

رفتار خوردگی میلگردهای بتن حاوی میکروسیلیس و حباب هوا با استفاده از آزمون تافل

حمید اسکندری^{۱*}، الهام سادات حسینی^۲

۱- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

Hamidsttu@yahoo.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری.

Hosseinielhamsadat@gmail.com

خلاصه

سازه های بتن مسلح در معرض خوردگی قرار دارند و این یکی از عمده مشکلات این نوع از سازه هاست. یکی از روش های موثر برای جلوگیری از خوردگی آرماتورهای فولادی بهبود خواص مکانیکی بتن است که با تغییر ماهیت فیزیکی بتن از طریق افزودن مواد مختلف ایجاد می شود. در این تحقیق از پوزولان میکروسیلیس و افزودنی حباب هوا به عنوان مواد افزودنی استفاده شده است. آزمون های بتنی استوانه‌ای شکل به ابعاد ۱۰*۱۵ سانتی متری، در ۱۲ طرح اختلاط متفاوت با درصدهای مختلفی از حباب هوا و ۱۰٪ وزن سیمان میکروسیلیس آماده گردید و رفتار خوردگی آرماتورهایی به قطر ۱۶ میلی‌متر که در مرکز این نمونه ها قرار گرفته بود، با استفاده از آزمون تافل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشات انجام شده بر روی این نمونه های بتنی نشان می‌دهد که حباب هوا می‌تواند رفتار متفاوتی را در نرخ خوردگی نمونه ها بوجود آورد. هم چنین میزان خوردگی طرح هایی که از میکروسیلیس و حباب هوا استفاده شده بود نتایج بهتری را در مقایسه با طرح های دیگر به دنبال داشت.

کلمات کلیدی: بتن مسلح، آزمون تافل، میکروسیلیس، حباب هوا، نرخ خوردگی

۱. مقدمه

بتن، پرمصرف ترین ماده ساختمانی در دنیاست و دلیل آن، قیمت پایین، راحتی کاربرد و مقاومت نسبتاً خوب آن است. در حالت کلی، عوامل مخرب بتن به سه حالت فیزیکی نظیر یخ زدن، مکانیکی نظیر سایش و شیمیایی نظیر حمله سولفات ها و خوردگی آرماتور تقسیم بندی می‌شوند [۱]. خوردگی آرماتورهای فولادی یکی از رایج‌ترین عوامل تخریب سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. به علت استفاده گسترده از سازه های بتنی در شرایط اقلیمی متفاوت، مسئله آسیب دیدگی این نوع سازه ها و در نتیجه تعمیرات و نگهداری آنها، یکی از موضوعات اصلی بحث کارشناسان بتن را تشکیل می دهد [۲]. در سال‌های

* استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری

Hamidsttu@yahoo.com

گذشته تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. ترکیبات بتن تاثیر به سزایی در مقاومت آن در برابر خوردگی دارد و با توجه به اینکه عامل اصلی خوردگی میلگردهای فولادی حمله کلریدها به بتن است بنابراین نوع بتن و بهبود ترکیبات آن در بسیاری از موقعیت‌ها می‌تواند سبب جلوگیری از هم پاشیدن سازه های بتن مسلح شود [۳]. از فاکتورهای مهمی که می‌تواند در فرایند خوردگی موثر باشد، اندازه پوشش بتنی، مدت زمان عمل آوری و نسبت آب به سیمان است یکی از روش‌هایی که می‌تواند روی خوردگی تاثیر داشته باشد، جلوگیری از نفوذپذیری بتن می‌باشد [۴، ۵] و یکی از پوزولان‌هایی که نفوذپذیری بتن را کاهش می‌دهد میکروسیلیس می‌باشد [۶]. در صنعت بتن سیلیس یکی از موادی است که نقش مهمی در چسبندگی و پر کنندگی بتن با عملکرد بالا ایفا می‌کند [۷]. ریزی ذرات میکروسیلیس واکنش با هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراته شدن سیمان پرتلند را تسریع می‌نماید، ذرات خیلی کوچک میکروسیلیس می‌تواند در فضای بین ذرات سیمان جای گیرند و تراکم را بهبود بخشند، همچنین وقتی که میکروسیلیس در مخلوط وجود داشته باشد فوق روان کننده‌ها ارزشمند خواهند بود، زیرا میکروسیلیس نیاز به آب سازه را افزایش می‌دهد [۸]. نوع دیگری از افزودنی‌ها که برای افزایش دوام بتن استفاده می‌شود حباب هوا نام دارد. حباب هوا در بتن عبارت است از هوایی که به وسیله مواد مناسب، عمداً در بتن ایجاد می‌گردد. ایجاد حباب هوا در بتن سبب می‌شود که در خمیر سیمان، منافذ ریز تقریباً کروی شکل جدا از یکدیگر به وجود آیند، به صورتی که هیچ گونه مجرای برای عبور آب ایجاد نگردد و لذا نفوذپذیری بتن افزایش نمی‌یابد [۹].

خوردگی میلگرد به دو طریق به بتن مسلح آسیب می‌رساند. اول اینکه باعث کاهش سطح مقطع میلگرد می‌گردد. دوم اینکه محصولات خوردگی با حجمی بزرگتر از خود فولاد را را به وجود می‌آورد. این افزایش حجم با ایجاد تنش‌های کششی در بتن منجر به ترک خوردگی و در نهایت خرابی سازه می‌گردد. بتن خوب متراکم شده و صحیح عمل آوری شده با یک نسبت آب به سیمان کم نفوذ پذیری کمی دارد که نفوذ آلاینده‌های آغاز کننده خوردگی همانند کلرید، دی اکسید کربن، رطوبت و غیره را به سطح فولاد به حداقل می‌رساند [۱۰]. از روش‌های غیرمخرب که می‌تواند برای بازرسی خوردگی آرماتورهای بتن مسلح مفید باشد، روش‌های NDT می‌باشد که به دو گروه الکتروشیمیایی مانند امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون خطی و پلاریزاسیون تافل و غیر الکتروشیمیایی مانند اختلاف پتانسیل تقسیم می‌شود. روش‌های الکتروشیمیایی نرخ خوردگی میلگردهای فولادی مدفون در بتن را مورد ارزیابی قرار می‌دهد [۱۱-۱۸] با توجه به اینکه هیچکدام از محققین در ارتباط با میزان حباب هوا و میکروسیلیس و تاثیر همزمان آنها با هم تا کنون مورد بررسی قرار نداده اند بنابراین در این تحقیق به بررسی تاثیر حباب هوا و میکروسیلیس بر میزان خوردگی آرماتورهای بتن مسلح با استفاده از آزمون تافل پرداخته می‌شود. بدیهی است انتخاب روش مناسب به شناخت دقیق عوامل تخریب و میزان خرابی‌ها بوجود آمده بستگی دارد.

۲. مصالح و ساخت نمونه:

۱-۲. سیمان

سیمان مورد استفاده برای نمونه‌ها سیمان پرتلند از نوع ۲ و در رده مقاومتی ۵۳۵ محصول کارخانه سیمان زاوه تربت حیدریه می‌باشد که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- محتویات استاندارد سیمان

مواد تشکیل دهنده	SI					
	O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O
مقدار (درصد)	۲۱/۲۹	۰/۵	۰/۴	۶۳/۲۹	۲/۸۱	۰/۵۴

۲-۲. سنگدانه:

سنگدانه مورد استفاده در ساخت این نمونه‌ها مطابق با دانه بندی جدول ۲ که با آیین نامه ASTM مربوط به دانه بندی مصالح مصرفی در بتن مطابقت دارد، نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی

اندازه الک (میلی‌متر)	#۱۲	۹/۵ #	# ۴/۷۵	# ۲/۳۶	# ۱/۱۸	# ۰/۶	# ۰/۳	۰/۱۵ #
درصد مانده روی هر الک	۲	۵	۱۸	۲۰	۱۵	۷	۱۲	۱۴

۳-۲. میکروسیلیس:

میکروسیلیس یک سوپر پوزولان است که به عنوان یک افزودنی چند منظوره، جهت افزایش دوام، مقاومت و تراکم مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین بتن را ضد سولفات نموده و نفوذپذیری را به شدت کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث جلوگیری از خوردگی آرماتور در بتن مسلح در مقابل عوامل خورنده می‌شود.

۴-۲. مواد حباب‌زا:

مایع، با افزودن به بتن حبابهای ریز هوا در حجم گسترش یافته و موجب افزایش مقاومت بتن در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد می‌گردد.

۵-۲. فوق روان کننده:

از فوق‌روان کننده با پایه پلی‌کربوکسیلیت (PCE) استفاده شد. هنگام مصرف ۰/۲ تا ۱/۲ درصد وزن سیمان مصرفی (بسته به اسلامپ مورد نظر) به مصالح اضافه می‌شود.

۶-۲. آب:

آب مصرفی در ساخت نمونه‌ها آب شرب شهر سبزوار می‌باشد.

۷-۲. میلگرد:

میلگرد مصرفی از نوع St 37 با قطر ۱۶ میلیمتر در استفاده شده است که نمونه میلگردها مطابق شکل زیر است.



شکل ۱- آرماتورهای مصرفی

۳. عملیات طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی:

جهت تهیه نمونه‌ی آزمایشی که طرح کلی آن در شکل ارائه شده است، از آرماتورهای فولادی با سطح صاف به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۱۶ میلی‌متر استفاده شد. برای این منظور ابتدا سطح نمونه‌ها با سنباده، کاملاً تمیز گردید. سپس قسمتهایی از سطح که در معرض عوامل خورنده قرار داشتند در ۳ لایه توسط اپوکسی پوشانده شد تا هیچ گونه نفوذی از قسمت‌های مذکور به سطح میلگرد صورت نگیرد. برای تامین فاصله دقیق کاور به گونه‌ای عمل شد که حداقل کاور ۴

سانتیمتر از سطح بتن برای هر نقطه از میلگرد که در مرکز نمونه قرار دارد تامین شود این فاصله از بالا به طور کامل توسط اپوکسی زدن تا سطح بتن تامین شد و از پایین به این صورت بود که پایین میلگرد از کف قالب ۳ سانتیمتر فاصله داده شد و ۱ سانتیمتر دیگر از پایین میلگرد با اپوکسی پوشش داده شد.

در این پروژه ۱۲ طرح اختلاط به عنوان آزمون‌های بررسی میزان خوردگی بتن مسلح مورد استفاده قرار گرفتند نمونه‌ها با درصد‌های مختلفی از میکروسیلیس و حباب هوا ساخته شد و از قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۰ سانتی متر و ارتفاع ۲۰ سانتی متر استفاده شد و هر یک از نمونه‌ها پس از ریختن بتن، میلگردی با قطر ۱۶ میلی‌متر در مرکز قرار گرفت. طرح اختلاط نمونه‌ها در جدول شماره ۳ آورده شده است. در این طرح اختلاط‌ها استفاده از میکروسیلیس به‌عنوان ماده افزودنی مورد استفاده قرار گرفت که با اضافه نمودن فوق روان‌کننده اسلامپ مورد نظر تامین گردید. لازم به ذکر است همان‌طور که در جدول طرح اختلاط مشاهده می‌شود طرح اختلاط‌های ۱ تا ۶ با حباب هوا و نسبت آب به سیمان ۰/۵ و طرح اختلاط‌های ۷ تا ۱۲ با میکروسیلیس و حباب هوا و نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شد. در نمونه‌های ۷ تا ۱۲ هدف بررسی تاثیر همزمان میکروسیلیس و حباب هوا در بحث دوام بتن توانمند بود.

مجموع میزان میکروسیلیس ۱۰٪ وزن سیمان مصرفی می‌باشد و این مقدار در کلیه طرح اختلاط‌های مربوطه (۷ تا ۱۲) یکسان است. تفاوت طرح اختلاط‌ها، در استفاده از ترکیب میکروسیلیس با مقادیر مختلف حباب هوا می‌باشد.

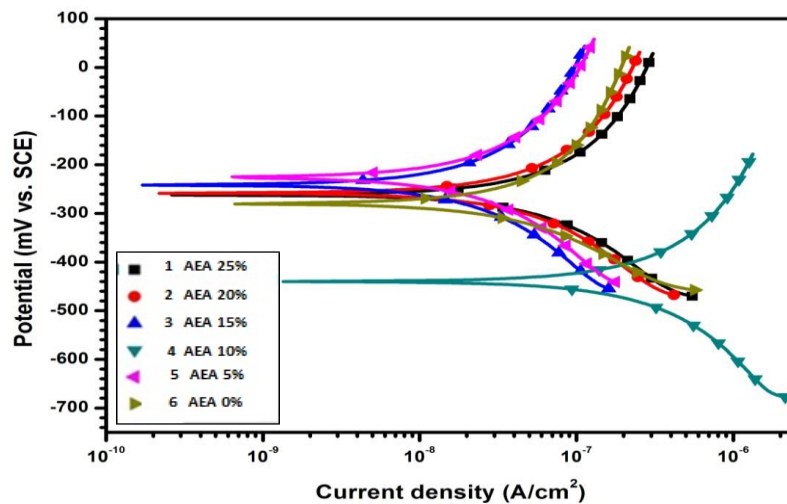
جدول ۳- طرح اختلاط آزمون‌های بتن مسلح با افزودنی ماده حباب‌زا و میکروسیلیس

شماره نمونه	سیمان (گرم)	آب (گرم)	سنگدانه (گرم)	ماده حباب‌زا (میلی)	فوق-روان-کننده	میکروسیلیس (۱۰ درصد)
۱	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۲۵	۰	۰
۲	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۲۰	۰	۰
۳	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۱۵	۰	۰
۴	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۱۰	۰	۰
۵	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۵	۰	۰
۶	۷۰۰	۳۵۰	۲۰۰۰	۰	۰	۰
۷	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۲۵	۳	۷۰
۸	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۲۰	۵	۷۰
۹	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۱۵	۱۰	۷۰
۱۰	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۱۰	۱۰	۷۰
۱۱	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۵	۱۰	۷۰
۱۲	۶۳۰	۲۸۰	۲۰۰۰	۰	۱۰	۷۰

همچنین مقادیر نسبت‌های اختلاط درج شده در جدول به میزان لازم برای ساختن هر سری از نمونه‌های مورد نیاز می‌باشد. برای مطالعات و بررسی خوردگی، در وسط نمونه‌های استوانه‌ای میلگردهای آجدار فولادی با قطر ۱۶ میلیمتر که کاربرد نسبتاً بیشتری در ساخت و ساز دارد، قرار داده شد. در انتها کلیه نمونه‌های بتن مسلح پس از ۲۴ ساعت از زمان ساخت داخل بشر مدرج پلاستیکی که حاوی محلول ۳/۵ درصد یون کلر بود قرار گرفت آزمایشات خوردگی پس از نفوذ یون‌ها به داخل بتن در بازه‌های زمانی مشخص شده انجام پذیرفت.

۴. تفسیر منحنی های پلاریزاسیون تافل:

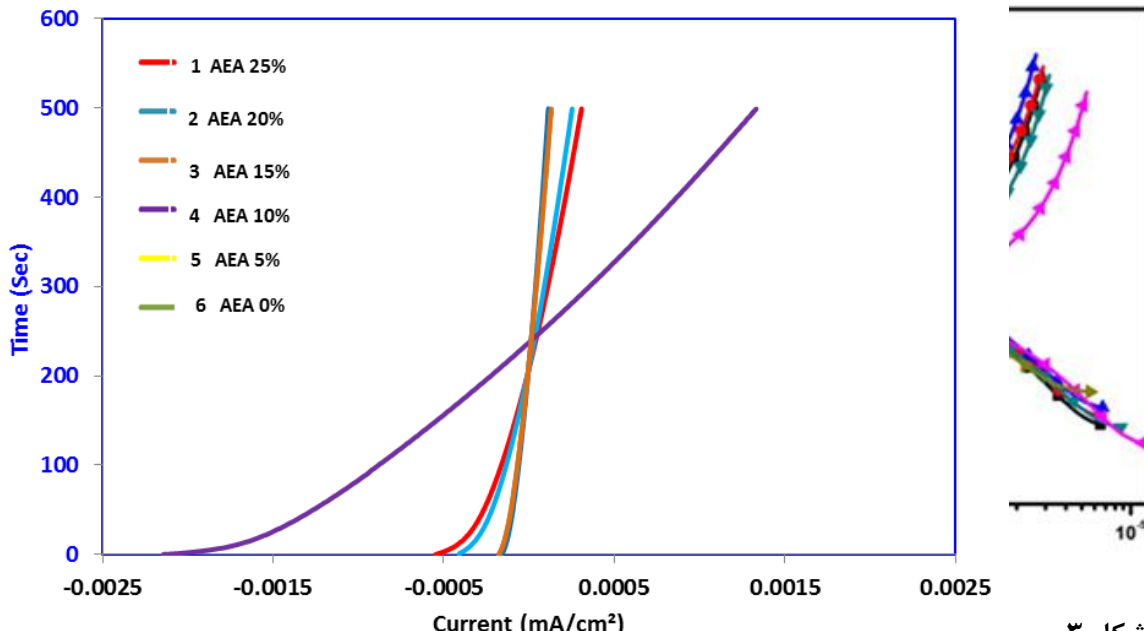
اساس روش تافل مشابه پلاریزاسیون خطی است با این تفاوت که محدوده ی پتانسیل اعمال شده بیشتر است. معمولاً پتانسیل اعمالی نسبت به OCP تا حدود 400 تا 500 mv تغییر داده می شود و جریان حاصل در این حالت مثبت می گردد. پلاریزاسیون الکتروود معمولاً از 200 mv - نسبت به OCP شروع شده و تا 200 mv + نسبت به آن ادامه می یابد.



شکل ۲- نمودار پلاریزاسیون تافل برای نمونه های بتنی حاوی درصد های مختلف حباب هوا

با توجه به شکل ۲ می توان مشاهده کرد که نمونه بتنی حاوی 10 میلی لیتر حباب هوا دارای کمترین میزان پتانسیل خوردگی در مقایسه با سایر نمونه های بتنی دارد که طرح اختلاط شماره ۴ جدول ۳ را شامل می شود. این به این مفهوم است که این نمونه نسبت به سایر نمونه ها تمایل بیشتری به خوردگی دارد. نمونه های حاوی 5 میلی لیتر حباب هوا دارای میزان پتانسیل خوردگی مثبت تری نسبت به سایر نمونه است و پس از آن نمونه بتنی حاوی 15 میلی لیتر حباب هوا پتانسیل مثبت تری نسبت به سایر نمونه ها دارد. نمونه های حاوی 20 ، 25 و 30 میلی لیتر حباب هوا دارای میزان پتانسیل خوردگی تقریباً نزدیک بهم می باشند و از بین این سه نمونه، نمونه ایی که حاوی 15 میلی لیتر حباب هوا است از پتانسیل مثبت تری برخوردار است.

در نمودار مشاهده می شود که نمونه ای که حاوی 15 میلی لیتر حباب هوا می باشد نسبت به سایر نمونه ها بیشتر به سمت چپ تمایل دارد که این نشان دهنده جریان خوردگی کمتر در سطح میلگرد است و همچنین نمونه حاوی 10 میلی لیتر حباب هوا نسبت به سایر نمونه ها بیشتر به سمت راست تمایل دارد که این نشان دهنده جریان خوردگی بیشتر در سطح میلگرد و کمترین مقاومت در برابر خوردگی می باشد. با توجه به نمودار می توان نتیجه گرفت که نمونه ای که حاوی 15 میلی لیتر حباب هوا می باشد دارای پتانسیل خوردگی مثبت تر و جریان خوردگی کمتر در سطح میلگرد و بیشترین مقاومت در برابر خوردگی را دارا می باشد.



شکل ۳-

نمودار پلاریزاسیون تافل نمونه های بتنی حاوی میکروسیلیس و درصد های مختلف حباب هوا

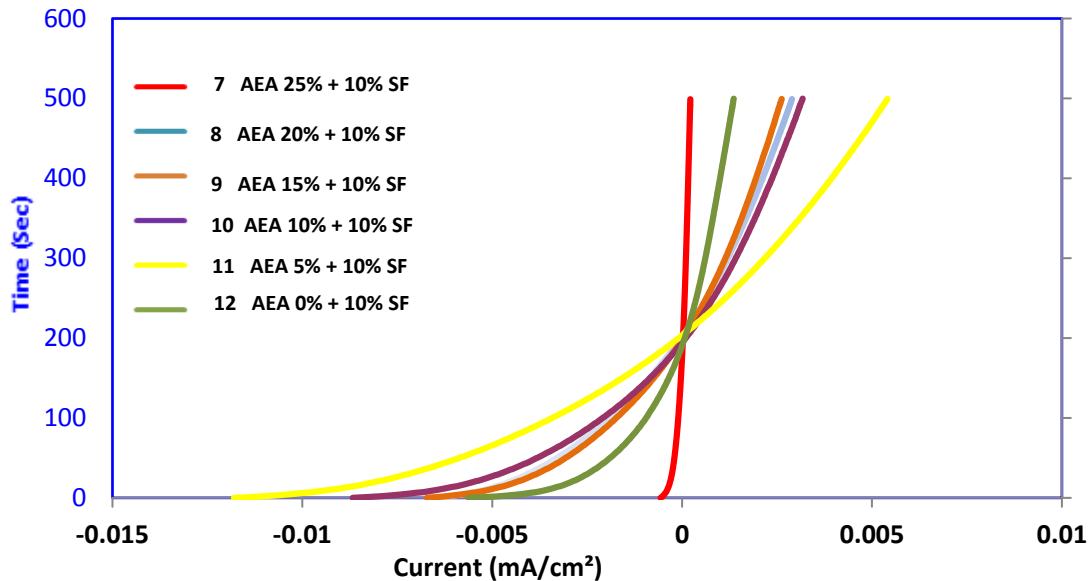
شکل ۳ نمودار جریان بر حسب پتانسیل است و نتایج بدست آمده از آزمون تافل را برای نمونه های بتنی حاوی مقدار ثابت میکروسیلیس (۱۰٪ وزن سیمان) با درصد های مختلف حباب هوا نشان می دهد. با توجه به شکل ۳ می توان مشاهده کرد که نمونه بتنی حاوی ۵ میلی لیتر حباب هوا دارای کمترین میزان پتانسیل خوردگی در مقایسه با سایر نمونه های بتنی دارد که طرح اختلاط شماره ۱۱ جدول ۳ را شامل می شود. این به این مفهوم است که این نمونه نسبت به سایر نمونه ها تمایل بیشتری به خوردگی دارد. نمونه بتنی که فقط دارای میکروسیلیس است و حباب هوا ندارد دارای میزان پتانسیل خوردگی مثبت تری نسبت به سایر نمونه است و همچنین مشاهده می شود که نمونه های حاوی میکروسیلیس و میزان حباب هوای ۲۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۵ دارای میزان پتانسیل خوردگی یکسانی می باشند.

در این شکل مشاهده می شود که نمونه ای که حاوی ۲۵ میلی لیتر حباب هوا و میکروسیلیس می باشد نسبت به سایر نمونه ها بیشتر به سمت چپ تمایل دارد که این نشان دهنده جریان خوردگی کمتر در سطح میلگرد است و بعد از آن نمونه بتنی که حباب هوا ندارد و فقط دارای میکروسیلیس می باشد دارای جریان خوردگی کمتر و پتانسیل بیشتری نسبت به بقیه نمونه ها است. با توجه به نمودار می توان نتیجه گرفت که نمونه حاوی ۱۵ میلی لیتر حباب هوا می باشد دارای پتانسیل خوردگی مثبت تر و جریان خوردگی کمتر و مقاومت بیشتر در سطح میلگرد می باشد. نمونه شماره ۱۱ که دارای میکروسیلیس و ۵ میلی لیتر حباب هوا می باشد دارای بیشترین جریان خوردگی و کمترین مقاومت در برابر خوردگی را دارا می باشد.

شکل ۴- نمودار پلاریزاسیون تافل جریان - زمان برای نمونه های بتنی حاوی درصد های مختلف حباب هوا

شکل ۴ نمودار پلاریزاسیون تافل جریان بر حسب زمان است و جریان خوردگی نمونه های بتنی حاوی درصد های مختلف حباب هوا در مدت زمان ۵۰۰ ثانیه نشان می دهد. نمونه بتنی حاوی ۱۰ میلی لیتر حباب هوا دارای کمترین میزان جریان خوردگی نسبت به سایر نمونه ها در مدت زمان ۵۰۰ ثانیه می باشد و همچنین جریان خوردگی برای این نمونه در این

مدت زمان متغیر است. بعد از آن نمونه های حاوی ۲۵ و ۲۰ میلی لیتر دارای رنج جریان خوردگی کمتری می باشند و همچنین تغییر جریان خوردگی برای این نمونه ها در این مدت زمان کمتر از نمونه حاوی ۱۰ میلی لیتر حباب هوا است. نمونه های حاوی ۵،۰ و ۱۵ میلی لیتر حباب هوا دارای رفتار کاملا مشابه ای می باشند در این نمونه ها رنج جریان خوردگی در این مدت زمان تقریبا ثابت است و تغییر نمی کند.



شکل ۵- نمودار پلاریزاسیون تافل جریان - زمان برای نمونه های بتنی حاوی میکروسیلیس و درصد های مختلف حباب هوا

شکل ۵ نمودار پلاریزاسیون تافل جریان بر حسب زمان است و جریان خوردگی نمونه های بتنی حاوی مقدار ثابت میکروسیلیس (۱۰٪ وزنی سیمان) و درصد های مختلف حباب هوا در مدت زمان ۵۰۰ ثانیه را نشان می دهد. نمونه بتنی حاوی میکروسیلیس و ۵ میلی لیتر حباب هوا نشان دهنده کمترین میزان جریان خوردگی نسبت به سایر نمونه ها و بیشترین تغییرات جریان در مدت زمان ۵۰۰ ثانیه می باشد بعد از این به ترتیب نمونه های حاوی ۱۰، ۲۰، ۱۵، ۲۵، ۰ میلی لیتر دارای تغییرات جریان خوردگی کمتری نسبت به نمونه حاوی ۵ میلی لیتر حباب هوا می باشند. با توجه به نمودار می توان مشاهده نمود نمونه ای که حاوی ۲۵ میلی لیتر حباب هوا می باشد دارای جریان خوردگی یکسان و ثابتی در این مدت زمان می باشد.

۵. نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از آزمون الکتروشیمیایی پلاریزاسیون تافل را می توان از دو جهت مورد بررسی قرار داد: الف) تاثیر نسبت های حجمی مختلف حباب هوا روی رفتار خوردگی نمونه های بتنی:

با توجه به نتایج بدست آمده به نظر میرسد که افزایش میزان حباب هوا در نمونه های بتنی از روند خاصی در میزان پتانسیل خوردگی و جریان خوردگی پیروی نمی کند. نمونه بتنی با ۱۵ میلی لیتر حباب هوا دارای بالاترین پتانسیل خوردگی و کمترین جریان خوردگی می باشد.

ب) تاثیر حباب هوا و میکروسیلیس روی رفتار خوردگی نمونه های بتنی:

براساس آزمایشات انجام شده و تحلیل آن، نتایج نشان می‌دهد که با یک مقدار کافی از حباب هوا، بتن حاوی میکروسیلیسی دارای ضریب فاصله بیشتری در منافذ هوا می‌باشد و همزمان، بافت متراکم خمیر سیمان هیدراته از حرکت آب جلوگیری می‌نماید و باعث افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش اختلاف پتانسیل می شود ضمن اینکه وقتی میکروسیلیس در مخلوط وجود داشته باشد فوق روان کننده‌ها ارزشمند خواهند بود، زیرا میکروسیلیس نیاز به آب سازه را افزایش می‌دهد و به نحو چشم‌گیری قابلیت نفوذ بتن را کاهش و مقاومت الکتریکی آن را افزایش می‌دهند و لذا باعث کاهش آهنگ خوردگی می‌گردند. همچنین افزایش حباب هوا باعث مقاومت الکتریکی کمتر و اختلاف پتانسیل بیشتر و در نتیجه خوردگی بیشتر می شود.

۶. قدردانی

نویسنده بر خود ضروری می‌داند که در این میان از حمایت‌های مجموعه آزمایشگاه فناوری‌های نوین بتنی دانشکده فنی دانشگاه حکیم سبزواری نهایت سپاسگذاری را به عمل آورد.

۷. مراجع

۱. گل‌گذار، ع.م.ک.، ر.ش.ح.م. (۱۳۸۶)، بررسی خوردگی فولاد بتن مسلح در محیط آبی حاوی ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم، یازدهمین کنگره سالانه انجمن مهندسين متالوژی ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۲. پیکرنگار، م.م.ر.م. (۱۳۸۹)، بررسی تاثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر آهنگ میزان نفوذ در بتن حاوی متاکائولین و دوده سیلیس، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران اردیبهشت ماه، دانشگاه فردوسی مشهد.
3. Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*.
4. Kakooei, S., et al. (2012)., *The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete*. Construction and Building Materials. **35**: p. 564-570.
5. Midgley, H. and J. Illston. (1984), *The penetration of chlorides into hardened cement pastes*. Cement and Concrete Research. **14**(4): p. 546-558.
6. Dotto, J., et al. (2004), *Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars*. cement and concrete composites. **26**(1): p. 31-39.
۷. صادقی، ر.ه.ز.ا. (۱۳۸۳)، کاربرد مواد نانوساختار در صنعت ساختمان یازدهمین کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه هرمزگان.
8. Al-Amoudi, O.S.B., M. Maslehuddin, and A.I. Al-Mana. (1993), *Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes*. Materials Journal,. **90**(6): p. 564-570.
9. Neville, A.M. (1995), *Properties of concrete..*
10. Ahmad, S., *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction—a review*. Cement and Concrete Composites, 2003. **25**(4): p. 459-471.

11. Gu, P., et al., *Performance of Steel Reinforcement in Portland Cement and High-Volume Fly Ash Concretes*. ACI materials Journal, 1999. **96**(5).
12. Andrade, C., et al., *The importance of geometrical considerations in the measurement of steel corrosion in concrete by means of AC impedance*. Corrosion Science, 1995. **37**(12): p. 201۲-۲۳-۳
13. Lemoine, L., F. Wenger, and J. Galland. (1990) , "Study of the corrosion of concrete reinforcement by electrochemical impedance measurement". Corrosion Rates of Steel in Concrete, ASTM STP. **1065**: p. 118-133.
14. Dhouibi-Hachani, L., et al. (1996), *Comparing the steel-concrete interface state and its electrochemical impedance*. Cement and Concrete Research. **26**(2): p. 253-266.
15. Hachani, L., et al. (1992), *Steel corrosion in concretes deteriorated by chlorides and sulphates: Electrochemical study using impedance spectrometry and 'stepping down the current' method*. Cement and concrete research. **22**(1): p. 56-66.
16. Hope, B.B., J.A. Page, and A.K. Ip.(1986) , *Corrosion rates of steel in concrete*. Cement and Concrete Research. **16**(5): p. 771-781.
17. John ,D., P. Searson, and J. Dawson. (1981) *Use of AC impedance technique in studies on steel in concrete in immersed conditions*. British Corrosion Journal. **16**(2): p. 102-106.
18. García-Alonso, M., et al. (2007) , *Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete*. Cement and concrete research. **37**(10): p. 1463-1471.