

## بررسی مرز سنگدانه - خمیر سیمان در بتن های حاوی دوده سیلیسی و خاکستر بادی

علی صدرممتازی<sup>۱\*</sup>، بهزاد طهمورسی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران  
 ۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

## چکیده

پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان موسوم به ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) از پارامترهای مهمی است که بر خواص مکانیکی و دوام بتن تاثیر می‌گذارد. ریزساختار ناحیه انتقال و تخلخل (حفرات) خمیر سیمان و بتن متأثر از نوع و خواص مصالح مصرفی است که بررسی آن از اهداف این تحقیق می‌باشد. از طرفی استفاده از روش‌های کارآمد، کم هزینه و قابل اتکا برای ارزیابی عملکرد بتن در برابر نفوذ یون کلراید و رابطه آن با ناحیه انتقال، به عنوان معیار مناسب برای ارزیابی دوام، اهمیت ویژه‌ای دارد. تاکنون روش‌های مختلفی با رویکرد شاخص‌های الکتریکی ارائه شده است. در این پژوهش، تاثیر مواد پوزولانی خاکستر بادی (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) و دوده سیلیسی (۵٪ و ۱۰٪) به عنوان جایگزین با وزن سیمان به صورت مخلوط‌های دوجزیبی و سه‌جزیبی، بر خواص بتن تازه و سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است. از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول الاستیسیته برای ارزیابی خواص مکانیکی استفاده شد. همچنین برای ارزیابی دوام بتن، آزمایش‌های عمق نفوذ آب، تخلخل، جذب آب موئینه، مقاومت الکتریکی ویژه، نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)، انتقال تسریع شده یون کلراید (RCMT) بکار برده شد. جهت بررسی ریخت شناسی مرز مشترک سنگدانه و خمیر سیمان از تصاویر ریزنگار الکترون پویشی (SEM) استفاده شد. نتایج آزمایش بر روی بتن تازه نشان داد که حضور دوده سیلیسی در مخلوط‌های دوجزیبی و سه‌جزیبی موجب کاهش کارایی و هوای محبوس و حضور خاکستر بادی موجب افزایش این دو می‌شود. افزودن دوده سیلیسی به مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی ضمن افزایش مقاومت مکانیکی، موجب کاهش تخلخل و حفرات تا ۱۸٪ می‌شود. همچنین حضور مواد پوزولانی علاوه بر افزایش کیفیت پیوند و یکنواختی مرز سنگدانه با خمیر سیمان، به طور چشمگیری بر خواص انتقال بتن تاثیر مثبت می‌گذارد.

کلمات کلیدی: خاکستر بادی، دوده سیلیسی، ناحیه انتقال، تخلخل، دوام.

\*نویسنده مسئول: علی صدرممتازی

پست الکترونیکی: sadrmontazi@guilan.ac.ir

DOI: 10.22065/jsce.2017.81146.1129

شناسه دیجیتال

http://dx.doi.org/ 10.22065/jsce.2017.81146.1129

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۱۰

## ۱- مقدمه

استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی موجب اصلاح برخی از خواص بتن می‌شود. حضور مواد مکمل سیمانی در بتن موجب بهبود خواص مهندسی بتن از جمله خواص رئولوژیکی، خواص مکانیکی و انتقال (نظیر: نفوذ آب و یون کلراید) می‌شود [۲ و ۱]. جریان یافتن آب و ترکیبات آن در بتن و فرآورده‌های سیمانی می‌تواند از طریق ایجاد تغییرات فیزیکی و یا شیمیایی بر دوام آن تاثیر نامطلوب بگذارد [۳]. با کاهش نفوذپذیری تاثیر نامطلوب برخی عوامل از جمله نفوذ یون‌های کلراید، حمله سولفات، واکنش قلیایی سنگدانه و کربناتاسیون بر بتن کاهش می‌یابد. تحقیقات مختلفی توسط پژوهشگران [۴-۶] بر روی نفوذپذیری و تاثیرات مواد معدنی پوزولانی بر آن انجام شده است و نتایج آن‌ها نشان داده که استفاده از این مواد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به دلایلی از جمله ریزی (نرمی بالا) و انجام واکنش پوزولانی با آهک آزاد در خمیر سیمان موجب افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود در دوام می‌شود. پاپاداکیس [۷] در تحقیق خود بر روی کربناتاسیون و انتشار یون کلراید در ملات حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی نشان داد که افزودن پوزولان موجب کاهش کربناتاسیون و انتشار یون کلراید می‌شود.

ریزساختار خمیر سیمان هیدراته شده مجاور ذرات سنگدانه با ریزساختار توده خمیر سیمان تفاوت دارد. دلیل این امر، آن است که در جریان مخلوط نمودن، ذرات خشک سیمان نمی‌توانند کاملاً در مجاورت ذرات نسبتاً بزرگ سنگدانه‌ها متراکم شوند. این موقعیت مشابه "اثر دیواره" بر روی سطوحی از بتن که در مجاورت قالب‌ها قرار می‌گیرند، با مقیاس بسیار کوچک‌تر می‌باشد؛ بنابراین سیمان کمتری برای هیدراته شدن و پر نمودن منافذ اولیه وجود دارد و در نتیجه ناحیه مشترک خمیر سیمان با سنگدانه یا ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) دارای تخلخل بسیار زیادتری از خمیر سیمان هیدراته شده‌ای که دورتر از سنگدانه‌های درشت قرار دارند، می‌باشد. توزیع ریزساختار ITZ به این ترتیب است که سطح سنگدانه‌ها با لایه‌ای از بلورهای هیدروکسید کلسیم جهت‌دار با ضخامت حدود ۰/۵ میکرومتر پوشانده شده‌اند. در پشت این لایه قشری از ژل هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H) با حدود همان ضخامت وجود دارد. همچنین منطقه سطح مشترک اصلی با ضخامت تقریبی ۵۰ میکرومتر حاوی محصولات هیدراسیون سیمان با بلورهای بزرگتر  $Ca(OH)_2$  می‌باشد که در آن سیمان هیدراته نشده بسیار کمتر است [۳]. این توزیع از دو دیدگاه دارای اهمیت است؛ اول آنکه هیدراسیون کامل سیمان نشانگر آن است که نسبت آب به سیمان در سطح مشترک، بیشتر از نقاط دیگر است و دوم آنکه وجود بلورهای بزرگ  $Ca(OH)_2$  بیانگر تخلخل زیادتر در این ناحیه بوده که اثر دیواره را نیز تأیید می‌کند [۸ و ۹]. ناحیه انتقال که در حقیقت ضعیف‌ترین حلقه در زنجیره بتن است، عامل محدودکننده مقاومت بتن می‌باشد. به همین دلیل (وجود ناحیه انتقال) بتن تحت تنش شکسته می‌شود که این تنش به مراتب کمتر از مقاومت هریک از دو جزء تشکیل دهنده آن است. ساختار ناحیه انتقال، بخصوص حجم حفرات و ترک‌های ریز موجود در آن تأثیر عمده‌ای بر سختی و مدول ارتجاعی بتن دارند. ناحیه انتقال در بتن همچون پلی بین دو جزء یعنی بخش خمیر سیمان و سنگدانه عمل می‌کند. حتی اگر هر جزء دارای سختی بالایی باشد، سختی ماده مرکب ممکن است به علت وجود پل‌های شکسته (حفرات و ترک‌های ریز در ناحیه انتقال) که تنش را انتقال نمی‌دهد، پایین باشد [۱۰ و ۱۱]. مقاومت ناحیه سطح مشترک می‌تواند در نتیجه واکنش‌های ثانوی بین  $Ca(OH)_2$  موجود در این منطقه و مواد پوزولانی معدنی افزایش و با گذشت زمان تخلخل آن کاهش یابد. همچنین استفاده از مواد پوزولانی در بتن به علت ریزی و سطح ویژه زیاد ذرات، مانع از بروز پدیده آب انداختن شده به طوری که هیچ‌گونه آب ناشی از آن در زیر سنگدانه‌های درشت محبوس نمی‌شود. در نتیجه تخلخل منطقه سطح مشترک کاهش می‌یابد [۱۲-۱۴]. برتون و همکاران [۱۵] در پژوهش خود نشان دادند که ضریب نفوذ موثر یون کلراید در ITZ ۶ تا ۱۲ برابر بیشتر از خمیر سیمان است که بیانگر تخلخل بالای آن است. وو و همکاران [۱۶] در تحقیق خود بر روی خواص ریز ساختاری ITZ در مخلوط‌های بتنی و رابطه آن با خواص تراوایی گزارش دادند که افزودن مواد پوزولانی باعث کاهش در تخلخل ITZ و در مخلوط‌های سه جزیی موجب هم‌افزایی در توزیع تخلخل شد. همچنین میزان ضریب انتقال یون کلراید و جذب آب مویینه به دلیل بهبود ساختار ITZ کاهش یافت.

نفوذ یون‌های کلراید به بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن یکی از دلایل خرابی زودرس سازه‌های بتن آرمه می‌باشد. از این‌رو، بررسی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلراید و اندازه‌گیری ضریب انتشار آن از طریق انجام آزمایش‌های بلند مدت یا کوتاه مدت، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به زمان بر و پرهزینه بودن آزمایش‌های بلند مدت، روش‌های تسریع یافته‌ای ارائه شده است. در برخی از این روش‌ها با تسریع نفوذ یون‌های کلراید توسط میدان الکتریکی، ضریب انتشار یون‌های کلراید به دست می‌آید و در برخی دیگر، با استفاده از شاخص‌هایی مانند رسانایی الکتریکی، مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلراید ارزیابی می‌گردد [۱۷-۱۹].

یکی از روش‌های پرکاربرد برای اندازه‌گیری نفوذ پذیری یون کلراید روش توصیه شده توسط استاندارد ASTM C1202، موسوم به نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) است. این روش نسبتاً سریع و تکرار پذیر می‌باشد اما تغییرات دمایی به وجود آمده (به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد و ناپایداری جریان عبوری) در خلال آزمایش موجب ایجاد انتقادهایی در مجامع علمی به آن شده است. همچنین به‌طور تئوری، رابطه‌ای صحیح و کامل بین نتایج آن با ضریب انتشار نمی‌توان پیدا کرد. همین امر موجب شده تا محققان تلاش‌های بیشتری را جهت ارزیابی دقیق‌تر نفوذ یون کلراید انجام دهند. از روش‌هایی که انطباق مناسبی با نتایج روش‌های طولانی مدت از خود نشان داده است، روش تسریع شده انتقال (مهاجرت) یون کلراید (RCMT) می‌باشد. این روش بر اساس استاندارد AASHTO TP64 [۲۰] یا NT BUILD 492 [۲۱] و به طور کلی مشابه روش RCPT است، ولی در این روش ولتاژ اعمال شده به نمونه با توجه به جریان عبوری از آن تغییر یافته و حجم محلول نمک در تماس با نمونه به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است.

از روش‌های دیگر برای ارزیابی سریع عملکرد دوام بتن اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی ویژه است. مقاومت الکتریکی (ویژه) از ویژگی‌های پیچیده در بتن می‌باشد که نشان دهنده توانایی حمل بار الکتریکی در اجزای مختلف ماتریس سیمانی و حتی سنگدانه هاست که عمدتاً به چگونگی پیشرفت فرآیند هیدراتاسیون، هندسه ساختار حفرات و توزیع فضایی آن‌ها در حجم بتن، ویژگی‌های الکتروشیمیایی ترکیبات محلول در حفره‌ها، رطوبت و تغییرات دما بستگی دارد [۲۲ و ۲۳].

هدف از انجام این تحقیق، بررسی تاثیر خاکستربادی و دوده سیلیسی بر خواص انتقال و مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلراید بتن (مقاومت الکتریکی ویژه و هدایت الکتریکی حجمی، RCPT و RCMT) و رابطه آن‌ها با مقاومت فشاری، تخلخل و ساختار ITZ می‌باشد.

## ۲- مطالعه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح

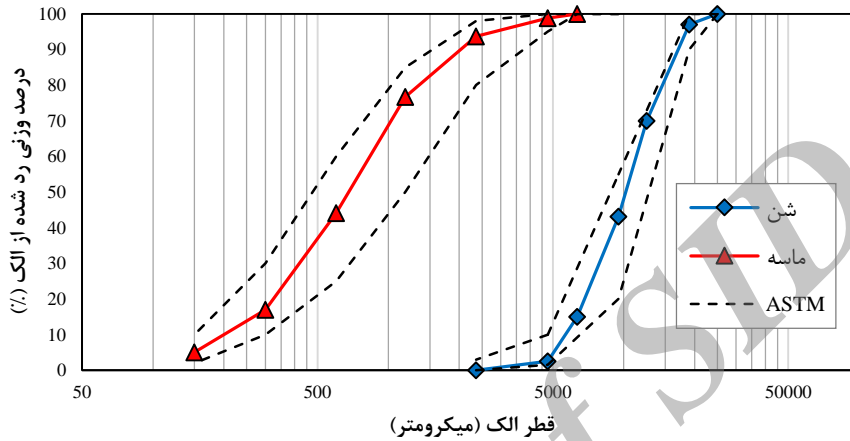
در این پژوهش از سیمان تیپ ۱-۴۲۵ مطابق الزامات ASTM C150 و مواد مکمل سیمانی شامل دوده سیلیسی و خاکستربادی استفاده شده است که ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. سنگدانه مورد استفاده برای تولید مخلوط بتن از نوع، شن شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و چگالی  $2/67 \text{ gr/cm}^3$  و ماسه طبیعی با چگالی  $2/6 \text{ gr/cm}^3$  بود که دانه‌بندی آن‌ها مطابق استاندارد ASTM C 33 در شکل ۱ ارائه شده است. همه مخلوط‌های بتنی با مقدار ثابت آب به مواد سیمانی  $0/45$  و عیار ثابت  $(\text{kg/m}^3)$  ۴۰۰ ساخته شدند و تحت شرایط یکسان در داخل آب آهک اشباع تا زمان آزمون، عمل‌آوری شدند. برای ساخت مخلوط‌های بتنی حاوی مواد مکمل سیمانی، از دوده سیلیسی (SF) در نسبت‌های جایگزینی ۵ و ۱۰ درصد وزنی مواد سیمانی و از خاکستربادی (FA) در نسبت‌های جایگزینی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی مواد سیمانی استفاده شده است. مشخصات مخلوط‌های مورد مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.

2 Rapid Chloride Penetration Test

3 Rapid Chloride Migration Test

جدول ۱: خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی مواد سیمانی

ترکیبات شیمیایی (% وزنی)								خواص فیزیکی		
SO3	Na2O	K2O	MgO	Fe2O3	Al2O3	SiO2	CaO	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	سطح ویژه (m <sup>2</sup> /kg)	
۲/۱	۰/۵	۰/۸۲	۲	۳/۶۴	۵/۳۶	۲۱/۰۸	۶۴/۳۴	۳۱۰	۳/۱۵	سیمان
۰	۰	۰	۲	۲	۱	۹۰	۱/۵	۱۹۵۰	۲/۲	دوده سیلیسی
۰/۱	۳/۲	-	۰/۶	۴/۸	۲۳/۴	۵۹/۳	۸/۶	۴۱۰	۲/۵۴	خاکسترآدی



شکل ۱: دانه بندی سنگدانه مصرفی.

جدول ۲: مشخصات مخلوط‌های ساخته شده برای یک متر مکعب

کد مخلوط	آب به مواد سیمانی	سیمان (kg)	دوده سیلیسی		خاکسترآدی		سنگدانه (kg)	
			(%)	(kg)	(%)	(kg)	شن	ماسه
Ctrl*	۰/۴۵	۴۰۰	۰	۰	۰	۰	۹۴۴	۸۷۱
FA10	۰/۴۵	۳۶۰	۰	۰	۱۰	۴۰	۹۴۱	۸۶۸
FA20	۰/۴۵	۳۲۰	۰	۰	۲۰	۸۰	۹۳۷	۸۶۵
FA30	۰/۴۵	۲۸۰	۰	۰	۳۰	۱۲۰	۹۳۳	۸۵۲
SF5	۰/۴۵	۳۸۰	۵	۲۰	۰	۰	۹۴۱	۸۶۹
SF10	۰/۴۵	۳۶۰	۱۰	۴۰۰	۰	۰	۹۳۷	۸۶۵
SF5FA10**	۰/۴۵	۳۴۰	۵	۲۰	۱۰	۴۰	۹۲۵	۸۶۳
SF5FA20	۰/۴۵	۲۸۰	۵	۲۰	۲۰	۸۰	۹۳۲	۸۶۱
SF5FA30	۰/۴۵	۲۶۰	۵	۲۰	۳۰	۱۲۰	۹۳۰	۸۵۸

\*: طرح شاهد، \*\*: SF5FA10 بیان گر مخلوط حاوی ۵٪ دوده سیلیسی و ۱۰٪ خاکسترآدی است.

## ۲-۲- روش‌های آزمایش

## ۲-۲-۱- بتن تازه

کارایی و مقدار هوای بتن تازه همه مخلوط‌های بتنی اندازه‌گیری شد. کارایی مخلوط با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 و مقدار هوای محبوس در مخلوط بتنی تازه مطابق استاندارد ASTM C 231 انجام شد.

## ۲-۲-۲- مقاومت مکانیکی

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی با بعد ۱۰۰ میلی‌متر در سن ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین آزمایش‌های کشش غیر مستقیم و مدول الاستیسیته بر روی استوانه‌های به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در سن ۲۸ انجام شد. در هر سن سه نمونه بتنی آزمایش شدند و مقدار متوسط آن‌ها به عنوان نتیجه گزارش شد.

## ۲-۲-۳- جذب آب موئینه

آزمایش جذب آب موئینه بر اساس استاندارد ASTM C1585 در سن ۲۸ روز انجام شد. در این آزمایش از قرص‌های بتنی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر استفاده شد که بخش تحتانی آن به میزان ۱ تا ۳ میلی‌متر در آب قرار گرفته و سطوح دیگر نمونه به منظور جلوگیری از اثرات تبخیر آب در طی انجام آزمایش پوشش داده می‌شوند و در نهایت، افزایش جرم آن بر اثر جذب موئینه آب در بازه‌های زمانی مختلف بدست می‌آید. عامل جذب آب موئینه (I) مطابق معادله (۱) بدست آمد:

$$I = \frac{\Delta m}{A \rho} \quad (1)$$

که در آن I عامل جذب آب موئینه بر حسب میلی‌متر،  $\Delta m$  تغییرات جرم نمونه در زمان بر حسب گرم، A مساحت در معرض آب نمونه بر حسب میلی‌متر مربع و  $\rho$  چگالی آب بر حسب گرم بر میلی‌متر مربع است. شکل ۲ الف قرص‌های بتنی تحت آزمایش جذب آب موئینه را نشان می‌دهد.

## ۲-۲-۴- عمق نفوذ آب و تخلخل

آزمایش عمق نفوذ آب روی نمونه‌های مکعبی با بعد ۱۵۰ میلی‌متر تحت فشار ۰/۵ مگاپاسکال به مدت ۷۲ ساعت مطابق استاندارد EN 12390-8 در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. شکل ۲ ب دستگاه مورد استفاده را نشان می‌دهد.

میزان تخلخل (حجم حفرات) مخلوط‌های بتنی مطابق استاندارد ASTM C 642 بر روی قرص‌های بتنی ۲۸ روزه به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر به روش اختلاف بین وزن غوطه‌وری و وزن نمونه خشک محاسبه شد. ابتدا نمونه به مدت ۴۸ ساعت در گرم‌خانه با درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت نگه‌داری شدند و سپس توزین شده و وزن خشک (B) آن بدست آمد. در مرحله بعد نمونه در آب غوطه‌ور و جوشانده شد و سپس وزن با سطح خشک (A) آن بدست آمد. در انتها با استفاده از رابطه (۲) متوسط نتایج آزمایش روی سه قرص بتنی، به عنوان درصد تخلخل محاسبه شد.

$$P = \frac{(A - B)}{\rho V_c} \times 100 (\%) \quad (2)$$

که در آن  $P$  تخلخل کل برحسب درصد،  $A$  وزن نمونه غوطه‌ور و جوشانده شده در آب برحسب گرم،  $B$  وزن نمونه خشک برحسب گرم،  $V_c$  حجم نمونه بر حسب سانتی متر مکعب و  $\rho$  دانسیته آب در دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بر حسب گرم بر سانتی‌متر مربع.

خواص نفوذپذیری و تخلخل بتن، بهترین ویژگی برای توصیف یک ماده نفوذپذیر است. تخلخل مقدار منافذ و حفرات داخل بتن است که به صورت درصدی از مجموع حجم ماده نشان داده می‌شود. نفوذپذیری نیز بازتابی از چگونگی ارتباط میان منافذ است. این خاصیت به کمک یکدیگر اجازه تشکیل کانال‌های باریکی بر ای عبور آب به داخل جسم بتن و خروج از سمت دیگر را ممکن می‌سازد.



شکل ۲. ب: دستگاه اندازه‌گیری عمق نفوذ آب.



شکل ۲. الف: قرص‌های بتنی تحت آزمایش جذب آب مویینه.

## ۲-۲-۵- نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) مطابق با استاندارد ASTM C 1202 در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. در این آزمایش قرص‌های بتنی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت ۵۰ میلی‌متر تهیه شد و پس از اعمال خلأ و اشباع کردن با آب، داخل سلول دستگاه قرار گرفت و آزمایش شد. نمونه داخل سلول از یک وجه با محلول سود (NaOH) و وجه دیگر با محلول نمک (NaCl) در تماس قرار می‌گیرد. الکتروود طرفی از سلول که محلول سود درون آن است به قطب مثبت و الکتروود طرف دیگر سلول که محلول نمک درون آن است به قطب منفی دستگاه مولد جریان مستقیم متصل شده و با روشن کردن دستگاه اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت به آزمونه از طریق الکتروودها اعمال می‌گردد. جریان عبوری از نمونه طی ۶ ساعت ثبت می‌شود. مجموع جریان رد شده برحسب کولمب به عنوان شاخصی برای مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید استفاده شد. RCPT روشی است که در آن شرایط پایدار نفوذ وجود ندارد. به عبارت دیگر برای حصول انتشار پایدار، می‌بایست شرایطی ایجاد شده باشد که یون‌های کلراید از یک سوی نمونه به سوی دیگر آن رسیده باشند که برای دستیابی به این شرط، نیاز به مدت زمان طولانی است [۱۹]. بنابراین در روش RCPT اندازه‌گیری از همان لحظه شروع انجام آزمایش، آغاز می‌گردد.

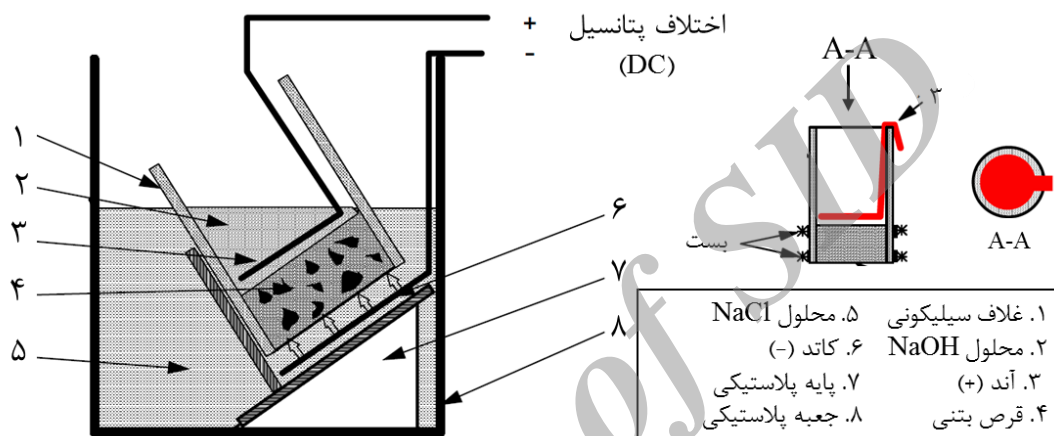
## ۲-۲-۶- انتقال (مهاجرت) تسریع شده یون کلراید (RCPT)

این آزمایش که عملکرد خوبی از خود نشان داده است و نتایج آن ارتباط خوبی با روش‌های بلند مدت دارد، بر اساس استاندارد BUILD 492-99 [۲۱] در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. نمونه‌های استفاده شده در این آزمایش مشابه آزمایش RCPT می‌باشد. نمونه‌ها پس از اشباع شدن با آب آهک در محفظه خلأ، داخل غلاف لاستیکی قرار داده شده و سطح پیرامونی آن‌ها ایزوله می‌شود. در شکل ۳ صورت شماتیک آزمایش ارائه شده است. پس از اعمال اختلاف پتانسیل، جریان عبوری از هر آزمونه اندازه‌گیری می‌شود. در صورت زیاد بودن جریان اولیه عبوری ولتاژ اعمالی کاهش داده می‌شود تا نرخ جریان کاهش پیدا کرده و از گرم شدن آزمونه جلوگیری شود. پس از مدت زمان  $24 \pm 2$  ساعت دستگاه خاموش و نمونه‌ها از آن خارج می‌شود. در این روش برای جلوگیری از تأثیر یون‌های دیگر مانند OH بر نتایج،

مستقیماً عمق نفوذ یون کلراید با دو نیم کردن نمونه و استفاده از محلول نیترات نقره، بدست آمد. با اندازه گیری عمق ناحیه تغییر رنگ داده، عمق انتقال یون کلراید تعیین و در انتها نرخ نفوذ کلراید از رابطه ۳ محاسبه شد.

$$D_{nssm} = \frac{X_d}{\sqrt{t}} \quad (3)$$

که در آن  $D_{nssm}$  نرخ انتقال یون کلراید بر حسب میلی متر بر ولت ساعت،  $X_d$  میانگین عمق نفوذ یون کلراید بر حسب میلی متر،  $V$  اختلاف پتانسیل اعمال شده در طول آزمایش بر حسب ولت،  $t$  مدت زمان آزمایش بر حسب ساعت می باشد.



شکل ۳: شماتیک تجهیزات آزمایش RCMT.

### ۲-۲-۷- مقاومت الکتریکی ویژه

آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه با استفاده از دو صفحه ضد زنگ آلومینیومی به عنوان الکترود که در تماس با دو سطح جانبی و روبروی هم در نمونه مکعبی با بُعد ۱۰۰ میلی متری اشباع از آب قرار می گیرند، در سن ۲۸ و ۹۰ روز انجام شد. با استفاده از قانون اهم، رابطه بین اختلاف پتانسیل اعمال شده و شدت جریان اندازه گیری شده و مقدار مقاومت الکتریکی ویژه مطابق رابطه (۴) بدست می آید [۲۴].

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4)$$

که در آن  $\rho$  مقاومت الکتریکی ویژه بر حسب اهم در متر،  $R$  مقاومت الکتریکی بر حسب اهم،  $L$  فاصله بین دو الکترود (طول نمونه در جهت جریان) بر حسب متر،  $A$  سطح سطح مقطعی که جریان از آن می گذرد (سطح تماس الکترودها با نمونه) بر حسب متر مربع است.

### ۲-۲-۸- ریخت شناسی

به منظور بررسی ریزساختار ماتریس سیمان و ناحیه انتقال، قطعاتی به ابعاد حدود ۵×۵×۲ میلی متر از مرکز نمونه استخراج شد. پس از انجام عملیات آماده سازی بر روی نمونه در آزمایشگاه، جهت تصویر برداری به داخل دستگاه SEM منتقل شدند.

## ۳- بحث و بررسی نتایج

## ۳-۱- کارایی و هوای محبوس بتن تازه

نتایج اسلامپ و درصد هوای محبوس بتن در جدول ۳ آمده است. ملاحظه می شود که افزون خاکستر بادی در مخلوط های دو جزئی و سه جزئی به ترتیب تا ۴۵٪ تا ۲۵٪، موجب افزایش اسلامپ شده است. در مخلوط های دو جزئی، با افزودن دوده سیلیسی و خاکستر بادی مقدار هوای محبوس شده به ترتیب کاهش و افزایش یافته است. در مخلوط های سه جزئی، تاثیر افزودن دوده سیلیسی به مخلوط های حاوی خاکستر بادی به صورت کاهش درصد هوا قابل مشاهده است. که ریزی و سطح مخصوص بالای دوده سیلیسی موجب این امر شده است.

## ۳-۲- مقاومت مکانیکی

خلاصه نتایج مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مدول الاستیسیته در جدول ۳ آمده است. در مخلوط های دو جزئی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد افزایشی نداشته است. اما با افزایش سن تا ۹۰ روز، مقاومت فشاری آن ها تا ۱۴٪ افزایش پیدا کرده است.

در مخلوط های سه جزئی افزودن ۵٪ دوده سیلیسی موجب بهبود مقاومت مکانیکی نمونه های حاوی خاکستر بادی شده است. ملاحظه می شود که افزودن دوده سیلیسی به مخلوط های حاوی خاکستر بادی، در سن ۹۰ روز در مقایسه با بتن شاهد تا ۲۰٪ افزایش مقاومت فشاری داشت. مخلوط های سه جزئی در مقایسه با مخلوط های FA10، FA20 و FA30 در تمام سن ها مقاومت بالاتری را کسب کرده اند. به طوری در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب تا ۱۹٪ و ۱۲٪ افزایش مقاومت داشتند. حضور دوده سیلیسی به دلیل انجام واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان و تشکیل ژل هیدرات سیلیکات کلسیم موجب افزایش مقاومت می شود. با توجه به ضعف خاکستر بادی در بهبود مقاومت مکانیکی در سنین اولیه افزودن پوزولان های با نرمی و واکنش پذیری بالا مانند دوده سیلیسی یا متاکائولن در مقادیر پایین جایگزنی (۵٪ تا ۱۰٪) می تواند منجر به افزایش خواص مکانیکی شود.

جدول ۳: خلاصه نتایج بتن تازه و مقاومت مکانیکی مخلوط های بتنی

کد مخلوط	مدول الاستیسیته					اسلامپ (mm)	هوای محبوس (%)	تخلخل کل (%)
	مقاومت فشاری		مقاومت کششی غیرمستقیم		(GPa)			
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)				
	۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز	۲۸ روز	۲۸ روز			
Ctrl	۲۲/۵	۳۱	۳۴	۲/۳۳	۲۶/۴	۱۰۰	۳/۳	۱۳/۶
FA10	۲۰	۲۸	۳۸/۶	۲/۴	۲۵	۱۲۷	۳/۴۵	۱۴/۳۵
FA20	۱۷/۵	۲۶	۳۷	۲/۲۵	۲۴	۱۴	۳/۸	۱۶/۳۲
FA30	۱۴	۲۱	۳۲	۲	۲۳/۴	۱۴۵	۳/۸۲	۱۷/۳۵
SF5	۲۱	۳۰	۳۵	۲/۶	۲۸/۸	۹۰	۲/۸	۱۱/۳۶
SF10	۲۶/۲	۴۰	۴۳	۳/۱۷	۳۰	۷۸	۲/۶۸	۹/۳
SF5FA10	۲۲	۲۸	۳۸	۲/۴۷	۲۸/۳	۱۰۸	۲/۷۸	۱۲/۳۶
SF5FA20	۲۰	۳۱	۴۰/۷	۲/۳۶	۲۷	۱۲۵	۲/۸۵	۱۳/۲۵
SF5FA30	۱۶/۴	۲۶	۳۷	۲/۳	۲۶/۴	۱۳۶	۲/۸	۱۵/۳

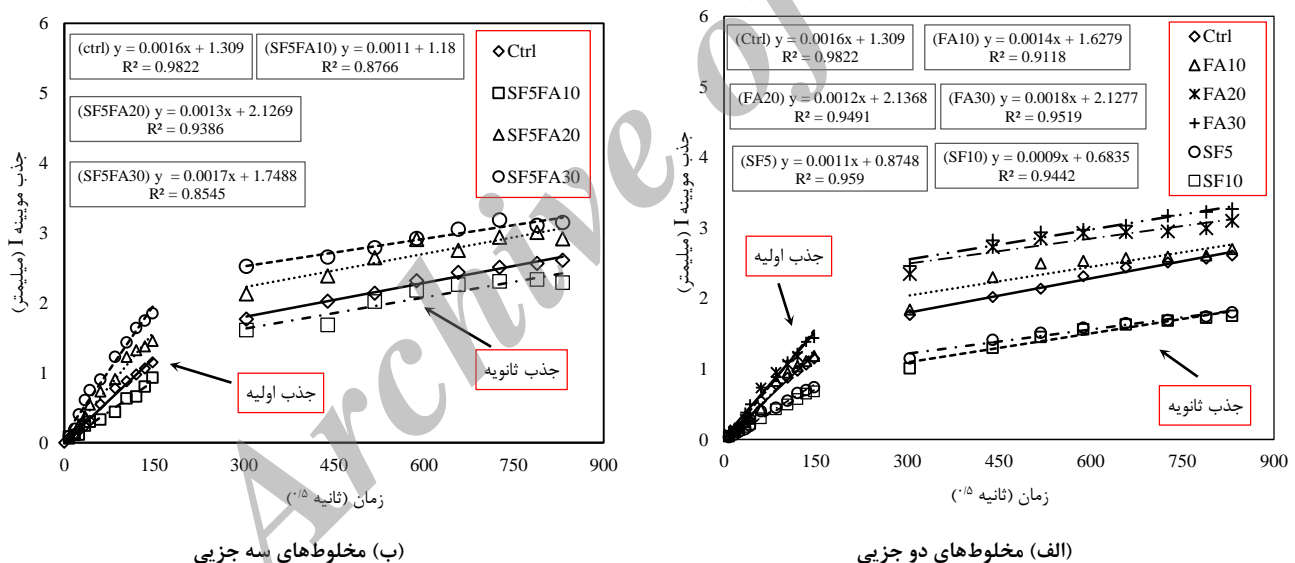


## ۳-۳- جذب آب مویینه

جذب آب مویینه شاخصی از نفوذ یا انتقال رطوبت به داخل بتن اشباع نشده است. نرخ جذب مویینه (I mm) مخلوط‌های بتنی در شکل ۴ نشان داده شده است. خط روند (Trend line) جذب مویینه آب اولیه و ثانویه رسم و معادلات مربوط به جذب ثانویه نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی  $R^2$  تمام مخلوط‌های بتنی بیشتر از ۰/۹ است. همچنین مقایسه بین جذب اولیه و ثانویه نشان می‌دهد که روند مکش مویینه آب با افزایش زمان روندی نزولی دارد. در شکل ۴. الف برای مخلوط‌های دوجزئی کمترین مقدار جذب آب مویینه مربوط به طرح SF10 است که به دلیل فعالیت پوزولانی بالا و ذرات ریز، در مدت ۲۸ روز توانسته به بسته بندی ایده‌آل (Ideal Packing) یا تراکم بالا، نزدیک شود. مقدار شاخص مویینه برای مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی بالاتر از مخلوط شاهد بود که با افزایش زمان شیب خط روند گرایش نزولی دارد.

در شکل ۴. ب کمترین مقدار جذب آب اولیه مویینه مخلوط‌های سه جزئی، مربوط به طرح SF5FA10 است که نزدیک به طرح Ctrl یا شاهد است. که با افزایش مقدار خاکستر بادی در مخلوط‌های سه جزئی جذب مویینه نیز افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۵ بهبود مقدار عامل مویینه به صورت درصد (در مقایسه با بتن شاهد) بیان شده است. ملاحظه می‌شود که تمام مخلوط‌ها (به جز مخلوط‌های حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی) عامل مویینه کمتری دارند. همچنین اثر مثبت افزودن ۵٪ دوده سیلیسی به مخلوط‌های بتنی به خوبی مشهود است؛ به طوری که تا ۲۱٪ موجب کاهش عامل مویینه، در مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی (سه جزئی) شده است.



شکل ۴: نرخ جذب آب مویینه مخلوط‌های بتنی.

## ۳-۴- عمق نفوذ آب و تخلخل

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب مخلوط‌های بتنی در شکل ۶ نشان داده شده است. در سن ۹۰ روز، نرخ عمق نفوذ آب تمام مخلوط‌ها روندی نزولی داشت، اما در سن ۲۸ روز مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی، با افزایش مقدار خاکستر بادی عمق نفوذ آب افزایش یافت. که سرعت کند واکنش پوزولانی خاکستر بادی دلیل آن می‌باشد. کمترین مقدار عمق نفوذ آب در هر دوسن، مربوط به نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی بود که اثر پودری، سرعت واکنش پوزولانی و شکل‌گیری هسته (مغز) همگن‌تر از دلایل آن است. در مخلوط‌های سه جزئی نیز افزودن دوده سیلیسی به طور مثبتی در هر دوسن ۲۸ و ۹۰ روز تاثیر داشته به طوری در مقایسه با نمونه‌های دو جزئی فاقد دوده سیلیسی، به ترتیب تا ۲۳٪ و ۲٪ موجب کاهش عمق نفوذ آب شد.

نتایج تخلخل کل در جدول ۳ آمده است. بیشترین حجم حفرات (تخلخل) متعلق به مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی (FA20) و (FA30) است. به دلیل به دلیل حضور کمتر سیمان در این مخلوط‌ها حفرات موئینه بیشتری به وجود آمده که عدم تکمیل واکنش پوزولانی (شکل گیری کم C-S-H) می‌تواند دلیل آن باشد [۲۵]. مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی (SF5 و SF10) به دلیل سطح مخصوص بالای دوده سیلیسی و واکنش پذیری شدید آن در سنین اولیه، موجب کاهش حجم حفرات (ژلی و موئینه) شده است. در مخلوط‌های سه جزیی نیز افزودن دوده سیلیسی به طور مثبتی موجب کاهش تخلخل و حفرات در حدود ۱۸٪ شده است. با افزایش جانمایی خاکستر بادی (در هر دو مخلوط دوجزیی و سه جزیی) حجم حفرات نیز روندی صعودی داشته که نشان دهنده عملکرد ضعیف آن در انسداد ریزکانال ها و یا چگال کردن ریز ساختار است.

### ۳-۵- نفوذ تسریع شده یون کلراید

نتایج نفوذ یون کلراید به عنوان شاخصی از شار الکتریکی عبور از مخلوط‌های بتنی در واحد کولمب در شکل ۷ آمده است. هر چه شار عبوری از میان بتن کمتر باشد، بیانگر مقاومت بالا در برابر نفوذ کلراید است. مطابق طبقه بندی مشخص شده در استاندارد ASTM C1202، نرخ نفوذ یون کلراید بتن بر اساس شار عبوری از میان مخلوط‌های بتنی در طول ۶ ساعت به صورت زیر است:  $RCPT < 4000$  کولمب: نفوذپذیری کلراید در سطح بالاست،  $4000 < RCPT < 2000$  کولمب: نفوذپذیری کلراید در سطح متوسط است و  $RCPT < 2000$  کولمب: نفوذپذیری کلراید در سطح پایین است.

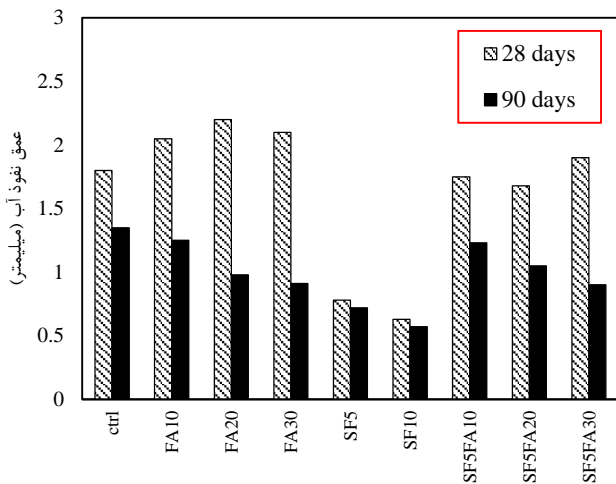
نتایج نشان می‌دهد که کمترین مقدار نفوذ متعلق به نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی است، که در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب تا ۶۰٪ و ۶۸٪ موجب کاهش نفوذ کلراید شده است. در مخلوط‌های دوجزیی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز، میزان نفوذ یون کلراید روندی صعودی دارد، اما با افزایش سن مخلوط‌های بتنی تا ۹۰ روز، مقدار نفوذ یون کلراید در مقایسه با بتن شاهد تا ۲۱٪ بهبود پیدا کرده است. در مخلوط‌های سه جزیی با افزون دوده سیلیسی نفوذ یون کلراید در مقایسه با مخلوط‌های فاقد دوده سیلیسی، کاهش پیدا کرده است، به طوری که در سنین ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب تا ۳۵٪ و ۵۰٪ موجب بهبود نفوذ پذیری شد.

مطابق طبق بندی مشخص شده در بالا، مخلوط‌های بتنی دوجزیی حاوی خاکستر بادی را می‌توان در رده بتن‌های با نفوذپذیری متوسط کلراید محسوب کرد در صورتی که با افزون دوده سیلیسی به این مخلوط‌ها به رده نفوذ پذیری متوسط کلراید ارتقاء پیدا می‌کند.

### ۳-۶- انتقال تسریع شده یون کلراید

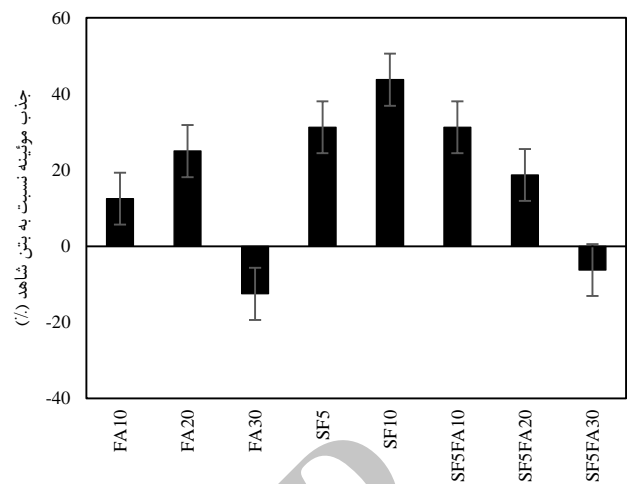
نتایج انتقال تسریع شده یون کلراید در شکل ۸ آمده است. مشاهده می‌شود که دوده سیلیسی موجب کاهش محسوس نرخ انتقال کلراید در تمام مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ و ۹۰ روز می‌شود، که با افزایش مقدار جانمایی اثر کاهش نرخ انتقال تشدید می‌شود. در مخلوط‌های دوجزیی افزودن خاکستر بادی موجب افزایش نرخ انتقال کلراید در سن ۲۸ روز شده است اما با افزایش سن تا ۹۰ روز و پیشرفت فرآیند واکنش‌های پوزولانی در این مدت، عملکرد آن‌ها در مقایسه با بتن شاهد به طور قابل توجهی بهبود پیدا می‌کند، به طوری در مخلوط حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی (FA30)، مقدار انتقال کلراید تا ۳۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

در مخلوط‌های سه جزیی، در سن ۲۸ روز نرخ انتقال با افزایش جانمایی خاکستر بادی روندی صعودی دارد، اما با در سن ۹۰ روز نرخ انتقال کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود افزودن دوده سیلیسی، نرخ انتقال کلراید را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد، به طوری در مقایسه با مخلوط‌های فاقد دوده سیلیسی، نرخ انتقال کلراید در سن ۲۸ و ۹۰ روز به ترتیب تا ۲۸٪ و ۲۰٪ کمتر بود.



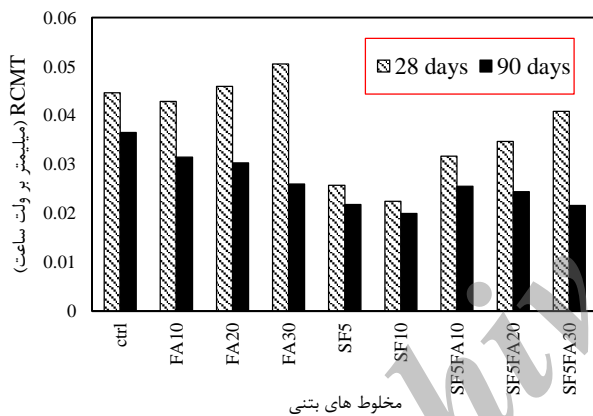
مخلوط های بتنی

شکل ۶: عمق نفوذ آب مخلوط های بتنی.



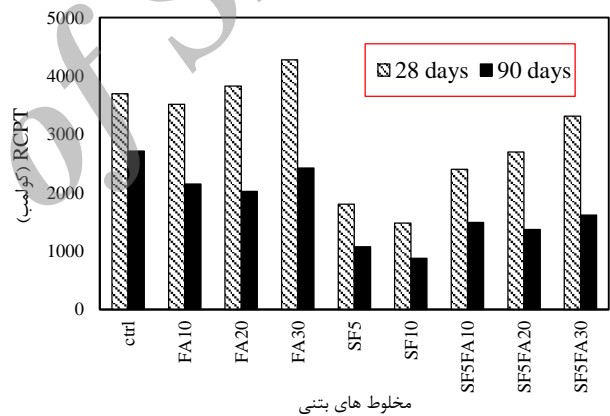
مخلوط های بتنی

شکل ۵: بهبود جذب مؤثر نسبت به بتن شاهد



مخلوط های بتنی

شکل ۸: انتقال تسرع شده یون کلراید (RCMT).

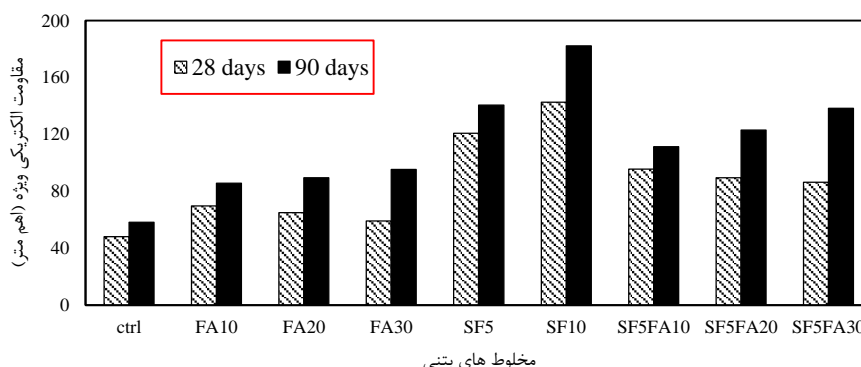


مخلوط های بتنی

شکل ۷: نفوذ تسرع شده یون کلراید (RCPT).

### ۳-۷- مقاومت الکتریکی ویژه

نتایج مقاومت الکتریکی ویژه در شکل ۹ آمده است. در مخلوط های دوجزیی نتایج مقاومت الکتریکی روند تقریباً مشابهی با نتایج آزمایش های RCMT و RCPT دارد. با افزودن دوده سیلیسی مقاومت الکتریکی نمونه ها در سن ۲۸ و ۹۰ در مقایسه با بتن شاهد به ترتیب تا ۳/۲ و ۲/۹ برابر بالاتر بود. در مخلوط های دو جزئی حاوی خاکستر بادی در سن ۲۸ روز، مقاومت الکتریکی تا ۳۸٪ بهبود پیدا کرد که با افزایش در مقدار جانمایی خاکستر بادی، مقاومت الکتریکی روندی نزودی داشت. با افزایش سن نمونه تا ۹۰ روز مقاومت الکتریکی تا ۶۵٪ افزایش یافت. در مخلوط های سه جزئی دوده سیلیسی به طور مثبتی بر مقاومت الکتریکی تاثیر داشت به طوری که در مقایسه با نمونه های دوجزیی فاقد دوده سیلیسی، مقاومت الکتریکی را حداقل ۳۰٪ افزایش داد.



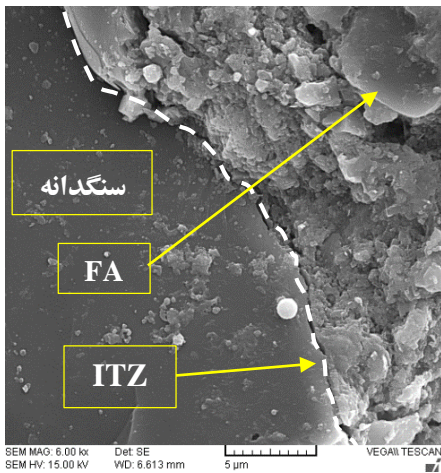
شکل ۹: مقاومت الکتریکی ویژه مخلوط‌های بتنی.

### ۳-۸- ریزنگار الکترون پویشی (SEM)

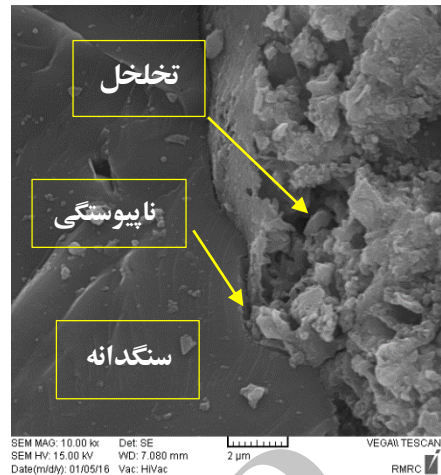
تصاویر ریزنگار الکترون پویشی از ناحیه مرز خمیر سیمان و سنگدانه‌ها به منظور ریخت شناسی و پیوند بین آن‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است. شکل ۱۰-الف تصاویر SEM بتن شاهد را نشان می‌دهد. پیوندهای صورت گرفته بین ذرات خمیر سیمان و کریستال‌های تشکیل شده در آن حکایت از انبوهی از فضای خالی و رشد اترینگایت و پرتلندیت در بین ذرات تشکیل دهنده خمیر سیمان دارد. با توجه به شکل ۱۰-الف، برخی از حفره‌های ناشی از کریستالی شدن آهک مزاد به خوبی قابل مشاهده می‌باشند. با توجه به عدم وجود مواد افزودنی معدنی، تخلخل موجود در خمیر امری بدیهی است که نشان می‌دهد ماتریس خمیر به طور کامل متراکم نشده است و می‌تواند دلیلی بر عملکرد نا مطلوب آن نسبت به مخلوط‌های حاوی مواد پوزولانی در خواص مکانیکی و دوام باشد.

در شکل ۱۰-ب و پ تصاویر SEM مخلوط‌های دوجزبی FA30 و SF10 نشان داده شده است. در مقایسه با طرح شاهد مخلوط‌های حاوی پوزولان دارای یکنواختی، تراکم و بهبود ITZ هستند. از مقایسه تصاویر مربوط به مخلوط‌های SF10 و FA30 مشخص است که دوده سیلیسی به طور قابل ملاحظه‌ای موجب شکل‌گیری ساختاری متراکم و هموار در ناحیه انتقال شده است. به طوریکه ساختار ژل C-S-H فشرده تر و مقدار هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ریزترک‌ها به تدریج کاهش می‌یابند و ذرات ریز موجب پل‌بندی درزها در سطح مشترک بین سنگدانه و ماتریس سیمان می‌شود.

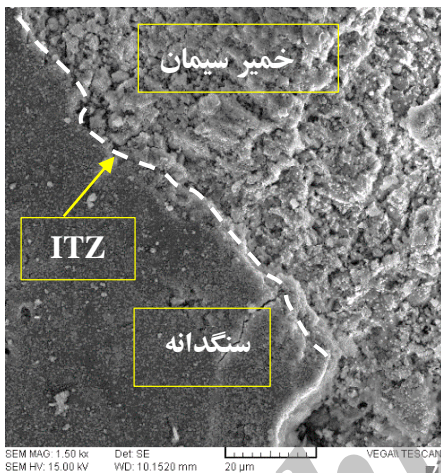
شکل ۱۰-ت تصاویر SEM مخلوط سه جزبی SF5FA30 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزودن دوده سیلیسی موجب ساختار یکنواخت ناحیه انتقال و تراکم بیشتر شده است. ساختار منافذ (پیچ و خم، عدم پیوستگی یا باریک شدگی) با انجام فرآیند هیدراتاسیون به دلیل افزودن دوده سیلیسی، در مقایسه با مخلوط FA30 بهبود پیدا کرده است. دوده سیلیسی و خاکستر بادی پس از هیدراتاسون با کلسیم هیدروکسید واکنش نشان داده و موجب ایجاد کلسیم سیلیکات هیدرات الیافی و کلسیم آلومینات می‌شود که از عوامل اصلی مقاومت و دوام کامپوزیت سیمانی هستند [۲۶].



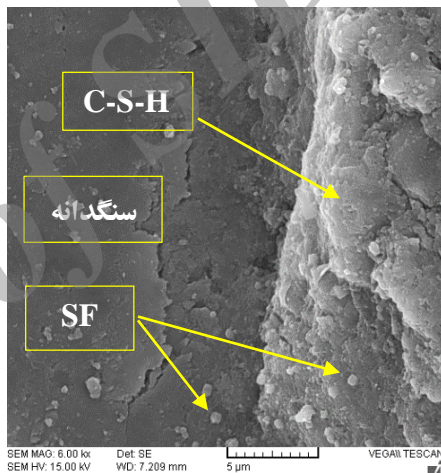
(ب) مخلوط حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی (FA30)



(الف) مخلوط بتنی شاهد (بدون مواد پوزولانی)



(ت) مخلوط حاوی ۳۰٪ خاکستر بادی و ۵٪ دوده سیلیسی (SF5FA30)



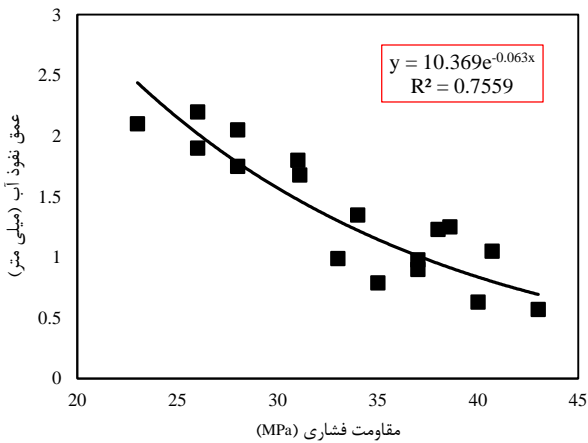
(پ) مخلوط حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی (SF10)

شکل ۱۰: تصاویر SEM مخلوط‌های بتنی مختلف در سن ۲۸ روزه

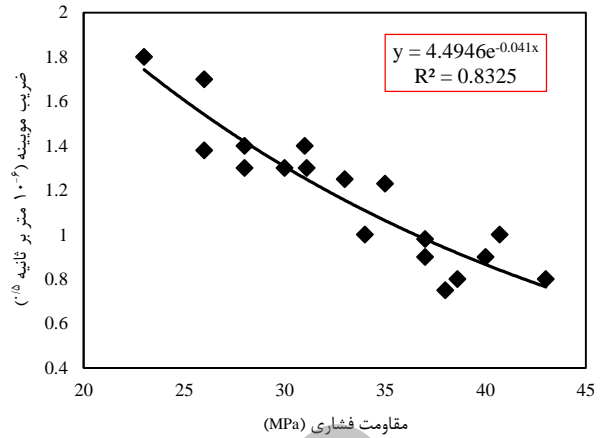
### ۳-۹- رابطه بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و دوام

دوام بتن تا حد زیادی به امکان ورود آب، گازها و یون‌ها به درون ساختار آن وابسته است. در نتیجه، ویژگی‌های ریزساختاری ناحیه انتقال و ماتریس سیمان بر خواص انتقال بتن به طور چشمگیری موثر است. نتایج حاصل از آزمایشات نفوذ پذیری و رابطه آن با ریخت شناسی نشان می‌دهد که افزایش کیفیت پیوند سطح مشترک سنگدانه-ماتریس سیمان منجر به بهبود خواص انتقال بتن می‌شود.

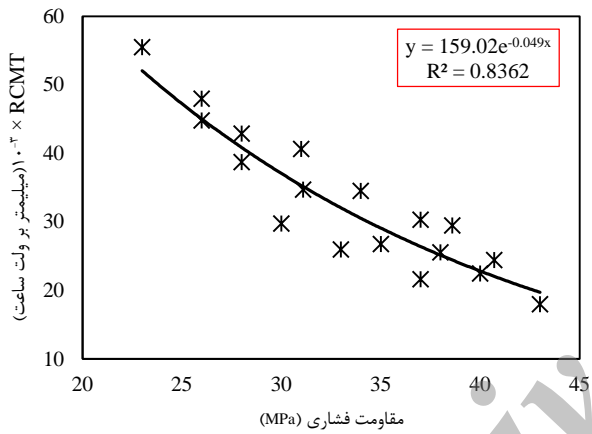
در شکل ۱۱ منحنی همبستگی نمایی برای نمایش ارتباط بین نتایج مقاومت فشاری و دوام رسم شده است. معمولاً افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش عمق نفوذ آب، مویینه، تخلخل (حجم حفرات)، شار عبوری و انتقال (مهاجرت) یون از نمونه‌ها، همراه است [۲۷].



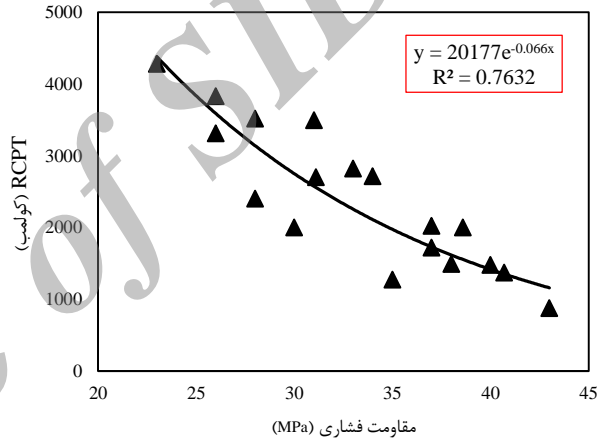
(ب) مقاومت فشاری - عمق نفوذ آب



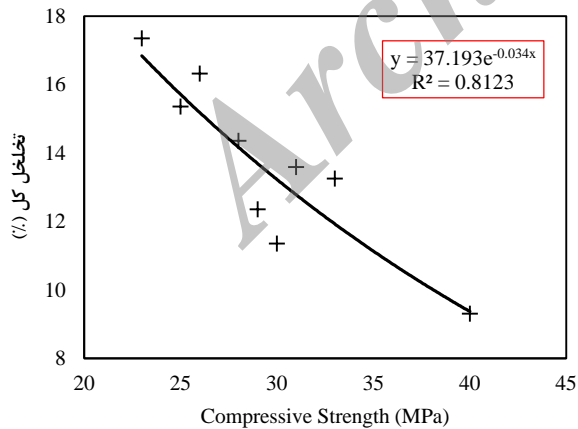
(الف) مقاومت فشاری - ضریب موینده



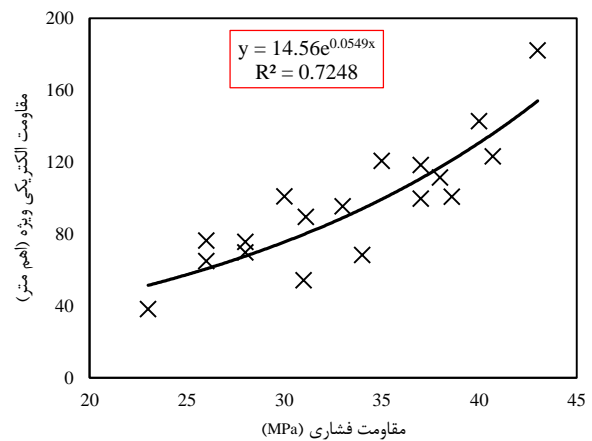
(ت) مقاومت فشاری - RCMT



(پ) مقاومت فشاری - RCPT



(ج) مقاومت فشاری - تخلخل



(ث) مقاومت فشاری - مقاومت الکتریکی ویژه

شکل ۱۱: رابطه بین نتایج آزمایش مقاومت فشاری و دوام

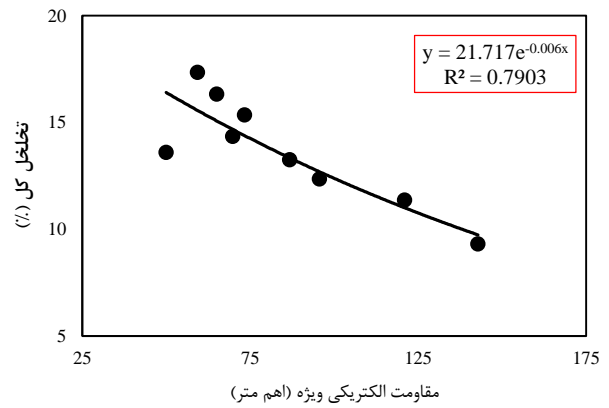
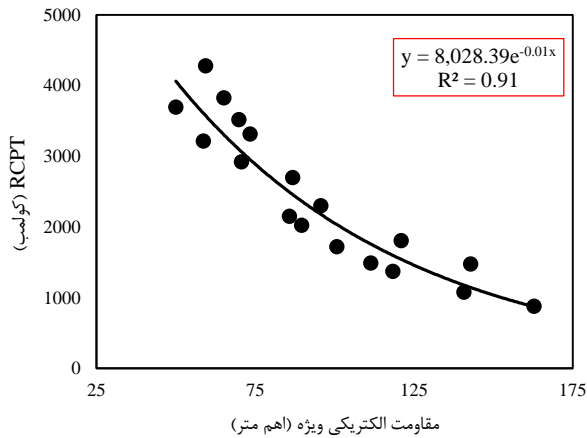
## ۳-۱۰- رابطه بین مقاومت الکتریکی، تخلخل، RCPT و RCMT

روابط بین نتایج آزمایش‌های مقاومت الکتریکی ویژه، تخلخل، نفوذ و انتقال یون کلراید بررسی شد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ساختار حفرات مواد بر پایه سیمانی (حفره هوا، منافذ موئینه و خلل و فرج) به طور تصادفی در اندازه و شکل‌های مختلف در ماتریس سیمان توزیع می‌شوند که از عوامل کلیدی است که به طور مستقیم بر مقاومت مکانیکی و دوام تاثیر دارد. شکل ۱۲- الف رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه و درصد تخلخل را به صورت نمایی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی ایجاد شده حدود ۰/۷۹ است که انتظار می‌رود با کامل شدن فرآیند واکنش شیمیایی و افزایش سن، ساختار منافذ اصلاح شده و همبستگی بالاتری حاصل شود.

با توجه به یکسان بودن آزمایش RCPT و مقاومت الکتریکی ویژه به لحاظ پایه فیزیکی، انتظار می‌رود که رابطه خطی بین این دو حاکم باشد. از آنجایی که حرارت ایجاد شده در آزمایش RCPT بر مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی تاثیر منفی (کاهش) دارد، شار عبوری از میان نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند. با توجه به مقدار آمپر پایین در آزمون مقاومت الکتریکی، مقدار نفوذ پذیری در آزمایش RCPT در مقایسه با آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه افزایش می‌یابد [۲۲ و ۲۳]. از همین رو روابط حاکم بین این دو معمولاً به صورت توانی یا نمایی است.

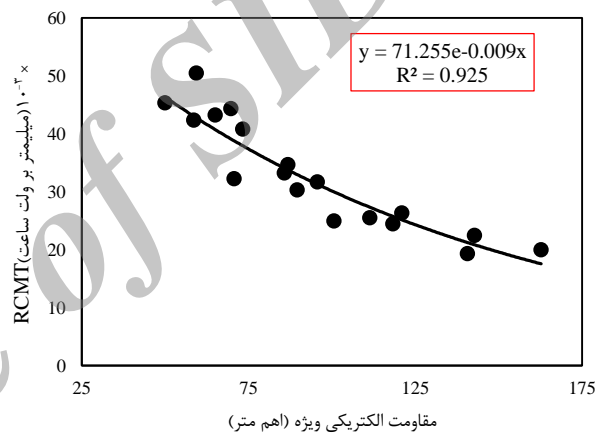
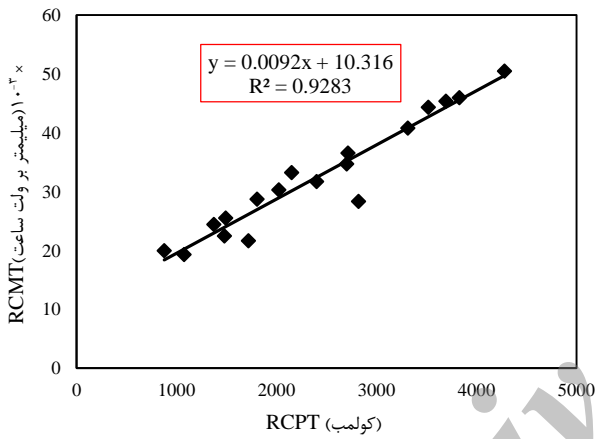
ضریب همبستگی بین نتایج مقاومت الکتریکی ویژه، RCPT و RCMT بیشتر از ۰/۹ است، که نشان دهنده پتانسیل بالای روابط نمایی بدست آمده، برای ارزیابی یا تخمین نفوذپذیری با استفاده از آزمایش مقاومت الکتریکی ویژه است. در شکل ۱۲- پ، رابطه بین نتایج RCPT و RCMT رسم شده است. ملاحظه می‌شود که رابطه آن‌ها به صورت خطی (معادله  $y = ax \pm b$ ) و با ضریب همبستگی ۰/۹۳ است.

برخلاف آزمایش‌های RCPT و RCMT که کاهش جریان عبوری و یا کاهش در نرخ انتقال یون کلراید نشانگر بهبود عملکرد مخلوط می‌باشند، در آزمایش مقاومت الکتریکی بتن، کاهش مقاومت الکتریکی ویژه نشانگر افت عملکرد مخلوط است. برای امکان اعمال رویه یکسان در آزمایش‌های مختلف انجام شده، مقایسه عملکرد مخلوط‌ها براساس شاخص هدایت الکتریکی  $[1/\rho (1/\Omega.m)]$  انجام شد که روابط آن‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج دست بالا در آزمایش RCPT، رابطه خطی آن با هدایت الکتریکی می‌تواند نتایج عمق نفوذ کلراید را واقع بینانه‌تر نشان دهد (شکل ۱۳- الف). علیرغم اینکه هدایت الکتریکی و RCPT پایه فیزیکی یکسانی در ارزیابی جریان عبوری از نمونه‌ها دارند، ضریب همبستگی کمتری (۰/۹) در مقایسه با رابطه بین هدایت الکتریکی و RCMT ضریب همبستگی ۰/۹۶ داشتند.



(ب) مقاومت الکتریکی ویژه - RCPT

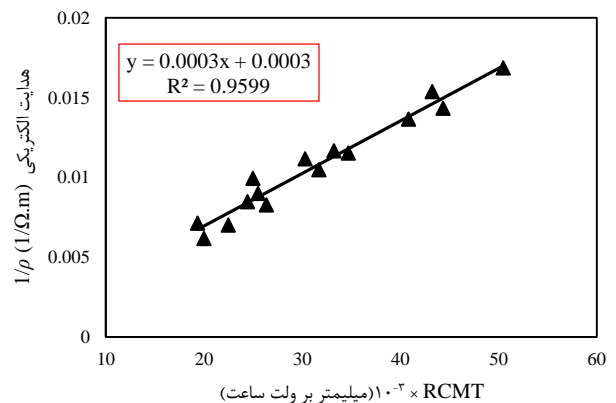
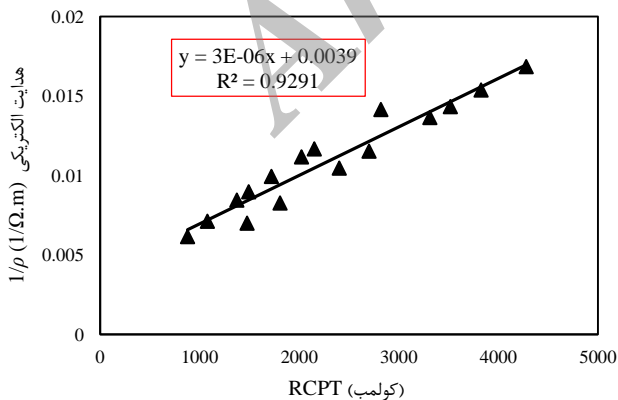
(الف) مقاومت الکتریکی ویژه - تخلخل



(ت) RCPT-RCMT

(پ) مقاومت الکتریکی ویژه-RCMT

شکل ۱۲: رابطه بین مقاومت الکتریکی ویژه، تخلخل، RCPT و RCMT.



شکل ۱۳: رابطه هدایت الکتریکی با RCPT و RCMT.



تصور بر این است که محلول حفره‌ای ماتریس سیمان می‌تواند بر هدایت الکتریکی تاثیر داشته باشد. ساختار شیمیایی محلول حفره‌ای موجود در حفرات بتن ممکن است دوام بالقوه آن را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. پتانسیل ایجاد واکنش قلیایی سیلیسی، خوردگی فولاد، حمله سولفات و تورق بتن همگی مستقیماً تاثیر ساختار شیمیایی محلول حفره‌ای و تغییراتی که ممکن است در آن اتفاق بیفتد را منعکس می‌کنند [۲۸]. محلول حفره‌ای شامل یون هایی از جمله  $K^+$ ،  $Na^+$ ،  $Ca^{2+}$ ،  $SO_4^{2-}$  و  $OH^-$  است که غلظت آن‌ها بر اثر گذر زمان و مواد افزوده شده به بتن، تغییر می‌کند. محلول‌های حفره‌ای غلیظ هیدروکسید قلیایی دارای هدایت الکتریکی بالایی هستند به طوری که با کاهش غلظت آن، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد [۲۹]. حضور مواد مکمل سیمانی از جمله دوده سیلیسی، سرباره آهن‌گدازی و خاکستر بادی با کلسیم پایین موجب کاهش در غلظت قلیایی‌های موجود در محلول منفذی می‌شود [۲۸]. برخی از محققین هدایت الکتریکی مواد برپایه سیمانی را وابسته به ساختار منافذ (اندازه حفرات و ارتباط حفرات) و ترکیب شیمیایی محلول حفره‌ای می‌دانند، که این موضوع نشان دهنده ارزیابی دست بالا (یا غیر واقعی) روش‌های الکتریکی در نتایج مخلوط‌های حاوی مواد مکمل سیمانی در مقایسه با بتن شاهد (فاقد مواد پوزولانی) است.

از نخستین تحقیقات انجام شده بر روی روش‌های اندازه‌گیری الکتریکی می‌توان به پژوهش ویتینگتون و همکاران [۳۰] اشاره کرد. آن‌ها نشان دادند که هدایت الکتریکی به طور نسبتاً کاملی هدایت ماتریس خمیر سیمان بستگی دارد. بعدها کریستنسن و همکاران [۳۱] اصول مربوط به هدایت جریان در فاز چسباننده خمیر سیمان را بررسی کردند. مشخص شد که هدایت حجمی خمیر عموماً چندین برابر کوچکتز از هدایت محلول حفره‌ای هیدروکسید قلیایی موجود در آن می‌باشد. روابط حاکم به صورت محصول توأم سه عامل بیان شدند: الف) قابلیت هدایت محلول حفره‌ای، ب) کسر حجمی موثر حفرات موئینه حامل جریان، پ) عامل  $\beta$  که شاخص معکوس انحنای این کانال‌های حامل جریان می‌باشند. مشخص شد که قابلیت هدایت مخلوط حفره‌ای با کاهش حجم موثر حفراتی و افزایش انحنای مسیر جریان (کاهش  $\beta$ ) خنثی می‌شود. محلول‌های حفره‌ای بتن و قابلیت هدایت آن‌ها توسط نوکن و هوتون [۳۲] و اسپندر و همکاران [۳۳] توصیف و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد درعین حال که قابلیت هدایت محلول حفره‌ای چندین برابر بیشتر از قابلیت هدایت حجمی می‌باشد، اما با نرمال نمودن مقادیر اخیر، تنها هم بستگی کمی بهتری بدست آمد. همچنین در تحقیق دیگری [۳۴] نشان داده شد که محلول حفره‌ای بتن‌های حاوی مواد پوزولانی، فقط تاثیر ثانویه بر هدایت بتن دارد.

در این تحقیق ارتباط خوبی بین هدایت الکتریکی و نتایج واقعی نفوذ یون کلراید و حجم حفرات بدست آمده از آزمایش‌های دوام (RCMT) وجود داشت و همچنین اثری از نتایج دست بالا یا غیر واقعی مشاهده نشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر مخلوط‌های دوجزبی و سه‌جزبی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی، بر خواص انتقال و مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلراید بتن (مقاومت الکتریکی ویژه و هدایت الکتریکی حجمی، RCPT و RCMT) و رابطه آن‌ها با مقاومت فشاری، تخلخل و ساختار ITZ بررسی شد. خلاصه نتایج بدست آمده در ادامه آورده شده است.

۱. افزون خاکستر بادی در مخلوط‌های دو جزبی و سه جزبی به ترتیب تا ۴۵٪ و ۲۵٪ موجب افزایش اسلامپ شد. اثر دوده سیلیسی بر مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی به صورت کاهش در کارایی و درصد هوای بتن تازه بود.

۲. مخلوط حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی بیشترین مقاومت را در تمام سنین داشت. با افزودن ۵٪ دوده سیلیسی به مخلوط‌های حاوی خاکستر بادی مقاومت فشاری تا ۱۹٪ و درمقایسه با بتن شاهد ۲۰٪ افزایش یافت.

۳. کمترین مقدار جذب آب موئینه مربوط به SF10 بود که در مقایسه با بتن شاهد ۴۳٪ بهبود پیدا کرد. در مخلوط‌های سه‌جزبی افزودن دوده سیلیسی تا ۳۱٪ موجب کاهش عامل موئینه در مقایسه با بتن شاهد شد و نسبت به نمونه‌های فاقد دوده سیلیسی تا ۲/۴۸ برابر بهبود یافت.

۴. کمترین مقدار عمق نفوذ آب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، مربوط به مخلوط SF10 بود که به ترتیب ۶۵٪ و ۵۷٪ موجب کاهش آن شد. در مخلوط‌های سه جزیی افزودن دوده سیلیسی در مقایسه با مخلوط‌های دو جزئی فاقد دوده سیلیسی و بتن شاهد به ترتیب تا ۲۳٪ و ۳۳٪ موجب کاهش عمق نفوذ آب شد. همچنین به طور مثبتی تخلخل و حفرات تا حدود ۱۸٪ کاهش یافت.
۵. در مخلوط‌های دوجزیی و سه‌جزیی، در سن ۲۸ روز RCPT و RCMT با افزایش جانمایی خاکستر بادی افزایش داشت. اما در سن ۹۰ روز نرخ انتقال کاهش یافت. نرخ انتقال کلراید مخلوط‌های سه جزیی در مقایسه با مخلوط‌های دو جزیی حاوی خاکستر بادی کاهش یافت.
۶. در مخلوط‌های دوجزیی روند کسب نتایج مقاومت الکتریکی ویژه تقریباً مشابه با RCPT و RCMT بود. با افزودن خاکستر بادی و دوده سیلیسی مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در تمام سنین افزایش پیدا کرد، در مقایسه با بتن شاهد به ترتیب تا ۳/۲ و ۲/۹ برابر بالاتر بود.
۷. نتایج تخلخل و تصاویر SEM نشان داد افزودن مواد پوزولانی موجب کاهش مجموع تخلخل و حجم حفرات شد. همچنین ریز ساختار، تراکم ITZ و کیفیت پیوند سنگدانه با ماتریس سیمان بهبود یافت.
۸. خطای موجود در آزمایش RCPT به دلیل حرارت ایجاد شده ناشی از اختلاف پتانسیل بالا، منجر به کسب نتایج دست بالا شد و تاثیر آن در مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی (به دلیل مصرف یون‌های OH<sup>-</sup> در اثر واکنش‌های پوزولانی و افت شدید رسانایی محلول حفره‌ای) بیشتر بود. در آزمایش RCMT افزایش حرارت ناچیزی رخ داد که بر نتایج آن بی تاثیر بود. مقایسه بین دو آزمایش اخیر نشان داد که نتایج کسب شده از RCMT رفتار واقع بینانه‌تری از عملکرد بتن در نفوذ کلراید و شمای کلی بهتری از وضعیت ناحیه انتقال را نشان می‌دهد.
۹. مقایسه نتایج مقاومت الکتریکی (هدایت الکتریکی) با تخلخل، RCPT و RCMT نشان داد که رابطه خوبی بین آن‌ها حاکم است و با توجه به سهولت و غیر مخرب بودن آزمایش مقاومت الکتریکی پتانسیل بالایی برای ارزیابی مقاومت بتن در برابر یون کلراید و نیز تخمین نسبی کیفیت پیوستگی مرز سنگدانه-خمیر سیمان دارد.

## مراجع

- [1] de Sensale, G. R. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and concrete composites*, 28(2), 158-160.
- [2] Khan, M. I., and Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [3] Locher, F.W., 2006. *Cement: principles of production and use*. Verlag Bau und Technik, 30-34.
- [4] Leung, H. Y., Kim, J., Nadeem, A., Jaganathan, J., and Anwar, M. P. (2016). Sorptivity of self-compacting concrete containing fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, 113, 369-375.
- [5] Wu, K., Shi, H., Xu, L., Ye, G., and De Schutter, G. (2016). Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement and Concrete Research*, 79, 243-256.
- [6] Sezer, G. İ. (2012). Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 613-618.
- [7] Papadakis, V. G. (2000). Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. *Cement and concrete research*, 30(2), 291-299.
- [8] Sun, Z., Garboczi, E. J., and Shah, S. P. (2007). Modeling the elastic properties of concrete composites: Experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 22-38.
- [9] Maruyama, I., Sasano, H., and Lin, M. (2016). Impact of aggregate properties on the development of shrinkage-induced cracking in concrete under restraint conditions. *Cement and Concrete Research*, 85, 82-101.
- [10] Liao, K. Y., Chang, P. K., Peng, Y. N., and Yang, C. C. (2004). A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 977-989.
- [11] Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., and Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411-421.
- [12] Wang, Y., Jin, F., and Xie, Y. (2016). Experimental Study on Effects of Casting Procedures on Compressive Strength, Water Permeability, and Interfacial Transition Zone Porosity of Rock-Filled Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(8), 04016055.

- [13] Wong, H. S., Zobel, M., Buenfeld, N. R., and Zimmerman, R. W. (2009). Influence of the interfacial transition zone and microcracking on the diffusivity, permeability and sorptivity of cement-based materials after drying. *Mag. Concr. Res*, 61(8), 571-589.
- [14] Jiang, Z., Huang, Q., Xi, Y., Gu, X., and Zhang, W. (2016). Experimental study of diffusivity of the interfacial transition zone between cement paste and aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(10), 04016109.
- [15] Breton, D., Ollivier, J.P., Ballivy, G. and Maso, J.C., (1992). Interfaces in cementitious composites. In *RILEM International Conference*, Toulouse.
- [16] Wu, K., Shi, H., Xu, L., Ye, G., and De Schutter, G. (2016). Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties. *Cement and Concrete Research*, 79, 243-256.
- [17] Pilvar, A., Ramezani pour, A. A., and Rajaie, H. (2017). Experimental Assessment of Electrically Accelerated Chloride Permeability Tests for Concrete. *Concrete Research*, 9(2), 5-15.
- [18] Zheng, J. J., & Zhou, X. Z. (2013). Effective medium method for predicting the chloride diffusivity in concrete with ITZ percolation effect. *Construction and Building Materials*, 47, 1093-1098.
- [19] Pilvar, A., Ramezani pour, A. A., and Rajaie, H. (2016). Comparison of Four Electrical Measurement Methods with Bulk Diffusion for Assessing the Chloride Resistance of Concretes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 40(4), 327-336.
- [20] AASHTO. (2007b). *Standard test method for predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure*. TP64, Washington, DC.
- [21] NT Build. (1999). *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non steady-state migration experiments*. Build492, NORDTEST, Espoo. Finland.
- [22] Bagheri, A. R., and Zanganeh, H. (2012). Comparison of rapid tests for evaluation of chloride resistance of concretes with supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(9), 1175-1182.
- [23] Ramezani pour, A. A., Karein, S. M. M., Vosoughi, P., Pilvar, A., Isapour, S., and Moodi, F. (2014). Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 66, 222-228.
- [24] Carlsson, B., Frei, U., Köhl, M., and Möller, K. (1994). *Swedish National Testing and Research Institute* (No. 1994, p. 13). Report.
- [25] Zhang, M. H., and Islam, J. (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag. *Construction and Building Materials*, 29, 573-580.
- [26] Mounanga, P., Khokhar, M. I. A., El Hachem, R., and Loukili, A. (2011). Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler. *Materials and Structures*, 44(2), 437-453.
- [27] Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., and Mobasher, B. (2010). Transport properties in metakaolin blended concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2217-2223.
- [28] Vollpracht, A., Lothenbach, B., Snellings, R., & Haufe, J. (2016). The pore solution of blended cements: a review. *Materials and Structures*, 49(8), 3341-3367.
- [29] Buenfeld, N. R., Glass, G. K., Hassanein, A. M., & Zhang, J. Z. (1998). Chloride transport in concrete subjected to electric field. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(4), 220-228.
- [30] Whittington, H. W., McCarter, J., and Forde, M. C. (1981). The conduction of electricity through concrete. *Magazine of concrete research*, 33(114), 48-60.
- [31] Christensen, B. J., Coverdale, T., Olson, R. A., Ford, S. J., Garboczi, E. J., Jennings, H. M., and Mason, T. O. (1994). Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application. *Journal of the American Ceramic Society*, 77(11), 2789-2804.
- [32] Nokken, M. R., & Hooton, R. D. (2006). Electrical conductivity testing. *Concrete international*, 28(10), 58-63.
- [33] Snyder, K. A., Feng, X., Keen, B. D., & Mason, T. O. (2003). Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH<sup>-</sup>, K<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> concentrations. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 793-798.
- [34] Nokken, M., Boddy, A., Wu, X., and Hooton, R. D. (2008). Effects of temperature, chemical, and mineral admixtures on the electrical conductivity of concrete. *Journal of ASTM International*, 5(5), 1-9.