

Laboratory Investigation of Factors Influencing Concrete Corrosion in Marine Conditions and the Effect of Petrochemical Industry Waste By-Products on Concrete Durability

Saman Akabar

Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

Abdolkarim Abbasi Dezfouli *

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

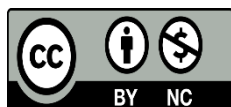
abbasihamid@hotmail.com

Keywords

corrosion,
concrete durability,
spent catalyst waste,
petrochemical industry,
electrical resistivity,
chloride ion penetration

Abstract

Given the environmental concerns and the necessity to reduce the consumption of natural resources in the construction industry, the use of waste materials as substitutes in concrete production has attracted significant attention. In this study, the effect of using spent catalyst waste — as a partial replacement for cement and aggregates — on the durability of concrete was investigated. The conducted experiments included measurements of concrete electrical resistivity and chloride ion penetration. The results indicated that replacing cement with spent catalyst powder up to %30 increased the electrical resistivity of concrete, while higher replacement levels reduced this property. Similarly, replacing coarse aggregates with catalyst waste up to %20 improved the electrical resistivity of concrete. Overall, the addition of catalyst waste increased the electrical resistivity of concrete by a factor of 1.3 to 2.7 and reduced chloride ion penetration. These findings highlight the effective role of catalyst waste in enhancing durability and reducing the corrosion potential of concrete.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می باشد).

* Corresponding Author

بررسی آزمایشگاهی عوامل مؤثر بر خوردگی بتن در شرایط دریایی و تأثیر استفاده از پسماندهای تولید شده در صنایع پتروشیمی بر دوام بتن

سامان اکابر

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

عبدالکریم عباسی دزفولی *

دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

abbasihamid@hotmail.com

تاریخ پذیرش: ۰۵ خرداد ۱۴۰۴

تاریخ دریافت: ۱۲ بهمن ۱۴۰۳

چکیده

باتوجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و ضرورت کاهش مصرف منابع طبیعی در صنعت ساخت‌وساز، استفاده از مواد ضایعاتی به‌عنوان جایگزین در تولید بتن موردتوجه قرار گرفته است. در این تحقیق، اثر استفاده از پسماند کاتالیستی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و سنگ‌دانه مصرفی، بر دوام بتن موردبررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های انجام شده شامل سنجش مقاومت الکتریکی ویژه بتن و میزان نفوذ یون کلرید بوده است. نتایج نشان داد که جایگزینی پودر کاتالیستی به‌جای سیمان تا ۳۰ درصد منجر به افزایش مقاومت الکتریکی بتن می‌شود، درحالی‌که مقادیر بالاتر باعث کاهش این خاصیت می‌گردد. همچنین جایگزینی سنگ‌دانه کاتالیستی به‌جای شن تا ۲۰ درصد باعث بهبود مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده است. به‌طورکلی، افزودن پسماندهای کاتالیستی مقاومت الکتریکی بتن را بین $1/3$ تا $2/7$ برابر افزایش داده و نفوذ یون کلرید را کاهش داده است. این یافته‌ها حاکی از نقش مؤثر پسماندهای کاتالیستی در افزایش دوام و کاهش پتانسیل خوردگی بتن می‌باشد.

واژگان کلیدی: خوردگی، دوام بتن، پسماند کاتالیستی، صنایع پتروشیمی، مقاومت الکتریکی ویژه، نفوذ یون کلرید

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه و بیان مسئله

در سال‌های اخیر تعداد زیادی از سازه‌های بتنی دریایی در کشورهای مختلف دنیا از جمله ایران به دلیل عدم رعایت اصول پایایی بتن دچار آسیب‌دیدگی و یا خرابی زودرس شده‌اند که خسارت ناشی از خوردگی سازه‌های بتنی دریایی در دنیا قابل ملاحظه است. خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی دریایی اصلی‌ترین علت فرسایش است و در صورتی که بتوانیم میلگردهای موجود در بتن مسلح را در برابر خوردگی محافظت نماییم، عمر سازه‌های بتنی افزایش می‌یابد. هزینه حفاظت میلگرد در مقایسه با هزینه ساخت یک سازه بتنی بسیار ناچیز است که با صرف این هزینه اندک می‌توان از هدر رفتن سرمایه‌های عظیم جلوگیری نمود.

در برآوردهای به عمل آمده مشاهده می‌گردد، هزینه‌های سالیانه مربوط به سیل‌ها، طوفان‌ها، آتش‌سوزی‌ها، رعدوبرق و زمین‌لرزه‌ها، همواره کمتر از هزینه سالیانه خوردگی برآورد شده است. طبق بررسی‌های انجام شده، هزینه سالیانه خوردگی فلزات، در ایالات متحده بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار برآورد شده است، که حدود ۲۰ میلیارد دلار از هزینه فوق‌الذکر را می‌توان با اعمال بهترین روش‌های موجود برای مبارزه با خوردگی صرفه‌جویی نمود.

اگر چه خوردگی اجتناب‌ناپذیر است؛ ولی هزینه‌های آن را می‌توان به مقدار زیادی کاهش داد. طراحی خوب، انتخاب صحیح مواد، هزینه‌های خوردگی را کاهش می‌دهد. یک برنامه صحیح تعمیر و نگهداری با استفاده از پوشش‌های مناسب (مانند رنگ‌آمیزی)، استفاده از نفوذگرها آندهای فداشونده چندین برابر مخارج خوردگی را کاهش خواهد داد.

در حل مسائل خوردگی می‌بایست از روش‌هایی بهره گرفت که کمترین هزینه و بیشترین بهره‌وری و عمر مفید را برای سازه در برداشته باشد. باتوجه به قرارگیری سازه‌های دریایی در محیط‌های شدیداً خورنده و شرایط نامساعد در این مناطق، وسعت تخریب سازه‌های دریایی و تعمیر آنها کاملاً قابل ملاحظه است و رسیدن به پاره‌ای از دستاوردها در بتن‌های با مقاومت زیاد و با نفوذپذیری کم می‌تواند در مقابل خوردگی دوام داشته باشند.

شرایط حاکم بر سازه‌های دریایی، در حاشیه خلیج فارس چه از نظر املاح موجود در آب دریا و چه از نظر شرایط اقلیمی حاکم بر آن، این محیط را به یکی از مهاجم‌ترین محیط‌های دریایی از دیدگاه خوردگی آرماتور در سازه‌های بتنی مبدل ساخته است. خرابی‌های زودرس سازه‌های بتنی منطقه خلیج فارس در اثر خوردگی آرماتورهای مدفون، تاکنون هزینه‌های تعمیراتی زیادی را به کشورهای منطقه تحمیل نموده است که یک مشکل جدی و مهم از نظر اقتصادی به شمار می‌رود. به همین علت استقبال روزافزون برای شناخت علل خوردگی آرماتور در بتن، راه‌های پیشگیری از آن، عوامل ایجادکننده مقاومت زیاد و دوام بتن نشانه اهمیت موضوع است [۱].

خرابی سازه‌های بتنی دریایی در اثر خوردگی آرماتور، تحت تأثیر نفوذ یون‌های کلراید، یکی از رایج‌ترین عوامل تخریب سازه‌های بتن مسلح

است. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت گرفته است. مهم‌ترین پدیده در بحث خرابی‌ها که سازه‌های بتنی را در محیط دریایی تهدید می‌کند، پدیده خوردگی است که به علت وجود شرایط نامساعد در این مناطق، نیاز به تعمیر و ترمیم و تعیین عمر بهره‌برداری سازه‌ها را آشکار می‌سازد [۲].

خوردگی به فساد یک جسم جامد به علت اندرکنش آن با محیط اطلاق می‌گردد، به عبارت دیگر خوردگی تخریب ناشی از فعل‌وانفعالات ناخواسته شیمیایی یا الکتروشیمیایی است که از سطح جسم شروع می‌شود. خوردگی می‌تواند بر روی عمر تجهیزات، بهره‌برداری از آنها، بازگشت سرمایه، کیفیت محصولات تولیدی و موارد دیگر مؤثر باشد. از طرف دیگر خسارت‌های ناشی از خوردگی می‌تواند اثرات مستقیم و یا غیرمستقیمی را نیز در برداشته باشد. برخی از خسارت‌های مستقیم خوردگی عبارت‌اند از تخریب یا انهدام سازه‌های بتن‌آرمه (به عنوان مثال تخریب پل‌ها و اسکله‌ها، انواع سازه‌های دریایی) در صنایع گوناگون. سازه‌های بتن‌آرمه در دریا در معرض آسیب‌دیدگی شیمیایی و الکتروشیمیایی قرار دارند، مهم‌ترین عوامل خوردگی، در اثر دو پدیده کرناسیون هوا و نفوذ کلراید است. در اثر خوردگی آرماتور و ترک خوردگی و متلاشی شدن بتن، عمر مفید سازه‌های بتنی دریایی در حد قابل توجهی کاهش می‌یابد، این نوع آسیب‌دیدگی در منطقه جزر و مد بیشتر مشاهده می‌شود، زیرا در منطقه جزر و مد به دلیل تر و خشک شدن، نفوذ کلراید به داخل بتن تشدید می‌گردد و در نتیجه شدت خوردگی افزایش می‌یابد [۳ و ۴].

طبق تعریف کمیته ۲۰۱ انستیتوی بتن آمریکا (ACI)، دوام بتن برای مقابله با تهاجم شیمیایی، سایش و یا هر فرآیندی که به آسیب دیدگی می‌انجامد، گفته می‌شود. بنابراین بتن پایا بتنی است که تا حدود زیادی شکل اولیه و کیفیت و قابلیت خدمت رسانی خود را در شرایط محیطی حاکم حفظ نماید [۴].

باتوجه به اینکه اکثر سازه‌های دریایی معمولاً در مناطق گرم و مرطوب و محیط‌های شدیداً خورنده ساخته شده‌اند و استفاده از آنها روزبه‌روز، در حال افزایش است. در نتیجه شناخت عوامل خوردگی و پیشنهاد راهکارهای علمی و اجرایی در کاهش آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، از مهم‌ترین این راهکارها، رسیدن به طرح اختلاط مناسب با استفاده از پوزولان‌ها به منظور کاهش پتانسیل خوردگی و افزایش مقاومت الکتریکی بتن و علاوه بر این استفاده از بازدارنده‌های خوردگی در بتن مورد توجه است.

محاسبات مربوط به هزینه‌های خوردگی بر اساس روش‌های معمول در کشورهای صنعتی جهان، درصدی از تولید ناخالص ملی است. طبق این اصول خسارات خوردگی در ایران برای سال ۱۳۷۹ معادل ۲/۷ میلیارد تومان، بر اساس ۵ درصد از تولید ناخالص ملی برآورد گردیده است. البته ذکر این نکته ضروریست که پیدا کردن رقم دقیق خسارت خوردگی، نیاز به آنالیز اطلاعات و ارزیابی آنها دارد. در کشورهای صنعتی پیشرفته که آمار و اطلاعات لازم را در این زمینه دارا می‌باشند، محدوده

بروز Impingement خوردگی به شدت تشدید می شود (برای مثال خوردگی حفره‌ای (Pitting) شدید بر روی ایمپلر پمپها و پروانه‌ها).
PH - آب دریا: میزان PH آب دریا در میزان خوردگی تأثیر داشته و در PH بالا بین ۱۰ تا ۱۲ (حالت قلیایی) حداقل خوردگی حاصل می گردد.

- ترکیبات آب دریا: باتوجه به شرایط رودخانه‌ها، دریاها و اقیانوس‌ها، آب‌ها می‌توانند دارای ترکیبات و خصوصیات متفاوتی باشند.

باتوجه به اینکه اکثر سازه‌های دریایی معمولاً در مناطق گرم و مرطوب و محیط‌های شدیداً خورنده ساخته شده‌اند و استفاده از آنها روبه‌روز، در حال افزایش است. در نتیجه شناخت عوامل خوردگی و پیشنهاد راهکارهای علمی و اجرایی در کاهش آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، از مهم‌ترین این راهکارها، رسیدن به طرح اختلاط مناسب با استفاده از پوزولان‌ها به منظور کاهش پتانسیل خوردگی و افزایش مقاومت الکتریکی بتن و علاوه بر این استفاده از بازدارنده‌های خوردگی در بتن مورد توجه است.

یکی از منطقه‌های مهم دربردارنده صنایع پتروشیمی در ایران منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس در عسلویه است که مجتمع‌های پتروشیمی زیادی را در خود جای داده است. وجود صنایع گوناگون پتروشیمی در منطقه ویژه اقتصادی انرژی پارس سبب شده است که حجم زیادی از این پسماندها در این منطقه جمع شود و از این رو لزوم بیان یک راهکار مدیریتی مناسب برای این نوع پسماندها بیش از پیش احساس می شود.

دو مورد از مهم‌ترین پسماندهای تولیدی در مجتمع‌های پتروشیمی، پسماند مولکولارسیو و پسماند کاتالیست است که بر اساس آمار موجود، به طور میانگین و طی ۲۵ سال آینده، سالانه ۳۰۰۰ تن پسماند مولکولارسیو و ۲۰۰۰ تن پسماند کاتالیست در این منطقه تولید می شود. ماده اولیه این پسماندها، زئولیت مصنوعی بوده و تحقیقات قبلی نشان داده است که این ماده خواص پوزولانی بالایی دارد. از آنجایی که تأثیر مثبت پوزولان‌ها در بتن طی سال‌های اخیر اثبات شده، لذا در این تحقیق به بررسی اثر این مواد ضایعاتی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی، بر دوام بتن پرداخته خواهد شد. در صورتی که استفاده از این مواد ضایعاتی باعث بهبود خواص بتن شود و یا حتی اگر باعث کاهش چشمگیر خواص بتن نشود می‌توان با استفاده از این ماده ضایعاتی به محیط‌زیست کمک نموده و از دپو کردن بیش از اندازه این ماده مضر برای محیط‌زیست جلوگیری نمود.

۲- خوردگی بتن

امروز توجه به مبحث دوام در سازه‌های بتنی اهمیت بسیاری یافته است. یکی از شایع‌ترین موارد تخریب بتن، خوردگی بتن است. بسیاری از کارشناسان و متخصصین اذعان دارند که سواحل خلیج فارس به لحاظ شرایط منحصر به فرد دارای شدیدترین پتانسیل در خوردگی بتن است. از جمله این موارد می‌توان به رطوبت بالا، دمای بالا، یون کلر و سولفات موجود در محیط اشاره کرد. از این رو توجه به مبحث خوردگی و

۳ تا ۵ درصد تولید ناخالص ملی را به عنوان الگویی مناسب ارایه نموده‌اند.



شکل ۱- خوردگی اعضای بتنی یک سازه دریایی

از آنجایی که محیط دریا به دلیل وجود رطوبت زیاد، گرما، نمک محلول در آب، شرایط بسیار خورنده‌ای را از نقطه نظر خوردگی ایجاد می‌نماید، اکثر سازه‌های دریایی در معرض این پدیده نامطلوب قرار گرفته و به شدت از بین می‌روند؛ بنابراین باتوجه به این مطلب که بخش عمده مصالح بکار رفته در کشتی‌ها، سکوها، نفتی و اصولاً سازه‌های دریایی از فولاد و یا بتن مسلح هستند. شناخت دقیق این پدیده و روش‌های کنترل و محافظت از سازه‌های در معرض خوردگی، امر مهم و حیاتی خواهد بود.

خوردگی فلزات در محیط‌های آبی یک مکانیزم الکتروشیمیایی است. هنگامی که خوردگی برای یک فلز اتفاق می‌افتد، سطح فلز خورده شده به صورت یک الکتروود مرکب عمل کرده و واکنش‌های آندی و کاتدی در آنجا صورت می‌گیرند. در محل‌های آندی اتم‌های فلز به صورت یون‌های مثبت درآمده و به داخل محلول می‌روند (بنام اکسیداسیون آندی). اما الکترون‌های آزاد شده، با جریان یافتن از طریق فلز به محل‌های کاتدی انتقال یافته و در آنجا با یون‌های هیدروژن یا اکسیژن حل می‌شوند و سپس واکنش‌های کاتدی انجام می‌دهند (بنام احیاء کاتدی). فرایند مذکور با حرکت یون‌ها و فاز آبی یا الکترولیت تکمیل شده و با انجام واکنش بین یون‌های مثبت و منفی محصولات خوردگی ایجاد می‌گردد. محصولات خوردگی (Corrosion Product) می‌توانند به صورت محلول (مانند کلرور آهن) و یا غیر محلول (مانند زنگ آهن، اکسید آهن، آهن هیدراته شده) ظاهر شوند.

به طور کلی قسمت‌های اساسی این فرایند به صورت زیر خلاصه می‌شوند:

الف- فلز در محل آندی اکسید شده و به صورت یون مثبت وارد محلول می‌شود.

ب- یک یا چند جزء احیاء کننده در واکنش‌های کاتدی شرکت کرده و الکترون‌های آزاد شده را مصرف می‌نمایند.

ج- الکترولیت موجود بین آند و کاتد به حرکت یون‌های مثبت و منفی کمک می‌نماید.

عوامل مؤثر بر خوردگی در سازه‌های دریایی شامل موارد زیر هستند:

- دمای آب: افزایش دمای آب باعث تشدید چشمگیر خوردگی می‌شود. یکی از دلایل خوردگی شدید در خلیج فارس همین عامل است.

- سرعت جریان آب: سرعت جریان آب باعث افزایش میزان جدا شدن فلز شده و از طرفی در صورت ازدیاد چشمگیر افزایش سرعت آب و

راهکارهای مقابله با آن در سواحل خلیج فارس از منظر اقتصادی، بهره‌برداری و دوام از اهمیت بالایی برخوردار است.

۱-۲- عوامل مؤثر در خوردگی بتن

زمان شروع خوردگی، شدت خوردگی و سن تخریب بتن ناشی از خوردگی میلگردها به عوامل مختلفی بستگی دارد که اهم آنها در زیر ملاحظه می‌گردد:

نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر (به‌ویژه بتن سطحی در منطقه پوشش روی میلگردها)

ضخامت بتن روی میلگردها

وجود درزها و ترک‌ها در پوشش بتن روی میلگردها

نوع میلگردها و شرایط سطحی آن

پوشش سطحی روی بتن

پوشش حفاظتی روی میلگردها

شرایط محیطی (دما، اکسیژن، رطوبت، میزان یون کلر، وزش باد، تری و خشکی مکرر و...)

وجود یون کلر در بتن اولیه و مصالح مصرفی

تدابیر حفاظت کاتدی

در اجرای یک قطعه بتنی می‌توان به نحوی عمل نمود که از خوردگی زودرس میلگردها جلوگیری کرد و به عبارتی شروع خوردگی را به تأخیر انداخت و شدت (آهنگ) خوردگی را کند نمود. همچنین با انجام برخی اقدامات ممکن است باعث تسریع در خوردگی و کاهش زمان شروع فعالیت خوردگی شد.

۳- پسماندهای کاتالیستی

ضایعات کاتالیست پتروشیمی، به موادی گفته می‌شود که پس از استفاده از کاتالیست‌های پتروشیمی، باقی می‌مانند. این ضایعات، معمولاً شامل کاتالیست‌های پلاتین، رودیوم و پالادیوم، همراه با سایر مواد غیرفلزی، مانند خاک، شن و ماسه، هستند. کاتالیزورها، موادی هستند که می‌توانند سرعت واکنش‌های شیمیایی را افزایش دهند. این مواد، در صنایع مختلف، از جمله صنایع پتروشیمی، صنایع خودروسازی و صنایع شیمیایی، استفاده می‌شوند.

در صنایع پتروشیمی، از کاتالیست‌ها برای انجام واکنش‌های مختلفی، از جمله تبدیل نفت خام به محصولات مختلف، مانند بنزین، گازوئیل و نفت سفید، استفاده می‌شود. کاتالیزورها، پس از استفاده، به تدریج فرسوده می‌شوند و خواص خود را از دست می‌دهند. در این صورت، کاتالیست‌ها باید تعویض شوند.

ضایعات کاتالیست پتروشیمی، حاوی مقادیر قابل توجهی از فلزات گرانبها، مانند پلاتین، رودیوم و پالادیوم، هستند. این فلزات، ارزش اقتصادی بالایی دارند. بازیافت ضایعات کاتالیست پتروشیمی، می‌تواند به استخراج این فلزات گرانبها کمک کند. این فرایند، یک فرایند اقتصادی و سودآور است. همچنین، می‌تواند به کاهش ضایعات و آلودگی محیط‌زیست نیز کمک کند.

روش‌های مختلفی برای بازیافت ضایعات کاتالیست پتروشیمی وجود دارد. یکی از روش‌های متداول، روش لیچینگ اسیدی است. در این روش، ضایعات کاتالیست، در یک محلول اسیدی، مانند اسید هیدروکلریک یا اسیدسولفوریک، حل می‌شوند. در این فرایند، فلزات گرانبها، از جمله پلاتین، رودیوم و پالادیوم، به‌صورت محلول در اسید قرار می‌گیرند. سپس، این فلزات می‌توانند با استفاده از روش‌های مختلفی، مانند رسوب‌گذاری، الکترولیز یا جذب سطحی، از محلول اسیدی جدا شوند.

۴- تاریخچه مطالعات پیشین

شروع یک تحقیق موفق، یقیناً شناخت دقیق تحقیق، نیازها و الزامات آن است. این شناخت با بررسی تاریخچه موضوع، سیر تحول و گسترش آن و در نهایت عوامل موفقیت شروع شده و نقطه انتهایی این شناخت، بررسی تحقیقات مشابه با موضوع و شناخت نقاط ضعف و قوت است. می‌توان بجای تجربه‌کردن و شکست‌خوردن، از حاصل تجربیات و تحقیقات گذشته دیگران استفاده کرد و به موفقیت رسید. باتوجه به اینکه ایران کشوری است که از شمال و جنوب به دریا ارتباط دارد، نیاز به ساخت سازه‌هایی دارد که بتوانند در محیط‌های دریایی دوام داشته باشند. از این‌رو استفاده از فناوری‌های نوین ساخت بتن از مسائل روز کشور بشمار می‌رود و هر روز ضرورت استفاده از آنها در کشور شدت بیشتری می‌گیرد. محافظت در برابر خوردگی میلگرد در محیط‌های دریایی نیازمند آگاهی و درک مکانیزم خوردگی و مصالح مصرفی است. راه‌های گوناگونی برای محافظت در برابر خوردگی وجود دارد که شامل اصلاح بتن مصرفی و یا میلگرد استفاده شده در بتن است که می‌تواند سرعت خوردگی را کاهش دهد. مطالعات پژوهشگران بیانگر این بود که مهارکننده‌های خوردگی برای ترمیم بتن مسلح بسیار موردتوجه هستند زیرا می‌توانند از طریق انتشار، در بتن حرکت کنند و در صورت تماس با فولاد، اطراف آنها یک‌لایه محافظ تشکیل دهند که با محافظت از آند و همچنین نواحی کاتدی از میلگردها، خوردگی را کاهش دهند [۵]. مطالعات محققین دیگر بیانگر این بود که ترمیم سازه‌های بتنی آسیب‌دیده در محیط‌های دریایی را می‌توان با استفاده از مهارکننده‌های خوردگی (MCI) انجام داد. مهارکننده‌های خوردگی شیمیایی یک روش جایگزین و مقرون‌به‌صرفه برای جلوگیری و کاهش در بروز خوردگی آرماتور یا دوام عمر مفید بتن است، زیرا مولکول‌های بازدارنده یک‌لایه محافظ یکپارچه روی بتن تشکیل می‌دهند که خوردگی را کاهش می‌دهد [۲]. محققان با انجام آزمایش‌هایی بر روی سه نوع بتن معمولی، بتن با میکروسیلیس، و بتن با متاکائولین، مقاومت این بتن‌ها را در مقابل نفوذ یون‌های کلراید مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در این پژوهش نشانگر افزایش مقاومت در صورت استفاده از متاکائولین و میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی است. همچنین نتایج آزمایش نفوذ سریع یون کلر در بتن (RCPT) نشانگر کاهش نفوذ یون کلر در بتن در صورت استفاده از متاکائولین و میکروسیلیس است [۶]. پژوهشگرانی عملکرد خمیر

تسهیل کیفیت یکنواخت‌تر در نمونه‌های ستون مؤثر است [۱۲]. مطالعه محققین باهدف حل مسائل دوام طولانی‌مدت در مورد خوردگی ناشی از کلرید سازه‌های بتنی انجام شد. در این تحقیق از روش‌های الکتروشیمیایی برای بررسی عملکرد ضدخوردگی بازدارنده‌های خوردگی مهاجر (MCI) استفاده شد. نتایج نشان داد که مقاومت به خوردگی میلگرد فولادی با افزودن بازدارنده تا حد زیادی بهبود یافته است. در همین حال، بازدارنده خوردگی عملکرد الکتروشیمیایی مطلوبی را نشان داد و پتانسیل قطبش میله تقویت شده وقتی ۲٪ مهارکننده به بتن اضافه شد، پایدار می‌ماند. درحالی‌که دوز نانوذرات (به‌عنوان مثال، $\text{SiO}_2\text{-nano}$) به ۲٪ می‌رسد، مقاومت و شار الکتریکی بتن می‌تواند نیازهای عملکردی را برآورده کند خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی بتن مسلح وقتی شار الکتریکی کمتر از ۱۰۰۰ کولن با ۱۵٪ اجزای عملکردی مرکب باشد، به طور مؤثری بهبود می‌یابد. باتوجه‌به نتایج آزمایش‌ها افزودن ۲۰٪ ماده سیمانی اصلاح شده نانو می‌تواند مقاومت بتن و مقاومت در برابر نفوذ یون‌های کلرید را در نمونه‌ها بهبود بخشد [۱۳]. محققین در تحقیق خود به بررسی اثر سرباره مس به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگ‌دانه بر روی مقاومت در برابر نفوذ کلرید و خوردگی فولاد مخلوط‌های بتن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بتن با سرباره مس بیشتر، به غلظت یون کلرید کمتری رسیده است که نشان‌دهنده افزایش مقاومت بتن در برابر کلرید است. علاوه بر این، محققین در این پژوهش نشان دادند که اختلاط خاکستر بادی در سیمان مخلوط با واکنش پوزولانی خاکستر باگاس با کاهش نفوذپذیری و سرعت نفوذپذیری اکسیژن، محافظت بتن در برابر خوردگی میلگردهای فولادی ناشی از کلرید را بهبود می‌بخشد [۱۴]. در مطالعه پژوهشگران، ترک‌خوردگی بتن ناشی از خوردگی در سه تیر بتنی تحت بار خارجی همراه با خوردگی تسریع شده بررسی شد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که بارگذاری خارجی منجر به ترک‌خوردگی زودتر ناشی از خوردگی بتن می‌شود. محدودیت پوشش (کاور) تأثیر قابل‌توجهی در توزیع و انتشار ترک‌خوردگی و خوردگی طولی فولاد پیدا کرد. با درنظرگرفتن کمی اثرات بارگذاری خارجی و رکودها، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی ترک‌خوردگی بتن ناشی از خوردگی ایجاد شد و نتایج آن مطابقت مطلوبی با نتایج تجربی نشان داد [۱۵]. پژوهشگران در تحقیق خود به بررسی دوام بتن دریایی در مواجهه با عوامل محیطی مختلف مانند خوردگی کلرید، کربناسیون و چرخه‌های خشک - مرطوب پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که افزودن مواد افزودنی مانند خاکستر بادی، الیاف و نانومواد می‌تواند مقاومت بتن را در برابر عوامل افزایش دهد، اگرچه خاکستر بادی ممکن است مقاومت در برابر کربناسیون را کاهش دهد [۱۶]. پژوهشگران در تحقیق خود به بررسی تأثیر استفاده از ضایعات سرامیکی به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه در بتن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این ضایعات می‌تواند دوام و مقاومت بتن را بهبود بخشد، اگرچه نیاز به بررسی‌های بیشتر برای تعیین درصد بهینه جایگزینی وجود دارد [۱۷]. مطالعه محققین دوام

سیمان با افزودن میکروسیلیس (۷٪ و ۱۰٪) به‌عنوان جایگزینی سیمان با سیمان پرتلند معمولی نوع II در شرایط مرطوب و خشک‌شدن را موردبررسی قرار داده‌اند. نتایج مبین عملکرد بسیار خوب و مقاومت بالاتر بتن حاوی میکروسیلیس در برابر بتن بدون میکروسیلیس است. علاوه بر این نتایج نشان داده هر چه مقدار میکروسیلیس مورداستفاده در مخلوط‌ها بیشتر باشد، جذب آب مویرگی در معرض قرارگرفتن منطقه جزرومد بیشتر می‌شود [۷]. مطالعات محققان دیگر بیانگر این بود که استفاده از مهارکننده‌های خوردگی یکی از مناسب‌ترین و کارآمدترین روش‌ها در زمینه محافظت در برابر خوردگی سازه‌های بتن مسلح به دلیل کارکرد آسان، کم‌هزینه و اثر عالی در برابر خوردگی است. مهارکننده‌هایی که در غلظت‌های کوچک به بتن اضافه می‌شوند و شروع خوردگی در بتن‌آرمه را به تأخیر می‌اندازند. اکثر مهارکننده‌ها با تشکیل یک فیلم محافظ اطراف آرماتور دوام بتن را طولانی‌تر می‌کنند [۸]. پژوهشگران با انجام آزمایش‌هایی دریافتند که جایگزینی ۱۲ درصد میکروسیلیس با سیمان می‌تواند مقاومت الکتریکی بتن را تا ۵ برابر افزایش دهد [۹]. مطالعات پژوهشگران بیانگر این بود که یکی از نقاط ضعف بتن مسلح به‌ویژه در محیط‌های دریایی خوردگی آرماتور است که به علت نفوذ یون کلر در آب و ترکیب با اکسیژن موجود در اتمسفر، لایه محافظ روی آرماتور ازمیان‌رفته و خوردگی آغاز می‌شود. پدیده خوردگی سبب کاهش انواع مقاومت در بتن مسلح شده و طول عمر مفید سازه را به‌شدت کاهش می‌دهد، ازاین‌رو راه‌حل پیشنهادی جهت رفع مشکل خوردگی آرماتور بتن مسلح استفاده از بازدارنده‌های خوردگی یا همان MCI به‌عنوان یک افزودنی در بتن برای مقابله با پدیده خوردگی، باهدف بهبود خواص مهندسی بتن، افزایش طول عمر مفید سازه و کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی آتی پروژه‌ها در محیط‌های دریایی اهمیت بسزایی داشته و مقرون‌به‌صرفه خواهد بود [۱۰]. پژوهشگران با انجام آزمایش‌هایی دریافتند، عملکرد و دوام طولانی‌مدت بتن حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس در معرض یک محیط دریایی می‌تواند عمق نفوذ کلرید را از ۹۰ میلی‌متر (۳/۵ اینچ) به ۴۰ میلی‌متر (۱/۶ اینچ) در برابر همه نمونه‌های شاهد (بدون خاکستر بادی و میکروسیلیس) در مدت و شرایط مشابه کاهش دهد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری حاکی از افزایش قابل‌توجه مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید برای بتن حاوی خاکستر بادی و میکروسیلیس است [۱۱]. مطالعه پژوهشگرانی دیگر باهدف بررسی اثرات سرباره مس و خاکستر بادی در خوردگی میلگردهای فولادی افقی قرار داده شده در نمونه‌های ستون بتن مسلح است. نتایج نشان می‌دهد که خوردگی میلگردهای فولادی افقی در قسمت بالایی نمونه‌های بتنی ستون، تأثیر منفی داشته است. این امر به مقاومت کمتری در برابر نفوذ مواد خورنده، به‌ویژه در چنین مکان‌هایی نسبت داده شد. در مورد مخلوط‌های خاکستر بادی، مقاومت در برابر خوردگی به دلیل کاهش نفوذپذیری اکسیژن، به طور قابل‌توجهی بهبود یافته است. جایگزینی خاکستر بادی به دلیل مقاومت بیشتر در برابر جداسازی و واکنش‌های پوزولانی، در

ملات‌های حاوی هیدرومگنسیت (MgO) را از نظر مقاومت در برابر نفوذ کلرید و خوردگی بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که این ملات‌ها دارای مقاومت بالایی در برابر نفوذ کلرید هستند و می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای محیط‌های خورنده باشند [۱۸]. پژوهشگران در پژوهشی تأثیر افزودنی‌های کریستالی را بر دوام بتن در شرایط محیطی سخت مانند تنش حرارتی، قرارگیری در معرض نمک و فعالیت‌های لرزه‌ای بررسی نمودند. نتایج نشان می‌دهد که این افزودنی‌ها می‌توانند نفوذپذیری بتن را کاهش داده و خاصیت خودترمیمی را افزایش دهند [۱۹]. محققین در تحقیق خود به بررسی اثر رسوب کربنات القایی میکروبی (MICP) بر خوردگی آرماتور در بتن در معرض محیط دریایی پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از MICP می‌تواند مقاومت بتن را در برابر خوردگی افزایش دهد، اگرچه ممکن است تأثیر منفی بر مقاومت فشاری داشته باشد [۲۰].

۵- مصالح مصرفی

هر یک از مصالح تشکیل‌دهنده بتن نقش مهمی در ایجاد خصوصیات آن ایفا می‌نمایند. سیمان چسبندگی لازم بین سنگ‌دانه‌ها و سنگ‌دانه‌ها نیز نقش پرکنندگی و تحمل بارهای وارده را بر عهده دارند و آب برای عمل هیدراتاسیون و ایجاد روانی و کارایی مخلوط لازم است. در اکثر بتن‌ها برای به‌دست‌آوردن مشخصات موردنیاز لازم است که از مواد افزودنی استفاده شود. هرکدام از این مصالح باکیفیت و کمیت خود می‌توانند بر بتن تأثیر گذاشته و کیفیت بتن تازه و سخت شده را تحت تأثیر قرار دهند. در این بخش کیفیت و کمیت مصالح مورد استفاده برای تهیه نمونه‌های بتنی مورد آزمایش و همچنین آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها شرح داده شده است. مصالح مصرفی در طرح‌های مختلف اختلاط بتن در این تحقیق شامل سیمان، آب، سنگ‌دانه و پسماند کاتالیزتی است که در ادامه مشخصات کلی آنها بیان می‌شود.

۵-۱- سیمان مصرفی

در مناطقی که بتن هم‌زمان در معرض یون کلر و سولفات قرار دارد توصیه شده است از سیمان تیپ ۲ به عنوان یک سیمان ضد سولفات ضعیف‌تر استفاده شود تا امکان خوردگی در اثر نفوذ یون کلر نیز کاهش یابد. سیمان مورد استفاده در این تحقیق جهت ساخت بتن، سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید شرکت سیمان کردستان می‌باشد. خواص فیزیکی و تجزیه شیمیایی سیمان مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است.

۵-۲- آب مصرفی

آب آشامیدنی مناسب‌ترین آب برای تهیه بتن است. در آزمایش‌ها از آب آشامیدنی شهر اهواز با میزان PH حدود ۷/۶، دمای آزمایشگاه ۲۲ درجه سانتی‌گراد و غلظت یون کلرید ۱۶۰ تا ۲۸۰ ppm برای طرح اختلاط استفاده شده است.

۵-۳- سنگ‌دانه‌های مصرفی

باتوجه به اینکه تقریباً ۷۵ درصد از حجم بتن را سنگ‌دانه‌ها تشکیل می‌دهند، برای تهیه طرح اختلاط بتن، بررسی مشخصات این مصالح لازم است. در این پژوهش از دو نوع سنگ‌دانه در اندازه‌های ماسه (۰ تا ۴/۷۵ میلی‌متر) و شن (۴/۷۵ تا ۱۰ میلی‌متر) استفاده شده است. وزن مخصوص ماسه و شن مصرفی به ترتیب برابر ۲۴۵۰ و ۲۵۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. ماسه و شن مورد استفاده در این پروژه آزمایشگاهی، به ترتیب از شهرهای شوشتر و رامهرمز تهیه شده‌اند. در جدول (۲-۳) مشخصات اندازه‌گیری شده سنگ‌دانه‌های مصرفی ذکر گردیده است. در آزمایشگاه پس از وزن کردن سنگ‌دانه‌ها به میزان لازم (بر حسب جدول طرح اختلاط)، الک‌های مورد نظر طبق استاندارد ASTM-C136 روی هم قرار داده شده و بر روی دستگاه لرزاننده قرار داده شدند و بدین ترتیب سنگ‌دانه‌ها دانه‌بندی شدند. در شکل‌های (۲) و (۳) منحنی‌های دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مصرفی ترسیم شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات شیمیایی (%)							مشخصات فیزیکی		
CaO	SiO ₂	C ₃ A	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	گیرش اولیه (دقیقه)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	سطح ویژه (gr/cm ²)
۶۲/۰۲	۲۱/۳۲	۷/۶	۳/۸۳	۲/۷۶	۳/۴۴	۲/۰۹	۴۵	۳۴۵	۲۹۰۰

جدول ۲- ترکیب‌های شیمیایی تشکیل دهنده پسماند کاتالیست

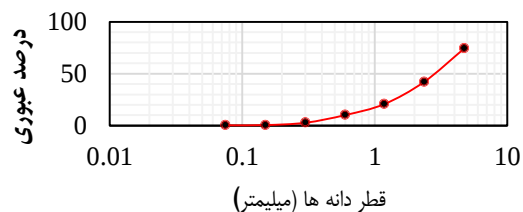
نام ترکیب	درصد
SiO ₂	24.877
Al ₂ O ₃	0.516
Fe ₂ O ₃	1.833
CaO	0.507
Na ₂ O	0.143
MgO	0.098
K ₂ O	0.149
TiO ₂	0.08
MnO	0.025
P ₂ O ₅	0.04
LOI	9.72
SO ₃	2.78
CuO	0.58
NiO	57.9

۶- طرح اختلاط نمونه‌ها

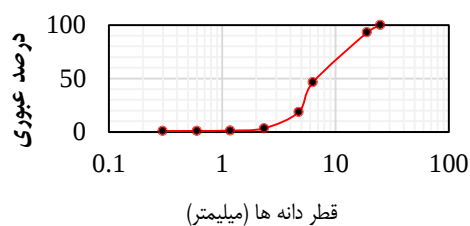
طرح اختلاط بکار رفته در جدول (۳) آورده شده است. طرح اختلاط نمونه‌های حاوی پسماند کاتالیست نیز در جدول (۴) آورده شده‌اند. سنگدانه کاتالیستی در دو حالت پودر و سنگ‌دانه به ترتیب جایگزین سیمان و شن مصرفی بتن در درصدهای ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد شده‌اند.

جدول ۳- طرح اختلاط نمونه بدون پسماند کاتالیستی در این تحقیق

ماسه (kg)	شن (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	نسبت آب به سیمان
۸۶۶	۹۱۶	۳۴۱	۱۸۳	۰/۵۴



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی شن مصرفی

۴-۵- پسماند کاتالیستی مصرفی

پسماند کاتالیستی مورد استفاده در این پژوهش از شرکت پتروشیمی ماهشهر تهیه شد. در شکل (۴) نمونه‌ای از این مواد قابل مشاهده است. در جدول (۲) نیز ترکیبات شیمیایی پسماند کاتالیستی مورد استفاده ارائه شده است.



شکل ۴- پسماند کاتالیستی مورد استفاده در این تحقیق

جدول ۴ - طرح اختلاط نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق

شماره نمونه	نام نمونه	شن (kg)	ماسه (kg)	سیمان (kg)	پودر کاتالیست (جایگزین سیمان) (kg)	سنگ‌دانه کاتالیست (جایگزین شن) (kg)	درصد کاتالیست مصرفی
۱ (نمونه شاهد)	NC	۹۱۶	۸۶۶	۳۴۱	۰	۰	۰
۲	CP10	۹۱۶	۸۶۶	۳۰۶/۹	۳۴/۱	۰	۱۰
۳	CP20	۹۱۶	۸۶۶	۲۷۲/۸	۶۸/۲	۰	۲۰
۴	CP30	۹۱۶	۸۶۶	۲۳۸/۷	۱۰۲/۳	۰	۳۰
۵	CP50	۹۱۶	۸۶۶	۱۷۰/۵	۱۷۰/۵	۰	۵۰
۶	CA10	۸۳۴/۴	۸۶۶	۳۴۱	۰	۹۱/۶	۱۰
۷	CA20	۷۳۲/۸	۸۶۶	۳۴۱	۰	۱۸۳/۲	۲۰
۸	CA30	۶۴۱/۲	۸۶۶	۳۴۱	۰	۲۷۴/۸	۳۰
۹	CA50	۴۵۸	۸۶۶	۳۴۱	۰	۴۵۸	۵۰

۷- روش انجام آزمایش‌ها
آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش جهت بررسی دوام نمونه‌ها، شامل موارد زیر هستند:
آزمایش مقاومت الکتریکی
آزمایش نفوذپذیری یون کلرید سریع (RCPT)
در ادامه به شرح آزمایش‌های یاد شده پرداخته شده است.

۷-۱- آزمایش مقاومت الکتریکی

خوردگی پدیده الکتروشیمیایی است که در آن میلگردها به صورت آند و بتن به صورت کاتد عمل می‌کند و یک جریان الکتریکی بین میلگرد و سطح بتن به وجود می‌آید. مسلماً در این حالت تحرک یون‌ها را شاهد هستیم. هر چه این حرکت بیشتر و سهل‌تر انجام شود به مفهوم آن است که مقاومت در برابر تحرک یونی کمتر است و یا هدایت الکتریکی بتن بیشتر است؛ بنابراین باید گفت یکی از راه‌های ساده آزمایش دوام بتن، تعیین مقاومت ویژه الکتریکی آن است. وجود رطوبت، مقاومت الکتریکی را کم می‌کند. وجود ترک‌های ریز که با آب پر شود هم باعث کاهش مقاومت الکتریکی می‌شود. روش‌های مقاومت الکتریکی برای تعیین ضخامت روسازی‌های بتنی استفاده شده‌اند. این روش بر مبنای این است که ماده در برابر عبور جریان الکتریکی از خود مقاومت نشان می‌دهد. خاصیت مقاومتی یک روسازی بتنی نسبت به لایه‌های قرار گرفته در بستر آن متفاوت است. تغییر شیب مقاومت در برابر منحنی عمق برای تخمین روسازی بتنی بکار می‌رود. در این تحقیق از دستگاه سنجش مقاومت الکتریکی بتن نوع I.S.C.R.M^۱ استفاده شده

$$\rho_c = \frac{R \cdot A}{L} \quad (۱)$$

که در آن:

ρ_c : مقاومت ویژه الکتریکی بتن بر حسب اهم‌متر

R: مقاومت الکتریکی قرائت شده از دستگاه اهم‌متر

A: سطح نمونه (سطح تماس صفحه برنجی با بتن) بر حسب مترمربع

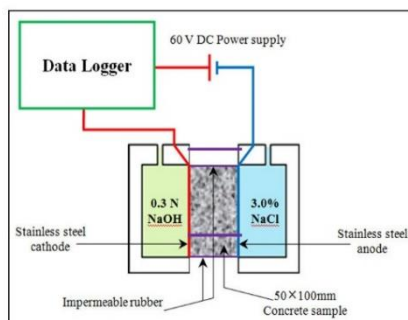
L: فاصله بین دو صفحه تماس (طول نمونه) بر حسب متر

هرچه مقاومت الکتریکی بتن بیشتر باشد، بتن بادوام‌تر و مطلوب‌تر خواهد بود. برای اتصال مناسب صفحه برنجی با بتن معمولاً لایه‌نازکی از خمیر سیمان نسبتاً شل را بکار می‌برند و صفحه را با فشار به خمیر سیمان و سطح بتن چسبانیده و اندازه‌گیری را انجام می‌دهند. جدول (۵) مقاومت الکتریکی بتن‌هایی را نشان می‌دهد که اگر کمتر از ۵۰ اهم‌متر باشد خطر خوردگی در آنها بیشتر است [۲۱].

جدول ۵ - رابطه بین مقاومت الکتریکی و خوردگی بتن [۲۱].

مقاومت الکتریکی ویژه بتن (اهم‌متر)	احتمال میزان خوردگی
بیشتر از ۲۰۰	ناچیز
۱۰۰-۲۰۰	کم
۵۰-۱۰۰	زیاد
کمتر از ۵۰	خیلی زیاد

1 Impedance Spectroscopy Concrete Resistivity Meter



شکل ۶- دستگاه اندازه‌گیری بار الکتریکی عبور کرده (آزمایش RCPT) [۹]

جدول ۶- نفوذپذیری یون کلرید بر اساس بار الکتریکی عبور کرده از نمونه [۲۲]

بار الکتریکی عبور کرده (کولمب)	نفوذپذیری یون کلرید
$4000 <$	زیاد
$4000 - 2000$	متوسط
$2000 - 1000$	کم
$1000 - 100$	خیلی کم
$100 >$	قابل اغماض

۸- ارائه نتایج

در این بخش از تحقیق به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده پرداخته شده است. نتایج ارائه شده در دو بخش شامل نتایج مربوط به آزمایش مقاومت الکتریکی و نتایج مربوط به آزمایش نفوذ یون کلرید سریع (RCPT) هستند.

۸-۱- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

در این بخش از تحقیق به ارائه نتایج حاصل از آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی نمونه‌ها پرداخته شده است. لازم به ذکر است که قالب مورد استفاده برای این آزمایش قالب مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ بوده و جهت محاسبه مقاومت الکتریکی ویژه برای کلیه نمونه‌ها، سطح مقطع و طول نمونه‌ها به ترتیب برابر 0.1 مترمربع و 0.1 متر می‌باشد. همچنین جهت انجام این آزمایش برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه تحت آزمایش قرار گرفته و میانگین نتایج این ۳ نمونه محاسبه و ارائه شده است. در جدول (۷) مقادیر میانگین مقاومت الکتریکی و مقاومت الکتریکی ویژه نمونه‌ها محاسبه و آورده شده است. افزودن پودر کاتالیست به جای سیمان مصرفی تا مقدار ۳۰ درصد، باعث افزایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده است، اما با افزایش بیشتر پودر کاتالیستی از مقدار مقاومت الکتریکی ویژه بتن کاسته شده است و از این منظر می‌توان ۳۰ درصد جایگزینی پودر کاتالیست را مناسب‌ترین مقدار دانست. از طرفی جایگزینی سنگدانه کاتالیستی به جای شن تا مقدار ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده و در مقادیر بالاتر به تدریج شاهد کاهش مقاومت الکتریکی ویژه بتن می‌باشیم. بطور کلی می‌توان بیان کرد که با افزودن پسماند کاتالیستی

برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دو سطح روبروی نمونه بتنی را با ملات سیمان (نه شل نه سفت) آغشته کرده یکی از صفحات برنجی را روی میز و سپس نمونه بتنی را روی صفحه برنجی قرار می‌دهیم و صفحه دوم برنجی را روی نمونه می‌گذاریم و عمل قرائت مقاومت را انجام می‌دهیم. دستگاه مورد استفاده در آزمایش‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی

۷-۲- آزمایش نفوذپذیری کلرید سریع (RCPT)

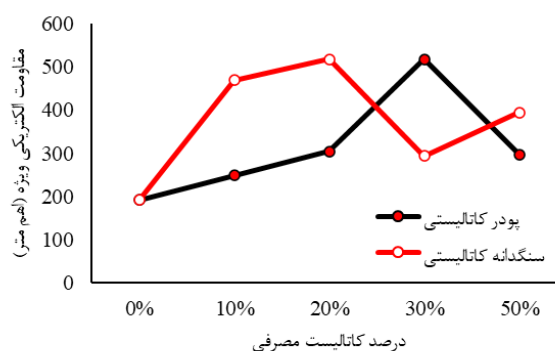
تست RCPT یا نفوذپذیری کلرید سریع طبق استاندارد ASTM C1202 انجام می‌شود. نمونه‌های اشباع شده در آب به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به ضخامت ۵۰ میلی‌متر بین دو ظرف با محلول‌های ۳ درصد NaCl و 0.3 M سدیم هیدروکسید NaOH مطابق شکل (۶) قرار داده می‌شود. پس از آن در مدت ۶ ساعت، ۶۰ ولت برق اعمال می‌شود. پس از اتمام آزمایش، کل بار الکتریکی عبور کرده اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس جدول (۶) می‌توان مقاومت بتن را در برابر نفوذپذیری کلرید تعیین کرد. مقادیر تست RCPT تابع ریز ساختار بتن و هدایت الکتریکی محلول منافذ در بتن است. این روش آزمایش مورد انتقاد بسیاری قرار گرفته است. از جمله دلایل این انتقاد می‌توان به افزایش دما در بتن که سبب افزایش بار الکتریکی عبور کرده می‌شود، نام برد. از طرف دیگر اعمال ۶۰ ولت فقط یون‌های کلرید را حرکت نمی‌دهد بلکه، بسیاری از یون‌ها در منافذ را نیز انتقال می‌دهد. همچنین این روش برای ارزیابی بتن‌های حاوی پوزولان مناسب نیست، زیرا نتایج حاصل ناشی از تغییرات در ترکیب شیمیایی محلول منافذ است.

به مخلوط بتن، مقدار مقاومت الکتریکی ویژه بتن حداقل به مقدار $1/3$ برابر و حداکثر به مقدار $2/7$ برابر افزایش پیدا کرده است.

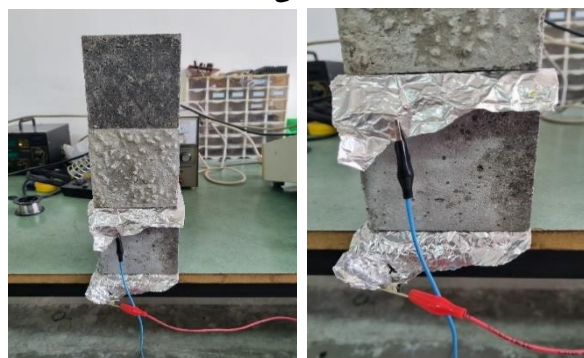
جدول ۷- مقادیر مقاومت الکتریکی ویژه نمونه‌ها

ردیف	نام طرح	مقاومت الکتریکی (اهم)	مساحت نمونه (m2)	طول نمونه (m)	مقاومت الکتریکی ویژه (اهم - متر)	احتمال خوردگی
1	NC	1919.5	0.01	0.1	192	کم
2	CP10	2491.6	0.01	0.1	249	ناچیز
3	CP20	3053.6	0.01	0.1	305	ناچیز
4	CP30	5183.5	0.01	0.1	518	ناچیز
5	CP50	2968.1	0.01	0.1	297	ناچیز
6	CA10	4686.8	0.01	0.1	469	ناچیز
7	CA20	5171.3	0.01	0.1	517	ناچیز
8	CA30	2942.5	0.01	0.1	294	ناچیز
9	CA50	3952.2	0.01	0.1	395	ناچیز

در شکل (۷) تغییرات مقدار مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های حاوی پسماند کاتالیستی نمایش داده شده است. در این نمودارها نیز به وضوح می‌توان روند صعودی افزایش مقاومت الکتریکی ویژه نمونه‌ها با افزودن پسماند کاتالیستی را دید.



شکل ۷- مقایسه مقاومت الکتریکی ویژه نمونه‌های حاوی پسماند کاتالیستی



شکل ۸- مراحل انجام آزمایش مقاومت الکتریکی

۸-۲- نتایج آزمایش نفوذپذیری کلرید سریع (RCPT)

در این بخش از تحقیق به ارائه نتایج حاصل از آزمایش نفوذپذیری کلرید سریع بر روی نمونه‌ها پرداخته شده است. جدول (۸) نتایج آزمایش RCPT را برای ۹ طرح اختلاط در سن ۲۸ روز نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده میانگین نتایج برای ۳ نمونه می‌باشند.

جدول ۸- نتایج آزمایش RCPT

نام طرح	بار الکتریکی عبوری (کولومب)	میانگین ۳ نمونه
NC	1125	1121
	1116	
	1121	
CP10	970	971
	966	
	978	
CP20	941	937
	933	
	938	
CP30	911	907
	901	
	908	
CP50	1101	1089
	1087	
	1079	
CA10	1109	1095
	1101	
	1076	
CA20	998	988
	986	
	981	
CA30	1025	1032
	1033	
	1038	
CA50	1110	1100
	1092	
	1099	

[1] Morris W, Vázquez M. A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides. *Cement Concr Res.* 2002;32(2):259-67. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00669-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00669-X).

[2] Fedrizzi L, Azzolini F, Bonora PL. The use of migrating corrosion inhibitors to repair motorways' concrete structures contaminated by chlorides. *Cement Concr Res.* 2005; 35 (3): 551 -61.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.038>

[3] Zhang M, Xu R, Liu K, Sun S. Research progress on durability of marine concrete under the combined action of Cl^- erosion, carbonation, and dry-wet cycles. *Rev Adv Mater Sci.* 2022; 61 (1): 622 -37.

<https://doi.org/10.1515/rams-2022-0049>

[4] ACI Committee 222. Protection of metals in concrete against corrosion. ACI 222R-01. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2010.

<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/11305>

[5] Batis G, Routoulas A, Rakanta E. Effects of migrating inhibitors on corrosion of reinforcing steel covered with repair mortar. *Cement Concr Compos.* 2003; 25 (1): 109 -15. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00047-6)

[6] Poon CS, Kou SC, Lam L. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Constr Build Mater.* 2006; 20 (10): 858 -65.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.001>

[7] Ganjian E, Sadeghi Pouya H. The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag. *Cem Concr Compos.* 2009;31 (9): 644 -52.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.05.006>

در شکل (۹) تغییرات مقدار بار الکتریکی عبور کرده از نمونه‌ها به ترتیب در حالت استفاده از پودر و سنگدانه کاتالیستی نمایش داده شده است. در این نمودارها نیز به وضوح می‌توان روند نزولی کاهش مقدار بار الکتریکی عبور کرده از نمونه‌ها با افزودن پسماندهای کاتالیستی به بتن را دید.



شکل ۹- مقایسه بار الکتریکی عبور کرده از نمونه‌ها در آزمایش RCPT

۹- جمع‌بندی نتایج

در این تحقیق به بررسی تأثیر استفاده از پسماندهای کاتالیستی بر دوام بتن پرداخته شد. بر اساس نتایج ارائه شده در بخش قبل و بحث‌های انجام شده پیرامون این نتایج، نتایج نهایی این تحقیق شامل موارد زیر هستند:

۱- نتایج آزمایش‌های انجام شده تأثیر مثبت استفاده از پسماند کاتالیستی را در افزایش مقاومت الکتریکی در مقایسه با بتن بدون پسماند کاتالیستی نشان داد.

۲- افزودن پودر کاتالیست به جای سیمان مصرفی تا مقدار ۳۰ درصد، باعث افزایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده است، اما با افزایش بیشتر پودر کاتالیستی از مقدار مقاومت الکتریکی ویژه بتن کاسته شده است و از این منظر می‌توان ۳۰ درصد جایگزینی پودر کاتالیست را مناسب‌ترین مقدار دانست.

۳- جایگزینی سنگدانه کاتالیستی به جای شن تا مقدار ۲۰ درصد باعث افزایش مقاومت الکتریکی ویژه بتن شده و در مقادیر بالاتر به تدریج شاهد کاهش مقاومت الکتریکی ویژه بتن می‌باشیم.

۴- بطور کلی می‌توان بیان کرد که با افزودن پسماند کاتالیستی به مخلوط بتن، مقدار مقاومت الکتریکی ویژه بتن حداقل به مقدار ۱/۳ برابر و حداکثر به مقدار ۲/۷ برابر افزایش پیدا کرده است.

۵- نتایج آزمایش نفوذ یون کلرید سریع نشان داد که بار الکتریکی عبور کرده از نمونه بتن بطور کلی با افزودن پسماندهای کاتالیستی، کاهش یافته است. نتایج بدست آمده بیانگر نقش بسیار موثر پسماندهای کاتالیستی در کاهش نفوذپذیری یون کلرید و به تبع آن کاهش پتانسیل خوردگی در بتن می‌باشد.

external loading and stirrup constraint. *Constr Build Mater.* 2021;266 (Pt B): 121053.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121053>

[16] Zhang M, Xu R, Liu K, Sun S. Research progress on durability of marine concrete under the combined action of Cl^- erosion, carbonation, and dry-wet cycles. *Rev Adv Mater Sci.* 2022; 61 (1): 622 -37.

<https://doi.org/10.1515/rams-2022-0049>

[17] Medina C, de Brito J, Agrela F. Use of ceramic wastes as aggregate in concrete: durability and mechanical properties. *Constr Build Mater.* 2022; 190: 453 -66.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.157>

[18] Furcas FE, German A, Winnefeld F, Lura P, Angst U. Durability of MgO/hydromagnesite mortars – Resistance to chlorides and corrosion. *arXiv preprint.* 2024 May 13.

<https://arxiv.org/abs/2405.08164>

[19] Krelani V, Ahmeti M, Kryeziu D. Increased durability of concrete structures under severe conditions using crystalline admixtures. *Buildings.* 2025; 15 (3): 352.

<https://doi.org/10.3390/buildings15030352>

[20] Youssa Tchamou LK, Xue C. Effect of MICP on reinforcement corrosion of cement concrete exposed to the marine environment. *Discov Civ Eng.* 2025; 2: 47.

<https://doi.org/10.1007/s44290-025-00200-4>

[21] Akoba B, Ajah UC, Kennedy C. Utilizing electrochemical techniques for assessing the probability of concrete resistivity and corrosion potential in reinforced concrete structures. *Middle East Res J Eng Technol.* 2024; 4 (2) :21 -38.

<https://doi.org/10.36348/merjet.2024.v04i02.001>

[22] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. ASTM C1202-22e1. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022. <https://www.astm.org/c1202-22e1.html>

[8] El-Hacha R, Mirmiran A, Cook A, Rizkalla S. Effectiveness of surface-applied corrosion inhibitors for concrete bridges. *J Mater Civ Eng.* 2011; 23 (3): 271 -80.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000163](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000163)

[9] Bagheri A, Zanganeh H, Alizadeh H, Shakerinia M, Marian MAS. Comparing the performance of fine fly ash and silica fume in enhancing the properties of concretes containing fly ash. *Constr Build Mater.* 2013; 47: 1402-8.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.037>

[۱۰] آقائوری ر، امیری ر، ابوالقاسمی م، جاوید ص. استفاده از بتن پایا حاوی بازدارنده‌ی خوردگی مهباجر (MCI) در محیط‌های خورنده حاشیه خلیج فارس. در: هشتمین کنفرانس ملی بتن ایران؛ ۱۳۹۷ مهر ۲۵: قرچک، ایران <https://civilica.com/doc/818541>

[11] Moffatt EG, Thomas MDA. Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment. *Cem Concr Res.* 2018; 113: 65 -73.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.004>

[12] Sandra N, Kawaai K, Ujike I, Nakai I, Nsama W. Effects of bleeding on the corrosion of horizontal steel bars. *Int J Technol.* 2019; 10 (4): 741 -52. Available from:

<https://ijtech.eng.ui.ac.id/article/view/2503>

[13] Pan C, Chen N, He J, Liu S, Chen K, Wang P, Xu P. Effects of corrosion inhibitor and functional components on the electrochemical and mechanical properties of concrete subject to chloride environment. *Constr Build Mater.* 2020; 260: 119724.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119724>

[14] Sandra N, Kawaai K, Ujike I. Effect of copper slag fine aggregate on corrosion processes and behavior in reinforced concrete prism specimen. *Constr Build Mater.* 2021;271:121909.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121909>

[15] Zhao Y, Wang Z, Dong F. Prediction of corrosion-induced concrete cracking under

