

بررسی دوام سازه‌های بتنی دریایی با پوزولان‌های مختلف در محیط‌های دریایی خورنده شدید

امین محمودی، حسن افشین، حسین کربلائی فرجی

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی

استادیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی سهند

کارشناس ارشد سازه دانشگاه صنعتی سهند

a_mahmoodi1363@yahoo.com

hafshin@sut.ac.ir

karbalaefaraji@sut.ac.ir

خلاصه:

کاربرد پوزولان‌های مختلف می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر خواص بتن، بخصوص بر دوام بتن در محیط‌های دریایی خورنده شدید داشته باشد. در این تحقیق دوام نمونه‌های بتنی مسلح و غیر مسلح ساخته شده با سیمان نوع ۲ و پوزولان‌های میکروسیلیس ازنا، توف سبلان و پومیس عنصرد در محیط دریایی خورنده شدید در مدت ۶ ماه بررسی شده است. به منظور شبیه‌سازی محیط دریایی خورنده شدید از آب دریاچه ارومیه استفاده شده است. نمونه‌های آزمایشی با دو نسبت آب به سیمان متفاوت و سه نوع پوشش بتنی روی آرماتور تهیه و در معرض شرایط متفاوت محیطی (خارج از آب، مغروق، جزر و مد) قرار داده شده‌اند. آزمایش‌هایی نظیر مقاومت فشاری بتن، میزان نفوذ یون کلرید، مقاومت الکتریکی، پتانسیل خوردگی و شدت خوردگی آرماتور در سنین مختلف بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است.

در این مقاله، نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی کلیه نمونه‌ها با یکدیگر مقایسه شده و عملکرد نمونه‌های ساخته شده را از لحاظ دوام مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: دوام بتن، پوزولان، نفوذ یون کلرید، پتانسیل و شدت خوردگی آرماتور، مقاومت فشاری

مقدمه:

شرایط آب و هوایی بسیار خورنده، عدم آگاهی کافی عوامل اجرایی، ضعف در مراحل ساخت، بکارگیری مصالح نامناسب و بدون کیفیت و ... از عوامل انواع خرابی‌های سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی می‌باشد.

انجام تحقیقات بیشتر به منظور ارائه راهکارهایی برای ساخت بتن با دوام با توجه به توسعه منطقه و گسترش روز افزون ترانزیت دریایی و بهره‌برداری و استخراج منابع نفت و گاز و نیاز به ساخت و اجرای انواع سازه‌های بتنی کاملاً احساس می‌شود.

انجام تحقیقات در شرایط واقعی دریایی مشکل و نیاز به امکانات و تجهیزات گسترده‌ای می‌باشد لذا می‌توان در آزمایشگاه با شبیه‌سازی شرایط دریایی آزمایشات لازم را بر روی نمونه‌های مورد نظر انجام داد. در جدول (۱) املاح موجود در دریاچه ارومیه و مقایسه آن با خلیج فارس آورده شده است.

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

	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	So_4^{2-}	Na^+	Cl
دریاچه ارومیه	۱۴۰۴	۱۳۶۰	۱۳۴۱۸	۲۲۷۵۲	۸۶۰۶۶	۱۴۳۷۰۴
خلیج فارس	۴۵۰	۴۳۰	۱۴۶۰	۲۷۲۰	۱۲۴۰۰	۲۱۴۵۰
نسبت املاح دریاچه ارومیه به خلیج فارس	۳/۱۲	۳/۱۶	۸/۵	۸/۳	۶/۹	۶/۷

برنامه کار

الف) مصالح مصرفی

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

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان و مواد جایگزین سیمان 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	۲/۳۲	۰/۹۷	۱/۴	۰/۵
CaO	۶۴/۵۶	۰/۴۹	۳/۹	۴/۱۵
SO ₃	۱/۶۵	۰/۱	-	-
C ₃ S	۵۰/۶۸	-	-	-
C ₂ S	۲۴/۷۶	-	-	-

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.

وزن مخصوص حقیقی شن و ماسه به ترتیب ۲۶۵۰ و ۲۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد. آب مصرفی در ساخت مخلوط‌ها آب شرب پردیس دانشگاه بود. (ب) انواع طرح اختلاط، جزئیات نمونه‌ها نحوه نگهداری و آزمایش‌های در نظر گرفته شده در این پروژه، ۱۰ طرح اختلاط با ۵ نوع ترکیب مواد سیمانی (MP - سیمان نوع ۲، M - ۱۰ درصد جایگزینی وزنی سیمان با میکروسیلیس، S - ۱۵ درصد جایگزینی وزنی سیمان با میکروسیلیس، PO - ۱۰ درصد جایگزینی وزنی سیمان با پومیس عنصرود، TO - ۱۰ درصد جایگزینی وزنی سیمان با توف سبلان) و 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) با اضافه نمودن فوق روان کننده (با پایه ملامین) به مقدار ۳-۲ درصد وزنی سیمان تأمین گردید.

جدول ۳- مشخصات مخلوط‌های ساخته شده

وزن مصالح مصرفی - کیلوگرم							$\frac{W}{B}$	نوع مخلوط	علامت اختصاری
آب	شن	ماسه	توف	پومیس	میکروسیلیس	سیمان تیپ ۲			
۱۸۰	۱۰۹۲	۸۱۹	-	-	-	۴۰۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲	MP1
۱۸۰	۱۰۹۹	۷۵۸	-	-	-	۴۵۰	۰/۴		MP2
۱۸۰	۱۰۹۰	۸۱۷	-	-	۴۰	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد میکروسیلیس	M1
۱۸۰	۱۱۰۱	۷۵۹	-	-	۴۵	۴۰۵	۰/۴		M2
۱۸۰	۱۰۹۰	۸۱۷	-	-	۶۰	۳۴۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۵ درصد میکروسیلیس	S1
۱۸۰	۱۰۹۸	۷۵۸	-	-	۶۷/۵	۳۸۲/۵	۰/۴		S2
۱۸۰	۱۰۹۱	۸۱۸	-	۴۰	-	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد پومیس	PO1
۱۸۰	۱۱۰۱	۷۵۹	-	۴۵	-	۴۰۵	۰/۴		PO2
۱۸۰	۱۰۹۲	۸۱۹	۴۰	-	-	۳۶۰	۰/۴۵	سیمان نوع ۲+۱۰ درصد توف	TO1
۱۸۰	۱۱۰۱	۷۶۰	۴۵	-	-	۴۰۵	۰/۴		TO2

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 از قبل پیش‌بینی شده منتقل شدند.

محیط آزاد: محیط داخل فضای آزمایشگاه

محیط شاهد: حوضچه دارای آب شرب دانشگاه سپند و در شرایط محیطی آزمایشگاه

محیط تر (محیط مغروق): حوضچه‌ای دارای آب دریاچه ارومیه و در دمای ثابت 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 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 نیز ثابت و در ۳۰ درجه سانتیگراد بود.

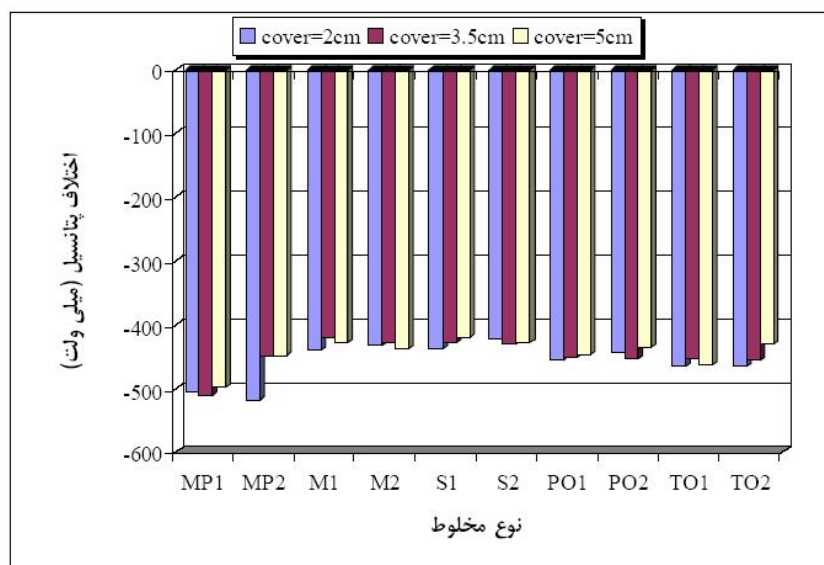
چربیات نمونه‌های ساخته شده برای هر آزمایش و شرایط نگهداری آنها در جدول (۴) آمده است.

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

نوع آزمایش	اندازه نمونه‌ها (cm)	ویژگی‌ها	محیط نگهداری
مقاومت فشاری	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، مغروق، جزر و مد
میزان نفوذ یون کلر	۱۰×۱۰×۱۰	-	مغروق، جزر و مد
پتانسیل و شدت خوردگی	۱۵×۲۲×۴۰	پوشش بتنی ۲ cm و ۳/۵ و ۵	آزاد، مغروق، جزر و مد
مقاومت الکتریکی	۱۰×۱۰×۱۰	-	شاهد، مغروق، جزر و مد

آزمایشها و نتایج آن

مقاومت فشاری نمونه‌های نگهداری شده در محیط‌های مختلف در سنین ۲۸، ۹۰، و ۱۸۰ روزه تعیین گردید. 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 الکتروود مرجع Ag/AgCl تعیین گردید. برای اندازه‌گیری شدت خوردگی از دستگاه پتانسیواستات استفاده شد و از مدار الکتریکی پل و تستون برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی استفاده شد. 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 اندازه‌گیری شد و با استفاده از قانون فیک (Fick law) ضریب نفوذ یون کلرید تعیین گردید.



شکل ۱- مقادیر پتانسیل نیم پیل در مخلوط‌های مختلف با اندازه پوشش متفاوت روی آرماتور برای نمونه‌های در شرایط جزر و مدی در سن ۱۲۰ روزه

جدول ۵- محدوده پتانسیل خوردگی و احتمال خوردگی طبق ASTM C876 برای نیم پیل Ag/AgCl

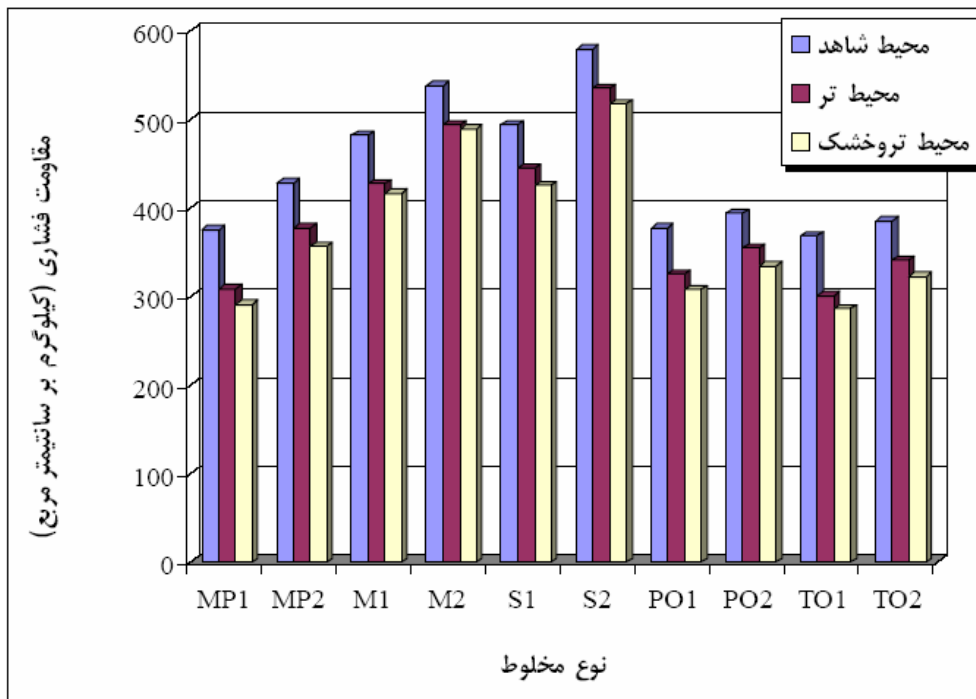
احتمال خوردگی	محدوده پتانسیل
به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود ندارد	$\leq -84 \text{ mv}$
فعالیت خوردگی قطعی نمی‌باشد، اما امکان آن کاملاً وجود دارد	$-234 \text{ mv} \leq \leq -84 \text{ mv}$
به احتمال ۹۰ درصد فعالیت خوردگی وجود دارد.	$\leq -234 \text{ mv}$

جدول ۶- مقادیر مقاومت و جریان الکتریکی برای نمونه‌های مختلف با اندازه پوشش بتنی ۵ سانتیمتر در سن ۱۸۰ روزه

سرعت جریان خوردگی (mpy)		شدت جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)		مقاومت پلاریزاسیون (ohm)		علامت اختصاری
ناحیه جزر و مد	ناحیه مغروق	ناحیه جزر و مد	ناحیه مغروق	ناحیه جزر و مد	ناحیه مغروق	
۰/۸۳۶	۰/۵۳۷	۱/۸۳۴	۱/۱۷۷	۱۲۲	۱۹۰	MP1
۰/۲۶	۰/۲۵۹	۰/۵۷	۰/۵۶۸	۳۹۲	۳۹۴	MP2
۰/۳۱	۰/۲۳۷	۰/۶۸	۰/۵۲۱	۳۲۹	۴۲۹	M1
۰/۱۵۸	۰/۱۳۶	۰/۳۴۷	۰/۲۹۹	۶۴۵	۷۴۶	M2
۰/۲۰۳	۰/۱۵۷	۰/۴۴۶	۰/۳۴۵	۵۰۱	۶۴۷	S1
۰/۱۱	۰/۰۹۷	۰/۲۴۲	۰/۲۱۴	۹۲۳	۱۰۴۲	S2
۰/۴۳۶	۰/۲۸۹	۰/۹۵۶	۰/۶۳۵	۲۳۴	۳۵۲	PO1
۰/۲	۰/۱۶۸	۰/۴۳۹	۰/۳۶۸	۵۰۹	۶۰۷	PO2
۰/۴۰۵	۰/۳۶۹	۰/۸۸۸	۰/۸۱	۲۵۲	۲۷۶	TO1
۰/۳۶۴	۰/۲۱	۰/۷۹۹	۰/۴۶	۲۸۰	۴۸۶	TO2

جدول ۷- محدوده‌های شدت خوردگی و تفسیر آن

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



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

جدول ۸- نتایج آزمایش درصد میزان یون کلرید بتن‌ها در دو محیط مغروق و جزر و مد

علامت اختصاری	نوع مخلوط	W/B	درصد میزان کلر برحسب وزن بتن در عمق (۲-۳ cm) بعد از ۳ ماه		درصد میزان کلر برحسب وزن بتن در عمق (۲-۳ cm) بعد از ۶ ماه	
			ناحیه مغروق	ناحیه جزر و مد	ناحیه مغروق	ناحیه جزر و مد
			MP1	سیمان نوع ۲	۰/۴۵	۰/۲۳
MP2	سیمان نوع ۲	۰/۴	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۶
M1	سیمان نوع ۱۰+۲	۰/۴۵	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۴
M2	درصد میکروسیلیس	۰/۴	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲
S1	سیمان نوع ۱۵+۲	۰/۴۵	۰/۱	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۲
S2	درصد میکروسیلیس	۰/۴	۰/۰۹	۰/۱	۰/۱	۰/۱۳
PO1	سیمان نوع ۱۰+۲	۰/۴۵	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۲
PO2	درصد پومیس	۰/۴	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۸
TO1	سیمان نوع ۱۰+۲	۰/۴۵	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۲۵
TO2	درصد توف	۰/۴	۰/۱۸	۰/۲	۰/۲	۰/۲۳

تجزیه و تحلیل نتایج

الف) نفوذ یون کلر

در خصوص نفوذ یون کلرید مشاهده می‌شود که محیط جزر و مد 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 مغروق برای نمونه‌های بتنی ایجاد می‌کند. با کاهش نسبت نسبت آب به مواد سیمانی تا حدودی از میزان نفوذ یون کلرید کاسته می‌شود. بتن حاوی سیمان نوع ۲ بیشترین مقدار یون کلرید را در عمق (۲-۳cm) در تمام محیطها داشته است و بتن شامل ۱۵ درصد میکروسیلیس کمترین میزان یون کلرید را در همه شرایط نشان می‌دهد. بنابراین تأثیر میکروسیلیس بر ریزتر شدن منافذ بتن به مراتب بیشتر از اثر کم شدن قلیائیت می‌باشد و در نتیجه از نفوذ بیشتر یون کلرید جلوگیری می‌کند.

ب) پتانسیل خوردگی، شدت خوردگی و مقاومت الکتریکی

با توجه به نتایج می‌توان گفت که بتن‌های حاوی میکروسیلیس، کمترین پتانسیل خوردگی را در تمام محیطها و در تمام طول آزمایش نشان می‌دهند. در شرایط مغروق در آب دریاچه، گرچه پتانسیل خوردگی آرماتور بسیار بالاست، اما میزان شدت خوردگی به علت عدم وجود اکسیژن ناچیز است. در محیط جزر و مد میزان شدت خوردگی نسبت به محیط مغروق بالاست و بتن‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس کمترین میزان شدت خوردگی را در این محیط دارند. مقاومت الکتریکی نمونه‌های قرار داده شده در محیط جزر و مد و مغروق دریاچه نسبت به محیط شاهد کاهش چشمگیری داشته است، زیرا با افزایش رطوبت و مقدار کلر آزاد در بتن مقدار مقاومت الکتریکی کاهش یافته و به تبع آن شدت خوردگی افزایش می‌یابد. مقدار کاهش مقاومت الکتریکی در محیط جزر و مدی بیشتر از محیط مغروق بوده است.

ج) مقاومت فشاری

مقاومت مخلوط‌های بتنی با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴ به ۰/۴ افزایش یافته است. به ترتیب مخلوط‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد میکروسیلیس، سیمان نوع ۲، پومیس و توف بیشترین مقاومت را در محیط شاهد داشته‌اند. از نقطه نظر خوردگی سولفاتی می‌توان گفت وجود یون سولفات در دو محیط مغروق و جزر و مد باعث کاهش مقاومت فشاری کلیه مخلوط‌های بتنی نسبت به مخلوط‌های شاهد شده است. پوزولان‌ها باعث کاهش درصد افت مقاومت فشاری بتن می‌شوند. به ترتیب مخلوط‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس، ۱۰ درصد میکروسیلیس، پومیس، سیمان نوع ۲ و توف کمترین درصد افت مقاومت فشاری را داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

- ۱- در محیط‌های دریایی، 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 و سیستم جزر و مد قرار دارند نسبت به محیط مغروق در آب دریا آسیب‌پذیرتر بوده و نیاز به توجه ویژه در ساخت و نگهداری دارند.
- ۲- در شرایط مغروق در آب دریاچه، گرچه پتانسیل خوردگی آرماتورها بسیار بالاست، اما به علت عدم وجود اکسیژن شدت خوردگی ناچیز است.
- ۳- بتن‌های دارای میکروسیلیس ازنا، بهترین عملکرد را در مقابل خرابی و خوردگی داشته‌اند. پس از آن سیمان‌های دارای پومیس عنصرود و توف سبلان به ترتیب دوام بیشتری را در محیط دریاچه ارومیه نشان داده‌اند.
- ۴- استفاده از سیمان به میزان ۴۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بتن، نسبت آب به سیمان ۰/۴ و عمل‌آوری مطلوب، به ویژه برای بتن‌های دارای سیمان-های پوزولانی پایایی بتن‌ها را افزایش داده است.
- ۵- اندازه پوشش بیشتر از ۵ سانتیمتر برای سازه‌های بتنی که در معرض جزر و مد قرار دارند توصیه می‌شود.

مراجع

1. A.Bentur, S.Diamond and N.S.Berke, "Steel Corrosion in Concrete", 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 in marine environments", cement and concrete research, 2000

4. J.M.R. Dotto, A.G.de Abreu, D.C.Dal Molin, I.L. Muller, “ Influence of silica fume addition on concrete physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars” , cement and concrete composites,2004
5. Ramezani pour, A.A., Miyamoto, A.,” Durability of concrete structures in the Persian Gulf” , Concrete Journal, Japan Concrete Institute,Vol 18, No.3, march 2000