

# مانیتورینگ پتانسیل میله‌های فولادی در بتون بمنظور تعیین مکان خوردگی

سعید رضا الله کرم

استادیار گروه مهندسی متالورژی و مواد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۸/۳/۱۸، تاریخ تصویب ۷۸/۱/۲۵)

## چکیده

خوردگی آرماتورهای بتون یکی از مشکلات عظیم و روبه رشد در کشورهای صنعتی جهان محسوب می‌شود. بتونهای مسلح بطور گسترده در پروژه‌های ساختمانی نظیر پلها، تونلها، تأسیسات ساختمانی، پلانفرمهای نفتی و غیره استفاده می‌شوند. در حال حاضر خوردگی آرماتورها بعنوان یک مشکل شناخته شده پذیرفته گردیده است و روشهای اصولی و قابل اطمینان جهت کاهش هزینه‌های ناشی از تعمیر و افزایش طول عمر سازه‌های بتونی به کار گرفته می‌شوند.

در این مقاله بررسی رفتار خوردگی آرماتورها از طریق مانیتورینگ پتانسیل بوسیله دو الکتروود مرجع کالومل مورد ارزیابی واقع شده است. نتایج حاصل از این تکنیک نشان‌دهنده قابلیت آن در تعیین نواحی آندی و کاتدی بتون و نهایتاً شناسایی مکان‌های خوردگی در آرماتورها می‌باشد. برای این منظور از دو نمونه مسطح بتونی استفاده شده است. تغییرات پتانسیل نسبت به زمان به صورت نقوشی که شامل طیف رنگهای مختلف می‌باشد ارائه گردیده است. این تکنیک قادر است که بعنوان یک سیستم عامل و احطار دهنده جهت جلوگیری از وقایع ناگوار ناشی از خسارات خوردگی آرماتورها در تأسیسات بتونی مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه های کلیدی:** مانیتورینگ پتانسیل، تغییرات پتانسیل خوردگی میله های فولادی، کوپلهای گالوانیک، نقاط آندی و کاتدی، نقشه های پتانسیل های الکتروشیمیایی

## مقدمه

در آمریکا می‌توانسته وجود داشته باشد [۴]. در مقایسه می‌توان انتظار داشت که در رابطه با مشکلات خوردگی بتونهای مسلح در ایران نیز مقادیر قابل توجهی جهت هزینه بازسازی و نگهداری تأسیسات و پلهای مواصلاتی می‌شود که با استفاده از برنامه‌ریزیهای اصولی می‌توان به میزان قابل توجهی این هزینه‌ها را کاهش داد.

بنا به اظهارات استاد فول<sup>۳</sup> ساختمان بتون نظیر یک الکتروولت می‌باشد که در اثر جذب نمک از مقاومت الکتریکی آن کاسته می‌شود [۵]. بتون نیز نظیر خاک در اثر کاهش مقاومت الکتریکی سبب خوردگی فلزات مدفون در آن می‌گردد. در بسیاری از مقالات حد بحرانی این مقاومت الکتریکی برای بتون  $\Omega\text{cm}$  ۱۰۰۰۰ تعیین شده است [۶ - ۷]. در مجموع عواملی که باعث تسریع در فرآیند خوردگی آرماتورها می‌باشند عبارتند از حد رطوبت، مقدار نمک و اکسیژن محلول که این پارامترها در کل عوامل خوردگی در خاک نیز محسوب می‌شوند. متأسفانه بیشتر آزمایشات خوردگی بتون جنبه آزمایشگاهی داشته، چنانچه نتایج اینگونه آزمایشات را نمی‌توان بطور مستقیم با خوردگی موضعی و ماکروپیلهایی که در

بتونهای مسلح بطرق مختلف مورد حمله خوردگی واقع می‌شوند. در مورد پلهای مواصلاتی یکی از عوامل خوردگی آرماتورها از طریق استفاده از نمک جهت جلوگیری از یخ زدن سطوح بتونی صورت می‌گیرد. خوردگی آرماتورها معمولاً باعث تخریب پلها و ستونهای آنها شده و فجایع غیرقابل جبران بدنبال خواهد داشت. از معروفترین وقایع اخیر می‌توان از ریزش سقف کنگره برلین<sup>۱</sup> در آلمان و نیز سقف پارکینگ عمومی در مین‌سوتا<sup>۲</sup> در سالهای ۱۹۸۰ را نام برد که معرف این نوع خوردگی می‌باشند [۱-۲].

پدیده خوردگی بتون یک حقیقت غیرقابل انکار است که در بیشتر موارد توسط نفوذ کلر و یا دی‌اکسید کربن و تخریب محیط قلیایی بتون صورت می‌پذیرد. در آمریکا خسارات ناشی از خوردگی بتونهای مسلح و تأسیسات بتونی میلیاردها دلار تخمین زده می‌شود [۳]. طبق برآوردهای بعمل آمده در سال ۱۹۸۵ در آمریکا بیش از ۵۰۰۰۰۰۰ پل مواصلاتی نیازمند رسیدگی بوده‌اند [۴]. بررسیهای انجام شده در همان سال نشان می‌دهند که امکان صرفه‌جویی بیش از ۵۰۰ میلیون دلار تنها در رابطه با خوردگی پلها

برای این منظور از یک نیم پیل و یا دو الکتروود مرجع مشابه برای مانیتورینگ پتانسیل استفاده می‌شود. الکتروود مرجع می‌تواند الکتروود مس سولفات مس، الکتروود نقره و یا الکتروود کالومل باشد. هانس آراپ و همکارانش (Hans Arup et al) معتقدند که برای آزمایشات خوردگی آرماتورها در بتون، توسط استفاده از الکتروود مرجع کالومل نتایج بهتری حاصل می‌گردد تا الکتروود مس - سولفات مس [۱۲]. ولی در عین حال بسیاری از بررسیهای انجام شده، توسط الکتروود مس - سولفات مس صورت گرفته است.

### عوامل موثر در اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی

مانیتورینگ پتانسیل یکی از متداولترین روشهای غیر مخرب در شناسایی خوردگی آرماتورهای بتونهای مسلح می‌باشد. چنانچه از این تکنیک بطور اصولی و تحت شرایط برنامه‌ریزی شده استفاده گردد این روش می‌تواند در تشخیص خوردگی بتون قبل از آنکه از طریق مشاهدات عینی نظیر ترک خوردگی و یا وجود لکه‌های زنگ بر روی بتون به خوردگی آرماتورها پی برد، بسیار مفید واقع گردد. یکی از پارامترهای مهم در آزمایشات غیر مخرب تفسیر صحیح نتایج حاصله و نیز استفاده اصولی از پیشنهادات و راه‌حلهای ارائه شده توسط استانداردها می‌باشد. وان داویر<sup>۳</sup> حد پتانسیل خوردگی در بتون را برای تعداد بسیاری از سطوح پلهای موصلاتی و تأسیسات بتونی ارائه داده است [۱۴].

عواملی که در فرایند پتانسیل خوردگی میله‌های فولادی داخل بتون تأثیر می‌گذارند عبارتند از:

۱ - پتانسیل اتصال<sup>۴</sup> - این پتانسیل به عواملی از قبیل مقدار کربن و نیز غلظت کلر در داخل بتون ارتباط دارد. در رابطه با کربن حداکثر پتانسیلی که از طریق مدار نیم پیل اندازه‌گیری می‌شود، معمولاً حدود ۱۰۰ mV مثبت تر از پتانسیل واقعی آرماتورها می‌باشد. این موضوع می‌تواند بدلیل وجود لایه‌های حاوی دی‌اکسید کربن و عاری از آن در داخل بتون باشد که توسط تفاوت مابین غلظت یون هیدروکسید (که از طریق الکتروولیز  $Ca(OH)_2$  محلول در آب تخلخها حاصل می‌شود) و نیز غلظت دی‌اکسید کربن حاصل شود [۱۵]. فرمول ارائه شده جهت کنترل مقدار این پتانسیل اتصال عبارت است از [۱۶]:

$$E = (t_- - t_+) \frac{RT}{F} \ln \frac{a_+}{a_-}$$

$t_-$  = تعداد آنیونهای انتقال یافته

$t_+$  = تعداد کاتیونهای انتقال یافته

$a$  = اکتیویته یونهای محلول

آرماتورهای بتون در شرایط محیط واقعی اتفاق می‌افتد بررسی نمود. از طرفی روشهای ابتدایی نظیر کشیدن زنجیر بر روی سطوح بتونی و بررسیهای آلوستیک از طریق تشدید همناوبی که در نتیجه تخریب داخلی بتون بوسیله خوردگی آرماتورها حاصل می‌شود تنها در شرایط پیشرفته خوردگی مفید خواهد بود (این تکنیک از روش ضربه زدن بوسیله چکش بر روی سطح بتون منشعب شده است). همچنین بررسی خسارات ناشی از خوردگی آرماتورهای بتون از طریق مشاهدات عینی که معمولاً منجر به ترک خوردن بتون در اثر تنش‌های داخلی حاصل از محصولات خوردگی می‌شود نیز بدلیل تأخیر در شناسایی مشکل آفرین خواهد بود. البته در رابطه با وجود ترک بر روی سطح بتون نیز بدلیل گوناگونی به غیر از تأثیرات محصولات خوردگی اشاره شده است. از آن جمله اینکه ترک در بتون می‌تواند توسط تخریب شیمیایی ساختمان بتون در تماس با محیط مخرب و یا توسط صدمات ناشی از یخ زدگی<sup>۱</sup> صورت گیرد [۸]. برخی از صاحب‌نظران بر این عقیده‌اند که ترکهایی که رشد آنها بطور عمودی بطرف میله‌های داخلی بتون صورت می‌گیرند از اهمیت کمتری نسبت به ترکهایی که موازی با میله‌ها می‌باشند برخوردارند [۹]. در هر حال احتمال اینکه ترکها سبب خوردگی آرماتورها می‌شوند و یا بالعکس، مبحثی است قابل تأمل و بررسی بیشتر.

از دیگر طرق آزمایشات خوردگی بتون استفاده از محلول فنول فتالین بر روی بتون و حصول رنگ بنفش که شرایط قلیایی و نهایتاً پسو بودن آرماتورها را نمایان می‌سازد می‌باشد. از این آزمایش می‌توان جهت تعیین نفوذ دی‌اکسید کربن بداخل بتون استفاده کرد. همچنین برای اندازه‌گیری مقدار کلر و سولفات که از طریق دیفوزیون بداخل بتون رخنه کرده‌اند و نیز تجزیه شیمیایی آب داخل تخلخلهای بتون و سائز تخلخلها می‌توان از روش نمونه برداری که توسط سوراخ کردن بتون در اعماق مختلف صورت می‌گیرد و روش غلظت یابی<sup>۲</sup> استفاده نمود.

یکی دیگر از روشهای غیر مخرب جهت بررسی خوردگی آرماتورهای بتون اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی می‌باشد. تاریخچه استفاده از تکنیک مانیتورینگ پتانسیل خوردگی آرماتورهای بتون به سالهای اولیه ۱۹۷۰ میلادی باز می‌گردد [۱۰]. این تکنیک شناخته شده بطور گسترده در بررسی خوردگی پلهای موصلاتی، پلاتفرمهای نفتی، تأسیسات ساختمانی بتونی، کف و دیواره استخرهای شنا و غیره بکار گرفته شده است [۱۱ - ۱۳]. انجام اینگونه آزمایشات در استاندارد ملی آمریکا ANST/ASTMC 876-87 بطور جامع تشریح شده است [۱۴].

می تواند تغییر یابد [۱۸].

۳- تأثیرات پلاریزاسیون - بتونهای مسلح که داخل آب و یا خاک قرار می گیرند بدلیل محدودیت در رسیدن اکسیژن کافی (اختلاف دمشی هوا) پتانسیلهای بسیار منفی تری اتخاذ می کنند [۱۹]. در بسیاری از موارد این تغییرات در پتانسیل می تواند سبب تفسیر غیر واقعی وضعیت خوردگی آرماتورها گردد. بطوریکه این موضوع در مورد نواحی پاشش آب بسیار محسوس می باشد. در چنین شرایطی نواحی انتقالی که شامل بخشی از بتون که خارج از آب قرار می گیرد، و یا قسمتی از بتون که خارج از سطح زمین قرار می گیرد، دارای پتانسیلهای منفی (در محدوده پتانسیلهای خوردگی وان داویر) خواهد بود. این تغییرات در پتانسیل بواسطه تأثیرات گالوانیک توسط قسمت فرو رفته در آب و یا مدفون در خاک ایجاد می شود، که این پتانسیلهای منفی را نمی توان با خوردگی نواحی انتقالی ارتباط داد ( ناحیه انتقالی برای سازه های بتونی بزرگ نظیر پلاتفرمهای نفتی واقع در دریا تا حدود ۵+ متر از سطح آب دریا تخمین زده می شود). این پتانسیلهای منفی از طریق پلاریزه کردن نواحی کاتدی خارج از آب و یا خاک توسط ناحیه آندی داخل آب و چسبیده به آن صورت می گیرد که در این صورت نواحی کاتدی بصورت نواحی فعال طبق مبانی پتانسیلهای خوردگی ارائه شده از طریق وان داویر تلقی خواهد شد [۲۰]. بنابراین اگر چه روش اندازه گیری پتانسیل خوردگی روشی نسبتاً آسان است ولی بررسی نتایج حاصل از اینگونه آزمایشات نیازمند دقت کافی و رعایت اصول فوق می باشد.

### روش آزمایش

برای انجام این آزمایشات دو قطعه مسطح بتونی تهیه شد. اندازه هر یک عبارت بود از  $8 \times 10 \times 12$  سانتیمتر و تعداد ۵ میله فولادی داخل هر یک کار گذاشته شده بود. بمنظور تسریع در خوردگی این نمونه های بتونی در یکی از آنها (بتون A) مقدار ۳٪  $\text{CaCl}_2$  بطور یکنواخت از طریق ملاط سیمان اضافه گردید. نمونه دوم (بتون B) از سه قسمت مجزا با درصدهای مختلف  $\text{CaCl}_2$  تولید گردید. به ۱/۳ قطعه  $(8 \times 10 \times 6)$  سانتیمتر مقدار ۳٪  $\text{CaCl}_2$  و به ۱/۸ آن  $(8 \times 10 \times 3)$  سانتیمتر مقدار ۱٪  $\text{CaCl}_2$  اضافه گردید. به ۱/۴ مابقی قطعه بتونی  $\text{CaCl}_2$  اضافه نشد. حضور کلر در ملاط سیمان که از طریق اضافه نمودن  $\text{CaCl}_2$  حاصل می گردد، در مقایسه با  $\text{NaCl}$  سرعت خوردگی آرماتورها را بمقدار بیشتری افزایش میدهد [۲۱]. دلیل این موضوع بواسطه این است که سرعت

در مورد دیفوزیون کلر بداخل بتون، چنانچه نفوذ کلر بطور سطحی صورت گیرد و به آرماتورها نرسیده باشد، پتانسیل اتصال بنا به تغییرات غلظت (اکتیویته) کلر در داخل آب تخلخلها ایجاد خواهد شد. نظر به اینکه غلظت محلول نزدیک به سطح بتون بیشتر می باشد، بنابراین حداکثر پتانسیلی که از طریق نیم پیل بدست می آید بنا به فرمول فوق می بایستی  $100 \text{ mV}$  منفی تر از پتانسیل واقعی آرماتورها باشد. آزمایشات انجام شده توسط براون و همکارانش (Brown et al) نتایج عکس تئوری فوق را نشان می دهد [۱۵]. در این آزمایشات پتانسیلهای اندازه گیری شده توسط مدار نیم پیل نزدیک به سطح بتون مثبت تر می باشند. بطوریکه به ازای هر میلی متر و تا عمق ۵ میلی متر بداخل بتون  $10 \text{ mV}$  افزایش در پتانسیل مشاهده شده است. همچنین برای پتانسیلهای از عمق ۵ میلی متر تا عمق ۳۰ میلی متر بداخل بتون به ازای هر میلی متر  $2 \text{ mV}$  افزایش حاصل گردیده است. نتیجه اینکه بنا به اظهارات براون پتانسیل نیم پیل بر روی سطح بتون مغایر با حدود پتانسیل خوردگی آرماتورها که توسط وان داویر پیشنهاد گردیده است می باشد ( $200 - 350$  میلی ولت، احتمال ۵۰٪ خوردگی) [۱۴].

۲- تأثیرات مقاومت بتون و سطح فوقانی آن - وجود پیللهای خوردگی در آرماتورها باعث ایجاد نواحی پسیو و فعال در آرماتورها شده که این نواحی تولید پیللهای گالوانیک می کنند. بطوریکه ناحیه خوردگی بصورت آندو ناحیه پسیو بصورت کاتد درمی آید.

پتانسیل پیل،  $\Delta E$  در این ماکروپیلها برابر خواهد بود با اختلاف پتانسیل مابین نواحی فعال و پسیو بر روی میله فولادی که این پتانسیل می تواند تا حدود  $500 \text{ mV}$  برسد [۱۷].

از طرفی مقاومت الکتریکی بتون نسبت به مقدار رطوبت بسیار حساس می باشد [۱۸]. بنابراین افزایش مقاومت الکتریکی در بتونهای خشک و سطوح فوقانی (نظیر آسفالت) در اندازه گیری پتانسیل مؤثر خواهد بود. سطوح فوقانی با مقاومت الکتریکی بسیار بالا می توانند بعنوان مانعی بر سر راه شدت جریان خوردگی در اندازه گیری پتانسیل خوردگی آرماتورها تأثیرات نامطلوب ایجاد نمایند. این تأثیرات در نواحی آندی متمرکزتر بیش از نواحی کاتدی پلاریزه شده می باشد. نتیجه اینکه قدر مطلق پتانسیل خوردگی که از طریق مدار نیم پیل اندازه گیری می شود مثبت تر از مقدار واقعی آن خواهد بود.

قدر مطلق این پتانسیل بستگی به ضخامت سطح فوقانی دارد تا جائیکه محدوده آن از مقداری ناچیز تا ۲۰۰ الی ۳۰۰ میلی ولت

نمکی مملو از ژل Agar Agar و KCl اشباع استفاده نمود. تماس نوک پروب با سطح بتون بوسیله اسفنج مرطوب برقرار شده است. در این آزمایشات صرفاً به مانیتورینگ پتانسیل خوردگی آرماتورها اکتفا شده است، ولی این روش می‌تواند در مواردی که آرماتورها تحت حفاظت کاتدی واقع می‌شوند و نیز در شرایطی که تحت پلاریزاسیون واقع می‌گردند و همچنین زمانی که از ممانعت کننده‌های خوردگی برای کاهش میزان خوردگی استفاده می‌شوند بکار گرفته شود.

## نتایج و بحث

نقشه (۱) شرایط تغییرات پتانسیل آرماتورهای نمونه A را در شروع آزمایش نشان می‌دهد. در این نقشه طیف رنگها از آبی پر رنگ تا آبی نسبتاً کم‌رنگ می‌باشند. رنگ آبی پررنگ معرف شرایط پسیو در آرماتورها بوده که از پتانسیلهای نسبتاً نجیب و پایدار بوجود آمده است. در این حالت الکتروود مرجعی که سطح بتون را مانیتور می‌کند نسبت به الکتروود مرجع ساکن مقادیر منفی‌تر پتانسیل را اندازه می‌گیرد، بطوریکه اختلاف پتانسیل این دو الکتروود برای هر نقطه منجر به تولید مقادیر منفی برای پتانسیل آرماتورها خواهد شد. از طرفی تمامی نقوشی که برای این آزمایشات ارائه گردیده‌اند مابین پتانسیلهای  $-24$  تا  $+12mV$  که برترتیب مربوط به کاتدی‌ترین و آندی‌ترین نقاط آرماتورها می‌باشند و در آخرین آزمایش مانیتورینگ این اعداد اتخاذ گردیده‌اند تعیین گشته است. دلیل ارائه نقوش در دو محدوده مشخص پتانسیل بدان جهت می‌باشد که طیف رنگها در نقشه‌های مختلف شرایط پسیو و فعال آرماتورها را از ابتدا تا پایان آزمایشات به خوبی نمایان سازد. این روش در ترسیم چنین نقوشی متداول بوده و به آن Normalization گفته می‌شود [۲۵]. در نقشه (۱) ماکزیمم پتانسیل مانیتور شده مابین آندی‌ترین و کاتدی‌ترین نقاط مربوط به آرماتورها برابر با  $8/2mV$  می‌باشد.

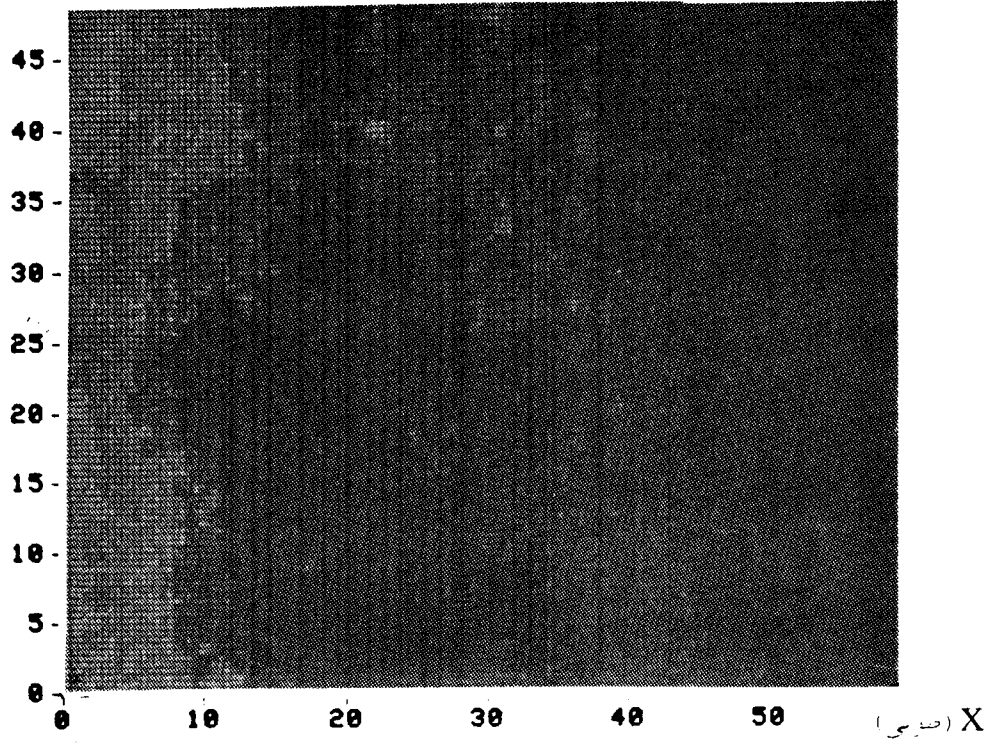
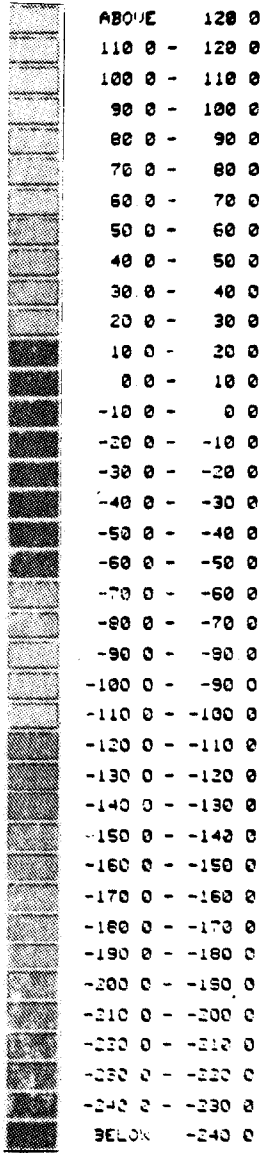
در نقشه (۲) نواحی آندی و کاتدی بوضوح بیشتری هویدا گردیده‌اند. در اثر گذشت زمان (۲ ماه بعد از شروع آزمایش) نواحی پسیو رفته رفته فعال گردیده، ولی خوردگی آرماتورها در قسمتی از سطح بتون بیشتر نمایان است. هر چه به طیف رنگهای قرمز و در انتها زرد نزدیک‌تر می‌شویم، شرایط خوردگی آرماتورها بمراتب بیشتر مشخص می‌شود. چنانچه اگر این نقشه در محدوده ماکزیمم پتانسیل مانیتور شده مابین آندی‌ترین و کاتدی‌تری نقاط روی سطح بتون یعنی پتانسیل  $14/5mV$  ترسیم می‌گردید، تعداد نقاط آندی مربوط به ماکروپیل‌های پراکنده در آرماتورها بطور واضح‌تری

دیفوزیون یون کلر که از طریق  $CaCl_2$  اضافه می‌شود در داخل سیمان سخت شده بمراتب بیش از NaCl می‌باشد [۲۲]. در این نمونه‌ها نسبت سیمان به ماسه ۱:۳ و نسبت آب به سیمان ۰/۶ بوده است. یکی از تأثیرات افزایش آب به سیمان، متخلخل شدن ساختمان بتون می‌باشد [۲۳]. این خلل سبب تسریع در دیفوزیون یونهای کلر شده و سهولت جذب اکسیژن را فراهم کرده و نیز باعث کاهش در مقاومت الکتریکی بتون می‌شود. در مقابل از  $P^H$  محلول در این تخلخلها کاسته شده و زمینه شکست فیلم پسیو بر روی آرماتورها از طریق تأثیرات غلظت بحرانی کلر مهیا می‌گردد [۲۴]. نمونه‌ها پس از آماده شدن بداخل ظروفی که حاوی  $NaCl$  ٪۵ بود منتقل شدند. بطوریکه سطح نمونه‌ها خارج از محلول قرار می‌گرفتند تا اکسیژن به مقدار کافی بتواند بداخل بتون نفوذ کند.

مانیتورینگ پتانسیل - در آزمایشات مانیتورینگ پتانسیل نظر به اینکه قدر مطلق پتانسیل خوردگی که از طریق مدار نیم پیل حاصل می‌شود صرفاً جهت تعیین مواضع خوردگی در آرماتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد و این قدر مطلق به جهاتی که قبلاً اشاره شد منجمله افت پتانسیل می‌تواند تا حدودی همراه کننده باشد، بنابراین برای این آزمایشات از دو الکتروود کاملاً مشابه کالومل استفاده گردید. اساساً اختلاف پتانسیلی که از طریق این دو الکتروود اندازه‌گیری میشود می‌تواند جهت شناسایی کولپلهای گالوانیک حاصل از نقاط آندی و کاتدی بکار گرفته شود. موفقیت این تکنیک قبلاً در شناسایی خوردگی شیاری در آلیاژهای منیزیم [۲۵] و نیز تعیین زمان و توسعه ترک ناشی از SCC و نیز مکان دقیق آن در کامپوزیت‌های آلومینیم به اثبات رسیده است [۲۶]. جهت کسب اطلاعات بیشتر در مورد این سیستم مانیتورینگ علاقه‌مندان چنانچه مایل باشند می‌توانند به راجع مذکور مراجعه نمایند. بطور خلاصه در این روش از دو الکتروود مرجع کاملاً مشابه که یکی بطور ساکن داخل الکترولیت قرار می‌گیرد و دیگری بطور سیستماتیک در دو جهت X (طولی) و Y (عرضی) سطح بتون را مانیتور می‌کند. فواصل مابین اندازه‌گیری‌های پتانسیل در این آزمایشات برابر با ۲ سانتیمتر از هر طرف انتخاب شده است. در هر اندازه‌گیری متوسط ۱۰ پتانسیل مانیتور و از طریق کامپیوتر ضبط گردیده و نتایج بصورت نقوشی برای زمانهای مختلف بوسیله ترسیم‌گر ارائه گردیده است. در این نقشه‌ها مواضع آندی و کاتدی بوضوح نمایان می‌باشند. لازم به یادآوریست که این دو الکتروود مرجع داخل دو پروب مجزا قرار گرفته‌اند زیرا در اندازه‌گیری پتانسیل تماس مستقیم کالومل با محیط خورنده جایز نیست و می‌بایستی از پل

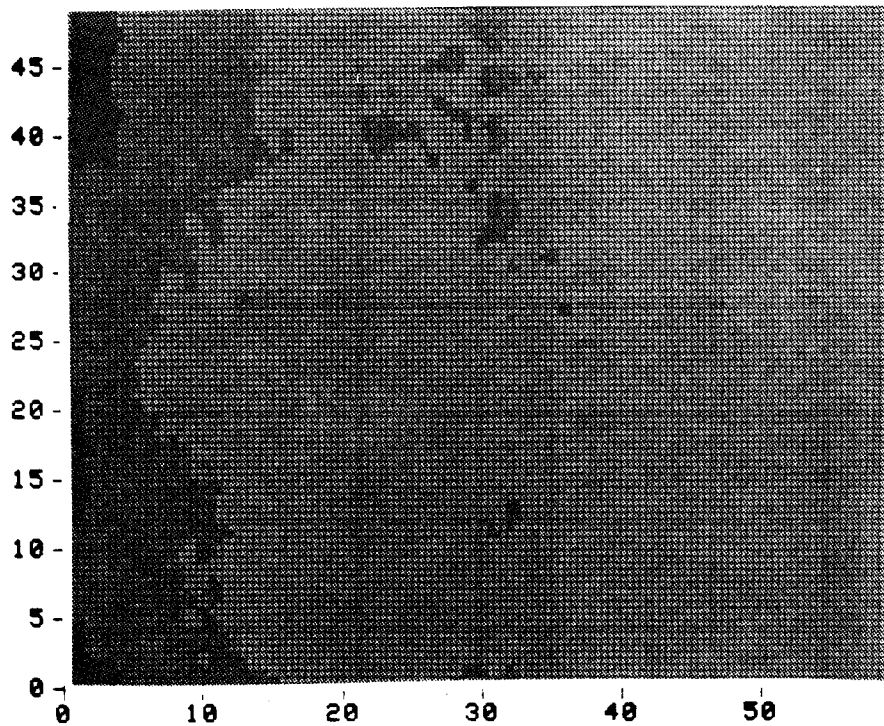
COMMENCEMENT OF THE EXPERIMENT  
 Y (عرضی)

ANODE



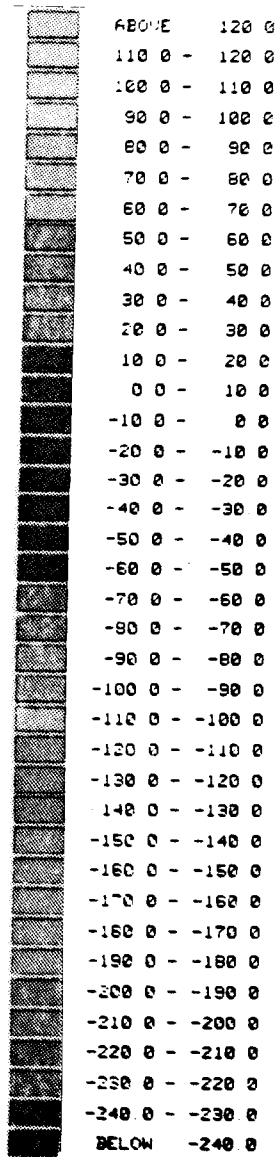
نقشه ۱: تغییرات پتانسیل نمونه A در شروع آزمایش در محلول ۵٪ NaCl.

CATHODE

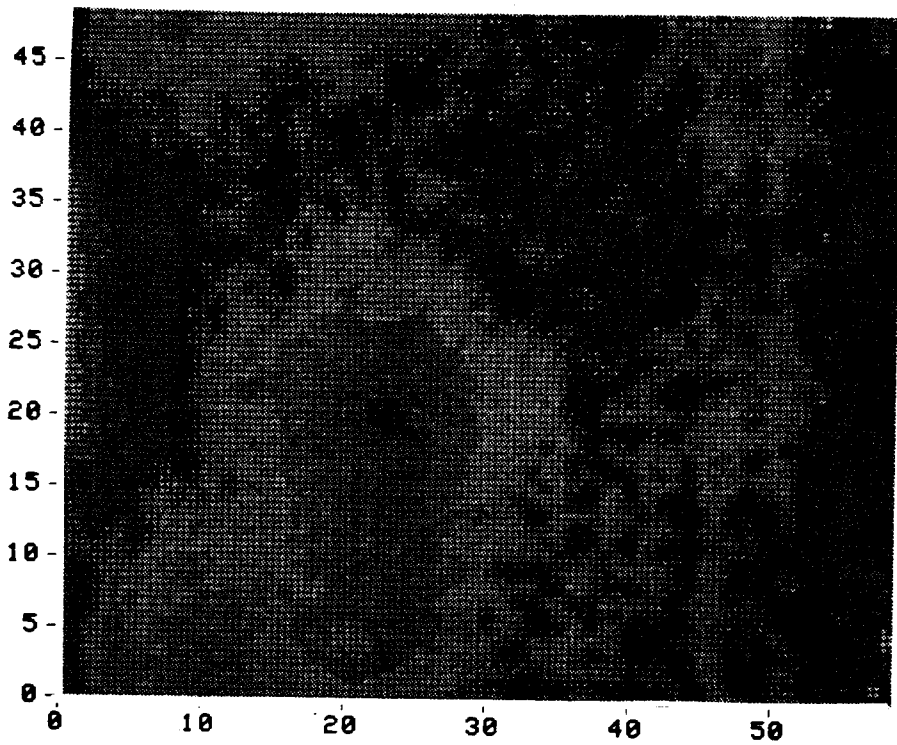


نقشه ۲: تغییرات پتانسیل نمونه A پس از ۲ ماه در محلول ۵٪ NaCl.

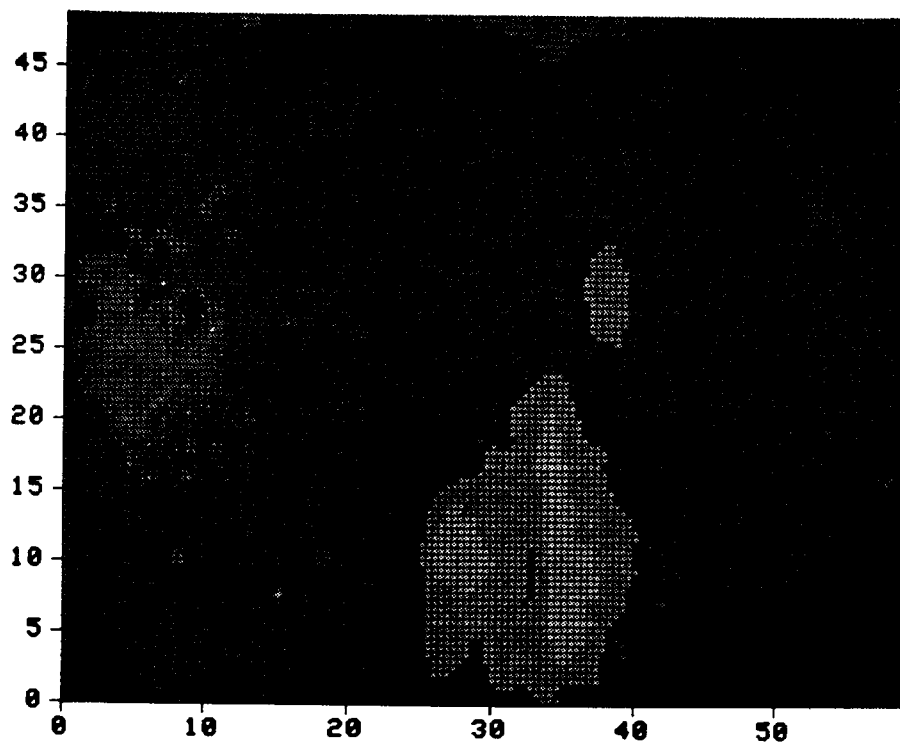
ANODE



CATHODE



نقشه ۳: تغییرات پتانسیل نمونه A پس از ۴ ماه در محلول ۵٪ NaCl.



نقشه ۴: تغییرات پتانسیل نمونه A پس از ۶ ماه در محلول ۵٪ NaCl.

با رنگ زرد مشخص شده است بمقدار بیشتری مورد حمله خوردگی واقع گردیده است. تغییرات پتانسیل در این نقشه برابر با  $36mV$  می‌باشد.

تفاوت اعظم خوردگی فولاد در بتون و دیگر سیستم‌های خوردگی بواسطه دیفوزیون آهسته اکسیژن بداخل ماتریس بتون و هیدروکسید کلسیم جامد یا لایه غلظتی آهک در فاز مشترک فولاد/بتون می‌باشد [۲۹]. این پارامترها بطور کاملاً مشهود می‌توانند سبب ایجاد اختلالات در کسب اطلاعات صحیح مربوط به واکنش‌های الکتروشیمیایی شده و در نحوه تجزیه و تحلیل داده‌ها تاثیر گذارند.

یکی از مزایای ضبط و نگهداری داده‌ها از طریق کامپیوتر در تکنیک مانیتورینگ پتانسیل این می‌باشد که کامپیوتر قادر خواهد بود اطلاعات بسیاری را ضبط و به صور دلخواه ارائه کند. این موضوع می‌تواند در شناسایی خوردگی آرماتورها بسیار مفید واقع گردد، چنانچه نتایج ارائه شده معرف اهمیت این موضوع می‌باشد.

بعد از اتمام این آزمایش در پایان ۶ ماه نمونه A شکسته شد تا میله‌های فولادی داخل آن مورد بازرسی واقع شوند. همانطور که در تصویر ۱ دیده می‌شود، خوردگی در میله فولادی بوضوح پیداست. چنانچه این منطقه با ناحیه خوردگی واقع در نقشه (۴) مطابقت دارد.

نقشه (۶) مربوط به نمونه B می‌باشد که بعد از ۶ ماه مانیتورینگ پتانسیل روی آن انجام شده است. این نمونه همانطور که قبلاً اشاره شد از سه ترکیب مجزا تشکیل شده است. همانطور که از این نقشه پیداست حدود نیمی از نمونه B کاملاً شرایط آندی آرماتورها را نشان می‌دهد. این نیمه از نمونه B شامل  $CaCl_2$  ۳٪ می‌باشد. در محدوده ۱ دیگر که چسبیده به این قسمت می‌باشد رفتار خوردگی به میزان کمتری مشهود می‌باشد. در این ناحیه طیف رنگها از قهوه‌ای کم رنگ به آبی کم‌رنگ تغییر کرده است. در این ناحیه غلظت  $CaCl_2$  برابر با ۱٪ می‌باشد. در ۱ مابقی نمونه B که غلظت  $CaCl_2$  برابر با صفر می‌باشد شرایط قلیایی محیط بتون بوضوح رویت می‌گردد. هدف از ساخت و انجام آزمایش بر روی نمونه B نشان دادن قابلیت سیستم مانیتورینگ در تشخیص و تفکیک نواحی مختلف بر روی نمونه‌ای که عمداً با ترکیبات مختلف تهیه شده می‌باشد. نقشه (۶) می‌تواند به عنوان شاهدی بر این مدعا تلقی گردد.

نتایج ارائه شده از طریق استفاده از سیستم مانیتورینگ پتانسیل بوسیله دو الکتروود مرجع نشان داده است که چنین سیستمی می‌تواند برای شناسایی نواحی خوردگی در بتونهای مسلح بعنوان

مشخص می‌شدند. در قسمتهایی که تخریب موضعی فیلم پسیو بر روی آرماتورها اتفاق می‌افتد، تداوم خوردگی تحت تأثیر وجود و یا عدم وجود ماکروپیلها قرار خواهد گرفت. این ماکروپیلها توسط همزیستی نواحی پسیو و فعال روی یک میله فولادی ایجاد خواهند شد که تولید کویل‌های گالوانیک می‌کنند. بنا به اظهارات آگیلار و همکارانش (Agilar et al) تداوم خوردگی تحت تأثیر این ماکروپیلها خواهد بود. بطوریکه برای خوردگی آرماتورهای بتون تحت شرایط مشابه با این آزمایشات، انحلال فلز در نواحی اتفاق می‌افتد که تماس بیشتر با الکتروولیت وجود داشته باشد و تواماً احیاء اکسیژن بطور انتخابی در قسمتهایی از بتون صورت خواهد گرفت که از طریق آب اشباع نشده باشد. بررسی شدت جریان حاصل از تفاوت در اختلاف دمشی هواگواه بر دلالت شرایط مذکور عنوان شده است [۲۷].

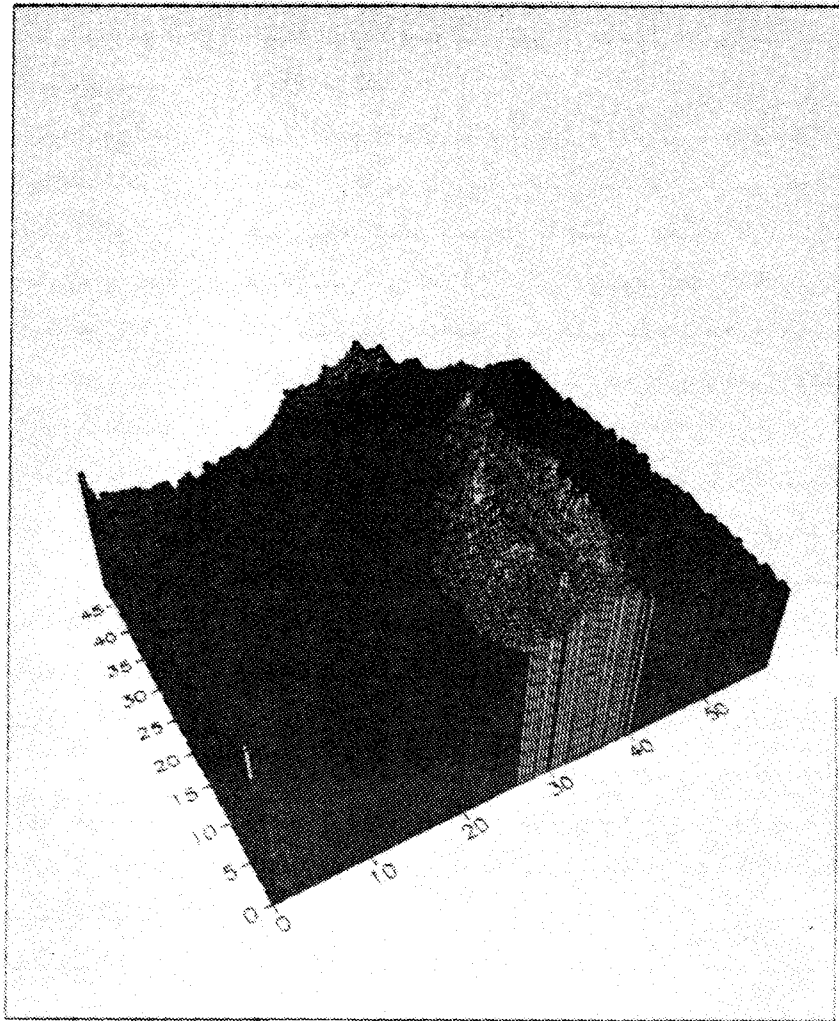
در شرایط ایده‌آل حفاظت آرماتورها از طریق ایجاد لایه پسیو در pH های ۹ تا حدود ۱۳ (شرایط قلیایی در آب تخلخلها) صورت می‌پذیرد. تخریب موضعی این لایه پسیو در اثر کمبود و یا اختلاف غلظت اکسیژن و یا وجود کلر صورت می‌گیرد. همچنین از دیگر عوامل کاهش در شرایط آلتالی آب تخلخلها نفوذ دی اکسید کربن بداخل بتون می‌باشد که نهایتاً تخریب لایه پسیو را بدنبال خواهد داشت. نوسانات پتانسیل و تغییر مواضع فعال به پسیو و یا بالعکس توام با تغییرات پتانسیل از  $100$  - به  $400mV$  - (نسبت به الکتروود مرجع نقره) برای مدت ۶ ماه گزارش شده است، بطوریکه تبدیل نواحی فعال پس از گذشت زمان به نواحی پسیو و یا بالعکس در شناسایی مناطق خوردگی مشکل آفرین خواهد بود [۲۸]. این موضوع به اهمیت مانیتورینگ پتانسیل و ارائه نقشه‌های تغییرات پتانسیل نسبت به زمان برای زمانهای مختلف می‌افزاید. چنانچه برای تشخیص خوردگی بتونهای مسلح نباید صرفاً به یکبار اندازه‌گیری پتانسیل به طور پراکنده بر روی سطح سازه بتونی اکتفا نمود. زیرا نتایج حاصل از اینگونه اندازه‌گیریها می‌توانند بسیار گمراه کننده باشند.

مراجعه به نقشه‌های (۳) و (۴) بازگو کننده این واقعیت می‌باشد. چنانچه بعد از گذشت حدود ۶ ماه، خوردگی در منطقه خاصی از بتون متمرکز شده و همانطور که نقشه (۴) پیداست دیگر مناطق آندی تحت تأثیر این منطقه به مناطق غیر فعالتر مبدل شده است. نقشه ۵ تصویر سه بعدی نقشه (۴) را نمایان می‌سازد. همانطور که مشاهده می‌شود، عمق خسارات ناشی از خوردگی آرماتورها در این نقشه بطور واضح تری هویدا می‌باشد. بررسی طیف رنگها نمایانگر شرایط مخرب در تمامی سطوح بتون A می‌باشد، ولی منطقه‌ای که

ANODE

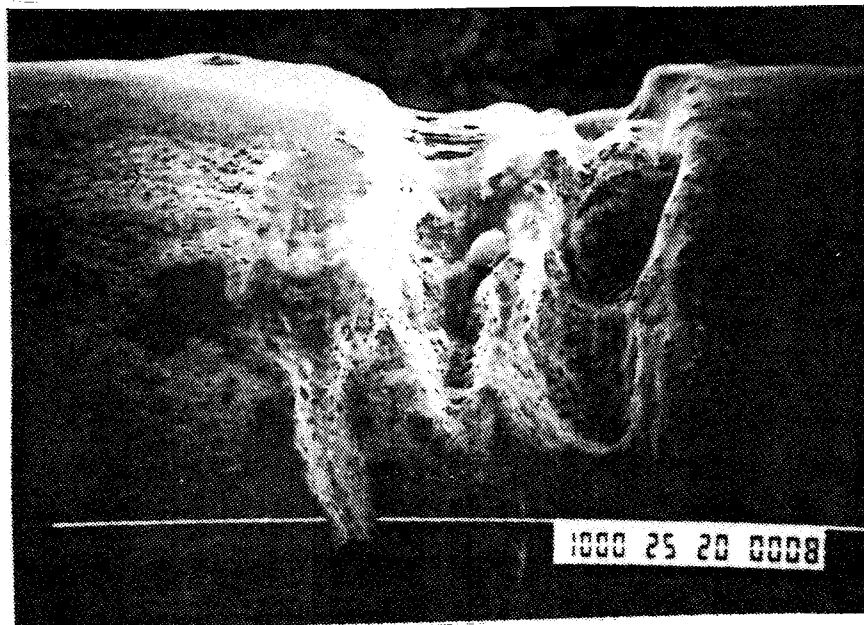


ABOVE	120 0
110 0 -	120 0
100 0 -	110 0
90 0 -	100 0
80 0 -	90 0
70 0 -	80 0
60 0 -	70 0
50 0 -	60 0
40 0 -	50 0
30 0 -	40 0
20 0 -	30 0
10 0 -	20 0
0 0 -	10 0
-10 0 -	0 0
-20 0 -	-10 0
-30 0 -	-20 0
-40 0 -	-30 0
-50 0 -	-40 0
-60 0 -	-50 0
-70 0 -	-60 0
-80 0 -	-70 0
-90 0 -	-80 0
-100 0 -	-90 0
-110 0 -	-100 0
-120 0 -	-110 0
-130 0 -	-120 0
-140 0 -	-130 0
-150 0 -	-140 0
-160 0 -	-150 0
-170 0 -	-160 0
-180 0 -	-170 0
-190 0 -	-180 0
-200 0 -	-190 0
-210 0 -	-200 0
-220 0 -	-210 0
-230 0 -	-220 0
-240 0 -	-230 0
BELOW	-240 0



نقشه ۵: تغییرات پتانسیل نمونه A پس از ۶ ماه در محلول ۵٪ NaCl.

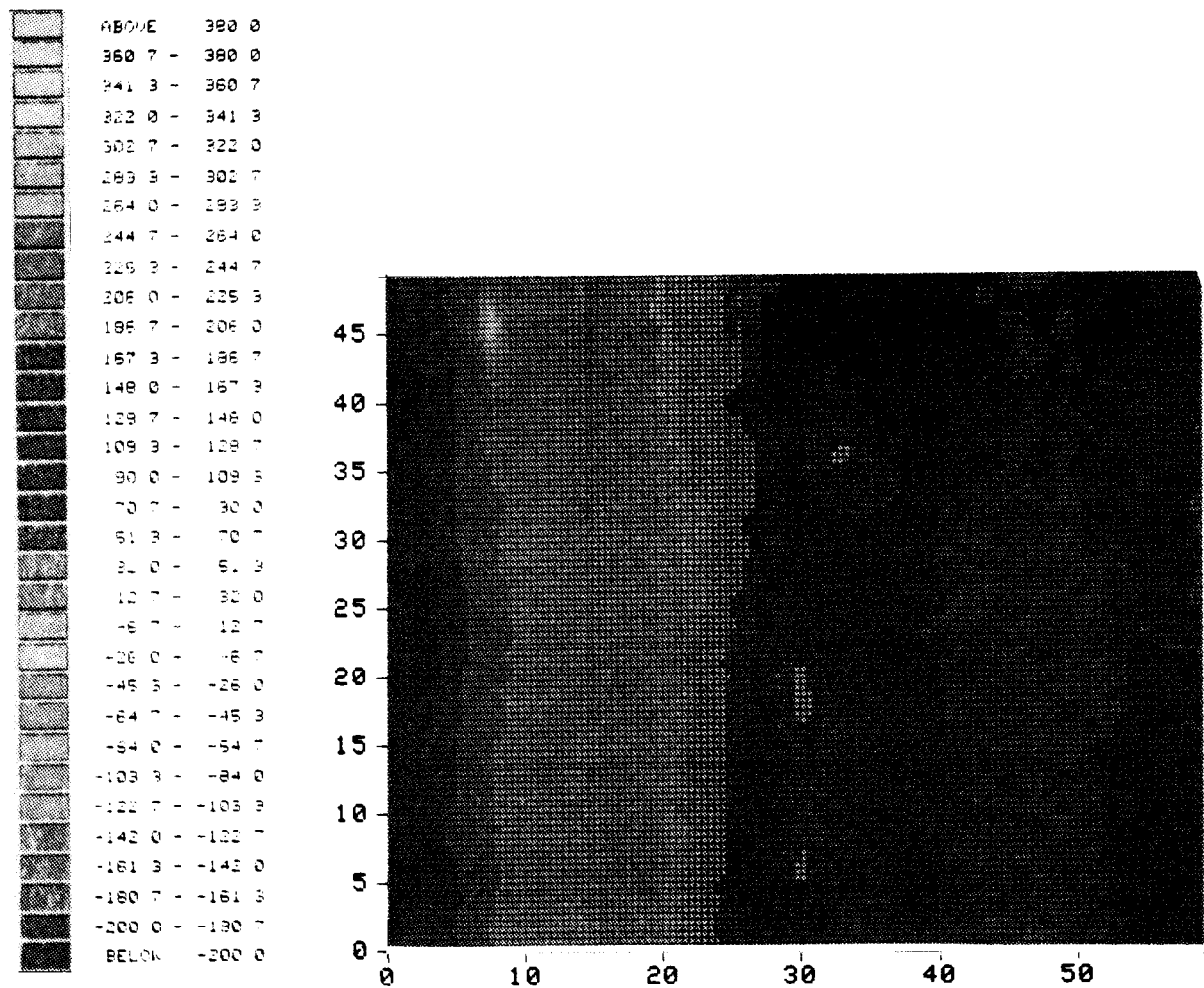
CATHODE



تصویر ۱: ناحیه خوردگی در یکی از میله های فولادی پس از برداشتن بتون.



## ANODE



## CATHODE

نقشه ۶: تغییرات پتانسیل نمونه B پس از ۶ ماه در محلول ۵٪ NaCl.

می‌باشد. نظر به اینکه پتانسیل خوردگی یک فرایند ترمودینامیک می‌باشد، بنابراین از این طریق نمی‌توان سرعت خوردگی را محاسبه نمود.

در این آزمایشات رفتار خوردگی از طریق مانیتورینگ تغییرات پتانسیل نسبت به زمان مورد ارزیابی واقع شده است. بطوریکه اختلاف پتانسیل حاصل از آندی‌ترین (فعال‌ترین) و کاتدی‌ترین (پسیو‌ترین) ناحیه مربوط به آرماتورها که از طریق دو الکتروود مرجع کالومل اندازه‌گیری شده‌اند از  $8/2\text{mV}$  در زمان شروع آزمایشات به  $36\text{mV}$  پس از ۶ ماه افزایش یافته است. بازرسی مناطق خورده شده روی میل‌های فولادی با نقشه‌های تغییرات پتانسیل کاملاً منطبق بوده‌اند.

یک سیستم مؤثر بکار گرفته شود، نقشه‌های مانیتورینگ پتانسیل در زمانهای مختلف جهت مطالعه رفتار خوردگی بسیار ارزشمند بوده و با برنامه‌ریزی اصولی می‌توان زمان شروع و توسعه حفره‌ها را در آرماتورها تعیین نمود. روش مانیتورینگ پتانسیل می‌تواند بعنوان یک سیستم اخطار دهنده به موقع جهت جلوگیری از وقایع ناگوار ناشی از تخریب پلها، تاسیسات بتونی، پلاتفرمهای نفتی و غیره مورد استفاده واقع شود [۳۰].

## نتیجه‌گیری

هدف از اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورها در بتون تفکیک نواحی آندی و کاتدی و نیز شناسایی قسمتهای خورده شده در آرماتورها

نوسانات نواحی آندی و کاتدی نسبت به زمان دنبال کند. با استفاده از نتایج حاصله از این روش به همراه اطلاعات مربوط به مقاومت الکتریکی بتون و نیز غلظت کلر در آب تخلخلهای موجود در بتون می توان سرعت خوردگی در آرماتورها را محاسبه نمود [۳۱].

این آزمایشات نشان داده اند که تکنیک مانیتورینگ پتانسیل بعنوان یک روش غیر مخرب قادر است که رفتار خوردگی بتونهای مسلح را تعیین نماید. این روش بعنوان یک سیستم اخطار دهنده سریع و مطمئن قادر است که روند خوردگی را بالاخص در رابطه با

## مراجع

- 1 - Isecke, B. (1982). *Materials Performance*. Vol. 21, No. 12, P.36.
- 2 - (1984). "Salt flattens old garage." *Eng. Record*, June 4, P. II.
- 3 - Litvan, G. and Bickley, J. (1987). "In concrete durability." *J. Scanlon, Ed., Am. Concrete Inst. SP 100*, Detroit, PP. 1503 - 1523.
- 4 - (1985). *Strategic highway research program*. Washington, DC, Sept. P.TRA 4 - 1.
- 5 - Stradfull, R. (1986). *Materials Protection*. Vol. 7, No. 3, P. 29.
- 6 - Hope, B. and Ip, A. (1987). "Material." *J., Am. Concrete Inst.*, July - Aug. PP. 306 - 314.
- 7 - Hope, B., Ip, A. and Manning, D. (1985). *Cement and concrete research*. Vol. is, PP. 525 - 534.
- 8 - Fujiwara, T. (1987). "In concrete durability." *J. Scanlon, Ed., Am. Concrete Inst. SP 100*. Detroit, PP. 805 - 188.
- 9 - Darwin, D., Manning, D., Hognestad, E., Beeby, A., Rice, P., and Ghowarwal, A. (1985). *Concrete international*. Vol. 7, No. 5, P. 20.
- 10 - Stradfull, R. F. (1973). "Halfcell potentials and the corrosion of steel in concrete." *Highway Research Record*. Vol. 433, P. 12.
- 11 - Cavalier, P. G and Vassie, P. R. (1981). *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 70, P. 461.
- 12 - Arup, H. *Steel in concrete newsletter*. Korrosin Scentralen.
- 13 - Broomfield, J. P., longford, P. E. and Ewins, A. J. (1990). "Corrosion rates of sreel in concrete." *ASTM STP 1065*, PP. 157-173.
- 14 - Van Daveer, J. R. (1975). *J. of am. concrete inst.*, Vol. 12, PP. 697 - 704.
- 15 - Browne, R. D., Geoghegan, M. P. and Baker, A. F. (1985). "Corrosion of reinforcement in concrete construction." *Ed.A.P. Crane*, London, PP. 201 - 221.
- 16 - Denaro, A. R. (1965). *Elementary electrochemistry*, Butterworth, hondon.
- 17 - Elsener, B. and Bohni, H. (1990). "Corrosion rates of sfeel in concrete." *ASTM STP 1065*, PP. 143 - 156.
- 18 - Browne, R. D. (1982). "Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride, environments." *Durability of Building Materials*, Amsterdam, Vol. 1, PP. 113 - 125.
- 19 - Popovis, S., Simenov, Y. and Bozhinov, G. (1983). "Corrosion." *Soc. of chem. Industry*, london, P. 19.
- 20 - Baker, A. F. (1986). "Potential mapping teshniques." *Semimar on Corrosion in concrete*, London Press Centre, 13 Hay Paper No.3.
- 21 - Hansson, C. M., Frolund, T. and Markussen, J.B. (1985). *Cement and conerete research*, Vol. 15, PP. 65 - 73.

- 22 - Kondo, R., Satake, M. and Ushiyama, H. (1974). *Proc., 28th general tech. session of the cement assoc. of Japan*, PP. 41 - 43.
- 23 - Byfors, K. (1986). *Nordic concrete research*, No. 5, PP. 27 - 38.
- 24 - Sorensen, B. and Maahn, E. (1982). *Nordic concrete research*, Pub. No. 1, P. 24.
- 25 - Allahkaram, S. R., Vasantasree, S. and Hocking, M, G.(1991). "New instrumentation method for mapping of SCC specimens using SRET." *Proc. International Corrosion conference*, Manchester, Vol.2, 22 - 24.
- ۲۶ - الله کرم، س. ر. "Potential Mapping of an Aluminum Composit Specimen" سومین کنگره ملی خوردگی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران (۱۳۷۲).
- 27 - Aguilar, A., Sagues, A. A. and Powers, R. G. (1990). "Corrosion measurements of reinforcing steel in partially submerged concrete slabs." *ASTM STP 1065*, PP. 66 - 85.
- 28 - Gurusamy, K. N. and Geoghegan, M. P. (1985). "In corrosion of reinforcement in concrete." Ed. C.L. Page, *Soc. of Chem. Ind.*, London, P. 340.
- 29 - Page, C. L. (1975). *Nature*, P.258.
- ۳۰ - الله کرم، س. ر. "بررسی تکنیکهای مانیتورینگ خوردگی در نیروگاهها." سمینار مبدل‌های حرارتی، پژوهشگاه نیرو، ۳۰ شهریور (۱۳۷۷)، ص ۱۱۴ - ۱۱۸.
- 31 - Elsener, B. and Bohni, H. (1985). *Proc., Europ. congr. of corrosion*, Vol. 1, Nov. 19 - 21, P. 1.

### واژه نامه :

1 - Freez - Thaw

یخ زدگی

2 - Titration

غلظت یابی

3 - Junction Potential

پتانسیل اتصال

