J. of Marine Eng. Vol. 21, Iss. 48, 2026. (65-77)

Journal of Marine Engineering

Journal homepage: marine-eng.ir

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

Hoseinali Bagi[1]*, Ali Rahimi[2]

[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/]

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

نشریه مهندسی دریا، جلد ۲۱، شماره ۴۸، ۱۴۰۴، (۷۷-۶۵)

نشریه مهندسی دریا

صفحه اصلی نشریه: marine-eng.ir

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

حسینعلی بگی*[۱]، علی رحیمی[۲]

[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

اطلاعات مقاله

تاریخچه 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

چکیده

این پژوهش با هدف توسعه سازه‌های آبی و بهبود عملکرد گروهی از سازه‌های بتن‌آرمه واقع در نواحی ساحلی انجام شده است. امروزه اهمیت طراحی و ارزیابی دوام بتن‌های خودتراکم به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در این تحقیق، با تمرکز بر استفاده از فوق‌روان‌کننده‌های کربوکسیلاتی، میکروسیلیس و پودر کربنات کلسیم در طراحی بتن‌های خودتراکم (SCC)، پایداری بتن‌هایی که در معرض آب دریا قرار دارند و یا در آب دریا غوطه‌ور هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که غلظت بالای کلریدها در آب دریا باعث افزایش نرخ هیدراتاسیون، کاهش زمان گیرش و افزایش مقاومت اولیه بتن می‌شود. همچنین یافته‌های آزمایشگاهی بیانگر آن است که فوق‌روان‌کننده‌های بر پایه پلی‌کربوکسیلات، اثرات مخرب کلریدها را به‌طور مؤثر خنثی می‌کنند. علاوه بر این، نمونه‌های آزمایشگاهی عمل‌آوری‌شده در آب دریا، مقاومت نسبتاً بالاتری در مقایسه با نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در آب آشامیدنی از خود نشان داده‌اند.

ISSN: 2645-8136

DOI:

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

۱ – مقدمه

توسعه فناوری بتن های خودتراکم در دنیای امروزی بسیار سریع است. پژوهش‌های نوآورانه متعددی تا کنون توسط محققان انجام شده تا با تلاش برای ارتقای کیفیت بتن، دستاوردهای جدیدی به‌وجود آید. محققان پژوهش‌های فراوانی انجام داده‌اند تا به مسائل ناشی از کاربرد مواد در اختلاط بتن پاسخ دهند و محدودیت‌هایی را که اغلب در اجرای کار در محل رخ می‌دهد به ویژه بتن های در معرض آب دریا ، برطرف کنند. مشکلاتی که در دنیای ساخت و ساز مشاهده می‌شوند شامل کمبود نواحی آب آشامیدنی مناسب برای استفاده به‌عنوان آب مخلوط بتن، کارایی (قابلیت جاری شدن) بتن و فرآیندهای اجرای بتن، به‌ویژه در سازه‌های بتنی با آرماتوربندی پیچیده، سازه‌های بتنی بلند و سهل‌انگاری در نگهداری بتن است. [۱].

این گروه از بتن ها در حالت تازه و سخت‌شده دارای مزایای بسیاری است . به دلیل توانایی بالای پرکنندگی، SCC تمام فضاهای قالب را پر کرده و از ایجاد لانه‌زنبوری جلوگیری می‌کند و در نهایت منجر به ساخت سازه‌های بتنی با کیفیت بالا می‌شود [۲]. در بسیاری از پروژه های توسعه SCC معمولاً با استفاده از پسماندهای صنعتی مانند خاکستر بادی یا سرباره، آهک، میکروسیلیس صورت می‌گیرد [۳]. . بتن تازه SCC دارای روانی بالا است که می‌تواند با اندک یا بدون فرایند ویبراسیون فضاهای قلب را پر کند و زمان فرآیند تراکم را کاهش دهد؛ همچنین به دلیل روانی بالا، بتن تازه را می‌توان به‌راحتی از طریق پمپ تا ارتفاع زیاد منتقل کرد، حتی در سازه‌هایی که آرماتوربندی بسیار فشرده‌ای دارند[۴]. همچنین پژوهشی های مختلفی توسط محققان تا کنون ر روی بتن های SCC انجام شده و از آب شیرین و آب دریا به‌عنوان آب اختلاط استفاده شده و بتن‌ها با همان نوع آب نگهداری (کیور) شده اند و کارایی، مقاومت فشاری و ریزساختار SCC را بررسی نموده اند[۵و 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 توبرموریت (C–S–H) در حضور آب دریا است که پیوند ماتریس با سنگدانه را قوی‌تر می‌کند. علاوه بر این، نمک فریدل تشکیل‌شده، فضاهای تخلخل را پر کرده و ریزساختار را متراکم‌تر می‌سازد. 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 جریانی اندازه 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 به‌عنوان آب اختلاط استفاده شده ارزیابی شده و با بتن SCCبدون 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 عمل‌آوری با آب دریا است. این مطالعه به‌صورت کمی مقاومت فشاری نمونه‌های SCC حاوی ترکیبات فوق را با استفاده از آزمون اسلامپ جریانی (T500) بررسی می‌کند و تاثیر جایگزینی جزئی سیمان با پودر سنگ آهک (LSP) بر افزایش مقاومت اولیه و نهایی بتن را می‌سنجد؛ 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 استانداردISIRI 329 استفاده گردید(شکل ۱). خاکستر بادی مورد استفاده مطابق استاندارد ASTM-618-19 با بلین ۳۸۰۰(سانتی متر مربع برگرم) با وزن مخصوص ۳/۰۸بوده[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-494استفاده گردید[۱۱].

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

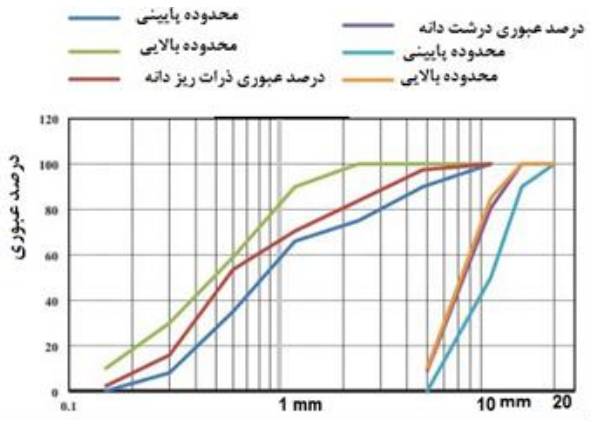
درصد مصالح (آنالیز شیمیایی)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	SO3	CaO	C3S	C2S	C3A	C4AF
خاکستر بادی	47.65	27.73	18.43	2.65	0.34	5.11	-	-	-	-
فوم سیلیسی	94.4	0.3	0.81	0.14	0.87	0.26	-	-	-	-
سیمان پرتلند	16.25	3.42	-	2.38	3.75	67	51.9	31	8.96	7.98

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

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].



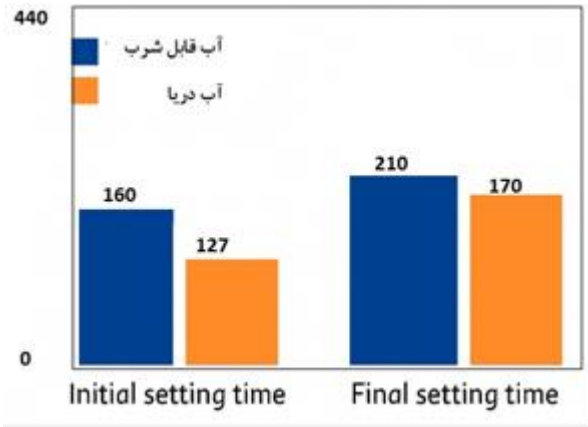
شکل۳: دانه‌بندی مصالح درشت دانه و ریز دانه

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 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−)	$mg \cdot L^{-1}$	18500
سولفات (SO_4^{2-})	$mg \cdot L^{-1}$	2400
شوری کل / TDS	$mg \cdot L^{-1}$	38500
شوری (Salinity)	$g \cdot L^{-1}$	38.5
سدیم (Na+)	$mg \cdot L^{-1}$	11000
منیزیم (Mg2+)	$mg \cdot L^{-1}$	1350
کلسیم (Ca2+)	$mg \cdot L^{-1}$	500
برمید (Br−)	$mg \cdot L^{-1}$	500
بور (B)	$mg \cdot L^{-1}$	4
PH	-	8.05
هدایت الکتریکی	$ms.cm^{-1}$	55

شکل ۴- ترکیب آب دریا(خلیج فارس)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]



شکل۵- گیرش اولیه و ثانویه سیمان به کمک آب دریا و آب شرب مصرفی بر حسب دقیقه

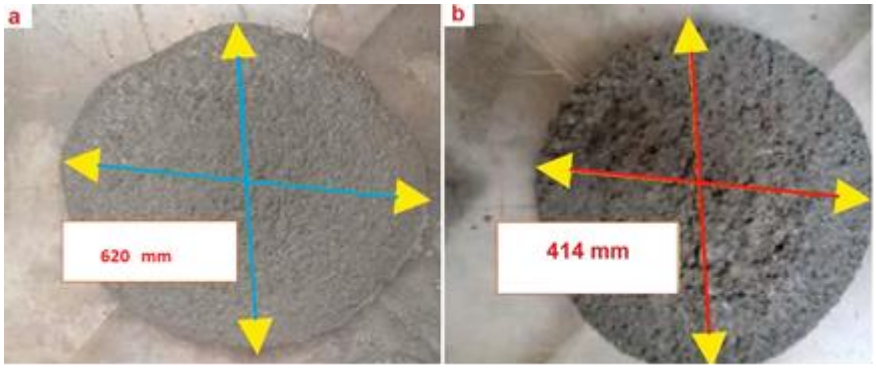
۳- بحث

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 گرو ها ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. در گروه اول به جای ۵۰۰ کیلو سیمان به ترتیب ۴۵۰، ۴۰۰و 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.

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

شکل۶- گروه های مختلف طراحی شده بتن SCC

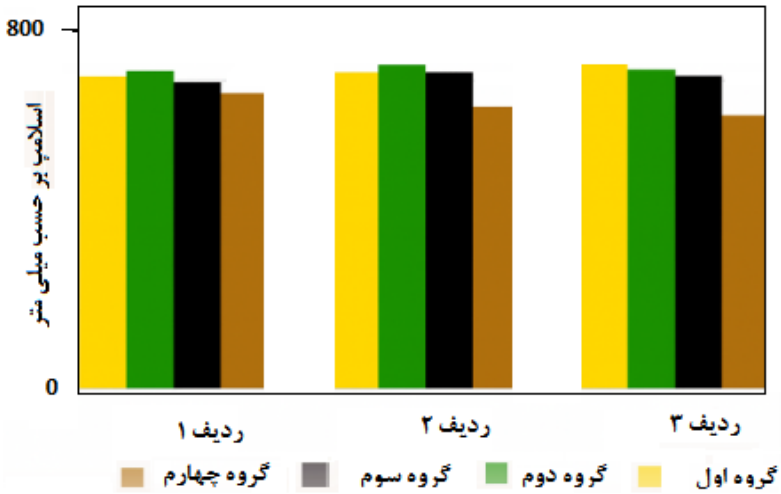
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]



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

دراین 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:

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 ۶۲۰میلی متر تا حدود ۷۵۰ میلی متر اندازه گیری شده است(شکل ۸).



شکل ۸- اسلامپ جریانی نمونه های بتن تازه

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

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).

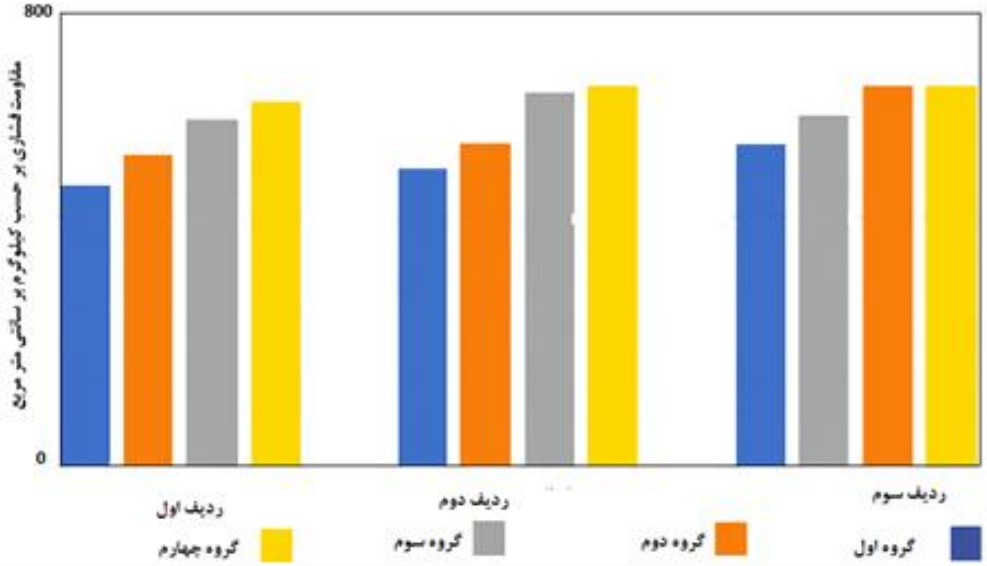
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

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

فرآوری در آب دریا

فرآوری در آب آشامیدنی

شکل ۹- مقاومت بتن در گروه های طراحی شده



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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

بررسی این تحقیق نشان می دهد که مقاومت فشاری SCC که با آب آشامیدنی اختلاط و عمل آوری شده است، نسبت به مقومت بتن ساخته شده با آب معمولی عمل آوری و کیور شده در آب دریا کمتر است . حداکثر مقاومت فشاری نمونه های بیست وهشت 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 ساخته‌شده با آب معمولی و عمل آوری در آب دریا ، الگوهای جریان گرمایی متفاوتی نشان می‌دهند[۱۵]. در هنگام هیدراسیون سیمان با آب دریا، گرمای واکنش در مرحله ای که بتن در حال هیدراسیون شدید است ، تغییرات قابل‌توجهی دارد. بر اساس مطالعات موجود، پیشنهاد شده است که آب دریا با فراهم کردن مقادیر زیاد کلریدها، سینتیک هیدراسیون سیمان را شتاب می‌بخشد می بخشد. اوج جریان گرمایی در خمیر سیمان مخلوط‌شده با آب دریا حدوداً ۲۵٪ بیشتر از خمیر سیمان مخلوط‌شده با آب شیرین برآورد شد(شکل ۲). همچنین اوج جریان گرما در خمیر سیمان با آب دریا بزرگتر و زودتر از اوجِ خمیر با آب شیرین رخ داد. محققین مختلف نشان دادند که دادند جایگزینی آب مقطر با آب دریا نرخ هیدراسیون را افزایش می‌دهد و اوج جریان گرما حدود ۱۰۰ دقیقه زودتر رخ می‌دهد[۱۶]..

دلیل عمدهٔ هیدراسیون زودترِ سیمان در حضور آب دریا، وجود یون‌های کلرید (NaCl، MgCl2 و CaCl2) است که تولید ژل C–S–H را سریع‌تر می‌کنند. گو و همکاران (۲۰۲۰) نیز مقادیر بالاتر جریان گرما را در بتنِ مرکبِ آب دریا و ماسهٔ دریا نسبت به بتن معمولی گزارش کردند. تحقیقات مختلف تا کنون نشان داده که خمیر سیمانِ حاوی آب دریا اوج جریان گرما را بین ۱ تا ۱۰ ساعت افزایش می‌دهد و در ۷۲ ساعت در مجموع ۱.۱۲ برابر گرمای بیشتری نسبت به خمیر با آب دیونیزه تولید کرد. ذکر شده است که آب دریا بیش از یک محلول NaCl هم‌غلظت، هیدراسیون را تشدید می‌کند؛ بنابراین NaCl تنها عامل شتاب‌دهنده نیست و اجزای متنوع آب دریا نقش دارند دلایل پیشنهادی برای افزایش نرخ هیدراسیون سیمان در حضور کلریدهای آب دریا عبارت‌اند از: نفوذ یون‌های کلرید به محصولات هیدراسیون اولیه: یون‌های کلرید به‌دلیل اندازهٔ کوچکتر نسبت به یون هیدروکسید می‌توانند وارد لایه پاسیو اولیه شده و آن را تضعیف یا تخریب کنند؛ این امر حل‌شدگی محصولات هیدراسیون (مثلاً C3S) را افزایش داده و هدراسیون را تسریع می‌کند [۱۷]..فلوکولاسیون ذرات سیمان: ذرات سیمان دارای بارهای مثبت و منفی هستند و در تماس با آب دچار فلوکولاسیون می‌شوند. کلریدها به‌عنوان آنیون‌ها روی سطح ذرات جذب شده و موجب منفی‌شدن سطوح و در نتیجه دِفلوکولاسیون و پراکندگی ذرات می‌گردند؛ این پراکندگی بیشتر، واکنش‌پذیری سیمان را افزایش می‌دهد . تشکیل CaCl2 از واکنش NaCl با Ca(OH)2: NaCl می‌تواند با Ca(OH)2 واکنش داده و CaCl2 تولید کند که در دورهٔ ابتدایی هیدراسیون نقش کاتالیستی دارد و هیدراسیون C3S و C2S را تسریع می‌کند؛ این فرایند ممکن است منجر به تشکیل ژل C–S–H با ساختار متخلخل‌تر شود که تبادل یونی سریع‌تر و هیدراسیون سریع‌تر را تسهیل کند[۱۸].

استفاده از پودر سنگ آهک در بتن خودتراکم (SCC) یک ماده نوآورانه در صنعت ساخت‌وساز است که از روانی و پایداری بالایی برخوردار بوده و بدون نیاز به ویبره، تحت وزن خود جریان یافته و قالب را به‌طور کامل پر می‌کند. برای دستیابی به این ویژگی‌ها، SCC به مقدار زیادی پودر (عمدتاً سیمان) تا حدود ۵۰۰ کیلوگرم در متر مکعب نیاز دارد. افزایش ماده متصل کننده(سیمان، پودر آهک) مشکل‌ساز باشد، زیرا افزایش مقدار سیمان نه‌تنها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست، بلکه ممکن است مشکلات فنی مانند افزایش گرمای هیدراسیون و جمع‌شدگی خشک‌شدگی بیشتر را نیز به همراه داشته باشد. [۱۹].. در این پژوهش به بررسی تأثیر پودر سنگ آهک (LSP) بر خواص تازه و سخت‌شده بتن خودتراکم پرداخته شده است. به ویژه از منظر استفاده از LSP به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان. برای مقایسه، یک نمونه کنترل بدون LSP تهیه شد و با نمونه‌هایی که دارای درصدهای مختلفی از LSP به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان بودند، مقایسه گردید. چهار طرح اختلاط با مقادیر نسبتا ثابت فوق‌روان‌کننده، ماسه، سنگ‌دانه درشت و آب، و با درصدهای جایگزینی ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ از وزن سیمان تهیه شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که پودر سنگ آهک می‌تواند به‌طور مؤثر به‌عنوان 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. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار پودر سنگ آهک (LSP)، مقاومت بتن نیز افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه مقاومت اولیه می‌تواند 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 می‌بخشند. در شکل ۱۰ نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری بتن در طول زمان هستند. از نمودار مشخص است که نمونه‌های 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 و در سن ۲۸ روزه، افزایش مقاومت بین ۳ تا ۱۱٪ بوده است. در جایگزینی ۱۰٪ سیمان با LSP، مقاومت فشاری در ۷ روز حدو 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

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 فوق روان کننده 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 ۱-۴۲۵ 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 می توانند 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 د انسیته بالاتر ، کاهش می‌دهند(شکل ۹). با کاهش مسیرهای تخلخل حفرات کمتر شده و سرعت پخش و انتقال کلریدها به میلگردها کمتر می شود[۲۱].

همچنین اثر کلریدها بر رفتار تازه بتن خودتراکم به دلیل حساسیت بالا به تغییرات رئولوژی، بیشتر تحت تأثیر املاح قرار می‌گیرد. کلریدها ی سدیم و منیزیم می توانند افزایش روانی اولیه ایجاد کنند، زیرا یون‌های کلرید تا حدی خاصیت روان‌کننده‌مانند دارند اما همزمان می توانند باعث کاهش اسلامپ جریانی شوند (شکل۳)زیرا ، سرعت هیدراتاسیون اولیه را بالا می‌برند و زمان گیرش کوتاه‌تر می‌شود و به علت چسبیدن ذرات حالت روانی کم می شود. کلریدها بر فوق روان کننده نیز اثر دارند و برخی فوق روان کننده های پلی کربوکسیلاتی در حضور کلرید ها کارایی و توان خود را از دست می دهند و احتمال جدایش ذرات وجو دارد. البته به نوع سیمان و مواد افزودنی دیگر ارتباط فراوانی نیز وجود دارد. کلریدها با کاهش زمان گیرش اولیه و ثانویه سیمان می شوند(شکل ۲) و باعث کاهش کارپذیری می گردد. کلریدها بر خواص سخت‌شده بتن خودتراکم نیز موثر هستند. این یون ها باعث افزایش سرعت هیدراتاسیون و مقاومت اولیه می شوند و کلیرید کلسیم سرعت تشکیل C-S-H را افزایش می‌دهند و می تواند منجر به افزایش مقاومت اولیه شود اما می تواند 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 ساختار های دیر رس سیمان را مختل کند و در زمان طولانی مقاومت نهایی بتن را کم کند در این راستا خوردگی میلگردها افزایش می یابد. در این بتن ها اگر کلرید زیاد باشد تراکم بتن مانع خوردگی نمی شود و در ادامه باعث ترک خوردت بتن و کاهش دوام سازه می شود و مقاومت بتن در بربر حملات شیمیایی کم می شود. آب دریا چون حاوی یون های کلرید ، سولفات، منیزیم و ... است ، موجب تخریب چسبندگی سیمان و تشکیل اترینگایت و ... می شود و در دراز مدت منجر به افزایش ترک های ریز و کاهش دوام نهایی بتن و سازه می گردد[۲۲].

فوم سیلیسی در بتن SCC تحت عمل‌آوری در آب دریا باعث افزایش مقاومت مکانیکی می شود. 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 می شود. 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 بتن ها وجود پودر بسیار ریز باعث افزایش ویسکوزیته و جلوگیری از جداشدگی می‌شود.

پودر کربنات کلسیم (پودر سنگ آهک) منجر افزایش چگالی بتن می شود. 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 جداشدگی 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 می شود. فوم سیلیسی مقاومت و دوام را بالا می‌برد(شکل ۱۰). و نفوذ کلریدها را کاهش می دهد و در بربر افزایش پودر آب اختلاط کاهش می یابد.. استفاده همزمان آنها باعث تشکیل رسوبات کربناتی محافظ می شود و میکروستراکچر متراکمی ایجاد می کند. ترکیب این دو باعث می‌شود SCC هم روانی مطلوب داشته باشد، هم دوام و مقاومت بالا، به‌ویژه در شرایط شدید آب دریا می شود[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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

متناقض است، اما دلایل علمی شناخته‌شده‌ای 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 خلل‌وفرج یون‌های موجود در آب دریا می‌توانند باعث تشکیل کلروآلومینات‌ها، کربنات‌های کلسیم، محصولات منیزیمی می شوند 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 آب‌به‌سیمان 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 به‌دلیل 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 به‌صورت متناوب خیس و خشک می‌شوند. این چرخه‌ها باعث: افزایش نفوذ کلرید، تسریع کربناته‌شدن، ترک‌های سطحی ناشی از جمع‌شدگی می‌شوند. SCC به‌دلیل ریزساختار متراکم کمتر دچار نفوذپذیری بالا می‌شود، اما حساسیت به جمع‌شدگی خمیری (در صورت عمل‌آوری نامناسب) می‌تواند مشکل‌ساز شود. کربناته‌شدن CO_2 موجود در هوا و آب دریا باعث کاهش pH بتن می‌شود. در SCC به دلیل چگالی بالاتر و نفوذ پایین‌تر، سرعت کربناته‌شدن 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 هیدراسیون و کاهش زمان گیرش که معمولاً در اثر حضور کلریدها رخ می‌دهد، می‌تواند به‌طور مستقیم بر ریولوژی و کارایی بتن خودتراکم (SCC) تأثیر بگذارد. کلریدها (به‌ویژه $CaCl_2$) معمولاً نقش شتاب‌دهنده هیدراسیون را ایفا می‌کنند. این اثرات از نظر ریولوژیک و کارایی عبارت‌اند از: ۱. کاهش کارایی (Workability Loss)، شتاب‌گیری واکنش هیدراسیون 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 ریولوژی افزایش سرعت تشکیل محصولات هیدراسیون (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 هیدراسیون و کاهش زمان گیرش می‌توانند کارایی SCC را کاهش دهند و تنش تسلیم و ویسکوزیته را افزایش دهند و پایداری و روانی لازم برای

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

SCC را مختل کنند و زمان کارپذیری را محدود کنند ودر نتیجه، در بتن خودتراکم به خصوص در بتن مسلح معمولاً از شتاب‌دهنده‌های کلریدی استفاده نمی‌شود یا به‌شدت محدود است[۱۶، ۱۹و 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 جداشدگی 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 عمل‌آوری‌شده 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 نهای 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 کندعملکرد بتن ساده با آب دریا مطابق آیین نامه هااین است که بتن سازه‌ای نباید با آب دریا تهیه شود؛ با این وجود، شواهد آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهد که برای بتن ساده (بدون آرماتور) اثرات نامطلوب قابل‌توجهی در کوتاه مدت رخ نمی‌دهد و باعث تغییر گیرش و مقاومت نهایی ۲۸ روزه بتن می گردد.

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 آزمایش های ثابت در نظر گرفته شده است.

۵- تشکر و قدردانی:

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

در پایان بر خود لازم می دانیم که از مسولان دانشگاه های ATU قزاقستان و ملی مهارت و دانشجویان گرامی 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, 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-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]

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 Na_2SO_4 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

19- Sánchez-Herrero, M.J., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., (2017), C_3S and C_2S hydration in the presence of Na_2CO_3 and Na_2SO_4, *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.MTENG-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 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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-18]