



Strength Evaluation of Self-Compacting Concrete Using Carboxylate-Based Superplasticizers in Seawater

Hoseinali Bagi^{1*} , Ali Rahimi²

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran, hbagi@tvu.ac.ir

² Professor, Faculty of Engineering, ATU University, Almaty, Kazakhstan, alirahimiacademia@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 13 Nov 2025

Last modification: 15 Feb 2026

Accepted: 16 Feb 2026

Available online: 17 Feb 2026

Article type:

Scientific Research

Keywords:

Self-Compacting Concrete

(SCC)

Seawater

Superplasticizer

Ultimate Strength

ABSTRACT

This research was conducted with the aim of developing hydraulic structures and enhancing the performance of a group of reinforced concrete structures located in coastal areas. Today, the importance of designing and evaluating the durability of self-compacting concretes has increased significantly. In this study, focusing on the use of carboxylate-based superplasticizers, microsilica, and calcium carbonate powder in the design of self-compacting concrete (SCC), the stability of concretes exposed to or submerged in seawater has been investigated. The results of this study indicate that the high concentration of chlorides in seawater increases the rate of hydration, shortens the setting time, and enhances the early-age strength of the concrete. Furthermore, laboratory findings demonstrate that superplasticizers based on polycarboxylate effectively neutralize the detrimental effects of chlorides. Additionally, laboratory specimens cured in seawater exhibited relatively higher strength compared to those cured in fresh water.

ISSN: 2645-8136



DOI:

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>]



ارزیابی مقاومتی بتن های خودتراکم به کمک فوق روان کننده های کربوکسیلاتی در آب دریا

حسینعلی بگی^{۱*} ID، علی رحیمی^۲ ID

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت تهران، ایران، hbagi@tvu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه ATU، آلماتی، قزاقستان، alirahimiacademia@gmail.com

چکیده

این پژوهش با هدف توسعه سازه های آبی و بهبود عملکرد گروهی از سازه های بتن آرمه واقع در نواحی ساحلی انجام شده است. امروزه اهمیت طراحی و ارزیابی دوام بتن های خودتراکم به طور چشمگیری افزایش یافته است. در این تحقیق، با تمرکز بر استفاده از فوق روان کننده های کربوکسیلاتی، میکروسیلیس و پودر کربنات کلسیم در طراحی بتن های خودتراکم (SCC)، پایداری بتن هایی که در معرض آب دریا قرار دارند و یا در آب دریا غوطه ور هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که غلظت بالای کلریدها در آب دریا باعث افزایش نرخ هیدراتاسیون، کاهش زمان گیرش و افزایش مقاومت اولیه بتن می شود. همچنین یافته های آزمایشگاهی بیانگر آن است که فوق روان کننده های بر پایه پلی کربوکسیلات، اثرات مخرب کلریدها را به طور مؤثر خنثی می کنند. علاوه بر این، نمونه های آزمایشگاهی عمل آوری شده در آب دریا، مقاومت نسبتاً بالاتری در مقایسه با نمونه های عمل آوری شده در آب آشامیدنی از خود نشان داده اند.

اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

نوع مقاله: علمی پژوهشی

کلمات کلیدی:

بتن خود تراکم

آب دریا

فوق روان کننده

مقاومت نهایی بتن

DOI:

حق نشر: © ۲۰۲۵ توسط نویسندگان. این اثر برای انتشار با دسترسی آزاد، تحت شرایط و ضوابط مجوز (CC BY) ارسال شده است.

ISSN: 2645-8136



۱ - مقدمه

توسعه فناوری بتن های خودتراکم در دنیای امروزی بسیار سریع است. پژوهش های نوآورانه متعددی تا کنون توسط محققان انجام شده تا با تلاش برای ارتقای کیفیت بتن، دستاوردهای جدیدی به وجود آید. محققان پژوهش های فراوانی انجام داده اند تا به مسائل ناشی از کاربرد مواد در اختلاط بتن پاسخ دهند و محدودیت هایی را که اغلب در اجرای کار در محل رخ می دهد به ویژه بتن های در معرض آب دریا، برطرف کنند. مشکلاتی که در دنیای ساخت و ساز مشاهده می شوند شامل کمبود نواحی آب آشامیدنی مناسب برای استفاده به عنوان آب مخلوط بتن، کارایی (قابلیت جاری شدن) بتن و فرآیندهای اجرای بتن، به ویژه در سازه های بتنی با آرماتوربندی پیچیده، سازه های بتنی بلند و سهل انگاری در نگهداری بتن است. [۱].

این گروه از بتن ها در حالت تازه و سخت شده دارای مزایای بسیاری است. به دلیل توانایی بالای پرکنندگی، SCC تمام فضاهای قالب را پر کرده و از ایجاد لانه زنبوری جلوگیری می کند و در نهایت منجر به ساخت سازه های بتنی با کیفیت بالا می شود [۲]. در بسیاری از پروژه های توسعه SCC معمولاً با استفاده از پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی یا سرباره، آهک، میکروسلیس صورت می گیرد [۳]. بتن تازه SCC دارای روانی بالا است که می تواند با اندک یا بدون فرایند ویبراسیون فضاهای قالب را پر کند و زمان فرآیند تراکم را کاهش دهد؛ همچنین به دلیل روانی بالا، بتن تازه را می توان به راحتی از طریق پمپ تا ارتفاع زیاد منتقل کرد، حتی در سازه هایی که آرماتوربندی بسیار فشرده ای دارند [۴]. همچنین پژوهشی های مختلفی توسط محققان تا کنون روی بتن های SCC انجام شده و از آب شیرین و آب دریا به عنوان آب اختلاط استفاده شده و بتن ها با همان نوع آب نگهداری (کیور) شده اند و کارایی، مقاومت فشاری و ریزساختار SCC را بررسی نموده اند [۵ و ۶].

این محققان نشان دادند که که افزایش مقاومت فشاری SCC با استفاده از آب دریا نسبت به آب شیرین بیشترین اختلاف را در سنین اولیه یعنی در روزهای لول تا سوم بوده است. این امر ناشی از تسریع تشکیل توپرموریت (C-S-H) در حضور آب دریا است که پیوند ماتریس با سنگدانه را قوی تر می کند. علاوه بر این، نمک فریدل تشکیل شده، فضاهای تخلخل را پر کرده و ریزساختار را متراکم تر می سازد. افزایش چگالی ریزساختاری با افزایش مقاومت فشاری و کاهش اندازه و تخلخل منافذ همخوانی داشت. [۷]

این مطالعه متمرکز بر روی مقاومت نهایی بتن های SCC است و در طراحی بتن SCC از مواد جایگزین با سیمان همراه با

فوق روان کننده ها در راستای بهبود کیفیت مقاومتی بتن شده است. همچنین در این ارزیابی میزان اسلامپ جریان یافته گیری شده است. همزمان عمل آوری مقاومت بتن در آب معمولی و آب دریا را ارزیابی گردیده است و در بعضی موارد خواص مکانیکی بتن SCC که از آب دریا به عنوان آب اختلاط استفاده شده ارزیابی شده و با بتن SCC بدون عمل آوری در آب دریا مقایسه گردیده است. هدف از این پژوهش ارزیابی اثر فوق روان کننده کربوکسیلاتی، فوم سیلیسی و پودر کربنات کلسیم بر خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم (SCC) در شرایط اختلاط و عمل آوری با آب دریا است. این مطالعه به صورت کمی مقاومت فشاری نمونه های SCC حاوی ترکیبات فوق را با استفاده از آزمون اسلامپ جریان یافته (T500) بررسی می کند و تاثیر جایگزینی جزئی سیمان با پودر سنگ آهک (LSP) بر افزایش مقاومت اولیه و نهایی بتن را می سنجد؛ همچنین تفاوت عملکرد SCC گیرش شده در آب آشامیدنی و آب دریا مشخص می نماید.

۲- روش کار و مطالعات آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور ارزیابی پایداری و مقاومت بتن های خودتراکم در آب های معمولی و آب دریا از سیمان معمولی پرتلند تیپ یک با بلین ۳۲۵۰ (سانتیمتر مربع بر گرم) با آنالیز شیمیایی مشخص [۸] و مطابق استاندارد ISIRI 329 استفاده گردید (شکل ۱). خاکستر بادی مورد استفاده مطابق استاندارد ASTM-618-19 با بلین ۳۸۰۰ (سانتی متر مربع بر گرم) با وزن مخصوص ۳/۰۸ بوده [۹] و فوم سیلیسی مورد استفاده دارای ذراتی با وزن مخصوص ۲/۲ و ذرات کوچکتر از ۴۴ میکرومتر و ترکیب شیمیایی زیر استفاده شده است [۱۰].

پودر آهک استفاده شده با درجه خلوص ۹۸/۵ درصد کربنات کلسیم با ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرومتر و وزن مخصوص ۲/۶ و فوق روان کننده نوع F و دانسیته ۱/۱ کیلوگرم بر لیتر جهت روان سازی و کاهش شدید آب مصرفی و مطابق استاندارد ASTM-C-494 استفاده گردید [۱۱].

در شکل ۲ جزئیات ترکیب وزنی مواد مصرفی در ساخت بتن بر حسب کیلوگرم مشخص شده است.

درصد مصالح (آنالیز شیمیایی)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
خاکستر بادی	47.65	27.73	18.43	2.65	0.34	5.11	-	-	-	-
فوم سیلیسی	94.4	0.3	0.81	0.14	0.87	0.26	-	-	-	-
سیمان پرتلند	16.25	3.42	-	2.38	3.75	67	51.9	31	8.96	7.98

شکل ۱- ترکیب شیمیایی خاکستر بادی، فوم سیلیسی و سیمان پرتلند

وزن آب مصرفی	مصالح ریز دانه	مصالح درشت دانه	سیمان و مواد متصل کننده
165	970	764	500

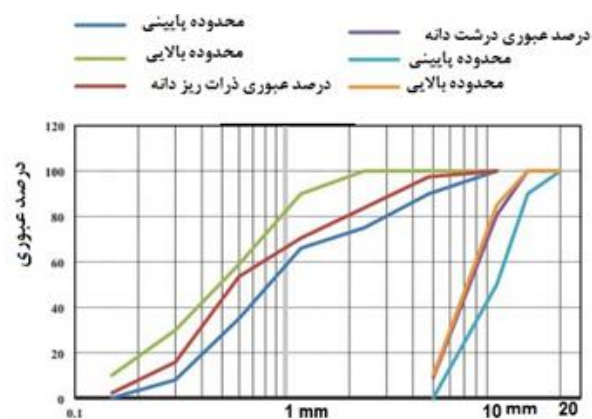
شکل ۲- ترکیب مواد سازنده بتن بر حسب کیلوگرم

اسلامپ جریانی T500 بر اساس اصول معرفی شده EFNARC اندازه گیری شد. سپس مقاومت های نمونه های مکعبی ۱۰۰ میلی متری اندازه گیری شد [۱۳]. گیرش اولیه و ثانویه سیمان با استفاده از آب قابل شرب و آب دریا اندازه گیری شد (شکل ۵).

پارامتر	واحد	میانگین تقریبی
کلرید کل (Cl ⁻)	mg·L ⁻¹	18500
سولفات (SO ₄ ²⁻)	mg·L ⁻¹	2400
شوری کل / TDS	mg·L ⁻¹	38500
شوری (Salinity)	g·L ⁻¹	38.5
سدیم (Na ⁺)	mg·L ⁻¹	11000
منیزیم (Mg ²⁺)	mg·L ⁻¹	1350
کلسیم (Ca ²⁺)	mg·L ⁻¹	500
برمید (Br ⁻)	mg·L ⁻¹	500
بور (B)	mg·L ⁻¹	4
PH	-	8.05
هدایت الکتریکی	ms. cm ⁻¹	55

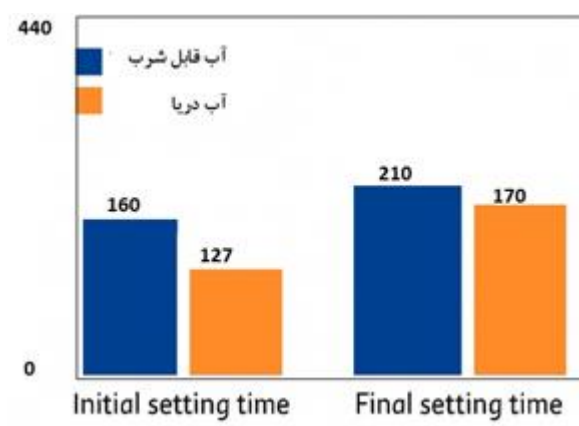
شکل ۴- ترکیب آب دریا (خلیج فارس)

دانه بندی مصالح دانه ای مصرفی شامل شن و ماسه در شکل ۳ نشان داده شده است. مصالح ریز دانه شامل دانه هایی است که از الک NO=4 عبور نموده و داری وزن مخصوص ۲/۶۴ و مصالح درشت دانه اندازه کمتر از ۲۰ میلی متر با وزن مخصوص ۲/۶۲ و همچنین سنگ دانه ها مقاومت فشاری حدود ۹۰ مگاپاسکال در مغزه های حفاری شده از سنگ های کرتاسه میانی داشته اند [۱۲].



شکل ۳: دانه بندی مصالح درشت دانه و ریز دانه

در این پژوهش ابتدا گیرش سیمان با آب معمولی و سپس آب دریا (خلیج فارس) اندازه گیری شد (شکل ۴). سپس آزمایش های بتن تازه



شکل ۵- گیرش اولیه و ثانویه سیمان به کمک آب دریا و آب شرب مصرفی بر حسب دقیقه

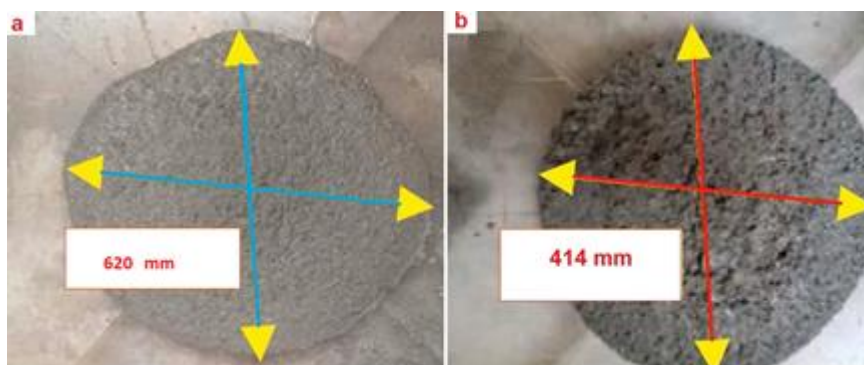
۳- بحث

۴۵۰، ۴۰۰ و ۳۵۰ کیلوگرم استفاده شد و به جای آنها از خاکستر بادی استفاده شد و در آنها مطابق شکل ۶، به ترتیب ۹، ۸ و ۷ لیتر فوق روان کننده F استفاده شد. سایر تغییرات در گروه های دیگر در شکل ۶ مشخص است.

در راستای بررسی و ارزیابی شاخص های مقاومتی چهار گروه از مصالح همراه با فوق روان کننده مطابق شکل زیر استفاده گردید. و آزمایش ها همزمان در بعضی موارد با آب دریا و آب قابل شرب انجام گردید. مواد چسباننده با سیمان در همه گروه ها ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. در گروه اول به جای ۵۰۰ کیلو سیمان به ترتیب

گروه	درصد جانشینی مواد	وزن مواد سیمانی	خاکستر بادی	پودر آهک	فوم سیلیسی	فوق روان کننده F
۱	10	450	50	---	---	9.0
	20	400	100	---	---	8.0
	30	350	150	---	---	7.0
۲	10	450	---	50	---	9.0
	20	400	---	100	---	8.0
	30	350	---	150	---	7.0
۳	10	450	25	---	25	9.0
	20	400	50	---	50	8.0
	30	350	50	---	100	7.0
۴	8	460	---	---	40	9.2
	10	450	---	---	50	9.0
	12	440	---	---	60	8.8

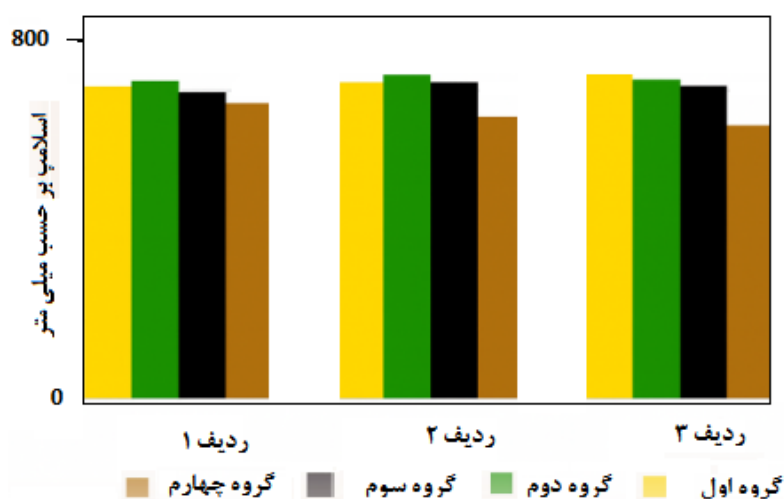
شکل ۶- گروه های مختلف طراحی شده بتن SCC



شکل ۷- مقایسه اسلامپ جریانی. a- اسلامپ جریانی نمونه ساخته شده با آب معمولی از گروه ۴، ردیف ۳

نتایج آزمایش های اسلامپ جریانی ۱۲ نمونه که در چهار گروه آماده شده اند در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان اسلامپ اندازه گیری شده در گروه های مختلف از ۶۲۰ میلی متر تا حدود ۷۵۰ میلی متر اندازه گیری شده است (شکل ۸).

در این بررسی آزمایشگاهی کلیه نمونه با آب معمولی ساخته شد و در دوره نگه داری آنها در دو گروه آب معمولی و آب دریا جهت ارزیابی نگه داری شدند. آماده سازی نمونه ها مطابق استاندارد BS.12390-3 انجام گردید [۱۴]. نتایج آزمایشگاهی این چهار گروه که در سه ردیف آماده شده به صورت زیر بدست آمده است:



شکل ۸- اسلامپ جریانی نمونه های بتن تازه

همزمان مقاومت نمونه های آماده شده ۲۸ روزه در آب دریا بررسی گردیده کلیه نمونه ها در حدود سه تا ده درصد مقاومت فشاری بالاتری داشتند (شکل ۹).

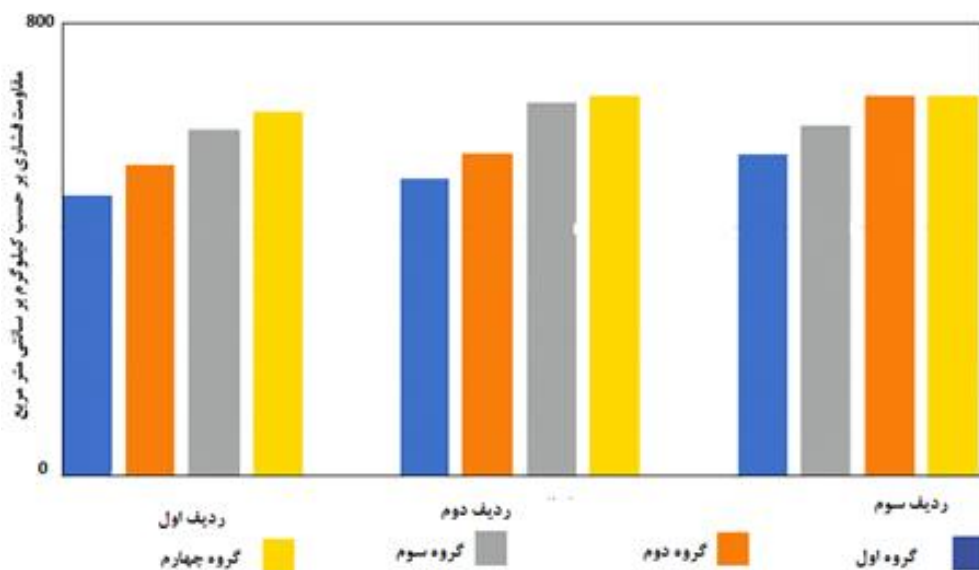
نمونه های آماده شده در دو محفظه آبی (آب معمولی و آب دریا) نگه داری شدند و مقاومت فشاری گروه های مختلف در روزهای ۷ و ۲۸ اندازه گیری (شکل ۹)، نمونه های عمل آوری شده در آب آشامیدنی (گردید).

گروه	ردیف	درصد جانشینی به جای سیمان	مقاومت فشاری ۷ روزه کیلوگرم بر سانتیمتر مربع	مقاومت فشاری ۲۸ روزه کیلوگرم بر سانتیمتر مربع	مقاومت فشاری ۲۸ روزه - بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع
۱	۱	۱۰	۴۱۰	۵۴۰	۵۶۳
۱	۲	۲۰	۳۸۰	۵۰۰	۵۲۰
۱	۳	۳۰	۳۷۰	۴۷۰	۵۰۱
۲	۱	۱۰	۴۲۰	۴۹۰	۵۲۲
۲	۲	۲۰	۳۹۰	۴۶۰	۴۷۳
۲	۳	۳۰	۳۴۰	۴۲۰	۴۴۸
۳	۱	۱۰	۴۵۰	۵۸۰	۵۰۰
۳	۲	۲۰	۴۹۰	۶۷۰	۶۹۴
۳	۳	۳۰	۴۱۰	۶۳۰	۶۵۷
۴	۱	۸	۴۷۰	۶۰۰	۶۲۲
۴	۲	۱۰	۴۹۰	۶۷۰	۷۰۴
۴	۳	۱۲	۵۱۰	۶۹۰	۷۴۰

فرآوری در آب آشامیدنی

فرآوری در آب دریا

شکل ۹- مقاومت بتن در گروه های طراحی شده



شکل ۱۰- مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های مختلف در چهار گروه طراحی شده و فرآوری شده در آب شرب

بررسی این تحقیق نشان می دهد که مقاومت فشاری SCC که با آب آشامیدنی اختلاط و عمل آوری شده است، نسبت به مقاومت بتن ساخته شده با آب معمولی عمل آوری و کیور شده در آب دریا کمتر است. حداکثر مقاومت فشاری نمونه های بیست و هشت روز بتن مربوط به گروه ۴ است که فقط از فوم سیلیسی به جای سیمان استفاده شده و حاوی حدود ۹ لیتر فوق روان کننده نوع بوده است) (شکل ۱۰).

بتن ساخته شده با آب معمولی و عمل آوری در آب دریا، الگوهای جریان گرمایی متفاوتی نشان می دهند [۱۵]. در هنگام هیدراسیون سیمان با آب دریا، گرمای واکنش در مرحله ای که بتن در حال هیدراسیون شدید است، تغییرات قابل توجهی دارد. بر اساس مطالعات موجود، پیشنهاد شده است که آب دریا با فراهم کردن مقادیر زیاد کلریدها، سینتیک هیدراسیون سیمان را شتاب می بخشد می بخشد. اوج جریان گرمایی در خمیر سیمان مخلوط شده با آب دریا حدوداً ۲۵٪ بیشتر از خمیر سیمان مخلوط شده با آب شیرین برآورد شد (شکل ۲). همچنین اوج جریان گرما در خمیر سیمان با آب دریا بزرگتر و زودتر از اوج خمیر با آب شیرین رخ داد. محققین مختلف نشان دادند که دادند جایگزینی آب مقطر با آب دریا نرخ هیدراسیون را افزایش می دهد و اوج جریان گرما حدود ۱۰۰ دقیقه زودتر رخ می دهد [۱۶].

دلیل عمده هیدراسیون زودتر سیمان در حضور آب دریا، وجود یون های کلرید (NaCl ، MgCl_2 و CaCl_2) است که تولید ژل C-S-H را سریع تر می کنند. گو و همکاران (۲۰۲۰) نیز مقادیر بالاتر جریان گرما را در بتن مرکب آب دریا و ماسه دریا نسبت به بتن معمولی گزارش کردند. تحقیقات مختلف تا کنون نشان داده که خمیر سیمان حاوی آب دریا اوج جریان گرما را بین ۱ تا ۱۰ ساعت افزایش می دهد و در ۷۲ ساعت در مجموع ۱۰۱۲ برابر گرمای بیشتری نسبت به خمیر با آب دیونیزه تولید کرد. ذکر شده است که آب دریا بیش از یک محلول NaCl هم غلظت، هیدراسیون را تشدید می کند؛ بنابراین NaCl تنها عامل شتاب دهنده نیست و اجزای متنوع آب دریا نقش دارند دلایل پیشنهادی برای افزایش نرخ هیدراسیون سیمان در حضور کلریدهای آب دریا عبارتند از: نفوذ یون های کلرید به محصولات هیدراسیون اولیه: یون های کلرید به دلیل اندازه کوچکتر نسبت به یون هیدروکسید می توانند وارد لایه پاسیو اولیه شده و آن را تضعیف یا تخریب کنند؛ این امر حل شدگی محصولات هیدراسیون (مثلاً C3S) را افزایش داده و هیدراسیون را تسریع می کند [۱۷]. فلوکولاسیون ذرات سیمان: ذرات سیمان دارای بارهای مثبت و منفی هستند و در تماس با آب دچار فلوکولاسیون می شوند. کلریدها به عنوان آنیون ها روی سطح ذرات جذب شده و موجب منفی شدن سطوح و در نتیجه دِفِلوکولاسیون و پراکندگی ذرات می گردند؛ این پراکندگی بیشتر، واکنش پذیری سیمان را افزایش می دهد. تشکیل CaCl_2 از

واکنش NaCl با Ca(OH)_2 می تواند با Ca(OH)_2 واکنش داده و CaCl_2 تولید کند که در دوره ابتدایی هیدراسیون نقش کاتالیستی دارد و هیدراسیون C3S و C2S را تسریع می کند؛ این فرایند ممکن است منجر به تشکیل ژل C-S-H با ساختار متخلخل تر شود که تبادل یونی سریع تر و هیدراسیون سریع تر را تسهیل کند [۱۸].

استفاده از پودر سنگ آهک در بتن خودتراکم (SCC) یک ماده نوآورانه در صنعت ساخت و ساز است که از روانی و پایداری بالایی برخوردار بوده و بدون نیاز به ویبره، تحت وزن خود جریان یافته و قالب را به طور کامل پر می کند. برای دستیابی به این ویژگی ها، SCC به مقدار زیادی پودر (عمدتاً سیمان) تا حدود ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب نیاز دارد. افزایش ماده متصل کننده (سیمان، پودر آهک) مشکل ساز باشد، زیرا افزایش مقدار سیمان نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، بلکه ممکن است مشکلات فنی مانند افزایش گرمای هیدراسیون و جمع شدگی خشک شدگی بیشتر را نیز به همراه داشته باشد. [۱۹]. در این پژوهش به بررسی تأثیر پودر سنگ آهک (LSP) بر خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم پرداخته شده است. به ویژه از منظر استفاده از LSP به عنوان جایگزین جزئی سیمان. برای مقایسه، یک نمونه کنترل بدون LSP تهیه شد و با نمونه هایی که دارای درصدهای مختلفی از LSP به عنوان جایگزین بخشی از سیمان بودند، مقایسه گردید. چهار طرح اختلاط با مقادیر نسبتاً ثابت فوق روان کننده، ماسه، سنگ دانه درشت و آب، و با درصدهای جایگزینی ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ از وزن سیمان تهیه شدند. نتایج آزمایش ها نشان داد که پودر سنگ آهک می تواند به طور مؤثر به عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن خودتراکم مورد استفاده قرار گیرد،

نتایج آزمایش مقاومت فشاری مکعبی بتن خودتراکم (SCC) در شکل ۱۰ و نمودار شکل ۵ ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، با افزایش مقدار پودر سنگ آهک (LSP)، مقاومت بتن نیز افزایش می یابد؛ به ویژه مقاومت اولیه می تواند بیش از ۲۰٪ افزایش یابد. این امر احتمالاً به دلیل آن است که ذرات ریز پودر سنگ آهک موجب تسریع در فرآیند هیدراسیون شده و در نتیجه، توسعه مقاومت اولیه را بهبود می بخشد. در شکل ۱۰ نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری بتن در طول زمان هستند. از نمودار مشخص است که نمونه های حاوی LSP مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه مرجع (بدون LSP) دارند. در سن ۷ روزه، مقاومت فشاری بین ۵ تا ۲۰٪ افزایش یافته است و در سن ۲۸ روزه، افزایش مقاومت بین ۳ تا ۱۱٪ بوده است. در جایگزینی ۱۰٪ سیمان با LSP، مقاومت فشاری در ۷ روز حدود ۵٪، و در ۲۸ روز در حدود ۳٪ افزایش یافته است. در جایگزینی ۲۰٪، این افزایش به ترتیب ۵٪، ۸٪ بوده است. بیشترین افزایش مقاومت فشاری در سن

۲۸ روزه، معادل ۱۰٪، در جایگزینی ۳۰٪ مشاهده شده است (اشکال ۹ و ۱۰).

در این تحقیق بررسی تأثیر نوع فوق‌روان‌کننده F که شامل پلیمرهای ترکیبی سنتزی (CSP)، اتر پلی‌کربوکسیلات (PCE) بر کارایی و خواص مکانیکی مخلوط‌های بتن خودتراکم حاوی فوم سیلیسی، آهک و یا بدون آهک بررسی شده است. این فوق‌روان‌کننده و کاهنده آب بسیار مؤثری است که نرخ سخت شدن بتن، مقاومت اولیه و نهایی این ماده مطابق با ASTM C494 Type F به طور قابل توجهی افزایش داده است [۲۰]. سیمان مورد استفاده در رده مقاومتی ۴۲۵-۱ کیلوگرم بر سانتی متر مربع بوده و اغلب نمونه های ۲۸ روزه مقاومتی بالای ۵۰ مگاپاسکال داشته اند (شکل ۵). در این راستا باید اشاره نمود، فوق‌روان‌کننده‌های پایه پلی‌کربوکسیلات (PCE) مستقیماً کلریدها را خنثی نمی‌کنند و یون کلرید واکنش شیمیایی ندارند. اما می‌توانند اثر منفی کلریدها بر بتن و فولاد را به‌صورت غیرمستقیم با کاهش نفوذ پذیری بتن، کاهش تخلخل (کم شدن نسبت آب به سیمان) و ایجاد بتن متراکم با دانسیته بالاتر، کاهش می‌دهند (شکل ۹). با کاهش مسیرهای تخلخل حفرات کمتر شده و سرعت پخش و انتقال کلریدها به میلگردها کمتر می‌شود [۲۱].

همچنین اثر کلریدها بر رفتار تازه بتن خودتراکم به دلیل حساسیت بالا به تغییرات رئولوژی، بیشتر تحت تأثیر املاح قرار می‌گیرد. کلریدهای سدیم و منیزیم می‌توانند افزایش روانی اولیه ایجاد کنند، زیرا یون‌های کلرید تا حدی خاصیت روان‌کننده‌مانند دارند اما همزمان می‌توانند باعث کاهش اسلامپ جریانی شوند (شکل ۳) زیرا، سرعت هیدراتاسیون اولیه را بالا می‌برند و زمان گیرش کوتاه‌تر می‌شود و به علت چسبیدن ذرات حالت روانی کم می‌شود. کلریدها بر فوق‌روان‌کننده نیز اثر دارند و برخی فوق‌روان‌کننده های پلی‌کربوکسیلاتی در حضور کلریدها کارایی و توان خود را از دست می‌دهند و احتمال جدایش ذرات وجود دارد. البته به نوع سیمان و مواد افزودنی دیگر ارتباط فراوانی نیز وجود دارد. کلریدها با کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه سیمان می‌شوند (شکل ۲) و باعث کاهش کارپذیری می‌گردد. کلریدها بر خواص سخت‌شده بتن خودتراکم نیز مؤثر هستند. این یون‌ها باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون و مقاومت اولیه می‌شوند و کلیرید کلسیم سرعت تشکیل C-S-H را افزایش می‌دهند و می‌تواند منجر به افزایش مقاومت اولیه شود اما می‌تواند مقاومت نهایی را با تشکیل فازهای ناسازگار همراه یون منیزیم و سولفات در آب دریا شود و پتانسیل ترک زایی را زیاد کند و رشد ساختارهای دیررس سیمان را مختل کند و در زمان طولانی مقاومت نهایی بتن را کم کند در این راستا خوردگی میلگردها افزایش می‌یابد. در این بتن‌ها اگر کلرید زیاد باشد تراکم بتن مانع خوردگی نمی‌شود و در ادامه باعث ترک

خوردت بتن و کاهش دوام سازه می‌شود و مقاومت بتن در برابر حملات شیمیایی کم می‌شود. آب دریا چون حاوی یون‌های کلرید، سولفات، منیزیم و ... است، موجب تخریب چسبندگی سیمان و تشکیل اترینگایت و ... می‌شود و در دراز مدت منجر به افزایش ترک‌های ریز و کاهش دوام نهایی بتن و سازه می‌گردد [۲۲].

فوم سیلیسی در بتن SCC تحت عمل‌آوری در آب دریا باعث افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود. زیرا فوم سیلیسی بسیار ریز است (۰/۱ تا ۱/۱ اندازه سیمان) و باعث پرشدن حفرات خمیر سیمان می‌شود. با آهک آزاد $(Ca(OH)_2)$ واکنش پوزولانی داده و ژل C-S-H اضافی تولید می‌کند (شکل ۵). این ژل چسبندگی و مقاومت فشاری و خمشی بتن را افزایش می‌دهد. فوم سیلیس در آب دریا باعث بهبودی و دوام می‌شود. آب دریا حاوی یون‌های کلرید و سولفات است که دشمن بتن‌اند. فوم سیلیسی، نفوذپذیری را کاهش می‌دهد و از ورود یون‌های کلرید و سولفات کاهش می‌یابد. و میزان تشکیل هیدروکسید کلسیم محلول را کم می‌کند و شستشوی قلیایی کاهش می‌یابد. در این گروه از بتن‌ها وجود پودر بسیار ریز باعث افزایش ویسکوزیته و جلوگیری از جداسازی می‌شود.

پودر کربنات کلسیم (پودر سنگ آهک) منجر افزایش چگالی بتن می‌شود. ذرات نسبتاً ریز پودر آهک فضای خالی بین دانه‌ها را پر کرده و باعث روانی و ملایمت جریان بتن خودتراکم می‌شود. کشش تسلیم کاهش می‌یابد و بتن راحت‌تر جریان پیدا می‌کند. پودر آهک عمدتاً پوزولانی نیست، اما به عنوان پرکننده، تراکم خمیر را افزایش می‌دهد و جداسازی و آب‌اندازی را کاهش می‌دهد و شروع هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کند (اثر هسته‌زایی). این مواد با آب دریا سازگار هستند و پودر آهک نسبت به فوم سیلیسی حساسیت کمتری به محیط خورنده دارد. حضور $CaCO_3$ می‌تواند باعث تشکیل محصولات پایدارتر مانند: کربنات‌های کلسیم کریستالی (کلسیت، آراگونیت). این مواد تا حدودی منافذ سطحی را پر کرده و نفوذپذیری کلرید را کاهش می‌دهند [۲۳].

استفاده همزمان فوم سیلیس و پودر آهک در بتن خودتراکم باعث بهبود رئولوژی و افزایش مقاومت بتن می‌شود. فوم سیلیسی مقاومت و دوام را بالا می‌برد (شکل ۱۰). و نفوذ کلریدها را کاهش می‌دهد و در برابر افزایش پودر آب اختلاط کاهش می‌یابد. استفاده همزمان آنها باعث تشکیل رسوبات کربناتی محافظ می‌شود و می‌شود SCC هم روانی مطلوب داشته باشد، هم دوام و مقاومت بالا، به‌ویژه در شرایط شدید آب دریا می‌شود [۲۴].

نمونه‌های بتنی که در آب دریا عمل‌آوری می‌شوند، گاهی مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در آب آشامیدنی نشان می‌دهند (اشکال ۹ و ۱۰). این پدیده در نگاه اول

متناقض است، اما دلایل علمی شناخته شده‌ای دارد. مهم‌ترین عوامل عبارت‌اند از: ۱. وجود یون‌های کلسیم و منیزیم در آب دریا. آب دریا حاوی Ca^{2+} و Mg^{2+} است که می‌توانند در فرآیند هیدراتاسیون سیمان مشارکت کنند. تشکیل محصولات هیدراتاسیون اضافی مانند کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) را تسریع می‌کنند. باعث تراکم ریزساختار بتن می‌شوند و در نتیجه مقاومت اولیه را افزایش می‌دهند. نمک‌های محلول موجب تسریع اولیه هیدراتاسیون می‌شوند. آب دریا مقدار زیادی NaCl و KCl دارد. کلریدها در ابتدای واکنش، هیدراتاسیون برخی فازهای سیمان (به‌ویژه C_3S) را تسریع می‌کنند. این تسریع باعث، کسب سریع‌تر مقاومت و افزایش نسبی مقاومت در سنین اولیه می‌شود. تشکیل نمک‌های ثانویه و انسداد خلل و فرج یون‌های موجود در آب دریا می‌تواند باعث تشکیل کلروآلومینات‌ها، کربنات‌های کلسیم، محصولات منیزیمی می‌شوند و این ترکیبات درون منافذ بتن تشکیل شده و آن‌ها را تا حدی مسدود می‌کنند، که باعث افزایش دانسیته و افزایش مقاومت کوتاه‌مدت می‌شود. اما افزایش مقاومت «کوتاه‌مدت» است، نه دوام هرچند مقاومت ممکن است افزایش یابد، اما: یون‌های کلریدی، سولفات‌ها، منیزیم در درازمدت باعث خوردگی میلگرد و تخریب خمیر سیمان می‌شوند. اما این به معنای دوام بهتر نیست و در بلندمدت آب دریا مخرب‌تر است.

ورود کلراید به بتن مسئله‌ای جداگانه از رئولوژی است، حتی اگر رئولوژی را بتوان تنظیم کرد، وجود یون کلراید طولانی‌مدت خطر خوردگی میلگرد را بالا می‌برد؛ در پروژه‌های مسلح یا سازه‌های در معرض نمک باید محدودیت‌های محتوی کلراید رعایت شود یا از شتاب‌دهنده‌های غیرکلریدی استفاده شود.

کاهش نفوذ یون کلرید و خوردگی آرماتور: محیط دریایی سرشار از یون کلرید است؛ این یون‌ها از طریق منافذ و ترک‌های سطحی وارد بتن می‌شوند. SCC معمولاً تخلخل کمتری دارد و نفوذپذیری‌اش پایین‌تر است، بنابراین نرخ ورود کلرید در آن کم‌تر از بتن معمولی است. با این حال اگر طرح اختلاط نامناسب باشد یا آب به سیمان بالا باشد، نفوذ کلرید سرعت گرفته و خوردگی آغاز می‌شود. حملات سولفاتی: در ناحیه پاشش امواج و قسمت‌های زیر آب به‌ویژه در خاک‌های سولفاته، امکان حملات سولفاتی وجود دارد. SCC به دلیل نسبت پایین آب به سیمان و استفاده از مواد پوزولانی (مانند میکروسیلیس، سرباره، خاکستر بادی) معمولاً مقاومت سولفاتی بالاتری دارد. چرخه‌های تر و خشک شدن (Wet-Dry Cycles) سازه‌های ساحلی به صورت متناوب خیس و خشک می‌شوند. این چرخه‌ها باعث: افزایش نفوذ کلرید، تسریع کربناته شدن، ترک‌های سطحی ناشی از جمع‌شدگی می‌شوند. SCC به دلیل ریزساختار متراکم کمتر دچار نفوذپذیری بالا می‌شود، اما حساسیت به جمع‌شدگی خمیری (در صورت عمل‌آوری

نامناسب) می‌تواند مشکل‌ساز شود. کربناته شدن CO_2 موجود در هوا و آب دریا باعث کاهش pH بتن می‌شود. در SCC به دلیل چگالی بالاتر و نفوذ پایین‌تر، سرعت کربناته شدن معمولاً کم‌تر است. حملات فیزیکی (فرسایش، سایش، آب‌شستگی) امواج، شن و ماسه معلق، جزر و مد، و آب جریان‌دار می‌توانند سطح بتن را فرسوده کنند. SCC اگر مقاومت فشاری بالا و سنگدانه‌های مناسب داشته باشد، مقاومت سایشی خوبی از خود نشان می‌دهد. واکنش قلیایی-سیلیسی (ASR): وجود رطوبت زیاد در محیط‌های دریایی می‌تواند ریسک ASR را افزایش دهد. استفاده از مصالح مناسب و افزودنی‌های پوزولانی در SCC معمولاً این خطر را به مقدار زیادی کاهش می‌دهد. به‌طور کلی، بتن خودتراکم در مقایسه با بتن معمولی در محیط‌های دریایی دوام بلندمدت بهتری دارد زیرا: نفوذپذیری کمتر، تراکم بهتر، استفاده بیشتر از مواد پوزولانی، اما دو عامل بسیار مهم برای حفظ این دوام عبارت‌اند از: طرح اختلاط صحیح و عمل‌آوری مناسب (به‌ویژه جلوگیری از جمع‌شدگی خمیری) [۲۵].

افزایش نرخ هیدراتاسیون و کاهش زمان گیرش که معمولاً در اثر حضور کلریدها رخ می‌دهد، می‌تواند به‌طور مستقیم بر رئولوژی و کارایی بتن خودتراکم (SCC) تأثیر بگذارد. کلریدها (به‌ویژه $CaCl_2$) معمولاً نقش شتاب‌دهنده هیدراتاسیون را ایفا می‌کنند. این اثرات از نظر رئولوژیک و کارایی عبارت‌اند از: ۱. کاهش کارایی (Workability Loss)، شتاب‌گیری واکنش هیدراتاسیون باعث افزایش سریع‌تر: ویسکوزیته پلاستیک، تنش تسلیم می‌شود. این امر موجب کاهش روانی، کاهش مدت زمان حفظ کارایی و سخت شدن زودتر مخلوط در SCC که روانی بالا و پایداری یکنواخت ضروری است، این اثر می‌تواند بسیار مشکل‌ساز باشد. ۲- تغییر در رئولوژی افزایش سرعت تشکیل محصولات هیدراتاسیون (خصوصاً C-S-H اولیه): ساختار فلوکوله شده‌تری ایجاد می‌کند حرکت ذرات را محدود می‌کند و باعث افزایش تنش تسلیم و ویسکوزیته پلاستیک می‌شود و بنابراین بتن SCC تمایل بیشتری به کاهش قابلیت پرکنندگی و عبورپذیری پیدا می‌کند. ۳. افزایش پتانسیل انسداد (Blocking) در SCC، عبور از میان میلگردها بسیار مهم است. افزایش تنش تسلیم ناشی از شتاب‌گرها می‌تواند: احتمال گیرکردن بتن در شبکه آرماتور کاهش پایداری در برابر جداشدگی را بالا ببرد. ۴. کاهش زمان گیرش کاهش زمان ویسکوزیته پایدار به‌طور معمول SCC باید تا مدت مشخصی روان باقی بماند. کلریدها زمان گیرش را کاهش داده، بنابراین: زمان قابل بتن‌ریزی کوتاه‌تر می‌شود و مخلوط سریع‌تر سفت شده و رفتار شبه‌پلاستیک قوی‌تر پیدا می‌کند. بنابراین کلریدها از طریق افزایش نرخ هیدراتاسیون و کاهش زمان گیرش می‌توانند کارایی SCC را کاهش دهند و تنش تسلیم و ویسکوزیته را افزایش دهند و پایداری و روانی لازم برای

SCC را مختل کنند و زمان کارپذیری را محدود کنند و در نتیجه، در بتن خودتراکم به خصوص در بتن مسلح معمولاً از شتاب‌دهنده‌های کلریدی استفاده نمی‌شود یا به شدت محدود است [۱۶، ۱۹ و ۲۲].

در بتن‌های خودتراکم (SCC)، انتخاب سیمان اهمیت بسیار زیادی دارد و نمی‌توان از هر نوع سیمان بدون بررسی استفاده کرد. ۱. محدودیت‌های نوع سیمان: سیمان پرتلند تیپ I و II: رایج‌ترین گزینه برای SCC هستند و معمولاً با فوق‌روان‌کننده‌های پلی‌کربوکسیلاتی سازگارند. سیمان تیپ III (سریع‌گیر): معمولاً برای SCC با گیرش سریع و مقاومت اولیه بالا مناسب است، ولی باید مراقب زمان گیرش و کارپذیری باشید. سیمان تیپ V (مقاوم در برابر سولفات): می‌توان استفاده کرد، ولی گیرش کند و واکنش ضعیف C_3A باعث می‌شود نیاز به دوز بالاتر PCE و کنترل دقیق زمان گیرش باشد. سیمان با آهک بالا یا مخصوص (High-Alumina Cement): معمولاً برای SCC مناسب نیست، چون واکنش‌های شیمیایی می‌توانند با فوق‌روان‌کننده‌ها تداخل کنند و کارپذیری را کاهش دهند. ۲. عوامل مؤثر بر استفاده در SCC: ترکیب با افزودنی‌ها: میکروسیلیس، خاکستر بادی، پوزولان‌ها و سنگدانه‌های ریز می‌توانند جذب فوق‌روان‌کننده را افزایش دهند و نیاز به تنظیم دوز دارند. کارپذیری و ویسکوزیته: SCC نیازمند روانی زیاد بدون جداسازی است؛ سیمان‌هایی که آب زیادی جذب می‌کنند یا زودگیر هستند، ممکن است نیاز به اصلاح نسبت آب به سیمان یا استفاده از روان‌کننده‌های خاص داشته باشند. مقاومت و دوام: سیمان‌های مقاوم در برابر سولفات یا با C_3A پایین ممکن است رفتار متفاوتی در زمان گیرش و مقاومت اولیه داشته باشند. تقریباً همه سیمان‌های پرتلند معمولی (I و II) مناسب SCC هستند. تیپ‌های خاص مانند III و V نیاز به تنظیم دوز فوق‌روان‌کننده و کنترل گیرش دارند [۲۶].

۴- نتیجه گیری

این پژوهش نشان داد که بتن خودتراکم حاوی فوق‌روان‌کننده‌های کربوکسیلاتی، فوم سیلیسی و پودر کربنات کلسیم در شرایط اختلاط و عمل‌آوری با آب دریا رفتار مقاومتی بهتری نسبت به نمونه‌های مشابه عمل‌آوری شده در آب آشامیدنی از خود بروز می‌دهد. افزایش نرخ هیدراسیون در حضور یون‌های کلرید آب دریا منجر به تسریع تشکیل ژل C-S-H و افزایش مقاومت اولیه شد و استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های پایه پلی‌کربوکسیلات کارایی مخلوط را حفظ و اثرات نامطلوب کلریدها را تا حدی خنثی نمود. همچنین فوم سیلیسی با پر کردن خلل و فرج و واکنش پوزولانی، و پودر سنگ آهک با پرکردن فضای بین ذرات، چگالی و تراکم ریزساختار را افزایش داده و بهبود مقاومت فشاری را تسهیل کردند.

با این حال، نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقاومت اولیه در محیط دریایی با خطرات بلندمدت همراه است؛ حضور یون‌های منیزیم و سولفات و نفوذ کلرید می‌تواند در درازمدت منجر به تشکیل فازهای ناسازگار، تضعیف چسبندگی و افزایش پتانسیل ترک‌زایی و خوردگی میلگردها شود. بنابراین، هرچند مخلوط‌های بهینه‌شده SCC می‌توانند عملکرد مکانیکی و کارایی اجرایی را در شرایط ساحلی بهبود بخشند، تضمین دوام بلندمدت نیازمند کنترل نفوذپذیری، کاهش مسیرهای تخلخل و اقدامات محافظتی برای میلگردها است.

نتایج آزمایش نشان داد که استفاده از پودر سنگ آهک (LSP) به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان در بتن خودتراکم (SCC) مؤثر است. افزودن تا ۳۰٪ LSP بر حسب وزن سیمان، هزینه‌ها را کاهش داده و عملکرد SCC را در حالت تازه و سخت‌شده بهبود می‌بخشد. پودر سنگ آهک تا ۲۰٪ از سیمان می‌تواند با پودر سنگ آهک جایگزین شود تا خودسازگاری افزایش یابد و طبقه‌بندی‌های SCC تحت تأثیر قرار نگیرند. مقاومت فشاری در مراحل اولیه و نهایی برای مخلوط‌هایی که از فوق‌روان‌کننده‌های مبتنی بر پلی‌کربوکسیلات و فوم سیلیسی استفاده شده بود، موثرتر از سایر مخلوط‌ها در افزایش مقاومت فشاری بتن بود.

با توجه به اینکه حدود ۷۱٪ از سطح زمین را آب پوشانده و ۹۶.۵٪ از آن آب دریاست، استفاده از آب دریا به‌عنوان جایگزین آب شیرین در اختلاط بتن می‌تواند به حفظ منابع آب شیرین کمک کند. عملکرد بتن ساده با آب دریا مطابق آیین نامه‌ها این است که بتن سازه‌ای نباید با آب دریا تهیه شود؛ با این وجود، شواهد آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهد که برای بتن ساده (بدون آرما تور) اثرات نامطلوب قابل‌توجهی در کوتاه مدت رخ نمی‌دهد و باعث تغییر گیرش و مقاومت نهایی ۲۸ روزه بتن می‌گردد.

در این پژوهش نشان داده شد که کارپذیری بتن خودتراکم (SCC) در حالت تازه، چه با آب شیرین و چه با آب دریا، در محدوده‌های قابل قبول برای SCC قرار دارد. مقاومت فشاری مهم‌ترین خاصیت مکانیکی برای تعیین کیفیت بتن در مقایسه با خواص دیگر به‌شمار می‌آید. تعیین مقاومت فشاری براساس نسبت‌های سازنده‌ها شامل سیمان، سنگدانه‌های درشت و ریز، آب و مخلوط‌های مختلف انجام می‌گیرد. نسبت آب به سیمان عامل اصلی تعیین‌کننده مقاومت بتن است؛ هرچه این نسبت کمتر باشد، مقاومت فشاری بیشتر خواهد بود. با این حال، آب بیش از حد، کارایی یا سهولت اجرای بتن را افزایش می‌دهد اما مقاومت را کاهش می‌دهد. اما در این مطالعه میزان آب در طراحی در کلیه آزمایش‌های ثابت در نظر گرفته شده است.

۵- تشکر و قدردانی:

No. 1, p.24744. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75613-9>

8- Sun, C., Chen, Z., Chen, J., Zheng, Y., Sun, W., He, H., Wu, Z. and Wei, Z., (2025), Effect of seawater and sustained load on the long-term bond durability performance of GFRP bars embedded in high-volume fly ash self-compacting concrete prepared with seawater and sea sand, *Construction and Building Materials*, Vol. 491, p.142809. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142809>

9- Sahu, S., (2021), Technological forecasting for commercializing novel low-carbon cement, in *Intelligent and Sustainable Cement Production: Transforming to Industry 4.0 Standards*, p.405.

10- Mukhtar, A., Qazi, A.U., Khan, Q.S., Munir, M.J., Kazmi, S.M.S. and Hameed, A., (2022), Feasibility of using coal ash for the production of sustainable bricks, *Sustainability*, Vol. 14, No. 11, p.6692. <https://doi.org/10.3390/su14116692>

11- Karlina, A.I., Karlina, Y.I. and Gladkikh, V.A., (2023), Analysis of experience in the use of micro-and nanoadditives from silicon production waste in concrete technologies, *Minerals*, Vol. 13, No. 12, p.1525. <https://doi.org/10.3390/min13121525>

12- Ferron, R.D., Stacey, S., Carris, G. and Rung, M., (2017), Evaluation of ASTM C 494 procedures for polycarboxylate admixtures used in precast concrete elements, *Project Summary*.

13- Bagi, H. and West, R.R., (2015), Microfacies and environmental significance of hypercalcified demosponges of the Upper Jurassic Esfandiar platform (Shotori Mountains, Tabas Block, eastcentral Iran), *Carbonates and Evaporites*, Vol. 30, p.483-493. <https://doi.org/10.1007/s13146-015-0269-y>

14- Pradhan, S.S. and Panda, K.C., (2017), Assessment of fresh and hardened properties of concrete using supplementary cementitious materials, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 9, p.9837-9841. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.277>

15- Adetukasi, A.O., Fadugba, O.G., Adebakin, I.H. and Omokungbe, O., (2021), Strength characteristics of fibre-reinforced concrete containing nano-silica, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 38, p.584-589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.123>

16- Sun, Y., Alqurashi, M. and Mostafa, S.A., (2024), Exploring the impact of seashell powder and nano-silica on ultra-high-performance self-curing concrete: Insights into mechanical strength, durability, and high-

در پایان بر خود لازم می دانیم که از مسولان دانشگاه های قزاقستان و ملی مهارت و دانشجویان گرمی که در فرایند انجام آزمایش ها کمک موثری داشتند، سپاسگزاری نماییم.

۶- منابع

1- Yang, B.X., Xie, T.Y., Yu, Y., Zheng, Y. and Xu, J.J., (2022), Mechanical properties and environmental performance of seawater sea-sand self-compacting concrete, *Advances in Structural Engineering*, Vol. 25, No. 15, p.3114-3136. <https://doi.org/10.1177/13694332221119863>

2- Yahyaei, B., Asadollahfardi, G., Por, E.M., Samadi, S.Y., Valizadeh, T. and Cici, Y.M., (2023), Experimental and statistical study of mechanical and durability properties of self-compacting concrete using seawater for making and curing, *Environmental Engineering and Management Journal*, Vol. 22, No. 11.

3- Gheidan, E., Ab. Kadir, M.A. and Aluko, O.G., (2025), A thorough review of thermal and mechanical properties of fiber-reinforced ordinary Portland cement-SCC and pozzolanic-SCC, *Journal of Structural Fire Engineering*, Vol. 16, No. 2, p.268-290. <https://doi.org/10.1108/JSFE-08-2024-0031>

4- Seelapureddy, J., Bommisetty, J. and Rao, M.S., (2021), Effect of metakaolin and micro silica on strength characteristics of standard grades of self-compacting concrete, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, p.884-890. <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2022.20488.7438>

5- Wang, H., Li, P., An, X., Cheng, W. and Wang, D., (2025), Influence of pre-demolding early-age loading on post-demolding microstructure and compressive strength evolution of self-compacting concrete under different curing regimes: Experiments and multi-scale model, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 22, p.e05141. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05141>

6- Odeyemi, S.V. and Ogunmakinde, O., (2025), Effect of seawater use on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Discover Civil Engineering*, Vol. 2, No. 1, p.45. <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00197-w>

7- Jose, A., Nazeer, M., Kumar, R.S. and Sathyan, D., (2024), Mock-up pragmatic study on the impact performance of self-compacting concrete incorporating sea sand, *Scientific Reports*, Vol. 14,

Engineering, Vol. 24, p.26. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00805-5>

25- Golgota, A., Vrusho, B. and Dhoska, K., (2023), Properties of aggregates in durable concrete working in normal and aggressive marine environmental conditions, *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, Vol. 15, No. 57, p.376-382.

26- RILEM TC 197-SCC, (2010), Specification, production and compliance of SCC, *Materials and Structures*, Vol. 43. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9631-2>

temperature resilience, *Reviews on Advanced Materials Science*, Vol. 63, No. 1, p.20240080. <https://doi.org/10.1515/rams-2024-0080>

17- Younis, A., Ebead, U., Suraneni, P. and Nanni, A., (2018), Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 190, p.276-286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.126>

18- Li, W., Jiang, Z., Lu, M., Long, W., Xing, F. and Liu, J., (2021), Effects of seawater, NaCl, and Na₂SO₄ solution mixing on hydration process of cement paste, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 33, No. 5, p.04021057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003673](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003673)

19- Sánchez-Herrero, M.J., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., (2017), C₃S and C₂S hydration in the presence of Na₂CO₃ and Na₂SO₄, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 100, No. 7, p.3188-3198. <https://doi.org/10.1111/jace.14855>

20- Lu, Z., Liu, J., Ma, S., Zhang, B., Xu, Z., Xie, J. and He, S., (2025), Durability study of low-alkalinity sulfoaluminate cement seawater-sea sand concrete in a marine environment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 37, No. 4, p.04025051. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTE NG-18938>

21- Yaphary, Y.L., Lam, R.H. and Lau, D., (2020), Reduction in cement content of normal strength concrete with used engine oil (UEO) as chemical admixture, *Construction and Building Materials*, Vol. 261, p.119967. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119967>

22- Zhang, P., Wu, J., Wei, X., Zhang, C. and Gao, Z., (2025), Effects of polycarboxylate superplasticizer on the rheological properties of cement-based composites, *Journal of Civil and Hydraulic Engineering*, Vol. 3, No. 2, p.77-90. <https://doi.org/10.56578/jche030202>

23- Şimşek, O., Aruntaş, H.Y., Demir, İ. et al., (2022), Investigation of the effect of seawater and sulfate on the properties of cementitious composites containing silica fume, *Silicon*, Vol. 14, p.663-675. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01052-0>

24- Chiker, T. and Aggoun, S., (2024), Limestone powder and silica fume performance on slag-blended PLC plain and self-consolidating mortars properties, *Archives of Civil and Mechanical*