



# حفاظت کاتدی پیشگیری از تخریب بتون مسلح

حال طبق گزارش سال ۱۹۹۷ در میان ۵۸۱ هزار و ۸۶۲ پل موجود در داخل و خارج سیستم کمک فدرال ایالات متحده<sup>۱</sup>، حدود ۱۰۱ هزار و ۵۱۸ پل به لحاظ ساختاری آسیب دیده‌اند و خوردگی سهم زیادی در پیدایش این آسیب دیدگی‌ها داشته است. هزینه مورد نیاز برای برطرف کردن تمام این خسارات، حدود ۷۸ میلیارد دلار برآورد شده است که بسته به مدت زمان رسیدن به اهداف تعیین شده، می‌تواند تا ۱۱۲ میلیارد دلار افزایش یابد [۳].

خوردگی فولاد در سازه‌های بتونی، اصلی ترین علت فرسایش و از حیز انتفاع افتادن آنها است و در صورتی که بتوانیم میلگردهای موجود در بتون مسلح را در برابر خوردگی محافظت کنیم عمر سازه‌های بتونی افزایش می‌یابد. هزینه حفاظت میلگرد در برابر خوردگی در مقایسه با هزینه ساخت یک سازه بتونی بسیار بسیار ناچیز است که با صرف این هزینه اندک، می‌توان از هدر رفتن سرمایه‌های عظیم جلوگیری کرد.

## مکانیزم خوردگی در بتون مسلح

طی دهه‌های اخیر، خوردگی میلگرد در بتون مسلح، یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش دهنده عمر سازه‌های مذکور بوده است. در واقع به دلیل مقاومت کششی اندک بتون، لازم است که آن را به روشی در برابر بارگذاری کششی تقویت کرد. استفاده از میلگردهای فولادی راه حلی است که طی سالیان متمادی برای رفع این نقیصه به کار رفته است.

محیط بتون تازه به دلیل وجود مقادیر بسیاری هیدروکسید کلسیم و مقادیر به نسبت کمتری عناصر قلیایی مانند سدیم و پتاسیم محیطی بسیار قلیایی با PH بین ۱۲ تا ۱۳ است. وجود این محیط قلیایی باعث ایجاد یک لایه نازک اکسید بر روی سطح میلگرد می‌شود. این لایه در محیط به شدت قلیایی بتون تازه، پایدار بوده و میلگرد را در برابر خوردگی محافظت می‌کند. تا زمانی که PH محیط، بیشتر از ۱۰ باشد، میلگرد به لحاظ شیمیایی همچنان غیر فعال مانده و در معرض خوردگی قرار نمی‌گیرد.

مشکل اساسی زمانی آغاز می‌شود که PH محیط، رو به کاهش

خوردگی میلگردهای مورد استفاده در بتون مسلح، هرساله هزینه‌های زیادی را به اقتصاد کشورهای جهان از جمله ایران تحمیل می‌کند. این مسئله به ویژه در مناطقی که نرخ خوردگی بالاتر است، مانند: سواحل آب‌های شور، بسیار جدی و مشکل آفرین است. این مقاله به معرفی یک روش جدید حفاظت کاتدی برای پیشگیری از خوردگی میلگردهای مورد استفاده در بتون مسلح می‌پردازد. به لحاظ تقسیم بندی علمی، این روش در زمره روش‌های مبتنی بر تئوری آند فداشونده قرار می‌گیرد. تئوری حاکم بر شیوه عملکرد روش به همراه نتایج آزمایش‌های انجام شده روی میلگردهای نمونه، توضیح داده شده است. نتایج آزمایش‌ها ثابت می‌کند که این روش جدید حفاظت کاتدی، بهتر از سایر روش‌های شناخته شده قبلی، از بروز خوردگی در میلگرد جلوگیری می‌کند. واژگان کلیدی: بتون، خوردگی، حفاظت کاتدی، آند فداشونده.

## مقدمه

سازه‌های بتونی بسیاری هر ساله در سراسر جهان ساخته می‌شود. هزینه ساخت این سازه‌ها بالغ بر میلیاردها دلار است. با وجود چنین سرمایه‌گذاری‌های عظیم، عمر سازه‌های بتونی که در معرض خوردگی قرار دارند، به شدت کاهش یافته و این امر باعث تحمیل هزینه‌های بسیار زیاد تعمیر، بازسازی و نگهداری و حتی جایگزینی آنها می‌شود. طبق بررسی سال ۱۹۹۳ که در برنامه تحقیقات استراتژیک بزرگراه‌های ایالات متحده انجام شده است، هزینه تعمیر پل‌های آسیب دیده بر اثر یونهای کلرید، ۲۰ میلیارد دلار برآورد شده است و این هزینه سالانه، ۵۰۰ میلیون دلار افزایش می‌یابد [۱].

براساس برآوردهای انجام شده، خوردگی فولاد در سازه‌های بتونی، مانند: پل‌ها، ساختمان‌ها و سازه‌های دریایی هر ساله هزینه‌ای معادل ۵۵۰ میلیون لیره استرلینگ به انگلستان تحمیل می‌کند [۲]. در عین

می‌گذارد؛ یعنی قلیایی بودن بتون از دست می‌رود. کاهش PH محیط، می‌تواند به دلایل متفاوتی صورت پذیرد که مهم‌ترین دلیل تحقق این امر، مربوط به نفوذ یک سری عناصر شیمیایی خاص به داخل بتون است. در این میان مواد زیر از بیشترین اهمیت برخوردارند:

۱. دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>) موجود در اتمسفر.
۲. دی اکسید گوگرد (SO<sub>2</sub>) موجود در محیط‌های صنعتی.
۳. یونهای کلرید موجود در محیط‌های دریایی.
۴. املاح نمک (که معمولاً در اثر یخ‌زدایی جاده‌ها، پلها و ... بر روی سازه‌های بتونی انباشته می‌شود).

ورود مواد فوق به داخل بتون باعث انجام واکنش شیمیایی و کاهش PH بتون می‌شود. در اغلب موارد، این مواد از حفره‌های موجود در سطح بتون وارد ساختار سازه می‌شود.

در محیط‌هایی که امکان ورود چنین موادی وجود دارد، غلظت این مواد افزایش پیدا کرده و در نهایت به آستانه‌ای می‌رسد که لایه محافظ تخریب می‌شود و در نتیجه، فولاد شروع به خوردگی می‌کند. شواهدی حاکی از این امر وجود دارد که آستانه خوردگی در بتون به نوع سیمان مصرف شده و ترکیبات آن بستگی دارد. علاوه بر این، نوع ماده خورنده غالب نیز به جغرافیای محل استفاده بتون بستگی دارد؛ برای مثال کربناسیون بتون در اروپا نسبت به امریکا، اهمیت بیشتری دارد. خوردگی، باعث کاهش سطح مقطع مفید میلگرد شده و می‌تواند ناپیوستگی‌های مقطعی ایجاد کرده و مقاومت کششی و مقاومت در برابر تنش‌های خستگی را کاهش دهد.

در سازه‌های بتون مسلح، در اثر خوردگی میلگرد اضافه حجمی تا چند برابر حجم فولاد اولیه ایجاد می‌شود. تنش‌های ناشی از نیروهای مولکولی حاصل از این اضافه حجم منجر به ترک خوردگی و در نهایت تخریب کامل سازه بتونی می‌شود.

ترک‌های ایجاد شده، راه را برای نفوذ آب، اکسیژن و کلریدها باز می‌کنند و این باعث تسریع در امر خوردگی می‌شود. بنابراین زنگ بیشتری تشکیل شده و تنش‌های بیشتری به وجود می‌آید و تنش‌های بیشتر باعث ایجاد ترک‌های بیشتر می‌شود. چرخه به وجود آمده تا جایی که فاجعه تخریب بتون به طور کامل اتفاق بیفتد، ادامه پیدا می‌کند.

### مقایسه روش‌های مختلف

به لحاظ کاربردی از میان روش‌های تنوری موجود برای حفاظت فولاد، چندین روش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برخی از روش‌ها نیز به دلایلی چند جنبه عملی پیدا نکرده است.

ساده‌ترین روشی که در ابتدا به نظر می‌رسد، استفاده از رنگها و اپوکسی‌ها است. ولی، به دو دلیل عمده استفاده از رنگها برای حفاظت میلگرد میسر نمی‌باشد. نخست اینکه رنگهای بسیار کمی وجود دارد که بتوانند PH بالای بتون تازه را تحمل کند و ثانیاً رنگها و اپوکسی‌ها فقط به عنوان یک پوشش فیزیکی مانع از نفوذ اکسیژن، رطوبت و مواد خورنده می‌شود و در صورتی که پوشش رنگ یا اپوکسی زخمی شود، از همان قسمت میلگرد خورده شده و زنگ‌زدگی در زیر پوشش گسترش می‌یابد و با توجه به اینکه در اثر حمل‌ونقل و عملیات برشکاری، خمکاری و آرماتور بندی، میلگردها حتماً زخمی می‌شود استفاده از این روش عملی نیست.

گالوانیزه گرم دومین راه حلی است که می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. گالوانیزه گرم به دلیل وجود روی می‌تواند علاوه بر حفاظت غیر فعال حفاظت کاتدی را نیز انجام دهد. اما استفاده از این روش دارای مشکلاتی به شرح ذیل است.

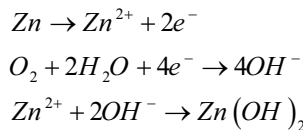
۱. ایجاد تنش‌های حرارتی پسماند در میلگردها بر اثر دمای زیاد فرایند گالوانیزه گرم.

۲. هزینه زیاد عملیات گالوانیزه گرم، برای میلگردهای دوازده متری. راه حل دیگر، استفاده از موادی غیر از فولاد کربنی برای مسلح کردن بتون می‌باشد؛ به عنوان مثال در آمریکای شمالی از میله‌های پلی پروپیلن (polypropylene) برای تقویت بتون استفاده می‌شود. ولی گذشته از هزینه بسیار زیاد این روش، مشکل دیگر چسبندگی غیر کافی بین میله‌های پلی پروپیلن و بتون است.

در آلمان، میله‌های فولادی ضد زنگ (stainless steel rebar) برای استفاده در بتون مسلح تولید می‌شود. این میله‌ها نیز با مشکلاتی مشابه آنچه در مورد میله‌های پروپیلن گفته شد، روبه‌رو هستند؛ یعنی علاوه بر اینکه فوق‌العاده گران هستند، چسبندگی لازم را با بتون ندارند. به

### تولید میلگردهای مقاوم در برابر خوردگی





شده در این لایه، تبادل الکترون در فرآیند پیل الکترو شیمیایی بین فولاد و فلز روی به خوبی صورت پذیرفته و میلگرد را به طریق حفاظت کاتدی در برابر خوردگی محافظت می‌کند.

در این فرآیند الکترو شیمیایی عنصر روی الکترون آزاد شده و به صورت یون مثبت در می‌آید، از سوی دیگر اکسیژن نیز در واکنش با آب و با جذب الکترون‌های آزاد شده یون هیدروکسید تولید می‌کند. یون هیدروکسید با کاتیون‌های عنصر روی واکنش انجام داده و هیدروکسید روی را به وجود می‌آورد که در نتیجه فولاد از طریق حفاظت کاتدی در برابر خوردگی محافظت می‌شود. این فرآیند را می‌توان به صورت زیر نمایش داد.

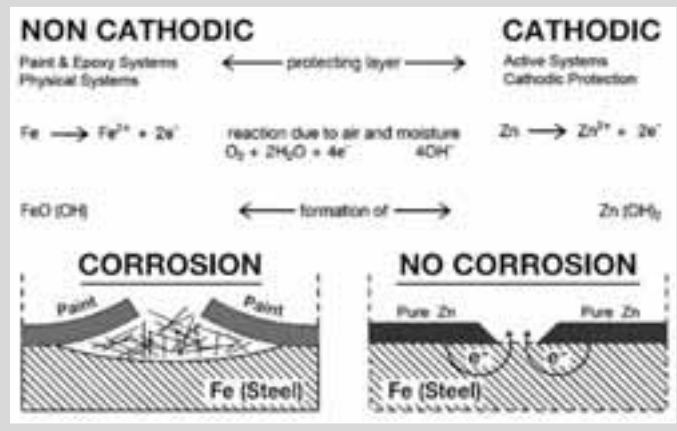
بر اساس آزمایش‌های متعددی که در آزمایشگاه‌های معتبر فرانسه، بلژیک، انگلستان و آلمان صورت گرفته تأیید شده است که این پوشش، فولاد را به دو طریق حفاظت مکانیکی و حفاظت کاتدی در برابر خوردگی محافظت می‌کند همچنین مشخص شده است که دوام و قابلیت حفاظتی این پوشش از گالوانیزه گرم نیز بیشتر است [۵]. مطابق آزمایش‌های انجام شده توسط آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه گنت بلژیک [۶] و آزمایشگاه علمی- تحقیقاتی بتون روسیه [۷] تأیید شده است که میلگردهای محافظت شده با این پوشش، از چسبندگی کافی با بتون برخوردار هستند همچنین بر اساس مطالعات انجام شده مشخص شده است که با استفاده از این نوع میلگرد در سازه‌های بتون مسلح، می‌توان عمر مفید آنها را تا ۲ برابر افزایش داد.

از لحاظ مطالعه اقتصادی، هزینه مصرف این نوع میلگرد در پروژه‌های بتون مسلح در مقایسه با ارزش سازه بتونی و فواید ناشی از افزایش طول عمر آن، بسیار بسیار ناچیز است. امید است با بهره گیری از سیستم‌های نوین بتوانیم موجبات حفاظت از سازه‌های ملی کشور را که از سرمایه‌های زیر بنایی هستند، فراهم آوریم. ■

تهیه و تنظیم: علیرضا امینی نجفیان  
شرکت مهندسی خوردگی غدیر

#### مراجع:

- [1] Bavarian B., and Reiner L., Corrosion Protection of Steel Rebar in Concrete using Migrating Corrosion Inhibitors MCI 2021 & 2022, Report 1136 The Cortec Corporation
  - [2] <http://www.npl.co.uk/npl/cmmt/programmes/dme/cic.html>
  - [3] <http://www.corrosion-doctors.org/Concrete/Problem.htm>
  - [4] Daily S. F., and Green W. K., Galvanic Cathodic Protection of Reinforced and Prestressed Concrete Structures using CORRSPRAY- A Thermally Sprayed Aluminum Alloy, Corpro Companies Technical Paper 51
  - [5] ATC/32A/150683/Z.M. R.U.G., Fulmer Materials Technology. Oxford U.K Ref N NMF/GS/DL19, Staatliche Materialprufungsanstalt Darmstadt
  - [6] Universiteit Gent, Laboratory Soete for Strength of Materials, Corrosion Department, Report Concerning the Pull-Out Test Performed on Uncoated and Coated Rebars, 1999
  - [7] R.U. National Research and Scientific Laboratory for Modified Concrete, on Reinforcing Structures in Concrete, Report Nr. 378/02, September 2002
1. USA federal-aid system
  2. Federal Highway Administration (FHWA)



فرآیند سیستم حفاظت کاتدی در مقایسه با سیستم حفاظت فیزیکی

این مشکلات باید این مطلب را نیز اضافه کرد که خم کردن میلگرد پوشش شده با فولاد ضد زنگ، بدون ایجاد ترک به طور عملی امکان پذیر نیست.

استفاده از بازدارنده‌های خوردگی (corrosion inhibitors) از دیگر روش‌های مبارزه با خوردگی در بتون مسلح است. در این روش، مواد کاهش دهنده خوردگی را به صورت افزودنی در طرح اختلاط بتون اضافه می‌کنند اما کارایی این روش تنها در غلظت‌های کم کلرید (کمتر از ۱٪ وزن سیمان) به اثبات رسیده است. بر اساس مستندات اداره کل بزرگراه‌های فدرال آمریکا<sup>۴</sup> تنها روشی که صرف نظر از میزان کلرید موجود، می‌تواند خوردگی را متوقف کرده یا از ایجاد آن جلوگیری کند، روش حفاظت کاتدی است [۴].

#### حفاظت کاتدی

هنگامی که دو فلز غیر همجنس، در محلول هادی یا خورنده در تماس با یکدیگر قرار گیرند، بین آن دو اختلاف پتانسیلی به وجود می‌آید که این اختلاف پتانسیل باعث ایجاد جریان الکترونی بین آنها می‌شود. این جریان موجب خوردگی فلزی می‌شود که پتانسیل الکترونی کمتری دارد. فلز با پتانسیل الکترونی کمتر در این واکنش قطب آند و فلز با پتانسیل الکترونی بیشتر قطب کاتد را تشکیل می‌دهد که در اثر واکنش پیل الکتروشیمیایی قطب آند فدا شده و کاتد را در مقابل خوردگی (اکسیداسیون) محافظت می‌کند در واکنش الکتروشیمیایی بین فلزات روی و فولاد، فلز روی که دارای پتانسیل الکترونی کمتر است قطب آند شده و همان گونه که بیان شد، فولاد را در مقابل خوردگی محافظت می‌کند. مطابق اصول تئوری، اثبات شده است که برای اینکه پوششی غنی از روی، بتواند سطح فلز پایه را به روش حفاظت کاتدی در برابر خوردگی محافظت کند، باید حداقل ۹۲ درصد عنصر روی، در لایه فیلم خشک پوشش وجود داشته باشد و این در حالی است که عموماً در رنگ‌های زینک ریج، مقدار روی موجود در فیلم خشک بسیار کمتر از این مقدار است.

#### میلگردهای محافظت شده در برابر خوردگی به روش حفاظت کاتدی

شرکت مهندسی خوردگی غدیر با اهمیت دادن به موضوع حفاظت سازه‌های بتونی در برابر خوردگی، اقدام به تولید میلگردهای مقاوم در برابر خوردگی کرده است. در فرآیند تولید این میلگردها، با بهره گیری از تکنولوژی روز و استفاده از ماشین آلات اتوماتیک، لایه‌ای از عنصر روی اتمیسیته شامل ۹۶ درصد روی خالص به خلوص ۹۹/۹۹۵ درصد بر روی میلگردهای فولادی اعمال می‌شود. به دلیل وجود روی اتمیاز