

ارزیابی ملات‌های پوزولانی با پایه‌ی میکروسیلیس در برابر محیط‌های خورنده‌ی اسیدی و کلرایدی

فرامرز مودی

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی امیر کبیر

علی اکبر رمضانپور

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

قاسم باقری چنار

کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی امیر کبیر

عرفان ریاحی دهکردی *

کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی امیر کبیر

چکیده

محیط‌های اسیدی خرابی سریعی را در سازه‌های بتنی ایجاد می‌کنند. یون‌های کلراید نیز موجب خوردگی آرماتور می‌شوند. هدف این تحقیق، ارائه‌ی ملاتی مقاوم در برابر هر یک از عوامل اسیدی و کلرایدی می‌باشد. بدین منظور از سه نوع سیمان به همراه ترکیباتی از پوزولان‌های میکروسیلیس و پومیس/تراس استفاده شد تا ۱۰ طرح اختلاط ساخته شود. آزمایش‌های صورت گرفته شامل آزمایشات کلی (مقاومت فشاری، جذب آب موینه و جذب آب حجمی)، آزمایشات تعیین عملکرد در محیط کلرایدی (مقاومت الکتریکی سطحی و مهاجرت تسریع‌یافته‌ی یون‌های کلرایدی) و آزمایشات کنترل عملکرد در محیط اسیدی (کاهش مقاومت فشاری و کاهش وزن) می‌باشد. نتایج بدست آمده تا سن ۲۴۰ روزه حاکی از آن است که ترکیب ۵٪ میکروسیلیس و ۸٪ تراس در سیمان سرباره‌ای می‌تواند طرح اختلاط مناسبی برای ملات در برابر محیط‌های مهاجم اسیدی و کلرایدی باشد. افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی به ترتیب تا ۴ و ۵ برابر نمونه شاهد، گواهی بر این ادعاست. هم‌چنین استفاده از ۱۰٪ پومیس بجای پوزولان تراس در طرح مذکور نیز عملکرد قابل قبولی ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دوام ملات، محیط اسیدی، یون‌های کلراید، پوزولان.

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

۱- مقدمه

مواد معدنی و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی سبب کاهش مقدار جریان عبوری و در نتیجه کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. آن‌ها به ترتیب دوده سیلیس، خاکستر بادی، زئولیت و روباره را در کاهش مقدار جریان عبوری ۶ ساعته‌ی بتن مؤثرتر معرفی کردند.

رضانیانپور و همکاران [۹] نیز مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌های ملات استاندارد حاوی تراس و میکروسیلیس را تا ۶ ماه عمل-آوری در محلول آب آهک مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش کردند که قابلیت نفوذپذیری یون‌های کلرایدی برای نمونه‌های شاهد، تراس و میکروسیلیس به ترتیب متوسط، کم و بسیار کم پیش‌بینی می‌گردد. نتایج بدست آمده از پروفیل نفوذ یون‌های کلرایدی نیز این موضوع را تأیید می‌کند.

به منظور داشتن ملاتی با مقاومت مناسب در برابر محیط‌های اسیدی و کلرایدی، لازم است کیفیت طرح پیشنهادی با آزمایشات مربوط، کنترل و ارزیابی گردد. در ادامه به روند انجام هر آزمایش و نتایج حاصل از آن بر روی ملات‌های حاوی پوزولان‌های مختلف پرداخته می‌شود.

۲- مصالح و روش کار

در این بررسی جهت ساخت ملات، از سه نوع سیمان نوع یک (دلیجان (D))، سیمان نوع دو (کردستان (K)) و سیمان سرباره‌ای (سپاهان (S)) با جایگزینی با مواد پوزولانی میکروسیلیس (MS)، تراس (T) و پومیس (P) استفاده شده است. در جدول ۱، آنالیز شیمیایی و مشخصات مصالح مصرفی به نمایش در آمده است.

۱۰ طرح اختلاط برای ملات از مواد مذکور ساخته شد که طرح اول به عنوان طرح شاهد با استفاده از سیمان دلیجان و بدون مواد پوزولانی بدست آمد. در سایر طرح‌ها از ۵٪ میکروسیلیس به عنوان ماده‌ی اول پوزولانی و از ۱۰٪ پومیس و ۸٪ تراس به عنوان ماده‌ی پوزولانی دوم برای هر یک از سه نوع سیمان مورد استفاده، بهره گرفته شد. نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی طرح‌ها ثابت و برابر ۰٫۳۶ می‌باشد. میزان مواد سیمانی در تمامی طرح‌ها ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. جهت تأمین کارایی ملات در بازه-ی ۱۲۰-۱۳۰ mm بر روی میز سیلان، از مواد کاهنده‌ی آب به میزان مناسب بهره گرفته شد. جدول ۲، طرح‌های اختلاط ساخته شده را نشان می‌دهد.

A.F. Idriess و همکاران [۱] نمونه‌های ملات ماسه سیمان ساخته شده را پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، به مدت یک سال در محلول سولفید هیدروژن نگهداری کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که در صورت جایگزین کردن میکروسیلیس به اندازه‌ی ۸٪ با سیمان و کاهش مقدار آب به سیمان، بهترین مقاومت در برابر سولفید هیدروژن حاصل می‌شود. این در حالی است که K. Kawai و همکاران [۲] تأثیر افزایش نسبت آب به سیمان را در بهبود مقاومت نمونه‌ها در برابر اسید سولفوریک گزارش نموده‌اند.

تحقیقات R. Sersale و همکاران [۳] نیز این موضوع را در برابر باران‌های اسیدی تأیید می‌کند. تحقیقی که توسط M.L. Bemdt [۴] صورت گرفته است نشان می‌دهد که جایگزین کردن ۵ تا ۱۰٪ میکروسیلیس به همراه ۲۰٪ سرباره با سیمان، دوام بتن را در محیط‌های اسیدی افزایش می‌دهد. نتایج کار J. Montey و همکاران [۵] نیز نشان می‌دهد که بتن حاوی میکروسیلیس می‌تواند در محیط اسیدی دوام خوبی داشته باشد.

در مطالعات Khandaker و همکاران [۶] اثر پومیس و خاکستر آتش‌فشانی معدنی در مقاومت ملات‌ها بررسی شده است. ریزی پومیس، خاکستر آتش‌فشانی و سیمان به ترتیب ۲۸۵، ۲۴۲ و ۳۲۰ مترمربع بر کیلوگرم بود. نتایج حاکی از آن است که مقاومت فشاری ملات استاندارد با افزایش مقدار خاکستر آتش‌فشانی و پومیس کاهش می‌یابد.

محمدی منش و همکاران [۷] اثر پوزولان‌های تراس و پومیس اسکندان را بر مقاومت فشاری مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که پس از سه ماه، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ تراس و ۲۲٫۵٪ پومیس، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌ی شاهد داشته‌اند. نتایج آزمایش نفوذ تسریع‌شده‌ی یون‌های کلراید نیز نشان‌دهنده‌ی اثر مثبت این دو پوزولان در کاهش نفوذپذیری بتن در مقابل یون‌های کلرایدی بوده است. همچنین مقاومت الکتریکی نمونه‌های نگهداری شده در شرایط خوردگی کلرایدی، نشان از اثر کاهنده‌ی پوزولان‌ها در خوردگی کلرایدی داشته است.

Feng و همکاران [۸] با آزمایش تسریع‌شده‌ی نفوذ یون‌های کلراید، نفوذپذیری بتن‌های حاوی پوزولان را در برابر این یون‌ها اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که افزایش مقدار

جدول ۱- آنالیز شیمیایی و مشخصات مواد مصرفی

پومیس	تراس	میکروسیلیس	سیمان دلیجان	سیمان کردستان	سیمان سرباره‌ای اصفهان		
۶۴,۹	۶۷,۸۲	۸۷,۵	۲۳,۱۲	۲۲,۲۸	۲۷/۳۲	SiO ₂	اکسیدها (%)
۱۲,۱	۱۴,۱۴	۰,۵	۳,۵۶	۴,۷۲	۶,۰۸	Al ₂ O ₃	
۵,۲	۲,۹۶	۱,۵۳	۳,۲۹	۲,۷۵	۲,۱۲	Fe ₂ O ₃	
۷,۴	۳,۳۶	۱,۲۷	۶۳,۰۷	۶۴,۱۲	۵۵,۳۴	CaO	
۲,۴۹	۴,۳	۰,۳۶	۰,۱۹	۰,۲۸	۰,۳۶	Na ₂ O	
۱,۸۸	۲,۵	۱,۱۴	۰,۶۶	۰,۷۶	۰,۷۶	K ₂ O	
۱,۹۸	۱,۶	۱,۰۱	۱,۳۱	۱,۲۳	۴,۲۱	MgO	
۰,۷۹	-	۰,۰۲	۰,۱۴۶	۰,۱۵۶	۰,۵۸	TiO ₂	
۰,۱۲۳	-	۰,۰۸۶	۰,۰۹۱	۰,۱۱۲	۰,۵۱۲	MnO	
۰,۲	-	۰,۱۳	۰,۲۲۴	۰,۲۶۳	۰,۲۰۱	P ₂ O ₅	
-	-	۰,۴۶	۱,۶۳۸	۱,۹۷۳	۲,۳۵۵	SO ₃	
۲,۵۴	۲,۳۴	۲,۱۴	۳,۰۶	۳,۰۲	۳,۰۷	چگالی (gr/cm ³)	
۵۰۷۴	۴۱۰۰	۶۵۰۰۰	۲۹۰۸	۳۰۳۵	۳۱۲۰	نرمی (cm ² /gr)	
۲,۵	۷,۱۸	۵,۹۲	۲,۳۷	۱,۱۲	۰,۰۲	افت سرخ شدن (%)	

جدول ۲- طرح‌های اختلاط ملات

عنوان	طرح اختلاط
OPC	سیمان دلیجان
M.D.5%MS	سیمان دلیجان + ۰.۵٪ میکروسیلیس
M.K.5%MS	سیمان کردستان + ۰.۵٪ میکروسیلیس
M.S.5%MS	سیمان سرباره‌ای سپاهان + ۰.۵٪ میکروسیلیس
M.D.5%MS.8%T	سیمان دلیجان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۰.۸٪ تراس
M.K.5%MS.8%T	سیمان کردستان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۰.۸٪ تراس
M.S.5%MS.8%T	سیمان سرباره‌ای سپاهان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۰.۸٪ تراس
M.D.5%MS.10%P	سیمان دلیجان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۱۰٪ پومیس
M.K.5%MS.10%P	سیمان کردستان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۱۰٪ پومیس
M.S.5%MS.10%P	سیمان سرباره‌ای سپاهان + ۰.۵٪ میکروسیلیس + ۱۰٪ پومیس

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ISIRI 3206 بر روی نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ cm در سنین ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه پس از عمل‌آوری در آب آهک انجام شد. این نمونه‌ها بدان جهت در ابعاد ۱۰ cm انتخاب شدند که اندازه مشابهی با نمونه‌های قرار گرفته در محلول سولفاتی داشته باشند تا بتوان مقایسه بهتری نیز در این زمینه داشت. با نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی، نرخ خوردگی احتمالی در اثر نفوذ یون‌های کلرایدی پیش‌بینی می‌گردد. هر قدر مقاومت الکتریکی کمتر باشد، امکان حرکت یون‌های کلرایدی به درون بتن به دلیل هدایت پذیری بیشتر محلول منفذی و نیز نفوذپذیری بیشتر نمونه، بیشتر خواهد بود. این رابطه معکوس میان نرخ خوردگی و مقاومت الکتریکی را می‌توان در تحقیقات مختلف نیز مشاهده کرد [۱۱-۱۶]. تعیین مقاومت الکتریکی مطابق استاندارد AASHTO TP 095، با استفاده از دستگاه Wenner و با قراردادن پراب چهار کاناله‌ی آن بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰×۲۰ cm و قرائت میزان مقاومت الکتریکی تا سن ۲۴۰ روزه ادامه یافت (شکل ۱، الف)). آزمایش مهاجرت تسریع‌یافته‌ی یون‌های کلرایدی نیز مطابق استاندارد NT Build 492 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰×۵ cm و در سنین ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ روز انجام شد. طبق این استاندارد، سه عدد از هر نمونه و در هر سن، پس از قرار گرفتن در ظروف مخصوص،

x_d (mm)؛ متوسط عمق‌های نفوذ (mm)؛ t ، دوره‌ی زمانی آزمایش (h) است. جذب آب مویینه مطابق استاندارد ASTM C1585 و جذب آب حجمی مطابق استاندارد BS 1881، در سنین ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ روزه بر روی نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ cm انجام شدند. در آزمایش جذب آب حجمی، نمونه‌های تهیه شده تا زمان آزمایش در محلول آب آهک قرار گرفتند و در سنین آزمایش به میزان ۷۲ ساعت به گرم‌خانه با دمای 105°C منتقل شدند. سپس نمونه‌ها وزن شده و به مدت نیم‌ساعت در آب مغروق گشتند تا با توزین مجدد آنها میزان جذب حجمی بدست آید (شکل ۱، (د)). در آزمایش جذب آب مویینه نیز نمونه‌ها در سنین آزمایش به مدت ۱۴ روز در گرم‌خانه با دمای 50°C قرار گرفتند تا حفرات آنها خالی از آب شود. نمونه‌ها پس از توزین اولیه، به گونه‌ای در آب قرار گرفتند که آب به ارتفاع ۵ mm آنها را در برگیرد. در ادامه نمونه‌ها پس از ۳، ۶، ۲۴ و ۷۲ ساعت مجدداً توزین گشتند تا ضریب جذب مویینه تعیین گردد.

درون سدیم کلراید با غلظت ۱۰٪ به عنوان محلول کاتدی قرار داده شدند. از سود ۰٫۳ نرمال به عنوان محلول آنودی در بخش فوقانی نمونه‌ها استفاده شد. با اعمال جریان الکتریکی به نمونه‌ها و ثبت مقادیر اولیه و ثانویه‌ی شدت جریان عبوری در دمای آزمایش، پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها شکسته شده و با پاشش محلول نقره نیترات بر سطح نفوذ یافته و با توجه به تغییر رنگ ایجاد شده، عمق نفوذ یون‌های کلرایدی تعیین شد (شکل ۱، (ب) و (ج)). در ادامه با استفاده از رابطه‌ی (۱)، ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی در هر نمونه تعیین گشت.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right) \quad (1)$$

که در آن، D_{nssm} ، ضریب مهاجرت در شرایط غیرپایدار (10^{-11} ثانیه بر مترمربع)؛ U ، مقدار مطلق ولتاژ (V)؛ T ، مقدار متوسط دمای اولیه و ثانویه در محلول آنودی ($^{\circ}\text{C}$)؛ L ، ضخامت نمونه



شکل ۱- (الف): مقاومت الکتریکی سطحی، (ب) و (ج): مقاومت تسریع یافته یون‌های کلرایدی، (د): جذب آب حجمی

پس از ۲۸ روز عمل آوری نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ cm در آب آهک، به منظور ارزیابی عملکرد در محیط اسیدی، نمونه‌ها در معرض محلول اسید سولفوریک قرار گرفتند. این محلول با قرارگیری در ظروف مخصوص، به صورت دائمی در حال چرخش بود تا میزان pH در تمامی قسمت‌ها ثابت و برابر با ۱ باشد (شکل ۲). جهت ارزیابی میزان افت مقاومتی در اثر قرارگیری در

محلول اسیدی، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷ الی ۲۴۰ روزه اندازه و با مقاومت ۲۸ روزه قبل از قرارگیری در محیط اسیدی مقایسه شد. تعیین وزن نمونه‌ها در سنین مختلف و مقایسه‌ی آن با مقادیر وزن اولیه، راهکاری دیگر در راستای ارزیابی میزان آسیب‌پذیری در اثر محیط اسیدی بود که در بخش بعدی به نتایج آنها پرداخته می‌شود.



شکل ۲- قرارگیری نمونه‌ها در مخازن حاوی اسید سولفوریک و گردش اسید در ظروف

۳- نتایج و تفسیر آزمایشات

۳-۱- آزمایشات کلی

۳-۱-۱- مقاومت فشاری

سنین اولیه باعث افت مقاومت فشاری شده‌اند که این موضوع با گذشت زمان تا حد قابل قبولی جبران گشته است. نمونه‌های حاوی سیمان سرباره‌ای، به علت وجود پوزولان سرباره و ایجاد تاخیر در کسب مقاومت، مقاومت‌های کمتری را نشان می‌دهند که البته در این مورد هم گذشت زمان بهبود نتایج را به همراه داشته است.

در جدول ۳، نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها آمده است. مطابق آن، حضور میکروسیلیس منجر به افزایش مقاومت فشاری در کوتاه مدت و بلندمدت گشته است. پوزولان‌های تراس و پومیس در

جدول ۳- مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف (مگاپاسکال)

روزه ۲۱۰	روزه ۱۸۰	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	طرح اختلاط
۶۶	۶۵	۶۴	۵۶	۴۶	OPC
۸۲	۸۲	۸۱	۸۰	۵۹	M.D.5%MS
۹۳	۹۱	۸۷	۸۲	۶۰	M.K.5%MS
۷۰	۶۹	۶۷	۶۴	۳۸	M.S.5%MS
۷۵	۷۴	۷۱	۶۸	۶۲	M.D.5%MS.8%T
۷۸	۷۶	۷۴	۶۷	۴۷	M.K.5%MS.8%T
۷۲	۷۰	۶۲	۵۳	۳۶	M.S.5%MS.8%T
۷۶	۷۵	۷۴	۶۷	۶۰	M.D.5%MS.10%P
۸۱	۷۹	۷۶	۶۹	۵۴	M.K.5%MS.10%P
۷۲	۷۰	۶۹	۵۳	۳۳	M.S.5%MS.10%P

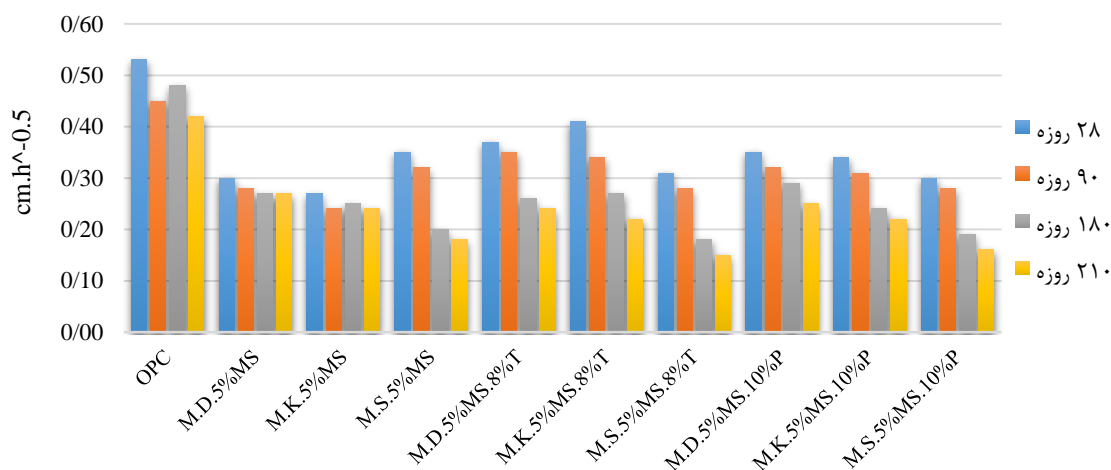
۳-۱-۲- جذب آب مویینه

سیمان‌های کردستان و دلیجان در طول زمان بسیار کند شده است. ترکیب تراس/پومیس به همراه میکروسیلیس در سیمان سرباره‌ای در بلندمدت عملکرد بهتری نسبت به سایر طرح‌ها داشته است.

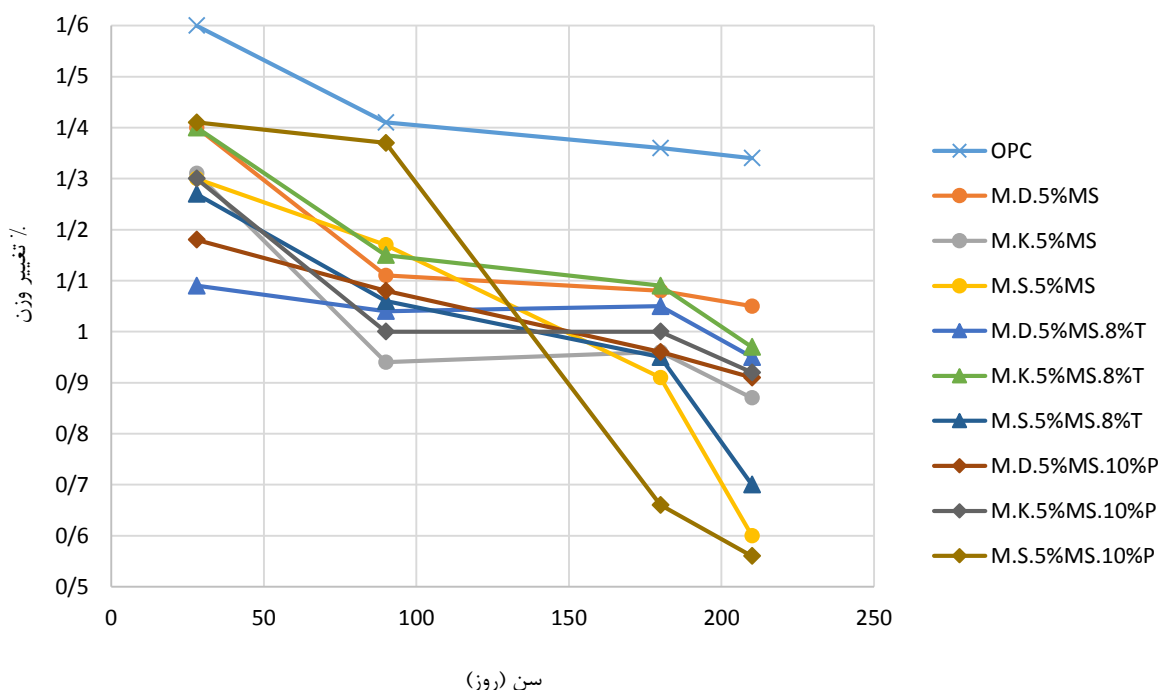
نتایج جذب آب مویینه نمونه‌ها در شکل ۳ آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نمونه‌های پوزولانی جذب مویینه‌ی کمتری را نسبت به نمونه‌ی شاهد به خود اختصاص داده‌اند که این موضوع را می‌توان به واکنش‌های پوزولانی و تشکیل ژل ثانویه مرتبط دانست که با تبدیل فضاهای کوچک به حفرات مویینه و ایجاد انقطاع در مسیر این حفرات، منجر به کاهش نفوذ مویینه‌ی نمونه‌ها می‌گردند [۲۲-۱۷]. طبق نتایج، میکروسیلیس به تنهایی از سنین اولیه جذب مویینه را کاهش داده است، اما نرخ این کاهش در

۳-۱-۳- جذب آب حجمی

در شکل ۴، نتایج جذب آب حجمی نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. در این-جا نیز مشابه آزمایش جذب آب مویینه، نمونه‌های پوزولانی عملکرد خوبی را از خود نشان داده‌اند. نمونه‌های حاوی سیمان سرباره‌ای نیز در بلندمدت جذب آب کمتری را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۳- جذب آب موینگی نمونه‌ها در سنین مختلف



شکل ۴- روند تغییرات جذب آب حجمی نمونه‌ها در سنین مختلف

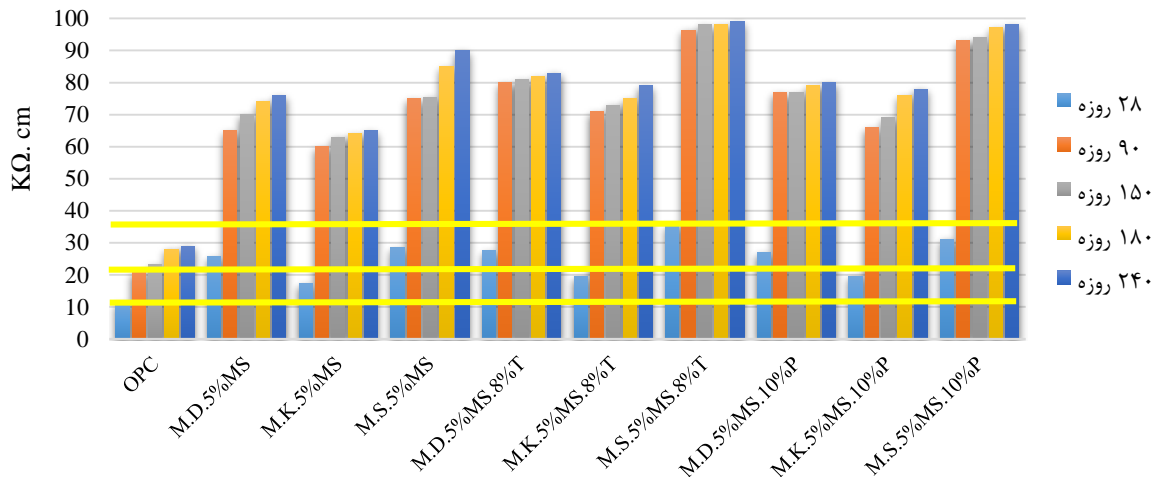
۲-۳- آزمایشات کنترل نفوذ یون‌های کلراید

۱-۲-۳- مقاومت الکتریکی سطحی

قابلیت نفوذپذیری یون‌های کلراید در تمامی نمونه‌ها بجز نمونه‌های حاوی سیمان کردستان و نمونه‌ی شاهد، در محدوده‌ی کم قرار می‌گیرند. برای نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های حاوی سیمان کردستان، این دسته‌بندی در محدوده‌ی متوسط قرار می‌گیرد. مقاومت الکتریکی کمتر در سیمان کردستان را می‌توان به ماهیت آن نسبت داد. این سیمان از نوع دو بوده و واکنش‌های هیدراسیون در سیمان نوع دو تدریجی تر صورت می‌گیرد. پس از سن ۲۸ روزه در تمامی طرح‌ها جز طرح شاهد، افزایش قابل توجه مقاومت

نتایج مقاومت الکتریکی سطحی نمونه‌ها در شکل ۵ آمده است. افزودن پوزولان میکروسیلیس و دیگر پوزولان‌ها مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را در سنین اولیه بیش از ۲ برابر و در سنین نهایی تا ۴ برابر افزایش داده است. طبق جدول ارائه شده توسط آشتو [۱۰] و با توجه به دسته‌بندی تقریبی انجام شده بر روی نمودار، برای نمونه‌های استوانه‌ای 10×20 cm و پس از سن ۲۸ روزه،

الکتریکی مشاهده می‌گردد که قابلیت نفوذپذیری نمونه‌ها را در محدوده‌ی بسیار کم قرار می‌دهد. این در حالی است که در نمونه‌ی شاهد حتی پس از ۲۴۰ روز، قابلیت نفوذپذیری در محدوده‌ی کم باقی مانده است. این موضوع حاکی از نقش مثبت پوزولان‌ها در بهبود مقاومت الکتریکی و به تبع آن کاهش رسانایی مایع منفذی دارد. تشکیل واکنش‌های پوزولانی و بهبود ساختار و کاهش تخلخل در اثر تولید ژل سیلیکاتی ثانویه از مزایای این مواد می‌باشد. در این‌جا نیز طرح‌های حاوی سیمان سرباره‌ای و ترکیب میکروسیلیس با پومیس/تراس بهترین عملکرد را به خود اختصاص داده‌اند.

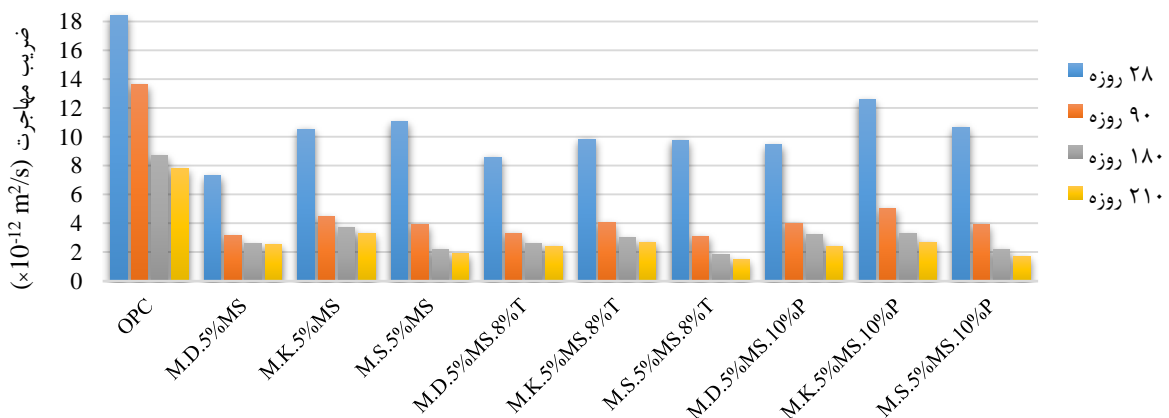


شکل ۵- روند کسب مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در سنین مختلف

را نسبت به استفاده از پومیس و میکروسیلیس از خود نشان می‌دهد. از طرح‌های حاوی سیمان سرباره‌ای نیز به ویژه در بلندمدت نتایج قابل قبولی بدست آمده است. افزودن پوزولان‌ها ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی را در سنین اولیه بیش از ۲ برابر و در سنین نهایی در حدود ۴ الی ۵ برابر کاهش داده است. بیشترین مقدار ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی مربوط به طرح شاهد می‌باشد که هیچ نوع پوزولانی در ساختار خود ندارد. این طرح با داشتن نفوذپذیری بیشتر، نسبت به بقیه‌ی نمونه‌ها دوام کمتری در برابر نفوذ یون‌های کلرایدی دارد.

۳-۲- مهاجرت تسریع‌یافته‌ی یون‌های کلرایدی

در شکل ۶، ضریب مهاجرت تسریع‌یافته‌ی یون‌های کلرایدی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد شباهت زیادی بین نتایج این آزمایش با آزمایش مقاومت الکتریکی برقرار است. با بررسی نتایج مشخص می‌گردد که مقدار ضریب مهاجرت یون‌های کلراید در تمام طرح‌ها، با گذشت زمان و بالا رفتن سن نمونه‌ها در اثر پیشرفت هیدراسیون و بهبود ساختار خمیر و کاهش تخلخل‌ها، کاهش پیدا می‌کند. وجود پوزولان‌ها به این امر کمک شایانی کرده است. ترکیب تراس به همراه میکروسیلیس، عملکرد بهتری



شکل ۶- روند تغییر ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی در سنین مختلف

۳-۳- آزمايشات کنترل حمله‌ی اسیدی

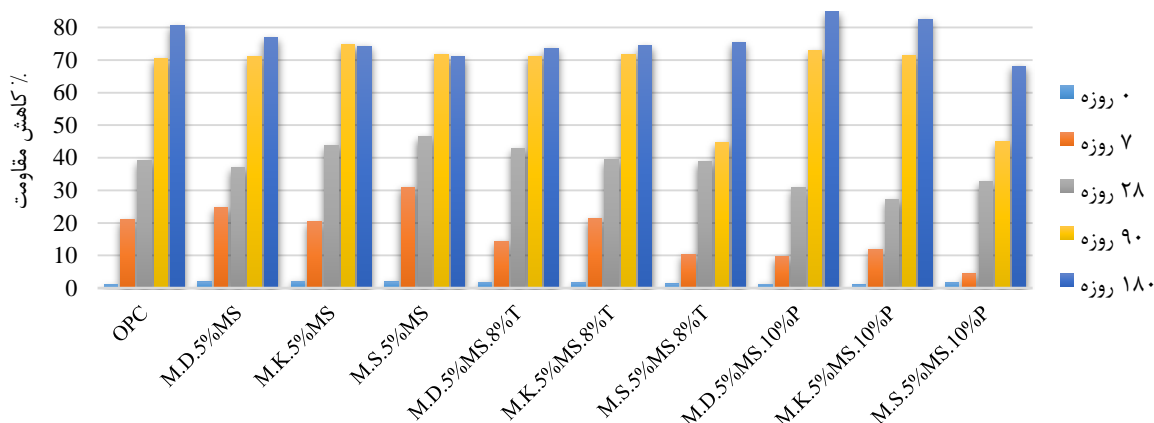
۳-۳-۱- کاهش مقاومت فشاری

محلول اسیدی در شکل ۷ آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۷ پیداست، تا ۱۸۰ روز قرارگیری در محلول اسیدی، کاهش مقاومت در نمونه‌های میکروسیلیسی از نمونه‌های شاهد بیشتر می‌باشد. نمونه‌های حاوی پومیس در سنین اولیه کاهش مقاومت کمتری را تجربه کرده‌اند. در نمونه‌های سیمان سرباره‌ای نیز کاهش مقاومت‌ها چه در سنین اولیه و چه در بلندمدت کمتر از دو طرح سیمانی دیگر می‌باشد. در این میان، ترکیب میکروسیلیس و پومیس در سیمان سرباره‌ای بهترین عملکرد را به خود اختصاص می‌دهد. عملکرد تراس در سیمان سرباره‌ای نیز قابل قبول ارزیابی می‌گردد.

در جدول ۴، مقاومت نمونه‌های در معرض محیط اسیدی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، برخی از نمونه‌ها هم-چون نمونه‌های حاوی میکروسیلیس تنها، پیش از قرارگیری در محلول اسیدی، مقاومت‌های بالایی را به خود اختصاص داده‌اند اما این نمونه‌ها با قرارگیری در محیط اسیدی پس از ۹۰ روز، افت قابل ملاحظه‌ای را تجربه می‌کنند. به منظور مطالعه‌ی بهتر، نسبت مقاومت فشاری نمونه‌ها به مقاومت آنها قبل از قرارگیری در

جدول ۴- میزان مقاومت فشاری نمونه‌های قرارگرفته در محیط اسیدی (مگاپاسکال)

طرح اختلاط	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه	۱۸۰ روزه	۲۱۰ روزه
OPC	۵۶	۴۵	۳۴	۱۷	۱۱
M.D.5%MS	۸۰	۶۱	۵۱	۲۳	۱۹
M.K.5%MS	۸۲	۶۵	۴۶	۲۱	۲۱
M.S.5%MS	۶۴	۴۴	۳۴	۱۸	۱۹
M.D.5%MS.8%T	۶۸	۵۹	۳۹	۲۰	۱۸
M.K.5%MS.8%T	۶۷	۵۳	۴۱	۱۹	۱۷
M.S.5%MS.8%T	۵۳	۴۷	۳۲	۲۹	۱۳
M.D.5%MS.10%P	۶۷	۶۰	۴۶	۱۸	۱۰
M.K.5%MS.10%P	۶۹	۶۱	۵۰	۲۰	۱۲
M.S.5%MS.10%P	۵۳	۵۱	۳۶	۲۹	۱۷

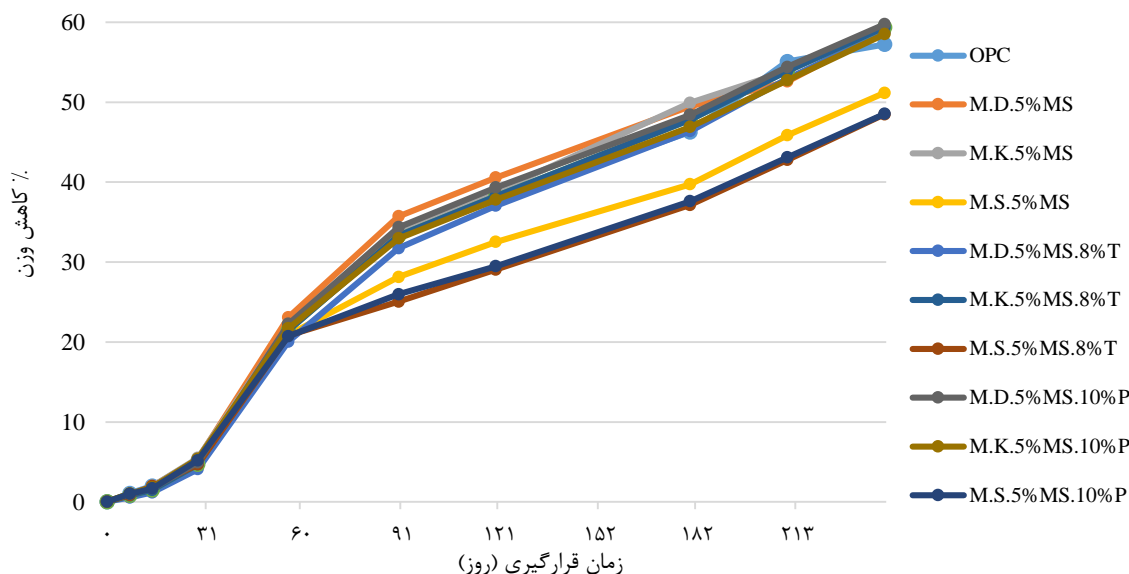


شکل ۷- درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های قرار گرفته در محیط اسیدی در سنین مختلف

۳-۳-۲- کاهش وزن

قرارگیری در محیط اسیدی، نمونه‌های حاوی سیمان سرباره‌ای افت مقاومت کمتری را از خود نشان می‌دهند؛ در این میان نیز ترکیب پوزلان میکروسیلیس با پومیس/تراس عملکرد بهتری را نسبت به میکروسیلیس تنها نشان می‌دهد. با توجه به شیب نمودارها، نرخ خرابی در بازه‌ی زمانی یک الی سه ماهه، بیشتر از سایر زمان‌ها می‌باشد.

در شکل ۸، نتایج کاهش وزن نمونه‌ها در اثر قرارگیری در محیط اسیدی به تصویر کشیده شده است. مطابق شکل، تا حدود ۵۶ روز قرارگیری در محیط اسیدی، میزان کاهش وزن نمونه‌های مختلف تقریباً با یکدیگر برابر بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با افزایش زمان



شکل ۸- میزان کاهش وزن نمونه‌های قرار گرفته در محیط اسیدی در سنین مختلف

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، می‌توان گفت:

- وجود پوزولان‌های تراس و پومیس و نیز سرباره (در سیمان سرباره‌ای) در ملات اگرچه افت مقاومت را در سنین اولیه به همراه داشته‌اند، اما در بلندمدت با تکمیل فرآیندهای هیدراسیون و تشکیل ژل ثانویه‌ی سیلیکاتی رشد مقاومت قابل قبولی از خود نشان داده‌اند. کاهش جذب آب موینه و جذب آب حجمی حتی از سنین اولیه، حاکی از عملکرد مثبت این مواد در کنار میکروسیلیس در ملات به شمار می‌آید.

- کاهش ضریب مهاجرت یون‌های کلرایدی (بیش از ۲ برابر در سنین اولیه و تا ۵ برابر در سنین نهایی) و افزایش مقاومت الکتریکی (بیش از ۲ برابر در سنین اولیه و تا ۴ برابر در سنین نهایی)، حاکی از آن است که طرح‌های پوزولانی می‌توانند در برابر محیط مهاجم کلرایدی، بتنی با مقاومت مناسب در برابر خوردگی ایجاد نمایند.

- در نمونه‌های قرار گرفته در معرض محیط اسیدی، کاهش کمتر مقاومت فشاری و وزن نمونه‌های حاوی ترکیب پوزولان‌های میکروسیلیس و پومیس/تراس به ویژه در سیمان سرباره‌ای عملکرد قابل قبولی را در برابر هجوم اسید سولفوریک از خود نشان داده‌اند.

- از آنجایی که سرعت واکنش‌های پوزولانی در میکروسیلیس در کوتاه مدت قابل توجه است و از طرف دیگر پوزولان‌های تراس و پومیس به زمان بیشتری برای تکمیل فرآیند پوزولانی نیاز دارند، ترکیب پوزولان میکروسیلیس با پومیس/تراس می‌تواند در

مجموع عملکرد قابل قبولی را چه در برابر محیط کلرایدی و چه در برابر محیط اسیدی از خود نشان دهد.

۵- مراجع

- [1]. Idriss, A.F., "Effect of hydrogen sulphide emissions on cement mortar specimens", *Canadian Bio systems Engineering*, 43(5), 2001.
- [2]. Kawai, K., Yamaji, S., Shinmi, T., "Concrete deterioration caused by sulfuric acid attack", 10th DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Component, 2005.
- [3]. Sersale, R., Frigione, G., Bonavita, L., "Acid depositions and concrete attack: Main influences", *Cement and concrete research*, 28(1), pp. 19-24, 1998.
- [4]. Berndt, M.L., "Protection of concrete in cooling towers from microbiologically influenced corrosion", *Transactions-Geothermal resources council*, pp. 3-8, 2001.
- [5]. Monteny, J., "Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete", *Cement and Concrete Research*, 31(9), pp. 1359-1365, 2001.
- [6]. Khandaker, M., Anwar, H., "Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics", *Cement and Concrete Research*, 35, pp. 1141-1144, 2005.
- [7]. محمدی منش، م.، "بررسی خواص مکانیکی و دوام بتن‌های ساخته‌شده با پوزولان طبیعی پومیس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۳.

- fume and blast furnace slag”, in: V.M. Malhotra (Ed.), *Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Proceedings of the Fifth International Conference, Milwaukee, Wisconsin, USA, American Concrete Institute, P.O. Box 19150, Redford Station, Detroit, Michigan 48219, pp. 1051 – 1068, 1995.
- [20]. Jiang, W., Roy, D.M., “Microstructural aspects of high-performance cement-based materials”, *Materials Research Society, Symposia Proceedings*, 370, pp. 115 – 124, 1995.
- [21]. Touse, S.A., Bier, T.A., Knepfler, C.A., Young, J.F., Berger, R.L., “Pore structure of low porosity DSP cement pastes”, *Materials Research Society, Symposia Proceedings*, 137, pp. 449 – 456, 1989.
- [23]. Young, J.F., “Dense high strength, low permeability cement-based materials for containment”, in: R.W. Piggott (Ed.), *Cement Industry Solutions to Waste Management*, Canadian Portland Cement Association, Calgary, Alberta, Canada, pp. 13 – 22, 1992.
- [8]. Fenga, N., Fenga, X., Haoa, T., “Effect of Ultrafine Mineral Powder on the Charge Passed of the concrete”, *Cement and Concrete Research*, pp. 623-627, 2004.
- [۹]. رضانیانپور، ع. ا.، ریاحی دهکردی، ع.، پیدایش، م.، “ارزیابی میزان نفوذ یون‌های کلرایدی در ملات‌های بتنی در محیط ترکیبی سولفاتی - کلرایدی به سه روش چشمی، پروفیل نفوذ و مهاجرت تسریع‌یافته،” پنجمین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی مصالح و سازه‌های نوین در مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۷-۵ آبان، ۱۳۹۵.
- [10]. 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.
- [11]. Hope, B.B., Ip, A.K.C., “Corrosion of steel in concrete made with slag cement”, *ACI Materials Journal*, 84(6), pp. 525-31, 1987.
- [12]. Feliu, S., Gonzalez, J.A., Feliu, S.J., Andrade, C., “Relationship between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars”, *British Corrosion Journal*, 24(3), pp. 195-198, 1989.
- [13]. Lopez, W., Gonzalez, J.A., “Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement”, *Cement and Concrete Research*, 23, pp. 368-376, 1993.
- [14]. Bertolini, L., Polder, R.B., TNO report – “concrete resistivity and reinforcement corrosion rate as a function of temperature and humidity of the environment”, *TNO Building and Construction Research*, 1997.
- [15]. Morris, W., Vico, A., Vazquez, M., de-Sanchez, S.R., “Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements”, *Corrosion Science*, 44(1), pp. 81-99, 2002.
- [16]. Gonzalez, J.A., Miranda, J.M., Feliu, S., “Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete”, *Corrosion Science*, 46(10), pp. 2467-2485, 2004.
- [17]. “Properties of concrete incorporating fly ash and ground granulated blast-furnace slag”, *Cement and Concrete Composites*, 25, pp. 293-299, 2003.
- [18]. Ghrici, M., Kenai, S., Said-Mansour, M., “Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements”, *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 542-549, 2007.
- [19]. Nagataki, S., Wu, C., “A study of the properties of Portland cement incorporating silica

Evaluation of pozzolanic mortars containing micro silica against acid and chloride attack

Faramarz Moodi

Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Ali Akbar Ramezaniapour

Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Qasem Bagheri Chenar

Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Erfan Riahi Dehkordi *

Concrete Technology and Durability Research Center (CTDRc), Department of Civil & Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Acidic environments lead to rapid destruction in the reinforcement concrete structures. Chloride ions also lead to rebar corrosion. The aim of this study is to represent an appropriate mortar which resists against each of the acidic and chloride attack. For this purpose, three types of cement with combination of pozzolans (micro silica and pumice/trass) were used as 10 mix designs. Experiments consisted of compressive strength, capillary absorption and water permeability as general tests, and tests which control the performance of specimens against acid attack (compressive strength reduction, weight loss) and chloride attack (surface electrical resistivity, rapid chloride migration test). Results showed that until the age of 240 days, combination of 5% micro silica and 8% trass in slag cement would be an appropriate mix design for mortar against both chloride and acid attack. Usage of 10% pumice as a substitution of trass in the mentioned mix design performed well too.

Keywords: Durability of mortar, acid attack, chloride ions, pozzolan.

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

