

عملکرد و دوام بتن مسلح حاوی پوزولان‌های مختلف در شرایط محیطی دریاچه ارومیه

حسن افشین
استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
حسین کربلایی فرجی
کارشناس ارشد سازه، مهندسین مشاور فراز آب

چکیده

کاربرد مواد افزودنی معدنی پوزولانی می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر خواص بتن بخصوص بردوام بتن در محیط‌های خورنده داشته باشد. در این تحقیق، دوام نمونه‌های بتنی مسلح ساخته شده با سیمان نوع ۲، پوزولان توف سبلان، پوزولان پومیس عنصرود و دوده سیلیس در شرایط شبیه‌سازی شده دریاچه ارومیه در مدت ۶ ماه بررسی شده است. نمونه‌های آزمایشی با دو نسبت آب به سیمان متفاوت و سه نوع پوشش بتنی آرماتور تهیه و در معرض شرایط متفاوت محیطی (آزاد، مغروق، تر و خشک) قرار داده شده‌اند. آزمایش‌های مقاومت فشاری، میزان نفوذ یون کلر، عمق کربناتاسیون، مقاومت الکتریکی، پتانسیل خوردگی و شدت خوردگی آرماتور در سنین مختلف بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که شرایط تر و خشک در بتن‌ها بیشترین تأثیر را داشته است. در شرایط مغروق در آب دریاچه، اگر چه پتانسیل خوردگی آرماتورها بسیار بالاست و مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار گرفته در این محیط نسبت به محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است، اما به علت عدم وجود اکسیژن شدت خوردگی آرماتورها ناچیز است. اغلب بتن‌های حاوی پوزولان، دوام بهتری نسبت به بتن شاهد حاوی سیمان تیپ ۲ نشان داده و بهترین عملکرد مربوط به بتن حاوی دوده سیلیس بوده است. کاربرد سیمان در حد 450 kg/m^3 و نسبت آب به سیمان کمتر از $0/4$ تأثیر عمده‌ای در جلوگیری از نفوذ مواد مضر به داخل بتن و در نتیجه افزایش دوام آن داشته است.

کلمات کلیدی: دوام بتن، مقاومت الکتریکی، نفوذ یون کلر، مقاومت فشاری، کربناتاسیون، پتانسیل خوردگی، شدت خوردگی.

Durability of Reinforced Concrete Containing Different Pozzolans in Oroumia Lake Environment

H. Afshin and H. Karbalaye Faraje
Civil Engineering Faculty Sahand University of Technology, Tabriz

Abstract

The durability of concrete in corrosive ambient has been a matter of concern for concrete researchers. Natural and artificial pozzolans in replacement with cement have performed very well in concrete structures situated in such environments. In order to investigate the performance of Iranian pozzolans, concrete specimens incorporating Type 2, ordinary cement natural pozzolans (Sabalan tuff, Ansarod pumice) and silica fume were made and stored maintained in simulated Oroumia lake conditions (free air, submerged and wetting-drying) for 6 months. All the considered mixtures have been made with two different water-cement ratios (0.4 & 0.45). Three size of concrete cover (2, 3.5, 5 cm) have been used. Tests such as corrosion potential measurement, electrical resistivity, reinforcement corrosion intensity, carbonation depth, chloride ion concentration and compressive strength were carried out at different ages. Results show that the wetting - drying condition has had a great influence on the durability of concretes. Pozzolanic mixtures have shown better performance in comparison with Type 2 mixtures. Concretes containing silica fume showed the best durability and performance. The use of 450 kg/m^3 cement and water - cement ratio less than 0.4 had a great influence on the protection of concrete against corrosive ions and thus their durability enhancement.

Key words: Durability, Concrete, Electrical resistivity, Chloride penetration, Compressive strength, Carbonation, Corrosion intensity, Potential of corrosion.

۱- مقدمه

دریاچه ارومیه بزرگترین و شورترین دریاچه داخلی ایران و بعد از بحرالمت در فلسطین، شورترین دریاچه جهان محسوب می‌شود. ضرورت احداث پل میانگذر، جاذبه‌های گردشگری موجود در پارک ملی و همچنین وجود آرمیا در آب این دریاچه که از ارزش اقتصادی بسیار بالایی برخوردار است، احداث سازه‌های بتنی را در این منطقه اجتناب ناپذیر می‌سازد. لذا انجام تحقیقات بمنظور ارائه راهکارهایی برای ساخت بتن بادوام در این محیط خورنده ضروری به نظر می‌رسد. در جدول (۱) املاح موجود در دریاچه ارومیه و مقایسه آن با خلیج فارس آورده شده است. در این تحقیق، دوام نمونه‌های بتنی مسلح ساخته شده با مواد متفاوت از قبیل سیمان نوع ۲، پوزولان توف سبلان، پوزولان پومیس عنصرود و دوده سیلیس در شرایط شبیه‌سازی شده دریاچه ارومیه در آزمایشگاه به مدت ۶ ماه مورد کنکاش قرار گرفته است.

۲- روش کار

۱-۲- مصالح مصرفی

سیمان و مواد مکمل سیمان مورد استفاده عبارتند از: سیمان نوع ۲ (صوفیان)، میکروسیلیس ازنا، توف سبلان و پومیس عنصرود. مشخصات شیمیایی سیمان و مواد مضاف مصرفی در جدول (۲) آمده است.

جدول ۱- مقایسه ترکیبات آب دریاچه ارومیه (Mg/lit)

	K	Ca	Mg	SO ₄	Na	Cl
دریاچه ارومیه	۱۴۰۴	۱۳۶۰	۱۲۴۱۸	۲۲۷۵۲	۸۶۰۶۶	۱۴۳۷۰۴
خلیج فارس	۴۵۰	۴۳۰	۱۴۶۰	۲۷۲۰	۱۲۴۰۰	۲۱۴۵۰

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان و مواد مضاف مصرفی

ترکیب شیمیایی %	سیمان نوع ۲	میکروسیلیس ازنا	توف سبلان	پومیس عنصرود
SiO ₂	۲۱/۹۷	۹۵/۱	۶۵/۴	۶۵/۹۵
Al ₂ O ₃	۴/۶۲	۱/۳۲	۱۷/۴	۱۶/۴۵
Fe ₂ O ₃	۳/۵۵	۰/۸۷	۳/۳	۳/۴
MgO	۲/۳۳	۰/۹۷	۱/۴	۰/۵
CaO	۶۴/۵۶	۰/۴۹	۳/۹	۴/۱۵
C ₃ S	۵۰/۶۸	-	-	-
C ₂ S	۲۴/۷۶	-	-	-
C ₃ A	۶/۲۴	-	-	-
Na ₂ O	۰/۲۸	۰/۳۱	-	-
K ₂ O	۰/۹۵	۱/۰۱	-	-
L.O.I.	۱<	۰/۹۴	۳/۳	۲/۲

۲-۲- مشخصات طرح‌های اختلاط، جزئیات نمونه‌ها، نحوه نگهداری و آزمایش‌های انجام شده

در این پروژه، ۱۰ طرح اختلاط با ۵ نوع ترکیب مواد سیمانی (MP- سیمان نوع ۲، M-۱۰٪ جایگزینی وزنی سیمان با میکروسیلیس، S-۱۵٪ جایگزینی وزنی سیمان با میکروسیلیس، PO-۱۰٪ جایگزینی وزنی سیمان با پومیس عنصرود، TO-۱۰٪ جایگزینی وزنی سیمان با توف سبلان) و در دو رده (نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۴۵، عیار سیمان ۴۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت ماسه به شن ۰/۶۹ و ۰/۷۵ به ترتیب) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. که مشخصات آنها در جدول (۳) نشان داده شده است. اسلامپ مورد نظر در کلیه مخلوط‌ها (۲۰-۱۲) بود که با اضافه نمودن فوق روان کننده دیسپرسیون ملامین سولفونات به مقدار ۲-۳ درصد وزنی سیمان تأمین گردید.

جدول ۳- مشخصات مخلوط‌های ساخته شده

شماره	وزن مصالح مصرفی - کیلوگرم					$\frac{W}{B}$	نوع مخلوط	علامت اختصاری
	شن	ماسه	توف	پومیس	میکروسیلیس			
۱۰۹۲	۸۱۹	-	-	-	۴۰۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲	MP ₁
۱۰۹۹	۷۵۸	-	-	-	۴۵۰	۰/۴		MP ₂
۱۰۹۰	۸۱۷	-	-	۴۰	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد میکروسیلیس	M ₁
۱۱۰۱	۷۵۹	-	-	۴۵	۴۰۵	۰/۴		M ₂
۱۰۹۰	۸۱۷	-	-	۶۰	۳۴۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۵ درصد میکروسیلیس	S ₁
۱۰۹۸	۷۵۸	-	-	۶۷/۵	۳۸۲/۵	۰/۴		S ₂
۱۰۹۱	۸۱۸	-	۴۰	-	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد پومیس	PO ₁
۱۱۰۱	۷۵۹	-	۴۵	-	۴۰۵	۰/۴		PO ₂
۱۰۹۲	۸۱۹	۴۰	-	-	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد توف	TO ₁
۱۱۰۱	۷۶۰	۴۵	-	-	۴۰۵	۰/۴		TO ₂

مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های مختلف در سنین ۲۸، ۹۰، ۱۸۰ روزه تعیین گردید. همچنین پتانسیل خوردگی، شدت خوردگی آرماتور و مقاومت الکتریکی بتن در سنین مختلف روی نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. میزان پتانسیل خوردگی توسط دستگاه نیم پیل با الکترومد مرجع Ag/AgCl تعیین گردید [۱]. برای اندازه‌گیری شدت خوردگی از یک سل الکتروشیمیایی سه الکترودی استفاده شد که شامل الکترومد شاهد، کار و الکترومد کمکی بود. لازم بذکر است که اعمال پتانسیل به الکترومد کار نسبت به الکترومد شاهد صورت گرفته و جریان بین الکترومد کار و کمکی ثبت می‌شد. از الکترومد Ag/AgCl به عنوان الکترومد شاهد و از الکترومد پلاتین به عنوان الکترومد کمکی و نیز از آرماتور مدفون در بتن به عنوان الکترومد کار استفاده گردید. قلب این سیستم الکتروشیمیایی، پتانسیواستات می‌باشد که این تکنیک در استاندارد ASTM-G59 آورده شده است [۸ و ۱]. روش استاندارد برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن در استانداردهای AASHTO و ASTM آورده نشده است. به همین علت روش‌های متنوعی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بخصوص در مطالعات آزمایشگاهی وجود دارد. در این پروژه برای اندازه‌گیری آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی بتن از روش Cabera (1994) استفاده گردید. برای انجام آزمایش نیاز به دو صفحه برنجی بود تا به عنوان الکترودهای خارجی عمل کنند. این دو

کلیه نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از زمان ساخت، از قالب‌ها خارج و به مدت ۷۲ ساعت در محیط آزمایشگاه و در داخل آب معمولی عمل‌آوری و سپس به محیط‌های مورد نظر زیر منتقل شده‌اند.

محیط آزاد: محیط داخل فضای آزمایشگاه

محیط شاهد: حوضچه‌ای دارای آب شرب سهند و در شرایط محیطی آزمایشگاه

محیط تر: حوضچه‌ای دارای آب دریاچه ارومیه و در دمای ثابت ۳۰ درجه سانتیگراد بود که آب آن در فواصل یک ماه تعویض می‌شد.

محیط تر و خشک: این محیط از دو حوضچه خالی و پر از آب دریاچه ارومیه تشکیل شده بود که به وسیله پمپ، آب حوضچه‌ها به یکدیگر پمپاژ می‌شد. در ۲۴ ساعت یک سیکل تروخشک صورت می‌گرفت که هر سیکل ۱۰ ساعت خیس شدن و ۱۴ ساعت خشک شدن را در بر داشت. دمای این محیط نیز ثابت و در ۳۰ درجه سانتیگراد بود و آب آن در فواصل یک ماه تعویض می‌شد.

اتاق کربناتاسیون: اتاقکی با درجه حرارت ۳۲ درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی ۳۵٪ بود که به منظور تسریع در کربناتاسیون، نمونه‌های ساخته شده برای اندازه‌گیری عمق کربناتاسیون در این محیط قرار داده شدند.

جزئیات نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش و شرایط نگهداری آنها در جدول (۴) آمده است.

میزان نفوذ کلر در عمق ۳-۲ سانتیمتری، از نمونه بتن پودر تهیه گردید و درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن با استفاده از یک روش شیمیایی که در BRE آمده است، اندازه‌گیری شد و با استفاده از قانون فیک ضریب نفوذ یون کلرید تعیین گردید [۶]. عمق کربناتاسیون نمونه‌های قرار گرفته در اتاق کربناتاسیون، با شکستن مقاطع مختلف نمونه‌ها و با پاشیدن معرف فنل‌فتالین ۱٪ تعیین شد [۱].

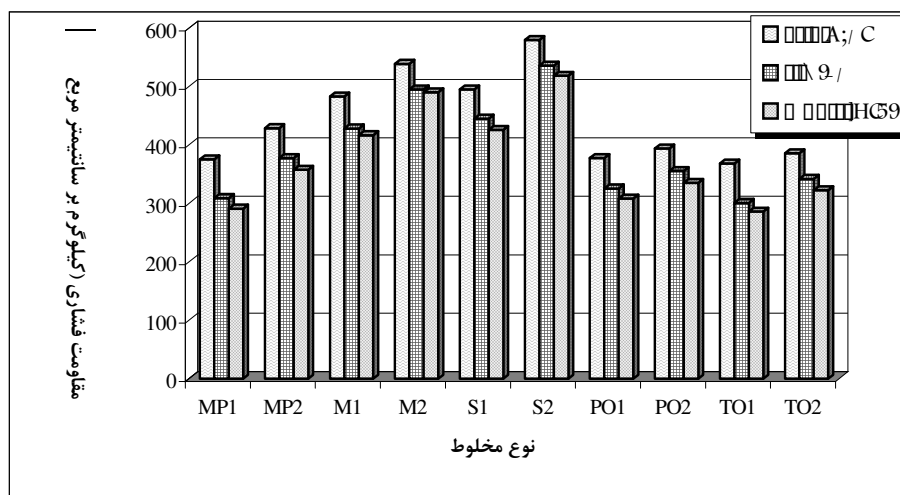
صفحه برنجی در دو طرف نمونه بتنی ۱۰×۱۰×۱۰ cm قرار داده شده و از خمیر سیمان برای تماس الکتریکی بین الکترودها و نمونه‌ها استفاده می‌شود. دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه بر اساس مدار پل وتستون ساخته شد. مدار مذکور در تعیین مقاومت مجهول مورد استفاده قرار می‌گرفت. نوسان ساز، مدار را با جریان AC که دارای فرکانس ۱۰۰۰ HZ و ولتاژ ۱۰ ولت بود، تغذیه می‌کرد [۲]. در سنین ۶ و ۳ ماهه برای اندازه‌گیری

جدول ۴- جزئیات و ویژگی‌های نمونه‌های ساخته شده و نحوه نگهداری آنها

نوع آزمایش	اندازه نمونه‌ها (cm)	ویژگی‌ها	محیط نگهداری
مقاومت فشاری	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، تر، تر و خشک
میزان نفوذ کلر	۱۰×۱۰×۱۰	-	تر، تر و خشک
پتانسیل خوردگی آرماتور	۱۵×۲۲×۴۰	پوشش بتنی (۲ و ۳/۵ و ۵ cm)	آزاد، تر، تر و خشک
شدت خوردگی آرماتور	۱۵×۲۲×۴۰	پوشش بتنی (۵ cm)	تر، تر و خشک
عمق کربناتاسیون	۱۰×۱۰×۴۰	فاقد آرماتور	اتاق کربناتاسیون
مقاومت الکتریکی	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، تر، تر و خشک

۳- نتایج آزمایشات

نتایج تعدادی از آزمایش‌ها در جداول (۵، ۶، ۷ و ۸) و شکل‌های (۲) تا (۱۰) خلاصه شده‌اند.



شکل ۲- مقایسه مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌ها در محیط‌های مختلف بعد از ۱۸۰ روز

جدول ۵- مقادیر درصد میزان کلر، ضریب نفوذ یون کلر و عمق کربناتاسیون در سن ۳ ماهه

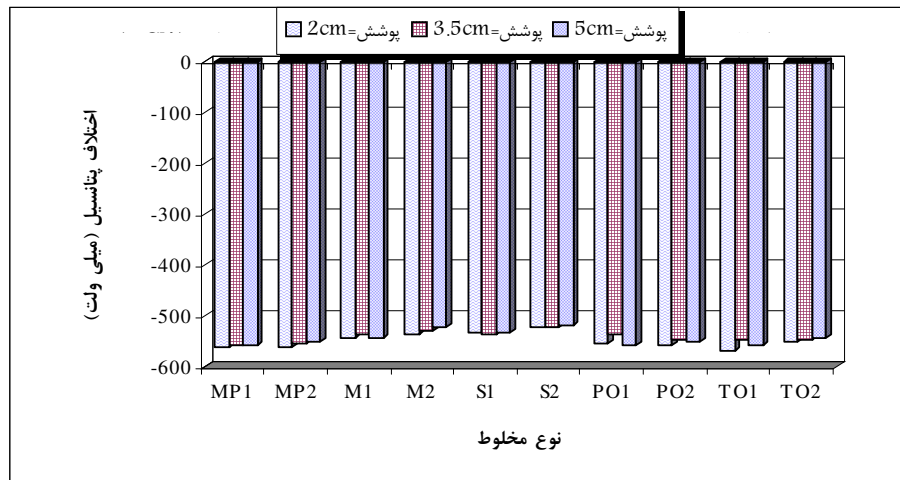
عمق کربناتاسیون (میلیمتر)	ضریب نفوذ یون کلر $(\times 10^{-12} m^2/s)$		درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن در عمق (۲-۳cm)		$\frac{W}{B}$	نوع مخلوط
	تروخشک	تر	تروخشک	تر		
۱۰/۲۵	۳۶/۶۹	۳۵/۵۳	۰/۲۴	۰/۲۳	۰/۴۵	سیمان نوع ۲
۹/۰۸	۲۹/۷۳	۲۷/۰۴	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۴	
۱۰/۰۸	۱۹/۳۱	۱۹/۳۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد میکروسیلیس
۸/۳۳	۱۷/۸۸	۱۶/۸۸	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۴	
۹/۶۶	۱۹/۳۱	۱۷	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۵ درصد میکروسیلیس
۸/۵۵	۱۵/۷۶	۱۴/۸	۰/۱	۰/۰۹	۰/۴	
۸/۸۳	۲۷/۲۹	۲۵/۸۸	۰/۱۸	۰/۱۷	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد پومیس
۸/۵۸	۲۲/۰۳	۲۰/۹۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۴	
۱۰/۸۵	۳۳/۷۱	۳۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۲	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد توف
۱۰/۲۵	۲۶/۹۸	۲۴/۳۷	۰/۲	۰/۱۸	۰/۴	

جدول ۶- مقادیر درصد میزان کلر، ضریب نفوذ یون کلر و عمق کربناتاسیون در سن ۶ ماهه

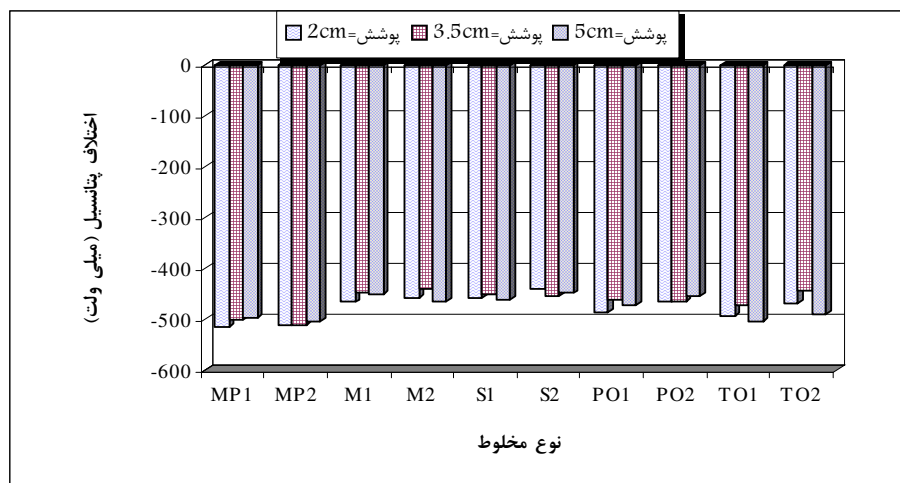
عمق کربناتاسیون (میلیمتر)	ضریب نفوذ یون کلر $(\times 10^{-12} m^2/s)$		درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن در عمق (۲-۳cm)		$\frac{W}{B}$	نوع مخلوط
	تروخشک	تر	تروخشک	تر		
۱۵/۶۹	۲۶/۹۱	۲۱/۷۹	۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۴۵	سیمان نوع ۲
۱۴/۷	۱۷/۸۶	۱۵/۵۸	۰/۲۶	۰/۲۳	۰/۴	
۱۳/۹۹	۱۰/۹۲	۹/۶۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد میکروسیلیس
۱۲/۳۹	۸/۹۲	۸/۹۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۴	
۱۳/۸	۹/۶۵	۹/۰۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۵ درصد میکروسیلیس
۱۲/۵۹	۹/۴۲	۷/۸۸	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۴	
۱۴/۷۹	۱۵/۲	۱۴/۴۱	۰/۲۰	۰/۱۹	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد پومیس
۱۴/۳	۱۲/۱۸	۱۱/۰۴	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۴	
۱۶/۵	۱۹/۶۵	۱۷/۷۶	۰/۲۵	۰/۲۳	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد توف
۱۵/۲۵	۱۵/۵۸	۱۳/۵۲	۰/۲۳	۰/۲	۰/۴	

جدول ۷- محدوده پتانسیل خوردگی طبق ASTM_C876 برای نیم پیل AgCl/Ag

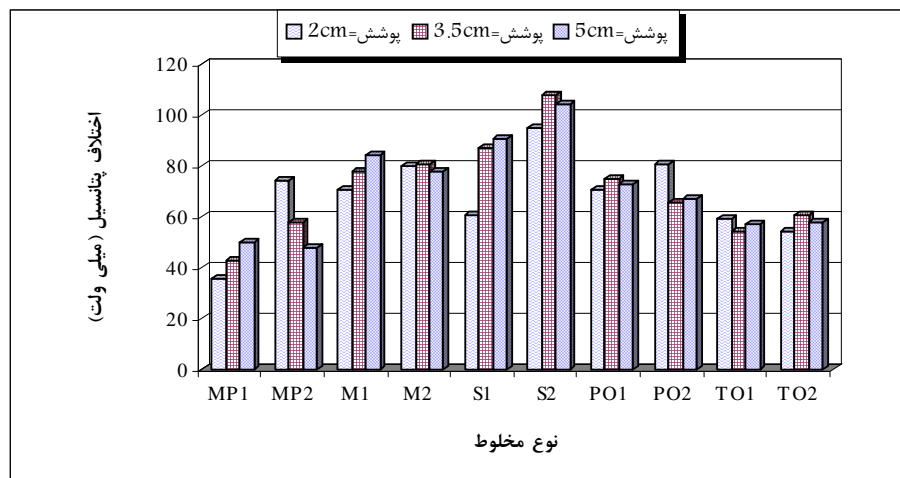
احتمال خوردگی	محدوده پتانسیل
به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود ندارد.	$\geq -84mv$
فعالیت خوردگی قطعی نمی‌اشد، اما امکان آن کاملاً وجود دارد.	$-234mv \leq -84mv$
به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود دارد.	$\leq -234mv$



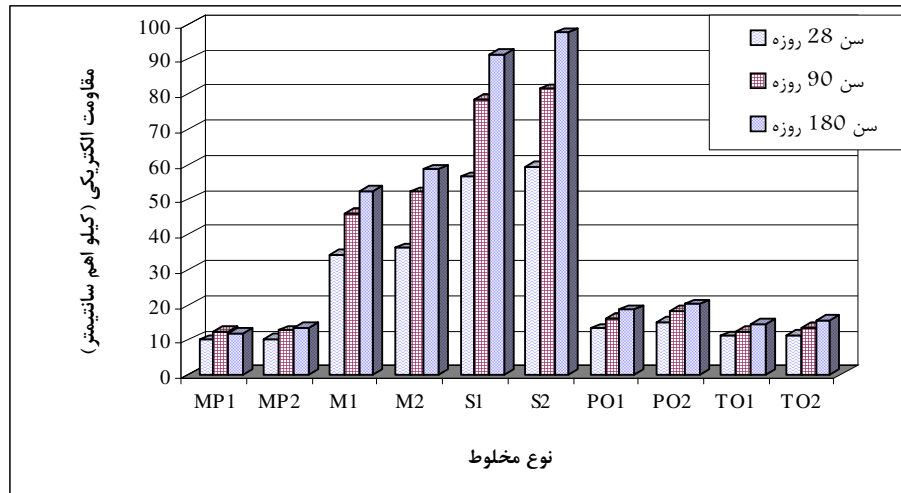
شکل ۳- مقادیر پتانسیل خوردگی با اندازه پوشش‌های متفاوت برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط تر در سن ۶ ماهه



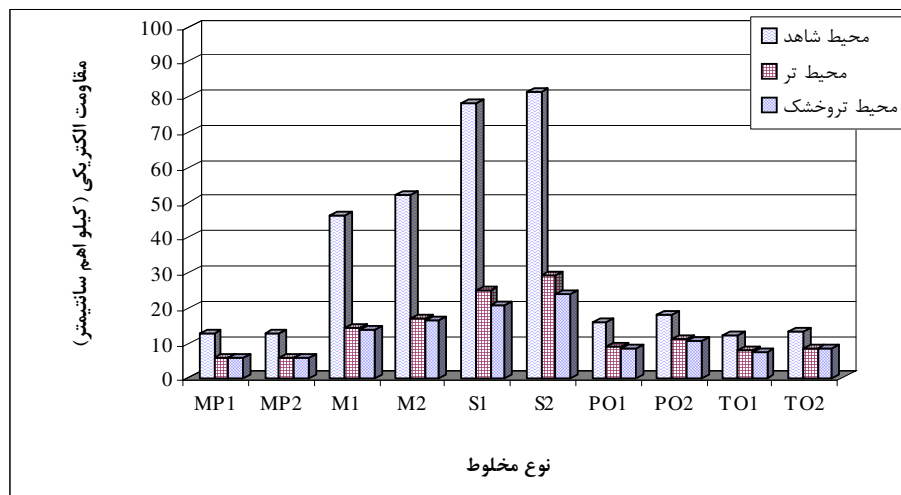
شکل ۴- مقادیر پتانسیل خوردگی با اندازه پوشش‌های متفاوت برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط تروخشک در سن ۶ ماهه



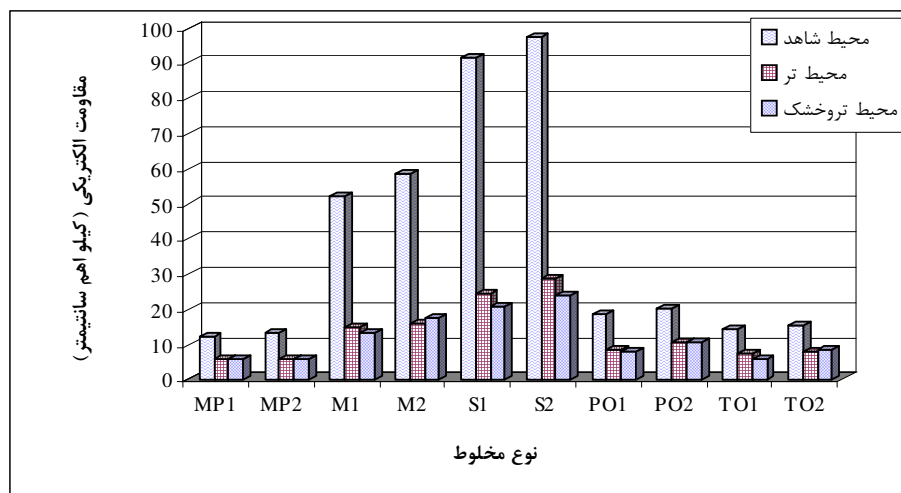
شکل ۵- مقادیر پتانسیل خوردگی با اندازه پوشش‌های متفاوت برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط آزاد در سن ۶ ماهه



شکل ۶- مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتنی در سنین مختلف در محیط شاهد



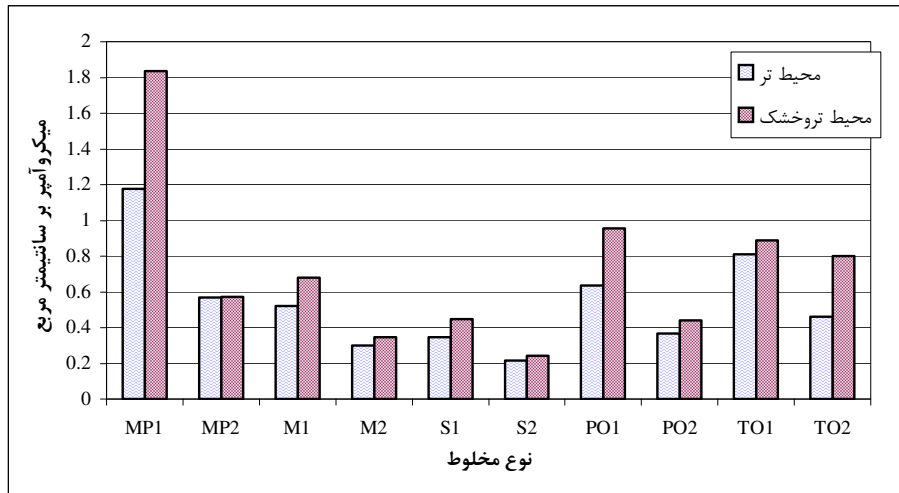
شکل ۷- مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتنی در سن ۹۰ روزه در محیط‌های مختلف



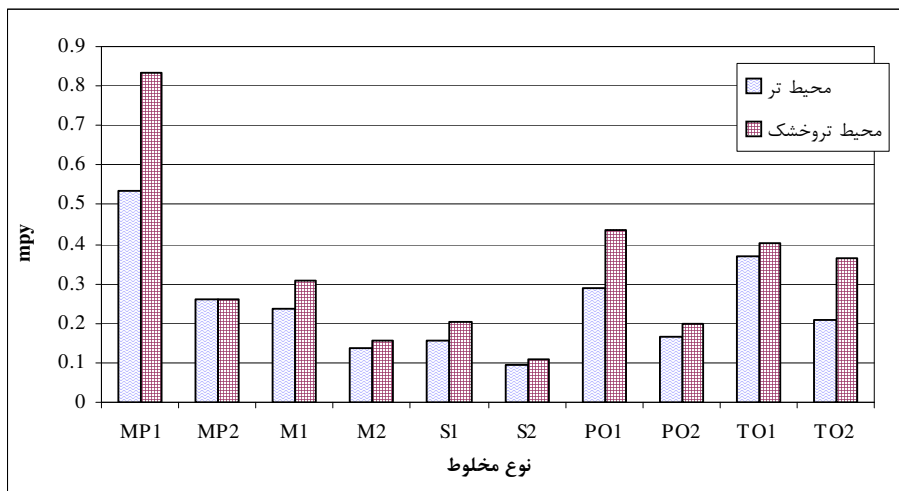
شکل ۸- مقدار مقاومت الکتریکی مخلوط‌های بتنی در سن ۱۸۰ روزه در محیط‌های مختلف

جدول ۸- رابطه بین شدت جریان خوردگی و احتمال خوردگی

شدت جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)	احتمال خوردگی
$I_{corr} < 0.1$	خوردگی پایین
$0.1 < I_{corr} < 0.5$	خوردگی بین حد پایین و متوسط
$0.5 < I_{corr} < 1$	خوردگی بین حد متوسط و بالا
$I_{corr} > 1$	خوردگی بالا



شکل ۹- مقادیر شدت جریان خوردگی فولاد مدفون در بتن با اندازه پوشش بتنی ۵ سانتیمتر برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط تر و خشک و تر در سن ۶ ماهه



شکل ۱۰- مقادیر سرعت جریان خوردگی فولاد مدفون در بتن با اندازه پوشش بتنی ۵ سانتیمتر برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط تر و خشک و تر در سن ۶ ماهه

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- مقاومت فشاری

همانطور که در شکل‌های (۲ و ۱) مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری مخلوط‌های بتنی که در محیط شاهد قرار داشته‌اند با افزایش عیار سیمان همراه با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و همچنین با گذشت زمان افزایش یافته است. بیشترین مقاومت فشاری مربوط به بتن‌های دارای ۱۵ درصد میکروسیلیس بوده است. همچنین به طور متوسط بیش از ۹۰ درصد مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های بتنی مورد آزمایش تا ۹۰ روز حاصل شده است. پس از بتن‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس، مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس بیشترین مقدار مقاومت فشاری را داشته‌اند. در کل می‌توان نتیجه گرفت که از نظر کسب مقاومت فشاری به ترتیب پوزولان‌های میکروسیلیس ازنا، پومیس عنصرود و توف سبلان عملکرد بهتری را نشان داده‌اند. به نظر می‌رسد که عملکرد ضعیف پوزولان توف سبلان ناشی از اندازه بزرگ دانه‌های آن در مقایسه با پوزولان‌های میکروسیلیس ازنا و پومیس عنصرود می‌باشد.

از نظر نقطه نظر خوردگی سولفاتی به طور خلاصه می‌توان گفت که وجود یون سولفات در دو محیط تر و تر خشک به علت تشکیل اترینگایت و ایجاد انبساط باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های بتنی نسبت به مخلوط‌های شاهد شده است و محیط تر خشک ارومیه، محیط مخربتری برای نمونه‌های بتنی است. زیرا نفوذ یون سولفات به داخل بتن در محیط تر و خشک بیشتر از محیط تر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان بدین نحو توجیه کرد که در مرحله خشک شدن، آب از سطح بتن تبخیر می‌شود و در نتیجه غلظت یون سولفات به دلیل کاهش آب در محلول موجود در منافذ، در قسمت خشک بتن افزایش می‌یابد. در مرحله تر شدن، آب نمک در مدت زمان خیلی کوتاه از طریق عملکرد موئینگی وارد بتن می‌شود. از این رو وقتی فرآیند تر و خشک شدن بتن برای مدت زمان طولانی ادامه می‌یابد، غلظت یون سولفات در بتن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند.

از نظر ضریب افت مقاومت فشاری نمونه‌ها در محیط دریاچه ارومیه، مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس کمترین ضریب افت مقاومت فشاری را داشته‌اند. اما میزان جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس بجای سیمان برای بهبود دوام بتن در مقابل حمله سولفات‌ها در محیط دریاچه ارومیه توصیه می‌گردد. مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد پومیس عنصرود، ضریب افت مقاومت فشاری کمتری نسبت به مخلوط‌های بتنی شاهد حاوی سیمان نوع دو نشان داده‌اند. مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد توف سبلان، عملکرد نزدیکی نسبت به مخلوط‌های بتنی شاهد حاوی

سیمان تیپ دو داشته‌اند. پس پوزولان‌ها باعث کاهش درصد افت مقاومت فشاری بتن می‌شوند زیرا:

۱- با جایگزینی پوزولان بجای بخشی از سیمان پرتلند، مقدار سیمان پرتلند در مخلوط کاهش یافته و بنابراین درصد C_3A که ضمن واکنش با یون سولفات با تولید اترینگایت باعث افزایش حجم و تخریب بتن می‌شود، کاهش می‌یابد.

۲- مصرف هیدروکسید کلسیم توسط مواد پوزولانی باعث می‌شود مقدار تولید گچ که محصول واکنش هیدروکسید کلسیم و یون سولفات است و تولید آن باعث کاهش مقاومت و افزایش حجم بتن می‌شود، کاهش یابد.

۳- پوزولان‌ها باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردند. در واقع ژل سیلیکات کلسیم هیدراته شده (C-S-H) که در اثر فعل و انفعال بین پوزولان و هیدروکسید کلسیم بوجود آمده است، به صورت یک پوشش عایق بر روی سطوح فازهای آلومینی قرار گرفته و در نتیجه مانعی در جهت تشکیل اترینگایت بوجود می‌آورد. بنابراین به نظر می‌رسد مقاومت سیمان‌های پوزولانی بیشتر بستگی به جلوگیری از حمله سولفات دارد.

۴- در صورتی که اترینگایت نیز تشکیل شود. چون اترینگایت فقط در محیط‌های با PH بیش از ۱۲ دچار انبساط می‌شود و از طرفی پوزولان‌ها با مصرف هیدروکسید کلسیم، PH را کم می‌کنند، از اینرو اترینگایت کمتر منبسط می‌شود.

۵- تشکیل C-S-H باعث چگال‌تر شدن بتن می‌شود. زیرا تشکیل آن، باعث پر شدن حفرات می‌شود. بنابراین سیمان را غیر قابل نفوذ می‌سازد و نتیجتاً یون‌های سولفات به راحتی نمی‌توانند به داخل ماتریس سیمان نفوذ کنند.

۴-۲- عمق کربناتاسیون و میزان نفوذ کلر

در مورد کربناتاسیون نتایج مندرج در جداول (۶ و ۵) نشان می‌دهد که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی همراه با افزایش میزان مصالح سیمانی، عمق کربناتاسیون تا حدودی کاهش می‌یابد. کمترین عمق کربناتاسیون مربوط به مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس می‌باشد و بعد از ۶ ماه بیشترین عمق کربناتاسیون مربوط به بتن‌های شامل توف سبلان است. پوزولان‌ها دو اثر متضاد بر پدیده کربناتاسیون دارند:

الف - کاهش قلیائیت بتن در اثر مصرف هیدروکسید کلسیم که باعث افزایش عمق کربناتاسیون می‌شود.

ب - ریزتر شدن منافذ بتن و در نتیجه کاهش نفوذ کربناتاسیون در مورد کاربرد میکروسیلیس علیرغم کاهش قلیائیت بتن، به علت نقش مهم دانه‌های میکروسیلیس در ریزتر شدن منافذ بتن و کم کردن نفوذپذیری در کل عمق کربناتاسیون کاهش پیدا می‌کند. در حالیکه تأثیر کاهش قلیائیت بتن در نتیجه استفاده از

می‌گردد. نهایتاً ترکیب دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی دوده سیلیس در ایجاد یک جسم بسیار متراکم و کم تخلخل، خود را نشان می‌دهد. بنابراین فعالیت پوزولانی باعث کاهش نفوذپذیری بتن و کاهش درجه قلیایی بتن (مقدار هیدروکسید کلسیم) شده و کاهش نفوذپذیری نیز باعث تغییر توزیع اندازه‌های منافذ و کاهش نفوذ یون کلرید می‌گردد. زیرا در مقایسه با خمیر سیمان پرتلند خمیر هیدراته شده سیمان پرتلند به اضافه پوزولان دارای منافذ خیلی ریزتری هستند که به آسانی قابل نفوذ نیستند. مقدار نفوذ یون کلرید با افزایش مقدار میکروسیلیس جایگزین شده به جای سیمان از ۱۰ درصد به ۱۵ درصد، کاهش می‌یابد. اما مقدار جایگزینی ۱۵ درصد میکروسیلیس تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد و مقدار ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس از لحاظ ملاحظات اقتصادی توصیه می‌گردد.

بترتیب مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد پومیس عنصرود، ۱۰ درصد توف سبلان و شاهد حاوی سیمان تیپ دو بعد از مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس کمترین میزان نفوذ یون کلرید را داشته‌اند. ضریب نفوذ یون کلرید به وسیله قانون فیک که به صورت معادله زیر می‌باشد، محاسبه گردید.

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{DCt}} \right) \right]$$

که در آن:

x = عمق از سطح

t = زمان سپری شده (ثانیه)

C = غلظت یون کلرید در عمق x از سطح (برحسب درصد)

C_0 = غلظت یون کلرید در سطح (برحسب درصد)

DC = ضریب نفوذ یون کلرید (cm^2/s)

erf = تابع خطا

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-t^2} dt$$

از نظر ضریب نفوذ یون کلرید، بیشترین ضریب نفوذ مربوط به مخلوط‌های بتنی شاهد حاوی سیمان تیپ دو می‌باشد. کمترین ضریب نفوذ یون کلرید متعلق به بتن‌های حاوی میکروسیلیس در کلیه مخلوط‌ها و در هر دو محیط می‌باشد. به طور کلی در پدیده نفوذ یون کلرید، بتن‌های حاوی پوزولان بهتر از بتن‌های شاهد حاوی سیمان تیپ دو عمل می‌کنند. پس از بتن‌های حاوی میکروسیلیس، ضریب نفوذ یون کلرید بتن‌های حاوی ۱۰ درصد پومیس عنصرود نسبت به پوزولان توف سبلان کمتر است که علت آن همان ریزتر شدن منافذ بتن و فعالیت این پوزولان

توف سبلان بیش از اثر ریزتر شدن منافذ آن است. لذا عمق کربناتاسیون در بتن حاوی توف سبلان بیشتر شده است. مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد پومیس عنصرود پس از مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس، کمترین میزان عمق کربناتاسیون را داشته‌اند.

درخصوص نفوذ یون کلرید مشاهده می‌شود که محیط تر و خشک به علت داشتن دو نوع جذب (جذب موئینگی با تبعیت از قانون انتشار فیک و جذب با تبعیت از پدیده تغلیظ سطح) محیط مخربتری نسبت به محیط تر برای نمونه‌های بتنی ایجاد می‌کند. با استفاده از جداول (۶ و ۵) می‌توان استنباط نمود که با افزایش عیار سیمان همراه با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، از میزان نفوذ یون کلرید کاسته شده است. دلیل این امر را می‌توان بدین نحو توجیه کرد که اولاً با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی نفوذپذیری بتن کاهش یافته و به تبع آن، نفوذ یون کلرید نیز تقلیل می‌یابد. ثانیاً با افزایش عیار مواد سیمانی مقدار C_3A موجود در مخلوط افزایش می‌یابد و همانطور که می‌دانیم کلریدها بیشتر با محصولات هیدراتاسیون C_3A ترکیب می‌شوند و نمک فریدل تشکیل می‌دهند. بنابراین مخلوطی که C_3A زیاد دارد با یون کلر زیادی واکنش شیمیایی انجام می‌دهد و نفوذ کلریدها به داخل بتن به کندی صورت می‌گیرد. در کلیه نمونه‌ها شیب افزایش یون کلرید تا سن ۳ ماهه بیشتر از شیب افزایش آن در فاصله سنی ۳ تا ۶ ماه است که علت این امر تغییر در ساختار بتن‌ها به علت بسته شدن منافذ می‌باشد. بتن‌های شاهد حاوی سیمان تیپ دو بیشترین میزان یون کلرید را در هر دو محیط داشته‌اند و بتن‌های شامل میکروسیلیس کمترین میزان یون کلرید را در همه شرایط نشان می‌دهند. زیرا در بین مواد پوزولانی، دوده سیلیس یکی از فعالترین آنهاست. رفتار پوزولانی دوده سیلیس در بتن، مهمترین خاصیتی است که باعث می‌شود بتن سخت شده دارای خواص قابل ملاحظه‌ای گردد. تفاوت اساسی بین دوده سیلیس و سایر پوزولان‌ها در این است که فعالیت پوزولانی دوده سیلیس زودتر از پوزولان‌های دیگر قابل حصول است. دوده سیلیس بواسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده بسیار مؤثری در بتن است. در جریان هیدراتاسیون سیمان پرتلند، بخش زیادی از فعالیت پوزولانی دوده سیلیس باعث تبدیل کریستال‌های هیدروکسید کلسیم غیر مفید به ژل می‌شود. این ژل که سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) می‌باشد دارای C/S کمتری نسبت به ژل‌های معمولی است و ظرفیت بالایی در ترکیب با یون‌های خارجی خصوصاً یون‌های بازی دارد.

خاصیت پرکنندگی دوده سیلیس نیز باعث توزیع یکنواخت و هموزن محصولات به دست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط

می‌باشد. همانطور که در جداول (۶ و ۵) مشاهده می‌شود به مرور زمان ضریب نفوذ یون کلرید در کلیه مخلوط‌ها کاهش می‌یابد که این امر احتمالاً به علت تغییر ریز ساختار بتن و بسته شدن منافذ آنها است.

۴-۳- پتانسیل خوردگی آرماتور، مقاومت الکتریکی بتن و شدت خوردگی آرماتور

مطابق جدول (۷) اگر پتانسیل خوردگی آرماتور کمتر از (۲۳۴-) میلی ولت باشد به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی در آرماتور وجود دارد. همانطور که در شکل‌های (۳) و (۲) مشاهده می‌شود، به مرور زمان اختلاف پتانسیل کلیه مخلوط‌های بتنی قرار گرفته در محیط‌های تروخسک و تر آنقدر کاهش می‌یابد که در مدت کمتر از ۶ ماه فعالیت همه نمونه‌ها، با اندازه پوشش‌های بتنی مختلف، در منطقه فعال قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که بتن‌های حاوی دوده سیلیس، کمترین پتانسیل خوردگی را در تمام محیط‌ها و در تمام طول آزمایش نشان می‌دهند. در مورد نمونه‌های قرار گرفته در محیط آزاد با توجه به شکل (۵)، در مورد کلیه مخلوط‌ها بعد از ۶ ماه، فعالیت خوردگی کاملاً متوقف شده بود و هیچ گونه فعالیتی دیده نمی‌شد. چون پتانسیل خوردگی همه آرماتورها در کلیه مخلوط‌ها بیشتر از (۸۴-) میلی ولت می‌باشد.

مطابق شکل (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی همه مخلوط‌هایی که در محیط شاهد قرار داشته‌اند با گذشت زمان افزایش یافته است. زیرا با افزایش سن بتن و افزایش محصولات هیدراتاسیون از مقدار یون‌ها کاسته می‌شود و همچنین به دلیل کاهش تخلخل، تحرک یون‌ها نیز کاهش می‌یابد. مقاومت الکتریکی همه نمونه‌ها با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی همرا با افزایش عیار مصالح سیمانی، افزایش یافته است. بتن‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی را در سنین مختلف داشته‌اند. پس از آن مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۰ درصد پومیس عنصرود و ۱۰ درصد توف سیلان به ترتیب بیشترین مقدار مقاومت الکتریکی را در محیط شاهد داشته‌اند. مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد توف سیلان و شاهد حاوی سیمان تیپ دو عملکردی نزدیک به هم را نشان می‌دهند که این امر با توجه به کامل نشدن واکنش پوزولانی توف سیلان قابل توجیه می‌باشد.

همانطور که در شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌کنیم مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار داده شده در محیط تر و خشک و تر ارومیه نسبت به محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته‌اند. زیرا با افزایش رطوبت و مقدار کلر آزاد در بتن مقاومت الکتریکی کاهش یافته و به تبع آن شدت خوردگی افزایش می‌یابد. مقدار کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار داده شده در محیط تروخسک ارومیه بیشتر از محیط تر ارومیه بوده است زیرا نفوذ یون کلر

در بیشتر نمونه‌های قرار گرفته در محیط تروخسک ارومیه بیشتر از محیط تر ارومیه می‌باشد. مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار داده شده در آب دریاچه ارومیه، در سه ماهه اول با گذشت زمان کاهش چشمگیری می‌یابد ولی بعد از گذشت سه ماه، روند افت مقاومت الکتریکی کندتر می‌شود که این بدان علت است که با گذشت زمان سرعت نفوذ یون کلر کاهش یافته و به تبع آن از ضریب نفوذ یون کلر کاسته می‌شود. به طور کلی از نقطه نظر مقاومت الکتریکی به ترتیب مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد پومیس عنصرود، ۱۰ درصد توف سیلان و شاهد حاوی سیمان تیپ دو عملکرد بهتری را در هر دو محیط داشته‌اند. نکته جالب توجه این است که درصد کاهش مقاومت الکتریکی در دو محیط تروخسک و تر نسبت به محیط شاهد در آزمون‌های بتنی شاهد حاوی سیمان تیپ ۲ کمتر از مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس می‌باشند. مقدار کاهش مقاومت الکتریکی در نمونه‌های بتنی شاهد حاوی سیمان تیپ ۲، ۵۰ درصد نسبت به محیط شاهد است، در حالیکه مقدار کاهش در نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس ۷۰ الی ۷۵ درصد می‌باشد. زیرا میکروسیلیس سبب افزایش مقدار کلر آزاد در بتن می‌شود و وجود یون‌های آزاد کلر در بتن حاوی میکروسیلیس سبب کاهش چشمگیر مقاومت الکتریکی می‌شود. ولی در بتن‌های شاهد حاوی سیمان تیپ ۲، یون‌های پیوند یافته کلر بیشتر می‌باشد هر چند عمق نفوذ کلر بیشتر از بتن میکروسیلیسی است. به عبارت دیگر کلرهای آزاد سبب کاهش شدید مقاومت الکتریکی می‌شوند ولی عمق نفوذ کلر، اثر کمتری بر مقاومت الکتریکی می‌گذارد. اما باید توجه داشت که به هر حال مقاومت الکتریکی بتن حاوی میکروسیلیس بیشتر از بتن شاهد حاوی سیمان تیپ ۲ است.

در کل می‌توان گفت که چون مقاومت الکتریکی همه مخلوط‌هایی که در محیط تر و خشک و تر ارومیه قرار داشته‌اند به مقدار کمتر از 50 kohm.cm کاهش یافته‌اند از نقطه شدت خوردگی در محدوده متوسط تا شدید قرار می‌گیرند. در محیط تر اگر چه قدر مطلق پتانسیل خوردگی آرماتورها بسیار بالا است و مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار گرفته در این محیط نسبت به محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است، اما همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود به علت عدم وجود اکسیژن در این محیط شدت خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن در همه مخلوط‌ها به جز مخلوط بتنی شاهد حاوی سیمان تیپ ۲ با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، ناچیز بوده و از نظر احتمال خوردگی مطابق جدول (۸) در حد پایین می‌باشند.

میزان شدت و سرعت خوردگی آرماتورها در محیط تروخسک بیشتر از محیط تر می‌باشد زیرا در محیط تروخسک احتمال دسترسی آرماتورها به اکسیژن بیشتر می‌باشد. در ضمن نفوذ بیشتر یون

- in marine environments", cement and concrete research, pp. 345-350, 2000.
- [4] J.M.R. Dotto, A. G. de Abreu, D. C. Dal Molin, I.L. Muller, "Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars", cement and concrete composites, pp. 31-39, 2004.
- [5] Kumar Mehta, "Concrete in the marine environment", Elsevier Applied Science, LONDON and NEYYORK, 1991.
- [۶] رضانیانپور علی اکبر، دوام بتن با سیمان‌های پوزولانی در شرایط آزمایشگاهی مشابه خلیج فارس، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۰.
- [7] R. D. Hootan, "influence of silica fume Replacement of cement on physical properties and Resistance to sulfate Attack, freezing and Throwing, and Alkali-silica Reactivity", ACI Materials Journal, March-April, 1993.
- [۸] گلگذار، محمدعلی، ریاحی، احمد رضا، الکتروشمی خوردگی، دانشگاه اصفهان، مرکز نشر، شهریور ۱۳۷۸.
- [9] S.U.AL-Dulaijan, M. Maslehuddin, M. M. AL-Zahrani, A. M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, "sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate", cement and concrete composites, 2003.
- [۱۰] رضانیانپور، علی اکبر و همکاران، توصیه‌هایی برای پایایی بتن سواحل جنوبی کشور، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۲.
- [11] Ehtesham Hussain, Ahmad S. AL-Gahtani, and Rasheeduzzafar, "Chloride Threshold for corrosion of Reinforcement in concrete", ACI materials Journals, November – December, 1996.
- [12] ACI Corrosion of metals in concrete, ACI 222R-96
- [13] ACI Guide for the use of silica fume in concrete, ACI 234R-96
- [14] SOROKA, I. "Concrete in hot environments", National Building Research Institute, Faculty of Civil Engineering, Technion - Israel Institute of Technology, 1993.
- کلرید در محیط تروخشک نسبت به محیط تر، به این امر سرعت می‌بخشد. مخلوط‌های بتنی حاوی میکروسیلیس کمترین میزان شدت خوردگی را در هر دو محیط داشته‌اند. اما میزان جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس به جای سیمان از لحاظ اقتصادی توصیه می‌گردد. با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی همراه با افزایش میزان مصالح سیمانی، میزان شدت خوردگی آرماتورها در هر دو محیط کاهش می‌یابد. بترتیب مخلوط‌های بتنی حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد پومیس عنصرود و ۱۰ درصد توف سیلان کمترین میزان شدت خوردگی را در هر دو محیط داشته‌اند. در مورد کلیه مخلوط‌های قرار گرفته در هر دو محیط تروخشک و تر، کاهش در مقاومت الکتریکی طی زمان رخ می‌دهد که احتمالاً این امر افزایش میزان شدت خوردگی با گذشت زمان را در پی خواهد داشت.

۵- نتیجه‌گیری

۱. در محیط دریاچه ارومیه، دوام بتن مهمترین عاملی است که در ساخت و سازه‌های بتن باید مورد توجه قرار گیرد. در این محیط، بتنهایی که در معرض پاشش نمک آب دریاچه و سیستم تروخشک قرار دارند نسبت به محیط مغروق در آب دریاچه آسیب‌پذیرتر بوده، نیاز به توجه ویژه در ساخت و نگهداری دارند.
۲. در شرایط مغروق در آب دریاچه، اگر چه پتانسیل خوردگی آرماتورها بسیار بالاست و مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار گرفته در این محیط نسبت به محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است، اما به علت عدم وجود اکسیژن شدت خوردگی آرماتورها ناچیز است.
۳. بتن‌های دارای سیمان میکروسیلیس ازنا، بهترین عملکرد را در مقابل خرابی و خوردگی داشته‌اند. پس از آن سیمان‌های دارای پومیس عنصرود و توف سیلان به ترتیب دوام بیشتری را در محیط دریاچه ارومیه نشان داده‌اند.
۴. استفاده از سیمان به میزان ۴۰ تا ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن، نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴ و عمل‌آوری مطلوب، به ویژه برای بتن‌های دارای سیمان‌های پوزولانی پایایی بتن‌ها را افزایش داده است.
۵. اندازه پوشش بیشتر برای سازه‌های بتنی که در معرض تروخشک شدن قرار دارند، توصیه می‌شود. مخلوط‌های پوزولانی با پوششی مناسب، دارای ارجحیت استفاده در این محیط می‌باشند.

مراجع

- [1] A. Bentur, S. Diamond and N. S. Berke, "Steel Corrosion in Concrete", E & FN SPON, LONDON, 1997.
- [2] David A. Whiting and Mohamad A. Nagi, "Electrical Resistivity of Concrete –A Literature Review", Portland Cement Association, 2003.
- [3] Sunil Kumar, "Influence of water quality on the strength of plain and blended cement concretes