



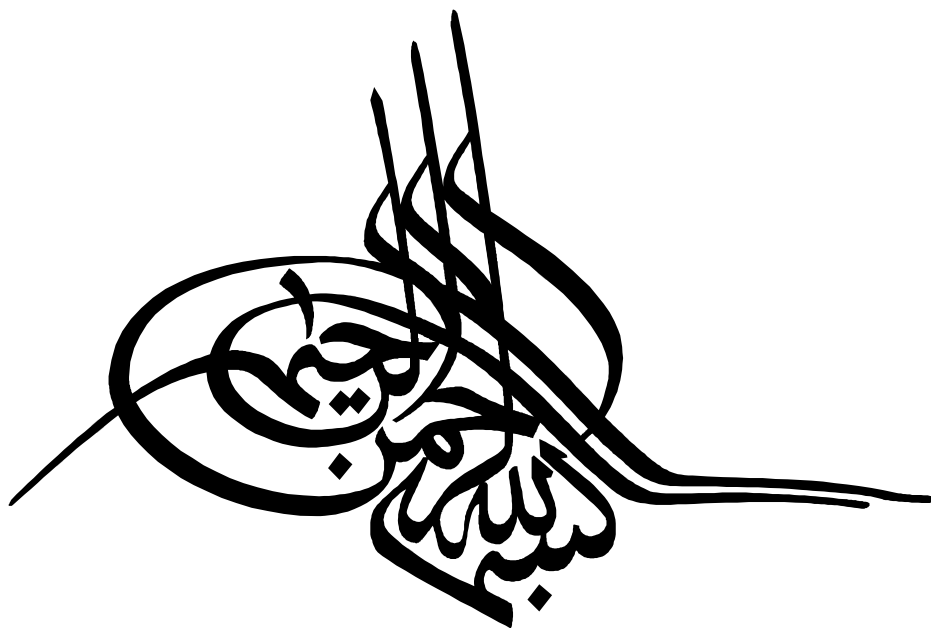
وزارت راه و ترابری
معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری

مجمع جهانی راه (پیارک)

حفاظت کاتدیک عرشه پلها

دفتر مطالعات فناوری و ایمنی

دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک) در ایران



وزارت راه و ترابری
معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری



دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک) در ایران

حفاظت کاتدیک عرشه پلها

(گزارش کمیته شماره TC4-4)

این مجموعه ترجمه‌ای است از گزارشی تحت عنوان:

Cathodic Protection of Bridge Decks

توجه: هدف از تهیه این گونه مجموعه‌ها، طرح موضوعات تخصصی در قالب انتقال فناوری از طریق نشر منابع تخصصی معتبر می‌باشد. لذا به کلیه بهره‌برداران توصیه می‌گردد جهت کاربرد اعداد و استانداردهای مورد اشاره به اصل منابع مراجعه نمایند. بدیهی است ناشر هیچ گونه مسؤولیتی در خصوص پیامدهای سوء ناشی از عدم توجه به توصیه فوق را متقبل نخواهد شد.

دفتر مطالعات فناوری و ایمنی

عنوان و پدیدآور	: حفاظت کاتدیک عرشه پلها/ تهیه و تالیف دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک) - کمیته شماره ۴؛ مترجم عبدالله کیوانی؛ [برای] دفتر مطالعات فناوری و ایمنی گروه مطالعات تطبیقی.
مشخصات نشر	: تهران: وزارت راه و ترابری، معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری، پژوهشکده حمل و نقل، ۱۳۸۵، ۶۲ ص.
مشخصات ظاهری	: شابک : ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۹۹-۷۵-۷ : ۹۶۴-۶۲۹۹-۷۵-X
یادداشت	: فپبا
یادداشت	: این کتاب ترجمه‌ای است تحت عنوان: Cathodic Protection of Bridge Decks
موضوع	: پلهای بتنی -- عرشه -- حفاظت کاتدی.
موضوع	: بتن مسلح -- حفاظت کاتدی.
شناسه افزوده	: کیوانی، عبدالله، مترجم.
شناسه افزوده	: انجمن بین‌المللی دائمی کنگره‌های راه (ایران) دبیرخانه. Permanent International Association of Road Congresses
شناسه افزوده	: ایران. وزارت راه و ترابری. پژوهشکده حمل و نقل
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۸۵ / ح ۶ / ج ۳۲۵ / TG
رده‌بندی دیوی	: ۶۲۴/۲۸۳
شماره کتابخانه ملی	: ۳۱۶۷۱-۸۵ م

دفتر مطالعات فناوری و ایمنی
گروه مطالعات تطبیقی

عنوان گزارش	: حفاظت کاتدیک عرشه پلها
تهیه و تألیف	: دبیرخانه مجمع جهانی راه (پیارک) - کمیته شماره ۴
مترجم	: دکتر عبدالله کیوانی
ویرایش ادبی	: عصمت شیخ‌الاسلامی
ناشر	: پژوهشکده حمل و نقل
نوبت چاپ	: اول
تاریخ انتشار	: پاییز ۱۳۸۵
کد انتشار	: 85/RRRM/201
شابک ۱۰ رقمی	: ۹۶۴-۶۲۹۹-۷۵-X
شابک ۱۳ رقمی	: ۹۷۸-۹۶۴-۶۲۹۹-۷۵-۷
تیراژ	: ۱۰۰۰ نسخه
قیمت	: ۱۰۰۰ تومان
لیتوگرافی	: باران
چاپ و صحافی	: پژمان
نشانی	: میدان آرژانتین - ابتدای بزرگراه آفریقا - اراضی عباس‌آباد - ساختمان شهید دادمان - وزارت راه و ترابری - طبقه سیزدهم شمالی - واحد اطلاع‌رسانی و نشر پژوهش‌ها
	تلفکس: ۸۲۲۴۴۱۶۴
	وب سایت فروش نشریات
	دفتر مرکزی فروش (انتشارات رنگین قلم)
	۸۸۹۶۹۴۵۱
	web:www.rahiran.ir
	http://shop.rahiran.ir

* کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است *

این گزارش با حمایت مالی پژوهشکده حمل و نقل منتشر می‌گردد

بسمه تعالی

وزارت راه و ترابری به عنوان متولی اصلی صنعت حمل و نقل کشور، نیازمند استفاده از بخش وسیعی از خدمات مهندسی در زمینه طراحی، ساخت، نگهداری و بهره‌برداری از اجزاء سیستم حمل و نقل می‌باشد. از این رو ضروری است که دانش فنی مورد نیاز بطور مستمر در اختیار مدیران و کارشناسان مربوطه قرار گرفته تا نیازهای مطالعاتی و تحقیقاتی آنها مرتفع گردد. معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و ترابری در صدد است ضمن شناسایی نیازهای اساسی بخشهای مختلف وزارت متبوع و انجام تحقیقات علمی - کاربردی در زمینه مسائل فنی حمل و نقل و همچنین استفاده از آخرین دستاوردها و انجام مبادلات علمی با مجامع و سازمانهای علمی و تخصصی ذیربط، به رفع این نیازها بپردازد. در همین راستا این معاونت برآن است تا با تهیه و تدوین مجموعه گزارشهای تخصصی، دانش فنی مورد نیاز را به شکلی مناسب در اختیار بخشهای مختلف وزارت متبوع و سایر متخصصان قرار دهد.

موضوع این گزارش در رابطه با حفاظت کاتدیک به عنوان سیستمی جهت جلوگیری یا توقف خوردگی در سازه‌های بتنی معمولی و پیش‌تنیده می‌باشد. با توجه به گستردگی و جدی بودن خرابی تعداد زیادی از طرحهای عمومی نظیر پلهای راه، راه‌آهن، پلهای روگذر، پارکینگ‌ها... که نتیجه آن هزینه‌های اقتصادی زیاد ناشی از تعمیرات طرح و کاهش قابلیت بهره‌برداری می‌باشد، اهمیت این موضوع بیش از پیش روشن می‌گردد.

امید است که با تلاشهای صورت گرفته در دفتر مطالعات فناوری و ایمنی و همکاری افرادی که در تهیه این گزارش ما را یاری رساندند، گامی مؤثر در جهت ایجاد تحول، نوآوری و ارتقاء عملکردها برداشته شود. در پایان از پژوهشکده حمل و نقل، به جهت حمایت از انتشار این مجموعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری

دفتر مطالعات فناوری و ایمنی

مختصری در خصوص پیارک

انجمن بین‌المللی دائمی کنگره‌های راه (پیارک) با هدف جمع‌آوری و انتشار اطلاعات در خصوص مسایل مربوط به جاده و ترافیک آن، اصلاح و استاندارد کردن شیوه‌های طراحی، اجرایی، اداری و مالی و نگهداری راهها، یکنواخت کردن علایم و نشانه‌ها، کدهای مربوط به آمد و شد در شاهراههای کشورهای مختلف و پیش‌بینی شبکه ارتباطی لازم متناسب با پیشرفت‌های اقتصادی و اجتماعی کشورها در سال ۱۹۰۸ همزمان با برگزاری اولین کنگره آن و با شرکت ۲۷ کشور جهان در پاریس تشکیل شد.

این انجمن، با مشارکت کشورهای مختلف هر چهار سال یکبار در زمان و مکانی که توسط دولت‌های عضو مورد توافق قرار می‌گیرد، کنگره‌ای را برگزار می‌کند و هم‌اکنون با تغییر نام به مجمع جهانی راه با بیش از ۲۰۰۰ نماینده از ۱۰۵ کشور عضو به کار خود ادامه می‌دهد. در سال ۲۰۰۳ میلادی بیست‌ودومین کنگره این مجمع در شهر دوربان آفریقای جنوبی برگزار گردید.

اهداف کلی و اولیه پیارک را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- بهبود ارتباطات بین‌المللی

۲- تدوین سیاست‌های حمل‌ونقل جاده‌ای

۳- ارتقای کیفیت برنامه‌ریزی، ساخت، بهسازی و نگهداری راهها

۴- ارتقای کیفیت اجرایی و مدیریت سیستم‌های راه

امروزه این اهداف شکل جدیدی پیدا کرده و با سرعت بیشتری تعقیب می‌گردد که عبارتند از:

۱- افزایش همکاری بین‌المللی

۲- پیشرفت هر چه سریعتر و جهت‌دار نمودن سیاست‌های برنامه‌ریزی، ساخت، بهسازی و نگهداری راهها

طی سال‌های اخیر، فعالیت‌های مجمع جهانی راه (پیارک) در ایران گسترش یافته و با تشکیل دبیرخانه این مجمع در معاونت آموزش، تحقیقات و فناوری وزارت راه و ترابری و معرفی اعضاء، سعی بر آن شده که هر چه بیشتر با مرکز پیارک در فرانسه ارتباط لازم برقرار شود. اعضای که برای این مجمع در نظر گرفته شده شامل یک عضو اصلی و یک عضو مکاتبه‌ای برای هر یک از کمیته‌های ۱۸ گانه مندرج در زیر می‌باشند:

۱- بخش "مدیریت و اداره سیستم راه"

TC1-1: کمیته اقتصاد سیستم راه

TC1-2: کمیته سرمایه‌گذاری در سیستم راه

TC1-3: کمیته عملکرد ادارات راه

TC1-4: کمیته مدیریت عملکرد شبکه راه

۲- بخش "حمل و نقل پایدار" با عضویت اعضای اصلی و مکاتبه‌ای کمیته‌های تخصصی:

- TC2-1: کمیته توسعه پایدار و حمل و نقل جاده‌ای
- TC2-2: کمیته راههای بین شهری و حمل و نقل یکپارچه
- TC2-3: کمیته مناطق شهری و طراحی یکپارچه شهری
- TC2-4: کمیته حمل و نقل بار و حمل و نقل ترکیبی
- TC2-5: کمیته نیازهای راههای برون شهری و قابلیت دسترسی

۳- بخش "ایمنی راهها"

- TC3-1: کمیته ایمنی راهها
- TC3-2: کمیته مدیریت ریسک در راهها
- TC3-3: کمیته عملیات تونل‌های راه
- TC3-4: کمیته راهداری زمستانی

۴- بخش "کیفیت و زیرساختهای راه"

- TC4-1: کمیته مدیریت منابع مالی در زیرساختهای راه
- TC4-2: کمیته اثرات متقابل راه و وسیله نقلیه
- TC4-3: کمیته روسازی راه
- TC4-4: کمیته پلها و سازه‌های مرتبط
- TC4-5: کمیته عملیات خاکی، زهکشی و بستر روسازی

ریاست پیارک در ایران بر عهده آقای دکتر مرتضی قارونی نیک بوده، آقای مهندس اصغر نادری سمت دبیر پیارک و آقای مهندس مهران قربانی مسؤلیت دبیرخانه پیارک در ایران را عهده‌دار می‌باشند. با توجه به اهداف اصلی مجمع جهانی راه، دبیرخانه پیارک در ایران با بازنگری در تشکیلات و اعضای خود به جهت رسیدن به ترکیب ایده‌آل چه به لحاظ امکانات و تسهیلات و چه به لحاظ نیروهای تخصصی فعال امیدوار است که بتواند در ارتقای سطح دانش فنی و تخصصی زیرمجموعه‌های مختلف حمل و نقل جاده‌ای کشور سهم و نقش خود را ایفاء نماید.

دبیرخانه پیارک در ایران

حفاظت کاتدیک عرشه پل‌ها

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- مقدمه
۲	۲- خوردگی میلگردها
۲	۲-۱- کلیات
۲	۲-۲- شرایط کاهش مصونیت
۵	۲-۳- مکانیزم خوردگی
۸	۳- روش‌های حفاظت و تعمیر
۸	۳-۱- تکنیک‌های حفاظت
۸	۳-۱-۱- طرح اختلاط بتن
۸	۳-۱-۲- آب‌بندی
۸	۳-۱-۳- سایر روش‌ها
۱۰	۳-۲- بازسازی و تعمیرات موضعی سازه‌های موجود
۱۱	۴- حفاظت کاتدیک
۱۱	۴-۱- اصول عملیات
۱۴	۴-۲- تکامل سیستم آند
۱۴	۴-۲-۱- آندهای منفرد با روکش آسفالتی رسانا
۱۵	۴-۲-۲- سیستم‌های آند منفرد بدون روکش
۱۷	۴-۲-۳- روکش‌های رسانا
۱۸	۴-۲-۴- آندهای مشبک
۲۰	۴-۳- معیار حفاظت
۲۱	۴-۴- شدت جریان حفاظت
۲۲	۴-۵- شدت جریان آندی
۲۲	۴-۶- قدرت
۲۲	۴-۷- اتصال الکتریکی میلگردها

۲۲	۸-۴- توزیع جریان
۲۳	۹-۴- سازه‌های پیش‌تنیده
۲۳	۱۰-۴- روکش تیتانیوم مشبک
۲۴	۱۱-۴- سیستم‌های کنترل
۲۶	۵- سیر تکاملی
۲۶	۱-۵- تاریخچه
۲۷	۲-۵- نتایج یک بررسی
۳۶	۳-۵- نتیجه‌گیری
۳۸	۶- ضمیمه: پرسشنامه
۴۴	۷- منابع

۱- مقدمه

این گزارش در رابطه با حفاظت کاتدیک به عنوان سیستمی جهت جلوگیری یا توقف خوردگی در سازه‌های بتنی معمولی و پیش‌تنیده می‌باشد و بدون در نظر گرفتن مواردی است که در حفاظت میلگردها به تنهایی چندان نقشی ندارند. خوردگی میلگردهای بتن موضوعی است که در بررسی‌های فنی و گردهمایی‌های بین‌المللی در گذشته توجه کمتری به آن شده است. علت این موضوع احتمالاً ناشی از یک سری مقررات است که ضرورت ارتباط نزدیک متخصصین رشته‌های مختلف (مثلاً سازه، علم مواد، الکتروشیمی، شیمی، الکتروتکنیک، الکترونیک) را می‌طلبد. البته، اهمیت این موضوع را با توجه به گستردگی و جدی بودن خرابی تعداد زیادی از طرح‌های عمومی (راهها، پلها، راه‌آهن، پل‌های روگذر، پارکینگ‌ها و...) نباید نادیده گرفت که نتیجه‌اش، هزینه‌های اقتصادی زیاد ناشی از تعمیرات طرح و کاهش قابلیت بهره‌برداری می‌باشد.

۲- خوردگی میلگردها

۲-۱- کلیات

در شرایط عادی، میلگردهای بتن به طور طبیعی حفاظت شده و در مقابل عارضه خوردگی محافظت می‌شود که به خاطر محیط قلیایی ناشی از واکنش هیدراسیون سیمان مقدار pH (۱۳-۱۴) بالاتر از حداقل مقدار (در حدود ۹/۵) مورد نیاز برای تضمین مصونیت سطح فولاد را تأمین می‌کند. شرایط مصونیت فولاد در محیط قلیایی به طور گسترده و تنگاتنگ در تمام سطوح مطالعه شده و از جنبه تئوری و مطالعات کاربردی هم در سازه‌ها و هم در نمونه‌های آزمایشگاهی تأیید شده است. بنابراین واضح است که تمام مشکلات ناشی از خوردگی میلگردهای سازه‌های بتنی معمولی و پیش‌تینده را باید به عواملی نسبت داد که منجر به از بین رفتن مصونیت موضعی و یا کلی در سطح میلگردها می‌شود.

۲-۲- شرایط کاهش مصونیت

برخی عوامل که می‌تواند به خوردگی میلگردها منجر شود عبارتند از:

(الف) کربناسیون بتن

(ب) وجود یون‌های کلروری

(ج) بتن متخلخل و وجود رطوبت

(د) پوشش کم فولاد

کربناسیون در بتن، ناشی از واکنش بین دی‌اکسید کربن هوا و هیدرات کلسیم سیمان است. این واکنش به تشکیل کربنات کلسیم منجر شده که با کاهش مقدار pH محلول در منافذ بتن از مقدار ۱۳-۱۲ به pH کمتر در حدود ۹ را سبب می‌شود. در این pH اکسید آهن دیگر محافظ پایداری نبوده و فولاد مستعد خوردگی کلی می‌شود.

یون‌های کلروری، بدترین عامل خوردگی میلگردها هستند زیرا این عوامل می‌توانند موجب تخریب غشاء محافظ فولاد (غشای مصونیت) شوند، حتی وقتی که محلول در منافذ بتن دارای pH بالایی (۱۳-۱۲) باشد. علاوه بر این، چنانچه بتن کربنی شده باشد، اثر تهاجمی یون کلر تشدید می‌شود.

۱- حد آستانه برای شروع خوردگی در فولاد، در حدود ۰.۴٪ کلر بر حسب وزن سیمان است. در بتن کربنی، این مقدار خیلی کمتر بوده و حتی به صفر میل می‌کند.

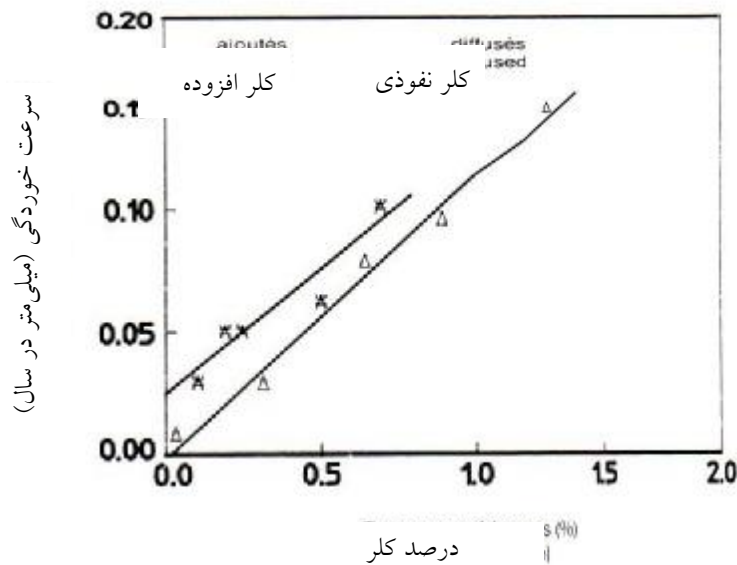
۲- یون کلر از طرق مختلف می‌تواند بتن را آلوده کند از جمله:

(الف) وجود یون کلر در مخلوط بتن در حین ساخت ناشی از وجود آن در آب و یا ماسه‌های کلردار و یا استفاده از کلرید کلسیم به عنوان تسریع‌کننده هیدراسیون

(ب) سازه‌هایی که به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی در ماههای سرد زمستان به سطح آنها نمک پاشیده می‌شود (عرشه پل‌های روگذر)

(ج) سازه‌های بتنی متخلخل در معرض محیط‌های دریایی

وقتی یکی از این عوامل باعث تخریب غشاء محافظ می‌شود (حتی فقط موضعی و به صورت حفره‌ای)، فولاد در شرایط فعال (Active) قرار گرفته و این عمل ممکن است به واکنش فولاد با اکسیژن که در سطح فولاد است منجر شود و بروز اکسیدهای غیرمحافظ را سبب گردد.



شکل ۱- اثرات منشاء کلر در میزان خوردگی

وقتی رطوبت نسبی محیط خارجی خیلی بالا باشد (در حدود ۹۵-۹۰ درصد)، سرعت خوردگی ممکن است خیلی زیاد باشد (بیشتر از ۱۰۰ میکرومتر در سال). در این شرایط سرعت واکنش فولاد با اکسیژن که همان سرعت خوردگی باشد، متناسب با سرعت نفوذ یا عبور اکسیژن از محیط خارجی به درون لایه پوشش روی میلگردها است.

مناطقى که رطوبت نسبی بیشتر از ۹۵ درصد است، شرایط اشباع بتن فراهم بوده و مقدار اکسیژن رسیده به میلگردها خیلی کم می‌باشد و در نتیجه سرعت خوردگی ناچیز است. این حالت برای سازه‌های زیرآب است و بتن در این وضعیت به علت وجود یون‌های کلروری ضریب هدایت الکتریکی بالایی داشته و همچنین در ناحیه زیرآب مقدار خیلی کمی اکسیژن وجود دارد. از این رو خوردگی میلگردها در مجاورت ناحیه زیر آب (به عنوان مثال پایه پل‌ها در ناحیه جزر و مد آب دریا) که بالاتر از سطح آب اکسیژن نیز به حد کافی وجود دارد، اتفاق می‌افتد.

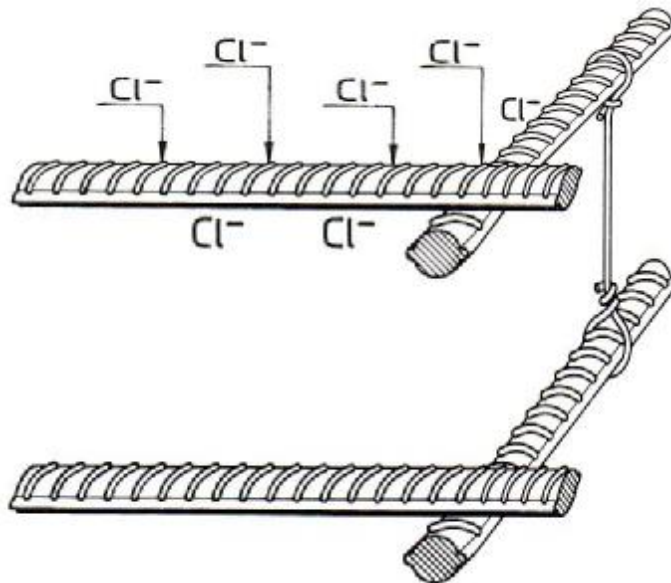
به عبارت دیگر، وقتی رطوبت نسبی کمتر از ۹۰ درصد است، عوامل دیگر در کنترل سرعت خوردگی نقش دارند. این عوامل بخصوص شامل ضریب هدایت الکتریکی بتن است که با کاهش رطوبت نسبی خارجی این ضریب نیز کاهش می‌یابد.

وقتی رطوبت نسبی خارجی به کمتر از ۶۵-۷۰ درصد تنزل می‌کند، ضریب هدایت الکتریکی بتن خیلی ناچیز شده، به طوری که سرعت خوردگی عملاً متوقف می‌شود. احتمال تهاجم خوردگی ناشی از کلرورها (حفره‌ای) با افزایش نسبت کلر به اکسیژن رشد می‌یابد که این نسبت با مقدار کلر داخل بتن، کاهش عیار سیمان، کربناسیون و مشخصات بتن مرتبط است.

باید خاطر نشان نمود که یون‌های Cl^- موجود در خمیر سخت سیمان، چنانچه عمداً اضافه شوند یا به طرق دیگری در موقع درست کردن بتن یون کلر وجود داشته باشد و یا اگر یون کلر بعداً از محیط خارجی، جذب گردد، اثری متفاوت خواهند داشت. شکل ۱ نتایج اثر یون کلر در حالات مختلف را بر اساس آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد.

در بعضی از انواع بتن‌ها، با توجه به سه کلسیم آلومینات ($3CaO, Al_2O_3$) کلر اضافه شده در فرآیند خوردگی کاملاً دخالت ندارد، در حالی که، آزمایشات نشان می‌دهد که کلر به طور جزئی با محصول حاصل از هیدراسیون سیمان ترکیب شده و تشکیل ترکیبات کلروری می‌دهد (کلراید آلومینات و کلراید فریت). این ترکیبات بخشی از کلورها را تثبیت کرده و مقدار آن را در محلول تقلیل می‌دهند، لیکن یک مقدار کافی یون کلر آزاد را برای ایجاد شرایط ریسک باقی می‌گذارد. تشکیل ترکیبات پیچیده حاوی کلورها اثر غلظت کلورها را در محلول فقط به طور موقت و ظاهری کاهش می‌دهد.

در حقیقت، نوعی "اندوخته یا ذخیره" به وجود می‌آید زیرا این ترکیبات پیچیده در تعادل با کلورهای محلول است و در نتیجه، تغییر غلظت کلورها با تغییر ترکیبات جبران می‌شود.



شکل ۲- اتصال الکتریکی میلگردها

چنانچه ملاحظه شد، حد آستانه کلورها برای تهاجم خوردگی در بند ۱ مشخص گردید، لیکن این حد بیانگر این است که تا وقتی توافق در تأیید مقدار کلورهای موجود در کمتر از این حد وجود دارد، حالت ایمنی کافی نیز وجود دارد. به عبارت دیگر توافق دیگری که خارج از این حد باشد تا کنون مطرح نشده است. این عدم توافق با چارچوب متفاوت در استانداردهای کشورهای مختلف بیان می‌شود (جدول ۱). در حقیقت، حد مقادیر فقط هنگامی اهمیت دارد که این حد نه فقط در طبیعت اجزای متشکله مخلوط سیمانی (نوع سیمان، مصالح سنگی، نوع آب) مد نظر قرار گیرد، بلکه تمام شرایطی

که مشخصات فیزیکی نظیر دانه بندی مصالح سنگی، نسبت آب به سیمان، نسبت سیمان به مصالح سنگی، فرآیند عمل آوری انتخابی و.. را توأمأ مشخص کند.

همان طور که توسط وزارت حمل و نقل ایالت ویسکانسین مشخص شده است، باید گفت که بیشتر ایالت ها در آمریکا اندازه گیری کلورها در عرشه های بتنی را قبل از بازسازی متوقف کرده اند. این اقدام نتیجه یافته های قبلی به میزان ۳ الی ۹ کیلوگرم کلر در متر مکعب است که مشخص شده تمام عرشه ها کلور خیلی بیشتر از حد در سطح فولاد جهت شروع و ادامه نیمه پیل فعال (Active half cells) روی فولاد بدون روکش داشته اند.

در جمع بندی باید خاطرنشان کرد که علاوه بر عوامل مشخص شده، خرابی سازه های بتن مسلح ممکن است ناشی از مشارکت عوامل دیگر در رابطه با خود بتن باشد:

- سیکل های یخ زدگی- آب شدگی: این عامل باعث خرابی و زوال بتن ناشی از انبساط حجمی آب یخ زده می شود (۹٪+ انبساط حجمی).

- اثر سولفات ها: این ترکیب در آب و بعضی مواقع در مصالح وجود دارد، که با خمیر سیمان ترکیب شده و تشکیل بلورهای خیلی حجیم را داده، که باعث تجزیه و متلاشی شدن بتن می شود.

- آب شستگی: نمک های محلول را حل کرده و از خمیر سیمان خارج می کند که باعث افزایش تخلخل خمیر سیمان می شود.

- واکنش قلیایی: این عارضه بین مواد قلیایی سیمان (K, Na) و بعضی مصالح سنگی خاص که حاوی آمورف یا سیلیکات متبلور ناقص (اوپال، شینگل) است ایجاد می شود که به انبساط حجمی ژل منجر می شود.

۳-۲- مکانیزم خوردگی

یکی از مکانیزم های احتمالی خوردگی ناشی از کلورها که در عرشه پل به وجود می آید در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. برای بروز خوردگی، علاوه بر کلورها، شرایط زیر نیز لازم است:

- وجود اکسیژن (محرک واکنش خوردگی) در سطح میلگردها

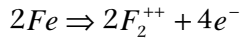
- رطوبت داخلی بتن باید به مقداری باشد که ضریب هدایت الکتریکی مشخصی را در بتن ایجاد کند (نه کمتر از ۶۵٪)

دو ردیف میلگرد که به طور الکتریکی به همدیگر متصل هستند را در نظر می گیریم (شکل ۲). کلر نفوذ کرده به بتن به سطح اولین ردیف می رسد. بدین طریق، یک اختلاف ناشی از تمرکز کلر بین دو ردیف میلگرد ایجاد شده که این اختلاف منجر به بروز یک اختلاف پتانسیل الکتریکی بین ردیف پایین و بالا می شود (شکل ۳). اختلاف در پتانسیل الکتریکی مربوط با جریان الکترون ها از ردیف بالا به ردیف پایین می باشد.

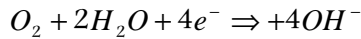
الکترون ها در ردیف فوقانی میلگردها تولید می شوند (تحلیل آهن) و این الکترون ها در ردیف تحتانی توسط اکسیژن اتمسفر به مصرف می رسند. ناحیه ای که آهن آن تحلیل می یابد، ناحیه آندی گفته شده و ناحیه ای که اکسیژن آن کاهش می یابد ناحیه کاتدی نامیده می شود. مدار الکتریکی با حرکت یونها در منافذ کامل می شود (شکل ۴).

مکانیزم الکتروشیمیایی که بدین طریق ایجاد می شود نتیجه سه فرآیند است.

(۱) ناحیه آندی، با اکسیداسیون آهن و آزاد شدن الکترون ها، مطابق واکنش زیر است:

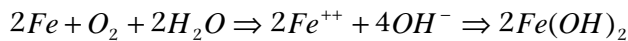


(۲) ناحیه کاتدی، که الکترون های آزاد شده را به واسطه کاهش اکسیژن محلول در آب طبق واکنش زیر مصرف می کند.

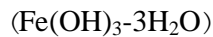


(۳) عبور جریان از آند به کاتد در بتن

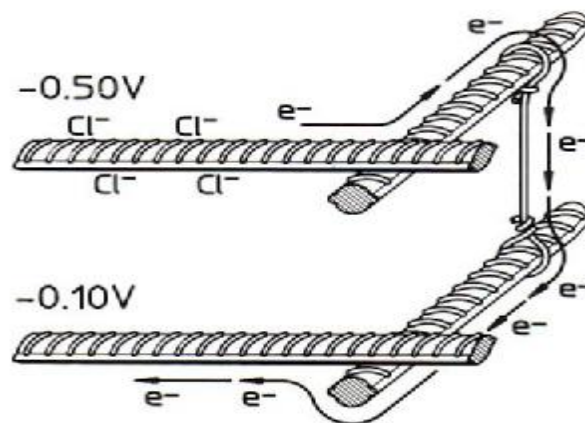
واکنش خوردگی سرتاسری، که نتایج زیر را ارایه می دهد:



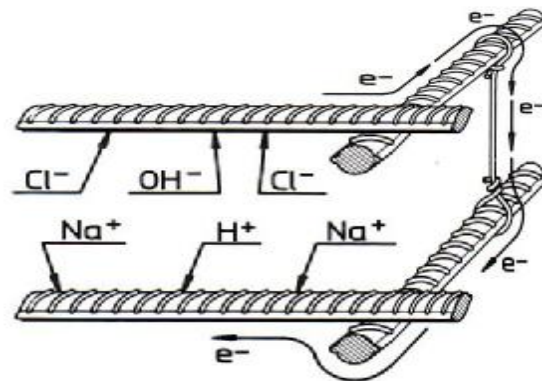
که این فرآیند به تشکیل هیدروکسید آهن قابل حل منجر شده که با واکنش های بعدی و با افزایش تدریجی در حجم به تشکیل هیدرات غیرمحافظ هیدروکسیدهای آهن منجر می گردد.



این محصول خوردگی حجمی برابر با ۲ الی ۱۴ برابر حجم اولیه آهن، فضا اشغال کرده و در نتیجه تنش مکانیکی زیادی در بتن به وجود می آورد که به بروز گسیختگی و تورق منجر شده و ممکن است فرآیند خوردگی را تشدید کند (نفوذ بیشتر اکسیژن و رطوبت) و تخریب فیزیکی در خود سازه به وجود آورد. یادآوری این نکته مهم است که در واکنش خوردگی، کلورها در این فرآیند دخالتی ندارند و از این نظر هیچ کاهش و تحلیلی در مقدار کلورها مشاهده نمی شود، بنابراین تا وقتی کلورها به هر طریقی از سطح میلگردها زدوده نشوند، اثر مخرب آنها در غشاء مصونیت میلگردها ادامه خواهد داشت.



شکل ۳- ایجاد یک اختلاف پتانسیل الکتریکی



شکل ۴- تکمیل مدار الکتریکی

جدول ۱- حد ریسک پذیری کلر در بتن

ملاحظات	درصد یون کلر بر حسب وزن سیمان	مرجع
		بتن آرمه
(الف)	۰/۲۵	مقررات West and Coll.
(الف)	۰/۱۵	استاندارد FWHA
(الف) (۱)	۰/۱۵	آیین نامه ACI n.318
(الف) (۲)	۱/۰۰	آیین نامه ACI n.318
(ب) (۳)	۰/۳۰	آیین نامه ACI n.318
(ب)	۰/۲۰	مقررات آیین نامه ACI Order 222
(ب) (۴)	۰/۳۵	آیین نامه B.S. CP110
		استاندارد NORSK 3420
(ب)	۰/۴۰	پلها و سازه‌هایی که در معرض کلورها قرار ندارند
(ب)	۰/۱۰	پلها و سازه‌هایی که در معرض کلورها (آب دریا، نمک‌های یخزدا) قرار دارند
		بتن پیش تنیده
(الف)	۰/۰۶	آیین نامه ACI n.318
(ب)	۰/۰۸	مقررات آیین نامه ACI Order 222
(الف)	۰/۰۲	پروژه استاندارد ANDIS AICAP
(ب)	۰/۱	استاندارد NORSK 3420
(ب)	۰/۰۰۵	در صورت وجود کلورهای محلول در افزودنی‌ها
	(۱) در معرض دائمی کلورها (۲) محیط خشک با بتن حفاظت شده (۳) محیط‌های دیگر (۴) حاصل ۹۵٪ آزمایشات حداکثر ۱۰۰/۰۵٪	(الف) کلورهای محلول در آب (ب) کلورهای محلول در اسید

۳- روش‌های حفاظت و تعمیر

روش‌های جلوگیری از حملات شیمیایی و فیزیکی فوق‌الذکر و نیز روش‌های تعمیر برای حالت‌هایی که قبلاً در آن خرابی ایجاد شده، به طور مشخصی پیشرفت کرده است.

۳-۱- تکنیک‌های حفاظت

روش‌های مورد استفاده در حال حاضر که در عرشه پل‌ها و روگذرها در حین ساخت استفاده می‌شود تا از گسترش مکانیزم‌های خرابی جلوگیری کند، به شرح زیر بیان می‌شود.

۳-۱-۱- طرح اختلاط بتن

دوام یک سازه بتن‌آرمه یا پیش‌تنیده در طول سالیان و تضمین بهره‌برداری بر اساس طراحی انجام شده، توانایی خود سازه است. اگر چه دوام بتن شرط کافی برای تضمین دوام کل سازه نیست، لیکن یک شرط لازم است. از این رو تحقیقات انجام گرفته بر روی تعدادی از سازه‌های آسیب‌دیده نشان می‌دهد که درصد زیادی از خرابی مشاهده شده ناشی از آماده‌سازی نادرست بتن بوده است.

بنابراین عواملی که باید در ساخت بتن و طرح اختلاط آن مد نظر باشد به شرح زیر است:

- اجزای متشکله بتن، که شامل نسبت آب به سیمان، نسبت مصالح سنگی به سیمان و کیفیت مصالح اولیه سیمان، مصالح سنگی، آب و افزودنی‌ها می‌باشد.
- کارآیی بتن بعد از بتن‌ریزی
- عمل‌آوری بتن بعد از قالب‌برداری

این عوامل تأثیر زیادی در نفوذپذیری و خلل و فرج موینگی مصالح و در نتیجه دوام بتن دارند.

۳-۱-۲- آب‌بندی

آب‌بندی سطح فوقانی عرشه‌ها با کاربرد لایه‌های آسفالت داغ یا غشاهای ترکیبی که با استفاده از تجهیزات خاص به صورت اسپری یا روکش انجام می‌شود، صورت می‌گیرد. البته کاربرد مواد آب‌بند که برای سازه‌های جدید تعیین می‌شود باید از نوعی باشد که فاقد هرگونه آلودگی کلری باشد. در غیر این صورت بتن‌های آلوده به کلر باید قبل از کاربرد این گونه مواد کاملاً برداشته شود. مواد آب‌بند به تنهایی ممکن است اثر کاهش خوردگی میلگردها را با محدود کردن دستیابی به اکسیژن داشته باشند.

۳-۱-۳- سایر روش‌ها

فناوری‌های دیگری نیز که می‌توانند از خوردگی میلگردهای بتن جلوگیری کنند، پیشرفت زیادی کرده‌اند. هر چند که در حال حاضر نتایج آزمایشات کاملاً رضایت‌بخش نبوده است.

مهم ترین این روشها عبارتند از:

- استفاده از مواد بازدارنده خوردگی (Corrosion inhibitor) در هنگام ساخت بتن: نقش این مواد کاهش فرآیند تحلیل فلز و تمایل به تشکیل یک غشاء محافظ روی سطح فلز می باشد. یکی از رایج ترین مواد، نیترات کلسیم $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ است. حساس ترین و مهم ترین جنبه این روش، ارزیابی و تعیین نسبت صحیح شرایط وجود کلر در مصالح سنگی و آن مقداری که از خارج نفوذ می کند، است. در عین حال چنانچه ترک هایی در بتن وجود داشته باشد، مواد بازدارنده ممکن است با تشکیل خوردگی موضعی خطرناک، شسته و خارج شود. در نتیجه تعدادی از واکنش های شیمیایی، نیترات کلسیم با گذشت زمان تحلیل می رود.
- استفاده از میلگردهای روکش دار با رزین های اپوکسی: این فرآیند در کارخانه انجام شده و شامل سیکل های خاص بهسازی و ایجاد روکش از مواد اپوکسی در شرایط ویژه روی میلگردهاست که همانند یک لایه عایق در مقابل محیط خارجی عمل می کند. این فرآیند برای کاربرد در میلگردهای پیش تنیده مشکل است. همچنین مراقبت های ویژه ای در حین حمل و انبار کردن بایستی اعمال شود تا از خرابی و آسیب دیدگی روکش جلوگیری گردد و در این میلگردها در موقع بستن نباید جوشکاری انجام شود.
- استفاده از میلگردهای فولادی گالوانیزه: نظرات مختلفی در خصوص این راه حل وجود دارد، به خصوص از جنبه های زیر موضوع جای بحث دارد:
 - روی (Zn) در محیط قلیایی نظیر محیط بتن پایدار است.
 - فولاد در نتیجه رشد هیدروژن در سطح آن به واسطه تماس فولاد گالوانیزه با بتن، ترد و شکننده می شود (Hydrogen Evolution).
 - کاهش چسبندگی بین میلگردهای گالوانیزه و بتن.
 - استفاده از میلگردهای فولادی استیل: این راه حل که مشابه راه حل قبلی است، از مواد جایگزین به جای فولاد کربنی استفاده می کند که در حال حاضر پرهزینه است. در واقع اگر خوردگی به واسطه کلر باشد، حتی فولاد استیل، اگرچه انواع مختلفی دارد، ممکن است تحت اثر خوردگی حفره ای (Pitting) با تشکیل زنگ قرار گیرد و در نتیجه باعث ترک خوردگی بتن شود.
 - جنبه های منفی این راه حل شامل چسبندگی ضعیف و مقاومت مکانیکی کم است (این مورد فقط با نوردکاری می تواند اصلاح شود).
 - استفاده از میلگردهای غیرفلزی: این راه حل در حال حاضر در مراحل اولیه پیشرفت قرار دارد که در اینجا بحث بیشتری نمی توان کرد.
 - استفاده از روکش های آلی
 - اشباع سطح خارجی بتن با پلیمرها
 - رنگ آمیزی سطح خارجی سازه

۲-۳- بازسازی و تعمیرات موضعی سازه‌های موجود

در مورد کربناسیون بتن که فاقد کلرور است، خوردگی فولاد ممکن است با برداشتن کامل لایه کربناسیون کاملاً متوقف شده و پوشش روی میلگردها با ملات سیمانی بازسازی شود.

برای بتن حاوی کلرور، تمام بتن آلوده به کلرور باید برداشته شده و نوسازی شود. میلگردها نیز باید کاملاً تمیز گردند (حتی داخل منافذ خورده شده) و محصول خوردگی آهن که ممکن است حاوی کلرور باشد بایستی برداشته شود. چنانچه این محصول خوردگی زوده نشود، ممکن است عارضه خوردگی در لایه پوشش که قبلاً نوسازی شده، مجدداً نفوذ کند.

لازم به یادآوری است که برداشتن بتن آلوده و صرف تعمیرات بتن متورق یا بتنی که به طور مکانیکی تخریب شده، کافی نیست زیرا سطوحی که تعمیرات موضعی در آنها انجام شده (ناحیه کاتدی) و سطوحی که اطراف آن هستند (ناحیه آندی)، هنوز با کلر آلوده بوده و جریان قوی خوردگی مجدداً ایجاد خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که بعد از یک زمان مشخص، پدیده تورق و ترک در بتن، در اطراف مناطق تعمیر شده، مجدداً ظاهر می‌شود. بدین دلیل، تعمیرات موضعی وصله‌ای شکل (Patches) نه تنها نقش مؤثری در توقف خوردگی به واسطه وجود کلرورها ندارند، بلکه در واقع، اغلب تشدید خوردگی را نیز سبب می‌شوند.

سیستمی که به طور وسیع در ایالات متحده و به طور فزاینده‌ای در سایر کشورها استفاده می‌شود و در سازه‌های جدید به عنوان جلوگیری کننده و در سازه‌های موجود جهت توقف خوردگی میلگردها ممکن است به کار رود، سیستم حفاظت کاتدیک است.

۴- حفاظت کاتدیک

۴-۱- اصول عملیات

حفاظت کاتدیک روش جلوگیری از خوردگی بیشتر مواد فلزی به طور عام و میلگردهای بتن به طور خاص در تماس با یک محیط خورنده (خاک، آب دریا، آب بطور کلی، بتن آلوده با کلرور) است. این روش با ایجاد پتانسیل خیلی منفی در میلگردها به دست می‌آید، به طوری که واکنش خوردگی حذف یا به حد ناچیزی کاهش می‌یابد.

کاهش پتانسیل یا اثر پلاریزاسیون (Polarization) با بروز یک جریان پیوسته ضعیف عبوری از بتن به میلگردها به دست می‌آید که با تشکیل یک پیل الکتروشیمیایی با ترکیب زیر است:

- میلگردها چون گیرنده جریان هستند به عنوان "کاتد" عمل می‌کنند.

- الکتروود دوم که داخل بتن یا روی سطحش قرار گرفته، جریان را انتقال داده و در نتیجه به عنوان "آند" عمل می‌کند.

- الکتروولیت که خود بتن است.

به طور کلی حفاظت کاتدیک ممکن است به دو طریق انجام شود:

- با آندهای فداشونده (Sacrificial Anode) به وسیله فلزهای واکنش‌زا نظیر روی، آلومینیوم یا منیزیم که در یک مدار کوتاه با آهن کوپل شده و این فلزات ترجیحاً خورده می‌شوند و الکترون‌ها را به سوی آهن روانه می‌کنند.

- با اعمال جریان (Impressed Current) که به وسیله یک مدار الکتریکی که در آن یک مولد الکتریکی خارجی تعبیه شده و همانند یک پمپ، الکترون‌ها را به سمت آهن می‌فرستد تا حفاظت کاتدی را دریافت کند، که به شکل یک الکتروود درونی ناکارآمد در همان محیط درآمده و نظیر یک آند غیر قابل حل عمل می‌کند.

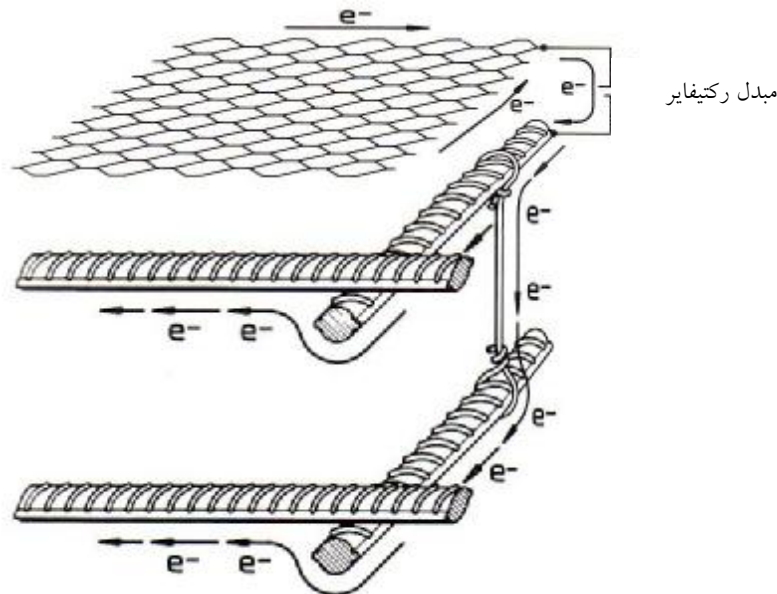
در خصوص سازه‌های در معرض اتمسفر، مقاومت الکتریکی زیاد بتن به حدی است که اولین روش بهترین روش نبوده و معمولاً سیستم اعمال جریان در حال حاضر انتخاب می‌شود.

این بدان مفهوم نیست که سیستم آند فداشونده کاملاً باید کنار گذاشته شود. گزارش NCHRP شماره ۲۳۴، "حفاظت کاتدیک گالوانیک برای عرشه پل‌های بتن‌آرمه، ارزیابی صحرائی"، چگونگی نصب و ارزیابی سه نوع سیستم آند فداشونده مختلف با استفاده از نوارها و ورقه‌های فلز روی (Zn) را شرح می‌دهد.

در ایام خاصی از سال، به نظر می‌رسد جریان کافی، برای حفاظت کاتدیک مؤثر باشد. این تکنیک موقتاً کنار گذاشته شد چرا که جریان مورد نیاز در طول سال استمرار نداشت. هر چند ایامی از سال همچنین ایامی که احتمال وقوع خوردگی بالا بود، جریان برقرار بود. به عبارت دیگر، حفاظت وقتی انجام می‌شد که مورد نیاز باشد.

همان طور که در بخش ۲-۲ اشاره شد، مکانیزم خوردگی به سادگی با این واقعیت خلاصه می‌شود که وقتی اکسیژن اتمسفر به میلگردها می‌رسد، الکترون‌های آهن را در قسمت‌های خورده شده جذب و مصرف می‌کند، جایی که یون‌های کلرین غشاء محافظ اکسیدی را تخریب می‌کند.

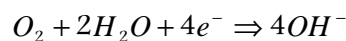
اما اگر الکترون‌هایی که اکسیژن باید از آهن جذب و مصرف کند از خارج تأمین شود، اکسیژن این الکترون‌ها را بدون توجه به الکترون‌های آهن مصرف خواهد کرد و در نتیجه فرآیند خوردگی اتفاق نمی‌افتد. با حفاظت کاتدی به وسیله اعمال جریان، الکترون‌ها به آهن "پمپ" می‌شود که یک بار منفی تصور شده یا به عبارت دیگر به طور کاتدی پلاریزه می‌شود (شکل ۵).



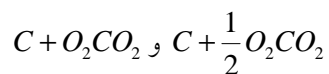
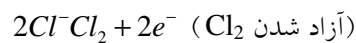
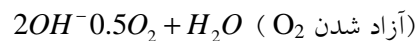
شکل ۵- حفاظت پلاریزاسیون میلگردها

وقتی عبور جریان از آند به میلگردها افزایش می‌یابد، پتانسیل میلگردها در جهت منفی زیاد شده و سرعت خوردگی به اندازه‌ای کاهش می‌یابد که بی‌اهمیت شده و پتانسیل "حفاظت" نامیده می‌شود. شدت جریان مورد نیاز برای دستیابی به پتانسیل حفاظت، تحت عنوان "شدت جریان حفاظت"، شناخته می‌شود. حفاظت کاتدی و واکنش‌های زیر را در بتن ایجاد می‌کند:

- در کاتد (میلگردها) کمبود اکسیژن وجود دارد که از طریق نفوذ اکسیژن به میلگردها می‌رسد، یعنی:



- در آند، واکنش‌هایی ممکن است وجود داشته باشد:



(آزاد شدن منواکسید کربن و دی‌اکسید کربن در سیستم‌های آندی با پایه کربن)

بنابراین، در میلگردها (کاتد) وجود محصول قلیایی و در آند مصرف آن ممکن است مشاهده شود. ذکر این نکته مهم است که نقش کاتدی میلگردها علاوه بر عملکرد حفاظتی به عنوان یک نتیجه مستقیم در کاهش پتانسیل، اثرات مفید دیگری نیز ارایه می‌دهد:

- ۱- احیای وضعیت قلیایی اطراف میلگردها، همان طوری که با واکنش کاتدی در بالا مشاهده شد.
- ۲- زدودن کلورها (اگر وجود داشته باشد) از سطح میلگردها و از قسمت‌های مجاور نزدیک میلگردها یا جلوگیری و یا تأخیر ورود کلورها در سازه‌های جدید.
- ۳- افزایش مقدار رطوبت در غشاء بتنی مجاور میلگردها.

اگر حفاظت کاتدیک در سازه‌هایی که قبلاً خوردگی دارند استفاده شود، دو اثر اول، مصونیت (Passivity) میلگردها را اعاده می‌نماید چرا که این اقدام نسبت OH به کلورها را افزایش می‌دهد. اگر حفاظت کاتدیک در سازه‌های جدید که هنوز تحت اثر کلورها قرار نگرفته، استفاده شود، به عنوان تکنیکی جهت جلوگیری یا در هر حالتی بازدارنده از نفوذ کلر ممکن است در نظر گرفته شود. در نتیجه ممکن است این روش به عنوان تکنیک نگهداری بازدارنده نیز مد نظر باشد. سومین اثر حفاظت کاتدیک، کاهش سرعت نفوذ اکسیژن و در نتیجه کاهش در جریان حفاظتی است. این عملکرد مزیت چندانی به جز صرفه‌جویی در انرژی و (از بعد انرژی خیلی ناچیز است). یا استهلاک کمتر آند (همیشه ناچیز بوده به خصوص با آندهای تیتانیوم) ندارد، لیکن این اثر توزیع بهتر جریان در زمان را میسر کرده که نتیجه‌اش دستیابی به شرایط حفاظتی در سطح وسیع‌تر است.

اساساً اثرات نامطلوب حفاظت کاتدیک به دو مورد محدود می‌شود. اولین مورد مربوط به کاهش pH در سطح تماس آند/ بتن است که ممکن است به خرابی موضعی بتن منجر شود. هرچند این اثر با استفاده از یک شدت جریان آندی کمتر از حد آستانه به طور جزئی قابل جبران است.

دومین اثر نامطلوب احتمال بروز عارضه تردی هیدروژنی در فولادها به خصوص در فولادهایی با حد تسلیم بالا می‌باشد (در فولاد کابل‌های پیش‌تنیده یا پس‌کشیده).

البته تجارب آزمایشگاهی و صحرایی در مدت بیش از ۲۰ سال در سازه‌های مدفون در خاک یا سازه‌های دریایی نشان داده است که حتی در بحرانی‌ترین شرایط هیچ مورد از تردی هیدروژنی برای پتانسیل‌های مثبت‌تر از -0.95 ولت در مقیاس Ag/AgCl ایجاد نمی‌شود. در هر حال با طراحی دقیق سیستم و استفاده از سیستم‌های هشدار دهنده مناسب، این عارضه کاملاً می‌تواند منتفی شود.

از نظر تئوری، سومین اثر مضر که می‌تواند وجود داشته باشد ناشی از افزایش میزان قلیایی روی میلگردها است که چنانچه مصالح سنگی مستعد و حساس به واکنش قلیایی وجود داشته باشد، منجر به واکنش قلیایی مصالح سنگی می‌شود. در عمل این عارضه هرگز مشاهده نشده است. علاوه بر این، تجربه نشان می‌دهد در شدت جریان‌هایی که به طور عادی استفاده می‌شود، افزایش قلیایی بالاتر از مقادیر معمول pH (بین $12/5$ و $13/5$) کاملاً بی‌ربط است.

۲-۴- تکامل سیستم آند

در طراحی و ساخت سیستم‌های حفاظت کاتدیک به روش اعمال جریان، پیچیده‌ترین قسمت، اندازه سازه آند است که با مقاومت زیاد بتن (به مقدار آب منفذی بستگی داشته و البته همیشه مقدار آن هزاران اهم- سانتی‌متر است) و حجم محدود شده الکترولیت (بتن) که از آن جریان توزیع می‌شود، ارتباط دارد. آندها در واقع، در خارج از سطح سازه بوده و به طور کلی با لایه‌ای از ملات سیمانی پوشانده می‌شوند.

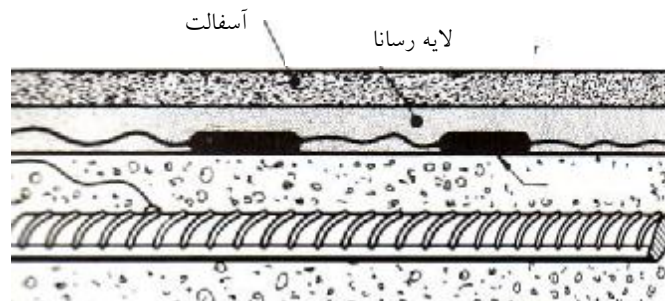
مشخصات اصلی که یک سیستم آندی باید از آن برخوردار باشد به طور خلاصه شامل نکات اصلی زیر است:

- آند باید از چسبندگی یا از قابلیت مهار شدن به سطح بتن برخوردار باشد.
- سیستم آندی باید قابلیت کاربرد در تمام انواع سطوح بتنی را داشته باشد (سطوح افقی نظیر سقف‌ها، قائم، تخت یا منحنی).
- این سیستم باید از مشخصات مکانیکی مناسب برای نصب و مهار برخوردار باشد.
- آند باید بادوام بوده و هزینه‌های نصب کمتری داشته باشد تا کاربرد حفاظت کاتدیک از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد.
- مروری بر پیشرفت سیستم‌های آندی در حفاظت عرشه پلها در اینجا مناسب به نظر می‌رسد، کاربردی که بیشترین تجارب را در این زمینه شامل می‌شود.

۲-۴-۱- آندهای منفرد با روکش آسفالتی رسانا

در اولین سیستم‌های اعمال جریان برای حفاظت عرشه پلها، آندهای منفرد چدنی، فروسیلیکون یا گرافیت استفاده شد که روی عرشه قرار می‌گرفت. این آندها با یک لایه ضخیم آسفالت رسانا (۵۰ میلی‌متر) با پایه کربن- کک به عنوان آند ثانویه برای توزیع جریان از آند اولیه به کل سطح مورد حفاظت، پوشانده می‌شد. این اقدام منجر به کاهش شدت جریان و در نتیجه محدود شدن حمله اسیدی در سطح تماس آند اولیه و بتن می‌گردید. لایه رسانا نیز با یک لایه آسفالتی محافظ به ضخامت ۴۰-۵۰ میلی‌متر پوشانده می‌شد (شکل ۶).

آسفالت رسانا با ماشین‌آلات معمولی به طور مستقیم روی آندها و کابل‌ها پخش می‌گردید. بنابراین فوق‌العاده مهم بود که تمامی اجزای سیستم آندی قادر به تحمل حرارت زیاد آسفالت باشند.



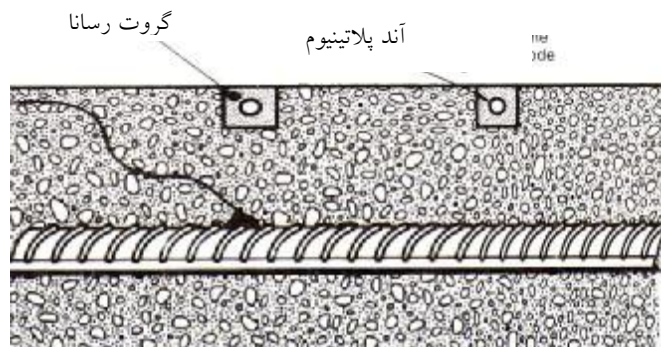
شکل ۶- آند با روکش آسفالتی رسانا

در سالهای ۱۹۷۳ تا ۱۹۸۰، دهها سیستم حفاظتی از این نوع در شمال آمریکا نصب گردید که تا به امروز هنوز کار می‌کنند، هر چند که در این سیستم‌ها گهگاهی نگهداری لایه آسفالتی رسانا ضروری است. از آنجایی که این روش معایب و نقایصی دارد، در حال حاضر از آن استفاده نمی‌شود. از مشکلات این سیستم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- وزن: بسیاری از سازه‌ها نمی‌توانند اضافه وزن لایه آسفالتی رسانا را تحمل کنند.
 - قابلیت تعویض: لایه آسفالتی رسانا زودتر از بتن خراب می‌شود. لذا اگر آسفالت روی عرشه ضرورت تعویض داشته باشد، اجزا و سیستم حفاظت کاتدیک عموماً خراب شده و در نتیجه سیستم دیگر نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

- محدودیت کاربرد: این سیستم برای کاربرد در دیوارهای قائم یا سقف‌ها مناسب نیست.

- هزینه: هزینه سالیانه سیستم با احتساب هزینه‌های تعویض آسفالت زیاد است.



شکل ۷- سیستم شیاری

۴-۲-۲- سیستم‌های آند منفرد بدون روکش

سیستم‌های بدون روکش رسانا پیشرفت کرده و لذا دارای مسایل و مشکلاتی که به آن اشاره گردید، نمی‌باشد. دو نوع اصلی این نوع سیستم عبارتند از:

- سیستم آند شیاری

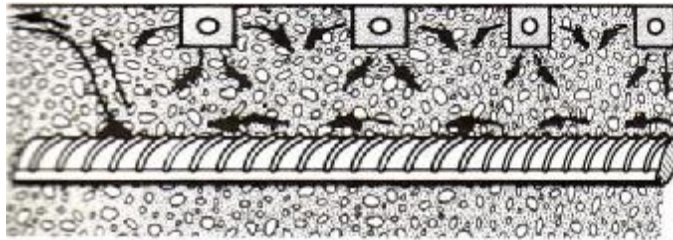
- بدون روکش با ملات رسانا

در نوع اول، آند ترکیبی از سیم‌های تیتانیوم یا نایوبیوم (Niobium) با روکش پلاتین است. شکل ۷، روش نصب معمولی یک سری آندهای شیاری در فواصل تقریبی ۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر و به ابعاد حدود ۲۰×۲۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. این نوع آندها باید تمیز و بدون لبه‌های تیز باشند. چنانچه میلگردها در تماس با این نوع آندهای شیاری باشند، باید آندها با مواد اپوکسی عایق پوشانده شود. وقتی آندهای شیاری تهیه شدند، سیم‌های آندی در موقعیت خود قرار گرفته و تمام سیستم (سیم‌ها و آندها) با ملات رسانا پوشانده می‌شود. عملکرد سیستم در شکل ۸ نمایش داده شده است.

به دلیل ابعاد کوچک آندهای شیاری، سطح آندی در شدت جریانی بالاتر از نوع قبلی به خصوص در اوایل نصب

کار می‌کند، چرا که بعداً به دلیل آسیب‌های مختلف ناشی از حملات اسیدی به واسطه واکنش آندی تحریک می‌شود.

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، به جای قرار دادن آند در شیارهای خاص، به طور مستقیم روی عرشه بتنی قرار داده شده و با ملات رسانا پوشانده می‌شود (سیستم آند برجسته). چنانچه سطح تخت مورد نیاز باشد، یک لایه نازک بتن ممکن است روی این آندها اجرا شود.



شکل ۸- عملکرد سیستم آند شیاری

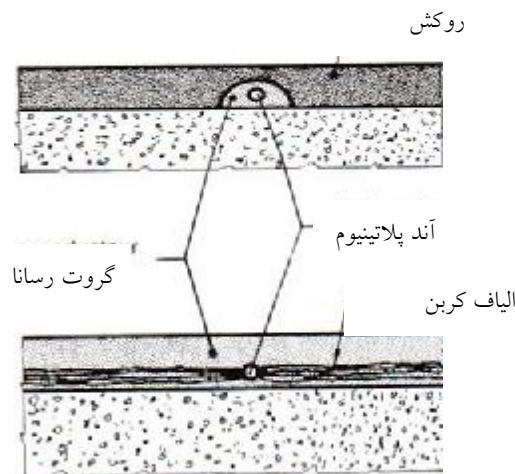
روش دیگری در شکل ۹ نشان داده شده که استفاده از رشته الیاف‌های گرافیتی به جای آند تیتانیوم با روکش پلاتین را نمایش می‌دهد. البته، این راه‌حل از نقطه‌نظر عمر کوتاه الیافها (۴-۵ سال) توصیه نمی‌شود و ذکر این روش فقط از این لحاظ بود که در چندین پل در ایالات متحده مورد استفاده قرار گرفته است. اگر چه هزینه گرافیت فوق‌العاده کمتر از پلاتین است، اما هزینه عمر مفید سالیانه آن بیشتر است. مزایای این سیستم عبارت است از:

- عدم وزن اضافی

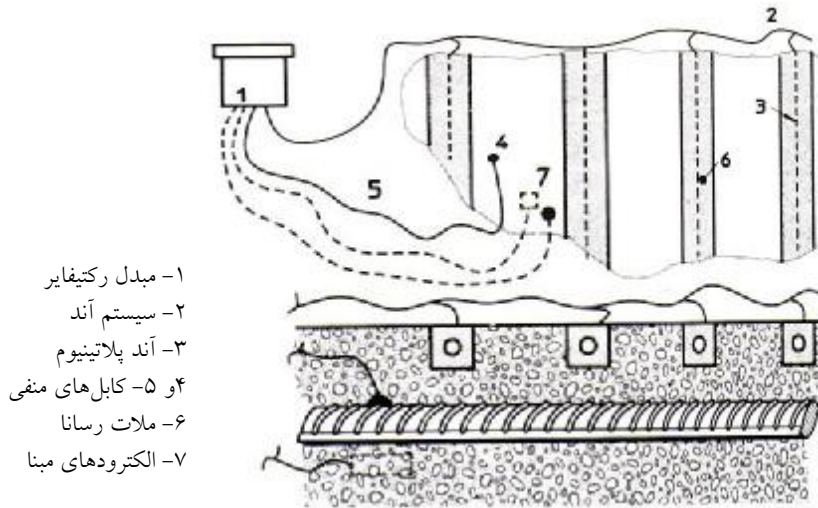
- هزینه کمتر

- امکان کاربرد سیستم در سطوح مختلف از جمله سطوح قائم

باید خاطر نشان کرد که سیستم آند شیاری در جایی که پوشش کافی نیست قابل استفاده نمی‌باشد. در چنین حالتی، استفاده از سیستم نشان داده شده در شکل ۹ تحت عنوان سیستم برجسته ترجیح داده می‌شود. شکل ۱۰ رفتار اساسی سیستم "بدون روکش" با بتن رسانا را نشان می‌دهد.



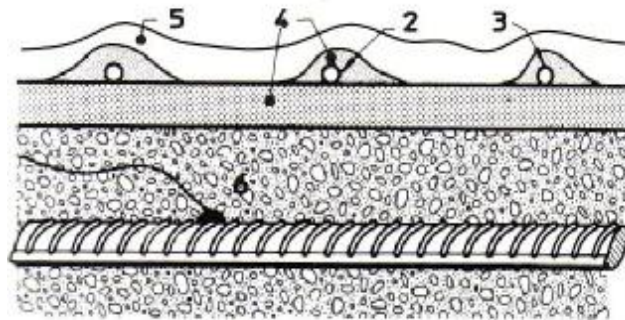
شکل ۹- نصب سیستم آندها روی عرشه بتنی (سیستم برجسته)



- ۱- مبدل رکتیفایر
- ۲- سیستم آند
- ۳- آند پلاتینیوم
- ۴ و ۵- کابل های منفی
- ۶- ملات رسانا
- ۷- الکترودهای مینا

شکل ۱۰- عملکرد سیستم "بدون روکش"

به غیر از سیستم های بیان شده در بالا، سیستمی که در هر نوع سازه افقی یا قائم نظیر پلها، ساختمانها، دیوارهای قائم، سقفها، ستونها و... امکان کاربرد دارد و در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. این سیستم ساده ترین نوع بوده و به شیار نیازی نیست. این سیستم آندی مرکب از یک لایه ماستیک رسانا بوده که روی عرشه بتنی نصب می شود. یک سری سیم های پلاتینی کوچک با توری فایبرگلاس چسب دار روی لایه رسانا قرار می گیرد. روکش نهایی خارجی در صورت مطلوب نبودن روکش های قیری، ممکن است با استفاده از رنگهای اپوکسی انجام شود.



شکل ۱۱- جزئیات سیستم بدون روکش

- ۲- سیستم آندی
- ۳- الباف شیشه
- ۴- روکش رسانا
- ۵- پوشش رنگ پلاستیک
- ۶- سیستم منفی- میلگردها

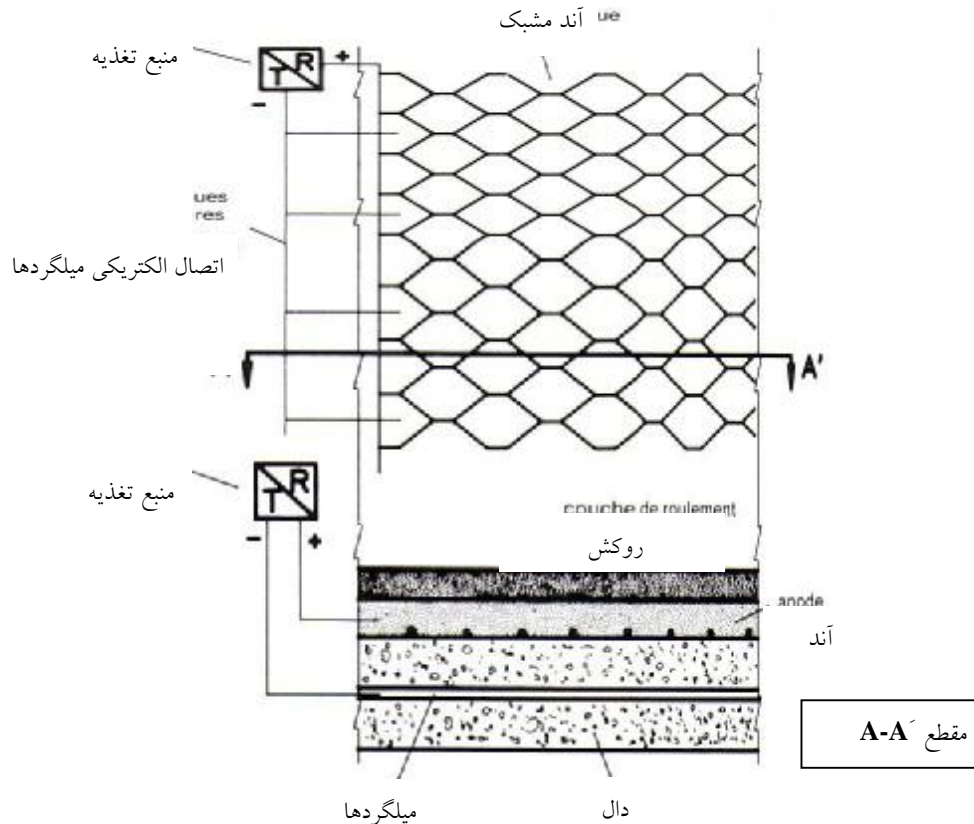
۳-۲-۴- روکش های رسانا

نوع دیگر سیستم های آندی کاربرد روکش های رسانا روی سطوح خارجی سازه هایی است که باید حفاظت شود. بدین منظور این روکش ها به کابل هایی که جریان را انتقال می دهند، متصل می شود. هر چند به نظر می رسد مدت عمر این سیستم از ۴ تا ۶ سال بیشتر نباشد. آندهایی با روکش روی (Zinc) نیز آزمایش شده که با پاشیدن فلز روی مذاب به سطح

بتن تهیه شده است. این آندها عمر نسبتاً کوتاهی داشته و عیب آن، احتمال بروز اتصال کوتاه است که می‌تواند به سهولت به وجود آید.

۴-۲-۴- آندهای مشبک

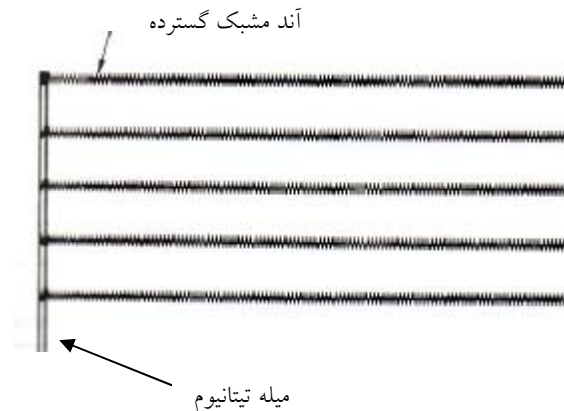
در حال حاضر گسترش سازه‌های آندی بر سیستم‌های مشبک توری متمرکز است که روی سطح خارجی سازه‌ای که حفاظت می‌شود قرار می‌گیرد و با یک لایه ملات سیمانی مناسب پوشانده می‌شود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نقشه شماتیک نصب یک سیستم حفاظت کاتدی با آند مشبک

تا مدتی قبل، اساساً دو نوع توری مشبک در بازار موجود بود. نوع اول که در حال حاضر دیگر استفاده نمی‌شود و برای اولین بار در سالهای ۱۹۸۳-۱۹۸۴ استفاده شد، از مس ساخته شده و با مواد پلیمری رسانا (کربن با پلی اولفین carbon-loaded polyolefin) پوشانده شده بود. نوع دوم ورق مشبک تیتانیوم (ورق پانچ شده مشبک) است که سطح آن با اکسیدهای فلزات گرانبها فعال می‌شود. همان طوری که در بالا اشاره شد، این نوع آند کاملاً جایگزین آندهای پلیمری شده است چرا که نوع پلیمری قادر به رقابت با آندهای فعال تیتانیوم از نقطه نظر مکانیکی، دوام و مشخصات الکتروشیمیایی نبود. بررسی‌های آزمایشگاهی و تجارب بدست آمده در زمینه کاربرد آندهای فعال تیتانیوم نشان می‌دهد که اگر کیفیت و مقاومت روکش این آندها کافی باشد، آندهای تیتانیوم عملکرد درازمدتی خواهند داشت. از مزایای آندهای

مشبک تیتانیوم، امکان دستیابی به توزیع یکنواخت جریان و همچنین کاهش هزینه نصب در مقایسه با سایر انواع آند است. این آندها می‌توانند برای حفاظت انواع مختلف سازه‌ها به راحتی استفاده شوند. همچنین آندهای مشبک تیتانیوم در سطوح قائم، منحنی، روی عرشه‌های قوسی و... نیز می‌توانند به کار روند. بعضی انواع آندهای مشبک بیان شده در اینجا، هنوز در مرحله آزمایشی هستند، نظیر ترکیب تسمه‌ها و ورق مشبک فعال تیتانیوم جوش شده به یکدیگر به وسیله میلگردهای توزیع جریان. البته از جنس تیتانیوم - که به شکل آند میله‌ای (Anodic grill) در می‌آید (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- آند میله‌ای (Anodic grill)

طول میله‌ها، عرض و فاصله بین آنها به منظور دستیابی به جریان‌های متغیر در واحد سطح بتن با توجه به سطح فولادی که حفاظت می‌شود، ممکن است متفاوت باشد. با در نظر گرفتن همان مقدار مادی در واحد سطح بتن، مزایای آند میله‌ای در مقایسه با تیتانیوم مشبک معمولی عبارتند از:

- انتقال جریان حفاظتی متغیر و کنترل بهتر توزیع جریان
- حذف کاربرد توری مشبک دوتایی یا سه‌تایی به منظور ایجاد جریانی بیشتر از حداکثر مقداری که برای یک توری مشبک معمولی مجاز است.

جدول ۲ مشخصات و انواع مواد آندی مختلف را ارائه می‌دهد.

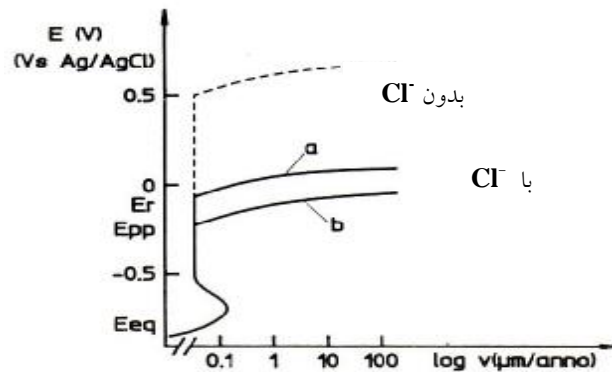
جدول ۲- خواص آندها

نوع آند	عمر (سال)	شدت جریان (سطح آند mA/m^2)	فرآیند آندی
تیتانیوم فعال (مشبک یا میله‌ای)	>۵۰	۱۰۰*	اکسیژن
مواد پلیمری غنی شده با گرافیت	۱۵	۵۰	اکسیژن، کلرین، دی‌اکسید کربن
روکش با مواد کربنی	۱۰	۲۰	اکسیژن، کلرین، دی‌اکسید کربن
کربن غنی شده با روکش‌های رسانا	۴-۶	۲۰	اکسیژن، کلرین، دی‌اکسید کربن
روی	۴-۶	۲۰	اکسید روی

*اخیراً در طرحی حداکثر شدت جریان آندی در تیتانیوم مشبک فعال برابر با 400 mA/m^2 به دست آمده است.

۳-۴- معیار حفاظت

شکل ۱۴ روند سرعت خوردگی را نشان می‌دهد. پتانسیل میلگردهای درون بتن حاوی کلر که هنوز در آنها خوردگی ایجاد نشده (منحنی a) متفاوت از پتانسیل سایر میلگردهایی است که مورد حمله کلر قرار گرفته است (منحنی b).



شکل ۱۴- سرعت خوردگی بر اساس تغییرات پتانسیل

لازم به ذکر است که به منظور دستیابی به شرایط حفاظت، رسیدن به شرایط مصونیت لازم نیست زیرا این پتانسیلی است که لازم نیست از پتانسیل حفاظت مصونیت (E_{eq}) پایین‌تر باشد. کافی است به پتانسیلی پایین‌تر از پتانسیل بازکنش‌پذیری (E_{pp}) که متخصصین الکتروشیمی پتانسیل کنش‌پذیری کامل می‌نامند) یا پایین‌تر از مقداری که تحت عنوان پتانسیل شکست (E_r) شناخته می‌شود، دست یابیم. این امر بستگی به این دارد که آیا هدف از حفاظت پلاریزاسیون، توقف فعالیت خوردگی قبلی است یا جلوگیری از خوردگی.

همان‌طور که در نمودار مشهود است، چون E_{pp} برابر $100-200\text{mV}$ منفی‌تر از E_r است، شرایط مورد نیاز برای توقف فرآیند خوردگی فعال قبلی، خیلی سخت‌تر از شرایط مورد نیاز برای جلوگیری از شروع خوردگی است. متأسفانه، برخلاف پتانسیل حفاظت مصونیت (E_{eq})، این پتانسیل‌ها به مقدار کلر بستگی داشته و در نتیجه از سازه‌ای به سازه دیگر یا از یک ناحیه به ناحیه‌ای دیگر در همان سازه فرق می‌کند و در مواقعی بر اساس وظیفه حفاظت کاتدیک پتانسیل‌ها متفاوت است.

اگر سازه‌ای را در نظر بگیریم که هنوز در سطح میلگردها مورد حمله کلر واقع نشده، برای کاربرد حفاظت کاتدیک به منظور جلوگیری از ورود کلر موضوع مجدداً متفاوت است. در این حالات، شرایط حفاظت خوردگی در رابطه با رسیدن به یک پتانسیل مشخص نیست، بلکه ترجیحاً اعمال یک شدت جریان، کافی است تا نفوذ کلر به میزان مورد نظر کاهش یابد. با توجه به تمام این دلایل، امروزه آن معیار حفاظتی عموماً پذیرفته است که بر اساس مقادیر پتانسیل حفاظت نباشد بلکه مبنای نیمه تجربی داشته باشد.

این معیار که تحت عنوان معیار "۱۰۰mV" شناخته می‌شود، می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:
 "یک سازه فولادی درون بتن وقتی حفاظت شده در نظر گرفته می‌شود که دپلاریزاسیون^۱ یعنی تغییر پتانسیل آن در مدت ۴ ساعت در یک مدار باز از ۱۰۰ mV تجاوز کند".

تعیین دپلاریزاسیون باید بعد از یک افزایش ناگهانی پتانسیل در لحظه قطع جریان ناشی از عدم وجود مقاومت اهمی باشد که به مقدار نهایی، بعد از ۴ ساعت دپلاریزاسیون نزول می‌کند.

میزان افزایش بالقوه (دپلاریزاسیون) از یک سازه به سازه دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است، بنابراین در بعضی حالات خاص، ممکن است استفاده از زمان‌های اندازه‌گیری بیشتر از ۴ ساعت ذکر شده عاقلانه باشد.

این مسأله به وجود اکسیژن در مجاورت میلگردها بستگی دارد که تابعی از عوامل زیر است:

(۱) نفوذ اکسیژن از پوشش بتنی

(۲) میزان تولید اکسیژن در آند

در قسمت‌های درونی بتن آرمه این معیار قابل استفاده نیست.

البته همیشه لازم است از پتانسیل کمتر از 900 mV (در مقیاس Ag/AgCl) اطمینان حاصل شود تا از شروع شرایطی که در رابطه با اثرات منفی بروز هیدروژن ممکن است به وجود آید، جلوگیری شود.

احتمالاً تجاری که در این سالها به دست می‌آید، توصیه و انتخاب معیار حفاظتی مناسب هر حالت جداگانه، در آینده مقدور خواهد شد، همچنین احتمالاً برای مراحل حفاظتی مختلف، به عنوان مثال معیار حفاظت در اوایل کار ممکن است خیلی محدودتر از دوره‌های درازمدت باشد.

۴-۴- شدت جریان حفاظت

سیستم حفاظت کاتدیک باید قادر به تأمین جریان کافی جهت حفاظت میلگردها و توزیع آن در سطوح میلگردها و در عین حال قادر به کنترل شرایط حفاظت (قابل کنترل با سیستم‌های هشداردهنده) در تمام سطوح ممکن باشد.

تجارب جمع‌آوری شده به خصوص از حفاظت عرشه پلها نشان می‌دهد که شدت جریان حفاظت ممکن است از 0.05 تا 20 mA/m^2 فولاد تغییر کند که معمولاً بین محدوده ۲ تا 15 mA/m^2 باقی می‌ماند. بالاترین مقدار شدت جریانی که مشاهده شده، برای بتن‌هایی با مقدار کلر بالا، تخریل زیاد و ضخامت کم پوشش بوده است.

شدت جریان حفاظت به پتانسیل حفاظت بستگی دارد که در حالت خاص تابعی از مقدار کلر، pH بتن، سرعت نفوذ اکسیژن به سطح فلز و در نهایت تمام عواملی که در تعیین آن مؤثر است (رطوبت نسبی، نفوذپذیری بتن و ...).

بعد از شروع حفاظت، شدت جریان حفاظت به پایین‌تر از مقدار اولیه نزول کرده که ناشی از تغییر و تبدیل‌های به وجود آمده از عبور جریان در ناحیه کاتدیک است. این تغییر و تبدیل به واسطه زدودن کلر، افزایش pH و افزایش آب منفذی در بتن چسبیده به میلگردها است. ارزیابی تقریبی شدن جریان حفاظت اولیه، معمولاً از تغییر امتداد رفتار منحنی پتانسیل/جریان به دست می‌آید (در منحنی E-Log I).

۴-۵- شدت جریان آندی

فرآیندهای آندی (تولید اکسیژن و در صورت وجود کلر تولید کلرین) به افزایش تشکیل اسید در ناحیه آندی منجر می‌شود که ممکن است باعث تخریب بتن اطراف آند شود. بدین دلیل لازم است سرعت تولید اسید را با محدود کردن شدت جریان آندی (که متناسب با سرعت است) کاهش داد.

طبق تجارب به دست آمده به منظور عدم بروز آسیب، شدت جریان آندی باید کمتر از 100 mA/m^2 برای آندهای سبک یا آندهای رشته‌ای، 50 mA/m^2 برای آندهای کربنی و 20 mA/m^2 برای آندهای ساخته شده با روکش‌های رسانا باشد.

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، آندهای مشبک تیتانیوم که رایج‌ترین نوع مورد استفاده است، در ابعاد و سوراخ‌های متفاوت تهیه می‌شود (و در نتیجه با سطوح آندی متفاوت در واحد سطح توری) تا شدت جریان‌های متفاوت مورد نیاز را تأمین کند.

۴-۶- قدرت

در عمل، سیستم‌های تأمین نیرو با ولتاژ یا جریان ثابت استفاده می‌شود تا بتواند یک جریان برابر با حداکثر جریان اولیه مورد انتظار را تأمین کند. در سیستم‌های آندی معمولی، ولتاژهای اعمال شده جهت تأمین جریان حفاظت مورد نیاز بالا می‌باشد، به عنوان مثال، بین ۶ تا ۱۲ ولت است. در سیستم‌های آندی مشبک، ولتاژ مورد نیاز کمتر است (۱ تا ۳ ولت) توان مورد نیاز عموماً بین 0.3 تا ۳ وات در 100 متر مربع سطح بتن است.

۴-۷- اتصال الکتریکی میلگردها

تمام میلگردها باید به یکدیگر اتصال الکتریکی داشته باشند تا شرایط حفاظت قابل حصول باشد. در عمل مشاهده شده که این شرایط، عموماً در تمام میلگردها برقرار است. در هر حال، قبل از نصب یک سیستم حفاظت در یک سازه موجود، لازم است از وجود اتصال الکتریکی مؤثر بین میلگردها اطمینان حاصل شود، به عبارت دیگر این امر باید با ایجاد اتصالات ضروری اصلاح گردد.

۴-۸- توزیع جریان

مسئله اطمینان از دستیابی به شرایط حفاظت در هر نقطه از سازه بدون حفاظت اضافی در سایر نقاط با تمام اثرات منفی که این امر دارد، مسأله‌ای است که حل آن همیشه آسان نیست.

آندهای مشبک به شکل توری در حل این مسأله برای میلگردهایی که به طور مستقیم با آند مشبک در تماس هستند، مطمئناً مشارکت دارند. لیکن برای میلگردهای ردیف‌های داخلی به طور کامل مشارکت ندارند. در حقیقت، وقتی اولین ردیف به طور مستقیم در تماس با آند مشبک است، جریانی را دریافت می‌کند که فقط برای حفاظت خودش لازم است و ردیف‌های زیرین کمتر حفاظت خواهند شد، چرا که جریان حفاظتی توسط اولین ردیف غربال می‌شود. تجربه نشان می‌دهد

که در سطح میلگردهایی که به فاصله تقریباً ۳۰-۴۰ سانتی متر از آند مشبک فرار می‌گیرند، به طور کلی حفاظت کامل انجام می‌شود بدون این که ردیف‌های نزدیک‌تر حفاظت اضافی شوند.

مسأله دیگر در توزیع جریان هنگامی ظاهر می‌شود که قابلیت رسانایی بتن یکنواخت نباشد، نظیر مقدار کلر که در بتن یکنواخت نیست. خوشبختانه در این حالت، سیستم تمایل دارد خود تنظیم باشد. در حقیقت، جریان به نواحی با بیشترین رسانایی، "متمایل" می‌شود که این نواحی، نواحی آلوده به کلر بوده که شدت جریان بیشتری را نیاز دارد.

۹-۴- سازه‌های پیش‌تنیده

جنبه خیلی حساسی که در طراحی و نصب یک سیستم حفاظت کاتدیک در سازه‌های پیش‌تنیده باید در نظر گرفته شود عارضه تردی ناشی از هیدروژن است. بر خلاف فولاد معمولی در بتن آرمه، فولادهای مقاوم بالا در سازه‌های پیش‌تنیده مستعد تردی هیدروژنی (Hydrogen Embrittlement) هستند، چنانچه عملیات حفاظت در پتانسیل کمتر از حد مشخصه انجام گیرد. این امر به موارد زیر بستگی دارد:

- شرایط بتن (به عنوان مثال، کاهش pH در صورت وجود یون‌های خاص نظیر سولفات‌ها و کلرورها که باعث افزایش تردی هیدروژنی می‌شود).

- مشخصات سازه‌ای فولاد (افزایش مقاومت مکانیکی فولاد، افزایش تردی هیدروژنی را به دنبال داشته و با مقاومت مکانیکی یکسان، برای فولادهای سخت‌تر این عارضه بیشتر از فولادهایی است که با به صورت سرد نورد شده‌اند).

- مقدار تنش‌های اعمال شده و تغییرات تنش در طول زمان (به ویژه در تنش‌های بالا، عارضه تردی هیدروژنی افزایش یافته، مخصوصاً وقتی فولادها تحت اثر بارهای افزایش شونده تدریجی باشند).

در هر حالت، تجارب آزمایشگاهی و محلی (در خصوص سازه‌های مدفون یا فراساحلی) نشان می‌دهد که حتی در بحرانی‌ترین شرایط (نظیر بتن‌های کربنی، بتن‌های حاوی کلرورها، فولادهای سخت‌کاری و آبکاری شده، تنش با تسلیم بالا، بارهای افزایش شونده تدریجی) هیچ عوارضی از تردی ناشی از هیدروژن در پتانسیل‌های خیلی منفی‌تر از -950 mV در مقیاس Ag/AgCl تولید نمی‌شود. در واقع، در اکثر حالات عملی عوارضی به وجود نمی‌آید مگر پتانسیل خیلی منفی‌تر از -1000 mV دریافت شود (در مقایسه با الکتروود مبنا). البته فقط تحقیق یا تجربه کافی، کاربرد عادی حفاظت کاتدیک در سازه‌های پیش‌تنیده را مجاز خواهد کرد.

۱۰-۴- روکش تیتانیوم مشبک

دوام و پایداری سیستم حفاظت کاتدیک کاملاً با رفتار روکشی که تیتانیوم مشبک را می‌پوشاند، در ارتباط است. بنابراین مشخصات ذاتی مواد و روش‌های کاربرد آن بیشترین اهمیت را دارد.

روکش آند دو وظیفه تضمین‌کننده دارد. نخست اینکه اتصال الکتریکی بین تیتانیوم مشبک و عرشه بتنی برقرار می‌کند. دوم این که حفاظت مکانیکی لازم را برای توری مشبک تأمین می‌کند. مراحل عملیات روکش بر اساس شرایط

نصب توری مشبک در عرشه سازه‌های موجود و یا روی بتن تازه متفاوت است. در حالت اول که رایج‌ترین حالت است، عملیات زیر انجام می‌شود:

- آماده‌سازی سطح بتنی که تیتانیوم مشبک روی آن قرار می‌گیرد تا از وجود تکیه‌گاه تمیز و کاملاً زبر برای اتصال روکش اطمینان حاصل شود. بدین منظور ممکن است از روش سنتی (قلم-چکش) یا روش مدرن با استفاده از فشار جت آب جهت ایجاد سطح تمیز و زبر استفاده نمود که روش اخیر جهت اتصال بهتر ترجیح داده می‌شود.

- شناسایی میلگردهای نمایان در سطح عرشه و پوشاندن سطح آنها با رزین اپوکسی به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه بین توری مشبک و میلگردها، و یا بریدن بخشی از آند مشبک در اطراف میلگردهای نمایان بعد از نصب سیستم آند مشبک.

- پهن کردن و مهار توری مشبک روی سطح بتن با استفاده از بست‌های پلاستیکی که در سوراخ‌های ایجاد شده به صورت فشاری مهار می‌شود.

- پوشاندن آند با استفاده از روکش به منظور اطمینان از اتصال الکتریکی بین تیتانیوم مشبک و بتن و همچنین تأمین حفاظت مکانیکی کافی برای خود توری مشبک.

در حالت دوم، آند مشبک در سازه جدید و روی بتن تازه بدین ترتیب نصب می‌شود که در حین بتن‌ریزی سازه به فاصله ۲ الی ۲/۵ سانتی‌متر از سطح فوقانی میلگردها، توری مشبک را در بتن تازه قرار می‌دهند. سپس عملیات بتن‌ریزی تکمیل می‌گردد. توری مشبک در بتن تازه باید با دقت کافی پهن و نصب گردد چرا که همان بتن به عنوان روکش نیز عمل می‌کند.

مشخصاتی که روکش باید داشته باشد عبارت است از:

- حداکثر چسبندگی به تکیه‌گاه
 - مقاومت مکانیکی برابر یا بیشتر از بتن زیرین
 - توپری و آب‌بندی کافی به منظور جلوگیری از نفوذ رطوبت و کلر
- در عملیات روکش، توصیه می‌شود ملات مربوطه به صورت اسپری و در چندین لایه حتی با ضخامت‌های نسبتاً کم (۱-۲ سانتی‌متر) اجرا شود. توجه خاصی باید به عمل‌آوری ملات اسپری شده در کارگاه مبذول گردد. از این رو لازم است بعد از اسپری ملات روکش سطح آن با ورق‌های پلی‌اتیلن و یا نایلون پوشانده شود تا رطوبت حفظ گردد.

۴-۱۱- سیستم‌های کنترل

وظیفه سیستم‌های نظارت، امکان کنترل در طول زمان پارامترهایی است که حفاظت کاتدیک را هدایت می‌کند، به ویژه داده‌هایی که در تنظیم فیدرها (T/R) و داده‌های پلاریزاسیون میلگردها مهم است.

سیستم‌های خیلی پیشرفته که معمولاً برای بتن‌های پیش‌تنیده استفاده می‌شوند، مشخصات زیر را دارند:

الف) یک یا چند دستگاه جمع‌آوری اطلاعات به منظور:

- کنترل و تنظیم فیدرها

- اندازه‌گیری پتانسیل‌های میلگردها بین الکترودهای ثابت مبنا
 - جلوگیری از افزایش ولتاژ یا افزایش مقادیر یکی از الکترودهای مبنا از مقدار تنظیم شده
 - تست پلاریزاسیون
 - اندازه‌گیری، ذخیره و ثبت داده‌های دریافت شده از الکترودهای مبنا و سایر سنسورها
- به طور کلی، مفید است که بتوانیم این داده‌ها (سیگنال‌ها) را به طور اتوماتیک با استفاده از سیستم‌های ارتباطی (خط تلفن) به یک یا چند مرکز داده‌پردازی ارسال کنیم. در این حالت، دستگاههای کنترل برای ایجاد ارتباط با کامپیوتر دارای مودم خواهند بود. با استفاده از چنین خط ویژه‌ای، کنترل کامل تمام وظایف مهم دستگاه کنترل میسر خواهد شد.
- ب- توانایی در ساماندهی دستگاههای کنترل با یک نرم‌افزار مدیریتی
 - ج- الکترودهای مبنا برای کنترل مؤثر بودن سیستم حفاظت کاتدیک با اندازه‌گیری پتانسیل الکتروشیمیایی میلگردها. این الکترودها از $Ag/AgCl$ یا تیتانیوم فعال تهیه می‌شوند.
 - د- مقره‌های سنجش جریان که بدین وسیله تشخیص و ارزیابی شدت جریان حفاظت میلگردها در نقاط مختلف امکان‌پذیر می‌گردد.

۵- سیر تکاملی

۵-۱- تاریخچه

اگر چه اندرکنش ناشی از تماس دو فلز به طور کامل مشخص و توسط فابرونی (Fabbroni) ده سال قبل از اختراع باتری توسط ولتا (Volta) بیان شده است، لیکن حفاظت کاتدیک به طور رسمی در انگلستان در سال ۱۸۲۴ ابداع شد. داوی (Sir H. Davy) در انجمن سلطنتی انگلستان پیشنهادی ارائه داد که چگونه مس وقتی به توده‌ای از آهن یا فلز روی متصل باشد در آب دریا مصون از خوردگی می‌شود.

نیروی دریایی بریتانیا، پیشنهاد داوی را در حفاظت ورق‌های مسی جهت پوشش بدنه کشتی‌های چوبی در آن زمان به کار گرفت. بدین ترتیب که چهار قطعه چدن در کشتی بادبانی "Samarang" که به واسطه اکتشافات در دریا‌های جنوب مشهور شده بود نصب شد. همچنین در کشتی باربر "Carneba Castle" و کشتی تفریحی "Elizabeth" قطعات روی نصب گردید. اما آندهای روی (احتمالاً به جهت ناخالصی زیاد و بروز مصنویت) خوب کار نکرد. به عبارت دیگر، قطعات روی خوردگی ورق‌های مسی را کاملاً بلوکه کرد.

به دلایل زیادی این روش، به طور ضمنی باید کنار گذاشته می‌شد. در واقع خوردگی مس متوقف شد، لیکن اثر سمی محصول خوردگی، روی گیاهان و حیوانات اثرات زیانباری نیز داشت زیرا این محصول قادر بود فلور زیادی در صفحات حفاظت شده ایجاد کند. در نتیجه، مشکل خوردگی کشتی برطرف می‌شد لیکن اثرات آن به راحتی قابل پاک کردن نبود. البته این تفکر و روش به طور کامل منسوخ نگردید.

در سال ۱۸۶۵، بکرل (Becquerel) در گزارشی با موضوع خوردگی ورق‌های معمولی مس، فصلی را در رابطه با "حفاظت فلزات به وسیله تماس با فلزات اکسیدان بالا" ارائه داده است که به روش حفاظت کاتدیک انجام می‌شود. در این کتابچه، گسترش کاربرد این روش حفاظت برای سازه‌های مدفون پیشنهاد شده است.

در همان سال، اختراع دینام توسط گرام (Z. Gramme) دریچه‌ای به روی روش حفاظت کاتدیک با اعمال جریان گشود، که ادیسون (T. Edison) اولین بار در سال ۱۸۹۰ آن را به کار برد، هرچند نتایج کار برای بدنه کشتی‌ها که در آن موقع با فولاد ساخته می‌شد، چندان رضایت‌بخش نبود.

اولین موفقیت حفاظت کاتدیک در اوایل قرن بیستم به دست آمد که کامبرلند (Cumberland) در ایالات متحده و جفر (Geffer) در آلمان حفاظت با اعمال جریان را جهت حفاظت مخازن بخار آب کشتی‌های بزرگ و خنثی‌سازی اثر جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم‌های تولید جریان پیوسته پراکنده در لوله‌های زیر خاک به کار بردند. بعد از مدت کوتاهی، این روش در صنعت نفت در تگزاس برای حفاظت سازه‌های مدفون استفاده شد.

در فاصله دو جنگ جهانی، حفاظت کاتدیک به طور اساسی پایه‌گذاری شد. مبانی تئوری که بر اساس آن حفاظت کاتدیک انجام می‌شود در همان زمان مشخص گردیده و به دست آمد.

پس از آن و به ویژه بعد از جنگ جهانی دوم، کاربرد حفاظت کاتدیک در مقیاس وسیعی نظیر حفاظت سازه‌های زیرخاکی، سازه‌های فراساحلی و تجهیزات شیمیایی انجام شده است. در همان زمان، نیاز بیشتر به سیستم‌های حفاظتی مطمئن و اقتصادی، پیشرفت قابل توجهی به بار آورده است. نوآوری اصلی در خصوص تمام مسایل فوق در رابطه با

مواردی است که به سخت‌افزار حفاظت کاتدیک مشهور شده است. این موارد شامل مواد آندی فداشونده و بدون زوال، سیم‌ها، مواد عایق، تجهیزات برقی و الکترونیکی به ویژه آنهایی که برای کنترل اتوماتیک شرایط حفاظت سازه‌ها لازم است. معیار طراحی البته با دانش حاصل از رفتار مواد آندی یا عوارض جانبی و عملکرد حفاظت کاتدیک تکمیل می‌شود، نظیر اثرات حفاظت اضافی، رسوب‌های پولکی، تنش مکانیکی بحرانی (خوردگی - خستگی).

متأسفانه فناوری این دانش، بخشی حاصل شکست‌هایی است که در عمل مخصوصاً در اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰ میلادی به خصوص در کاربردهایی در دریای شمال با صرف هزینه‌های زیاد انسانی، اقتصادی و محیط زیست به دست آمده است.

در دهه ۸۰، برنامه‌های کامپیوتری برای دستیابی به سیستم‌های حفاظت کاتدیک به بازار آمد. این برنامه‌ها بر اساس روش‌های ریاضی استوار بود و قادر به تجزیه و تحلیل میدان الکتریکی (المان‌های محدود، دیفرانسیل‌های محدود، المانهای محدود محیطی) حتی برای سازه‌های پیچیده هندسی یا قسمت‌هایی از سازه‌ها نظیر آندهای چاههای نفتی دریایی و قسمت‌های داخلی تجهیزات بوده است.

همان طوری که اشاره شد، موضوع اصلی این گزارش حفاظت کاتدیک میلگردهای بتن آرمه است که توسط کلورورها مورد حمله قرار گرفته است. می‌توان گفت این روش حفاظت، کاربرد نسبتاً جدیدی بود که اخیراً توجه مهندسين را در این زمینه به خود جلب کرده است.

به طور کلی، حفاظت کاتدیک در حال حاضر یک تکنیک کاملاً شناخته شده در زمینه حفاظت میلگردهای بتن است. علیرغم اینکه مواردی وجود دارد که هنوز نیاز به تعریف بهتر یا روشن شدن بیشتر موضوع دارد (به خصوص با تأکید بر شرایط اولیه عملیات، مواد مصنوعیت، ترک‌های پیشرفته خستگی، عارضه افزایش تردی).

علیرغم این پیشرفت‌ها، هنوز راه‌حل نهایی برای بعضی مسایل مهم مهندسی پیدا نشده است (نظیر بهینه‌سازی شرایط اولیه عملیات برای دستیابی به بهترین توزیع جریان یا مشکلات کنترل سازه‌های بتن آرمه). بنابراین، به سادگی انتظار می‌رود پیشرفت سالهای اخیر در آینده نیز ادامه خواهد داشت و احتمالاً بیشترین نوآوری نه در اصول مهندسی بلکه در موضوعاتی که ممکن است در راس آنها "نرم افزارها" مد نظر باشد، صورت گیرد.

۵-۲- نتایج یک بررسی

برای جزئیات بیشتر و اظهارنظر تازه در خصوص سیر تکاملی حفاظت کاتدیک بهتر است پاسخ‌های یک نظرخواهی که به ۲۷ کشور عضو کمیته فنی پل‌های جاده‌ای پیارک ارسال شده بود را مورد بررسی قرار دهیم (ضمیمه ۱). با صرف‌نظر از همکاری کم برخی کشورها که به دلایل آب و هوایی، وضعیت توپوگرافی یا اقتصادی علاقه کمتری به حفاظت کاتدیک نشان داده‌اند، پاسخ سایر کشورها که در آنها این تکنیک پذیرش فراوانی داشته است، نتایج گزارش و ارزیابی حایز ارزش است. جدول ۳ نشان می‌دهد که ایالات متحده و کانادا از جمله کشورهایی هستند که در آنها حفاظت کاتدیک میلگردها در عرشه‌های بتنی اولین بار و در مقیاس وسیعی استفاده شده است (از سال ۱۹۸۶ در حدود ۵۰۰۰۰۰ متر مربع در ایالات متحده و از سال ۱۹۷۴ در حدود ۴۳۰۰۰ متر مربع در کانادا).

جدول ۳- وضعیت حفاظت کاتدیک در کشورهای مختلف

کشور	شروع اولین کاربرد	تعداد پلها یا سازه‌ها	کل سطح حفاظت شده m ²
ایالات متحده آمریکا	۱۹۶۸	۳۵۰	۵۰۰۰۰۰
کانادا	۱۹۷۴	۴۴	۴۳۰۰۰
ایتالیا	۱۹۸۷	۷	۶۴۲۰۰
اتریش	۱۹۸۹	۱	۱۵۰۰
دانمارک	۱۹۸۷	۳	۵۰۰
نروژ	۱۹۸۹	۲	۵۴۰
فرانسه	۱۹۸۷	۱	۲۰۰
انگلستان	۱۹۸۶	۲	-
چک و اسلواکی	۱۹۸۵	۳	۸۰۰
سوئیس	۱۹۸۶	۲	۱۵۰۰
ژاپن	۱۹۸۶	۱	۲۰

در ایالات متحده، کاربرد سیستم حفاظت کاتدیک بخشی از یک برنامه مدون FHWA (اداره راههای فدرال) است که تمام پروژه‌های آزمایشگاهی را از نظر مالی حمایت می‌کند. به دنبال ایالات متحده و کانادا، اخیراً سایر کشورها سیستم‌های حفاظت کاتدیک را راه‌اندازی کرده‌اند. نظیر انگلستان، اتریش، سوئیس، فرانسه، ایتالیا، سوئد، نروژ و ژاپن در مقیاس کمتر.

در این کشورها، متوسط سیستم‌های نصب شده از چند صد مترمربع تا چندین هزار مترمربع می‌باشد. اوج این مقدار با رقم قابل توجه به میزان ۶۴۰۰۰ مترمربع در ایتالیا است که البته بعد از چهار سال از اولین کاربرد انجام شده است. نتیجه‌گیری اداره راههای فدرال بعد از تجربه‌اندوزی با سیستم‌های مختلف بازسازی سازه‌های آلوده به کلر یادآوری می‌کند: " ... تنها تکنیک بازسازی که ثابت کرده است خوردگی عرشه پل‌های آلوده به نمک را صرف‌نظر از مقدار کلر متوقف می‌کند، حفاظت کاتدیک است."

جدول ۴ خلاصه جوایبه کشورهای مختلف در خصوص سؤالات زیر را ارائه می‌دهد:

- وجود یا فقدان برنامه‌های تحقیقات علمی در موضوع حفاظت کاتدیک
- دلایل عمده برای کاربرد حفاظت کاتدیک
- روند کار برای کاربردهای آینده

ذکر این نکته ضروری است که چون در ایالات متحده، FHWA مروج کاربردهای عملی بود، در سایر کشورها نیز برنامه‌های تحقیقاتی عملی در پیشرفت این سیستم حفاظت وجود دارد. همچنین لازم به ذکر است که IBWK (انستیتو ETH زوریخ) در سوئیس، TRRL (آزمایشگاه تحقیقات راه و حمل‌ونقل) در انگلستان، مرکز

تحقیقات امور عمومی ژاپن و مؤسسات تحقیقاتی فرانسه و ایتالیا در این زمینه فعال هستند. چنانچه ملاحظه می‌شود، انتخاب حفاظت کاتدیک جهت دفاع در مقابل خوردگی به طور کلی به این دلیل است که حفاظت کاتدیک تنها روش قابل اطمینان برای بازسازی فوری سازه‌هایی است که به طور بحرانی آسیب دیده‌اند. این امر ناشی از تجارب مثبت سایر کشورها یا برنامه‌های آزمایشگاهی می‌باشد. در جدول ۴، جمع‌بندی آرایه شده نشان می‌دهد که در آینده نزدیک، کاربردهایی از این روش جدید می‌توان انتظار داشت.

جدول ۴- اطلاعات عمومی

روند کاربرد		دلیل اصلی کاربرد				
تعریف نشده	در حال افزایش	پروژه‌های آزمایشی	تجارب مثبت از سایر کشورها	خوردگی بحرانی در میلگردها	برنامه تحقیقاتی	کشور
	ü	ü		ü	ü	ایالات متحده آمریکا
	ü		ü			کانادا
	ü	ü	ü		ü	ایتالیا
	ü		ü			اتریش
ü		ü				دانمارک
	ü	ü	ü	ü		نروژ
	ü			ü	ü	فرانسه
	ü	ü			ü	انگلستان
ü		ü	ü		ü	چک و اسلواکی
	ü	ü	ü		ü	سوئیس
ü		ü		ü	ü	ژاپن

در تمام کشورهایی که قبلاً تا حدودی با سیستم حفاظت کاتدیک آشنایی داشته‌اند، روند کاربرد رو به افزایش می‌باشد، هرچند که در حال حاضر تمایل به کاربرد حفاظت کاتدیک، تا حدودی با توجه به هزینه این روش تحت تأثیر قرار گرفته است. بسیاری از ادارات راه دولتی و شرکت‌های خصوصی در استفاده از حفاظت کاتدیک به عنوان یک تکنیک بازسازی و یا به عنوان یک روش بازدارنده در مقابل خوردگی سازه‌های بتن‌آرمه نظر مساعدی دارند، لیکن تعداد کاربردها در حال حاضر به علت هزینه زیاد این سیستم محدود می‌باشد. کشورهای دیگری نظیر دانمارک، سوئیس و ژاپن هنوز طرحی را برای این روش تعریف نکرده‌اند. در دانمارک و سوئیس برنامه‌های داخلی هنوز تعریف نشده در حالی که در ژاپن مسایلی در ارتباط با خوردگی میلگردها وجود داشته است. در جدول ۵، بر اساس نتایج نظرخواهی‌ها، قضاوت کشورهای مختلف در خصوص نتایج به دست آمده با حفاظت کاتدیک تاکنون آرایه شده است. در تکمیل نتایج ارائه شده در جدول باید اضافه نمود که به عنوان مثال در بعضی ایالت‌های آمریکا نظیر واشنگتن، رفتار این سیستم‌ها عالی ذکر شده و

جدول ۷- مشخصات سازه

کشور	عرشه بتن آرمه	عرشه پیش تنیده	سایر قطعات	قبل از ۱۹۵۰	دهه ۵۰-۶۰	دهه ۶۰-۷۰	دهه ۷۰-۸۰	دهه ۸۰-۹۰
ایالات متحده آمریکا	بدون پاسخ							
کانادا	بدون پاسخ							
ایتالیا	ü	ü			ü			ü
اتریش			ü			ü		
دانمارک	ü		ü	ü				
نروژ	ü	ü					ü	
فرانسه	ü					ü		
انگلستان							ü	
چک و اسلواکی	ü		ü	ü				
سوئیس	ü		ü			ü		
ژاپن	ü			ü				

به عنوان نمونه، عمده مسایل مطرح شده در کاربرد حفاظت کاتدیک در ایالات متحده، مربوط به عدم وجود تغذیه‌کننده‌های خوب یا آندهای بادوام است که همیشه در دسترس نبوده است (به خصوص در گذشته در موقع استفاده از آندهای کهنه که در حال حاضر استفاده نمی‌شود). سایر مسایل مربوط به خطر صاعقه است که بعضی مواقع اصابت کرده و باعث خرابی محیط یکسوساز (رکتیفایر^۱)، هم‌چنین بعضی ناپایداری در الکترودهای مینا در بعضی کاربری‌ها شده است. بدین منظور لازم بوده جهت داشتن سطح حفاظت متوسط، از الکترودهای مینای مجاور استفاده گردد.

در ایتالیا، بر خلاف سایر کشورها، یک سری مسایل با این واقعیت مرتبط است که در بیشتر حالات، حفاظت کاتدیک در سازه‌های پیش‌تنیده نصب شده است لذا فقدان تجربه در این زمینه و خطرات تردی کابل‌های پیش‌تنیده ناشی از تصاعد هیدروژن دلیل مسایل پیش‌آمده می‌باشد.

در انگلستان و سوئیس عمده مسایل مربوط به روکش آند (در انگلستان) و احتمالاً در مورد کیفیت (در سوئیس) می‌باشد. در نروژ نیز برخی مسایل مرتبط با تورق بتن رویه و توزیع جریان نامناسب برای سیستم آند منفرد گزارش شده است. از نقطه‌نظر نوظهور بودن سیستم، هنوز معلومات در خصوص دوام سیستم‌های آندی جدید و چگونگی واکنش‌های بوجود آمده کامل نیست، زیرا در بعضی حالات، مسایلی در ابزارآلات سیستم‌های کنترل یا خطای کارکرد الکترودهای مینا وجود داشته است.

همان طوری که در جدول ۷ ملاحظه می‌شود، در بیشتر انواع سازه‌های متداول که حفاظت کاتدیک نصب شده است، سایر اطلاعات منجمله عمر سازه‌ها نیز ذکر شده است. البته در ایالات متحده و کانادا تعداد کاربردها خیلی زیاد است و

انواع سازه‌ها را از لحاظ تنوع و عمر در بر می‌گیرد. ذکر این نکته چنانچه در بالا اشاره شد، جالب است که اکثریت سیستم‌های حفاظت کاتدیک نصب شده در ایتالیا در حال حاضر در سازه‌های پیش‌تینده بوده که سازه‌های در حال ساخت را نیز شامل می‌شود.

مشخصاً، در این کشور بر خلاف سایر کشورها که حفاظت کاتدیک به عنوان روشی جهت توقف خوردگی موجود سازه‌های مسلح مطرح است، در ایتالیا این سیستم به عنوان یک سیستم ثابت برای جلوگیری از خوردگی به جای روش‌های سنتی در نظر گرفته می‌شود.

در بیشتر کشورها، سازه‌ها عمدتاً از بتن‌آرمه معمولی با بیش از ۲۰ سال عمر ساخته شده‌اند. لذا همان طوری که اشاره شد، حفاظت کاتدیک ممکن است در انواع سطوح سازه استفاده شود. جدول ۸ خلاصه‌ای از این مسأله را به طور روشن و واضح ارائه می‌دهد.

با در نظر گرفتن عامل اصلی تهاجم که سازه‌ها در معرض آن هستند، در اغلب حالات نمک‌های یخ‌زدا است که با توجه به کشورهای مربوطه با مقادیر مختلفی استفاده می‌شود. یکی دیگر از علل، اثر تهاجمی محیط‌های صنعتی و دریایی است. جدول ۹ اطلاعات لازم در خصوص وجود یا عدم وجود سیستم‌های حفاظتی و تأثیر هر نوع تعمیر انجام شده قبل از اعاده به سیستم حفاظت کاتدیک برای بازسازی و توقف خوردگی را نشان می‌دهد.

از جدول ۹ می‌توان مشاهده نمود که در بیشتر حالات سازه‌هایی که حفاظت کاتدیک در آنها نصب شده فاقد سیستم‌های آب‌بندی بوده است. توضیح این نکته ضروری است که نصب برخی سیستم‌های آب‌بندی در پایه‌ها، ستونها و سایر سازه‌ها با روش سنتی نمی‌توانست اعمال گردد.

جدول ۸- کاربردهای حفاظت کاتدیک

کشور	عرشه پل	شاه‌تیر	پایه‌ها ستون‌ها	تونل	مواد یخ‌زدا	محیط صنعتی	محیط دریایی
ایالات متحده آمریکا	ü		ü		ü	ü	ü
کانادا	ü				ü	ü	
ایتالیا	ü				ü		
اتریش	ü	ü	ü		ü		
دانمارک			ü	ü	ü	ü	ü
نروژ		ü	ü				ü
فرانسه	ü				ü		
انگلستان	ü		ü		ü	ü	
چک و اسلواکی	ü		ü	ü	ü		
سوئیس			ü				ü
ژاپن		ü				ü	ü

البته، ایتالیا در این خصوص استثنا است، چرا که به طور عادی حفاظت کاتدیک به عنوان یک سیستم دفاعی یا بازدارنده تلقی شده و بنابراین در سازه‌هایی که این سیستم در آنها نصب می‌شود، سیستم‌های آب‌بندی غیرضروری یا زاید می‌باشد. همان طوری که ملاحظه می‌شود، تعمیراتی که قبل از کاربرد حفاظت کاتدیک انجام می‌شود، در اغلب حالات، به صورت عملیات موضعی بوده و در بیشتر موارد فقط به برداشتن بتن آسیب‌دیده (ترک‌خورده، آلوده، متورق) به طور مکانیکی و جایگزینی با بتن جدید محدود می‌شود.

این دیدگاه خیلی مهم است و مجدداً تأکید می‌شود که از نظر اصول عملکرد حفاظت کاتدیک بر خلاف سایر روش‌های تعمیر، ضروری نیست که تمام بتن آلوده به کلرورها برداشته شود، بلکه برداشتن قسمتی که از لحاظ مکانیکی فاقد ایمنی است کافی است. این تکنیک صرفه‌جویی واضحی را از دو بعد عملی و اقتصادی همراه با نتایج عالی که تا به حال به دست آمده، ارایه می‌دهد.

هم‌چنین باید خاطر نشان نمود که چگونه برخی پاسخ‌های داده شده به این نکته در پرسشنامه نشان داد که تعمیرات انجام شده قبلی با سایر روش‌ها به نتایج مطلوبی نرسیده بودند. نتیجه در آخرین مرحله حفاظت کاتدیک استفاده شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، نوع آند نصب شده، به سالی که حفاظت کاتدیک استفاده شده بود بستگی دارد که حداقل در شمال آمریکا این طور می‌باشد.

جدول ۹- سیستم‌های حفاظت

کشور	بدون آب‌بندی	غشاء نازک	آسفالت ماستیک	تعمیرات قبل از حفاظت کاتدیک
ایالات متحده آمریکا	ü			ü
کانادا			ü	ü
ایتالیا	اکثراً			
اتریش	اکثراً			
دانمارک	ü			ü
نروژ	ü			
فرانسه		ü		ü
انگلستان	ü			ü
چک و اسلواکی	ü			ü
سوئیس	ü			
ژاپن	ü			

همان طور که قبلاً گفته شد، زمان نصب اولین سیستم‌ها به دهه هفتاد بر می‌گردد که آندهای منفرد فروسیلیکون با روکش لایه‌های آسفالت رسانا استفاده شد. در اوایل دهه هشتاد، بیشتر سیستم‌ها ترکیبی از کابل‌های پلیمری رسانا در داخل

شیارهای خاص در عرشه قرار گرفته بود (سیستم‌های شیاری)، در حالی که در کاربردهای سالهای ۱۹۸۵ - ۱۹۸۶ غالباً کابل‌های مسی با روکش پلیمری رسانا مورد استفاده قرار گرفت.

از سال ۱۹۸۷ به بعد، سیستم‌ها با تیتانیوم مشبک گسترده با روکشی از اکسیدهای فلزات نجیب (نوبل) انتخاب شد و خیلی زود نسبت به انواع دیگر ترجیح داده شد و در نتیجه از لحاظ کمی یکی از پرمصرف‌ترین نوع از ۱۹۸۸ تا به امروز است. خلاصه تمام موارد فوق در جدول ۱۰ نشان می‌دهد که به جز ایالات متحده و کانادا که آنجا به طور عملی انواع مختلف حفاظت کاتدیک نصب شده است، به دنبال پیشرفت این سیستم، در کشورهای دیگر نیز، سیستمی که بیشترین کاربرد را دارد نوع تیتانیوم مشبک گسترده است که جدیدترین نسل سیستم‌های حفاظت کاتدیک است. جالب است آماده‌سازی سطوح مورد کاربرد سیستم حفاظت کاتدیک با تیتانیوم مشبک را مدنظر قرار دهیم که عمدتاً با سندبلاست، هیدروبلاست و تراشیدن مکانیکی انجام شده و اخیراً هیدروتراش (Hydroscarifying) با فشار زیاد جت آب در ایالات متحده، ایتالیا و استرالیا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مهم‌ترین قسمت حفاظت کاتدیک سیستم کنترل مورد استفاده است. مشخصات سیستم‌های کنترل در جدول ۱۱ به طور خلاصه ذکر شده است. قابل ذکر است سیستم کنترل که در اکثر حالات استفاده می‌شود. جمع‌آوری دستی داده‌ها است که مستقیماً از نقاط خاص انجام می‌شود.

جدول ۱۰- انواع سیستم‌های آندی نصب‌شده

کشور	فروسیلیکون با آسفالت رسانا	سیستم شیاری	سیستم ارزیابی	روکش رسانا	سیم پلیمری رسانا	تیتانیوم مشبک	آند خارجی آب دریا
ایالات متحده آمریکا	ü	ü	ü	ü	ü	ü	
کانادا	ü	ü	ü	ü	ü	ü	
ایتالیا						ü	
اتریش						ü	
دانمارک				ü	ü	ü	
نروژ						ü	
فرانسه						ü	
انگلستان					ü	ü	
چک و اسلواکی					ü	ü	
سوئیس					ü	ü	ü
ژاپن				ü	ü		

جدول ۱۱- مشخصات سیستم‌های ارزیابی و کنترل

کشور	در محل		کنترل از راه دور	نوع رکتیفایر			خروجی رکتیفایر		نوع مقره		مسلح به میلگرد
	اتوماتیک	دستی		E ثابت	I ثابت	E-I ثابت	E	I	قطع / وصل	الکتروود مینا	
ایالات متحده آمریکا	ü			ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü
کانادا	ü	ü			ü		ü	ü	ü		ü
ایتالیا	ü		ü	ü	ü		ü	ü	ü	ü	ü
اتریش		ü		ü	ü		ü	ü		ü	
دانمارک		ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	
نروژ		ü		ü	ü		ü	ü	ü	ü	
فرانسه		ü		ü	ü		ü	ü	ü	ü	ü
انگلستان		ü		ü	ü		ü	ü	ü	ü	
چکسلواکی		ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	ü	
سوئیس		ü		ü	ü		ü	ü	ü	ü	ü
ژاپن		ü			ü		ü	ü	ü	ü	ü

هر چند اخیراً به ویژه در کشورهایی نظیر دانمارک، ایتالیا و سوئیس، یک روش عملی و خیلی جالب انتخاب شده که کنترل از راه دور (Remote) است. جمع‌آوری، بررسی و انتقال داده‌ها به یک کامپیوتر در دوردست در تعدادی از سیستم‌های نصب شده موجود با استفاده از یک خط تلفن قبلاً انجام شده یا در نظر گرفته شده است.

با استفاده از یک برنامه خاص در یک کامپیوتر شخصی، سیستم کنترل از راه دور امکان بررسی و کنترل کل سیستم حفاظت کاتدیک یک یا چند سازه مجاور هم را از موقعیتی حتی چندین کیلومتر دورتر می‌سازد که از لحاظ اقتصادی و ماهیت عملی از مزایای آشکاری برخوردار است.

با توجه به این امکان، دیگر ضرورتی به ارزیابی نقطه‌ای در روی سازه‌ها نیست، به خصوص این که سازه‌ها به طور متناوب در معرض برداشتن سطوح یا جابجایی بوده و دسترسی به این نقاط مشکل می‌باشد، در حالی که با سیستم کنترل از راه دور کنترل متناوب سیستم امکان‌پذیر است.

جدول ۱۲ تعداد دفعات کنترل سیستم حفاظت را در کشورهای مختلف نشان می‌دهد. در ایالات متحده و کانادا دفعات کنترل در اولین سال نصب با توجه به شرایط نصب از حداقل یک‌بار در هر دو ماه تا حداکثر یک‌بار در هفته متغیر است، در حالی که در سایر کشورها هر ماه یا هر دو ماه این کنترل و ارزیابی انجام می‌شود. اطلاعاتی از مراحل کار در انگلستان، سوئیس و ژاپن در دسترس نیست، هر چند در طول عملیات، متوسط تعداد به یک بار در هر دو ماه با حداکثر ۱۲

بار در سال (یکبار در ماه) بوده است. در مورد دانمارک سیستم کنترل از راه دور برای حفاظت کاتدی که قبلاً شرح داده شد، اتخاذ شده است.

جدول ۱۲- دوره بازرسی

سطح مهارت اپراتور	تعداد در سال				اولین سال	کشور
	۴ و بیشتر	۳	۲	۱		
متخصص خوردگی	ü				متغیر	ایالات متحده آمریکا
متخصص خوردگی	ü				متغیر	کانادا
مهندس برق	ü	ü			هر ماه	ایتالیا
مهندس باتجربه			ü		هر دو ماه	اتریش
مهندس برق	ü				هر ماه	دانمارک
مهندسین برق و باتجربه	ü			ü	متغیر	نروژ
مهندس باتجربه		ü			هر ماه	فرانسه
مهندس باتجربه	ü					انگلستان
مهندس باتجربه					متغیر	چکسلواکی
متخصص خوردگی					متغیر	سوئیس
مهندس باتجربه						ژاپن

در این نظرخواهی متأسفانه برای جنبه‌های اقتصادی اطلاعات قابل اعتمادی ارایه نشده است.

۳-۵- نتیجه‌گیری

از پاسخ‌های پرسشنامه، با اطمینان می‌توان گفت که مهندسین، طراحان و مسؤولین که در نوسازی سازه‌ها نقش دارند، به عملکرد مطلوب حفاظت کاتدی که تنها به عنوان یک تکنیک برای توقف خوردگی میلگردها بلکه به عنوان یک سیستم بازدارنده (مشابه روش ایتالیا) سهم قایل هستند.

البته در اوایل هر تکنیکی، تمایل به انتظار و مشاهده تجارب دیگران با نتایج اخیر در کاربردها وجود دارد، که اگر نتیجه مثبت بود، مسلماً به افزایش تعداد کاربردها منجر خواهد شد و کشورها علاقمند به کاربرد چنین تکنیکی می‌شوند. تمام شرایطی که مستلزم اطمینان از تمام مواردی که احتمالاً در آینده مطرح می‌شود، به طور آشکار در برگیرنده مسایل زیر می‌باشند:

۱- خرابی عرشه یک پل یا سازه باید شناسایی شود که آیا به کیفیت ضعیف بتن مرتبط است و یا به حالت خوردگی میلگردها ارتباط دارد.

- ۲- پلی که سیستم حفاظت کاتدیک برای آن تأمین می‌شود، باید حداقل برای مدت ۲۰ سال طراحی شود در غیر این صورت تعویض سازه‌ای با حجم زیاد ترافیک که شامل یک سوپر سازه است، گران خواهد بود. یک مثال خوب برای این موضوع، باکس بتن‌آرمه است که از نظر سازه‌ای یکپارچه و بی‌نقص بوده و بدیهی است دستیابی به سازه بی‌عیب باکسی بتن‌آرمه امر ساده‌ای نیست.
- ۳- برای کاربرد امکانات بالقوه مفید نظیر خط تلفن جهت کنترل از راه دور باید شرایط لازم فراهم باشد.
- ۴- هزینه‌ها باید در سطح مناسب حفظ شود تا کاربرد حفاظت کاتدیک از نظر اقتصادی با تکنیک‌های متداول نگهداری که غالباً امروزه استفاده می‌شود قابل مقایسه باشد، از این نظر باید اشاره کرد که هزینه تابعی از تعداد کاربردها است. لذا با افزایش تعداد کاربردها، هزینه طرح کاهش می‌یابد. چنانچه کاهش ارقام هزینه‌ها را در ایالات متحده و کانادا می‌توان به وضوح دید.

۶- ضمیمه

پرسشنامه

سؤالات عمومی

۱- آیا حفاظت کاتدیک قبلاً در کشور شما برای حفاظت عرشه پلها استفاده شده است؟

بله خیر

اگر جواب مثبت است از چه زمانی؟

۲- در چند پل حفاظت کاتدیک استفاده شده است؟

۳- کل سطح عرشه پل‌هایی که در کشور شما این سیستم در آنها نصب شده چقدر است؟

۴- اگر حفاظت کاتدیک هنوز در کشور شما برای عرشه پل‌ها استفاده نشده، آیا در آینده نزدیک قصد استفاده وجود دارد؟

بله خیر

آیا برنامه تحقیقاتی شامل کاربردهای عملی در دست اقدام است؟

بله خیر

لطفاً ارگان مسؤول در برنامه تحقیقاتی را مشخص کنید (دانشگاه، مراکز تحقیقاتی و...)

۵- اگر در کشور شما حفاظت کاتدیک در عرشه پل‌ها هنوز استفاده می‌شود دلیل این امر چیست؟ (هزینه خیلی زیاد، تا به

حال آزمایش نشده و ...)

۶- اگر از حفاظت کاتدیک در عرشه پل‌ها استفاده می‌کنید دلیل اصلی برای این تقسیم چیست؟ (تجارب مثبت سایر

کشورها، نیاز فوری به تغییر در سازه‌های بحرانی و...)

۷- آیا روند کاربرد حفاظت کاتدیک در کشور شما رو به افزایش است؟

بله خیر

۸- چگونه نتایج به دست آمده از کاربرد حفاظت کاتدیک در کشورتان را در نظر می‌گیرید؟

۹- چه مسایلی در کاربرد حفاظت کاتدیک مطرح است؟

پرسشنامه صفحه مقابل فقط برای کشورهایی است که حفاظت کاتدیک را حداقل در مرحله آزمایشی به کار برده‌اند،

همان طوری که مشاهده خواهید کرد، پرسشنامه به پل‌های منفرد اشاره دارد. از این رو توصیه می‌شود ۵ مورد خیلی مهم

حفاظت کاتدیک عرشه پل‌ها را در کشورتان انتخاب و پرسشنامه زیر را برای هر پل به طور جداگانه تکمیل نمایید.

پرسشنامه حفاظت کاتدیک پل

۱- مشخصات پل

- ۱-۱- محل پل
 ۲-۱- ابعاد عرض (متر) طول (متر)
 سطح عرشه پل (مترمربع) تعداد باندها تعداد دهنه
 ۳-۱- نوع سازه (پیش تنیده ، بتن آرمه، ...)
 ۴-۱- سال ساخت
 ۵-۱- حجم ترافیک (متوسط سالیانه)

۲- آب و هوا

- ۱-۲- درجه حرارت در تابستان حداقل حداکثر
 درجه حرارت در زمستان حداقل حداکثر
 ۲-۲- مقدار کاربرد نمک یخزدا متوسط تعداد روز در سال
 متوسط kg/m^2 در سال
 نوع نمک یخزدا
 ۳-۲- آیا پل در معرض محیط دریایی است؟ بله £ خیر £
 آیا پل در معرض محیط خورنده است؟ بله £ خیر £
 اگر جواب مثبت است، چه قسمتی از پل؟ عرشه £ سازه تحتانی £ ناحیه تر و خشک یا جزرومد £

۳- نصب حفاظت کاتدیک

- ۱-۳- آیا حفاظت کاتدیک در پل نصب شده است؟
 £ در حین عملیات ساخت پل (پل جدید)؟ اگر جواب مثبت است به سوال ۲-۳ رجوع شود.
 £ در حین بهره‌برداری از پل (پل موجود)؟ اگر جواب مثبت است به سوال ۴ رجوع شود.

- ۳-۲- در اولین مورد، حفاظت کاتدیک در چه حالتی نصب شد؟
 £ بتن تازه؟ اگر جواب مثبت است به سؤال ۶ رجوع شود.
 £ بتن عمل‌آوری شده؟ اگر جواب مثبت است به سؤال ۵ رجوع شود.

۴- شرایط پل قبل از نصب حفاظت کاتدیک

- ۴-۱- آیا عرشه یا سازه تحتانی ناشی از خرابی خوردگی تعمیر شده است؟
 بله £ خیر £
- ۴-۱-۱- اگر جواب مثبت است، سال تعمیر؟
- ۴-۱-۲- چگونه تعمیر شد (نوع روکش، مصالح و ...)؟
- ۴-۱-۳- اگر تعمیر عرشه بوده مقدار آن (m^2)؟
- ۴-۱-۴- اگر تعمیر تیرها یا کلاهک پایه‌ها یا پایه‌ها بوده، چه تعداد بوده است؟
- ۴-۱-۵- درصد کل سطوح تعمیر شده؟
- ۴-۲- آیا پراکندگی جریان وجود داشته است؟ بله £ خیر £
- ۴-۳- آیا مورد آشکاری وجود داشت؟
- ۴-۳-۱- وجود کلرور در مرحله ساخت در آب، سیمان یا مصالح مشاهده شده است؟
 بله £ خیر £
- ۴-۳-۲- کلرور کلسیم ($CaCl_2$) به عنوان زودگیر (تسریع کننده گیرش) استفاده شده بود؟
 بله £ خیر £
- ۴-۴- مواد آب بند؟ بله £ خیر £
 چه نوعی؟
- ۴-۵- از آزمایشات زیر کدامیک انجام گرفته است؟
- £ پتانسیل نیمه‌هادی
- £ نقشه آلودگی
- £ بررسی ضخامت پوشش
- £ کنترل پیوستگی در میلگردها
- £ آزمایش مغزه‌گیری (مقاومت فشاری، درصد هوا، آسیب‌ها)
- £ عمق کربناسیون
- £ نمایش کلراید [] حجمی نمودار []
- £ سایر موارد را ذکر کنید.

۵- روش پرداخت سطح بتن قبل از نصب

۱-۵- روش پرداخت سطح بتن قبل از نصب:

£ سندبلاست

£ هیدروبلاست

£ هیدروتراش

سایر موارد (توضیح دهید).

۲-۵- اگر نصب سیستم در یک پل موجود بوده، روش پرداخت سطح بتن قبل از نصب:

£ سند بلاست

£ هیدروبلاست

£ هیدروتراش

£ تخریب هیدرولیکی (و بتن ریزی مجدد دال بتنی)

سایر موارد (توضیح دهید).

۶- سیستم حفاظت کاتدیک

۱-۶- چه شرایط فیزیکی منجر به نصب حفاظت کاتدیک شد؟

۲-۶- قسمت‌های حفاظت شده

£ عرشه (تعداد دهنه و سطح بر حسب مترمربع)

£ حاشیه پیاده‌رو (سطح بر حسب مترمربع)

£ تیرها (تعداد و سطح بر حسب مترمربع)

£ کلاهک پایه‌ها (تعداد و سطح بر حسب مترمربع)

£ پایه‌ها (تعداد و سطح بر حسب مترمربع)

سایر قسمت‌های سازه‌ای (نوع و سطح بر حسب مترمربع)

۳-۶- چه ملاحظاتی برای حفاظت سازه‌های پیش‌تنیده انجام گرفته است؟

۴-۶- مشخصات سیستم حفاظت کاتدیک

۱-۴-۶- تاریخ نصب

۲-۴-۶- هزینه نصب سیستم به غیر از تأمین و نصب سیستم کنترل (دلار آمریکا بر مترمربع)

۳-۴-۶- هزینه تأمین و نصب سیستم کنترل (دلار آمریکا بر مترمربع)

۴-۴-۶- سیستم اعمال جریان (نوع آندها)

£ تیتانیوم مشبک

£ سیم پلیمری رسانا

سایر موارد را شرح دهید.

۴-۴-۵- سازنده آند

۴-۵-۵- مشخصات رویه

۴-۵-۱- نوع مواد

۴-۵-۲- ضخامت متوسط (میلی متر)

۷- سیستم کنترل

۷-۱- نوع رکتیفایر

£ ولتاژ ثابت

£ جریان ثابت

£ ولتاژ و جریان ثابت

£ مجهز به کنترل از راه دور

۷-۲- مراحل کنترل

۷-۲-۱- نوع سیستم کنترل

£ کنترل در محل

£ جمع آوری اتوماتیک داده‌ها و تنظیم T/R

£ جمع آوری دستی داده‌ها و تنظیم T/R

£ کنترل از راه دور

۷-۲-۲- جزییات سیستم کنترل

۷-۳-۱- نوع مقره‌های کنترل

£ الکترودهای مبناء دائمی داخلی

£ الکترودهای مبناء دستی سطحی

£ مقره‌های مجهز (ماکروسل)

سایر موارد (شرح دهید).

۴-۷- نوع قرائت‌ها و وظایف رکتیفایر کنترل:

£ جریان خروجی

£ ولتاژ خروجی

£ قطع و وصل

سایر موارد

۵-۷- دفعات کنترل (ماهانه، هر دو ماه و...)

۶-۷- تخصص افراد مسؤول آزمایش سیستم در چه سطحی است؟

۷-۷- معیار حفاظت

£ ۱۰۰mV دپلاریزاسیون

£ ۳۰۰ mV تغییر جهت

£ E log I

سایر موارد

۸-۷- آیا سیستم مطابق طراحی کار می‌کند؟ بله £ خیر £

۹-۷- اگر جواب منفی است دلیل خرابی چیست؟

۱۰-۷- آیا در حین نصب سیستم مسایلی از لحاظ کنترل، عملکرد و ... داشته‌اید؟

بله £ خیر £

۱۱-۷- اگر جواب مثبت است:

در چه مرحله‌ای؟

و چه نوع مسایلی؟

٧- منابع

- 1- BENNETT J. E. and MITCHELL T.
Depolarisation testing of cathodically protected reinforcing steel in concrete, Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana, NACE Paper No 373 (1989).
- 2- BERKE N. and SUNDBERG K
The effects of admixtures and concrete mix designs on long term concrete durability in concrete environments, Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana. NACE Paper No 386 (1989).
- 3- BERKELEY K G C
Recent developments in the cathodic protection of reinforced concrete structures, The Failure and Repair of Corroded Reinforced Concrete Structures, Oyez, 49-58, (1987).
- 4- BROWN J.P.
Cathodic protection of reinforced concrete using conductive coating anodes. Proceedings of conference on cathodic protection of reinforced concrete bridge decks, 12 / 13 February, San Antonio, Texas, NACE, 156-158, (1985).
- 5- CADY P.D.
A study of policies for the protection, repair, rehabilitation and replacement of concrete bridge decks, Department of Transportation, Commonwealth of Pennsylvania, Penn State University, 83 pp (1981).
- 6- CHERRY B.W
Quantifying the conditions necessary for corrosion induced damage in reinforced concrete. Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana, NACE Paper No 377 (1989).
- 7- CLEAR K.C
Growth and evolution of bridge deck cathodic protection, Proceedings of conference on cathodic protection of reinforced concrete bridge decks, 12/13 February, San Antonio, Texas, NACE, 55-65, (1985).
- 8- CLEAR K. C
Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs, Vol. 4 Galvanized reinforcing steel, FHWA/RD-82/028 (1981).
- 9- FROMM H.J.
Cathodic protection for concrete bridge restoration, Ministry of Transportation and Communications, Ontario, SP-81-O1, 36 pp (1981).
- 10- FROMM H.J.
Successful application of cathodic protection to a concrete bridge deck. Transportation Research Record, 762, 9-13, (1980).

- 11- HARTT W.H. and NARAYANAN P.
Assessment of prestressing steel embrittlement by constant extension rate testing. Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana, NACE Paper No 382 (1989).
- 12- JACKSON D.R.
The cost/benefit of cathodic protection for reinforced concrete bridge decks, Corrosion '82, NACE Houston (1982).
- 13- KATAWAKI K.
Cathodic protection of reinforcing steel in concrete, Transactions of the Japan Concrete Institute, 3, 127-132, (1981).
- 14- KESSLER RT. and POWERS RG.
Cathodic protection of concrete bridge substructures in marine environment. Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana, NACE Paper No 374 (1989).
- 15- SCHELL H.C.
Research direction in corrosion protection for reinforced concrete - Ontario Ministry of Transportation. Proceedings of a conference symposium on corrosion of metals in concrete, 18/19 April, New Orleans, Louisiana, NACE Paper No 385, (1989).
- 16- WYATT B.S.
Anodes for concrete - old and new, Paper 23 presented at cathodic protection theory and practice, 2nd International Conference, Stratford-upon-Avon, June 1989.
- 17- WYATT B.S. and IRVINE D.J.
Cathodic protection of reinforced concrete. Proceedings of a conference on cathodic protection, Corrosion Science and Materials Selection, 17-19 Nov, Birmingham UK, Institution of Corrosion Science and Technology Vol. 2, 17-38, (1986).
- 18- NACE PUBLICATIONS:
 - a. NACE RP0290-90 "Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures" (Houston, TX : National Association of Corrosion Engineers, 1990).
 - b. Solving Rebar Corrosion Problems in Concrete (Houston, TX : NACE, 1983).
 - c. Collected NACE Papers 1976-1982 (Houston, TX: NACE).
- 19- ACI PUBLICATIONS:
 - a. 222R85 Committee Report, "Corrosion of Metals in Concrete" (Detroit, MI: American Concrete Institute, 1985).
 - b. SP-65, "Performance of Concrete in Marine Environment," (Detroit, MI: American Concrete Institute, 1985).
 - c. SP-1, "Concrete Primer, "3rd ed., F. McMillian, L. Tuthill, eds. (Detroit, MI: American Concrete Institute, 1973).
 - d. SP-102, "Corrosion, Concrete, and Chlorides" (Detroit, MI: American Concrete Institute, 1987).

20- ASTM PUBLICATIONS

- a. J. Slater, STP-818. "Corrosion of Metals in Association with Concrete," (Philadelphia, PA: ASTM, 1984).
- b. STP-727, "Electrochemical Corrosion Testing," Mansfeld and Bertocci, Eds. (Philadelphia, PA: ASTM, 1981).
- c. STP-713, "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete," Tonini and Gaidis, Eds. (Philadelphia, PA: ASTM, 1980).
- d. STP-629, "Chloride Corrosion of Steel in Concrete," Tonini and Dean, Eds. (Philadelphia, PA: ASTM, 1977).

21- P. PEDEFERRI, M. TETTAMANTI, G.L. MUSSINELLI

The effect of current density on anode behaviour and on concrete in the anode region. Second International Conference on Deterioration and Repair of Reinforced Concrete in the Arabian Gulf, 11-13 October, 1987 – Bahrain

22- CJ. MUDD, P. PEDEFERRI, M. TETTAMANTI, G.L. MUSSINELLI

Cathodic Protection of Steel in Concrete with mixed metal oxide activated titanium net. Paper No 229 Corrosion 88 March 21-25, 1988 - St. Louis, Missouri Also on "Material Performance", September 1988.

23- CJ. MUDD, P. PEDEFERRI, G.L. MUSSINELLI, M. TETTAMANTI

New Developments in Mixed Metal Oxide activated Net for Cathodic Protection of Steel in Concrete, Corrosion 89 Paper No. 168 April, 17-21, 1989 - New Orleans, Louisiana.

24- M. TETTAMANTI, P. BALDO, O. MASON

Cathodic Protection of Bridge Viaduct in the presence of Prestressed Steel: An Italian Case History Corrosion 91, paper No. 119 March 11-15, 1991 - Cincinnati, Ohio.

فهرست انتشارات

قیمت (ریال)	سال انتشار	عنوان کتاب
<i>الف) پروژه‌های تحقیقاتی</i>		
۱۱/۰۰۰	۸۳	بهار ۱. کاربرد آب و مصالح محلی چابهار برای ساخت بلوکهای ساختمانی
۱۳/۰۰۰	۸۳	بهار ۲. شیوه‌های طراحی و کاربرد حفاظها و ضربه‌گیرهای ایمنی در راهها
۱۴/۰۰۰	۸۳	بهار ۳. ضوابط طراحی و اجرای روسازی راه آهن بدون بالاست
۲۷/۰۰۰	۸۳	بهار ۴. بررسی و مقایسه فنی و اقتصادی رویه‌های بتنی و آسفالتی
۱۶/۰۰۰	۸۳	زمستان ۵. بررسی مسائل کمی و کیفی مصرف قیر در راههای کشور
۱۱/۰۰۰	۸۴	بهار ۶. ضوابط طراحی و اجرای آسفالت ماستیک
۱۱/۰۰۰	۸۴	بهار ۷. راهنمای طراحی و ایمن‌سازی پایه علائم راه
۲۴/۰۰۰	۸۴	تابستان ۸. بررسی عوامل مؤثر در ارزیابی و توجیه فنی و اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی پروژه‌های راه و راه‌آهن
۲۳/۰۰۰	۸۴	تابستان ۹. راهنمای طراحی و اجرای سیستم زهکشی آبهای سطحی و زیرسطحی راه، راه‌آهن و فرودگاه (و نقشه‌های اجرایی)
۱۳/۰۰۰	۸۴	تابستان ۱۰. روش‌های جدید طرح مخلوط‌های آسفالتی بر اساس عملکرد و پیشنهاد روش مناسب برای کشور
۱۸/۰۰۰	۸۴	تابستان ۱۱. راهنمای تثبیت لایه‌های خاکریز و روسازی راهها
۱۴/۰۰۰	۸۴	تابستان ۱۲. تسلیح خاکریز و بستر راهها با استفاده از ژئوگرید
۲۰/۰۰۰	۸۴	پاییز ۱۳. سیستم‌های هوشمند حمل و نقل ریلی
۱۷/۰۰۰	۸۴	زمستان ۱۴. ظرفیت باربری محوری شمعها
۲۶/۰۰۰	۸۴	زمستان ۱۵. راهنمای تهیه مشخصات فنی، جزئیات و نقشه‌ها در پل و سازه‌های راه
۵۰/۰۰۰	۸۴	زمستان ۱۶. آیین‌نامه نحوه بارگیری، حمل و مهار ایمن بار وسایل نقلیه باربری جاده‌ای
۱۴/۰۰۰	۸۵	بهار ۱۷. تثبیت شیب شیروانی خاکریزها و خاکبرداری‌ها
۱۰/۰۰۰	۸۵	بهار ۱۸. روشهای نوین تعیین مشخصات و ارزیابی روسازی راه
۱۵/۰۰۰	۸۵	بهار ۱۹. روشهای بازیافت سرد و گرم آسفالت و امکان‌سنجی اقتصادی آن در ایران
۲۲/۰۰۰	۸۵	بهار ۲۰. بررسی و ارائه روش‌های ساماندهی اخذ عوارض در آزادراههای کشور
۲۰/۰۰۰	۸۵	بهار ۲۱. معیارهای طرح مخلوط‌های آسفالتی برای مناطق گرمسیر، سردسیر و شیبهای تند جاده‌ها

۱۷/۰۰۰	۸۵	تابستان	۲۲. کاربرد پلیمر در بهبود خواص قیرها و مخلوطهای آسفالتی
۷۵/۰۰۰	۸۵	پاییز	۲۳. مدیریت پل

ب) گزارش‌های تخصصی

۱۰/۰۰۰	۸۲	تابستان	۱. ممیزی ایمنی راه
۱۰/۰۰۰	۸۲	پاییز	۲. پیشنهاداتی برای آزمایش ژئوتکستایلها
۱۰/۰۰۰	۸۲	پاییز	۳. راهنماییهای سودمند برای طراحی و ساخت خاکریزهای راه
۱۰/۰۰۰			۴. روشها و شرایط لازم برای عملیات خاکی به منظور کاهش اثرات زیست محیطی پروژه‌های راه
	۸۲	پاییز	
۱۰/۰۰۰	۸۲	پاییز	۵. آلودگی ناشی از دی اکسید نیتروژن در تونلهای راه
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۶. ایمنی در تونلها
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۷. مدیریت ترافیک و کیفیت سرویس
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۸. بهینه سازی شبکه‌های موجود بین شهری
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۹. بیست و دومین همایش جهانی راه پیارک
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۰. یارانه‌ها هزینه‌ها و منافع اجتماعی حمل‌ونقل عمومی
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۱. برنامه‌ریزی و بودجه در شبکه راهها
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۲. روشهای مشارکت همگانی در توسعه پروژه راه
۱۱/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۳. قیمت‌های بین‌المللی سوخت (بنزین و گازوییل)
۱۱/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۴. سیاست حمل‌ونقل اروپایی تا سال ۲۰۱۰
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۵. مبانی تحلیل اقتصادی
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۶. گزارش سالانه ژوئیه ۲۰۰۳ GRSP
۱۰/۰۰۰	۸۳	بهار	۱۷. راهنمای ممیزی ایمنی راه
۱۰/۰۰۰	۸۳	تابستان	۱۸. راهنمای فیلم‌های IRF
			۱۹. انتخاب مصالح و طراحی روسازی‌های انعطاف‌پذیر برای آمدوشد و شرایط آب‌وهوایی سخت
۱۶/۰۰۰	۸۳	تابستان	
۱۰/۰۰۰	۸۳	تابستان	۲۰. راههای دسترسی به مناطق برون شهری
۱۱/۰۰۰	۸۳	تابستان	۲۱. روشهای ساده نگهداری راه
۱۰/۰۰۰	۸۳	تابستان	۲۲. تجهیزات اتوماتیک بررسی ترک خوردگی روسازی راه
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۳. ارتقاء و بهبود عملکرد داخلی راهها
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۴. تأمین مالی و ارزیابی اقتصادی
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۵. بهبود تأمین منابع مالی و مدیریت نگهداری راه

۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۶. باز یافت روسازی های انعطاف پذیر موجود
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۷. حمل و نقل هوشمند
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۸. محیط زیست و پروژه های راه سازی
۱۰/۰۰۰	۸۳	پاییز	۲۹. تقسیم مسؤلیت برای داشتن جاده های ایمن تر
۱۰/۰۰۰	۸۳	زمستان	۳۰. فرآیند تصمیم گیری در اعمال سیاست های پایدار حمل و نقل جاده ای
۱۰/۰۰۰	۸۳	زمستان	۳۱. کیفیت خدمات جاده ای
۱۰/۰۰۰	۸۳	زمستان	۳۲. روش هایی برای ارزیابی خطر وقوع زمین لغزه ها
۱۰/۰۰۰	۸۳	زمستان	۳۳. روش های ارزیابی اقتصادی برای پروژه های راه در کشورهای عضو پیارک
۱۰/۰۰۰	۸۳	زمستان	۳۴. راهنمای ارزیابی سیستم های نگهدارنده خاک
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	۳۵. آشنایی با مفاهیم مدیریت روسازی
			۳۶. راهنمای انعقاد قرارداد، نحوه انتخاب و مدیریت مشاوران در فعالیت های
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	مهندسی پیش از ساخت
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	۳۷. تضمین کیفیت در عملیات خاکی
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	۳۸. رویه های بتنی مسلح پیوسته
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	۳۹. طبقه بندی تونل ها، دستورالعمل ها، تجربیات موجود و پیشنهادات
۱۰/۰۰۰	۸۴	بهار	۴۰. نقش مدل های اقتصادی و اجتماعی - اقتصادی در مدیریت راه
۱۰/۰۰۰	۸۴	تابستان	۴۱. حمل و نقل ترکیبی، اقداماتی جهت تشویق به استفاده از حمل و نقل عمومی
۱۰/۰۰۰	۸۴	تابستان	۴۲. پیشرفت مدیریت و تأمین بودجه نگهداری راهها در افریقا
۱۱/۰۰۰	۸۴	پاییز	۴۳. برنامه ملی ایمنی ترافیک کشور ترکیه
۱۷/۰۰۰	۸۴	پاییز	۴۴. بررسی توسعه حمل و نقل در منطقه اسکاپ در سال ۲۰۰۳، آسیا و اقیانوسیه
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۴۵. تبادل فناوری و توسعه
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۴۶. راه های دارای رویه بتنی
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۴۷. تجدید ساختار بخش راه
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۴۸. حمل و نقل کالا
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۴۹. گزارش سالانه ژوئن ۲۰۰۴ GRSP
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۵۰. بکارگیری مصالح حاصل از باز یافت رویه های آسفالتی و بتن خرد شده در خاکریز
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۵۱. تراکم ترافیک در آزادراهها و بزرگراهها
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۵۲. کاربرد بتن غلتکی در راه سازی
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۵۳. راهنمای تأمین روشنایی راهها
۱۰/۰۰۰	۸۴	زمستان	۵۴. راه سازی در نواحی بیابانی
۱۰/۰۰۰	۸۵	بهار	۵۵. مدیریت عملکرد پلها

۱۲/۰۰۰	۸۵	بهار	۵۶. سیستم مدیریت ایمنی در صنعت حمل و نقل ریلی
۱۰/۰۰۰	۸۵	بهار	۵۷. راهنمای ممیزی سیستم مدیریت ایمنی هوایی
۱۰/۰۰۰	۸۵	بهار	۵۸. توسعه ابزارهای سنجش عملکرد
۳۰/۰۰۰	۸۵	تابستان	۵۹. نگهداری نواحی کنار راه و زهکشی (جلد اول)
۳۰/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۰. تعمیر و نگهداری راههای شوسه (جلد دوم)
۲۵/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۱. تعمیر و نگهداری راههای دارای رویه آسفالتی (جلد سوم)
۱۵/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۲. نگهداری سازه‌ها و ادوات کنترل ترافیک (جلد چهارم)
۱۰/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۳. فناوری و اقدامات ابتکاری کنترل ترافیک در اروپا
۱۰/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۴. معرفی سیستم مدیریت ریسک
۱۲/۰۰۰	۸۵	تابستان	۶۵. تعمیر و مقاوم‌سازی زیرسازه پلها
۲۰/۰۰۰	۸۵	پاییز	۶۶. الگوی مناسب برای بهره‌برداری و نگهداری تونلهای جاده‌ای
۲۶/۰۰۰	۸۵	پاییز	۶۷. مدیریت ایمنی راه
۱۰/۰۰۰	۸۵	پاییز	۶۸. مطالعه‌ای بر مدیریت ریسک در راهها
۱۲/۰۰۰	۸۵	پاییز	۶۹. گزارش جهانی در خصوص پیشگیری از صدمات ناشی از تصادفات جاده‌ای
۱۰/۰۰۰	۸۵	پاییز	۷۰. ارزیابی و تأمین بودجه نگهداری راه در کشورهای عضو پیارک
۱۰/۰۰۰	۸۵	پاییز	۷۱. حفاظت کاتدیک عرشه پلها

ج) کتب

۱۵/۰۰۰	۸۳	تابستان	۱. فرهنگ جامع دریایی
۳۹/۰۰۰	۸۳	تابستان	۲. برنامه‌ریزی و طراحی فرودگاه (دو جلد)
۱۰/۰۰۰	۸۳	تابستان	۳. فرهنگ و اصطلاحات فنی و مهندسی راه
۱۲۵/۰۰۰	۸۴	پاییز	۴. راهنمای ایمنی راه (پیارک)
۴۰/۰۰۰	۸۴	پاییز	۵. فرهنگ مصور دریایی (همراه با نسخه الکترونیک)

د) لوح فشرده

۳۴/۵۰۰	۸۳	پاییز	۱. نشریات Austroads (شامل ۱۸۶ عنوان از نشریات وزارت راه استرالیا و نیوزلند در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)
۳۴/۵۰۰ (قیمت واحد)	۸۳	زمستان	۲. فیلم‌های آموزشی راه IRF (شامل ۱۰۷ فیلم در ۴۲ لوح فشرده)
۳۴/۵۰۰	۸۴	بهار	۳. نشریات SWOV (شامل ۱۳۸ عنوان از نشریات SWOV ,VTI , DRI NCHRP, در موضوعات مختلف بصورت فایل pdf)
			۴. آیین‌نامه ایمنی راهها (مجموعه هفت جلدی منتشر شده از سوی

Ministry of Roads and Transportation
Deputy of Education Research and Technology

Cathodic Protection of Bridge Decks



WORLD ROAD ASSOCIATION – PIARC

ROAD AND TRANSPORTATION MINISTRY
DEPUTY OF
EDUCATION, RESEARCH AND TECHNOLOGY
Web: www.rahiran.ir

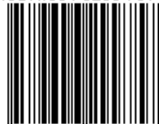
Cathodic Protection of Bridge Decks

THE BUREAU OF TECHNOLOGY & SAFETY STUDIES

PIARC SECRETARIAT IN IRAN

85/RRRM/201

ISBN: 964-6299-75-X



9 789646 299757