

بررسی تجربی خوردگی فولاد در بتن حاوی سرباره و میکروسیلیس

کمال میر طلایی
استادیار

داود مستوفی نژاد
دانشیار

مرتضی صادقی
کارشناس ارشد

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

به دلیل استفاده وسیع از سازه های بتنی در شرایط متفاوت اقلیمی و در نتیجه بروز انواع آسیب دیدگی ها در بتن، توجه به پایایی بتن از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا در غیر اینصورت سازه بتنی در طول عمر مفید خود توانایی سرویس دهی مطلوب را نخواهد داشت. یکی از مهمترین دلایل بروز خسارت در سازه های مسلح بتنی، خوردگی آرماتورهای فولادی می باشد که هر ساله در سراسر جهان زیانهای فراوانی به بار می آورد. نفوذ یونهای کلر در محیط بتن و کربناسیون از شایع ترین عوامل خوردگی آرماتورهای فولادی محسوب می شوند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی و مقایسه دوام نمونه های بتنی، در صورت تغییر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس، سرباره و ترکیب آنها به عنوان جایگزین سیمان و در نهایت تشخیص بهترین حالت ترکیب این مواد با سیمان در محیط بتن (درصد بهینه) به لحاظ دستیابی به حداکثر مقاومت و پایایی در برابر خوردگی فولاد می باشد. همچنین بررسی نقش تغییرات مقاومت فشاری بتن بر دوام بتن در برابر خوردگی فولاد از دیگر اهدافی بود که در این تحقیق دنبال شد. در این تحقیق جهت دستیابی به اهداف فوق الذکر، نمونه ها در سه نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و در قالب ۵۲ طرح اختلاط (۶۸ نمونه) ساخته شدند. بدین ترتیب که نمونه های ساخته شده در هر کدام از نسبت های آب به مواد سیمانی، حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی بوده و در هر درصد جایگزینی سرباره، از ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس نیز به عنوان جایگزین سیمان مصرفی استفاده شد. مقادیر بهینه هر یک از سرباره و میکروسیلیس جایگزین در بتن برای حصول بهترین پایایی در مقابل خوردگی فولاد در این تحقیق تعیین گردید که شرح آن در اصل مقاله ارائه خواهد گردید.

کلمات کلیدی

میکروسیلیس، سرباره، خوردگی، آرماتورهای فولادی، دوام، بتن.

Experimental Investigation of Steel Corrosion in Concrete with Slag and Silica Fum

D. Mostofinejad
Assistant Professor

K. Mirtalaei
Assistant Professor

M. Sadeghi

Department of Civil Engineering,

Abstract

For the wide use of concrete in different climates and consequently outbreak types of damages in concrete, attention to concrete durability has special importance. One of the most important damages in reinforced concrete structures is corrosion of steel. Chloride intrusion in concrete and carbonation are most common reasons of steel corrosion. The aim of the present study was investigation and comparison of durability of concrete specimens due to variation of water to cementitious ratio (W/CM), silica fume and slag percent and their components as cement replacement. Furthermore, the optimum percent of the aforementioned components to reach to a durable concrete against steel corrosion was intended to be determined. To reach to the mentioned aims, specimens were made in 0.5, 0.4 and 0.3 W/CM ratios with 52 mix proportions (468 specimens); which specimens in each W/CM ratio contained 0, 20, 35 and 50 percent of slag as cement replacement, while in each case, 0, 5, 10 and 15 percent of silica fume were used as cement replacement. In the current study, to obtain the best durability against steel corrosion, the optimum amounts of slag and silica fume in concrete were determined which will be presented in the full paper.

Keywords

Silica Fume, slag, corrosion, steel reinforcement, durability, concrete.

مقدمه

طبیعت فوق العاده قلیایی محیط بتن با تشکیل یک لایه محافظ^۱ میکروسکوپی از جنس اکسید آهن روی سطح فلز، از خوردگی آرماتورهای فولادی جلوگیری می‌کند. لایه محافظ شکل گرفته روی سطح فولاد ناپایدار و موقتی است. دو عامل عمده که باعث از بین رفتن لایه محافظ فولاد موجود در بتن می‌شوند عبارتند از: کاهش قلیائیت بتن و حمله یونهای مهاجم کربناسیون بتن معمول‌ترین مکانیزم کاهش قلیائیت بتن می‌باشد. وقتی بتن در معرض هوا قرار می‌گیرد، مقداری از CO₂ موجود در هوا به داخل آن نفوذ می‌کند. نفوذ گاز دی اکسید کربن در بتن و ایجاد واکنش با محصولات هیدراسیون باعث کاهش pH محیط بتنی شده و در اثر این امر لایه محافظ از سطح فولاد حذف شده و خوردگی شروع می‌شود. همچنین یونهای مهاجم نظیر یونهای کلر می‌توانند لایه محافظ را در خود حل کنند و به این ترتیب خوردگی میلگرد در بتن شروع می‌شود. یونهای کلر ممکن است در مرحله ساخت بتن وارد آن شوند. به عنوان مثال آب دریا یا آبهای حاوی یونهای کلر با غلظت زیاد که به عنوان آب اختلاط مورد استفاده واقع می‌شوند و یا سنگدانه های حاوی کلر و مواد افزودنی نظیر کلرید کلسیم، همگی می‌توانند باعث حضور یونهای کلر در محیط بتن شوند. گاهی اوقات سنگدانه ها حاوی مقادیر قابل توجهی یونهای کلر می‌باشند. بخصوص سنگدانه های متخلخل می‌توانند حاوی مقادیر بیشتری یونهای کلر نسبت به سایر سنگدانه‌ها باشند. همچنین گاهی یونهای کلر از محیط اطراف به داخل بتن نفوذ می‌کنند. نمکهای ضد یخ، آب دریا، خاکهای حاوی یون کلر از جمله منابع یونهای کلری هستند که از محیط خارج بتن به داخل آن نفوذ می‌کنند [۱]. نفوذ یونهای کلر به داخل بتن، سبب خورده شدن آرماتورهای فولادی می‌شود که به سرعت بتن را خراب می‌کنند. یونهای کلر پس از رسیدن به سطح فولاد، حالت انفعالی فولاد را از بین می‌برند و سبب خوردگی فعال و سریع آن می‌شوند [۲-۵].

آسیب دیدگی بتن در اثر خوردگی فولاد، ناشی از ایجاد زنگ آهن است که با افزایش حجم آهن و تولید تنش‌های کششی در بتن اطراف همراه است. در اثر خورده شدن فولاد، از آنجا که محصولات خوردگی، حجمی بیش از فولاد سالم دارند، تنشهای کششی داخلی در ناحیه تماس فولاد با بتن ایجاد شده و توسعه می‌یابد. در نتیجه بتن اطراف ترک خورده و حتی بتن در مراحل پیشرفته تر خوردگی فولاد، به صورت لایه لایه فرو می‌ریزد (اصطلاحاً ورقه ورقه می‌شود). به علاوه در اثر تنشهای کششی ایجاد شده در طول دوران خوردگی، ترکهای ریز موجود در بتن، بزرگتر شده و با مرتبط شدن به یکدیگر، شبکه ای از ترکهای داخلی را بوجود می‌آورند و در نتیجه انتقال یونها از سطح بتن به سطح آرماتورها با سرعت بیشتری انجام می‌شود. این

مسأله باعث افزایش سرعت و تشدید خوردگی خواهد شد.

با توجه به نتایج برخی از تحقیقات انجام شده با حضور و افزایش مقدار میکروسیلیس در بتن، میزان هیدروکسید کلسیم کاهش می‌یابد. با از بین رفتن هیدروکسید کلسیم، بخصوص در ناحیه حد فاصل بتن و فولاد، خاصیت حفاظتی آرماتورهای فولادی در محیط قلیایی بتن نیز کاهش می‌یابد. برخی گزارشها دلالت بر آن دارد که استفاده از سرباره نیز دارای اثر مشابهی بر بتن می‌باشد. از این دیدگاه، استفاده از میکروسیلیس و سرباره در بتن، دارای اثر منفی بر حد مجاز یون کلر خواهد بود، زیرا حد مجاز یون کلر با کاهش pH کاهش می‌یابد [۶].

به طور کلی وقتی یونهای کلر به داخل بتن نفوذ می‌کنند، به صورتهای مختلفی در بتن باقی می‌مانند. قسمتی از یونهای کلر با C_3A پیوند شیمیایی برقرار کرده و نمک فریدل^۲ ایجاد می‌کنند. این یونهای پیوند یافته، در فرآیند خوردگی نقشی ندارند. بخش دیگری از یونهای کلر با محصولات هیدراسیون، پیوند فیزیکی برقرار می‌کنند که آنها نیز نقشی در خوردگی فولاد در بتن ندارند. بقیه یونهای کلر در محلول منافذ بتن به صورت آزاد باقی می‌مانند. این یونها عامل شروع و شدت خوردگی فولاد می‌باشند. نتایج برخی از تحقیقات نشان می‌دهد که حضور و افزایش میکروسیلیس سبب افزایش مقدار کلر آزاد در بتن می‌شود [۷ و ۸].

امروزه این مسأله به خوبی روشن شده است که نسبت Cl^-/OH^- در محیط بتن به عنوان پارامتر تعیین کننده خطر بروز خوردگی محسوب می‌شود. در کنار غلظت یونهای کلر، باید به ترکیب شیمیایی الکترولیت موجود در منافذ بتن بر خطر بروز خوردگی توجه داشت. تحقیقات نشان می‌دهد که میکروسیلیس بر ترکیب شیمیایی آب منفذی دارای اثر منفی بوده به طوریکه اتصال پذیری^۳ یونهای کلر با محصولات هیدراسیون کاهش می‌یابد [۹].

۱- هدف از این تحقیق

هدف از تحقیق حاضر، بررسی و مقایسه دوام نمونه‌های بتنی، در صورت تغییر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس، سرباره و ترکیب آنها به عنوان جایگزین سیمان، و تشخیص بهترین حالت ترکیب این مواد با سیمان در محیط بتن (درصد بهینه) به لحاظ دستیابی به حداکثر مقاومت و پایداری در برابر خوردگی فولاد بوده است. بررسی نقش تغییرات مقاومت فشاری بتن بر دوام بتن در برابر خوردگی فولاد، از دیگر اهدافی بود که در این تحقیق دنبال شد.

۲- مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارت بودند از:

- ۱- درشت دانه شکسته آهکی مطابق با دانه بندی شماره ۷ استاندارد ASTM-C33 [۱۰] با حداکثر اندازه ۱۲/۵ میلیمتر، چگالی ۲/۶۱، وزن خشک میله خورده 1450 kg/m^3 و درصد جذب آب ۰/۵۵٪. قبل از ساخت نمونه ها، درشت دانه کاملاً شسته شد تا سطح آن عاری از مواد مضر گردد. همچنین به منظور اصلاح دانه بندی، تمام درشت دانه مورد استفاده توسط الک شماره ۸ (۲/۳۶ میلیمتر) سرنده شده و دانه‌های عبوری از این الک از درشت دانه جدا و حذف شد.
- ۲- ریزدانه آهکی مطابق دانه بندی مجاز ASTM-C33، با مدول نرمی ۲/۷، چگالی ۲/۵۱ و درصد جذب آب ۰/۱٪ به منظور دستیابی به دانه بندی واقع در محدوده مجاز استاندارد ASTM-C33، ریزدانه آهکی، توسط الک‌های ۴/۷۵، ۲/۳۶ و ۱/۱۸ میلیمتر سرنده شده و در دیوهای جداگانه قرار گرفت. سپس ریزدانه‌های موجود در هر کدام از دیوها با درصدهای مشخص، طوری ترکیب شد که دانه بندی نهایی در محدوده مجاز استاندارد قرار گیرد.
- ۳- سیمان تیپ I (از نوع محصول صادراتی کارخانه سیمان اصفهان و بدون سرباره)، مطابق با استاندارد ASTM-C150 [۱۱].
- ۴- میکروسیلیس با چگالی ۲/۲ به صورت پودر (تولید شده در کارخانه فروسیلیس ایران).
- ۵- فوق روان کننده ملامین فرمالدئید سولفونات با نام تجاری MELMENT، مطابق با تیپ F استاندارد ASTM-C494 [۱۲].

۶ - سرباره با چگالی ۲/۸۴ مطابق با استاندارد ASTM-C989 [۱۳].

در این تحقیق از سرباره مورد استفاده در کارخانه سیمان اصفهان که تولید کارخانه ذوب آهن اصفهان می‌باشد استفاده شد. لازم به ذکر است که سیمانهای تیپ I تولیدی توسط این کارخانه که عموماً در داخل کشور استفاده می‌شود، معمولاً حاوی مقداری سرباره است که همراه با کلینکر آسیاب شده و مقدار درصد آن دقیقاً مشخص نیست. لذا سرباره به صورت خام مستقیماً از کارخانه تهیه شد و توسط آسیاب گلوله‌ای آسیاب شده و در مرحله ساخت بتن به صورت دقیق با درصدهای معین ۲۰، ۳۵ و ۵۰ به عنوان جایگزین سیمان به بتن افزوده شد.

۷- میلگردهای فولادی ساده نمره ۸ با طول ۱۰ سانتیمتر.

به منظور زنگ زدایی از سطح قطعات میلگرد، لایه‌ای به ضخامت تقریبی ۰/۳ میلی‌متر، توسط عملیات تراشکاری از روی آنها برداشته شد.

۸- اپوکسی. در این تحقیق از نوعی اپوکسی با نام تجاری آراکس ۵۹۲ استفاده شد. اپوکسی مزبور شامل دو قسمت A و B بود که قبل از کاربرد، دو قسمت A و B با درصدهای وزنی مشخص ترکیب شده و کاملاً مخلوط می‌شد، بطوری که ترکیبی کاملاً هموزن و یکنواخت حاصل شود.

۳ - تعداد نمونه‌ها

به ازای هر طرح اختلاط، سه نمونه جهت ارزیابی و برآورد خوردگی فولاد به روش اندازه‌گیری و بررسی پتانسیل نیم پیل، سه نمونه جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۲۸ روزه و سه نمونه جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری ۹۱ روزه تهیه شد. تمام نمونه‌ها از نوع مکعبی ۷×۷×۷ سانتیمتر بودند. به این ترتیب ۱۵۶ نمونه جهت ارزیابی خوردگی فولاد، ۳۱۲ نمونه به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری و در مجموع ۴۶۸ نمونه ساخته شد.

۴ - ساخت، عمل آوری و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای ساخت کلیه نمونه‌های بتنی از طرح اختلاط بتن بر اساس آئین نامه ACI-211 [۱۴] استفاده شد. به منظور دستیابی به مقاومت‌های بالاتر، نتایج تحقیقات سایر محققین در ساخت بتن‌های با مقاومت بالا [۱۵-۲۲] در طرح اختلاط بتن اعمال شد. در این تحقیق به طور کلی چهار دسته نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. دسته اول نمونه‌هایی بودند که در ساخت آنها فقط از میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده شده بود. نسبت‌های آب به مواد سیمانی در این دسته از نمونه‌ها عبارت بودند از: ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲۵. این نمونه‌ها به منظور بررسی تأثیر میکروسیلیس در بتن بر خوردگی فولاد تحت اثر نفوذ یون کلر ساخته شد. برای کدگذاری این دسته از نمونه‌ها، از حرف A برای نمایش بتن حاوی میکروسیلیس (و بدون سرباره) استفاده شد و در کنار آن نیز نسبت آب به مواد سیمانی نوشته شد. سپس نسبت میکروسیلیس به کار رفته در نمونه نشان داده شد. به عنوان مثال نمونه‌ای با کد 4-5. A نشاندهنده نمونه حاوی میکروسیلیس (و بدون سرباره) با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ بود که در ساخت آن ۵ درصد از سیمان توسط میکروسیلیس جایگزین شده بود. به دلیل آنکه به ازای هر طرح اختلاط سه نمونه ساخته شد شماره نمونه‌ها نیز با اعداد یونانی I و II و III روی یکی از وجوه نمونه نمایش داده شد. لازم به توضیح است که مقدار درشت دانه بکار رفته در ساخت تمام نمونه‌ها 1020 kg/m^3 بود. به منظور حذف تأثیر درشت دانه بر نفوذ یونهای کلر و در نتیجه تأثیر آن بر خوردگی آرماتورهای فولادی، مقدار درشت دانه در تمام نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد. جدول ۱ نشاندهنده طرح اختلاط این دسته از نمونه‌ها است.

دسته دوم، سوم و چهارم نمونه‌هایی بودند که در ساخت آنها به ترتیب از ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره، به عنوان جایگزین بخشی از سیمان و درصدهای مختلف میکروسیلیس استفاده شد. نسبت‌های آب به مواد سیمانی بکار رفته در مورد این سه دسته از نمونه‌های بتنی عبارت بودند از: ۰/۵، ۰/۴، ۰/۳ و ۰/۲. برای کدگذاری این دسته از نمونه‌ها به ترتیب از حروف C، B و D و برای نمایش نمونه بتنی حاوی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره استفاده شد. در کنار آن نیز نسبت آب به مواد سیمانی نمونه نوشته شد و سپس نسبت میکروسیلیس به کار رفته در نمونه نشان داده شد. جداول ۲، ۳ و ۴ به ترتیب نشاندهنده طرح اختلاط

نمونه‌های حاوی ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره به همراه درصد‌های متفاوت میکروسیلیس می‌باشد. مقدار درشت دانه بکار رفته در ساخت تمام این نمونه‌ها نیز 1020 kg/m^3 است.

نمونه‌های ساخته شده جهت اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیلی، نمونه‌های مکعبی $7 \times 7 \times 7$ سانتیمتر بودند که چهار عدد میلگرد در چهار گوشه آن تعبیه شده بود. تمامی میلگردها دارای طول یکسان ۱۰ سانتیمتر بودند و پس از قرارگیری در داخل نمونه، حدود ۳ سانتیمتر آنها خارج از نمونه بتنی واقع می‌شد. به منظور جلوگیری از تماس مستقیم قسمتهایی از میلگردهای فولادی که در خارج از بتن قرار داشتند، با آب محلول حاوی یون کلر، حدود ۲ سانتیمتر از قسمت پایین این بخش از میلگردها توسط اپوکسی پوشیده شد. همچنین به دلیل آنکه در هنگام ساخت نمونه‌های بتنی، میلگردها معمولاً با کف قالب تماس پیدا می‌کردند و بدین ترتیب امکان خوردگی میلگردها از ناحیه کف قالب در اثر مجاورت با محلول حاوی یون کلر وجود داشت، قسمت کف نمونه‌ها نیز بطور کامل توسط اپوکسی پوشیده شد تا نفوذ یونهای کلر فقط از سطوح جانبی نمونه انجام پذیرد. ضخامت پوشش بتن بر روی میلگردهای فولادی به اندازه $1/5$ سانتیمتر در نظر گرفته شد. همچنین تمام نمونه‌ها پس از ساخت به مدت ۲۴ ساعت درون قالب بوده و پس از آن به منظور عمل‌آوری، نمونه‌ها به مدت ۲۷ روز داخل آب قرار گرفتند.

در این تحقیق برای بررسی و ارزیابی خوردگی فولاد در بتن از روش اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیلی مطابق با استاندارد ASTM-C876 [۲۳] استفاده شد. شکل ۱ نشان‌دهنده شکل کلی یک نمونه ساخته شده جهت اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیلی می‌باشد. بعلاوه جهت ایجاد محیط حاوی یون کلر، از محلول هفت درصد وزنی NaCl استفاده شد. به منظور حذف اثر سایر مواد موجود در آب بر خوردگی فولاد، جهت ساختن محلول NaCl از آب مقطر استفاده شد. همچنین جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی $7 \times 7 \times 7$ سانتیمتر استفاده گردید. اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه صورت گرفت. به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری به ازای هر طرح اختلاط سه نمونه ساخته شد.

۵ - ارائه نتایج آزمایشات و تحلیل نتایج

همانگونه که در قسمت قبل ذکر گردید، به ازای هر طرح اختلاط سه نمونه جهت اندازه‌گیری پتانسیل نیم پیلی ساخته شد و در هر نمونه نیز چهار عدد میلگرد در چهار گوشه آن تعبیه گردید. پس از اندازه‌گیری پتانسیل مربوط به هر میلگرد در هر نمونه، متوسط پتانسیل‌های بدست آمده مربوط به هر نمونه محاسبه شده و به این ترتیب سه عدد برای پتانسیل مربوط به آن طرح اختلاط در زمان اندازه‌گیری پتانسیل منظور گردید. متوسط این سه عدد، پتانسیل مربوط به طرح اختلاط مزبور در نظر گرفته شد.

در شکلهای ۲ تا ۵ به ترتیب نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره (نمونه‌های نوع A، B، C و D) با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ نسبت به زمان آورده شده است.

همانطور که در این شکلها ملاحظه می‌شود، پتانسیل مربوط به نمونه شاهد (نمونه حاوی صفر درصد میکروسیلیس) در کلیه زمانها، از پتانسیل نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر است و این موضوع نشان می‌دهد که خوردگی در میلگردهای موجود در نمونه شاهد نسبت به میلگردهای موجود در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس بیشتر است. طبق نتایج حاصله از این شکلها، مدت زمان لازم برای سقوط پتانسیل به زیر عدد -350 میلی ولت که در واقع محدوده نشان‌دهنده ۹۰ درصد احتمال وقوع خوردگی میلگرد فولادی در بتن می‌باشد (استاندارد ASTM C876)، در بتن شاهد نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر است. در نتیجه مدت زمان لازم برای شروع خوردگی در بتن شاهد، نسبت به نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر است و بنابراین سرعت خوردگی در آن بیشتر است. مدت زمان لازم برای شروع خوردگی در نمونه‌های بتنی حاوی میکروسیلیس برای نمونه حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان، از سایر درصد‌های میکروسیلیس بیشتر است و در نتیجه مقاومت این نمونه در برابر خوردگی آرماتورهای فولادی نسبت به سایر درصد‌های میکروسیلیس بیشتر است. پتانسیل میلگردهای موجود در نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس تقریباً در یک زمان از مرز -350 میلی ولت عبور می‌کنند (منفی‌تر می‌شوند) و از این نظر تفاوت چندانی بین آنها وجود ندارد.

با مقایسه نمونه‌های نوع B و C با نمونه‌های مشابه ولی از نوع A (نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ و حاوی

میکروسیلیس و بدون سرباره) ملاحظه می‌شود که افزودن سرباره، بطور قابل توجهی باعث افزایش دوام نمونه‌های بتنی در برابر خوردگی فولاد شده است. لذا استفاده ترکیبی از دو پوزولان میکروسیلیس و سرباره، نسبت به حالتی که فقط از میکروسیلیس در بتن استفاده شده باشد، باعث افزایش بیشتر پایداری بتن در برابر خوردگی فولاد گردیده است. توجه شود که عملکرد نمونه‌های نوع D در مقایسه با نمونه‌های نوع A در برابر خوردگی فولاد بهتر بوده ولی از نمونه‌های نوع B و C ضعیف‌تر است.

جدول (۱) طرح اختلاط نمونه‌های حاوی میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان.

نمونه	W — CM	میکروسیلیس درصد	آب خالص kg/m ³	تصحیح آب kg/m ³	آب اختلاط kg/m ³	فوق روان کننده (پودر) درصد وزنی مواد سیمانی	سیمان kg/m ³	میکروسیلیس kg/m ³	ریز دانه kg/m ³
A.5-0	۰/۵	۰	۱۹۰	۱۲	۲۰۲	۱/۱	۳۸۰	۰	۶۹۲
A.5-5		۵					۳۶۱	۶۸۵	
A.5-10		۱۰					۳۴۲	۶۷۹	
A.5-15		۱۵					۳۲۳	۶۷۲	
A.4-0	۰/۴	۰	۱۷۲	۱۲	۱۸۴	۱/۵	۴۳۰	۰	۶۹۵
A.4-5		۵					۴۰۸	۶۸۷	
A.4-10		۱۰					۳۸۷	۶۸۰	
A.4-15		۱۵					۳۶۵	۶۷۲	
A.3-0	۰/۳	۰	۱۶۲	۱۲	۱۷۴	۱/۸	۵۴۰	۰	۶۲۹
A.3-5		۵					۵۱۳	۶۲۰	
A.3-10		۱۰					۴۸۶	۶۱۱	
A.3-15		۱۵					۴۵۹	۶۰۲	
A.25-0	۰/۲۵	۰	۱۵۰	۱۲	۱۶۲	۲/۸	۶۰۰	۰	۶۰۵
A.25-5		۵					۵۷۰	۵۹۵	
A.25-10		۱۰					۵۴۰	۵۸۵	
A.25-15		۱۵					۵۱۰	۵۷۵	

جدول (۲) طرح اختلاط نمونه های حاوی ۲۰ درصد سرباره به همراه درصد های متفاوت میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان.

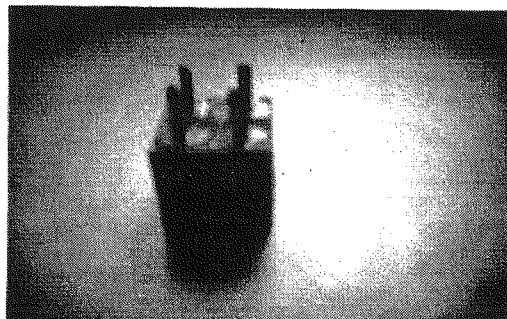
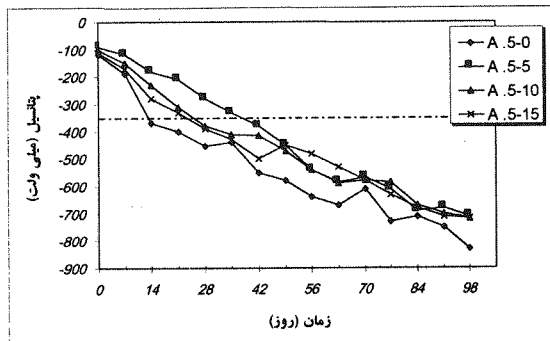
نمونه	$\frac{W}{CM}$	میکروسیلیس درصد	آب خالص kg/m^3	تصحیح آب kg/m^3	آب اختلاط kg/m^3	فوق روان کننده (پودر) درصد وزنی مواد سیمانی	سرباره kg/m^3	میکروسیلیس kg/m^3	سیمان kg/m^3	ریز دانه kg/m^3
B.5-0	۰/۵	۰	۱۹۰	۱۲	۲۰۲	۱/۱	۷۶	۰	۳۰۴	۶۸۵
B.5-5		۵								
B.5-10		۱۰								
B.5-15		۱۵								
B.4-0	۰/۴	۰	۱۷۲	۱۲	۱۸۴	۱/۵	۸۶	۰	۳۴۴	۶۸۷
B.4-5		۵								
B.4-10		۱۰								
B.4-15		۱۵								
B.3-0	۰/۳	۰	۱۶۲	۱۲	۱۷۴	۱/۸	۱۰۸	۰	۴۳۲	۶۲۰
B.3-5		۵								
B.3-10		۱۰								
B.3-15		۱۵								

جدول (۳) طرح اختلاط نمونه های حاوی ۳۵ درصد سرباره به همراه درصدهای متفاوت میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی ازسیمان.

ریز دانه kg/m ³	سیمان kg/m ³	میکروسیلیس kg/m ³	سرباره kg/m ³	فوق روان کننده (پودر) درصد وزنی مواد سیمانی	آب اختلاط kg/m ³	تصحیح آب kg/m ³	آب خالص kg/m ³	میکروسیلیس درصد	W CM	نمونه
۶۸۰	۲۴۷	۰	۱۳۳	۱/۱	۲۰۲	۱۲	۱۹۰	۰	۰/۵	C.5-0
۶۷۴	۲۲۸	۱۹						۵		C.5-5
۶۶۷	۲۰۹	۳۸						۱۰		C.5-10
۶۶۰	۱۹۰	۵۷						۱۵		C.5-15
۶۸۱	۲۷۹	۰	۱۵۰/۵	۱/۵	۱۸۴	۱۲	۱۷۲	۰	۰/۴	C.4-0
۶۷۴	۲۵۸	۲۱/۵						۵		C.4-5
۶۶۷	۲۳۶	۴۳						۱۰		C.4-10
۶۵۹	۲۱۵	۶۴/۵						۱۵		C.4-15
۶۱۳	۳۵۱	۰	۱۸۹	۱/۸	۱۷۴	۱۲	۱۶۲	۰	۰/۳	C.3-0
۶۰۴	۳۲۴	۲۷						۵		C.3-5
۵۹۴	۲۹۷	۵۴						۱۰		C.3-10
۵۸۵	۲۷۰	۸۱						۱۵		C.3-15

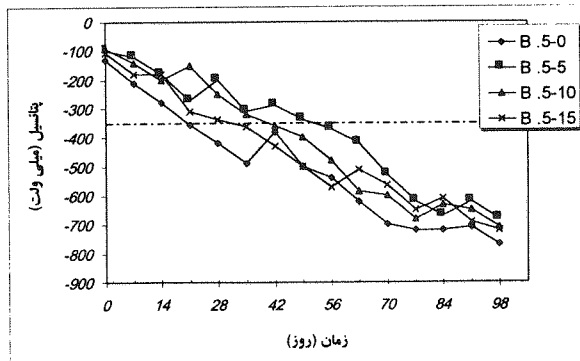
جدول (۴) طرح اختلاط نمونه های حاوی ۵۰ درصد سرباره به همراه درصد های متفاوت میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان.

نمونه	$\frac{W}{CM}$	میکروسیلیس درصد	آب خالص kg/m^3	تصحیح آب kg/m^3	آب اختلاط kg/m^3	فوق روان کننده (پودر) درصد وزنی مواد سیمانی	سرباره kg/m^3	میکروسیلیس kg/m^3	سیمان kg/m^3	ریز دانه kg/m^3
D.5-0	۰/۵	۰	۱۹۰	۱۲	۲۰۲	۱/۱	۱۹۰	۰	۱۹۰	۶۷۵
D.5-5		۵						۶۶۹	۱۷۱	۱۹
D.5-10		۱۰						۶۶۲	۱۵۲	۳۸
D.5-15		۱۵						۶۵۶	۱۳۳	۵۷
D.4-0	۰/۴	۰	۱۷۲	۱۲	۱۸۴	۱/۵	۲۱۵	۰	۲۱۵	۶۷۶
D.4-5		۵						۶۶۸	۱۹۳	۲۱/۵
D.4-10		۱۰						۶۶۱	۱۷۲	۴۳
D.4-15		۱۵						۶۵۴	۱۵۰	۶۴/۵
D.3-0	۰/۳	۰	۱۶۲	۱۲	۱۷۴	۱/۸	۲۷۰	۰	۲۷۰	۶۰۶
D.3-5		۵						۵۹۷	۲۴۳	۲۷
D.3-10		۱۰						۵۸۷	۲۱۶	۵۴
D.3-15		۱۵						۵۷۸	۱۸۹	۸۱



شکل (۲) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی صفر درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ نسبت به زمان.

شکل (۱) شکل کلی یک نمونه مورد استفاده جهت اندازه‌گیری پتانسیل نیم پلی.

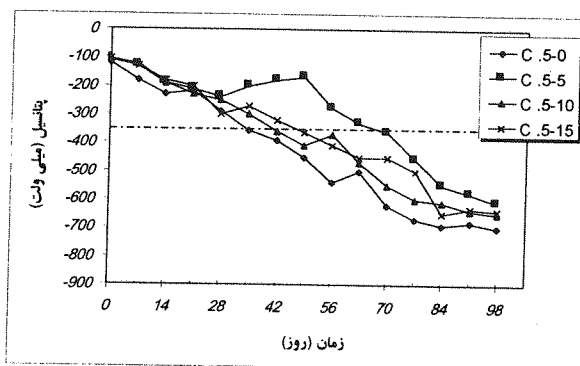


شکل (۳) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۲۰ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ نسبت به زمان.

در شکل‌های ۶ تا ۹ به ترتیب نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای داخل نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره و با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ آورده شده است. در این شکل‌ها نیز در کلیه زمانها پتانسیل میلگردهای داخل نمونه شاهد، از پتانسیل میلگردهای واقع در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کمتر است و این موضوع نشان‌دهنده عملکرد بهتر بتن‌های حاوی میکروسیلیس در برابر خوردگی فولاد می‌باشد.

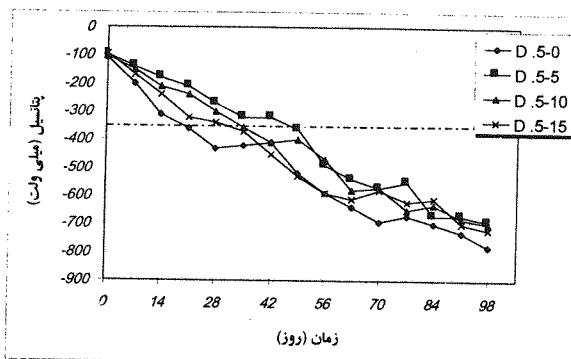
مقایسه شکل‌های ۶ تا ۹ همچنین نشان می‌دهد که به ازای انواع درصد‌های سرباره مورد استفاده، مدت زمان لازم جهت افت پتانسیل به زیر عدد ۳۵۰ میلی‌ولت در نمونه شاهد از همه نمونه‌ها کمتر و در بتن حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس از همه بیشتر است. بنابراین در این نسبت آب به مواد سیمانی، جایگزینی ۱۰ درصد میکروسیلیس به جای سیمان، بهترین عملکرد را در ارتباط با مقاومت در برابر خوردگی فولاد از خود نشان داده است. همین مدت زمان در مورد نمونه‌های بتنی حاوی ۵ و ۱۵ درصد میکروسیلیس به عنوان جایگزین سیمان از بتن حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس کمتر، ولی همچنان از بتن شاهد بیشتر است. همانطور که از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار میکروسیلیس از ۱۰ به ۱۵ درصد به عنوان جایگزین سیمان، نه تنها مقاومت نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد افزایش نمی‌یابد، بلکه مقاومت این نمونه نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس کاهش می‌یابد. لذا افزایش درصد میکروسیلیس مصرفی، لزوماً افزایش مقاومت بتن در برابر

خوردگی فولاد را به همراه نخواهد داشت. بنابراین برای میکروسلیس جایگزین سیمان در بتن، مقدار بهینه ای جهت حصول بیشترین مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد وجود دارد.



شکل (۴) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۳۵ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ نسبت به زمان.

با مقایسه نمونه‌های ساخته شده با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴، با نمونه‌های مشابه ولی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ ملاحظه می‌شود که کاهش این نسبت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر خوردگی فولاد دارد. در واقع کاهش نسبت آب به مواد سیمانی باعث کاهش نفوذپذیری بتن می‌گردد که در این صورت آب و اکسیژن کمتری نیز در کاند به منظور انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی وجود خواهد داشت و در نتیجه سرعت خوردگی فولاد کاهش می‌یابد. کاهش نفوذپذیری بتن منجر به افزایش مقاومت آن در برابر نفوذ عوامل مهاجم همچون یونهای کلر، یونهای سولفات و نیز دی اکسید کربن خواهد شد. در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نیز با افزودن سرباره به بتن، دوام بتن در برابر خوردگی فولاد افزایش می‌یابد.

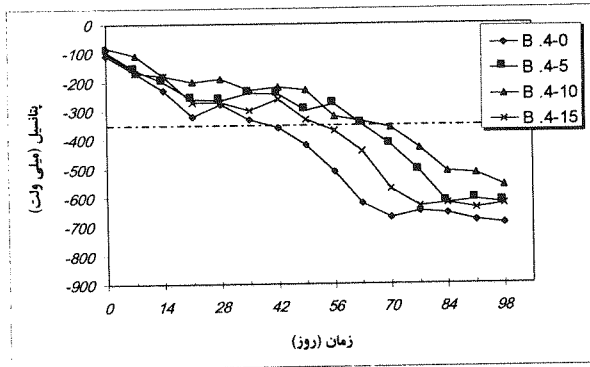


شکل (۵) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۵۰ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ نسبت به زمان.

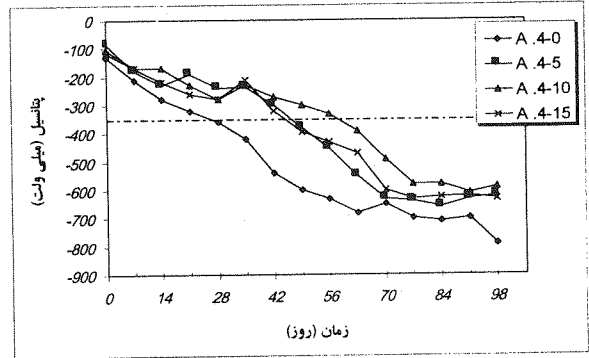
باید توجه داشت که اگرچه با ورود سرباره به بتن، هیدروکسید کلسیم تبدیل به C-H-S می‌شود [۲۴] و به این ترتیب قلیائیت محیط بتنی کاهش یافته و در نتیجه ظاهراً خطر بروز خوردگی افزایش می‌یابد، ولی در مقابل همانطور که قبلاً اشاره شد، سرباره باعث بهبود ساختار بتن در جهت مقاوم نمودن آن در برابر نفوذ عوامل مهاجم می‌گردد. و از آنجا که اندرکنش دو عامل کاهش خاصیت قلیایی محیط بتنی و کاهش نفوذپذیری بتن در بروز خوردگی فولاد نقش دارند، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برآیند اندرکنش تأثیر این دو عامل به سمت افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد می‌باشد. همچنین با توجه به خاصیت پوزولانی میکروسلیس و تبدیل هیدروکسید کلسیم به C-S-H توسط میکروسلیس [۹ و ۲۵-۲۶]، در صورت مقایسه نمونه‌های حاوی صفر درصد میکروسلیس با نمونه‌های حاوی این ماده، استنتاج مشابه با آنچه که در مورد سرباره به آن اشاره شد حاصل می‌گردد. بدین ترتیب که در هر نسبت آب به مواد سیمانی، افزودن میکروسلیس باعث افزایش مقاومت

نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد در مقایسه با نمونه‌های فاقد میکروسیلیس گردیده است.

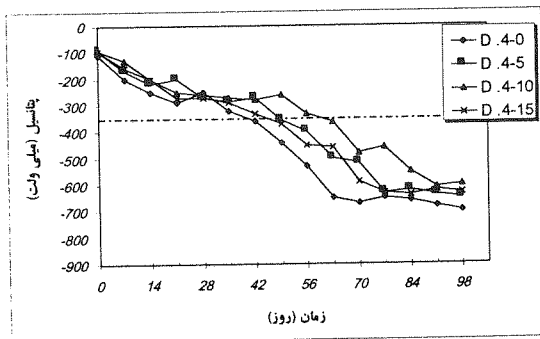
در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ به ترتیب نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای داخل نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره و مقادیر مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ آورده شده است. طبق نتایج حاصله، در این نسبت آب به مواد سیمانی با افزایش درصد میکروسیلیس، اختلاف پتانسیل بتن شاهد و نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نیز افزایش می‌یابد و فاصله نمودارهای پتانسیل - زمان از یکدیگر بیشتر می‌شود. لذا با افزایش درصد میکروسیلیس، عملکرد نمونه بتنی نیز در ارتباط با خوردگی فولاد بهبود یافته است.



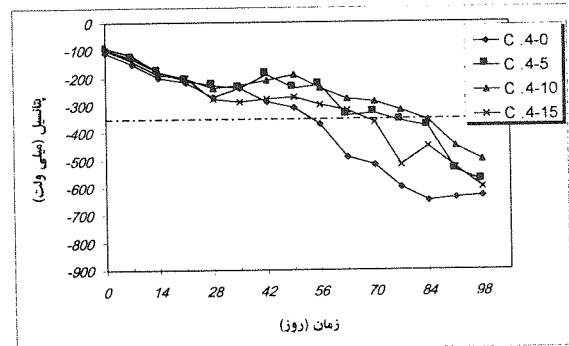
شکل (۷) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۲۰ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نسبت به زمان.



شکل (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی صفر درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نسبت به زمان.



شکل (۹) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۵۰ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نسبت به زمان.



شکل (۸) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۳۵ درصد سرباره با درصد‌های مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ نسبت به زمان.

بنابراین در نمونه‌های با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳، به موازات افزایش درصد میکروسیلیس در نمونه بتنی، عملکرد و دوام آنها نیز در برابر خوردگی فولاد افزایش یافته است؛ مدت زمان لازم برای شروع خوردگی میلگردهای درون نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس از همه نمونه‌ها بیشتر بوده و پس از آن نیز به ترتیب نمونه‌های حاوی ۱۰، ۵ و صفر درصد میکروسیلیس قرار دارند. پس در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳، افزودن تا ۱۵ درصد میکروسیلیس نیز باعث بهبود مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد شده است و از این حیث نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.

در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۵ و ۰/۴ به ترتیب افزایش مقدار میکروسیلیس از ۵ و ۱۰ درصد به عنوان جایگزین سیمان، منجر به کاهش مقاومت نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد شده است؛ در حالیکه در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳

افزایش درصد میکروسیلیس، حتی تا ۱۵ درصد نیز باعث افزایش مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد گشته است. از اینرو، با تغییر نسبت آب به مواد سیمانی مقدار بهینه مصرف میکروسیلیس در ارتباط با افزایش مقاومت نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد تغییر می کند.

با دقت در شکل های ۲ تا ۱۳ ملاحظه می شود که با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، افزودن میکروسیلیس به ترکیب بتن تأثیر بیشتری بر افزایش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد دارد. این نکته از اختلاف پتانسیل بیشتر نمونه های حاوی میکروسیلیس با نمونه حاوی صفر درصد میکروسیلیس در نسبت های آب به مواد سیمانی پایین تر، برداشت می شود. لذا در موارد اجرایی توصیه می شود به منظور بهره گیری مؤثرتر از خواص پوزولان های میکروسیلیس و سرباره در ارتباط با افزایش پایایی بتن در برابر خوردگی فولاد، حتی المقدور نسبت آب به مواد سیمانی کاهش یابد. ذکر این نکته ضروری است که صرف کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تضمین کننده افزایش دوام بتن نمی باشد و در کنار آن باید نسبت به خوب متراکم کردن بتن نیز توجه کافی مبذول داشت. در این تحقیق به منظور دستیابی به تراکم بالا در ساخت نمونه ها از فوق روان کننده استفاده شد. بخصوص از آن جهت که با اضافه شدن میکروسیلیس، کارایی بتن تا حدود زیادی کاسته می شود.

با دقت در شکل ۱۲ مشاهده می شود فاصله بین نمودار مربوط به نمونه بتنی حاوی صفر درصد میکروسیلیس (که در واقع حاوی ۳۵ درصد سرباره به عنوان جایگزین بخشی از سیمان است) و نمودارهای مربوط به نمونه بتنی حاوی میکروسیلیس در مقایسه با نسبت های جایگزینی ۰ و ۲۰ درصد سرباره کمتر شده است و این موضوع نشان می دهد که وجود سرباره در ترکیب بتن و افزایش آن تا ۳۵ درصد به عنوان جایگزین سیمان باعث عملکرد بهتر بتن در برابر خوردگی فولاد در مقایسه با درصد های کمتر جایگزینی سرباره می شود. به عبارت دیگر، در این دسته از نمونه ها، نمونه بتنی حاوی صفر درصد میکروسیلیس نیز مقاومت خوبی در برابر خوردگی فولاد از خود نشان می دهد و دلیل این امر وجود سرباره در ترکیب بتن می باشد.

با مقایسه این دسته از نمونه ها با نمونه های مشابه نوع B، ملاحظه می شود که افزایش سرباره از ۲۰ به ۳۵ درصد باعث بهبود مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد شده است. این نکته بخصوص از نقطه نظر اقتصادی حائز اهمیت می باشد. چرا که سرباره به لحاظ آنکه جزء مواد زاید صنعت فولاد محسوب می شود و استحصال آن تقریباً هیچ هزینه ای در بر ندارد (مگر هزینه آسیاب کردن) و از قیمت چندانی برخوردار نبوده و به مراتب از سیمان ارزانتر است. لذا جایگزینی مقادیر بیشتر سرباره به جای سیمان مصرفی در بتن، علاوه بر آنکه منجر به صرفه جویی در هزینه های احداث سازه های بتنی می گردد، می تواند اثرات مفیدی همچون افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد و نیز افزایش مقاومت در برابر حمله سولفات ها را به همراه داشته باشد. در کشور ما نیز که خوردگی فولاد در بتن، بویژه در برخی از مناطق آب و هوایی همچون حاشیه خلیج فارس به عنوان یک معضل جدی مطرح می باشد، بهتر است استفاده از سرباره در ساخت بتن بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. به علاوه استفاده از سرباره می تواند باعث کاهش دمای هیدراسیون، افزایش مقاومت فشاری و کاهش مصرف فوق روان کننده در ساخت بتن گردد [۲۷] که در کنار سایر اثرات مفید استفاده از سرباره، از این مزیتها نیز در جای خود می توان بهره جست.

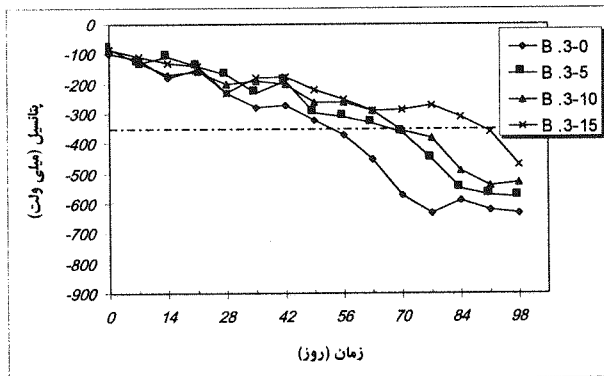
لازم به ذکر است که تقریباً در تمام شکلها، در نمونه های با میکروسیلیس یا بدون میکروسیلیس، استفاده از ۵۰ درصد سرباره به عنوان جایگزین سیمان نسبت به مقادیر کمتر سرباره مصرفی، باعث کاهش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد شده است و مدت زمان لازم جهت وقوع خوردگی نسبت به بتن حاوی ۳۵ درصد سرباره، و حتی در بسیاری از موارد نسبت به بتن حاوی ۲۰ درصد سرباره کمتر شده است. ولی همچنان وجود سرباره در ترکیب بتن باعث افزایش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد در مقایسه با بتن فاقد سرباره شده است.

در شکل ۱۴ نتایج حاصل از اندازه گیری پتانسیل میلگردهای داخل نمونه های بتنی نوع A با درصدهای متفاوت میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ثابت ۰/۲۵ آورده شده است. در این نسبت آب به مواد سیمانی نیز با افزایش درصد میکروسیلیس جایگزین در نمونه بتنی، عملکرد و دوام آن نمونه در برابر خوردگی فولاد افزایش می یابد. بطوریکه تقریباً در اکثر زمانهای اندازه گیری پتانسیل، این عدد برای نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس از سایر نمونه ها بیشتر بوده است که دلالت بر عملکرد بهتر آن در زمینه خوردگی فولاد نسبت به سایر نمونه ها دارد.

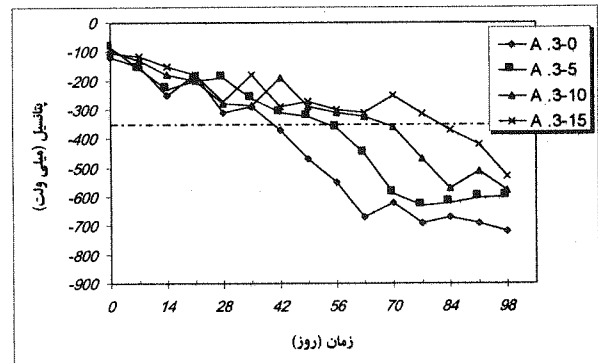
۶- مقایسه مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی فولاد در نمونه های بتنی

به طور کلی فرایند خوردگی فولاد شامل دو مرحله می باشد: مرحله شروع خوردگی^۴ (t_0) و مرحله گسترش خوردگی^۵ (t_1). این مراحل در شکل ۱۵ نشان داده شده است. زمان شروع خوردگی (t_0) مدت زمان نفوذ عامل مهاجم به داخل بتن و رسیدن آن به سطح آرماتورهای فولادی و فعال نمودن سطح آرماتورهای فولادی جهت فرایند خوردگی می باشد. مدت زمان گسترش خوردگی (t_1) نشانگر مدت زمانی است که خوردگی فولاد در بتن به حد غیر قابل قبول نرسیده باشد. به عبارتی پس از این مدت زمان، عملاً عمر بهره برداری و مفید سازه بتنی به اتمام خواهد رسید [۶].

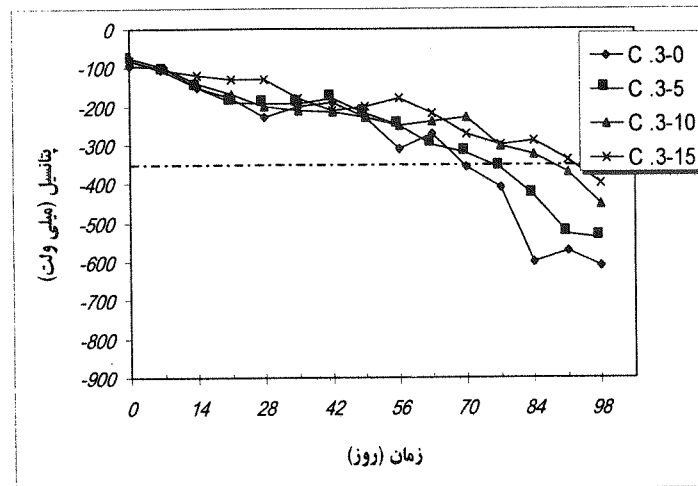
همانطور که قبلاً ذکر شد، پس از وقوع خوردگی فولاد در بتن، لایه های از زنگ آهن بر روی فولاد شکل می گیرد که این مسئله منجر به کاهش سطح مقطع فولادها شده و نیز به واسطه افزایش حجمی که در این لایه زنگ آهن رخ می دهد، ترکهایی در بتن و در طول آرماتورها بوجود خواهد آمد. با شروع وقوع خوردگی فولاد، قبل از آنکه کاهش قابل توجهی در مقاومت سازه ای ایجاد شود، ترکهایی در بتن ظاهر شده و بتن ورقه ورقه می شود.



شکل (۱۱) نتایج حاصل از اندازه گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه های بتنی حاوی ۲۰ درصد سرباره با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ نسبت به زمان.



شکل (۱۰) نتایج حاصل از اندازه گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه های بتنی حاوی صفر درصد سرباره با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ نسبت به زمان.



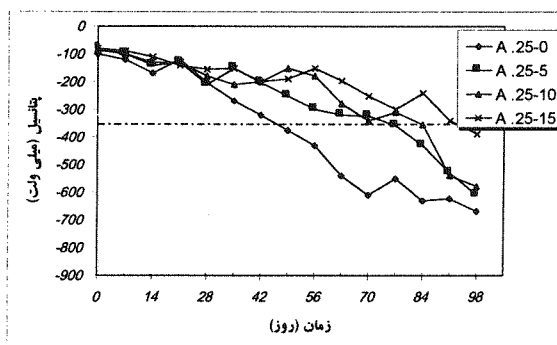
شکل (۱۲) نتایج حاصل از اندازه گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه های بتنی حاوی ۳۵ درصد سرباره با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ نسبت به زمان.

در اثر ترک خوردگی، سرعت خوردگی آرماتورهای فولادی به شدت افزایش می یابد. گزارشهایی مبنی بر افزایش سرعت خوردگی به میزان ۲۰ برابر در بتن ترک خورده نسبت به بتن سالم و بدون ترک ارائه شده است. متعاقب آن و با کاهش سطح

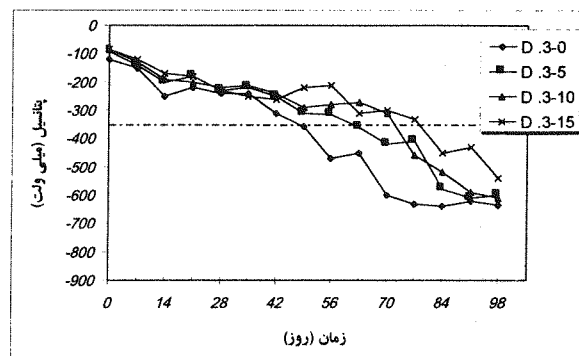
مقطع آرماتورهای فولادی و مقاومت اعضای سازه، عمر بهره‌برداری سازه به مقدار قابل توجهی نسبت به عمر مفیدی که سازه برای آن طراحی شده است، کاهش می‌یابد [۶].

مدت زمان شروع خوردگی تابعی از نفوذ یونهای کلر، آب و اکسیژن می‌باشد. مدت زمان گسترش خوردگی به مجموعه عوامل متعدد و اندرکنش پیچیده آنها بستگی دارد. برخی از این عوامل عبارتند از: کیفیت و عمق پوشش بتن، قطر و فاصله آرماتورها، نفوذ و حضور اکسیژن، دما، مقاومت الکتریکی بتن، رطوبت و مقاومت کششی بتن [۸].

در این تحقیق، زمان لازم جهت شروع خوردگی به عنوان شاخص (معیار) دوام نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد در نظر گرفته شد. باید توجه داشت که ترک خوردگی و ورقه شدن بتن در مدت زمان کوتاهی بعد از شروع خوردگی رخ می‌دهد. همانطور که عنوان شد، پس از وقوع ترک خوردگی، سرعت خوردگی آرماتورهای فولادی به شدت افزایش می‌یابد و کاهش سطح مقطع آرماتورها با شتاب بیشتری انجام شده و در پی آن سازه بتنی با سرعت بیشتری به پایان عمر بهره‌برداری خود نزدیک می‌شود. با این توضیح می‌توان گفت مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی (که ترک خوردن و ورقه شدن بتن و تسریع خوردگی آرماتورهای فولادی و در نهایت کاهش عمر مفید سازه را به همراه دارد)، ملاک مناسبی جهت تعیین دوام نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد می‌باشد.



شکل (۱۴) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی صفر درصد سرباره با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۵ نسبت به زمان.



شکل (۱۳) نتایج حاصل از اندازه‌گیری پتانسیل میلگردهای درون نمونه‌های بتنی حاوی ۵۰ درصد سرباره با درصدهای مختلف میکروسیلیس و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳ نسبت به زمان.

در این تحقیق مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی در نمونه‌های مختلف با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت تا برتری یا ضعف طرح اختلاط‌های مختلف به لحاظ مقاومت در برابر خوردگی فولاد مقایسه شده و بهترین طرح اختلاط در هر نسبت آب به مواد سیمانی و با تغییرات مقادیر سرباره و میکروسیلیس مشخص شود. این مقایسه در مورد نمونه‌های ساخته شده با نسبت‌های آب به مواد سیمانی مختلف نیز انجام شد تا نقش نسبت آب به مواد سیمانی در پایایی بتن در برابر خوردگی فولاد و تأثیر آن بر مقادیر بهینه سرباره و میکروسیلیس مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است نقطه (t_0) یا مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی متناظر با نقطه‌ای است که نمودار پتانسیل - زمان مربوط به طرح اختلاط مورد نظر، خط ۳۵۰- میلی ولت را قطع می‌کند.

به منظور تلخیص نتایج، سعی شد تا مقایسه مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی فولاد در نمونه‌های مختلف در قالب روابطی گنجانده شود. بنابر این لازم است تابعی که بیانگر مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی فولاد در دو نمونه بتنی مختلف باشد، بر حسب متغیرهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد میکروسیلیس و درصد سرباره در هر یک از دو نمونه مورد مقایسه آورده شود. لذا شش متغیر مستقل و یک تابع (متغیر وابسته) در این رابطه وجود خواهد داشت. با استفاده از درون‌یابی لگاریتمی، رابطه (۱) جهت مقایسه مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی در دو نمونه مختلف حاصل شد. این رابطه بر اساس ۱۱۲۸ مقایسه انجام شده یا به عبارتی ۱۱۲۸ دسته اطلاعات آزمایشگاهی، استخراج شده است. هر دسته مقایسه انجام شده شامل ۶ متغیر مستقل و یک متغیر وابسته می‌باشد.

$$\frac{(b)_1}{(b)_2} = 1.346$$

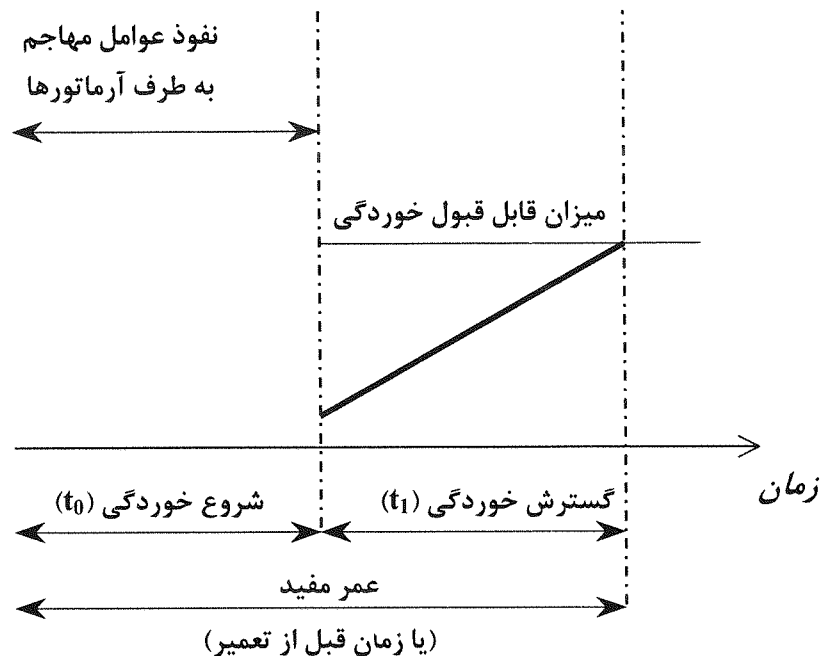
$$\left[\frac{\left(\frac{SF}{CM}\right)^{0.056} \left(\frac{Slag}{CM}\right)^{0.022} \left(\frac{W}{CM}\right)^{1.622}}{\left(\frac{SF}{CM}\right)^{0.078} \left(\frac{Slag}{CM}\right)^{0.045} \left(\frac{W}{CM}\right)^{1.109}} \right]^{-1}$$

$$R^2 = 0.68$$
(۱)

در رابطه (۱)، اندیس‌های ۱ و ۲ مربوط به نمونه اول و نمونه دوم (دو نمونه مورد مقایسه) می‌باشند. سایر پارامترها در این رابطه عبارتند از: $\frac{W}{CM}$ = نسبت آب به مواد سیمانی، $\frac{SF}{CM}$ = نسبت میکروسیلیس به کل مواد سیمانی، $\frac{Slag}{CM}$ = نسبت سرباره به کل مواد سیمانی، = مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی فولاد و $\frac{(t_0)_1}{(t_0)_2}$ مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی فولاد در نمونه اول در مقایسه با نمونه دوم. در این رابطه همچنین R^2 ضریب تعیین می‌باشد که هر چه به عدد یک نزدیک تر باشد، دقت درون یابی انجام شده، بیشتر خواهد بود. از رابطه فوق می‌توان جهت یک مقایسه اولیه و تخمینی در ارتباط با عملکرد یک نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد با نمونه بتنی دیگر، در صورت تغییر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد سرباره و درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان استفاده کرد. در صورت حذف اثر سرباره از مشاهدات رابطه (۲) حاصل خواهد شد. این رابطه بر اساس ۶۶ مقایسه انجام شده که در واقع شامل ۶۶ دسته اطلاعات آزمایشگاهی می‌باشد بدست آمده است.

$$\frac{(t_0)_1}{(t_0)_2} = 1.321 \left[\frac{\left(\frac{SF}{CM}\right)_1^{0.050} \left(1 + \left(\frac{W}{CM}\right)_2\right)^{4.360}}{\left(\frac{SF}{CM}\right)_2^{0.068} \left(1 + \left(\frac{W}{CM}\right)_1\right)^{3.403}} \right]^{-1}$$

$$\& R^2 = 0.78$$
(۲)



شکل (۱۵) مراحل پیشرفت خوردگی فولاد در بتن [۶].

رابطه (۲) با توجه به نتایج بدست آمده از نمونه‌های فقط حاوی میکروسیلیس، حاصل شده است و لذا چنانچه در ساخت بتن از سرپاره استفاده نشده باشد، در صورت تغییر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی و درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان در دو نمونه مختلف، می‌توان عملکرد این دو نمونه را در برابر خوردگی فولاد توسط رابطه (۲) با یکدیگر مورد مقایسه قرار داد.

همچنین در صورت حذف اثر میکروسیلیس از مشاهدات، رابطه (۳) حاصل می‌شود. این رابطه بر اساس ۶۶ مقایسه انجام شده که در واقع شامل ۶۶ دسته اطلاعات آزمایشگاهی می‌باشد بدست آمده است.

توجه شود که رابطه (۳) بر اساس نتایج مربوط به نمونه‌های فقط حاوی سرپاره حاصل شده است لذا در مواردی که تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی و درصد سرپاره جایگزین سیمان مطرح بوده و میکروسیلیس در بتن وجود نداشته باشد، می‌توان جهت برآورد و مقایسه تخمینی عملکرد دو نمونه مختلف بتنی در برابر خوردگی فولاد، از رابطه (۳) استفاده کرد.

باید توجه داشت که محدودیت‌های زیر بر روابط (۱)، (۲) و (۳) مترتب می‌باشد:

$$\frac{(t_0)_1}{(t_0)_2} = 0.976 \left[\frac{\left(\frac{Slag}{CM}\right)_1^{0.022} \left(1 + \left(\frac{W}{CM}\right)_2\right)^{5.099}}{\left(\frac{Slag}{CM}\right)_2^{0.033} \left(1 + \left(\frac{W}{CM}\right)_1\right)^{3.166}} \right] - 1 \quad (3)$$

& $R^2 = 0.72$

$$0 \leq \frac{SF}{CM} \leq 0.15, \quad 0 \leq \frac{Slag}{CM} \leq 0.5, \quad 0.3 \leq \frac{W}{CM} \leq 0.5$$

لازم به توضیح است که در مرحله درون یابی، جهت حصول روابط (۱)، (۲) و (۳)، در صورتیکه یکی از پارامترهای — یا — صفر می‌بود، با توجه به آنکه از شیوه درون یابی لگاریتمی استفاده می‌شد، اعداد صفر توسط عدد ۰/۰۰۰۱ جایگزین شدند. لذا در هنگام استفاده از روابط فوق چنانچه درصد سرپاره یا میکروسیلیس جایگزین سیمان در نمونه‌ها صفر باشد، لازم است به جای عدد صفر عدد ۰/۰۰۰۱ جایگزین شود.

۷- بررسی نقش تغییرات مقاومت فشاری بتن بر مقاومت آن در برابر خوردگی فولاد

با توجه به اینکه مقاومت فشاری یکی از مهمترین مشخصه‌های مکانیکی بتن می‌باشد که بعضاً سایر مشخصات بتن نظیر مدول الاستیسیته، مدول گسیختگی، مقاومت کششی و... بر پایه آن برآورد می‌گردند در تحقیق حاضر اثر افزایش یا کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف با نسبت‌های آب به مواد سیمانی و درصد سرپاره و میکروسیلیس متفاوت، بر مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد مورد بررسی قرار گرفت. برای اینکار مدت زمان لازم جهت شروع خوردگی هر دو نمونه مشخص با یکدیگر مقایسه شده و همزمان مقاومت فشاری همان دو نمونه مقایسه گردید (در این مقاله به جهت اختصار از ذکر نتایج مقاومت فشاری خودداری شده است). چنانچه با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت نمونه بتنی نیز در برابر خوردگی فولاد افزایش یابد و یا با کاهش مقاومت فشاری، مقاومت نمونه بتنی نیز در برابر خوردگی فولاد کاهش یابد، این موضوع بیانگر آن است که ارتباط مستقیمی بین مقاومت فشاری و مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد وجود دارد و در غیر اینصورت ارتباط مستقیمی بین مقاومت فشاری و مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد وجود نخواهد داشت. بر این اساس ۱۱۲۸ مورد مقایسه بین نمونه‌های مختلف انجام شد که در ۹۶۴ مورد مقایسه انجام شده ارتباط مستقیمی بین

مقاومت فشاری و مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد مشاهده شد و در ۱۶۴ مورد مقایسه انجام شده ارتباط مستقیمی بین مقاومت فشاری و مقاومت نمونه در برابر خوردگی فولاد ملاحظه نگردید.

با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می‌شود اگرچه همواره رابطه مستقیمی بین مقاومت فشاری و پایداری در برابر خوردگی فولاد وجود ندارد، با این وجود در ۸۵٪ از مقایسه‌های صورت گرفته، افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی فولاد شده و یا کاهش مقاومت فشاری منجر به کاهش مقاومت در برابر خوردگی فولاد گشته است. بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق در بسیاری از موارد مقایسه، ارتباط مستقیمی بین مقاومت فشاری و دوام در برابر خوردگی فولاد وجود دارد. لذا آزمایش‌های مقاومت فشاری می‌توانند جهت مقایسه نمونه‌های مختلف به لحاظ پایداری و دوام آنها در برابر خوردگی فولاد، برآورد و تخمین‌های اولیه را بدست دهند هر چند که برای تأیید قطعی نتیجه مقایسه انجام آزمایش‌های مکمل نیز لازم است. نتایج بدست آمده از تحقیقات بعضی از محققین دلالت بر آن دارد که جهت بالا بردن دوام بتن و کاهش ضریب نفوذپذیری، آزمایش‌های ساده مقاومت فشاری ۲۸ روزه می‌توانند جهت برآورد و تخمین‌های اولیه مورد استفاده گیرند [۲۸]. با این وجود، تحقیق دیگری که بر روی نمونه‌های بتنی با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و حاوی میکروسلیس و خاکستر بادی در قالب ۸ طرح اختلاط انجام شد، ارتباط مستقیمی بین دوام و مقاومت بتن در برابر نفوذ یونهای کلر و مقاومت فشاری را نشان نداد [۲۹].

۸- نتیجه گیری

۱- برای میکروسلیس و سرباره جایگزین سیمان در بتن مقدار بهینه‌ای جهت حصول بیشترین مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد وجود دارد. بنابراین در موارد اجرایی چنانچه مسأله دوام بتن در برابر خوردگی فولاد مطرح باشد لازم است نسبت به استفاده مقدار بهینه میکروسلیس و سرباره مصرفی در بتن توجه داشت.

۲- در نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، مقاومت نمونه حاوی ۵ درصد میکروسلیس در برابر خوردگی آرماتورهای فولادی نسبت به سایر درصدهای جایگزینی میکروسلیس بیشتر است.

۳- در نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴، جایگزینی ۱۰ درصد میکروسلیس به جای سیمان بهترین عملکرد را در ارتباط با مقاومت در برابر خوردگی فولاد از خود نشان داده است.

۴- در نمونه‌های بتنی حاوی ۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ درصد سرباره و با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳، افزودن تا ۱۵ درصد میکروسلیس به عنوان جایگزین سیمان نیز باعث بهبود مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد می‌شود و از این نظر نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسلیس بهترین عملکرد را از خود نشان داده است.

۵- با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، افزودن میکروسلیس و یا سرباره تأثیر بیشتری بر افزایش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد دارد. لذا در موارد اجرایی توصیه می‌شود به منظور بهره‌گیری مؤثرتر از خواص پوزولانهای میکروسلیس و سرباره در ارتباط با افزایش پایداری بتن در برابر خوردگی فولاد، حتی المقدور نسبت آب به مواد سیمانی کاهش یابد.

۶- کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، تأثیر اساسی و قابل ملاحظه‌ای بر افزایش مقاومت نمونه‌های بتنی در برابر خوردگی فولاد دارد.

۷- با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، درصدهای جایگزینی بیشتر میکروسلیس، تأثیر بیشتری بر افزایش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد از خود بروز می‌دهند. به بیان دیگر، مقدار بهینه میکروسلیس جایگزین سیمان در رابطه با افزایش مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد تغییر کرده، بطوریکه با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی درصد بهینه میکروسلیس مصرفی در بتن افزایش می‌یابد.

۸- استفاده از سرباره به میزان ۲۰ درصد به عنوان جایگزین سیمان، باعث بهبود دوام بتن در برابر خوردگی فولاد، در مقایسه با نمونه‌های مشابه ولی فاقد سرباره گردیده است. این امر در مورد نمونه‌های با یا بدون میکروسلیس صادق

است.

۹ - استفاده از سرباره به میزان ۳۵ درصد به عنوان جایگزین سیمان باعث بهبود دوام بتن در برابر خوردگی فولاد، در مقایسه با نمونه‌های مشابه ولی فاقد سرباره و نیز نمونه‌های مشابه و حاوی ۲۰ درصد سرباره شده است و این امر در مورد نمونه‌های با یا بدون میکروسیلیس صادق است. این نکته از نظر اقتصادی نیز حائز اهمیت می‌باشد. زیرا سرباره در مقایسه با سیمان ارزانتر است. بنابراین جایگزینی مقادیر بیشتر سرباره به جای سیمان مصرفی در بتن، می‌تواند منجر به صرفه جویی در هزینه‌های احداث سازه‌های بتنی گردد.

۱۰ - در صورت استفاده از سرباره به میزان ۵۰ درصد جایگزین سیمان، دوام نمونه‌های بتنی در برابر خوردگی فولاد، نسبت به نمونه‌های مشابه و حاوی ۳۵ درصد سرباره و حتی در بسیاری از موارد نسبت به نمونه‌های مشابه و حاوی ۲۰ درصد سرباره کاهش می‌یابد. اما نمونه‌های حاوی ۵۰ درصد سرباره همچنان عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های حاوی صفر درصد سرباره در برابر خوردگی فولاد از خود نشان می‌دهند. نتایج فوق در مورد نمونه‌های با یا بدون میکروسیلیس صادق است.

۱۱ - نمونه‌های حاوی ۳۵ درصد سرباره در هر یک از نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۵، ۰/۴ و ۰/۳ بهترین عملکرد را در افزایش دوام بتن در برابر خوردگی فولاد از خود نشان می‌دهند و این امر در مورد نمونه‌های با یا بدون میکروسیلیس صادق است.

۱۲ - از رابطه (۱) می‌توان جهت یک مقایسه اولیه و تخمینی در ارتباط با عملکرد یک نمونه بتنی در برابر خوردگی فولاد در مقایسه با نمونه بتنی دیگر در صورت تغییر پارامترهای نسبت آب به مواد سیمانی، درصد سرباره و درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان استفاده کرد. در صورت عدم وجود سرباره یا میکروسیلیس در ترکیب بتن می‌توان جهت مقایسه فوق‌الذکر به ترتیب از روابط (۲) و (۳) استفاده نمود.

۱۳ - بر اساس نتایج بدست آمده در این تحقیق، اگرچه همواره رابطه مستقیمی بین مقاومت فشاری و دوام در برابر خوردگی فولاد وجود ندارد، اما در تعداد زیادی از نمونه‌ها، افزایش مقاومت فشاری باعث افزایش مقاومت در برابر خوردگی فولاد شده و یا کاهش مقاومت فشاری منجر به کاهش مقاومت بتن در برابر خوردگی فولاد گشته است. بنابراین آزمایش‌های مقاومت فشاری می‌توانند جهت مقایسه نمونه‌های مختلف به لحاظ پایایی آنها در برابر خوردگی فولاد، برآورد و تخمین‌های اولیه را بدست دهند. اما به هر حال برای قضاوت نهایی انجام آزمایش‌های تکمیلی ضروری است.

۱- واژه نامه

1- Passive Film
2- Friedel
3- Binding

4- Initiation Period
5- Propagation Period
6- Coefficient of determination

مراجع

- [1] ACI Committee 222, "Corrosion of Metals in Concrete", (ACI 222 R-85), *ACI Materials Journal*, V. 81, No. 1, pp. 3-38, 1985.
- [2] Kurtis, K. E., and Mehta, K., "A Critical Review of Deterioration of Concrete Due to Corrosion of Reinforcing Steel", *Durability of Concrete, Proceedings, Fourth CANMET/ACI, International Conference*, pp. 535-554, Sydney, Australia, 1997.
- [3] سید عسگری، ن.، آسیب دیدگی‌های بتن، علل و عوامل آن، چاپ دوم، تهران، ۱۳۷۰.
- [4] Haque, M. N., and Kayyali, O. A., "Aspects of Chloride Ion Determination in Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 92, No. 5, pp. 532-540, 1995.
- [5] Nagataki, S., Otsuki, N., Wee, T. H., and Nakashita, K., "Condensation of Chloride Ion in Hardened Cement Matrix Materials and on Embedded Steel Bars", *ACI Materials Journal*, V. 90, No. 4, pp. 323-332, 1993.

- [6] Pettersson, K., and Sandberg, P., "Chloride Threshold Levels, Corrosion Rates and Service Life for Cracked High-Performance Concrete", *Durability of Concrete, Proceedings, Fourth CANMET/ACI, International Conference*, pp. 451-472, Sydney, Australia, 1997.
- [۷] قدوسی، پ.، "مکانیزم و علل کاهش آسیب پذیری بتن دارای میکروسیلیس"، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۱۸۲-۱۹۶، تهران، ۱۳۷۶.
- [8] Rasheeduzzafar, Al-Saadoun, S. S., and Al-Gahtani, A. S., "Reinforcement Corrosion of Silica Fume Blended-Cement Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 4, pp. 337-344, 1992.
- [9] Mullick, A., "Rational Use of Microsilica in Concrete in Arid and Tropical Environs", *Proceedings of the International Seminar on the Use of Microsilica in Concrete, Building and Housing Research Center*, pp. 84-99, Tehran, Iran, 1997.
- [10] ASTM C33-93, "Standard Specification for Concrete Aggregates", *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02, pp. 10-16, 1997.
- [11] ASTM C150-97, "Standard Specification for Portland Cement", *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02, pp. 132-135, 1997.
- [12] ASTM C494-92, "Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.02, pp. 251-259, 1997.
- [13] ASTM C989-95, "Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars", *Annual Book of ASTM Standards*, V. 04.01, pp. 487-491, 1997.
- [14] ACI Committee 211, "Guide For Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash", (ACI 211.4R-93), *American Concrete Institute*, 13 pp., 1998.
- [15] Hooton, R. D., "Influence of Silica Fume Replacement of Cement on Physical Properties and Resistance to Sulfate Attack, Freezing and Thawing, and Alkali-Silica Reactivity", *ACI Materials Journal*, V. 90, No. 2, pp. 143-151, 1993.
- [16] ACI Committee 234, "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete", (ACI 243R-96), *American Concrete Institute*, 51pp., 1998.
- [17] Khayat, K. H., Vachon, M., and Lanctôt, M., C., "Use of Blended Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures", *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 3, pp. 183-192, 1997.
- [18] ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", (ACI 363R-92), *American Concrete Institute*, 48 pp., 1998.
- [۱۹] مستوفی نژاد، د.، و نزهتی، م.، "نقش ملات در تخمین مدول الاستیسیته بتن با مقاومت بالا (HSC/HPC)", سومین کنفرانس بین المللی بتن، مقاله شماره ۱۰۳، تهران، ۱۳۷۹.
- [20] Luciano, J. J., Nmai, C. K., and DelGado, J. R., "A Novel Approach to Developing High-Strength Concrete", *Concrete International*, V. 13, No. 5, 1991.
- [21] Gagné, R., Boisvert, A., and Pigeon, M. "Effect of Superplasticizer Dosage on Mechanical Properties, Permeability, and Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concrete With and Without Silica Fume", *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 2, pp. 111-120, 1996.
- [22] Punkki, J., Golaszewski, J., and Gjølrv, O. E., "Workability Loss of High-Strength Concrete", *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 5, pp. 427-431, 1996.
- [23] ASTM C876-91, "Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02, pp. 426-431, 1997.
- [24] ACI Committee 233, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete", (ACI 233R-95), *American Concrete Institute*, 18 pp., 1998.
- [25] Khayat, K. H., Vachon, M., and Lanctôt, M., C., "Use of Blended Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures", *ACI Materials Journal*, V. 94, No. 3, pp. 183-192, 1997.
- [26] Durning, T. A., and Hicks, M. C., "Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals", *Concrete International*, V. 13, No. 3, 1991.
- [27] Aïtcin, P. C., and Neville, A., "High-Performance Concrete Demystified", *Concrete International*, V. 15, No. 1, pp. 21-26, 1993.
- [۲۸] شکرچی زاده، م.، "مطالعه نفوذپذیری در بتن های با کارایی بالا"، سومین کنفرانس بین المللی بتن، مقاله شماره ۲۰۹، تهران، ۱۳۷۹.
- [29] Li, Z., Peng, J., and Ma, B., "Investigation of Chloride Diffusion for High Performance Concrete Containing Fly Ash, Microsilica and Chemical", *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 3, pp. 391-396, 1999.