

## مروری بر انواع روش های پایش خوردگی آرماتور در سازه های بتن مسلح

مهلا سالاریان زاده<sup>۱</sup>، محمدجواد میرزایی<sup>۲</sup>، محمدحسین طالب پور<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

m.h.talebpour@du.ac.ir

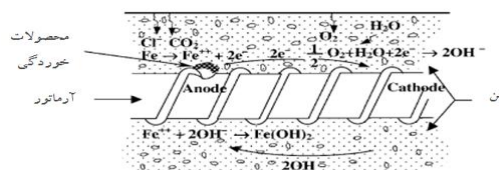
### خلاصه

یکی از مهم ترین دلایل خرابی سازه های بتن مسلح در محیط های خورنده به ویژه مناطق حاشیه خلیج فارس و دریای عمان، خوردگی آرماتورها می باشد. با توجه به اهمیت موضوع، در دهه های گذشته بسیاری از محققین از منظرهای گوناگون این پدیده را مورد بررسی قرار داده اند. یکی از جنبه های اصلی و مهم، پایش سازه های بتن مسلح از نظر میزان خوردگی آرماتورها می باشد. با توجه به این موضوع، در این مقاله سعی شده است انواع روش های پایش خوردگی آرماتورها در سازه های بتن مسلح مورد بررسی قرار داده شود و مقایسه ای بین آنها از نظر میزان دقت و عملکرد انجام شود. کلمات کلیدی: سازه های بتن مسلح، خوردگی آرماتور، محیط های خورنده، پایش سلامت.

### ۱. مقدمه

امروزه، علیرغم تئوری و عملکرد مطلوب سازه های بتن مسلح، خوردگی آرماتورهای تعبیه شده در آنها به عنوان اصلی ترین مسئله تهدید کننده دوام و پایایی سازه های بتنی به خصوص در شرایط محیطی خورنده مانند محیط های دریایی مطرح شده است. به همین دلیل در اکثر کشورها سالانه هزینه های زیادی صرف تعمیر و بازسازی سازه های بتنی می شود. در سواحل جنوبی ایران، که به عنوان یکی از خورنده ترین محیط های دریایی شناخته می شود [۱]، سازه های بتنی در معرض خوردگی شدید قرار دارند؛ بنابراین داشتن دانش کافی در خصوص پدیده خوردگی فولاد در بتن، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

آرماتورهای تعبیه شده در بتن، در ابتدا به علت محیط قلیایی ایجاد شده توسط بتن از خطر خوردگی محافظت می شوند. در این حالت آرماتورها، غیرفعال نامیده می شوند. در اثر نفوذ یون کلرید و دی اکسید کربن، مقدار pH محیط کاهش یافته و محیط اسیدی می شود و در نتیجه لایه محافظ آرماتورها از بین رفته و خوردگی آغاز می شود [۲]. فرآیند خوردگی در آرماتورها، در دو محل مجزا ولی وابسته به هم اتفاق می افتد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است جریان الکتریکی باید به صورت یک حلقه بسته بین دو محل جریان داشته باشد تا واکنش های شیمیایی پیشرفت کنند. این فرآیند کاملاً شبیه فرآیندی است که در یک باتری خشک اتفاق می افتد و تولید برق می کند. این چنین باتری هایی را پیل های گالوانیکی می نامند و به همین دلیل در بعضی از مواقع خوردگی فولاد در بتن را خوردگی گالوانیکی می نامند [۳].



شکل ۱- شکل شماتیک خوردگی فولاد در بتن [۳]



# سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



برای خوردگی آرماتورها، دو واکنش الکتروشیمیایی اتفاق می افتد که به واکنش های آندیک و کاتدیک موسوم هستند و مناطقی از فولاد که این واکنش ها در آن مناطق اتفاق می افتد، مناطق آندیک و کاتدیک یا به اختصار آند و کاتد نامیده می شود [۳]. این واکنش ها عبارت است از:

- واکنش های آندی



- واکنش های کاتدی



الکترونی هایی که در اثر واکنش آندیک به وجود می آیند به نواحی کاتدیک جریان پیدا می کنند و در این نواحی مطابق واکنش کاتدیک مصرف می شوند و این جابجایی متقابل یونی در محلول منافذ بتن نیز جریان دارد که جریان خوردگی نامیده می شود. ایجاد چنین جریانی لازمه فرآیند خوردگی می باشد و با قطع این جریان، فرآیند خوردگی نیز متوقف می شود.

خوردگی فولاد در بتن در مناطق آندی اتفاق می افتد. چنانچه در واکنش های آندی نشان داده شده است، اتم های آهن به یون های  $Fe^{2+}$  یونیزه می شوند. این یون ها در محلول منافذ بتن نفوذ کرده و الکترونی هایی در سطح فولاد به جا می گذارند که در اثر آن پتانسیل الکتریکی افزایش می یابد. الکترونی های موجود در سطح آرماتور در طول آرماتور جریان می یابند و به کاتد رفته و مطابق واکنش های کاتدی مصرف می شوند. این واکنش ها تا زمانی ادامه پیدا می کنند که واکنش کاتدی فعال بوده و الکترونی های تولید شده در ناحیه آندی در کاتد مصرف شود. بنابراین می توان به این نکته مهم دست یافت که اگر اکسیژن و آب در مناطق کاتدی وجود نداشته باشند، فرآیند خوردگی ادامه نخواهد یافت.

به دنبال عمل اکسیداسیون آهن، محصولات متنوعی تولید می شود که پایدارترین آن ها زنگ قرمز می باشد. سودا و همکاران [۴] نشان دادند که محصولات خوردگی حجمی ۲ تا ۶ برابر حجم اولیه دارند. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی فولاد و محصولات اصلی خوردگی آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی فولاد و محصولات خوردگی [۵-۸]

محصول	نماد	چگالی	نسبت حجمی محصول به فولاد مادر
Iron	Fe	۷,۸۷	۱
Iron oxide	FeO	۵,۷۴	۱,۷۰
Hematite	$1/2 Fe_2O_3$	۵,۱۷	۲,۰۰
Magnetite	$1/3 Fe_3O_4$	۵,۲۴	۲,۱۰
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$	۴,۲۶	۲,۹۱
Aragonite	$\beta\text{-FeOOH}$	۳,۵۶	۳,۴۸
Lapidocrocite	$\gamma\text{-FeOOH}$	۴,۰۹	۳,۰۳
Ferrous hydroxide	$Fe(OH)_2$	۳,۴۰	۳,۶۰
Ferric hydroxide	$Fe(OH)_3$	۳,۹۰	۴,۰۰
Hydrated ferric oxide	$Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$	۲,۷۴	۶,۱۵

تجمع محصولات خوردگی در اطراف آرماتور، باعث ایجاد یک فشار داخلی در اطراف آرماتور می شود. نتیجه ایجاد چنین فشاری، ایجاد تنش های کششی در داخل بتن می باشد. زمانی که تنش های کششی ایجاد شده در بتن از مقاومت کششی بتن تجاوز کند، بتن دچار ترک خوردگی می شود. با ادامه فرآیند خوردگی، میزان ترک ها افزایش یافته و در نهایت قسمتی از پوشش بتنی تخریب شده و به این ترتیب عمر مفید سازه ها به شدت کاهش

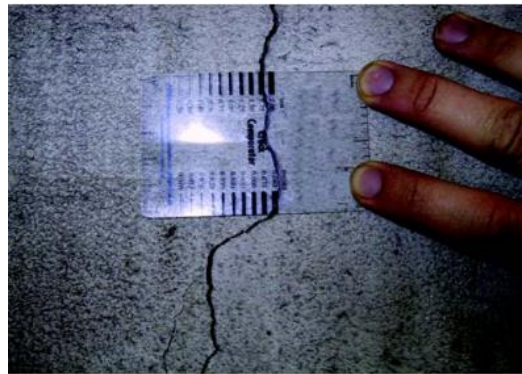
می‌باید. با توجه به اهمیت موضوع، پایش سازه‌های بتن مسلح از نظر میزان خوردگی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در دهه‌های گذشته، محققین روش‌های بسیار متنوعی برای پایش سازه‌های بتن مسلح پیشنهاد کرده‌اند که هر کدام از آن‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد. در این مقاله، سعی شده است تمامی روش‌های موجود در بحث پایش خوردگی سازه‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته شود و مقایسه‌ای بین آن‌ها انجام شود.

#### ۲. روش‌های پایش خوردگی

در دهه‌های اخیر، روش‌های پایش خوردگی متعددی برای سازه‌های بتن مسلح توسط محققین ارائه شده است. در ادامه هر یک از این روش‌ها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است:

##### ۲.۱. روش‌های بازرسی چشمی

روش‌های بازرسی چشمی، یکی از ابتدایی‌ترین و ساده‌ترین روش‌های پایش خوردگی در سازه‌های بتن مسلح می‌باشد. هدف از بازرسی چشمی، رصد کردن آسیب‌های ناشی از خوردگی آرماتورها در سازه‌های بتن مسلح، مانند ترک خوردن پوشش بتنی، می‌باشد (شکل ۲) [۹]. این روش علیرغم این که بسیار ساده می‌باشد، اما نیاز به تجربه و مهارت بسیار زیادی دارد؛ زیرا قضاوت کردن در خصوص میزان آسیب دیدگی یک سازه و تخمین عمر مفید آن از روی مشاهده ترک‌ها و سایر آسیب‌های ظاهری، کار بسیار سختی بوده و مهارت بسیار بالای فرد را می‌طلبد.



شکل ۲- اندازه‌گیری عرض ترک در بازرسی چشمی [۹]

##### ۲.۲. روش اندازه‌گیری ضخامت پوشش بتنی

ضخامت پوشش بتنی یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده خوردگی آرماتورها در داخل بتن می‌باشد؛ به همین دلیل بسیاری از آیین‌نامه‌ها با توجه به شرایط محیطی، حداقل مقدار ضخامت پوشش بتنی را پیشنهاد کرده‌اند. به عنوان مثال، محبت نهم از مقررات ملی ساختمان، حداقل ضخامت پوشش بتنی برای قطعات بتنی در شرایط محیطی مهاجم را برابر ۷۵ میلی‌متر پیشنهاد می‌کند [۱۰]. با توجه به اهمیت موضوع، کلیور و کی در سال ۱۹۷۳ روش اندازه‌گیری ضخامت پوشش بتنی را ارائه کردند [۱۱]. بر اساس این روش و با کمک دستگاهی با نام کاورمتر، ضخامت پوشش بتنی، قطر آرماتور و موقعیت آرماتورها بررسی می‌شود. شکل ۳ نمونه‌ای از یک کاورمتر را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به دست آمده از این روش، در قسمت‌هایی از سازه که ضخامت پوشش بتنی از مقدار مجاز کمتر شده است، مشخص می‌شود. این قسمت‌ها به دلیل افزایش نفوذپذیری در معرض خوردگی شدید قرار دارند و به همین دلیل باید تمهیدات لازم برای ترمیم و تقویت سازه در آن قسمت‌ها اتخاذ کرد.





شکل ۳- کاورمتر [۱۲]

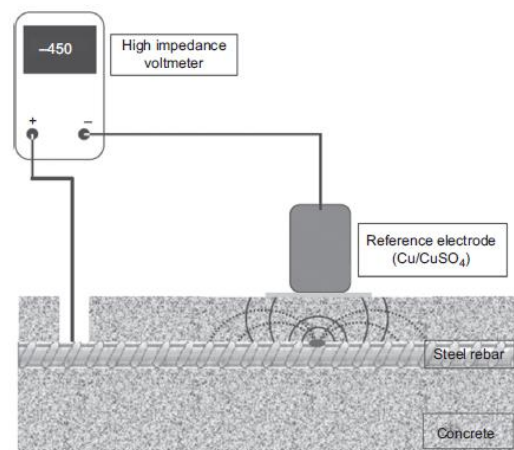
## ۲,۳. روش اندازه گیری پتانسیل مدار باز

روشی تحت عنوان پتانسیل مدار باز در سال ۱۹۹۲ توسط هرالده و همکاران [۱۳] ارائه شد. در سال ۱۹۹۹ این روش در استاندارد ASTM C۸۷۶ تحت عنوان "روش آزمایش برای پتانسیل نیم پیل در سازه های بتن مسلح" ذکر شد [۱۴]. اندازه گیری پتانسیل مدار باز، رایج ترین روش برای پایش سازه های بتن مسلح می باشد. روش اندازه گیری پتانسیل مدار باز بر اصل اندازه گیری پتانسیل خوردگی میلگرد نسبت به یک الکتروود مبنای استاندارد مانند الکتروود جیوه سفید اشباع شده (CSE) استوار است. اندازه گیری پتانسیل مدار باز در صورتی که آرماتورهای موجود در سازه در معرض محیط باز باشند، یک تکنیک مفید در پیدا کردن جایگاه آندی و کاتدی در سازه های بتن مسلح می باشد (شکل ۴). مطابق جدول ۲، با کمک روش اندازه گیری پتانسیل مدار باز اطلاعات قابل توجهی از یک حوزه ساختاری بزرگ بدست می آید. بر اساس جدول فوق، در صورتی که مقدار پتانسیل به دست آمده از این روش کمتر از ۵۰۰- میلی ولت باشد، احتمال خوردگی در آن منطقه بسیار بالاست. این روش مانند سایر روش ها دارای مزایا و معایب خاص خود می باشد. تخمین سریع میزان خوردگی، صرفه جویی اقتصادی، آسان بودن روش انجام آزمایش، ترسیم نقشه خطوط هم پتانسیل و غیرمخرب بودن آزمایش از جمله مزایای این روش می باشد. علیرغم تمام مزایای ذکر شده، روش اندازه گیری پتانسیل مدار باز دارای محدودیت هایی همچون عدم دستیابی به سرعت خوردگی، نیازمند بودن به اپراتور متخصص و تاثیر پذیری از عوامل محیطی می باشد [۱۵].

## جدول ۲- جدول احتمالات خوردگی بر اساس روش اندازه گیری

### پتانسیل مدار باز [۱۴]

پتانسیل (میلی ولت)	احتمال خوردگی
< -۵۰۰	احتمال خوردگی بیش از ۹۰ درصد است.
-۳۵۰	احتمال خوردگی کمتر از ۹۰ درصد است.
-۲۰۰ to -۳۵۰	احتمال خوردگی در حدود ۵۰ درصد است.
> -۲۰۰	احتمال خوردگی کمتر از ۱۰ درصد است.

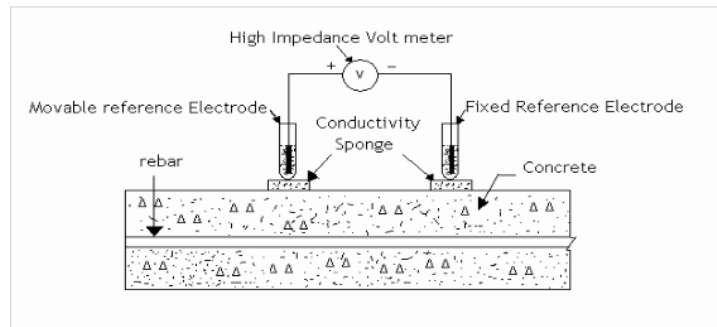


شکل ۴- روش اندازه گیری پتانسیل مدار باز [۱۶]

## ۲,۴. روش اندازه گیری پتانسیل سطح

روش اندازه گیری پتانسیل سطح در سال ۱۹۹۵ توسط ایلزبیک مطرح شد. [۱۳] در طول فرایند خوردگی، یک جریان الکتریکی بین آند و کاتد از طریق بتن ایجاد می شود و این جریان را می توان با اندازه گیری افت پتانسیل در بتن شناسایی کرد. مطابق شکل ۵، در این روش با استفاده از دو الکتروود مینا که یکی بر روی سطح بتن ثابت نگه داشته می شود و الکتروود دیگر در طول سطح بتن حرکت داده می شود، پتانسیل سطح بین دو نقطه متفاوت

اندازه گیری می شود. احتمال خوردگی میلگرد را با کمک این روش می توان بدست آورد. روش اندازه گیری پتانسیل سطح، به عنوان یک آزمایش غیر مخرب محسوب می شود. سانگ و همکاران (۲۰۰۷) [۱۳] نشان دادند که هر چه اختلاف پتانسیل بین مناطق آندی و کاتدی بیشتر باشد، احتمال رخداد خوردگی بیشتر است در این روش هیچگونه اتصال الکتریکی به میلگرد نیاز نیست. همچنین علاوه بر خوردگی موضعی، برای تشخیص آسیب های مکانیکی و اطلاع از وضعیت میلگردهای فولادی تعبیه شده در بتن هم، می توان از این روش به عنوان یک تکنیک غیر مخرب استفاده کرد.



شکل ۵- طرح شماتیک روش اندازه گیری پتانسیل سطح [۱۷]

## ۲,۵ روش اندازه گیری مقاومت بتن

روش اندازه گیری مقاومت ویژه بتن در سال ۲۰۰۲ توسط موریس و همکاران ارائه شد [۱۳]. مقاومت الکتریکی بتن یک پارامتر مهم جهت تعیین شدت شروع فرایند خوردگی است. مقاومت الکتریکی بتن، به کیفیت بتن و شرایط محیطی همچون رطوبت نسبی و درجه حرارت بستگی دارد. این پارامتر به طور غیر مستقیم برای ارزیابی خواص بتن از قبیل انتشار یون کلرید و درجه اشباع بتن نیز کاربرد دارد. علاوه بر این، اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن اطلاعات مفیدی در مورد عملکرد خوردگی میلگردها در بتن ارائه می کند. مطابق جدول ۳، در بتن های با مقاومت الکتریکی بالا فرایند خوردگی کندتر خواهد بود، زیرا جریان به راحتی قابلیت تردد بین مناطق کاتدی و آندی را ندارد و واکنش های آندی و کاتدی به کندی صورت می گیرد.

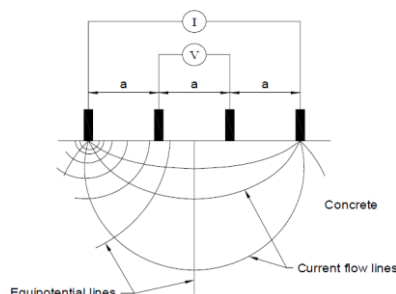
جدول ۳- میزان خوردگی در مقایسه با مقاومت الکتریکی بتن [۱۷]

مقاومت الکتریکی بتن (اهم-سانتی متر)	خطر خوردگی
بیش تر از ۲۰۰۰۰	قابل صرف نظر
۲۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰	کم
۱۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰	زیاد
کمتر از ۵۰۰۰	بسیار زیاد

به طور کلی، مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از تکنیک های گوناگون برای نمونه هایی با ابعاد و طرح های متفاوت با فرض اتصال کامل الکترودهای اعمالی به نمونه و تنظیم فاصله گذاری بین آن قابل اندازه گیری است. معمول ترین تکنیک بکار رفته در اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن در موقعیت های کارگاهی، تکنیک چهار الکترودی بوده که به آن تکنیک ونر نیز گفته می شود [۱۸]. شکل ۶، مدل اندازه گیری و شکل ۷ تجهیزات اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن با استفاده از این روش را نشان می دهد.



شکل ۷- تجهیزات اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن



شکل ۶- طرح شماتیک اندازه گیری مقاومت الکتریکی بتن

در این روش، جریان معلوم  $I$ ، توسط تجهیزات مورد استفاده اعمال و افت پتانسیل  $V$  بین کاوشگرهای داخلی اندازه گیری می شود. بدین ترتیب مقاومت الکتریکی بتن ( $R$ ) از رابطه ۶ قابل محاسبه می باشد [۱۹]:

$$\rho = 2 \pi * Ra \quad (\text{k}\Omega - \text{cm}) \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $a$  فاصله بین الکترودهای داخلی بر حسب سانتی متر و  $R$  مقاومت بر حسب اهم می باشد.

## ۲.۶. روش اندازه گیری مقاومت قطبش خطی

روش اندازه گیری مقاومت قطبش خطی توسط استرن و گیبیری در سال ۱۹۵۷ مطرح شد [۱۳]. گورس در سال ۱۹۹۴ [۱۳] و برومفیلد در سال ۱۹۹۶ [۱۳] به تکمیل و بررسی این روش پرداختند. اندازه گیری مقاومت قطبش خطی تکنیکی سریع برای تعیین مستقیم سرعت خوردگی آرماتورهای موجود در بتن می باشد. به منظور ایجاد اتصال الکتریکی به آرماتورها تخریب موضعی پوشش بتن اعمال میگردد. با اطلاعات حاصل از این روش می توان ارزیابی جامعی از شرایط سازه ای با دقت کافی بدست آورد. طبق این روش، اگر یک ولتاژ اضافی به میلگرد اعمال شود تا در پتانسیل خوردگی آن اغتشاش ایجاد کند، یک جریان بین میلگرد و مواد خوردنده شکل می گیرد. اگر ولتاژ اغتشاش  $\Delta E$ ، به اندازه کافی کوچک باشد، اندازه جریان،  $\Delta I$ ، با ولتاژ اغتشاش اعمالی متناسب خواهد شد؛ به گونه ای که می توان گفت نسبت  $\Delta E/\Delta I$  مقداری ثابت است. این پارامتر مقاومت قطبش ( $R_p$ ) نامیده می شود. جهت محاسبه سرعت خوردگی از رابطه ۷ استفاده می شود [۲۰].

$$I_{corr} = B/R_p \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $I_{corr}$  سرعت خوردگی بر حسب میکروآمپر بر سانتی متر مربع،  $R_p$  مقاومت قطبش و  $B$  ثابت استرن-گیری می باشد. این مقدار برای فلزهای فعال برابر ۲۵ میلی ولت و برای فلزات غیرفعال برابر ۵۰ میلی ولت در نظر گرفته می شود. جدول ۴ وضعیت خوردگی را به ازای مقادیر مختلف سرعت خوردگی نشان می دهد.

روش اندازه گیری مقاومت قطبش خطی، امکان تعیین محل های مستعد خوردگی را فراهم می کند. این موضوع سبب شده است استفاده از این روش در سازه های دریایی و همچنین سایر سازه های واقع در محیط های مهاجم، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار شود. همچنین از آنجا که روش اندازه گیری مقاومت قطبش خطی، پتانسیل را پیش از به دست آوردن آهنگ خوردگی ایجاد می کند، مقادیر به دست آمده این امکان را فراهم می کند تا تصویر دقیق تری از رفتار خوردگی آرماتورهای تعبیه شده در بتن به دست آید.



جدول ۴- وضعیت خوردگی به ازای مقادیر مختلف سرعت خوردگی [۱۷]

سرعت خوردگی (میکروآمپر بر سانتی متر مربع)	وضعیت خوردگی
< ۰,۲	هیچگونه خرابی ناشی از خوردگی انتظار نمی رود.
۰,۲-۱,۰	خرابی ناشی از خوردگی در ۱۰ الی ۱۵ سال آینده محتمل است.
۱,۰-۱۰	خرابی ناشی از خوردگی در ۲ الی ۱۰ سال آینده محتمل است.
> ۱۰	خرابی ناشی از خوردگی در ۲ سال یا کمتر از آن مورد انتظار است.

## ۲,۷. روش طیف سنجی مقاومت ظاهری الکتروشیمیایی

روش طیف سنجی مقاومت ظاهری اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط ونجر و گالاند [۲۱] ارائه شد. در سال های اخیر از این روش به عنوان یک روش غیر مخرب جهت پایش خوردگی میلگردهای تعبیه شده در بتن استفاده می شود. به بیان دیگر، این روش به طور گسترده برای ارزیابی سرعت خوردگی سیستم فولاد- بتن مورد استفاده واقع شده و بسیاری از محققان از این روش برای توصیف رفتار خوردگی فولاد در بتن بهره گرفته اند. در این روش ولتاژهای متناوب ۱۰ تا ۲۰ میلی ولت به میلگرد اعمال شده و در پایان، زاویه فاز و جریان نهایی برای فرکانس های متفاوت اندازه گیری می شود. مقاومت ظاهری سیستم، نسبت ولتاژ AC به جریان خواهد بود. با مطالعه اختلاف بین فرکانس ها و مقاومت ظاهری، می توان یک مدار الکتریکی معادل تعیین کرد. با استفاده از جمع آوری طیف های مقاومت ظاهری و پردازش اطلاعات با استفاده از مدار الکتریکی ساده، سرعت خوردگی بدست می آید.

روش طیف سنجی مقاومت ظاهری الکتروشیمیایی مانند سایر روش های پایش خوردگی، دارای مزایا و معایب خاص خود می باشد. تعیین فرایند های الکتروشیمیایی در مواد چند فازه و غیرهمگن، تخمین سرعت ثابت خوردگی، کسب اطلاعات دقیق در مورد مکانیسم و سینتیک واکنش های الکتروشیمیایی و دامنه کوچک تحریک از جمله مزایای این روش می باشد. از معایب این روش نیز می توان به محدود شدن استفاده از این روش به مطالعات آزمایشگاهی به دلیل گران بودن تجهیزات و نحوه مدل سازی فرآیندهای الکترودی اشاره کرد. در شکل (۸) و (۹) تجهیزات و نمونه بکارگیری روش طیف سنجی مقاومت ظاهری قابل مشاهده می باشد.



شکل ۹- تجهیزات و نمونه بکارگیری روش طیف سنجی مقاومت ظاهری



شکل ۸- دستگاه طیف سنج مقاومت ظاهری

## ۲,۸. روش تحلیل هارمونیک

اساس این روش مشابه روش طیف سنجی مقاومت ظاهری الکتروشیمیایی می باشد. در این روش یک ولتاژ اغتشاش AC در یک فرکانس منفرد به سیستم اعمال شده و سپس با اندازه گیری چگالی جریان AC، سرعت خوردگی را می توان براساس رابطه ۸ بدست آورد: [۲۲]

$$I_{corr} = \frac{i_1^2}{\sqrt{48}} \times \sqrt{2i_1i_3 - i_2^2} \quad (8)$$

سرعت قابل ملاحظه این روش نسبت به سایر روش های الکتروشیمیایی، اندازه گیری شیب های تافل به طور مستقیم از نمونه تحت آزمایش و تعیین سرعت خوردگی از جمله مزایای این روش می باشد. علیرغم مزایای ذکر شده، در این روش فرض خوردگی یکنواخت مطرح است، بنابراین در صورت بروز خوردگی موضعی، نتایج این روش دقت لازم را ندارد.

## ۲.۹. روش برون یابی تافل

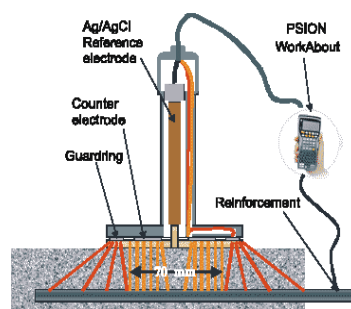
روش برون یابی تافل در سال ۲۰۰۱ و پس از اصلاحاتی به عنوان یکی از روش های پایش خوردگی در آیین نامه ACI ۲۲۲ آورده شد. [۲۳] روابط مورد استفاده در روش برون یابی تافل مبتنی بر معادلات استرن - گبیری است. در روش برون یابی تافل، سرعت جریان خوردگی طبق رابطه ۹ محاسبه می شود:

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 R_p (\beta_a + \beta_c)} \quad (9)$$

در این روش  $I_{corr}$  سرعت خوردگی بر حسب میکروآمپر بر سانتی متر مربع،  $\beta_a$  و  $\beta_c$  ثابت های آندی و کاتدی تافل می باشد. با استفاده از این روش می توان سرعت های خوردگی خیلی پایین را اندازه گیری کرد. همچنین امکان نظارت های پیوسته سرعت خوردگی یک سیستم با این روش میسر است.

## ۲.۱۰. روش پالس گذرای گالوانوستاتیک

پالس گذرای گالوانوستاتیک، یک تکنیک قطبش گذرا و کوتاه در حوزه زمان است. یک پالس جریان آندی کوتاه مدت در محدوده ۱۰ الی ۲۰۰ میکروآمپر توسط یک الکتروود مستقر بر روی سطح بتن، به آرماتورهای تعبیه شده در بتن اعمال می شود. یک حلقه محافظ، جریان اعمالی را به مساحت A از سطح میلگرد زیر الکتروود محدود می کند. بازه زمانی پالس اعمالی ۵ تا ۳۰ ثانیه می باشد. این جریان اعمالی کوچک، منجر به تغییر در پتانسیل آرماتورها می شود. ضعف عمده این روش این است که مقدار پتانسیل قطبش ماکزیمم به واسطه تثبیت پاسخ پالس اعمالی رخ می دهد که تعیین آن کار دشواری است. روش پالس گالوانوستاتیک مقادیر بزرگتری از سرعت خوردگی را نسبت به روش قطبش خطی در اختیار قرار می دهد. به همین دلیل، نتایج آزمایش پالس گالوانوستاتیک قابل اعتمادتر می باشد. شکل ۱۰ تجهیزات روش پالس گالوانوستاتیک را نشان می دهد.



شکل ۱۰ - تجهیزات پالس گالوانوستاتیک [۲۴]

## ۲.۱۱. روش اتلاف جرم

این روش یکی از روش های قدیمی جهت تعیین سرعت خوردگی می باشد. از این روش بیشتر در مطالعات مربوط به خوردگی اتمسفری استفاده می شود. همچنین برای اعتبار سنجی نتایج مربوط به روش قطبش خطی و طیف سنجی مقاومت ظاهری می توان از این روش استفاده کرد. از این روش به دلیل ماهیت مخرب آن، زمان بر بودن و محدودیت در استفاده های میدانی، کمتر استفاده می شود. [۱۷]



## ۲،۱۲. روش سرعت پالس مافوق صوت

[۱]. سرعت پالس مافوق صوت (UPV) یک تکنیک غیر مخرب است که شامل اندازه گیری صوت درون مصالح به منظور پیش بینی مقاومت مصالح، کشف وجود عیوب داخلی مانند ترک، حفره ها، پوسیدگی و سایر عیوب می باشد. در این روش، پالس هایی که توسط یک مبدل منتشر می شوند، از میان بتن عبور کرده و توسط مبدل دیگری که در فاصله  $L$  از مبدل اول قرار دارد، دریافت می شود. زمان انتقال پالس (T) از مبدل اول به دوم توسط ابزارهای الکترونیکی دقیقی محاسبه می شود. با توجه به معلوم بودن زمان و فاصله، می توان سرعت پالس را مطابق رابطه ۱۰ [۲۵] به دست آورد:

$$V=L/T \quad (10)$$

رابطه بین سرعت پالس و کیفیت بتن در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- رابطه بین سرعت پالس و کیفیت بتن [۱۷]

سرعت پالس طولی (کیلومتر بر ثانیه)	مقاومت فشاری تقریبی (نیوتن بر میلی متر مربع)	کیفیت بتن
<۲،۰	---	بسیار ضعیف
۲،۰-۳،۰	۴،۰	ضعیف
۳،۰-۳،۵	تا ۱۰	نسبتا خوب
۳،۵-۴،۰	تا ۲۵	خوب
۴،۰-۴،۵	تا ۴۰	خیلی خوب
>۴،۰	تا ۴۰	عالی

شکل ۱۱ تجهیزات روش پالس مافوق صوت را نشان می دهد. این تجهیزات شامل دستگاه تراسونیک و چکش اشمیت می باشد. با استفاده از چکش اشمیت می توان یک صوت توخالی ایجاد و به طور موثری ناحیه متورق شده اطراف آرماتورها را مشخص کرد [۲۶].



شکل ۱۱- تجهیزات روش پالس مافوق صوت

## ۲،۱۳. روش اندازه گیری پرتونگاری گاما و اشعه ایکس

با استفاده روش غیرمخرب پرتونگاری گاما و اشعه ایکس می توان به اطلاعاتی پیرامون کیفیت بتن و نواقص موجود در سازه های بتنی مسلح دست یافت. این روش قابل اعتماد قادر به مکان یابی ترک های داخلی، حفره ها و تفاوت در چگالی بتن می باشد. روش پرتو نگاری مبتنی بر نشر فوتون توسط یک مولد تابش پرتو می باشد. پرتو نگاری به دو دسته استفاده از اشعه ایکس و اشعه گاما تقسیم بندی می شود. این دو اشعه، تابش های الکترومغناطیسی نامرئی می باشند که می توانند در بتن نفوذ کرده و در یک خط مستقیم حرکت کنند. به دلیل خطرناک بودن پرتوها، اقدامات احتیاطی در خصوص انجام این فرایند توصیه می شود [۱۷].

## ۲,۱۴. روش استفاده از گرمانمای مادون قرمز الکتروشیمیایی



شکل ۱۲- نتیجه اندازه گیری با دوربین چند طیفی [۱۲]

روش گرمانمای مادون قرمز در سال ۲۰۰۱ توسط ساتو و همکاران ارائه شد [۱۳]. این روش یک تکنیک جدید برای کسب اطلاعات پیرامون محتویات کلرید بر روی سطح بتن و بدست آوردن ضریب نفوذ ظاهری کلراید بدون تخریب بتن می باشد. این روش مبتنی بر ارتباط نزدیک ضریب انتشار یون کلرید با خاصیت اتلاف گرمایی بتن می باشد. این سیستم شامل تجهیزات اشعه نزدیک به مادون قرمز، تصویر برداری طیفی و دوربین چند طیفی نزدیک به مادون قرمز می باشد. شکل ۱۲ تجهیزات گرمانمای مادون قرمز و نتیجه اندازه گیری با دوربین چند طیفی را نشان می دهد. اشعه های مادون قرمز پراکنده شده از طریق طیف بین با طول موج های متغیر توسط المان های حساسی بر روی دوربین چند طیفی می توانند دریافت شوند.

## ۲,۱۵. روش تحلیل الکتروشیمیایی صدا

این روش توسط ادن و روت ول در سال ۱۹۹۲ معرفی شد [۲۷]. با استفاده از این روش می توان به مکانیزم و سرعت خوردگی پی برد. در این روش منبع تولید صدا در محل محتمل به خوردگی قرار می گیرد. با استفاده از دستگاه به راحتی نوسانات پتانسیلی در محدوده مورد نظر قابل ضبط است. بسیاری از پژوهشگران معتقداند که با استفاده از این روش می توان انواع خوردگی ها به صورت حفزه، شکاف و ترک خوردگی را مشخص کرد. از مهم ترین مزیت های این روش این است که استفاده از آن موجب اختلالات مصنوعی بر روی سیستم نمی شود.

## ۲,۱۶. روش استفاده از سنسور های خوردگی با قابلیت جاسازی

### ۲,۱۶,۱. الکترودهای مبنای جاسازه شده

الکترودهای مبنای جاسازی شده (ERE۲۰) که در سال ۲۰۱۰ توسط شرکت فورس تکنولوژی ارائه شدند [۱۳]، بدون نمونه گیری، وقفه در استفاده از سازه و حضور در محل، قادر به دریافت اطلاعات هستند. سنسورهای فیبر نوری ارائه شده توسط فور و هوستان در سال ۱۹۹۸ [۱۳]، کرنش سنسورهای الکتریکی و سیمی ارتعاشی (شکل ۱۳) ارائه شده توسط سانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۱۳] و ابزار خوردگی جاسازی شده (ECL) برای ارزیابی خوردگی بسیار کارآمد می باشند. ابزار خوردگی جاسازی شده (ECL) قادر به اندازه گیری پارامترهای مقاومت قطبش خطی، پتانسیل مدار باز، دما و پتانسیل مربوط به غلظت کلرید هستند.



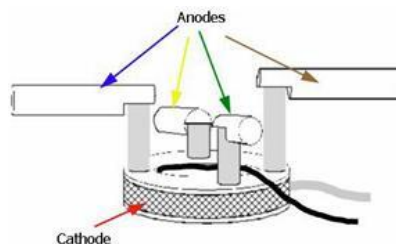
شکل ۱۴- سنسور ECL در حین عملیات [۱۷]



شکل ۱۳- کرنش سنسج سیمی ارتعاشی [۲۸]

## ۲،۱۶،۲ سنسورهای چندگانه کرو و واتج

این سنسورها در سال ۲۰۱۰ توسط شرکت فورس تکنولوژی ارائه شد. این سنسورها متشکل از چهار آند فولادی و یک کاتد فلزی هستند شکل (۱۵) [۲۹]. برای هر یک از آندها یا کاتد مورد نظر جریان عبوری بررسی می‌شود. نکته قابل توجه این است که افزایش جریان عبوری، پدیده خوردگی را تشدید می‌کند. این سنسورها علاوه بر کنترل در محل، با استفاده از یک مودم، قابلیت کنترل از راه دور را میسر می‌کنند. چین وو و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۳] با استفاده از تکنولوژی فرکانس رادیویی سنسورهای بی سیم را ارائه کردند. دانگ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ [۱۳] سنسورهای چند کاربره ای ارائه کردند که علاوه بر پیش بینی وضعیت خوردگی می‌لگرد، می‌تواند محتویات شیمیایی بتن را نیز ارائه کند.



شکل ۱۵- تصویری شماتیک از سنسورهای چندگانه کرو و واتج [۲۹]

## ۳. نتیجه گیری

روش های متعددی برای پایش خوردگی آرماتورهای تعبیه شده در بتن وجود دارد. هر یک از این روش ها دارای اصول، مزایا، معایب و تجهیزات خاصی هستند که در این مقاله هر کدام از آنها به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. بازرسی پیوسته پوشش می‌لگرد و بتن در فواصل زمانی مختلف می‌تواند اطلاعات مفیدی از کارایی سازه به همراه داشته باشد. در تکنیک پتانسیل مدار باز می‌توان با استفاده از یک ولت متر و سیم اتصال بین می‌لگرد فولادی و الکتروود مرجع، پتانسیل الکتریکی بین می‌لگرد و الکتروود را اندازه گیری کرد. علیرغم زمان بر بودن، نتایج این روش به صورت مقداری عددی منفرد، اطلاعات مفیدی از شرایط فولاد ارائه می‌کند. اندازه گیری مقاومت ویژه بتن یک روش مناسب، آسان و سریع برای ارزیابی احتمال خوردگی و کیفیت بتن می‌باشد که می‌تواند در بازرسی های رایج مورد استفاده قرار گیرد. روش غیرمخرب و اقتصادی مقاومت قطبش خطی نیز روشی موفق در اندازه گیری سرعت خوردگی است. هر چند که این روش هم دچار ضعف هایی از جمله احتمال خطا در محاسبه چگالی جریان خوردگی به دلیل نامحدود بودن ولتاژ اغتشاش تولید شده توسط الکتروود کمکی است که امکان نتیجه گیری نادرست از وضعیت سازه را به همراه دارد. برای افزایش دقت این روش و غلبه بر مشکل مذکور، استفاده از الکتروود حلقه ای ثانویه برای محدود کردن جریان در محدوده از پیش تعیین شده توصیه می‌شود. همچنین رسیدن به نتایج کامل با استفاده از این روش، اندکی زمان بر است. در هر حال، رویکرد عددی هر دو روش اندازه گیری مقاومت ویژه و مقاومت قطبش خطی، از مزیت های این دو روش به حساب می‌آید. طیف سنجی مقاومت ظاهری با محدودیت استفاده میدانی نیز تکنیکی غیرمخرب برای اندازه گیری سرعت خوردگی می‌باشد. سرعت اندازه گیری این روش رضایت بخش و سرعت پاسخگویی آن بهینه می‌باشد. تحلیل هارمونیک (تحلیل همساز)، با ضعف جدی فرض خوردگی یکنواخت، روشی نامناسب برای خوردگی های موضعی است. در کنار این ضعف جدی، روش تحلیل هارمونیک روشی با پیچیدگی کم، غیرمخرب با سرعت پاسخدهی بهینه برای اندازه گیری سرعت خوردگی آرماتورهای موجود در بتن محسوب می‌شود. روش پالس مافوق صوت یک روش آسان برای تخمین اندازه، شکل و ماهیت آسیب بتنی است. ارزیابی داده های حاصل از این روش، فرایندی تخصصی است و نیاز به جمع آوری دقیق اطلاعات و تحلیل کارشناسی دارد. روش گرمانمای مادون قرمز تکنیکی مقرون بصرفه و موثر است. نتایج و داده های حاصل از این روش به آسانی قابل تفسیر هستند. در این تکنیک هیچ اطلاعات کمی در مورد آسیب خوردگی وجود ندارد. تحلیل الکتروشیمیایی صدا روشی با کاربرد ساده و بدون نیاز به دخالت در سیستم می‌باشد. سینگال های اندازه گیری شده با این روش را می‌توان به کمک تحلیل های ریاضی تفسیر کرد. در برخی موارد، برخی سینگال های پیچیده که ناشی از خوردگی آرماتورها هستند، فرایند تفسیر و تحلیل را دشوار می‌کنند. استفاده از سنسورهای خوردگی در سازه هایی که دچار خوردگی و آسیب شده اند در فرایند ترمیم سازه بسیار مفید و کارآمد است. توسعه استفاده از این سنسورها برای پایش خوردگی سازه های بتن مسلح توصیه می‌شود. استفاده از این سیستم های پیشرفته موجب کاهش هزینه های نگهداری از سازه ها می‌باشد. برای دستیابی به اطلاعات دقیق تر از وضعیت سلامت سازه ترکیبی از روش های پایش خوردگی مذکور توصیه می‌شود.





#### ۴. منابع

۱. Lea F. M. "The chemistry of cement and concrete", ۳<sup>rd</sup> edn., chemical publication Co., New York, p. ۶۲۷.
۲. Arafati N., Fazli A. H., Mousavi S. M., Rouzmehr F. (۲۰۱۲) "Construction and maintenance of concrete piles in corrosive and destructive marine environments, based on study of the Persian Gulf marine installation", Construction Research Congress.
۳. Gerwich B. C. (۱۹۸۶) "Construction of offshore structures", wiley-interscience, pp. ۱۶-۲۴.
۴. Suda k, Misra S, Motohashi K (۱۹۹۳) "Corrosion products of reinforced bars embedded in concrete", Corros. Sci., ۳۵, pp. ۱۵۴۳-۱۵۴۹.
۵. Marcotte TD, Hanson CM (۲۰۰۷) "Corrosion products that form steel within cement paste", Mater Structures, ۴۰, pp. ۳۲۵-۳۴۰.
۶. Fookes P. G., Simm J. D., Bar J. M. (۱۹۸۶) "Marine concrete performance in different climatic environments", proceeding, International conference on concrete in the marine environment, The concrete society, London, ۱۹۸۶, pp. ۱۱۵-۱۳۰.
۷. Huovinen S. (۱۹۹۰) "Ice abrasion of concrete in Arctic sea structures", ACI materials J., ۸۷ (۳), pp. ۲۶۶-۲۷۰.
۸. Bentur A., Diamond N. S., Berke N. S. (۱۹۹۷) "Steel corrosion in concrete", E@FN SPON.
۹. ACI ۲۰۱, 1R-08. (۲۰۰۸) "Guide for conducting a visual inspection of concrete in service".  
۱۰. مبحث نهم از مقررات ملی ساختمان (۱۳۹۲). "طرح و اجرای ساختمان های بتن آرمه"
۱۱. K.C. Clear and R.E.Kay. (۱۹۷۳). "Time to corrosion of steel in concrete slabs", Vol ۱. Effect of mix design and construction parameters, FHWA report No. RD-۷۳-۲۲, interim report FHWA.
۱۲. K. Videm. (۱۹۹۸). "corrosion of reinforcement in concrete. Monitoring, prevention and rehabilitation" EFC no.۲۵. London.
۱۳. Miller, T. (۲۰۱۰). "Nondestructive inspection of corrosion and delamination at the concrete-steel reinforcement", The University of Arizona, pp. ۵۷-۵۸.
۱۴. ASTM C۸۷۶-۹۱, (۱۹۹۹). "Standard test method for Half-Cell Potentials of uncoated reinforcing steel in concrete".
۱۵. B. Elenser, C. Andrade, J. Guilkers, R. Poldor and M. Raupach, (۲۰۰۳). "Half-cell potential measurements-potential mapping on reinforced concrete structures" Materials and structures, Vol. ۳۶, pp. ۴۶۱-۴۷۱.
۱۶. Sadowski, Lukasz. (۲۰۱۳). "Methodology for assessing the probability of corrosion in concrete structures on the basis of half-cell potential and concrete resistivity measurement", Hindawi publishing corporation the scientific world journal.
۱۷. Song, H. and Saraswathy, V. (۲۰۰۷), "Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures – A Review," International Journal of Electrochemical Science, Vol. ۲, pp ۱-۲۸  
۱۸. آزمونگر مقاومت الکتریکی بتن. ژئوتکنیک و ژئوفیزیک, [http:// farand-systems.com](http://farand-systems.com)
۱۹. Bjegovic, D. and Stipanovic, I. and Skazlic, M. and Feric, K. and Barbalic, I. (۲۰۰۷), "Case study-corrosion monitoring in marine environment in Croatia," The University of Zagreb.
۲۰. Millard, S., Sadowski, L., (۲۰۰۹), "Novel method for linear polarisation resistance corrosion", Conference on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France
۲۱. Vedalakshmi, R. and Palaniswamy, N. "Analysis of the electrochemical phenomenon at the rebar-concrete interface using the electrochemical impedance spectroscopic technique," Magazine of Concrete Research, (۲۰۱۰). ۶۲, No. ۳, March, ۱۷۷-۱۸۹
۲۲. Slepiski, P. and Gerengi, H. and Bereket, G. and Samandar, A. (۲۰۰۹), "HARMONIC ANALYSIS FOR CORROSION MONITORING", Journal of Corrosion ISSN: ۱۳۰۶-۳۵۸۸, ۲۹-۳۱ pp.
۲۳. ACI ۲۲۲R-۰۱, "Protection of Metals in Concrete Against Corrosion"



سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در  
مهندسی سازه و مدیریت ساخت  
دانشگاه صنعتی شریف - تیر ۱۳۹۸



۲۴. Bäßler, R. and Burkert, A. (۲۰۰۳), "GPM-Portable equipment for determination of corrosion stage of concrete structures - laboratory and on-site experiences," International Symposium (NDT-CE ۲۰۰۳), Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), D -۱۲۲۰۰, Berlin, GERMANY

۲۵. Mahure, N.V and Vijn, G.K. and Sharma, P. and Sivakumar, N. and Ratnam, M. "Correlation between Pulse Velocity and Compressive Strength of Concrete", International Journal of Earth Sciences and Engineering, ISSN ۰۹۷۴-۵۹۰۴, Vol ۰۴, No ۰۶ SPL, October ۲۰۱۱, pp ۸۷۱-۸۷۴

۲۶. بختیاری، ک. (۱۳۷۹)، "بررسی خوردگی آرماتورهای فولادی در سازه های بتن مسلح به روش مانیتورینگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران.

۲۷. D. A. Eden, and A. N. Rothwell, "Electrochemical Noise data: analysis, interpretation, presentation", in Proceedings of Corrosion # ۹۲, paper no. ۲۹۲, (National Association of Corrosion Engineers, Houston, ۱۹۹۲)

۲۸. Strain Gauges and Thermometers, Vibrating Wire Strain Gauges, "http://sisgeo.com.

۲۹. - CorroWatch - Embeddable Corrosion Front Probes,"http://pcte.com.au/ CorroWatch - Embeddable Corrosion Front Probes