

بتن ضد خوردگی پایدار با استفاده از سرباره فولادسازی، پوست پسته و پلی آنیلین: یک رویکرد زیست محیطی

وحیده مظفری^{۱*}، مریم احتشامزاده^۲، احمد ایران نژاد^۳، کاظم طهماسبی^۴، ابراهیم یوسفی^۵

^{۱*} دانشجوی دکتری مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان

^۲ استاد، گروه مهندسی علم مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان

^۳ دانشیار، گروه مهندسی علم مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان

^۴ استادیار، گروه مهندسی علم مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه باهنر کرمان

^۵ مدیر تحقیق و توسعه شرکت صنایع فولاد مشیز بردسیر

* نویسنده مسئول: vahideh.mozafari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

چکیده

این تحقیق به بررسی جامع پتانسیل استفاده مجدد از ضایعات صنعتی و کشاورزی، یعنی سرباره فولادسازی و پوست پسته، در تولید بتن پایدار با خواص ضد خوردگی ممتاز می‌پردازد. با توجه به دفع سالانه حجم قابل توجهی سرباره فولادسازی به عنوان آلاینده‌های زیست محیطی و همچنین چالش مدیریت ضایعات کشاورزی مانند پوست پسته، این پژوهش رویکردی نوین و دوستدار محیط زیست را با هدف تبدیل این مواد زائد به مصالح ساختمانی ارزشمند ارائه می‌دهد. در این مطالعه، کامپوزیتی متشکل از سرباره فولادسازی و زغال پوست سخت پسته، همراه با پلی آنیلین، به عنوان جایگزینی جزئی برای سیمان پرتلند در فرمولاسیون بتن مورد استفاده قرار گرفت. خواص ضد خوردگی بتن اصلاح شده با این کامپوزیت، با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته پلاریزاسیون (از جمله پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی) و اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، به دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی برای سنجش استحکام مکانیکی آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که جایگزینی ۱۰٪ سیمان پرتلند با کامپوزیت سرباره فولادسازی، زغال پوست پسته و پلی آنیلین، منجر به بهبود قابل توجهی در عملکرد بتن می‌شود. به طور مشخص، پس از ۹۰ روز، مقاومت فشاری بتن تا ۴۲٪، مقاومت الکتریکی آن ۴۹٪ و مقاومت پلاریزاسیون آن ۱۵۰٪ افزایش یافته و شدت جریان خوردگی آن ۳۷٪ کاهش یافته است. این یافته‌های امیدوارکننده، پتانسیل بالای این کامپوزیت نوآورانه را در توسعه بتن‌های ضد خوردگی و پایدار، با استفاده کارآمد از ضایعات صنعتی و کشاورزی، تأیید می‌کند و راه را برای کاربردهای عملی در صنعت ساخت و ساز هموار می‌سازد.

کلیدواژه: بتن، سرباره فولاد سازی، ذغال، پلی آنیلین، پلاریزاسیون، امپدانس الکتروشیمیایی، مقاومت الکتریکی

Sustainable Anti-Corrosion Concrete Using Steelmaking Slag, Pistachio Shell, and Polyaniline: An Environmental Approach

V. Mozafari Tabatabai ^{1*}, M. Ehteshamzadeh ², A. Irannejhad ³, K. Tahmasebi⁴, E. yusefi⁵

^{1*} PhD student of materials engineering, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

² Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

³ Associate Professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

⁴ Assistant professor, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

⁵ Research and Development Manager of Mashiz Steel Company.

* Corresponding Author: vahideh.mozafari@gmail.com

Submission: 2025, 06, 15 Acceptance: 2025, 09, 16

Abstract

This research comprehensively investigates the potential for reusing industrial and agricultural wastes, namely steelmaking slag and pistachio shell, in the production of sustainable concrete with superior anti-corrosion properties. Considering the annual disposal of significant amounts of steelmaking slag as environmental pollutants and the challenge of managing agricultural wastes like pistachio shells, this study presents a novel and environmentally friendly approach aimed at transforming these waste materials into valuable construction materials. In this study, a composite material comprising steelmaking slag and hard pistachio shell, along with polyaniline, was utilized as a partial replacement for Portland cement in concrete formulations. The anti-corrosion properties of the modified concrete were rigorously evaluated using advanced polarization techniques (including Tafel polarization and electrochemical impedance) and by measuring its electrical resistivity. Furthermore, the compressive strength of the concrete specimens was measured to assess their mechanical integrity. The findings of this research indicate that replacing 10% of Portland cement with the composite of steelmaking slag, pistachio shell, and polyaniline leads to a significant improvement in concrete performance. Specifically, after 90 days, the compressive strength of the concrete increased by 42%, its electrical resistivity improved by 49% and polarisation resistance by 150%. and the corrosion current density decreased by 37%. These promising results confirm the high potential of this innovative composite in developing anti-corrosive and sustainable concretes through the efficient utilization of industrial and agricultural wastes, paving the way for practical applications in the construction industry.

Keywords: concrete, steel slag, char, PANI, polarization, electrochemical impedance, electrical resistivity

۱- مقدمه

بتن، به عنوان دومین مصالح پرکاربرد بشر پس از آب، نقشی حیاتی در زیرساخت‌های جهان ایفا می‌کند. با این حال، تولید سیمان، جزء اصلی بتن، با انتشار قابل توجهی دی‌اکسید کربن (CO_2) همراه است که به گرمایش جهانی دامن می‌زند. در این راستا، استفاده از مواد جایگزین سیمان در بتن، راهکاری کلیدی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت و ساز محسوب می‌شود. همزمان، انباشت حجم بالای سرباره فولادسازی به عنوان یک ضایعات صنعتی، چالش‌های زیست‌محیطی و فضایی را برای کارخانه‌های تولید آهن و فولاد ایجاد کرده است. بازیافت و استفاده مجدد از این سرباره‌ها، نه تنها به کاهش آلودگی کمک می‌کند، بلکه منابع طبیعی را نیز حفظ می‌نماید. مطالعات متعددی بر جایگزینی سیمان با سرباره کوره‌های بلند و سرباره‌های فولادسازی تمرکز کرده‌اند [۴-۱]. تحلیل ترکیب شیمیایی سرباره‌ها نشان می‌دهد که سرباره فولادسازی (Electric Arc Furnace Slag - EAFS) در مقایسه با سرباره کوره بلند (Blast Furnace Slag - BFS)، حاوی مقادیر بیشتری آهن و منیزیم و مقادیر کمتری کلسیم است [۵-۱]. برخی تحقیقات [۷-۵] حاکی از آن است که حضور اکسید آهن و اکسید منیزیم ممکن است منجر به کاهش خواص مکانیکی بتن شود، زیرا ذرات اکسید آهن می‌توانند مانع تشکیل محصولات هیدراسیون شده و تأثیر منفی بر خواص بتن بگذارند [۸].

در کنار مواد معدنی، مواد کربنی مانند دوده (char)، گرافن و نانولوله‌های کربنی نیز مورد توجه تحقیقات گسترده‌ای قرار گرفته‌اند [۱۳-۹]. به عنوان مثال، شوارتز و همکاران [۹] G دریافتند که افزودن ۲٪ وزنی دوده به ملات سیمان، مقاومت خمشی و انرژی شکست را افزایش می‌دهد و دوده به عنوان یک ماده‌ی تقویت‌کننده عمل می‌کند. در مقابل، مطالعات امراد و قهاب [۱۰] و اختر و همکاران [۱۱] نشان دادند که حضور دوده در بتن می‌تواند مقاومت فشاری را کاهش دهد.

از سوی دیگر، پلی آنیلین (Polyaniline - PANI) به عنوان یک پلیمر رسانا، پایداری حرارتی و زیست‌محیطی بالایی از خود نشان داده است. به دلیل سنتز آسان و خواص ضد خوردگی چشمگیر، پلی آنیلین اخیراً مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۱۶-۱۴]. مکانیسم‌های متعددی برای خاصیت ضد

خوردگی پلی آنیلین پیشنهاد شده است، از جمله حفاظت آندی و عملکرد به عنوان یک سد محافظ در برابر عوامل خوردنده [۱۶-۱۷]. پلی آنیلین قادر است فرآیند اکسیداسیون را تسریع کرده و فلز را در حالت غیرفعال (passive) نگه دارد و همچنین دارای خاصیت اکسیداسیون-احیاء برگشت پذیر است [۱۷]. علاوه بر این، پلی آنیلین چسبندگی بالایی به مواد مختلف دارد [۱۸]، که این ویژگی می‌تواند به بهبود خواص ضد خوردگی بتن حاوی آن کمک کند.

میلگرد فولادی در بتن به طور معمول به دلیل محیط قلیایی بتن، در معرض خوردگی قرار نمی‌گیرد؛ زیرا لایه‌ای محافظ از اکسید آهن بر روی آن تشکیل می‌شود. اما کاهش قلیایی بودن بتن (ناشی از کربناسیون) یا فعال شدن میلگردها توسط یون‌های مهاجم (مانند کلرید)، می‌تواند منجر به خوردگی شود. خوردگی فولاد، با تولید هیدروکسید و اکسید آهن، باعث افزایش حجم قابل توجهی در اطراف میلگرد شده و تنش‌های کششی در بتن ایجاد می‌کند که در نهایت به تخریب آن منجر می‌شود [۱۹]. بسیاری از مطالعات [۲۲-۲۰] نشان داده‌اند که عمر بتن تحت تأثیر نفوذ عوامل خوردنده قرار می‌گیرد. همچنین، چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌تواند نفوذ عوامل خوردنده را تسریع بخشد [۲۳] و با تأثیر بر پارامترهای الکتروشیمیایی، باعث از بین رفتن لایه محافظ (passive layer) شود [۲۵-۲۳]. روش‌های مختلفی جهت بررسی خوردگی آرماتور در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از این روش‌ها بررسی الکتروشیمیایی خوردگی در بتن با استفاده از پلاریزاسیون تافل و تست امپدانس الکتروشیمیایی بتن است و به دلیل اینکه میتوان با این روش‌ها مکانیزم خوردگی را بهتر تشخیص داد و روش اندازه‌گیری امپدانس الکتروشیمیایی یک روش غیرمخرب است، بسیار ارزشمند است. طی تحقیقی که جو انجام داده است داده‌های تست امپدانس بتن حاوی سیمان آهکی نسبت به سیمان معمولی و خاک رس کلسینه شده، منحنی‌های نایکویست با قطرهای بزرگتری در فرکانس‌های بالا و پایین داشته است و بنابراین عملکرد ضد خوردگی بهتری داشته است [۲۴].

هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی خواص ضد خوردگی و مکانیکی بتن حاوی سرباره فولادسازی، زغال حاصل از پوست پسته (به عنوان بخشی از کامپوزیت) و پلی آنیلین است. این

ارزیابی از طریق آزمون‌های امیدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون تافل و اندازه‌گیری مقاومت فشاری انجام خواهد شد. برای اعتبارسنجی نتایج، آزمون مقاومت الکتریکی بتن نیز به کار گرفته خواهد شد.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد

سیمان: سیمان پرتلند نوع ۱ از کارخانه سیمان تهران، مطابق با استاندارد ASTM C150 [۱۸] با سطح ویژه ۳۷۰۰ سانتی متر مربع بر گرم (cm^2/gr) استفاده شد.

سرباره: سرباره کوره قوس الکتریکی (EAFS) از کارخانه فولاد مشیز بردسیر تهیه گردید. ترکیب شیمیایی سیمان و سرباره در جدول ۱ ارائه شده است. برای مقایسه، محدوده‌ی ترکیب شیمیایی سرباره کوره بلند (BFS) نیز در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود، سرباره فولادسازی دارای درصد بالاتری از آهن و درصد کمتری از سیلیس نسبت به سرباره کوره بلند است. ترکیب شیمیایی پوست پسته در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند و سرباره فولادسازی

مورد استفاده در این تحقیق و محدوده ترکیب شیمیایی سرباره

کوره بلند آهن گدازی [۱-۵]

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO-Fe ₂ O ₃
سیمان پرتلند	۵۸	۲۱	۶	۲/۵	۵
سرباره فولادسازی	۳۵	۱۸	۳/۶	۱۱	۱۶
سرباره کوره بلند	۳۴-۴۸	۲۷-۳۸	۷-۱۲	۷-۱۵	۱/۰-۳/۲

جدول ۲. ترکیب شیمیایی پوست سخت پسته (درصد وزنی) [۲۶]

Empirical formula	N	O	H	C
CH _{0.48} O _{0.73} N _{0.03}	۱/۵۱	۴۷/۷۶	۱/۹۶	۴۸/۷۷

۲-۲- تهیه کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP)

سرباره‌ها پس از خروج از کوره، با آب سرد شدند. جهت تولید کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP)، از دمای بالای سرباره (حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد) برای فرآیند پیرولیز پوست پسته و تولید زغال استفاده شد. این فرآیند به صورت *in-situ* (درجا) انجام گرفت. کامپوزیت حاصل، پس از آسیاب شدن، از الک ۲۰۰ مش عبور داده شد. بر اساس اختلاف وزن سرباره و پوست پسته قبل و بعد از پیرولیز، میزان زغال به دست آمده در کامپوزیت حدود ۲۰٪ وزنی تخمین زده شد.

۲-۳- سنتز پلی آنیلین (PANI)

پلی آنیلین به روش پلیمریزاسیون شیمیایی با استفاده از آنیلین به عنوان مونومر، آمونیوم پرسولفات به عنوان اکسید کننده و اسید هیدروکلریک به عنوان محیط اسیدی سنتز شد. پودر سبز رنگ حاصل از سنتز، پلی آنیلین بود.

۲-۴- طرح اختلاط و نمونه‌سازی بتن

طرح اختلاط نمونه‌های بتنی در جدول ۳ آورده شده است. نسبت آب به ماده سیمانی (w/cm) برابر با ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. نمونه‌سازی بتن مطابق با استاندارد ASTM C109 [۲۰] انجام پذیرفت. پس از گذشت ۲۴ ساعت از قالب‌گیری، نمونه‌ها از قالب خارج شده و به مدت یک ماه در آب نگهداری شدند تا فرآیند گیرش و سخت شدن بتن کامل گردد. بر اساس طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۳، شش سری نمونه بتنی تهیه شد:

C: نمونه شاهد (بتن معمولی بدون هیچ افزودنی)

C.S: جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان با سرباره فولادسازی (EAFS)

C.SP: جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان با کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP)

C.S.PANI: جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان با سرباره فولادسازی (EAFS) به همراه افزودن ۰/۰۲٪ وزنی سیمان از پلی آنیلین (PANI)

C.SP.PANI: جایگزینی ۱۰٪ وزنی سیمان با کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP) به همراه افزودن ۰/۰۲٪ وزنی سیمان از پلی آنیلین (PANI)

جدول ۳. طرح اختلاط نمونه‌های بتنی بر حسب کیلوگرم، سرباره: S. کامپوزیت: SP. پلی آنیلین: PANI

Specimen	جایگزین سیمان (wt%)	ماسه	شن ریز ۱۲ mm	شن درشت ۳۰ mm	آب	PANI	SP	S	سیمان پرتلند
C	0%	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	-	-	-	۸
C.S	10% S	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	-	-	۰/۷۲۷	۷/۲۷
C.SP	10% SP	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	-	۰/۷۲۷	-	۷/۲۷
C.PANI	0.02% PANI	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	۰/۱۶	-	-	۸
C.S.PANI	10% S + 0.02% PANI	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	۰/۱۶	-	۰/۷۲۷	۷/۲۷
C.SP.PANI	10% SP + 0.02% PANI	۱۸/۶	۵	۹/۸	۳/۶۸	۰/۱۶	۰/۷۲۷	-	۷/۲۷

۵-۲- مشخصه‌یابی مواد

پراش پرتو ایکس (XRD): برای تعیین فازهای بلوری مواد، آزمون XRD با زاویه پراش بین ۱۰ تا ۱۰۰ درجه، زمان ۱/۱ ثانیه در هر استپ، و با گام ۰/۰۲ درجه انجام شد.

۶-۲- آزمون‌های خواص مکانیکی و الکتروشیمیایی

الف) مقاومت فشاری: آزمون مقاومت فشاری مطابق با استاندارد BS 1881-116M در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی انجام شد. برای این منظور، از نمونه‌های بتنی مکعبی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر که حاوی میلگرد با قطر ۱/۵ سانتی‌متر بودند، استفاده گردید. هر آزمایش سه بار تکرار شد.

ب) پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی: آزمون‌های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون تافل بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر حاوی میلگرد با قطر ۱/۵ سانتی‌متر انجام شد. پس از تکمیل فرآیند سخت شدن در آب، نمونه‌ها به مدت ۶ ماه در محیط آزاد قرار گرفتند و سپس به مدت ۹۰ روز در محلول ۳/۵ مولار کلرید سدیم (NaCl) نگهداری شدند تا به

پایداری شیمیایی برسند. پس از آن، نمونه‌ها به دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات 2273 PARSTAT، EG&G، پریستون اپتیکال مدل A۲۷۳ متصل شدند. آزمون پلاریزاسیون تافل با نرخ روبش ۱ میلی‌ولت بر ثانیه انجام پذیرفت و همچنین طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی در پتانسیل مدار باز و در محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ میلی‌هرتز انجام شده است. میزان پتانسیل بر اساس الکتروود مرجع کالومل اشباع (SCE) سنجیده شده است. تصویر سل الکتروشیمیایی در شکل ۱ آورده شده است.

ج) مقاومت الکتریکی: مقاومت الکتریکی بتن به منظور اعتبارسنجی نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی اندازه‌گیری شد. آزمون مقاومت الکتریکی بتن مطابق با استاندارد ASTM C1760 انجام گرفته است. این تست با اندازه‌گیری میزان جریان عبوری از نمونه بتنی با اختلاف پتانسیل اعمالی ۶ ولت اندازه‌گیری می‌شود. نمونه مورد استفاده در این تست، استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر است.



شکل ۱. تصویر سل الکتروشیمیایی جهت اندازه‌گیری امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون تافل.

۳- نتایج و بحث

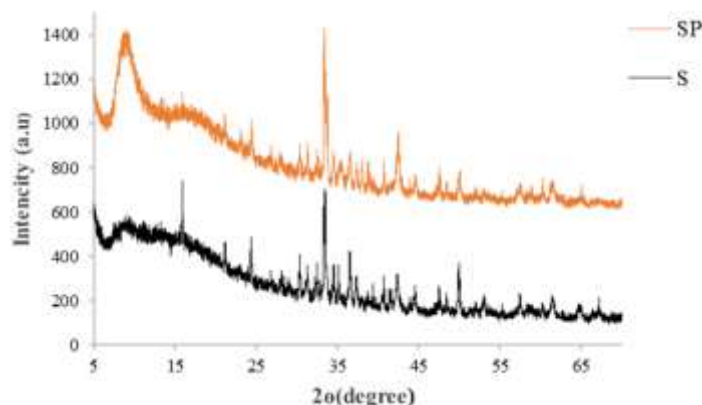
۳-۱- نتایج پراش اشعه ایکس (XRD)

نتایج حاصل از آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) برای نمونه سرباره فولادسازی (S) و کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP) در شکل ۲ ارائه شده است.

در الگوی XRD نمونه سرباره (S)، فاز مونیتسلیت (CaMgSiO_4) با تطابق بالا با کارت ICDD شماره ۰۷۲۷-۷۶ شناسایی شد. تفاوت برجسته بین دو الگو، ظهور یک پیک پراش عریض و با شدت نسبتاً بالا در زاویه $2\theta = 9/3^\circ$ درجه در الگوی نمونه SP است. این پیک به حضور نانومواد کربن‌زا، که احتمالاً ناشی از پیرولیز پوست پسته است، نسبت داده می‌شود. برخی مطالعات [۲۷ و ۲۸] حضور چنین پیکی در زاویه مشابه را تأییدکننده تشکیل اکسید گرافن (GO) یا نانوکربن‌ها می‌دانند. اگرچه GO به دلیل ساختار غیر بلوری مشخص، کارت ICDD استاندارد ندارد، اما عرض کم پیک در این زاویه، نشان‌دهنده اندازه ذرات کربن در مقیاس نانومتری است.

برای تخمین اندازه کریستالیت (D) نانوذرات موجود در کامپوزیت SP، از معادله شرر (Debye-Scherrer) استفاده شد: $D = K\lambda / (\beta \cos \theta)$ که در آن K ضریب شکل ($0/9$)، λ طول موج اشعه ایکس ($1/5406 \text{ \AA}$)، β پهنای کامل پیک در نیمه حداکثر (FWHM) به رادیان، و θ زاویه براگ به رادیان است. با استفاده از مقادیر استخراج شده از شکل ۲ ($2\theta = 3^\circ$) درجه و $\beta = 2/1$ درجه)، اندازه کریستالیت محاسبه شده تقریباً $3/81$ نانومتر به دست آمد.

این نتیجه، حضور مؤلفه‌های نانوساختار در کامپوزیت SP را

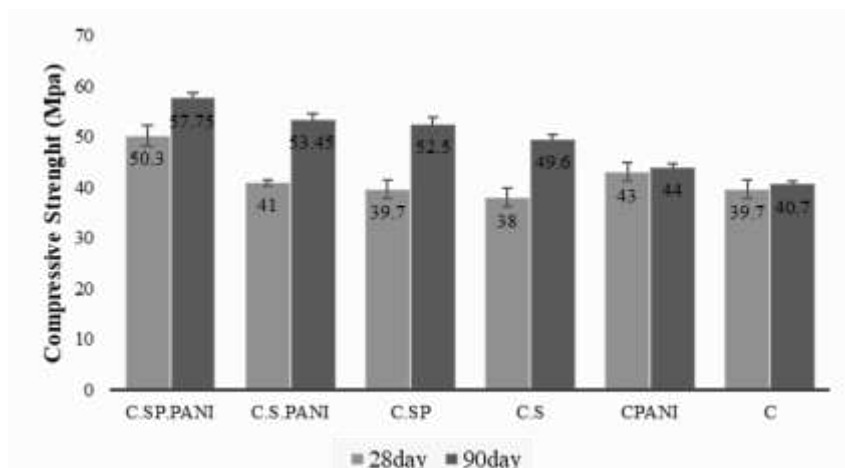


شکل ۲. طیف اشعه ایکس نمونه سرباره فولادسازی با سرد شدن در حالت عادی، سرد شدن سریع (S) و کامپوزیت حاصل از سرباره وزغال پوست پسته (SP).

تأیید می‌کند که می‌تواند بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن تأثیرگذار باشد.

۳-۲- نتایج مقاومت فشاری

تأثیر جایگزینی سیمان با سرباره (S)، کامپوزیت سرباره/ زغال پوست پسته (SP) و پلی آنیلین (PANI) بر مقاومت فشاری بتن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که نمونه C.SP.PANI (حاوی ۱۰٪ کامپوزیت SP و ۰/۰۲٪ PANI) بالاترین مقاومت فشاری را در هر دو سن از خود نشان می‌دهد. به طور خاص، مقاومت فشاری نمونه شاهد (C) در ۹۰ روزگی ۵۲/۵ مگاپاسکال بوده، در حالی که نمونه C.SP.PANI به مقاومت ۵۸ مگاپاسکال رسیده است. این بدان معناست که جایگزینی ۱۰٪ سیمان با ترکیب SP و PANI منجر به افزایش ۴۲ درصدی مقاومت فشاری در ۹۰ روزگی شده است. این افزایش قابل توجه را می‌توان به دو عامل اصلی نسبت داد: اول، خاصیت پوزولانی سرباره و ذرات نانو کربن در کامپوزیت SP که منجر به تشکیل محصولات هیدراسیون اضافی و افزایش تراکم ساختار بتن می‌شود؛ و دوم، تأثیر پلی آنیلین که علاوه بر خواص رسانایی، می‌تواند به عنوان یک عامل پرکننده منافذ و بهبود دهنده پیوند در ماتریس سیمانی عمل کند. افزایش مقاومت فشاری در نمونه C.SP.PANI نسبت به نمونه شاهد، به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از افزایش مشاهده شده در نمونه‌هایی است که تنها با سرباره (C.S) یا کامپوزیت (C.SP) اصلاح شده‌اند. این نشان می‌دهد که ترکیب همزمان سرباره، ذرات نانو کربن و پلی آنیلین، اثر هم‌افزایی (synergistic effect) در بهبود خواص مکانیکی بتن دارد.



شکل ۳. تاثیر جایگزینی سیمان با مواد مختلف مورد مطالعه (سرباره (S)، کامپوزیت (SP) و پلی آنیلین (PANI)) بر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بعد از ۲۸ روز و ۹۰ روز.

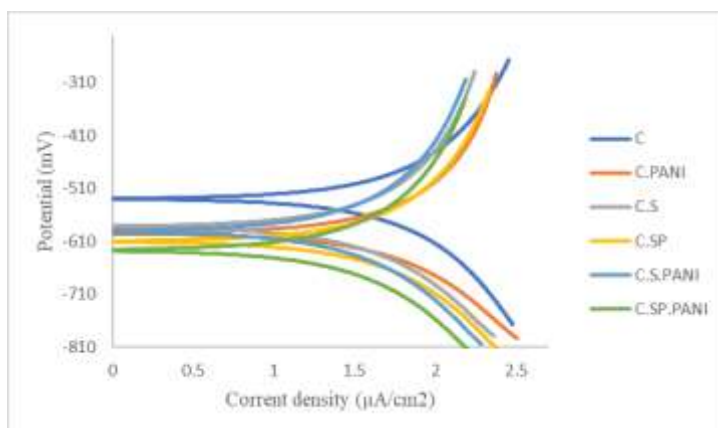
۳-۳. نتایج آزمون‌های خوردگی

الف) پلاریزاسیون تافل:

نمودارهای پلاریزاسیون تافل برای نمونه‌های مختلف بتن در شکل ۴ ارائه شده است. پارامترهای کلیدی خوردگی شامل پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و شدت جریان خوردگی (i_{corr}) که از این نمودارها استخراج شده‌اند، در جدول ۴ آورده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نمونه C.SP.PANI (حاوی ۱۰٪ SP و ۰/۰۲٪ PANI) کمترین پتانسیل خوردگی (۶۳۱- میلی‌ولت) و کمترین شدت جریان خوردگی ($2/5 \mu A/cm^2$) را در مقایسه با سایر نمونه‌ها، از جمله نمونه شاهد (C) با بیشترین پتانسیل (۵۲۴- میلی‌ولت) و شدت جریان ($4 \mu A/cm^2$) از خود نشان می‌دهد.

نمونه شاهد (C) دارای شیب‌های پلاریزاسیون کمتری است که نشان‌دهنده تسهیل فرآیند خوردگی فولاد در بتن شاهد است. مقایسه جزئی‌تر با استفاده از نتایج وارد شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که کامپوزیت SP به تنهایی ۱۸٪، سرباره S به تنهایی ۲۷٪ و پلی آنیلین PANI به تنهایی ۵٪ شدت جریان خوردگی را کاهش دادند، در حالی که ترکیب کامپوزیت و پلی آنیلین (در نمونه C.SP.PANI) توانست شدت جریان خوردگی را تا ۳۷٪ کاهش دهد.

این نتایج مؤید اثر هم‌افزایی مثبت ترکیب مواد مختلف برای دستیابی به بتن ضد خوردگی پایدار است. اینکه از چه روشی توانسته‌اند این کار را انجام دهند را میتوان با تحلیل نتایج امپدانس الکتروشیمیایی تا حدودی متوجه شد.



شکل ۴. نمودار تافل نمونه‌های بتنی حاوی جایگزین‌های مختلف برای سیمان (سرباره (S)، کامپوزیت (SP) و پلی آنیلین (PANI)).

جدول ۴. تاثیر جایگزینی سیمان با مواد مورد مطالعه (سرباره، کامپوزیت و پلی آنیلین) بر نتایج تست تافل نمونه‌های بتنی

	$i_{corr}(\mu A/cm^2)$	$E_{corr}(mV)$
C	۴	۵۲۴
C.PANI	۳/۸	۵۸۸
C.S	۲/۹	۵۷۵
C.SP	۳/۳	۶۱۷
C.S.PANI	۲/۶	۵۸۵
C.SP.PANI	۲/۵	۶۳۱

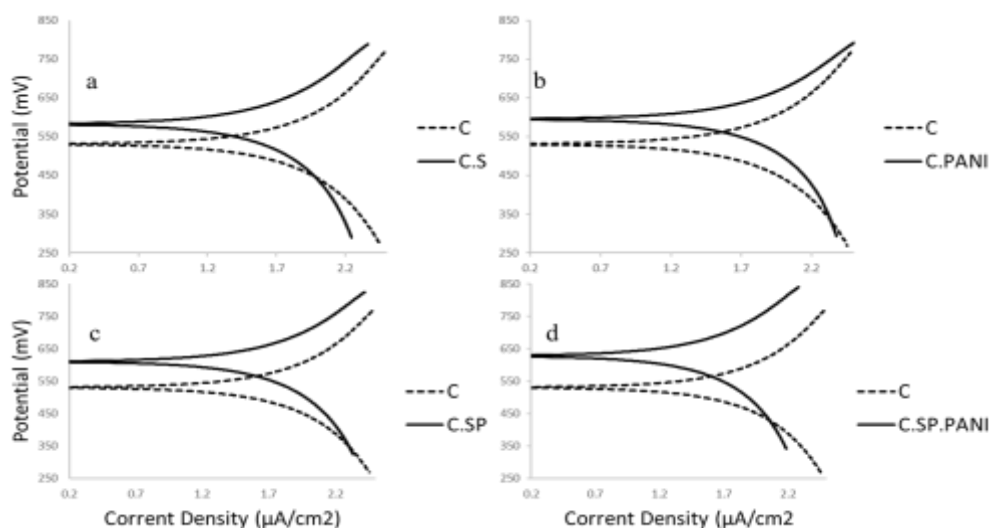
سمت وضعیت غیرفعال تر و مقاوم تر در برابر شروع خوردگی است. این پدیده می‌تواند ناشی از تشکیل لایه محافظ سطحی یا افزایش رسانایی الکتریکی ماتریس بتن باشد [۲۹]. نتایج تحقیقات ژو و همکاران [۳۰] نیز نشان داده است که پلی آنیلین با ایجاد خاصیت ضد رسوبی، می‌تواند از خوردگی بتن جلوگیری کند.

شکل ۵- c نشان می‌دهد که سرباره و نانوکربن که کامپوزیت را تشکیل داده‌اند توانسته‌اند هم باعث افزایش پلاریزاسیون کاتدی و آندی شوند و هم پتانسیل خوردگی را کاهش دهند. شکل ۵- d نشان می‌دهد که ترکیب سرباره، نانوکربن و پلی آنیلین اثر هم‌افزایی قابل توجهی بر مقاومت خوردگی بتن دارد. در این نمونه، هر دو پارامتر E_{corr} و شیب‌های پلاریزاسیون به طور همزمان بهبود یافته‌اند، که نشان‌دهنده کاهش نرخ خوردگی و افزایش مقاومت در برابر شروع خوردگی است.

این هم‌افزایی احتمالاً از طریق بهبود ساختار ریزدانه، کاهش نفوذپذیری و تشکیل لایه‌های محافظ حاصل می‌شود.

تحلیل منحنی‌های پلاریزاسیون تافل در شکل ۵ نشان داده است که افزودنی‌های مختلف تأثیر قابل توجهی بر مقاومت الکتروشیمیایی بتن در برابر خوردگی دارند. مقایسه نمودار پلاریزاسیون نمونه بتن کنترل (C) با نمونه حاوی سرباره (C.S) شکل ۵- a نشان‌دهنده تأثیر چشمگیر سرباره بر سینتیک واکنش‌های الکتروشیمیایی است.

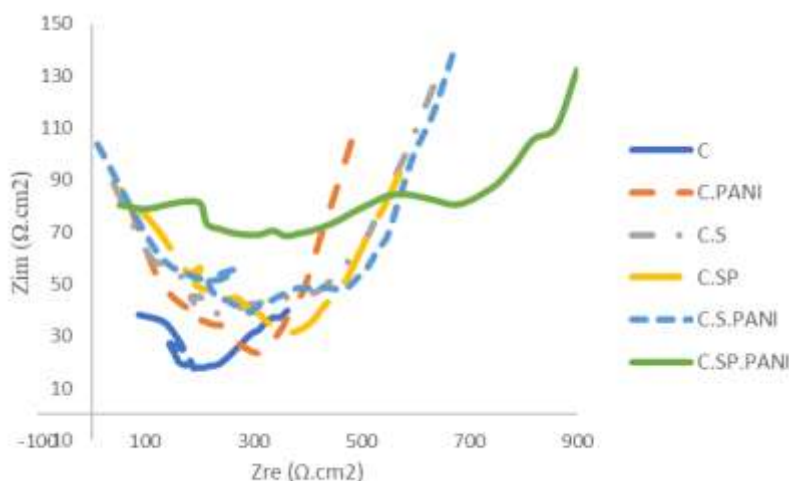
افزایش شیب‌های پلاریزاسیون کاتدی و آندی در نمونه C.S مؤید بهبود مقاومت بتن در برابر واکنش‌های احیا و اکسیداسیون و کاهش نرخ خوردگی است. این بهبود را می‌توان به واکنش پوزولانی سرباره با هیدروکسید کلسیم (CH) و تولید فازهای سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیشتر نسبت داد [۱۲]. افزایش میزان C-S-H منجر به کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن در برابر یون‌های خورنده می‌شود. شکل ۵- b نشان می‌دهد که افزودن پلی آنیلین (PANI) تغییربرجسته‌ای در شیب‌های پلاریزاسیون ایجاد نمی‌کند، اما پتانسیل خوردگی (E_{corr}) را کاهش می‌دهد. این کاهش نشان‌دهنده تمایل بیشتر سیستم به



شکل ۵. تاثیر (a) سرباره (S)، (b) پلی آنیلین (PANI)، (c) کامپوزیت (SP) و (d) PANI و SP بر نمودار تافل نمونه بتن.

این منحنی‌ها در ثابت‌های زمانی مختلف زیاد بوده و فاقد شکل نیم‌دایره‌ای کامل می‌باشند؛ بنابراین، شناسایی حلقه‌های مربوط به ثابت‌های زمانی مختلف به دشواری صورت می‌گیرد. با این حال، با استفاده از نمودار بد فاز (Bode Phase plot) می‌توان مقاومت کلتی پلاریزاسیون نمونه‌ها را استخراج نمود که نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است.

ب) امپدانس الکتروشیمیایی: منحنی‌های نایکوئیست حاصل از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، بدون لحاظ کردن مقاومت محلول، در شکل ۶ ارائه شده‌اند. منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌های بتنی در این تحقیق، ظاهری غیرمعمول در مقایسه با منحنی‌های نایکوئیست متداول در مطالعات خوردگی فلزات از خود نشان می‌دهند. قطر



شکل ۶. نمودارهای نایکوئیست نمونه‌های بتنی حاوی جایگزین‌های مختلف برای سیمان (سرباره (S)، کامپوزیت (SP) و پلی آنیلین (PANI)) (مقاومت محلول (R_{sol}) حذف شده است).

جدول ۵. تاثیر جایگزینی سیمان با مواد مختلف مورد مطالعه (سرباره، کامپوزیت و پلی آنیلین) بر المان‌های مدار معادل ($R(QR(QR)OR)$) حاصل از تست امپدانس الکتروشیمیایی نمونه‌های بتنی

	C	C.PANI	C.S	C.SP	C.SP, PANI	C.SP, PANI
$R(\Omega.cm^2)$	۳۴۰	۴۰۶	۵۲۰	۵۱۲	۶۶۱	۸۴۲
$R_{sol}(\Omega.cm^2)$	۴۶۷	۲۶۹	۴۳۳	۳۶۴	۶۰۶	۲۲۴
$Y_{0-c}(S-sec^{-n})$	$1E-8$	$1E-8$	$1E-8$	$1E-8$	$1E-8$	$1E-8$
n_{co}	۱	۱	۱	۱	۱	۱
$R_{co}(\Omega.cm^2)$	۵۴۸	۱۰۸۶	۱۲۸۵	۸۳۷	۱۹۶۴	۳E۶
$Y_{0-dl}(S-sec^{-n})$	$0/003$	$0/0002$	$0/0003$	$0/0001$	$0/0002$	$0/0005$
n_{dl}	$0/3$	$0/3$	$0/3$	$0/3$	$0/3$	$0/2$
$R_{dl}(\Omega.cm^2)$	۳۲۹	۱۶۶	۲۱۳	۲۱۷	۳۲۸	$0/3$
O_{pr}	$3E-5$	$0/008$	$0/005$	$0/003$	$0/009$	$0/02$
$R_{pr}(\Omega.cm^2)$	۱۶	۲۳۳	۲۱۵۶	۶۳۵۷	۷۶۶۴	۷۴
B_{pr}	۴۴۴	۵۴۸	۸۶۹	۸۸۱	۷۵۲	۱۱۵۷

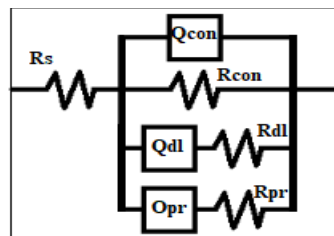
بین ۱- و ۱ قرار دارد. مقدار n در CPE، نشان‌دهنده میزان ناهمگنی یا ناهمواری سطح الکترود است؛ به طوری که برای یک خازن ایده‌آل و سطحی کاملاً همگن، n برابر ۱ خواهد بود. هرچه مقدار n از ۱ کمتر باشد، بیانگر ناهمگنی بیشتر سطح، وجود تخلخل‌ها یا مکانیزم‌های پیچیده‌تر توزیع زمانی ثابت (constant phase angle) در سطح فصل مشترک است.

بررسی جدول ۵ نشان می‌دهد که ضریب n_{con} برای المان فاز ثابت CPE مربوط به بتن در تمامی نمونه‌ها برابر با ۱ است. این امر حاکی از آن است که المان CPE در این حالت به عنوان یک خازن خالص عمل می‌کند و ظرفیت آن (Y_{0-con}) برای همه نمونه‌ها یکسان است. این نتیجه دلالت بر این دارد که میزان بار ذخیره شده در بتن تمامی نمونه‌ها در طول غوطه‌وری در محلول، ثابت باقی مانده است. این موضوع نشان می‌دهد که در مقیاس کلی بتن، ناهمگنی سطح یا توزیع فاز برای همه نمونه‌ها یکسان بوده و رفتار خازنی ایده‌آلی از خود نشان می‌دهند.

در مقابل، برای المان فاز ثابت مربوط به لایه دوگانه نزدیک آرماتور (CPE_{dl})، مقدار ضریب n تقریباً ۰/۳ است. این مقدار که به طور قابل ملاحظه‌ای از ۱ کوچکتر است، نشان‌دهنده ناهمگنی قابل توجه در سطح آرماتور و/یا توزیع غیریکنواخت فرآیندهای الکتروشیمیایی در فصل مشترک بتن و آرماتور است. این انحراف از $n=1$ ، تأکیدی بر پیچیدگی‌های سطح آرماتور در محیط بتن و وجود نواحی فعال و غیرفعال مختلف است. قابل ذکر است که مقدار Y_{0-dl} برای لایه دوگانه نمونه شاهد، ده برابر نمونه‌های دیگر بوده، در حالی که مقادیر آن برای سایر نمونه‌ها تقریباً یکسان است. این مشاهده نشان می‌دهد که میزان بار در لایه دوگانه نمونه شاهد ده برابر بیشتر از سایر نمونه‌ها است. بنابراین، پارامترهای تعیین‌کننده تفاوت رفتاری در نمونه‌های حاوی جایگزین‌های مختلف سیمان، عمدتاً المان‌های مقاومت (R_{pr} ، R_{dl} ، R_{con}) و المان تابع هذلولی کتانژانت هذلولی (O_{pr}) می‌باشند.

شکل ۸ تاثیر جایگزین‌های سیمان مختلف را در بتن نشان می‌دهند. در شکل ۸-a، منحنی‌های نایکوئیست نمونه‌های C و C.S مقایسه شده‌اند. آشکار است که حضور سرباره در نمونه C.S منجر به افزایش قابل توجه شیب در قسمت راست منحنی نایکوئیست شده است. این امر نشان می‌دهد که سرباره به تنهایی موجب افزایش امپدانس موهومی در فرکانس‌های پایین‌تر

پس از بررسی تمامی مدارهای معادل پیش‌فرض در نرم‌افزار ZSim، مدار نشان داده شده در شکل ۷ بیشترین تطابق را با داده‌های تجربی این تحقیق نشان داد. مقادیر عناصر این مدار برای تمامی نمونه‌ها نیز در جدول ۵ درج گردیده است.



شکل ۷. مدار معادل رفتار الکتروشیمیایی خوردگی آرماتور در بتن.

این مدار معادل شامل اجزای زیر است:
 R_s (مقاومت محلول): این جزء، مقاومت محلول را نشان می‌دهد. از آنجا که مقاومت محلول در بررسی خواص الکتروشیمیایی خوردگی آرماتور در بتن از اهمیت کمتری برخوردار است، در ادامه مورد بحث قرار نمی‌گیرد.
 R_{con} و CPE_{con} : این عناصر مربوط به فاز بتن بوده و مکانیزم‌های الکتروشیمیایی درون بتن را تعریف می‌کنند.
 R_{dl} و CPE_{dl} : این عناصر به لایه دوگانه تشکیل شده در سطح آرماتور مربوط بوده و رفتار خوردگی آرماتور در محیط بتن را توصیف می‌نمایند.

O_{pro} و R_{pro} : بر اساس مطالعات لیو و همکاران [۲۷]، عناصر O_{pro} و R_{pro} به نفوذ عوامل خوردنده از طریق ترک‌ها و خلل و فرج‌های دارای مسیرهای زیگزاگی مرتبط هستند. در مواردی که مسیرهای نفوذ مستقیم و بدون پیچ‌وخم باشند، از المان واربرگ (W) برای توصیف این مشخصه استفاده می‌شود. اما در فصل مشترک بتن و آرماتور، ریزساختار بتن و شکل ترک‌ها منجر به ظهور المان O ، که تابعی هذلولی کتانژانت هذلولی (hyperbolic cotangent) است، شده است. R_{pro} نیز مقاومت در برابر عبور یون‌ها را در ترک‌ها نشان می‌دهد که به شکل ترک و نوع خلل و فرج‌ها بستگی دارد.

مقاومت (R) بیانگر مقاومت در برابر انتقال بار در یک فرآیند خاص یا درون یک ماده است. خازن (C) نشان‌دهنده توانایی ذخیره بار الکتریکی است و عنصر فاز ثابت (CPE) یک المان کلی است که رفتار فازی متغیر را نمایش می‌دهد و مقدار n آن

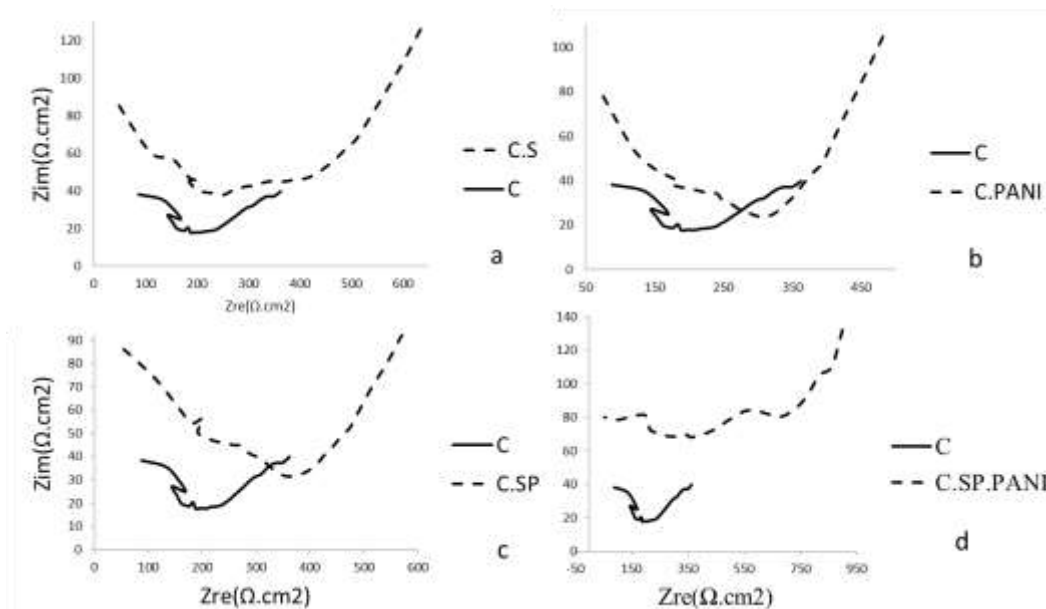
می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که حضور پلی آنیلین هم المان‌های مربوط به نفوذ (Opr و Bpr) را در سطح آرماتور افزایش داده و هم میزان مقاومت‌ها (Rpr و Rdl, Rcon) را در ثابت‌های زمانی مختلف بالا برده است. اما تأثیر آن بر افزایش المان‌های مربوط به نفوذ، به طور قابل توجهی بیشتر از تأثیر آن بر مقاومت‌ها است. این امر را می‌توان به پیچیده‌تر و باریک‌تر شدن مسیر عبور یون‌ها و عوامل خورنده در حضور پلی آنیلین تعبیر نمود.

در شکل ۸-c تأثیر حضور SP بر مشاهده می‌شود که SP نیز باعث افزایش کشیدگی منحنی روی محور امپدانس حقیقی و افزایش شیب در قسمت راست منحنی شده است. در شکل ۸-d، تأثیر حضور همزمان SP (ابر روان کننده) و PANI (پلی آنیلین) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که SP در حضور PANI، افزایش بی‌سابقه‌ای در کشیدگی منحنی روی محور امپدانس حقیقی ایجاد می‌کند که در حضور هیچ عنصر دیگری مشاهده نشده است. بررسی مکانیزم دقیق این اثر افزایشی SP در حضور PANI، نیازمند تحقیقات بیشتری است.

می‌شود. فرکانس‌های پایین‌تر به رفتار الکتروشیمیایی نزدیک سطح آرماتور در بتن مرتبط هستند. این افزایش در امپدانس موهومی را می‌توان به افزایش مقادیر المان‌های مربوط به نفوذ (Opr, Bpr) نسبت داد.

بر اساس جدول ۵، مقادیر بالاترین المان‌ها در نمونه C.S نسبت به C، حاکی از دشوارتر شدن نفوذ عوامل خورنده به سطح آرماتور است. علاوه بر این، کشیدگی منحنی روی محور امپدانس حقیقی در شکل ۸-a برای نمونه حاوی سرباره (S) قابل توجه است، که به معنای افزایش میزان مقاومت‌ها (Rdl, Rcon و Rpr) در ثابت‌های زمانی مختلف است.

در شکل ۸-b تأثیر حضور پلی آنیلین در این شکل قابل مشاهده است. شیب منحنی در قسمت سمت راست برای نمونه حاوی پلی آنیلین، افزایش یافته است که دلالت بر افزایش امپدانس موهومی (و در نتیجه افزایش المان‌های مربوط به نفوذ) دارد. همچنین، منحنی روی محور امپدانس حقیقی کشیده‌تر شده است؛ با این حال، میزان تغییر در کشیدگی منحنی روی محور امپدانس حقیقی به مراتب کمتر از مورد سرباره شکل ۸-a



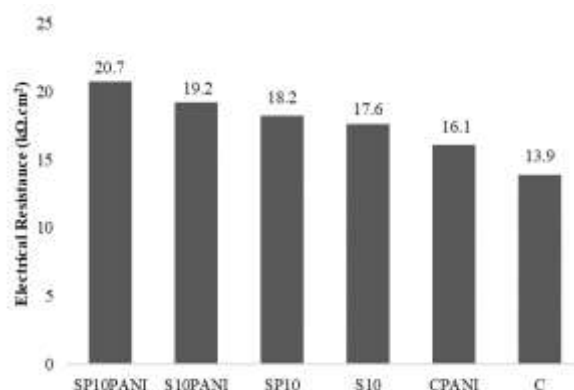
شکل ۸. تأثیر (a) سرباره (S)، (b) پلی آنیلین (PANI)، (c) کامپوزیت (SP) و (d) SP و PANI بر منحنی نایکوئیست نمونه بتن مسلح.

مکانیسم‌های تأثیر افزودنی‌ها بر بتن را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود: سرباره (S): سرباره به عنوان یک ماده پوزولانی فعال، نقش حیاتی در تغییر شیمیایی و بهبود ساختار بتن ایفا می‌کند. این ماده با هیدروکسید کلسیم (CH) حاصل از هیدراتاسیون سیمان پرتلند واکنش داده و سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) اضافی تولید می‌کند. افزایش C-S-H منجر به متراکم شدن ساختار بتن و افزایش مقاومت آن در برابر نفوذ یون‌های خورنده می‌شود [۱۲]. این فرآیند هم یک تغییر شیمیایی در محصولات هیدراتاسیون و هم یک تراکم فیزیکی در ماتریکس بتن ایجاد می‌کند. با توجه به شکل‌های ۵ و ۸، سرباره می‌تواند باعث تغییر شیب پلاریزاسیون آندی و کاتدی و همچنین افزایش امیدانس شود. بنابراین سرباره نقش اصلی را در ایجاد تغییر شیمیایی ایفا می‌کند؛ با تولید C-S-H بیشتر، ترکیب شیمیایی و ساختاری بتن را بهبود می‌بخشد. زغال: مطالعات نشان می‌دهند نانوکربن‌ها می‌توانند به عنوان نقاط هسته‌زایی برای هیدراتاسیون سیمان عمل کنند [۹-۱۳]. همچنین منگ و همکاران گزارش کرده‌اند که گرافن (G) و اکسید گرافن (GO) با کمک به تحرک یون‌ها، هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌کنند. این تسریع در سینتیک هیدراتاسیون، رشد نانوترک‌ها را محدود کرده و دوام بتن را افزایش می‌دهد، که می‌تواند دلیل بهبود خواص الکتروشیمیایی و مکانیکی نمونه‌های حاوی نانوزغال باشد [۹]. پلی آنیلین (PANI): با توجه به شکل‌های ۵ و ۸ افزودن سرباره به همراه پلی آنیلین، بدون تغییر محسوس در شیب پلاریزاسیون آندی و کاتدی، مقدار المان‌های مختص نفوذ را افزایش می‌دهد که به کاهش حدود ۳۵ درصدی شدت جریان خوردگی منجر می‌شود. پلی آنیلین ممکن است با افزایش رسانایی الکتریکی، به

یکپارچگی بهتر فرآیندهای الکتروشیمیایی در بتن کمک کرده و با سرباره اثر هم‌افزایی داشته باشد. تحقیقات گنچارووا و همکارانش [۲۹] نشان داده‌اند که پلیمرهایی مشابه پلی آنیلین می‌توانند با تنگ کردن مسیر نفوذ آب، از خوردگی بتن جلوگیری کنند. همچنین، ژو و همکارانش [۳۰] گزارش کرده‌اند که پلی آنیلین از طریق خاصیت ضد رسوبی بر سطح بتن، مانع از خوردگی می‌شود، که این یافته‌ها مؤید نتایج این تحقیق هستند. با توجه به نتایج پلاریزاسیون تافل میتوان گفت هر سه افزودنی (سرباره، پلی آنیلین، زغال) به تراکم فیزیکی بتن کمک می‌کنند. سرباره از طریق تولید C-S-H و پر کردن منافذ، و پلی آنیلین و نانوزغال نیز به عنوان پرکننده‌های ریز یا بهبوددهنده هیدراتاسیون، به کاهش تخلخل و افزایش فشردگی بتن کمک می‌کنند. با این حال، تراکم ناشی از سرباره با بهبود خواص شیمیایی و مکانیکی همراه است.

ج) مقاومت الکتریکی:

نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی پس از ۹۰ روز در شکل ۹ ارائه شده است. مقاومت الکتریکی بتن به عنوان معیاری برای نفوذپذیری آن در برابر یون‌های خورنده (مانند کلرید) و آب در نظر گرفته می‌شود؛ مقاومت الکتریکی بالاتر، نفوذپذیری کمتر و در نتیجه مقاومت به خوردگی بیشتر را نشان می‌دهد. نمونه C.SP.PANI (حاوی ۱۰٪ SP و ۰/۰۲٪ PANI) بالاترین مقاومت الکتریکی را با افزایش ۴۸ درصدی نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. این یافته با نتایج مقاومت فشاری و آزمون تافل همخوانی دارد و نشان می‌دهد که ترکیب سرباره، ذغال پوست پسته و پلی آنیلین، ساختار بتن را متراکم‌تر کرده و مسیر نفوذ یون‌ها را مسدود می‌سازد.

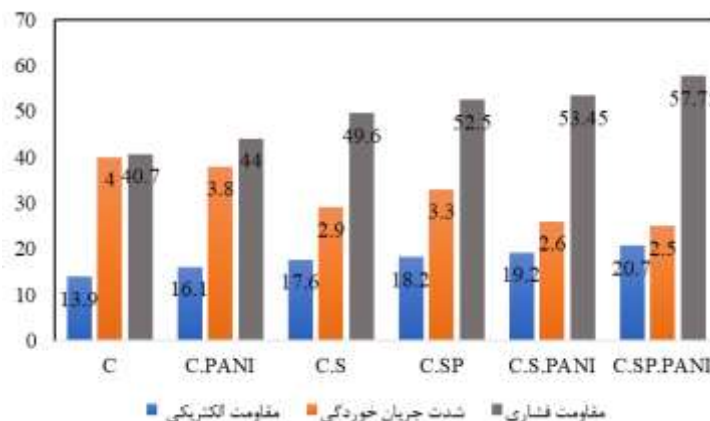


شکل ۹. مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی حاوی جایگزین‌های مختلف برای سیمان (سرباره (S)، کامپوزیت (SP) و پلی آنیلین (PANI)) (پس از نود روز) ($K\Omega.cm^2$).

۴-۳- همبستگی نتایج مکانیکی و الکتروشیمیایی

شکل ۱۰ به طور خلاصه، همبستگی بین مقاومت فشاری، شدت جریان خوردگی، مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت الکتریکی را برای نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، نمونه‌هایی که بالاترین مقاومت فشاری را از خود نشان می‌دهند

(مانند C.SP.PANI)، کمترین شدت جریان خوردگی، بالاترین مقاومت پلاریزاسیون و مقاومت الکتریکی را نیز دارا هستند. این همبستگی قوی بین نتایج آزمون‌های مکانیکی و الکتروشیمیایی، اعتبار یافته‌های این تحقیق را تأیید می‌کند.



شکل ۱۰. مقایسه مقاومت الکتریکی ($\Omega.cm^2$)، شدت جریان خوردگی ($\mu A/cm^2$) و مقاومت فشاری (Mpa) نمونه‌های بتن مسلح حاوی جایگزین‌های مختلف سیمان

۴- نتیجه‌گیری

- بر اساس یافته‌های این پژوهش، جایگزینی ۱۰ درصد سیمان با سرباره فولادسازی می‌تواند تغییرات شیمیایی مطلوبی در محصولات هیدراسیون بتن ایجاد کند که منجر به افزایش ۲۲ درصدی مقاومت فشاری، ۵۳ درصدی مقاومت پلاریزاسیون و نیز کاهش ۲۷ درصدی شدت جریان خوردگی می‌شود. با این حال، استفاده از کامپوزیت حاصل از ترکیب سرباره فولادسازی و زغال پوست پسته، تأثیرات به مراتب چشمگیرتری را به همراه خواهد داشت. به طور خاص، افزودن این کامپوزیت به همراه ۰/۰۲٪ پلی آنیلین (نمونه C.SP.PANI) باعث افزایش قابل توجهی در تمامی خواص بتن می‌شود. این ترکیب، علاوه بر افزایش ۴۲ درصدی مقاومت فشاری (که نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی بتن است)، موجب افزایش ۱۴۷ درصدی مقاومت پلاریزاسیون و کاهش ۳۷ درصدی شدت جریان خوردگی (که بیانگر افزایش قابل توجه مقاومت در برابر خوردگی میلگرد است) می‌گردد. همچنین، نمونه C.SP.PANI با افزایش ۴۹ درصدی مقاومت الکتریکی بتن، نفوذپذیری آن را به طور چشمگیری کاهش داده و از این طریق، مانع از رسیدن عوامل خورنده به میلگرد می‌شود.
- این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از کامپوزیت سرباره/زغال پوست پسته و پلی آنیلین، رویکردی مؤثر و پایدار برای تولید بتن با عملکرد بالا و مقاوم در برابر خوردگی است. اثر هم‌افزایی این سه جزء (سرباره، ذرات نانوکربن حاصل از پیرولیز پوست پسته، و پلی آنیلین) منجر به بهبود همزمان خواص مکانیکی، دوام و مقاومت الکتروشیمیایی بتن می‌شود. این بتن اصلاح‌شده، نه تنها در سازه‌های جدید کاربرد دارد، بلکه می‌تواند در تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی آسیب‌دیده نیز مورد استفاده قرار گیرد، که این امر به افزایش طول عمر و کاهش هزینه‌های نگهداری زیرساخت‌ها منجر خواهد شد.
- با توجه به پتانسیل بالای سرباره‌های فولادسازی و پسماندهای کشاورزی نظیر پوست پسته برای تولید مواد افزودنی بتن، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات آتی بر بهینه‌سازی نسبت این مواد، بررسی اثر آن‌ها بر سایر خواص بتن (مانند مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ذوب‌شدن)، و ارزیابی عملکرد بلندمدت سازه‌های ساخته‌شده با این نوع بتن متمرکز شود. همچنین، بررسی جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از این مواد، می‌تواند به تجاری‌سازی و کاربرد گسترده‌تر آن‌ها در صنعت ساخت‌وساز کمک کند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه صنعتی همدان بابت فراهم کردن مواد و تجهیزات مورد نیاز جهت انجام این پژوهش تشکر نموده و همچنین از انجمن خوردگی ایران بابت چاپ این پژوهش در فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] M. Dolores, M. Eugenia, F. A. Perez-Garcia, Bettencourt, Influence of Steel Slag Type on Concrete Shrinkage, Sustainability, Vol. 13, 2021, pp. 214
- [2] L. Wang, H. Quan, and Q. Li, Evaluation of Slag Reaction Efficiency in Slag-Cement Mortars under Different Curing Temperature, Materials, Vol. 12, 2019, pp. 18.
- [3] Y. UEKI, History and Utilization of Portland Blast Furnace Slag Cement, Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report, Vol. 109, 2015, pp.109-113
- [4] E. D. Shumuye and Z. Jun, A Review on Ground Granulated Blast Slag (GGBS) in Concrete, The Eighth International Conference on Advances in Civil and Structural Engineering, Vol. 12, 2018, pp. 76-78
- [5] M. Bouasria, F. Khadraoui, M. H. Benzaama, K. Touati, Partial substitution of cement by the association of Ferronickel slags and Crepidula fornicata shells, Building Engineering, Vol. 13, 2021, pp. 33
- [6] E. Gerasimova, The Effect of Fe_2O_3 on the Mechanical Properties of the Polymer Modified Cement Containing Fly Ash, Procedia Engineering, Vol. 150, 2016, pp. 1553 – 1557.
- [7] S.C. Choi, W. K. Lee, Effect of Fe_2O_3 on the Physical Property of Geopolymer Paste, Advanced Materials Research, Vol. 586, 2012, pp. 126-129.
- [8] A. Kishar, Y. Alasqalani, R. Sarraj, A. Ahmed, The Effect of Using Commercial Red and Black Iron Oxides as a Concrete Admixtures on its Physiochemical and Mechanical Properties, Science and Research, Vol. 4, 2013, pp. 1389-1393.
- [9] D. Suarez-Rieraa, L. Restucciaa, and G.A. Ferroa, The use of Biochar to reduce the carbon footprint of cement-based material, Journal of Procedia Structural Integrity, Vol. 26, 2020, pp. 199–210.
- [10] A. Akhtar, and A.K. Sarmah, Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties, Journal of Science of the Total Environment, Vol. 616–617, 2018, pp. 408–416.
- [11] R. Mrad, and G. Chehab, Mechanical and Microstructure Properties of Biochar-Based Mortar: An Internal Curing Agent for PCC, Journal of Sustainability, Vol. 11, No. 9, 2019, pp. 2491
- [12] Wang L, Zhang S, Zheng D, Yang H, Cui H, Tang W, and Li D. Effect of Graphene Oxide (GO) on the Morphology and Microstructure of Cement Hydration Products. Nanomaterials, Vol. 7, 2017, pp. 429
- [13] Szela M. Mechano-Physical Properties and Microstructure of Carbon Nanotube Reinforced Cement Paste after Thermal Load. Nanomaterials, Vol. 7, 2017, pp. 267
- [14] S. Pour-Ali, C. Dehghanian, and A. Kosari, Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline–camphorsulfonate nanocomposite coating, Journal of corrosion Science, Vol. 90, 2015, pp. 239-247.
- [15] B. Ramezanzadeh, G. Bahlakeh, and M. Ramezanzadeh, Polyaniline-cerium oxide (PAni-CeO_2) coated graphene oxide for enhancement of epoxy coating corrosion protection performance on mild steel, Journal of Corrosion Science, Vol. 137, 2018, pp. 111-126.
- [16] Y. Zhang, Y. Shao, X. Liu, C. Shi, Y. Wang and G. Meng, A study on corrosion protection of different polyaniline coatings for mild steel, Journal of Progress in Organic Coatings, Vol. 111, 2017, pp. 240-247.
- [17] G. Ebrahimi, F. Rezae, and J. Neshati, Investigation on corrosion protection mechanism of polyaniline nanoparticles doped with phosphoric acid by scanning Kelvin probe and other electrochemical methods, Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 70, 2016, pp. 427-436.
- [18] C. Zhoua, X. Gong, Y. Qub and J. Hanb, Hydrophobic and high adhesive polyaniline layer of rectangular microtubes fabricated by a modified interfacial polymerization, Journal of Applied Surface Science, Vol. 379, 2016, pp. 124–131.
- [19] J.P. Broomfield, Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair, Crc Press, Jan 31, 2023
- [20] M. Ismail and M. Ohtsu, Corrosion rate of ordinary and high-performance concrete subjected to chloride attack by AC impedance spectroscopy. Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 7, 2006, pp. 458-469.
- [21] J. Kim, K.T. Park, and T.H. Kwon, Influencing Factors of Steel States in Concrete Based on Electrochemical Impedance Spectroscopic Measurements, Applied Sciences, Vol. 12, No. 24, 2022, pp.12611.
- [22] J.K. Kim, S.H. Kee, C.M. Futralan and J.J. Yee, Corrosion monitoring of reinforced steel embedded in cement mortar under wet-and-dry cycles by electrochemical impedance spectroscopy, Sensors, Vol. 20, No. 1, 2019, pp.199.

- [23] M. Jin, L. Jiang, M. Lu, N. Xu and Q. Zhu, Characterization of internal damage of concrete subjected to freeze-thaw cycles by electrochemical impedance spectroscopy, *Construction and Building Materials*, Vol. 152, 2017, pp. 702-707.
- [24] F. Guo, Calcined clay and limestone as partial replacements of portland cement: Electrochemical corrosion behavior of low carbon steel rebar as concrete reinforcement in corrosive environment, *International Journal of electrochemical Science*, Vol. 15, No. 12, 2020, pp.12281-12290.
- [۲۵] ح. نوری، ن. علوی، ع. افشار، بررسی خوردگی بتن پوزوالنی توسط آزمون تسریع شده خوردگی. فصلنامه علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۱۵، سال ۱۳۹۶
- [26] L.I. Demira, İ.G. Atilgan, and S. Şensöz, Production of Biofuel from Soft Shell of Pistachio, *Chemical Engineering Communications*, Vol. 196, 2009, pp. 104-116.
- [27] Z. Yuefang, L. Jia, Z. Yahong, L. Jin and D. Yuping Facile, synthesis of hierarchical nanocomposites of aligned polyaniline nanorods on reduced graphene oxide nanosheets for microwave absorbing materials, *The Royal Society of Chemistry*, Vol. 7, 2017, pp. 54031–54038.
- [28] Y. Yang, D. Chen, H. Zhang, L. Zhou, P. Zhang, H. Jiang and D. Deng, Phosphorus-containing silane modified steel slag waste to reduce fire hazards of rigid polyurethane foams, *Journal of Advanced Powder Technology*, Vol. 1, 2020, pp. 1-19.
- [29] N.I. Goncharova, Z.A. Abobakirova, and A. Mukhamedzyanov, Influence Of Polymeric Additives On The Corrosion Resistance Of Concrete, *The American Journal of Applied sciences*, 2(10), Vol. 2, No. 10, 2020, pp. 1-5
- [30] S. Zhou, X. Liang, J. Gao, B. Ye, C. Li, J. Qian, Shu and Y. Ye, Applications of Polyaniline–Alkaline Copper Carbonate Composites for Anti-Bio-Attachment of Concrete in Marine Environments, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, No. 2, 2023, pp. 419.

