

Investigating Durability Properties of Binary and Ternary Self-Consolidating Concrete Mixtures in Simulated Marine Environment (Persian Gulf)

Sajjad Mirvalad^{a*}, Ali Akbar Shirzadi Javid^b, Sadegh Manouchehri^c

^a Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

^b Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

^c M.Sc. Student, School of Civil Engineering, Iran University of Science & Technology

* Corresponding author (mirvalad@iust.ac.ir)

Abstract

The performance of binary and ternary self-consolidating concrete (SCC) samples immersed in Persian Gulf simulated water including compressive strength, electrical resistance, bulk water absorption, total voids and chloride ions penetration were investigated. Portland cement was partially replaced with 8, 20, and 50% (by mass) of silica fume, metakaolin and slag, respectively. In addition, ternary blends containing the mentioned percentages of metakaolin and silica fume as well as slag and metakaolin were cast. The water to binder ratio was considered 0.45. The results indicated the improvement in the performance of immersed binary and ternary SCC samples compared with control samples. SCC containing the studied supplementary cementing materials showed better performance compared to the plain SCC when immersed in sea water from the view point of resistance against chloride ions attack. The best performance was arrived to the ternary SCC containing metakaolin and silica fume. The samples containing slag did not perform well in the Persian Gulf exposure which can be related to the poor quality of the studied slag.

Keywords: Self-Consolidating Concrete; Chloride Ions Penetration, Electrical Resistivity, Silica Fume; Metakaolin; Slag; Simulated Marine Environment.

بررسی دوام مخلوط های بتن خودتراکم دو و چند جزئی در شرایط شبیه سازی دریایی (خلیج فارس)

دریافت مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۰۳

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸-۰۸-۱۳

سید سجاد میرولد*

استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

mirvalad@iust.ac.ir

علی اکبر شیرزادی جاوید

استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

صادق منوچهری

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق عملکرد نمونه های بتن خودتراکم شامل مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی، جذب آب حجمی، تخلخل کل و پدیده نفوذ یون کلرید در شرایط شبیه سازی شده ی مستغرق در خلیج فارس در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده است. در طرح مخلوط بتن خودتراکم از جایگزین کردن ۸، ۲۰ و ۵۰٪ سیمان با مواد افزودنی به ترتیب میکروسیلیس، متاکائولن و سرباره و همچنین برای مخلوط های چند جزئی، میکروسیلیس و متاکائولن و نیز میکروسیلیس و سرباره با درصد های جایگزینی مذکور استفاده شده است. در این تحقیق از نسبت های آب به سیمان ثابت ۰/۴۵، استفاده شده است. نتایج نشان دهنده عملکرد مثبت آزمون های حاوی مواد افزودنی در مقایسه با بتن های بدون مواد افزودنی است. بتن خود تراکم حاوی مواد افزودنی در برابر نفوذ یون کلرید مقاومت بیشتری را در شرایط غوطه وری در دریا از خود نشان می دهند. بتن های خود تراکم بدون مواد جایگزین کمترین مقاومت را در برابر نفوذ یون کلرید داشتند و مخلوط های بتنی چند جزئی حاوی میکروسیلیس و متاکائولن در تمامی سنین عملکرد بهتری در برابر نفوذ یون کلرید داشته اند. مخلوط های بتن چند جزئی حاوی سرباره و میکروسیلیس و همچنین مخلوط های بتنی حاوی سرباره دارای مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با بتن شاهد در تمامی سنین بودند که می توان دلیل این امر را، تخلخل بالای ایجاد شده در دوران آماده سازی و استفاده از سرباره نامرغوب دانست.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، نفوذ یون کلرید، مقاومت ویژه الکتریکی، میکروسیلیس، متاکائولن، سرباره، محیط شبیه سازی دریایی.

در سال های اخیر، مشکلات ایجاد شده برای سازه های بتنی در مناطق مخرب دنیا از جمله خلیج فارس موجب شده تا دوام و پایداری بتن اهمیت خاصی پیدا کند به طوری که امروزه پایداری بتن در طراحی و ساخت سازه های زیربنایی هر کشوری از اصلی ترین عوامل می باشد. با پیشرفت سازه های بتنی و صنایع بتن پیش ساخته و همچنین به دلیل کمبود کارگر های ماهر مفهوم بتن خود تراکم برای اولین بار توسط اوکامورا¹ [1] در ژاپن ارائه گردید. بتن خود تراکم تحت وزن خود می تواند حرکت کند برای تراکم نیاز به ویبراسیون ندارد. بتن خود تراکم با ویژگی های خود می تواند دوام سازه های بتنی را افزایش دهد. از آنجایی که حرکت سیال های مخرب از محیط زیست به درون بتن علت اصلی اغلب خرابی ها در بتن می باشند، عمرزنده المان های بتنی و نفوذ پذیری دو فاکتور مهم در دوام به شمار می آیند. به منظور درک درست از عمر زنده تنش های مکانیکی و محیط زیستی، لازم است که دانش کافی نسبت و خواص مصالح به خصوص پدیده انتقال داشت. در این راستا فرایندهای مختلف به انتقال مواد زیان آور به داخل به توان بیشتر به صورت انتشار، جذب و نفوذ به عنوان نیروی محرکه و همچنین ماهیت مصالح انتقال یافته شده شناخته می گردد. استفاده از پوزولان های مختلف از جمله روش های مهم به منظور بهبود پایداری بتن است. نقش مواد افزودنی معدنی بر روی فعالیت سیمانی ناشی از دو اثر فیزیکی- شیمیایی و ریز ساختار است. طبق انیسا² [2] اثر شیمیایی باعث بهبود چسبندگی ماتریس سیمانی با کاهش حجم هیدرات ها می گردد. به طور کلی مقاومت فشاری با استفاده از افزودنی پوزولانی افزایش پیدا میکند. زیرا پوزولان ها با محصولات هیدراتاسیون سیمان واکنش داده و محصولات هیدراته جدیدی را که می تواند در افزایش مقاومت فشاری مثر اثر باشند، تشکیل می دهد. همچنین در ماتریس سیمانی، تعداد زیادی از ذرات ریز در کنار دانه های سیمان امکان تولید فرآورده های هیدراته و افزایش پیچیدگی ساختار به همراه افزایش چسبندگی را محتمل می کند.

به همین دلیل از نظر مکانیکی، اثر چسبندگی افزودنی معدنی نقش ساختاری در ماتریس سیمان ایفا می کند. که باعث کاهش تخلخل از لحاظ نقطه نظردوامی این اثر ساختاری باعث بهبود مقاومت در مواجهه با عوامل مخرب شیمیایی تعبیر می گردد. پوزولان های مورد استفاده در کشور ما اغلب میکروسیلیس و تا حدودی متاکائولن و سرباره می باشد. میکروسیلیس یک سوپرپوزولان با مشخصاتی است که اکثر مهندسين با آن آشنایی دارد. متاکائولن یک پوزولان بسیار فعال است مواد اولیه در تولید کائولن، رس کائولن می باشد. کائولن یک ماده معدنی بسیار ریز سفید و بررسی است که در دمای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه سانتی گراد این مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می دهند. دمای کائولینیت که اصلی ترین جزء تشکیل دهنده کائولن است، که به واسطه دی هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتیگراد می باشد. به منظور تولید متاکائولن، رس کائولن تا دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد حرارت می دهند [3].

متاکائولن با هیدروکسید کلسیم شکل گرفته در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند واکنش می دهد این روند باعث تغییر در ساختار بتن از لحاظ بهبود خواص مکانیکی و دوام می شود. ویوک³ [4] نشان داد که بتن های خود تراکم حاوی مواد جایگزین دوده سیلیس، متاکائولن و سرباره همگی مقاومت بهتری نسبت به بتن شاهد دارند. همچنین در این تحقیق نشان دادند که جایگزینی ۲۰، ۱۰ و ۵۰٪ سیمان به ترتیب با میکروسیلیس، متاکائولن و سرباره منجر به بهبود مقاومت فشاری و کاهش منافذ نسبت به بتن شاهد گردیده اند با جایگزین کردن ۵۰ درصد سیمان با سرباره منجر به بهبود ۷۵ درصد مقاومت فشاری می گردد.

¹ Okamura

² Anissa

³ Vivek s,s

بتن های خود تراکم حاوی ۱۵ درصد متاکائولن بیشترین مقاومت فشاری را نسبت به دیگر طرح به مخلوط ها در تمامی سن ها از خود نشان می دهد. همچنین نتایج نشان دادند که هرچه ماتریس سیمان به دلیل واکنش پوزولانی متراکم تر باشند، مقاومت فشاری بیشتر است و بالطبع نفوذ جذبی و همچنین تعداد حفرات نفوذپذیر به مراتب کمتر هستند. همچنین مخلوط های حاوی متاکائولن مقاومت خوبی را در برابر نفوذ یون کلرید از خود نشان ندادند و این بیانگر اثر مثبت متاکائولن در بتن خود تراکم می باشد.

سرباره محصول مصنوعی و جانبی است که به هنگام جداسازی آهن در کوره های ذوب آهن از ناخالصی های موجود در سنگ آهن به وجود می آید سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص، باقی می ماند. تحقیقات اوزیلدیریم^۴ [5] نشان می دهد که افزودن ۵ تا ۱۰ درصد میکروسیلیس به ۳۰ تا ۵۰ درصد سرباره جایگزین باعث افزایش مقاومت ۷ روزه و همچنین بیشترین مقاومت برای طرح های حاوی ۳۳ درصد سرباره و ۷ درصد میکروسیلیس بوده است. مستوفی نژاد و همکاران [۶] نشان داد که نمونه های حاوی ترکیب سرباره و میکروسیلیس دارای مقاومت بیشتری هستند. استفاده از مقادیر زیاد سرباره موجب کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به طور معمولی در سنین اولیه می شود. اما با کاربرد دوده سیلیس به همراه سرباره می توان کاهش مقاومت فشاری بتن در سنین اولیه را جبران نمود [7-9]. مقاومت بتن سه جزئی حاوی دوده سیلیسی و سرباره در برابر نفوذ یون کلرید در آزمایش RCPT نسبت به بتن دو جزئی حاوی سرباره و به طور معمولی بهتر است.

خواص پدیده های انتقال در این پژوهش در دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد. آزمایش های مورد بررسی قرار گرفته عبارتند از: نفوذ یون کلرید، جذب حجمی، مقاومت ویژه الکتریکی و تخلخل. این مقاله بر روی مقایسه تاثیرات ۸، ۲۰ و ۵۰٪ جایگزینی به ترتیب میکروسیلیس، متاکائولن و سرباره به جای سیمان و جایگزین سه جزئی میکرو سیلیس و سرباره و همچنین میکرو سیلیس و متاکائولن بر روی رفتار رئولوژیکی، مقاومت فشاری و پدیده های انتقال بتن خودتراکم در سنین اولیه تا سن ۱۸۰ روز می پردازد. در ابتدا ترکیبات معدنی و شیمیایی از طریق بررسی ریزساختار مصالح استفاده شده مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش هایی بر روی فاز خمیری بتن خود تراکم و متعاقباً آزمایش های مکانیکی بر روی وضعیت بتن سفت شده جهت ارزیابی مقاومت فشاری نمونه ها صورت گرفت. آزمایش های مربوط به پدیده های انتقال همچنین در سنین مختلف به منظور ارزیابی خواص دوام در راستای زمان انجام شد. در پایان مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید در سن ۱۸۰ روزه برای طرح مخلوط های مختلف در شرایط آب دریا مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- برنامه آزمایشگاهی

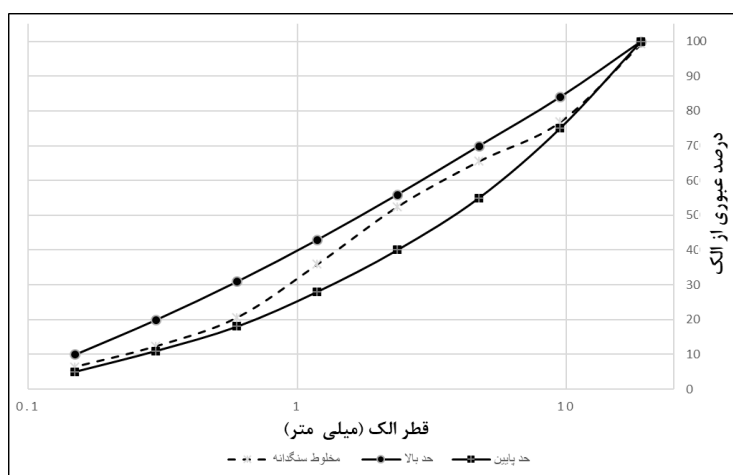
۲-۱- مواد و مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، از سیمان پرتلند تیپ دو با وزن مخصوص ۳/۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و نرمی بلین ۳۰۸۱ سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. مصالح سنگی در چهار اندازه دانه بندی شده و جهت دستیابی به دانه بندی پیوسته و مناسب، مکمل یکدیگر تهیه شده است. این مصالح شامل دو سایز شن درشت و ریز با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر و دو سایز ماسه درشت و ریز به ترتیب با حداکثر اندازه ۸ و ۳ میلیمتر می باشد. دانه بندی مصالح سنگی در شکل ۱ و مشخصات آنها در جدول ۱ ملاحظه می شود. همچنین از فوق روان کننده با پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص ۱/۱ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شد. در تمام مخلوط ها از پودر سنگ آهک به عنوان فیلر استفاده شده است که دارای وزن مخصوص ۲/۶۶ گرم بر سانتیمتر مکعب می باشد. مشخصات شیمیایی سیمان و پوزولانهای استفاده شده در جدول ۲ مشاهده می شود.

⁴ Ozyildirim

جدول ۱ مشخصات جرم حجمی و جذب آب سنگدانه های مصرفی

سنگدانه	نوع	وزن مخصوص g/cm^3	جذب آب %SSD
شن بادامی	شکسته	۲/۵۰۰	۱/۱۹
شن نخودی	شکسته	۲/۵۷۰	۲/۹۵
ماسه درشت	طبیعی	۲/۷۰۰	۳
ماسه ریز	طبیعی	۲/۷۰۰	۳/۲
پودر سنگ آهک	فیلر	۲/۶۶۰	۱۰/۱



شکل ۱ نمودار دانه بندی مصالح سنگی

جدول ۲ آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان های مورد مصرف

سرباره	متاکائولن	دوده سیلیس	سیمان	ترکیب شیمیایی
۳۴/۹۱	۷۵/۲۹	۹۴	۲۰/۷۴	SiO_2
۱۳/۳۶	۱۷/۰۳	۱	۴/۹۰	Al_2O_3
۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۱	۳/۵۰	Fe_2O_3
۳۷/۵۷	۱/۳۴	۱	۱/۲۰	CaO
۵/۲	۰/۷	۰/۶	۶۲/۹۵	MgO
۳/۴۶	-	۱/۲	۳/۰۰	SO_3
۱/۱	۰/۲۲۶	۰/۳	۱/۵۶	Na_2O
۱/۱	۰/۸۴	۰/۳۷	۰/۷۴	K_2O
۲۷۰۰	۲۵۰۰	۲۲۰۰	۳۱۵۰	چگالی kg/m^3

۲-۲ نسبت های مخلوط بتن

در این پژوهش به منظور بررسی اثر پوزولان ها بر بتن خودتراکم، یک دسته بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شد. همچنین شش طرح مخلوط بتن که شامل سه طرح دو جزئی و دو طرح سه جزئی مطابق جدول ۳ مورد مطالعه قرار گرفتند.

جدول ۳ نسبت های مخلوط مصالح

معرف بتن	سیمان	درصد و نوع افزودنی	میکروسیلیس	متاکائولن	سرباره	پودر سنگ آهک	مصالح سنگی	نسبت آب به مواد سیمانی	فوق روانکننده
							kg/m ³		lit/m ³
S N	۳۸۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۷۱۴/۱۳	۰/۴۵	۲/۶۶
S F	۳۴۹/۶	میکروسیلیس (۸٪)	۳۰/۰۴	۰	۰	۱۰۰	۱۷۰۳/۱۳	۰/۴۵	۳/۸۵
M k	۳۰۴	متاکائولن (۲۰٪)	۰	۷۶	۰	۱۰۰	۱۶۹۷/۶	۰/۴۵	۲/۷۴
S L	۱۹۰	سرباره (۵۰٪)	۰	۰	۱۹۰	۱۰۰	۱۶۸۷/۶۵	۰/۴۵	۲/۲۸
MK+SF	۲۷۳/۹۶	۸+۲۰	۳۰/۰۴	۷۶	۰	۱۰۰	۱۶۸۶/۶۳	۰/۴۵	۴/۱۱
SL + SF	۱۵۹/۹۶	۸+۵۰	۳۰/۰۴	۰	۱۹۰	۱۰۰	۱۶۷۶/۶۷	۰/۴۵	۲/۴۰

۳- آزمایش های انجام شده

۳-۱- آزمایش خواص بتن تازه

در بخش رئولوژی برای بررسی قابلیت پرمیسی و عبور، آزمایش های جریان اسلامپ، T50، آزمایش قیف V، آزمایش شاخص پایداری چشمی و حلقه J طبق دستور العمل [10] EFNARC انجام شد.

۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

نمونه های بتنی مکعبی ۱۰*۱۰*۱۰ جهت تعیین مقاومت فشاری تعیین گردیدند. بعد از باز کردن غالب ها نمونه ها تا سن آزمایش در آب آهک و حوضچه شبیه سازی دریا نگهداری شدند. آزمایش مقاومت فشاری برای سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام شدند. این آزمایش بر اساس استاندارد BS 1881:PART 116 [۱۱] محاسبه شده است.

۳-۳- آزمایش تخلخل و جذب آب بتن

این آزمایش طبق دستورالعمل ASTM C642 [۱۲] انجام شده است. جذب آب بتن ها به صورت درصد وزنی با استفاده از میانگین گیری نتایج ۳ نمونه مکعبی به دست آمده اند. این آزمایش نیز مانند مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه انجام شده است.

در سن مورد نظر نمونه ها از حوضچه عمل آوری خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه با دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته تا کاملاً خشک شوند. پس از خارج کردن از گرمخانه توزین شده (A) و پس از مدتی که کاملاً در هوای محیط خنک شدند، درون آب غوطه ور شدند و پس از ۲۴ ساعت از آب خارج شده و سطح آن ها توسط پارچه تمیز، خشک شده و توزین شدند (B). سپس نمونه ها به مدت ۵ ساعت در آب در حال جوش قرار گرفته و پس از آن دوباره سطح آن ها توسط پارچه تمیز، خشک شده و توزین شدند (C). در آخرین مرحله وزن غوطه وری نمونه ها اندازه گیری شده است (D). سپس طبق روابط ۱ و ۲ جذب آب حجمی و تخلخل نمونه ها محاسبه شده است.

$$\text{رابطه (۱)} \quad \text{درصد جذب حجمی آب} = \frac{(B - A)}{A} * 100$$

$$\text{رابطه (۲)} \quad \text{درصد تخلخل} = \frac{(C - A)}{(C - D)} * 100$$

که در این روابط هر پارامتر به شرح زیر است: A وزن نمونه خشک شده در گرمخانه، B وزن نمونه اشباع با سطح خشک، C وزن نمونه اشباع با سطح خشک پس از جوش و D وزن نمونه غوطه ور شده در آب.

۳-۴- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

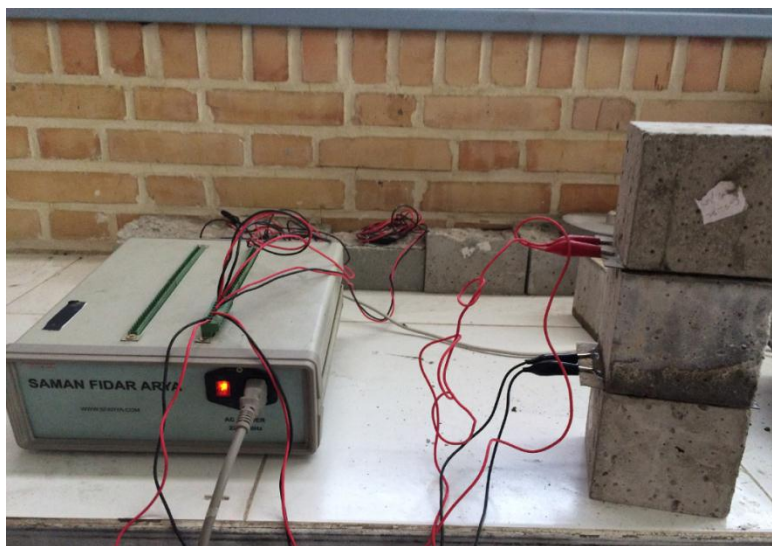
در این آزمایش همانند آزمایش تعیین مقاومت فشاری از آزمون‌های مکعبی ۱۰۰ میلی متر با همان شرایط عمل آوری استفاده شد. تعداد آزمون‌های ساخته شده در این آزمایش برای هر مخلوط با توجه به ماهیت غیرمخرب بودن آن ۳ عدد بود که در سنین ۷، ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز، آزمون‌ها از آب خارج و پس از انجام آزمایش مجدداً به آب برگردانده شدند.

برای تعیین مقاومت الکتریکی آزمون‌های ساخته شده در استانداردهای مختلف دستورالعملی خاصی وجود ندارد. از این رو برای انجام این آزمایش از وسایل و روش خاصی استفاده شد.

نحوه تعیین مقاومت الکتریکی هر آزمون به این ترتیب بود که بر روی یکی از صفحات مسی مقداری خمیر سیمان جهت ایجاد اتصال و برقراری مناسب جریان بین آزمون بتنی اصلی و صفحات مسی گذاشته شد، در نهایت با اتصال هر یک از سیم‌های دستگاه به یکی از صفحات مقدار مقاومت الکتریکی نشان داده شده ثبت شد. در شکل ۲ آزمون‌ها و صفحات مسی و نحوه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آزمون‌های بتنی نشان داده شده است. برای تعیین مقاومت ویژه الکتریکی، مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده طبق رابطه ۳ در سطح تماس ضرب و بر طول یا فاصله بین دو صفحه مسی تقسیم شد.

$$\rho = \frac{R \times A}{L} \quad \text{رابطه (۳)}$$

ρ برابر مقاومت ویژه الکتریکی R و $[\Omega.m]$ برابر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده $[\Omega]$ ، A سطح مقطع آزمون در تماس با خمیر $[m^2]$ و L ارتفاع آزمون با فاصله بین دو صفحه مسی $[m]$ می باشد.



شکل ۲ چگونگی برقراری مدار اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۳-۵- آزمایش تعیین میزان نفوذ یون کلرید در بتن

روش رایج برای تعیین درصد یون کلرید در بتن با سیمان، انجام تیتراسیون با نیترات نقره است که طبق استاندارد ASTM C114 [۱۳] یا AASHTO T269 [14] انجام می شود.

در استاندارد ASTM مقدار کل کلرید موجود در سیمان با آزمایش تیتراسیون با نیترات نقره اندازه‌گیری می شود، این روش برای بتن سخت شده، کلینکر و همچنین سیمان پرتلند خام نیز قابل استفاده است. در این آزمایش هیچ

ترکیب کننده دیگری نباید در واکنش های آزمایش تداخل ایجاد کند. بطور خلاصه، طی این آزمایش ۱۰ گرم از پودر مورد نظر داخل ۷۵ میلی لیتر آب مقطر ریخته به مدت ۵ دقیقه حرارت داده شده است و بعد ۲۵ میلی نیتریک اسید حل شده و پس از دو دقیقه، تا رسیدن به نقطه جوش حرارت داده می شود. پس از سرد شدن محلول و عبور آن از صافی، محلول آماده آزمایش می گردد. قبل از آزمایش، ۲ میلی لیتر کلرید سدیم با نرمالیت ۰/۰۵ داخل بشر حاوی محلول ریخته می شود. پس از نصب الکترودهای مخصوص و بورت، کم کم نیترات نقره ۰/۰۵ نرمال به محلول حاوی یون کلر اضافه شده و با تشکیل رسوب AgCl، اختلاف پتانسیل زیاد می شود. هر دفعه مقدار نیترات نقره اضافه شده و اختلاف پتانسیل مربوطه ثبت می گردد.

طی این آزمایش تغییرات اختلاف پتانسیل که ابتدا کم است، زیاد شده و سپس دوباره کم می شود. در این حالت آزمایش تمام شده و با رسم نمودار تغییرات اختلاف پتانسیل بر حسب مقدار نیترات نقره، نقطه عطف بدست آمده که با رابطه ای به درصد یون کلر مربوط می شود. در استاندارد AASHTO مرحله محلول سازی با روش ASTM متفاوت است.

۳-۶- تعیین ضریب انتشار بتن

میزان نفوذ یون کلرید بر حسب عمق از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشارپذیری Fick بیان می شود (رابطه ۴) [۱۵]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Dc \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{رابطه (۴)}$$

پس از حل معادله دیفرانسیل فوق به صورت رابطه ۵ در می آید:

$$C(x, t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن x فاصله از سطح بتن بر حسب متر، t مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه، D_c ضریب انتشارپذیری بر حسب متر مربع بر ثانیه، C_0 میزان درصد وزنی کلر در سطح بتن و $C(x, t)$ میزان درصد وزنی یون کلر در عمق x نسبت به سطح و در زمان t است. erf هم تابع خطاست که بصورت رابطه ۶ بیان می شود:

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-\beta^2} d\beta \quad \text{رابطه (۶)}$$

میزان کلرید اولیه در آزمون بدون پوزولان برابر ۰/۰۱۵ درصد وزنی بتن و در آزمون های حاوی متاکائولن برابر ۰/۰۱۰ درصد وزنی بتن بدست آمده است.

از برآزش هر پروفیل یون کلرید بر حسب عمق پودرگیری با رابطه فرض $C_0 = 0.01$ (حسب درصد وزنی بتن) و با استفاده از نرم افزار MATLAB اعداد D و C_s بدست می آیند.

۴- نتایج و تفسیر

۴-۱- نتایج کارایی مخلوطها و مقاومت فشاری

همانگونه که در جدول ۵ مشاهده می شود، نتایج آزمایش های کارایی برای کلیه مخلوطها، حدود جریان اسلامپ، T50 و حلقه l_c مطابق حدود تعیین شده در راهنمای EFNARC [۱۰] بوده است. همچنین در نتایج آزمایش مقاومت فشاری نیز ملاحظه می شود که مطابق انتظار با افزودن دوده سیلیس بیشترین افزایش در مقاومت فشاری نمونه نسبت به مخلوط حاوی سربراره و مخلوط بدون افزودنی بدست آمده است. مشاهده می شود که با کاهش نسبت آب به پودر در مخلوطها، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافته است.

جدول ۴ نتایج آزمایش های حالت تازه بتن

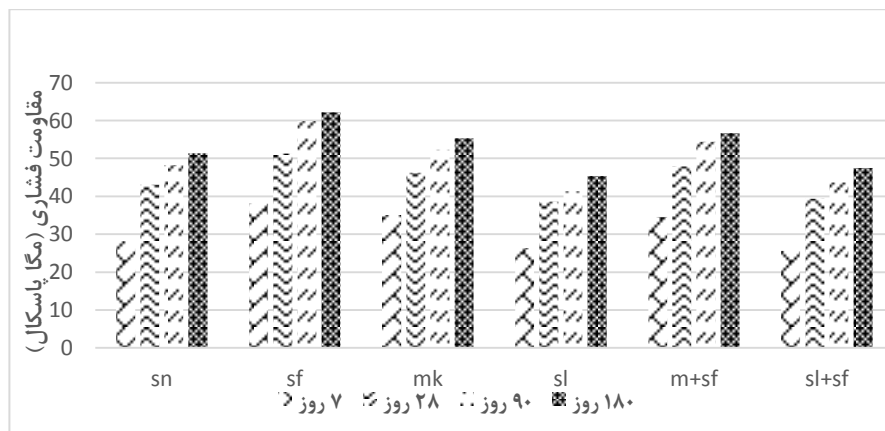
شاخص پایداری چشمی (VSI)	چگالی تازه بتن Kg/m ³	جریان اسلامپ		قیف V (ثانیه)	حلقه ل (میلی متر)	شناسه مخلوط
		T 50 (s)	قطر جریان اسلامپ			
۰	۲۲۹۲	۱/۲۵	۶۷۵	۲/۷	۹	SN
۱	۲۳۶۸	۲/۲۱	۶۴۰	۱۲/۷۶	۸	SF
۰	۲۳۵۷	۱/۵	۶۵۰	۸/۵۸	۸/۵	M
۲	۲۳۳۰	۳	۵۷۶	۱۳	۹	SL
۱	۲۳۳۰	۱/۶۸	۷۱۰	۶/۴	۷/۵	M+SF
۱	۲۳۳۱	۲	۶۵۷	۷/۳	۸	SL+SF

مقاومت فشاری نمونه های بتن بر حسب تابعی از زمان در محیط آب آهک و مستغرق در آب دریا در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که مقاومت فشاری نمونه های بتن حاوی دوده سیلیس و متاکائولن در تمامی سنین بیشتر از بتن ساده بوده است. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره کمی کمتر از بتن ساده بوده است. همچنین مقاومت فشاری نمونه های غوطه ور در آب دریا کمتر از نمونه های شاهد، بدست آمد.

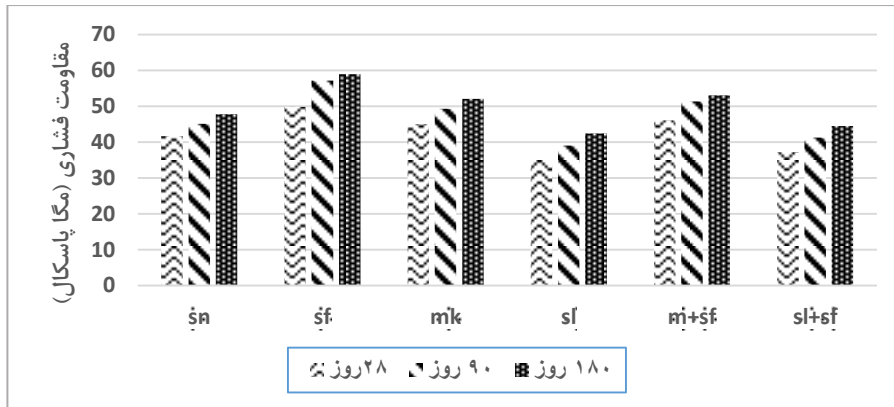
براساس نتایج نشان داده شده در شکل شماره ۳ مقاومت فشاری کلیه طرح مخلوط ها در تمامی سنین بین ۲۵٫۶ تا ۶۲٫۲ مگاپاسکال می باشد. براساس این نتایج، بیشترین روند رشد مقاومتی برای بتن حاوی سرباره با میکروسیلیس مشاهده می شود. با افزایش سن نمونه ها، مقاومت فشاری تا سن ۹۰ روزه افزایش یافته که این میزان افزایش برای بتن های مختلف، متفاوت بوده است. پس از سن ۹۰ روزه تقریباً افزایش مقاومت فشاری یکنواخت بوده است. تنها در بتن های حاوی سرباره پس از ۹۰ روز رشد مقاومتی مشاهده شده است.

با بررسی بتن بدون افزودنی معدنی و بتن حاوی سرباره مشاهده می شود، باینکه مقاومت فشاری آن ها در ابتدا تقریباً برابر بوده است، اما به دلیل رشد مقاومتی کمتر بتن حاوی سرباره نسبت به بتن بدون افزودنی معدنی، مقاومت فشاری طولانی مدت آن نسبت به بتن مرجع کمتر بوده است.

همانطور که مشاهده می شود در هر یک از مخلوطها تفاوت قابل توجهی بین مقاومت ۷، ۹۰ و ۱۸۰ روزه وجود دارد. که دلیل این امر را می توان به پیشرفت هیدراسیون و کاهش میزان اترینگایت و افزایش ژل C-S-H و در نتیجه متراکم تر و یکنواخت تر شدن ساختار خمیر سیمان که منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن با گذشت زمان می گردد، بیان نمود.



شکل ۳ مقاومت فشاری نمونه های بتنی در شرایط آب آهک

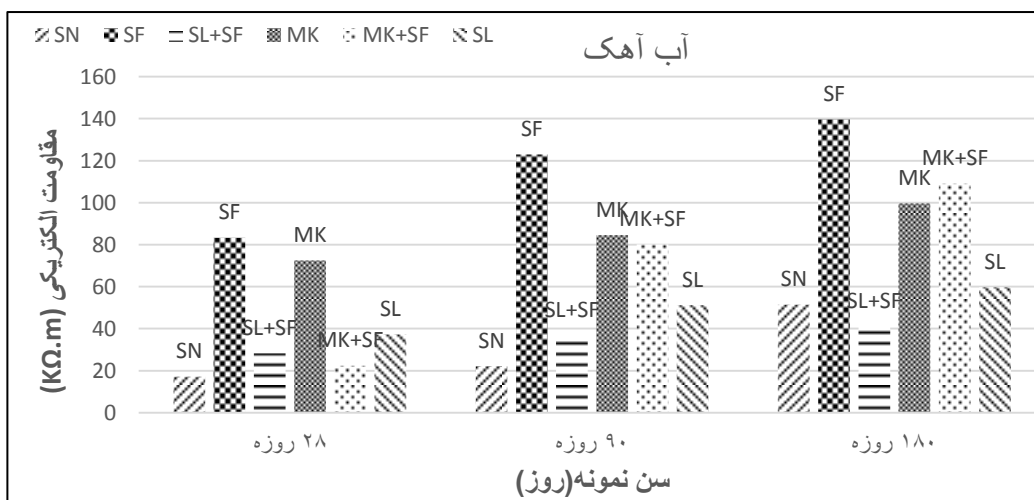


شکل ۴ مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی در شرایط مستغرق در آب دریا

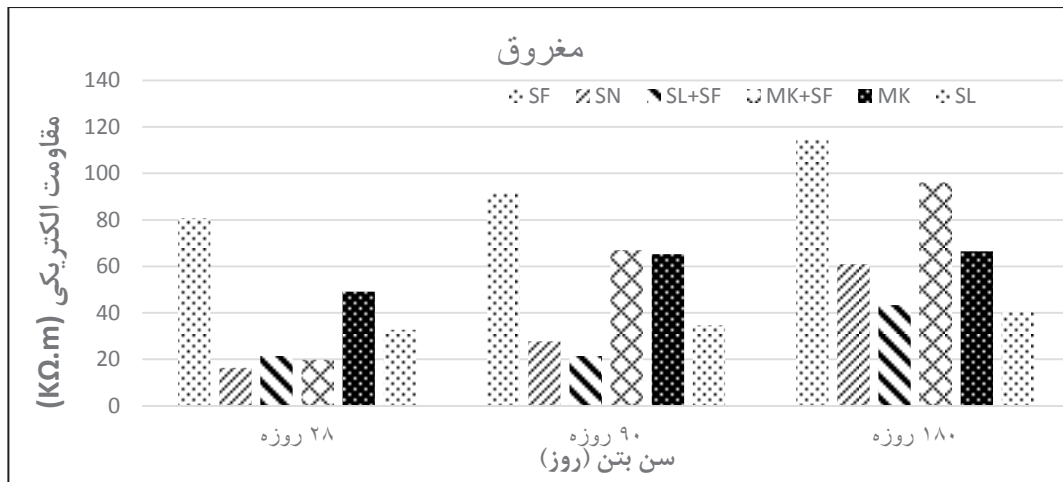
۲-۴- نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی:

بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده مربوط به آزمون‌های دارای افزودنی میکروسیلیس می‌باشند، در حالی که کمترین آن آزمون‌های حاوی بتن خودتراکم معمولی حاصل شده‌اند. مشابه چنین نتایجی در پژوهش‌های پیشین مشاهده شده است [16, 17] در نمودار مشاهده می‌شود. مخلوط‌های حاوی پوزولان باعث افزایش قابل توجه مقدار و آهنگ کسب مقاومت الکتریکی می‌شود، این افزایش در مقاومت ویژه الکتریکی در سنین اولیه ناچیز است، ولی در سنین بالاتر کاملاً چشمگیر می‌گردد. همچنین ذرات بسیار ریز پوزولان‌ها باعث پر شدن منافذ بتن شده و از قدرت تحریک یون‌ها به مقدار زیادی می‌کاهد. بنابراین باعث افزایش مقاومت الکتریکی در طرح‌های حاوی پوزولان‌ها سه‌گونی گردیده است.

نمونه‌های قرار گرفته شده در محیط دریایی خورنده شدید نسبت به محیط شاهد افزایش چشمگیری در مقاومت الکتریکی برخوردار بودند، با افزایش رطوبت و نفوذ یون کلر و به تبع آن شدت خوردگی افزایش می‌یابد. همچنین نشان می‌دهد که مقاومت الکتریکی در ناحیه غوطه‌وری کاهش می‌یابد، این واقعیت ممکن است اینگونه توجیه شود که یون‌های کلرید به داخل بتن نفوذ کرده و باعث افزایش غلظت یون کلرید در محلول منافذ شده و این امر منجر به افزایش هدایت الکتریکی و کاهش مقاومت الکتریکی شده است [۱۸].



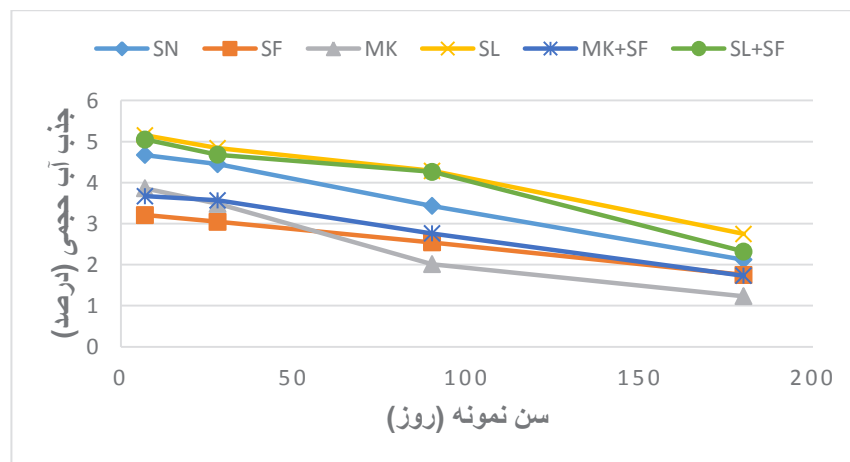
شکل ۵ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی در آب آهک



شکل ۶ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های بتنی مستغرق در دریا

۴-۳- نتایج آزمایش جذب آب حجمی

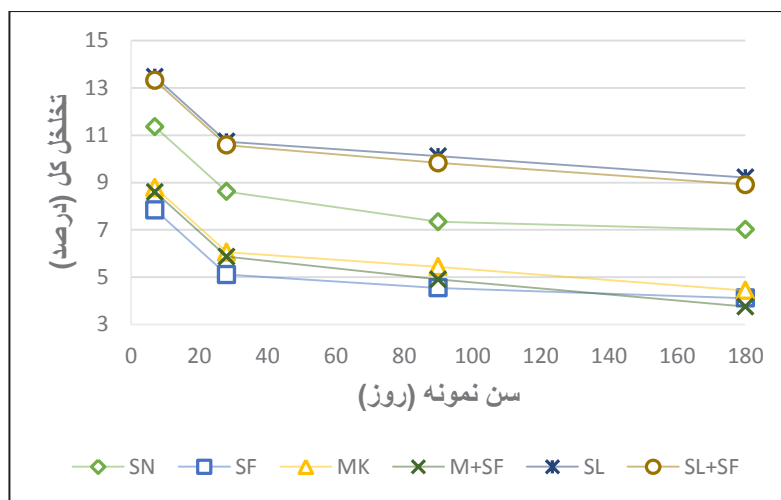
درصد جذب آب حجمی نمونه های بتن در شکل ۷ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود، جذب آب حجمی نمونه های حاوی افزودنی معدنی دوده سیلیس و متاکائولن، کمتر از نمونه ی بدون افزودنی معدنی بوده است. از طرف دیگر، نمونه حاوی سرباره، جذب آب بالاتری نسبت به بتن بدون افزودنی معدنی داشته است. اما با افزایش سن نمونه و واکنش پوزولانی آن، در سن نهایی جذب آب نهایی آن نزدیک به دیگر بتن ها شده است.



شکل ۷ تغییر در جذب آب حجمی بتن با افزایش سن نمونه

۴-۴- نتایج آزمایش تخلخل کل

مقدار تخلخل کل نمونه های بتن در سنین مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می شود که با اضافه کردن دوده سیلیس و متاکائولن به بتن، مقدار تخلخل کل بتن نسبت به بتن خودتراکم معمولی در تمامی سنین کمتر است. اما با اضافه کردن سرباره به بتن، در سنین اولیه سبب افزایش تخلخل کل بتن شده است. با افزایش سن نمونه ها، تخلخل در تمامی نمونه های بتنی کاهش یافته اما این مقدار کاهش برای بتن های مختلف متفاوت بوده به طوری که بیشترین میزان کاهش برای بتن بدون افزودنی معدنی و بتن حاوی سرباره مشاهده شده است. در سن ۲۸ روزه، کمترین تخلخل برای بتن حاوی دوده سیلیس ثبت شد، این در حالی است که در سن ۱۸۰ روزه، بتن حاوی هم زمان متاکائولن و میکروسیلیس دارای تخلخل کمتری بوده است.



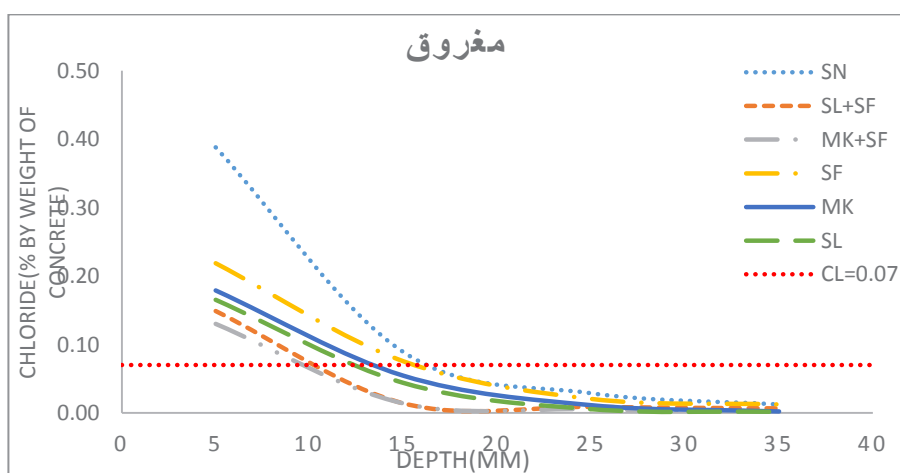
شکل ۸ تغییر در تخلخل کل بتن با افزایش سن نمونه

۴-۵- نتایج آزمایش نفوذ یون کلرید

پروفیل یون کلرید کل، مربوط به آزمون‌های حاوی افزودنی و آزمون بدون افزودنی در ناحیه مستغرق در آب دریا در نمودار ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار کلر بحرانی طبق تحقیقات قبلی به دست آمده از سازه‌های واقعی در منطقه خلیج فارس ۰/۰۷ درصد وزنی بتن در نظر گرفته شده است که در نمونه‌های مربوط به پروفیل آزمون‌ها مشخص می‌باشد [۲۰، ۱۹].

همچنین از دیگر پارامترهای حاصل از تجزیه و تحلیل نتایج برازش که در این تحقیق در مورد بررسی قرار گرفتند، می‌توان به مقادیر یون کلر در عمق ۱۵ میلی‌متر، ضریب انتشار پذیری و مقادیر کلر سطحی نیز اشاره کرد که در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

همچنین میزان عمق نفوذ یون کلر آزمون‌های حاوی متاکائولن و میکرو سیلیس و آزمون‌های حاوی متاکائولن، تقریباً یکسان است این میزان کمترین مقدار بین آزمون‌های دیگر می‌باشد. طبق جدول ۵ درصد کاهش عمق نفوذ یون کلرید در عمق ۱۵ میلی‌متر نسبت به آزمون‌های شاهد مشاهده شده است. کمترین درصد برای آزمون‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد و همچنین بیشترین میزان برای آزمون‌های حاوی متاکائولن و آزمون‌های سه جزئی سرباره و میکروسیلیس می‌باشد.



شکل ۹ پروفیل کلرید کلیه طرح هادر شرایط غوطه‌وری در دریا

مقدار نفوذ یون کلرید در بتن در عمق ۱۵ میلی متر (بر حسب درصد وزن بتن)

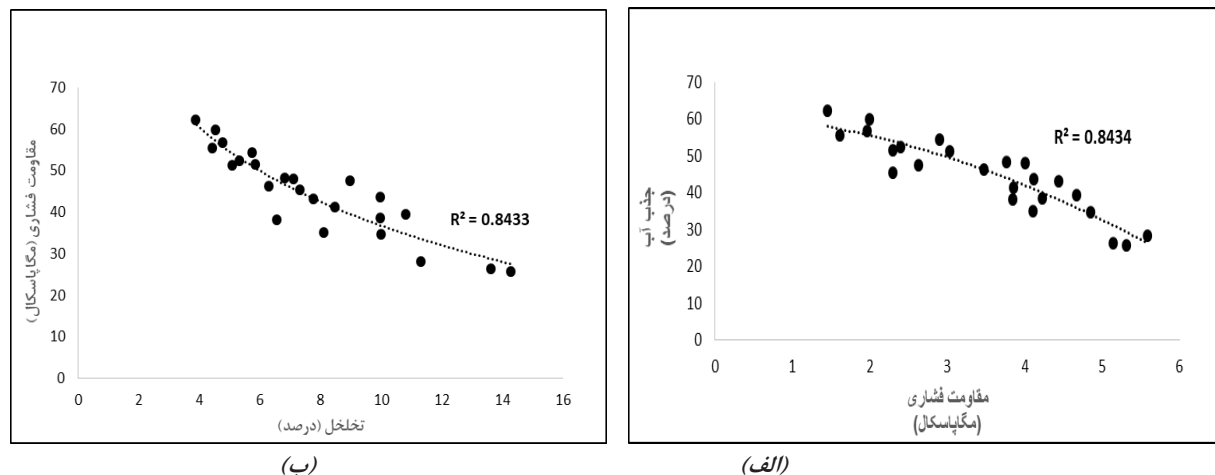
۴-۶- نتایج ضرایب انتشارپذیری

نتایج میزان ضریب انتشار پذیری DC و میزان کلر سطحی Cs برای شرایط غوطه وری در دریا در جدول ۷ شماره ارائه شده است. همانگونه که از جدول مشخص است، بیشترین مقدار ضریب انتشار پذیری یون کلر در تمام شرایط مربوط به آزمون بدون پوزولان می باشد. و این بیانگر اثر مثبت پوزولان ها در کاهش ضریب انتشار پذیری یون کلرید می باشد.

همچنین کمترین میزان ضریب انتشار پذیری یون کلرید برای آزمون های حاوی متاکائولن می باشد. جدول ۷ بیانگر درصد کاهش ضریب انتشار پذیری یون کلرید در شرایط شبیه سازی مغروق می باشد. بیشترین به ترتیب برای آزمون های متاکائولن، که برابر ۸۶ درصد می باشد اما در آزمون های حاوی ترکیب متاکائولن و میکروسیلیس می باشد که این مقدار برابر ۸۱ درصد می باشد همچنین کمترین میزان کاهش درصد ضریب انتشارپذیری برای آزمون های حاوی میکروسیلیس مشاهده شده است که این مقدار نسبت به آزمون های حاوی متاکائولن برای شرایط مغروق به ترتیب برابر ۱۱، ۲۳ و ۳۳ درصد می باشد که همانطور که گفته شد بیانگر عملکرد خوب متاکائولن در دوام بتن های خودتراکم می باشد.

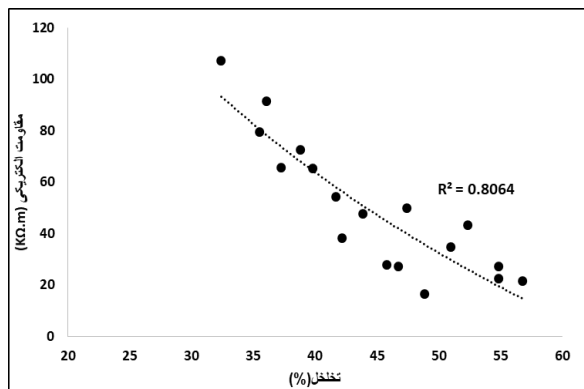
نتایج ضریب انتشارپذیری و میزان کلر سطحی

در شکل ۱۰ با بررسی ارتباط جذاب حجمی و همچنین تخلخل کل با مقاومت فشاری بتن مشاهده می شود که مقاومت فشاری با افزایش جذب آب حجمی کاهش پیدا کرده است. با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی بین این دو پارامتر، می توان نتیجه گرفت که ارتباط بین این دو پارامتر با مقاومت فشاری نزدیک بوده و روی هم اثر گذار هستند.



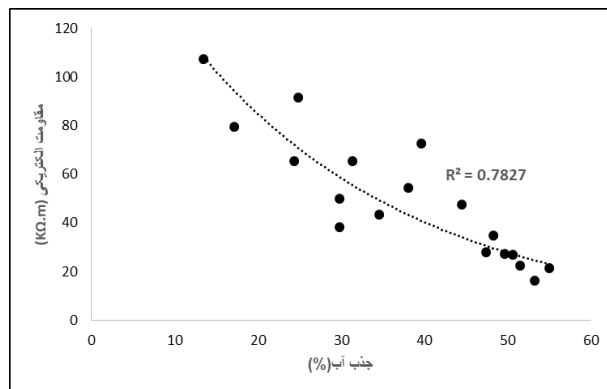
شکل ۱۱ (الف) - ارتباط بین نتایج آزمایش جذب آب و مقاومت ویژه الکتریکی (ب) - ارتباط بین نتایج تخلخل و مقاومت فشاری

در شکل ۱۱ ارتباط جذب و تخلخل بتن با مقاومت ویژه الکتریکی نشان داده شده است با افزایش مقاومت الکتریکی در شرایط دریایی و شاهد مشاهده می شود که تخلف کاهش پیدا کرده است. با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی بین این دو پارامتر می توان نتیجه گرفت ارتباط این دو با مقاومت ویژه الکتریکی نیز قوی بوده است و به یکدیگر اثر گذار هستند.



(ب)

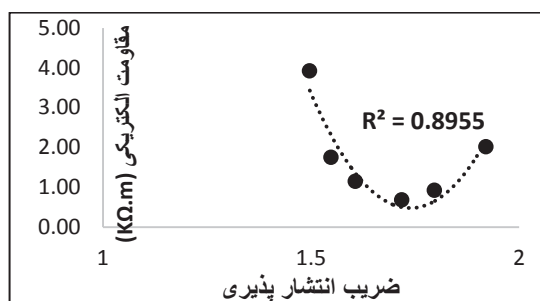
ب-ارتباط بین تخلخل و مقاومت ویژه الکتریکی



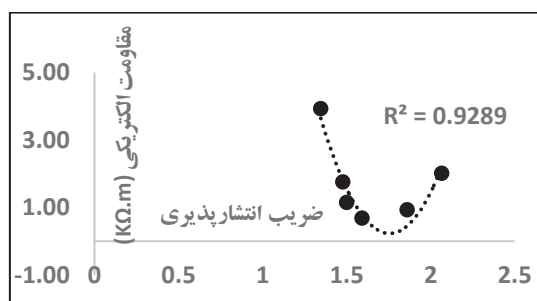
(الف)

الف-ارتباط بین جذب آب حجمی بتن و مقاومت ویژه الکتریکی

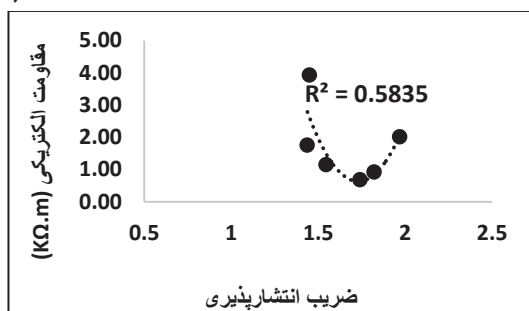
در شکل های ارتباط بین ضریب انتشار پذیری یون کلر با مقاومت ویژه الکتریکی مشاهده می شود. با توجه به بالا بودن ضریب همبستگی، ارتباط قوی بین این دو پارامتر مشاهده می شود و در نمونه های حاوی مواد افزودنی معدنی بیشتر نمایان است.



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲ الف-ارتباط بین ضریب انتشار پذیری کلرید با مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب در سن ۲۸، ۱۸۰ و ۹۰ روز

نتیجه گیری

۱. استفاده از پوزولان ها در طرح اختلاط بتن، نقش مهمی در افزایش طول عمر مفید سازه های بتنی در شرایط مهاجمی خلیج فارس دارد.
۲. در بررسی عملکرد پوزولان های مختلف، اولویت عملکرد مطلوب به صورت مخلوط های بتنی دو جزئی حاوی دوده سیلیس می باشد. با این حال مخلوط های بتنی سه جزئی حاوی متاکائولن و میکروسیلیس همچنین سرباره و میکروسیلیس دارای عملکرد بهتری داشته و روند افزایش مقاومت فشاری بیشتری نسبت به مخلوط

- های بتنی دو جزئی در طول زمان داشته اند. نتایج خواص مکانیکی برای شش طرح مطالعات نشان می دهد که در بتن های خود تراکم سه جزئی مقاومت فشاری به طور چشمگیری افزایش پیدا کرده است.
۳. نتایج مقاومت فشاری و تخلخل کاملاً در ارتباط با یکدیگرند، به طوری که هر چه ماتریس سیمانی به دلیل ساختار اسکلت بندی متراکم تر باشد مقاومت بیشتر و بالطبع نفوذ و همچنین تعداد نفوذ پذیر به مراتب کمتر خواهد بود.
۴. نتایج مقاومت فشاری با نتایج جذب آب نشان می دهد که سرباره تاثیر خوبی بر روی کاهش جذب آب حجمی دارد. همچنین با توجه به نتایج، مشاهده شده است که جذب آب حجمی با افزایش سن نمونه های بتنی کاهش داشته که این مقدار برای بتن های حاوی متاکائولن کاهش بیشتری داشته است و برای مخلوط های بتنی حاوی سیلیس درصد کاهش کمتر بوده است.
۵. نتایج تخلخل نشان می دهد که مخلوط های بتنی دو جزئی حاوی سرباره بیشترین کاهش درصد تخلخل را داشتند. از از طرفی کاهش درصد تخلخل در مخلوط های بتنی حاوی متاکائولن کمتر بوده است همچنین نتایج نشان داده اند که با گذشت زمان و افزایش سن نمونه های بتنی کاهش تخلخل بسیار کم بوده و با سرعت کمی کاهش پیدا کرده اند.
۶. وجود یون های سولفات در دریا باعث کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه های محیط شاهد شده است. همچنین مقاومت ویژه الکتریکی این نمونه بدون افزودنی نسبت به نمونه های دارای افزودنی معدنی کاهش چشمگیری داشته است. مقاومت ویژه الکتریکی کلیه مخلوط های بتن با افزایش سن نمونه ها و قرار گیری در شرایط کاهش پیدا می کند. این امر احتمالاً باعث افزایش خوردگی با گذشت زمان را در پی خواهد داشت.
۷. در نسبت آب به سیمان یکسان و در صورت استفاده از پوزولان در مخلوط های بتن، ضریب انتشار پذیری مخلوط های بتنی بدون پوزولان در ناحیه مغروق در آب دریا کاهش می یابد.
۸. بتن خود تراکم سه جزئی رفتار بسیار مشابهی نسبت به بتن خود تراکم دو جزئی از نظر کاهش ضریب انتشار پذیری یون کلرید داشته است. بیشترین کاهش ضریب پذیری برای مخلوط های خود تراکم سه جزئی حاوی متاکائولن و دوده سیلیس می باشد.
۹. با وجود کاهش قابل ملاحظه مقدار نفوذ یون کلرید و ضریب انتشار پذیری مخلوط های بتنی دو جزئی و سه جزئی نسبت مخلوط بتن شاهد، مقدار کلر سطحی در این مخلوط ها نسبت به بتن شاهد افزایش داشته است. بنابراین، این گونه می توان نتیجه گرفت که افزایش مقدار کلر سطحی امری مثبت و در راستای کاهش میزان نفوذ یون کلرید و ضریب انتشار پذیری بتن می باشد و نشان می دهد که پوزولان ها با اصلاح ساختار بتن و کاهش ضریب انتشار پذیری برای ورود یون کلرید مانع ایجاد می کنند و این یون در سطح باقی می ماند.
۱۰. با بررسی ارتباط بین پارامترهای دوام مشاهده شد که بین جذب آب حجمی بتن و تخلخل با مقاومت فشاری ارتباط قوی وجود دارد با افزایش مقاومت فشاری بتن تخلخل و جذب آب کاهش پیدا کرده است. همچنین بین جذب آب حجمی و تخلخل با مقاومت ویژه الکتریکی، با توجه به ضریب همبستگی بالا ارتباط قوی وجود دارد، با افزایش تخلخل مقاومت الکتریکی کاهش پیدا کرده است. ارتباط بین ضریب انتشار پذیری کلرید با مقاومت ویژه الکتریکی در سنین ۲۸ و ۱۸۰ روزه دارای ضریب همبستگی بالا می باشد اما در سن ۹۰ روزه این ارتباط مشاهده نشده است.
- بدیهی است که نتایج به دست آمده در مدت زمان ۶ ماه است و برای دستیابی به نتایج تکمیلی و قابل توجه نیاز به مطالعات درازمدت می باشد. همچنین تحقیقات انجام شده نشان می دهد که توجه به ملاحظات مقاومتی در طراحی، نمی تواند به تنهایی برای تخمین عمر مفید کافی باشد و به منظور تامین عمر مفید یک سازه باید به مسائل دوامی توجه داشت.

این پژوهش در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران انجام گردید و بدین ترتیب از مدیریت و مسئولین آزمایشگاه قدردانی می گردد.

مراجع

- [1]. Okamura, H. and M. Ouchi, *Self-compacting concrete. Journal of advanced concrete technology*, 2003. 1(1): p. 5-15.
- [2]. Assié, S., *Durabilité des bétons auto-plaçants*. 2004, Toulouse, INSA.
- [3]. Bonakdar, A., M. Bakhshi, and M. Ghalibafian. *Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin. in 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Washington DC. USA. 2005.*
- [4]. Vivek, S. and G. Dhinakaran, *Durability characteristics of binary blend high strength SCC. Construction and Building Materials*, 2017. 146: p. 1-8.
- [5]. Ozyildirim, C., *Laboratory investigation of low-permeability concretes containing slag and silica fume. Materials Journal*, 1994. 91(2): p. 197-202.
- [6]. Mostofinejad, D., K. Mirtalee, and M. Sadeghi, *Investigation of compressive strength of concrete with slag and silica fu. International Journal of Engineering Science (Tehran)*, 2002. 13(2): p. 117-132.
- [7]. Lane, D.S. and C. Ozyildirim, *Combinations of pozzolans and ground, granulated blast-furnace slag for durable hydraulic cement concrete. 1999, United States. Federal Highway Administration.*
- [8]. Thomas, M., et al., *Ternary cement in Canada. Concrete international*, 2007. 29(7): p. 59-64.
- [9]. Tikalsky, P., et al., *Development of Performance Properties of Ternary Mixtures: Phase I Final Report. 2007, United States. Federal Highway Administration.*
- [10]. Concrete, S.-C., *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. BIBM, et al*, 2005. 22.
- [11]. Standard, B., *Part-116 (1983) Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, London. British Standard Institution, 1881.*
- [12]. ASTM, *Standard test method for density of hydraulic cement. 2009.*
- [13]. ASTM, C., *Standard test methods for chemical analysis of hydraulic cement. American Society for Testing of Materials: Philadelphia, PA, USA, 2004.*
- [14]. AASHTO., *Standard method of test for sampling and testing for chloride ion in concrete and concrete raw materials. 1997, AASHTO Washington, DC.*
- [15]. Crank, J., *The mathematics of diffusion. 1979: Oxford university press.*
- [16]. Takada, K., G. Pelova, and J. Walraven, *Influence of mixing efficiency on the mixture proportion of general purpose self-compacting concrete. 1998: Univ.*
- [17]. Basheer, L., J. Kropp, and D.J. Cleland, *Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. Construction and building materials*, 2001. 15(2-3): p. 93-103.
- [18]. Samimi, K., et al., *Influence of Metakaolin and Cements Types on Compressive Strength and Transport Properties of Self-Consolidating Concrete.*
- [19]. Pargar, F., H. Layssi, and M. Shekarchi. *Investigation of chloride threshold value in an old concrete structure. in Proc., 5th Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions: Environment and Loading (CONSEC'07) Tours. 2007.*
- [20]. Shekarchi, M., F. Moradi-Marani, and F. Pargar, *Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: A case study. Structure and Infrastructure Engineering*, 2011. 7(9): p. 701-713.