بررسی دوام بتن و ملات خودتراکم حاوی دوده سیلیسی و زئولیت در شرایط شبیه سازی شده ی مغروق در آب خلیج فارس

نازنین علاقه بندیان[۱]، علی اکبر شیرزادی جاوید[۲]، سید سجاد میرولد[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده ی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Nazanin.Alaghebandian@gmail.com

چکیده

سالهاست که دریای خلیج فارس بدلیل شرایط محیطی خاص منطقه همچون رطوبت، دما، مقدار کلراید زیاد وهمچنین جغرافیای بسته منطقه به محیط بسیار مخرب و حساس برای دوام سازه های بتنی در معرض تهاجم آب دریا شناخته شده است. بنابراین یافتن طرح های با دوام در این منطقه از دغدغه های اصلی مهندسین می باشد. برای بهبود دوام و افزایش عمر بهره برداری سازه های این منطقه تحقیقات کثیری در ارتباط با استفاده از افزودنی دوده ی سیلیسی انجام شده است اما نسبت به استفاده از زئولیت طبیعی بصورت طرح مخلوط های سه گانه و همچنین استفاده از طرح مخلوط های چهارجزئی حاوی زئولیت و دوده ی سیلیسی در سازه های این مناطق توجه اندکی شده است. دراین پژوهش بمنظور ارزیابی عملکرد مخلوط های سه جزئی و چهارجزئی حاوی زئولیت و دوده ی سیلیسی بر دوام نمونه های سیمانی ملات و بتن خودتراکم در شرایط مهاجم آب دریای خلیج فارس نمونه های با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴۵ و سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار ۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب پودر سنگ آهک بعنوان پرکننده ی غیر فعال حاوی ٪۱۵ زئولیت و ٪۸ دوده ی سیلیسی بصورت طرح مخلوط های خودتراکم سه جزئی و چهار جزئی پس از عمل آوری در آب آهک اشباع بمدت ۷ روز در معرض آب دریای خلیج فارس قرار گرفتند و پس از انجام آزمایش های کارآیی ملات/بتن تازه شامل T۵۰، حلقه ی جی، جریان اسلامپ، قیف وی و زمان جریان و بدست آوردن میزان روان کننده ی بهینه برای رسیدن به محدوده ی اسلامپ مورد نظر آزمایش های دوام و نفوذپذیری انجام گرفت. از نمونه های ملات آزمایش های جذب آب موئینه و تخلخل کل در سن ۱۸۰ روز و انبساط طولی نمونه های منشوری تا سن ۶ ماه و مقاومت فشاری در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز و از نمونه های بتنی نیز آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز و مقدار یون کلراید آزاد در نمونه های ۶ ماهه در اعماق ۵ تا ۳۵ سانتی متر انجام گرفت. همچنین نمونه های کنترلی خودتراکم و نمونه های معمولی نیز ساخته و در شرایط تهاجم مشابه قرار گرفتند تا عملکرد دوامی آن ها با یکدیگر بررسی و مقایسه گردد. بصورت کلی، نتایج بیانگر این هستند که مخلوط های خودتراکم چهار جزئی زئولیت و دوده ی سیلیسی در مقایسه با مخلوط های سه جزئی از دوام قابل ملاحظه و بهتری در شرایط مغروق در آب دریای خلیج فارس داشتند.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، ملات خودتراکم، زئولیت، دوده ی سیلیسی، پودر سنگ آهک، دوام، مغروق، آب دریای خلیج فارس

۱. مقدمه

استفاده از بتن در سازه های دریایی اجتناب ناپذیر و حتمی است و عملکرد های اساسی را دارد. از جمله مهم ترین سازه های دریایی بتنی سازه های بنادر و یا دیوار های محافظ ساحلی می باشند. این سازه ها در معرض مخربترین شرایط محیطی قرار دارند و دوام و سرویس دهی آن ها فاکتورهایی اساسی است. عوامل مختلفی سبب شدند تا خلیج فارس یک منطقه ی پرخطر برای سازه های بتنی محسوب شوند. از جمله ی این موارد می توان به شرایط آب و هوایی بد منطقه، سنگدانه های ریز و نبود نیروی ماهر اشاره کرد [۱]. شرایط آب و هوایی در خلیج فارس همراه با دمای بالا و رطوبت همراه با نمک است[۱] و دما و رطوبت هر روز و هر فصل تغییر می کند [۲]. میانگین دما در تابستان بین ۳۰ تا ۳۵ درجه ی سانتیگراد متغیر است و گاهی دما تا ۵۰ درجه ی سانتیگراد نیز می رسد. متوسط تغییر دما در هر فصل ۱۰ تا ۱۵ درجه ی سانتیگراد است [۳]. رطوبت نسبی بین ۴۰ تا ۸۰٪ و گاهی ۹۸٪ می باشد. بعلاوه، مقادیر یون های سولفات و کلراید موجود بسیار بیشتر از مقدار میانگین بیان شده است. ویژگی جغرافیایی منطقه طوری است که خلیج از اطراف محدود به زمین شده و این سبب شده است تا میزان نمک و املاح موجود در آن بسیار بیشتر از دیگر نقاط جهان باشد [۴]. بطور مثال، مقدار کلراید موجود در آب دریای خلیج فارس، ۱,۶ تا ۲ برابر مقدار نمک در آب دریای مدیترانه و قطب است [۵].

بتن خودتراکم برای اولین بار در ژاپن ساخته شد و با معرفی روان کننده ها در آن، شهرت جهانی یافته، امروزه اکثر مهندسان در سرتاسر دنیا از این نوع بتن استفاده می کنند [۶], [۷] تحقیقات زیادی نشان دادند که کم کردن میزان نسبت آب به سیمان و افزودن مواد پوزلانی به مخلوط بتن می تواند مقاومت و دوام بتن را افزایش دهد. کاهش نسبت آب به سیمان سبب کاهش تخلخل بتن شده که سبب می شود تا مقدار نفوذ یون کلراید در بتن در مواجهه با محلول مهاجم تا ۲۵٪ کاهش یابد [۸], [۹]. امروزه، برای بدست آوردن بتن با دوام و مقاومت بالا، از افزودنی های شیمیایی و معدنی در بتن همچون دوده ی سیلیسی، سرباره و متاکائولین برای افزایش دوام بتن استفاده می شود [۱۰]–[۱۲]. استفاده از این افزودنی ها سبب افزایش پیوستگی یون کلراید [۱۲]، کاهش نفوذ یون کلراید [۱۳], [۱۴]، بهبود پراکندگی اندازه و شکل منافذ در ساختار بتن [۱۵], [۱۶] می شود. در کل، این افزودنی ها، طبیعی یا مصنوعی، سبب کاهش مقدار کلسیم هیدروکسید تولید شده از هیدراتاسیون سیمان شده و در عوض تولید ژل های کلسیم–سیلیکات–هیدرات از واکنش های ثانویه را افزایش می دهند. در نتیجه ی این فرآیند، نرخ هیدراتاسیون کاهش یافته و تخلخل و نفوذپذیری بتن بمقدار قابل توجهی افزایش می یابد [۱۷]–[۱۹]. همچنین، از انواع افزودنی های معدنی مختلف در یک طرح می توان استفاده کرد و طرح های دوگانه، سه گانه و حتی چهارگانه داشت. در این تحقیق از افزودنی های زئولیت و دوده ی سیلیسی استفاده شده است.

دوده ی سیلیسی یک محصول فرعی از کوره های قوس الکتریکی در جریان تولید آلیاژهای فروسیلیس می باشد. این ماده با داشتن حدود ۹۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی (آمورف) و به شکل ذرات بسیار ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون خاصیت شدیدا پوزلانی را داشته و برای استفاده بعنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در ساخت بتن استفاده می شود. زئولیت نیز یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل شده و بطور خلاصه از دسته کانی های رسی هشتند و از پایه ی هیدرو سیلیکات های آلومینیوم همراه با برخی کاتیون ها و اکسید های فلزات قلیایی و قلیایی خاکی تشکیل شده اند.

تپکو[۲] [۲۰] بیان می کند که زئولیت سبب کاهش گرمای هیدراتاسیون بتن شده و نرخ سخت شدگی شده[۳] و مقاومت فشاری بتن را کاهش می دهد و بهمین علت نیازمند مدت زمان عمل آوری بیشتری است. نتایج حاصل از رنجبر و همکاران [۲۱] نیز نشان داد که هنگامی که نسبت آب به سیمان بتن ۰/۴۵ باشد، افزودن زئولیت باعث کاهش مقاومت فشاری بتن خود متراکم می گردد و در بتن های با نسبت آب به سیمان کمتر (۰/۳۸) افزودن زئولیت سبب افزایش مقاومت فشاری می گردد. در تحقیق [۲۲] نیز افزودن ۱۵ درصد زئولیت به بتن پرمقاومت، باعث کاهش مقاومت بتن نسبت به بتن خود تراکم کنترلی شده است. اما مارکیو در تحقیق [۲۳] بیان می کند که تا سن ۱۸۰ روز، مقاومت فشاری بتن های خود متراکم حاوی زئولیت از مقاومت فشاری بتن خود متراکم کنترلی کمتر بوده که در سن ۱۸۰ روز، مقاومت آن به مقاومتی بیشتر از مقاومت بتن کنترلی رسیده است. در تحقیق [۲۴] که توسط تورکمن و همکاران[۴] صورت گرفت افزودن ۱۰ تا ۳۰ ٪ زئولیت سبب کاهش مقاومت بتن نسبت به بتن کنترلی شده که درصد این کاهش در سنین کم زیاد و با افزایش سن بتن کمتر شده است. تحقیقات زیادی همچون [۲۵], [۲۶] نیز نشان داده اند که زئولیت سبب کاهش مقاومت فشاری بتن می شود.

---

[۱] Salt laden humidity

[۲] Topcu

[۳] Rate of hardening

[۴] Torkman et al.

همچنین محققان زیادی همچون منگت و ال خطیب [۲۷] نشان دادند که دوده ی سیلیسی سبب بهبود عملکرد دوامی نمونه های سیمانی در شرایط رویاروئی آب دریای خلیج فارس که حاوی مقادیر زیاد منیزیم سولفات است نشده است. کوهن و بنتور[۵] [۲۸] نشان دادند که افزودن ۱۵٪ دوده ی سیلیسی به سیمان های تیپ ۱ و ۵، قرار گرفته در محلول ۵٪ سدیم سولفات سبب افزایش مقاومت فشاری آن شده اما هنگامی که نمونه در معرض منیزیم سولفات قرار گرفته، کاهش مقاومت و جرم بیشتری بدلیل ضعیف شدن ژل های کلسیم سیلیکات هیدراته و تبدیل آن به سیلیکات منیزیم هیدراته بوجود می آید که وجود دوده ی سیلیسی سبب می شود تا کاهش مقاومت فشاری ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از نمونه ی بدون دوده ی سیلیسی باشد. همچنین، هکل و همکاران[۶] [۲۹] گزارش کردند که افزودن ۱۰-۱۵٪ دوده ی سیلیسی تاثیر چندانی در افزایش مقاومت خمیر سیمانی سخت شده نداشته است. کاهش مقدار منیزیم هیدروکسید بعلت واکنش آن با سیلیکات هیدراته و تشکیل $M_3SH_{8.5}$ نامحلول سبب افزایش تماس ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته با مواد مضر مهاجم می گردد. نتایج تحقیقات مون و همکاران[۷] [۳۰] و لی و همکاران[۸] [۳۱] نشان داد که تبدیل ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته به ژل های منیزیم سیلیکات هیدراته[۹] که سبب نرم شدن ساختار سیمان می شود، باعث آثار تخریبی بیشتری در نمونه های حاوی دوده ی سیلیسی واقع در شرایط مهاجم منیزیم سولفات گردند. تشکیل منیزیم سیلیکات در بتن قرار گرفته در شرایط مهاجم دریایی توسط کوله[۱۰] [۳۲] و روی و همکاران[۱۱] [۳۳] بیان شده است. آن ها نشان دادند که در سطوح بتنی که در معرض محلول های منیزیمی غلیظ (آب دریا) هستند، فاز های غنی از منیزیم دیده می شود. نهدی و همکاران[۱۲] [۳۴] بیان کردند که در سطوح بتنی در معرض آب دریا (که حاوی مقدار زیادی منیزیم سولفات است.)، کلسیم زدایی ترکیبات سیلیکات کلسیم هیدراته چشمگیر بوده و وجود دوده ی سیلیسی تاثیر مثبت چندانی برای مقاومت در برابر تخریب سطح بتن نداشته و حتی وضعیت را بدتر از نمونه های سیمانی معمولی نیز کرده است.

۲. برنامه ی آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات مصالح مصرفی

۱.۱.2. مواد سیمانی

سیمان مصرفی در این تحقیق از نوع سیمان پاکتی پرتلند نوع ۲ و محصول کارخانه سیمان تهران می باشد. چگالی سیمان مصرفی ۳۰۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. پودر سنگ آهک مصرفی در این تحقیق تولید کارخانه ایران سنگ زاگرس بوده و چگالی آن ۲۶۱۰ کیلو گرم بر متر مکعب با درصد جذب آب ۱۱٪ است. دوده ی سیلیسی مصرفی در این تحقیق از کارخانه دوده ی سیلیسی ازنا و زئولیت مصرفی از معادن افتر شرق سمنان و از شرکت افرند توسکا تهیه شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی و پودر سنگ آهک در جداول ۱و۲ مشاهده می شود. نمودار ۱ دانه بندی سیمان و پودر سنگ آهک را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند نوع دو محصول کارخانه سیمان تهران

مشخصات	مقادیر
سطح مخصوص	۲۸۰۵ (gr/cm^2)
وزن مخصوص	۳۰۵۰ (kg/m^3)
زمان گیرش اولیه	۱۶۴ دقیقه
زمان گیرش نهایی	۲۴۵ دقیقه
مقاومت فشاری ملات ۷ روزه	۲۶۲ (kg/cm^2)
مقاومت فشاری ملات ۲۸ روزه	۳۸۴ (kg/cm^2)

---

[۵] Cohen and Bentur

[۶] Hekal et al.

[۷] Moon et al.

[۸] Lee et al.

[۹] M-S-H or M-C-S-H

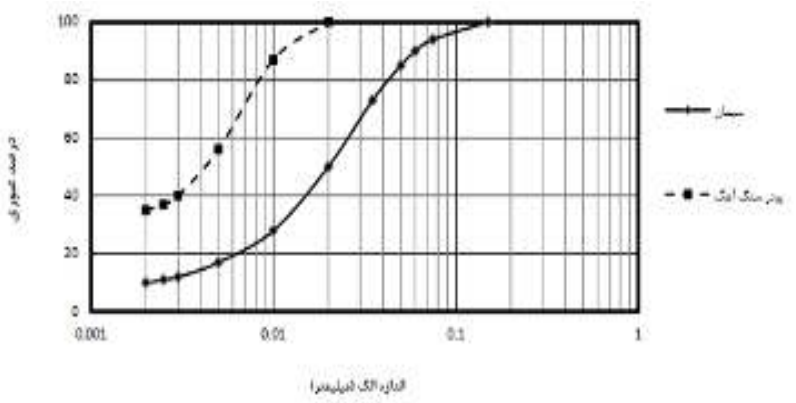
[۱۰] Cole

[۱۱] Roy et al.

[۱۲] Nehdi et al.

جدول ۲- مشخصات شیمیایی سیمان و پودر سنگ

نوع ترکیب	سیمان (٪)	پودر سنگ آهک (٪)
SiO_2	۲۰,۷۴	۲,۸
Al_2O_3	۴,۹	۰,۳۵
Fe_2O_3	۳,۵	۰,۵
MgO	۱,۲	۱,۸
CaO	۶۲,۹۵	۵۱,۲۲
SO_3	۳	۱,۲۴
کسر وزن در اثر سرخ شدن	۱,۵۶	۴۲,۰۶
باقیمانده ی نامحلول	۰,۷۴	۲,۸
C_3S	۵۲,۱۷	–
C_2S	۲۰,۱۱	–
C_3A	۷,۰۶	–
C_4AF+2C_3A	۲۴,۷۸	–
$Na_2O+0.658K_2O$	۰,۷۳	–



نمودار ۱- دانه بندی سیمان و پودر سنگ آهک

۲.۱.۲. سنگدانه ها

سنگدانه های مصرفی جهت ساخت تمام نمونه ها در این تحقیق از معادن واقع در منطقه شهریار در استان تهران، تهیه شده است. سنگدانه ی استفاده شده در این تحقیق از نوع شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر می باشد. مقادیر چگالی اشباع با سطح خشک و ظرفیت جذب آب سنگدانه های مصرفی در ساخت بتن و ملات در جدول ۳ آمده است.

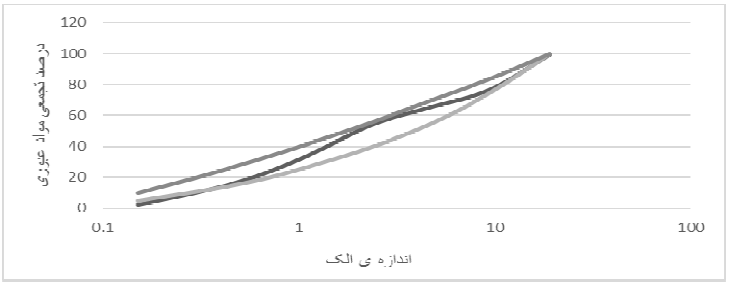
جدول ۳- مقادیر چگالی اشباع و ظرفیت جذب آب سنگدانه های مصرفی

مشخصات	شن درشت (بادامی)	شن ریز (نخودی)	ماسه درشت	ماسه ریز
چگالی اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	۲۵۰۰	۲۵۷۰	۲۷۰۰	۲۷۰۰
ظرفیت جذب آب (٪)	۱,۵۵	۱,۷۲	۲,۶۱	۳,۲۸

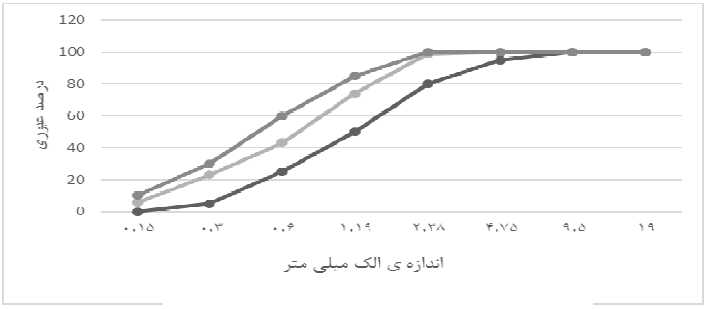
نسبت سنگدانه ها طوری انتخاب شده است تا منحنی دانه بندی سنگدانه های ترکیبی بین منحنی های با مدول نرمی ۰/۱ و ۰/۳۵ قرار گرفتند نمودار ۲ همچنین در این تحقیق، برای بدست آوردن طرح مخلوط نمونه های ملات خودمتراکم معادل بتن خودمتراکم هر طرح،[۱۳] از روش ابداع شده توسط کاترین و همکارش [۱۴][۳۵] استفاده شد. بدین منظور برای بدست آوردن مقدار ماسه ی مصرفی در طرح ملات، مجموع سطح ویژه ی مصالح سنگی بکار برده شده در بتن مادر را بدست آورده و بمقداری از ماسه ی ریز استفاده شده است تا سطح ویژه ی آن برابر با عدد بدست آمده در قبل گردد. محدوده ی دانه بندی ماسه، طبق دانه بندی مذکور در آیین نامه ی ASTM C۳۳ [۳۶] کنترل گردید. نمودار ۳.

[۱۳] Concrete equivalent mortar (CEM)

[۱۴] Catherine and Schwartzentruber.



نمودار ۲- دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده در این تحقیق در مقایسه با منحنی دانه بندی طرح مخلوط ملات



نمودار ۳- منحنی دانه بندی ماسه ی مصرفی در ملات

۳.۱.۲. آب

آب مصرفی برای ساخت نمونه ها، آب شرب لوله کشی داخلی آزمایشگاه تحقیقات بتن دانشگاه علم و صنعت ایران می باشد.

۴.۱.۲. افزودنی فوق روان کننده

به منظور رسیدن به کارایی مورد نظر در مخلوط ها، از فوق روان کننده بر پایه ی پلی کربوکسیلاتی با وزن مخصوص ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است.

۲.۲. طرح مخلوط و نحوه ی ساخت و عمل آوری

قبل ساخت هر مخلوط، طبق استاندارد ASTM C۵۶۶-۸۹ رطوبت سنگدانه ها مشخص شدند و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگدانه ها و پودر سنگ آهک درون مخلوط کن ریخته شده و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزلان و در انتها آب نیز به طرح اضافه گردید. فوق روان کننده بعنوان تنها پارامتر متغیر طرح ها با توجه به رسیدن جریان اسلامپ طرح ها در محدوده ی ۶۶ تا ۷۵ سانتی متر و قرار گیری در رده ی دوم جریان پذیری بر مبنای افنارک [۳۷]، با تنظیم میزان روان کننده از ۰/۷ تا ۱/۹ ٪ در مخلوط های بتنی و از ۰/۳ تا ۱/۳ ٪ در ملات بدست آمده است. سپس آزمایش های کارآیی ملات/بتن تازه شامل حلقه ی جی، جریان اسلامپ، قیف وی و زمان جریان و T۵۰ انجام گرفتند. همچنین، جداشدگی سنگدانه ها و آب انداختگی بتن بصورت چشمی کنترل گردید. نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM C۱۹۲ پس از ۲۴ ساعت عمل آوری در قالب و با یک لایه پارچه ی کنفی مرطوب، بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند. در جدول ۴ و طرح مخلوط ملات در جدول ۵ آمده است.

در این پژوهش تمام مخلوط های بتن خودتراکم با نماد SCC و ملات های خودتراکم با نماد M و بتن/ملات معمولی با نماد Normal مشخص شده اند. در نمونه هایی که در آنها از دوده سیلیسی استفاده شده است، از نماد SF و برای نمونه هایی که در آنها از زئولیت استفاده شده، از نماد Z بهره گرفته شده است و در کنار هر نماد درصد استفاده از ماده ی افزودنی نیز آمده است. برای مثال، نمونه ی بتن و ملات خودتراکم حاوی ۸٪ دوده ی سیلیسی و ۱۵٪ زئولیت بترتیب بصورت SCC-SF۸Z۱۵ و M-SF۸Z۱۵ نشان داده می شود.

جدول ۴- نسبت های مخلوط بتن و مقدار فوق روان کننده ی مصرفی

شماره	نام مخلوط	نسبت آب به سیمان	سیمان (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	مصالح سنگی (Kg/m^3)	دوده ی سیلیسی (٪)	زئولیت (٪)	پودر سنگ (Kg/m^3)	فوق روان کننده (٪)
۱	Normal - CONC	۰.۴۵	۳۸۰	۱۷۱	۱۸۱۳.۱۵	۰	۰	۰	۰.۳
۲	SCC - CONC	۰.۴۵	۳۸۰	۱۷۱	۱۷۱۴.۱۳	۰	۰	۱۰۰	۰.۷
۳	SCC - SF۸	۰.۴۵	۳۴۹.۶	۱۷۱	۱۷۰۳.۱۵	۸	۰	۱۰۰	۰.۹
۴	SCC - Z۱۵	۰.۴۵	۳۲۳	۱۷۱	۱۶۹۱.۶۴	۰	۱۵	۱۰۰	۱.۷
۵	SCC - SF۸Z۱۵	۰.۴۵	۲۹۲.۶	۱۷۱	۱۶۸۰.۶۶	۸	۱۵	۱۰۰	۱.۹

جدول ۵- نسبت های مخلوط ملات و مقدار فوق روان کننده ی مصرفی

شماره	نام مخلوط	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m^3)	آب (kg/m^3)	ماسه (kg/m^3)	پودر سنگ آهک (kg/m^3)	دوده ی سیلیسی (kg/m^3)	زئولیت (kg/m^3)	فوق روان کننده (%)
۱	M-Normal	۰.۴۵	۳۸۰	۱۷۱.۱	۱۸۱۳.۱۵	-	-	-	۰.۳
۲	M-SCC	۰.۴۵	۳۸۰	۲۰۳.۲۸	۱۷۱۴.۱۳	۱۰۰	-	-	۰.۵
۳	M-SF۸	۰.۴۵	۳۴۹.۶	۲۰۲.۸	۱۷۰۳.۱۵	۱۰۰	۳۰.۴	-	۰.۷
۴	M-Z۱۵	۰.۴۵	۳۲۳	۲۰۶.۹۱	۱۶۹۱.۶۴	۱۰۰	-	۵۷	۱
۵	M-SF۸Z۱۵	۰.۴۵	۲۹۲.۶	۲۰۲.۵۷	۱۶۸۰.۶۶	۱۰۰	۳۰.۴	۵۷	۱.۳

۳.۲. روش انجام آزمایش ها

مقاومت فشاری نمونه های بتن بر اساس استاندارد BS۱۸۸۱-PART۱۱۶ [38] با استفاده از ۳ نمونه مکعبی ۱۰۰ میلیمتری و مقاومت فشاری نمونه های ملات بر اساس استاندارد ASTM-C۱۰۹ [39] با استفاده از ۳ نمونه ی ۵۰ میلیمتری در هر یک از سنین ۲۸،۷، ۹۱ روز انجام شد. نکته ی حائز اهمیت در این بخش این است که نمونه های قرار گرفته در شرایط رویارویی آب دریای خلیج فارس (شرایط مغروق) هفت روز پس از زمان رسیدن به سن مورد نظر برای آزمایش از مخزن در آورده شدند. زیرا تمام نمونه ها پس از ساخت بمدت ۷ روز در آب آهک اشباع عمل آوری شدند که این امر سبب می شد تا سن نمونه های واقع در آب آهک اشباع (شرایط کنترلی) هفت روز بیشتر از نمونه های مغروق در آب دریای خلیج فارس باشد. فاکتور افزایش مقاومت فشاری طبق فرمول ۱ بدست آمده است.

فرمول ۱

$$SDF = 100\times(\text{(مقاومت فشاری نمونه در شرایط مهاجم-مقاومت فشاری نمونه در شرایط کنترلی)/مقاومت نمونه در شرایط کنترلی})$$

آزمایش مقاومت الکتریکی در این پژوهش از نوع دو الکترودی در نظر گرفته شد. بمنظور بدست آوردن کلر آزاد در سن ۶ ماه بتن هر طرح مخلوط، طبق استاندارد های ASTM-C۱۵۵۶ [۴۰] و ASTM-C۱۲۱۸ [۴۱] عمل شده است. تخلخل کل و فاکتور جذب آب موئینه ی ملات بترتیب با استفاده از استاندارد های ASTM-C۶۴۲ [۴۲] و ASTM-C۱۵۸۵ [۴۳] و با کمک روش بیان شده در تحقیق [۴۴] از میانگین گیری داده های ۳ نمونه ی مکعبی به ابعاد ۵۰*۵۰*۵۰ و در سن ۱۸۰ روز بدست آمدند. انبساط طولی ملات طبق استاندارد ASTM-C۱۰۱۲ [45] و با استفاده از ۴ نمونه ی منشوری ۲/۵*۲۸/۵*۲۸/۵ سانتی متری از هر طرح مخلوط تا سن ۶ ماه بدست آمده است.

۳. نتایج و تفسیر

۱.۳. کارآیی مخلوط ها

در این پژوهش، مقدار روان کننده مورد نیاز برای رسیدن به اسلامپ هدف، در نمونه های حاوی زئولیت و یا دوده ی سیلیسی از نمونه های کنترلی بیشتر است جدول ۶. میزان روان کننده مصرفی در طرح های چهارجزئی حاوی دوده ی سیلیسی و زئولیت نیز از بقیه نمونه ها بیشتر است. استفاده از زئولیت سبب نیاز به مصرف مقدار روان کننده ی بیشتری برای رسیدن به اسلامپ هدف می گردد. تحقیقات [۴۶], [۴۷] بیان می کنند که این امر ممکن است به این دلیل باشد که ساختار زئولیت بسیار متخلخل است و مساحت سطح ذرات آن بسیار بالاست و به همین دلیل باعث افزایش مقدار آب جذبی- سطحی توسط ذرات زئولیت شده و مقدار بیشتری روان کننده نیاز گردد تا مقدار آب ثابت نگه داشته شود و دلیل دیگر می تواند این باشد که وزن مخصوص زئولیت کمتر از سیمان است، افزایش حجم خمیر سیمان باعث کاهش اصطکاک سطحی سنگدانه های درون نمونه گردد و سیالیت آن را بالا برد. این نکته را باید در نظر داشت که استفاده از روان کننده ی زیاد در طرح حاوی زئولیت باعث کاهش کارایی آن می گردد. استفاده از دوده ی سیلیسی نیز مقدار روان کننده را بالا می برد علت در تحقیقات [۴۷], [۴۸] اینگونه بیان شده است که ذرات دوده ی سیلیسی دارای مساحت سطح بالایی بوده و روان کننده بیشتری را به سطح خود جذب کرده، در نتیجه روان کننده موجود بر روی ذرات سیمان را کاهش داده و در کل باعث کاهش سیالیت مخلوط های سیمانی می

گردند. بعبارت دیگر، ذرات دوده ی سیلیسی از سیمان خیلی ریزتر هستند و مقدار مساحت سطحی آنها بالاست و بنابراین مقدار آب بیشتری برای هیدراتاسیون نیاز دارند که به همین علت مقدار روان کننده ی مصرفی بالا می رود.

در این پژوهش، افزودن ۱۵ درصد زئولیت به طرح کنترلی خودمتراکم سبب کاهش اسلامپ می شود و نمونه ی زئولیتی دارای کمترین جریان اسلامپ است که دلیل آن این است که ذرات زئولیت دارای مساحت سطحی زیاد در مقایسه با ذرات سیمان پرتلند هستند. همانطور که در جدول ۷ دیده می شود، مقدار T_{50} برای تمامی طرح ها به غیر از بتن خود تراکم کنترلی بین ۳/۸ تا ۴/۵ ثانیه است که این نشان می دهد تمامی مخلوط ها مقدار T_{50} های آنها بین ۲ تا ۵ ثانیه است. بنابراین ویسکوزیته مخلوط ها در حدی است که مقاومت مخلوط در برابر جداشدگی سنگدانه بالا بوده و فشار وارد بر قالب را کاهش دهد. مقدار T_{50}، برای بتن خود تراکم کنترلی برابر با ۱/۴ است که این مقدار از ۲ کمتر بوده و نشانگر پیوستگی ضعیف این بتن می باشد. اما هنگامی که از افزودنی های دوده ی سیلیسی و یا زئولیت استفاده می کنیم این مقدار بین بازه ۲ تا ۵ (طبق افنارک) قرار می گیرد. همچنین هنگامی که در طرح خودتراکم کنترلی همزمان از هر دو افزودنی زئولیت و دوده ی سیلیسی استفاده کنیم عدد به دست آمده نشان می دهد که این افزودنی ها می توانند خاصیت اسلامپ جاری را به طور قابل قبولی بهبود بخشند. به بیان دیگر، مقدار و نوع افزودنی معدنی بر خواص بتن تازه مشخص بوده و این ارتباط بستگی زیادی به توزیع اندازه ی ذرات دوده ی سیلیسی و زئولیت دارد بطوریکه با افزایش سطح مخصوص بخش ریزدانه، کارآیی بتن بالا می رود و هر چه افزودنی ریزتر باشد مخلوط ساخته شده راحت تر از بین موانع و میلگرد ها حرکت کرده و بدلیل ریز بودنشان، موجب ایجاد چسبندگی و ویسکوزیته در مخلوط شده و سبب بالا رفتن زمان های T_{50} و عبور از قیف V شکل می شوند.

از مقایسه ی مقادیر T_{50} می توان به این نتیجه دست یافت که افزودن دوده ی سیلیسی سبب بهبود ویسکوزیته طرح چهار جزئی(حاوی پودر سنگ آهک و زئولیت و دوده ی سیلیسی) نسبت به بتن حاوی زئولیت بدون دوده ی سیلیسی می گردد. هرچند تاثیر آن ناچیز است. نکته مهم این است که در طرح چهارجزئی حاوی هر دو افزودنی زئولیت و دوده ی سیلیسی، برای رساندن آن به اسلامپ هدف، از روان کننده بیشتری نسبت به مخلوط های دیگر استفاده شده است، این امر سبب می شود تا این طرح ویسکوزیته بیشتری نسبت به مخلوط های دیگر داشته باشد. بنابراین مقدار T50 آن از بقیه طرح ها بیشتر و قطر جریان اسلامپ آن از بقیه طرح ها کمتر است. این نشان دهنده ی آن است که از این بتن می توانیم در بتن های پمپی ترمی که در ساخت سازه های دریایی از آن استفاده می شود، بهره ببریم. از طرفی ممکن است که افزودن دوده ی سیلیسی به زئولیت باعث افزایش ویسکوزیته پلاستیک آن شود. زیرا مقدار T_{50} را به عدد ۵ افنارک نزدیک کرده است که در این موارد ریسک جدا شدگی و آبدادگی بتن بالا می رود. مقدار زمان عبور از قیف V شکل که در بتن کنترلی کمتر از مقدار بیان شده در افنارک است، با افزوده شدن دوده ی سیلیسی مقدار آن در بین ۶ تا ۱۲ ثانیه قرار گرفته و نشان می دهد که افزودن دوده ی سیلیسی سبب افزایش ویسکوزیته بتن می گردند. هم چنین، افزودن زئولیت به طرح کنترلی خود تراکم باعث افزایش میزان زمان عبور از قیف V شکل آن به مقدار چشمگیر شده است، این نتایج نشان می‌دهند که زئولیت باعث افزایش ویسکوزیته نمونه ی بتن/ملات معمولی به علت افزایش مساحت سطحی و حجم خمیر سیمان می شود. نتایج آزمایش حلقه ی جی نشان می دهد که قابلیت عبور بتن حاوی ۸٪ دوده ی سیلیسی از رینگ تقریبا برابر با بتن کنترلی بوده و از این رو این ماده اثر قابل توجهی بر قابلیت عبور بتن ندارد. اما نکته ی قابل ذکر این است که استفاده از ۱۵٪ زئولیت سبب افزایش قابل توجه میزان انسداد می گردد. با توجه به اعداد شاخص هر طرح، در می یابیم که افزودن زئولیت و یا دوده ی سیلیسی سبب کاهش عدد شاخص نسبت به بتن کنترلی شده و پایداری چشمی افزایش یافته است. با وجود آن که زئولیت واکنش زایی کمتری نسبت به دوده ی سیلیسی با آب از خود نشان می دهد اما بدلیل جذب آب بالای آن، درصد آب اضافه در مخلوط های زئولیتی کمتر از مخلوط های دوده ی سیلیسی بود و کمترین آب انداختگی در مخلوط های زئولیتی مشاهده می شد. بهمین علت شاخص پایداری کمتری بدان اختصاص داده شد.

جدول ۶- طرح مخلوط و مقدار فوق روان کننده ی مصرفی

شماره	نام مخلوط	فوق روان کننده (٪)	شماره	نام مخلوط	فوق روان کننده (%)
۱	Normal-CONC	۰,۳	۱	M-Normal	۰,۳
۲	SCC-CONC	۰,۷	۲	M-SCC	۰,۵
۳	SCC-SF۸	۰,۹	۳	M-SF۸	۰,۷
۴	SCC-Z۱۵	۱,۷	۴	M-Z۱۵	۱
۵	SCC-SF۸Z۱۵	۱,۹	۵	M-SF۸Z۱۵	۱,۳

جدول ۷- نتایج آزمایش های کارآیی بتن تازه

شماره	نام مخلوط	حلقه ی جی اختلاف ارتفاع بیرون و درون رینگ (mm)	قیف وی یک دقیقه (ثانیه)	قطر جریان اسلامپ (سانتی متر)	t۵۰ (ثانیه)	شاخص پایداری چشمی (VSI)
۱	Normal - CONC	–	–	۸	–	–
۲	SCC - CONC	۵	۲,۷	۷۰	۱,۴	۱,۵
۳	SCC - SF۸	۴	۸,۲۲	۶۸,۷	۳,۸	۱
۴	SCC - Z۱۵	۳۰	۱۰,۷	۶۷,۴	۴,۳	۰
۵	SCC - SF۸Z۱۵	۲۴	۱۰,۵	۶۶	۴,۵	۱

جدول ۸- نتایج آزمایش های کارآیی ملات تازه

شماره	نام مخلوط	زمان قیف وی (ثانیه)	جریان اسلامپ (سانتی متر)
۱	M-Normal	–	–
۲	M-SCC	۴	۲۷
۳	M-SF۸	۶	۲۴
۴	M-Z۱۵	۷	۲۲,۵
۵	M-SF۸Z۱۵	۷	۲۳,۴

۲.۳. آزمایش مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه های بتنی و ملات در سنین ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روز و فاکتور افزایش مقاومت فشاری بتن قرار گرفته شده در شرایط مغروق، نسبت به نمونه ی هم سن با طرح یکسان در آب آهک اشباع (SDF)، در جدول ۹ دیده می شود. در تمام سنین، مقاومت فشاری نمونه های بتن و ملات خودمتراکم کنترلی از نمونه ی کنترلی معمولی بیشتر است که این اختلاف بمرور زمان کاهش می یابد. زیرا بتن های خودتراکم حاوی مقدار فوق روان کننده ی بالا هستند و روان کننده سبب می شود تا با جدا کردن ذرات سیمان از هم، آب بیشتری در فرآیند هیدراتاسیون درگیر شده و سیمان های بیشتری هیدراته شوند و ساختار چگالتری را ایجاد کرده، مقاومت فشاری نمونه بالا رود. همچنین مشاهده می شود که در شرایط کنترلی، نمونه های بتن و ملات سه جزئی زئولیتی در تمام سنین دارای مقاومت کمتری نسبت به نمونه های کنترلی معمولی و خودتراکم بوده است که بمرور زمان این اختلاف کم شده و در سنین بالاتر مقاومتی تقریبا برابر با نمونه های کنترلی خواهند داشت. این امر ممکن است بدلیل مشکلات رئولوژی زئولیت در خصوص تراکم و استفاده ی زیاد از روان کننده باشد. در تمامی نمونه های مغروق، فاکتور افزایش مقاومت فشاری منفی است که این بعلت وجود یون های مهاجم و شرایط محیطی مخرب می باشد. در تمام نمونه های مغروق، نمونه های بتن و ملات سه جزئی حاوی دوده ی سیلیسی، در تمام سنین، دارای کمترین فاکتور افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونه ی کنترلی خودتراکم، در مقایسه با سایر طرح ها هستند و این نشان دهنده ی این است که دوده ی سیلیسی در مواجه با آب دریای خلیج فارس از حیث مقاومتی، نسبت به باقی مواد بسیار بد عمل کرده است. دلیل این امر اینست که در سطوح نمونه های مغروق در آب دریا (که حاوی مقدار زیادی منیزیم سولفات است)، کلسیم زدایی ترکیبات سیلیکات کلسیم هیدراته چشمگیر بوده و وجود دوده ی سیلیسی تاثیر مثبت چندانی برای مقاومت در برابر تخریب سطح بتن نداشته و حتی وضعیت را بدتر از نمونه های سیمانی معمولی نیز کرده است. همچنین در نمونه های حاوی دوده ی سیلیسی، منیزیم هیدروکسید (بروسیت) وجود ندارد. منیزیم هیدروکسید از واکنش کلسیم هیدروکسید و سولفات منیزیم (موجود در آب دریای خلیج فارس) بوجود می آید و در آب نامحلول است. بنابراین منافذ را بسته و از ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته برای پیشرفت حمله محافظت می کند. در نمونه های حاوی دوده ی سیلیسی، نبود منیزیم هیدروکسید سبب می شود تا پیشرفت حمله به ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته زیاد گردد. در مجموع در نمونه های سه جزئی دوده ی سیلیسی، حمله بصورت شدیدتر اتفاق می افتد. در نمونه های بتن و ملات، رفتار زئولیت در برخورد با آب دریای خلیج فارس بهتر از دوده ی سیلیسی بوده و هنگامی که از دوده ی سیلیسی و زئولیت بصورت همزمان استفاده می کنیم، در تمامی شرایط رویارویی با آب دریای خلیج فارس در تمام انواع نمونه ها، فاکتور افزایش مقاومتی در تمام سنین بیشتر می گردد. بعبارت دیگر، در تمامی سنین، در نمونه های ملات و بتن، نمونه ی چهار جزئی دوده ی سیلیسی- زئولیت دارای بیشترین مقاومت فشاری است. علت آن فعالیت پوزلانی زیاد دوده ی سیلیسی و زئولیت و همچنین فرایند بهبود سازی منافذ توسط ذرات دوده ی سیلیسی و زئولیت می باشد.

جدول ۹- مقاومت فشاری نمونه های بتن/ملات (مگاپاسکال) و فاکتور افزایش مقاومت فشاری نمونه در شرایط خورنده نسبت به نمونه آب آهک اشباع هم سن (SDF)

نام طرح بتنی	سن نمونه (روز)		
	۱۸۰	۹۰	۲۸
آب آهک اشباع SCC-Z۱۵	۶۰.۷	۵۰.۱	۴۴.۳
مغروق SCC-Z۱۵	۴۶.۲	۴۳.۹	۴۱.۱
SCC-Z۱۵ SDF (٪)	-۳۳.۹	-۱۲.۴	-۷.۲
آب آهک اشباع SCC-SF۸Z۱۵	۷۸.۴	۶۷.۳	۵۹.۸
مغروق SCC-SF۸Z۱۵	۶۸.۵	۶۱.۳	۵۵.۷
SCC-SF۸Z۱۵ SDF (٪)	-۱۲.۶	-۸.۹	-۶.۹

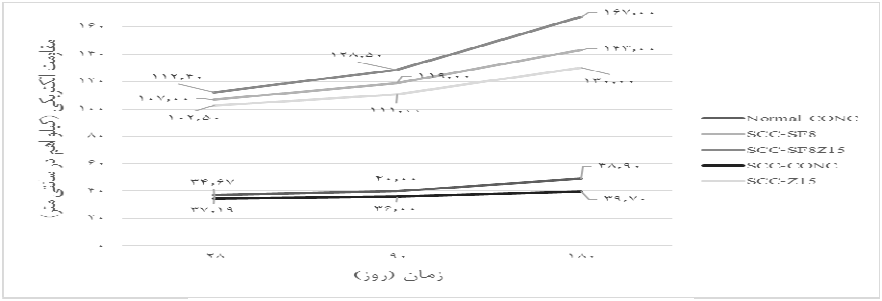
نام طرح بتنی	سن نمونه (روز)		
	۱۸۰	۹۰	۲۸
آب آهک اشباع SCC	۶۳.۶	۵۶.۷	۴۷.۲
مغروق SCC	۶۰.۲	۵۴.۱	۴۶.۳
SCC SDF (٪)	-۵.۳	-۴.۶	-۱.۹
آب آهک اشباع PC	۶۱.۲	۵۴.۹	۴۴.۵
مغروق PC	۵۹.۴	۵۳.۹	۴۴.۳
PC SDF (٪)	-۲.۹	-۱.۸	-۰.۴
آب آهک اشباع SCC-SF۸	۷۲.۱	۶۳.۴	۵۲.۱
مغروق SCC-SF۸	۴۴.۸	۴۳.۲	۴۰.۴
SCC-SF SDF (٪)	-۳۷.۹	-۳۱.۹	-۲۲.۵

نام طرح ملات	سن نمونه (روز)		
	۱۸۰	۹۰	۲۸
آب آهک اشباع SCC-Z۱۵	۳۸.۸	۳۶.۱	۳۴.۵
مغروق SCC-Z۱۵	۲۸.۹	۳۱.۸	۳۲.۵
SCC-Z۱۵ SDF (٪)	-۲۵.۵۲	-۱۱.۹۱	-۵.۸۰
آب آهک اشباع SCC-SF۸Z۱۵	۴۹.۳	۴۴.۵	۴۱.۶
مغروق SCC-SF۸Z۱۵	۳۴.۷	۳۶.۲	۳۸.۵
SCC-SF۸Z۱۵ SDF (٪)	-۲۹.۶۱	-۱۸.۶۵	-۷.۴۵

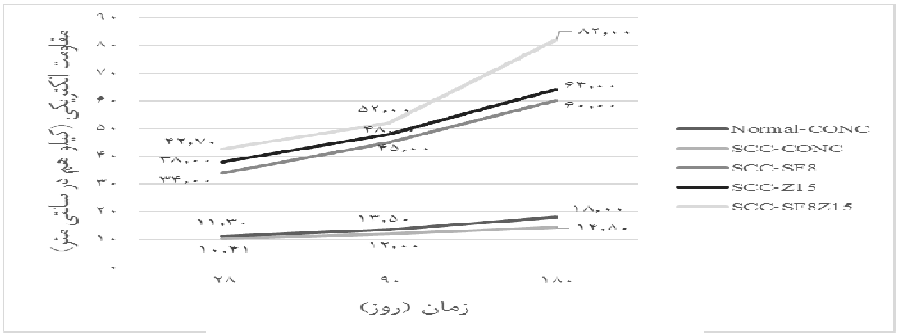
نام طرح ملات	سن نمونه (روز)		
	۱۸۰	۹۰	۲۸
آب آهک اشباع SCC	۳۹.۵	۳۸.۱	۳۵.۸
مغروق SCC	۳۱.۹	۳۳.۶	۳۴.۲
SCC SDF (٪)	-۱۹.۳۴	-۱۱.۸۱	-۴.۴۷
آب آهک اشباع PC	۳۹.۴	۳۷.۴	۳۵.۲
مغروق PC	۳۰.۹	۳۲.۱	۳۳.۴
PC SDF (٪)	-۲۱.۵۷	-۱۴.۱۷	-۵.۱۱
آب آهک اشباع SCC-SF۸	۴۳.۶	۴۱.۸	۳۷.۸
مغروق SCC-SF۸	۲۶.۶	۲۹.۱	۳۲.۵
SCC-SF SDF (٪)	-۳۸.۹۹	-۳۰.۳۸	-۱۴.۰۲

۳.۳. مقاومت الکتریکی

نمودارهای **۴** و **۵** مقاومت الکتریکی نمونه های کنترلی و مغروق در آب دریای خلیج فارس را در سنین ۲۸ تا ۱۸۰ روز تشان می دهند. در تمامی نمونه ها یا افزایش سن، مقاومت الکتریکی افزایش یافته است. این افزایش با افزایش سن نمونه بیشتر می گردد. زیرا نرخ فعالیت های پزلانی کم است و در سنین بالاتر افزایش مقاومت الکتریکی بیشتر است و در همه ی شرایط ، مقاومت الکتریکی نمونه های بتن معمولی بیشتر از بتن خودتراکم کنترلی است که این نشاندهنده ی اینست که از حیث نفوذ یون کلراید استفاده از بتن معمولی بهتر از بتن خودمتراکم کنترلی است. همانطور که مشاهده می شود افزودن زئولیت سبب افزایش مقاومت الکتریکی بتن گشته است. زیرا زئولیت در بتن، سبب گسترش یک اندازه ی حفرات شده و تمرکز یون ها را در آن کاهش می دهد همچنین فعالیت پزلانی زئولیت سبب می شود تا ریز ساختار بتن چگال تر شده و تمرکز یون های هیدروکسید در محلول منفذی کاهش یابد و مقاومت الکتریکی بتن را افزایش داده، دوام آن را در برابر نفوذ یون های کلراید بالا برد. افزودن دوده ی سیلیسی نیز سبب افزایش مواد سیمانی بتن شده و مقاومت الکتریکی آن را بالا می برد. ذرات بسیار ریز دوده ی سیلیسی باعث پر شدن منافذ بتن شده و از قدرت تحریک یون ها بمقدار زیادی می کاهد. بنابراین باعث افزایش مقاومت الکتریکی نمونه می شود. در شرایط کنترلی (آب آهک اشباع) نمودار ۴، در تمامی سنین، دوده ی سیلیسی مقاومت الکتریکی بتن را بیشتر از زئولیت نسبت به بتن کنترلی خودتراکم، بالا می برد و بنابراین در تمام سنین، مقاومت الکتریکی بتن حاوی دوده ی سیلیسی از بتن حاوی زئولیت بیشتر است و این اختلاف در سنین بالاتر مشهودتر است. این بدلیل فعالیت پزلانی بیشتر دوده ی سیلیسی نسبت به زئولیت می باشد که باعث چگالتر شدن ساختار خمیر سیمان نسبت به زئولیت شده و میزان رسانایی بخش خمیری سیمان نقش مهمتری از بخش سنگدانه ها در مقاومت الکتریکی بتن ایفا می کند. در سنین ۲۸ ،۹۰ و ۱۸۰ روز، درصد افزایش مقاومت الکتریکی بتن نسبت به نمونه ی خودمتراکم کنترلی، در نمونه ی سه جزئی دوده ی سیلیسی و زئولیتی بترتیب برابر با **۲۰۸/۶۲، ۲۳۰/۵۶، ۲۶۰/۲٪** و **۱۹۵/۶۵ ، ۲۰۸/۳۳، ۲۲۷/۴۶٪** می باشند. نمونه های مغروق در آب دریای خلیج فارس در مقایسه با نمونه های قرار گرفته در شرایط کنترلی آب آهک اشباع از کاهش چشم گیری در مقاومت الکتریکی برخوردار بودند. زیرا با افزایش رطوبت و نفوذ یون کلراید در بتن مقاومت الکتریکی کاهش یافته و به تبع آن شدت خوردگی افزایش می یابد.



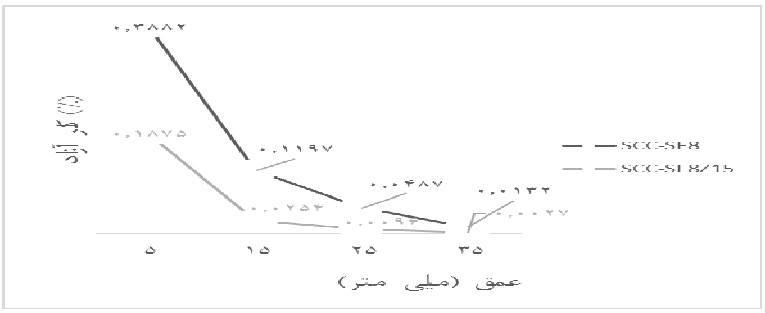
نمودار ۴- مقاومت الکتریکی در شرایط کنترلی آب آهک اشباع



نمودار ۵- مقاومت الکتریکی نمونه های بتنی در شرایط مغروق

۴.۳ .کلراید آزاد

نمودار ۶ مقدار کلراید آزاد موجود در اعماق ۵ تا ۳۵ میلی متری در را در نمونه های بتن ۶ ماهه ی حاوی دوده ی سیلیسی و دوده ی سیلیسی - زئولیت نشان داده شده است. نمونه های چهار جزئی حاوی زئولیت و دوده ی سیلیسی در تمام اعماق حاوی کلراید آزاد کمتری نسبت نمونه ی سه جزئی دوده ی سیلیسی هستند. این نشان می دهد که وجود زئولیت سبب کاهش مقدار کلراید آزاد در هر عمقی شده است. زیرا زئولیت بر اثر واکنش با هیدروکسید کلسیم در حضور رطوبت آزاد داخل شبکه ی منافذ بتن، محصولات چگال در منافذ موئینه ایجاد کرده و در نتیجه سیستم منفذی جدایی را ایجاد می کند. این ماده سبب بهبود منافذ بتن و ریز ساختار آن می گردد و در مجموع با فعالیت پزلانیش سبب بلوکه شدن منافذ بزرگ و کاهش آن ها می شود.

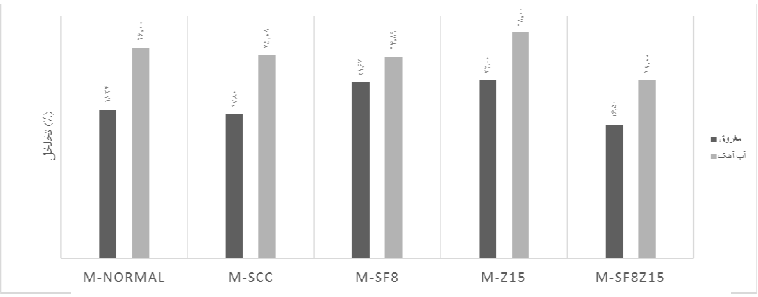


نمودار ۶- مقدار کلراید آزاد در اعماق مختلف نمونه های بتنی سه جزئی حاوی دوده ی سیلیسی و چهار جزئی زئولیت-دوده ی سیلیسی مغروق در آب دریای خلیج فارس

۵.۳. تخلخل کل ملات

دوام بتن بمقدار قابل توجهی به نفوذپذیری یون های مخرب در ساختار سیمان سخت شده ی آن وابسته است. نمودار ۷ تخلخل نمونه های ملات تمامی طرح ها را در شرایط مغروق و آب آهک اشباع نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، تخلخل همه ی ملات ها وقتی مغروق در آب دریای خلیج فارس هستند کمتر از آب آهک اشباع است زیرا وجود سولفات منیزیم سبب ایجاد بروسیت میشود (با واکنش شیمیایی یون های منیزیم با کلسیم هیدروکسید) که منافذ را بلوکه کرده و نفوذپذیری را کاهش میدهد. در هر دو شرایط مغروق و آب آهک اشباع، تخلخل بتن خودتراکم کنترلی کمتر از بتن معمولی است. مقدار تخلخل و جذب آب مویینه ی بتن خودمتراکم از بتن معمولی کمتر است و در حقیقت بتن های خودمتراکم مشخصات دوامی بهتری نسبت به بتن معمولی دارند. در شرایط کنترلی (آب آهک اشباع)، افزودنی ها بجز زئولیت (استفاده بصورت تکی)، سبب کاهش تخلخل ملات نسبت به نمونه های کنترلی شده اند. زئولیت سبب افزایش تخلخل ملات شده است و بعبارت دیگر مقدار منافذ قابل نفوذ ملات زئولیتی در ۱۸۰ روز بترتیب ۱/۳۶ و ۱/۳۱ برابر بتن کنترلی خودمتراکم و معمولی می باشد. این رفتار آثار منفی ای بر مقاومت فشاری نمونه می گذارد. بعلاوه افزایش منافذ سبب کاهش قدرت باربری بتن می شود و مقاومت فشاری نمونه ی زئولیتی را کاهش میدهد. مصرف زیاد روان کننده در نمونه های حاوی زئولیت بر تخلخل و مقاومت فشاری آن تاثیر میگذارد. برخلاف مقدار زیاد آب های غیر قابل تبخیر در خمیر نمونه ی سیمانی زئولیتی و فعالیت پزلانی بالای آن، مقاومت فشاری نمونه ی حاوی زئولیت در این پژوهش کمتر از نمونه های دیگر است و تخلخل آن بیشتر از نمونه های دیگر است. این اتفاق دو دلیل ممکن است که داشته باشد. ۱. بیشترین مقدار آب قابل تبخیر نسبت به سایر طرح ها ۲. مصرف زیاد روان کننده برای رسیدن به اسلامپ هدف مورد انتظار که سبب افزایش ورود هوا بداخل بتن می شود.

همچنین مشاهده می شود که تخلخل ملات سه جزئی زئولیتی از ملات سه جزئی دوده ی سیلیسی بیشتر است. و مقدار منافذ قابل نفوذ در نمونه ی حاوی زئولیت بیشتر از دوده ی سیلیسی است. همچنین هر چه مقدار این منافذ بیشتر باشد، مقاومت فشاری کمتر است و باطبع، ظرفیت باربری سازه نیز کمتر است. در نمونه هایی که دوده ی سیلیسی ندارند تخلخل کمتر است. زیرا در نمونه های بدون دوده ی سیلیسی بعلت وجود یون منیزیم در آب دریای خلیج فارس بروسیت ایجاد می شود که منافذ را می بندد. اما در نمونه هایی که حاوی دوده ی سیلیسی هستند، این اتفاق نمی افتد. در هر دو شرایط مغروق و آب آهک اشباع طرح چهار جزئی دوده ی سیلیسی-زئولیت دارای تخلخل کمتری نسبت به سایر طرح ها است. زیرا مقدار نسبت w/b در آن از بقیه ی طرح ها کمتر است.

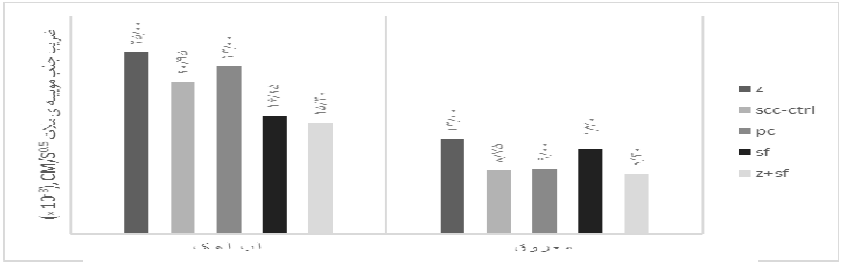


نمودار ۷- تخلخل ملات تمام طرح ها در شرایط رویارویی مغروق و آب آهک اشباع

۶.۳. فاکتور جذب آب موئینه ی ملات

نمودار ۸ ضریب جذب آب مویینه ی ملات تمامی طرح ها در شرایط مختلف قرارگیری را نشان می دهد. در این جدول مشاهده می کنیم که ضریب جذب مویینه ی ملات نسبت به جذر زمان با گذر زمان، در تمامی طرح ها بشرح زیر است : مغروق < آب آهک اشباع. همچنین، ضریب جذب آب مویینه ی بتن خودتراکم در تمامی شرایط از بتن معمولی کمتر بوده است. افزودن دوده ی سیلیسی سبب کاهش جذب آب نسبت به نمونه های کنترلی (بدون افزودنی) در آب آهک اشباع شده است، زیرا نمونه ی سیمانی حاوی دوده ی سیلیسی دارای ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته ی اضافی تولید شده از واکنش پزلانی دوده ی سیلیسی بوده که سبب یکنواخت سازی ریز ساختار و بهبود شبکه ی منافذ شده، تخلخل و نفوذپذیری را کاهش می دهد. کاهش اندازه ی منافذ موئینه توسط محصولات هیدراتاسیون سبب افزایش احتمال تبدیل منافذ پیوسته به منافذ گسسته می گردد. نمونه ی چهار جزئی دوده ی سیلیسی-زئولیت، در هر دو محیط، دارای فاکتور جذب آب مویینه ی کمتری نسبت به نمونه ی دوده ی سیلیسی است. این امر نشان می دهد که زئولیت در بهبود منافذ موثر بوده و دوام بتن را در برابر حملات سولفاتی بالا می برد. (زئولیت با فعالیت پزلانی بالا و مصرف کلسیم هیدروکسید در بتن) جذب آب مویینه ی ملات سه جزئی زئولیتی در شرایط آب آهک اشباع و مغروق از بتن های کنترلی بیشتر است.

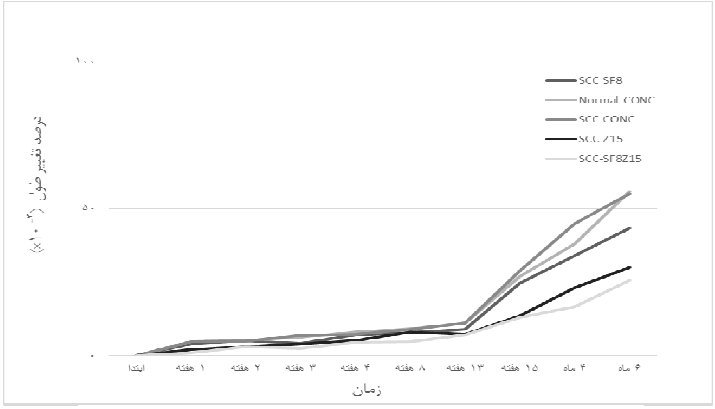
زئولیت جذب آب بتن را بالا می برد. زیرا این طور بنظر می رسد که جذب آب بتن به میزان جذب آب مواد مصرفی در خمیر سیمان لایه ی سطحی بتن وابسته بوده و به دلیل اینکه جذب آب زئولیت طبیعی از سیمان بیشتر است، جذب آب بتن را بلاشک بالا می برد. بالاتر بودن ضریب جذب مویینه ی نمونه ی زئولیت از نمونه ی دوده ی سیلیسی، در شرایط کنترلی در سن ۱۸۰ روز می تواند نشان دهنده ی آن باشد که فعالیت پزلانی زئولیت در بلند مدت، از دوده ی سیلیسی بیشتر است. وجود دوده ی سیلیسی در نمونه های سه جزئی، در شرایط رویارویی آب دریا، سبب افزایش ضرایب جذب آب مویینه نسبت به زمان در مقایسه با طرح های کنترلی است.



نمودار ۸- ضریب جذب آب مویینه ی ملات تمام طرح ها در شرایط رویارویی مختلف

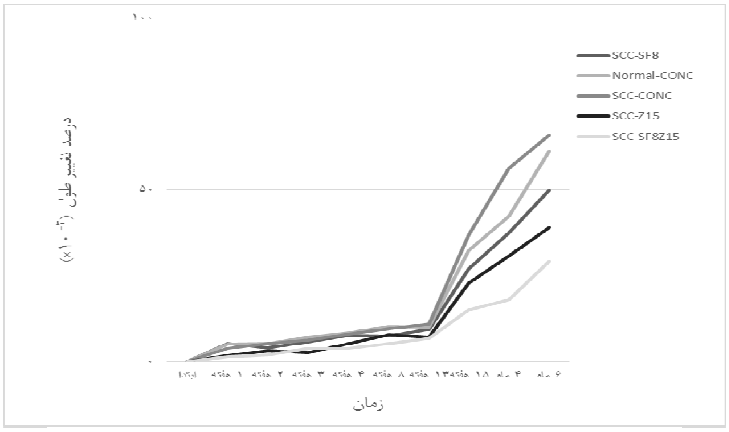
۷.۳. انبساط طولی ملات

تغییر طول ملات تمامی طرح اختلاط ها، در شرایط مغروق در آب دریای خلیج فارس در بازه ی زمانی ۱ تا ۴۲ هفته، در نمودار ۹ آمده است. همچنین تغییر طول نمونه های ملات قرار گرفته در محلول سدیم سولفات و منیزیم سولفات در نمودار ۱۰ مشاهده می شود. همانطور که مشاهده می شود در همه ی شرایط، درصد تغییر طول ملات های مختلف تقریبا با یکدیگر مشابهند؛ اما از هفته ی ۱۳ام مقدار انبساط نمونه ها بیشتر شده و اختلاف میزان انبساط نمونه ها با یکدیگر مشهود تر می گردد. هم چنین، از ماه ۴ام به بعد، درصد تغییر طول نمونه های کنترلی (بدون افزودنی زئولیت یا دوده ی سیلیسی)، در تمامی شرایط محیطی، خیلی بیشتر از نمونه های حاوی افزودنی در همان شرایط بود. این امر نشان می دهد که افزودنی ها می توانند باعث افزایش دوام نمونه در حمله سولفات از نظر مقدار انبساط بگردند. در تمامی شرایط رویارویی، نمونه های چهار جزئی حاوی زئولیت و دوده ی سیلیسی دارای انبساط کمتری نسبت به نمونه های زئولیتی و دوده ی سیلیسی بودند و عملکرد بهبود در نمونه های حاوی دوده ی سیلیسی در تمام شرایط بهتر از نمونه ی حاوی زئولیت تنها بود. همچنین، مقدار انبساط ملات در محلول سولفاتی بیشتر از انبساط همان ملات در محلول آب دریای خلیج فارس است. علت وجود کلراید در محلول آب دریای خلیج فارس است که سبب کند شدن روند حمله ی سولفات و کاهش اثرات انبساطی آن در نمونه ی ملات می گردد. وجود یون کلراید در محلول منفذی بتن بطور قابل ملاحظه ای حمله ی سولفاتی را کاهش ی دهد و هر چه میزان یون کلراید بیشتر باشد، انبساط و تخریب حاصل از حملات سولفاتی کاهش می یابد. در سنین ابتدایی، هیدراتاسیون سبب ایجاد انبساط خیلی کم در نمونه می شود. بدلیل آنکه مقدار ضرایب نفوذپذیری کلراید از سولفات بیشتر است، هنگامی که انبساط و ترک بدلیل حمله ی سولفاتی در نمونه بوجود می آید، یون های کلراید از طریق تخلخل های بتن و ریز ترک ها وارد اعماق نمونه می شوند و در حضور کلسیم هیدروکسید یون های کلراید با کلسیم آلومینات هیدراته واکنش داده و کلسیم آلومینات تکی و یا تری کلسیم آلومینات[۱۵] را بوجود می آورد که این ها از تشکیل اترینگایت جلوگیری می کنند. بهمین علت است که هر چه میزان کلراید در محلول مهاجم سولفاتی (در این پژوهش آب دریای خلیج فارس) بیشتر باشد میزان انبساط کمتر است. در ماه ۶ام، وجود کلراید در محلول مهاجم سبب شده تا مقدار انبساط در نمونه ی حاوی زئولیت، ۹٪ کم گردد که این مقدار برای نمونه های دارای دوده ی سیلیسی کمتر بوده است. بطوریکه برای ملات ۳ جزئی دوده ی سیلیسی ۶/۶ ٪ و برای ملات ۴ جزئی دوده ی سیلیسی-زئولیتی ۳/۵ ٪ کاهش گزارش شده است. بنابراین می توان گفت که وجود کلراید در کاهش انبساط مخلوط های حاوی دوده ی سیلیسی بخصوص دوده ی سیلیسی-زئولیت تاثیر چندانی ندارد.



نمودار ۹- تغییر طول ملات در شرایط مغروق در آب دریای خلیج فارس

[۱۵] Single or Ticalcium chloroaluminates



نمودار ۱۰- تغییر طول ملات در شرایط مغروق در محلول سولفات منیزیم و سدیم

۴. نتیجه‌گیری

۱. با توجه به نتایج آزمایش های کارآیی بتن و ملات تازه، افزودن هر دو افزودنی های دوده ی سیلیسی و زئولیت (طرح های چهار جزئی) به بتن سبب تعدیل خواص پرکنندگی و جاری شدن آن نسبت به طرح های حاوی زئولیت و یا سیلیکافیوم بصورت جدا می شود.

۲. وجود دوده ی سیلیسی در بتن هنگامی که در آب معمولی باشد (آب آهک اشباع) و بعبارتی هنگامی که مکانیزم تخریب بعلت انبساط ناشی از تشکیل اترینگایت باشد، سبب بهبود روند دوامی آن می شود. اما در آب دریای خلیج فارس که مقدار منیزیم آن زیاد است و بیشترین تاثیر تخریب بعلت تجزیه ی ژل های سیلیکات کلسیم هیدراته است افزودن دوده ی سیلیسی سبب تضعیف بتن می شود.

۳. زئولیت سبب کاهش گرمای هیدراتاسیون بتن شده و نرخ سخت شدگی شده و مقاومت فشاری بتن را کاهش می دهد و بهمین علت نیازمند مدت زمان عمل آوری بیشتری است. این امر ممکن است بدلیل مشکلات رئولوژی زئولیت در خصوص تراکم و استفاده ی زیاد از روان کننده باشد.

۴. نتایج آزمایش های مقاومت فشاری بتن و جذب آب موئینه نشان دادند که استفاده از دوده ی سیلیسی سبب کاهش دوام بتن در مواجهه با آب دریا می شود که زئولیت می تواند این امر را بهبود بخشد، بطوری که استفاده از زئولیت بهمراه دوده ی سیلیسی در نمونه های بتن و ملات چهارجزئی سبب افزایش خواص های مقاومتی و دوام آن در برابر آب دریا می گردد.

۵. از حیث انبساط طولی نمونه های ملات در شرایط مخرب، نمونه های خودتراکم کنترلی مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های کنترلی معمولی از خود نشان دادند و در نمونه های حاوی سیلیکافیوم، مقدار انبساط در شرایط مغروق در آب دریای خلیج فارس و مغروق در محلول سولفات تفاوت چندانی با یکدیگر نداشتند. همچنین، وجود کلراید در محلول مهاجم سبب کاهش انبساط تمامی طرح ها در محیط آب دریای خلیج فارس نسبت به محیط مغروق در سولفات گشت.

۶. هنگامی که از افزودنی در بتنی که قرار است تحت حمله ی یونهای مخرب سولفاتی (بخصوص منیزیم سولفات) قرار گیرد استفاده شود، مدت زمان عمل آوری بتن باید بیشتر از ۷ روز و در شرایط استاندارد عمل آوری باشد. سرعت ساخت و ساز سریع در ناحیه ی خلیج فارس اجازه ی عمل آوری بتن بمدت ۲۸ روز را نمی دهد و این پژوهش نشان می دهد که حتی با وجود استفاده از زئولیت و دوده ی سیلیسی باز هم بمدت زمانی عمل آوری بیشتری برای دستیابی به خواص دوامی و مقاومتی مطلوب نیاز است.

۵. قدردانی

این پژوهش در کارگاه ساختمانی دانشگاه علم و صنعت انجام گرفته است و از تمام پرسنل قدردانی بعمل می آید.

۶. مراجع

[۱] A.-M. A. Maslehuddin M, Rasheeduzzafar, Al-Amoudi OSB, "Concrete durability in very aggressive environment," in *ACI SP- 144, American Concrete Institute, Detroit*, 1994, pp. 191–211.

[۲] M. Shekarchi, F. Moradi-Marani, and F. Pargar, "Corrosion damage of a reinforced concrete jetty structure in the Persian Gulf: A case study," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. ۷, no. ۹, pp. ۷۰۱–713, 2011.

[۳] S. A. Al-Tayyib AJ, "The Gulf environment and its impact on corrosion of steel in concrete," in *Corrosion and Protection of Reinforced Concrete, Dubai*, pp. ۱۰–۱۱.

[۴] A.-G. A. Rasheeduzzafar, Dakhil FH, "Deterioration of concrete structures in the environment of the Middle East," *ACI J Proc*, vol. ۸۱(۱), pp. ۱۳–۲۰, ۱۹۸۴.

[۵] O. S. B. Al-Amoudi, S. N. Abduljauwad, Z. R. El-Naggar, and Rasheeduzzafar, "Response of sabkha to laboratory tests: A case study," *Eng. Geol.*, vol. ۳۳, no. ۲, pp. ۱۱۱–125, 1992.

[۶] K. A. Melo and A. M. P. Carneiro, "Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۲۴, no. ۸, pp. ۱۵۲۹–1535, 2010.

[۷] R. Siddique, "Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash," *Mater. Des.*, vol. ۳۲, no. ۳, pp. ۱۵۰۱–۱۵۰۷, ۲۰۱۱.

[۸] R. Vedalakshmi, K. Rajagopal, and N. Palaniswamy, "Longterm corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 186–199, 2008.

[۹] S. K. Roy, Liam Kok Chye, and D. O. Northwood, "Chloride ingress in concrete as measured by field exposure tests in the atmospheric, tidal and submerged zones of a tropical marine environment," *Cem. Concr. Res.*, vol. ۲۳, no. ۶, pp. ۱۲۸۹–۱۳۰۶, ۱۹۹۳.

[۱۰] K. A. Gruber, T. Ramlochan, A. Boddy, R. D. Hooton, and M. D. A. Thomas, "Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin," *Cem. Concr. Compos.*, vol. ۲۳, no. ۶, pp. ۴۷۹–484, 2001.

[۱۱] D. D. Toutanji HA, *Supplementary materials to enhance bridge deck durability, prepared for University Transportation Center for Alabama*. ۲۰۰۱.

[۱۲] L. K.-M. Choi Y-S, Kim J-G, "Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete," *Corros Sci*, vol. ۴۸(۷), pp. ۴۵–۱۷۳۳, ۲۰۰۶.

[۱۳] Y. Choi, J. Kim, and K. Lee, "Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete," vol. ۴۸, pp. 1733–1745, 2006.

[۱۴] D. Ridsdale, "A diverse and sometimes rocky road," *EuroAsia Semicond.*, vol. ۳۰(۴), no. ۴, p. ۳, ۲۰۰۸.

[۱۵] M. I. Khan, "Nanostructure and Microstructure of Cement Concrete Incorporating Multicementitious Composites," pp. ۲۱–۲۷.

[۱۶] C. C. Yang and S. W. Cho, "An electrochemical method for accelerated chloride migration test of diffusion coefficient in cement-based materials," vol. ۸۱, pp. ۱۱۶–125, 2003.

[۱۷] R. Rodríguez and R. Uribe, "Importance of using the natural pozzolans on concrete durability," *Cem. Concr. Res.*, vol. ۳۲, no. ۱۲, pp. ۱۸۵۱–۱۸۵۸, ۲۰۰۲.

[۱۸] J. Bai, S. Wild, and B. B. Sabir, "Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC – PFA – MK binder compositions exposed to synthetic seawater," vol. ۳۳, pp. ۳۵۳–362, 2003.

[۱۹] R. Alizadeh, P. Ghods, M. Chini, M. Hoseini, and M. Shekarchi, "Durability based design of RC structures in Persian Gulf region using DuraPGulf model," *Constr. Mater.*, vol. ۰, no. Taheri ۱۹۹۸, pp. 391–394, 2006.

[۲۰] Topcu IB, "The influence of ilicoferrochromium fume on concrete properties," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25(2), pp. 387–394, 1995.

[۲۱] M. M. Ranjbar, R. Madandoust, S. Y. Mousavi, and S. Yosefi, "Effects of natural zeolite on the fresh and hardened properties of self-compacted concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. ۴۷, pp. ۸۰۶–813, 2013.

[۲۲] K. Samimi, S. Kamali-bernard, and A. A. Maghsoudi, "Resistance to Chloride Penetration of High Strength Self-Compacting Concretes : Pumice and Zeolite Effect," no. February, ۲۰۱۸.

[۲۳] T. Markiv, K. Sobol, W. Franus, M. Franus, and W. Franus, "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. ۱۶, no. ۴, pp. ۵۵۴–562, 2016.

[۲۴] I. Tuuml, rkmen, A. Ouml, z, A. Cuuml, and neyt Aydin, "Characteristics of workability, strength, and ultrasonic pulse velocity of SCC containing zeolite and slag," *Sci. Res. Essays*, vol. ۵, no. ۱۵, pp. ۲۰۵۵–2064, 2010.

[۲۵] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, and W. Franus, "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. ۱۶, no. ۴, pp. ۵۵۴–562, 2016.

[۲۶] M. Sahmaran, A. Yurtseven, and I. Ozgur Yaman, “Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete,” *Build. Environ.*, vol. ۴۰, no. ۱۲, pp. ۱۶۷۲–۱677, 2005.
[۲۷] K. College and A. A. B. U. K, “INFLUENCE OF INITIAL CURING ON SULPHATE RESISTANCE OF BLENDED CEMENT CONCRETE BY P . S . MANGAT AND J . M . EL-KHATIB Department of Engineering , University of Aberdeen ,” vol. ۲۲, pp. ۱۰۸۹–۱100, 1992.
[۲۸] M. D. Cohen, “Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solution.,” *ACI Mater. J.*, vol. ۸۵, no. ۳, pp. ۵۷–۱48, 1988.
[۲۹] E. E. Hekal, E. Kishar, and H. Mostafa, “Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances,” *Cem. Concr. Res.*, vol. ۳۲, no. ۹, pp. ۱۴۲۱–۱427, 2002.
[۳۰] H.-Y. Moon, S.-T. Lee, and S.-S. Kim, “Sulphate resistance of silica fume blended mortars exposed to various sulphate solutions,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. ۳۰, no. ۴, pp. ۶۲۵–۶36, 2003.
[۳۱] S. T. Lee, “Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss,” vol. ۲۷, pp. ۶۵–۷۶, ۲۰۰۵.
[۳۲] J. Watson and F. Crick, “© ۱۹۵۳ Nature Publishing Group,” *Group*, ۱۹۵۳.
[۳۳] G. Mascolo, “Hydrotalcite observed in mortars exposed to sulfate solutions - A discussion,” *Cem. Concr. Res.*, vol. ۱۶, no. ۴, pp. ۶۱۰–۶۱۲, ۱۹۸۶.
[۳۴] M. Nehdi and M. Hayek, “Behavior of blended cement mortars exposed to sulfate solutions cycling in relative humidity,” vol. ۳۵, pp. ۷۳۱–۷۴۲, ۲۰۰۵.
[۳۵] A. Schwartzentruber and C. Catherine, “Method of the concrete equivalent mortar (CEM) – A new tool to design concrete containing admixture (in French).,” *Mater. Struct.*, vol. ۳۳, no. October, pp. ۴۷۵–482, 2000.
[۳۶] ASTM, “Astm C۳۳-۰۳,” vol. i, no. C, pp. ۱–۱۱, ۲۰۱۰.
[۳۷] EFNARC, “Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete,” *EFNARC ۲۰۰۲*, vol. ۴۴, no. February, p. ۳۲, ۲۰۰۲.
[۳۸] B. S. En, “Testing hardened concrete part ۳,” *Management*, no. August, ۲۰۰۲.
[۳۹] ASTM C۱۰۹/C۱۰۹M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using ۲-in . or [۵۰-mm] Cube Specimens) ۱,” *ASTM Int.*, vol. i, pp. ۱–۹, ۲۰۱۶.
[۴۰] A. R. Alizadeh and M. Hoseini, “The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region The Effect of Different Exposure Conditions on the Chloride Diffusion into Concrete in the Persian Gulf Region,” no. January, ۲۰۱۴.
[۴۱] T. Drilled and B. Statements, “Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete 1 ASTM,” vol. 15, no. 5, pp. 5–8, 2006.
[۴۲] ASTM C ۶۴۲-۲۰۰۶, “Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete,” *ASTM Int. West Conshohocken, PA*, no. ۴, pp. ۱–۳, ۲۰۰۶.
[۴۳] ASTM C۱۵۸۵, “Standard Test Method for Mesurement of Rate Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. ۴, no. ۱۴۷, pp. ۱–۶, ۲۰۰۴.
[۴۴] A. Benli, M. Karataş, and E. Gurses, “Effect of sea water and MgSO۴ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 464–474, 2017.
[۴۵] ASTM C۱۰۱۲/C۱۰۱۲M-۱۵, “Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. ۱۱, pp. ۵–۹, ۲۰15.
[۴۶] “THE STRENGTH EFFECT OF MINERAL ADMIXTURE ON CEMENT CONCRETE Feng Nai-qian , Yang Hsia-ming and Zu Li-hong Building Material Laboratory , Department of Civil Engineering Tsinghua University , Beijing , China (Communicated by Wu Zhong-wei) ABSTRACT This p,” vol. 18, no. c, pp. 464–472, 1988.
[۴۷] F. A. Sabet, N. A. Libre, and M. Shekarchi, “Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. ۴۴, pp. ۱۷۵–۱۸۴, ۲۰۱۳.
[۴۸] C. K. Park, M. H. Noh, and T. H. Park, “Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. ۳۵, no. ۵, pp. ۸۴۲–۸49, 2005.