

## بررسی دوام توسط آزمایش‌های نفوذ سریع شده یون کلراید (RCPT) و عمق نفوذ آب تحت فشار در بتن‌های خودتراکم حاوی میکرو سیلیس و پوزولان خاش

امیرخانی، مسعود عطاریان، محسن تدین، محمد ابراهیم کیانی فر<sup>۴</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی شاهرود- دفتر فنی پروژه خط ۳ مترو مشهد
- ۲- کارشناسی ارشد سازه دانشگاه سمنان- مسئول آزمایشگاه دوام بتن صنایع شیمیایی ژیکاوا
- ۳- عضو هیئت علمی بازنشسته دانشگاه بوعلی سینا همدان - رییس هیئت مدیره مهندسين مشاور سیناب غرب
- ۴- دانشجوی کارشناسی ارشد محیط‌زیست دانشگاه خاوران- مسئول آزمایشگاه بتن صنایع شیمیایی ژیکاوا

### چکیده

استفاده از بتن خودتراکم یا SCC به‌عنوان یکی از بتن‌های خاص که بدون جداشدگی سنگ‌دانه یا آب انداختگی و بدون نیاز به عمل تراکم، قابلیت پرکنندگی فضاهای خالی میان آرماتورها را دارد مطرح گردیده است. این نوع بتن برای اولین بار در دهه ۱۹۸۰ میلادی در ژاپن ابداع شد و در سال‌های اخیر در ایران کاربرد گسترده‌ای یافته است. پژوهش‌ها در سال‌های گذشته در خصوص عملکرد و رفتار بتن خودتراکم بخش مهمی از پژوهش‌ها در حوزه فناوری بتن بوده است. مواد پوزولانی نقش به‌سزایی در رفتار و دوام بتن‌های خودتراکم ایفا می‌نماید. در مطالعه حاضر نتایج آزمایشگاهی روی ویژگی‌های بتن تازه، انتشار یون کلراید و عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های بتن خودتراکم حاوی میکرو سیلیس و پوزولان خاش در مقایسه با بتن‌های شاهد ارائه می‌دهد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی میکرو سیلیس و پوزولان خاش در مقایسه با بتن‌های شاهد مقدار انتشار یون کلراید و نفوذ آب کاهش یافته است.

**کلمات کلیدی:** بتن خودتراکم، نفوذ سریع شده یون کلراید، عمق نفوذ آب تحت فشار، میکرو سیلیس، پوزولان خاش

amirkhani62@yahoo.com

### ۱. مقدمه

گستره دوام بتن به مراتب مهم‌تر و وسیع‌تر از موضوع مقاومت بتن می‌باشد. به نظر می‌رسد تعیین مقاومت فشاری طی سالیان گذشته حاوی نکات پیچیده‌ای نباشد، به‌رحال در سن خاصی در کوتاه‌ترین زمان ممکن اندازه‌گیری می‌شود و این در حالی است که در مورد دوام پیچیدگی‌های بیشتری به دلایل آزمایش‌های گوناگون وجود دارد.

نفوذ یون کلراید به بتن و خوردگی آرماتورهای مدفون در آن یکی از علل خرابی زودرس سازه‌های بتن آرمه می‌باشد که سبب افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری و حتی تخریب و بازسازی سازه‌های بتن آرمه می‌شود [۱].

با کنترل کیفیت درست، مقادیر زیادی از محصولات زائد صنعتی می‌توانند در بتن، یا به شکل سیمان پرتلند آمیخته و یا به عنوان مواد افزودنی معدنی به کار برده شوند. وقتی خواص پوزولانی یا سیمانی کننده‌ی یک ماده طوری باشد که به عنوان جایگزین نسبی برای سیمان پرتلند در بتن استفاده شود، صرفه‌جویی زیادی در انرژی و هزینه نتیجه خواهد شد [۲].

تفاوت عمده بتن خودتراکم با بتن معمولی استفاده از مقادیر بالای مواد پودری و فوق روان کننده‌های قوی در بتن خودتراکم می‌باشد. در حالی که در بتن معمولی در بسیاری از اوقات نیازی بر استفاده از این مواد نیست. همچنین در بتن خودتراکم به دلیل روانی بالا احتمال جداشدگی مصالح سنگی درشت از بتن زیاد می‌باشد لذا غلظت مناسب بایستی تأمین گردد.

طرح بتن خودتراکم بایستی به نحوی باشد که علاوه بر داشتن مشخصات مناسب از لحاظ کارایی و رئولوژی، از نظر مقاومت و دوام نیز مشخصات فنی را برآورده سازد. به همین دلیل تاکنون روش استاندارد و مورد اجماع در دنیا برای طرح مخلوط بتن خودتراکم بیان نشده است [۳].

در تولید بتن‌های با مقاومت و دوام بالا چالش‌های زیادی از جمله تعریف مشخصات بتن توسط مشاور، کنترل کیفیت در زمان تولید، شناخت نیازهای مقطع بتن‌ریزی و همچنین عمل‌آوری بتن باعث شده است که مشکلاتی در مراحل مختلف ایجاد شود [۴]. به فوق روان کننده‌ها کاهنده‌های قوی آب نیز گفته می‌شود، زیرا در مقایسه با مواد افزودنی کاهنده آب معمولی، ۳ الی ۴ برابر بیشتر قادر به کاهش آب در مخلوط بتنی هستند. فوق روان کننده‌ها در دهه ۱۹۷۰ توسعه پیدا کردند و از آن هنگام تاکنون، پذیرش وسیعی در صنعت ساختمان پیدا کرده‌اند.

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

#### ۱.۱.۲. مواد سیمانی

سیمان پرتلند یا سیمانی هیدرولیکی از پودر کردن کلینکر که اساساً حاوی سیلیکات‌های کلسیم هیدرولیکی می‌باشد، به دست آمده است و معمولاً دارای یک یا چند شکل از سولفات کلسیم است که با هم آسیاب شده و به آن افزوده شده است [۵]. کیفیت سیمان در مقاومت اولیه و نهایی، خواص بتن تازه و سخت شده تأثیر بسزایی خواهد داشت. سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد ASTM C150 تولید کارخانه سیمان بجنورد می‌باشد.

میکرو سیلیس عبارت است از سیلیس غیر بلوری که در کوره‌های قوس الکتریکی به عنوان محصول جانبی تولید عنصر سیلیسیم، یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می‌شود. ذرات میکرو سیلیس بسیار کوچک بوده و بیش از ۹۵٪ ذرات آن از یک میکرون کوچک‌تر است و از آنجا که ذرات میکرو سیلیس بسیار کوچک هستند، مساحت سطح بسیار بزرگ می‌باشد. مساحت سطح بالای ذرات میکرو سیلیس عامل مهمی است که بر واکنش‌پذیری ذرات اثر می‌گذارد. میکرو سیلیس مصرفی در این تحقیق از محصولات تولیدی صنایع فرو سیلیس سمنان بوده که به صورت بسته‌بندی از شرکت صنایع شیمیایی بتن ژیک‌اوا تهیه شده است.

پوزولان تهیه شده از کارخانه سیمان خاش به عنوان یکی از مواد پودری معدنی فعالی است که در این سال‌ها شناخته می‌شود به گونه‌ای که در ساخت اولین سد بتن غلتکی در ایران واقع در جگین هرمزگان به عنوان تنها پوزولان مورد تأیید مهندسین مشاور طرح و در سال ۱۳۸۲ به عنوان محصول برتر کشور انتخاب گردیده است. خواص فیزیکی مواد سیمانی مطابق جدول ۱ نیز می‌باشد. در جدول ۲ آنالیز شیمیایی پوزولان‌ها آمده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی مواد سیمانی

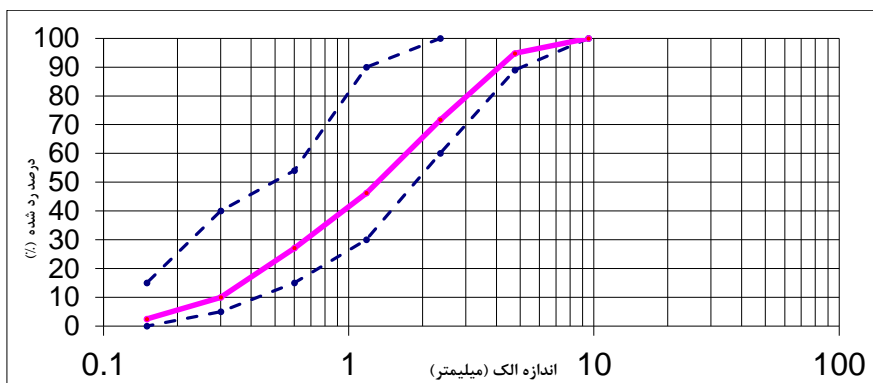
kg/m <sup>3</sup> وزن مخصوص	cm <sup>2</sup> /gr سطح مخصوص	
۳۱۵۰	۳۱۰۰	سیمان
۲۲۰۰	۶۵۰۰	میکرو سیلیس
۲۶۰۰	۳۳۰۰	پوزولان خاش

جدول ۲: آنالیز شیمیایی میکرو سیلیس و پوزولان خاش

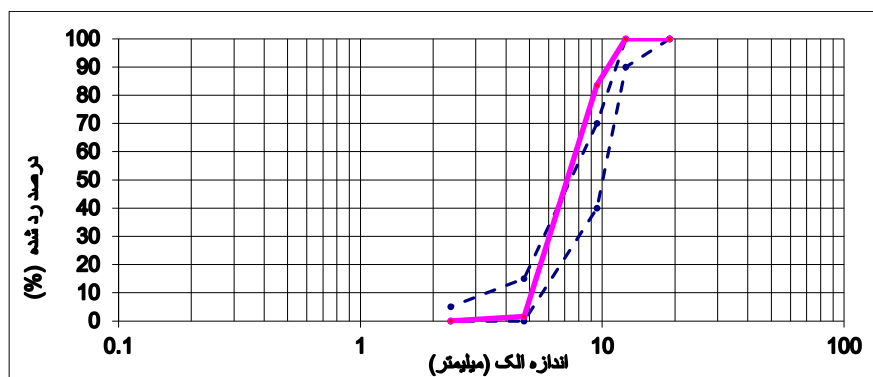
نام	$S_iO_2\%$	$Al_2O_3\%$	$Na_2O\%$	$K_2O\%$	CaO%	$Fe_2O_3\%$	L.O.I
میکروسیلیس	۸۹,۰۲	۰,۵۸	۰,۴۲	۱,۵۱	۰,۷۱	۲,۷۲	۳,۵۴
پوزولان خاش	۵۷,۹۸	۱۶,۸۹	۲,۹۲	۱,۹۶	۱۰,۰۲	۴,۵۱	۲,۳۲

### ۲.۱.۲. سنگدانه‌ها

درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه با وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه‌بادی با وزن مخصوص ۲۶۸۵ استفاده شد. همچنین از پور سنگ آهکی با وزن مخصوص ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز استفاده گردید. در شکل ۱ و ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه و شن نخودی و در شکل ۳ منحنی ترکیبی دانه‌بندی و همچنین در جدول ۳ سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی نیز آورده شده است.



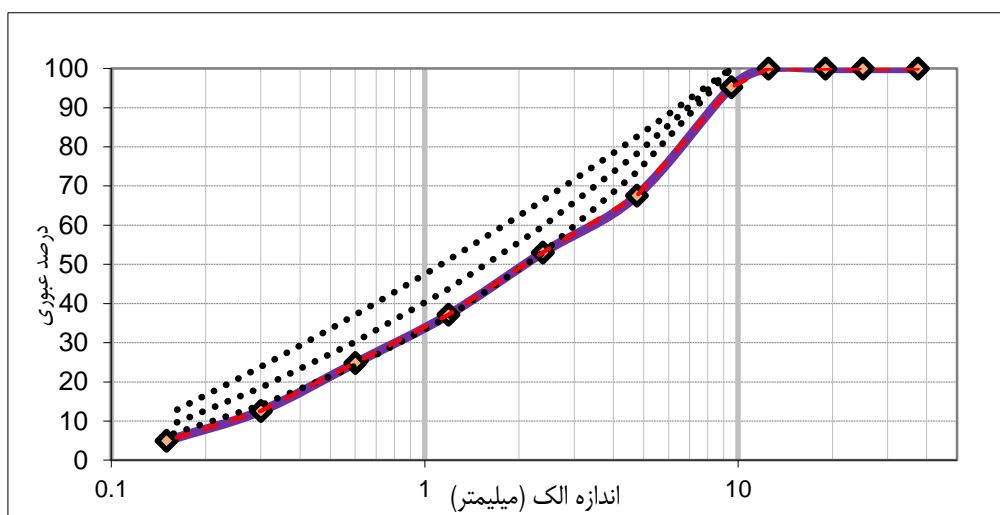
شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه



شکل ۲: منحنی دانه‌بندی شن نخودی

جدول ۳: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی مصالح

مدول نرمی FM	سهم	مصالح
۶/۱۳	۳۰	شن ریز (نخودی)
۳/۴۸	۶۰	ماسه
۱/۳۹	۴	ماسه بادی
۱/۰۷	۶	پودر سنگ
۴/۰۵	۱۰۰	ترکیب سنگدانه‌ها



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح

### ۳.۱.۲ آب

آب مصرفی جهت ساخت بتن از آب آشامیدنی شهر چناران با  $\text{PH} = 7/5$  استفاده گردید.

### ۴.۱.۲ افزودنی فوق روان کننده

به منظور رسیدن به خواص رئولوژیکی مناسب در بتن خودتراکم از فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلات با وزن مخصوص ۱۰۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد مواد جامد ۴۹٪ استفاده گردید.

### ۲.۲ طرح مخلوط و نحوه ساخت و عمل آوری

طرح مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که بتواند تمامی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده نماید. در ابتدای هرروز درصد رطوبت مصالح گرفته شده و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگدانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط کن ریخته شد و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان و در انتها آب نیز به طرح اضافه گردید. فوق روان کننده به عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن جریان اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر به طرح‌ها اضافه می‌گردید. سپس آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، حلقه L و جعبه L نیز صورت گرفتند. همچنین جداسازی دانه‌ها و آب‌انداختگی بتن به صورت چشمی کنترل گردید. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در قالب و با یک‌لایه روکش پلاستیکی بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند. طرح‌های اختلاط در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: طرح‌های اختلاط

نام طرح	مجموع مواد سیمانی	درصد مصرف پوزولان	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	میکروسیلیس	پوزولان خاش	شن	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ	فوق روان کننده
A1	۴۵۰	۵٪	۰/۴۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۵۱۷	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۴۳
A2	۴۵۰	۵٪	۰/۴۵	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۴۹۹	۹۹۸	۶۷	۱۰۱	۰/۶۶
A3	۴۵۰	۵٪	۰/۵۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۴۸۱	۹۶۱	۶۴	۹۷	۰/۳۱
A4	۴۵۰	۷٪/۱۵	۰/۴۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۵۱۳	۱۰۲۶	۶۸	۱۰۳	۰/۷۳
A5	۴۵۰	۷٪/۱۵	۰/۴۵	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۴۹۴	۹۸۷	۶۶	۹۹	۱/۰۳
A6	۴۵۰	۷٪/۱۵	۰/۵۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۴۷۵	۹۴۹	۶۳	۹۶	۰/۴۷
A7	۴۵۰	۱۰٪	۰/۴۰	۴۰۵	۴۵	-	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۸۷
A8	۴۵۰	۱۰٪	۰/۴۵	۴۰۵	۴۵	-	۴۸۸	۹۷۶	۶۵	۹۸	۱/۰۹
A9	۴۵۰	۱۰٪	۰/۵۰	۴۰۵	۴۵	-	۴۶۹	۹۳۷	۶۲	۹۴	۰/۶۹
A10	۴۵۰	۱۵٪	۰/۴۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۳۴	۱۰۶۷	۷۱	۱۰۸	۲/۱۸
A11	۴۵۰	۱۵٪	۰/۴۵	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۱۸	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۵۶
A12	۴۵۰	۱۵٪	۰/۵۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۰۱	۱۰۰۲	۶۷	۱۰۱	۱/۳۱
A13	۴۵۰	۲۵٪	۰/۴۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۳۸	۱۰۷۶	۷۲	۱۰۸	۲/۸۰
A14	۴۵۰	۲۵٪	۰/۴۵	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۲۳	۱۰۴۶	۷۰	۱۰۵	۲/۰۲
A15	۴۵۰	۲۵٪	۰/۵۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۷۱
A16	۴۵۰	۳۵٪	۰/۴۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۴۰	۱۰۸۱	۷۲	۱۰۹	۵/۵۸
A17	۴۵۰	۳۵٪	۰/۴۵	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۲۸	۱۰۵۵	۷۰	۱۰۶	۳/۱۱
A18	۴۵۰	۳۵٪	۰/۵۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۱۴	۱۰۲۸	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
A19	۴۵۰	۰٪	۰/۴۰	۴۵۰	-	-	۵۲۷	۱۰۵۴	۷۰	۱۰۶	۱/۵۶
A20	۴۵۰	۰٪	۰/۴۵	۴۵۰	-	-	۵۰۹	۱۰۱۹	۶۸	۱۰۳	۱/۲۵
A21	۴۵۰	۰٪	۰/۵۰	۴۵۰	-	-	۴۹۲	۹۸۳	۶۶	۹۹	۰/۵۶

### ۳.۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت سنجش عمق نفوذ آب تحت فشار از ۲ نمونه مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی متری و جهت آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید از نمونه‌های به قطر ۱۰ و ضخامت ۵ سانتی متر در سن ۲۸ روزه استفاده گردید.

### ۳. بحث و بررسی

#### ۱.۳. خواص بتن تازه

به منظور بررسی ویژگی‌های رئولوژی بتن خودتراکم؛ آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، حلقه J و جعبه L نیز انجام پذیرفت که در شکل ۴ مشخص می‌باشد. همچنین نتایج آن در جدول ۵ ارائه گردیده است.



شکل ۴: عکس رئولوژی بتن خودتراکم، نمونه‌ها، شکستن نمونه‌ها

جدول ۵: خواص بتن تازه خودتراکم

نام طرح	جریان اسلامپ (cm)	T50(sec)	حلقه L (cm)	جعبه L
A1	۵۷	۳	۴۸	۰/۸۰
A2	۶۱	۲/۷۰	۵۲	۰/۸۴
A3	۶۲	۲/۳۰	۵۰	۰/۸۶
A4	۶۷/۵۰	۳/۲۰	۵۵	۰/۹۲
A5	۶۰	۲/۶۰	۵۱	۰/۸۸
A6	۵۸/۵۰	۲/۱۰	۵۰/۵۰	۰/۸۲
A7	۶۷	۲/۴۰	۵۹	۰/۹۴
A8	۵۹	۲/۱۵	۵۰	۰/۸۰
A9	۶۳	۲	۵۵	۰/۸۴
A10	۷۶	۴/۷۰	۶۹	۰/۹۴
A11	۶۰/۵۰	۳/۷۰	۵۳	۰/۸۹
A12	۵۸	۳/۳۰	۵۲/۵۰	۰/۸۸
A13	۷۴/۵۰	۴/۴۰	۶۸/۵۰	۰/۹۵
A14	۷۴	۳/۷۰	۶۵	۰/۹۱
A15	۷۲/۵۰	۳/۱۰	۶۱	۰/۸۹
A16	۷۰	۳/۸۰	۶۳	۰/۹۷
A17	۷۰/۵۰	۳/۲۰	۶۱	۱
A18	۶۷	۳/۱۰	۵۸	۰/۸۴
A19	۶۶	۳/۲۰	۵۵	۰/۹۲
A20	۵۷	۳/۵۰	۴۸	۰/۸۴
A21	۵۶	۳/۸۰	۴۷/۵۰	۰/۸۲

با توجه به نتایج جریان اسلامپ مشخص گردید کلیه طرح‌ها در محدوده‌ی ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متری می‌باشند که بیشترین و کمترین مقادیر اسلامپ به ترتیب مربوط به طرح‌های A ۱۳ و A ۲۱ نیز می‌باشد. طبق آزمایش T50 ملاحظه گردید که بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس زمان بیشتری را صرف رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متری می‌کند که این به دلیل لزجت ظاهری بالاتر بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد. در کلیه طرح‌ها در آزمایش جعبه L عدم جداشدگی بتن در پشت میلگردها نیز مشاهده گردید و در بتن‌های حاوی پوزولان خاش سرعت حرکت بتن نسبت به بتن‌های شاهد و بتن‌های حاوی میکروسیلیس کمتر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس



از نظر رئولوژی رفتار و عملکرد مطلوب‌تری داشتند. البته شایان ذکر است که میزان مصرف میکروسیلیس با پوزولان خاش تفاوت چشمگیری دارد و برای مقایسه رئولوژی این دو نوع پوزولان بهتر است در درصدهای مصرف یکسان مورد مقایسه قرار گیرند.

### ۲.۳. آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

آزمایش RCPT یا نفوذپذیری کلراید سریع طبق استاندارد ASTM C1202 انجام می‌شود. نمونه‌های اشباع‌شده در آب به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به ضخامت ۵۰ میلی‌متر بین دو ظرف با محلول‌های ۳ درصد NaCl و سدیم هیدروکسید NaOH قرار داده می‌شود. پس از آن در مدت ۶ ساعت، ۶۰ ولت برق اعمال می‌شود. پس از اتمام آزمایش، کل بار الکتریکی عبور کرده اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس جدول ۶ می‌توان مقاومت بتن را در برابر نفوذپذیری کلراید تعیین کرد [۶]. مقادیر آزمایش RCPT تابع ریزساختار بتن و هدایت الکتریکی محلول منافذ در بتن است. این روش آزمایش مورد انتقاد بسیاری قرار گرفته است. RCPT روشی است که در آن شرایط پایدار نفوذ وجود ندارد. بدان معنی که برای دستیابی به انتشار پایدار، می‌بایست شرایطی ایجاد شده باشد که یون‌های کلراید از یک‌سوی نمونه به سوی دیگر آن رسیده باشند که برای حصول این شرط، نیاز به مدت‌زمان طولانی است [۷]. در مطالعه حاضر با توجه به شکل شماره ۵ آزمایش بر روی ۳ نمونه استوانه‌ای به ضخامت ۵۰ میلی‌متر از نمونه‌های برش خورده بتنی ۱۰۰\*۲۰۰ میلی‌متری استفاده شده است. در شکل نتایج آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) مطابق شکل ۶ تا ۸ می‌باشد.

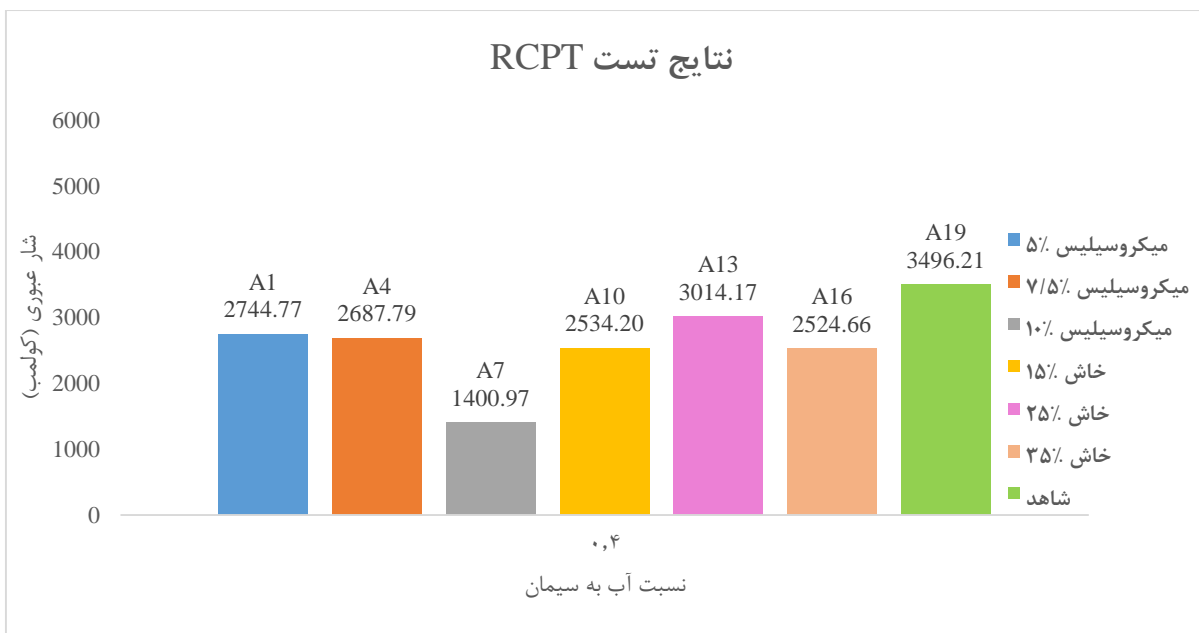


شکل ۵: آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT)

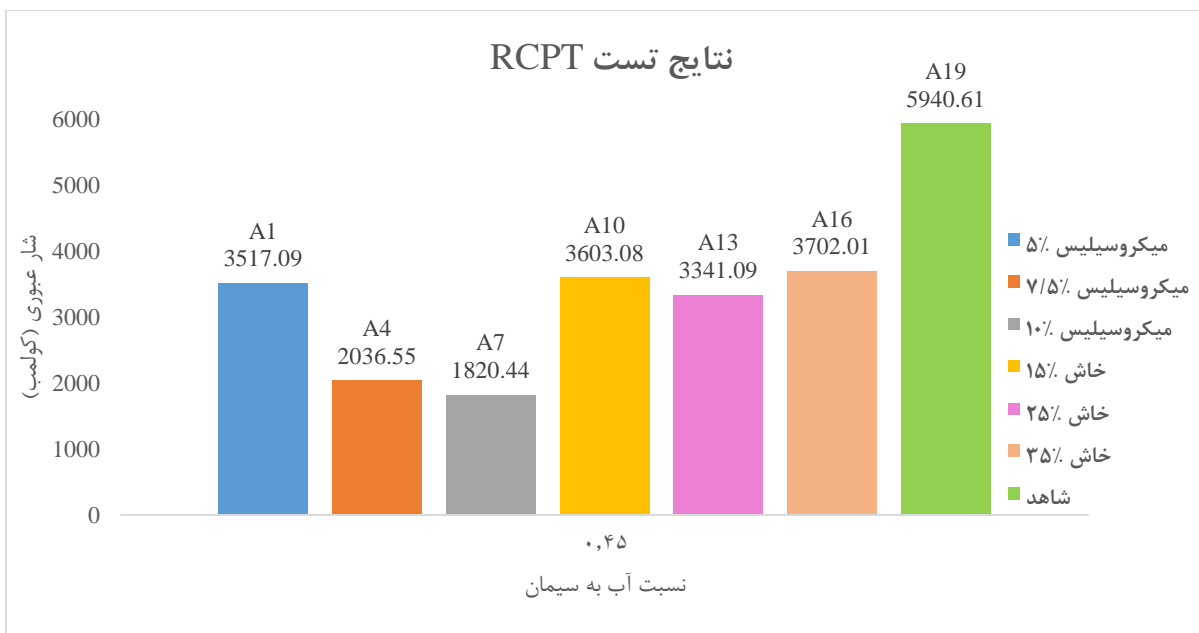


جدول ۶: محدوده تعریف شده نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) مطابق استاندارد ASTM C1202

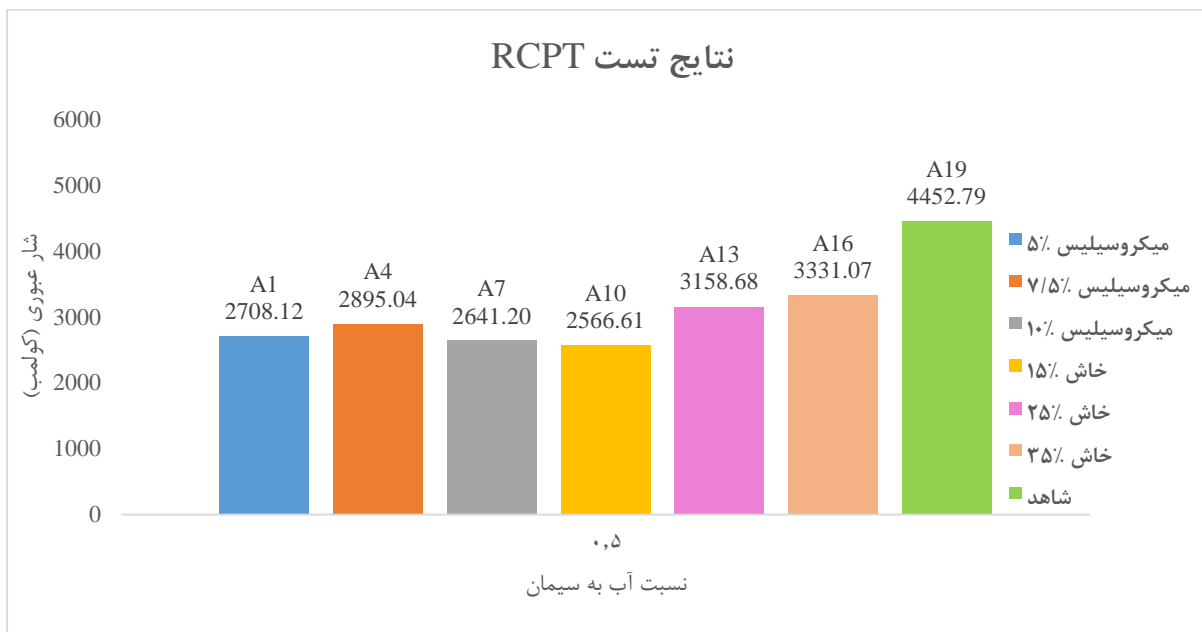
نفوذپذیری یون کلراید	بار الکتریکی عبور کرده (کولمب)
زیاد	$4000 <$
متوسط	2000-4000
کم	1000-2000
خیلی کم	100-1000
قابل اغماض	$100 <$



شکل ۶: نتیجه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در نسبت آب به مواد سیمانی ۰٫۴۰



شکل ۷: نتیجه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در نسبت آب به مواد سیمانی ۰,۴۵



شکل ۸: نتیجه آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید در نسبت آب به مواد سیمانی ۰,۵۰

از بررسی نمودارهای آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلر نتیجه می شود که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقدار شار عبوری نیز افزایش یافته است. کمترین میزان شار عبوری مربوط به طرح AV و بیشترین شار عبوری مربوط به طرح A20 نیز می باشد. افزایش درصد مصرف میکروسیلیس سبب کاهش شار عبوری و در پوزولان خاش افزایش مصرف به عنوان جایگزین سیمان سبب تغییر چندانی در شار عبوری نگردیده است، اما به طور کلی نتایج نشان می دهد که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش به عنوان ماده جایگزین سیمان سبب کاهش شار عبوری از نمونه های بتنی گردیده است و افزایش مشخصات دوامی بتن را گزارش می کند. همان طور که از نتایج استنتاج می شود بتن های خودتراکم شاهد از نظر استاندارد ASTM C1202 در محدوده زیاد قرار می گیرند و توصیه می گردد در صورت عدم استفاده از پوزولان ها در بتن خودتراکم تا حد امکان نسبت به کاهش نسبت آب به مواد سیمانی توجه ویژه اتخاذ گردد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که در روش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) اندازه گیری از همان لحظه شروع انجام آزمایش آغاز می گردد. مشکل دیگری که در روش RCPT وجود دارد، حرارت به وجود آمده در طول انجام آزمایش می باشد. همچنین زمانی که از مواد پوزولانی استفاده شود، تغییراتی در مشخصات مایع منفذی به وجود می آید که باعث عدم اطمینان به نتایج نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) می شود. به علاوه ولتاژ نسبتاً زیاد ۶۰ ولت خود نیز باعث حالت عدم پایداری در حین انجام آزمایش می شود [۸]. در نتیجه ممکن است نتایج به دست آمده از این روش به درستی بیانگر انتشار یون کلراید در نمونه بتنی نباشد اما به دلیل هزینه های زیاد انجام آزمایش های دوام و صرف وقت زیاد برای بررسی مشخصات دوامی بتن، آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید با توجه به استاندارد ASTM C1202 مورد توجه می باشد.

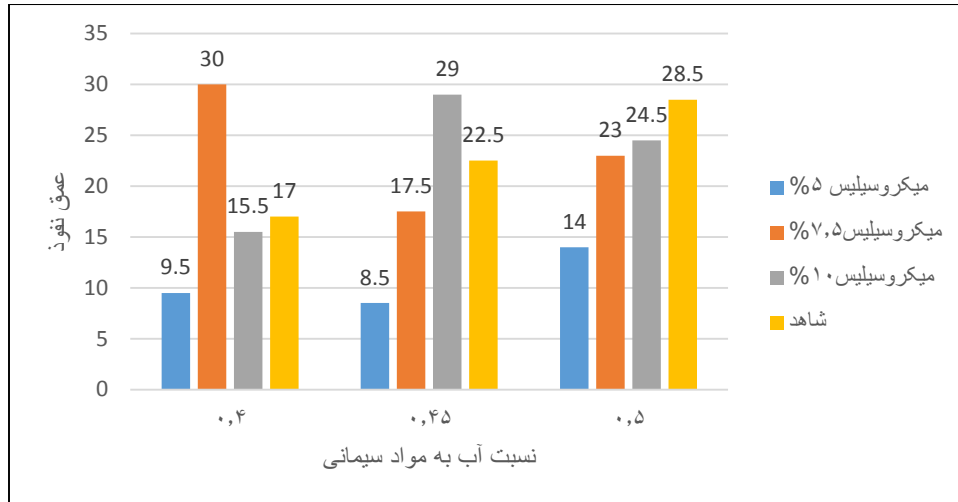
### ۲.۳. آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

هدف از انجام این آزمایش تعیین میزان نفوذ آب تحت فشار در بتن سخت شده می باشد که در آب عمل آوری شده است بدین ترتیب که آب با فشار به سطح بتن سخت شده اعمال می شود و سپس نمونه به دو نیم تقسیم شده و عمق نفوذ پذیری مربوط به پیشروی آب اندازه گیری می شود. ۲ عدد نمونه ی مکعبی ۱۵×۱۵ برای انجام این آزمایش در نظر گرفته شد که نمونه ها باید حداقل در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گیرد. روش آزمایش بدین گونه است که نمونه را درون دستگاه قرار داده و فشار آبی برابر ۴۵۰ الی ۵۵۰ کیلو پاسکال در مدت ۷۲ ساعت اعمال گردد. در طول آزمون به طور پیوسته سطوحی از نمونه را که در معرض فشار آب قرار ندارد کنترل تا آب نشت و تراوش نداشته باشد. پس از اعمال فشار در مدت زمان مشخص، نمونه را از درون دستگاه خارج کرده و قطرات آب اضافی سطحی از نمونه که فشار آب بر روی آن اعمال شده را پاک و سپس نمونه را از جهت عمود بر سطحی که در معرض فشار آب قرار گرفته به دو نیم شکاف می دهیم. هنگامی که نمونه دو نیم شد، سطحی از نمونه دو نیم شده را که در معرض فشار آب قرار گرفته بود را به سمت پایین قرار داده و به محض شکستن نمونه پیشروی آب روی نمونه را علامت گذاری کرده به طوری که پیشرفت نفوذ آب به وضوح در سطح قابل مشاهده باشد و نمونه دو نیم شده خشک نشود، سپس بیشترین عمق نفوذ اندازه گیری و به میلی متر ثبت می گردد. نتیجه آزمون بیشترین عمق نفوذ آب است که به میلی متر بیان گردیده است [۹]. شکل ۹ آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار نیز می باشد.

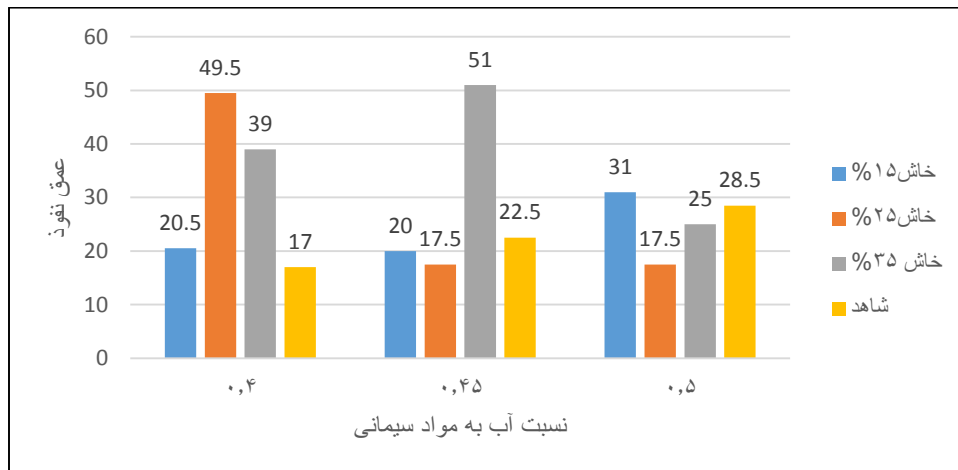


شکل ۹: آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد مطابق شکل‌های ۱۰ الی ۱۱ نیز می‌باشد.



شکل ۱۰: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با نمونه شاهد



شکل ۱۱: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های حاوی پوزولان خاش با نمونه شاهد

از مقایسه نمودارهای عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح‌های حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش با نمونه شاهد نتیجه می‌شود که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می‌گردد. همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف پوزولان‌ها برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد. کمترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح A۲ به مقدار ۸/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح A۱۷ به مقدار ۵۱ میلی‌متر نیز گزارش می‌شود. از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار و مقایسه با نمونه‌های شاهد ملاحظه می‌گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪ نیز می‌باشد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که خطای ناشی از انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار به دلیل مصرف افزودنی فوق روان‌کننده جهت رسیدن به الزامات حالت خمیری غیرقابل اجتناب بوده و مصرف این ماده سبب افزایش هوازایی در بتن نیز می‌گردد که در نتیجه موجب افزایش خلل و فرج در نمونه‌ها شده و افزایش عمق



مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی

دهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۷  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



انجمن علمی بتن ایران



انجمن بتن ایران  
انجمن علمی بتن ایران

نفوذ را در بردارد، لذا توصیه می‌گردد برای افزایش دقت در انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار، میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده نیز مدنظر قرار گیرد. در نمودارهای فوق ملاحظه می‌گردد که در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ در بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش به دلیل افزایش مصرف فوق روان کننده و در نتیجه امکان هوازایی بیشتر نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار نیز دارای دقت کافی و مطلوبی نمی‌باشد و نسبت به نمونه‌های شاهد ساخته شده عمق نفوذ بیشتری را گزارش می‌کند.

#### ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده و با استفاده از تجزیه و تحلیل، نتیجه گرفته می‌شود:

- ۱- با توجه به نتایج جریان اسلامپ مشخص گردید کلیه طرح‌ها در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی متری می‌باشند که بیشترین و کمترین مقادیر اسلامپ به ترتیب مربوط به طرح مخلوط حاوی ۲۵ درصد پوزولان خاش در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ و طرح مخلوط شاهد در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ می‌باشد.
- ۲- در آزمایش جعبه L عدم جداشدگی بتن در پشت میلگردها نیز مشاهده گردید و در بتن‌های حاوی پوزولان خاش سرعت حرکت بتن نسبت به بتن‌های شاهد و بتن‌های حاوی میکروسیلیس کمتر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس از نظر رئولوژی رفتار و عملکرد مطلوب‌تری داشتند. البته شایان ذکر است که میزان مصرف میکروسیلیس با پوزولان خاش تفاوت چشمگیری دارد و برای مقایسه رئولوژی این دو نوع پوزولان بهتر است در درصد‌های مصرف یکسان مورد مقایسه قرار گیرند.
- ۳- در کل نمونه‌ها مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقدار شار عبوری نیز افزایش یافته است لذا بهتر است جهت افزایش مشخصات دوامی، از بتن‌های خودتراکم با نسبت‌های آب به مواد سیمانی پایین‌تر مبادرت به عمل آید.
- ۴- افزایش مصرف میکروسیلیس از ۵ درصد به ۱۰ درصد سبب کاهش قابل توجه شار عبوری در نمونه‌های بتن خودتراکم گردیده است و این در حالی است که در پوزولان خاش، افزایش ۲۰ درصدی در مصرف این نوع پوزولان سبب تغییرات زیادی در شار عبوری در نمونه‌های بتن خودتراکم نگردیده است؛ اما به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب بهبود در نتایج شار عبوری نسبت به بتن شاهد می‌باشیم.
- ۵- از بررسی نتایج دقیق آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCPT) می‌توان دریافت که عدم استفاده از پوزولان سبب افزایش شار عبوری در نمونه‌ها و قرارگیری این نمونه‌ها در محدوده زیاد از نظر استاندارد ASTM C1202 می‌شود. لذا توصیه می‌شود در صورت عدم استفاده از پوزولان در بتن خودتراکم نسبت به کاهش نسبت آب به مواد سیمانی توجه ویژه به عمل آید.
- ۶- از مقایسه نمودارهای عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح‌های حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش با نمونه شاهد نتیجه می‌شود که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می‌گردد. همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف پوزولان‌ها برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد.
- ۷- کمترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح مخلوط حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به مقدار ۸/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح مخلوط حاوی ۳۵ درصد پوزولان خاش به مقدار ۵۱ میلی‌متر نیز گزارش می‌شود.
- ۸- از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار و مقایسه با نمونه‌های شاهد ملاحظه می‌گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪ می‌باشد.

#### تشکر و قدردانی

از جناب آقایان مهندس سید محمد سجادی عطار و مهندس محمدجواد طاهراز به خاطر راهنمایی‌هایشان سپاس‌گزاری می‌شود. همچنین از شرکت صنایع شیمیایی ژیکاوا و تمامی کارکنان این شرکت به دلیل در اختیار گذاشتن تمامی امکانات آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌ها کمال تشکر و قدردانی را داریم.

## مراجع

- [1] Baqheri, A.R. Zanganeh, H. Samadzad, H. and Kiani, A.(2012). "Assessing The Durability Of Binary And Ternary Concretes Using Rapid Chloride Resistance Test And The Accelerated Rebar Corrosion Test," presented at the International Congress On Durability Of Concrete.
- [۲] رمضانپور، ع. قدوسی، پ. گنجیان، ا. (۱۳۹۵). "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، تألیف کومار، پ. مهتا، پ. مونته نیرو، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص ۲۹۹-۳۴۱
- [۳] قدوسی، پ. شیرزادی جاوید، ع. رحمتی، ب. (۱۳۹۳) "روش نوین طرح مخلوط بتن خودتراکم بر پایه مقاومت فشاری". تحقیقات بتن، سال ششم، شماره اول، ص ۸۷-۱۰۲.
- [۴] ثابت دیوشلی، ب. (۱۳۹۶). "طراحی و اجرای بتن‌های بادوام و کارایی بالا برای سازه‌های دریایی". پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران، ۱۴ تا ۱۵ خرداد.
- [۵] رمضانپور، ع.، پیدایش، م. (۱۳۹۲). "تکنولوژی بتن (مصالح، خواص، اجرا)"، جلد اول، چاپ اول، تهران، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ص ۱۱-۶۹.
- [6] ASTM C1202-97, Standard test method for electrical indication of concrete ability to resist chloride ion penetration.
- [7] Streicher, H. Alexander, M. G. (1995). "A chloride conduction test for concrete," Cement and Concrete Research", vol.25, pp. 1284-1294.
- [8] Julio-Betancourt, G. Hooton, R.(2004) "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes," Cement and concrete research, vol. 34, pp. 1007-1015.
- [9] BS EN12390-8. (2000). "Depth of penetration of water under pressure".