

مقایسه مقاومت الکتریکی و مقاومت الکتریکی پولاریزه بتن مسلح در آزمایش اندازه‌گیری خوردگی به روش گالوانوستاتیک پالس

رایحه خاقانپور^{۱*}، محمد حسین تدین^۱، محمد شکرچی‌زاده^۱

۱. انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

پست الکترونیکی: r_khaghanpour@ut.ac.ir

تلفن: ۰۹۱۲۶۹۵۶۵۳۲

چکیده

امروزه سازه‌های بتنی نقش بسیار مهمی در زیرساخت‌های هر جامعه‌ای دارند. بنابراین شرایط و عملکرد این سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خوردگی میلگردهای فولادی در بتن به عنوان دلیل اصلی خرابی‌های زودرس و در برخی موارد تخریب کلی سازه‌های بتن مسلح شناخته می‌شود. مقاومت الکتریکی بتن یکی از پارامترهای اصلی تاثیرگذار روی نرخ خوردگی میلگرد در بتن است. بنابراین اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن و فهم رابطه بین مقاومت الکتریکی و نرخ خوردگی در تعیین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح اهمیت دارد. روش گالوانوستاتیک پالس یک روش سریع پلاریزه کردن برای تعیین نرخ واقعی خوردگی است که نرخ خوردگی و مقاومت الکتریکی بتن در یک آزمایش تعیین می‌شوند.

در مطالعه حاضر با قرار دادن نمونه‌های حاوی پوزولان دوده سیلیسی و نمونه بدون پوزولان در منطقه خلیج فارس و در ناحیه پاشش، آزمایش گالواپالس در بازه‌های زمانی مشخص انجام گرفته است و با مقایسه مقاومت الکتریکی و مقاومت الکتریکی پولاریزه محاسبه شده، رابطه‌ای بین این دو مقاومت به دست آمده است. مشاهده می‌شود که با شروع خوردگی مقاومت الکتریکی پولاریزه به شدت کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی:

بتن مسلح، روش گالوانوستاتیک پالس، سرعت خوردگی، مقاومت الکتریکی، مقاومت الکتریکی پولاریزه.

کد: ۱۴۲D

*مسئول مکاتبات

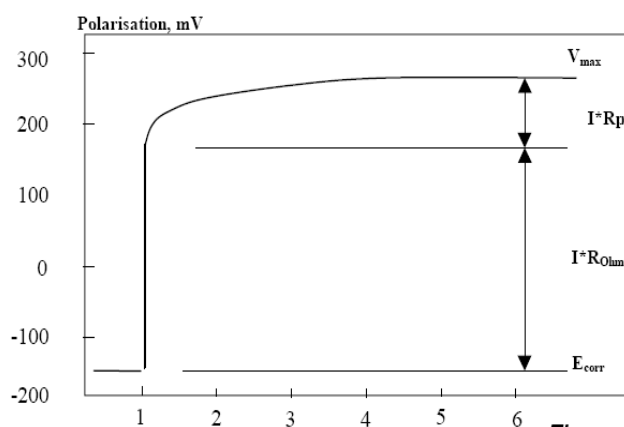
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر در مناطق مختلف دنیا، خوردگی میلگردهای فولادی در بتن به عنوان دلیل اصلی خرابی‌های زودرس و در برخی موارد تخریب کلی سازه‌های بتن مسلح مورد توجه قرار گرفته است. محیط‌های دریایی از جمله منطقه خلیج فارس به دلیل دارا بودن دما و رطوبت و غلظت املاح زیاد به عنوان محیط‌های خورنده شناخته می‌شوند. در محیط‌های دریایی، مهمترین عامل تخریب سازه بتنی بر اثر حملات شیمیایی، نفوذ یون کلرید به داخل بتن، از بین بردن لایه محافظ اطراف میلگردها و در نتیجه خوردگی آنها است. این پدیده منجر به انبساط مواد حاصل از خوردگی میلگرد و تخریب پوشش بتنی می‌شود. این فرآیند اگر با سایر عوامل، نظیر دما، و نیز عواملی که باعث کاهش قلیائیت بتن و یا افزایش نفوذپذیری آن می‌شوند، همراه باشد، اثرهای مخرب آن در زمان کوتاه‌تری نمایان می‌شوند.

مقاومت الکتریکی بتن یکی از عواملی است که به طور مستقیم روی سرعت خوردگی تاثیر می‌گذارد. مقاومت الکتریکی کم انتقال یون‌ها را تسریع می‌کند و نسبت آند به کاتد می‌تواند بسیار بزرگ شود [۱]. آلونسو و همکاران^۱ با آزمایش روی نمونه‌های بتن مسلح نشان دادند که با کاهش مقاومت الکتریکی بتن، خوردگی افزایش می‌یابد [۲]. در گزارشی که توسط اتحادیه اروپا ارائه شده آمده است که مهم‌ترین عامل تاثیر گذار روی خوردگی میلگرد در بتن مقاومت الکتریکی بتن است که به طرح اختلاط بتن و رطوبت آن وابسته است [۳]. به همین دلیل اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن و فهم رابطه بین مقاومت الکتریکی و نرخ خوردگی در تعیین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح اهمیت دارد. نرخ خوردگی، یا به بیان دیگر چگالی جریان خوردگی، توسط رابطه استرن-گری^۲ (رابطه ۱) با مقاومت پلاریزاسیون یا پلاریزه شده بتن در ارتباط است:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p \times A} \quad (1)$$

که در آن i_{corr} نرخ خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)، A مساحت سطح پلاریزه شده در میلگرد (m^2)، R_p مقاومت پلاریزه شده بتن ($\text{k}\Omega$) و B ضریبی است که به شیب‌های تافل آند و کاتد بستگی دارد [۴ و ۵]. مقاومت الکتریکی اهمیت مقاومت بخشی از بتن است که روی میلگرد قرار دارد (پوشش بتن) و به خصوصیات بتن بستگی دارد و به شرایط خوردگی میلگرد وابسته نیست. روش گالوانواستاتیک پالس (galvanostatic pulse) یک روش سریع پلاریزه کردن برای تعیین نرخ واقعی خوردگی است. علت گسترش این روش این است که در شرایط مرطوب و نیمه مرطوب به علت عدم وجود اکسیژن استفاده از روش پتانسیل نیم پیلی مشکل است [۶]. در این روش یک جریان کوچک در فصل مشترک میلگرد و بتن ایجاد شده و پتانسیل عکس‌العمل ثبت می‌شود و منحنی شکل ۱ به دست می‌آید.



شکل ۱: منحنی پتانسیل به دست آمده از روش گالوانواستاتیک پالس [۶]

1. Alonso et al.
2. Stern- Geary

دستگاه گالوپالس با بهره‌گیری از روش گالوانواستاتیک پالس برای اندازه‌گیری نرخ خوردگی و مقاومت الکتریکی اهمیت بتن (R_D) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این دستگاه از الکترود $Ag/AgCl$ به عنوان الکترود مرجع استفاده شده است و دارای یک کامپیوتر دستی است که پالس‌ها را ایجاد می‌کند و مراحل آزمایش را کنترل می‌کند و همچنین نتایج را ارائه می‌دهد (شکل ۲). برای به دست آوردن پتانسیل عکس‌العمل، در حالت پیش فرض دستگاه جریان ۲۵ میکرو آمپری در مدت ۵ ثانیه اعمال می‌کند، در نواحی فعال جریان ۱۰۰-۸۰ میکروآمپری برای مدت زمان ۱۰-۵ ثانیه اعمال می‌گردد و در مناطق بسیار فعال جریان باید تا ۴۰۰ میلی آمپر بالا رود. اما جریان تا حد ممکن باید پائین باشد تا پلاریزه شدن میلگردها حداقل گردد [۶ و ۷]. محدودیت‌های بحرانی برای طبقه‌بندی ریسک‌پذیری میزان خوردگی با توجه به نتایج گالوپالس در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲: دستگاه گالوپالس

جدول ۱: تخمین مقدار خوردگی قابل مشاهده از روی قرائت‌های انجام شده با دستگاه گالوپالس

مقدار خوردگی	مقدار اندازه‌گیری شده ($\mu A/cm^2$)
در حالت مقاوم	< 0.5
کم	$0.5 - 5$
متوسط	$5 - 15$
زیاد	> 15

انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در اسفندماه سال ۱۳۸۶ برای تخمین عمر مفید سازه‌های بتن مسلح در تماس با یون کلرید در محیط خلیج فارس، سایتی تحقیقاتی در منطقه‌ی آزاد قشم احداث نموده است و با قرار دادن آزمون‌های بتن مسلح در شرایط رویارویی مختلف، آزمایش‌های پایش خوردگی روی آنها انجام داده است. در این تحقیق به بررسی نتایج آزمایش گالوپالس روی آزمون‌های حاوی مقادیر مختلف پوزولان دوده سیلیسی در شرایط رویارویی پاشش می‌پردازیم. به دلیل این که در مقایسه با مقاومت الکتریکی پلاریزه شده، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اهمیت با روش‌های ساده امکان‌پذیر است، با مقایسه مقاومت الکتریکی اهمیت و مقاومت الکتریکی پلاریزه محاسبه شده، رابطه‌ای بین این دو مقاومت به دست می‌آوریم.

۲- مشخصات طرح اختلاط آزمون‌ها

در سایت تحقیقاتی قشم، آزمون‌های بتن مسلح به ابعاد $55 \times 30 \times 20$ سانتیمتری برای ارزیابی خوردگی میلگرد در بتن ساخته شده است. در ساخت آزمون‌ها از سیمان نوع ۲ هرمزگان و همچنین دوده سیلیسی کارخانه فرو آلیاژ ازنا استفاده شده است که

آنالیز شیمیایی آنها در جدول ۲ آمده است. مجموع سنگدانه‌ها تقریباً ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه سنگدانه مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر است. برای رسیدن به روانی کافی از فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلات استفاده شده است. به دلیل تسریع در پدیده‌ی خوردگی ضخامت پوشش روی میلگردها ۳ سانتیمتر در نظر گرفته شده و قطر میلگردها ۱۴ میلی‌متر است. به ازای سه میلگرد آند در بالا، شش میلگرد کاتد در پایین آزمون وجود دارد که در مجموع سه سیستم ماکروپیل را تشکیل می‌دهد. طرح اختلاط آزمون‌ها در جدول ۳ آمده است. آزمون‌ها بعد از سه روز عمل‌آوری مرطوب در شرایط محیطی منطقه، برای بررسی خوردگی در ناحیه‌ی پاشش قرار داده شدند و به فاصله زمانی ۱ ماهه آزمایش گالوپالس روی آنها صورت گرفته است.

جدول ۲: آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان دوده سیلیسی مورد مصرف

عنوان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	۶۳	۱/۸	۱/۶	۰/۵	۰/۶	۲
دوده سیلیسی	۹۳/۱۶	۱/۱۳	۰/۷۲	-	۱/۶	۰/۰۵	-	-	۱/۵۸

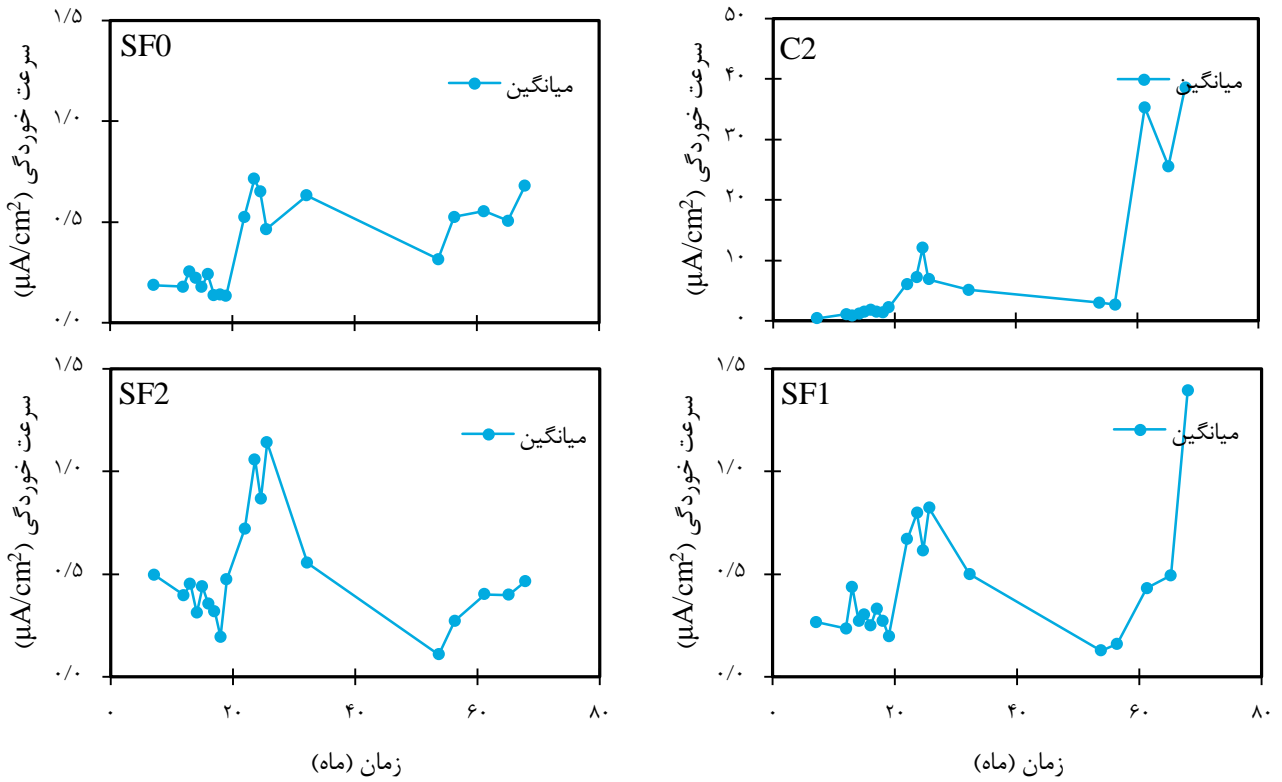
جدول ۳: مشخصات طرح‌های اختلاط

کد آزمون	نسبت آب به سیمان	عیار سیمان (kg/m ³)	پوزولان جایگزین (kg/m ³)	مقدار آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	اسلامپ (cm)
C2	۰/۴	۴۰۰	-	۱۶۰	۰/۲	۷
SF0	۰/۴	۴۰۰	۲۰	۱۶۰	۱/۲	۶
SF1	۰/۴	۴۰۰	۳۰	۱۶۰	۱/۴	۵
SF2	۰/۴	۴۰۰	۴۰	۱۶۰	۱/۶	۸

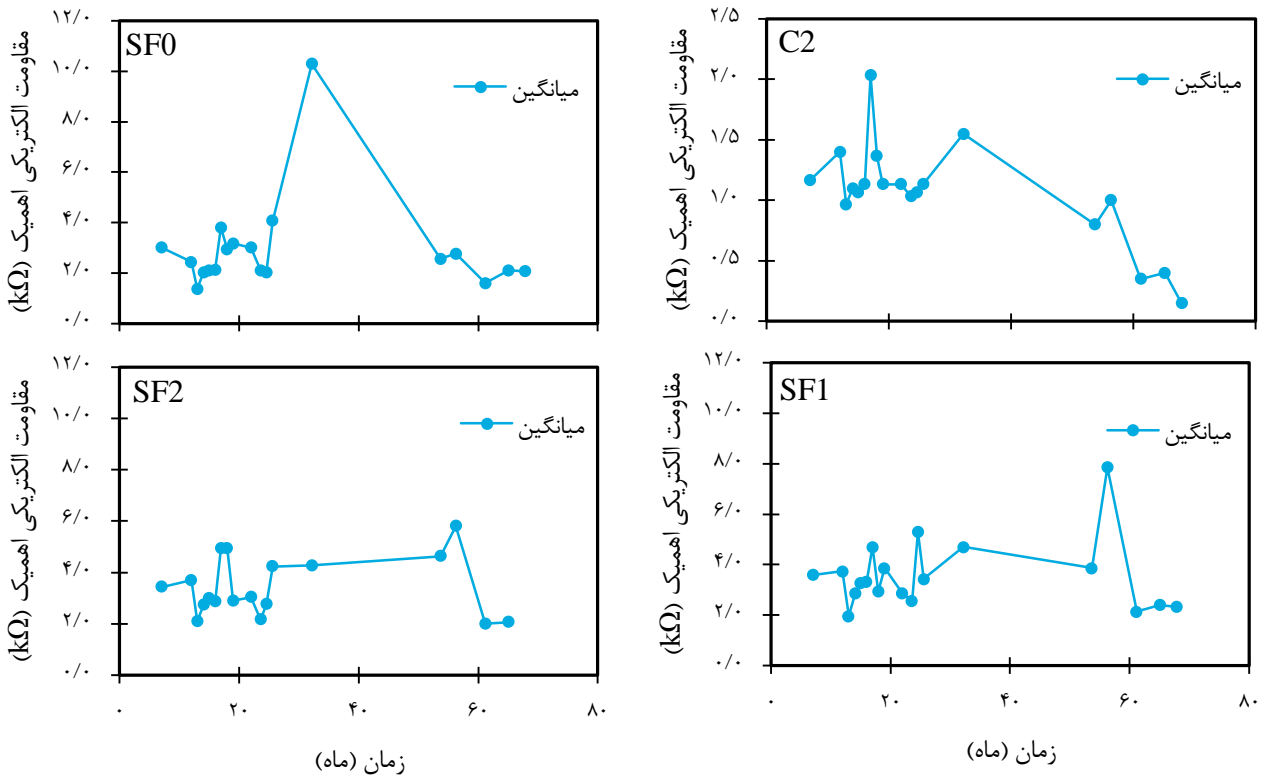
۳- نتایج تحقیق

۳-۱- نتایج آزمایش گالوپالس

با قرارگیری آزمون‌ها در سایت قشم، آزمایش گالوپالس در بازه‌های زمانی ۱ ماهه و برای مدت ۵ سال روی آزمون‌ها انجام شده است. نمودار تغییرات سرعت خوردگی و مقاومت الکتریکی اهمیت بر حسب زمان برای میانگین نتایج آزمون‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از دوده سیلیسی تاثیر زیادی در کاهش سرعت خوردگی دارد و آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی در مقایسه با نمونه شاهد C2 عملکرد بهتری در برابر خوردگی دارند. همچنین مقاومت الکتریکی اهمیت آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی به مراتب بیشتر از آزمون بدون پوزولان است. با توجه به محدودیت‌های بحرانی تعیین شده برای طبقه‌بندی ریسک‌پذیری میزان خوردگی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه گالوپالس (جدول ۱)، وقتی سرعت خوردگی از مقدار $0.5 \mu A/cm^2$ تجاوز کند، میلگرد از حالت مقاوم (غیر فعال) خارج شده است و فعال است. در نتیجه در آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی بعد از ۲۲ ماه و در آزمون بدون پوزولان بعد از گذشت ۱۲ ماه میلگردها فعال شده‌اند.



شکل ۳: تغییرات سرعت خوردگی در طول زمان برای میانگین آزمون‌های مختلف



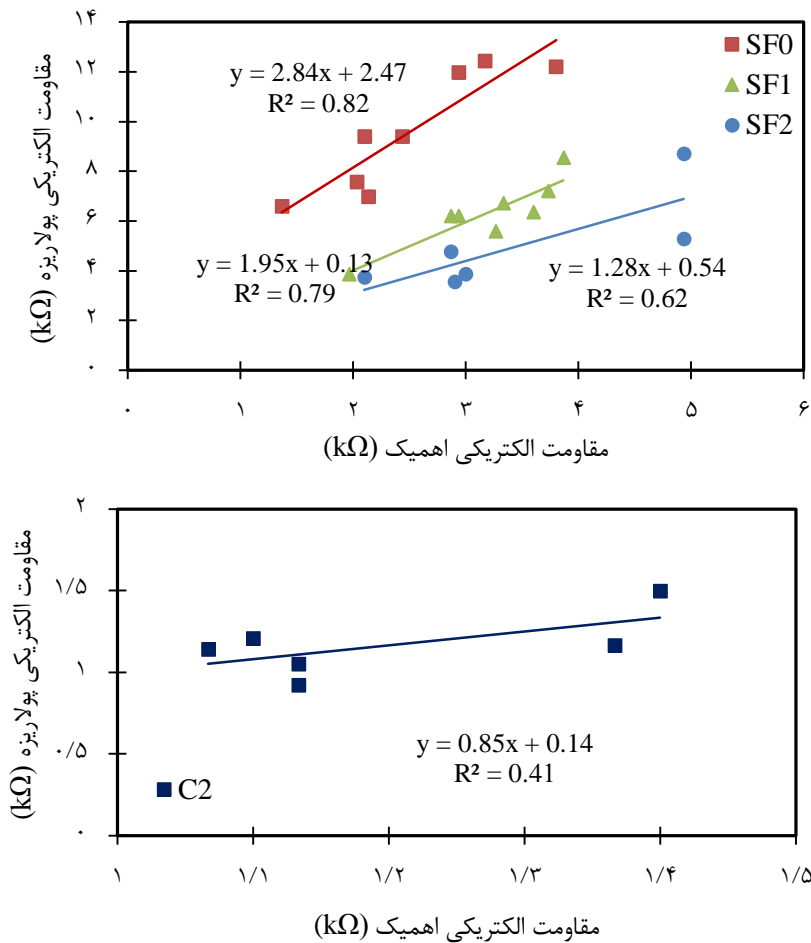
شکل ۴: تغییرات مقاومت الکتریکی اهمیک در طول زمان برای میانگین آزمون‌های مختلف

۳-۲- رابطه بین مقاومت الکتریکی و مقاومت الکتریکی پولاریزه

با جایگذاری سرعت خوردگی به دست آمده از آزمایش گالوپالس در رابطه ۱ می‌توان مقاومت پولاریزه شده بتن را برای نمونه‌های مختلف در طول زمان به دست آورد. ضریب B در این رابطه با تجربه و آزمایش به دست آمده است. به طوری که وقتی میلگرد در حالت مقاوم است این ضریب حدود ۵۲ میلی ولت و وقتی در حالت فعال است حدود ۲۶ میلی ولت خواهد بود [۵] و [۸ و ۹]. به این ترتیب مقاومت پلاریزاسیون نمونه‌های بتن مسلح به دست آمده و با مقاومت الکتریکی همیک مقایسه شدند. مشاهده می‌شود که رابطه خطی بین این دو مقاومت برقرار است. مقاومت الکتریکی همیک به مشخصات طرح اختلاط بتن وابسته است در حالی که مقاومت پلاریزاسیون به شرایط خوردگی میلگرد بستگی دارد. در نتیجه وقتی میلگرد از حالت مقاوم خارج می‌شود، مقاومت الکتریکی پلاریزه شده بتن به شدت کاهش می‌یابد. از این رو مدل به دو بخش مقاوم و فعال تقسیم می‌شود. رابطه کلی به شکل زیر است:

$$R_p = a R_{\Omega} + b \quad (2)$$

که در آن R_p مقاومت الکتریکی پلاریزاسیون بتن ($k\Omega$) و R_{Ω} مقاومت الکتریکی همیک بتن ($k\Omega$) و a و b ضرایبی هستند که تابع نوع بتن و درصد پوزولان و شرایط خوردگی هستند. در شرایط مقاوم، این ضرایب برای بتن حاوی پوزولان دوده سیلیسی از روابط ۳ به دست می‌آیند (با توجه به ضرایب به دست آمده در شکل ۵) و برای بتن بدون پوزولان و نسبت آب به سیمان ۰/۴ به ترتیب برابر ۰/۸۵ و ۰/۱۴ به دست آمده‌اند.



شکل ۵: رابطه بین مقاومت الکتریکی همیک و مقاومت الکتریکی پولاریزه در حالت مقاوم

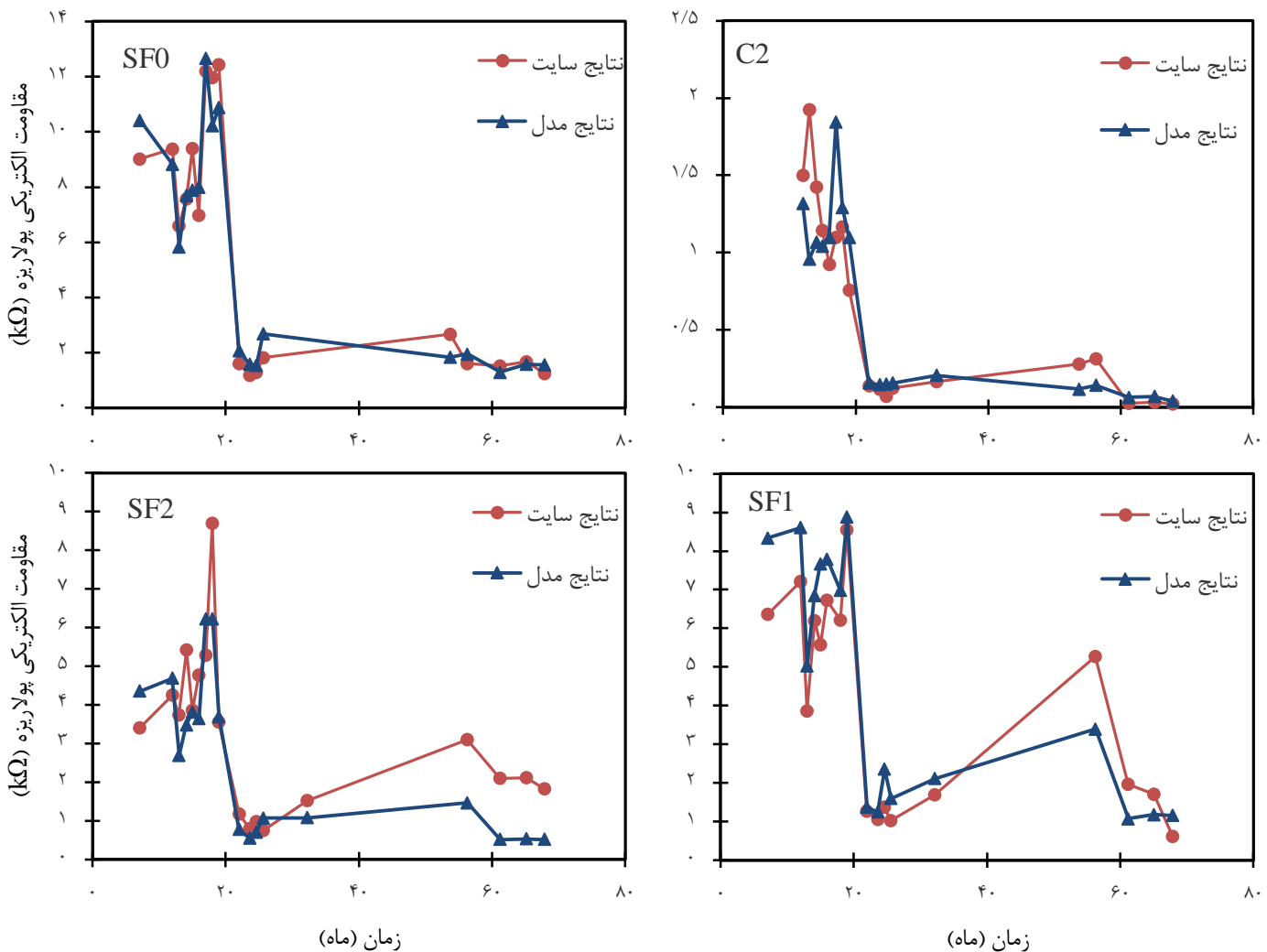
$$a = -3.11(SF/10) + 4.36$$

$$b = -3.86(SF/10) + 3.95$$

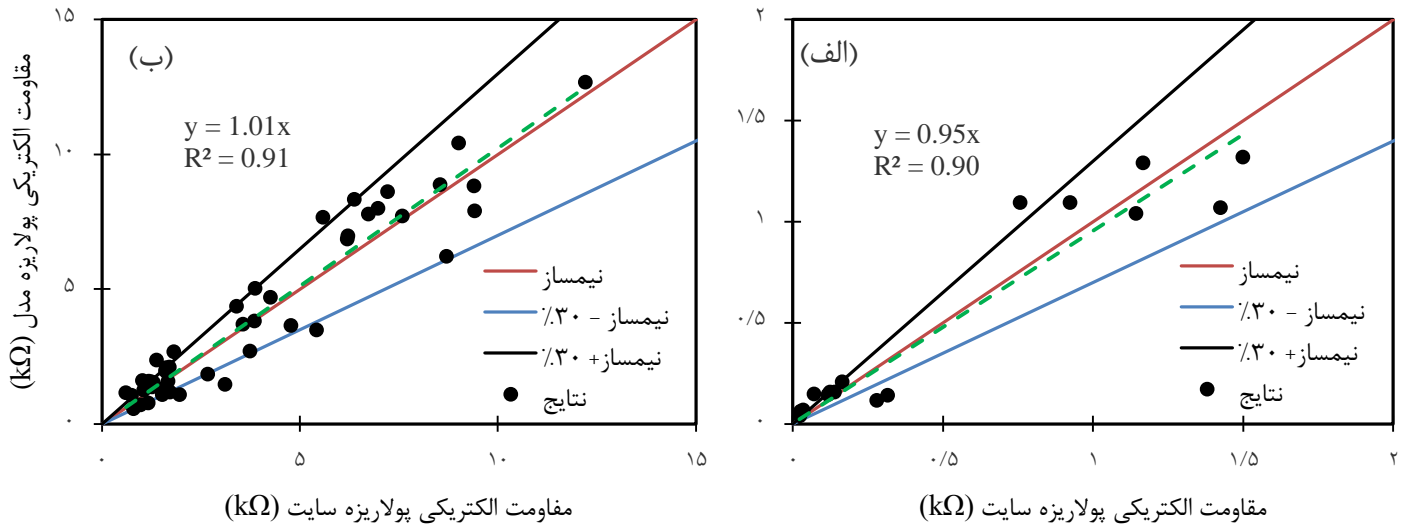
(۳)

که در آن SF مقدار دوده سیلیسی (درصد وزنی سیمان) است. وقتی بتن از حالت مقاوم خارج می‌شود این ضرایب به شدت کاهش می‌یابند به طوری برای نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی ضرایب a و b یک پنجم و برای نمونه بدون پوزولان این ضرایب یک هفتم حالت مقاوم به دست آمده‌اند. به بیان دیگر با شروع خوردگی مقاومت الکتریکی پولاریزه یک پنجم تا یک هفتم حالت مقاوم خواهد بود.

شکل‌های ۶ و ۷ رابطه بین مدل و نتایج آزمایش را نشان می‌دهند. نتایج سایت و مدل با ضریب رگرسیون $R^2=0/9$ با هم مرتبط هستند. همان طور که مشاهده می‌شود وقتی میلگرد از حالت مقاوم خارج می‌شود، مقاومت الکتریکی پولاریزه به شدت کاهش می‌یابد. همچنین استفاده از پوزولان دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت الکتریکی پولاریزه می‌شود به طوری که مقاومت الکتریکی حدود ۳ تا ۴ برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۶: مقایسه تغییرات مقاومت الکتریکی پولاریزه در طول زمان برای نتایج سایت و مدل



شکل ۷: رابطه بین نتایج سایت و مدل برای الف) آزمون بدون پوزولان (C2)، ب) آزمون‌های حاوی پوزولان

۴- نتیجه‌گیری

- استفاده از پوزولان دوده سیلیسی باعث کاهش سرعت خوردگی می‌شود و زمان فعال شدن میلگرد را افزایش می‌دهد.
- مقاومت الکتریکی بتن حاوی دوده سیلیسی بسیار بیشتر از بتن بدون پوزولان است. با افزودن دوده سیلیسی مقاومت الکتریکی بتن تا ۴ برابر می‌تواند افزایش یابد.
- مقاومت الکتریکی پولا ریزه بتن با شرایط خوردگی در ارتباط است، به طوری که با خارج شدن میلگرد از حالت مقاوم و شروع خوردگی، مقاومت الکتریکی پولا ریزه بتن به مقدار یک پنجم تا یک هفتم حالت مقاوم کاهش می‌یابد.
- استفاده از پوزولان دوده سیلیسی باعث کم شدن شدت افت مقاومت الکتریکی پولا ریزه بتن می‌شود.
- رابطه‌ای بین مقاومت الکتریکی بتن و مقاومت الکتریکی پولا ریزه بتن به دست آمده است که نشان می‌دهد یک رابطه خطی بین این دو مقاومت برقرار است و همچنین این رابطه تابع مقدار پوزولان دوده سیلیسی است.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری سازمان منطقه آزاد قشم به‌ویژه معاونت عمرانی این سازمان در احداث سایت تحقیقاتی انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در جزیره قشم کمال تشکر و قدردانی را دارند.

۶- مراجع

- [1] Modelling of reinforcement corrosion in concrete - State of the art, COIN P4 Operational service life design, SP 4.1 F Service life modelling and prediction, 2008.
- [2] Liu T. and Weyers R.W., "Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures", Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 3, pp. 365-379, 1998
- [3] DuraCrete, Modelling of Degradation, Document BE95-1347/R4-5, Gouda, CUR, 2000.
- [4] Nygaard Peter V., Geiker Mette R., Elsener Bernhard, "Corrosion rate of steel in concrete: evaluation of confinement techniques for on-site corrosion rate measurements", Materials and Structures, 42, pp. 1059-1076, 2009.
- [5] Pour-Ghaz M., "A Novel Approach for Practical Modelling of Steel Corrosion in Concrete", PhD Thesis, Carleton University, 2007.
- [6] GalvaPulse™ GP-5000, Instruction and Maintenance Manual, October 1st, 2009.

- [7] Poursaee A., Hansson C.M., "Galvanostatic pulse technique with the current confinement guard ring: The laboratory and finite element analysis", *Corrosion Science*, 50, pp. 2739–2746, 2008.
- [8] Esmailpoursaee A., "An Analysis of the Factors Influencing Electrochemical Measurements of the Condition of Reinforcing Steel in Concrete Structures", PhD Thesis, University of Waterloo, 2007.
- [9] Luping T., "Calibration of the Electrochemical Methods for the Corrosion Rate Measurement of Steel in Concrete", NORDTEST Project No. 1531-01, SP Swedish National Testing and Research Institute, 2002.

Comparison of electrical resistance and polarization resistance of reinforced concrete measured by galvanostatic pulse technique for corrosion measurement

Rayehe Khaghanpour¹, Mohammad Hossein Tadayon¹,
Mohammad Shekarchi¹

1. Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Email: r_khaghanpour@ut.ac.ir

Tel: 09126956532

Today, concrete structures have a crucial role in the infrastructure of society. So, the condition and performance of these structures are important. The corrosion of steel bars in concrete is known as the main cause of premature failures and in some cases total deterioration of reinforced concrete structures. Concrete resistance is one of the parameters affecting the steel corrosion in concrete. Thus, measuring the concrete resistance and discovering the relation between resistance and corrosion rate are important in estimating the service life of concrete structures. The galvanostatic pulse measurement technique is a fast polarization technique for determination of the actual corrosion rate.

In this study, concrete specimens with silica fume and a control specimen have prepared and located in splash zone in Persian Gulf, and GalvaPulse test is done over time. By comparing the electrical resistance and calculated polarization resistance, a relation between these resistances has been obtained. Results show that when corrosion starts, the polarization resistance reduces greatly.

Keywords:

Corrosion rate, Electrical resistance, Galvanostatic pulse technique, Polarization resistance, Reinforced concrete.

Code: 142D.

¹ Corresponding author