



ارزیابی تأثیر پارامترهای متفاوت بر روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل آن

یوسف زندی*^۱، مجید عابدی^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.
۲- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۴
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۵/۳۰
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۶/۳۱

کلمات کلیدی:

نفوذ یون کلراید
تخلخل بتن
نسبت آب به سیمان (W/C)
خاکستر بادی
نفوذپذیری بتن
دوام

خلاصه: یکی از عوامل اصلی دوام بتن نفوذپذیری آن است. نفوذپذیری بتن تابع دو عامل سیال عبوری و محیط متخلخل نفوذ است. در این تحقیق برای ارزیابی تأثیر پارامترهای نسبت آب به سیمان (W/C)، نوع و درصد خاکستر بادی بر روی نفوذپذیری بتن، آزمایش‌های نفوذ سریع یون کلراید (RCPT) و تخلخل‌سنجی به روش جیوه (MIP) انجام شد؛ که آزمایش‌ها بر روی آزمون‌های با نسبت آب به سیمان (W/C) متفاوت و بدون خاکستر بادی و همچنین از آزمون‌های با نسبت آب به سیمان (W/C) ثابت و خاکستر بادی متفاوت، با گریدهای استاندارد F_3C و خاکستر بادی صنعتی ویژه با نام تجاری A، که تشکیل‌دهنده ۱۸ طرح اختلاط بتن می‌باشند، انجام گردید. (تعداد کل نمونه‌ها ۲۱۶ عدد) انجام گردید. نتایج نشان می‌دهد که کاهش نسبت آب به سیمان (W/C)، باعث کاهش قطر تخلخل و حجم نفوذ می‌شود، اما این امر باعث کاهش سریع کارایی و مشکلات جدید اجرایی می‌گردد و نیز در مقایسه با افزایش درصد خاکستر بادی، تأثیر کمتری بر افزایش مقاومت بتن در مقابل یون کلراید داشته است. همچنین با افزایش درصد هر سه نوع خاکستر بادی باعث کاهش نفوذ سریع یون کلراید، قطر تخلخل و حجم نفوذ می‌گردد و نیز کارایی بتن را افزایش می‌دهد. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که پارامترهای نسبت آب به سیمان (W/C)، نوع و درصد خاکستر بادی در بتن بر روی نفوذپذیری بتن تأثیر زیادی داشته و باعث افزایش یا کاهش دوام و کارایی بتن گردیده است. نکته جالب در قابلیت انتشار یون کلر در بتن‌های حاوی خاکستر بادی این است که در مواردی که حتی نمونه حاوی خاکستر بادی صنعتی ویژه با نام تجاری A، دارای تخلخل بیشتری نسبت به نمونه شاهد (فاقد خاکستر) بوده باز هم کاهش انتشارپذیری یون کلر به دلیل واکنش‌های ویژه درونی یون کلر با فازهای آلومین مشاهده گردید.

۱- مقدمه

آسیب میرساند. اول اینکه باعث کاهش سطح مقطع میلگرد می‌گردد. دوم اینکه محصولات خوردگی با حجمی بزرگتر از خود فولاد را به وجود می‌آورد. این افزایش حجم با ایجاد تنشهای کششی در بتن منجر به ترک خوردگی و در نهایت خرابی سازه می‌گردد [۴].

عامل اصلی دیگری که در دوام بتن نقش دارد، نفوذ پذیری آن می‌باشد. مجراها و منافذ مویبین که از تبخیر آب اضافی در بتن باقی می‌ماند؛ مهم ترین علت متخلخل و نفوذپذیر بودن بتن محسوب می‌شود [۵]. هر چه این منافذ متصل تر باشند بتن نفوذ پذیر تر است. آب اضافی همچنین منجر به افزایش میزان ترک های جمع‌شدگی می‌گردد. این ترک ها خود مسیر عبور آب و مواد شیمیایی هستند.

بتن مسلح یکی از منحصربه‌فردترین ترکیبات در جهان است که امروزه تحقیقات زیادی روی آن انجام می‌گیرد. با این وجود خوردگی فولاد مدفون در آن سبب شده است تا تعمیرات پر هزینه در سازه رخ بدهد و گاهی اوقات سازه‌ها در معرض تخریب قرار بگیرند [۱]. این مسأله از مهم ترین مشکلاتی است که صنعت ساخت و ساز، در رابطه با دوام، با آن مواجه است [۲]؛ عامل اصلی این اتفاق کاهش pH محلول آبی موجود در منافذ بتن و تسریع واکنشهای اکسید شدن آهن در حضور یون کلر می‌باشد [۳]. خوردگی فولاد به دو طریق به بتن مسلح

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zandi@iaut.ac.ir

ترک های عمیق تر سریع تر به خوردگی فولاد مدفون در بتن منتهی می‌شوند [۶]. نفوذپذیری بتن هم چنین باعث می‌شود که آب یا سیالات دیگر بتوانند در بتن جریان پیدا کرده و مواد آسیب رسان و مضر را با خود به درون بتن حمل نمایند [۷]. بتن با نفوذپذیری پایین در مقابل حملات شیمیایی مقاومت بهتری نشان می‌دهد. به گونه ای که می‌توان بتن نسبتاً غیرقابل نفوذ را بتن با دوام دانست [۸]. هرچند مهم ترین علت نفوذپذیری بتن نداشتن فشردگی لازم و وجود خلل و فرج در بتن است [۹]. اما میزان نفوذپذیری تنها تابع ساده ای از تخلخل نمی‌باشد و علاوه بر آن به اندازه، توزیع، شکل پیچ و خم مسیر و پیوستگی منافذ نیز بستگی دارد [۱۰]. در حالت کلی میزان نفوذپذیری بتن تابع دو عامل سیال عبوری و محیط متخلخل نفوذ است [۹]. افزایش دوام بتن به ویژه در محیط های خورنده می‌تواند نقش عمده ای در توسعه پایدار داشته باشد [۱۱]. که بر اساس گزارش سازمان ملل، اصطلاح "توسعه پایدار" توسعه و پیشرفتی است که بتواند نیازهای زمان حال را به گونه‌ای تأمین کند که توانایی نسل‌های آینده در تأمین نیازهایشان به مخاطره نیافتد [۱۲].

از این رو پی بردن به خواص بتن و پیش بینی عملکرد آن در محیط های خورنده از اهمیت ویژه ای برخوردار است. عوامل متعددی به عملکرد بتن تأثیر می‌گذارد؛ مثلاً نفوذپذیری بتن، شرایط محیطی، نسبت آب به سیمان، عیار سیمان، یون‌های موجود در منطقه و غیره که هر کدام از این موارد در ساخت بتن خوب مؤثر است. اگر سیمان موجود در مخلوط ناکافی باشد، بتن به درستی متراکم نمی‌گردد و بافتی لانه زنبوری با سایر معایب سطحی در آن به وجود می‌آید که موجب تسهیل راه‌یابی عوامل آسیب‌رسان به درون آن می‌گردد [۱۳]. از طرف دیگر مقدار سیمان زیاد با افزایش حجم خمیر سیمان که مهمترین عامل تخلخل در بتن است، باعث افزایش تخلخل مخلوط می‌گردد [۵ و ۱۴].

دوام بتن در شرایط طبیعی، محیطی و داخلی عامل مهمی برای حفظ الزامات کارایی آن می‌باشد [۱۵]. در حال حاضر در اکثر کشورهای توسعه یافته تحولی در حال شکل‌گیری است که بر اساس آن توجه زیادی به مسائل دوام بتن صورت پذیرفته است و نقطه اساسی این امر نیاز به ارزیابی علمی طرح‌ها جهت بالا بردن معیارهای واقعی دوام و پایایی می‌باشد که یکی از کالبدی‌ترین فاکتورها، کنترل کیفیت جدی در پروژه‌های ساخت بتن جهت اطمینان از

ایمنی و افزایش عمر مفید ساختمانها می‌باشد. بنابراین در یک جمع‌بندی بررسی دوام بتن یک امر مهم پژوهشی است [۶]. افزایش تقاضا برای دوام و مقاومت مصالح مبتنی بر سیمان موجب شده است که مواد ضایعاتی مختلف با خواص پوزولانی به مخلوط بتن وارد گردند [۱۶]. همچنین افزایش نگرانی‌های جهانی در مورد اثرات زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی CO₂ و انتشار گازهای گلخانه‌ای، و راهکارهای مختلف برای کاهش میزان انتشار CO₂ را به همراه داشته است [۱۷ و ۱۸]. این نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای از فرایند تولید سیمان پرتلند باعث تشویق محققان به بررسی مناسب بودن مواد جایگزین برای جایگزینی سیمان پرتلند در بتن گشته است [۱۹]. بنابراین، مواد ضایعاتی معمولاً برای کاهش هزینه و کاهش انتشار CO₂ برای جایگزینی سیمان پرتلند استفاده می‌شود. مواد افزودنی که در ساخت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، باعث کاهش آلودگی زیست محیطی میگردد و همچنین استفاده از مواد افزودنی شیمیایی و معدنی موجب اصلاح برخی از خواص بتن می‌شود [۲۰]. حضور مواد مکمل معدنی و سیمانی در بتن موجب بهبود خواص بتن از جمله خواص مکانیکی، خواص رئولوژیکی و انتقال می‌شود [۲۱-۲۴].

ذرات کروی خاکستر بادی هم به دلیل اثر بلبرینگی^۱ موجب افزایش کارایی و اصلاح تجمع سیمان و در نتیجه کاهش نیاز به آب می‌شود [۲۵ و ۲۶] و در مورد نفوذ یون کلراید در بتن‌هایی که حاوی خاکستر بادی بودند، نشان دهنده افزایش مقاومت الکتریکی در بتن است [۲۷]. آسیب خوردگی در بتن‌های حاوی خاکستر بادی، نسبت به بتن با سیمان پرتلند معمولی کمتر است [۲۸].

دوام ارتباط زیادی به نفوذپذیری آن دارد که می‌توان این فاکتور را از طریق تست نفوذ یون کلراید ارزیابی کرد. نفوذ یون کلراید یک عامل مهم خوردگی فولادهای مدفون در بتن است که اغلب عمر سازه‌های بتنی را تعیین می‌کند [۲۹].

در فصول برفی زمستان برای شتاب بخشیدن به ذوب برف در جاده‌ها و ایجاد جریان آرام ترافیکی، اغلب از نمک یخ زدایی برای جلوگیری از مسائل انجماد استفاده می‌شود که از بین آنها منابع نمکی یون کلراید به لحاظ وفور، قیمت کم، تأثیرات خوب روی یخ و برف و غیره بوده و استفاده وسیعی در کشور دارند، اما ذرات آنها

1 Ball Bearing Effect

2 Durability

جدول ۱. طبقه‌بندی میزان مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید

Table 1. Classification of the strength of concrete against chloride ion penetration

RCPT (ASTM C1202 / AASHTO T277)	
میزان نفوذ یون کلراید	میزان شار عبوری (coulombs)
زیاد	> 4000
متوسط	2000-4000
کم	1000-2000
خیلی کم	100-1000
قابل چشم پوشی	< 100

مراجعی برای نفوذپذیری سریع یون کلراید و میزان شار عبوری مقادیری بیان نموده‌اند، که از جمله از آن مراجع ASTM C1202 / AASHTO T277 است. در جدول شماره ۱ مقادیر ذکر شده در ASTM C1202 / AASHTO T277 آورده شده است [۳۴ و ۳۵].

۱-۱- جنبه جدید و نوآوری و هدف تحقیق:

تاکنون مطالعه مشخصی و جامعی در خصوص تخلخل و نفوذ یون کلراید در بتن‌های ساخته شده با انواع مختلف پوزولان خاکستر بادی صورت نپذیرفته، در این کار تحقیقی با یک رویکرد آزمایشگاهی تأثیر میزان نسبت آب به سیمان (W/C) و همچنین تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس C₃F و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A⁻ روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ که آزمایش⁻ نفوذ یون کلراید به روش RCPT و آزمایش تخلخل سنجی به روش جیوه (MIP) انجام گردید و نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفتند.

۲- روند آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح

سیمان مصرفی، سیمان پرتلند تیپ ۱-۴۲۵ کارخانه سیمان صوفیان، طبق استاندارد ASTM C150 استفاده شد؛ که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. از سنگدانه درشت شکسته شده با حداکثر اندازه ۲۵ میلی‌متر و سنگدانه‌های ریز طبیعی، طبق استاندارد ASTM C33 استفاده گردید. جدول ۳ مشخصات سنگدانه‌های استفاده شده را نشان می‌دهد برای کسب کارایی مطلوب نیز در مخلوط‌های بتن از فوق روان کننده پلی کربوکسیلات، ساخت شرکت

می‌توانند باعث آسیب شدید به سازه‌های بتنی شوند. در حال حاضر آسیب نمک یخ زدا به سازه‌های کف جاده‌ای بتنی مورد توجه خاص مهندسان قرار گرفته که یکی از راهکارهای عملیاتی افزایش تراکم سازه داخلی بتن برای کاهش نفوذپذیری بتن می‌باشد. در این میان کاربرد برخی افزودنی‌ها نظیر افزودن انواع خاکستر بادی و حتی نوع سیمان به کار رفته روی نحوه خوردگی نمک انجماد بسیار حائز اهمیت است [۳۰].

در سال ۲۰۰۷، ژانگ^۱ تأثیر نسبت‌های مختلف آب به سیمان را ارزیابی و مقایسه نمود. او در مطالعات خود تحت شرایط استاندارد با استفاده از روش ASTM C1202 در تعیین ضریب الکتریسیته و نفوذپذیری یون کلراید، مقاومت تراکمی ۳، ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه را اندازه‌گیری نمود و نشان داد نفوذپذیری رابطه معنی داری با میزان نفوذ انواع آلودگی‌ها دارد [۳۱]. در سال ۲۰۰۹، ژانگ و همکاران، تأثیر نمک یخ زدا ۳/۵ درصد روی سازه بتنی با ضخامت کم و اضافه نمودن ماده هوزا را مورد بررسی قرار داد و دریافت که افزودن عامل هواده می‌تواند درجه آسیب بتنی را بشدت کاهش داده و توانایی آن در انجماد را بالا ببرد به ویژه زمانی که با میکروسیلیس ۱۰٪، خاکستر بادی ۲۰٪ و سرپاره کوره آهن ۵٪ ترکیب شود [۳۲].

در سال ۲۰۱۴، هونگانی^۲ در مقاله خود به بررسی پارامترهای مؤثر بر اندازه‌گیری و توزیع تخلخل تحت آزمایش MIP پرداختند و بیان کردند زمانی که وزن مخصوص نمونه در دست نمیباشد، بهتر است وزن مخصوص جیوه را ۴۸۰ mM/m و زاویه برخورد جیوه به دیواره منافذ هنگام نفوذ، ۱۳۰ درجه گرفته شود. همچنین ایشان اظهار کردند که برش نمونه‌ها بهترین روش برای تهیه نمونه از داخل بتن یا ملات می‌باشد [۳۳].

1 Zhang
2 Hongyan

جدول ۲. مشخصات سیمان مصرفی و خاکستر بادی

Table 2. Specifications of cement and fly ash

	بلین (m ² /kg)	زمان گیرش اولیه	زمان گیرش ثانویه	مقاومت فشاری ۳ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۷ روزه (kg/cm ²)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (kg/cm ²)								
سیمان	323.4	115	174	247	364	512								
خواص فیزیکی و مکانیکی خاکستر بادی														
	بلین (m ² /kg)	سطح ویژه (m ² /kg)		چگالی (gr/cm ³)		<45 μm, %								
خاکستر بادی A	132.8	87.3		1.61		40.03								
خاکستر بادی C	454.6	443.5		2.33		98.02								
خاکستر بادی F	315.7	203.2		2.29		73.43								
ترکیبات شیمیایی (%)														
سیمان	خاکستر بادی			سیمان	خاکستر بادی			سیمان	خاکستر بادی					
	A	C	F		A	C	F		A	C	F			
SiO ₂	21.57	86	62	55.9	K ₂ O	0.81	0.69	0.19	0.25	TiO ₂	-	0.13	-	-
Al ₂ O ₃	4.65	3.46	29.13	24.89	SO ₃	2.15	0.19	0.1	0.74	Fet	-	1.05	-	-
Fe ₂ O ₃	3.63	-	3.14	3.78	MnO	-	0.03	-	-	LR	0.63	-	-	-
CaO	63.32	0.58	3.2	10.43	Cr ₂ O ₃	-	0.53	-	-	C ₃ S	46.76	-	-	-
MgO	2.40	0.66	0.54	1.74	P ₂ O ₅	-	0.03	-	-	C ₂ S	26.56	-	-	-
Na ₂ O	0.32	0.93	0.15	0.23	CaO _f	1.11	-	-	-	C ₃ A	6.18	-	-	-
BaO	-	0.03	-	-	LoI	1.23	5.43	1.45	2	C ₄ AF	11.04	-	-	-

جدول ۳. دانه‌بندی و خواص فیزیکی سنگدانه‌ها

Table 3. Grain-size distribution and physical properties of aggregates

mm	0.075	0.150	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	12.5	19	25
بادامی	0	0	0	0	0	0.1	0.2	4	32	95	100
نخودی	0	0	0	0	0	4.5	15.1	85	100	100	100
ماسه	1.3	5.9	21	42	61	78	92	100	100	100	100

و ۵ مطابق استاندارد ACI ۲۱۱،۱ مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. به طوری که مطابق جدول شماره ۴ نسبت‌های آب به سیمان (W/C) ۰/۳۰، ۰/۳۲، ۰/۳۴، ۰/۳۶، ۰/۳۸، ۰/۴۰، ۰/۴۲، ۰/۴۴ و ۰/۴۶ در طرح اختلاط بتن به تعداد ۳ نمونه برای هر آزمایش از هر کدام مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همچنین مطابق جدول شماره ۵ با استفاده از سه نوع خاکستر بادی کلاس C₃F و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، در طرح اختلاط بتن به تعداد ۳ نمونه برای هر آزمایش از هر کدام مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در جدول طرح اختلاط‌ها نام‌گذاری بدین صورت می‌باشد که C-۱۶-P۴۰ یعنی طرحی که در آن نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۰ است (P۴۰)، قسمت دوم و سوم به ترتیب درصد خاکستر بادی (۱۶) و نوع خاکستر بادی (C) را نشان می‌دهد.

فرازون شیمی اصفهان، طبق استاندارد ASTM C۴۹۴ استفاده شد. همچنین سه نوع خاکستر بادی استفاده شده، طبق استاندارد ASTM C۶۱۸ در رده های کلاس C₃F و خاکستر بادی صنعتی شده با نام تجاری A که از فرآیند سنتز خاکستر کوره زباله سوز، ساخت شرکت بتن سپهرعمران اصفهان که مشخصات هر سه نوع خاکستر بادی در جدول ۲ آمده است، استفاده گردید.

۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق مخلوط های بتن برای دست یافتن به تأثیر میزان نسبت آب به سیمان (W/C) و همچنین تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس C₃F و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل بتن، مطابق جداول شماره ۴

جدول ۴. مشخصات مخلوط های بررسی شده با نسبت آب به سیمان متفاوت و بدون خاکستر بادی

Table 4. Specifications of tested mixtures with constant water-to-cement ratio and without fly ash

شماره	کد طرح اختلاط	W/C	اجزای تشکیل دهنده (kg/m ³)				فوق روان کننده (%)
			سیمان	آب	ماسه	شن	
1	P30	0.3	430	129	768	1061	1.61
2	P32	0.32	410	131	790	1061	1.53
3	P34	0.34	408	139	794	1061	1.42
4	P36	0.36	402	145	802	1061	1.36
5	P38	0.38	397	150.9	809	1061	1.27
6	P40	0.40	392	157	815	1061	1.18
7	P42	0.42	393	165	816	1061	1.08
8	P44	0.44	394	173.5	816	1061	0.96
9	P46	0.46	396	182	815	1061	0.85

جدول ۵. مشخصات مخلوط های بررسی شده با نسبت آب به سیمان ثابت و با خاکستر بادی متفاوت

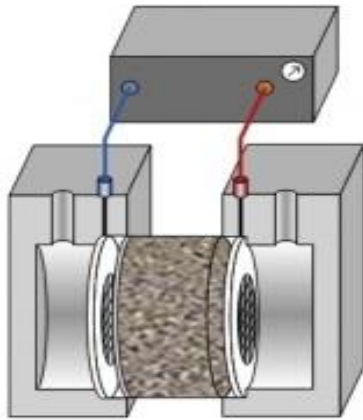
Table 5. Specifications of tested mixtures with constant water-to-cement ratio and containing fly ash

شماره	کد طرح اختلاط	W/C	اجزای تشکیل دهنده (kg/m ³)					فوق روان کننده (%)	خاکستر بادی (%)
			سیمان	آب	ماسه	شن	خاکستر بادی		
1	P40-0	0.40	392	157	815	1061	0	1.61	0
2	P40-4	0.40	376.5	157	815	1061	15.5	1.58	4
3	P40-8	0.40	360.5	157	815	1061	31.5	1.56	8
4	P40-12	0.40	345	157	815	1061	47	1.57	12
5	P40-16	0.40	329	157	815	1061	63	1.51	16
6	P40-20	0.40	313.5	157	815	1061	78.5	1.48	20
7	P40-24	0.40	298	157	815	1061	94	1.44	24
8	P40-28	0.40	282	157	815	1061	110	1.41	28
9	P40-32	0.40	266.5	157	815	1061	125.5	1.38	32

نمونه های بتنی از یک وجه با محلول NaCl و از وجه دیگر با محلول NaOH در تماس قرار می گیرند و با ایجاد اختلاف پتانسیل، جریان الکتریکی از نمونه ها عبور کرده و یون های کلراید به درون بتن رانده می شوند. این روش بر این فرض استوار است که میزان جریان عبوری، با قابلیت انتشار یون های کلراید از میان منافذ موئین بتن ارتباط دارد. در این تحقیق آزمایش بر روی نمونه ها در سن ۹۱ روز انجام شد. برای هر طرح اختلاط، ۳ نمونه استوانه ای به ضخامت ۵۰ میلی متر از نمونه های استوانه ۲۰۰×۲۰۰ میلی متری برش داده شد. بعد از آماده سازی، نمونه ها درون سلول-های آزمایش قرار داده شدند. در

۲-۳- جزئیات و نحوه انجام آزمایش

نفوذ سریع یون کلراید (RCPT): آزمایش نفوذ سریع یون کلراید بر اساس استاندارد ASTM C1۲۰۲، به طور گسترده ای در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش نمونه های بتنی اشباع به قطر ۱۰۰ و ضخامت ۵۰ میلی متر، تحت اختلاف پتانسیل ۶۰ ولت برای مدت ۶ ساعت قرار می گیرند و میزان کل بار عبوری در این مدت محاسبه می شود. این عدد به عنوان شاخصی برای طبقه بندی بتن از لحاظ مقاومت در مقابل نفوذ یون کلراید در نظر گرفته می شود.



شکل ۲. تخلخل‌سنجی به روش جیوه (MIP)

Fig. 2. Mercury Intrusion Porosimetry (MIP) device



شکل ۱. دستگاه نفوذ سریع یون کلراید (RCPT)

Fig. 1. Rapid Chloride ion Permeability Test device (RCPT)

عامل سیال عبوری و محیط متخلخل نفوذ است. در این تحقیق دو آزمایش برای ارزیابی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی دوام بتن انجام گردیده است.

۳-۱- تأثیر نسبت آب به سیمان (w/c) روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل آن

آزمایش نفوذ سریع یون کلراید، به طور گسترده در دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در حقیقت میزان بار الکتریکی عبوری از میان نمونه بتنی را در طول زمان آزمایش به عنوان شاخص نفوذپذیری کلرایدی بتن اندازه‌گیری می‌کند.

مطابق شکل ۳ نتایج آزمایش نشان می‌دهد، رابطه‌ای بین نسبت آب به سیمان و نفوذ سریع یون کلراید وجود دارد. چون نمونه‌ها دارای یک نوع طرح اختلاط که فقط در نسبت آب به سیمان (w/c) با هم متفاوت هستند، به همین دلیل پراکندگی نتایج کم است. پس رابطه بدست آمده دقیق تر است. همچنین با کاهش نسبت آب به سیمان (w/c)، از ۰/۴۶ تا ۰/۳ نفوذ سریع یون کلراید از نمونه حدود ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که آب اضافی یا حفره‌ای کمتر می‌شود، که هر چه نسبت آب به سیمان (w/c) افزایش یابد، نفوذپذیری بتن نیز افزایش می‌یابد و مجموع جریان رد شده برحسب کولمب بالا می‌رود.

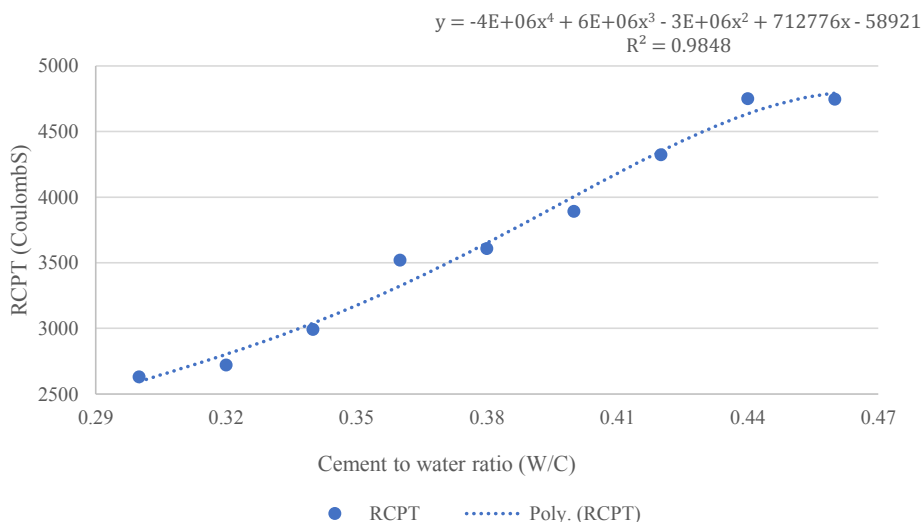
هم‌چنین براساس نتایج به دست آمده از شکل ۳، می‌توان گفت

انتهای، جریان ثابتی با اعمال ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل از نمونه‌ها عبور داده شد و بعد از ۶ ساعت، میزان کل بار الکتریکی عبوری از نمونه‌ها بدست آمد. دستگاه نفوذ سریع یون کلراید در شکل ۱ نشان داده شده است.

تخلخل‌سنجی به روش جیوه (MIP): آزمایش تعیین تخلخل بتن در سن ۹۱ روز انجام گرفت. این آزمون‌ها بعد از متراکم کردن با میز ویبره و قالب‌گیری، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در شرایط استاندارد نگهداری شدند. پس از قالب برداری، تا زمان آزمایش آزمون‌ها در حوضچه آب با دمای $20 \pm 2^\circ C$ قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از عمل‌آوری توسط دستگاه برش از مرکز نمونه‌ها به اندازه $25 \times 9 \times 9$ میلی‌متر برش داده شد. سپس برای خشک کردن کامل نمونه‌ها از روش خشک کردن با حلال استفاده شد [۳۶]. همچنین در این پژوهش جهت انجام این آزمایش روی نمونه‌ها از دستگاه‌های *Porosimeter PASCAL 140 and 440 ©Thermo Finnigan Italia* استفاده شده است. دستگاه تخلخل‌سنج به روش جیوه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۲ نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

دوام بتن در شرایط طبیعی، محیطی و داخلی عامل مهمی برای حفظ الزامات کارایی بتن می‌باشد. که یکی از عوامل اصلی دوام بتن، نفوذپذیری آن است. درحالت کلی میزان نفوذپذیری بتن تابع دو

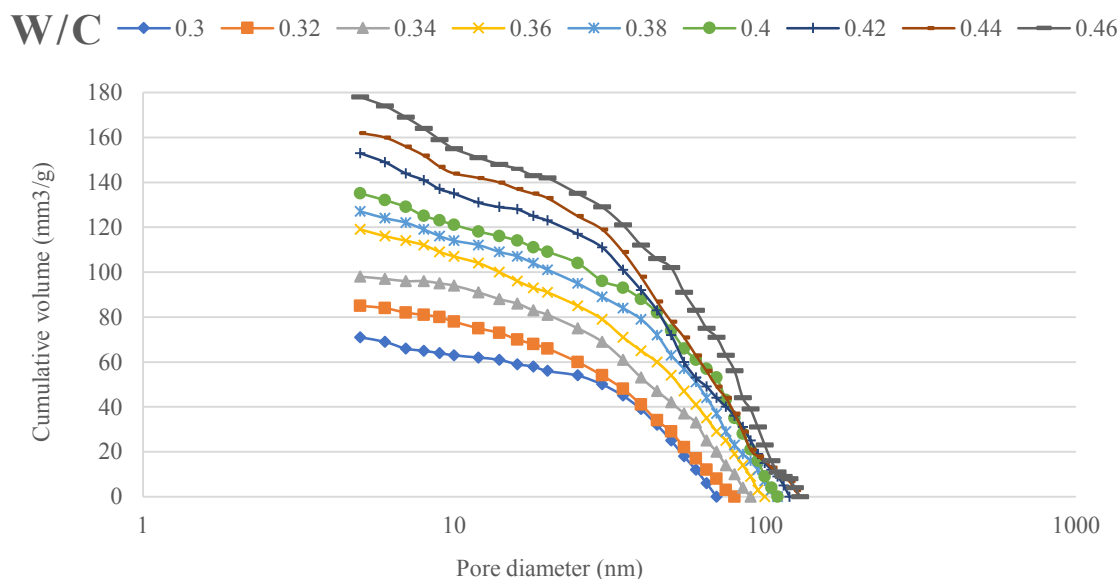


شکل ۳. تأثیر نسبت آب به سیمان روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید

Fig. 3. Effect of water to cement ratio on concrete strength against chloride ion penetration

در این تحقیق آزمایش تخلخل‌سنجی جیوه (MIP) که یکی از معمول‌ترین آزمایش‌ها برای اندازه‌گیری تخلخل در خمیر و ملات و بتن می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۴ نتایج آزمایش نشان می‌دهد، با کاهش نسبت آب به سیمان (W/C)، از ۰/۴۶ تا ۰/۳ تخلخل بتن کاهش می‌یابد (قطر منافذ و حجم نفوذ کاهش می‌یابد، لازم به ذکر است در قطر منافذ

میزان نفوذ یون کلراید در نمونه‌ها جدول طرح اختلاط ۴، بر اساس استاندارد AASHTO T277 / ASTM C1202 بین متوسط تا زیاد می‌باشد. به عبارت بهتر افزایش نسبت آب به سیمان (W/C)، سبب افزایش نفوذ سریع یون کلراید می‌گردد. یکی از عوامل اصلی دوام بتن، نفوذپذیری آن است. که بطور تنگاتنگ در ارتباط با ساختار منافذ و تخلخل داخل جسم می‌باشد.



شکل ۴. تأثیر نسبت آب به سیمان روی تخلخل بتن

Fig. 4. Effect of water to cement ratio on concrete porosity

می‌گردد و افزایش نفوذپذیری باعث کاهش دوام بتن می‌شود. باید توجه داشت که که طرح بهینه انتخابی در نمونه‌های بدون خاکستر بادی طرح با نسبت آب به سیمان (W/C)، ۰/۴ (P۴۰) می‌باشد.

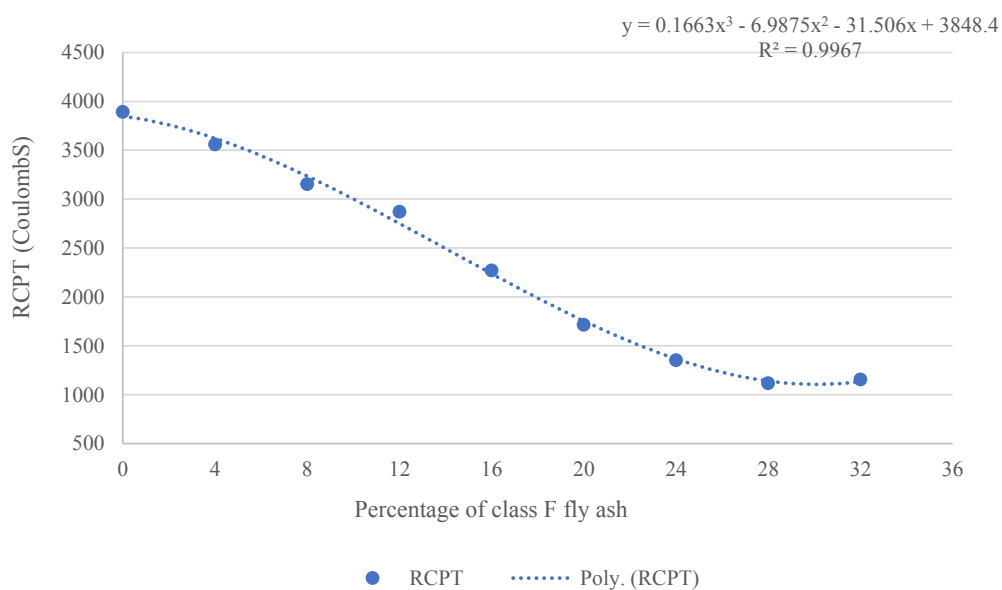
۲-۲- تأثیر خاکستر بادی روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید و تخلخل آن

با توجه به این که حضور مواد مکمل معدنی و سیمانی در بتن موجب بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی بتن می‌گردد؛ به همین دلیل در این مقاله از سه نوع خاکستر بادی کلاس C_F و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، استفاده شد؛ که براساس جدول شماره ۵، از هر کدام برای هر آزمایش ۳ نمونه ساخته شد.

مطابق شکل شماره ۵ نتایج آزمایش نشان می‌دهد، رابطه ای بین نفوذ سریع یون کلراید و درصد خاکستر بادی وجود دارد. چون نمونه ها از یک نوع ماده ساخته شده اند؛ به همین دلیل پراکندگی نتایج کم است. به همین خاطر رابطه بدست آمده دقیق تر است.

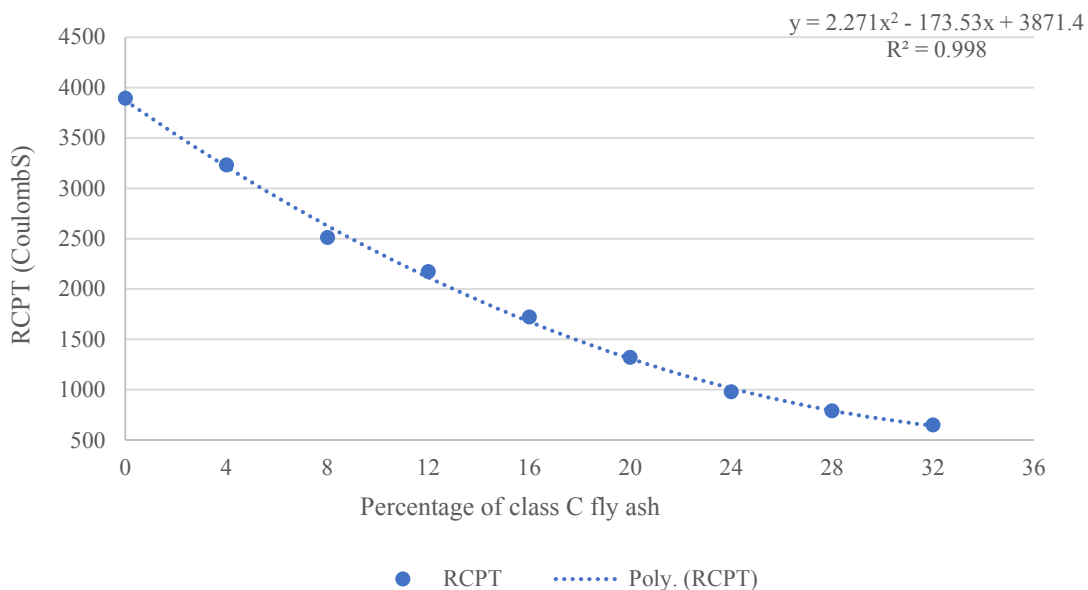
با افزایش درصد هر سه کلاس خاکستر بادی نفوذپذیری کاهش یافته و در نتیجه مجموع جریان رد شده برحسب کولمب کاهش می‌یابد، علت این کاهش، کاهش یافتن غلظت یون های هیدروکسید

۵ نانومتر حجم نفوذ حدود ۶۰ درصد کاهش می‌یابد). علت این امر آن است که تخلخل ها با ابعاد بزرگ تر هستند که یا پر شده اند و یا فقط توسط تخلخل های ژل C-S-H به هم متصل شده اند. با توجه به این که برای جبران کاهش آب که منجر به کاهش روانی در بتن می‌گردد، می‌توان از روان‌کننده‌ها استفاده نمود، هر چند با کاهش آب و استفاده از روان‌کننده‌ها در بتن باعث کاهش منافذ مویینه، تخلخل‌ها و سوراخ‌ها در بتن می‌شوند، اما کماکان به طور کامل از بین نمی‌روند و باقی می‌مانند و راه ورود مواد شیمیایی خورنده بتن را باز می‌گذارند و راه ورود آب، املاح و مواد شیمیایی خورنده به بتن بدلیل مسدود نشدن منافذ هم چنان وجود دارد؛ پس استفاده از مواد روان‌کننده به تنهایی به هیچ وجه بتن را آب بند نخواهد کرد. وجود این منافذ در بتن مسلح منجر به خوردگی فولاد مدفون داخل آن می‌شوند که جزء مهم در بتن های مسلح است. فولاد داخل بتن به منظور مقابله با تنش های کششی ناشی از بارهای اعمال شده به سازه در مقاطع بتنی استفاده می‌شوند. سازه های مسلح سازه های هستند که مقاومت فشاری بالای بتن در تکامل با مقاومت کششی خوب فولاد قرار گرفته و امکان افزایش ظرفیت باربری سازه را به وجود می‌آورد. با توجه به موارد بیان شده، این نتیجه حاصل می‌شود که وجود منافذ باعث تخریب بتن مسلح و به خطر افتادن کمال و یکپارچگی سازه

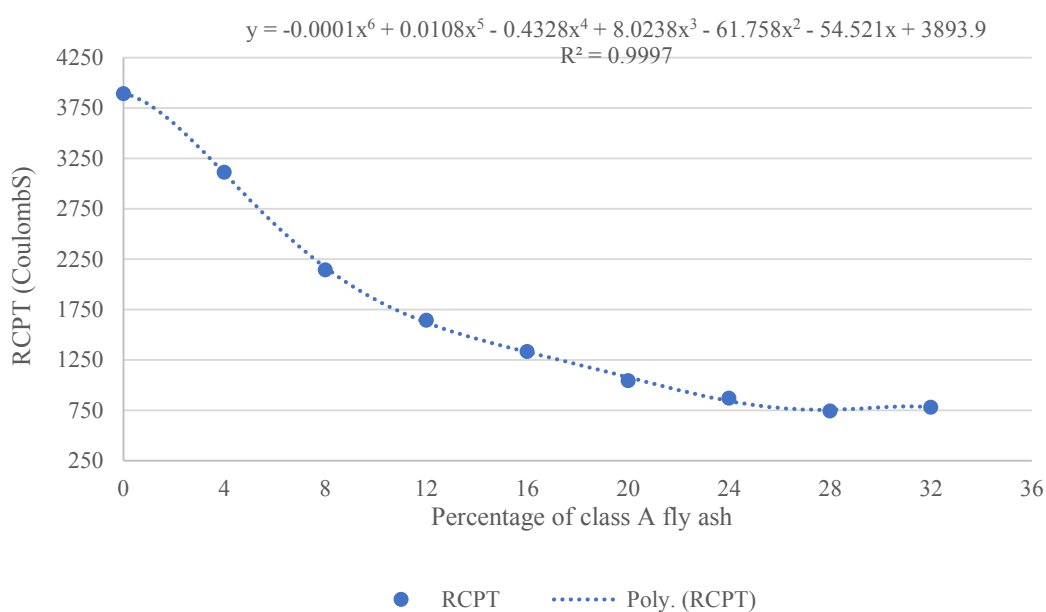


شکل ۵. الف- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس F روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید

Fig. 5a. Class F fly ash quantity effect on concrete strength against chloride ion penetration



شکل ۵. ب- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس C روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید
Fig. 5b. Class C fly ash quantity effect on concrete strength against chloride ion penetration

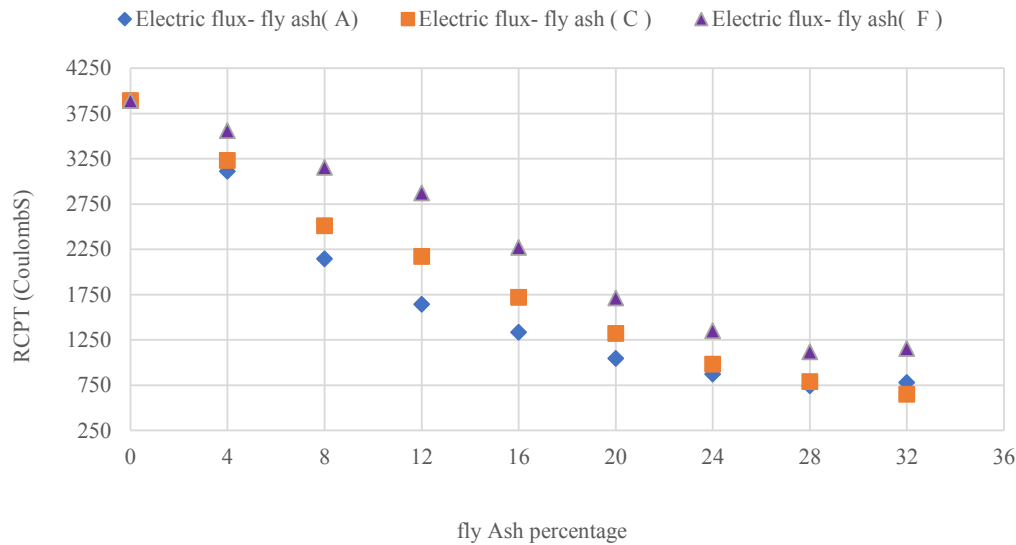


شکل ۵. ج- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس A روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید
Fig. 5c. Class A fly ash quantity effect on concrete strength against chloride ion penetration

شده برحسب کولمب کاهش می یابد، ولی این میزان کاهش با کاربرد خاکستر بادی کلاس های A, C به ویژه خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، تشدید یافته و ضرورت توجه به استفاده از کلاس های بالاتر خاکستر بادی به ویژه خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A را مورد توجه جدی قرار می دهد. علت این تأثیر زیاد کلاس های نوع A, C به ویژه خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A بالا بودن میزان

است و همچنین توزیع حفرات نسبت به بتن معمولی، ظریف تر و کوچک تر است. همچنین با افزایش درصد هر سه کلاس خاکستر بادی، شیب نزولی نمودار ها، سیر کاهش می یابد. علت این کاهش جزئی به دلیل کاهش ماده چسباننده در نمونه ها است.

با توجه به شکل ۶ می توان دریافت با افزایش درصد هر سه کلاس خاکستر بادی نفوذپذیری کاهش یافته و در نتیجه مجموع جریان رد



شکل ۶. تأثیر مقایسه‌ای میزان خاکستر بادی کلاس F با A, C روی مقاومت بتن در برابر نفوذ یون کلراید

Fig. 6. Comparative Effect of Class F fly ash with A, C on Concrete Strength against chloride ion penetration

درصد هر سه کلاس خاکستر بادی، قطر تخلخل و حجم نفوذ کاهش می‌یابد. علت این کاهش به خاطر ریز بودن و سطح ویژه کم خاکستر بادی نسبت به سیمان است که باعث پر شدن منافذ می‌گردد. انجام واکنش آب‌پوشی (هیدراتاسیون) در طول عمر بتن، منجر به کاهش سریع توسعه منافذ ریز و افزایش منافذ ژل در بتن می‌گردد و این امر باعث کاهش تدریجی حجم و ساختار منافذ می‌شود، همچنین باعث می‌شود که نفوذناپذیری بتن ارتقا یابد.

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در صورت استفاده از خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، چندان کاهشی در قطر تخلخل و حجم نفوذ دیده نمی‌شود، علت این امر به خاطر این است که سطح ویژه و ریزی خاکستر بادی A در مقایسه با سیمان تفاوت چندانی ندارد. اما با کاربرد خاکستر بادی کلاس های F, C، قطر تخلخل و حجم نفوذ کاهش زیادی می‌یابند، که بویژه در خاکستر بادی کلاس C این امر تشدید می‌یابد؛ چون خاکستر بادی کلاس F, C، ریزتر و سطح ویژه کمتری نسبت به سیمان و خاکستر صنعتی با نام تجاری A دارد، که باعث پر شدن منافذ بیشتری در بتن می‌گردد و نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد.

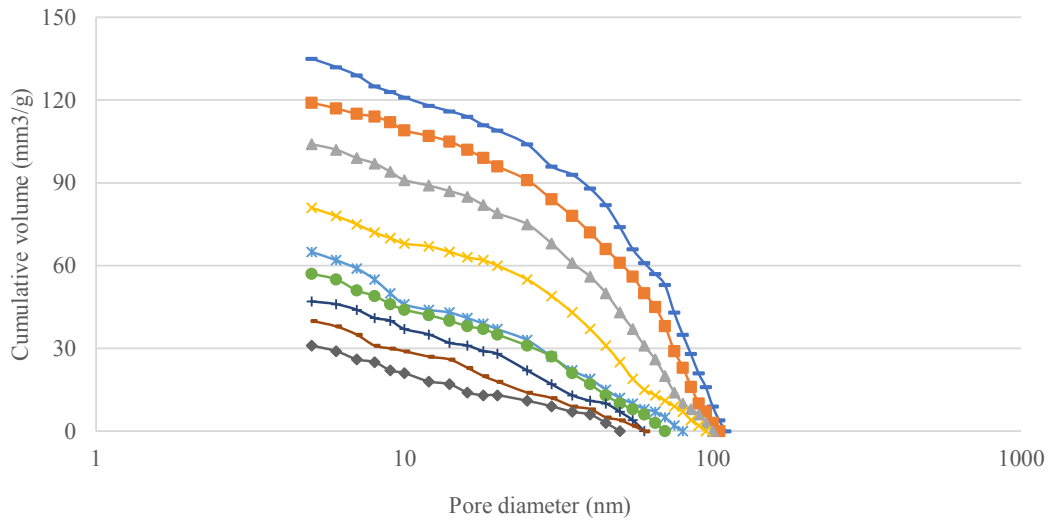
لازم به ذکر است با توجه به شکل ۳ و ۵ اگر تأثیر مقایسه‌ای بین نسبت آب به سیمان (w/c)، نوع و درصد خاکستر بادی انجام گیرد، مشاهده می‌گردد در آزمون‌های دارای نسبت آب به سیمان (w/c) ۰/۴، اگر از ۲۸ درصد خاکستر بادی به جای سیمان استفاده شود، در

سیلیس فعال (SiO_2) آن نسبت به کلاس F می‌باشد. همچنین با افزایش درصد خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، روند نزولی نمودار کاهش می‌یابد و در درصد بالای ۲۰ (P40-20) مجموع جریان گذرنده از نمونه با نمونه‌های دارای خاکستر بادی کلاس C برابری می‌کند و حتی در ۳۲ درصد (P40-32) از نمونه‌های دارای خاکستر بادی C بیشتر است. دلیل این امر به خاطر درشت تر بودن و سطح ویژه زیاد خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A نسبت به خاکستر بادی کلاس C, F است. لازم به توضیح است که با توجه به پراکندگی داده‌ها در شکل ۶، نمی‌توان رابطه معنی‌دار بین داده‌ها ایجاد کرد. علت این پراکندگی به خاطر استفاده از خاکستر بادی کلاس‌های مختلف است.

براساس نتایج به دست آمده از شکل ۵ و ۶، می‌توان گفت میزان نفوذ یون کلراید در آزمون‌ها جدول طرح اختلاط ۵، بر اساس استاندارد بین‌المللی کم تا متوسط می‌باشد. به عبارت بهتر افزایش درصد خاکستر بادی، سبب افزایش نفوذ سریع یون کلراید می‌گردد. همچنین افزایش درصد خاکستر بادی از ۰ تا ۳۲ درصد در نمونه‌های دارای خاکستر بادی کلاس F در بهترین حالت ممکن باعث می‌شود که مجموع جریان رد شده بر حسب کولمب ۷۱ درصد و در نمونه‌های دارای خاکستر بادی کلاس C، ۸۳ درصد و نیز در نمونه‌های دارای خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، ۸۰ درصد کاهش یابد.

مطابق شکل شماره ۷ نتایج آزمایش نشان می‌دهد، که با افزایش

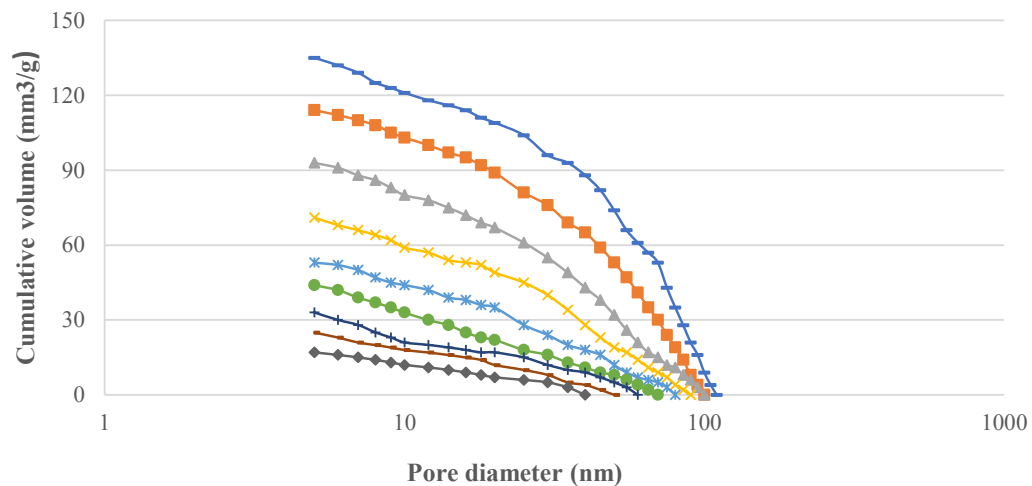
Percent fly ash(F): — 4 — 8 — 12 — 16 — 20 — 24 — 28 — 32



شکل ۷. الف- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس F روی تخلخل بتن

Fig. 7a. Effect of class F fly ash quantity on concrete porosity

Percent fly ash(C): — 0 — 4 — 8 — 12 — 16 — 20 — 24 — 28 — 32



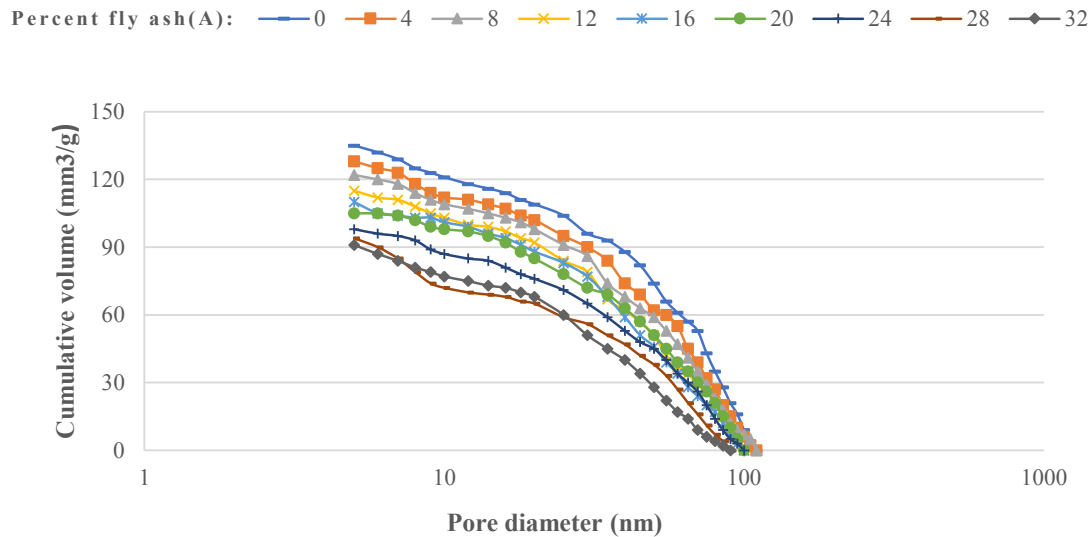
شکل ۷. ب- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس C روی تخلخل بتن

Fig. 7b. Effect of class C fly ash quantity on concrete porosity

سریع کارایی بتن می گردد.

با توجه به شکل های ۵ تا ۷ می توان دریافت که با افزایش خاکستر بادی، خاکستر تولید شده به وسیله واکنش آب پوشی باعث پر شدن حفره ها می شود و واکنش های ثانویه ایجاد شده منجر به واکنش آب پوشی آرام گردیده است. همچنین انتشار یون کلراید را کم کرده و نفوذناپذیری بتن را بهبود می بخشد. افزودن خاکستر بادی به عنوان ماده اضافی به بتن می تواند جذب یون کلراید را بالا برده

خاکستر بادی کلاس F, C و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A به ترتیب حدود ۸۰، ۷۱ و ۸۱ درصد باعث کاهش مجموع جریان رد شده از نمونه ها می شود؛ ولی اگر به جای استفاده از خاکستر بادی، نسبت آب به سیمان (W/C) را کاهش دهیم و از نسبت آب به سیمان (W/C) ۰/۳ استفاده شود، حدود ۳۲٪ مجموع جریان رد شده از نمونه کاهش می یابد که در مقایسه با خاکستر بادی کاهش خیلی کمی داشته و همچنین کاهش نسبت آب به سیمان (W/C) باعث کاهش



شکل ۷. ج- تأثیر میزان خاکستر بادی کلاس A روی تخلخل بتن
Fig.7c. Effect of class A fly ash quantity on concrete porosity

* با توجه به پراکندگی نتایج آزمایش نفوذ سریع یون کلراید برای کل آزمون‌های دارای خاکستر بادی کلاس C, F و خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، نمی‌توان رابطه معنی‌دار بین داده‌ها ایجاد کرد.

* با افزایش درصد هر سه کلاس خاکستر بادی نفوذ یون کلراید کاهش یافته و در نتیجه مجموع جریان گذرنده کاهش می‌یابد. این میزان کاهش با کاربرد کلاس‌های A, C به ویژه خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، تشدید می‌یابد و بهتر است از کلاس‌های بالاتر خاکستر بادی به ویژه کلاس A بیشتر استفاده گردد.

* با افزایش درصد خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، روند نزولی نمودار کاهش می‌یابد و در درصد بالای ۲۰ مجموع جریان گذرنده از نمونه با نمونه‌های دارای خاکستر بادی کلاس C برابری می‌کند و حتی در ۳۲ درصد از نمونه‌های دارای خاکستر بادی C بیشتر است.

* افزودن خاکستر بادی به عنوان ماده اضافی به بتن می‌تواند جذب یون کلراید را بالا برده و تقویت کند.

* میزان نفوذ یون کلراید در آزمون‌ها جدول طرح اختلاط ۵، بین کم تا متوسط است.

* با افزایش درصد هر سه کلاس خاکستر بادی قطر تخلخل و حجم نفوذ کاهش می‌یابد.

* در صورت استفاده از خاکستر بادی صنعتی با نام تجاری A، چندان کاهشی در قطر تخلخل و حجم نفوذ دیده نمی‌شود. اما با

و تقویت کند. نفوذ یون کلراید یک عامل مهم خوردگی فولادهای مدفون در بتن است. که مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید تأثیر زیادی روی عمر بتن دارد.

نتایج نمونه‌های ساخته شده با خاکستر بادی نشان می‌دهد که بهترین و بهینه‌ترین طرح مربوط به طرح اختلاط P40-20-C می‌باشد که از ۲۰ درصد خاکستر بادی کلاس C و نسبت آب به سیمان (W/C)، ۰/۴ ساخته شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله کارایی مقاومت بتن در مقابل یون کلراید و تخلخل بتن با فاکتورهای مؤثری شامل تأثیر نسبت آب به سیمان، استفاده از سه نوع خاکستر بادی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تأثیر این دو پارامتر روی نفوذ بتن از طریق داده‌های آزمایشی، نتایج زیر بدست آمدند:

* رابطه بین نسبت آب به سیمان و مجموع جریان رد شده در آزمون‌های بدون خاکستر بادی، با دقت خوبی $R^2=0/98$ بدست آمده است. همچنین با کاهش نسبت آب به سیمان، نفوذ سریع یون کلراید و قطر تخلخل و حجم منافذ کاهش می‌یابد.

* میزان نفوذ یون کلراید در آزمون‌ها جدول طرح اختلاط ۴، بین متوسط تا زیاد است.

* رابطه‌ای بین مجموع جریان رد شده و درصد خاکستر بادی، با دقت خوبی وجود دارد.

- Tabriz: Forouzou Publication, first Edition, 2007 (in Persian)
- [6] Zandi, Y., Advanced concrete technology, Tabriz: Forouzou Publication, Second Edition, 2009 (in Persian)
- [7] Ha-Won Song, Seung-Woo Pack, Sang-Hyeok Nam, Jong-Chul Jang and Velu Saraswathy, "Estimation of the permeability of silica fume cement concrete", Construction and building material, 2010.
- [8] Guneyisi, E., Gesoslu, M., 2012, Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes, Construction and Building Materials. Volume 34, September 2012.
- [9] Vahidi, A., MirAhmadi, M., Hassanzadeh, M., Zabetiyan, F., Investigation of Effective Factors on Concrete impermeability Studies, Case Study of the First Iranian Concrete boat, International Conference on Impermeability Concrete of Drinking Water Tanks, 2011 (in Persian)
- [10] Powers, T.C., 1958, Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, Ceramic Soc., Volume 41, Jan. 1958 (RCPT).
- [11] Tadvin, M., Maleki, M.S., Zehni, S., Maleki, M.J., Evaluation of the effect of fly ash on electrical conductivity, electrical resistance and chloride ion penetration index of concrete (RCPT), Road, Housing and Housing Research Center, Ninth National Concrete Conference of Iran, 2013. (In Persian)
- [12] Brito, J., Saikia, N., 2013, Recycle aggregate in concrete, Springer London, 2013.
- [13] Ahmad, S., 2003, Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction a review, Cement & Concrete Composites, No. 25, pp. 459-471.
- [14] Koliass, S., Georgiou, C., 2005, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, Cement &

کاربرد خاکستر بادی کلاس های F₃C، قطر تخلخل و حجم نفوذ کاهش زیادی می یابند، که به ویژه در خاکستر بادی کلاس C این امر تشدید می یابد.

* افزایش خاکستر بادی در مقایسه با کاهش نسبت آب به سیمان (W/C) تأثیر بیشتری بر مقاومت بتن در مقابل یون کلراید داشته و کاهش نسبت آب به سیمان (W/C) باعث کاهش کارایی بتن می گردد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله لازم می دانند از مساعدت و همکاری صمیمانه و ارزشمند معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد واحد تبریز و شرکت شهرک بتن اصفهان در حمایت مالی طرح پژوهشی دستیابی به فناوری بررسی تأثیر مقایسه‌ای خاکستر بادی (Fly ash) سنتز شده از ضایعات پتروشیمی و پالایشگاه و میکروسلیس بر روند رشد مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و بتن‌های سبک سازه‌ای کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Bertolini L, Elsener B, Pedferri P, Polder R (2004). " Corrosion of steel in concrete". Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- [2] Ramezani-pour, A.A., Pilvar, A.R., Mahdikhani, M., Moodi, F., 2011, Practical Evaluation of Relationship between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration and Compressive Strength, Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 2472-2479, (2011).
- [3] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2008, Concrete: microestrutura, propriedades e materiais. 3rd ed. São Paulo: IBRACON; 2008. 674p.
- [4] Yoon-Seok, Ch., Jung Gu, k., Kwang-Myon., L., 2006, Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete, Corrosion Science, No. 48, pp. , (2006) 1733-1745.
- [5] Zandi, Y., Concrete tests and interpretation of laboratory result concrete mixing design,

- experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete, *Cement and Concrete Research* Volume 30, Issue 6, June 2000, Pages 989-992.
- [24] Research on the capability of permeability and frost-resistant of concrete in NaCl solution. *Concrete*, 200: 15-17.
- [25] Cur Report, 1991, Fly Ash as Addition to Concrete, Centre for Civil Engineering Research and Codes, Report 144, 1991.
- [26] Roy, D.M., 1987, Hydration of Blended Cements Containing Slag, Fly Ash, or Silica Fume, Proc. of Meeting Institute of Concrete Technology, Coventry, UK, May 1987.
- [27] Moffatt, E.G., Thomas, M.D.A., Fahim, A., 2017, Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment, *Cement and Concrete Research* 102 (2017) 127–135.
- [28] Zafar, I., Sugiyama, T., 2018, The influence of bending crack on rebar corrosion in fly ash concrete subjected to different exposure conditions under static loading, *Construction and Building Materials* 160 (2018) 293–307.
- [29] Quanbing, Y., Peirong, Z., 2004. Effect of steel fiber on the deicer-scaling resistance of concrete. *J. Build. Mater.* 7(4): 376-378.
- [30] Power, T.C., 1954. Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete. *ACI J. Proc.*, 50(9): 741-760.
- [31] Zhang, M., 2007. Permeability of high performance concrete pavement resistance to chloride ion. *Low Temp. Archit. Technol.*, 1: 14-16.
- [32] Zhang, Y., Hongfa, Y., Jiachun, W., 2009. Injury law a concrete structure of the surface salt freezing conditions. *Chinese J. Highway*, 22(4).
- [33] Ma, H., Mercury intrusion porosimetry in concrete technology: tips in measurement, pore structure parameter acquisition and application. *Concrete Composites*, No. 27, PP. 211-216.
- [15] Zandi, Y., 2006, Effect of Mixture Composition on Washout Resistance of Highly Flow able Underwater Concrete, 2nd International FIB Congress- Naples- Italia 5-8 June 2006.
- [16] Ericikdi, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H., Alp, I., 2009, Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings, *J. Hazard. Mater.* 168 (2009) 848–856.
- [17] Fais, B., Sabio, N., Strachan, N., 2016, The critical role of the industrial sector in reaching long-term emission reduction, energy efficiency and renewable targets, *Appl. Energy* 162 (2016) 699–712.
- [18] Rajamma, R., Ball, R.J., Tarelho, L.A.C., Allen, G.C., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., 2009, Characterization and use of biomass fly ash in cement-based materials, *J. Hazard. Mater.* 172 (2009) 1049–1060
- [19] Embong, R., Kusbiantoro, A., Shafiq, N., Nuruddin, M.F., 2016, Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water absorptive aggregate, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 816–822.
- [20] Siddique, R., Jameel, A., Singh, M., Barnat-Hunek Kunal, D., Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R., Rajor, A., 2017, Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete, *Constr. Build. Mater.* 142 (2017) 92–100.
- [21] Khan, M.I., Siddique, R., 2011, Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- [22] De Sensale, G.R., 2006, Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and concrete composites*, 28(2), 158-160.
- [23] Leng, F., N. Feng and X. Lu, 2000. An

- for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org
- [36] Aligizaki, K.K., 2005, Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements. 2005: CRC Press.
- Journal of porous materials, 2014. 21(2): p. 207-215.
- [34] AASHTO T277-15, 2015, Standard Method of Test for Rapid Determination of the Chloride Permeability of Concrete”, www.transportation.org
- [35] ASTM C1202-17a, 2017, Standard Test Method

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Y., Zandi, M., Abedi, Comparative Evaluation of the Effect of Water/Cement Ratio (w/c), Type and Percentage of Fly Ash on Concrete Strength against Chloride Ion Penetration and Its Porosity. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 1067-1082.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16760.6336](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16760.6336)



