بررسی و مقایسه آزمون‌های ارزیابی پارامترهای دوام بتن درحاشیه خلیج فارس

مریم بنی اسدزاده[۱*]، سید طاها طباطبایی عقدا[۲]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس؛ Maryambaniasad@yahoo.com
[۲]عضو هیات علمی مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی واحد خلیج فارس (بندرعباس)؛ taha.taba@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۱۳
تاریخ انتشار مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۸

کلمات کلیدی:
پایایی بتن
جذب آب بتن
نفوذ آب در بتن
نفوذ تسریع شده یون کلرید
خلیج فارس

چکیده

از جمله مسائل مهم در طراحی سازه های جدید و ارزیابی سازه های بتنی موجود، انجام آزمون های کنترلی معیار های دوام حین و پس از ساخت بتن، در جهت ایجاد توسعه پایدار و حفظ آن در منطقه می باشد که در این مقاله بر روی ۲۱۶ آزمونه از ۶ طرح اختلاط با نسبت های مختلف آب به سیمان و پوزولان‌هایی مانند خاکستر بادی و میکروسیلیس، برخی از آزمون های دوام بتن مقایسه شده است. بر طبق نتایج تحلیلی به دست آمده از پراکندگی داده‌های آزمون‌ها و نیز براساس ملاحظات اجرایی، آزمون نفوذ آب در بتن روشی مطمئن برای رد کیفیت بتن نمی باشد. همچنین در دسترس نبودن تجهیزات و گران بودن آزمون نفوذ تسریع شده یون کلرید، باعث شده علیرغم استفاده گسترده در خارج از کشور، عملاً در پروژه‌های بتنی جنوب کشور به ندرت استفاده شود. در این میان، روش جذب آب موئینه به دلیل سرعت بالا، سهولت، ارزان بودن و همچنین تکرار پذیری خوب به نظر می رسد، می تواند به عنوان یکی از معیارهای کنترل پایایی بتن در این مناطق پیشنهاد گردد، که البته این امر خود مستلزم تحقیقات بیشتر می باشد.

Investigation and comparison of test methods of evaluation of concrete durability in the Persian Gulf environment

Maryam Baniasadizade[1*], Seyed Taha Tabatabaei Aghda[2]

[1]MSc Student of Civil Eng, Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch; Maryambaniasad@yahoo.com
[2] Faculty member of Road, Housing & Urban Development Research Center; taha.taba@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 13 Jul. 2013
Accepted: 23 Jan. 2014
Available online: 19 Mar. 2014

Keywords:
Concrete durability
water absorption
water permeability
RCPT
Persian Gulf

ABSTRACT

Following the growing economic and industrial development, concrete is to find a special place as building materials, as optimization of materials and components of this structural material in order to increase its durability and long service life, significant economic and industrial benefits will follow. So Performance of Durability control tests , during and after the concrete construction, Approach to achieving durable concrete production in order to obtain sustainable development in the region is essential.

In this paper, some of the concrete durability tests were performed on 216 samples of six concrete mixtures with different water-binder ratios, pozzolans (fly ash and silica fume). Based on the scattered results obtained from the experiments, depth of penetration of water under pressure test is not reliable in concrete quality evaluation. Also, lack of equipments and high expense of RCPT, despite its extensive use in many regions of the world, have led to limited use of this method in concrete projects in Iran. The capillary water absorption test for its quickness, convenience, low cost and good repeatability, seems to be able to serve as a measure of the concrete durability in marine areas, although it would require more research.

۱ - مقدمه

در مناطق ساحلی خلیج فارس آلودگی آب، خاک و اتمسفر به عناصر شیمیایی مضر برای بتن، رطوبت بالا، دما و تشعشعات خورشیدی در حدی است که به روند تخریب سازه‌ها کمک می‌کند و سرعت آسیب دیدگی را افزایش می‌دهد. مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داده است که املاح موجود در آب خلیج فارس از اغلب آب‌های جهان بیشتر است[۱] . زیاد بودن مقدار کلرید در این آب باعث تخریب انواع سازه‌های ساحلی و دریایی در این منطقه شده است. مقدار کلرید موجود در آب در حدود PPM ۲۴۰۰۰- ۲۰۰۰۰ و میزان سولفات در آن حدود PPM ۳۷۰۰- ۳۰۰۰ است. علاوه بر این، آب‌های زیرزمینی این منطقه شدیداً به یون‌های کلرید و سولفات آلوده می‌باشند. دمای هوای منطقه خلیج فارس به علت نزدیکی به خط استوا، در گرمترین ماه‌های سال حداکثر بین ۳۷ تا ۴۱ درجه سانتیگراد متغیر باشد. البته دمای سطح بتن زیر نور مستقیم خورشید به ۷۰ تا ۷۵ درجه سانتیگراد می‌رسد. رطوبت نسبی هوا نیز بین ۴۸ تا ۸۱٪ نغییر می‌کند[۱] .

بنابر آنچه گفته شد می‌توان به روشنی دریافت که از دیدگاه دوام سازه‌های بتنی، شرایط محیطی خلیج فارس به خصوص سواحل آن نسبت به نقاط دیگر دنیا بسیار مهاجم و خورنده بوده و سازه‌های بتنی زیادی در این منطقه در زمانی نه چندان طولانی دچار خرابی گشته‌اند، که همین امر اهمیت توجه به پدیده خوردگی و انتخاب روشهای بهینه مقابله با آن را مشخص می‌نماید. یادآور می‌شود در صورت استفاده از مصالح مناسب و نیز طرح بتن با مشخصات فنی ویژه این مناطق، اجرای بتن توسط افراد کاردان و سرانجام عمل آوری مناسب و کافی، بسیاری از مسائل بتن بر طرف خواهد گشت. بر همین اساس آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان در سال ۱۳۸۴ توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای ساخت و کنترل بتن در این مناطق تدوین و پیشنهاد شده است[۲] .

نفوذ یون‌ها، گازها و مایعات از سطح بتن به داخل آن مهمترین مشخصه تعیین دوام سازه‌های بتنی در شرایط مختلف از جمله محیط‌های دریایی می‌باشد.برای تعیین انواع نفوذ، روشهای مختلفی ارائه شده‌است. پیچیدگی آزمون‌ها و دستگاه‌ها، طولانی بودن آزمون و پراکندگی نتایج از مشکلات عمده برخی از این روش‌ها می‌باشند. از آزمون‌های تعیین نفوذ، میتوان به آزمون جذب آب، نفوذ آب تحت فشار، نفوذ گازها و اکسیژن و نیز هدایت یون کلرید در بتن اشاره نمود. در این تحقیق علاوه بر روش‌های توصیه شده در آیین-نامه پایایی، آزمون جذب آب موئینه که در پروژه‌های حاشیه خلیج فارس و آزمون‌های جذب آب کل و مقاومت الکتریکی که در سایر نقاط جهان به صورت گسترده استفاده می‌شوند، مورد بررسی و نتایج آن با روش‌های پیشنهادی آیین نامه پایایی، مقایسه میشود.

۱-۱- کنترل دوام بر اساس آیین نامه ملی پایایی بتن

بر اساس آیین نامه ملی پایایی بتن، شرایط محیطی در سه حالت کلی متوسط، شدید و فوق‌العاده شدید تقسیم بندی شده است (جدول ۱). در این آیین نامه مقادیر مجاز برای سه آزمون جذب آب، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ تسریع شده یون کلرید به صورت زیر ارائه شده است (جدول۲).

جدول ۱- دسته بندی شرایط محیطی سازه بتنی[۲و۱].

طبقه بندی	دسته بندی	شرایط
متوسط	A	سازه‌های روزمینی که در معرض خطر نفوذ یون کلرید بر اثر وزش بادهای دارای یون‌های نمک نیستند.
شدید	B	سازه‌های روزمینی در نواحی نزدیک به ساحل و در معرض بادهای دارای یونهای کلرید
	C	قسمت‌هایی از سازه که در تماس با خاک است و بالای ناحیه موئینگی خاک واقع شده است. و یا قسمت‌هایی که دائماً در زیر آب دریا واقع هستند.
فوق‌العاده شدید	D	قسمت‌هایی از سازه که در تماس با خاک مهاجم است و در زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده است
	E	سازه‌های دریایی (دارای قسمت‌هایی در ناحیه جزر و مدی و ناحیه پاشش)
	F	سازه‌های نگهدارنده آب و تصفیه خانه فاضلاب

جدول ۲- مقادیر مجاز برای سه آزمون جذب آب، نفوذ آب تحت فشار و نفوذ تسریع شده یون کلرید [۲]

نام آزمون	شرایط A	شرایط C, B	شرایط D, E, F
آزمون جذب آب نیم ساعته (BS1881,part122,1983)	حداکثر ۴٪	حداکثر ۳٪	حداکثر ۲٪
نفوذ آب در بتن (EN BS 12930-8:2000)	حداکثر ۵۰ میلیمتر	حداکثر ۳۰ میلیمتر	حداکثر ۱۰ میلیمتر
نفوذ یون تسریع شده کلرید در بتن (ASTM C1202 ,1994)	حداکثر ۳۰۰۰ کولمب	حداکثر ۳۰۰۰کولمب	حداکثر ۲۰۰۰ کولمب

۲- خلاصه روش انجام آزمون جذب آب موئینه بتن[1]

در سال ۱۳۸۳، در طرح توسعه اسکله شهید رجایی بندرعباس که توسط مؤسسه مکین انجام گرفته، آزمایش جذب آب موئینه بتن به عنوان شاخص اصلی دوام بتن ساخته شده در این پروژه ملی استفاده شده است[۳]. براساس این آزمون، نتایج بر روی یک آزمونه ۷ روزه در عرض ۲۴ الی ۴۸ ساعت به دست می‌آید. این آزمون به دلیل سرعت بالا و کم هزینه بودن، برای کنترل سازه‌های دریایی گسترش زیادی یافته است. هم اکنون در کشورهای عربی حاشیه خلیج فارس نیز این آزمون برای کنترل پایایی بتن استفاده می شود [۴].

برای انجام این آزمون، آزمونه مکعبی بتن به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی متری ساخته شده و به مدت ۷ روز عمل آوری می شود. پس از آن برش‌هایی به ضخامت ۲ سانتی‌متر از پایین و وسط آزمونه تهیه می گردد. مدت خشک کردن آزمونه در گرمخانه ۲۴ ساعت (دمای ۱۱۰- ۱۰۵) پیش بینی شده است. پس از خشک شدن، آزمونه‌ها به نحوی در معرض آب قرار می گیرند که ۲ میلی متر از ۲ سانتی متر ضخامت آنها زیر تراز آب باشد. در فواصل زمانی مشخص (در یک ساعت اول هر ۱۵ دقیقه، از ۱ الی۳ ساعت هر نیم ساعت و از ۳ الی ۶ ساعت هر ۱ ساعت) توزین آزمونه انجام و آزمونه مجدداً در معرض آب قرار داده می شود. با گذشت زمان مشخص t_0، میزان رطوبت جذب شده در حفره‌های مویینه بتن به مقدار ثابتی می رسد. در نهایت، با جایگذاری در رابطه زیر اندیس موئینگی قابل اندازه گیری می باشد.

$$I_C = \frac{\theta_0 - \theta_i}{\sqrt{t_0} - \sqrt{t_i}} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، θ_i: رطوبت حجمی اولیه، θ_0: رطوبت حجمی ثابت شده، t_i: زمان اولیه، t_0: زمان پس از ثابت شدن درصد رطوبت حجمی و I_C اندیس موئینگی است[۵].

۲- روش انجام کار

۲-۱- مصالح مصرفی

مشخصات مصالح مصرفی و طرح‌های مورد نظر مطابق جداول ۳ تا ۵ بوده است. بزرگترین اندازه سنگدانه های مصرفی ۲۵ میلیمتر و نوع فوق روان کننده مصرفی با پایه پلی کربوکسیلات می باشد. پوزولانهای به کار رفته در طرح اختلاط‌ها، خاکستر بادی با وزن مخصوص $2290\ kg/m^3$ و میکروسیلیس با چگالی $2200 kg/m^3$ می باشد. این خاکستر بادی در ساخت بتن‌های پروژه توسعه اسکله شهید رجایی و میکروسیلیس در پروژه ساخت حوض خشک کشتی سازی فرا ساحل بندرعباس استفاده شده است.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

سیمان پرتلند تیپ ۲ لارستان	
ترکیبات شیمیایی(٪)	واحد
Sio_2	۲۳/۴
Al_2o_3	۵/۱۷
Fe_2o_3	۴/۸۰
Mgo	۱/۱۱
Cao	۶۰/۸۵
So_3	۱/۵۵
$Na_2O + 0.68K_2o$	۱/۱۵
C_3s	۲۰/۸۶
C_2s	۴۹/۰۹
C_3A	۵/۵۸

جدول ۴- مشخصات سیمان مصرفی

سطح مخصوص m^2/kg	۳۲۵	
چگالی kg/m^3	۳۱۴۰	
انبساط در اتوکلاو ٪	۰/۰۱	
مقاومت فشاری×10^3 (KN/m^2)	۱۲۵/۱۵	۳روزه
	۱۹۳/۳۴	۷روزه
	۲۳۰/۰۶	۲۸روزه
زمان گیرش ویکات (دقیقه)	۱۵۵	ابتدایی
	۵۰	انتهایی

جدول ۵-مشخصات فیزیکی مصالح سنگی

سنگدانه	وزن مخصوص kg/m^3	جذب آب (٪)	عبوری از الک ۲۰۰
ماسه	۲۶۰۰	۱/۷	۲/۶
شن	۲۶۹۶	۰/۷	۰/۷

۲-۲- نسبت مخلوط‌ها

برای مقایسه روش‌های آزمایشگاهی ارزیابی دوام بتن، در این پروژه ۶ طرح اختلاط معرفی شده در جدول ۶، مورد استفاده قرار گرفته است. طرح اختلاط ساخته شده به همراه ۲۵٪ خاکستر بادی جزء اصلی ترین طرح‌های به کار رفته در اجرای قسمت دیواره ساحلی اسکله شهید رجایی می باشد. برای مقایسه اثر نوع پوزولان، طرح دیگری با جایگزینی ۷٪ میکروسیلیس و یک طرح شاهد بدون استفاده از مواد پوزولانی ساخته شد. برای تعیین تأثیر نسبت آب به سیمان و مقایسه روش‌های آزمون در نسبت‌های مختلف آب به سیمان، طرح‌های شماره ۱ تا ۳ با نسبت‌های ۰/۳۴، ۰/۴ و ۰/۵ تهیه گردیده اند. در کلیه طرح اختلاط‌ها در هر متر مکعب بتن، مجموع سنگدانه‌ها به طور تقریبی ۱۹۷۰ کیلوگرم است که مقدار ماسه حدود ۱۱۳۰ کیلوگرم در متر مکعب بوده و مابقی آن را درشت دانه (شن ۵-۱۵ و ۱۵-۲۵ میلیمتر با نسبت مساوی) تشکیل داده است. میزان فوق روان کننده در کلیه مخلوط‌ها حدود ۰/۱ الی ۰/۹ درصد وزنی سیمان بوده و کلیه طرح‌ها با اسلامپ حدود ۱۸ الی ۲۰ سانتی‌متر ساخته شده است.

جدول ۶- طرح اختلاط بتن‌های آزمایش شده (یک مترمکعب)

شماره طرح	نسبت آب به مواد سیمانی	آب کیلوگرم	سیمان کیلوگرم	ماده پوزولانی (کیلوگرم)	
				خاکستر بادی	میکرو سیلیس
۱	۰/۳۴	۱۳۵	۴۰۰	۰	۰
۲	۰/۴	۱۶۰	۴۰۰	۰	۰
۳	۰/۵	۲۰۰	۴۰۰	۰	۰
۴	۰/۳	۱۳۵	۴۵۰	۰	۰
۵	۰/۳	۱۳۵	۴۲۰	۰	۳۰
۶	۰/۳	۱۳۵	۳۶۰	۹۰	۰

۲-۳- ساخت آزمونه‌ها

پس از ساخت و قالب گیری ۶ طرح فوق، کلیه آزمونه‌ها در شرایط آزمایشگاهی عمل آوری و پس از آن تحت آزمون‌هایی نظیر جذب آب، مقاومت الکتریکی، نفوذ تسریع شده یون کلرید، نفوذ آب در بتن طبق استانداردهای مندرج در جدول ۷ قرار گرفتند.

جدول ۷- تعداد آزمونه‌های ساخته شده برای آزمون‌های مورد نظر در شرایط آزمایشگاهی

نام آزمون	نام استاندارد	شکل و ابعاد	تعداد آزمونه‌ها
مقاومت فشاری	BS 1881: Part 116	مکعبی (۱۵×۱۵×۱۵)	۱۸
نفوذ آب در بتن	EN BS [۱۰]12930-8	مکعبی (۱۵×۱۵×۱۵)	۳۶
جذب آب نیم ساعته	BS 1881-[۷] 122	استوانه ای (۱۵×۷/۵)	۳۶
نفوذ تسریع شده یون کلرید (RCPT)	ASTM [۹]C1202	مکعبی (۱۵×۱۵×۱۵)	۳۶
جذب آب موئینه[۴]	Capillary	مکعبی (۱۰×۱۰×۱۰)	۵۴
جذب آب کل	ASTM [۸]C642	مکعبی(۱۰×۱۰×۱۰)	۳۶
مقاومت الکتریکی[۱۱]	--	آزمونه‌های مکعبی (۱۵×۱۵×۱۵) ساخته شده سایر آزمون‌ها مورد استفاده قرار گرفت	
	جمع کل		۲۱۶

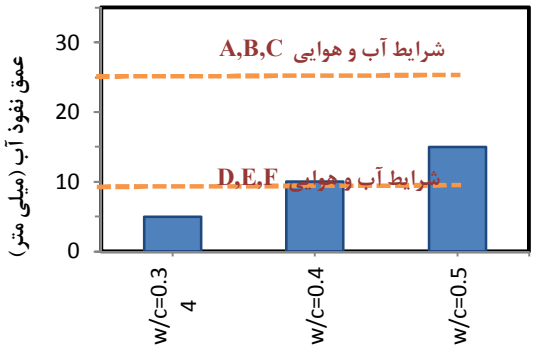
۳- نتایج

در این مطالعه، آزمون‌های دوام بتن بر روی نمونه‌هایی با نسبت‌های متفاوت آب به سیمان و دو نوع مختلف پوزولان انجام و نتایج بحث و بررسی می‌گردد. متوسط نتایج به دست آمده از هر آزمون، در ترسیم نمودارها مورد استفاده قرار گرفته است.

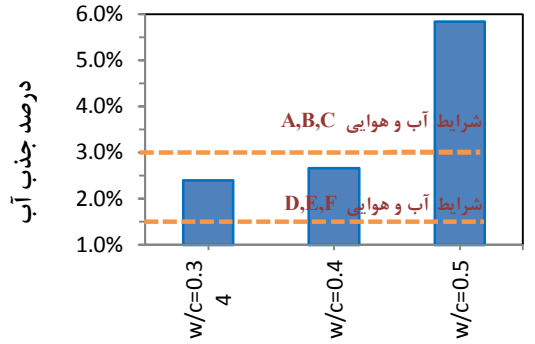
۳- ۱- نتایج آزمون‌های آیین نامه پایایی برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان

برای تعیین اثر نسبت آب به سیمان، نتایج حاصل از آزمون‌های آیین نامه پایایی در نمودارهای شماره ۱ تا ۳ آورده شده است. بر اساس استاندارد، در سه آزمون توصیه شده در آئین‌نامه پایایی، نتایج آزمون در سن ۲۸ روز ملاک می باشد. با ثابت نگه داشتن مقدار سیمان و افزایش آب در یک طرح اختلاط، مقدار نفوذ آب در بتن، جذب آب و نیز نفوذ یون کلرید روندی افزایشی داشته‌اند.

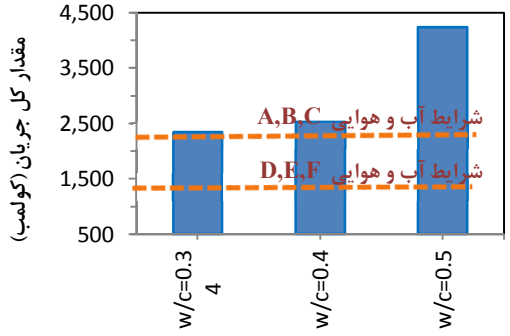
اگرچه در هر سه آزمون روند مشابهی مشاهده می‌شود، اما در آزمون نفوذ آب در بتن، نتایج نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۳۴ و ۰/۴ زیر خط ۱۰ میلی متر نفوذ و مناسب برای شرایط محیطی فوق‌العاده شدید می باشد، اما در سایر آزمون‌ها این دو طرح برای چنین شرایطی مناسب نیستند. همچنین در آزمون نفوذ آب در بتن، نسبت آب به سیمان ۰/۵در محدوده مجاز برای شرایط شدید می باشد ولی این طرح ملزومات آئین‌نامه پایایی درخصوص آزمون‌های جذب آب و نفوذ تسریع شده یون کلرید را برآورده نمی‌کند.



شکل ۱ – تاثیر نسبت آب به سیمان بر نفوذ آب در بتن



شکل ۲- تاثیر نسبت آب به سیمان بر جذب آب نیم ساعته



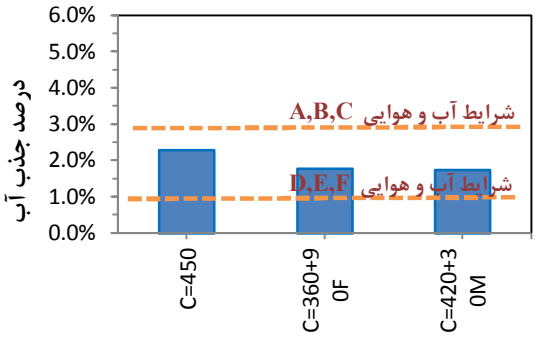
شکل ۳- تاثیر نسبت آب به سیمان بر نفوذ تسریع شده یون کلرید در بتن

۳- ۲- نتایج آزمون‌های آیین نامه پایایی برای پوزولان‌های مختلف

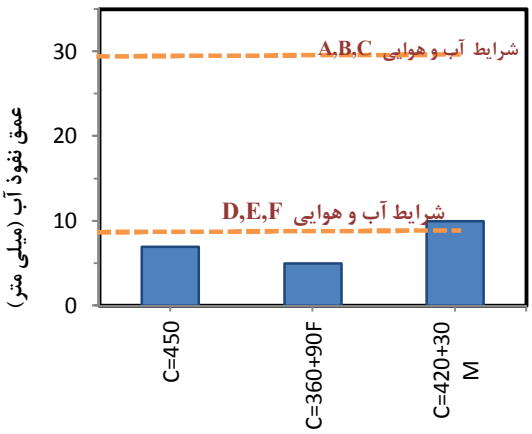
همان‌گونه که در نمودارهای شماره ۴ تا ۶ دیده می‌شود، با جایگزینی درصدی از سیمان با خاکستر بادی و میکرو سیلیس میزان جذب آب و نیز نفوذ یون کلرید در بتن کاهش یافته است. این روند کاهشی در آزمون نفوذ یون کلرید بیشتر مشهود می‌باشد. در آزمون نفوذ آب اگرچه نتایج هر ۳ نمونه کمتر از یک سانتی متر می‌باشد اما میزان نفوذ آب در بتن حاوی میکروسیلیس بر خلاف

سایر آزمون‌های این پروژه، بیشتر از نمونه فاقد پوزولان بوده است که احتمالاً تغییر روند این نمودار با توجه به پراکندگی زیاد نتایج این آزمون به وجود آمده است.

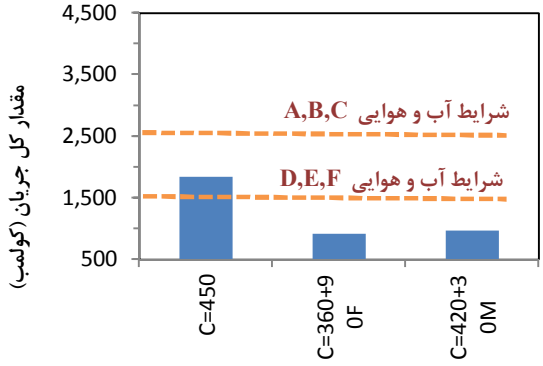
به طور کلی در نمودارهای ۱ تا ۶، اگر از نتایج آزمون نفوذ آب در بتن صرف نظر کنیم، صرفا نمونه‌های ساخته شده با مواد پوزولانی توانسته‌اند حد نصاب سخت گیرانه آیین نامه پایایی جهت استفاده در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید را به دست بیاورند. در این نمونه‌ها علاوه بر استفاده از پوزولان، نسبت آب به سیمان بسیار پایین معادل ۰/۳ انتخاب شده است. بر اساس این نتایج، قابل قبول‌ترین جواب‌ها مربوط به آزمون نفوذ تسریع شده یون کلرید در بتن (ASTM C1202) می باشد که بر اساس حدود آیین نامه می تواند معیار خوبی برای کنترل پایایی بتن باشد.



شکل۴- تاثیر پوزولان بر جذب آب نیم ساعته



شکل ۵- تاثیر پوزولان بر نفوذ آب در بتن



شکل ۶- تاثیر پوزولان بر نفوذ تسریع شده یون کلرید در بتن

۳- ۳- نتایج سایر آزمون‌ها برای نسبت‌های مختلف آب به سیمان

در این قسمت، نتایج سه آزمون پایایی متداول در برخی پروژه‌های اجرایی حاشیه خلیج فارس ارائه شده است. نتایج آزمون جذب آب موئینه در سن ۷ روز و آزمون جذب آب کل و مقاومت الکتریکی بتن معمولا در سن ۲۸ روز ملاک می باشد.

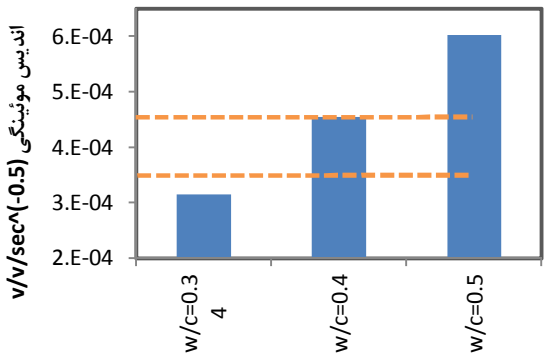
نمودارهای شماره ۷ و ۸ نشان می دهد که افزایش نسبت آب به سیمان باعث افزایش اندیس موئینگی در آزمون جذب آب موئینه و میزان جذب آب کل بتن شده است. اما نتایج مقاومت الکتریکی با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش یافته است.

حد مجاز اندیس موئینگی پیشنهاد شده برای آزمون جذب آب موئینه برابر $۴/۵\times۱۰^{-۴}$ $v/v/sec^{-0.5}$ در سن ۷ روزگی می باشد[۶]. بر این اساس نتایج ۷ روزه نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۴ در محدوده مجاز قرار گرفته اند. همچنین این نمونه‌ها با توجه به جدول ۸، با مقاومت ویژه حدود $k\Omega.cm$ ۱۰ به لحاظ دوام شرایطی متوسط دارند و به نظر می رسد این طرح‌ها برای شرایط محیطی شدید قابل قبول باشند.

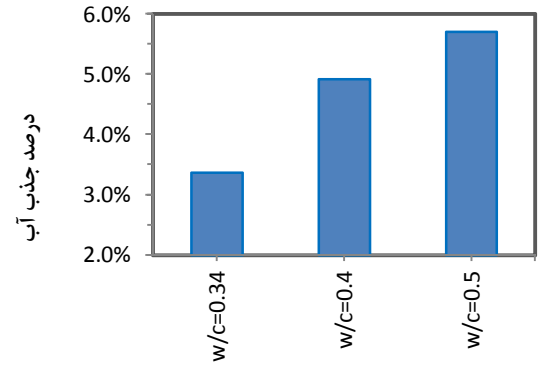
برای آزمایش جذب آب کل به صورت رسمی حدودی مشخص نشده است ولی اگر بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴ را به عنوان بتن مقاوم برای شرایط محیطی شدید در نظر بگیریم، می توان حداکثر جذب آب کل ۲۸ روزه ۵٪ را، به عنوان حدود مجاز برای این شرایط پیشنهاد داد. البته این نتیجه را نمی توان تعمیم داد و باید تحقیقات و آزمایشات زیادی جهت یک پیشنهاد قابل تعمیم از سوی مراکز علمی و تحقیقاتی انجام شود.

جدول ۸- حدود مقاومت الکتریکی و میزان خوردگی احتمالی [۱۱]

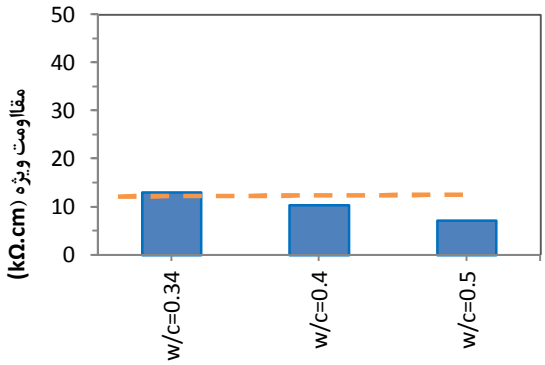
احتمال خطر بروز خوردگی	مقاومت ویژه
بسیار زیاد	<۵
زیاد	۵ تا ۱۰
متوسط تا کم	۱۰ تا ۲۰
ناجیز	۲۰>



شکل ۷- تاثیر نسبت آب به سیمان بر جذب آب مویینه



شکل۸- تاثیر نسبت آب به سیمان بر جذب آب کل



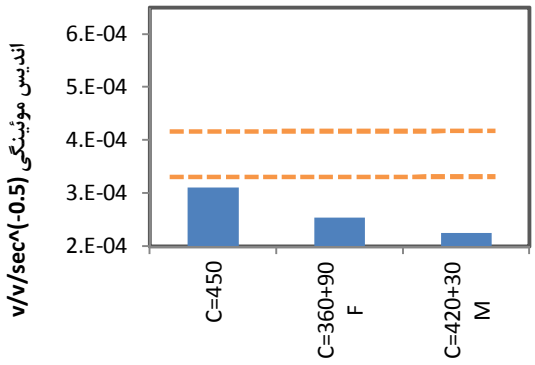
شکل ۹- تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت الکتریکی بتن

۳-۴- بررسی نتایج سایر آزمون‌ها برای دو نوع پوزولان

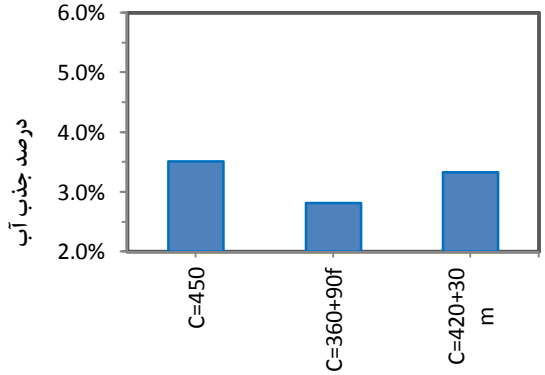
در شکل شماره۱۰، افزودن پوزولان باعث کاهش اندیس موئینگی شده است. میزان جذب آب موئینه نمونه حاوی میکروسیلیس کمتر از خاکستر بادی به دست آمده است. بر اساس شکل شماره ۱۰ و مقایسه آن با آزمون‌های آیین نامه پایایی می‌توان حد نصاب $۳/۵\times۱۰^{-۴}$ $v/v/sec^{-0.5}$ را به عنوان حداکثر اندیس موئینگی برای بتن‌های واقع در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید پیشنهاد داد که البته قطعیت این پیشنهاد مستلزم بررسی و انجام آزمایش های متعدد بسیاری می باشد.

در آزمون جذب آب کل (شکل شماره ۱۱)، برخلاف آزمون جذب آب موئینه (شکل شماره ۱۰) و جذب آب نیم ساعته (شکل شماره ۵)، میزان جذب آب آزمونه حاوی خاکستر بادی کمتر از جذب آب آزمونه حاوی میکرو سیلیس به دست آمده است. احتمالا یکی از دلایل این اختلاف، تفاوت زمان در معرض آب قرار گرفتن آزمونه‌ها می باشد. در روش جذب آب کل، آزمونه پس از خشک شدن ۲ روز در آب غوطه‌ور است ولی در دو آزمون دیگر آزمونه نیم الی ۳ ساعت در تماس با آب قرار دارد. به طور کلی، بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، به نظر می رسد عدد ٪۳/۵ به عنوان حداکثر جذب آب کل برای بتن‌های واقع در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید مناسب می باشد. البته این نتیجه را نمی توان تعمیم داد و به منظور دستیابی به نتایج قطعی تر، می بایست آزمایشات گسترده‌تری انجام شود.

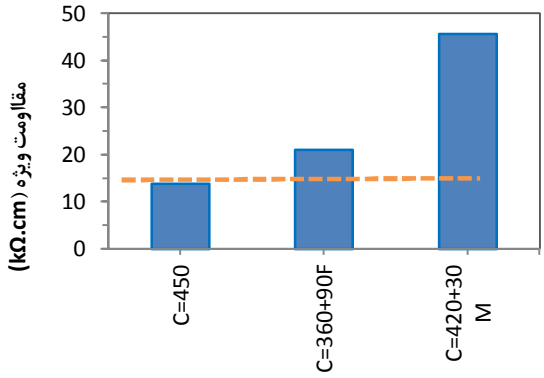
با توجه به شکل ۱۲، افزودن پوزولان به عنوان جایگزین سیمان باعث افزایش شدید مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده است. این افزایش در نمونه حاوی میکروسیلیس بسیار بیشتر از خاکستر بادی بوده است در حالیکه میزان پارامترهای پایایی بتن حاوی میکروسیلیس در سایر آزمون‌ها دارای تفاوت زیادی با بتن حاوی خاکستر بادی نمی‌باشد. بنابراین استفاده از این آزمون در بتن‌های حاوی پوزولان خصوصاً میکروسیلیس و مقایسه آن با بتن‌های معمولی احتمال برآوردهای اشتباه از پایایی بتن را به همراه دارد. بر اساس داده‌های به دست آمده و جدول ۸، می‌توان مقاومت الکتریکی ویژه $۲۰\ k\Omega/cm$ را به عنوان حداقل لازم برای بتن‌های واقع در شرایط محیطی فوق‌العاده شدید، پیشنهاد داد. البته با توجه به محدود بودن نتایج این تحقیق، لزوم بررسی بر روی آزمونه‌های بیشتر به منظور تعمیم این پیشنهاد اجتناب ناپذیر می‌باشد.



شکل ۱۰- تاثیر پوزولان بر جذب آب مویین



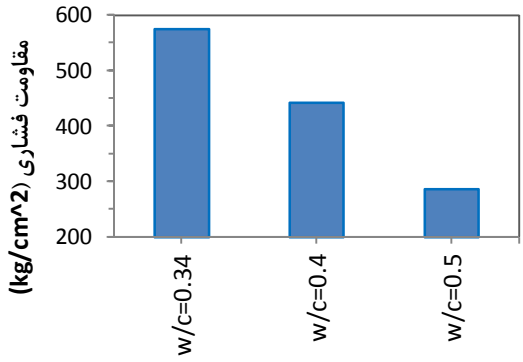
شکل۱۱- تاثیر پوزولان بر جذب آب کل



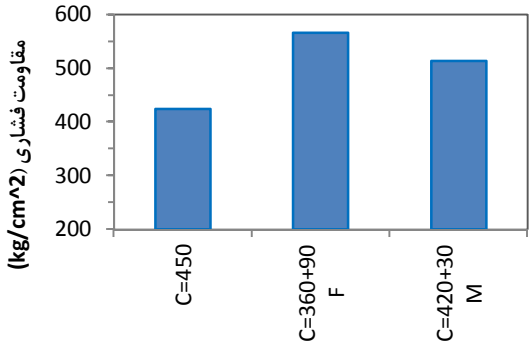
شکل۱۲- تاثیر پوزولان بر مقاومت الکتریکی بتن

۳- ۵- مقاومت فشاری

در نمودار شماره ۱۳ مشاهده می‌شود که افزایش مقدار نسبت آب به سیمان علاوه بر کاهش دوام بتن، باعث کاهش شدید مقاومت فشاری نیز می شود. تاثیر افزودن پوزولان به عنوان جایگزین سیمان در بتن در شکل شماره ۱۴ نشان داده شده است. نمونه حاوی خاکستر بادی و نمونه حاوی میکروسیلیس مقاومت فشاری بالاتری در مقایسه با نمونه شاهد به دست آورده اند.



شکل ۱۳- تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن



شکل ۱۴- تاثیر پوزولان برمقاومت فشاری بتن

۴- تفسیر نتایج

برای مقایسه دقت آزمون‌ها با یکدیگر، هر نمونه حداقل شش بار آزمایش شده و تکرارپذیری داده‌ها در هر ۶ نوع طرح اختلاط بر اساس روش پیشنهاد شده توسط سامر [۴] بررسی گردید. نتایج حاصل از تحلیل انجام گرفته در جدول ۹ آمده است. کوچکی درصد خطای هر آزمون نشان می دهد که آزمون تکرارپذیری و دقت خوبی دارد.

بر اساس ضریب تغییرات به دست آمده، آزمون جذب آب کل دارای کوچک‌ترین ضریب خطا بوده و نسبت به سایر روش‌های مورد بحث از دقت بیشتری برخوردار است. پس از آن کمترین خطا مربوط به آزمایش جذب آب موئینه با درصد خطای حدود ۱۲ می باشد. از آنجا که این آزمایش مستلزم انجام عملیات برشکاری به منظور تهیه نمونه‌های مورد نظر می باشد، احتمالاً میزان خطای این آزمون با افزایش دقت و استفاده از تجهیزات مناسب در برشکاری، قابل کاهش می باشد [۴]. اگرچه ضریب تغییرات مربوط به داده‌های آزمون جذب آب نیم ساعته در این تحقیق در حد قابل قبولی است ولی این مقدار از نتایج دو آزمون جذب آب دیگر بسیار بالاتر می باشد.

آزمون نفوذ آب در بتن بیشترین پراکندگی در میان نتایج را به خود اختصاص داده است. که بیانگر درصد بالای خطای این آزمون می باشد و با توجه به متفاوت بودن محدوده نتایج این آزمون با دو آزمون دیگر آیین نامه پایایی، به نظر می رسد آزمون نفوذ آب در بتن شاخص چندان مناسبی جهت ارزیابی دوام بتن نمی باشد.

نتایج مربوط به آزمون نفوذ یون کلرید، مندرج در جدول ۹ نشان می دهد که این آزمایش دارای دقت نسبتاً خوبی است. در صورت حذف نتایج مربوط به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس مقدار ضریب بسیار کوچکتر می گردد، ولی در این حالت نیز دقت دو آزمون جذب آب کل و موئینه از آزمون نفوذ یون کلرید بیشتر می باشند.

آزمون مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی متری، در تمام وجوه آزمونه و در راستای قطر انجام شده است. پراکندگی داده‌های آزمون مقاومت الکتریکی در جدول ۹ نشان می دهد که این آزمون غیر مخرب پس از آزمایش نفوذ آب از کمترین دقت برخوردار می باشد. البته کوچک بودن آزمونه‌ها می تواند یکی از دلایل بالا رفتن خطای این آزمون باشد.

در جدول ۱۰، برخی شرایط فیزیکی شش آزمون انجام شده ذکر شده است. بر این اساس روش جذب آب موئینه به لحاظ سن نمونه در هنگام آزمون و همچنین از نظر زمان انجام آزمون نسبت به سایر آزمون‌ها، سریعتر و به همین علتمی تواندروش مناسبی جهت کنترل پایایی بتن در حین ساخت پروژه‌های دریایی و ساختمانی باشد.

اگر مسئله سرعت به دست آمدن نتایج آزمایش مورد تاکید نباشد، بر اساس نتایج آماری جدول ۹ و همچنین عدم نیاز به تجهیزات خاص، مغزه گیری و برشکاری، آزمون جذب آب کل بر اساس ASTM C642 روشی دقیق تر، آسان تر و کم هزینه تر نسبت به سایر روش‌ها می باشد.

در میان آزمون‌های مورد بحث، آزمون نفوذ تسریع شده یون کلرید[۲] به علت تماس و کنترل بتن با یون کلر، امکان بهتری برای ارزیابیبنحوه عملکرد بتن در شرایط دریایی را می دهد. اما هزینه بالای آزمایش یا خرید و تعمیرات تجهیزات و همچنین لزوم برشکاری و تهیه مغزه از نمونه‌های بتنی، باعث شده عملا در تعداد کمی از پروژه‌های جنوب کشور از این آزمون استفاده شود.

مطابق جدول ۱۰، آزمون مقاومت الکتریکی صرف نظر از لزوم به کارگیری تجهیزات ویژه، در مدت زمان بسیار کوتاه و به راحتی قابل انجام می باشد. ولی به دلیل حساس بودن این آزمون به نوع پوزولان، ابعاد آزمونه و شرایط رطوبتی، توصیه می شود این آزمون

به همراه سایر روش‌ها به صورت همزمان و برای کنترل نسبی نمونه‌های طرح‌های مشابه استفاده شود.

در آیین نامه پایایی بتن ایران، شرایط محیطی به سه دسته کلی تقسیم و حدود مجاز برای آزمون‌های دوام در آنها تعیین شده است (جداول شماره ۱ و ۲). با مقایسه نتایج آزمون‌های پیشنهادی آیین نامه پایایی و سه آزمون جذب آب کل، جذب آب موئینه و نیز مقاومت الکتریکی، در جدول ۱۱ حدود اولیه برای شرایط محیطی شدید و فوق‌العاده شدید پیشنهاد شده است. البته با توجه به محدود بودن نتایج این تحقیق، لزوم بررسی بر روی آزمونه های بیشتر به منظور تعمیم این پیشنهاد اجتناب ناپذیر می باشد.

جدول ۹ - مقایسه آماری نتایج حاصله از آزمون‌ها

نام آزمون	طرح	تعداد آزمونه	مقدار بیشینه داده ها	مقدار کمینه داده ها	میانگین داده ها	درصد خطا	میانگین درصد خطا
نفوذ آب در بتن *(mm)*	w/c=0.34	۶	۱۳	۵	۸/۸	٪۹۰/۵۷	۸۶/۳۱
	w/c=0.4	۶	۱۵	۵	۱۰/۸	٪۹۲/۳۱	
	w/c=0.5	۶	۱۵	۱۰	۱۰/۴	٪۳۵/۷۱	
	C=450	۶	۱۵	۵	۹/۸	٪۸۲/۱۹	
	C=420+30M	۶	۱۵	۵	۱۲/۲	٪۱۰۱/۷۰	
	C=360+90F	۶	۱۵	۵	۸/۷	٪۱۱۵/۳۹	
جذب آب نیم ساعته *(%)*	w/c=0.34	۶	۲/۶۹	۲/۸۲	۲/۴۹	٪۲۰/۲۷	۲۶/۶۸
	w/c=0.4	۶	۲/۸۰	۲/۴۳	۲/۶۷	٪۱۳/۹۳	
	w/c=0.5	۶	۷/۷۹	۴/۶۲	۵/۸۴	٪۵۴/۱۸	
	C=450	۶	۲/۷۷	۲/۰۵	۲/۲۹	٪۳۱/۶۷	
	C=420+30M	۶	۱/۹۰	۱/۵۱	۱/۷۴	۱۸/۸۶	
	C=360+90F	۶	۱/۸۹	۱/۵۷	۱/۷۷	٪۲۱/۲۰	
نفوذ تسریع شده یون کلرید (کولمب)	w/c=0.34	۶	۲۵۸۹	۲۰۹۶	۲۳۴۵/۸	٪۲۱/۰۲	۲۱/۱۸
	w/c=0.4	۶	۲۷۳۰	۲۳۵۶	۲۵۳۰	٪۱۴/۷۸	
	w/c=0.5	۶	۴۵۲۳	۳۸۹۰	۴۲۴۱/۵	٪۱۴/۹۲	
	C=450	۶	۲۰۲۴	۱۶۱۷	۱۸۴۴/۵	٪۲۲/۰۷	
	C=420+30M	۶	۱۱۳۷	۸۰۷	۹۷۱/۵	٪۳۳/۹۷	
	C=360+90F	۶	۹۷۶	۷۸۹	۹۱۹	٪۲۰/۳۵	
جذب آب موئینه $(v/v/sec^{-\frac{1}{2}})$	w/c=0.34	۹	$۵/۰۷\times۱۰^{-۴}$	$۲/۰۲\times۱۰^{-۴}$	$۳/۱۶\times۱۰^{-۴}$	٪۹/۶۵	۱۲/۸۱
	w/c=0.4	۹	$۴/۷۶\times۱۰^{-۴}$	$۴/۱۴\times۱۰^{-۴}$	$۴/۵۵\times۱۰^{-۴}$	٪۱۰/۳۹	
	w/c=0.5	۹	$۶/۸۴\times۱۰^{-۴}$	$۵/۹۸\times۱۰^{-۴}$	$۶/۰۳\times۱۰^{-۴}$	٪۱۴/۳	
	C=450	۹	$۵/۴۸\times۱۰^{-۴}$	$۱/۸۹\times۱۰^{-۴}$	$۳/۱۲\times۱۰^{-۴}$	٪۱۱/۵۱	
	C=420+30M	۹	$۶/۵۲\times۱۰^{-۴}$	$۲/۰۲\times۱۰^{-۴}$	$۲/۸۷\times۱۰^{-۴}$	٪۱۳/۶۳	
	C=360+90F	۹	$۵/۳۵\times۱۰^{-۴}$	$۱/۶۷\times۱۰^{-۴}$	$۲/۷\times۱۰^{-۴}$	٪۱۵/۷	
جذب آب کل *(%)*	w/c=0.34	۶	۳/۴۲۳	۳/۳۰۰	۳/۳۶۷	٪۴/۲۴۹	۸/۲۸
	w/c=0.4	۶	۴/۹۹۹	۴/۵۸۴	۴/۷۷۴	٪۸/۶۸۷	
	w/c=0.5	۶	۵/۷۹۹	۵/۶۱۶	۵/۷۰۳	٪۳/۲۰۴	
	C=450	۶	۳/۶۶۱	۳/۲۶۵	۳/۵۱۵	٪۱۱/۲۶۵	
	C=420+30M	۶	۳/۴۳۶	۳/۱۸۲	۳/۳۳۲	٪۷/۶۳۳	
	C=360+90F	۶	۲/۹۹۱	۲/۵۷۸	۲/۸۱۶	٪۱۴/۶۶۲	
مقاومت الکتریکی *(kΩ/cm)*	w/c=0.34	۷۲	۲۲	۹	۱۳/۵۱	٪۹۳	۶۶
	w/c=0.4	۷۲	۱۵	۷/۹	۱۰/۷۹	٪۶۶	
	w/c=0.5	۷۲	۱۳	۵	۷/۳۷	٪۱۰۸	
	C=450	۷۲	۱۷	۱۱	۱۳/۸۸	٪۴۳/۳	
	C=420+30M	۷۲	۶۱	۳۷	۴۷/۰۸	٪۵۱	
	C=360+90F	۷۲	۲۸	۱۷	۲۱/۰۳	٪۵۲	

نتیجه گیری

۱- آزمون‌های جذب آب موئینه، جذب آب کل و مقاومت الکتریکی می توانند در کنار آزمون‌های پیشنهادی آیین نامه پایایی بتن معیار خوبی برای پیش بینی دوام بتن باشند.

۲- در میان آزمون‌های بررسی شده، آزمون جذب آب کل ساده ترین و در دسترس ترین آزمون می باشد. این آزمون نیازمند تجهیزات ویژه آزمایشگاهی نبوده و برای تهیه آزمونه آن نیاز به مغزه گیری یا برش نمی باشد. همچنین در این تحقیق کمترین پراکندگی داده مربوط به این آزمون می باشد.

۳- آزمون جذب آب موئینه، به عنوان یک روش سریع و ساده می تواند در کنترل کیفیت پروژهای بتنی حاشیه خلیج فارس و دریایی عمان در حین اجرا استفاده گردد.

۴- با توجه به پراکندگی بالای داده‌های آزمون نفوذ آب در بتن و محدوه متفاوت به دست آمده نسبت به سایر آزمون‌ها، این آزمون به تنهایی نمی تواند معیار خوبی برای پایایی بتن باشد.

۵- به دلیل حساس بودن آزمون مقاومت الکتریکی به نوع پوزولان، ابعاد آزمونه و شرایط رطوبتی، توصیه می شود این آزمون به همراه سایر روش‌ها به صورت همزمان و برای کنترل نسبی نمونه‌های طرح‌های مشابه استفاده شود.

۶- به نظر می رسد محدوده مجاز اولیه برای سه آزمون جذب آب موئینه، جذب آب کل و مقاومت الکتریکی به ترتیب در شرایط محیطی شدید آیین نامه ملی پایایی بتن حداکثر $v/v/sec^{-0.5}$ $۴/۵\times۱۰^{-۴}$، حداکثر ۵٪ و حداقل $۱۰\ k\Omega.cm$ و برای شرایط محیط فوق‌العاده شدید به ترتیب حداکثر $v/v/sec^{-0.5}$ $۳/۵\times۱۰^{-۴}$، حداکثر ۳/۵٪ و حداقل $۲۰\ k\Omega.cm$ مناسب باشند که با توجه به محدود بودن آزمایشات این پژوهش غیر قابل تعمیم بوده و پیشنهاد می شود مطالعات گسترده با هدف بازنگری آیین نامه ملی پایایی بتن و حدود پیشنهادی این آیین نامه صورت گیرد.

۷- در تمامی آزمون‌های انجام شده، افزایش نسبت آب به سیمان به وضوح نشان دهنده کاهش پایایی بتن می باشد. تاثیر استفاده از پوزولان‌های مختلف بر پایایی در تمامی موارد مثبت بوده ولی میزان تاثیر آن در آزمون‌های مختلف، متفاوت می باشد.

کلید واژگان

1- Capillary
2- RCPT

۶- مراجع

1- BHRC NO. S-428, (2005), *National code of Practice for Concrete Durability in the Persian Gulf and Omman Sea,* "In persian".

2- BHRC NO. R-434, (2006), *Assessing Concrete Durability with Different Cements and Pozzolans in Persian Gulf and Environment,* "In persian".

3-Gholami, A. and Mohammadi Pour M., (2011), *Evaluate the effective factors on concrete capillary as indicators of the durability in coastal areas*, 3th National Conference of Concrete, Tehran, Iran, "In persian".

4-Summers, G. R. J., (2005), *Concrete Durability Test Method*, Ministry of Works and Housing, Kingdom of Bahrain.

5- Fugerlund, G., (1982), *On the capillarity of concrete*, Journal of Nordic concrete Research, No. 1.

6- Summers, G. R. J., (2001), *A Framework for Durable Concrete*, Gulf Construction Magazine, September.

7-BS 1881 part 122, (2011), *Testing concrete Method for determination of water absorption*.

8- ASTM C642, (1997), *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.

9- ASTM C1202-97, (1997), *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetrationete***.**

10- BS EN 12390-8, (2000), *Testing hardened concrete part 8: Depth of penetration of water under pressure*.

11- ACI 222 R- 01, (2010), *222R-01: Protection of Metals in Concrete against Corrosion*.

12-Nili M. and Salehi A.M., (2011), *Influence of natural pozzolan, fly ash and silica fume on the compressive strength and water absorption of concrete with high resistance*, International Journal of Omran Modares, Vol. 10, No. 4. "In persian".