بررسی دوام بتن مسلح در محیط دریایی خورنده شدید بر حسب موقعیت قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا

امین محمودی[۱]، حسن افشین[۲*] ، حبیب حکیم زاده[۳]، داود جلالی وحید[۴]

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه صنعتی سهند
۲- استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی سهند
۳- دانشیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی سهند
۴- دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

میزان آسیب پذیری یک سازه بتنی کنار ساحل وابستگی شدیدی به محل قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا دارد. در این پژوهش،به منظور شبیه‌سازی فیزیکی محیط دریا و فراهم کردن شرایط نگهداری نمونه ها در شرایطی مشابه شرایط دریا ، کانالی سرپوشیده در ابعاد آزمایشگاهی به همراه دستگاه موج ساز با قابلیت ایجاد امواج منظم با ارتفاع و پریود موج مختلف در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه طراحی و ساخته شد. همچنین از آب دریاچه ارومیه و نگاه داشتن دمای ثابت محیط بسته کانال در محدوده ۳۵-۳۰ درجه سانتیگراد برای فراهم نمودن محیط دریایی خورنده شدید استفاده گردید. نمونه های بتن مسلح و غیر مسلح با نسبت‌های آب به سیمان عیارهای سیمان متفاوت و با استفاده از میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی ساخته شدند و در موقعیت‌های محیطی متفاوت مغروق، جزر و مدی، پاششی، اتمسفری، محیط آزاد آزمایشگاه و حوضچه عمل‌آوری آب شیرین نگهداری شدند. آزمایش هایی نظیر مقاومت فشاری بتن ، میزان نفوذ یون کلرید ، مقاومت الکتریکی(با استفاده از مدار الکتریکی پل وتستون) ، پتانسیل خوردگی(با استفاده از دستگاهHalf Cell) و شدت خوردگی آرماتور(با استفاده از دستگاه پتانسیواستات) در سنین مختلف بر روی نمونه ها انجام گرفت. عملکرد نمونه های قرار گرفته شده در نواحی مختلف نشانگر این مطلب است که، میزان شدت و سرعت خوردگی آرماتور در ناحیه پاششی بیشتر از نواحی دیگر می‌باشد. در ناحیه مغروق اگرچه قدرمطلق پتانسیل خوردگی آرماتورها بسیار بالا است اما به علت عدم وجود اکسیژن کافی در این محیط شدت خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن ناچیز بوده و از نظر احتمال خوردگی در حد پایین می‌باشند.

کلمات کلیدی: بتن، سازه‌های ساحلی، شدت خوردگی آرماتور، نفوذ یون کلرید، پتانسیل خوردگی، ناحیه پاششی، ناحیه اتمسفری

INVESTIGATION OF THE REINFORCED CONCRETE DURABILITY IN SEVERE CORROSIVE MARINE ENVIRONMENT ACCORDING TO ITS POSITION WITH RESPECT TO SEA LEVEL

A. Mahmoodi[1], H. Afshin[2], H. Hakimzadeh[3], D.Jalali[4]

1- Ph.D. Student, Dept. of Civil Eng., Sahand University of Technology, Tabriz
2- Assistance Professor, Dept. of Civil Eng., Sahand University of Technology, Tabriz
3- Associate Professor, Dept of Civil Eng., Sahand University of Technology, Tabriz
4- Associate Professor, Dept. of Mech. Eng., Sahand University of Technology, Tabriz

* نویسنده مسوول مقاله hafshin@sut.ac.ir

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

Abstract

The intensity of damage in concrete structures has a vital relationship to the position of concrete respect to sea level. A hydraulic model consists of a channel and a wave maker machine capable of making regular waves with various heights and periods, has been designed and constructed in hydraulic laboratory to simulate the marine environment and conditions in this research study. The Oroomiyeh lake water and controlling the temperature of channel in 30-35 °c range were used to reproduce severe corrosive marine environment. Different water/ cement ratios and different cement contents were selected for reinforcement and plain concrete specimens. Furthermore, silica fume was used as supplementary cementing material.

After standard curing, these specimens were kept in different conditions: submerged, tidal, splash, atmospheric and outdoors.

A series of tests such as corrosion potential measurement, electrical resistivity and reinforcement corrosion intensity, chloride ion concentration and compressive strength were carried out at different ages. In this paper, specimens' durability in different zones have been investigated. Results show that in view of corrosion the splashing zone has the worst conditions and in submerged condition, because of thin air, although corrosion potential of reinforcement is high, the rate of corrosion intensity is low.

Keywords: concrete, coastal structures, reinforcement corrosion, chloride ion concentration, corrosion potential, splashing zone, atmospheric zone

۱- مقدمه

امروزه به دلیل گسترش و اهمیت فعالیت‌های نفتی و حمل و نقل دریایی و همچنین توجه به استخراج معادن در بستر دریاها، فعالیت‌های ساختمانی مانند ساخت اسکله‌ها، سکوها و سازه‌های مانند آنها در مناطق ساحلی و اقیانوسی افزایش چشمگیری داشته است. هر چند بتن به عنوان یک ماده با دوام در محیط دریا محسوب می‌گردد، اما خرابی‌های زیادی از سازه‌های بتنی کنار ساحل گزارش شده است. هنگام طراحی سازه‌های بتنی در محیط دریا در نظر گرفتن عوامل مخربی که بتن طی سالیان دراز باید در معرض آن قرار گیرد ضروری است [۳] . میزان آسیب پذیری یک سازه بتنی کنار ساحل وابستگی شدیدی به محل قرارگیری بتن نسبت به تراز آب دریا دارد. از این نظر سازه قرار گرفته شده در کنار ساحل را می توان به چهار ناحیه : اتمسفری، پاششی ، جزر و مدی و غوطه وری تقسیم نمود[۱و۲].

در زمینه دوام بتن در محیط‌های دریایی کارهای تحقیقاتی فراوانی انجام شده است، که به عنوان نمونه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

بررسی نفوذ یون کلرید در داخل بتن در محیط دریایی در شرایط جزر و مد و اتمسفری و ناحیه اسپری که در سال ۱۹۹۸ توسط محققین دانشگاه لیسبون منتشر شده است[۱۳].

ارزیابی دوام دراز مدت (۱۵ ساله) نمونه‌های بتنی ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی، سرباره و خاکستر بادی در شرایط محیطی دریایی در سواحل ژاپن تحت شرایط جزر و مد که در سال ۲۰۰۰ منتشر شده است[۴].

در ایران نیز در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه صنعتی سهند تحقیقی انجام گرفته است که در آن، دوام بتن مسلح حاوی پوزولان‌های مختلف که در معرض شرایط متفاوت محیطی شبیه‌سازی شده در آزمایشگاه: آزاد، مغروق و جزر ومد قرار داده شده بودند، در مدت ۶ ماه بررسی شده است[۱۵].

همچنین توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، دوام نمونه‌های بتنی ساخته شده تحت شرایط مختلف در منطقه خلیج فارس بررسی و نتایج آن در سال ۲۰۰۶ منتشر شده است. در تحقیق اخیر، نمونه‌های ساخته شده در شرایط محیطی واقعی مختلف : در

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

ساحل، ناحیه جزر و مد دریا و کاملاً مغروق در آب دریا در سواحل بندرعباس نگهداری می‌شدند[۵].
در سال ۲۰۰۷ نتیجه یک کار تحقیقاتی در سواحل ۱۱ کشور در مقاله‌ای تحت عنوان " اثرات محیط دریا بر روی دوام بتن مسلح " منتشر شده است[۱۲].
در سال ۲۰۰۸ مقاله‌ای با عنوان " اثرات ناحیه جزر ومدی خلیج فارس بر روی دوام بتن حاوی میکروسیلیس" توسط محققین دانشگاه کاونتری منتشر شده است. در مقاله اخیر، نمونه‌های بتنی در شرایط جزر و مدی شبیه سازی شده در آزمایشگاه و همچنین در سواحل خلیج فارس و حوضچه آب شیرین، نگهداری و تست‌های مقاومت فشاری و جذب آب بر روی نمونه‌ها انجام شده است[۱۴].
شاید بتوان گفت در اکثر کارهای تحقیقاتی که تاکنون گزارش شده است، پارامترهای دوام بتن را در نواحی جزر و مد، مغروق و آزاد مورد بررسی قرار داده‌اند ولی در نواحی پاششی و اتمسفری بررسی زیادی صورت نگرفته است. انجام تحقیقات در شرایط واقعی دریایی مشکل و نیاز به امکانات و تجهیزات گسترده ای می باشد لذا می‌توان در آزمایشگاه با شبیه سازی شرایط دریایی آزمایشات لازمه را بر روی نمونه های مورد نظر انجام داد.
در این پژوهش، پارامترهای دوام بتن علاوه بر ناحیه های جزر و مدی، مغروق و آزاد، در ناحیه‌های پاششی و اتمسفری نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و کلیه نواحی با هم مقایسه شده‌اند.

۲- مواد و روش‌های آزمایشات

الف) مصالح مصرفی

مشخصات شیمیایی سیمان و ماده جایگزین سیمان در جدول ۱ آمده است.

شن مصرفی از معدن قره‌قوم مرند با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر بود و از ماسه اصلاح شده معدن سرام تبریز (با گذراندن از الک ۴/۷۵ میلیمتر) با مدول نرمی ۲/۹۴ استفاده شد. چگالی شن و ماسه به ترتیب ۲۶۵۰ و ۲۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. آب مصرفی در ساخت مخلوط‌ها آب شرب پردیس دانشگاه بود.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان و ماده جایگزین سیمان مصرفی

ترکیب شیمیایی ٪	سیمان تیپ ۲ صوفیان	میکروسیلیس ازنا
SiO_2	۲۱/۹۷	۹۵/۱
Al_2O_3	۴/۶۲	۱/۳۲
Fe_2O_3	۳/۵۵	۰/۸۷
MgO	۲/۳۳	۰/۹۷
CaO	۶۴/۵۶	۰/۴۹
SO_3	۱/۶۵	۰/۱
C_3S	۵۰/۶۸	-
C_2S	۲۴/۷۶	-

ب) طرح های اختلاط، جزئیات نمونه‌ها نحوه نگهداری و آزمایش‌های در نظر گرفته شده
در این پروژه ۲ طرح اختلاط با دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و۰/۵۵ و دو عیار سیمان ۴۰۰ وkg/m^3 ۳۵۰ و استفاده از میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی مورد استفاده قرار گرفتند. اسلامپ مورد نظر در کلیه مخلوطها (۱۰/۵-۱۰ cm) بود که با اضافه نمودن فوق روان کننده تأمین گردید.مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات مخلوطهاي ساخته شده

علامت اختصاری	نوع مخلوط	$\frac{W}{B}$	وزن مصرفی – کیلوگرم در هر متر مکعب				
			سیمان تیپ ۲	میکروسیلیس	ماسه SSD	شن SSD	آب
M1	سیمان نوع ۲	۰/۵۵	۳۵۰	-	۹۷۷	۸۲۵	۱۹۲
M2	سیمان نوع۲+۱۰ درصد میکروسیلیس	۰/۴۵	۳۶۰	۴۰	۷۸۷	۹۷۷	۱۸۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

کلیه نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از زمان ساخت، از قالبها خارج و به مدت ۷۲ ساعت حوضچه‌های عمل آوری با آب معمولی در دمای ۲۵-۲۰ درجه سانتیگراد و سپس به محیط‌های از قبل پیش‌بینی شده منتقل شدند.

محیط آزاد: محیط داخل فضای آزمایشگاه

محیط شاهد: حوضچه عمل آوری با آب معمولی در دمای۲۵-۲۰ درجه سانتیگراد

محیط تر (محیط مغروق): حوضچه‌ای دارای آب دریاچه ارومیه و در دمای ۳۵-۳۰ درجه سانتیگراد که آب آن در فواصل یک ماه تعویض می‌شد.

محیط تر و خشک (جزر و مد): این محیط از دو حوضچه حاوی آب دریاچه ارومیه تشکیل شده بود که به وسیله پمپ، آب حوضچه‌ها به یکدیگر پمپاژ می‌شد. در هر ۲۴ ساعت یک سیکل تر و خشک صورت می‌گرفت که هر سیکل ۱۰ ساعت خیس شدن و ۱۴ ساعت خشک شدن را در بر داشت. دمای این محیط نیز۳۵- ۳۰ درجه سانتیگراد بود.

ناحیه پاششی (Splash Zone): برای این محیط از یک کانالی به طول ۱۰ متر و عرض ۰/۷ متر و عمق ۱ متر به همراه دستگاه موج ساز با قابلیت ایجاد امواج منظم استفاده شد. این کانال دارای آب دریاچه ارومیه بود که نمونه ها با قرارگرفتن در سطح تراز آب ساکن در معرض برخورد موج و پاشش آن قرار می گرفتند.

ناحیه اتمسفری (Atmospheric Zone): برای شبیه سازی این ناحیه از یک پمپ آب به همراه یک سری نازل که آب را بصورت قطرات بسیار ریز (تقریباً مه مانند) اسپری می کرد استفاده شد و نمونه ها با کمی فاصله از این سیستم قرار گرفته بودند تا ناحیه اتمسفری تا حد امکان دقیق شبیه سازی شود.

در جدول ۳ املاح موجود در دریاچه ارومیه و مقایسه آن با خلیج فارس آورده شده است. جرئیات نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش و شرایط نگهداری آنها در جدول ۴ آمده است.



شکل ۱- الف) دستگاه موج‌ساز مکانیکی طراحی و ساخته شده



شکل ۱- ب) محل قرارگیری نمونه‌ها در ناحیه پاششی



شکل ۲- محل نگهداری نمونه‌ها در ناحیه‌های مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

جدول ۳- مقایسه ترکیبات آب دریاچه ارومیه (Mg/lit)

	دریاچه ارومیه	خلیج فارس	نسبت املاح دریاچه ارومیه به خلیج فارس
K^+	۱۴۰۴	۴۵۰	۳/۱۲
Ca^{2+}	۱۳۶۰	۴۳۰	۳/۱۶
Mg^{2+}	۱۲۴۱۸	۱۴۶۰	۸/۵
So_4^{2-}	۲۲۷۵۲	۲۷۲۰	۸/۳
Na^+	۸۶۰۶۶	۱۲۴۰۰	۶/۹
Cl^-	۱۴۳۷۰۴	۲۱۴۵۰	۶/۷

۳- آزمایش‌ها و نتایج آن

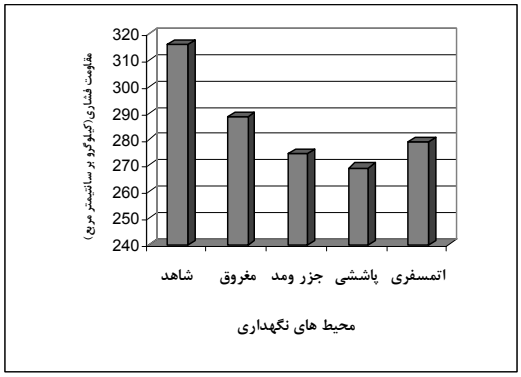
مقاومت فشاری نمونه‌های۱۰× ۱۰ × ۱۰ سانتیمتر نگهداری شده در محیط‌های مختلف در سنین ۲۸ ،۹۰و ۱۸۰ روزه تعیین گردید. سپس این نتایج با اعمال ضرایب تبدیل مربوطه به مقاومت فشاری معادل نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد cm ۳۰× ۱۵ تبدیل شدند. کاهش مقاومت فشاری بتن به وسیله ضریب افت مقاومت (SDF) مطابق رابطه زیر بیان می‌گردد [۱۶].

$$SDF = \left(1 - \frac{\sigma_R}{\sigma}\right) \times 100$$

σ_R = مقاومت فشاری نمونه های بتنی قرار گرفته در محیط خورنده بعد از مدت زمان t

σ = مقاومت فشاری نمونه های بتنی قرار گرفته در محیط شاهد بعد از مدت زمان t

همچنین پتانسیل خوردگی، شدت خوردگی آرماتور و مقاومت الکتریکی در سنین مختلف روی نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های متفاوت اندازه‌گیری شد. میزان پتانسیل خوردگی توسط دستگاه Half Cell با الکترود مرجع Ag/AgCl در سنین ۲۸، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰و ۱۸۰ روزه تعیین گردید [۶]. برای اندازه‌گیری شدت خوردگی از دستگاه پتانسیواستات استفاده شد[۷و۸] و از مدار الکتریکی پل وتستون برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در سنین ۹۰و ۱۸۰ روزه استفاده شد [۹]. در سن ۳ و ۶ ماهه برای اندازه‌گیری میزان نفوذ یون کلر در عمق ۳-۲ سانتیمتری، از نمونه بتن پودر تهیه گردید و درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن اندازه گیري شد.

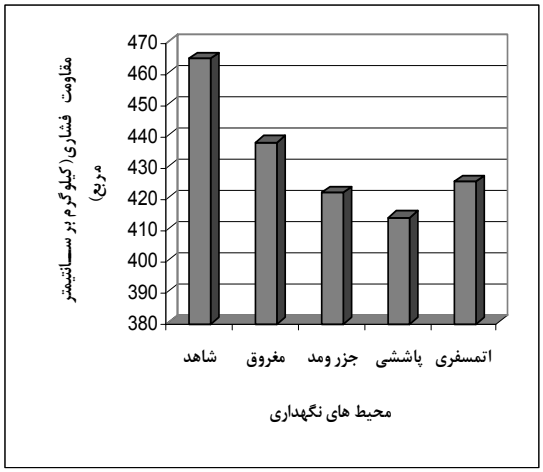


شکل ۳- مقایسه مقاومت فشاری طرح M1 در محیط های مختلف در سن۱۸۰ روزه (معادل استوانه‌ای cm۳۰* ۱۵)

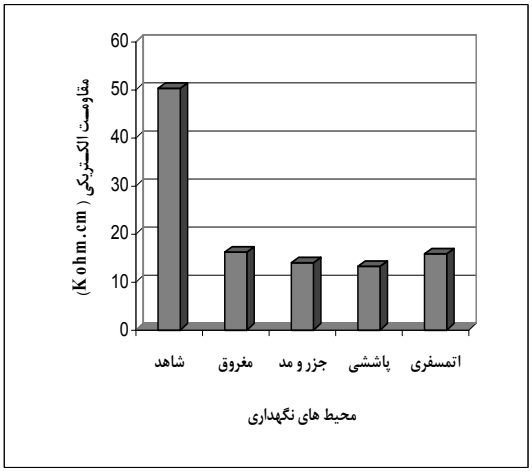
جدول۴- جزئیات و ویژگي‌هاي نمونه‌هاي ساخته شده و محیط‌هاي نگهداري آنها

نوع آزمایش	اندازه نمونه‌ها(cm)	ویژگی‌ها	محیط نگهداری
مقاومت فشاری	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، مغروق، جزر و مد، پاششی، اتمسفری
میزان نفوذ یون کلر	۱۰×۱۰×۱۰	-	مغروق، جزر و مد، پاششی، اتمسفری
پتانسیل و شدت خوردگی	۱۰×۱۰×۲۰	پوشش بتنی ۲/۵ cm	آزاد، مغروق، جزر و مد، پاششی، اتمسفری
مقاومت الکتریکی	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، مغروق، جزر و مد، پاششی، اتمسفری

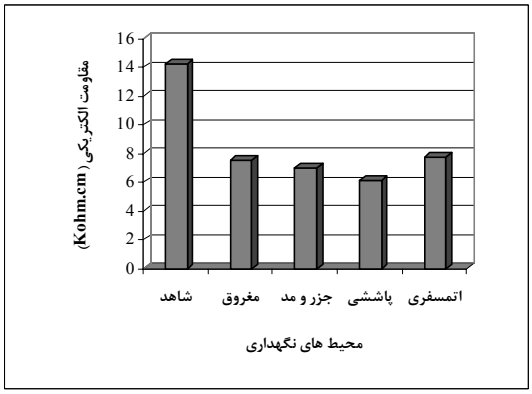
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]



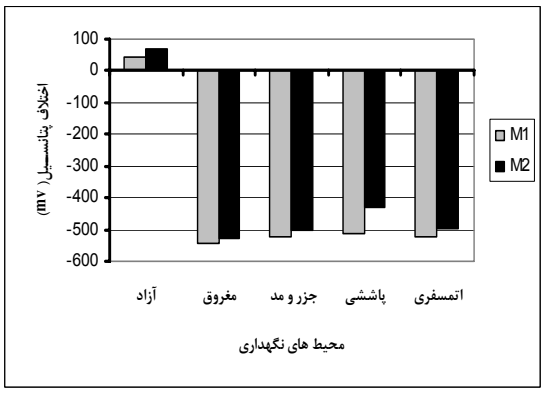
شکل ۴- مقایسه مقاومت فشاری طرح M2 در محیط های مختلف در سن ۱۸۰ روزه (معادل استوانه‌ای ۳۰cm* ۱۵)



شکل ۶- مقایسه مقاومت الکتریکی طرح M2 در محیط های مختلف در سن ۱۸۰ روزه



شکل ۵- مقایسه مقاومت الکتریکی طرح M1 در محیط های مختلف در سن ۱۸۰ روزه



شکل ۷- مقادیر متوسط اختلاف پتانسیل طرح M1 وM2 در محیط‌های مختلف در سن ۱۸۰ روزه

جدول ۵- ضرایب افت مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در محیط‌های مختلف معادل استوانه ۳۰cm* ۱۵ (٪)

محیط‌های نگهداری	M1ضریب افت مقاومت فشاری طرح		M2ضریب افت مقاومت فشاری طرح	
	سن ۳ ماهه	سن ۶ ماهه	سن ۳ ماهه	سن ۶ ماهه
مغروق	۶/۶۸	۸/۷۴	۴/۴۸	۵/۷۴
جزر و مد	۱۲/۰۵	۱۳/۱۷	۶/۳۷	۹/۱۵
پاششی	۱۴/۹۶	۱۴/۷۸	۸/۰۶	۱۰/۸۶
اتمسفری	۷/۳۲	۱۱/۶۹	۵/۳۰	۸/۴۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

جدول ۶- نتایج آزمایش تعیین میزان یون کلرید بتن ها در محیط های نگهداری مختلف

محیط‌های نگهداری	درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن در عمق (۳- ۲ cm) طرح M1		درصد میزان کلر بر حسب وزن بتن در عمق (۳- ۲ cm) طرح M2	
	سن ۳ ماهه	سن ۶ ماهه	سن ۳ ماهه	سن ۶ ماهه
مغروق	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۱۳
جزر و مد	۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۱۹
پاششی	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۲۳
اتمسفری	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۱۶

جدول ۷- شدت جریان خوردگی برای نمونه های مختلف در محیط های مختلف در سن ۱۸۰ روزه

علامت اختصاری	نوع مخلوط	$\frac{W}{B}$	شدت جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$)			
			ناحیه مغروق	ناحیه جزر و مدی	ناحیه پاششی	ناحیه اتمسفری
M1	سیمان نوع ۲	۰/۵۵	۰/۸۳۹	۱/۲۴۰	۱/۶۰۹	۰/۹۵۰
M2	سیمان نوع۲+۱۰ درصد میکروسیلیس	۰/۴۵	۰/۳۳۳	۰/۴۱۲	۰/۴۲۳	۰/۳۹۸

جدول ۸- محدوده پتانسیل خوردگی و احتمال خوردگی طبق ASTM C876 برای نیم پیل Ag/AgCl [۶]

محدوده پتانسیل	احتمال خوردگی
≤-84 mv	به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود ندارد
-234 mv≤ ≤ -84 mv	فعالیت خوردگی قطعی نمی‌باشد، اما امکان آن کاملاً وجود دارد
-234 mv≤	به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود دارد.

جدول ۹- محدوده‌های شدت خوردگی و تفسیر آن[۸]

Corrosion Current Density($\mu A/cm^2$)	Extent of Corrosion
$I_{corr} < 0.1$	Passive condition
$0.1 < I_{corr} < 0.5$	Low to moderate corrosion
$0.5 < I_{corr} < 1$	Moderate to high corrosion
$I_{corr} > 1$	High corrosion

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

الف) مقاومت فشاری

با توجه نتایج آزمایشات مقاومت فشاری، در تمام سنین برای طرح‌های مختلف، نمونه‌های قرار گرفته در ناحیه پاششی دارای کمترین مقاومت فشاری می‌باشند و پس از ناحیه پاششی، نمونه‌های قرار گرفته در ناحیه جزر و مد دارای کمترین مقاومت فشاری می‌باشند. دلیل این امر می‌توان را بدین نحو توضیح داد که هنگامی که بتن، به صورت پیوسته تحت سیکل‌های تر و خشک شدن متوالی قرار می‌گیرد، دچار شوره‌زدگی در سطح می‌شود. شوره‌زدگی در واقع نمکهای تراوش کرده از محیط بتن به خارج است که بر سطح بتن رسوب می‌کند. تراوش در حد زیاد باعث افزایش تخلخل بتن می‌شود و در نتیجه مقاومت بتن کاهش یافته و به علت افزایش نفوذپذیری در برابر حملات عناصر شیمیایی مخرب تضعیف می‌گردد.

وقتی که بتن در معرض آب حاوی نمک قرار می‌گیرد، محلول نمک به داخل بتن نفوذ می‌کند و پس از تبخیر آب، نمک داخل منافذ بتن، بلوری می‌شود. بر اثر تکرار و ادامه تبخیر، رسوب نمک در منافذ لایه‌های سطحی افزایش می‌یابد و در نتیجه بلوری شدن نمکها، بتن ترک می‌خورد. این پدیده در سازه‌هایی که در ناحیه پاششی دریا واقع‌اند دیده می‌شود.

از طرف دیگر وجود یون سولفات در محیط‌های مغروق، جزر و مد، پاششی و اتمسفری، می‌تواند باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های بتنی نسبت به مخلوط‌های شاهد شود. از نقطه نظر خرابی سولفاتی، ناحیه‌هایی که به صورت پیوسته تحت سیکل‌های تر و خشک شدن متوالی قرار می‌گیرند، محیط‌های مخربتری نسبت به محیط مغروق برای مخلوط‌های بتنی می‌باشند. دلیل این امر را می‌توان بدین نحو توضیح داد که، نفوذ یون سولفات به داخل بتن در محیط‌هایی که تحت سیکل‌های تر و خشک متوالی قرار دارند، بیشتر از محیط مغروق است. همچنین وجود مقدار زیاد کلرورها در آب دریا، می‌تواند باعث تشدید خرابی‌های سولفاتی شود. زیرا گچ و سولفوآلومینات‌کلسیم در محلول‌های کلروری بهتر حل می‌شوند تا در آب و در نتیجه بوسیله آب دریا حل شده و به خارج محیط بتن راه می‌یابند که باعث افزایش تخلخل بتن و در نتیجه مقاومت بتن کاهش می‌یابد. از آنجایی‌که ناحیه پاششی دارای بیشترین میزان نفوذ یون کلر می‌باشد، بنابراین خرابی‌های ناشی از یونهای سولفات در این ناحیه شدیدتر خواهد بود.

ضریب افت مقاومت فشاری در طرح M2 در سنین مختلف نسبت به طرح M1 کمتر می‌باشد دلیل این امر را می‌توان بدین نحو توجیه کرد که در طرح M2 با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، نفوذپذیری بتن کاهش می‌یابد و از سوی دیگر میکروسیلیس به علت ریزی ذرات خود که به طور متوسط در حدود ۱۰۰ برابر ریزتر از قطر متوسط ذرات سیمان است و فضای مابین دانه‌های سیمان را پر می‌کند، باعث افزایش تراکم و کاهش نفوذپذیری ملات می‌شود، همچنین میکروسیلیس یک پوزولان قوی بود و با انجام واکنش پوزولانی ریز ساختار بتن را بهبود و نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد، بدین ترتیب وجود میکروسیلیس به صورت چشمگیری مشخصات مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشد [۱۱].

ب) نفوذ یون کلر

در خصوص یون کلر مشاهده می شود که ناحیه پاششی به علت داشتن جذب موئینگی و جذب با تبعیت از پدیده تغلیظ سطح محیط مخربتری نسبت به سایر ناحیه‌ها برای نمونه‌های بتنی ایجاد می‌کند [۱۰]. علت این امر را می‌توان بدین نحو توجیه کرد، غلظت کلرید در لایه سطحی تابع مجموع دو پدیده می‌باشد: ۱- جذب یون با تبعیت از قانون انتشار Fick ۲- پدیده تغلیظ سطح [۱۷]

$$F'_c = F_c + S$$

F'_c سرعت انتقال یون کلرید آزاد است که تابع انتشار و مطابق با گرادیان غلظت است و همین طور تابع هجوم یون کلرید می‌باشد که باعث تغلیظ سطح می‌شود ($mol/cm^2/day$).

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

F_c سرعت انتقال یون کلرید مطابق گرادیان غلظت که از تئوری انتشار مشتق می‌شود ($mol/cm^2/day$)
S = تابعی است که برای سرعت انتقال یون کلرید در جهت تغلیظ سطح مطرح می‌شود و تابع مقدار کلراید آزاد در لایه سطحی است.
همچنین تغلیظ سطح، تابع مقدار کلرید در لایه سطحی می‌باشد. از ویژگی‌های معادله $F'_c = F_c + S$ این است که وقتی غلظت یون کلرید در سطح بتن نسبت به محیط احاطه شده آن کمتر باشد جهت S و F_c هر دو از محیط احاطه شده به داخل بتن می‌باشد، و اگر غلظت کلرید در سطح بتن نسبت به محیط آن بیشتر باشد جهتF_c از بتن به محیط احاطه شده می‌باشد و جهت S عکس جهت F_c است (یعنی از محیط به سطح بتن می‌باشد) که این پدیده بیشتر در ناحیه جزر و مدی مشاهده می‌شود و زمانی می‌رسد که در این ناحیه جهت S عکس جهت F_c است. در صورتیکه در ناحیه پاششی این عمل محسوس نمی‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که ناحیه پاششی از نظر نفوذ یون کلرید ناحیه مخربتری نسبت به سایر نواحی می‌باشد.
میزان نفوذ یون کلرید در طرح M2 در سنین مختلف نسبت به طرح M1 کمتر می‌باشد می‌توان گفت که در طرح M2، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از میکروسیلیس باعث کاهش نفوذپذیری بتن و در نتیجه کاهش نفوذ یون کلرید در این نوع بتن شده است.

پ) مقاومت الکتریکی

نمونه‌های قرار گرفته شده در محیط دریایی خورنده شدید نسبت به محیط شاهد از کاهش چشمگیری در مقاومت الکتریکی برخوردار بودند، زیرا با افزایش رطوبت و نفوذ یون کلر در بتن مقدار مقاومت الکتریکی کاهش یافته و به تبع آن شدت خوردگی افزایش می‌یابد. نمونه‌های قرار گرفته شده در ناحیه پاششی دارای کمترین مقاومت الکتریکی نسبت به نواحی مغروق، جزر ومد و اتمسفری می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان افزایش میزان نفوذ یون کلرید در داخل منافذ بتن دانست که باعث کاهش بیشتر مقاومت الکتریکی بتن وافزایش شدت خوردگی آرماتور می‌شود. یکی از پارامترهای بسیار مهم بتن که بر ریز ساختار و مقدار یونها در محلول منافذ تأثیر گذار است، نسبت آب به مواد سیمانی است. پس با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تخلخل و به تبع آن نفوذپذیری بتن کاهش یافته و از مقدار یونها و تحریک آنها کاسته می‌شود و این امر موجب افزایش مقاومت الکتریکی در طرح M2 گردیده است. همچنین در طرح M2 ذرات بسیار ریز میکروسیلیس باعث پر شدن منافذ بتن شده و از قدرت تحریک یونها به مقدار زیادی می‌کاهد بنابراین باعث افزایش مقاومت الکتریکی طرح M2 گردیده است.

ت) پتانسیل خوردگی و شدت خوردگی

با توجه به نتایج می توان گفت ناحیه پاششی نامناسبترین شرایط را از لحاظ خوردگی دارا می‌باشد زیرا با افزایش میزان رطوبت و مقدار کلر آزاد در بتن و وجود اکسیژن کافی شدت خوردگی افزایش می‌یابد. در شرایط مغروق، گرچه پتانسیل خوردگی آرماتور بسیار بالاست، اما میزان شدت خوردگی به علت عدم وجود اکسیژن ناچیز است. برای نمونه‌های قرار گرفته در محیط آزاد بعد از ۱۸۰ روز در معرض محیط بودن فعالیت خوردگی متوقف شده است. مقادیر پتانسیل خوردگی طی زمان روند افزایشی داشت و علت اینکه در سنین اولیه مقادیر پتانسیل خوردگی مقداری فعالیت را نشان می‌دهد این است که واکنش‌های اکسید شدن سطح آرماتور و تشکیل لایه غیر فعال به علت وجود رطوبت در محیط بتن رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در طرح M1، شدت جریان خوردگی در ناحیه‌های پاششی و جزر و مدی در محدوده High corrosion و در ناحیه‌های اتمسفری و مغروق در محدوده Moderate to high corrosion قرار دارند و شدت جریان خوردگی در طرح M2 در تمام نواحی در محدوده Low to moderate corrosion قرار دارند. در دراز مدت شاید اختلاف شدت جریان خوردگی در نواحی مختلف نسبت به هم محتمل باشد که البته مستلزم ادامه آزمایشات دراز مدت است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

۵- نتیجه‌گیری

۱- وجود یون سولفات در محیط خورنده مورد آزمایش باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه نمونه های بتن عمل آوری شده در این محیط نسبت به محیط شاهد شده است. همچنین مقاومت الکتریکی این نمونه ها نسبت به نمونه‌های محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است.

۲- نمونه‌های قرار گرفته در ناحیه پاششی دارای بیشترین ضریب افت مقاومت فشاری و نمونه‌های بتن قرار گرفته در ناحیه مغروق دارای کمترین ضریب افت مقاومت فشاری می‌باشند.

۳- نمونه‌های بتن دارای میکروسیلیس و نسبت آب به مواد سیمانی پایین در کلیه ناحیه‌ها کمترین ضریب افت مقاومت فشاری را نسبت به بتن‌های معمولی دارند.

۴- ناحیه پاششی دارای بیشترین مقدار نفوذ یون کلرید در داخل منافذ بتن می‌باشد که این امر باعث کاهش بیشتر مقاومت الکتریکی بتن و افزایش شدت خوردگی آرماتور می‌شود. در نتیجه ناحیه پاششی محیط مخربتری نسبت به سایر ناحیه‌ها برای نمونه‌های بتن مسلح ایجاد می‌کند.

۵- در مورد کلیه نمونه‌های قرار گرفته شده در نواحی مختلف، مقاومت الکتریکی در طی زمان کاهش می‌یابد که احتمالاً این امر افزایش میزان شدت خوردگی با گذشت زمان را در پی خواهد داشت.

۶- مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق نشان می دهد که شدت خوردگی در نواحی پاششی، جزر و مدی، اتمسفری و مغروق به ترتیب کاهش می یابد.

۷- در شرایط مغروق، گرچه پتانسیل خوردگی آرماتور بسیار بالاست، اما میزان شدت خوردگی به علت عدم وجود اکسیژن ناچیز است.

۶- مراجع

1-Allen , R.T.L , "Concrete in coastal structures" , 1998 , Thomas Telford.
2-M.N.Haque , H. Al-Khaiat , B. John , " Climatic zones_ A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf ", Building and Environment journal PP.2410-2416 4 April 2006.
3-Kumar Mehta, " Concrete in the marine environment" , 1991.
4-Tarek Uddin Mohammed, Toru Yamaji, Toshiyuki Aoyama, and Hidenori Hamada, " Marine Durability of 15- Year old concrete Specimens Made with Ordinary Portland, Slag and Fly Ash Cements, ACI SP 199-30-2000,PP.451-560.
5-Ramazanianpour, A.A., Parhizkar, T., Pourkhorshidi, R., Raisghasemi, M., "Assessing Concrete Durability with Different Cements and Pozzolans in Persian Gulf Environment", Concrete journal, Research Report, BHRC Publication No. R-434, 2006. (In Persian)
6-ASTM(American Society for Testing and Materials), Standard Test method of Half- Cell Potential of Uncoated Reinforced Steel in Concrete, ASTM C876, ASTM Publication, 1995.
7-A.Benture, S.Diamond and N.S.Berke, " Corrosion of steel in concrete" , 1988.
8-Ping Gu, .J.J. Beaudoin, Min-Hong Zhang, and V. M. Malhotra, " Performance of Reinforcing Steel in Concrete Containing silica fume and Blast- Furnace Slage Ponded with Sodium Chloride Solution ", ACI Materials Journal / May-June , 2000.
9-David A. Whiting and Mohamad A. Nagi, " Electrical Resistivity of concrete – A Literature Review ", Portland Cement Association, 2003.
10-Maruya, T.Tangtermsirikui S. " Simulation of chloride penetration in to hardened concrete ", Third conment / aui International conference on Durability of concrete, france sp 145-27, 1994, PP.519.
11-R.D.Hootan, " Influence of silica fume replacement of cement on physical

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]

properties and resistance to sulfate attack, freezing and thrawing , and alkali- silica reactivity ", ACI Material Journal, March-April, 1993.
12-Troconis de Rincon , M. Sanchez , V . Millano, R. Fernandez,…" Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries ", Corrosion Science Journal, PP. 2832-2843, 16 March 2007.
13-A. Coasta, J. Appleton, " Chloride penetration into concrete in marine environment " , Materials and Structures Journal, Vol. 32, May 1999, PP 252-259.
14-E. Ganjian, H. Sadaghi Pouya, " The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag ", ELSEVIER, Construction and Building Materials, Available online, 2008.
15-H. Karbalayi Faraji, H. Afshin, " Durability of Reinforcement Concrete Containing Pozzolans In Oroomiyeh Lake Environment", M.Sc. Thesis Sahand University of Technology, 2005. (In Persian)
16-Sunil Kumar, “ Influence of water quality on the strength of plain and blended cement concretes in marine environment” , cement and concrete research, 2000, pp.345-350.
17-ACI Corrosion of metals, ACI 222R.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1388.5.10.8.8]