

ارزیابی میزان نفوذ یون‌های کلرایدی در ملات‌های بتنی در محیط ترکیبی سولفاتی-کلرایدی به سه روش چشمی، پروفیل نفوذ و مهاجرت تسریع یافته

علی اکبر رمضانپور

رئیس مرکز تحقیقات و تکنولوژی دوام بتن و عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

عرفان ریاحی دهکردی*

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

آب‌های زیرزمینی و آب دریا، معمولاً حاوی نمک کلرایدی و سولفاتی به صورت توامان می‌باشند که به ترتیب با ایجاد خوردگی آرماتور و انبساط، موجب ترک خوردگی بتن مسلح می‌گردند. به جهت بررسی اثر یون‌های سولفاتی بر نفوذ یون‌های کلرایدی در ملات، تعیین عمق نفوذ به روش چشمی، پروفیل نفوذ و مهاجرت تسریع یافته، از آزمایشات به کار رفته می‌باشند. طبق نتایج تا سن ۲۰۸ روزه، نفوذ یون‌های کلرایدی در نمونه‌های شاهد و دوده‌سیلیسی، با افزایش میزان سولفات، به ترتیب کاهش و مختصری افزایش می‌یابد. در نمونه‌های حاوی تراس، غلظت کمتر نمک سولفاتی، این نفوذ را کاهش و غلظت بیشتر آن، منجر به افزایش آن می‌شود. با توجه به نتایج متفاوت مهاجرت تسریع یافته در محلول ترکیبی، با این آزمایش نمی‌توان رفتار نمونه‌ها را در محلول مذکور پیش‌بینی نمود. آزمایشات چشمی و پروفیل نفوذ، روند مشابهی از تغییرات را در باب مقایسه ارائه می‌دهند. اما استناد به نتایج مطلق عمق نفوذ در روش چشمی با خطا همراه است.

واژه‌های کلیدی: سولفات، نفوذ کلراید، بررسی چشمی، مهاجرت تسریع یافته، پوزولان.

* نویسنده مسئول: erfan.riahi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

مقاومت کمتر و نیز انبساط کمتر نمونه‌های ملاتی را گزارش کرده است [۵]. لی و پارک [۶] نیز معتقدند که سرعت بالاتر یون‌های کلرایدی نسبت به یون‌های سولفاتی، کاهش محصولات سولفاتی را در محیط ترکیبی سولفاتی- کلرایدی، نسبت به محیط صرفاً سولفاتی به دنبال دارد. اما در باب تأثیر یون‌های سولفاتی بر خرابی کلرایدی، دهوا [۷] معتقد است که یون‌های سولفاتی اگرچه بر زمان آغاز خوردگی چندان اثرگذار نمی‌باشند، اما با افزایش غلظت این یون‌ها، نرخ خوردگی آرماتور در بتن مسلح افزایش می‌یابد. سو [۸] و جنگ [۹] نیز در تحقیقاتی جداگانه، به مطالعه‌ی پیوند کلرایدی در نمونه‌های بتنی ساخته شده با آب اختلاط کلرایدی پرداختند. سو، معتقد است که پیوند کلرایدی تا میزانی معین، با حمله‌ی سولفاتی آزاد می‌گردد. جنگ نیز به طور مشابه، شاهد آزادسازی اکثر پیوندهای کلرایدی تا ۲۸ روز قرارگیری در محلول سولفاتی بود.

رمضانپور و همکاران [۱] با جمع‌بندی تحقیقات انجام شده در محیط ترکیبی کلرایدی- سولفاتی، به اثر مثبت یون‌های کلرایدی در تعدیل خرابی سولفاتی و به طور کلی، اثر مخرب یون‌های سولفاتی بر حمله‌ی کلرایدی اشاره کرده‌اند. البته آنان به نتایج متناقض در موضوع اثر یون‌های سولفاتی بر حمله‌ی کلرایدی در کار برخی از محققان نیز اشاره کرده‌اند. تأثیر پوزولان‌ها در این محیط ترکیبی نیز از سایر موضوعات بررسی شده است. جمع‌بندی نتایج انجام شده حاکی از وجود نتایج بعضاً متفاوت در مورد پوزولان‌ها هم‌چون سرباره در محیط ترکیبی می‌باشد. این موضوع کمابیش برای پوزولان دوده‌سیلیس هم مطرح می‌باشد [۱].

۳- مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق، ملات استاندارد با استفاده از سیمان نوع یک و مواد جای‌گزین سیمان شامل: دوده‌سیلیس و تراس جاجرود به ترتیب با ۷.۵ و ۱۷.۵ درصد جای‌گزینی، ساخته شد. میزان اکسیدها، دانسیته و نرمی مصالح در جدول ۱ قابل مشاهده است.

۴- برنامه‌ی آزمایشات و آماده‌سازی نمونه‌ها

۴-۱- برنامه‌ی آزمایشات

۴-۱-۱- آزمایشات عمومی

به منظور کنترل قابلیت نفوذپذیری یون‌های کلرایدی، آزمایش

نداشتن زمان کافی در پیش‌بینی عملکرد درازمدت بتن و نیز دشواری انجام برخی از آزمایش‌ها، محققان را بر این داشته تا با وضع آزمایش‌ها ابداعی، در زمان کوتاهی به شمایی از عملکرد بتن در درازمدت دست یابند. مصداق بارز این موضوع، آزمایشات نفوذ و مهاجرت تسریع‌یافته‌ی یون‌های کلرایدی می‌باشد. این آزمایشات، با تغییر در مکانیسم نفوذ یون‌های کلراید به درون بتن، در زمانی کوتاه‌تر، میزان این نفوذ را تخمین می‌زنند. در ادامه، در سیر پیشرفت آزمایشات، آزمایشات دیگری نیز ابداع شدند که اظهار نظر در مورد عملکرد بتن توسط آن‌ها، بادقت بیشتری انجام می‌گرفت. با وجود دقت بالا، پیچیدگی و سختی کار از مشکلات به‌کارگیری این آزمایشات می‌باشد. تعیین پروفیل نفوذ را می‌توان مصداقی از این مورد دانست. با این تفاسیر باید به این موضوع اشاره نمود که انتخاب روش مناسب ارزیابی در تعیین عملکرد بتن، نکته‌ی حائز اهمیت می‌باشد که در صورت انتخاب نادرست، علاوه بر هدررفت زمان و هزینه، خطا در نتیجه‌گیری را نیز به دنبال خواهد داشت. در ادامه پس از مرور مختصری از تاریخچه‌ی تحقیق به سه مورد از روش‌های ارزیابی نفوذ یون‌های کلرایدی در محیط ترکیبی کلرایدی- سولفاتی پرداخته می‌شود.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

تعیین مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلراید و سولفات، از جمله موضوعات مهم در ارزیابی دوام بتن می‌باشد. سازه‌های زیادی در منطقه‌ی خلیج فارس و دریای عمان، دچار خرابی‌های گسترده در اثر حمله‌ی این یون‌های مهاجم شده‌اند [۱]. اگرچه محققان متعددی، به تحقیق بر روی خوردگی آرماتور در اثر نفوذ یون‌های کلراید و نیز خرابی ناشی از یون‌های سولفات در بتن پرداخته‌اند، منتها به اثر توأم این خرابی‌ها در محیط ترکیبی سولفاتی- کلرایدی، کمتر پرداخته شده است [۲]. هریسون [۳] در سال ۱۹۹۰ میلادی، در باب تأثیر یون‌های کلرایدی بر خرابی سولفاتی، بیان کرده است که این یون‌ها با جای‌گزینی با یون‌های سولفات در ساختار مونوسولفات، مورفولوژی اترینگایت را اصلاح می‌نمایند. ال‌عمودی [۴] نیز معتقد است که انتقال فاز آلومینات هیدراته به کلسیم کلروآلومینات هم‌چون نمک فریدل، میزان اترینگایت را کاهش می‌دهد. وی در محیط ترکیبی کلرایدی- سولفاتی، کاهش

جدول ۱- مشخصات مواد مصرفی

دوده سیلیس	تراس جاجرود	سیمان		
۹۳.۲	۷۱.۷	۲۲.۲۸	SiO ₂	اکسیدها (درصد)
۰.۳۹	۸.۶	۴.۷۲	Al ₂ O ₃	
۰.۲۴	۲.۰۴	۲.۷۵	Fe ₂ O ₃	
۰.۶۳	۲.۱۹	۶۴.۱۲	CaO	
-	۱.۵	۰.۲۸	Na ₂ O	
۰.۲۱	۲.۲۶	۰.۷۶	K ₂ O	
۰.۷۵	۱.۲۵	۱.۲۳	MgO	
-	-	۰.۱۵۶	TiO ₂	
-	-	۰.۱۱۲	MnO	
-	-	۰.۲۶۳	P ₂ O ₅	
۰.۲۳	۰.۰۵	۱.۹۷۳	SO ₃	
۲.۲	۲.۳۵	۳.۰۲	دانسیته (g/cm ³)	
۲۶۰۰۰۰ ^۰	۶۲۰۰	۳۰۳۵	نرمی (cm ² /g)	

* میزان نرمی دوده سیلیس با استفاده از آزمایش جذب نیتروژن تعیین می شود.

مختلف تعیین عمق نفوذ یون های کلرایدی در محیط ترکیبی سولفاتی- کلرایدی مد نظر است، از پرداختن به پروفیل کامل نفوذ بدست آمده پرهیز شده و صرفا به بیشترین عمق نفوذ ثبت شده توجه می گردد. برای اطلاعات بیشتر می توان به سایر تحقیقات انجام شده توسط رضانیانپور و همکاران [۱۰]، مراجعه نمود.

۲-۴- آماده سازی نمونه ها

نمونه های استوانه ای ۱۰×۲۰ سانتی متر برای آزمایشات تعیین مقاومت الکتریکی سطحی (از هر طرح سه نمونه)، عمق نفوذ یون های کلرایدی (از هر طرح، در هر محلول و در هر سن یک نمونه) و مهاجرت تسریع یافته (از طرح شاهد در هر سن ۳ نمونه) و نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتی متر (از هر طرح در هر محلول و در هر سن، یک نمونه)، برای آزمایش پروفیل نفوذ یون های کلرایدی تهیه شدند. پس از ۲۸ روز عمل آوری مرطوب، نمونه های آزمایش عمق نفوذ، به دیسک هایی به ارتفاع ۵ سانتی متر برش خوردند. سطوح جانبی دیسک های این آزمایش و نمونه های آزمایش پروفیل نفوذ (به غیر از سطح در معرض نفوذ)، با چسب اپوکسی، روکش دار شدند (شکل ۱) و در محلول های ۳ گانه مطابق جدول ۲، قرار گرفتند.

مقاومت الکتریکی سطحی بر روی نمونه ها انجام شد. لازم به ذکر است که در این تحقیقات، آزمایشات دیگری هم چون: مقاومت فشاری و جذب آب موینه نیز مبنای کنترل مشخصات ذاتی نمونه های ملاتی قرار گرفتند [۱۰]. از نتایج آن ها در این بررسی استفاده می شود.



شکل ۱- نمونه های مکعبی و استوانه ای روکش شده

جدول ۲- محلول های ۳ گانه ی تهیه شده به عنوان محیط قرار گیری نمونه ها

کد محلول	نوع محلول	شماره
N	سدیم کلراید (۱۶۵ g/l)	۱
NS1	سدیم کلراید (۱۶۵ g/l) + سدیم سولفات (۲۷.۵ g/l)	۲
NS2	سدیم کلراید (۱۶۵ g/l) + سدیم سولفات (۵۵ g/l)	۳

۲-۱-۴- آزمایشات اصلی

در این تحقیق، به منظور بررسی اثر یون های سولفاتی بر میزان نفوذ یون های کلرایدی، از آزمایشات عمق نفوذ یون های کلرایدی، پروفیل نفوذ و مهاجرت تسریع یافته استفاده شد. آزمایشات عمق نفوذ و پروفیل نفوذ بر روی تمامی نمونه های شاهد (C)، دوده سیلیسی (MS) و تراسی (T) و آزمایش مهاجرت تسریع یافته تنها بر روی نمونه های شاهد انجام گرفت. آزمایش عمق نفوذ، پس از ۶۰ و ۱۲۰ روز قرار گیری در محلول های مهاجم، آزمایش پروفیل نفوذ پس از ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز قرار گیری در محلول های مهاجم و آزمایش مهاجرت تسریع یافته نیز پس از ۸۸، ۱۴۸ و ۲۰۸ روز عمل آوری در محلول آب آهک مورد آزمایش قرار گرفتند. مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های قرار گرفته در محلول آب آهک نیز هر ۱۴ روز یک بار با استفاده از دستگاه ونر تعیین شدند. در مورد آزمایش تعیین عمق نفوذ از طریق پروفیل گیری، باید اشاره نمود از آنجایی که در این تحقیق بیشتر مقایسه ی روش های



دیسک‌های برش خورده برای آزمایش مهاجرت تسریع یافته و نیز نمونه‌های استوانه‌ای آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی، همچنان تا زمان آزمایش در محلول آب آهک نگهداری شدند. آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی با قراردادن پراب ۴ کاناله‌ی دستگاه و نر بر روی نمونه‌های استوانه‌ای تعیین شد (شکل ۲).

شکل ۳- تعیین عمق نفوذ یون‌های کلراید به روش چشمی

نمونه‌های آزمایش تعیین پروفیل نفوذ، ابتدا در اعماق دو میلی‌متری با دریل مخصوص پودرگیری شدند و سپس مطابق استاندارد [12] ASTM C1152، با افزودن آب مقطر و اسیدنیتریک به پودرها، جوشاندن محلول، صاف نمودن آن و در انتها انجام تیتراسیون با استفاده از دستگاه پتانسیومتر، میزان کلراید موجود در هر عمق تعیین شد (شکل ۴).



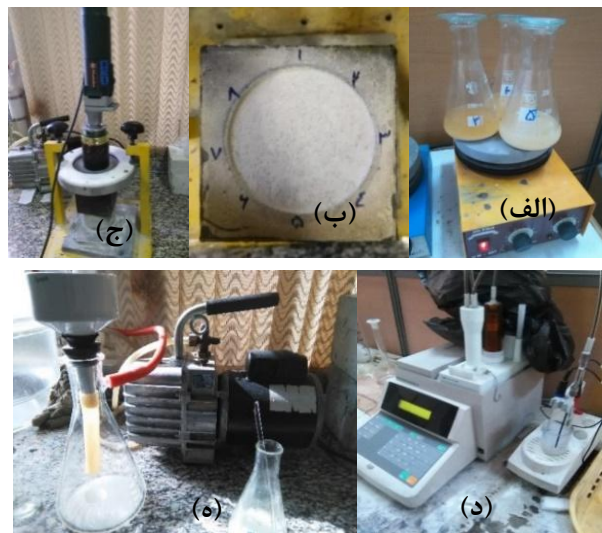
شکل ۲- دستگاه مقاومت الکتریکی سطحی

در ادامه با توجه به جدول ۳ (ارائه شده توسط آشتو)، قابلیت نفوذپذیری یون‌های کلراید برای هر یک از نمونه‌ها تعیین گردید.

جدول ۳- قابلیت نفوذ یون‌های کلراید در آشتو [۱۱]

مقاومت الکتریکی سطحی (کیلو اهم. سانتی‌متر)		قابلیت نفوذ یون‌های کلراید
استوانه‌ی ۱۵×۳۰	استوانه‌ی ۱۰×۲۰	کلرایدی
a=1.5	a=1.5	زیاد
کمتر از ۹.۵	کمتر از ۱۲	متوسط
۹.۵-۱۶.۵	۱۲-۲۱	کم
۱۶.۵-۲۹	۲۱-۳۷	بسیار کم
۲۹-۱۹۹	۳۷-۲۵۴	قابل صرف نظر
بیشتر از ۱۹۹	بیشتر از ۲۵۴	

a: فاصله‌ی رایج پراب‌های دستگاه ویر



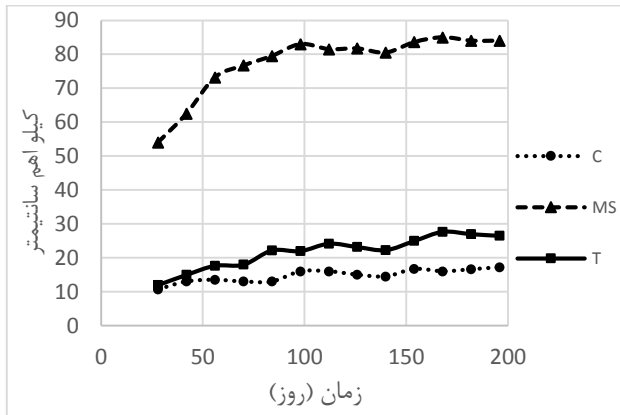
شکل ۴- مراحل انجام تعیین نفوذ یون‌های کلراید به روش پروفیل‌گیری: (الف)، (ب): پروفیل‌گیری، (ج): جوشاندن، (د): صاف نمودن، (ه): تیتراسیون

در آزمایش مهاجرت تسریع یافته، با ایجاد یک ابتکار، به محلول استاندارد این آزمایش، نمک سولفاتی (با نسبت مشابه نمک سولفاتی به نمک کلرایدی در محلول‌های آزمایش اصلی) افزوده شد و آزمایش مطابق استاندارد [13] NT Build 492، با قراردادن نمونه‌ها در ظروف مخصوص، افزودن محلول سدیم هیدروکسید، تنظیم ولتاژ دستگاه از روی آمپرهای موجود، ثبت دما و آمپرهای اولیه و دما و آمپرهای ثانویه پس از ۲۴ ساعت،

در آزمایش تعیین عمق نفوذ یون‌های کلراید به روش چشمی، نمونه‌ها در موعد مقرر، با ایجاد کشش توسط جک هیدرولیکی، به دو نیم تقسیم شدند. پس از اسپری نمودن محلول نیترات نقره بر سطح برش خورده، تغییر رنگ ایجاد شده میزان عمق نفوذ این یون‌ها را به درون نمونه مشخص می‌سازد که این عمق به وسیله‌ی کولیس ثبت می‌شود (شکل ۳).

ارزیابی میزان نفوذ یون های کلرایدی در ملات های بتنی...

۵-۱-۳- مطابق جدول ۳، برای نمونه های استوانه ای 10×20 سانتی متر، قابلیت نفوذپذیری یون های کلرایدی در نمونه های دوده سیلیسی، تراسی و شاهد پس از حدود ۱۰۰ روز عمل آوری مرطوب، به ترتیب بسیار کم، کم و متوسط ارزیابی می گردد.



شکل ۶- نمودار مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های ملاتی

۵-۲- تعیین عمق نفوذ یون های کلرایدی به روش چشمی

اعماق نفوذ ثبت شده از این آزمایش، در جدول ۴، آمده است. مطابق جدول ۴، می توان نتایج زیر را برداشت کرد:

- با افزایش سن قرارگیری در محلول از ۶۰ به ۱۲۰ روز، عمق نفوذ یون های کلرایدی به درون نمونه ها نیز افزایش می یابد.
- کمترین عمق نفوذ در تمامی محلول ها با اختلاف قابل توجه، مربوط به نمونه های حاوی دوده سیلیسی می باشد.
- به طور کلی، بیشترین عمق نفوذ به ترتیب مربوط به نمونه های شاهد، تراسی و دوده سیلیسی می باشد. تنها در نمونه ی تراسی درون محلول حاوی غلظت بیشتر نمک سولفاتی، عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه ی شاهد مشاهده می گردد.
- افزایش غلظت نمک سولفاتی، منجر به کاهش و افزایش مختصر عمق نفوذ یون های کلرایدی به ترتیب در نمونه های شاهد و دوده سیلیسی می شود. در مورد نمونه های تراسی، میزان کمتر نمک سولفاتی، منجر به کاهش عمق نفوذ و افزایش غلظت آن، این عمق را افزایش می دهد.

شکستن نمونه ها، اسپری نمودن نیترات نقره و قرائت میزان عمق نفوذ یون های کلرایدی انجام شد (شکل ۵). در انتها، میزان عمق نفوذ و ضریب مهاجرت با استفاده از رابطه ی زیر تعیین شد.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right) \quad (2)$$

که در آن، D_{nssm} ضریب مهاجرت در شرایط غیرپایدار (10^{-12} مترمربع بر ثانیه)؛ U ، مقدار مطلق ولتاژ بکار رفته (ولت)؛ T ، مقدار متوسط دمای اولیه و ثانویه در محلول آندی (درجه سانتیگراد)؛ L ، ضخامت نمونه (میلیمتر)؛ x_d ، متوسط عمق های نفوذ (میلیمتر)؛ t ، دوره ی زمانی آزمایش (ساعت) است.



شکل ۵- آزمایش مهاجرت تسریع یافته ی یون های کلرایدی

۵-۳- نتایج آزمایشات

در ادامه نتایج هر یک از آزمایشات به صورت متوسط نتایج اخذ شده از تعداد نمونه های مشابه ارائه شده است. لازم به ذکر است که پراکندگی نتایج به دست آمده محدود بوده و در این راستا نمونه هایی که پراکندگی آنها بیش از ۱۰ درصد از مقدار میانگین بود، از نتایج کنار گذاشته شدند.

۵-۱- مقاومت الکتریکی سطحی

نمودار شکل ۶، مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های ملاتی را نشان می دهد. با توجه به این نمودار، نتایج زیر قابل برداشت است: ۵-۱-۱- مقاومت الکتریکی سطحی با افزایش زمان، افزایش یافته و پس از حدود ۱۰۰ روز، تقریباً تثبیت می گردد.

۵-۱-۲- مقاومت الکتریکی سطحی نمونه های دوده سیلیسی (MS) با اختلاف قابل ملاحظه ای بیشتر از دو نمونه ی تراسی (T) و نمونه ی شاهد (C) می باشد که این می تواند به دلیل پرشدن خلل و فرج ماتریس خمیر به وسیله ی دوده سیلیس باشد. نمونه ی تراسی، به دلیل مشابه، عملکرد بهتری را نسبت به نمونه ی شاهد از خود نشان داده است.

جدول ۴- عمق نفوذ یون های کلرایدی به روش چشمی

(برحسب میلی متر)

نوع طرح	نوع محلول	مدت قرارگیری در محلول (روز)	
		۶۰	۱۲۰
C	N	۱۱.۹	۱۲.۹
	NS1	۱۱.۶	۱۲.۴
	NS2	۱۱	۱۱.۷
MS	N	۶.۱	۶.۵
	NS1	۶.۳	۶.۸
	NS2	۶.۸	۷.۲
T	N	۹.۴	۱۲.۲
	NS1	۹.۱	۱۲.۱
	NS2	۹.۶	۱۲.۸

باشد، عمق نفوذ این یون ها بیشتر خواهد بود. با استفاده از جدول ۵ می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- با افزایش سن قرارگیری در محلول، عمق نفوذ یون های کلرایدی به درون نمونه ها نیز افزایش می یابد.
- کمترین عمق نفوذ در تمامی محلول ها با اختلاف قابل ملاحظه، مربوط به نمونه های حاوی دوده سیلیس می باشد.
- به طور کلی، بیشترین عمق نفوذ به ترتیب مربوط به نمونه های شاهد، تراسی و سپس دوده سیلیسی می باشد. این در حالی است که نمونه ی تراسی درون محلول حاوی غلظت بیشتر نمک سولفاتی، عمق نفوذ بیشتری نسبت به نمونه ی شاهد از خود نشان می دهد.
- با افزایش غلظت نمک سولفاتی، عمق نفوذ یون های کلرایدی در نمونه های شاهد و دوده سیلیسی به ترتیب کاهش و مختصری افزایش می یابد. در مورد نمونه های تراسی، میزان کمتر نمک سولفاتی، باعث کاهش عمق نفوذ و افزایش غلظت آن، عمق این نفوذ را افزایش می دهد.

۳-۵- تعیین پروفیل نفوذ یون های کلرایدی

بیشترین عمق نفوذ ثبت شده در روش پودرگیری، در هر نمونه در محلول ها و زمان های متفاوت، در جدول ۵ آمده است. لازم به ذکر است که در اعماق مشابه، هر چه درصد یون های کلراید بیشتر

جدول ۵- مقادیر پروفیل نفوذ یون های کلرایدی (برحسب درصد وزنی ملات)

مدت قرارگیری در محلول (روز)	بیشترین عمق نفوذ ثبت شده (mm)	C			MS			T		
		N	NS1	NS2	N	NS1	NS2	N	NS1	NS2
۶۰	۸-۱۰	۰.۳۹۵۶	۰.۳۱۸۵	۰.۲۴۹۲	۰.۰۳۵۰	۰.۰۴۶۱	۰.۰۵۲۸	۰.۲۸۳۶	۰.۲۶۴۱	۰.۲۹۴۸
	۱۰-۱۲	۰.۲۹۹۲	۰.۱۹۰۰	۰.۱۳۴۲				۰.۲۰۲۶	۰.۱۷۸۸	۰.۲۱۱۵
	۱۲-۱۴	۰.۱۸۷۹	۰.۱۱۶۷	۰.۰۷۴۱				۰.۱۴۵۴	۰.۱۲۴۱	۰.۱۴۹۰
	۱۴-۱۶	۰.۱۲۰۷	۰.۰۷۳۵					۰.۱۰۰۱	۰.۰۷۴۷	۰.۰۹۹۰
	۱۶-۱۸	۰.۰۷۷۴								
۱۲۰	۸-۱۰	۰.۵۰۲۷	۰.۴۶۸۳	۰.۳۹۸۱	۰.۰۳۷۲	۰.۰۶۵۹	۰.۱۰۵۳	۰.۳۸۳۲	۰.۳۸۴۶	۰.۴۲۲۶
	۱۰-۱۲	۰.۳۹۴۹	۰.۳۶۲۳	۰.۲۹۲۸				۰.۲۵۹۱	۰.۲۸۲۷	۰.۲۹۳۵
	۱۲-۱۴	۰.۲۵۷۵	۰.۲۳۵۰	۰.۲۱۵۲				۰.۱۸۸۶	۰.۱۷۱۸	۰.۲۱۶۲
	۱۴-۱۶	۰.۱۶۴۹	۰.۱۳۷۴	۰.۱۳۱۸				۰.۱۳۴۸	۰.۱۰۹۸	۰.۱۴۶۶
	۱۶-۱۸	۰.۰۹۴۴	۰.۰۸۲۳	۰.۰۷۵۸				۰.۰۸۲۹	۰.۰۷۱۹	۰.۱۰۱۲
۱۸۰	۱۰-۱۲	۰.۴۶۲۵	۰.۴۲۶۵	۰.۳۶۴۳	۰.۰۲۳۴	۰.۰۲۴۸	۰.۰۲۹۴	۰.۳۸۶۵	۰.۳۶۲۷	۰.۳۹۹۸
	۱۲-۱۴	۰.۳۷۴۸	۰.۳۲۸۱	۰.۲۸۳۳				۰.۲۹۳۹	۰.۲۵۴۵	۰.۳۱۰۵
	۱۴-۱۶	۰.۳۰۱۵	۰.۲۹۲۱	۰.۲۰۱۲				۰.۲۰۷۰	۰.۱۷۰۵	۰.۲۳۰۴
	۱۶-۱۸	۰.۲۱۳۴	۰.۲۱۰۹	۰.۱۱۷۰				۰.۱۱۶۸	۰.۰۸۷۹	۰.۱۲۲۰
	۱۸-۲۰	۰.۱۷۰۵	۰.۱۵۶۹	۰.۰۶۴۵				۰.۰۵۰۳		۰.۰۶۸۸
	۲۰-۲۲	۰.۰۷۲۳	۰.۰۴۰۱							

۴-۵- مهاجرت تسریع یافته یون های کلراید (RCMT)

باتوجه به نتایج به دست آمده از جداول ۶ و ۷، مفاهیم زیر قابل دریافت است:

- در حالت کلی، با افزایش زمان عمل آوری نمونه ها، میزان نفوذ و نیز ضریب مهاجرت یون های کلرایدی در نمونه های شاهد کاهش می یابد که می تواند به دلیل پیشرفت فرآیند هیدراسیون خمیر سیمان و پر شدن منافذ باشد.
- با افزایش میزان سولفات درون محلول ها، عمق نفوذ و نیز ضریب مهاجرت افزایش می یابد.

جدول ۶- عمق نفوذ تسریع شده یون های کلرایدی در

نمونه های شاهد

عمق نفوذ یون های کلرایدی (برحسب میلی متر)			
زمان عمل آوری (روز)	محلول استاندارد (معادل N)	محلول استاندارد با غلظت کمتر سدیم سولفات (معادل NS1)	محلول استاندارد با غلظت بیشتر سدیم سولفات (معادل NS2)
۲۸	۱۶.۲	-	-
۸۸	۱۴.۹۵	۱۵.۳	۱۶.۲
۱۴۸	۱۳.۹	۱۴.۸	۱۶.۱
۲۰۸	۱۳.۶	۱۵.۱	۱۵.۷

جدول ۷- ضریب مهاجرت نفوذ تسریع شده یون های کلرایدی

در نمونه های شاهد

ضریب مهاجرت ($m^2/s \times 10^{-12}$)			
زمان عمل آوری (روز)	محلول استاندارد (معادل N)	محلول استاندارد با غلظت کمتر سدیم سولفات (معادل NS1)	محلول استاندارد با غلظت بیشتر سدیم سولفات (معادل NS2)
۲۸	۱۴.۶۱	-	-
۸۸	۹.۹۲	۱۰.۲۶	۱۰.۸۴
۱۴۸	۹.۲۹	۹.۸۳	۱۰.۶۳
۲۰۸	۹.۰۲	۱۰.۰۲	۱۰.۴۴

۶- مقایسه و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی، همبستگی بسیار خوبی را در پیش بینی بهترین نمونه از نظر عملکرد در محیط ترکیبی سولفاتی - کلرایدی با آزمایشات عمق و پروفیل نفوذ یون های کلرایدی از خود نشان می دهد. لازم به ذکر است که در تحقیقات دیگر در این زمینه، نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و جذب آب مویینه نیز به طور مشابه، عملکرد بهتر را به ترتیب به نمونه های دوده سیلیسی، تراسی و سپس شاهد اختصاص می دهند [۱۰].

مطابق نتایج به دست آمده از آزمایشات عمق نفوذ به روش چشمی و پروفیل نفوذ، نکات زیر حائز اهمیت می باشد:

- در هر دو آزمایش، در نمونه های شاهد و دوده سیلیسی، با افزایش غلظت نمک سولفاتی، نفوذ یون های کلرایدی به ترتیب کاهش و کمی افزایش می یابد. این تغییرات عمدتاً کمتر از ۱۰ درصد می باشد. در مورد نمونه های تراسی نیز با افزایش نمک سولفاتی تا حدی مشخص، این نفوذ کاهش و با افزایش بیشتر آن، نفوذ یون های کلرایدی افزایش می یابد.

- نتایج آزمایش عمق نفوذ به روش چشمی، خطای قابل توجهی در تعیین میزان نفوذ یون های کلرایدی از خود نشان می دهد و دلیل آن، عدم تغییر رنگ یون های کلراید نفوذ کرده با غلظت کمتر از حدود ۰.۰۷ مولار در زمان اسپری نیترات نقره می باشد [۱۳]. با این حال، هر دو آزمایش عمق و پروفیل نفوذ، روند مشابهی را از نتایج را در باب مقایسه ارائه می دهند.

- در موضوع امکان پذیری انجام آزمایش تسریع یافته به جای آزمایش در طول زمان؛ از آنجایی که نتایج عمق نفوذ بدست آمده برای نمونه های شاهد از آزمایش RCMT، با افزایش غلظت نمک سولفاتی، افزایش یافته است، با تمهیدات در نظر گرفته شده برای این تحقیق، نمی توان این آزمایش را جایگزین مناسبی برای بررسی نفوذ یون های کلرایدی در محیط های ترکیبی سولفاتی - کلرایدی دانست. اما در این آزمایش، دلیل افزایشی بودن میزان نفوذ با افزایش غلظت نمک سولفاتی را می توان این طور توجیه نمود که حضور یون های منفی سولفات، در اطراف صفحه کاتدی (دارای بار منفی)، دافعه ی بیشتری ایجاد نموده و این چنین عبور جریان توسط یون های منفی (کلراید و سولفات) از درون نمونه راحت تر

قابل استناد در مقایسه‌ی عملکرد نمونه‌ها در محلول ترکیبی سولفاتی - کلرایدی باشد.

- استفاده از روش چشمی در باب مقایسه‌ی عمق نفوذ یون‌های کلرایدی در نمونه‌های مختلف، روند مشابهی از تغییرات را هم‌چون آزمایش پروفیل‌گیری از خود نشان می‌دهد. اما، مقادیر مطلق عمق نفوذ گزارش شده به این روش، به علت عدم تغییر رنگ قابل مشاهده در لایه‌ی مرزی با غلظت کمتر از ۰.۰۷ مولار، دارای خطای قابل توجهی بوده و استناد به آن صحیح نمی‌باشد. لذا صرفاً در هنگام مقایسه عملکرد نمونه‌های گوناگون (و یا یک نمونه در محلول‌های متفاوت)، باتوجه به سرعت بالاتر و هزینه‌ی کمتر روش چشمی نسبت به روش پروفیل‌گیری، این آزمایش گزینه‌ی مناسبی می‌تواند باشد.
- باتوجه به نتایج متفاوت بدست آمده از آزمایش مهاجرت تسریع‌یافته و آزمایش در طول زمان که به ترتیب افزایش و کاهش نفوذ یون‌های کلرایدی در نمونه‌های شاهد را به همراه داشتند، به دلیل ماهیت متفاوت نفوذ در این دو آزمایش، باتوجه به فرضیات این تحقیق، پیش‌بینی رفتار نمونه‌ها در محیط ترکیبی و در طول زمان با روش تسریع‌یافته، نتایج قابل استنادی ارائه نمی‌دهد.

۸- مراجع

[۱] ریاحی دهکردی، ع.، اثر سولفات بر حمله‌ی کلرایدی در ملات‌های بتنی و تاثیر پوزولان‌های دوده‌سیلیس و تراس جاجرود در کاهش این حمله، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، استاد راهنما: دکتر علی اکبر رمضانپور، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، خرداد ۱۳۹۵.

[2] Pradhan, B.; Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete exposed to composite chloride-sulfate environment. *Construction and Building Materials*, Vol. 72, 398-410, 2014.

[3] Harrison, W.H.; Effect of chloride in mix ingredients on sulphate resistance of concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 42, No. 152, 113-126, 1990.

[4] Al-Amoudi, O.S.B.; Rasheeduzzafar, Maslehuddin, M.; Abduljawad, S.N.; Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 167, 113-123, 1994.

[5] Al-Amoudi, O.S.B.; Abdul-Al, Y.A.B. Role of chloride ions on expansion and strength reduction in

صورت گرفته و به دنبال آن، عمق نفوذ و ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی افزایش یافته است. از طرف دیگر باید به این موضوع توجه داشت که رفتار توام نمک سولفاتی و نمک کلرایدی در نفوذ به درون نمونه، در این آزمایشات با یکدیگر متفاوت می‌باشد. در آزمایش در طول زمان، نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری از همان ابتدا در معرض محلول‌های مهاجم قرار گرفته و پس از مدت‌های مشخص (۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز) آزمایش می‌شوند. این در حالی است که در آزمایش تسریع‌یافته، عمل‌آوری نمونه‌ها پس از ۲۸ روز در آب آهک هم‌چنان ادامه می‌یابد تا زمان معین برای انجام آزمایش فرارسد. در حالت اول، زمان لازم برای یون‌های کلرایدی و سولفاتی به منظور رقابت بر سر نفوذ و تشکیل پیوند با سه کلسیم آلومینات، ایجاد مواد منسب شونده توسط یون‌های سولفاتی و سایر مباحث در طول زمان (هم‌چون آزادسازی پیوند کلرایدی) مهیاتر می‌باشد. در حالت تسریع‌یافته، به دلیل طولانی‌تر بودن زمان عمل‌آوری، هیدراسیون با روند مناسبی ادامه می‌یابد؛ در حالی که در روش معمولی، پیشرفت هیدراسیون، توام با نفوذ یون‌های مهاجم می‌باشد. علاوه بر موضوعات یاد شده، در این دو آزمایش مکانیسم نفوذ کاملاً متفاوت می‌باشد. در آزمایش در طول زمان، نفوذ یون‌های کلرایدی به درون نمونه عمدتاً به روش انتشار می‌باشد. در حالی که در آزمایش تسریع‌یافته، جریان الکتریکی عامل هدایت یون‌ها می‌باشد. لذا با توجه به مطالب ذکر شده، عدم تطابق نتایج حاصل از آزمایش در طول زمان با روش تسریع‌یافته در محیط ترکیبی کلرایدی-سولفاتی، دور از ذهن نخواهد بود.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- طبق نتایج به‌دست آمده، آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی به جهت کنترل مشخصات ذاتی بتن، سازگاری بسیار خوبی با نتایج آزمایشات نفوذ یون‌های کلرایدی به درون نمونه‌ها در محیط ترکیبی دارد. این آزمایش به خوبی توانست عملکرد مناسب‌تر نمونه‌های دوده‌سیلیسی در برابر نفوذ یون‌های کلرایدی را با اختلاف قابل ملاحظه‌ای در میزان مقاومت الکتریکی سطحی نسبت به دو طرح دیگر پیش‌بینی نماید. لذا مقاومت الکتریکی سطحی می‌تواند از روش‌های جایگزین و

plain and blended cements in sulfate environments. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 1, 25-33, 1995.

[6] Lee, S.T., Park, D.W., Ann, K.Y. Mitigating effect of chloride ions on sulfate attack of cement mortars with or without silica fume. *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 35, 1210-1220, 2008.

[7] Dehwah, H.A.F., Maslehuddin, M., Austin, S.A. Long-term effect of sulfate ions and associated cation type on chloride-induced reinforcement corrosion in Portland cement concretes. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 24, 17-25, 2002.

[8]. Xu, Y. The influence of sulphates on chloride binding and pore solution chemistry. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 27, No. 12, 1841-1850, 1997.

[9] Geng, J., Easterbrook, D., Li, L.Y., Mo, L.W. The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, Vol. 68, 211-222, 2015.

[۱۰] رمضانیانپور، ع.ا.، ریاحی دهکردی، ع.، اثر پوزولان های دوده سیلیس و تراس جاجرود بر نفوذ یون های کلراید در محیط ترکیبی سولفاتی- کلرایدی، سمینار ملی بتن های سازگار با محیط زیست، گرمسار، اردیبهشت ۱۳۹۵.

[11] Kessler, R.J., Powers, R.G., Vivas, E., Paredes, M.A., Virmani, Y.P., Surface resistivity as an indicator of concrete chloride penetration resistance. *CBC* 2008.

[12] ASTM C1152-06, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[13] NT BUILD 492, Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *nordtest method*, Approved 1999-11.

Evaluation of Chloride Ions Penetration in Concrete Mortar in Combined Sulfate- Chloride Solutions by three Methods; Visual Investigation, Penetration Profile and Innovative Rapid Chloride Migration Test

Ali Akbar Ramezaniapour

Head of Concrete Research Center of Amirkabir University of Technology

Erfan Riahi Dehkordi*

Student of construction Engineering & Management, Amirkabir University of Technology

Abstract

Groundwater and seawater usually contain both chloride and sulfate ions. These two salts destroy concrete reinforcement by rebar corrosion and making expansion respectively. In order to investigate the influence of sulphate ions on chloride penetration in mortar, visual method, penetration profile and rapid chloride migration test results are compared with each other. According to the results until the age of 208 days, Sulfate ions lead to decrease the chloride penetration in control samples and a little increase in silica fume samples. Regarding to Trass Samples, an intermediate state is occurred; low sulfate content solution decreases and high sulphate content solution increases chloride penetration into these samples. According to different results of RCMT and common penetration tests in combined solutions, behavior of control samples is not predictable by RCMT method. However, visual investigation and profile penetration method demonstrate a similar trend in aspect of comparison. This research shows that the absolute penetration depth is caught by visual method does not have enough accuracy.

Keywords: Sulfate, Chloride Penetration, Visual Investigation, RCMT, Pozzolan.

* Corresponding Author: erf.riahi@aut.ac.ir