

بررسی میدانی و ریزساختاری آسیب پذیری اسکله‌های بتنی مسلح در برابر نفوذ یون کلرید در محیط دریایی خلیج فارس (مطالعه موردی: اسکله بندرعباس)

محمد امیری *

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان.

عزت‌اله بهرامی گوربندی

دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس.

چکیده

سازه‌های بتنی مسلح در محیط‌های دریایی به‌ویژه در سواحل خلیج فارس، در معرض تخریب تدریجی ناشی از نفوذ یون کلرید و کربناتاسیون قرار دارند. شرایط اقلیمی گرم و مرطوب، تبخیر بالا، پاشش مستقیم آب دریا و آلودگی‌های صنعتی، محیطی به‌شدت خورنده را برای این سازه‌ها فراهم کرده است. پژوهش حاضر باهدف بررسی میدانی و ریزساختاری آسیب‌پذیری اسکله‌های بتنی، به مطالعه موردی اسکله‌های بندرعباس می‌پردازد. به‌منظور تحلیل دقیق مکانیسم‌های تخریب، آزمایش‌هایی نظیر تعیین پروفیل نفوذ یون کلرید، بررسی میکروسکوپی با استفاده از تصاویر SEM، تحلیل عنصری با طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDX) و اندازه‌گیری مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های برداشت‌شده و آزمایشگاهی انجام شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده نفوذ یون کلرید به درون بتن، عامل اصلی تخریب زود هنگام سازه‌های دریایی در محیط دریایی خلیج فارس است. این یون‌ها با ایجاد ترکیبات ناپایدار نظیر نمک فریدل و تضعیف ژل/نانو ساختار C-S-H، به‌طور مستقیم موجب افزایش تخلخل، کاهش انسجام ریزساختار، و افت مقاومت مکانیکی بتن می‌شوند. تصاویر میکروسکوپی (SEM) و تحلیل‌های عنصری (EDX) حاکی از تمرکز بالای یون کلرید، ترک‌های ریز و آسیب به ناحیه انتقالی سطحی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها است. مشاهده پروفیل‌های نفوذ کلرید، بیانگر عبور غلظت یون‌ها از حد بحرانی خوردگی در عمق‌هایی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر است که نشان‌دهنده ضعف در طرح اختلاط، تراکم و عمل‌آوری بتن است. همچنین نتایج نشان داد که وجود پوشش‌های طبیعی نظیر صدف دریایی و افزایش ضخامت لایه پوششی بتن، در کاهش میزان نفوذ کلرید مؤثر بوده و نقش حفاظتی چشمگیری ایفا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: خرابی بتن، اسکله، محیط خورنده، ترمیم سازه، یون کلرید، بندرعباس.

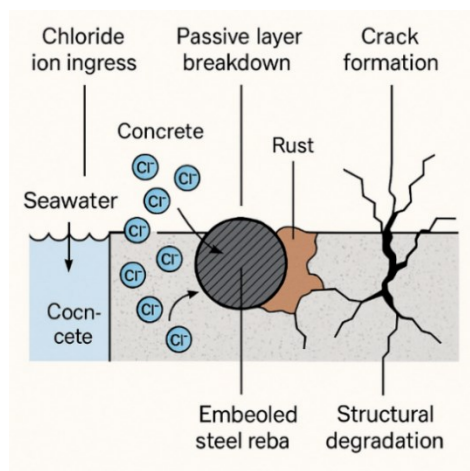
* نویسنده مسئول: amirii@hormozgan.ac.ir

۱- مقدمه

می‌شود. مکش موئینه از طریق شبکه منافذ ریز بتن، حرکت یون‌ها را همراه با آب تسهیل می‌کند. همچنین نفوذ فشاری ناشی از گرادیان فشار و مهاجرت یونی تحت تأثیر پتانسیل‌های الکتریکی از دیگر مکانیسم‌های مؤثر هستند. در شرایطی که بتن در معرض تغییرات رطوبتی قرار دارد، جذب رطوبتی نیز به‌عنوان یک مکانیسم مهم مطرح می‌شود. در محیط‌های جزر و مدی، ترکیب مکانیسم‌های انتشار و مکش موئینه اثر تشدیدکننده‌ای بر نفوذ یون‌ها دارد [۷، ۹-۱۱].

چرخه‌های مکرر تر و خشک شدن در محیط‌های دریایی منجر به افزایش غلظت یون کلرید در منافذ سطحی بتن می‌شود. این پدیده در بتن‌های دریایی به‌وضوح قابل مشاهده است، به‌طوری که جذب آب هنگام غوطه‌وری و تبخیر آن در هنگام خشک شدن، غلظت سطحی یون‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. یون کلرید آزاد به‌عنوان عامل اصلی آغاز فرایند خوردگی شناخته می‌شود، چون قادر به تخریب لایه محافظ روی سطح فولاد است [۷، ۱۲-۱۵].

بخشی از یون‌های کلرید با محصولات هیدراتاسیون سیمان وارد واکنش شده و تشکیل کلرید پیوندی می‌دهند که به‌طور موقت غیرفعال محسوب می‌شود [۱۶، ۱۷]. با این حال، این پیوندها در شرایط خاص می‌توانند مجدداً آزاد شوند. در این راستا، کاهش نفوذپذیری بتن از طریق بهینه‌سازی طرح اختلاط، استفاده از مواد پوزولانی و افزودنی‌های مناسب، به‌عنوان راهکاری کلیدی برای مقابله با نفوذ یون کلرید و افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده شناخته می‌شود [۱۹، ۴۱۸، ۴۱۹].



شکل ۱- تصویر شماتیک فرایند خوردگی آرماتور در محیط دریایی (نفوذ یون‌های کلر، تخریب لایه پسیو، ایجاد ترک و زوال عملکرد سازه‌ای)

سازه‌های بتنی در نواحی ساحلی و دریایی به‌ویژه در جنوب ایران، تحت تأثیر شرایط شدید محیطی قرار دارند که منجر به کاهش دوام و عملکرد بلندمدت این سازه‌ها می‌شود. عواملی نظیر رطوبت بالا، تبخیر شدید، نوسانات حرارتی و وجود یون‌های مهاجم چون کلرایدها و سولفات‌ها، محیطی بسیار خورنده را برای بتن و به‌ویژه آرماتورهای فولادی فراهم می‌کنند [۱، ۲]. این شرایط در محیط‌های صنعتی نظیر اسکله‌های نفتی به‌مراتب تشدید شده و مشکلات جدی‌تری را ایجاد می‌نمایند. طبق گزارش‌های بین‌المللی، خوردگی ناشی از کلر و سولفات از مهم‌ترین عوامل تخریب زودهنگام در سازه‌های بندری و دریایی است [۳].

خوردگی آرماتورها یکی از مکانیسم‌های اصلی خرابی در سازه‌های بتن آرمه است. این پدیده با نفوذ یون کلرید از آب دریا به داخل منافذ بتن آغاز می‌شود و پس از آن، لایه محافظ اطراف آرماتور تخریب می‌شود [۴، ۵]. واکنش‌های شیمیایی ناشی از خوردگی، منجر به افزایش حجم محصولات خوردگی و ایجاد ترک در بتن پوششی می‌شوند (شکل ۱)، که این فرایند در نهایت به کاهش چسبندگی بین بتن و آرماتور و از دست رفتن ظرفیت باربری سازه منجر می‌گردد شوند [۱، ۶].

فرایند خوردگی الکتروشیمیایی در حضور رطوبت منجر به تشکیل محصولات خوردگی با حجم ۲ تا ۶ برابر فولاد اولیه می‌شود. این افزایش حجم قابل توجه، تنش‌های کششی شدیدی در ماتریس بتن ایجاد می‌نماید که در نهایت به بروز پدیده‌های تخریبی شامل ترک خوردگی، پوسته‌شدگی و در موارد شدید، گسیختگی سازه‌ای منجر می‌شود. کاهش ضخامت پوشش بتنی و افزایش تراکم آرماتورها، شدت و سرعت این فرایند تخریبی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۷].

یون‌های کلرید به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده دوام سازه‌های بتنی در محیط‌های خورنده، می‌توانند از منابع خارجی مانند آب دریا، خاک‌های آلوده و اتمسفر دریایی و هم از منابع داخلی نظیر مواد افزودنی و مصالح مصرفی وارد ساختار بتن شوند [۷]. مکانیسم‌های مختلفی در نفوذ این یون‌ها به بتن نقش دارند که مهم‌ترین آن‌ها انتشار یونی بر اساس قانون دوم فیک است که تحت تأثیر گرادیان غلظت صورت می‌پذیرد [۸، ۹].

در محیط‌های دریایی، فرایندهای نفوذی پیچیده‌تری مشاهده

بندرعباس مورد بررسی میدانی و آزمایشگاهی قرار گرفته است. بررسی میزان نفوذ یون کلر و تأثیر آن بر ریزساختار در محیط دریایی واقعی، از اهداف اصلی این پژوهش می باشد. این مطالعه یک رویکرد کاربردی مبتنی بر تلفیق تحلیل میدانی، آزمایشگاهی و ریزساختاری در محیط دریایی و صنعتی واقعی است. برخلاف بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی که در شرایط کنترل شده انجام می گیرند، این پژوهش در بستر واقعی اسکله انجام شده و راهکارهای پیشنهادی آن، قابلیت پیاده سازی مستقیم در پروژه های مشابه را دارا می باشد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- معرفی اسکله مورد مطالعه

این پژوهش باهدف بررسی پایایی و تحلیل علل خرابی و آسیب پذیری سازه های بتنی اسکله بندرعباس با نگرش ریزساختاری و درشت ساختاری انجام شده است. اسکله مورد مطالعه که در سال های ۱۹۹۶-۱۹۹۷ میلادی احداث گردیده، از نوع شمع و عرشه بوده و جزء سازه های متداول در بنادر خلیج فارس محسوب می شود که به ویژه به دلیل امکان عبور آب از زیر سازه، از نظر طراحی منحصر به فرد می باشند.

اجزای اصلی اسکله مورد مطالعه به شرح ذیل است:

۱. دلفین ها: سازه هایی برای پهلوگیری کشتی ها که نیروهای پهلوگیری و باد را تحمل می کنند. این دلفین ها معمولاً به صورت چند شمعی طراحی می شوند (شکل ۲-۲a)).
۲. شمع ها: شمع های استوانه ای بتنی که نیروهای قائم را تحمل کرده و بر روی آن ها دلفین ها و عرشه بتنی قرار می گیرند (شکل ۲-۲b)).

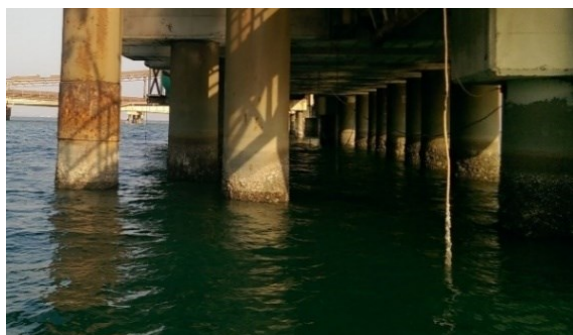
سازمان هایی نظیر FIB، ACI و BS به طور جدی بر کنترل خوردگی از طریق طراحی اصولی پوشش بتن، استفاده از مواد افزودنی بازدارنده، و روش های ترمیمی نوین تأکید دارند. با این حال، در بسیاری از پروژه های اجرایی، این راهکارها به درستی اجرا نشده و یا با محدودیت هایی در به کارگیری مصالح مقاوم روبرو هستند.

در اسکله های ایران نیز به دلیل فشارهای بهره برداری، زمان محدود اجرا و گاه عدم تطابق مصالح با شرایط محیطی، موارد متعدد از خرابی زودرس مشاهده شده است.

گنجیان و صادقی پویا (۲۰۰۹) در بررسی اثرات ناحیه جزر و مدی خلیج فارس بر روی دوام بتن نیز بیان کردند مقاومت فشاری نمونه ها در محیط دریای خلیج فارس کاهش می یابد و برای افزایش مقاومت در برابر تخریب توسط یون های سولفات و یا تبلور نمک، اقدامات حفاظتی اضافی، مانند استفاده از پوشش اپوکسی مقاوم در برابر آب، مورد نیاز است [۲۰].

احسان دوست و زارع (۲۰۲۲) بیان کردند، وجود یون سولفات و کلرید در محیط خورنده دریای خلیج فارس منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه های بتن عمل آوری شده در این محیط شده است. همچنین، مقاومت الکتریکی این نمونه ها در مقایسه با نمونه های شاهد کاهش چشمگیری را نشان داده است که این امر حاکی از افزایش نفوذ پذیری و کاهش دوام بتن در شرایط محیطی مورد مطالعه است [۲۱]. تنگ تکابی و همکاران (۲۰۲۴) نیز تأثیر خوردگی آرماتورها توسط یون های کلرید موجود در آب دریای خلیج فارس بر ناپایداری و از بین رفتن مقاومت بتن مسلح (RC) را تأیید کردند [۲۲].

در این پژوهش، به صورت موردی، خرابی های سازه بتنی اسکله



b



a

شکل ۲- نمونه ای از اجزای اصلی اسکله مورد مطالعه a: دلفین ها، b: شمع ها

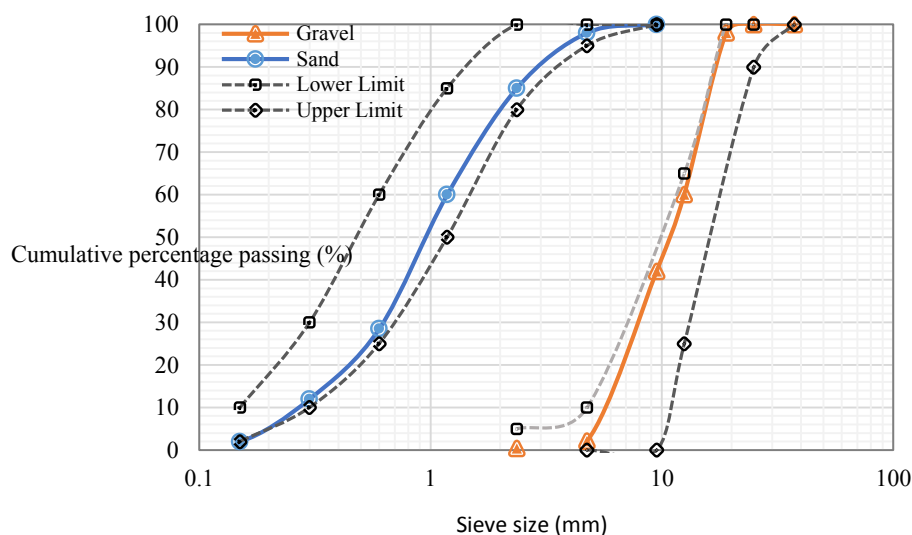
نتایج آنالیزهای شیمیایی نشان می‌دهد که غلظت کلرید سدیم و سولفات سدیم در این منطقه حدود ۱۷ درصد بیشتر از میانگین جهانی آب‌های آزاد است.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه آب دریای اسکله مورد مطالعه را در مقایسه با مقادیر میانگین بیان شده برای آب خلیج فارس و آب-های آزاد جهان نمایش می‌دهد. قابل توجه است، مقدار حدی یون کلرید برای شروع خوردگی در بتن در محدوده ۰/۶-۰/۹ gr/L ارائه شده است [۲۵]، بر اساس نتایج حاصل شده غلظت یون کلرید در محدوده اسکله و در متوسط دریایی خلیج فارس فراتر از آستانه‌ای است که می‌تواند آغازگر خوردگی در سازه‌های بتن مسلح باشد. همچنین، نوسانات قابل توجه دما و رطوبت نسبی همراه با رسیدن دمای سطح بتن به بیش از ۷۵ درجه سلسیوس در روزهای گرم سال، چرخه‌های متوالی انبساط و انقباض را در بتن ایجاد می‌نماید.

در طراحی و ساخت اسکله مورد مطالعه مصالح مصرفی شامل ماسه با اندازه دانه بین ۴/۷۵ تا ۰/۰۷۵ میلی‌متر و شن شکسته با اندازه دانه بین ۹/۵ تا ۴/۷۵ میلی‌متر است. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C33 در شکل ۳ ارائه شده است [۲۳]. همچنین برای ساخت اسکله مورد مطالعه از سیمان پرتلند معمولی تیپ II استفاده شده است. مقادیر آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند معمولی تیپ II از طریق آنالیز XRF تهیه و در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس استاندارد ASTM C188، چگالی سیمان مصرفی 3011 kg/m^3 است [۲۴].

۲-۲- آنالیز شیمیایی آب دریا

آب خلیج فارس به دلیل شرایط ویژه جغرافیایی و تبادل محدود با آب‌های آزاد، از غلظت نمکی بالاتری برخوردار است که به‌طور قابل توجهی خطر خوردگی در بتن‌های مسلح را افزایش می‌دهد.



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی (شن و ماسه)

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ II سیستم

Materials	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	L.O.I
Cement II	۲۱/۴۷	۵/۴۰	۳/۸۲	۶۲/۵۲	۱/۳۱	۰/۴۳	۰/۶۵	۲/۸۸	۱/۵۲

جدول ۲- آنالیز شیمیایی آب دریای اسکله و مقایسه با مقادیر متوسط خلیج فارس

Properties	pH	Cl (gr/L)	SO ₄ ²⁻ (gr/L)	Na (gr/L)	K (gr/L)	Ca (gr/L)	Mg (gr/L)
Sea dock	۷/۸۰	۲۳/۰۴	۲/۸۲	۱۱/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۰	۱/۴۹
Persian gulf	۷/۵۰	۲۱/۴۵	۲/۷۲	۱۲/۴۰	۰/۰۴۵	۰/۴۳	۱/۴۶
Global average	۸/۱	۱۹/۸۴	۲/۷۸	۱۱/۰۳	۰/۴۰	۰/۴۲	۱/۳۲

۳-۲- نمونه‌برداری، ساخت و ارزیابی نمونه‌ها

C192/192M استفاده شد [۲۸]. آزمون‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و برای عمل‌آوری اولیه به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب نگهداری شدند و سپس تحت شرایط محیط دریای خلیج فارس نگهداری شده است. طرح اختلاط بتن بر اساس آیین‌نامه ACI-211 با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. شایان به ذکر است یک سری نمونه به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شده است. طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

برای ارزیابی علمی مکانیسم‌های تخریب، نمونه‌برداری از بخش‌های مختلف اسکله انجام شد. معیار انتخاب وجود آسیب‌های ظاهری قابل مشاهده (مانند ترک‌ها، پوسته‌شدگی و خوردگی آرماتور) و همچنین نواحی با عملکرد نامناسب سازه‌ای بود. نمونه‌برداری از بخش‌های آسیب‌دیده شامل مغزه‌های بتنی، قطعات سطحی خورده شده و ملات اطراف آرماتورها مطابق استاندارد ASTM C42/C42M-20 انجام گرفت [۲۶].

برای بررسی مشخصات فیزیکی و شیمیایی مصالح به‌کاررفته در سازه، آنالیز شیمیایی به روش فلورسانس پرتوایکس (XRF) انجام شد و همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C39 اندازه‌گیری شد [۲۷]. علاوه بر آن، برای درک مکانیسم‌های تخریب در سطح میکروسکوپی، از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDX) استفاده شده است.

برای شبیه‌سازی رفتار بتن در شرایط عملیاتی اسکله، آزمون‌های جدیدی نیز در آزمایشگاه ساخته شدند. در این راستا از سیمان تیپ II، سنگ‌دانه‌های محلی و آب شرب بندرعباس استفاده شد و نمونه‌ها در محیط دریایی خلیج فارس نگهداری شد.

در طرح اختلاط مورد استفاده برای تهیه بتن نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. برای نمونه‌برداری از قالب‌های مکعبی به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM

۴-۲- آزمایش تعیین پروفیل یون کلرید

برای انجام آزمایش تعیین درصد یون کلر، مغزه‌هایی با قطر ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از سازه‌های مختلف اسکله (دلفین‌ها و شمع‌ها) با استفاده از دستگاه مغزه گیر تهیه شده است (شکل ۴). نمونه‌ها از نقاط بحرانی سازه شامل سه دلفین با بیشترین آسیب‌دیدگی و هشت شمع از مناطق مختلف (شماره ۱ تا ۸) جمع‌آوری شده‌اند (جدول ۴).

پس از نمونه‌برداری، مغزه‌ها به‌صورت عرضی با ضخامت ۱ سانتی‌متر برش داده شدند و عملیات پودرگیری از لایه‌های مختلف مغزه‌های بتنی، بر اساس استاندارد NT Build 443 انجام شد [۲۹]. اندازه‌گیری درصد یون کلرید بر اساس استانداردهای ASTM C114 و ASTM C1152 با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری انجام گرفت که بر پایه سنجش میزان جذب نور توسط کمپلکس آهن-تیوسیانات جیوه استوار است [۳۱، ۳۰].

جدول ۳- طرح اختلاط بتن با سیمان پرتلند تیپ II بر اساس آیین‌نامه ACI-211

Constituents	Gravel (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	W/C (kg/m ³)
Concrete	۶۹۳/۶	۱۰۶۹	۱۵۷/۵	۳۵۰	۰/۴۵



شکل ۴- مغزه‌گیری از دلفین و شمع با استفاده از دستگاه مغزه گیر

جدول ۴- نامگذاری نمونه‌های تهیه‌شده از دلفین و شمع‌های اسکله

Type	Sample Name							
Dolphin	D1	D1H30	D2	D2H30	D3	D3H30		
Pile	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
	P1H200	-	P3H200	P4H200	P5H200	P6H200	P7H200	P8H200

۲-۶- آزمایش ریزساختاری

جهت بررسی ریزساختاری نمونه‌ها از آزمایش تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در یک محفظه خلاء قرار داده شد و به کمک گاز آرگون و میدان مغناطیسی، یک لایه از اتم‌های طلا بر سطح نمونه قرار گرفت و سبب ایجاد یک پوشش رسانا از طلا بر سطح نمونه شد. سپس تصاویر نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی روبشی مدل TESCAN-510-SEM-01 تهیه شده است. برای بررسی و تجزیه و تحلیل ساختاری و خصوصیات شیمیایی نمونه‌های بتنی، آزمایش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDX) برای نمونه‌ها انجام شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- مشاهدات میدانی

مشاهدات میدانی وضعیت سازه نشان داد که بخش‌های وسیعی از سازه دچار خرابی‌های متوسط تا شدید شامل پبله کردن بتن، قلوه کن شدن، ریزش پوشش بتن و خوردگی آرماتورها شده است. آثار زنگ‌زدگی در محل ترک‌ها و نفوذ عوامل خوردنده به داخل بتن به وضوح قابل مشاهده است (شکل ۵).

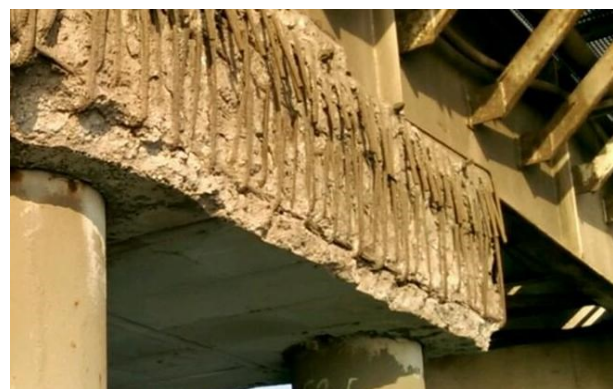
نتایج این آزمایش‌ها به صورت درصد یون کلرید در بتن بیان شد و بر اساس داده‌های به دست آمده، پروفیل‌های یون کلرید رسم شد. این پروفیل‌ها شامل یون کلرید محلول در اسید (کل کلریدها) و محلول در آب (کلرید آزاد) بودند که به منظور بررسی میزان نفوذ یون کلرید در بتن سازه اصلی بود. در اسکله مورد مطالعه، پروفیل‌های یون کلرید در دو موقعیت شامل شمع‌های اصلی و ژاکت‌های بتنی بررسی شدند. برای استخراج پروفیل کلرید آزاد و کل کلرید در اعماق مختلف بتن، از تکنیک‌های تحلیلی مانند تیتراسیون و ICP-OES استفاده شد. این داده‌ها اطلاعات دقیقی در مورد نفوذپذیری بتن و خطرپذیری آرماتورها در برابر خوردگی ارائه دادند.

۲-۵- آزمایش مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM C39 در دمای آزمایشگاهی و بر اساس طرح اختلاط جدول (۳) ساخته شد [۲۷]. شایان ذکر است نمونه‌های طرح در دریای خلیج فارس عمل‌آوری شده است، زمان انجام آزمایش‌ها اول شهریور لغایت تا انتهای آبان بوده است و دمای آب دریا در این مدت در محدوده ۱۸ تا ۳۴ درجه سلسیوس است. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری از جک بتن شکن دیجیتالی اتوماتیک شرکت آزمون استفاده شد.



b



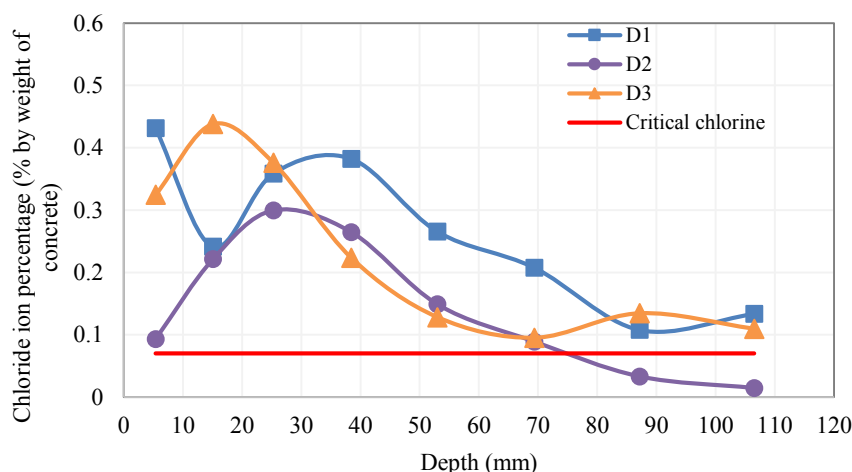
a

شکل ۵- a: ریزش پوشش بتن دلفین؛ b: زنگ‌زدگی آرماتور

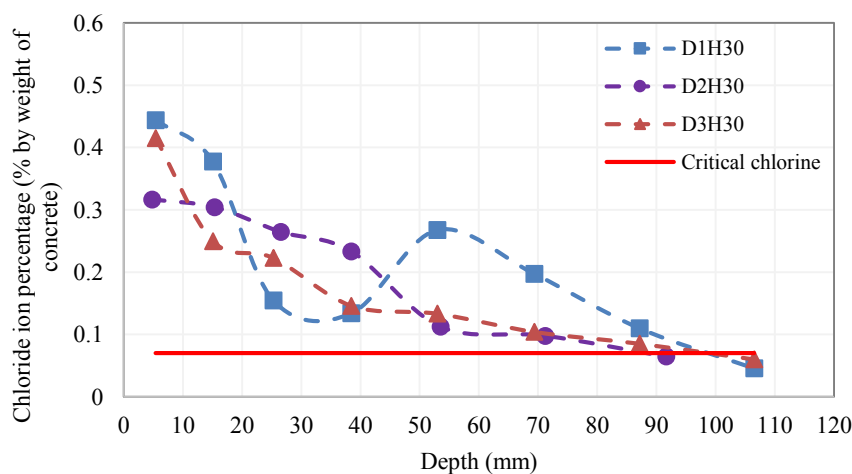
۲-۳- تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به دلفین-
های اسکله مورد مطالعه

پروفیل‌های یون کلرید استخراج شده از دلفین‌های شماره ۱، ۲ و ۳ اسکله در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. نمونه‌های D1، D2 و D3 به ترتیب از دلفین شماره ۱، ۲ و ۳ تهیه شده و در ناحیه اتمسفریک پاشش قرار دارند (شکل ۶)، نمونه‌های D1H30، D2H30 و D3H30 به ترتیب از دلفین شماره ۱، ۲ و ۳ در عمق ۳۰ سانتی-متری از سطح دلفین تهیه شده است و در ناحیه اتمسفریک پاشش قرار دارند (شکل ۷).

بر اساس نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود میزان درصد یون کلرید نمونه D1، در عمق ۵، ۳۸، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۳۲، ۰/۲۲، ۰/۰۹ و ۰/۱۰ درصد است. مقدار یون کلرید در عمق ۱۰۸ میلی‌متر نسبت به سطح بتن تقریباً ۶۸ درصد کاهش داشته است.



شکل ۶- پروفیل‌های یون کلرید استخراج شده از دلفین‌های شماره ۱، ۲ و ۳ اسکله مورد مطالعه



شکل ۷- پروفیل‌های یون کلرید استخراج شده از دلفین‌های شماره ۱، ۲ و ۳ اسکله مورد مطالعه در عمق ۳۰ سانتی‌متری از سطح دلفین

۳-۲-۱- تحلیل و بررسی ریزساختار و ترکیبات سیمان در دلفین‌های اسکله مورد مطالعه

در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و نتایج طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDX) نمونه‌های تهیه‌شده از دلفین شماره ۱ در عمق‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر ارائه شده است. بر اساس تصاویر ریزساختار بتن با افزایش عمق تغییر پیدا کرده است. در این تصاویر ساختار ترکیبات مختلف، حفره‌ها و منافذ نیز قابل مشاهده است.

از دیدگاه ریزساختاری، حضور کلرید در بتن باعث واکنش با فاز C_3A (تری کلسیم آلومینات) سیمان می‌شود که منجر به تشکیل ترکیب نامحلول کلروآلومینات‌ها نظیر $((3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O))$ می‌شود. این واکنش در نگاه اول موجب تثبیت کلرید می‌شود، اما با اشباع ظرفیت جذب C_3A ، کلرید آزاد به راحتی به آرماتورها نفوذ کرده و خوردگی را آغاز می‌کند. بنابراین، نسبت بالای C_3A در سیمان تیپ II، در درازمدت نمی‌تواند مانع خوردگی گردد [۴،۳۳].

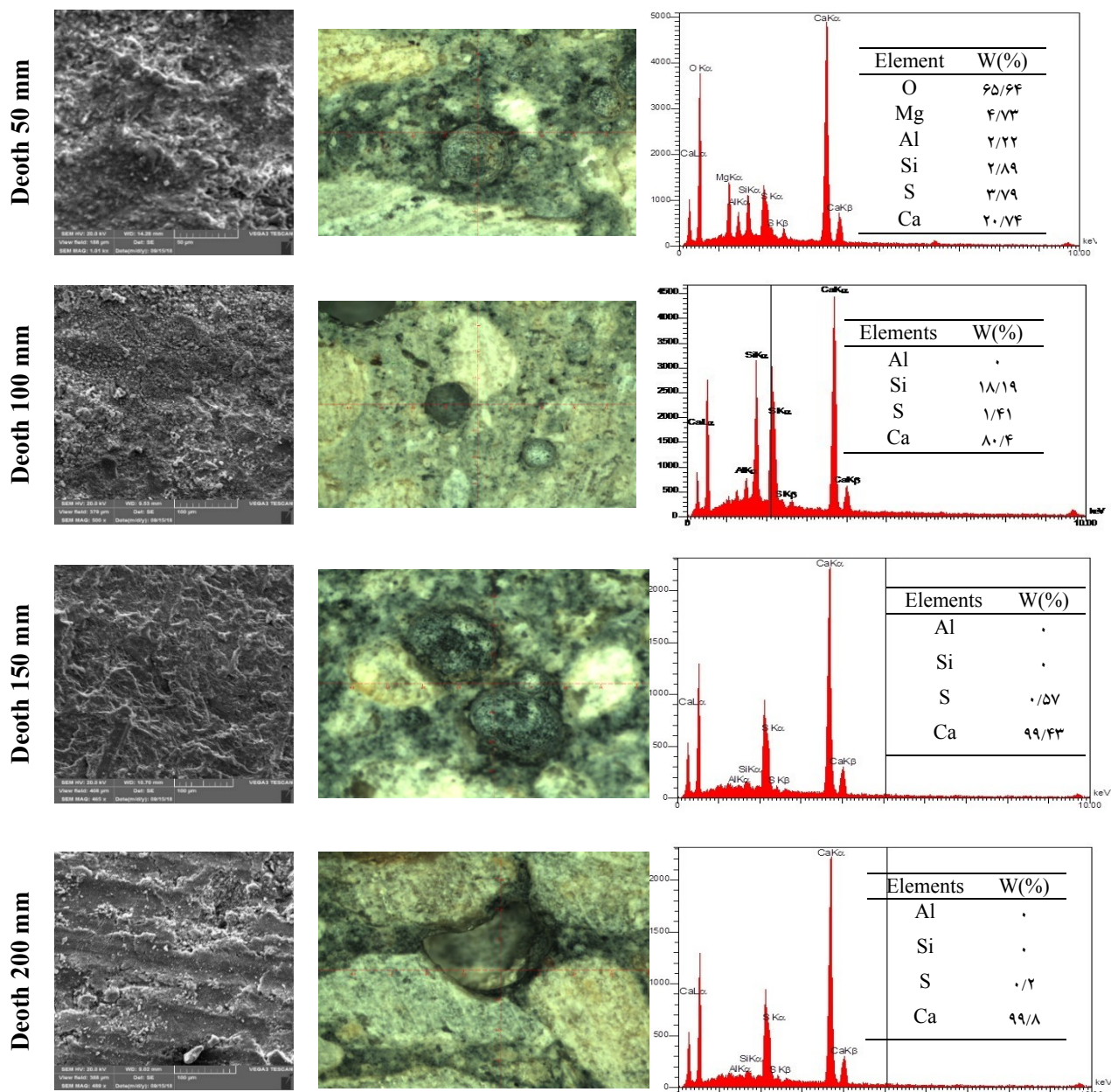
واکنش CH با دی‌اکسیدکربن، منجر به تشکیل کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و افت قلیانیت محیط می‌شود. این کاهش pH در اطراف آرماتورها، محیط را مستعد خوردگی می‌سازد حتی اگر کلرید حضور نداشته باشد. از منظر ساختاری، فرایند کربناتاسیون باعث افزایش تراکم موضعی اما کاهش نفوذپذیری سطحی می‌شود که به صورت متناقض، در لایه‌های زیرین موجب تمرکز تنش‌های انبساطی ناشی از خوردگی خواهد شد، بر اساس بررسی‌های صورت گرفته pH نمونه‌ها به حدود ۸ کاهش یافته بود. [۳۴،۳۵].

در ساختار نمونه‌های با عمق کمتر، کریستال‌های بزرگ و متقاطع و منافذ بزرگ بین آنها به راحتی قابل مشاهده است. در حالی که در نمونه‌های عمیق‌تر، ساختار نمونه‌ها همگن‌تر شده و منافذ ریزتر می‌شود. به عبارتی با مقایسه تصاویر می‌توان نتیجه گرفت هرچه عمق کم‌تر می‌شود، در ساختار نمونه‌ها منافذ بزرگ‌تر و خلل و فرج بیشتری دیده می‌شود و از همگنی ساختار بتن کاسته می‌شود. به گونه‌ای که در عمق ۲۰۰ میلی‌متری مجموع مساحت سطح حفرات و منافذ حدود ۱۱۶ میکرومتر مربع و در عمق ۵۰ میلی‌متری، مجموع مساحت سطح حفرات حدود ۱۳۲ میکرومتر مربع می‌باشد که حدود ۱۴ درصد افزایش یافته است. اندازه نسبتاً بزرگ حفره‌ها و منافذ در دلفین‌ها به دلیل کیفیت نامناسب بتن اولیه است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۷) مشاهده می‌شود میزان درصد یون کلرید نمونه $D1H30$ ، در عمق ۵، ۳۸، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۴۴، ۰/۱۴، ۰/۱۹ و ۰/۰۶ درصد است و مقدار یون کلرید در عمق ۱۰۸ میلی‌متر نسبت به سطح بتن تقریباً ۸۶ درصد کاهش داشته است. غلظت یون کلرید آزاد در سطوح نزدیک به سطح بتن بالا بوده و با افزایش عمق، این غلظت کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار کلرید آزاد در عمق حدود ۵ میلی‌متر، معادل ۰/۴۴ درصد وزنی است که از آستانه خوردگی بیشتر است و می‌تواند منجر به شروع خوردگی در آرماتورها شود. این کاهش تدریجی کلرید در عمق، با پدیده نفوذ از سطح به سمت داخل هم‌خوانی دارد. میزان درصد یون کلرید نمونه $D3H30$ ، در عمق ۵، ۳۸، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۴۱، ۰/۱۴، ۰/۱۰ و ۰/۰۷ درصد است، روند تغییر درصد یون کلرید با افزایش عمق به صورت نزولی است و مقدار یون کلرید در عمق ۱۰۸ میلی‌متر نسبت به سطح بتن تقریباً ۸۲ درصد کاهش داشته است.

به طور کلی نتایج نشان می‌دهد، تا عمق ۱۰۰ میلی‌متری بتن، غلظت یون کلرید به مراتب بالاتر از آستانه خوردگی (۰/۰۷ درصد وزنی نسبت به بتن) است. این امر بیانگر نفوذ عمیق و شدید کلرید به داخل بتن و ضعف در کیفیت بتن اولیه است. شکاف‌ها و ترک‌های مشاهده شده تا این عمق نیز مؤید وجود خوردگی در آرماتورهاست. با وجود اینکه دلفین‌ها عمدتاً در ناحیه اتمسفریک قرار داشته و کمتر در معرض پاشش مستقیم آب دریا بوده‌اند، مقدار نفوذ کلرید بسیار بالا است که این امر دلالت بر نقش رطوبت نسبی بالا و تبادل نمک‌های موجود در هوای مرطوب با سطح بتن دارد که فرایند نفوذ سطحی را تقویت می‌نماید که مؤید حساسیت شدید این سازه به نفوذ یون کلرید است.

بررسی پروفیل‌های کلرید نشان می‌دهد که در عمق ۱۰۰ میلی‌متری بتن، غلظت یون کلرید در دلفین‌های اسکله از مقدار ارائه شده توسط آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بیشتر است [۳۲] و غلظت یون کلرید در هر سه دلفین از حد آستانه‌ی شروع خوردگی تجاوز کرده است. این امر گویای نفوذپذیری بالای بتن و ضعف در طراحی یا اجرای مخلوط اولیه است. نفوذ کلرید، به‌ویژه در محیط دریایی، از طریق تخلخل‌های موئین (Capillary pores) رخ می‌دهد که معمولاً ناشی از نسبت آب به سیمان بالا (w/c) یا عدم تراکم مناسب بتن است.



شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM)، اندازه‌گیری حفره‌های نمونه و نتایج آنالیز EDX

عمق افزایش یافته است. همچنین میزان یون Ca در عمق ۵۰ میلی‌متر در مقایسه با دیگر نمونه‌ها به کم‌ترین مقدار رسیده است این نسبت بیانگر نفوذ شدید یون‌های کلرید و سولفات آب دریا به درون نمونه است و همچنین بیانگر تشکیل ساختار مخرب اترینگایت و گچ و تخریب نانو ساختارهای C-S-H در نمونه‌ها است که با نتایج حاصل از تصاویر SEM همخوانی مناسبی دارد. به‌طورکلی با پیشرفت حملات کلریدی و سولفاتی، کلسیم موجود در نانو ساختار C-S-H از بین رفته و نسبت مولی Ca/Si کاهش یافته است [۳۶،۳۷].

با توجه به تصاویر SEM فازهای ضعیف در خمیر سیمانی مانند اترینگایت (Ettringite) ثانویه یا فازهای ناپایدار حاصل از سولفات شدن یا واکنش کلرید با C_4AF نیز قابل مشاهده است، که می‌تواند بخشی از تورق و ترک خوردگی سطحی مشاهده شده را توضیح دهد. به‌ویژه در شرایط خلیج فارس که تنش‌های حرارتی و رطوبتی متناوب حضور دارند، ناپایداری فازهای هیدراته شده سیمان شدید است.

تغییرات درصد وزنی عناصر موجود در نمونه‌های بتن به‌دست آمده از آزمایش EDX نشان می‌دهد، میزان Ca در نمونه‌ها با افزایش

۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۰۸۶، ۰/۰۴۸، ۰/۰۳۶ و ۰/۰۱۸ درصد است. درصد یون کلرید در تمام عمق نمونه P1 و P4 کم‌تر از مقدار کلرید بحرانی است. در محیط‌های جذر و مدی دریا، سطح سازه‌های بتنی اغلب پوشیده از جانداران بی‌حرکت دریایی مانند میگوهای صخره‌ای، صدف‌های خوراکی و ماسل‌ها (صدف‌های سیاه) است. در مورد دوام بتن در حضور این موجودات بی‌حرکت دریایی، ایوانامی و همکاران (۲۰۰۲) [۳۹]، مارویا و همکاران (۲۰۰۳) [۴۰] نتایج آزمایشی جالبی را ارائه کرده‌اند، در این مطالعات ذکر شده است که بتن پوشیده شده با این موجودات، مقاومت بالایی در برابر خوردگی ناشی از کلرید از خود نشان داده است. غشای پایه این موجودات به‌طور قابل توجهی متراکم‌تر از بتن است، بنابراین نفوذ یون کلرید و اکسیژن کاهش می‌یابد. این نتیجه نشان می‌دهد که چسبیدن موجودات بی‌حرکت دریایی ممکن است به افزایش دوام سازه‌های بتنی کمک کند [۴۱]. جیانفولو و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأیید کردند که پوشش صدف‌ها می‌تواند مقاومت بتن را در برابر جذب آب و نفوذ یون کلرید افزایش دهد و این اثر مثبت با گسترش سطح پوشش صدف‌ها افزایش می‌یابد. پوشش صدف در سطح مشترک بین بتن و صدف‌ها دارای ساختار متراکمی است و به‌طور قابل توجهی ساختار منافذ بتن را بهبود می‌بخشد و به افزایش دوام بتن و سپس محافظت از بتن در برابر محیط دریایی شدید کمک می‌کند [۴۲].

میزان درصد یون کلرید نمونه P7، در عمق ۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۵۱۸، ۰/۲۶۰، ۰/۲۲۵ و ۰/۰۹۸ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد یون کلرید در تمام عمق نمونه بیشتر از مقدار کلرید بحرانی است.

بر اساس نتایج ارائه‌شده، میزان درصد یون کلرید نمونه P1H200، در عمق ۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۳۰۷، ۰/۱۵۳، ۰/۱۶۵ و ۰/۱۱۰ درصد است. درصد یون کلرید در عمق بیشتر از ۳۰ میلی‌متر کم‌تر از مقدار کلرید بحرانی است. میزان درصد یون کلرید نمونه P4H200، در عمق ۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۰۴۶، ۰/۰۱۲، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰۵ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد یون کلرید در تمام عمق نمونه بیشتر از مقدار کلرید بحرانی است. میزان درصد یون کلرید نمونه P7H200، در عمق ۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۳۴۰، ۰/۱۵۸، ۰/۰۷۷ و ۰/۰۱۶

با توجه به ضعف قلیائیت، غلظت بالای کلرید آزاد و حضور نواحی کربناته‌شده، ریزساختار بتن در این دلفین‌ها دیگر قادر به ایفای نقش محافظتی نیستند. در چنین شرایطی، حتی استفاده از پوشش‌های سطحی یا ژاکت‌های بتنی در مراحل آتی تعمیر نیز بدون حذف نواحی آلوده و اجرای بتن مقاوم در برابر نفوذ، کارایی بلندمدت نخواهد داشت.

پروفیل‌های یون کلرید تهیه‌شده از دلفین‌های شماره ۱، ۲ و ۳ اسکله نشان داده‌اند که غلظت یون کلرید در عمق ۱۰۰ میلی‌متری بتن به‌طور قابل توجهی بیش از آستانه خوردگی معادل ۰/۰۷ درصد وزنی نسبت به بتن است. چنین سطحی از نفوذ یون کلرید احتمالاً ناشی از تخلخل بالا، پیوستگی ضعیف شبکه خمیر سیمانی و وجود ریزترک‌ها در ماتریس سیمانی بوده است که امکان نفوذ سریع یون‌های مهاجم را فراهم نموده‌اند. تحلیل میکروسکوپی ساختار بتن نشان داده است که در چنین شرایطی، مرزهای بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها (ITZ) یکی از مسیرهای اصلی نفوذ یون کلرید به شمار می‌روند. ترک‌های مشاهده‌شده تا این عمق نیز با پدیده خوردگی ناشی از افزایش غلظت یون کلرید هم‌راستا هستند. از طرف دیگر طبق مشاهدات منگات و خطیبی دمای بالا باعث ایجاد منافذ حفره‌ای بیشتر و در نتیجه نفوذ کلر بیشتر می‌شود. با توجه به شرایط دمایی و رطوبت خلیج فارس وجود حفرات بزرگ و ترک‌ها با مشاهدات منگات و خطیبی همخوانی مناسبی دارد [۳۸].

۳-۳- تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به شمع‌های اسکله مورد مطالعه

پروفیل‌های یون کلرید استخراج‌شده از شمع‌های اسکله در شکل‌های (۹) و (۱۰) ارائه‌شده است. نمونه‌های P1، P2، P3، P4، P5، P6، P7 و P8 از شمع شماره ۱ تا ۸ تهیه‌شده (شکل ۹) و نمونه‌های P1H200، P3H200، P4H200، P5H200، P6H200، P7H200 و P8H200 در عمق ۲۰۰ سانتی‌متری از شمع‌های ۱ تا ۸ تهیه‌شده است (شکل ۱۰). لازم به ذکر است نمونه‌های P1، P2، P3، P4، P5H200، P6، P7H200 و P8 از محلی که پوشیده از صدف دریایی است تهیه شدند.

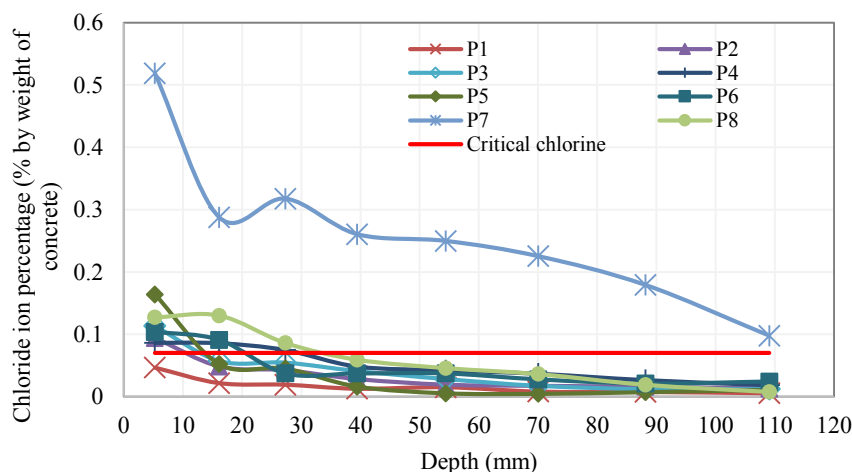
میزان درصد یون کلرید نمونه P1، در عمق ۵، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ میلی‌متر به ترتیب حدود ۰/۰۴۶، ۰/۰۱۲، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۰۵ درصد است. همچنین میزان درصد یون کلرید نمونه P4، در عمق ۵، ۴۰،

صدف دریایی و سطح بدون صدف دریایی ارائه شده است. مقایسه میان پروفیل‌های یون کلرید برای سطوح با صدف و بدون صدف این نتیجه را تأیید می‌نماید.

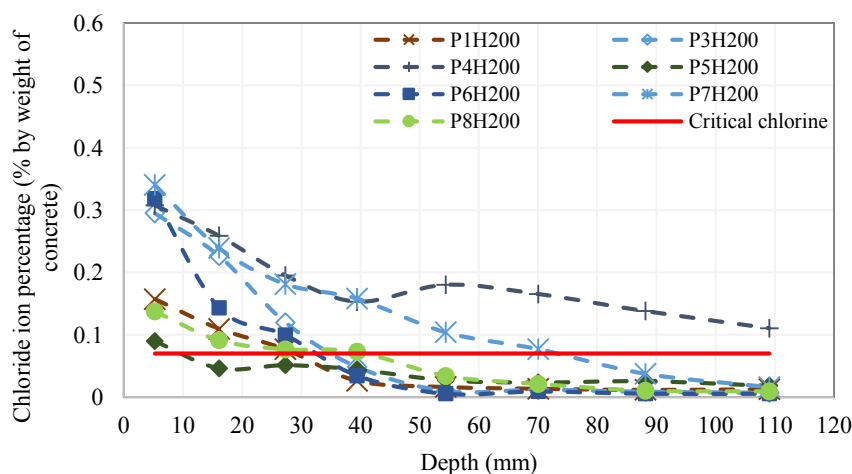
در بخش‌هایی که پوشش بتن روی آرماتورها کمتر از ۴۵ میلی‌متر بوده، علائم خوردگی مشاهده شده، درحالی‌که در نقاطی که این ضخامت رعایت شده است، خوردگی قابل‌ملاحظه‌ای مشاهده نگردیده است. این کاستی در عمق پوشش باعث تشدید نفوذ کلرید و افزایش نرخ خوردگی شده و توجه‌کننده وضعیت نامناسب مشاهده شده در این نقطه است. این یافته در راستای توصیه آیین‌نامه‌های منطقه‌ای است که حداقل پوشش ۷۵ میلی‌متر را برای مناطق دریایی توصیه می‌نمایند [۳۲، ۴۳]. علاوه بر آن، مطابق با توصیه‌های ACI 318 و BS EN 1992، افزایش ضخامت

درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد یون کلرید در عمق بیشتر از ۷۰ میلی‌متر کم‌تر از مقدار کلرید بحرانی است. آزمایش‌های انجام شده بر روی شمع‌های اسکله نشانه‌ای مثبت از کیفیت مطلوب بتن مصرفی و مقاومت بتن در این بخش‌ها است. با این حال، برخی از پروفیل‌ها، در بخش‌های بالایی خود علائم خوردگی را نشان داده‌اند. نکته قابل‌توجه دیگر حضور یا عدم حضور صدف‌های دریایی در محل برخی از پروفیل‌ها است. در شمع‌ها، ساختارهای صدفی تشکیل شده بر روی سطح بتن در بسیاری از نقاط به‌عنوان مانعی فیزیکی مؤثر در برابر نفوذ یون کلرید عمل کرده‌اند. اگرچه این سطوح بیشتر در معرض آب دریا قرار داشته‌اند، اما میزان کلر ثبت شده در عمق‌های مختلف کمتر از سطوح بدون صدف است.

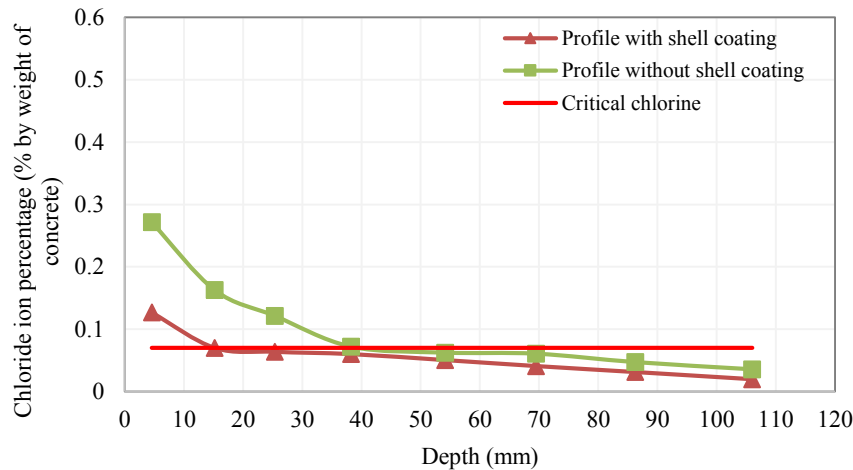
در شکل ۱۱ متوسط پروفیل یون کلرید برای سطح پوشیده از



شکل ۹- پروفیل‌های یون کلرید استخراج شده از شمع‌های شماره ۱ تا ۸ اسکله مورد مطالعه



شکل ۱۰- پروفیل‌های یون کلرید استخراج شده از شمع‌های شماره ۱ تا ۸ اسکله مورد مطالعه در عمق ۲۰۰ میلی‌متری



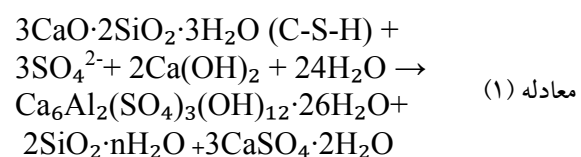
شکل ۱۱- مقایسه پروفیل متوسط یون کلرید برای سطح با صدف و بدون صدف

۳-۴- بررسی تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها

تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۱۲ ارائه شده است. مقاومت فشاری بتن یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های آن برای ارزیابی دوام و عملکرد سازه‌های بتنی است. در این تحلیل، به‌ویژه در مورد دلفین‌های اسکله، مشاهده می‌شود که نفوذ یون کلرید به داخل بتن تأثیرات منفی بر مقاومت فشاری دارد. نمونه‌های مختلفی از دلفین‌ها در شرایط مختلف نفوذ کلرید مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نشان‌دهنده کاهش‌های قابل توجه در مقاومت فشاری هستند. نمونه‌های دلفین‌ها که در عمق‌های مختلف از سطح بتن آزمایش شده‌اند، نشان‌دهنده کاهش مقاومت فشاری تا ۱۷٪ نسبت به نمونه‌های شاهد در آب شرب هستند. این کاهش‌ها به‌ویژه در نمونه‌های دلفین‌هایی که در معرض نفوذ بیشتر یون کلرید قرار داشته‌اند، مشهودتر است.

تخریب C-S-H در محیط دریایی عمدتاً از دو مسیر اصلی صورت می‌پذیرد [۴۶، ۴۷]:

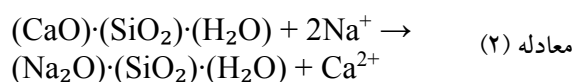
الف) حمله سولفاتی: یون‌های سولفات با واکنش با C-S-H و کلسیم هیدروکسید موجود، منجر به تشکیل اترینگایت و ژپس می‌گردند (معادله (۱)).



ب) تبادل کاتیونی: یون‌های سدیم و منیزیم موجود در آب دریا با کلسیم در ساختار C-S-H جایگزین می‌شوند که منجر به کاهش

نسبت Ca/Si و در نتیجه ضعیف ساختار مقاومتی می‌گردد

(معادله (۲)).

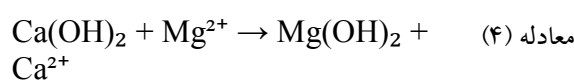


کلسیم هیدروکسید (CH) در محیط دریایی از سه مسیر زیر دچار تخریب می‌شود [۴۶-۴۸]:

الف) واکنش با کلریدها: تشکیل کلرید کلسیم محلول (معادله (۳)).



ب) واکنش با منیزیم: منجر به تشکیل بروسیت نامحلول می‌شود (معادله (۴)).



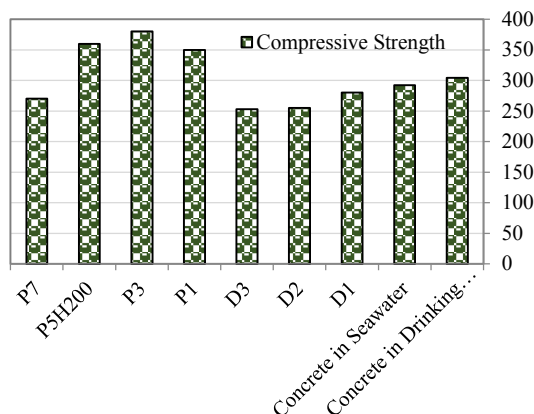
ج) انحلال مستقیم: انحلال و شستشوی CH در مناطق با جریان آب بالا (معادله (۵)).



این مکانیسم‌های تخریب منجر به کاهش چسبندگی بین ذرات سیمانی و افزایش تخلخل می‌شود.

در نمونه‌های دلفین اسکله، با مصرف محصولات هیدراتاسیون مانند CH و C-S-H تأثیر محیط سولفاتی و کلریدی آب دریا تشدید می‌شود. بنابراین انحلال محصولات هیدراتاسیون و تشکیل نمک فریدل، ساختار سوزنی شکل اترینگایت و کریستال‌های سنگ گچ در اثر حملات سولفات، کلرید و اسید درون آب دریای اسکله رخ داده است که با نتایج تصاویر SEM در شکل (۸)

نتایج حاصل از بررسی مقاومت فشاری با مشاهدات احسان دوست و زارع [۲۱] و تنگ تکابی و همکاران [۲۲] همخوانی مناسبی دارد.



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های گرفته‌شده از اسکله مورد مطالعه

۴- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده بر روی اسکله مورد مطالعه در ناحیه دریایی خلیج فارس نشان می‌دهد که عوامل محیطی نظیر شرایط جوی (منطقه اتمسفریک-پاشش)، کیفیت سطح بتن و حضور عوامل زیستی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تخریب و گسترش آسیب‌های سازه‌ای دارند. نتایج آزمایش‌ها با مشاهدات میدانی همخوانی مطلوبی داشته و صحت داده‌های آزمایشگاهی را تأیید می‌کند. از جمله مهم‌ترین یافته‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱. نتایج حاصل از داده‌های آزمایشگاهی دلفین‌های نشان می‌دهد، تا عمق ۱۰۰ میلی‌متری بتن، غلظت یون کلرید به‌مراتب بالاتر از آستانه خوردگی (۰/۰۷ درصد وزنی نسبت به بتن) است. این امر بیانگر نفوذ عمیق و شدید کلرید به داخل بتن و ضعف جدی در طرح اختلاط، تراکم، عمل‌آوری و کیفیت بتن اولیه است. شکاف‌ها و ترک‌های مشاهده‌شده تا این عمق نیز مؤید وجود خوردگی در آرماتورهاست.

۲. به‌طور کلی غلظت یون کلرید آزاد در سطوح نزدیک به سطح بتن بالا بوده و با افزایش عمق، این غلظت کاهش می‌یابد. بیشینه مقدار کلرید آزاد در دلفین اسکله و در عمق حدود ۵ میلی‌متر، معادل ۰/۴۴ درصد وزنی است که از آستانه خوردگی بیشتر است و می‌تواند منجر به شروع

هماهنگ است و منجر به تجزیه ساختار بتن می‌شود، نتیجه این آثار تخریبی از بین رفتن نانو ساختار C-S-H و ساختار CH است که بدین علت باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه بتنی شده است.

نفوذ یون کلرید، به‌ویژه در محیط‌های مرطوب و دریایی، عامل مؤثری در تخریب بتن و کاهش مقاومت فشاری آن است. این امر در دلفین‌های اسکله که بیشتر در معرض شرایط اتمسفریک پاشش هستند، اما به‌طور غیرمستقیم تحت تأثیر آب دریا قرار دارند، به‌وضوح قابل مشاهده است. به‌طور کلی، نفوذ کلرید به عمق بتن از طریق تخلخل‌های موئین و ضعف در کیفیت بتن، به‌ویژه در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان بالا یا تراکم نامناسب، موجب کاهش مقاومت فشاری و افزایش آسیب‌پذیری سازه در برابر خوردگی آرماتورها می‌شود. این نکته بر لزوم بهبود کیفیت بتن و استفاده از راهکارهای مقابله با نفوذ کلرید تأکید دارد.

بررسی داده‌های مقاومت فشاری شمع‌های نشان می‌دهد که میان نفوذ یون کلرید و کیفیت بتن رابطه معناداری وجود دارد. نمونه P1 با مقاومت فشاری ۳۵۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، در تمام اعماق مورد بررسی دارای مقادیر یون کلرید کمتر از حد بحرانی بوده و سطح آن با صدف دریایی پوشیده شده است. این موضوع بیانگر آن است که پوشش صدفی، با کاهش نفوذ یون کلرید به درون بتن، شرایط خوردگی را محدود کرده و در نتیجه باعث حفظ کیفیت و مقاومت بتن در بلندمدت شده است. نمونه P5H200 نیز که در عمق ۲۰۰ سانتی‌متری و دارای پوشش صدفی بوده، با مقاومت فشاری ۳۶۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، نشان‌دهنده رفتار مشابهی در برابر نفوذ کلرید و حفظ خواص مکانیکی بتن است.

در مقابل، نمونه P7 که فاقد پوشش صدفی بوده و مقادیر یون کلرید آن در تمام اعماق از مقدار بحرانی فراتر رفته، دارای پایین‌ترین مقاومت فشاری معادل ۲۷۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. این کاهش مقاومت می‌تواند ناشی از نفوذ بالای کلرید و شروع فرایند خوردگی در نواحی نزدیک به سطح و عمق‌های میانی باشد. با توجه به این تحلیل، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش نفوذ کلرید، به‌ویژه از طریق ایجاد موانع طبیعی مانند صدف‌های دریایی یا رعایت ضخامت کافی پوشش بتن، نقش مؤثری در حفظ مقاومت فشاری بتن شمع‌های دریایی دارد و می‌تواند به‌عنوان راهکاری عملی در طراحی و نگهداری سازه‌های دریایی مدنظر قرار گیرد.

دریایی ناسازگار است و نیازمند اقدامات اصلاحی بنیادین در طراحی، مواد و نگهداشت سازه‌های آبی مشابه می‌باشد.

۸. تحلیل پروفیل‌های یون کلرید نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که از بخش‌های دارای پوشش صدف دریایی برداشت شده‌اند (مانند P1 و P4)، در تمامی اعماق (تا ۱۰۸ میلی‌متر)، مقادیر کلرید کمتر از حد بحرانی دارند. به عنوان مثال، در نمونه P1، مقدار یون کلرید در عمق ۵ میلی‌متر تنها ۰/۰۴۶ درصد است که به مراتب کمتر از مقدار ۰/۵۱۸ درصد در نمونه بدون صدف مانند P7 در همان عمق است. این موضوع حاکی از نقش مؤثر پوشش صدف به عنوان یک لایه حفاظتی طبیعی در کاهش نفوذ یون کلرید و در نتیجه افزایش دوام بتن در محیط‌های دریایی است.

۵- مراجع

- [1] Lee, T., D. Kim, S. Cho, and M.O. Kim, *Advancements in Surface Coatings and Inspection Technologies for Extending the Service Life of Concrete Structures in Marine Environments: A Critical Review*. Buildings, 2025. 15(3): p. 304.
- [2] Zhang, J. Application of ultra-high performance concrete in the marine environment. in *E3S Web of Conferences*. 2025. EDP Sciences.
- [3] Zhao, R., C. Li, and X. Guan, *Advances in modeling surface chloride concentrations in concrete serving in the marine environment: A mini review*. Buildings, 2024. 14(6): p. 1879.
- [4] Amiri, M., M. Mandegari, and H. Karimi, *Microstructural Investigation of Compressive Strength and Permeability of Concrete Containing Fly Ash in the Marine Environment of the Persian Gulf*. Civil Engineering Infrastructures Journal, 2024. 57(2): p. 323-336.
- [5] Ghoddousi, P., Literature review on Coefficient of Chloride diffusion in Concrete and Propose the novel model. *Concrete research*, 2020. 13(2): p. 19-30.
- [6] Junior, J.R.H., C.E. Balestra, and R.A. Medeiros-Junior, Comparison of test methods to determine resistance to chloride penetration in concrete: Sensitivity to the effect of fly ash. *Construction and Building Materials*, 2021. 277: p. 122265.
- [7] Bertolini, L., B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, and R.B. Polder, *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. 2013: John Wiley & Sons.
- [8] Bu, Y., D. Luo, and J. Weiss, Using Fick's

خوردگی در آرماتورها شود. این کاهش تدریجی کلرید در عمق، با پدیده نفوذ از سطح به سمت داخل هم‌خوانی دارد. ۳. با وجود اینکه دلفین‌ها عمدتاً در ناحیه اتمسفریک قرار داشته و کمتر در معرض پاشش مستقیم آب دریا بوده‌اند، مقدار نفوذ کلرید بسیار بالا است که این امر دلالت بر نقش رطوبت نسبی بالا و تبادل نمک‌های موجود در هوای مرطوب با سطح بتن دارد که فرایند نفوذ سطحی را تقویت می‌نماید که مؤید حساسیت شدید این سازه به نفوذ یون کلرید است.

۴. یون کلرید، به عنوان یکی از مهاجم‌ترین عوامل در محیط‌های خورنده، با واکنش با فاز C_3A و سایر ترکیبات سیمانی، ساختار پیوسته ژل/نانو ساختار C-S-H را تضعیف کرده و باعث افزایش نفوذپذیری و افت دوام در بتن می‌شود. تحلیل‌های ریزساختاری (SEM/EDX) حاکی از آن است که حضور یون کلرید منجر به تشکیل فازهای ثانویه نظیر نمک فریدل (Friedel's salt)، اترینگایت ثانویه و محصولات کریستالی ناپایدار می‌شود که در منافذ خمیر سیمان رسوب کرده، این فازها ضمن افزایش حجم، منجر به تورق، ریزترک و تضعیف چسبندگی داخلی بتن می‌شوند که با افت عملکرد مکانیکی بتن همبستگی دارد.

۵. واکنش کلسیم هیدروکسید (CH) با CO_2 محیطی منجر به تشکیل $CaCO_3$ و افت pH در اطراف آرماتورها شده که حفاظت قلیایی طبیعی بتن را از بین می‌برد. ترکیب این پدیده با وجود کلرید، خطر خوردگی را به شدت افزایش می‌دهد.

۶. نتایج آزمون EDX نشان می‌دهد که درصد وزنی Ca در عمق کمتر، کاهش یافته است که بیانگر شسته شدن کلسیم از فاز C-S-H و تخریب ساختار اصلی خمیر سیمانی است. کاهش نسبت Ca/Si با پیشرفت خوردگی، گواهی بر از بین رفتن انسجام نانو ساختار بتن در مناطق آلوده است.

۷. ترکیب داده‌های ریزساختاری و شیمیایی به وضوح نشان می‌دهد که بتن دلفین‌های اسکله مورد مطالعه دارای نفوذپذیری بالا، ناپایداری فازهای هیدراته، افت قلیائیت و ریزترک‌های توسعه یافته است که همگی در کنار یکدیگر منجر به ایجاد شرایط بحرانی برای خوردگی آرماتورها شده‌اند. وضعیت فعلی بتن با استانداردهای دوام در محیط

- properties and chloride ion penetration resistance of Ultra-high Ductile Cementitious Composites (UHDCC). *Journal of Building Engineering*, 2025: p. 112765.
- [20] Ganjian, E. and H.S. Pouya, The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 2009. 23(2): p. 644-652.
- [21] Ehsan dost and Zare, Long-term effect of chloride ion penetration on concrete durability in the Persian Gulf coasts. *Specialized Quarterly Journal of Water Engineering*, 2022. 10(3).
- [22] Tangtakabi, A., M. Ramesht, A. Pahlaviani, and T. Pourrostam, Investigation on Chloride-Induced Corrosion Reduction Strategies for Offshore Reinforced Concrete Structures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2024. 48(3): p. 1245-1260.
- [23] ASTM, C33, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA (2006). .
- [24] ASTM, C188-17, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
- [25] Mehta, P.K. and P.J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 2014: McGraw-Hill Education.
- [26] ASTM, C42/C42M-20, Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA (2020). .
- [27] ASTM, C39, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA (2010). .
- [28] ASTM, C192/C192M-19 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.
- [29] NT BUILD 443, Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration. 1995.
- [30] ASTM, C114, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.
- [31] ASTM, C1152, Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.
- [32] Topic 9: National Building Regulations (Fifth Edition), Design and construction of reinforced concrete buildings, National Building Regulations Office, (2020).
- [33] Ortiz-Salcedo, B.H., J.M. Paris, C.C. Ferraro, R. Minkara, and K.A. Riding, Evaluation of chlorides in fly ash for use in concrete. *Cleaner Materials*, 2022. 5: p. 100098.
- [34] Mahi, M.S.H. and T.A. Ridoy, Corrosion Mechanisms in Reinforced Concrete: Causes, Effects, and Sustainable Mitigation Strategies. second law and Nernst–Planck approach in prediction of chloride ingress in concrete materials. *Advances in Civil Engineering Materials*, 2014. 3(1): p. 566-585.
- [9] Jin, M., S. Gao, L. Jiang, H. Chu, M. Lu, and F.F. Zhi, Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation. *Corrosion science*, 2018. 138: p. 42-53.
- [10] Honglei, C., J. Zuquan, Z. Tiejun, W. Benzhen, L. Zhe, and L. Jian, Capillary suction induced water absorption and chloride transport in non-saturated concrete: The influence of humidity, mineral admixtures and sulfate ions. *Construction and Building Materials*, 2020. 236: p. 117581.
- [11] Chiarella, G., Effect of mechanical cracking on the corrosion of steel reinforcement in concrete. 2023, Politecnico di Torino.
- [12] Marques, P.F., A. Costa, and F. Lanata, Service life of RC structures: chloride induced corrosion: prescriptive versus performance-based methodologies. *Materials and structures*, 2012. 45: p. 277-296.
- [13] Angst, U., B. Elsener, C.K. Larsen, and Ø. Vennesland, Critical chloride content in reinforced concrete—A review. *Cement and concrete research*, 2009. 39(12): p. 1122-1138.
- [14] Ann, K.Y. and H.-W. Song, Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete. *Corrosion science*, 2007. 49(11): p. 4113-4133.
- [15] Mohammad Hossein Tadayin, M.T., Mohammad Shakarchizadeh, Mehdi Valipour, Estimation of critical chloride ion concentration for corrosion initiation in concrete with different water-to-cement ratios under tidal conditions in the Persian Gulf. The 8th Annual National Iranian Concrete Conference, 2016.
- [16] Wang, Y., C. Liu, Y. Tan, Y. Wang, and Q. Li, Chloride binding capacity of green concrete mixed with fly ash or coal gangue in the marine environment. *Construction and Building Materials*, 2020. 242: p. 118006.
- [17] Yuan, Q., C. Shi, G. De Schutter, K. Audenaert, and D. Deng, Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment—a review. *Construction and building materials*, 2009. 23(1): p. 1-13.
- [18] Nie, Q., C. Zhou, X. Shu, Q. He, and B. Huang, Chemical, mechanical, and durability properties of concrete with local mineral admixtures under sulfate environment in Northwest China. *Materials*, 2014. 7(5): p. 3772-3785.
- [19] Sui, X., J. Yang, Y. Huang, C. Lu, Q. Wang, K. Zhuang, Y. Xu, Y. Zhou, and J. Cai, Study on the effect of silica fume dosage on the mechanical

blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*, 2002. 24(3-4): p. 305-316.

- Current Problems in Research, 2025. 1(1): p. 52-66.
- [35] Melchers, R.E. and P.J. Richardson, Carbonation, neutralization, and reinforcement corrosion for concrete in long-term atmospheric exposures. *Corrosion*, 2023. 79(4): p. 395-404.
- [36] Amiri, M. and P. Tanideh, Microstructural Assessment of the Effect of Sulfate Environments on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete. *Concrete Research*, 2020. 13(2): p. 45-57.
- [37] Amiri, M. and P. Tanideh, Microstructural Assessment of the Effect of Sulfate Environments on the Mechanical Properties of Concrete. *MODARES CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 2020. 19(6): p. 1-14.
- [38] Khatib, J.M. and P. Mangat, Influence of high-temperature and low-humidity curing on chloride penetration in blended cement concrete. *Cement and concrete research*, 2002. 32(11): p. 1743-1753.
- [39] Iwanami, M., H. Yokota, H. Hamada, T. Yamaji, and H. Watanabe. Can marine fouling organisms extend the life of concrete structures? in *IABSE Symposium Report*. 2002. International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [40] MARUYA, T., M. IWANAMI, E. SAKAI, M. MASHIMO, and H. HAMADA, Durability enhancement of RC structures covered with a dense layer formed by marine aquatic fouling organisms. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2003. 2003(739): p. 61-74.
- [41] Kawabata, Y., E. Kato, and M. Iwanami, Enhanced long-term resistance of concrete with marine sessile organisms to chloride ion penetration. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2012. 10(4): p. 151-159.
- [42] Lv, J., M. Wang, X. Hu, Z. Cao, and H. Ba, Experimental study on the durability and microstructure of marine concrete covered with barnacles. *Construction and Building Materials*, 2022. 317: p. 125900.
- [43] Ramezani pour and Poukhorshidi, Code of practice for concrete durability in the Persian Gulf and Omman Sea. Research Report BHRC Publication No.S-428. Building and Housing Research Center., 2005.
- [44] Standard, A. Building code requirements for structural concrete (ACI 318). in American Concrete Institute. 2011.
- [45] En, B. 1-1: 2004. in Eurocode. 1992.
- [46] Taylor, H., *Cement Chemistry*, 2nd ed Thomas Telford. 1997, London.
- [47] Mehta, P.K. and P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. (No Title), 2006.
- [48] Al-Amoudi, O.S.B., *Attack on plain and*

Field and Microstructural Investigation of the Vulnerability of Reinforced Concrete Wharves to Chloride Ion Penetration in the Marine Environment of the Persian Gulf

M. Amiri *

Associate Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

E. Bahrami Goorbandi

Master Student, Civil Engineering, Islamic Azad University, Bandar Abbas Branch, Iran.

Abstract

Reinforced concrete structures in marine environments, particularly along the Persian Gulf coasts, are susceptible to gradual deterioration caused by chloride ion penetration and carbonation. The hot and humid climate, high evaporation rates, direct seawater splash, and industrial pollutants create a highly aggressive environment for these structures. The present study aims to investigate the field performance and microstructural vulnerability of reinforced concrete wharves through a case study of the Bandar Abbas ports. To comprehensively analyze the degradation mechanisms, several tests were conducted on both field-extracted and laboratory-prepared specimens, including chloride ion penetration profiling, scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and compressive strength testing. The results indicate that chloride ion ingress is the primary factor responsible for the premature deterioration of marine structures in the Persian Gulf. These ions contribute to the formation of unstable compounds such as Friedel's salt and weaken the C-S-H gel/nanostructure, directly leading to increased porosity, reduced microstructural integrity, and loss of mechanical strength. SEM images and EDX elemental analyses revealed high concentrations of chloride ions, microcracks, and damage to the interfacial transition zone (ITZ) between the cement paste and aggregates. Chloride penetration profiles showed ion concentrations exceeding the critical corrosion threshold at depths greater than 100 mm, indicating deficiencies in mix design, compaction, and curing practices. Moreover, the results demonstrated that natural coverings such as marine shells and increased concrete cover thickness significantly reduce chloride ingress and play an effective protective role.

Keywords: Concrete degradation, wharf, aggressive environment, structural repair, chloride ion, Bandar Abbas.

* Corresponding Author: amirii@hormozgan.ac.ir

