

Evaluation of durability and compressive strength of concrete using polypropylene, E205 and polycarboxylate ether additives

Mohammadreza Piryaee¹, Mehdi Komasi^{2*}

1- M.Sc. Student, Civil Eng., Islamic Azad University, Borujerd Branch, Borujerd, Iran

2 -Associate Prof. Civil Eng., Department, University of Ayatollah Ozma Borujerdi, Borujerd, Iran

ABSTRACT

Compressive strength of concrete is one of the most important properties of concrete. But in fact, in many cases, other concrete properties such as quality, permeability and durability are of particular importance. Nowadays researchers are trying to simultaneously enhance the mechanical properties and durability of concrete by examining additives. In this study, the experimental results of the effect of admixture concrete with different percentages of polycarboxylate ether and E205 additives were investigated separately on fiber reinforced concrete with polypropylene fibers. In this regard, durability tests including electrical resistivity tests, water absorption, rapid chloride permeability test (RCPT) and compressive strength of concrete have been investigated. In addition, to study the microstructure of cement paste containing polypropylene fibers and polycarboxylate ether additives and E205 additives were used, X-ray diffraction spectroscopy (XRD) experiments, scanning electron microscopy (SEM) images and XRF chemical composition test. The results show that adding additives to the concrete admixture, Reduced compared to the control sample 51% chlorine ion penetration in concrete with polycarboxylate ether and polypropylene fibers (sample A) and 36% chlorine ion penetration with E205 additive. water absorption was reduce in samples A 27% and in samples B, 16% compared to the control sample, also The increase in specific electrical resistivity compared to the control sample was 525% in samples A and 619% in samples B. Also, the compressive strength of samples at 7 and 28 days of age increased by 134% and 56%, respectively, and the highest compressive strength in samples B at 7 and 28 days were 43% and 29%, respectively. Control sample increased. According to the results, it can be concluded that the durability and compressive strength of fibers reinforced with polypropylene fibers is increased by adding polycarboxylate ether and E205 additives.

ARTICLE INFO

Receive Date: 28 November 2020

Revise Date: 28 November 2021

Accept Date: 05 February 2021

Keywords:

Durability

Polypropylene

Poly carboxylate Ether

E205

RCPT

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.242644.2207>

*Corresponding author: Mehdi Komasi.

Email address: Komasi@abru.ac.ir

بررسی دوام و مقاومت فشاری بتن با استفاده از افزودنی‌های الیاف پلی‌پروپیلن، پلی کربوکسیلات اتر و E205

محمد رضا پیریانی^۱، مهدی کماسی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، بروجرد، ایران

۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه آیت اله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران

چکیده

مقاومت فشاری بتن یکی از مهمترین خصوصیات بتن محسوب می‌شود. اما در واقع، در بسیاری موارد، سایر خصوصیات بتن مانند کیفیت، نفوذپذیری و دوام از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. امروزه پژوهشگران در تلاشند تا با بررسی از مواد افزودنی، خواص مکانیکی و دوام بتن را به‌طور همزمان افزایش دهند. در این پژوهش، نتایج آزمایشگاهی تأثیر اختلاط بتن با درصد‌های مختلف مواد افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و ماده E205 به‌طور جداگانه بر روی بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا از آزمایش‌های دوام شامل آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، جذب آب حجمی، نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT) و همچنین مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه، جهت مطالعه ریزساختار خمیر سیمان حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و مواد افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و افزودنی E205 از آزمایش‌های طیف سنجی تفرق اشعه ایکس (XRD)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آزمون ترکیب شیمیایی به روش XRF استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اضافه کردن افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و الیاف پلی‌پروپیلن (نمونه A) ۵٪ و اضافه کردن افزودنی E205 و الیاف پلی‌پروپیلن (نمونه B) ۳۶٪ نفوذ تسریع شده یون کلر را نسبت به نمونه شاهد کاهش می‌دهد، جذب آب حجمی بتن در نمونه‌های A، ۲۷٪ و در نمونه‌های B به مقدار ۱۶٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت، همچنین مقاومت ویژه الکتریکی بتن نسبت به نمونه شاهد در نمونه‌های A، ۲۶۳٪ و در نمونه‌های B، ۳۱۰٪ افزایش یافت. مقاومت فشاری در نمونه‌های A در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۳۴٪ و ۵۶٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است و بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های B در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۴۳٪ و ۲۹٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. با توجه به نتایج ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که دوام و مقاومت فشاری بتن الیافی مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن با اضافه کردن مواد افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و ماده E205 افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: دوام، مقاومت ویژه الکتریکی، پلی‌کربوکسیلات اتر، RCPT، E205

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.242644.2207	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2021.242644.2207	۱۴۰۰/۱۰/۳۰	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۳۹۹/۱۱/۱۷	۱۴۰۰/۰۹/۰۷	۱۳۹۹/۰۹/۰۸
مهدی کماسی komasi@abru.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

خوردگی سازه‌های بتن مسلح توسط یون کلر یکی از شایع‌ترین حملات محیطی است که منجر به تخریب این نوع از سازه‌ها می‌شود. خسارت‌های مربوط به خوردگی به عرشه پل، پارکینگ، گاراژها، سازه‌های دریایی و کارخانجات تولیدی، منجر به هزینه میلیون‌ها دلار در سال، برای تعمیرات می‌شود که به همین دلیل در سال‌های اخیر مشکل دوام کم سازه‌های بتنی به دلیل بالا بودن هزینه تعمیرات مورد توجه گسترده قرار گرفته است [۱]. با توجه به اینکه سازه‌های بتنی مسلح اغلب در معرض محیط‌های نامناسب قرار دارند و انتظار می‌رود که در طول عمر مفید خود تعمیر و نگهداری زیادی نیاز داشته باشند. بنابراین برای انجام این کار، نیاز به ساخت سازه‌های با دوام است. برای سازه‌های بتنی مسلح، یکی از اشکال مهم حمله محیطی، نفوذ یون کلر است که منجر به خوردگی اعضای مسلح بتن و موجب کاهش مقاومت، سرویس‌دهی و زیبایی سازه می‌شود که ممکن است منجر به ترمیم زود هنگام یا تعویض زودرس سازه شود. یک روش معمول برای جلوگیری از چنین خرابی جلوگیری از نفوذ کلریدها به میلگرد یا اعضای فولادی آن با استفاده از بتن غیرقابل نفوذ است. نفوذ یون کلر در بتن فرایندی کند است و نمی‌توان آن را مستقیماً در یک بازه زمانی به عنوان یک معیار کنترل کیفیت مفید تعیین کرد بنابراین، برای ارزیابی نفوذ کلرید، نیاز به انجام آزمایشی است که بتواند مقادیر انتشار یون کلر را در یک زمان معقول اندازه‌گیری کند [۲]. در اوایل دهه ۱۹۸۰ وایتینگ اولین روش تسریع یافته الکتریکی را برای سنجش مقاومت بتن در مقابل نفوذ یونهای کلرید ارائه داد. در این روش که به روش $RCPT$ معروف است، مجموع بار الکتریکی عبوری میان نمونه آزمایش در طول زمان مشخص اندازه‌گیری می‌شود. به همین دلیل، در این روش اطلاعات مشخصی در مورد مقاومت بتن در مقابل نفوذ یونهای کلرید به دست نمی‌آید. هرچند روش $RCPT$ به دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. در این راستا مطالعه دوام بتن، از جمله تأثیر نفوذ کلرید، صرف هزینه‌ها جهت سرویس‌دهی سازه‌های بتنی، ابعاد و پیش‌بینی طول عمر مفید آن، از اهمیت بسزایی برخوردار است [۴]. همچنین خصوصیات ساختمانی بتن از جمله کارایی و دوام مانند مقاومت در برابر یخ‌زدگی، خاصیت انقباض و افزودنی‌های شیمیایی که امکان ساخت بتن‌های ویژه مانند بتن با روانی بالا و بتن با استحکام بالا را فراهم می‌کنند نیاز به انجام پژوهش گسترده‌تری دارند [۵]. از این جهت برای دستیابی به بتن با دوام و مقاومت بالا آزمایش‌هایی طراحی و انجام شده است به عنوان مثال مقاومت الکتریکی که نسبت بین ولتاژ مورد استفاده و جریان الکتریکی عبور شده از یک نمونه می‌باشد و به عنوان مقاومت مواد در برابر عبور جریان الکتریکی تعریف می‌شود. دانستن این نکته مهم است که چطور بتن در مقابل عبور جریان الکتریکی مقاومت می‌کند زیرا می‌تواند به تعیین خطر خوردگی آرماتور کمک کند [۶]. با توجه به نکته فوق در مورد مقاومت الکتریکی بتن، بین مقاومت الکتریکی و انتشار کلرید در بتن رابطه وجود دارد که این رابطه یک پارامتر کنترل‌کننده است و توسط آن می‌توان زمان لازم برای انتشار یونهای کلرید در بتن را مشخص کرد که با استفاده از آن زمان و آستانه بحرانی برای شروع خوردگی در بتن را توسط یون کلر تعیین نمود. به طور معمول، این زمان می‌تواند از طریق آزمایش تسریع‌شده انتقال یون کلرید ($RCMT$)^۴ و آزمون نفوذ تسریع‌شده کلرید ($RCPT$) اندازه‌گیری شود [۷]. در این راستا پرستگاری و همکاران، در مطالعه‌ای در مورد تأثیر باکتریها در مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر در بتن، به این نتیجه رسیدند که کربنات کلسیم رسوب شده توسط باکتری‌ها منافذ بتنی را پر کرده و از حرکت آزاد یون کلر در بتن جلوگیری می‌کند. یافته مهم این مطالعه میزان مقاومت الکتریکی بالای بتن با بکارگیری باکتری و ایجاد حفره هوا به طور همزمان می‌باشد. این امر به این دلیل است که هوای آزاد شده ناشی از وجود باکتری‌ها و رسوب کلسیم در بتن به صورت همزمان حرکت یونهای آزاد را مهار می‌کند و از بتن در برابر عوامل تهاجمی مانند کلریدها محافظت می‌کند و مقاومت الکتریکی آن را در حدود ۲۵٪ افزایش می‌دهد [۸]. همچنین در زمینه بررسی همزمان دوام و مقاومت بتن، کاکویی و همکاران در پژوهشی تجربی در مورد تأثیر الیاف پروپیلن بر خواص بتن مسلح، دریافتند که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن موجب افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش نفوذپذیری و کاهش میزان انقباض بتن می‌گردد که به طور قابل توجهی باعث کند شدن و تاخیر در روند فرآیند تخریب بتن می‌شود و در افزایش طول عمر بتن تأثیرگذار است [۹]. در راستای تحقیق فوق‌الذکر پور و همکاران، در یک پژوهش با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های بتن به دو نتیجه مهم رسیدند نخست اینکه افزودن پلی‌پروپیلن به بتن باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها،

³ Rapid Chloride Penetration Test⁴ Rapid Chloride Migration Test

افزایش مقاومت در برابر نفوذ کلرید و خوردگی بتن می‌شود. دوم اینکه افزودن پروپیلن به بتن به مقدار حداکثر یک کیلوگرم در متر مکعب باعث کاهش جذب آب بتن می‌شود، اما افزودن الیاف پروپیلن بیش از یک کیلوگرم در متر مکعب جذب آب را افزایش می‌دهد [۱۰].

یکی از مهمترین فاکتورهای دوام بتن آزمون جذب آب حجمی می‌باشد، بتن در این آزمون در بسیاری از محیط‌های تهاجمی قرار می‌گیرد و نفوذپذیری آن سنجش می‌شود زیرا نفوذپذیر بودن بتن از مهمترین عوامل کاهش دوام بتن است [۱۱]. علاوه بر این آزمایش‌هایی برای شناسایی مفهوم دوام بتن به روش غوطه‌وری و آزمون مویبگی انجام شده است. به عنوان مثال، آزمون جذب حجمی به روش غوطه‌وری عمدتاً به تخلخل کل بتن بستگی دارد، و با انجام این آزمایش به تخلخل کل بتن که در خصوصیات مکانیکی و دوام بتن بسیار مؤثر است می‌توان دست یافت. بنابراین، شایسته است به طور همزمان بیشتر عوامل مؤثر در شناخت و کاهش منافذ بتن که تأثیرات بسزایی در دوام بتن دارد و در اکثر مطالعات قبلی کمتر مورد توجه بوده از جمله آزمون جذب حجمی به روش غوطه‌وری و یا سایر آزمایش‌ها به روش مویبگی بتن در نظر گرفته شود [۱۲ و ۱۳]. همچنین در ارزیابی دوام بتن آزمایش‌های نفوذ تسریع‌شده یون کلر (RCPT) و جذب آب حجمی عوامل خوبی هستند. علاوه بر این، مشخص شده است که اندازه گیری مقاومت الکتریکی در مراحل اولیه هیدراتاسیون سیمان می‌تواند مبنای مناسبی برای پیش‌بینی رفتار طولانی مدت بتن باشد. بنابراین، تحقیقات بیشتر در مورد مقاومت الکتریکی می‌تواند مبنا و رویکردی مناسب برای تعیین دوام و آزمایش منطبق با سرویس‌دهی سازه‌ها باشد [۱۴]. با رویداشت به پیشینه پژوهش و نظر به اهمیت بررسی تأثیر همزمان چند افزودنی بر روی دوام بتن، هدف از این پژوهش بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با استفاده از آزمون جذب آب، مقاومت فشاری، مقاومت ویژه الکتریکی و آزمایش RCPT بتن اصلاح شده با سه نوع افزودنی، الیاف پروپیلن، پلی‌کربوکسیلات اتر و E205 با درصد‌های مختلف می‌باشد.

۲- مواد و مصالح ساخت

مصالحی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل: سیمان پرتلند نوع II شهرستان درود براساس ASTM C150، سنگدانه درشت شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر که با وزن مخصوص ۲/۶۴ و ماسه طبیعی با وزن مخصوص ۲/۵۸ و مدول نرمی ۳ می‌باشند. همچنین از سه نوع افزودنی در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. یک نوع از مواد افزودنی (الیاف پلی‌پروپیلن) در کلیه نمونه‌ها با مقدار ثابت ۰/۶ کیلوگرم در مترمکعب و دیگر مواد افزودنی با درصد‌های ۱٪، ۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪ و ۶٪ وزن سیمان طرح اختلاط مورد استفاده قرار گرفت و به طرح مخلوط بتن اضافه شده است. به منظور اطمینان از اجزای تشکیل دهنده مواد سیمانی استفاده در تحقیق، آزمایش فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مواد (سیمان، افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و ماده E205) در محل آزمایشگاه رازی تهران انجام شد. اکسید سیمان مورد استفاده در آزمایش در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان به روش XRF

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
21	SiO ₂	4.8	Al ₂ O ₃	1.6	MgO	0.11	Na ₂ O
-	-	0.8	K ₂ O	6.8	C ₃ A	0.3	SO ₃
-	-	62.8	CaO	1.6	L.O.I	3.7	Fe ₂ O ₃

۲-۱- ماده افزودنی پلی پروپیلن^۶

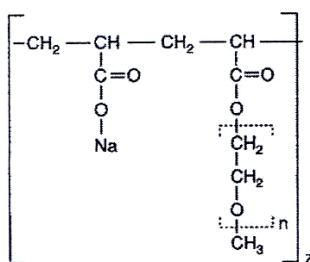
پلی پروپیلن^۱ ترکیبی از پلیمر ترموپلاستیک ساخته شده و ترکیبی از مونومرهای پروپیلن است که قابلیت ضربه بالاتری نسبت به میلگرد دارد و مهمترین اثر آن کاهش ترک در بتن می باشد. مشخصات فنی این ماده در جدول (۲) نشان داده شده است [۱۵].

جدول ۲: مشخصات فنی الیاف پلی پروپیلن.

مشخصات فنی	مشخصات ظاهری	وزن مخصوص (g/cm ³)	قطر (μ m)	مقاومت کششی (MPa)	نقطه ذوب (°C)	طول (μ m)	استحکام (g/ denier)	غوطه وری در آب (ثانیه)
دامنه	سفید	۹۱	۲۲	۴۰۰	۱۶۵	۱۲	۲/۵-۳	۵-۳

۲-۲- ماده افزودنی پلی کربوکسیلات اثر^۷

ماده افزودنی پلی کربوکسیلات اثر با نام تجاری *SPCR Plastite* که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته یک ابر روان کننده قوی با رنگ ظاهری قهوه ای روشن، حجم ۱/۱۱ گرم در سانتی متر مکعب در دمای ۲۰°C و درجه انجماد ۳°C- می باشد. افزودن *SPCR* باعث پخش شدن یکنواخت سیمان در سطح بتن در حین ساخت می شود. این افزودنی در بتن با نسبت آب به سیمان بالای ۰/۴ در هوای گرم مناسب است و با استاندارد *ASTM C494* مطابقت دارد. مهمترین ویژگی پلی کربوکسیلات اثر پراکنده کردن ذرات سیمان و جلوگیری از جمع شدن آنها و باز کردن منافذ سیمانی است. همچنین این ماده افزودنی که از جدیدترین نوع افزودنی فوق روان کننده بوده و عمدتاً از یک ساختار واحد تشکیل شده است. ساختار پلیمری تشکیل دهنده این ترکیبات بر پایه پلیمریزاسیون آکریلیک اسید بوده که می تواند با گروه های مونومری دیگری جایگزین شده و به این ترتیب موجب اصلاح تعداد گروه های کربوکسیلاتی بر روی ساختار پلیمری گردد (شکل ۱). گروه کربوکسیلاتی با تشکیل نمک سدیم خنثی شده و با تجزیه Na^+ در محیط محلول، بار منفی به خود می گیرد که نقطه اتصالی برای جذب مواد افزودنی بر سطح ذرات سیمان می گردد [۱۶].



شکل ۱: ساختار شیمیایی فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اثر.

۲-۳- ماده افزودنی E205

ماده E205 از خانواده کوپلیمر امولسیون سری Hawker 205 مبتنی بر استایرن اکریلیک استرن که توسط شرکت هاوکر تولید می شود و E205 نام تجاری این افزودنی می باشد. مشخصات فنی این ماده در جدول (۳) آورده شده است. همچنین تصویر مصالح مورد استفاده در پژوهش در شکل (۲) نشان داده شده است.

⁶ Poly Propylen

⁷ Poly Carboxylate Ether

جدول ۳: مشخصات شیمیایی ماده E205.

وضعیت ظاهری	ویژگی یونی	حداقل دمای فیلم شدن (°C)	PH	اندازه ذرات (μ)	لزجت c.poise	درصد جامد %
سفید مایع	آنیون	۰	۸-۹	۰/۱	۱۰۰۰-۴۰۰۰	۴۹±۱



(پ) ماده E205.

(ب) الیاف پلی پروپیلن.

(الف) پلی کربوکسیلات اتر.

شکل ۲: مواد افزودنی مورد استفاده در آزمایش.

۳- طرح اختلاط بتن

برنامه پژوهشی شامل ساخت دو سری نمونه‌های بتنی که هر کدام ۸ طرح اختلاط جداگانه را شامل می‌شوند. متغیرهای کد شده مخلوط بتن A در جدول (۴) نشان داده شده است و شامل: A₀, A₁, ..., A₅ و A₆ است که اندیس‌ها بیانگر درصد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر بر حسب وزن سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط بتن می‌باشد، ضمن اینکه در کل نمونه‌ها بجز نمونه شاهد الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۰/۶ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن استفاده شده است.

متغیرهای کدگذاری شده نمونه‌های بتن B در جدول (۵) نشان داده شده است و شامل: B₀, B₁, ..., B₅ و B₆ است که اندیس‌ها بیانگر درصد افزودنی ماده E205 بر حسب وزن سیمان مورد استفاده در اختلاط بتن می‌باشد، ضمن اینکه در کل نمونه‌ها بجز نمونه شاهد الیاف پلی پروپیلن به مقدار ۰/۶ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن استفاده شده است.

جدول ۴: طرح اختلاط نمونه‌های A حاوی ماده افزودنی پلی کربوکسیلات اتر.

نمونه	شاهد	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆
سیمان (kg/m ³)	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷
شن (kg/m ³)	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰
ماسه (kg/m ³)	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰
آب (kg/m ³)	۱۷۰	۱۷۰	۱۶۶/۲۳	۱۶۲/۵۰	۱۵۸/۷۹	۱۵۵	۱۵۱/۱۵	۱۴۷/۳۸
کربوکسیلات اتر (kg/m ³)	۰	۰	۳/۷۷	۷/۵۰	۱۱/۳۱	۱۵	۱۸/۸۵	۲۲/۶۲
پلی پروپیلن (kg/m ³)	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶
آب/سیمان (w/c)	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵

جدول ۵: طرح اختلاط نمونه‌های B حاوی ماده افزودنی E205.

نمونه	شاهد	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
سیمان (kg/m ³)	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷	۳۷۷
شن (kg/m ³)	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰
ماسه (kg/m ³)	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰	۹۰۰
آب (kg/m ³)	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
E205 (kg/m ³)	۰	۰	۳/۷۷	۷/۵۰	۱۱/۳۱	۱۵	۱۸/۸۵	۲۲/۶۲
پلی پروپیلن (kg/m ³)	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶
آب/سیمان (w/c)	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۴۵

۴- روند ساخت نمونه‌ها

در ابتدا نیمی از مصالح درشت دانه و ریز دانه و سیمان مخلوط شدند. سپس الیاف پلی پروپیلن مخلوط شده با آب به تدریج اضافه شدند. در نهایت مواد باقیمانده (نیمه باقیمانده مصالح درشت و ریز دانه) طرح اختلاط، به مخلوط اضافه شدند. ضمن اینکه مخلوط کردن مواد طرح اختلاط حداقل به مدت دو دقیقه انجام گرفت [۱۰]. در این پژوهش نمونه‌های با افزودنی پلی کربوکسیلات اتر در دمای 21 ± 2 درجه سانتیگراد درون آب در آزمایشگاه نگهداری و عمل‌آوری شدند در حالی که نمونه‌ها با افزودنی ماده E205 براساس توصیه‌های شرکت سازنده ماده E205 بدون عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. در فرایند ساخت نمونه‌ها باید به منظور جلوگیری از ایجاد در هم‌تنیدگی و جمع شدن الیاف پلی پروپیلن در مخلوط بتن ابتدا آنها را با آب مخلوط کرده و سپس به مخلوط‌ها اضافه گردد [۱۷]. هشت طرح بتنی بر اساس آیین نامه ACI در جداول (۴) و (۵) نشان داده شده است.

۵- روش پژوهش

۵-۱- آزمون نفوذ تسریع شده کلرید (RCPT)

مقاومت نمونه‌ها در برابر حمله نمک با آزمون نفوذ تسریع شده کلرید در سن ۲۸ روز نمونه‌ها، بر اساس ASTM C1202 اندازه‌گیری شد. در این آزمون نمونه‌های استوانه‌ای اشباع شده در آب با ارتفاع ۵۰ میلی متر و قطر ۱۰۰ میلی متر درون سلول یک دستگاه از یک طرف در یک مخزن محلول کلرید سدیم ۳٪ و در مخزن سلول دیگر محلول ۰/۳٪ میلی لیتر هیدروکسید سدیم است غوطه‌ور می‌شوند (شکل ۳) و در معرض ولتاژ متناوب DC اعمال شده با ولتاژ ۶۰ ولت به مدت ۶ ساعت قرار می‌گیرند. میزان بار عبوری بر واحد کولمب میزان مقاومت نمونه در برابر یون کلر را نشان می‌دهد [۱۸].

میزان بار کامل برای ارزیابی بتن با توجه به معیارهای مندرج در جدول (۶) استفاده می‌شود. کل بار الکتریکی عبور داده شده از نمونه با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_{360}) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Q بار الکتریکی بر حسب کولمب (C)، I_0 جریان الکتریکی بر حسب میلی آمپر (mA) بلافاصله پس از اعمال ولتاژ است و این جریان الکتریکی در دقایقی پس از اعمال ولتاژ یا جریان متوسط از طریق یک سلول محاسبه می‌شود.

$I_0, I_{30}, I_{60}, \dots, I_{330}, I_{360}$ میزان ولتاژ عبوری در نمونه های بتن می باشد که توسط دستگاه آزمایش اندازه گیری شده که اندیس‌ها بیانگر زمان اندازه گیری ولتاژ بر حسب دقیقه می‌باشند.



شکل ۳: آزمون RCPT براساس استاندارد ASTM C 1202.

جدول ۶: میزان نفوذ پذیری یون کلر بر اساس استاندارد ASTM C 1202.

نفوذ یون کلر	جریان عبوری، کولمب
زیاد	>4000
متوسط	2000-4000
کم	1000-2000
خیلی کم	100-1000
ناچیز	<100

۵-۲- آزمون جذب آب حجمی (WA)^۸

آزمون جذب آب حجمی بر اساس استاندارد ASTM C 642 مناسب جهت تشخیص دوام بتن است زیرا به صورت غیرمستقیم تخلخل قابل دسترس بتن را در آب اندازه گیری می‌کند. جذب آب حجمی بتن تفاوت بین توده نمونه اشباع سطح خشک نمونه (SSD)^۹ و جرم آن در حالت خشک را نشان می‌دهد و عمدتاً تحت تأثیر عواملی است که تخلخل بتن را کنترل می‌کنند. در این مطالعه، آزمون جذب حجمی بتن به روش غوطه‌وری از مخلوط‌های بتنی در سن ۲۸ روز تعیین شد [۱۹ و ۲۰].

در این آزمایش، نمونه‌های عمل‌آوری شده با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر در آزمایشگاه توزین می‌شوند و تقریباً ۳ روز با ثبت دقیق وزن در آب غوطه‌ور می‌شوند تا به یک وزن ثابت برسند. در این مدت، آنها از آب خارج می‌شوند و با یک پارچه خشک می‌شوند و سپس وزن می‌شوند. معمولاً پس از یک روز روند تغییر وزن نمونه‌ها اندک است. درصد جذب آب نمونه‌ها در هر زمان با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

^۸ Water Absorption

^۹ Saturate Surface Dry

$$A = 100 \times \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، A بیانگر جذب غوطه‌وری (درصد)، M_{sat} جرم نمونه اشباع (گرم) و M_s جرم نمونه خشک شده در گرمخانه (بر حسب گرم) می باشد [۲۱].

۵-۳- آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

در این آزمایش از نمونه‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر استفاده شده است. یک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی که دارای دو صفحه مسی است برای آزمایش استفاده می‌شود. در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها با یک پارچه تمیز شده و بین صفحات مسی قرار می‌گیرد سپس خمیر سیمان با یک کاردک بین هر دو سمت نمونه و صفحه مسی آغشته می‌شود تا اتصال الکتریکی بین نمونه و صفحه مسی برقرار شود، سپس خمیر اضافی برداشته می‌شود تا از اتصال کوتاه و نتایج نادرست جلوگیری شود و در نهایت سیم‌های اتصال دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به صفحات مسی متصل شده و مقاومت الکتریکی محاسبه می‌شود. آزمون مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است. در این راستا از رابطه (۳) برای محاسبه مقاومت الکتریکی نمونه استفاده می‌شود.

$$\rho = Z \times \left(\frac{A}{L} \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، ρ مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب اهم-متر ($\Omega.m$)، Z مقاومت الکتریکی اهم بر حسب (Ω)، A سطح مقطع عمود بر جریان بر حسب (مترمربع) و L ارتفاع نمونه بر حسب (متر) است. لازم به توضیح است که این آزمایش، غیر مخرب و بسیار کوتاه مدت می‌باشد [۲۲].



شکل ۴: آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های A و B.

۵-۴- آزمون مقاومت فشاری تک محوره

این آزمایش با هدف تعیین مقاومت فشاری (f'_c) بر اساس استاندارد ASTM C109 بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $15 \times 15 \times 15$ در سن ۷ و ۲۸ روزه انجام شد. در این آزمایش نمونه مکعبی جهت آزمایش بین دو فک متحرک جک در محل تعیین شده مشخص قرار می‌گیرد سپس اعمال فشار توسط فک جک به نمونه تا هنگام گسیختگی نمونه ادامه می‌یابد. مقدار فشاری که نمونه در آن خرد (گسیخته) می‌شود ثبت و به عنوان مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که سطح نمونه صاف نباشد و یا نمونه در محل دقیق تعیین شده قرار داده نشوند آزمایش دارای خطا می‌باشد [۲۳]. آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها برابر استاندارد ASTM C109.

۵-۵- آزمون طیف سنجی تفرق اشعه X (XRD)^{۱۰}

برای مطالعه ریز ساختار بتن از روش پراش پرتو ایکس (XRD) بدلیل آنکه روش مستقیمی برای تعیین نوع فازها و ساختار بلورین مواد است، در این مطالعات استفاده شده است. به منظور تخمین فعالیت مواد افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و ماده افزودنی E205 از آزمایش تفرق اشعه X بر اساس استاندارد BS EN 13925-2 بر روی پودر حاصل از آسیاب نمودن نمونه‌های خمیر سیمان شامل نمونه شاهد، نمونه‌های حاوی مواد افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و ماده افزودنی E205 استفاده شد. نمونه‌ها مدت یک روز در محیط خیس قرار گرفت تا واکنش آبدار شدن انجام شود. در هر مرحله جهت بررسی نمونه‌ها بصورت پودر درآمد و خشک شد. سپس، پودر حاصل جهت انجام آزمون XRD بصورت قرص ساخته شد. انجام آزمون در دمای 25°C و محدوده پویش 2θ برابر $90^{\circ} - 5$ انجام شد [۲۴].

۵-۶- آزمون میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM)^{۱۱} و آنالیز EDAX^{۱۲}

میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از بهترین روش‌های آنالیزی است که امروزه در حوزه‌های مختلف کاربردهای فراوانی دارد. این میکروسکوپ، امکان بررسی و آنالیز شیمیایی، ترکیب، سطح و ریزساختار داخلی را در ابعاد میکرونی و نانومتری فراهم آورده است. بررسی‌ها با این میکروسکوپ در کل به دو گروه میکروسکوپی و اسپکتروسکوپی تقسیم می‌شود که مورد اول برای بررسی فازها، ذرات، مورفولوژی و غیره است و حالت دوم برای بررسی‌های شیمیایی لایه‌های بیرونی همچون سطح به کار برده می‌شود [۲۵]. عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) بر روی خمیر سیمان سه طرح شامل نمونه شاهد، نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و ماده افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و نمونه حاوی ماده E205 انجام شد. همچنین مقایسه بین تراکم و یکنواختی ساختار خمیر سیمان را در سه نمونه در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد که تفاوت بین تراکم نمونه شاهد و دو نمونه حاوی ماده افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر و نمونه حاوی ماده E205 به روشنی مشخص است. همچنین برای تجزیه تحلیل ساختار شیمیایی نمونه‌ها از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) استفاده شده است.

۵-۷- آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

طیف نگاری فلورسانس اشعه ایکس یکی از رایج‌ترین دستگاه‌های آنالیز عنصری است که به دلیل غیر تخریبی بودن و سرعت نسبتاً بالای برای آنالیزهای کیفی و نیمه‌کمی از اهمیت زیادی برخوردار است. برای این منظور اشعه ایکس به نمونه تابیده و باعث برانگیختن اتم‌ها و انتقال الکترونی در لایه‌های مختلف اتم می‌گردد. در اثر این پدیده، اشعه ایکس ثانویه، تولید می‌شود که با تعیین طول موج (انرژی) اشعه ایکس ثانویه که مشخصه اتم است؛ می‌توان عناصر موجود در نمونه مورد نظر را شناسایی کرد. همچنین شدت نشر اشعه ایکس متناسب با غلظت گونه بوده و برای آنالیز کمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آماده سازی نمونه در این روش بسیار ساده است و آنالیز با روش XRF منجر به تخریب نمونه نمی‌شود. هرچند این روش برای اندازه گیری مقادیر کم مناسب نیست، ولی قادر به شناسایی و اندازه

¹⁰ X-ray Diffraction

¹¹ Scanning Electron Microscopy

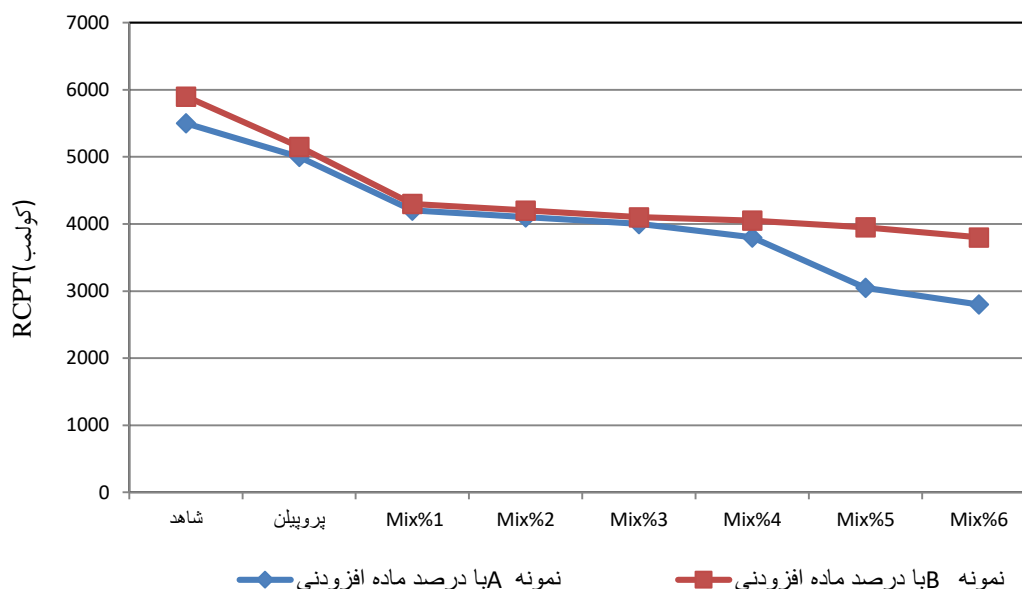
¹² Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

گیری بسیاری از اتم ها (سدیم تا اورانیوم) است. جهت تعیین بررسی ساختار عناصر موجود در نمونه‌ها از این آزمایش بر اساس استاندارد (2013) ASTM E1621 استفاده شده است [۲۶].

۶- نتایج و تفسیر

۶-۱- نتایج آزمون نفوذ تسریع شده یون کلر (RCPT)

آزمون نفوذ تسریع شده یون کلر برای ارزیابی توانایی بتن برای مقاومت در برابر نفوذ کلرید استفاده می‌شود و نسبت به سایر آزمون‌ها سریع و ارزان‌تر است [۲۷]. آزمون RCPT برای مقاومت در برابر نفوذ کلرید بر روی نمونه‌های استوانه‌ای پس از ۲۸ روز بر اساس استاندارد ASTM C 1202 انجام شد. همان‌طور که در استاندارد ASTM C 1202 مشخص شده است، جریان عبور داده شده به مدت شش ساعت در فاصله‌های زمانی ۱۵ دقیقه‌ای برای هر نمونه اندازه‌گیری شد. نتایج بدست آمده در این آزمون در شکل (۶) به تصویر کشیده شده است.



شکل ۶: مقادیر آزمون RCPT نمونه‌های طرح اختلاط A و B

با توجه به نتایج شکل (۶)، استفاده از مواد افزودنی برابر طرح اختلاط در نمونه‌های A و B از حرکت یون کلر در نمونه جلوگیری کرده و به طور قابل توجهی مقاومت نمونه‌ها در برابر نفوذ یون کلر را از حالت نفوذپذیری شدید به متوسط افزایش داده است. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است نتایج دارای بازه وسیعی است به طور مثال برای نمونه‌های A شار عبوری در نمونه شاهد ۵۴۰۰ کولمب، برای نمونه A با ۴٪ افزودنی ۳۷۰۰ کولمب و همچنین مقدار شار عبوری برای نمونه A با ۶٪ افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر ۲۷۰۰ کولمب بوده است بطوری که طبق نتایج، افزودنی الیاف پلی‌پروپیلن و پلی‌کربوکسیلات اتر به مقدار ۶٪ نفوذپذیری یون کلر را نسبت به نفوذپذیری نمونه شاهد ۵۱٪ کاهش داده است، همچنین در نمونه‌های B شار عبوری در نمونه شاهد ۵۹۰۰ کولمب، در نمونه B با ۴٪ افزودنی E205، ۴۱۰۰ کولمب و همچنین مقدار شار عبوری در نمونه B با ۶٪ ماده E205 ۳۷۰۰ کولمب بوده است براساس نتایج آزمایش، نمونه B با ۶٪ ماده E205 مقاومت بتن را در برابر نفوذ یون کلر ۳۷٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش داده است. همچنین بر اساس شکل (۶) میزان افزایش مقاومت نمونه پلی‌کربوکسیلات اتر و پلی‌پروپیلن در برابر نفوذ یون کلر تا افزودنی پلی‌کربوکسیلات اتر به مقدار ۶٪ روند منظم و یکسان افزایشی داشته است در صورتی که نمونه حاوی افزودنی E205 تا مقدار افزودنی ۴٪ روند افزایشی منظمی داشته اما از ۴٪

تا ۶٪ رشد تغییرات کمتری داشته است. در نهایت می توان نتیجه گرفت که نفوذ یون کلر نمونه های بتنی در افزودنی پلی کربوکسیلات اثر و پلی پروپیلن نسبت به ماده E205 و پلی پروپیلن کمتر بوده است.

۶-۲- نتایج آزمون جذب آب

این آزمون بر روی نمونه های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر در سن ۲۸ روز انجام گردید بطوری که ابتدا نمونه ها توزین شده و سپس به مدت سه روز در آب غوطه ور می شوند و در طول آزمایش به صورت منظم توزین شده در نهایت پس از سه روز توزین، اختلاف وزن نمونه ها در ابتدای آزمایش قبل از غوطه وری در آب و پس از سه روز غوطه وری در آب، مقدار آب جذب شده توسط نمونه های بتنی می باشد. میزان جذب آب نمونه ها در جداول (۷) و (۸) نشان داده شده است.

جدول ۷: مقدار جذب آب برای نمونه های طرح اختلاط نمونه A.

نمونه	درصد جذب آب %	وزن آب از دست رفته (گرم)	وزن نهایی (گرم)	زمان آزمون (ساعت)	وزن نمونه ها در حالت SSD (گرم)
شاهد	۷/۷۰	۱۷۷	۲۱۱۳	۷۲	۲۲۹۰
A ₀	۷/۳۰	۱۶۲	۲۰۹۷	۷۲	۲۲۵۹
A ₁	۷/۱۰	۱۶۲	۲۱۳۳	۷۲	۲۲۹۵
A ₂	۶	۱۳۲	۲۱۸۹	۷۲	۲۳۲۱
A ₃	۵/۹۰	۱۳۶	۲۱۷۲	۷۲	۲۳۰۸
A ₄	۵/۸۰	۱۲۶	۲۱۹۳	۷۲	۲۳۱۹
A ₅	۵/۷۵	۱۳۱	۲۱۶۹	۷۲	۲۳۰۰
A ₆	۵/۶۰	۱۲۳	۲۱۸۰	۷۲	۲۳۰۳

جدول ۸: مقدار جذب آب برای نمونه های طرح اختلاط نمونه B.

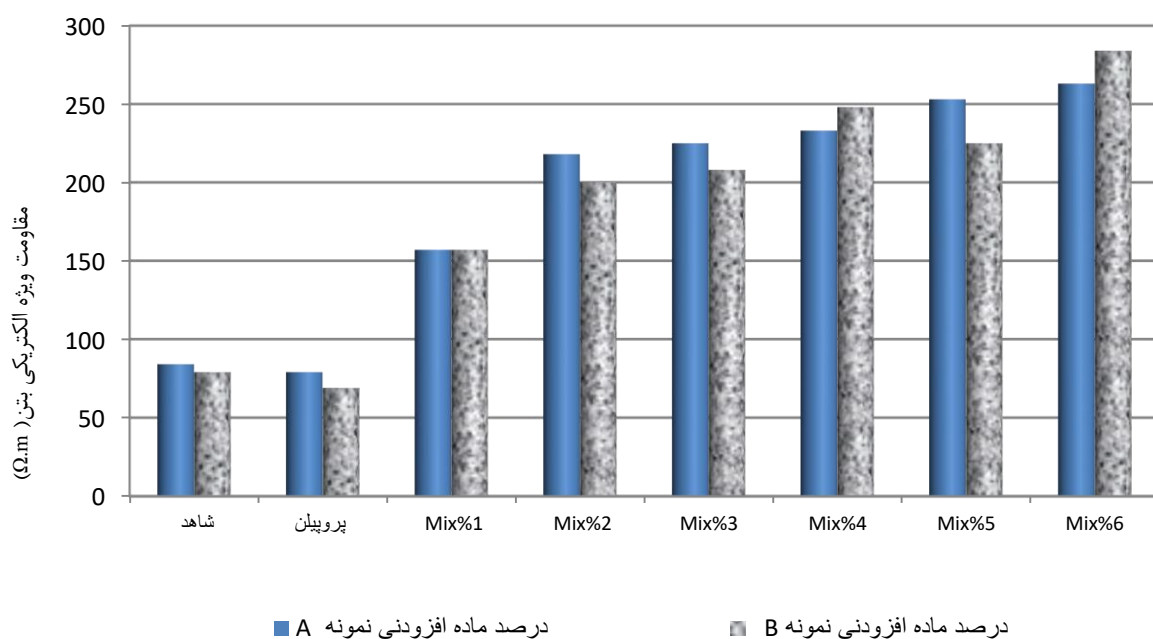
نمونه	درصد جذب آب %	وزن آب از دست رفته (گرم)	وزن نهایی (گرم)	زمان آزمون (ساعت)	وزن نمونه ها در حالت SSD (گرم)
شاهد	۸	۱۷۰	۲۱۰۰	۷۲	۲۲۷۰
B ₀	۷/۷	۱۶۰	۲۰۹۰	۷۲	۲۲۵۶
B ₁	۷/۷	۱۶۲	۲۰۸۸	۷۲	۲۲۵۰
B ₂	۷/۶	۱۶۲	۲۰۸۱	۷۲	۲۲۴۳
B ₃	۷/۲	۱۵۵	۲۰۸۷	۷۲	۲۲۴۲
B ₄	۷	۱۵۱	۲۰۸۷	۷۲	۲۲۳۸
B ₅	۶/۹	۱۴۶	۲۰۸۹	۷۲	۲۲۳۵
B ₆	۶/۷	۱۴۱	۲۰۹۲	۷۲	۲۲۳۷

با توجه به نتایج جدول (۷) اضافه کردن مواد افزودنی برابر طرح اختلاط نمونه های A به بتن بصورت یک روند منظم جذب آب نمونه ها را کاهش می دهد بطوری که افزودن الیاف پلی پروپیلن به نمونه ها میزان جذب آب بتن در نمونه های A را به مقدار ۵٪ کاهش داده است، همچنین در ادامه با افزودن ۲٪ پلی کربوکسیلات اثر ۲۲٪، افزودن ۴٪ پلی کربوکسیلات اثر ۲۴٪ و همچنین افزودن ۶٪ پلی کربوکسیلات اثر ۲۷٪ جذب آب نمونه های بتنی کاهش یافت که بیشترین کاهش جذب آب مربوط به ۶٪ پلی کربوکسیلات اثر و الیاف پلی

پروپیلن می‌باشد. در نمونه‌های B نیز برابر جدول (A) با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰.۴٪ جذب آب نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. در ادامه با افزودن ۰.۲٪ ماده E205، ۰.۵٪ اضافه کردن ۰.۴٪ ماده E205 و ۱.۲/۵٪ و همچنین افزودن ۰.۶٪ ماده E205 به طرح اختلاط بتن ۰.۱۶٪ جذب آب بتن را کاهش داده است. با توجه به نتایج جدول (V) و (A) و توضیحات فوق می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن با افزودنی های پلی‌کربوکسیلات اثر و ماده E205 باعث کاهش تخلخل در نمونه‌های بتنی و کاهش جذب آب آنها و موجب افزایش دوام بتن شده است با این تفاوت که تاثیر پلی‌کربوکسیلات اثر در کاهش جذب آب در نمونه‌های بتنی بیشتر از E205 بوده است. استفاده از مواد افزودنی و الیاف پروپیلن جذب آب را کاهش داده است که علت این امر می‌تواند کاهش ترک [۲۸]، ایجاد ریزترک بجای ترک‌ها یا افزایش فاصله ترک‌ها در بتن باشد [۲۹ و ۳۰].

۳-۶- نتایج آزمون مقاومت ویژه الکتریکی

این آزمون بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر در سن ۲۸ روز توسط یک دستگاه که دو صفحه مسی تشکیل شده است و نمونه‌ها را بین دو صفحه قرار داده و با برقراری اتصالات بین نمونه‌ها و دستگاه، جریان الکتریکی برقرار شده و مقدار مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها توسط دستگاه مخصوص ثبت می‌گردد. نتایج ثبت شده توسط دستگاه بر روی نمونه‌ها در شکل (V) نشان داده شده است



شکل ۷: نتایج آزمون مقاومت ویژه الکتریکی برای نمونه‌های طرح اختلاط A و B.

مقاومت الکتریکی بتن از مهمترین پارامترهای مربوط به خوردگی بتن به شمار می‌رود. با بالا رفتن مقاومت الکتریکی، از جریان عبوری از بتن کاسته می‌شود. بنابراین مقاومت الکتریکی بتن می‌تواند به عنوان یک وسیله سنجش غیر مستقیم برای میزان توانایی بتن در مقابله با خوردگی به کار رود [۳۱].

در این آزمایش نیز با اضافه کردن مواد افزودنی به بتن مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها تغییرات زیادی پیدا می‌کند بطوری که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ها مقاومت ویژه الکتریکی بتن در نمونه‌های A را به مقدار ۰.۶٪ نسبت به مقاومت ویژه الکتریکی نمونه

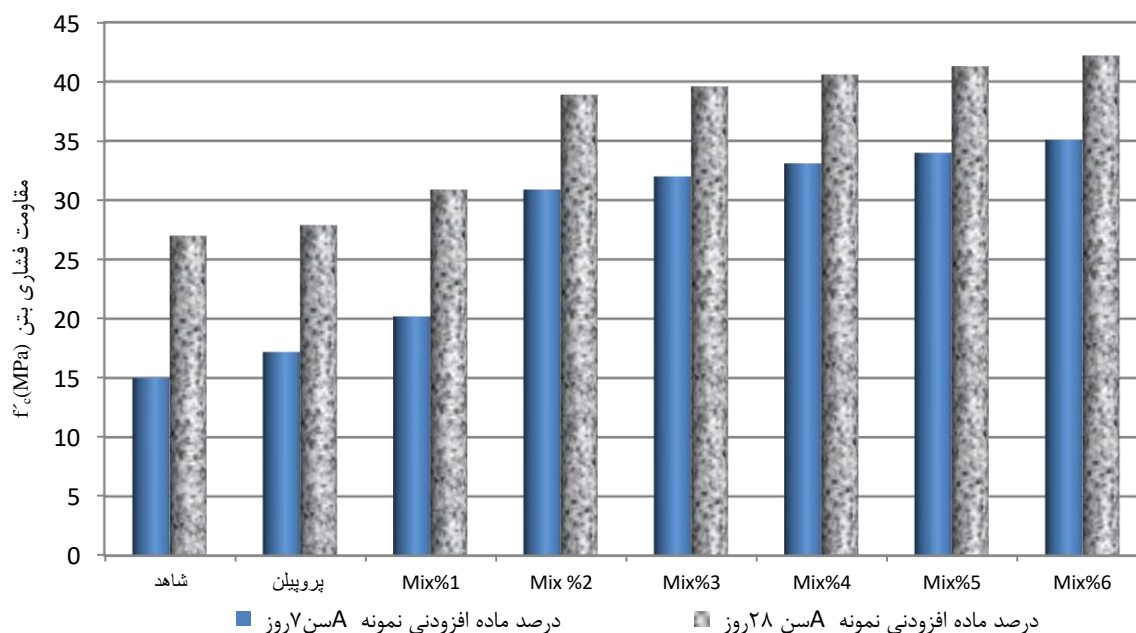
شاهد کاهش داده است، اما در ادامه با افزودن ۲٪ پلی کربوکسیلات اتر ۲۱۰٪، افزودن ۴٪ پلی کربوکسیلات اتر ۲۲۳٪ و همچنین افزودن ۶٪ پلی کربوکسیلات اتر ۲۶۳٪ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته که بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها مربوط به ۶٪ پلی کربوکسیلات اتر و الیاف پلی پروپیلن بوده است. در نمونه‌های B نیز با افزودن الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌ها ۱۴٪ مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافته در ادامه با افزودن ۲٪ ماده E205 ۲۰۳٪، اضافه کردن ۴٪ ماده E205، ۲۶۵٪ و همچنین افزودن ۶٪ ماده E205 به طرح اختلاط بتن ۳۰۹٪ میزان مقاومت ویژه الکتریکی بتن در نمونه‌های B را نسبت به نمونه شاهد افزایش داده است. در نتیجه با توجه به نتایج شکل (۷) و توضیحات فوق می‌توان نتیجه گرفت که اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن با افزودنی‌های کربوکسیلات اتر و ماده E205 باعث افزایش قابل توجه میزان مقاومت ویژه الکتریکی بتن در نمونه‌های بتنی شده است. بیشترین میزان مقاومت الکتریکی در هر دو نمونه با افزودن ۶٪ هر دو افزودنی بوده است با این تفاوت که افزودن ماده E205 و الیاف پلی پروپیلن تاثیر بیشتری در افزایش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به الیاف پلی پروپیلن و پلی کربوکسیلات اتر در نمونه‌ها داشته است. همچنین بر اساس جدول (۹) و نتایج آزمون احتمال خوردگی میلگرد در هر دو نمونه وجود ندارد.

جدول ۹: رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی بتن و احتمال خوردگی آرماتور [۲۲].

مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۱۲۰ اهم- متر	احتمال خوردگی ندارد
مقاومت ویژه الکتریکی بین ۵۰ اهم- متر تا ۱۲۰ اهم متر	احتمال خوردگی دارد
مقاومت ویژه الکتریکی کمتر از ۵۰ اهم- متر	خوردگی حتمی است

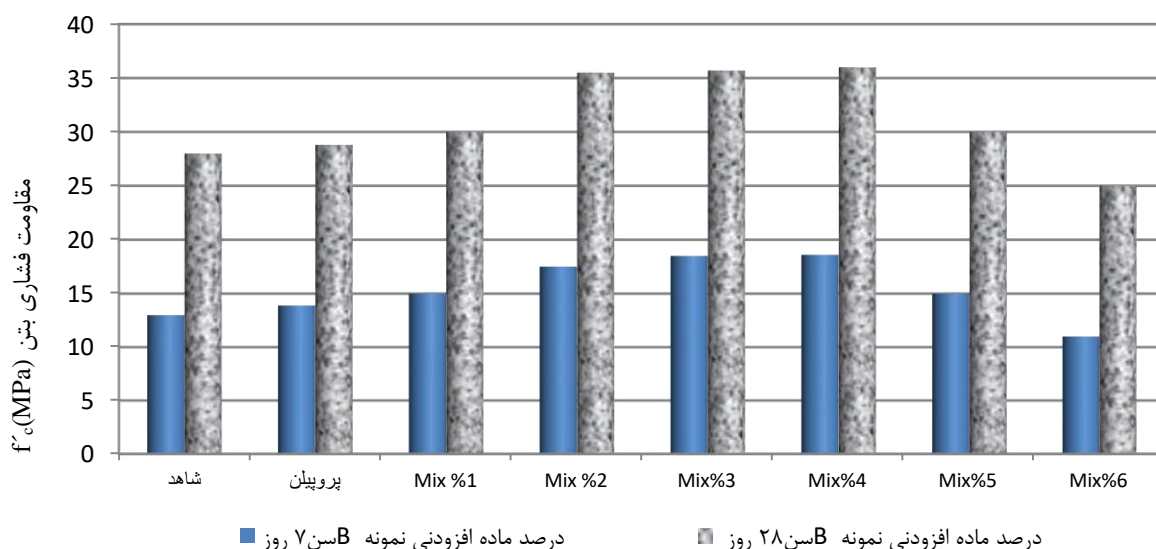
۴-۶- نتایج آزمون مقاومت فشاری

آزمون مقاومت فشاری انجام شده بر روی نمونه‌های مکعبی A و B با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متر بر اساس استاندارد ASTM C 109 در سن ۷ و ۲۸ روزه شکل (۸) و (۹) خلاصه شده است.



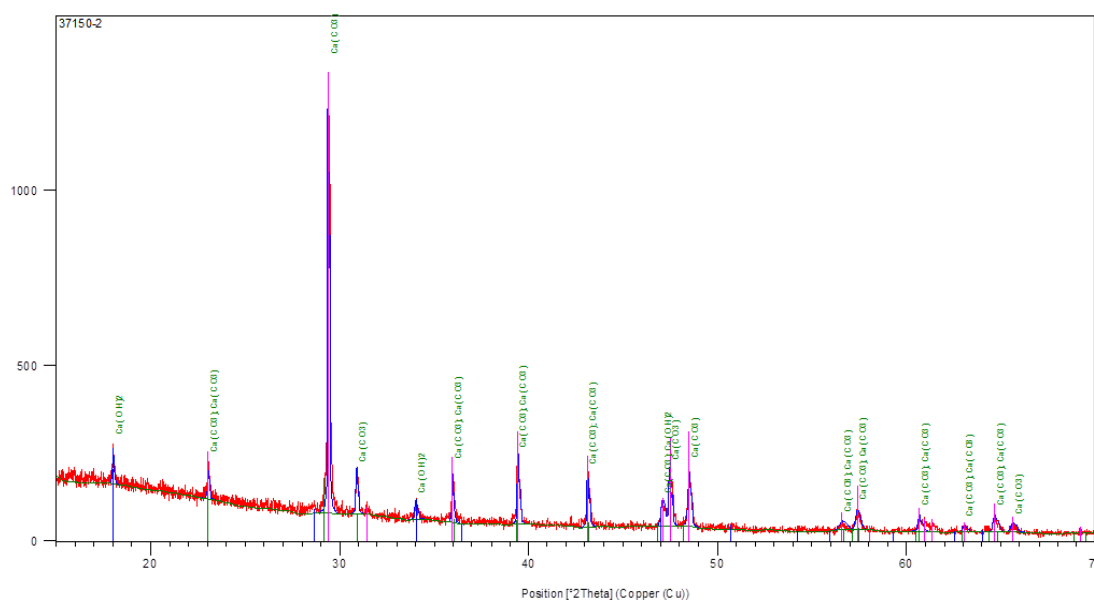
شکل ۸: مقادیر مقاومت فشاری بتن نمونه‌های طرح اختلاط A.

افزودن پلی پروپیلن برابر جدول (۴) به نمونه‌های بتنی A در سن ۷ روزه موجب افزایش ۱۵٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد گردید. در ادامه با افزودن پلی کربوکسیلات اتر به مقدار ۰.۲٪، ۰.۴٪ و ۰.۶٪ وزن سیمان طرح اختلاط به نمونه‌های بتنی در سن ۷ روزه مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب ۱۰۶٪، ۱۲۰٪ و ۱۳۴٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است که بیشترین تغییرات رشد مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد مربوط به ۰.۲٪ افزودنی پلی کربوکسیلات اتر بوده است در حالی که بالاترین مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزودنی ۰.۶٪ پلی کربوکسیلات اتر بود. همچنین برابر شکل (۸) با افزودن الیاف پلی پروپیلن و پلی کربوکسیلات اتر به نمونه‌ها، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به صورت منظم با افزایش درصد افزودنی افزایش یافته است با این تفاوت که تغییرات افزایش مقاومت فشاری تا ۰.۲٪ افزودنی به مقدار ۴۴٪ نسبت به نمونه شاهد بیشتر بوده در صورتی که افزایش مقاومت از ۰.۲٪ پلی کربوکسیلات اتر تا ۰.۶٪ روند افزایشی کمتری نسبت به درصد‌های تا ۰.۲٪ داشته است ضمن اینکه بیشترین مقاومت مربوط به ۰.۶٪ افزودنی کربوکسیلات اتر و پلی پروپیلن بوده است. همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، استفاده از مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و پلی پروپیلن، مقاومت فشاری بتن در سن ۷ و ۲۸ روز افزایش داده است که تاثیر رشد مقاومت نمونه‌ها در سن ۷ روزه ۱۳۴٪ نسبت به نمونه شاهد بیشتر است. همچنین مقاومت فشاری بتن در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۲۸ روز مقدار ۵۶٪ افزایش داشته است. با توجه میزان تغییرات مقاومت نمونه‌ها بر اساس نمودار و اختلاف کم مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روزه در درصد‌های بالای ماده افزودنی (از ۴ درصد تا ۶ درصد) می‌توان نتیجه گرفت که ماده افزودنی A تندگیرکننده می‌باشد.



شکل ۹: مقادیر مقاومت فشاری نمونه‌های طرح اختلاط B.

افزودن پلی پروپیلن برابر جدول (۵) به نمونه‌های بتنی B در سن ۷ روزه موجب افزایش مقاومت فشاری به مقدار ۷٪ نسبت به نمونه شاهد گردید. در ادامه با افزودن E205 به مقدار ۰.۲٪ و ۰.۴٪ به نمونه‌های بتنی B در سن ۷ روزه مقاومت فشاری نمونه‌ها به ترتیب ۳۵٪ و ۴۳٪ افزایش یافته است و با افزودن ۰.۶٪ ماده E205 ۱۵٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش یافته است، بیشترین تغییرات رشد مقاومت فشاری مربوط به ۰.۲٪ افزودنی E205 بود در حالی که بالاترین مقاومت فشاری با اضافه کردن ۰.۴٪ افزودنی E205 داشته است. همچنین برابر شکل (۹) با افزودن الیاف پلی پروپیلن و E205 به نمونه‌ها، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه به صورت منظم ۴٪ افزودنی E205 افزایش یافته است با این تفاوت که تغییرات افزایش مقاومت تا ۰.۲٪ افزودنی به مقدار ۲۷٪ افزایش یافته در صورتی که افزایش مقاومت از ۰.۴٪ E205 تا ۰.۶٪ روند کاهشی داشته است ضمن اینکه بیشترین مقاومت فشاری مربوط به ۰.۴٪ افزودنی E205 و الیاف پلی پروپیلن بوده است. همان‌گونه که در شکل (۹) نشان داده شده، افزودن مواد افزودنی پلی پروپیلن و E205 تا مقدار چهار درصد مقاومت فشاری نمونه‌ها را در سن ۷ و ۲۸ روز افزایش داده است. اما هنگامی که افزودنی E205 از چهار درصد بیشتر شود، مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۷ و ۲۸ روز کاهش می‌یابد.

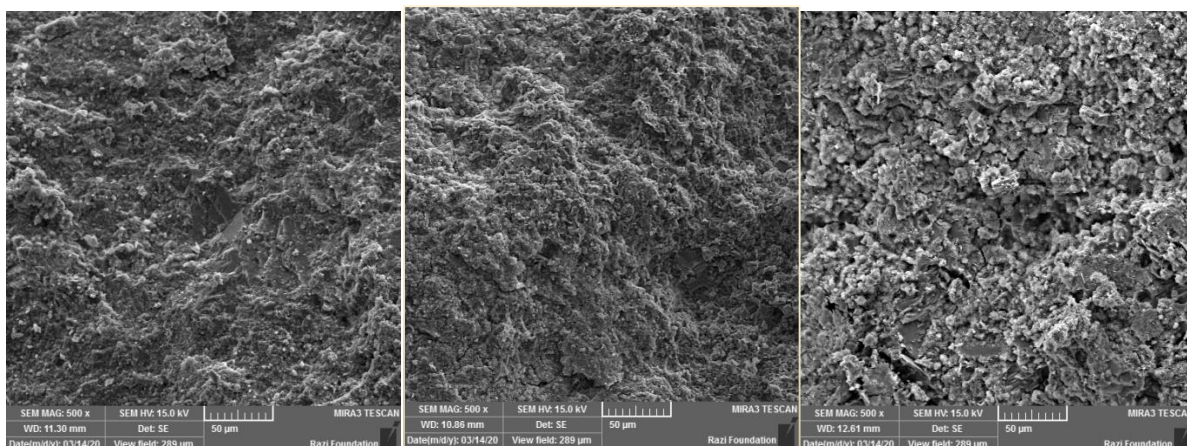


شکل ۱۲: طیف پراش پرتو ایکس (XRD) نمونه حاوی افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و الیاف پلی پروپیلن.

با مقایسه نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌های با افزودنی‌های پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 و بدون مواد افزودنی مشاهده می‌شود که وجود افزودنی‌های پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 موجب ایجاد واکنش (واکنش پوزولانی) این ماده با هیدروکسید کلسیم می‌شود و با مصرف هیدروکسید کلسیم مقدار این ماده در بتن کاهش داده (با توجه به شدت در نمودار) و در عوض مقدار سیلیکات کلسیم هیدراته (ژل C-S-H) را افزایش می‌دهد. نتیجه‌ای که بصورت غیر مستقیم از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذ پذیری نمونه‌ها قابل پیش‌بینی بود. نتایج حاصل از آزمایش XRD و شدت پیک‌های هیدروکسید کلسیم موجود در آن‌ها نشان دهنده این مطلب است که پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در ساختار خمیر سیمان موثر بوده‌اند. همانطور که از مقایسه نمودار شکل (۱۰-۱۲) مشخص است پلی کربوکسیلات اتر نسبت به ماده E205 اثر تقریباً برابر و قابل توجهی در کاهش شدت قله بیشینه هیدروکسید کلسیم موجود در نمونه‌های خمیر سیمان داشته است.

۶-۶- نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) و (EDAX)

شکل (۱۳ و ۱۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونیکی را برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌ها با مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 را نشان می‌دهد.

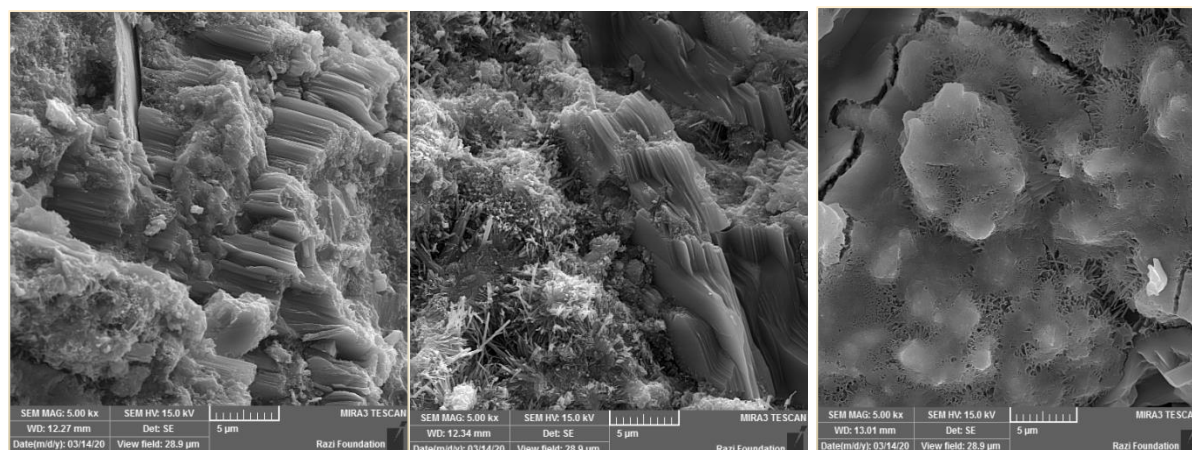


(الف) شاهد

(ب) پلی کربوکسیلات اثر

(پ) ماده E205

شکل ۱۳: تصاویر میکروسکوپ الکترونی



(الف) شاهد

(ب) پلی کربوکسیلات اثر

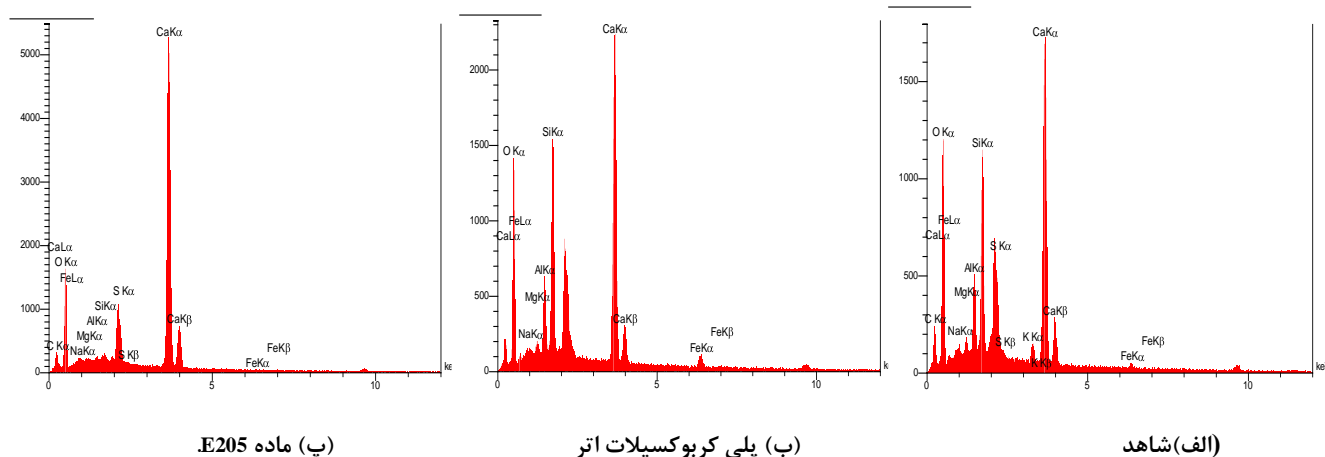
(پ) ماده E205

شکل ۱۴: تصاویر میکروسکوپ الکترونی.

با مقایسه تصاویر میکروسکوپ الکترونی (شکل ۱۳)، می توان دید که اضافه شدن افزودنی پلی کربوکسیلات اثر و ماده افزودنی E205 موجب ریزتر شدن خلل و فرج در نمونه ها می شود. در ساختار نمونه های بدون مواد افزودنی فوق کریستال های بزرگ و متقاطع و منافذ بزرگ بین آنها براحتی قابل مشاهده است. در حالی که به ترتیب با افزودن مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اثر و ماده افزودنی E205 ساختار نمونه همگن تر و منافذ ریزتر می شود. همچنین با توجه به تصاویر مشاهده می شود که ترک ها دارای عرض کمی می باشند و تقریباً مواد افزودنی طرح با گذر زمان در واکنش شیمیایی شرکت کرده است.

همچنین کریستال های کوچک نشان دهنده کلسیم هیدروکسید می باشد و کریستال های بزرگ حاصل از مقدار مواد افزودنی است که در بتن وارد واکنش نشدند با توجه به شکل (۱۴) می توان گفت اضافه شدن مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اثر و ماده افزودنی E205 به ترکیب سیمان و آب در خمیر سیمان می تواند موجب کاهش مقدار و اندازه کریستال های هیدروکسید کلسیم در ناحیه انتقال بین خمیر و سنگدانه گردد و موجب افزایش تشکیل ژل سیلیکات کلسیم شده است. مقدار و اندازه ژل سیلیکات کلسیم با توجه به تصاویر موجود، حاکی

از برتری نسبی پلی کربوکسیلات اتر در افزایش میزان این ماده در ناحیه انتقال مدل سازی شده می باشد و با دقت به تصاویر میکروسکوپی در هر سه طرح بالا براحتی می توان این تفاوت را تشخیص داد نکته قابل توجه در این آزمایشات تراکم و چگالی محصولات هیدراتاسیون نمونه های حاوی افزودنی با نمونه بدون افزودنی بود.



شکل ۱۴: تصاویر آنالیز EDAX.

نتایج آنالیز EDAX (شکل ۱۵) نیز تاییدکننده نتایج عکس های SEM هستند زیرا نتایج SEM کریستال های کوچک و بزرگ را نشان می دهد محور افقی مربوط به انرژی با واحد الکترون ولت می باشد که برابر ۱۱ کیلو الکترون ولت می باشد و محور عمودی میزان انرژی ظاهر سازی عنصر می باشد. مقادیر وزنی مشخص شده از تحلیل به صورت زیر می باشند. این نکته در تصاویر شکل (۱۵) بخوبی مشخص است و چگالی بالای محصولات هیدراتاسیون را در سن ۲۸ روزه بتن نسبت به نمونه شاهد را بخوبی نشان می دهد. همان طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است با افزودن پلی کربوکسیلات اتر و افزودنی E205 عناصر سیلیس و آهن و آلومینیوم بیشتری در نمونه ها نسبت به نمونه شاهد موجود بوده است که باعث افزایش دوام و مقاومت نمونه های بتنی می شود.

۶-۷- نتایج آزمون تعیین ترکیب شیمیایی به روش XRF

جهت تعیین دقیق عناصر تشکیل دهنده نمونه های بتنی از آزمایش XRF که آزمونی غیرمخرب و بر اساس استاندارد ASTM E1621(2013) می باشد استفاده شده است. نتایج آزمون XRF نمونه های بتنی در جداول (۱۰-۱۲) نشان داده شده است.

جدول ۱۰: نتایج آزمون ترکیب شیمیایی به روش XRF نمونه شاهد.

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
<0.01	P ₂ O ₅	0.8	MgO	0.7	Al ₂ O ₃	3.8	SiO ₂	<0.01	Na ₂ O
0.5	TiO ₂	<0.01	Cl	<0.01	K ₂ O	52.8	CaO	<0.01	SO ₃
-	-	41.2	L.O.I	<0.01	La&Lu	-	-	0.2	Fe ₂ O ₃

جدول ۱۱: نتایج آزمون ترکیب شیمیایی به روش XRF نمونه حاوی E205.

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
<0.01	P ₂ O ₅	0.7	Al ₂ O ₃	<0.01	Na ₂ O	3.6	SiO ₂	0.7	MgO
0.6	TiO ₂	<0.01	K ₂ O	<0.01	SO ₃	52.8	CaO	<0.01	Cl
-	-	41.4	La&Lu	0.2	Fe ₂ O ₃	-	-	0.2	L.O.I

جدول ۱۲: نتایج آزمون ترکیب شیمیایی به روش XRF نمونه حاوی پلی کربوکسیلات اتر.

درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب	درصد وزنی	ترکیب
<0.01	P ₂ O ₅	1.5	Al ₂ O ₃	0.4	Na ₂ O	16.0	SiO ₂	1.5	MgO
0.1	TiO ₂	<0.01	K ₂ O	<0.01	SO ₃	46.3	CaO	<0.01	Cl
0.2	MnO ₂	30	L.O.I	1.8	Fe ₂ O ₃	<0.01	La&Lu	0.2	BaO

نتایج آزمایش XRF نمونه‌ها به طور خلاصه در جداول (۱۰-۱۲) نشان داده شده است. فازهای تشکیل دهنده اصلی مواد به همراه درصد تشکیل دهنده آنها به صورت کامل قابل مشاهده است. فازهای اصلی تشکیل دهنده شامل CaO, Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃ می باشند که همان فازهای تشکیل دهنده سیمان نیز می باشد. همچنین جمع فازهای Fe₂O₃, SiO₂, Al₂O₃ بیانگر واکنش پوزولانی سیمان است که مقدار جمع فازهای نمونه پلی کربوکسیلات اتر بیشتر از ماده E205 و شاهد می باشد که این امر تایید کننده نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری و دوام می باشد.

۷- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش با افزودن الیاف پلی پروپیلن به مقدار ثابت ۰/۶ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن در تمام نمونه‌ها بجز نمونه شاهد با افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 به طور جداگانه از یک تا شش درصد وزن سیمان مصرفی طرح اختلاط با توجه به نتایج به دست آمده، نکات زیر می توان نتیجه گرفت:

۱- با افزودن پلی کربوکسیلات اتر و الیاف پلی پروپیلن به طرح اختلاط بتن مقاومت فشاری در نمونه های A نسبت به نمونه شاهد در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۳۴٪ و ۵۶٪ افزایش یافت و همچنین بیشترین مقاومت فشاری در نمونه‌های B با افزودن الیاف پلی پروپیلن و ماده E205 در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۴۳٪ و ۲۹٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت.

۲- افزودن پلی پروپیلن به نمونه‌ها برابر طرح اختلاط، جذب آب نمونه های بتنی را کاهش می دهد همچنین استفاده از مواد افزودنی و الیاف پروپیلن جذب آب را در هر دو نمونه های A و B کاهش می دهد با این تفاوت که مقدار جذب آب در نمونه های حاوی پلی کربوکسیلات اتر و الیاف پلی پروپیلن از نمونه‌های حاوی ماده E205 و پلی پروپیلن کم تر بوده است.

۳- افزودن الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌های بتنی مقاومت ویژه الکتریکی بتن را کاهش می‌دهد، اما افزودن پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 به بتن، مقاومت ویژه الکتریکی بتن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد بطوری که افزایش مقاومت ویژه الکتریکی به ترتیب ۲۶۳٪ و ۳۰۹٪ در نمونه‌های A و B نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است.

۴- افزودن الیاف پلی پروپیلن، پلی کربوکسیلات اتر و E205 به طرح اختلاط، مقاومت نمونه‌ها را در برابر نفوذ تسریع شده یون کلرید از حالت نفوذ شدید به نفوذ متوسط افزایش داده است. در نمونه‌ها با افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و پلی پروپیلن ۵۱٪ و نمونه‌ها با افزودنی E205 و الیاف پلی پروپیلن ۳۶٪ نفوذ پذیری کلرید کمتری نسبت به نمونه شاهد داشتند.

۵- آزمون SEM نشان داد که با افزودن مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و ماده افزودنی E205 برابر طرح اختلاط به نمونه‌ها همگن و ترک کمتری نسبت به نمونه شاهد بوده است. همچنین برابر آزمون XRD اضافه کردن مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 به طرح اختلاط موجب کاهش شدت پیک هیدروکسید کلسیم و موجب افزایش تشکیل ژل C-S-H در نمونه‌های حاوی افزودنی شده است و فضاهای خالی موجود در سطح تماس سنگ دانه‌ها با خمیر سیمان را پر کرده است. به این ترتیب ناحیه فصل مشترک سنگ دانه‌ها با خمیر سیمان بسیار متراکم تر شده است ضمن اینکه نتایج آزمون XRF و بررسی عناصر موثر در واکنش پوزولانی نمونه‌ها نشان داد که افزودن پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 در ساختار خمیر سیمان موثر بوده است و با توجه به نتایج آزمون‌های SEM, XRD و XRF افزودن مواد افزودنی پلی کربوکسیلات اتر و ماده E205 باعث افزایش دوام و مقاومت فشاری نمونه شده است.

مراجع

- Joshi, P., & Chan, C. (2002). Rapid Chloride Permeability Testing. *Concrete Construction*, 47(12), 37-43.
- Chandramouli, K., Srinivasa Rao, P., Seshadri Sekhar, T., Pannirselvam, N., & Sravana, P. (2010). Rapid chloride permeability test for durability studies on glass fibre reinforced concrete. *ARPJ Journal of engineering and applied sciences*, 5(3), 67-71.
- Whiting, D. (1981). RAPID DETERMINATION OF THE CHLORIDE PERMEABILITY OF CONCRETE FINAL REPORT. D. Whiting, Portland Cement Association, Skokie, Ill., Aug. 1981, 176.
- Luping, T., & Nilsson, L. O. (1993). Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field. *Materials Journal*, 89(1), 49-53.
- Plank, J., Sakai, E., Miao, C. W., Yu, C., & Hong, J. X. (2015). Chemical admixtures—Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and concrete research*, 78, 81-99.
- Alonso, C., Andrade, C., & Gonzalez, J. A. (1988). Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types. *Cement and concrete research*, 18(5), 687-698.
- Liu, Y. (2012). *Accelerated curing of concrete with high volume Pozzolans-resistivity, diffusivity and compressive strength*. Florida Atlantic University.
- Parastegari, N., Mostofinejad, D., & Poursina, D. (2019). Use of bacteria to improve electrical resistivity and chloride penetration of air-entrained concrete. *Construction and Building Materials*, 210, 588-595.
- Kakooei, S., Akil, H. M., Jamshidi, M., & Rouhi, J. (2012). The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, 27(1), 73-77.
- Ramezani pour, A. A., Esmaili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418.
- Hilsdorf, H., & Kropp, J. (1995). *Performance criteria for concrete durability*. CRC Press.
- Real, S., Bogas, J. A., & Pontes, J. (2015). Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders. *Construction and Building Materials*, 98, 425-436.

13. Zega, C. J., & Di Maio, Á. A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste management*, 31(11), 2336-2340.
14. Saravanakumar, P., & Dhinakaran, G. (2014). Durability aspects of HVFA-based recycled aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, 66(4), 186-195.
15. Afrouhsabet, V., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and building materials*, 94, 73-82
16. Admixture, W. R. ASTM C494, Type A. Structural concrete shall contain a water reducing (plasticizing) admixture. Subject to compliance with requirements, provide one of the following products, 1.
17. ACI-Committee. (2008). ACI 544.3 R-08 Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete, ACI American Concrete Institute.
18. ASTM, C. (2012). 1202: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *Annual Book of ASTM Standards*, 4, 7.
19. Ahmed, H., Bogas, J. A., & Guedes, M. (2018). Mechanical behavior and transport properties of cementitious composites reinforced with carbon nanotubes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(10), 04018257.
20. Carriço, A., Bogas, J. A., Hawreen, A., & Guedes, M. (2018). Durability of multi-walled carbon nanotube reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 121-133.
21. ASTM, C. (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. C642-13.
22. Chaker, V. (1992). Corrosion forms and control for infrastructure. Philadelphia: ASTM.
23. Standard, A. S. T. M. (2008). ASTM C109-standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
24. STANDARD, B. (2005). Non destructive testing—X ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials.
25. Joseph I. Goldstein et al., "Scanning Electron Microscopy & X-Ray Microanalysis" Third Edition, Kluwer academic/Plenum Publishers, New York Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2003.
26. ASTM E1621-13. (2013). Standard guide for elemental analysis by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry.
27. Liu, Z., & Beaudoin, J. J. (1999). An assessment of the relative permeability of cement systems using AC impedance techniques. *Cement and concrete research*, 29(7), 1085-1090.
28. Toutanji, H. A. (1999). Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete. *Construction and Building Materials*, 13(4), 171-177.
29. MUHAMMAD, A. (2017). CREEP AND THERMAL RESPONSE OF LONG SPAN PRESTRESSED CONCRETE INTEGRAL ABUTMENT BRIDGE (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).
30. ACI Committee. (1982). State of the Art Report in Fiber Reinforced Concrete. ACI (American Concrete Institute): Farmington Hills, MI, USA.
31. Ghodousi, P., "Effects of corrosion on the Bond and strength of Reinforced concrete Beams", Phd Thesis, Leeds University, 1992.
32. Malhotra, V. M., & Carino, N. J. (2003). *Handbook on nondestructive testing of concrete*. CRC Press.