

تأثیر ناحیه انتقال بر خواص و ریزساختار بتن

سیدفتح اله ساجدی^{۱*}، سیدقاسم میراحمدی^۲

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

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

چکیده

در این پژوهش سنگدانه‌های طبیعی با سیلیس بالا و نسبت آب به مواد سیمانی به میزان ۰/۴۵ استفاده شدند. به منظور بررسی تأثیر ناحیه انتقال بر خواص بتن با بررسی رئولوژی بتن تازه، ۳۰ نمونه در قالب ۱۰ طرح اختلاط در محدوده سنی ۷ تا ۱۸۰ روزه بررسی گردید و از روش ناگوچی طرح اختلاط منتخب مشخص شد. آزمایش‌های تعیین خواص مکانیکی و دوام بتن انجام شدند و در نهایت ریزساختار مخلوطها بررسی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سن نمونه‌ها، خواص مکانیکی بهبود یافته و به تبع آن کاهش در جذب آب حجمی، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ تسریع شده یون کلراید و افزایش قابل توجه در مقاومت الکتریکی نمونه‌ها رخ داده است. همچنین در میزان فاز بلوری اکسید 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، سیلیکات کلسیم هیدراته و کربنات کلسیم به ترتیب ۲۴٪ و ۲۱/۵٪ زیاد شدند و به تبع آن مقاومت‌های فشاری و ویژه الکتریکی نیز به ترتیب ۱۰/۳٪ و ۴۸/۶٪ افزایش یافتند و نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۲٪ کاهش یافت. در محدوده ۳۰ میکرومتری، به دلیل اغتشاش موجود در منطقه مرزی، روابط همبستگی قابل قبولی بین نسبت عناصر سازنده و خواص بتن به دست نیامد. در محدوده ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری روابط خطی با ضرایب تعیین ۰/۸۵ بین نسبت وزنی کلسیم به سیلیسیم با مقاومت فشاری و نفوذ تسریع شده یون کلراید برقرار شد، به طوری که با کاهش ۸۲٪ نسبت وزنی مذکور، مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ افزایش و نفوذ ۵/۲٪ کاهش یافت.

کلید واژه‌ها: ناحیه انتقال، ریزساختار، طیف سنجی اشعه ایکس، نسبت اتمی عناصر، ریزنگار الکترونی روبشی

۱- مقدمه

بتن یک مصالح ساختمانی چندمنظوره و پرکاربرد است و خواص آن تحت تأثیر عوامل زیادی از جمله ترکیب مخلوط، شرایط اختلاط، عمل‌آوری و ریزساختار قرار می‌گیرد. ناحیه انتقال^۱ که همان ناحیه سطحی بین خمیر سیمان و سنگدانه است، نقش مهمی در تعیین خواص مکانیکی و دوام بتن دارد. فاران مشاهده کرد که در طول گیرش مواد مبتنی بر سیمان در اطراف سنگدانه‌ها، برخی از محصولات هیدراتاسیون به شیوه‌ای متفاوت سازماندهی شدند. این آرایش متفاوت به عنوان اختلال در بسته‌بندی دانه‌های سیمان و ریزترین ذرات سنگدانه توصیف می‌شود، که در نتیجه چینی از ذرات ایجاد می‌شود که با دور شدن از سطح سنگدانه تغییر می‌کند. این منطقه توسط فاران به عنوان ناحیه انتقال نامیده شد [۱]. دو جنبه از ناحیه انتقال شامل تخلخل و هیدراتاسیون مورد توجه است؛ تخلخل به طور گسترده توسط اسکرینونر و همکاران^۲ توضیح داده شده است [۲-۳] که آن را به عنوان اختلال در بسته‌بندی کوچک‌ترین ذرات در حین نزدیک شدن به سطح سنگدانه بزرگ توصیف می‌کنند که می‌تواند به اصطلاح به اثر دیوار^۳ نسبت داده شود. عرض یا ضخامت ناحیه انتقال در چندین مطالعه تحقیقاتی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مانند ریزنگار الکترونی روبشی^۴، پراش اشعه ایکس^۵، تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه^۶ و بسیاری دیگر مورد بررسی قرار گرفته است [۳-۴]. مشاهده شده است که ضخامت ناحیه انتقال متفاوت است و به اندازه کوچکترین دانه‌های سیمان و هم‌چنین اندازه و نوع سنگدانه‌ها بستگی دارد. علاوه بر این، اشاره شده که با کاهش اندازه سنگدانه، ضخامت این ناحیه کاهش می‌یابد. در نتیجه، طیف وسیعی از میزان ضخامت، از ۱۵ تا ۱۰۰ میکرومتر گزارش شده است، اما ضخامت

۱ Interfacial transition zone (ITZ)

۲ Scrivener et al.

۳ Wall effect

۴ Scanning Electron Microscopy (SEM)

۵ X-ray Diffraction (XRD)

۶ Mercury intrusion porosimetry (MIP)

پذیرفته شده به طور گسترده در محدوده ۳۰ تا ۵۰ میکرومتر قرار دارد. ماسو [۵] ادعان دارد در حالی که تعیین خواص ناحیه انتقال با روش‌های مدرن ریزنگار الکترونی روبشی و پراش اشعه ایکس به اندازه کافی آسان است ولی تعیین خواص مکانیکی این ناحیه مشکل است و هیچ راه حل واضحی برای آن وجود ندارد. عناصر مشاهده شده در ناحیه انتقال و نسبت اتمی این عناصر می‌توانند منجر به تغییر در استحکام ریزساختار ناحیه انتقال و به تبع آن تأثیر بر مقاومت فشاری و دوام بتن در برابر شرایط محیطی و حملات شیمیایی در طول زمان شود. برای درک کامل تأثیر نسبت‌های اتمی عناصر ناحیه انتقال بر بتن، تحقیقات و آزمایشات گسترده‌ای انجام شده است [۸-۶]. خواص میکرومکانیکی و ریزساختاری ناحیه انتقال به نسبت اختلاط و محصولات هیدراتاسیون وابسته بوده و هم‌چنین ویژگی سنگدانه‌ها از نظر اندازه، شکل و بافت سطح بر خواص میکرومکانیکی این ناحیه تأثیرگذار است [۹]. ناحیه انتقال سبب بروز آثار منفی زیادی در بتن می‌شود، از جمله اینکه غلظت بلورهای اترینگایت^۱ و هیدروکسید کلسیم^۲ که خاصیت چسبانندگی ندارند در این ناحیه بیشتر از دیگر نواحی بتن است و در مقابل، ژل سیلیکات کلسیم هیدراته که اصلی‌ترین ترکیب سیمانی دارای خاصیت چسبانندگی در بتن است، در این ناحیه کمترین مقدار را دارد [۱۰]. این ادعا که ناحیه انتقال اسرارآمیزترین منطقه برای دانشمندان فن‌آوری بتن است، اغراق‌آمیز نخواهد بود [۱۱]. هیدراتاسیون در مجاورت سنگدانه‌ها در مقایسه با خمیرسیمان به دلیل بالاتر بودن موضعی نسبت آب به سیمان در ناحیه انتقال متفاوت است. میزان رشد و ماهیت هیدرات‌ها ممکن است تحت تأثیر سطح و ماهیت شیمیایی سنگدانه‌ها، منجر به تخلخل شود. علاوه بر تخلخل، حضور ریزترک‌ها، بلورهای چندلایه جهت‌دار در اطراف سنگدانه‌ها و اندازه بلورها، می‌توانند بر ریزساختار ناحیه انتقال مؤثر باشند [۱۳-۱۲]. عامل ایجادکننده پیوستگی بین سنگدانه‌ها و خمیرسیمان کاملاً روشن نشده، ولی بخشی از آن ناشی از درهم‌تنیدگی مکانیکی بین آنها در اثر زبری سطح سنگدانه‌ها و پیوستگی تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌ها، کانی‌شناسی و شرایط الکترواستاتیکی سطح سنگدانه‌ها، باشد [۱۵-۱۴]. بررسی پژوهشگران نشان می‌دهد که خواص ژئوشیمیایی سنگدانه‌ها روی تولید و افزایش ریزترک‌ها و افزایش قدرت پیوندی در ناحیه انتقال مؤثر است [۱۶، ۱۷]. گرادت^۳ و اولیویه^۴ با تجزیه و تحلیل سنگدانه‌ها به روش طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس^۴ تأیید کردند که کانی‌شناسی بر میزان جهت‌گیری هیدروکسیدکلسیم در ناحیه انتقال تأثیرگذار است. هم‌چنین مشاهده شده که کلیه سنگدانه‌ها به گروه معدنی فلدسپات با عنصر غالب Si و سایر عناصر Al, Ca, Na و Fe تعلق دارند [۱۸]. ناحیه انتقال در بتن همانند پلی بین دو بخش اصلی خمیرسیمان و سنگدانه‌ها عمل می‌کند، حتی اگر هر بخش دارای سختی بالایی باشد، سختی ماده مرکب ممکن است به علت وجود پیوندهای ضعیف (حفرات و ترک‌های ریز در ناحیه انتقال) که تنش را انتقال نمی‌دهند، پایین باشد [۳، ۱۹]. در رابطه با توسعه ساختار ناحیه انتقال با افزایش سن بتن، با توجه به تحقیقات کومار مهتا^۵ [۲۰]، لی^۶ [۲۱] و تحقیقات ماسو^۷ [۵]، خواص ساختاری ناحیه انتقال را می‌توان با رصد توسعه آن از زمان بتن‌ریزی به‌دست آورد، به این صورت که در نسبت آب به سیمان بالا در بتن تازه متراکم شده، تجمع لایه‌های نازک آب در اطراف سنگدانه‌های بزرگ بیشتر است. در خمیرسیمان، یون‌های کلسیم، سولفات، هیدروکسید و آلومینات وجود دارد که از انحلال ترکیبات سولفات کلسیم و آلومینات کلسیم تولیدشده و سپس برای تشکیل بلورهای بزرگ اترینگایت و هیدروکسید کلسیم ترکیب می‌شوند. با پیشرفت هیدراتاسیون، بلورهای ضعیف سیلیکات کلسیم هیدراته و نسل دوم بلورهای کوچک‌تر اترینگایت و هیدروکسید کلسیم شروع به پر کردن فضای خالی بین بلورهای بزرگ موجود اترینگایت و هیدروکسید کلسیم می‌کنند. این امر به بهبود تراکم و به تبع آن بهبود مقاومت ناحیه انتقال کمک می‌کند. نوع و چگالی سنگدانه‌ها بر خواص ناحیه انتقال مؤثر هستند [۲۲]. به دلیل اهمیت ناحیه انتقال در بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن معمولی و ضرورت یافتن راه‌حل‌هایی برای سنجش استحکام این

۱ Ettringite (CASH)

۲ Ca(OH)₂

۳ Gradet and Ollivier

۴ X-ray energy diffraction spectroscopy (EDX)

۵ Kumar Mehta

۶ Lea

۷ Maso

ناحیه و به دست آوردن رابطه آن با نتایج آزمایشگاهی متعارف؛ در این تحقیق تلاش شده است که با تهیه طرح اختلاط آزمایشگاهی با مصالح بومی، تأثیر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی بررسی شود. به همین منظور آزمایش‌های مربوط به خواص بتن در حالات تازه و سخت شده با استفاده از طرح اختلاط منتخب در چارچوب استانداردها و آیین‌نامه‌های معتبر انجام گرفت. همچنین با استفاده از تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی و آزمون‌های غیرمخرب شامل پراش اشعه ایکس و طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس، ساختار داخلی بتن و عناصر سازنده ناحیه انتقال و اثر نسبت آنها بر خواص مکانیکی و دوام بتن بررسی شد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان

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

۲-۱-۲- سنگدانه‌ها

۲-۱-۲-۱- سنگدانه‌های درشت مصرفی

در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده که از معادن شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه گردیده و حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌های درشت ۱۹mm بوده است. وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌های درشت در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب $2/6 \text{ g/cm}^3$ و ۱/۱٪ تعیین گردید. نتایج تجزیه شیمیایی سنگدانه‌های درشت طبیعی به روش فلورسانس اشعه ایکس^{۱۴} با نمونه‌برداری از سه نقطه معدن (P1,P2,P3) مطابق جدول ۳ به دست آمده است. علاوه بر تحلیل XRF، نتایج درصد افت وزنی سنگدانه‌ها در برابر سولفات‌های سدیم و منیزیم نیز به دست آمده و در جدول ۴ ارائه شده‌اند که بر همین اساس سلامت سنگدانه‌های درشت طبیعی تأیید شد.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

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 آزمایش اتوکلاو
۲	۳/۱	۳۰۰	۳۰	۶	≤ ۰/۸٪

جدول ۳- تجزیه شیمیایی سنگدانه‌های درشت معدن

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 بر مبنای استاندارد ASTM C88-13 [۲۳]

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

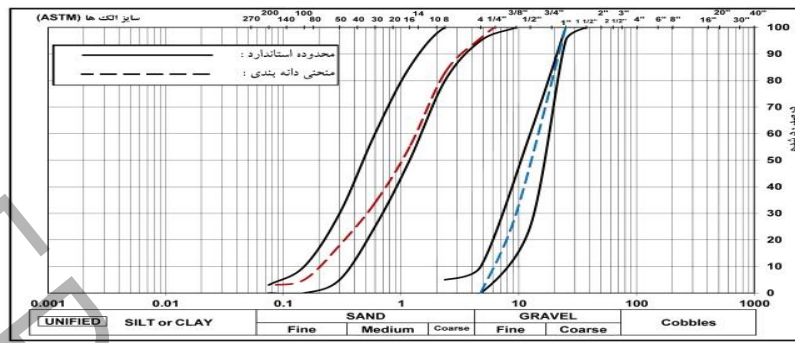
۲-۱-۲- سنگدانه‌های ریز مصرفی

وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌های ریز در حالت اشباع با سطح خشک به ترتیب $2/56 \text{ g/cm}^3$ و ۱/۲۷٪ تعیین گردید. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی در نمودار ۱ ارائه شده است. هم‌ارز ماسه‌ای ریزدانه مصرفی معادل ۹۱٪ تعیین گردید.

۱ X-Ray Fluorescence (XRF)

۲-۱-۳- فوق روان کننده

برای کسب کارایی در بتن، از فوق روان کننده بر پایه ترکیبی پلی کربوکسیلات و لیگنوسولفونات استفاده و مطابق استاندارد ASTM C494 عمل شده است. مشخصات فوق روان کننده استراپلاست N410^{۱۵} مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است.



نمودار ۱- منحنی دانه بندی سنگدانه های ریز و درشت مصرفی

جدول ۵- 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

۲-۱-۴- آب مصرفی

در این تحقیق آب مصرفی برای ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها، آب شرب شهر اهواز است که معیارهای توصیه شده توسط استاندارد ASTM C1602 [۲۴] در آن رعایت شده است. مشخصات شیمیایی آب مصرفی در جدول ۶ داده شده است.

جدول ۶- مشخصات شیمیایی آب شرب اهواز مصرفی در تحقیق

عنصر	CaCO ₃	So ₄	Cr ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg	pH
mg/lit	۲۶۰۰۰	۳۸۴	۴۱۶	۲۲	<۱	۸۰۰۰	۲۹۰۰	۷/۱۳

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

در این تحقیق، پس از ساخت و ارزیابی طرح‌های اختلاط متنوع براساس استاندارد ACI 211.1 [۲۵] جزئیات طرح اختلاط مرجع مطابق جدول ۷ مشخص شد و سپس با ساخت ۸۴ نمونه، بر مبنای برنامه آزمایشگاهی ارائه شده در جدول ۸ نتایج خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن به دست آمد.

جدول ۷- جزئیات طرح اختلاط بتن معمولی

اجزای بتن	سیمان	آب	فوق روان کننده	ماسه طبیعی	شن شکسته ریز	شن شکسته درشت	وزن (kg/m ³)
	۳۵۰	۱۷۹	۱/۸	۹۷۱	۳۰۵	۵۶۷	

جدول ۸- آزمایش‌ها و مشخصات نمونه‌ها

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

۳- آزمایش‌ها

۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

۳-۱-۱- آزمایش اسلامپ بتن

برای سنجش روانی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس ASTM C143/C143M-07 [۲۶] استفاده شد. در این تحقیق برای اندازه‌گیری اسلامپ، بتن تازه در سه لایه با میله مخصوص متراکم شد و با بلند کردن مخروط ناقص و اندازه‌گیری میزان نشست بتن تازه، اسلامپ در نمونه مرجع بر اساس مشخصات فیزیکی و میزان مواد و مصالح مصرفی به میزان ۱۰۰ میلی‌متر به دست آمد. ابزار لازم برای آزمایش اسلامپ بتن تازه و روش انجام آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- روش انجام آزمایش تعیین اسلامپ بتن

۳-۱-۲- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

در این تحقیق اندازه‌گیری وزن مخصوص بتن تازه بر مبنای استاندارد ASTM C138 [۲۷] انجام شد.

۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

۳-۲-۱- آزمایش وزن مخصوص بتن سخت شده

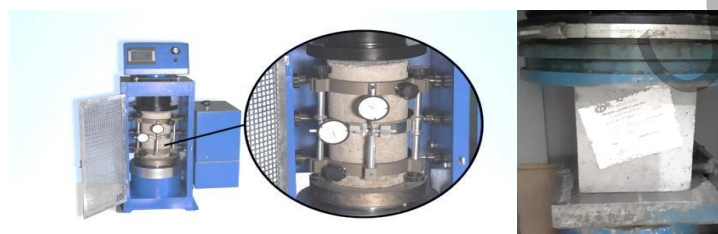
پس از عمل‌آوری نمونه‌ها در آب به مدت ۷ تا ۱۸۰ روزه، آزمایش تعیین وزن مخصوص بتن سخت شده منطبق بر استاندارد EN 12390-7، در سنین مختلف به دست آمد.

۳-۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری بتن

در این تحقیق آزمایش تعیین مقاومت فشاری مطابق با استاندارد EN BS 12390-3 یا ASTM C39 بر روی نمونه‌های مکعبی بتن معمولی در محدوده سنی ۷ تا ۱۸۰ روزه انجام گرفت.

۳-۲-۳- آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

آزمایش تعیین ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن مطابق استانداردهای ASTM C469 و BS 1881-121 و هم‌چنین هم‌زمان با آزمایش مقاومت فشاری انجام شد. در این تحقیق برای ترسیم نمودار تنش-کرنش، از نمونه‌های استوانه‌ای در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه استفاده شد. روش انجام آزمایش مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲- آزمایش تعیین مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی

۳-۲-۴- آزمایش جذب آب غوطه‌وری نیم ساعته

آزمایش جذب آب غوطه‌وری نیم ساعته برای سن ۲۸ روزه انجام گرفت. در توصیه‌های انجمن تحقیقات و اطلاع رسانی صنعت ساختمان^۱ برای مناطق عربی در حاشیه خلیج فارس و دریای سرخ، حداکثر جذب آب کوتاه‌مدت طبق BS1881 part122 را

۲٪ تعیین کرده‌اند [۲۸]. جذب آب نیم‌ساعته مجاز مطابق آیین نامه و طبقه‌بندی شرایط محیطی قرارگیری سازه در معرض (۲۹) در جدول ۹ ارائه شده است.

جدول ۹- مقادیر مجاز درصد جذب آب نیم‌ساعته در شرایط مختلف محیطی در آیین‌نامه پایایی [۲۹]

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

به نظر می‌رسد با تجدیدنظر در شرایط E و F مقدار حداکثر جذب آب نیم‌ساعته را به ۱/۵٪ محدود کرد.

۳-۲-۵- آزمایش جذب آب غوطه وری بلندمدت

علاوه بر جذب آب نیم‌ساعته، جذب آب بلندمدت نیز بر نمونه‌های مکعبی در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روزه بر اساس استاندارد ASTM C642 [۳۰] انجام گرفت. درصد مجاز جذب آب بلندمدت در جدول ۱۰ آورده شده است.

جدول ۱۰- درصد مجاز جذب آب بلندمدت در شرایط محیطی

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

بر اساس دسته‌بندی کیفی CEB-FIP [۳۱] کیفیت بتن بر مبنای درصد جذب آب به سه گروه خوب (<۳٪)، متوسط (۳-۵٪) و ضعیف (>۵٪) تقسیم‌بندی شده است.

۳-۲-۶- آزمایش تعیین نفوذ آب تحت فشار

آزمایش تعیین نفوذ آب در بتن سخت‌شده مطابق استاندارد EN BS12930-8 [۳۲] انجام گرفت. در این تحقیق نمونه‌های بتنی در سن ۲۸ روزه تحت فشار آب ۵۰۰ KPa در مدت ۷۲ ساعت قرار گرفته و سپس نمونه‌ها به دو قسمت تقسیم و بیشینه عمق نفوذ آب در آنها اندازه‌گیری شد. روش آزمایش نفوذ آب در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- آزمایش تعیین عمق نفوذ آب در نمونه‌های بتنی

۳-۲-۷- آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید

در این تحقیق آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید^۲ بر اساس استاندارد ASTM C1202 [۳۳] انجام گرفت. در شکل ۴ ابزار آزمایش تعیین نفوذ تسریع شده یون کلراید در بتن ارائه شده است.



شکل ۴- آزمایش تعیین نفوذ تسریع شده یون کلراید

بر مبنای طبقه‌بندی شرایط محیطی منطقه در آیین‌نامه مدنظر مطابق استاندارد نفوذ تسریع شده یون کلراید در جدول ۱۱ ارائه شده است. بهتر است در طبقه‌بندی موجود برای برخی رده‌های مدنظر مانند E یا F شرط سخت‌گیرانه‌تری مانند

1 Euro International Committee of concrete- International Prestressing Federation (CEB-FIP)

2 Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)

۱۲۰۰ یا ۱۰۰۰ کولمب منظور شود. در عوض برای شرایط محیطی A حداکثر ۴۰۰۰ کولمب نیز پذیرفته گردد. در جدول ۱۲ نفوذپذیری در برابر یون کلراید بر اساس میزان جریان عبوری ارائه شده است.

جدول ۱۱- مقادیر مجاز آزمایش‌های نفوذپذیری بتن مسلح برای اعمال دوام در شرایط محیطی منطقه [۳۳]

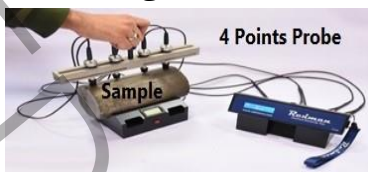
محدوده مجاز			آزمایش
شرایط F و E	شرایط C و B	شرایط A	
$\leq 2000 C$	$\leq 3000 C$	$\leq 3000 C$	نفوذ کلرید (در سن ۲۸ روزه)

جدول ۱۲- نفوذپذیری در برابر یون کلراید بر اساس میزان جریان عبوری [۳۴]

ناچیز	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	نفوذپذیری در برابر یون کلر
<۱۰۰	۱۰۰ تا ۱۰۰۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰	۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰	>۴۰۰۰	میزان جریان عبوری (کولمب)

۳-۲-۸- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

مبنای اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی در این پژوهش استاندارد ASTM C470 [۳۵] است که در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه با روش الکتروود چهارگانه انجام شد. ابزار تعیین مقاومت ویژه الکتریکی در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- تعیین مقاومت ویژه الکتریکی

در جدول ۱۳ و ۱۴ به ترتیب احتمال خوردگی میلگرد بر اساس نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی و تقسیم‌بندی کیفیت بتن بر اساس نتایج مقاومت ویژه الکتریکی ارائه شده‌اند. با پیشنهاد طبقه‌بندی زیر، به نظر می‌رسد برای شرایط E، D و F از کیفیت عالی، برای شرایط B و C از کیفیت خوب و یا خیلی خوب و برای شرایط A کیفیت متوسط بکار گرفته شود.

جدول ۱۳- احتمال خوردگی میلگرد بر اساس آزمایش مقاومت الکتریکی [۳۶]

ناچیز	کم	زیاد	خیلی زیاد	احتمال خوردگی میلگرد
بیش از ۲۰۰	۱۰۰ تا ۲۰۰	۵۰ تا ۱۰۰	کمتر از ۵۰	مقاومت ویژه الکتریکی بتن (اهم-متر)

جدول ۱۴- تقسیم‌بندی پیشنهادی کیفیت بتن بر اساس مقاومت ویژه الکتریکی [۳۷]

کیفیت بتن	عالی	خیلی خوب	خوب	متوسط	ضعیف	خیلی ضعیف
مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)	>۲۰۰	۱۵۰ تا ۲۰۰	۱۰۰ تا ۱۵۰	۷۵ تا ۱۰۰	۵۰ تا ۷۵	<۵۰

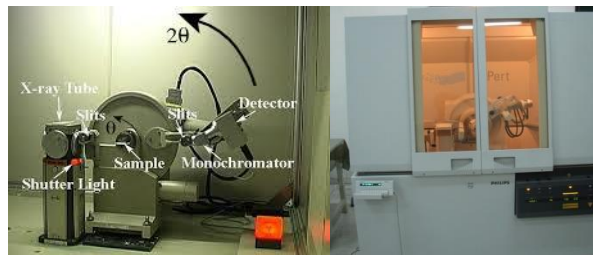
۳-۲-۹- مطالعات ریزساختاری مخلوط‌های بتنی

۳-۲-۹-۱- تحلیل فازها و بلورها

دستگاه پراش اشعه ایکس^۱ یکی از تجهیزات منحصربه‌فرد برای تجزیه و تحلیل مشخصات بلورها در آزمایشگاه است. اصول طراحی دستگاه XRD بر پایه تابش اشعه X به نمونه در زوایای مختلف و تحلیل الگوی پراش یا بازتابش آن است. در این تحقیق تلاش گردید فازهای بلوری مهم در محدوده ۰ تا ۵۰ میکرومتر از سطح مشترک سنگدانه‌ها با خمیر سیمان به دست آید. برای انجام تحلیل قطعاتی به ابعاد حدود ۱×۱×۱ سانتی‌متر از مرکز نمونه‌ها استخراج شده و پس از نگهداری قطعات به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در محفظه خلاء بررسی شدند. تحلیل‌ها در آزمایشگاه مرکز پژوهش متالورژی

۱ X-ray Diffraction (XRD)

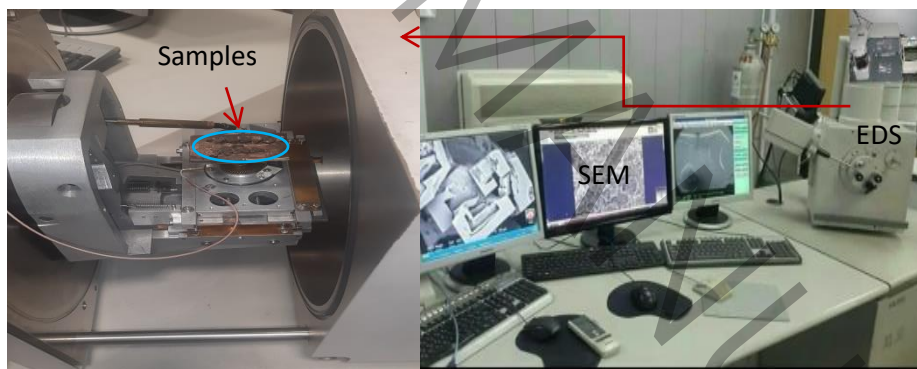
دانشگاه صنعتی اصفهان بر نمونه‌های سنین ۲۸ و ۹۰ روزه انجام گرفت. در شکل ۶ نمایی از دستگاه تحلیل به روش XRD برای ارزیابی وضعیت فازهای بلوری ریزساختار بتن ارائه شده است.



شکل ۶- فاز یابی بلورهای ریزساختار بتن به روش XRD

با تحلیل نتایج XRD در نرم افزار X'Pert high score plus فازهای بلوری تشکیل شده مربوط به هر فاصله صفحات اتمی برای نمونه‌ها، شناسایی شدند. فازهای بلوری شناسایی شده در این تحقیق شامل CH و CSH ناشی از هیدراتاسیون سیمان و فاز مهم بلوری سیمان CaO و فازهای مهم بلوری سنگدانه‌ها SiO₂ و CaCO₃ می‌باشند.

۳-۲-۹-۲- تحلیل تصاویر ریزنگار الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس نمونه‌های آزمایش شده در بخش تحلیل XRD توسط لایه‌ای از طلا به ضخامت چند انگستروم، پوشش شدند تا سطح نمونه‌ها به علت عدم رسانایی مناسب و به منظور حرکت آزادانه الکترون‌ها در ریزنگار الکترونی روبشی رسانا شوند. سپس از سطح قطعه با ریزنگار الکترونی روبشی از نوع TESCAN Vega II تصاویر ریزساختاری تهیه شد. در این تحقیق از سنین ۲۸ و ۹۰ روزه هر کدام ۳ نمونه به ابعاد استاندارد آماده‌سازی، خشک و تحت خلأ قرار گرفته و در معرض عکس‌برداری به روش SEM قرار گرفته‌اند. هم‌چنین برای بررسی کیفیت ناحیه انتقال علاوه بر تهیه تصاویر SEM، تحلیل طیف‌سنجی به روش خطی برای عنصرهای Si، Ca، Fe، Al، S و O انجام گرفت. در شکل ۷ دستگاه ریزنگار الکترونی روبشی و طیف‌سنجی EDS ارائه شده است.



شکل ۷- طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس

تراگارد^۱ [۳۸] از طبقه‌بندی داده شده در جدول ۱۵ برای تشخیص هیدرات‌های غنی از CH، CSH و AFm استفاده کرد. در این تحقیق نیز از طبقه‌بندی مشابهی برای مطالعه و شناسایی فازهای بلوری استفاده گردیده است.

جدول ۱۵- فاز یابی و تشخیص هیدرات‌های بتن

به روش طبقه‌بندی تراگارد^۱ [۳۸]

S/Ca	(Al+Fe)/Ca	Ca/Si	نوع فاز شناسایی شده
-	≤ ۰/۲	۲/۵ تا ۰/۸	CSH
≤ ۰/۰۴	≤ ۰/۴	≥ ۱۰	CH
> ۰/۱۵	> ۰/۴	≥ ۴	AFm

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- ارائه و تفسیر نتایج رئولوژی بتن

۴-۱-۱- اسلامپ بتن معمولی تازه

در این پژوهش برای تعیین اسلامپ بتن تازه، از روش ارائه شده در استاندارد [ASTM-C143] استفاده شده است. میانگین اسلامپ در نمونه‌های بتن بر اساس مشخصات فیزیکی و مقادیر مواد و مصالح مصرفی و مقدار ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب فوق‌روان‌کننده به میزان ۱۰۰ میلی‌متر به دست آمد.

۴-۱-۲- چگالی بتن معمولی تازه

در این تحقیق بر مبنای استاندارد ASTM C138 وزن مخصوص بتن تازه معادل $2/37 \text{ g/cm}^3$ به دست آمد.

۴-۲- مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت شده

آزمایش تعیین مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه بر اساس استاندارد BS1881:Part116 انجام شده است. هر عدد بیانگر متوسط ۳ نمونه مکعبی $150 \times 150 \times 150$ سانتی‌متر مکعبی می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت شده در جدول ۱۶ آورده شده است. همانگونه که نتایج مقاومت فشاری در سن ۷ تا ۱۸۰ روزه نشان می‌دهد، با افزایش سن نمونه بتنی، مقاومت فشاری افزایش داشته است؛ به گونه‌ای که مقاومت فشاری بتن در سن ۱۸۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه به میزان حدود ۱۳٪ رشد نشان می‌دهد. وزن مخصوص بتن سخت شده در سن ۱۸۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه ۳٪ کاهش پیدا کرده است. نتایج ترکیبی مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن سخت شده در نمودار ۲ ارائه شده است.

جدول ۱۶- مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن‌های معمولی در سنین ۷ تا ۱۸۰ روزه

سن نمونه (روز)	مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص بتن سخت شده (g/cm^3)
۷	۲۷/۹	۲/۳۳
۲۸	۳۵	۲/۳۳
۹۰	۳۸/۶	۲/۲۸
۱۸۰	۳۹/۵	۲/۲۶



نمودار ۲- مقاومت فشاری و وزن مخصوص بر حسب سن نمونه‌ها

علت رشد مقاومت فشاری را می‌توان این گونه بیان کرد که مقاومت سنگ مادر سنگدانه‌های طبیعی مصرف شده و ترکیبات کانی‌شناسی آنها در نتایج مقاومت فشاری تأثیر مستقیم داشته و عامل دیگر واکنش شیمیایی محتمل سیلیس آزاد در سطح سنگدانه‌های مصرفی با هیدروکسید کلسیم و بهبود ناحیه انتقال با تولید ژل سیلیکات کلسیم هیدراته باشد که در بخش ریزساختار بتن بحث شده است. لازم به ذکر است که مطابق نتایج تجزیه شیمیایی به روش XRF درصد سیلیس سنگدانه‌های مصرفی بالای ۵۰٪ بوده است. علاوه بر آن در این تحقیق یکی از جنبه‌های پیوستگی در ناحیه انتقال بتن از نوع فیزیکی بوده و وابسته به تخلخل و زبری بافت، شکل و گوشه‌داری سنگدانه بوده و سبب قفل‌بست اجزای بتن شده است. سنگدانه‌های مصرفی از نوع رسوبی بوده و علاوه بر داشتن زبری سطح و گوشه‌دار بودن شکل سنگدانه‌ها، مقداری پیوند شیمیایی بین هیدروکسیدهای سیمان با سطح سنگدانه‌های مصرفی وجود داشته است.

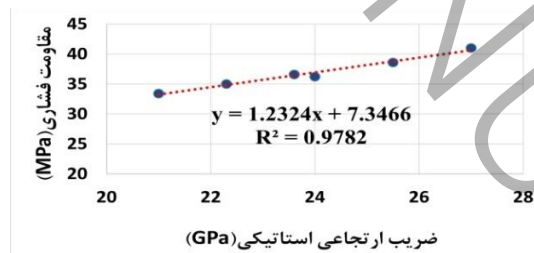
۳-۴- ضریب ارتجاعی استاتیکی

ضریب ارتجاعی بتن، در تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی دارای اهمیت ویژه‌ای است. در اکثر پروژه‌های بزرگ و مهم، ضریب ارتجاعی از جمله پارامترهای مهمی است که همیشه به عنوان اولین پارامتر در طراحی مطرح است. ضریب ارتجاعی همانند مقاومت با توجه به نرخ بار وارده می‌تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. ضریب ارتجاعی دینامیکی بزرگتر از نوع استاتیکی است ولی هرچه مقاومت بیشتر باشد، آن دو مقدار به هم نزدیک‌تر می‌باشند. لازم به ذکر است مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن از مهمترین ویژگی‌های بتن برای طبقه‌بندی در آیین‌نامه‌های داخلی و بین‌المللی هستند، لذا بررسی پارامترهای تأثیرگذار در آن ویژگیها حائز اهمیت است [۳۹]. در طراحی سازه‌های بتنی، ضریب ارتجاعی و شکل‌پذیری نقش مهمی را دارا می‌باشند، به‌ویژه در اکثر پروژه‌های بزرگ از جمله سدسازی، احداث نیروگاه هسته‌ای، مخازن نفت و دیگر موارد از پارامترهای اولیه و مهم که همیشه به عنوان اولین پارامترها در طراحی محسوب می‌شوند، ضریب ارتجاعی و شکل‌پذیری بتن هستند. هم‌چنین در سازه‌های بتنی، اغلب در شرایط بهره‌برداری و یا بعضاً در بررسی حالت نهایی از ضریب ارتجاعی استفاده می‌شود. رفتار بتن به دلیل استفاده از مصالح با ویژگی‌های متفاوت و ناهمگن آن، نسبت به دیگر مواد همگن تابع عوامل بسیار زیادی است و رفتار پیچیده و بعضاً ناشناخته‌ای را دارد [۴۰]. تغییرشکل حاصل در بتن تا اندازه‌ای به تغییرشکل ارتجاعی سنگدانه‌ها ارتباط دارد. نوع سنگدانه‌های مصرفی بر روی ضریب ارتجاعی تأثیرگذار است [۴۱]. نتایج مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن سخت‌شده در جدول ۱۷ آورده شده است.

جدول ۱۷- ضریب ارتجاعی استاتیکی و مقاومت فشاری بتن‌های معمولی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

سن نمونه	مقاومت فشاری (MPa)		ضریب ارتجاعی استاتیکی (GPa)	
۲۸ روزه	۳۵	۳۶/۶	۳۳/۴	۲۲/۳
۹۰ روزه	۳۸/۶	۴۱	۳۶/۲	۲۵/۵

همبستگی خطی ضریب ارتجاعی استاتیکی با مقاومت فشاری بتن معمولی در نمودار ۳ نشان داده شده است؛ به گونه‌ای که ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن معمولی در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه ۱۴/۳٪ افزایش داشته و در این محدوده زمانی میانگین مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ افزایش پیدا کرده است.

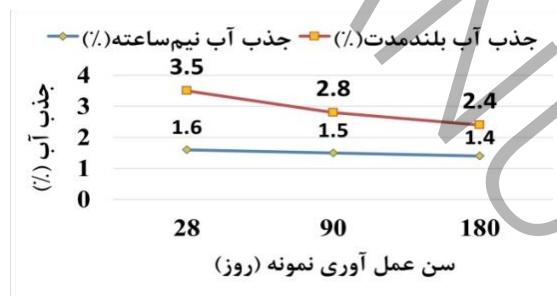


نمودار ۳- تغییرات مقاومت فشاری بتن برحسب ضریب ارتجاعی استاتیکی

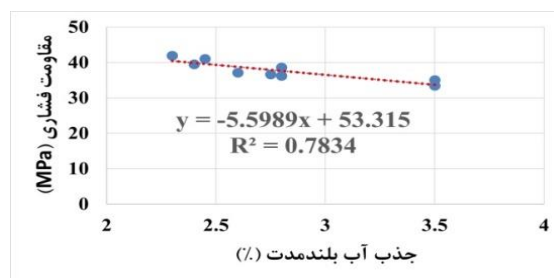
شایان‌ذکر است که مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی بتن، به یک‌میزان تحت تأثیر سن عمل‌آوری قرار ندارند. در مخلوط‌های بتنی با مقاومت‌های مختلف، در سنین ۲۸ تا ۹۰ روزه، ضریب ارتجاعی با سرعت بیشتری در مقایسه با مقاومت افزایش یافته است و این پدیده ممکن است ناشی از تأثیرات مثبت افزایش چگالی ناحیه انتقال، براثر واکنش‌های آهسته بین قلیائی‌های خمیرسیمان و سنگدانه باشد و تأثیر بیشتری بر روی منحنی تنش- کرنش و ضریب ارتجاعی، در مقایسه با مقاومت فشاری بتن، بگذارد. از دیگر عوامل مؤثر بر ضریب ارتجاعی نیز می‌توان به طراحی مخلوط (میکس)، نرخ بارگذاری، شرایط عمل‌آوری، مواد افزودنی معدنی و شیمیایی اشاره کرد.

۴-۴- جذب آب غوطه‌وری

نظر به اینکه با افزایش سن بتن، ناحیه انتقال به تراکم و بلوغ مطلوبی می‌رسد، لذا استحکام و چسبندگی این ناحیه از ایجاد ترک و شکست بتن تا زمانی که میزان بار فشاری وارده به مقدار مقاومت سنگدانه نرسیده باشد، جلوگیری می‌کند؛ چون که مقاومت سنگدانه‌های مصرفی معمولاً نسبت به ناحیه انتقال از مقاومت بالاتری برخوردار هستند. بدین ترتیب بار فشاری بر بتن سخت‌شده به سنگدانه‌های مخلوط بتنی و ناحیه انتقال وارد شده و عامل تعیین‌کننده مقاومت نمونه‌ها در این حالت، میزان مقاومت سنگ مادر که سنگدانه از آن مشتق شده و هم‌چنین میزان بلوغ ناحیه انتقال، خواهد بود. مخلوط‌های ساخته‌شده این پژوهش در ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده از مقاومت فشاری در وضعیت مطلوبی قرار داشتند. با نگاهی کلی به نتایج و به‌منظور یافتن رابطه‌ای ساده بین مقاومت فشاری و میزان جذب آب حجمی، نمودار همبستگی بین تمامی سنین مقاومت فشاری و جذب آب طرح مخلوط‌های بتن معمولی، ترسیم و ضرایب همبستگی مورد بررسی قرار گرفت. در خصوص نتایج جذب آب بلندمدت به غالب بودن تخلخل ساختار ملات بر ضعف سنگدانه‌ها ارتباط دارد با این توضیح که افزایش زمان غوطه‌وری نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری جذب آب بلندمدت فرصت نفوذ آب به عمق نمونه‌ها و رسیدن آب به سنگدانه‌های مخلوط بتنی در اختیار می‌گذارد. میزان کاهش جذب آب حجمی را می‌توان به علت پدیده کاهش منافذ و هم‌چنین مسیرهای منتهی به آنها و یا طولانی شدن مسیرهای عبور جریان آب در ریزساختار بتن دانست. به نظر می‌رسد مشارکت سیلیس آزاد سطوح سنگدانه‌ها در بهبود ریزساختار ناحیه انتقال و کاهش منافذ بتن به‌دلیل تشکیل ژل سیلیکات کلسیم هیدراته ثانویه موجب کاهش ابعاد این بلورها و کاهش ضخامت ناحیه انتقال شده و از این طریق موجب کاهش نفوذپذیری و کاهش میزان جذب آب حجمی در بتن شده است. هم‌چنین بر اساس مشاهدات می‌توان چنین استنباط کرد که نتایج این آزمایش تحت تاثیر تغییرات جریان منفذی درونی و تغییرات شیمیایی در ساختار این بتن‌ها قرار گرفته است. لازم به ذکر است که ناحیه انتقال به دلیل حضور بلورهای شش ضلعی بزرگ هیدروکسید کلسیم در این ناحیه دارای تخلخل قابل توجهی می‌باشد؛ در حالی که این ناحیه در خمیر سیمان وجود ندارد. نتایج جذب آب نیم‌ساعته آمده مطابق استاندارد BS 1881 کمتر از ۲٪ بوده و بتنی با دوام را نشان داده و نتایج جذب آب بلندمدت نشان می‌دهد که درصد جذب آب کمتر از ۳٪ داشته و طبق دسته‌بندی کیفی CEB-FIP در رده کیفی خوب قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده جذب آب و همبستگی با مقاومت فشاری بتن معمولی در نمودارهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بین مقاومت فشاری و جذب آب بلندمدت بتن در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روزه یک رابطه خطی با ضریب همبستگی ۰/۷۸ وجود دارد و با کاهش ۳۱/۴٪ جذب آب بلندمدت، میزان مقاومت فشاری معادل ۱۸/۳٪ افزایش یافت.



نمودار ۴- تغییرات جذب آب نیم‌ساعته و بلندمدت بتن در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روزه



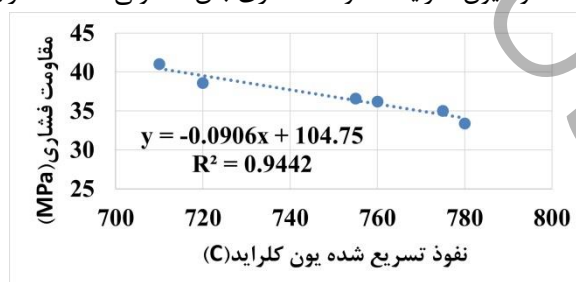
نمودار ۵- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب جذب آب بلندمدت

۴-۵- نفوذ آب تحت فشار

نتایج مربوط به آزمایش میزان نفوذ آب انجام شده بر روی نمونه‌های بتنی ۲۸ روزه برای طرح اختلاط منتخب پژوهش معادل ۱۲ میلی‌متر به دست آمده و با مطابقت میزان عمق نفوذ با آیین‌نامه پیشنهادی پایایی بتن در حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، طرح اختلاط بتن تحقیق در دسته بندی شرایط محیطی شدید قرار گرفته است. علیرغم اینکه دستیابی به حداکثر عمق نفوذ آب ۱۰ میلی‌متر عملاً بسیار مشکل است و در حالت طبیعی و شرایط واقعی فشار ۵ بار وجود ندارد به‌رحال الزاماً این آزمایش به‌نوعی تعیین‌کننده کیفیت بتن است و در این پژوهش بتن معمولی در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید قابلیت استفاده را ندارد. معمولاً راهکارهای متعددی مانند انتخاب مناسب مصالح و تعیین دقیق نسبت‌های اختلاط، عمل‌آوری مناسب، کاهش انواع درزها، روش صحیح قالب برداری، انواع روش‌های حفاظت از آرماتورها، استفاده از الیاف و یا پوشش‌های پلیمری، استفاده از پوشش‌های صنعتی، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها برای کاهش عمق نفوذ آب پیشنهاد شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که بایستی دقت کافی در میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد. قابل‌ذکر است که مصرف فوق روان کننده برای رسیدن به الزامات حالت خمیری غیرقابل‌اجتناب بوده و مصرف این ماده سبب افزایش هوازایی در بتن نیز می‌گردد که در نتیجه موجب افزایش خلل و فرج در نمونه‌ها شده و به نظر می‌رسد در این پژوهش بخشی از افزایش عمق نفوذ ناشی از مصرف اجباری فوق روان کننده برای بهبود رئولوژی بتن بوده است.

۴-۶- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج میزان شار عبوری از نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد ASTM C1202 نشان می‌دهد که میزان نفوذ یون کلراید در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب معادل ۷۷۰ و ۷۳۰ کولمب بوده و در طیف نفوذ خیلی کم قرار می‌گیرد. برای ارتقای کیفیت بتن و قرار گرفتن در بازه خطر نفوذ قابل چشم‌پوشی می‌توان با جایگزینی مواد پوزولانی به جای سیمان و اصلاح ریزساختار ناحیه انتقال به این هدف دسترسی پیدا کرد. در حال حاضر به استناد آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان روش RCPT به‌عنوان یکی از روش‌های کنترل کیفی بتن در شرایط محیطی خلیج فارس و دریای عمان در مدارک فنی کشور مطرح است. در برنامه‌های آزمایشگاهی با توجه به اینکه شرایط آماده‌سازی نمونه‌ها یکسان است و درصد پوزولان جایگزین شده در عمده نمونه‌ها به میزان برابر استفاده شده؛ لذا دخالت یون OH^- علاوه بر یون کلر در انتقال جریان عبوری از نمونه، یکسان است. بنابراین باور موجود در این خصوص که کاربرد برخی مواد مکمل سیمانی از راه کاهش یون OH^- در آب منفذی منجر به کاهش جریان عبوری می‌گردند و این کاهش الزاماً نشانگر مقاومت بالاتر در برابر نفوذ یون کلر نیست تا حدودی برطرف می‌شود. در این پژوهش به‌دلیل عدم استفاده از مواد پوزولانی در طرح اختلاط بتن معمولی دخالت یونهای متفرقه علاوه بر یون کلر منتفی بوده و خطای آزمایش پایین می‌آید. مطابق نمودار ۶ رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بین میانگین نفوذ تسریع شده یون کلراید و میانگین مقامت فشاری بتن معمولی به‌دست آمد؛ به گونه‌ای که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه با کاهش ۵/۲٪ نفوذ یون کلراید، مقاومت فشاری بتن معمولی ۱۰/۳٪ افزایش پیدا کرده است.

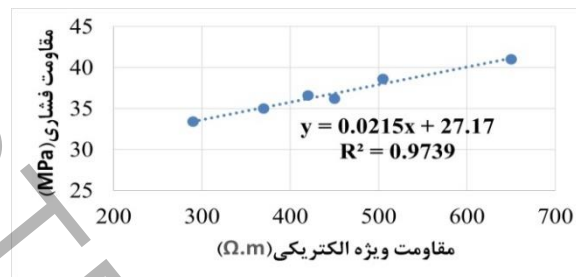


نمودار ۶- تغییرات مقاومت فشاری بتن برحسب نفوذ تسریع شده یون کلراید

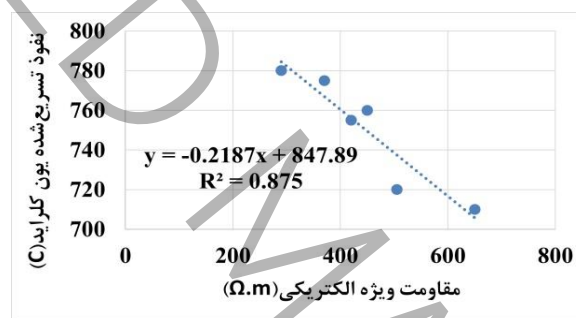
۴-۷- مقاومت ویژه الکتریکی

طبق مشاهدات و مقایسه نتایج مشخص گردید که مقاومت ویژه الکتریکی بتن وابستگی مستقیم به ریزساختار ماتریس سیمان، خلل و فرج آن، تخلخل و اندازه حفرات در مخلوط بتنی دارد. هم‌چنین تابعی از غلظت و تحرک یون‌ها در منافذ است. شیمی سیمان، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و استفاده مواد افزودنی و مکمل‌های سیمانی، فاکتورهایی هستند که بر ریزساختار ماتریس سیمانی بتن و منافذ آن اثرگذارند؛ بنابراین بر مقاومت الکتریکی بتن نیز تأثیرگذارند که نتایج حاصله از این پژوهش

این عوامل مؤثر را تأیید می‌نماید. با توجه به نتایج حاصله مقدار میانگین مقاومت الکتریکی ۲۸ و ۹۰ روزه برای بتن معمولی به ترتیب معادل ۳۶۰ و ۵۳۵ اهم‌متر است که در تقسیم‌بندی پیشنهادی در استاندارد ACI 222R-01 احتمال خوردگی آرماتور بر مبنای نتایج در آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی، بسیار ناچیز به‌دست آمده است. همچنین بر اساس طبقه‌بندی کیفیت بتن بر مبنای آزمایش مقاومت الکتریکی مالهوترا و همکاران [۴۲]، بتن مورد استفاده در پژوهش دارای کیفیت عالی است. روابط همبستگی مقاومت ویژه الکتریکی با مقاومت فشاری بتن معمولی و نفوذ تسریع‌شده یون کلراید در نمودارهای ۷ و ۸ آمده است؛ به گونه‌ای که در فاصله زمانی ۲۸ تا ۹۰ روزه با افزایش ۴۸/۶٪ مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت فشاری بتن معمولی ۱۰/۳٪ افزایش داشته و نفوذ تسریع‌شده یون کلراید بتن معمولی ۵/۲٪ کاهش پیدا کرده است.



نمودار ۷- تغییرات مقاومت فشاری برحسب مقاومت الکتریکی



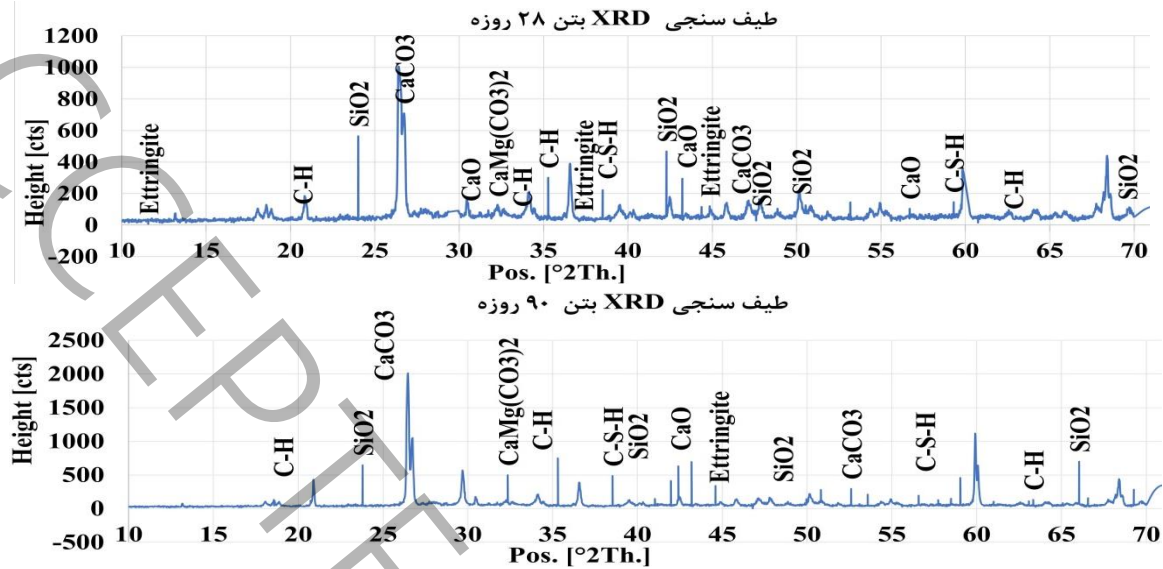
نمودار ۸- تغییرات نفوذ تسریع شده یون کلراید بتن برحسب مقاومت ویژه الکتریکی

۴-۸- تحلیل ریزساختار

۴-۸-۱- تحلیل ریزساختار با استفاده از طیف سنجی XRD

با به‌کارگیری نرم‌افزار Xpert High Score Plus و بررسی نتایج آزمایش پراش‌سنجی اشعه ایکس در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، شدت پیک فازهای محصولات هیدراتاسیون تشکیل شده در زاویه‌های مختلف دو تا تعیین شد. فازیابی بر مبنای بانک داده‌های نرم‌افزار انجام گرفته و فاصله صفحات اتمی، شدت پراش نسبی، زاویه پراش و شدت نقطه بیشینه و همچنین فازهای بلوری مربوط به هر فاصله صفحات اتمی برای نمونه‌های بتنی به‌دست آمد. فازهای بلوری مورد مطالعه در این تحقیق شامل فاز مهم بلوری سیمان هیدراته نشده به‌صورت آهک آزاد، فازهای بلوری مهم سنگدانه‌ها شامل کوارتز و کربنات کلسیم و همچنین فازهای مهم هیدراتاسیون سیمان شامل هیدروکسید کلسیم و سیلیکات کلسیم هیدراته و اترینگایت بوده است. با استفاده از کارت‌های شناسایی شده مربوط به فازهای بلوری انتخابی و مقایسه شدت قله موجود در کارت و مقایسه با اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش پراش‌سنجی مخلوط‌ها، رتبه‌بندی کمی شدت قله‌های طیف پراش پرتو ایکس برای فازهای بلوری به‌دست‌آمده از آنجایی که شدت قله‌ها در الگوی پراش پرتو ایکس، متناسب با مقدار فازهای موجود در نمونه است؛ با رتبه‌بندی کمی شدت قله‌ها می‌توان به میزان تقریبی و یا شدت نسبی میزان حضور فاز مورد نظر (آنالیز کمی به‌صورت تقریبی) در مخلوط‌های بتنی دسترسی پیدا نمود. نتایج به‌دست آمده از فازیابی به روش XRD در نمودار ۹ مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش سن نمونه بتنی، برخلاف انتظار شدت پیک CH بیشتر شده و در مقابل شدت قله CSH نیز افزایش یافت؛ که علت آن مصرف CH اضافی به واسطه سیلیس آزاد در سطوح سنگدانه سیلیسی و تشکیل CSH ثانویه با گذشت زمان و پیشرفت فرآیند

هیدراتاسیون است. لازم به ذکر است که با بررسی نتایج، یافته‌های آنالیز XRD با مقاومت فشاری و تصاویر SEM مطابقت داشته است. نتایج شدت قله‌های محصولات هیدراتاسیون با خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی در جدول ۱۸ ارائه شده است.

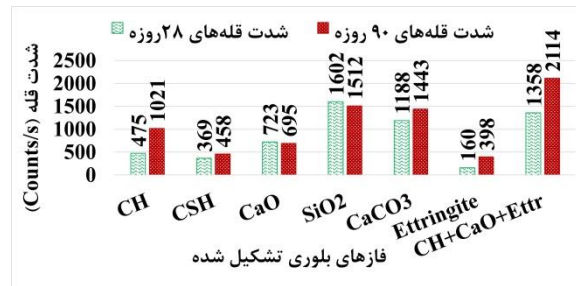


نمودار ۹- پراش اشعه ایکس نمونه بتن در سن ۲۸ و ۹۰ روزه

تغییرات شدت قله‌های محصولات هیدراتاسیون در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در نمودار ۱۰ ارائه شده است. به دلیل عدم استفاده از میکروسلیس شدت قله‌های CH و اترینگایت به ترتیب ۲/۱۵ و ۲/۴۹ برابر افزایش یافته است. با بررسی همبستگی نتایج شدت قله‌های CSH و CaCO₃ با مقاومت فشاری، مشخص شد که رابطه مستقیمی بین فازهای مذکور و مقاومت فشاری برقرار است که علت آن خاصیت چسبندگی سیلیکات کلسیم هیدراته، تراکم ریزساختار ناحیه انتقال و هم‌چنین خاصیت پرکنندگی کربنات کلسیم است. به گونه‌ای که با افزایش ۲۴٪ فاز سیلیکات کلسیم هیدراته و ۲۱/۵٪ فاز کربنات کلسیم، میزان مقاومت فشاری بتن معمولی ۱۰/۳٪ افزایش پیدا کرده است. به طور مشابه خواص دوام بتن معمولی نیز بهبود پیدا کرده؛ به طوری که مقاومت ویژه الکتریکی ۴۸/۶٪ افزایش و نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۲٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از مواد پوزولانی جایگزین سیمان، امکان بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن معمولی وجود خواهد داشت.

جدول ۱۸- مجموع شدت قله‌های محصولات هیدراتاسیون در مقایسه با خواص بتن معمولی ۲۸ و ۹۰ روزه

سن نمونه بتن معمولی	هیدروکسید کلسیم (CH)	سیلیکات کلسیم هیدراته (CSH)	اکسید کلسیم (CaO)	اکسید سیلیسیم (SiO ₂)	کربنات کلسیم (CaCO ₃)	اترینگایت (Ettringite)	اترینگایت (CH+CaO+Ettri)	هیدروکسید و اکسید کلسیم و	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت الکتریکی (Ωm)	نفوذ تسریع شده یون کلراید (C)
۲۸ روزه	۴۷۵	۳۶۹	۷۲۳	۱۶۰۲	۱۱۸۸	۱۶۰	۱۳۵۸	۳۵	۳۶۰	۷۷۰	
۹۰ روزه	۱۰۲۱	۴۵۸	۶۹۵	۱۵۱۲	۱۴۴۳	۳۹۸	۲۱۱۴	۳۸,۶	۵۳۵	۷۳۰	
تغییرات	+۲۱۵٪	+۲۴٪	-۳/۹٪	-۵/۶٪	+۲۱/۵٪	+۲۴۹٪	+۵۷٪	+۱۰/۳٪	+۴۸/۶٪	-۵/۲٪	



نمودار ۱۰- فازبایی محصولات هیدراتاسیون بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

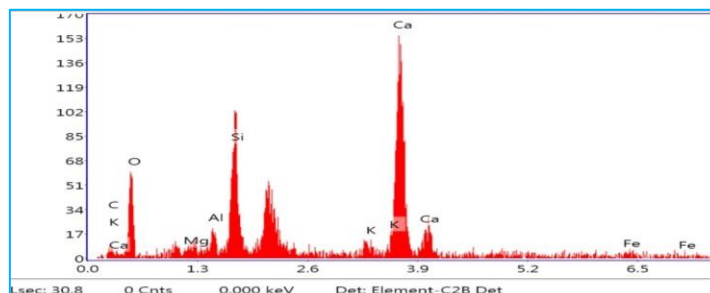
۴-۸-۲- تحلیل ریزساختار بتن معمولی با طیف سنجی EDS و تصاویر SEM

نسبت‌های اتمی عناصر ناحیه انتقال بر خواص مکانیکی و دوام بتن تأثیر می‌گذارد. پس از فازبایی بلورهای تشکیل شده در ناحیه انتقال، عناصر سازنده این فازها در مرز سنگدانه و به صورت خطی تا فاصله ۵۰ میکرومتر شناسایی شد. تصویر SEM از ناحیه انتقال در شکل ۸ ارائه شده است.



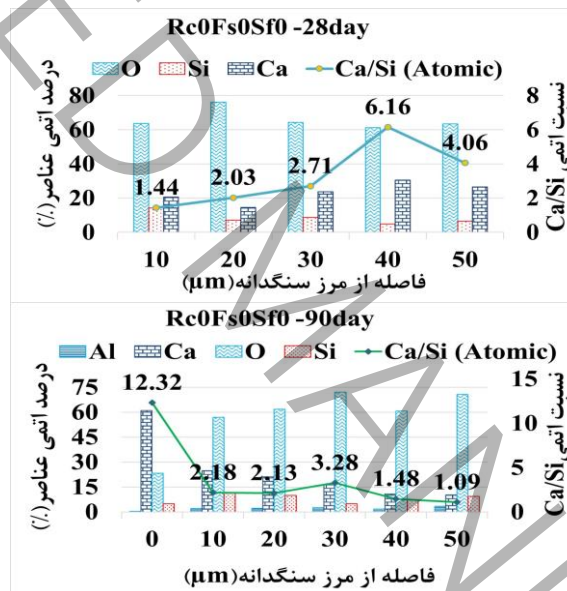
شکل ۸- تصویر ریزنگار الکترونی روبشی از ناحیه انتقال

عناصر مهم موجود در ناحیه انتقال شامل کلسیم، سیلیسیم، اکسیژن، آلومینیم و آهن هستند که نسبت‌های این عناصر نقش تعیین کننده‌ای بر خواص مکانیکی و دوام بتن دارند. در تحقیقات تراگرده و اردیم و همکاران [۳۸، ۴۳، ۴۴] از طبقه‌بندی مشابهی برای مطالعه و شناسایی فازهای بلوری و نسبت‌های عناصر تشکیل دهنده فازها استفاده گردیده؛ ولی فرمول ریاضی مشخصی برای ارتباط این نسبت‌ها با خواص مکانیکی و دوام بتن ارائه نشده است. در این تحقیق به بررسی روابط مختلف (خطی، نمایی، چند جمله‌ای و توانی) بین نتایج مکانیکی، دوام و ریزساختار بتن معمولی پرداخته شد. نمودار ۱۱ عناصر را در ناحیه انتقال در فاصله ۱۰ میکرومتری از مرز سنگدانه نشان می‌دهد. نمودارهای ۱۲ و ۱۳ نسبت وزن کلسیم به سیلیسیم در ناحیه انتقال بتن معمولی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه نشان می‌دهند. علاوه بر این نسبت مجموع عناصر آلومینیم و آهن به عنصر کلسیم در فاصله مرز تا ۳۰ میکرومتری از سنگدانه معادل ۰/۱۵ تا ۰/۲ ثبت گردیده و در فاصله بیشتر از ۳۰ میکرومتر افزایش یافته و تا فاصله ۵۰ میکرومتر به ۰/۳۷ رسیده است. در مرز اتصال ناحیه انتقال با سنگدانه بیشترین نسبت وزنی Ca/Si معادل ۱۷/۵۹ به دست آمده که بیانگر نسبت بالای CH در تماس با سنگدانه است و این پدیده در طیف سنجی XRD به اثبات رسید. در این تحقیق برای تشخیص هیدرات‌های غنی از CSH، CH و دارای منوسولفات (AFm) در ناحیه انتقال، مطابق جدول ۱۹ و ۲۰ نسبت‌های وزنی و اتمی Ca/Si، (Al+Fe)/Ca و S/Ca بتن معمولی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بررسی شده است.

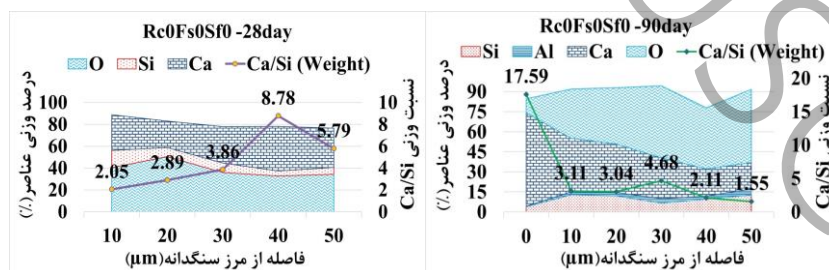


نمودار ۱۱- نمایی از عناصر شناسایی شده در فاصله ۱۰ میکرومتری از مرز سنگدانه

نتایج نشان داد که تا سن ۹۰ روزه نسبت Ca/Si در مرز با سنگدانه ۵/۶ برابر مقدار این نسبت در فاصله ۱۰ میکرومتری از سنگدانه بوده که این پدیده نشان دهنده رسوبگذاری بیشتر بلورهای هیدروکسیدکلیسیم در مجاور سنگدانه است که رسوبگذاری CH و اترینگایت در تصویر SEM مشاهده و مطابق شکل ۹ ارائه شده است. یافته ها با تحقیق وارگاس و همکاران [۴۵] در مورد نقش ناحیه انتقال در توسعه مقاومت فشاری همسو هستند. نسبت وزنی Ca/Si با فاصله گرفتن از مرز سنگدانه تا فاصله ۳۰ میکرومتری رشد داشته و سپس تا فاصله ۵۰ میکرومتر روند کاهشی دارد. نتایج به دست آمده از نسبت وزنی Ca/Si در نمودار ۱۴ ارائه شده است. نتایج به دست آمده مطابق نمودار ۱۵ نشان می دهد که نسبت وزنی Ca/Si در فاصله مرز سنگدانه تا فاصله ۳۰ میکرومتری، همبستگی پایینی با مقاومت فشاری بتن داشته؛ ولی در فاصله ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری رابطه خطی مستقیم با ضریب همبستگی قابل قبول ۰/۸۶ بین نسبت وزنی Ca/Si و مقاومت فشاری به دست آمد. بطور مشابه برای همبستگی نسبت وزنی Ca/Si با نفوذ سریع شده یون کلراید در محدوده (۳۰-۵۰) μm ، رابطه خطی مستقیم $Y=6/34X+721$ با ضریب همبستگی قابل قبول $R^2=0/86$ برقرار می باشد. نتایج نشان داد که نسبت وزنی (Al+Fe)/Ca در محدوده (۰-۳۰) μm از مرز سنگدانه، ۰/۱۵ تا ۰/۲ متغیر بوده و با عبور از فاصله ۳۰ میکرومتری نسبت مذکور تا فاصله ۵۰ μm ، رشد ۰/۲ تا ۰/۳۷ داشته است.



نمودار ۱۲- نسبت اتمی کلسیم به سیلیسیم در ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه



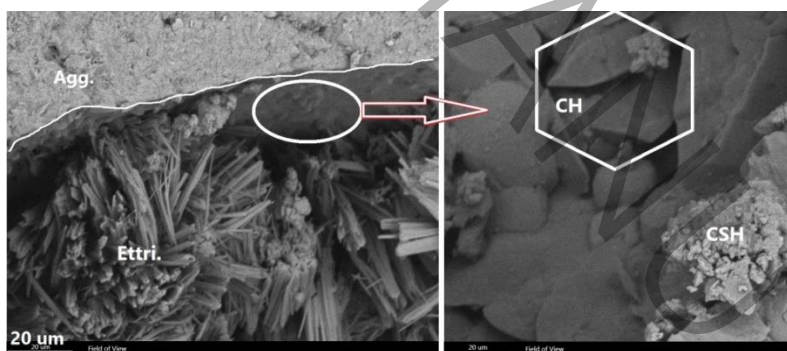
نمودار ۱۳- نسبت وزنی انباشته کلسیم به سیلیسیم در ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

جدول ۱۹- نسبت عناصر سازنده ناحیه انتقال بتن در سن ۹۰ روزه

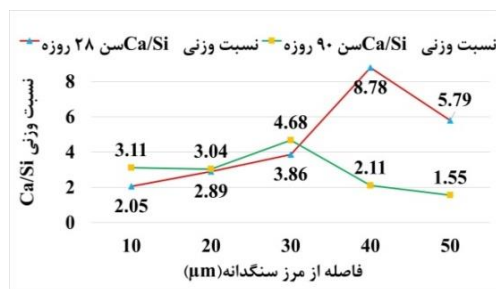
نسبت عناصر						فاصله از مرز سنگدانه (μm)
S/Ca (Atomic)	S/Ca (Weight)	(Al+Fe)/Ca (Atomic)	(Al+Fe)/Ca (Weight)	Ca/Si (Atomic)	Ca/Si (Weight)	
۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱۴	۰/۱۹	۱۲/۳۲	۱۷/۵۹	۰
۰/۴۶	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۶	۲/۱۸	۳/۱۱	۱۰
۰/۴۷	۰/۳۳	۰/۱۶	۰/۱۵	۲/۱۳	۳/۰۴	۲۰
۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۱۹	۳/۲۸	۴/۶۸	۳۰
۰/۶۸	۰/۴۷	۰/۲۴	۰/۲۳	۱/۴۸	۲/۱۱	۴۰
۰/۹۲	۰/۶۴	۰/۴۴	۰/۳۷	۱/۰۹	۱/۵۵	۵۰

جدول ۲۰- تغییرات نسبت کلسیم به سیلیسیم ناحیه انتقال بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه

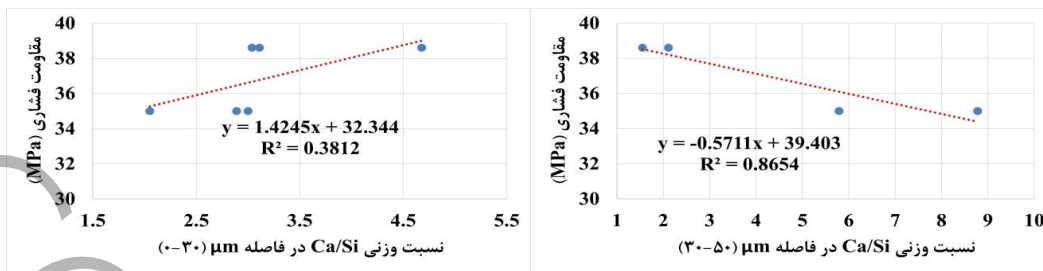
تغییر نسبت وزنی و اتمی	نسبت کلسیم به سیلیسیم				فاصله از مرز سنگدانه (μm)
	Ca/Si (Atomic) روزه ۹۰	Ca/Si (Weight) روزه ۹۰	Ca/Si (Atomic) روزه ۲۸	Ca/Si (Weight) روزه ۲۸	
۹۰ به ۲۸ روزه	*	۱۲/۳۲	۱۷/۵۹	*	۰
	۱/۵۲	۲/۱۸	۳/۱۱	۱/۴۴	۲/۰۵
	۱/۰۵	۲/۱۳	۳/۰۴	۲/۰۳	۲/۸۹
	۱/۲۱	۳/۲۸	۴/۶۸	۲/۷۱	۳/۸۶
	۰/۲۴	۱/۴۸	۲/۱۱	۶/۱۶	۸/۷۸
	۰/۲۷	۱/۰۹	۱/۵۵	۴/۰۶	۵/۷۹



شکل ۹- رسوبگذاری CH شش وجهی و اترینگایت سوزنی در مجاورت سنگدانه بتن معمولی ۹۰ روزه



نمودار ۱۴- تغییرات نسبت وزنی Ca/Si با افزایش فاصله از مرز سنگدانه در بتن معمولی



نمودار ۱۵- تغییرات مقاومت فشاری بتن بر حسب نسبت وزنی Ca/Si در ناحیه انتقال

۴- نتایج

نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص تاثیر ناحیه انتقال بر خواص و ریزساختار بتن معمولی بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی به شرح ذیل ارائه می‌گردد:

- ۱- با توجه به مقاومت سنگ مادر به میزان بیش از ۴۰MPa، مقاومت مشخصه نهایی بتن معادل ۳۵MPa تحت تأثیر مقاومت پیوستگی ناحیه انتقال قرار گرفته و سبب شده که مقاومت بتن از مقاومت پیوستگی بیشتر نشود و سطح شکست بتن در ناحیه انتقال خمیرسیمان و سنگدانه اتفاق بیفتد.
- ۲- مقاومت فشاری بتن در سن ۱۸۰ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه به میزان ۱۳٪ افزایش نشان داد.
- ۳- بر اساس رابطه خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۸ بین ضریب ارتجاعی استاتیکی و مقاومت فشاری بتن در محدوده سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه، با افزایش ۱۴/۳٪ در ضریب ارتجاعی استاتیکی، مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ رشد داشته‌است.
- ۴- با افزایش سن نمونه از ۲۸ تا ۱۸۰ روزه، جذب آب غوطه‌وری بلندمدت ۳۱/۴٪ کاهش یافته و مقاومت فشاری ۱۸/۳٪ افزایش نشان داد. رابطه خطی معکوسی با ضریب همبستگی ۰/۷۸ بین جذب آب بلندمدت و مقاومت فشاری به دست آمد.
- ۵- رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۹۴ بین نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت فشاری بتن حاصل شد، به گونه‌ای که در محدوده سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه با کاهش ۵/۲٪ در نفوذ یون کلراید، مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ افزایش نشان داد.
- ۶- بر اساس رابطه خطی با ضریب همبستگی ۰/۹۷ بین مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت فشاری بتن در محدوده سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه، با افزایش ۴۸/۶٪ مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ رشد داشته‌است.
- ۷- با افزایش سن نمونه از ۲۸ تا ۱۸۰ روزه، نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۲٪ کاهش یافته و مقاومت فشاری ۱۰/۳٪ افزایش نشان داد. رابطه خطی معکوسی با ضریب همبستگی ۰/۸۷ بین نفوذ تسریع شده یون کلراید و مقاومت فشاری به دست آمد.
- ۸- شدت قله‌های CSH و CaCO₃ و همسویی با مقاومت فشاری در محدوده سنی ۲۸ تا ۹۰ روزه، مشخص شد که رابطه مستقیمی بین این فازها و مقاومت فشاری وجود دارد که علت آن خاصیت چسبندگی CSH و همچنین خاصیت پرکنندگی CaCO₃ است که باعث تراکم ریزساختار ناحیه انتقال و بهبود خواص بتن شده‌است. به گونه‌ای که با افزایش ۲۴٪ فاز CSH و ۲۱/۵٪ فاز CaCO₃، میزان مقاومت فشاری بتن ۱۰/۳٪ رشد داشته‌است.
- ۹- با افزایش ۲۴٪ فاز CSH و ۲۱/۵٪ فاز CaCO₃، مقاومت ویژه الکتریکی به میزان ۴۸/۶٪ افزایش و نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۲٪ کاهش داشته‌است.
- ۱۰- در سن ۹۰ روزه نسبت Ca/Si در مرز با سنگدانه ۵/۶ برابر مقدار نسبت در فاصله ۱۰ میکرومتری از سنگدانه بوده و این پدیده نشانگر رسوب‌گذاری بیشتر CH در مرز سنگدانه که نقطه بیشینه نمودار نسبت‌های کلسیم به سیلیس به مرز سنگدانه نزدیک‌تر شده‌است. تصاویر SEM تجمع CH و اترینگایت در منافذ مرزی سنگدانه با ناحیه انتقال را نشان داد.
- ۱۱- با فاصله گرفتن از مرز سنگدانه تا ۱۰ میکرومتر، نسبت Ca/Si در این فاصله ۸۲٪ افت پیدا کرد و مجدداً رشد تدریجی ۱/۷ برابری تا فاصله ۳۰ میکرومتری داشته و با عبور از این نقطه کاهش پیدا می‌کند.

۱۲- در فاصله ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری رابطه خطی معکوس با ضریب همبستگی ۰/۸۶ بین نسبت وزنی Ca/Si و مقاومت فشاری بتن به دست آمد، به گونه‌ای که با افزایش ۵/۷ برابری نسبت وزنی Ca/Si میزان مقاومت فشاری ۹/۳٪ کاهش پیدا کرد.

۱۳- در فاصله ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری بین نسبت وزنی Ca/Si و نفوذ تسریع شده یون کلراید رابطه خطی مستقیم برقرار است، به طوری که با افزایش ۵/۷ برابری نسبت وزنی Ca/Si مقدار نفوذ تسریع شده یون کلراید ۵/۵٪ افزایش یافت.

۱۴- نسبت وزنی (Al+Fe)/Ca تا فاصله ۳۰ میکرومتر از مرز سنگدانه، به میزان ۰/۱۵ تا ۰/۲ تغییر کرده و در محدوده ۳۰ تا ۵۰ میکرومتری، از ۰/۲ تا ۰/۳۷ افزایش یافته است.

مراجع

- [1] J. Farran, Introduction: The transition zone-discovery and development, in *Interfacial Transition Zone in Concrete*, (1996).
- [2] K.L. Scrivener, A. Bentur, P. Pratt, Quantitative characterization of the transition zone in high strength concretes, *Advances in Cement Research*, 1(4) (1988) 230-237.
- [3] K.L. Scrivener, A.K. Crumbie, P. Laugesen, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface science*, 12 (2004) 411-421.
- [4] L.E. Dalton, J.M. LaManna, S. Jones, M. Pour-Ghaz, Does ITZ Influence Moisture Transport in Concrete?, *Transport in Porous Media*, 144(3) (2022) 623-639.
- [5] J. Maso, *Interfacial transition zone in concrete*, CRC Press, 1996.
- [6] J.L. Costafreda, D.A. Martín, L. Presa, J.L. Parra, Effects of a Natural Mordenite as Pozzolan Material in the Evolution of Mortar Settings, *Materials*, 14(18) (2021) 5343.
- [7] J.A. Rossignolo, Interfacial interactions in concretes with silica fume and SBR latex, *Construction and Building Materials*, 23(2) (2009) 817-821.
- [8] B. Pang, Z. Zhou, X. Cheng, P. Du, H. Xu, ITZ properties of concrete with carbonated steel slag aggregate in salty freeze-thaw environment, *Construction and Building Materials*, 114 (2016) 162-171.
- [9] G. Fang, Q. Wang, M. Zhang, Micromechanical analysis of interfacial transition zone in alkali-activated fly ash-slag concrete, *Cement and Concrete Composites*, 119 (2021) 103990.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] J. Maso, "7th International Congress on the Chemistry of Cement", Paris, in, Editions septima Paris, 1980.
- [13] K. Scrivener, P. Pratt, RILEM TC 108 State of the Art Report, New York, (1994).
- [14] K.M. El-Dash, M.O. Ramadan, Effect of aggregate on the performance of confined concrete, *Cement and concrete research*, 36(3) (2006) 599-605.
- [15] J.-J. Zheng, X.-Z. Zhou, Effective medium method for predicting the chloride diffusivity in concrete with ITZ percolation effect, *Construction and Building Materials*, 47 (2013) 1093-1098.
- [16] Y. Xie, D.J. Corr, F. Jin, H. Zhou, S.P. Shah, Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC), *Cement and Concrete Composites*, 55 (2015) 223-231.
- [17] 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.
- [18] K.L. Scrivener, P.L. Pratt, Characterization of interfacial microstructure, *Interfacial transition zone in concrete*, 2 (1996) 3-18.
- [19] K.-Y. Liao, P.-K. Chang, Y.-N. Peng, C.-C. Yang, A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete, *Cement and Concrete research*, 34(6) (2004) 977-989.
- [20] P.K. Mehta, *Concrete. Structure, properties and materials*, (1986).
- [21] F.M. Lea, *The chemistry of cement and concrete*, (1935).
- [22] M. Zhou, X. He, H. Wang, W. Wu, J. He, C. Wu, Experimental study of mechanism properties of interfacial transition zones in steel fiber reinforced concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 20 (2024) e02954.
- [23] C. Committee, Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, in, ASTM International, 2013.
- [24] C. Astm, 12.(2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International, i.
- [25] A. Standard, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, *ACI Man. Concr. Pract.*, (1996) 1-38.
- [26] A. C143, Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete, *Book of ASTM Standards*, (2015).

- [27] 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).
- [28] M. Walker, Guide to the construction of reinforced concrete in the Arabian Peninsula, (No Title), (2002).
- [29] B.S. Institution, BS 1881 122: 2011+ A1: 2020. Testing Concrete: Part 122. Method for Determination of Water Absorption, British Standards Institution, 2020.
- [30] C. Astm, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, C642-13, (2013).
- [31] C.E.-I.d. Béton, CEB-FIP model code 1990: Design code, Thomas Telford Publishing, 1993.
- [32] B. En, 12390-8," Depth of penetration of water under pressure, British Standards Institution, (2000).
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] C. Astm, Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, West Conshohocken (PA): ASTM, (2012).
- [36] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on nondestructive testing of concrete, CRC press, 2003.
- [37] A.C.I.C. 222, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (ACI 222R-01), in, ACI Farmington Hills, MI, 2001.
- [38] 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.
- [39] K. Janamian, J.B. Aguiar, Concrete Materials and Technology: A Practical Guide, CRC Press, 2023.
- [40] A. Standard, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
- [41] K. Kishore, R. Tomar, Understanding the role of interfacial transition zone in cement paste and concrete, Materials Today: Proceedings, 80 (2023) 877-881.
- [42] V. Malhotra, N. Carino, CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete,(1991), in, CRC Press, Florida.
- [43] H.K.A. Al-Bayati, S.L. Tighe, H. Baaj, H.K.A. Al-Bayati, Effect of different treatment methods on the interfacial transition zone microstructure to coarse recycled concrete aggregate, in: Green Technol. Geotechnical Mater. Eng. Session, 2016 Conference of the Transportation Association of Canada Toronto. Retrieved from https://www.tac-atc.ca/sites/default/files/conf_papers/al-bayati_.pdf, 2016.
- [44] 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.
- [45] 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.

Effect of interfacial transition zone on properties and microstructure of concrete

Seyed Fathollah Sajedi^{a1}, Seyed Qasem Mirahmadi^b

^a PhD candidate, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

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

Abstract

Natural aggregates with high silica and w/c of 0.45 were used. To investigate the effect of the interfacial transition zone (ITZ) on the properties of concrete, 30 samples were examined in the form of 10 mixtures in the age range of 7 to 180 days; the selected mixtures was determined by the Taguchi method. Experiments were conducted to determine the properties concrete and finally its microstructure. The results showed that with the increase in the age, the mechanical properties improved; there was a decrease in volumetric water absorption, pressure water penetration and accelerated chloride ion penetration (RCPT), and a significant increase in the electrical resistance of the samples. Also, the amount of crystalline phase of calcium oxide and the number of large pores decreased and the hydrated calcium silicate phase of the transition region increased, which led to the improvement of the quality of the microstructure. With increasing age, hydrated calcium silicate and calcium carbonate increased by 24% and 21.5%, respectively; the compressive strength and electrical resistances also increased by 10.3% and 48.6%, and the accelerated penetration of chloride ions increased by 5.2%. Upto 30 micrometers, due to the disturbance in the boundary area, no acceptable correlation between the ratio of constituent elements and concrete properties was obtained. from 30 to 50 micrometers, linear relationships with R^2 as 0.85 were established between the weight ratio of Ca/Si with compressive strength and the RCPT; so by reducing Ca/Si by 82%, the compressive strength increased by 10.3% and penetration by 5.2% decreased.

Keyword: Interfacial Transition Zone (ITZ), Microstructure, X-ray spectroscopy, Atomic ratio of elements, Scanning Electron Micrograph (SEM)

¹ Corresponding Author: Email: sajedi.ac@gmail.com