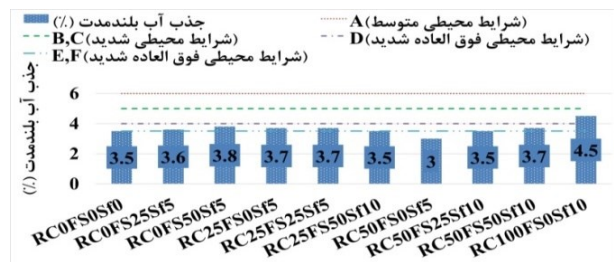
۴-۴- جذب آب غوطه‌وری

نتایج جذب آب نیم‌ساعته همگی طرح‌ها به جزء RC50Fs0Sf5 کمتر از ۲٪ بوده و در طبقه‌بندی فوق‌العاده شدید قرار دارند. جذب آب بلندمدت، مخلوط‌های بتن بر اساس دسته‌بندی کیفی CEB-FIP [۵۹] در گروه متوسط (۳-۵٪) است. نمودار ۶ نتایج جذب آب در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهد.



نمودار ۶- جذب آب نیم‌ساعته و بلندمدت مخلوط‌های بتنی

در چارچوب استاندارد ASTM C642 تمام مخلوط‌های بتنی تحقیق به جزء طرح RC100Fs0Sf10 در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید طبقه‌بندی شدند. نتایج جذب آب بلندمدت و طبقه‌بندی آن‌ها در نمودار ۷ ارائه شده است.



نمودار ۷- طبقه‌بندی مخلوط‌های بتنی بر مبنای جذب آب بلندمدت

۴-۵- عمق نفوذ آب تحت فشار

عمق نفوذ آب سایر نمونه‌ها از طرح مرجع بالاتر بوده و بیشترین نفوذ آب مربوط به طرح RC100Fs0Sf10 معادل ۳۷ میلی‌متر

می تواند در بتن کاملاً بازیافتی در مقایسه با بتن مرجع افزایش یابد [۶۰]. حداکثر نفوذ یون کلرید در بتن کاملاً بازیافتی ۳/۷ برابر از مواد بازیافتی است. بیشتر از بتن مرجع است که نشان دهنده چالش های بالقوه در استفاده

جدول ۱۳- مقایسه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید با نتایج آزمایش مخلوط های بتنی ۲۸ روزه

نمونه	مقاومت ویژه الکتریکی ($\Omega.m$)	عمق نفوذ آب (mm)	جذب آب بلندمدت (درصد)	وزن مخصوص (g/cm^3)	مقاومت فشاری (MPa)	نمونه
RC ₀ FS ₀ Sf ₀	۳۶۰	۱۲	۳/۵	۲/۳۳	۳۵	۷۷۰
RC ₀ FS ₂₅ Sf ₅	۳۱۰	۱۳	۳/۶	۲/۳۲	۳۳/۵	۱۳۲۶
RC ₀ FS ₅₀ Sf ₅	۲۶۰	۲۰	۳/۸	۲/۳۳	۲۹/۲	۸۹۶
RC ₂₅ FS ₀ Sf ₅	۲۳۰	۲۱	۳/۷	۲/۳۲	۲۳/۲	۷۱۷
RC ₂₅ FS ₂₅ Sf ₅	۱۸۰	۲۲	۳/۷	۲/۳۴	۲۳/۴	۱۲۸۵
RC ₂₅ FS ₅₀ Sf ₁₀	۲۰۰	۱۶	۳/۵	۲/۳۵	۳۵/۶	۱۱۹۰
RC ₅₀ FS ₀ Sf ₅	۱۸۰	۱۹	۳	۲/۳۱	۳۰/۳	۱۰۳۰
RC ₅₀ FS ₂₅ Sf ₁₀	۱۵۰	۲۲	۳/۵	۲/۳۱	۲۹/۳	۲۱۸۱
RC ₅₀ FS ₅₀ Sf ₁₀	۱۲۰	۳۰	۳/۷	۲/۲۹	۲۶/۲	۲۳۲۵
RC ₁₀₀ FS ₀ Sf ₁₀	۱۰۰	۳۷	۴/۵	۲/۲۸	۲۹/۱	۲۸۵۴

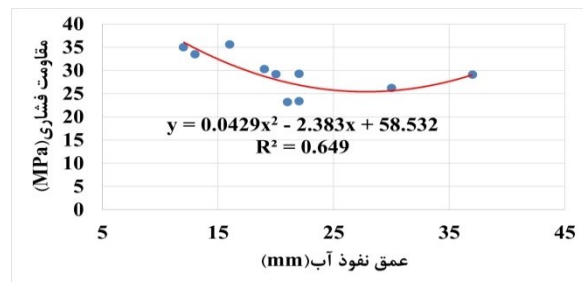
۴-۷- مقاومت ویژه الکتریکی

بتن با سنگ دانه های بازیافتی و سرباره فولاد دارای روابط خطی بین مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت فشاری است. همبستگی بالا در نمودار ۱۲ نشان داده شده است. بر مبنای استاندارد [۵۵]، خطر خوردگی آرماتور در نمونه ها به جزء طرح Rc100Fs0Sf10 ناچیز و کم است. علاوه بر آن طبق نمودار ۱۳ مقاومت ویژه الکتریکی دارای روابط توانی و چندجمله ای درجه دو به ترتیب با عمق نفوذ آب و نفوذ یون کلراید در بتن ۲۸ روزه داشته است.

۴-۸- تحلیل ریزساختار بتن های بازیافتی

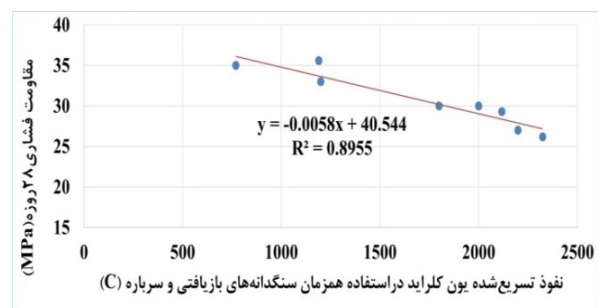
۴-۸-۱- تحلیل ریزساختار بتن های بازیافتی با طیف سنجی XRD

فازهای سازنده ناحیه انتقال با نرم افزار Xpert High Score Plus شناسایی شد. بین شدت قله های این فازها با مقاومت فشاری بتن ۹۰ روزه رابطه خطی وجود دارد. نتایج در جدول ۱۴ و نمودارهای ۱۴ و ۱۵ ارائه شده است. همچنین رابطه مستقیمی بین شدت قله های CSH، SiO₂، CaCO₃ و مقاومت فشاری پیدا شد که به خاصیت چسبندگی سیلیکات کلسیم هیدراته، چگالی ریزساختار و خواص پرکننده اکسید سیلیسیم پوزولانی و کربنات



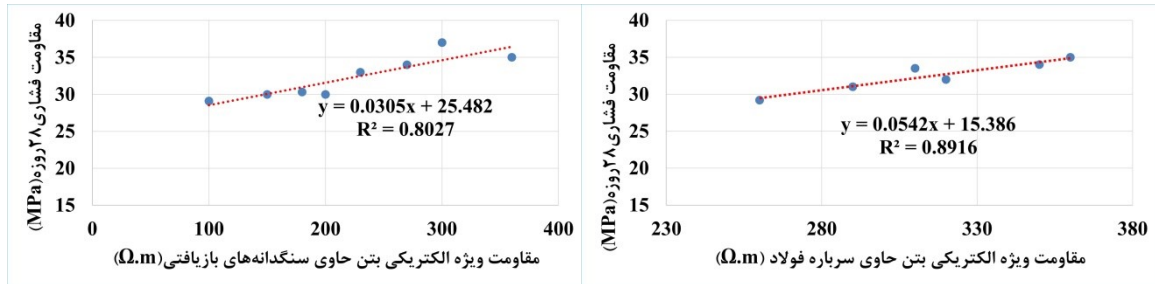
نمودار ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری طرح اختلاط های تحقیق بر حسب عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روزه

نمودار ۱۱ همبستگی بین نفوذ یون کلرید و مقاومت فشاری در بتن را نشان می دهد. به طوری که با کاهش ۶۷٪ نفوذ یون کلراید، میزان مقاومت فشاری بالای ۲۵ مگاپاسکال معادل ۳۳/۶٪ افزایش یافته است.

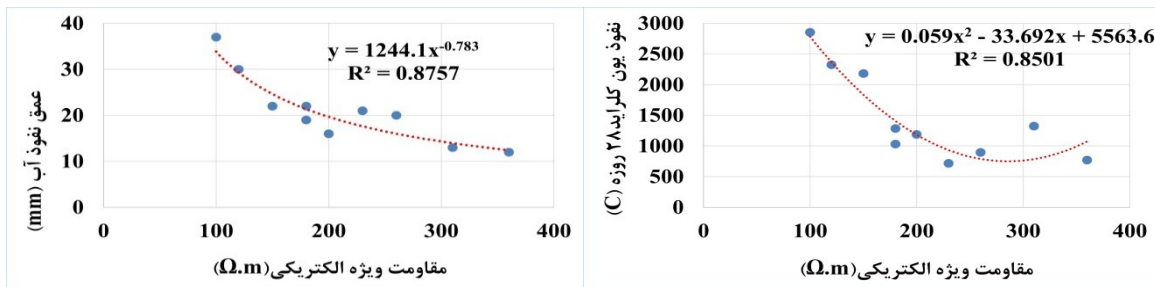


نمودار ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب نفوذ یون کلراید

کلسیم نسبت داده می‌شود. تشکیل فاز اترینگایت تحت تأثیر واکنش اکسید کلسیم، اکسید آلومینیوم و سولفات کلسیم است. در تائید این ادعا، تاسونگ و الکساندر [۳۶، ۶۱] اذعان دارند که بهبود ناحیه انتقال به بهبود خواص مکانیکی بتن می‌انجامد. شدت قله‌های CH، CSH و تأثیر گذاری بر مقاومت فشاری بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در نمودار ۱۶ ارائه شده است.



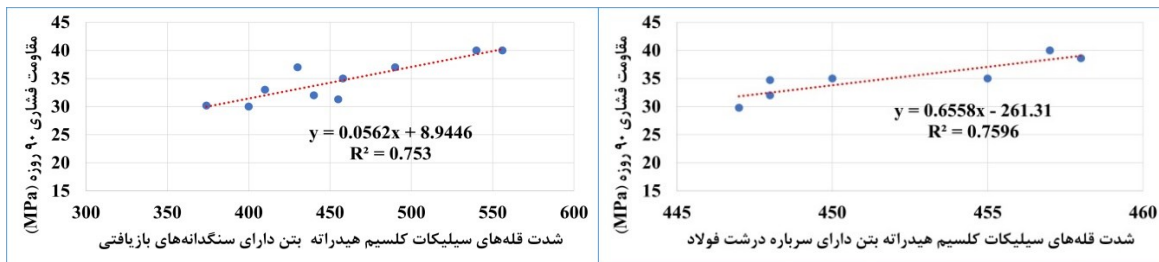
نمودار ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد بر حسب مقاومت ویژه الکتریکی



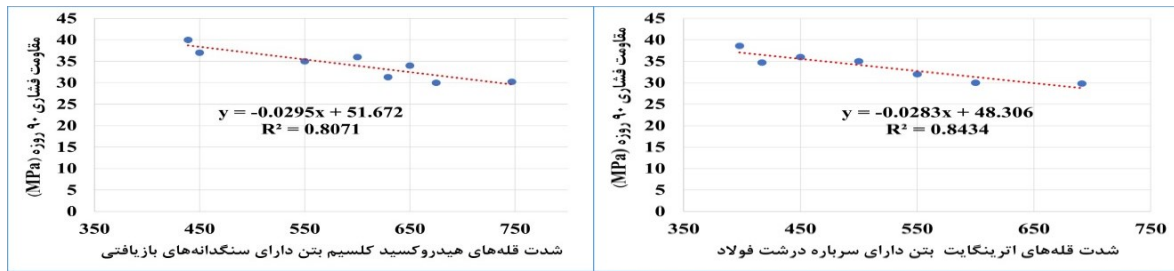
نمودار ۱۳- تغییرات عمق نفوذ آب و نفوذ تسریع شده یون کلراید بر حسب مقاومت ویژه الکتریکی در سن ۲۸ روزه

جدول ۱۴- شدت قله‌های محصولات هیدراتاسیون نمونه‌های بتنی در سن ۹۰ روزه

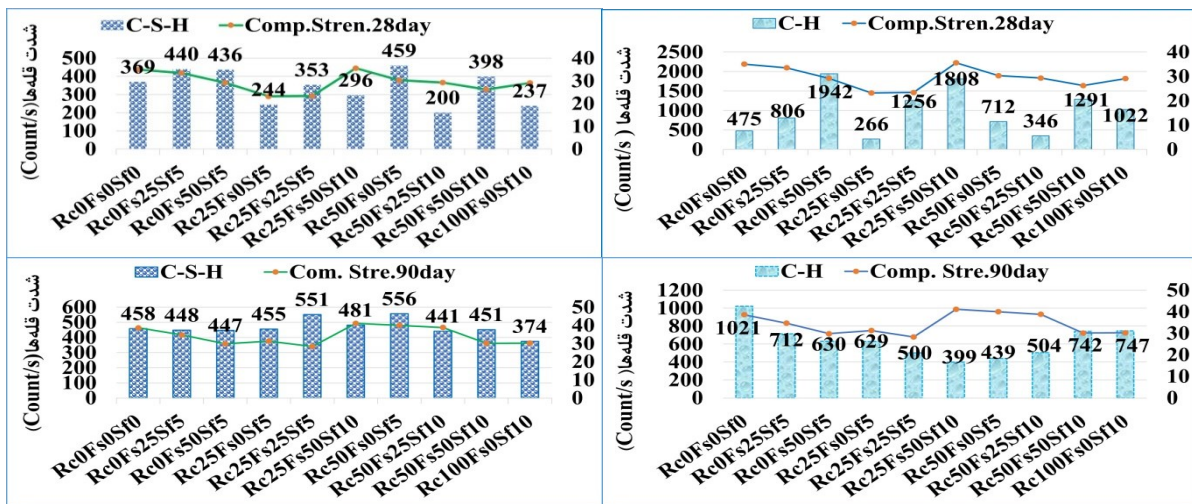
ردیف	عنوان طرح	C-H	C-S-H	CaO	SiO ₂	CaCO ₃	Ettringite	CS at 90 days
۱	Rc ₀ Fs ₀ Sf ₀	۱۰۲۱	۴۵۸	۶۹۵	۱۵۱۲	۱۴۴۳	۳۹۸	۳۸/۶
۲	Rc ₀ Fs ₂₅ Sf ₅	۷۱۲	۴۴۸	۱۲۴	۱۵۱۵	۴۰۲	۴۱۷	۳۴/۷
۳	Rc ₀ Fs ₅₀ Sf ₅	۶۳۰	۴۴۷	۳۸۱	۱۴۱۳	۲۴۹	۶۹۱	۲۹/۸
۴	Rc ₂₅ Fs ₀ Sf ₅	۶۲۹	۴۵۵	۴۷۶	۸۶۵	۷۳۸	۶۲۶	۳۱/۳
۵	Rc ₂₅ Fs ₂₅ Sf ₅	۵۰۰	۵۵۱	۲۹۳	۸۱۰	۸۰۰	۴۳۴	۲۸/۳
۶	Rc ₂₅ Fs ₅₀ Sf ₁₀	۳۹۹	۴۸۱	۸۹	۱۴۰۸	۸۲۱	۷۷۸	۴۱/۱
۷	Rc ₅₀ Fs ₀ Sf ₅	۴۳۹	۵۵۶	۳۰۷	۱۳۵۸	۱۱۹۲	۸۹۹	۴۰
۸	Rc ₅₀ Fs ₂₅ Sf ₁₀	۵۰۴	۴۴۱	۲۳۷	۱۵۴۷	۹۲۰	۵۱۹	۳۸/۸
۹	Rc ₅₀ Fs ₅₀ Sf ₁₀	۷۴۲	۴۵۱	۶۰۷	۱۱۲۷	۷۴۹	۸۰۵	۳۰/۱
۱۰	Rc ₁₀₀ Fs ₀ Sf ₁₀	۷۴۷	۳۷۴	۶۴۲	۱۲۱۸	۸۴۵	۷۹۹	۳۰/۲



نمودار ۱۴- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب شدت قله‌های CSH در سن ۹۰ روزه



نمودار ۱۵- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب شدت قله‌های CH و اترینگایت در سن ۹۰ روزه



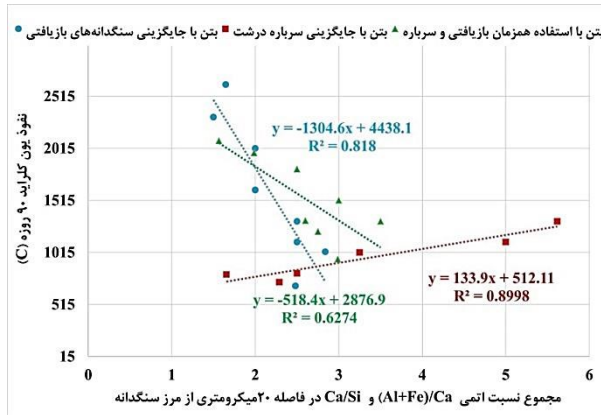
نمودار ۱۶- شدت قله‌های CH، CSH و مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

۴-۸-۲- تحلیل ریزساختار بتن باز یافتی با طیف‌سنجی SEM و تصاویر EDS
 ۵۰ و ۲۸ روزه بررسی شد. تغییرات در نسبت Ca/Si تا فاصله ۵۰ میکرومتر از مرز سنگ‌دانه مشاهده شد که بر مقاومت فشاری در سنین مختلف تأثیر گذاشت. نتایج در جدول ۱۵ ارائه شده است. تأثیر نسبت‌های اتمی عناصر ناحیه انتقال بر خواص بتن سنین

جدول ۱۵- نسبت‌های اتمی Ca/Si و مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی تحقیق

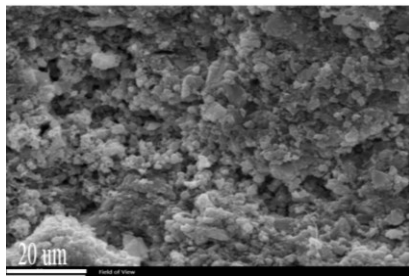
مقاومت فشاری (MPa)	فاصله از مرز سنگ‌دانه (μm)												
	۵۰		۴۰		۳۰		۲۰		۱۰		سن نمونه (روز)		
۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	۹۰	۲۸	۲۸	گروه یک
۳۱/۳	۲۳/۲	۰/۸۲	۱/۸۸	۲/۱۸	۲/۴۲	۲/۰۸	۲/۵۳	۲/۲۲	۳/۰۷	۱/۷۳	۲/۵۴	Rc25Fs0Ms5	
۴۰	۳۰/۳	۱/۶۷	۲/۲۲	۱/۵۳	۲/۶۹	۱/۷۷	۳/۳۲	۲/۷۳	۸/۰۱	۳/۸۲	۴/۲۶	Rc50Fs0Ms5	
۳۰/۲	۲۹/۱	۱/۳۶	۲/۱۸	۱/۶۹	۱/۷۰	۱/۸	۱/۴۴	۱/۴۹	۱/۵۹	۱/۶۶	۱۲/۸۸	Rc100Fs0Ms10	
۳۸/۶	۳۵	۱/۰۹	۴/۰۶	۱/۴۸	۶/۱۶	۳/۲۸	۲/۷۱	۲/۱۳	۲/۰۳	۲/۱۸	۱/۴۴	Rc0Fs0Ms0	گروه دو
۳۴/۷	۳۳/۵	۱/۹۳	۲/۷۱	۵/۶۶	۲/۳۷	۱/۲۸	۲/۶۵	۲/۴۲	۲/۲۸	۲/۹۰	۱/۸۳	Rc0Fs25Ms5	
۲۹/۸	۲۹/۲	۱/۴۱	۰/۵۵	۱/۳۳	۰/۸۳	۱/۳۲	۱/۲۳	۱/۴۶	۰/۵۷	۱/۴۸	۰/۷۶	Rc0Fs50Ms5	
۲۸/۳	۲۳/۴	۰/۴۰	۵/۱۳	۱/۰۷	۴/۷۷	۱/۰۵	۲/۰۵	۰/۹۹	۲/۱۸	۲/۵۹	۱/۱۹	Rc25Fs25Ms5	گروه سه
۴۱/۱	۳۵/۶	۱/۱۵	۱/۷۸	۰/۹۷	۱/۵۸	۰/۹۲	۱/۶۳	۱/۲۱	۲/۱۳	۱/۲۲	۱/۶۲	Rc25Fs50Ms10	
۳۸/۸	۲۹/۳	۱/۶۷	۰/۴۳	۱/۲۲	۱/۷۸	۱/۴۶	۲/۸۲	۱/۷۲	۲/۰۲	۱/۱۹	۰/۸۳	Rc50Fs25Ms10	
۳۰/۱	۲۶/۲	۱/۳	۴/۱۵	۱/۳۷	۳/۱۲	۱/۴۳	۲/۲۵	۱/۲۱	۳/۴۴	۱/۴۳	۴/۰۱	Rc50Fs50Ms10	

سنگ‌دانه‌های بازیافتی و استفاده همزمان بازیافتی و سرباره نشان داد. در جایگزینی سرباره درشت رابطه خطی مستقیم با ضریب ۰/۹۰ برقرار شد. معادلات در نمودار ۱۸ ارائه شده است.



نمودار ۱۸- تغییرات نفوذ تسریع شده یون کلراید بر حسب نسبت اتمی $(Al+Fe)/Ca$ و Ca/Si مخلوط‌های بتنی ۹۰ روزه

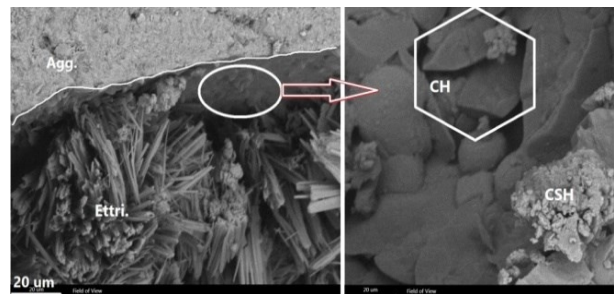
وجود حفره‌های بسته و محدود در ماتریس متراکم عبور و نفوذ یون کلراید را کاهش می‌دهد و دوام را بهبود می‌بخشد. تبلور بیش از حد CH در منافذ بر انبساط ریزساختار تأثیر گذاشته و به طور بالقوه عملکرد بتن را کاهش می‌دهد. این پدیده در شکل ۲ نشان داده شده است و بر اهمیت ماتریس خمیر سیمان کاملاً فشرده برای خواص مکانیکی و دوام بهینه تأکید دارد.



شکل ۲- توسعه فضایی حفرات بسته و محبوس ماتریس سیمانی مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روزه

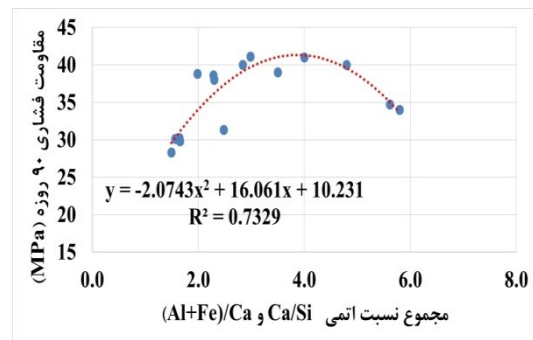
در این تحقیق مطابق شکل ۳ و ۴ توده‌های برجسته و ذرات شکسته و جدا شده همگی نشان از ترد شدن ماتریس در اثر تقویتی همزمان میکروسیلیس و واکنش پوزولانی سطح تماس سرباره دارند. در تأیید این ادعا صدرمنازی و همکاران [۶۳] معتقدند مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس دارای سطح یکنواخت و هموارتری هستند، همچنین ناحیه انتقال این مخلوط‌ها دارای پیوند و چسبندگی بهتری به خمیر و سنگ‌دانه‌ها است، به طوری که

در مرز سنگ‌دانه‌ها، میانگین نسبت وزنی Ca/Si به میزان ۵/۵ و نسبت S/Ca بیش از ۰/۲ به دست آمد که بیانگر نسبت بالای اترینگایت و مونوسولفات به‌ویژه در نمونه‌های دارای سرباره فولاد است و این پدیده در طیف‌سنجی XRD نیز مشاهده شد. نسبت Ca/Si در مرز سنگ‌دانه‌ها در بتن ۹۰ روزه در مقایسه با ۲۸ روز بیشتر است، که نشان دهنده حضور بلورهای CH و اترینگایت در مجاورت سنگ‌دانه‌ها است که با گذشت زمان کاهش می‌یابد. یافته‌ها با تحقیق وارگاس و همکاران [۶۲] در مورد نقش ناحیه انتقال در توسعه مقاومت فشاری همسو هستند. رسوب‌گذاری بلورها در تصاویر SEM شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- رسوب‌گذاری CH شش‌وجهی و اترینگایت سوزنی در مجاورت سنگ‌دانه بتن معمولی ۹۰ روزه

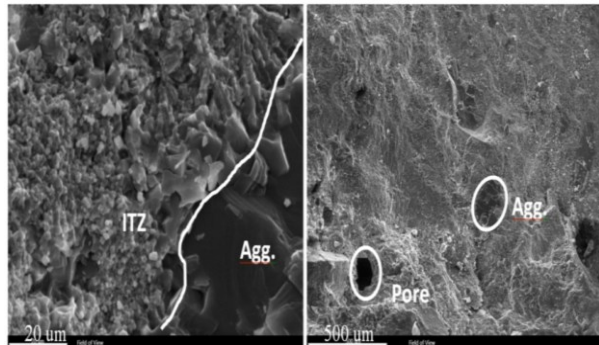
در تحلیل نتایج ارتباط قوی بین نسبت‌های اتمی Ca/Si و $(Al+Fe)/Ca$ با مقاومت فشاری در ۲۰ میکرومتر از مرز سنگ‌دانه به صورت معادله چند جمله‌ای با ضریب ۰/۷۳ یافته شد. مطابق نمودار ۱۷ با افزایش نسبت‌ها تا میزان ۳/۸۷، مقاومت فشاری افزایش و سپس کاهش می‌شود.



نمودار ۱۷- تغییرات مقاومت فشاری بر حسب نسبت اتمی Ca/Si و $(Al+Fe)/Ca$ مخلوط‌های بتنی ۹۰ روزه

بررسی تأثیر نسبت عناصر بر نفوذ تسریع شده یون کلراید، روابط خطی معکوس با ضرایب ۰/۸۲ و ۰/۶۳ به ترتیب در جایگزینی

ساختار ژل C-S-H فشرده تر و مقدار هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ITZ متراکم تر می‌شود و ریزترک‌ها به تدریج کاهش می‌یابند. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشخص است، ساختار منافذ (پیچ خوردگی و انقباض یا حفرات بسته) در طرح دارای سرباره درشت فولاد به دلیل افزودن میکروسیلیس و عملکرد سریع فرآیند هیدراتاسیون بهبود یافته است. میکروسیلیس با CH موجود در ناحیه انتقال واکنش داده و با تولید الیاف CSH و آلومینات کلسیم هیدراته، باعث بهبود ناحیه انتقال شده است.

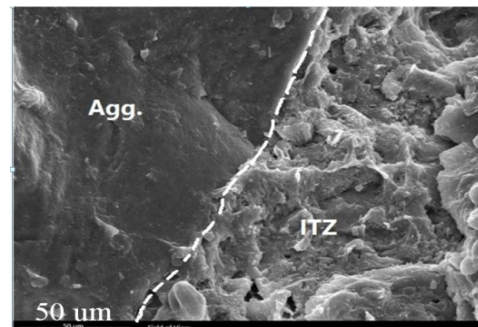


شکل ۴- تصویر ریزنگار الکترونی روبشی از ITZ طرح

Rc0Fs50Sf5

همان‌طور که در جدول ۱۶ مشخص است بررسی و اندازه‌گیری چگالی ترک با نرم‌افزار Image J در ناحیه انتقال مخلوط‌های بتنی نشان داد که آسیب رخ داده در ITZ بتن با استفاده همزمان از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره درشت و همچنین بتن با جایگزینی کامل سنگ‌دانه‌های بازیافتی به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در مقایسه با بتن سنگ‌دانه طبیعی گسترده‌تر بود؛ همان‌طور که توسط آکوگلو و همکاران [۶۵] برجسته شده است.

شکل ۳- ترد شدگی ماتریس سیمانی در ناحیه انتقال طرح RC50Fs0Sf5 در سن ۲۸ روزه



شکل ۳- ترد شدگی ماتریس سیمانی در ناحیه انتقال طرح

RC50Fs0Sf5 در سن ۲۸ روزه

به‌طور مشابه موناگا و همکاران [۶۴] معتقدند که ذرات آزاد سرباره فولاد به‌عنوان مکان‌های هسته‌زایی برای رسوب‌گذاری CH عمل

جدول ۱۶- چگالی ریزترک‌های ناحیه انتقال مخلوط‌های بتنی تحقیق

عنوان طرح	طول ترک (μm)	بازشدگی ترک (μm)	سطح ترک خورده (μm ²)	چگالی ترک خوردگی (۱/μm)
Rc0Fs0Sf0	۲۵۴	۱	۱۲۶۰۰	۰/۰۲
Rc0Fs25 Sf 5	۵۵۶	۲/۶	۱۸۰۰۰	۰/۰۳
Rc0Fs50 Sf 5	۸۵	۰/۸	۹۴۵۰	۰/۰۱
Rc25Fs0 Sf 5	۲۳۰	۰/۵	۷۹۰۰	۰/۰۳
Rc25Fs25 Sf 5	۱۰۷	۰/۶	۸۰۰۰	۰/۰۱
Rc25Fs50 Sf 10	۱۴۵	۰/۴	۸۱۰۰	۰/۰۲
Rc50Fs0 Sf 5	۳۲۵	۳	۱۵۶۵۰	۰/۰۲
Rc50Fs25 Sf 10	۳۲۳	۰/۶	۹۱۰۰	۰/۰۴
Rc50Fs50 Sf 10	۴۸۳	۱/۴	۱۷۰۰۰	۰/۰۳
Rc100Fs0 Sf 10	۶۰۷	۳/۲	۱۳۳۵۰	۰/۰۵

با این فرض که هر چه تفاوت بین استحکام ITZ و ماتریس اطراف آن بیشتر باشد، تمایل به ایجاد ریزترک در ناحیه انتقال بر اثر ضربه در صورت ضعیف‌تر بودن این ناحیه بیشتر خواهد بود. بنابراین

ناسازگاری نسبتاً بزرگ‌ترین مقاومت ITZ و ملات در مورد بتن سرباره‌ای، احتمالاً می‌تواند ترک‌ها را مجبور به تجمع در ناحیه انتقال کند. ولی مطابق شکل ۱۱ تسریع هیدراتاسیون و بهبود ناحیه

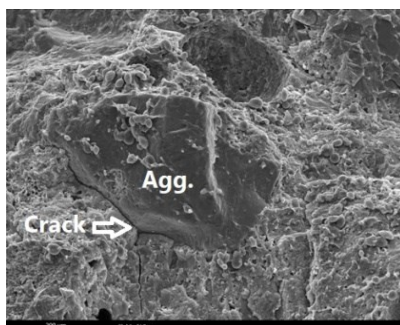
انتقال در مجاورت سرباره فولاد نتیجه معکوس داده است. علاوه بر آن وجود رسوب‌های سوزنی اترینگایت در حفرات مخلوط‌های بتنی نشان می‌دهد ترکیب شیمیایی ITZ (یعنی آزاد شدن سولفات یا مقدار زیاد Al، Fe و S) ممکن است باعث تبلور مجدد اترینگایت ثانویه شود، اما نتایج به دست آمده در فاصله $20\mu\text{m}$ از مرز سنگ‌دانه مطابق جدول ۱۷ نمی‌تواند به طور کامل وقوع ریزترک‌های ناشی از تشکیل اترینگایت را توصیف نماید. همانطور که توماس و همکاران [۶۶] معتقدند که مشاهده اترینگایت

در حفره‌ها و ترک‌های بتن فرسوده معمول است. اما تاکنون به عقیده اردیم و همکاران [۶۷] شواهد روشنی مبنی بر اینکه کریستال‌های اترینگایت علت تشکیل ترک هستند وجود ندارد. چگالی کم ترک در نمونه‌های دارای سرباره درشت فولاد همان‌طور که در شکل ۱۱ ارائه شده، ممکن است به دلیل زبری سطح و افزایش استحکام رابط خمیر-سرباره باشد، همان‌گونه که توسط زامپینی و همکاران [۶۸] نتیجه‌گیری شده است. افزودن میکروسیلیس ضخامت ناحیه انتقال را کاهش داده و یکپارچگی بتن را بهبود بخشیده است.

جدول ۱۷- مقایسه نسبت اتمی عناصر با ترک خوردگی در ناحیه انتقال مخلوهای بتنی تحقیق در سن ۹۰ روزه

عنوان طرح	عنوان طرح	Ca/Si	(Al+Fe)/Ca	S/Ca	چگالی ترک خوردگی ($1/\mu\text{m}$)
بتن با جایگزینی	Rc25Fs0Sf5	۲/۲۲	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۰۳
سنگ‌دانه‌های	Rc50Fs0Sf5	۲/۷۳	۰/۱۱	۰/۶۰	۰/۰۲
بازیافتی	Rc100Fs0Sf10	۱/۴۹	۰/۱۵	۰/۵۵	۰/۰۵
بتن با جایگزینی	Rc0Fs0Sf0	۲/۱۳	۰/۱۶	۰/۴۵	۰/۰۲
سرباره فولاد	Rc0Fs25Sf5	۲/۴۲	۰/۱۹	۰/۱۰	۰/۰۳
	Rc0Fs50Sf5	۱/۴۶	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۰۱
بتن با استفاده همزمان	Rc25Fs25Sf5	۰/۹۹	۰/۵۰	۰/۲۴	۰/۰۱
	Rc25Fs50Sf10	۱/۲۱	۱/۷۸	۰/۱۵	۰/۰۲
	Rc50Fs25Sf10	۱/۷۲	۰/۲۷	۰/۷۲	۰/۰۴
سنگ‌دانه‌های	Rc50Fs50Sf10	۱/۲۱	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۰۳
بازیافتی و سرباره	Rc50Fs50Sf10	۱/۲۱	۰/۳۵	۰/۵۵	۰/۰۳

علاوه بر آن سیلیس موجود در سنگ‌دانه‌ها می‌تواند به صورت محلول درآمده و با بلورهای CH که در ناحیه انتقال تراکم بیشتری دارند واکنش داده و تولید CSH نماید. شکست بتن اغلب ناشی از جداشدگی سنگ‌دانه و ملات است که این پدیده از ترک‌های ناحیه انتقال آغاز می‌گردد. در شکل ۵ تصویر ریزنگار الکترونی روبشی وقوع ترک به قطر $3\mu\text{m}$ در ناحیه انتقال را نشان داده که ناشی از جداشدگی کامل ماتریس از سنگ‌دانه است.



شکل ۵- تصویر ریزنگار الکترونی روبشی از جداشدگی

سنگ‌دانه از ITZ در طرح Rc50Fs0Sf5

- در جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ‌دانه‌های بازیافتی و همچنین ۵۰٪ درشت‌دانه‌های سرباره فولاد به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی، مقاومت فشاری بتن سن ۲۸ روزه در هر دو حالت ۱۶/۸٪ نسبت به بتن مرجع کاهش یافت. با افزایش سن نمونه مقاومت فشاری بهبود پیدا کرده

۵- نتایج
نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن‌های بازیافتی بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی به شرح ذیل ارائه می‌گردد:
- با جایگزین نمودن سرباره درشت فولاد به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی بر خلاف انتظار، وزن مخصوص حداکثر به میزان

است. به طور خاص، با افزایش شدت قله‌های CSH به مقدار ۲۲٪ و کاهش شدت قله‌های CH به میزان ۴۱٪، در مقاومت فشاری ۳۰٪ رشد حاصل شد.

- در مرز اتصال ITZ با سنگ‌دانه‌ها نسبت‌های Ca/Si، Ca/(Al+Fe) و S/Ca به ترتیب ۵/۵، بیش از ۰/۴ و بیش از ۰/۲ است. این نسبت‌ها نشان‌دهنده نسبت بالای اترینگایت و مونوسولفات به‌ویژه در نمونه‌های بتنی دارای سرباره فولاد در سن ۹۰ روزه بوده که در طیف‌سنجی XRD تأیید گردید.

- با بررسی نسبت عناصر در فاصله $50-0 \mu\text{m}$ ، مشخص شد که بیشترین همبستگی بین مقاومت فشاری بتن و مجموع Ca/Si و Ca/(Al+Fe) در فاصله $20 \mu\text{m}$ وجود دارد به نحوی که بین آن‌ها معادله چندجمله‌ای درجه دو با ضریب $0/73$ برقرار است. با افزایش نسبت‌ها تا میزان $3/87$ ، مقاومت فشاری روند صعودی داشته است.

- مجموع نسبت‌های (Al+Fe)/Ca و Ca/Si در مخلوط‌های بتنی دارای سنگ‌دانه‌های بازیافتی، با نفوذ تسریع‌شده یون کلراید به صورت معکوس با ضریب $0/82$ و در مخلوط‌های بتنی دارای سرباره درشت فولاد به صورت مستقیم با ضریب $0/9$ رابطه خطی دارد. همچنین در صورت استفاده همزمان از سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد، رابطه‌ای خطی معکوس با ضریب همبستگی $0/63$ بین آن‌ها وجود دارد.

- تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی نشان داد که با جایگزینی سرباره فولاد به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی در مخلوط‌های بتنی، ناحیه انتقال دارای ویژگی‌های بهتری مانند توده‌های برجسته و کاهش تدریجی ریزترک‌ها است. این امر به دلیل تأثیر مضاعف میکروسیلیس و واکنش پوزولانی سطح تماس سرباره فولاد است که باعث پیوند و چسبندگی بهتری بین خمیرسیمان و سنگ‌دانه‌ها و افزایش مقاومت فشاری به میزان ۲۰٪ در سن ۱۸۰ روزه نسبت به مقاومت هدف شده است.

- چگالی ترک خوردگی اندازه‌گیری شده با نرم‌افزار Image J در ناحیه انتقال مخلوط‌های بتنی بیانگر چگالی بالای ترک‌ها در مخلوط‌های بتنی با استفاده همزمان سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد به جای سنگ‌دانه‌های طبیعی بوده که معادل $(1/\mu\text{m})$ $(0/04-0/03)$ است. همچنین بیشترین چگالی ترک‌ها معادل $(1/\mu\text{m})$ $0/05$ مربوط به حذف کامل درشت‌دانه‌های طبیعی

به طوری که بیشترین مقاومت فشاری در سن ۱۸۰ روزه در نمونه Rc25Fs50Sf10 با ۲۱٪ رشد نسبت به مقاومت هدف حاصل شد. - در صورت استفاده همزمان سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد در سن ۲۸ روزه، با افزایش ۵۲٪ در مقاومت فشاری بتن، میزان ضریب ارتجاعی استاتیکی $2/3$ برابر رشد نشان داد.

- جذب آب نیم‌ساعته در سایر طرح‌ها به جزء Rc50Fs0Sf5 کمتر از ۲٪ بوده و کیفیت سطحی نمونه‌های بتنی به گونه‌ای است که قابلیت استفاده در معرض شرایط محیطی فوق‌العاده شدید را دارند. جذب آب بلندمدت سایر طرح‌ها به جزء طرح Rc100Fs0Sf10 کمتر از ۴٪ بوده و در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید طبقه‌بندی شدند.

- عمق نفوذ آب تحت فشار با مقاومت فشاری رابطه چند جمله‌ای درجه دو با ضریب تعیین $0/65$ برقرار شد. به نحوی که با کاهش عمق نفوذ به میزان ۶۷٪، مقاومت فشاری ۲۰٪ رشد پیدا کرده است. - نفوذ تسریع‌شده یون کلراید به طور خطی با عمق نفوذ آب تحت فشار و به طور معکوس با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی رابطه دارد. به نحوی که با افزایش $3/84$ برابری نفوذ یون کلراید، عمق نفوذ آب $2/2$ برابر شده است. به طور خاص با استفاده همزمان سنگ‌دانه‌های بازیافتی و سرباره فولاد، کاهش ۶۷٪ نفوذ تسریع‌شده یون کلراید منجر به افزایش مقاومت فشاری در بتن‌های بارده مقاومتی بالای ۲۵ مگاپاسکال به مقدار $33/6$ ٪ شود.

- مقاومت ویژه الکتریکی بتن‌ها بر مبنای استاندارد ACI 222 نشان‌دهنده کیفیت متوسط تا عالی است و بجز طرح Rc100Fs0Sf10، خطر خوردگی آرماتور در سایر نمونه‌ها ناچیز و کم است.

- مقاومت ویژه الکتریکی با عمق نفوذ آب و نفوذ تسریع‌شده یون کلراید رابطه معکوس دارد و به ترتیب دارای روابط توانی و چندجمله‌ای با ضریب تعیین $0/87$ و $0/85$ است. با افزایش $3/6$ برابری مقاومت ویژه الکتریکی، عمق نفوذ آب $67/5$ ٪ و میزان نفوذ تسریع‌شده یون کلراید 73 ٪ کاهش می‌یابند.

- تحلیل XRD نشان داد که در بتن‌های بازیافتی، جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی منجر به تغییرات معنی‌داری در مقاومت فشاری و شدت قله‌های CSH و CH شده است. مقاومت فشاری به صورت خطی مستقیم با ضریب همبستگی $0/75$ از CSH و خطی معکوس با ضریب همبستگی $0/81$ از CH تأثیر پذیرفته

concretes, Construction and building materials, 17(2) (2003) 105-112.

[11] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete, Journal of cleaner production, 112 (2016) 2171-2186.

[12] S.-c. Kou, C.-s. Poon, Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete, Construction and Building Materials, 77 (2015) 501-508.

[13] A. Gholampour, T. Ozbakkaloglu, Time-dependent and long-term mechanical properties of concretes incorporating different grades of coarse recycled concrete aggregates, Engineering Structures, 157 (2018) 224-234.

[14] D. Pedro, J. De Brito, L. Evangelista, Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume, Cement and Concrete Composites, 93 (2018) 63-74.

[15] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, D. Pedro, Durability of concrete with recycled coarse aggregates: influence of superplasticizers, Journal of materials in civil engineering, 26(7) (2014) 06014011.

[16] L. Jiang, The interfacial zone and bond strength between aggregates and cement pastes incorporating high volumes of fly ash, Cement and concrete composites, 21(4) (1999) 313-316.

[17] K.M. Nemati, P.J. Monteiro, K.L. Scrivener, Analysis of compressive stress-induced cracks in concrete, ACI Materials Journal, 95 (1998) 617-630.

[18] H. Wong, M. Zobel, N. Buenfeld, R. Zimmerman, Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying, Magazine of concrete research, 61(8) (2009) 571-589.

[19] S. Diamond, J. Huang, The ITZ in concrete—a different view based on image analysis and SEM observations, Cement and concrete composites, 23(2-3) (2001) 179-188.

[20] Y. Zaitsev, Crack propagation in a composite material, Fracture mechanics of concrete, (1983) 251-299.

[21] D.P. Bentz, D.P. Bentz, A three-dimensional cement hydration and microstructure program. I. hydration rate, heat of hydration, and chemical shrinkage, National Institute of Standards and Technology, 1995.

[22] I.B. Topcu, Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete, Cement

و جایگزینی با سنگ‌دانه‌های بازیافتی است.

- بررسی قطر ترک‌های بتن در ناحیه انتقال نشان داد که با افزایش درصد جایگزینی سنگ‌دانه‌های بازیافتی در سطوح بالای ۵۰٪

میزان بازشدگی ریزترک‌ها افزایش می‌یابد به گونه‌ای که با حذف کامل سنگ‌دانه‌های طبیعی و جایگزینی با سنگ‌دانه‌های بتن بازیافتی اندازه قطر ترک $3/2 \mu\text{m}$ شده است.

۶- مراجع

[1] V. Corinaldesi, G. Moriconi, Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate, Construction and building materials, 23(1) (2009) 289-294.

[2] A. Rao, K.N. Jha, S. Misra, Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete, Resources, conservation and Recycling, 50(1) (2007) 71-81.

[3] N.D. Oikonomou, Recycled concrete aggregates, Cement and concrete composites, 27(2) (2005) 315-318.

[4] J. Wang, H. Yuan, X. Kang, W. Lu, Critical success factors for on-site sorting of construction waste: a China study, Resources, conservation and recycling, 54(11) (2010) 931-936.

[5] F. Krausmann, S. Gingrich, N. Eisenmenger, K.-H. Erb, H. Haberl, M. Fischer-Kowalski, Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century, Ecological economics, 68(10) (2009) 2696-2705.

[6] M.U. Farooq, R. Hameed, M. Tahir, M.G. Sohail, S. Shahzad, Mechanical and durability performance of 100% recycled aggregate concrete pavers made by compression casting, Journal of Building Engineering, 73 (2023) 106729.

[7] L. Chunlin, Z. Kunpeng, C. Depeng, Possibility of concrete prepared with steel slag as fine and coarse aggregates: A preliminary study, Procedia Engineering, 24 (2011) 412-416.

[8] E. Anastasiou, I. Papayianni, Criteria for the use of steel slag aggregates in concrete, in: Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties: An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah, Northwestern University, USA, Springer, 2006, pp. 419-426.

[9] J.M. Manso, J.A. Polanco, M. Losañez, J.J. González, Durability of concrete made with EAF slag as aggregate, Cement and concrete composites, 28(6) (2006) 528-534.

[10] M. Maslehuddin, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M. Barry, Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate

- Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC), *Cement and Concrete Composites*, 55 (2015) 223-231.
- [36] W.A. Tasong, C.J. Lynsdale, J.C. Cripps, Aggregate-cement paste interface: Part I. Influence of aggregate geochemistry, *Cement and concrete research*, 29(7) (1999) 1019-1025.
- [37] A. Neville, Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete, *Materials Journal*, 94(1) (1997) 71-74.
- [38] D. ASTM, C856-18a, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete.
- [39] C.S. Poon, Z. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and building materials*, 18(6) (2004) 461-468.
- [40] K.L. Scrivener, P.L. Pratt, Characterization of interfacial microstructure, *Interfacial transition zone in concrete*, 2 (1996) 3-18.
- [41] J. Ollivier, J. Maso, B. Bourdette, Interfacial transition zone in concrete, *Advanced cement based materials*, 2(1) (1995) 30-38.
- [42] A. Jayasuriya, E.S. Shibata, T. Chen, M.P. Adams, Development and statistical database analysis of hardened concrete properties made with recycled concrete aggregates, *Resources, Conservation and Recycling*, 164 (2021) 105121.
- [43] J. Maso, *Interfacial transition zone in concrete*, CRC Press, 1996.
- [44] C. Chen, G. Wei, J.-G. Dai, S. Hong, B. Dong, J. Chen, Y. Wang, *Micromechanical and Microstructural Characteristics of Interfacial Transition Zone in Calcium Rich Artificial Aggregate Concrete*, Available at SSRN 4720866.
- [45] ASTM, Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. ASTM C88-05, in, *ASTM International West Conshohocken, PA*, 2005.
- [46] A. C143, Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, *Book of ASTM Standards*, (2015).
- [47] A. Standard, C138: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air-Content (Gravimetric) of Concrete, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2013).
- [48] M. Riley, A. Cotgrave, *Construction technology 1: House construction*, Bloomsbury Publishing, 2018.
- [49] M. Walker, *Guide to the construction of reinforced concrete in the Arabian Peninsula*, (No Title), (2002).
- [50] B.S. Institution, BS 1881 122: 2011+ A1: 2020. *Testing Concrete: Part 122. Method for and concrete research*, 27(12) (1997) 1817-1823.
- [23] C. Pellegrino, P. Cavagnis, F. Faleschini, K. Brunelli, Properties of concretes with black/oxidizing electric arc furnace slag aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 37 (2013) 232-240.
- [24] F. Faleschini, C. Pellegrino, Experimental behavior of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag as recycled aggregate, *ACI Mater. J*, 110(2) (2013) 197-205.
- [25] H. Beshr, A. Almusallam, M. Maslehuddin, Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, *Construction and building materials*, 17(2) (2003) 97-103.
- [26] J.D. Gupta, W.A. Kneller, R. Tamirisa, E. Skrzypczak-Jankun, Characterization of base and subbase iron and steel slag aggregates causing deposition of calcareous tufa in drains, *Transportation research record*, (1434) (1994).
- [27] A.M. Wagih, H.Z. El-Karmoty, M. Ebid, S.H. Okba, Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete, *HBRC journal*, 9(3) (2013) 193-200.
- [28] P. Agamuthu, *Challenges in sustainable management of construction and demolition waste*, in, SAGE Publications Sage UK: London, England, 2008, pp. 491-492.
- [29] P.K. Mehta, *Concrete. Structure, properties and materials*, (1986).
- [30] J. Pacheco, J. De Brito, C. Chastre, L. Evangelista, Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 201 (2019) 110-120.
- [31] H.K.A. Al-Bayati, P.K. Das, S.L. Tighe, H. Baaj, Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 284-298.
- [32] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra, Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and concrete research*, 37(5) (2007) 735-742.
- [33] 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.
- [34] K. Rahal, Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate, *Building and environment*, 42(1) (2007) 407-415.
- [35] Y. Xie, D.J. Corr, F. Jin, H. Zhou, S.P. Shah,

of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler, *Materials and structures*, 44 (2011) 437-453.

[65] T. Akçaoğlu, M. Tokyay, T. Çelik, Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete, *Cement and Concrete Research*, 35(2) (2005) 358-363.

[66] M. Thomas, T. Ramlochan, Field cases of delayed ettringite formation, in: *International RILEM Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Rilem Publications SARL, 2004, pp. 85-97.

[67] S. Erdem, A.R. Dawson, N.H. Thom, Influence of the micro-and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates, *Cement and Concrete Research*, 42(2) (2012) 447-458.

[68] D. Zampini, H. Jennings, S. Shah, Characterization of the paste-aggregate interfacial transition zone surface roughness and its relationship to the fracture toughness of concrete, *Journal of materials science*, 30 (1995) 3149-3154.

Determination of Water Absorption, British Standards Institution, 2020.

[51] A. ASTM C642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM, ASTM International, (2013).

[52] B. En, 12390-8, "Depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, (2000).

[53] A.S.f. Testing, M.C.C.-o. Concrete, C. Aggregates, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, 2012.

[54] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC press, 2003.

[55] A.C.I.C. 222, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01), in, ACI Farmington Hills, MI, 2001.

[56] C. ASTM, 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, Annual book of ASTM standards, 4(2) (1997) 639-644.

[57] J. Tragardh, Microstructural features and related properties of self-compacting concrete, in: *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm, 1999*, pp. 175-186.

[58] S. Erdem, A.R. Dawson, N.H. Thom, Influence of the micro- and nanoscale local mechanical properties of the interfacial transition zone on impact behavior of concrete made with different aggregates, *Cement and Concrete Research*, 42(2) (2012) 447-458.

[59] C.E.-I.d. Béton, CEB-FIP model code 1990: Design code, Thomas Telford Publishing, 1993.

[60] J.-C. Souche, P. Devillers, M. Salgues, E.G. Diaz, Influence of recycled coarse aggregates on permeability of fresh concrete, *Cement and Concrete Composites*, 83 (2017) 394-404.

[61] M. Alexander, Two experimental techniques for studying the effects of the interfacial zone between cement paste and rock, *Cement and Concrete Research*, 23(3) (1993) 567-575.

[62] P. Vargas, O. Restrepo-Baena, J.I. Tobón, Microstructural analysis of interfacial transition zone (ITZ) and its impact on the compressive strength of lightweight concretes, *Construction and Building Materials*, 137 (2017) 381-389.

[63] A. Sadrmomtazi, B. Tahmouresi, R. Kohani Khoshkbijari, Effect of fly ash and silica fume on transition zone, pore structure and permeability of concrete, *Magazine of Concrete Research*, 70(10) (2018) 519-532.

[64] P. Mounanga, M.I.A. Khokhar, R. El Hachem, A. Loukili, Improvement of the early-age reactivity

The effect of transition zone on the properties and microstructure of recycled concrete

Seyed Qasem Mirahmadi

PhD student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Seyed Fathollah Sajedi*

Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Seyed Vahid Razavi Toosi

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Jundishapur University of Technology, Dezful, Iran.

Abstract

In the current study, the effect of the Interfacial transition zone on the mechanical properties, durability and microstructure of recycled concrete made from recycled concrete aggregates and coarse steel slag was evaluated. Recycled concrete aggregates replaced with natural coarse aggregates by 25%, 50%, 100%, and slag by 25% and 50%, respectively, and microsilica by 5% and 10% replaced with a part of cement used in concrete using the w/c as 0.45. In order to investigate the effect of ITZ on the mechanical properties, durability and microstructure of concrete, 21 mixing designs were made and 10 designs were selected using the Taguchi method and a total of 800 samples aged between 7 and 180 days were examined. Increasing microsilica improved mechanical properties, reduced water absorption and penetration, increased chloride resistance, and enhanced electrical resistance in samples. Also, the amount of crystalline phase of calcium hydroxide and the number of large pores decreased, and the hydrated calcium silicate phase of the transition region increased, which led to Enhanced microstructure quality. As the samples age increased, hydrated calcium silicate phase increased by 22% and calcium hydroxide phase decreased by 41%; as a result, the compressive strength and specific electrical resistance increased by 30% and 460%, respectively, and the chloride ion acceleration penetration decreased by 72%; examining the 50 μm limit from the aggregate boundary with X-ray energy spectroscopy showed that at a distance of 20 μm , the highest correlation between the ratios of elements in the transition zone with concrete properties is established.

Keywords: Interfacial Transition Zone, Properties of recycled concrete, Microstructure, Spectroscopy, X-ray, Atomic ratio of elements, Scanning Electron Micrograph (SEM).

* Corresponding Author: f_sajedi@yahoo.com

