فصل چهارم

فصل چهارم

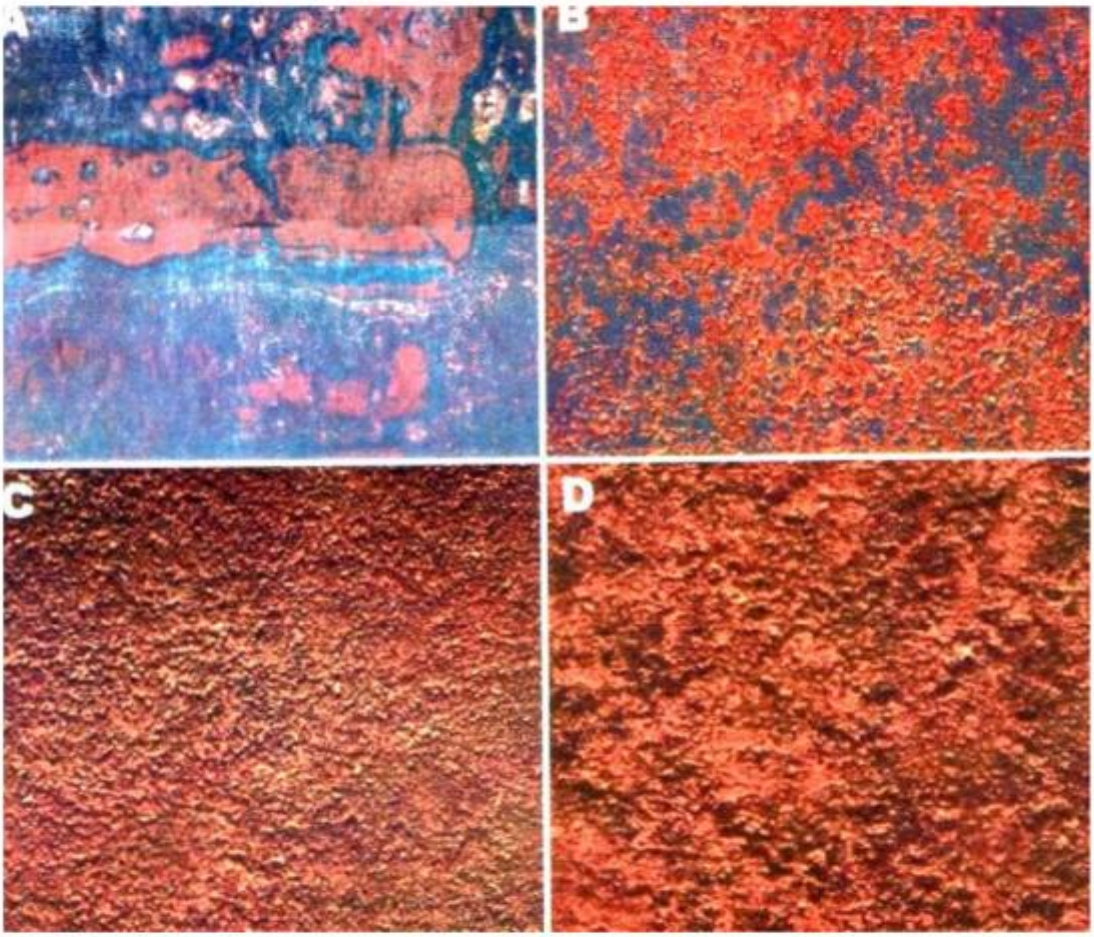
آماده‌سازی و پوشش‌دهی سطح

برای افزایش کارایی حفاظت کاتدی، اعمال پوشش عایق الکتریکی بر روی سازه‌های فلزی ضروری است. عمدهٔ پوشش‌های عایقی خطوط لوله شامل انامل پایهٔ نفتی و زغال‌سنگ، پوشش سه لایهٔ پلی‌الفینی (پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن)، بتنی، اپوکسی و کامپوزیتی هستند. برای سازه‌های در معرض آب مثل کشتی، اسکله‌ها، دکل‌ها و مبدل‌های حرارتی از انواع رنگ‌ها استفاده می‌شود. پوشش‌های عایقی، نقش مهمی در کاهش دانسیتهٔ جریان حفاظت دارند و چنانچه حفاظت کاتدی به‌خوبی اجرا شود، علاوه‌بر کاهش و توزیع مناسب جریان حفاظت، می‌توانند باعث افزایش عمر پوشش نیز بشوند. تخریب پوشش، ناشی از حفاظت بیش از حد، نیز خود معضلی است که می‌تواند باعث اخلال در سیستم حفاظت کاتدی شود. در این فصل دربارهٔ آماده‌سازی سطح و پوشش‌های اعمالی بر روی سازه‌ها توضیح داده شده است.

۱.۴. روش‌های آماده‌سازی سطح

کارایی پوشش‌های اعمالی بر روی سازه‌ها به‌طور قابل توجهی به نحوهٔ تمیزکاری و آماده‌سازی سطوح بستگی دارد. ارزیابی چشمی برای تشخیص میزان تمیزی سطوح در اغلب موارد کفایت می‌کند. قبل از انتخاب و به‌کارگیری روش آماده‌سازی برای اجرای پوشش، شناخت کیفیت سطح سازه قبل از اجرا نیز مهم است. به‌طور مثال، برای فولاد میزان زنگ‌زدگی براساس استاندارد ایزو، با چهار درجهٔ A، B، C و D مشخص می‌شوند. در درجهٔ A، سطح فولاد به‌طور عمده با پوستهٔ اکسید کارخانه‌ای کاملاً چسبیده، پوشانده شده است، ولی زنگ‌زدگی آن بسیار کم است. در درجهٔ B، سطح فولاد شروع به زنگ زدن نموده و پوستهٔ کارخانه‌ای شروع به پوسته شدن کرده است. در درجهٔ C، پوستهٔ اکسید کارخانه‌ای بر روی سطح فولاد، از بین رفته و یا به حالتی تبدیل شده است که آن را می‌توان تراشید. به هر صورت خوردگی موضعی جزئی

به‌صورت حفره‌های پراکنده بر روی سطح در شرایط دید عادی مشاهده می‌شود. در درجهٔ D، پوستهٔ اکسید کارخانه‌ای موجود بر روی سطح فولاد، زنگ زده و جدا شده است و روی سطح فولاد خوردگی موضعی به‌صورت کلی، در شرایط عادی مشاهده می‌شود. برای مشاهده تصاویر درجات مذکور به شکل ۱.۴ مراجعه شود. با توجه به کیفیت سطوح قبل از آماده‌سازی، هزینه و میزان کاری که برای تمیزکاری سطح انجام می‌شود، متفاوت است.



شکل ۱.۴. تصویر درجهٔ زنگ‌زدگیA، B، C و D فولاد، قبل از آماده‌سازی [۱]

به‌طورکلی روش‌های آماده‌سازی سطوح فلزی را می‌توان به چهار دستهٔ زیر تقسیم‌بندی نمود:

روش مکانیکی شامل:

- آماده‌سازی سطح توسط وسایل دستی،
- آماده‌سازی سطح با ابزار ماشینی،
- آماده‌سازی سطح با فشار آب،
- آماده‌سازی سطح با ساچمه‌زنی، ماسه‌پاشی و پوستهٔ دانه‌های گیاهی مثل پوست گردو.

روش شیمیایی و الکتروشیمیایی شامل:

- چربی‌زدایی با حلّال یا بخار،
- اسیدشویی،
- آماده‌سازی با مواد قلیایی،
- آماده‌سازی توسط جریان الکتریکی.

روش‌های حرارتی و انرژتیک شامل:

- استفاده از شعله،
- استفاده از امواج،
- استفاده از لامپ،
- استفاده از لیزر.

اعمال آستری به‌منظور آماده‌سازی سطوح شامل:

- شست‌وشو با پرایمر،
- پرایمرهای غنی از روی،
- فسفاته کردن،
- کروماته کردن.

سه استاندارد اصلی NACE، SSPC (Steel Structures Painting Council) و ISO برای آماده‌سازی وجود دارد. البته استاندارد BS 7079، BS4232 و یا استاندارد DIN 55928 هم وجود دارد که کمتر در صنعت مورد توجه قرار دارند. استاندارد NACE کیفی است، ولی دو استاندارد دیگر به‌صورت تصویرسازی و میزان زبری سطح به‌صورت کمّی نیز ارائه شده‌اند. تطابق دقیق این سه استاندارد در بعضی موارد مشکل، ولی تاحدودی می‌توانند با هم مقایسه شوند (جدول‌های ۱.۴ تا ۳.۴).

درجات آماده‌سازی براساس سطح ظاهری، پس از تمیزکاری مشخص می‌شوند. شکل ۲.۴ درجه‌های آماده‌سازی سطح را نشان می‌دهد.

روش‌های بلاستینگ، تمیزکاری دستی، ابزار الکتریکی و تمیزکاری با شعله بر روی سطوح فولادی نورد گرم‌شده کاربرد دارند. از روش بلاستینگ برای تمیزکاری ورق‌های فولادی نورد سردشده با ضخامت کافی هم استفاده می‌شود. جدول ۴.۴ میزان زبری سطوح برای پوشش‌های مختلف را نشان می‌دهد. بسته به روش اجرا و نوع درجات زنگ‌زدگی، ممکن است زبری سطح

متفاوت باشد. محدودهٔ زبری سطح $۲۵\mu m < R_{Y5} < ۶۰\mu m$ زبری کم و محدودهٔ زبری $۶۰\mu m < R_{Y5} < ۱۰۰\mu m$ زبری متوسط و سطح $۱۰۰\mu m < R_{Y5} < ۱۵۰\mu m$ محدودهٔ زبری خشن تعریف می‌شود [۷]. جدول ۵.۴ کیفیت سطوح با توجه به نوع پوشش و نوع آماده‌سازی را نشان می‌دهد. R_{Y5} متوسط ۵ مورد اندازهٔ ارتفاع قله تا کف درهٔ پروفیل است که گاهی با R_z هم معرفی می‌شود.

جدول ۱.۴. انواع روش آماده‌سازی سطوح قبل از اعمال پوشش [۵-۲]

International standard (Swedish Standard)
- St 2: Hand tool cleaning - St 3: Power tool cleaning - St 4: Brush-off blast cleaning - Sa 2: Commercial blast cleaning - Sa 2 1/2: Near-white blast cleaning - Sa 3: White metal blast cleaning
Steel Structures Painting Council (SSPC, USA Standard)
- SP-1: Solvent cleaning - SP-2: Hand-tool cleaning (St 2) - SP-3: Power tool cleaning (St 3) - SP-4: Flame cleaning (FL) - SP-5: White metal blast cleaning - SP-6: Commercial blast cleaning - SP-7: Brush-off blast cleaning - SP-8: Pickling (Be, DIN 55928) - SP-9: Weathering followed by blast cleaning - SP-10: Near-white blast cleaning - SP-11: Power tool to base metal - SP-12: Water blast (NACE 5) - SP-13: Surface preperation of concrete (NACE 6) - SP-14: Industrial blast cleaning (NACE 8) - SP-15: Commerical grade power tool cleaning
National Association of Corrosion Engineers (NACE)
- NACE 1: White metal blast cleaning (Swedish Sa.3 or SP5 or WJ1) - NACE 2: Near-white metal blast cleaning (Swedish Sa.2.5 or SP10 or WJ2) - NACE 3: Commercial blast cleaning (Swedish Sa.2 or SP6 or WJ3) - NACE 4: Brush off blast cleaning (Swedish Sa.1 or SP7 or WJ4) - NACE 5: Water blast (SP12) - NACE 6: Surface preperation of concrete (SP13) - NACE 8: Industerial (SP14 or WJ3)

۱۴۷%

جدول ۲.۴. مقایسهٔ استانداردهای مختلف برای آماده‌سازی سطوح [۵]

Cleaning Grade (abrasive) NACE, SSPC	Cleaning Grade (water alone) ISO, NACE	NACE abrasive	NACE SSPC	SSPC abrasive	ISO Abrasive	Water
White metal	Bare metal	1	WJ-1	SP-5	Sa 3	
Near-White	Very Thorough	2	WJ-2	SP-10	Sa 2 ½	Wa 2 1/2
Commercial	Thorough	3	WJ-3	SP-6	Sa 2	Wa 2
Industrial	Thorough	8	WJ-3	SP-14		
Brush Off	Light	4	WJ-4	SP-7	Sa 1	Wa 1

جدول ۳.۴. توضیح و معادل‌سازی بعضی از روش‌های تمیزکاری سطوح فولادی [۶]

SSPC STANDARD	DESCRIPTION	EQUIVALENT
SP1 Solvent Cleaning	Removal of oil, grease, dirt, soil, salts and contaminants by cleaning with solvent, vapour, alkali, emulsion or steam	
SP2 Hand Tool Cleaning	Removal of loose rust, mill scale and paint by chipping, scraping, sanding and wire brushing to a specific degree	ISO **St 2**
SP3 Power Tool Cleaning	Removal of loose rust, mill scale and paint by power tool chipping, de-scaling, sanding, wire brushing, and grinding to a specified degree	ISO **St 3**
SP5 White Metal Blast Cleaning	Removal of all visible rust, mill scale, paint and foreign matter by blast cleaning with wheel or nozzle (dry or wet) using sand, grit or shot. (for very corrosive environment where high cost of cleaning is warranted)	ISO **Sa 3** BS4232 (1st grade quality)
SP6 Commercial Blast Cleaning	Blast cleaning until at least two thirds of the surface area is free of all visible residues. (for rather severe conditions of exposure)	ISO **Sa 2** BS4232 (3rd grade quality)
SP7 Brush Off Blast Cleaning	Blast cleaning of all except tightly adhering residues of mill scale, rust and coatings, exposing numerous evenly distributed flecks of underly-ing metal.	ISO **Sa 1**
SP8 Pickling	Complete removal of rust and mill scale by acid pickling, duplex pick-ling or electrolytic pickling.	
SP10 Near White Blast Clean-ing	Blast Cleaning nearly to "White Metal" cleanliness, until at least 95% of the surface area is free of all visible residues. (For high humidity, chemical atmosphere, marine or other corrosive environments)	ISO **SA2.5** BS4232 (2nd grade quality)

Note: Besides the above standards, "Chemical Treatment", such as Iron, Zinc, or Manganese Phosphate treatment, may also be applied. This method is a combination of pickling and blast cleaning.

معمولاً ماسه‌های ریز، ماسه‌های درشت و خشن‌تر، ساچمه‌های چدنی، سرباره‌های مس و دانه‌های آهن با گرید ۱۶ دارای ابعاد و اندازه‌های مختلف باعث ایجاد پروفیل‌های متفاوتی روی سطح می‌شوند. جدول ۶.۴ مشخصات و داده‌های انواع ساینده‌های سطح را نشان می‌دهد.

شکل ۲.۴. تصاویر درجهٔ تمیزکاری برحسب درجهٔ زنگ‌زدگی [۸]

جدول ۴.۴. میزان زبری سطوح برحسب روش آماده‌سازی و نوع پوشش [۹]

Coatings	Surface Profile Requirements, mils (μm)		
As required by	NACE	CSA	AWWA
Asphalt	N/A	N/A	N/A
Coal tar (plant)	1.5-3.5 (38-89)		1.5-3.5
Coat tar (field)	1.5-3.5 (38-89)		
Tape	Not specified		1-3 (25-75)
Tape (for joints)			Not specified
FBE (plant)	1.5 (38)	1.5-4.5 (40-110)	1.5-4.0 (38-102)
FBE (field)	2.5-4 (64-100)		
Liquid epoxy			Not specified
Liquid urethane			2 (50)
2-layer	1.5-4.0 (38-102)	1.5-4.5 (40-110)	1.5-4.0 (38-102)
3-layer		1.5-4.5 (40-110)	
Composite		1.5-4.5 (40-110)	
Wax	Not specified		

فشار آب که تحت عنوان جت آب برای تمیزکاری سطوح مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسته به فشار، میزان تمیزی و پاک کردن متفاوت است (جدول ۷.۴).

جدول ۵.۴. انتخاب نوع آماده‌سازی برحسب نوع پوشش [۹]

Coatings	Surface Preparation Requirements		
As required by (Standards)	NACE	CSA	AWWA
Asphalt	N/A	N/A	N/A
Coal tar (plant)	(SSPC-SP1) SSPC SP6/NACE #3 or ISO 8501-1		(SSPC-SP1) SSPC SP6/NACE #3/SSPC SP 10/NACE #2
Coat tar (field)	(SSPC-SP1) SSPC SP6/NACE #3 or ISO 8501-1		
Tape	Not specified		(SSPC-SP1) SSPC-SP 6/NACE #3
Tape (for joints)			(SSPC-SP1) SSPC-SP 6/NACE#3
FBE (plant)	SSPC-SP 10/NACE #2 or ISO 8501-1	SSPC-SP 10/NACE #2	(SSPC-SP1) SSPC-SP 10/NACE #2
FBE (field)	(SSPC-SP1) SSPC-SP 10/NACE #2		
Liquid epoxy	*Work in progress (NACE Committee TG 247)*		(SSPC-SP1) SSPC-SP 10/NACE #2
Liquid urethane	*Work in progress (NACE Committee TG 281)*		(SSPC-SP1) SSPC-SP 10/NACE #2
2-layer	SSPC-SP 6/NACE#3	SSPC-SP 6/NACE#3	(SSPC-SP1) SSPC-SP 6/NACE#3
3-layer		SSPC-SP 10/NACE #2	
Composite		SSPC-SP 10/NACE #2	
Wax	(SSPC-SP 1) SSPC-SP 2		

جدول ۶.۴. تأثیر اندازه و ابعاد مواد ساینده روی پروفیل به‌جامانده از روش بلاستینگ [۱۰]

Type of Abrasive	Mesh Size Max.	Height of Profile
Very fine sand	80	37 microns (1.5 mils)
Coarse sand	12	70 microns (2.8 mils)
Iron shot	14	90 microns (3.6 mils)
Copper slag	1.5-2.0 mm grain size	75-100 microns (3-4 mils)
Iron grit No. G16	12	200 microns (8.0 mils)

جدول ۷.۴. تأثیر فشار آب بر روی تمیزی سطح از آلودگی [۱۰]

Pressure (bar)	Removal of;	Typical speed (m^2/hr)
Up to 500	Fouling, salt and dirt.	300
> 1000	Also loose rust and paint. Firm adherent paint remains.	150 (machine)
> 2000	All coatings. Restores original roughness profile.	5 (handgun) 100 (machine)
> 4000	All coatings. Creates roughness profile.	

در روش تمیزکاری شیمیایی، ابتدا چربی‌زدایی و بعد اسیدشویی انجام می‌شود. بعد از اسیدشویی خنثی‌سازی و در نهایت شست‌وشو با آب انجام می‌شود. برای افزایش کارایی اسیدشویی زدودن مواد چربی، روغن، گریس و موادی که در حین ساخت و آزمون‌های غیرمخرب بر روی سازه باقی مانده‌اند، توسط قلیاشویی ضروری است. مواد قلیاشویی به‌صورت تکی و یا ترکیبی از هیدروکسید سدیم، کربنات سدیم، متاسیلیکات سدیم، تری‌فسفات سدیم، پیروفسفات سدیم، برات سدیم و ترکیبات پیچیده‌ای مانند اتیلن دی‌آمین تترا استیک اسید، گلوکونات‌ها، هپتونات‌ها، پلی‌فسفات‌ها، آمین‌ها و مواد فعال سطحی هستند. از میان چربی‌گیر از نوع حلال آلی، می‌توان به استون، تلوئن، پرکلرواتیلن، تری‌کلرواتیلن، دی، تری و تترا سیلوکسان و بنزن اشاره کرد. هرچه نقطهٔ اشتعال کمتر باشد، قدرت انحلال می‌تواند بیشتر باشد. در عملیات اسیدشویی، با واکنش شیمیایی بین اسید و زنگ، تمیزکاری سطح صورت می‌گیرد. بسته به شرایط سازه، شست‌وشو با اسیدهای معدنی و در مواردی هم آلی ازجمله اسید سولفوریک، اسید کلریدریک، اسید فسفریک یا اسید استیک همراه با تزریق بازدارنده خوردگی، انجام می‌شود. وقتی که غلظت یون آهن شروع به افزایش می‌کند، عملیات اسیدشویی باید متوقف شود. بعد از شست‌وشو، باید عملیات خنثی‌سازی و شست‌وشو انجام شود تا از خوردگی در مناطقی که اسید جمع شده، جلوگیری شود.

روش شعله برای تمیزکاری سطوح ضخیم فولادی بیشتر از ۵ میلی‌متر، شامل آلودگی‌های رطوبت و خیسی، رنگ کهنه و در بعضی موارد زنگ و لایه‌های اکسیدی، می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. شعلهٔ گاز یا احتراق استیلن با اکسیژن در این موارد استفاده می‌شود. تمیزکاری سطح با مکانیسم سوختن پوشش کهنه و ایجاد اختلاف ضریب حرارتی زمینه با پوسته‌های اکسیدی اتفاق می‌افتد. اگر سمت دیگر سازه دارای پوشش باشد، دمای سطح نباید از $۱۰۰^{\circ}C$ فراتر برود. در موارد معمول حداکثر دمای سطح $۲۰۰^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. میزان تمیزکاری شعله به روش پاششی نمی‌رسد. به‌همین دلیل طول عمر پوشش اعمالی روی سطوح تمیزکاری‌شده با روش شعله، کمتر است. این روش برای آماده‌سازی سطوح نو، سطوح مخازن، برای سطوحی که بخواهند با بیتومن یا کولتار ضخیم، اتیل‌سیلیکات روی، اپوکسی و پلی‌اورتان از نوع دو جزئی پوشش داده شوند، به کار نمی‌رود. برای سوزاندن پوشش‌های حاوی مواد سمی مثل سرب و کروم و... باید رعایت نکات تنفسی را لحاظ نمود. بلافاصله بعد از آماده‌سازی، یک لایهٔ آستری در زمانی که دمای سطح حداکثر $۴۰^{\circ}C$ است باید اعمال شود. پس از به‌کارگیری

شعله، مواد زائد و باقی‌مانده از روی سطح فولاد باید توسط هوای فشرده یا مکش هوا تمیز شوند. رعایت استانداردهای ایمنی و محیط زیستی، از نقاط قابل توجه در روش‌های آماده‌سازی سطح است. اینکه برای چه پوششی چه روش آماده‌سازی به کار برده شود، به عوامل مختلفی ازجمله ضخامت سازه، کیفیت پوشش قدیمی، نوع پوشش و... بستگی دارد. به‌طورکلی سازه‌های فولادی ضخیم جهت اعمال پوشش‌های قیری و اپوکسی، توسط روش‌های مکانیکی تمیزکاری می‌شوند. جهت اعمال پوشش گالوانیزه بر روی فولاد از روش شست‌وشوی شیمیایی استفاده می‌شود. در بعضی موارد برای حذف پوسته‌های اکسیدی، رسوبات کربناتی چسبنده و رنگ‌های قدیمی و کهنه از روش شعله استفاده می‌شود. جهت اعمال پوشش بر فلزاتی مثل مس، آلومینیم، از آستری و یا زیر پوشش کروماته یا فسفاته استفاده می‌شود. روش‌های دیگر مثل لامپ گزنون، لیزر و امواج آلتراسونیک برای سطوح کوچک کاربرد دارند. انتخاب روش آماده‌سازی سطح بستگی به عوامل زیر دارد:

- میزان رنگ و پوستهٔ اکسید کارخانه‌ای موجود بر روی سطح فلز،
- میزان و نوع آلودگی سطح شامل نمک‌ها، گردوخاک، روغن و چربی‌ها، رنگ‌ها و پوشش‌های قبلی،
- زبری سطح مورد نیاز،
- تجهیزات و تجربیات،
- ملاحظات ایمنی،
- ملاحظات اقتصادی.

۲.۴. پوشش‌های اعمالی بر روی خطوط لولهٔ مدفون در خاک

بعد از انتخاب جنس سازه و ملاحظات مربوط به طراحی، با در نظر گرفتن شرایط محیطی، پوشش به‌عنوان یکی از اولین گزینه‌های کنترل خوردگی سازه به شمار می‌رود. به‌طورکلی در صنعت، چهار نوع و یا دسته‌بندی برای پوشش وجود دارد.

- پوشش‌های معدنی مثل لعاب، شیشه، سرامیک و بتن،
- پوشش‌های فلزی مثل آبکاری الکتریکی، روکش کردن، غوطه‌وری گرم،
- پوشش‌های تبدیلی مثل آندایزینگ، پوشش فسفاته، کروماته و مولیبدات،
- پوشش‌های آلی مثل قیر، رنگ، لاستیک و پلاستیک.

انتخاب نوع پوشش براساس پارامترهای مقاومت الکتریکی، دوام در شرایط محیطی مورد نظر و ملاحظات اقتصادی، صورت می‌گیرد. شکل ۳.۴ معیارهای انتخاب پوشش مناسب برای خطوط لوله را نشان می‌دهد.

شکل ۳.۴. معیارهای انتخاب پوشش مناسب برای خطوط لوله [۱۱]

پوشش‌ها دارای طیف گسترده‌ای از خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی هستند که بر عملکرد و عمر مفید پوشش تأثیر می‌گذارد. درک کامل از خواص پوشش قبل از استفاده ضروری است. ویژگی‌های پوشش مطلوب خط لوله عبارت‌اند از:

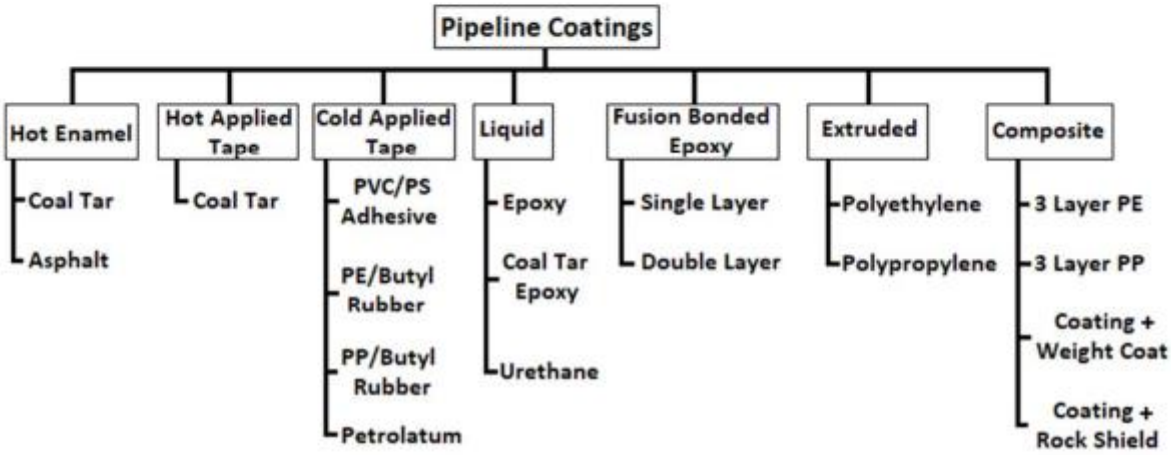
- عایق الکتریکی مؤثر،
- مانع رطوبت مؤثر،
- چسبندگی خوب به زمینهٔ فولادی،
- قابل اجرا بدون تأثیر منفی بر ایجاد عیوب و کاهش خواص لوله،
- توانایی مقاومت در شرایط بدون استفاده،

- توانایی مقاومت در برابر آسیب و فرسودگی در حین جابجایی، انبارداری و نصب،
- توانایی حفظ مقاومت در طول زمان بهره‌برداری مورد نظر،
- مقاومت در برابر جدایش و کندگی،
- مقاومت در برابر تخریب شیمیایی،
- سهولت تعمیر،
- حفظ مشخصات فیزیکی،
- غیرسمی برای محیط زیست،
- سازگاری و عدم تخریب با اعمال حفاظت کاتدی،
- مقاومت در برابر تنش خاک.

تصور بر این است که اعمال پوشش به‌دلیل عایق کردن سطح سازهٔ فلزی و قطع اتصال الکتریکی آن با محیط، می‌تواند به‌طور کامل سازهٔ فلزی را تحت حفاظت قرار دهد. ولی ایجاد چنین پوششی به‌لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نبوده و عملاً هم نگهداری خاصیت عایقی کامل در طی زمان بهره‌برداری، امکان‌پذیر نیست. با اعمال پوشش‌های مناسب با ملاحظات فنی- اقتصادی و اجرای سیستم حفاظت کاتدی، به‌طور قابل توجهی خوردگی سازه‌ها را می‌توان تحت کنترل درآورد. با وجود میزان حفاظت‌کنندگی پوشش‌ها تا ۹۹ درصد، باز هم اعمال سیستم حفاظت کاتدی، خصوصاً در محیط‌های خورنده، توجیه‌پذیر خواهد بود. مقاومت الکتریکی به‌عنوان اصلی‌ترین پارامتر خواص پوشش در بحث حفاظت کاتدی به شمار می‌رود. مقاومت پوشش به‌طور میانگین برحسب اهم بر متر یا اهم بر متر مربع در نظر گرفته می‌شود. ممکن است قسمتی از سطح سازه دارای پوشش مناسب و نقاط دیگر دارای تخلخل و یا ضخامت کمتری از پوشش باشد. پوشش اصلی با جنس‌های مختلف با روش‌های متفاوتی برای جلوگیری از خوردگی و کاهش جریان برای حفاظت کاتدی بر روی لوله‌های خطوط انتقال آب، گاز، نفت و مواد شیمیایی مدفون در خاک استفاده می‌شود که کلیات آن در شکل ۴.۴ به‌ترتیب زیر ارائه شده است. خواننده با دقت و جست‌وجو می‌تواند مشخصات و تصاویر را پیدا و دربارهٔ آنها تحقیق کند.

- انامل (لعاب) گرم شامل قیر پایهٔ زغال‌سنگی (Coal tar Enamel-CTE) و آسفالت با نوارپیچی،
- نوارپیچی گرم کولتار،
- نوارپیچی سرد شامل نوار پلی‌ونیل کلراید/پلی‌استر، پلی‌اتیلن/لاستیک بوتیل، پلی‌پروپیلن/ لاستیک بوتیل، پلی‌پروپیلن/لاستیک بوتیل و ترکیب نفت خام،

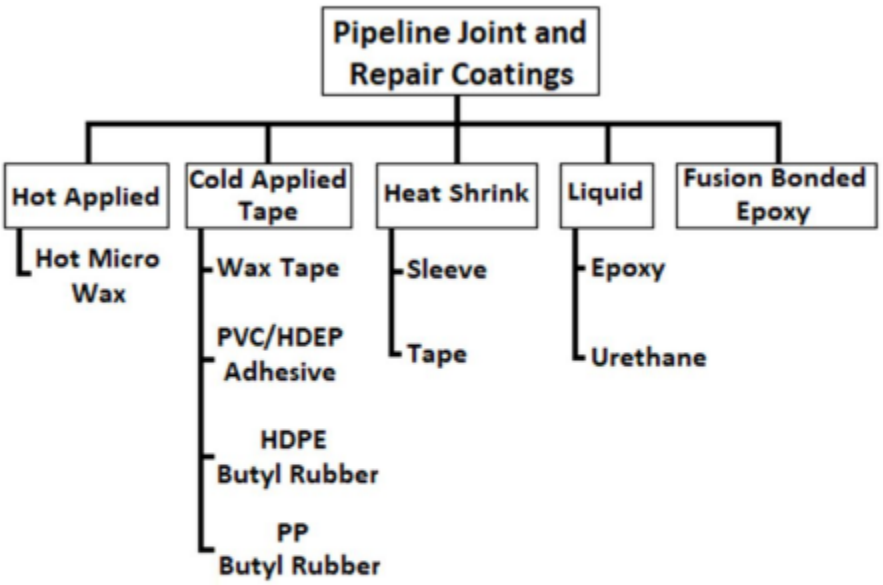
- انامل قیر پایه نفتی (Bitumen Enamel) همراه با نوارپیچی،
- پوشش مایع اپوکسی کولتار اپوکسی و اورتان،
- پوشش اپوکسی اتصال ذوبی (Fusion Bond Epoxy- FBE) یک‌لایه و دولایه،
- پوشش اکسترودی شامل پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن،
- پوشش کامپوزیتی شامل سه لایهٔ اولفینی (پروپیلن یا پلی‌اتیلن)، پوشش بتنی و پایهٔ سنگی وزین (سنگین) روی پوشش‌های پلیمری و پلی‌اورتان،



شکل ۴.۴. دسته‌بندی انواع پوشش اصلی برای خطوط لوله [۱۲]

شکل ۵.۴ دسته‌بندی پوشش‌های تعمیری برای اعمال در نواحی جوشکاری، اتصالات و بازسازی نواحی خوردگی را نشان می‌دهد. از مهم‌ترین پوشش‌های تعمیری می‌توان به پوشش انقباض حرارتی، نواری و پوشش مایع کامپوزیتی (پلی اورتان، اپوکسی یا پلی‌استر با الیاف شیشه یا کربن) اشاره کرد.

اطلاعات کلی دربارهٔ شرایط کاربری مزایا و معایب هرکدام از پوشش‌ها در جدول‌های ۸.۴ و ۹.۴ ارائه شده است. پیمانکاران براساس شرایط محیطی و ملاحظات اقتصادی اقدام به انتخاب نوع پوشش می‌کنند. برای کنترل کیفی هریک از پوشش‌های اعمالی استانداردهایی تعریف شده است که به‌صورت کارگاهی برای ارزیابی مورد توجه قرار می‌گیرد. جدول ۱۰.۴ و ۱۱.۴ استانداردهای رایج و استانداردهای کشورهای مختلف برای کنترل کیفیت پوشش‌های اعمالی را نشان می‌دهد. معمولاً نمایندهٔ کارفرما برای بازرسی و کنترل کیفیت پوشش در محل کارگاه حضور دارد.



شکل ۵.۴. دسته‌بندی پوشش اصلی برای خطوط لوله [۱۲]

جدول ۸.۴. ارزیابی‌های کلی آزمایشگاهی و عملکرد میدانی پوشش‌های خط لوله [۹]

Coating	Physical and chemical stability	Resistance to soil stress	Resistance to impact	Adhesion	Resistance to cathodic disbonding
Polyethylene tape	Good	Poor	Good	Poor	Good
Asphalt enamel	Fair	Poor	Good	No lab. data	Good
Asphalt mastic	Poor	Poor	Good	No lab. data	Good
Epoxy	Good	Good	Good	Good	Good
Coal-tar enamel	Good	Fair	Good	No lab. data	Fair
Urethane	Good	Good	Good	Good	Good

براساس تاریخچهٔ کاربری پوشش‌های مذکور، عمده‌ترین آنها را می‌توان در سه نسل اول، دوم و سوم معرفی کرد (شکل ۶.۴). بسته به جنس، کیفیت اجرا و شرایط محیطی، دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت کاتدی پوشش‌ها مختلف است. شکل ۷.۴ بررسی میزان و تغییر جریان برای حفاظت کاتدی یک سازه به‌دلیل افزایش تخلخل در محیط خاک را برای انواع پوشش‌ها در طی زمان بهره‌برداری ۲۵-۱۵ سال، نشان می‌دهد. معمولاً با گذشت زمان میزان تخلخل افزایش و درصد عایقی پوشش کاهش می‌یابد. درنتیجه دانسیتهٔ جریان جهت حفاظت نیز افزایش پیدا می‌کند. هنگام انتخاب پوشش لوله، باید عوامل زیر را در نظر گرفت:

نوع محیط، دسترسی به خط لوله، دمای عملیاتی خط لوله، دمای محیط در حین استفاده، انبارداری، حمل‌ونقل، ساخت و نصب، موقعیت جغرافیایی و فیزیکی، نوع پوشش روی خط لولهٔ موجود، حمل‌ونقل و انبار، روش‌های نصب، هزینه‌ها، الزامات آماده‌سازی سطح لوله.

جدول ۹.۴. مزایا و معایب و شرایط عملکرد دمایی پوشش‌های خط لوله [۱۳]

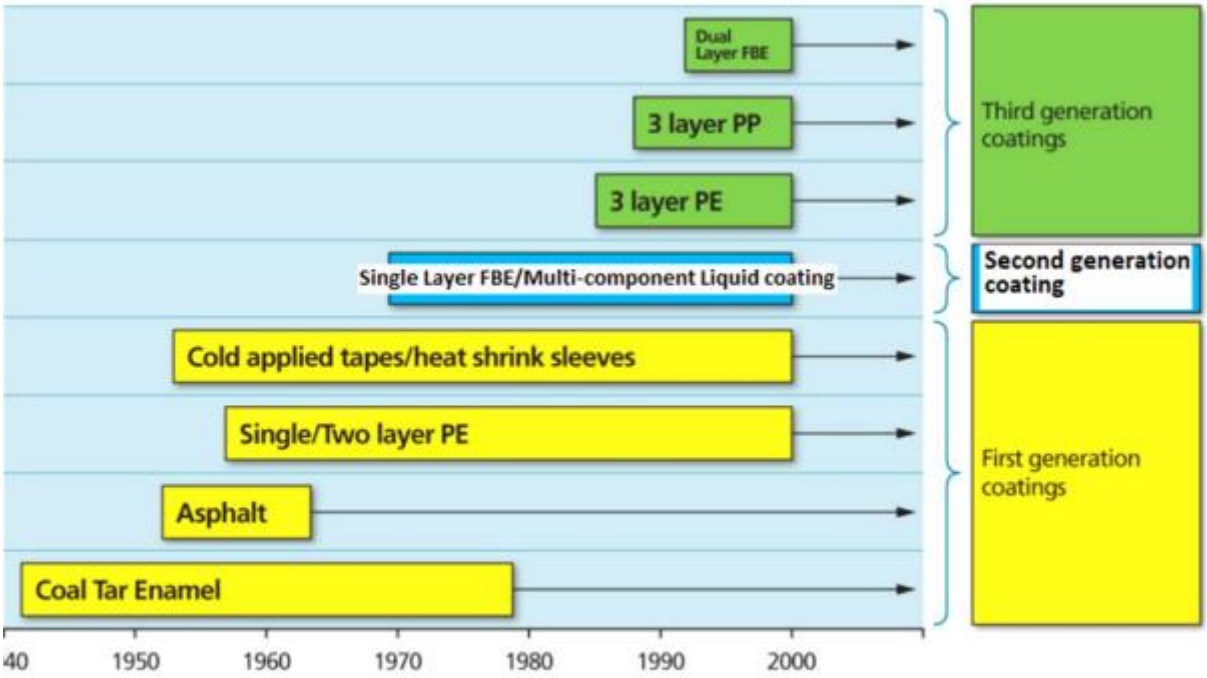
Coating	temperature	Benefit	Disadvantage
FBE	90°C (194°F)	• FBE is more flexible than other coatings, meaning pipes can be bent *after* coating in the field. • Excellent adhesion to steel. • Is able to pass cathodic protection (CP) current eliminating CP shielding. • Cures instantly.	• Not as mechanically robust as 3LPE. • Pipe must be heated.
2LPE	60°C (140°F)	• Cheap effective coating.	• Low temperature resistance.
3LPE	90°C (194°F)	• Damage tolerant, water impermeable coating. • Respectable temperature resistance.	• Susceptible to cathodic shielding.
3LPP	140°C (284°F)		
Liquid epoxy	~150°C (302°F)	• Tends to be a wider range of chemistries available to suit different roles (e.g.; epoxy, polyurethane, etc.). • Usual for field repairs.	• Pipe generally bent before coating. • Cure is sensitive to temperature and humidity. • Very long cure times.
Viscoelastic	80°C (176°F)	• Excellent corrosion resistance. • Excellent cathodic disbondment resistance. • Self-healing properties. • High tolerance to underprepared surfaces.	• Maintenance problematic. • Limited temperature.

جدول ۱۰.۴. استانداردهای رایج برای کنترل کیفیت پوشش‌های اعمالی [۹]

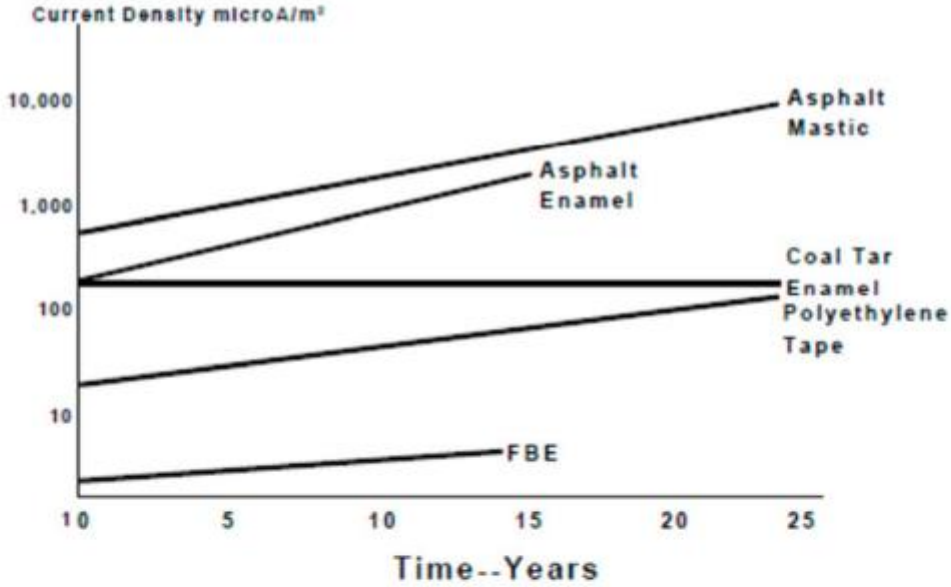
Cold-tar	
NACE RP0399	Plant-Applied External Coal Tar Enamel Pipe Coating Systems: Application, Performance, and Quality Control
ANSI/AWWA C203	Coal-Tar Protective Coatings and Linings for Steel Water Pipelines – Enamel and Tape- Hot Applied
NACE RP0602	Field-Applied Coal Tar Enamel Pipe Coating Systems: Applications, Performance, and Quality Control
Tape	
ANSI/AWWA C214	Tape Coating Systems for the Exterior of Steel Water Pipelines
ANSI/AWWA C209	Cold-Applied Tape Coatings for he Exterior of Special Sections, Connections, and Fittings for Steel Water Pipelines
NACE MR0274	Material Requirements for Polyolefin Cold-Applied Tapes for Underground or Submerged Pipeline Coatings
FBE	
NACE RP0394	Application, Performance, and Quality Control of Plant-Applied, Fusion-Bonded Epoxy External Pipe Coating
CSA Z245-20	External Fusion Bond Epoxy Coating for Steel Pipe
ANSI/AWWA C213	Fusion-Bonded Epoxy Coating for the Interior and Exterior of Steel Water Pipelines
NACE RP0402	Field-Applied Fusion-Bonded Epoxy (FBE) Pipe Coating Systems for Girth Weld Joints: Application, Performance, and Quality Control
Liquid Epoxy	
ANSI/AWWA C210	Liquid-Epoxy Coating Systems for the Interior and Exterior of Steel Water Pipelines
Liquid Urethane	
ANSI/AWWA C222	Polyurethane coatings for the Interior and Exterior of Steel Water Pipe Fittings
2-layer, 3-layer, and composite	
DIN 30670	Polyethylene-Coatings for Steel Pipes and Fittings Requirements and Testing
NACE RP0185	Extruded Polyolefin Resin Coating Systems with Soft Adhesives for Underground or Submerged Pipe
CSA Z245-20	External Polyethylene Coating for Pipe
ANSI/AWWA C215	Extruded Polyolefin Coatings for the Exterior of Steel Water Pipelines
Wax	
NACE RP0375	Wax Coating Systems for Underground Piping Systems

جدول ۱۱.۴. استانداردهای کشورهای مختلف برای کنترل کیفیت پوشش‌های خطوط لوله [۱۴]

Origin	Standard	Title/Scope
German	DIN 30670	Polyethylene coating for steel pipes and fittings
	DIN 30678	Polypropylene coating for steel pipes and fittings
ISO	ISO 21809-1:2011	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 1: Polyolefin coatings (3-layer PE and 3-layer PP)
	ISO/DIS 21809-2 (under development)	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 2: Single layer fusion-bonded epoxy coatings
	ISO 21809-3:2008	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 3: Field joint coatings
	ISO 21809-4:2009	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 4: Polyethylene coatings (2-layer PE)
	ISO 21809-5:2010	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 5: External concrete coatings
	ISO/NP 21809-6 (under development)	Petroleum and natural gas industries—external coatings for buried or submerged pipelines used in pipeline transportation systems
		Part 6: Multilayer fusion- bonded epoxy coatings (FBE)
Canadian	CSA Z245.20-06/CSA Z245.21-06	External fusion bond epoxy coating for steel pipe/external polyethylene coating for pipe
	CSA Z245.20-98	External fusion bond epoxy coating for steel pipe
French	AFNOR	
Recommended practice	DNV-RP-F102	Pipeline field joint coating and field repair of linepipe coating



شکل ۶.۴. تاریخچه و کاربرد انواع پوشش برای خطوط لوله [۱۱]



شکل ۷.۴. تغییرات دانسیتهٔ جریان جهت حفاظت در طول زمان [۱۵]

۱.۲.۴. پوشش انامل کولتار

کولتار، قیر پایهٔ زغال‌سنگی است. coal به‌معنی زغال‌سنگ است. پوشش قیر زغال‌سنگی برای سازه‌ها و خطوط لوله روی زمین مناسب نیستند و فقط برای سازه‌ها و خطوط لولهٔ زیرزمینی و بستر دریا به کار می‌روند. پوشش انامل کولتار از اولین پوشش اعمالی بر روی خطوط لوله است که قدمتی حدود ۱۰۰ ساله دارد. این پوشش طبق استاندارد AWWA C203 ساخته می‌شود.

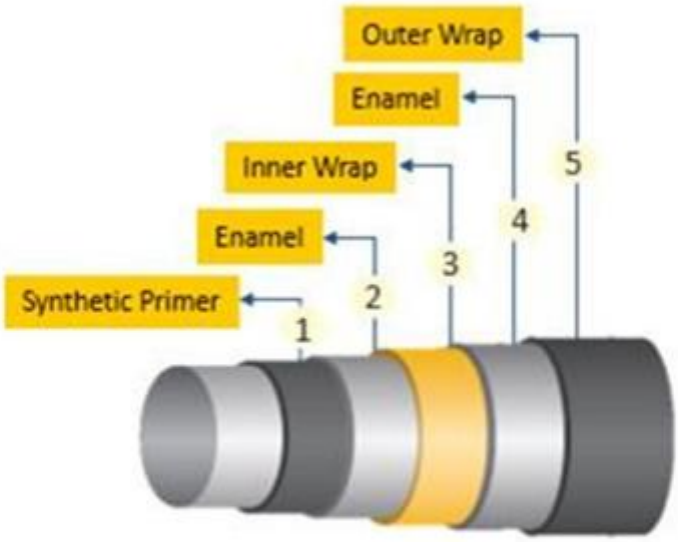
این پوشش حاوی کولتار، پشم شیشه، قیر به‌عنوان حالت‌دهندهٔ پلاستیکی و مواد ترکنندهٔ معدنی است. مشخصات انامل کولتار در سه گرید در جدول ۱۲.۴ آمده است. استاندارد شرکت ملی نفت ایران (Iranian Petroleom Standards IPS-) برای این پوشش استاندارد با کد IPS-M-TP-290 را معرفی کرده است. این نوع از پوشش‌ها به روش گرم بر روی سازه اعمال می‌شوند. ممکن است از نوارهای حفاظت‌کننده نیز استفاده شود. براساس شرایط کاری ممکن است ضخامت هر سری پوشش به یک سانتی‌متر هم برسد. با استفاده از پرایمرهای اپوکسی، دمای بهره‌برداری پوشش تا ۱۱۰°C قابل افزایش است.

جدول ۱۲.۴. مشخصات سه نمونه انامل کولتار برای پوشش‌دهی [۱۶]

Characteristic	Grade 105/15	Grade 105/8	Grade 120/5	Method of test [b]
Filler content by ignition, % by mass	25 to 35	25 to 35	25 to 35	Annex I
Density at 25 °C, g/cm^3	1.4 to 1.6	1.4 to 1.6	1.4 to 1.6	Annex J
Softening point (ring and ball), °C	105 to 116	105 to 116	120 to 130[a]	BS EN 1427
Penetration (total moving mass), 10^{-1} mm 25 °C, 100 g 45 °C, 50 g	 10 to 20 15 to 55	 5 to 12 8 to 30	 1 to 9 3 to 16	Annex K
Flow time, s 230 °C 240 °C	9 to 16	9 to 16	9 to 24	Annex L

[a] The softening point range for this grade may be exceeded by agreement between the manufacturer and the purchaser.
[b] According standard BS 4164

انامل کولتار در بین پوشش‌های رایج سابقهٔ خوبی دارد و با دیگر پوشش قابل رقابت و مقایسه است. پیشرفت‌های فنی، این سیستم را قادر می‌سازد تا با هزینه‌های بسیار پایین‌تر از پوشش‌های رقیب، با سرعت و کارآمدی بالا اعمال شود. با انتخاب گریدهای صحیح، برای دمای در حین کار بین ۳۰°C- تا ۹۵°C+ مناسب است و تا دمای ۱۱۵°C به‌عنوان زیر پوشش وزنی بتن، برای خطوط لوله در زیر دریا مؤثر است. پوشش coal tar enamel CTE به‌ترتیب از پنج لایهٔ پرایمر، انامل قطران زغال‌سنگ، پوشش داخلی الیاف شیشه، انامل لایهٔ دوم و پوشش بیرونی الیاف شیشه تشکیل شده است (شکل ۸.۴). بسته به شرایط خاک ممکن است تعداد لایه‌های پوشش تغییر کند (جدول ۱۳.۴).



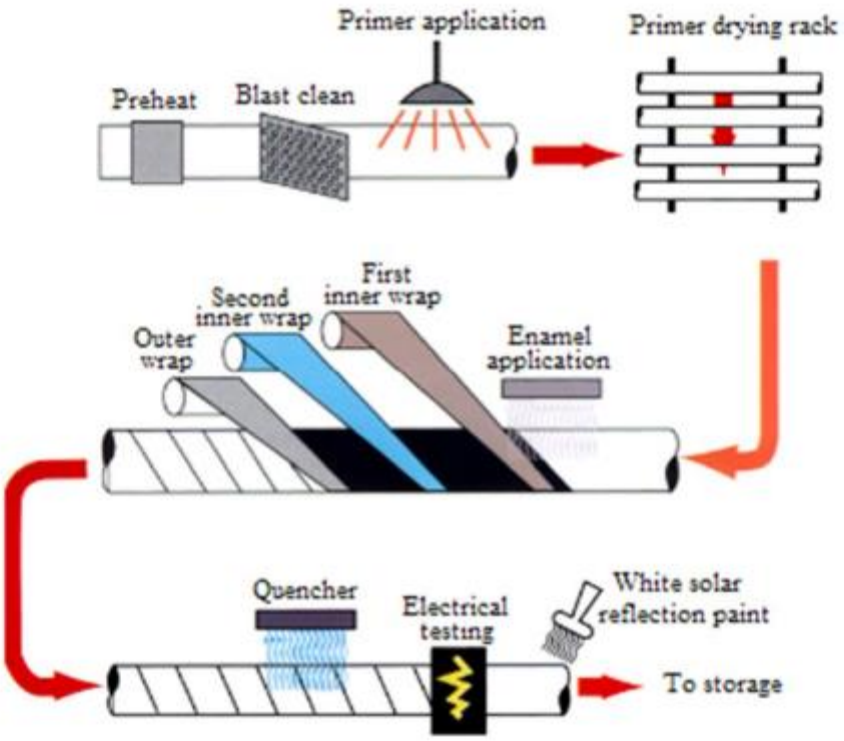
شکل ۸.۴. تصویر لایه‌های مختلف پوشش انامل کولتار بر روی خط لوله [۱۷]

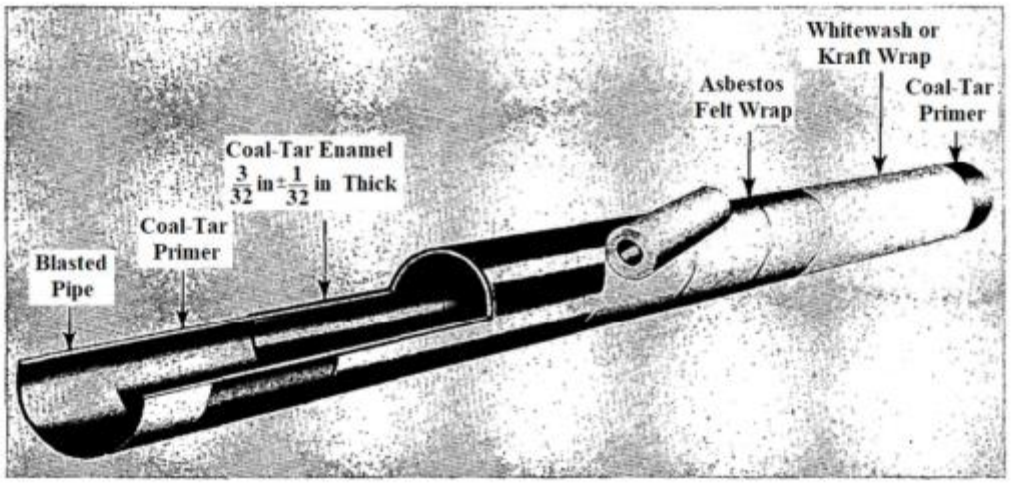
جدول ۱۳.۴. شرایط مختلف پوشش برای خاک‌های خورنده [۱۸]

Soil Resistivity Ω-cm	*Corrosivity*	*Coating System*
Below 1 000	Extremely corrosive	3 coats and 3 wraps (7.0 mm, *Min*)
From 1 000 - 5 000	Corrosive	2 coats and 2 wraps (4.0 mm, *Min*)
Above 5 000	Non-corrosive	1 coat and 1 wrap (3.0 mm, *Min*)

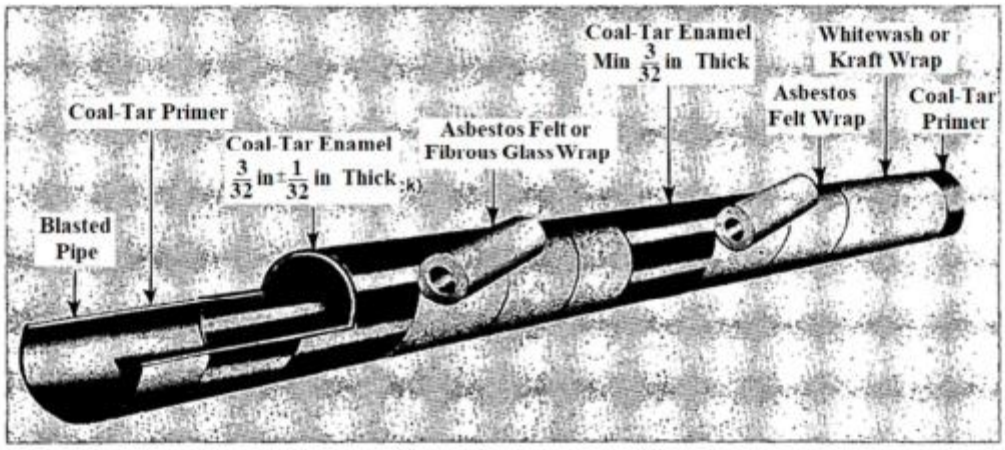
هنگام انتخاب گریدهای انامل و پوشش بیرونی، توجه به الزامات عملکردی بسیار مهم است. کاربران هنگام انتخاب گرید مناسب باید دمای سرویس، شرایط زمین و تغییرات فصلی را در نظر بگیرند. معمولاً پرایمر از نوع مصنوعی پایهٔ لاستیک کلرینه یا پرایمرهای اپوکسی انتخاب می‌شوند. پرایمرها را می‌توان با اسپری، قلم مو یا غلتکی اعمال کرد و ظرف ۵ تا ۱۵ دقیقه خشک کرد. پرایمر اپوکسی یک مادهٔ دو جزئی است که پس از مخلوط شدن رزین و هاردنر روی لولهٔ پیش‌گرم (۲۵-۴۶°C) اسپری می‌شود. درحالی‌که پرایمر هنوز چسبنده است، پوشش انامل اعمال می‌شود. گرمای انامل، واکنش شیمیایی را برای تشکیل پیوند با اپوکسی، کامل می‌کند. هر دو پرایمر با تمام درجات مختلف انامل سازگار هستند. روکش‌های داخلی یا رپینگ، پتوهای با فیبر شیشه‌ای آغشته به رزین با خاصیت ارتجاعی محدود هستند. این تقویت‌کننده‌ها باعث استحکام مکانیکی انامل که مواد ترموپلاستیک هستند، می‌شود. آنها

ضمن اینکه پوشش را تقویت می‌کنند از حرکت، شره کردن و چروکیدگی انامل در اثر افزایش دما جلوگیری می‌کنند و مقاومت در برابر ضربه را نیز افزایش می‌دهند. برای ضخامت‌های پوشش کمتر از ۴ میلی‌متر، یک لایه پوشش داخلی کافی است، اما برای ضخامت‌های ۴ میلی‌متر به بالا، دو لایه توصیه می‌شود. روکش‌های بیرونی نیز از الیاف شیشه‌ای آغشته به CTE هستند. شکل ۹.۴ شماتیک مراحل اجرای پوشش را نشان می‌دهد. در پوشش قیر اصلاح‌شدهٔ پلیمری، نوار داخلی حذف می‌شود.





شکل ۹.۴. تصویر عملیات پوشش‌دهی و مشخصات پوشش انامل تک‌لایه و دولایه [۲۰-۱۹]



ادامهٔ شکل ۹.۴

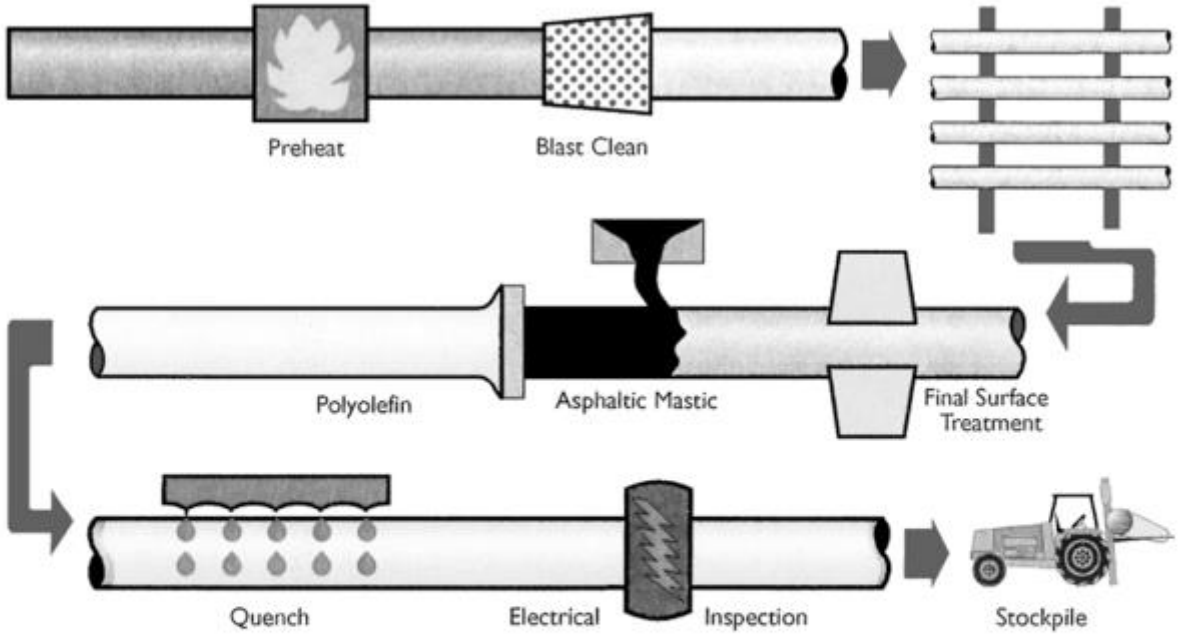
لعاب‌های قطران مقاومت بالایی در برابر رطوبت داشته و چسبندگی خوبی نیز به فولاد دارند. بنابراین برای سازه‌های غوطه‌ور در آب (خصوصاً آب آلوده) یا مدفون در خاک، مناسب هستند. لعاب‌های قطران توسط هیدروکربن‌های نفتی کمتر دچار نرم‌شدگی می‌شوند. قرار داشتن طولانی در معرض هوا و نور خورشید، باعث گچی شدن سطح این پوشش در اثر اکسیداسیون و از دست دادن اجزا نرم‌کننده می‌شود. بنابراین لعاب‌های قطران و قیر هرگز نباید برای چنین شرایطی به کار گرفته شوند، مگر اینکه آن‌ها را با مواد آسفالتی به شکل محلول یا فرم امولسیون پوشش نهایی بدهند. همچنین این پوشش در شرایط بسیار گرم نباید به کار رود. پوشش‌ها ممکن است توسط الیاف شیشه‌ای یا پنبهٔ نسوز نیز تقویت شوند. استفاده از الیاف گیاهی مانند پنبه به‌دلیل حملات میکروبیولوژیکی، مناسب نیستند.

۲.۲.۴. انامل بِتیومِن (پوشش قیری یا آسفالتی)

بتیومن به قیر پایهٔ نفتی یا قطران که از برج تقطیر در فرایند پالایش نفت به دست می‌آید، گفته می‌شود. آسفالت مخلوطی از مواد معدنی (مواد شن‌مانند) و قیر به‌عنوان بایندر است. پوشش به‌کاررفته برای لوله‌ها شامل آسفالت به‌همراه دانه‌بندی مشخص آهک خردشده و فایبرگلاس است. پوشش مذکور به روش گرم اعمال شده و ضخامت آن ۱/۲ تا ۱/۶ سانتی‌متر است. جهت بالا بردن مقاومت الکتریکی و مکانیکی پوشش ممکن است از نوارهای حفاظت‌کننده نیز استفاده شود. شکل ۱۰.۴ چگونگی اعمال پوشش آسفالتی و روکش پلی‌الفین به روش اکسترود و نوارپیچ را نشان می‌دهد. در مورد پوشش پایهٔ نفتی، اعمال پوشش به‌این‌ترتیب است که ابتدا یک لایه قیر بر روی لوله ریخته شود، سپس یک لایه نوار

فایبرگلاس، دوباره یک لایه قیر و سپس نوار رویی به دور لوله پیچیده می‌شود. در مرحلهٔ پیچیدن نوار زیری باید زاویه و نیروی نگه‌دارندهٔ رول به‌گونه‌ای باشد که نوار دارای چین‌وچروک نشود و از تماس نوار با سطح لوله جلوگیری شود. این نوار برای افزایش استحکام مکانیکی و افزایش عایقی پوشش به کار می‌رود و باید دقیقاً در وسط پوشش قرار بگیرد و بسته به سایز لوله، هم‌پوشانی حداقل ۱۲ میلی‌متری داشته باشد. اگر در این مرحله رطوبتی بر روی لوله باشد، بین فلز و پوشش محبوس می‌شود و رطوبت حاصله باعث جدا شدن عایق شده و در هنگام انجام آزمون هالیدی، دستگاه اخطار می‌دهد.

معایب اصلی پوشش‌های قیری، محدود بودن دمای کاربرد از ۱۰°C- تا ۴۰°C+، مقاومت کم در برابر ضربه، پایداری کم در برابر عوامل میکروبی، امکان تورم در خاک‌های مرطوب است. به همین دلیل بیشتر برای خاک خشک، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در محیط قلیایی، طول عمر پوشش‌های قیری محدود و بیش از ۱۰-۱۵ سال نخواهد بود. زمینهٔ پیشنهادی کاربرد پوشش‌های قیری، محافظت در برابر خوردگی خطوط لوله با قطرهای کوچک تا متوسط در دمای معمولی و در خاک خشک است.



شکل ۱۰.۴. تصویر چگونگی اعمال پوشش ماستیک آسفالتی به روش اکستروژن و نوارپیچ [۲۱]

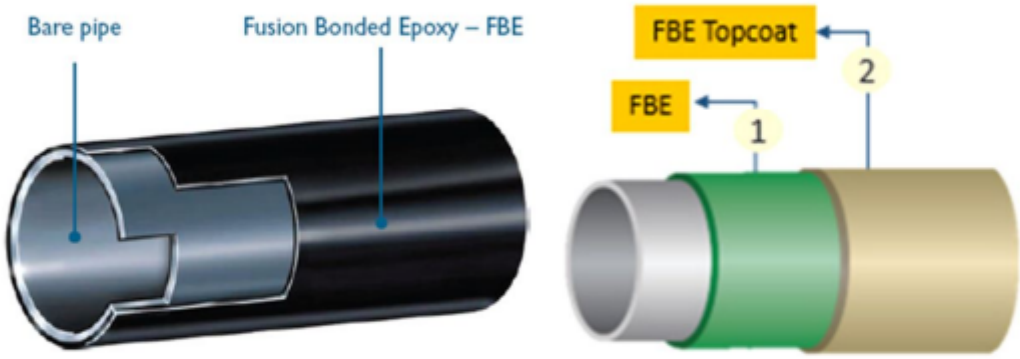
پوشش‌های قیر نفتی هزینه‌های کمی دارد و خواص حفاظتی آنها به ضخامت فیلم وابسته است. سطح وسیعی از مواد بر مبنای قیر معدنی یا اجزای قطران زغال‌سنگ به شکل

محلول‌های حرارت‌ندیده، محلول‌های گرم یا ذوب‌شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. امولسیون‌های قیر نفتی برای حفاظت از فولاد کمتر به کار می‌روند. تهیهٔ مواد خاص، بر پایهٔ پودر زغال‌سنگ پخش‌شده در قیر (TP-M-IPS 290) به‌طور گسترده‌ای برای حفاظت از لوله‌های زیرزمینی استفاده می‌شود. تمیزکاری سطح لوله با روش پاشش ماسه قبل از اعمال پوشش، بهترین عملکرد را دارد.

پوشش‌های قیر نفتی (به استانداردهای IPS-M-230، TP-285 و TP-295 مراجعه شود) مقاومت خوبی در برابر اسیدها، قلیایی‌های رقیق، محلول‌های نمک و آب دارد. اما در برابر روغن گیاهی، هیدروکربن‌ها و دیگر حلال‌ها مقاوم نیستند. ممکن است در هوای سرد، ترد و شکننده و در هوای گرم، نرم شوند. محلول‌های قیر و امولسیون‌ها به‌راحتی با برس یا اسپری اعمال می‌شوند و اغلب به‌عنوان پوشش‌های آستری به شکل گرم یا سرد در محل، قابل اجرا هستند.

۳.۲.۴. پوشش اپوکسی اتصال هم‌جوشی

پوشش اپوکسی اتصال هم‌جوشی Fusion Bonded Epoxy (FBE) در طبقه‌بندی پوشش‌های مقاوم در برابر حرارت هستند و بعد از پوشش انامل کولتار در سال ۱۹۵۹، به‌عنوان محافظ خوردگی خطوط لوله استفاده شده است. این پوشش دارای یک یا دو لایه است که آن را می‌توان بر روی لوله‌هایی با قطرهای مختلف اعمال نمود (شکل ۱۱.۴).

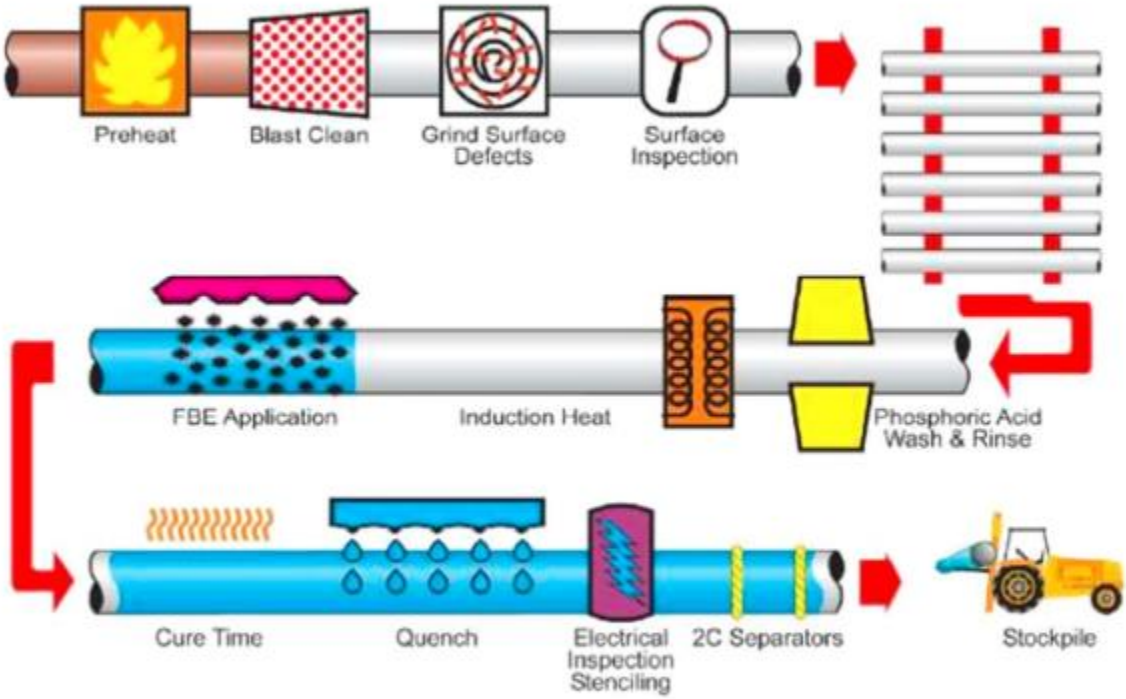


شکل ۱۱.۴. تصویر پوشش تک لایه و دو لایه FBE بر روی خط لوله [۲۳-۲۲]

پوشش پودر اپوکسی با مکانیسم فیوژن یا هم‌جوشی بر روی سطح فلزات می‌چسبد. این پوشش دارای خواص مکانیکی و فیزیکی مناسبی بوده و به‌طور وسیعی برای عملیات خطوط لوله در خشکی با دمای بالا و یا در زیر یا روی زمین به کار می‌رود. این پوشش نسبت‌به پوشش پایهٔ قیری، مقاومت

بیشتری در برابر هیدروکربن‌ها، اسیدها و مواد قلیایی دارد. ازآنجاکه این سیستم پوششی، عایق الکتریکی خوبی است، جریان بسیار کمی برای حفاظت کاتدی نیاز دارد. بالاترین مزیت استفاده از پوشش اپوکسی در مقایسه با سایر پوشش‌ها، مقاومت آن در حرارت بالا در حدود ۱۰۰°C با طول عمر مناسب است. این نوع پوشش برای خطوط لوله در خشکی با درجه حرارت عملیات ۶۵°C متداول است. لازم به ذکر است محدودهٔ دمای بهره‌برداری این پوشش از ۷۰°C- تا ۱۲۰°C است. این پوشش به‌صورت تک لایه، با ضخامت بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میکرون اجرا می‌گردد که با پایداری فیزیکی و شیمیایی، به‌عنوان یک پوشش محافظ خوردگی ایده‌آل در شرایطی اقلیمی مختلف ارائه شده است. استاندارد شرکت ملی گاز ایران (Iranian Gas Standards) برای این پوشش، IGS-M-TP-026 است. در این ارتباط استفاده از استانداردهای ASTM A972/A972M-00, NACE RP 0349, NACE RP0402, ISO 21809-2 نیز مفید است. در بعضی موارد از پوشش اپوکسی بدون حلال براساس استاندارد BS EN 10289 نیز استفاده می‌شود.

برای اعمال پوشش، لوله‌ها ابتدا تمیز و گرم می‌شوند. سپس اپوکسی پودری توسط نازل‌های الکترواستاتیکی روی سطح لوله اسپری و با ایجاد یک لایهٔ یکنواخت پس از مدت کوتاهی خشک می‌شود (شکل ۱۲.۴). رزین و اجزای سخت‌کنندهٔ موجود در پودر خشک FBE در شرایط معمولی بدون واکنش باقی می‌مانند. در دمای محدوده ۱۸۰°C تا ۲۵۰°C، پودر اپوکسی (به روش الکتروستاتیکی) روی سطح لولهٔ ذوب‌شده اسپری شده و به مایع تبدیل می‌شود. فیلم مایع خیس بر روی سطح، جریان می‌یابد و با کمک حرارت اعمالی، اتصال شیمیایی (پیوند هم‌جوشی) با سطح انجام شده و به یک پوشش جامد تبدیل می‌شود. واکنش شیمیایی اپوکسی با فولاد غیرقابل برگشت است. هنگامی‌که عمل‌آوری انجام شد، پوشش به‌هیچ‌وجه نمی‌تواند به شکل اولیهٔ خود بازگردد. اعمال حرارت بیشتر باعث ذوب شدن پوشش نمی‌شود و به‌همین دلیل به‌عنوان پوشش گرماسخت شناخته می‌شود. ضخامت معمولی برای این سیستم از ۳۰۰ تا ۵۰۰ میکرون متغیر است. این پوشش برای خطوط لوله با دمای عملیاتی تا ۱۰۰°C استفاده می‌شود. برای شرایط دمایی بیشتر و در مواردی که مقاومت مکانیکی بیشتر مورد نیاز است، باید از پوشش دو لایه استفاده شود. لایهٔ اول محافظ در برابر خوردگی است. اپوکسی لایهٔ اول پیوند نسبی با سطح فلزی دارد. لایهٔ دوم نیز از جنس اپوکسی مقاوم در برابر سایش است. برای بررسی کیفیت پوشش از استاندارد ISO 21809-6 استفاده می‌شود.



شکل ۱۲.۴. تصویری از روش پوشش‌دهی اپوکسی [۲۴]

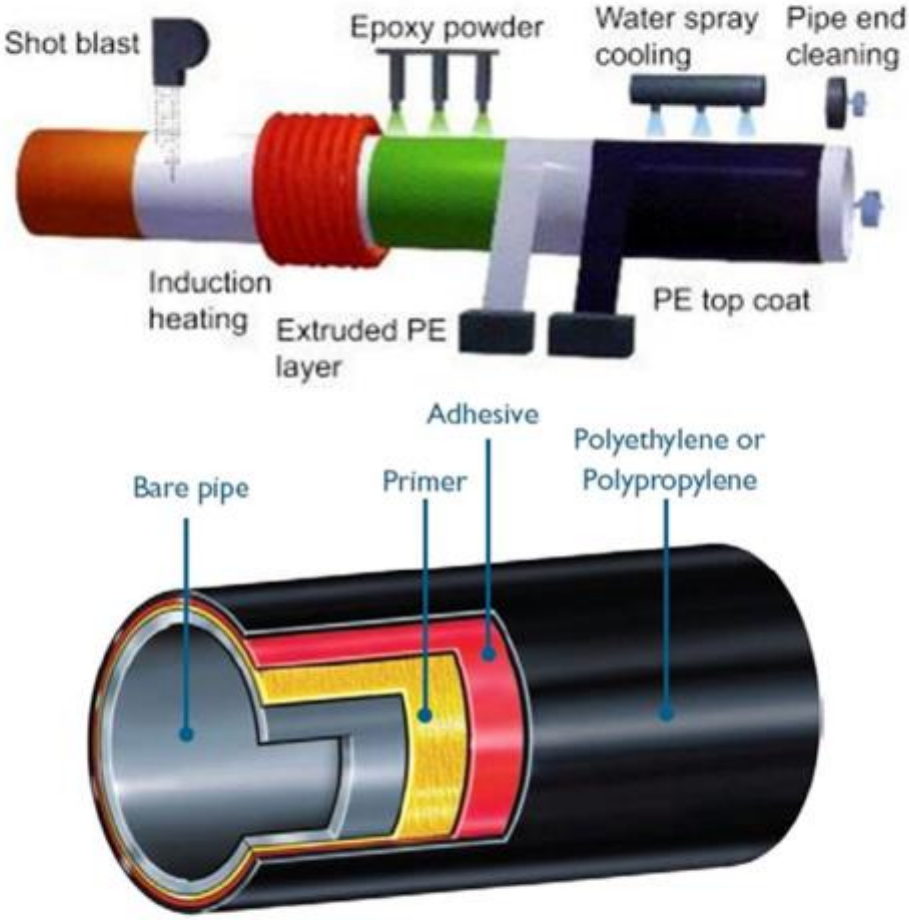
۴.۲.۴. پوشش سه‌لایه‌ای پلی‌اولفینی (پلی‌اتیلنی یا پلی‌پروپیلنی)

پوشش سه‌لایهٔ پلی‌اولفینی دارای سه لایهٔ آستری اپوکسی اتصال هم‌جوشی، چسب و لایهٔ فوقانی پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن است که توسط اکستروژن یا نواری بر روی لایهٔ دوم اعمال می‌گردد (شکل ۱۳.۴). حداقل ضخامت برای پوشش سه‌لایه‌ای در جدول ۱۴.۴ آمده است.

پلی‌پروپیلن به‌لحاظ دمای کارکردی بالاتر از پلی‌اتیلن است. پوشش‌های پلی‌اتیلن برای خطوط لوله در محدودهٔ دمایی $-40^{\circ}C$ تا $80^{\circ}C$ کارایی دارد. محدودهٔ دمایی پوشش پلی‌پروپیلن $-20^{\circ}C$ تا دمای $110^{\circ}C$ است. معمولاً رنگ پلی‌اتیلن مشکی و رنگ پلی‌پروپیلن سفید است. بسته به قطر و شرایط کارکرد لوله، ضخامت نهایی پوشش ۳۵۰۰-۲۵۰۰ میکرون است. ضخامت لایهٔ اپوکسی و چسب به‌ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ میکرون است. این پوشش مطابق با استانداردهای IGS-E-TP-010 و یا ISO 21809- 1: 2011 اجرا می‌شوند. جدول میزان حداقل ضخامت پوشش را برحسب قطر لوله برای پوشش سه‌لایه نشان می‌دهد.

مقاومت پوشش‌های پلی‌اتیلن در برابر ضربه و نفوذ نسبت‌به پوشش‌های گرم قطران زغال‌سنگ بیشتر بوده، بنابراین در برابر صدمات مکانیکی در حین حمل‌ونقل، جابجایی و انبار کردن و قرار دادن روی زمین کمتر آسیب‌پذیر هستند. همچنین به‌علت مقاومت الکتریکی بالا، به جریان حفاظت کاتدی کمتری در طول عمر کاری نیاز خواهد داشت. روکش‌های رویی

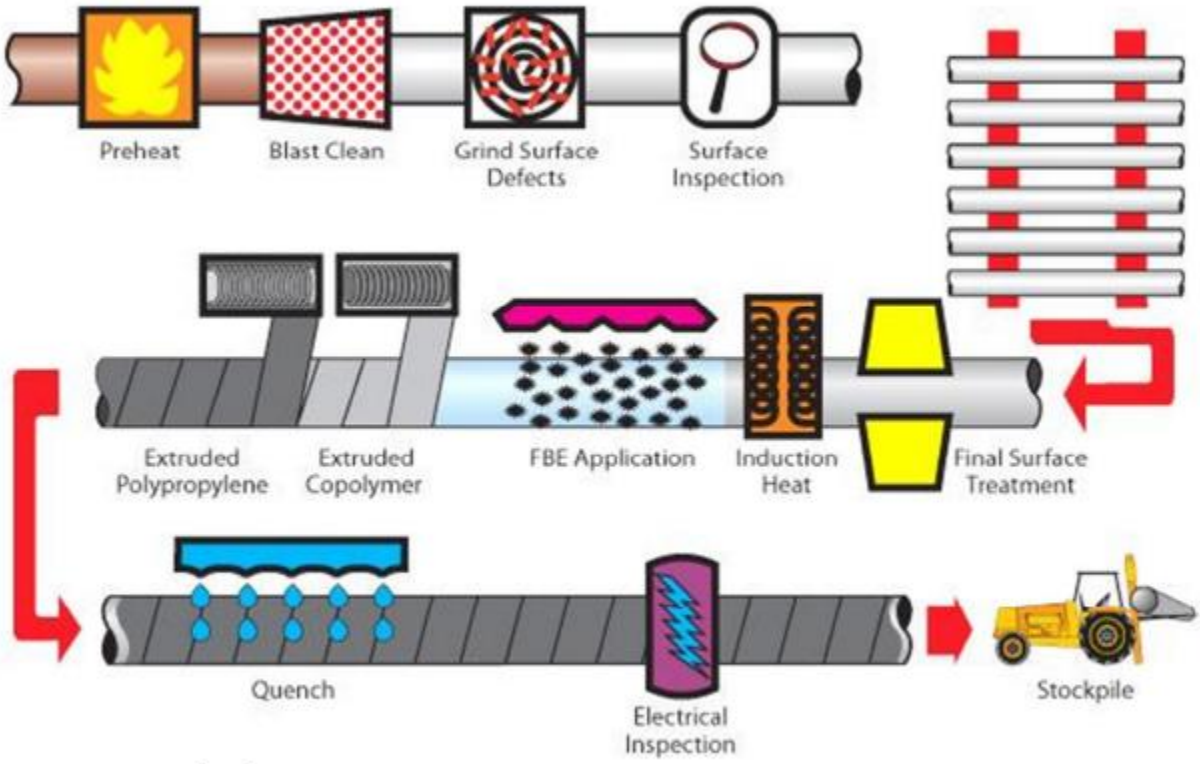
عموماً حاوی الیاف شیشه‌ای بوده تا در اثر نور خورشید از شل‌شدگی و چرودگی پوشش‌های زیرین در اثر حرارت جلوگیری کند (شکل ۱۴.۴). در استاندارد ISO 21809 مقدار مقاومت پوشش سه لایهٔ پلی‌اتیلنی بیشتر از $10^{8}\ \Omega.m^{2}$ بیان شده است.



شکل ۱۳.۴. تصویرهایی از پوشش سه لایهٔ پلی‌اولفینی بر روی خطوط لوله [۲۶- ۲۵]

جدول ۱۴.۴. حداقل ضخامت پوشش را برحسب قطر لوله برای پوشش سه لایه [۲۷]

Pipe Size (Specified Outside Diameter)	Minimum Coating Thickness (mm)
≤ 10 ¾" (273.1 mm)	2.5
≥ 12 ¾" (323.9 mm) to ≤ 18" (457 mm)	2.8
≥ 20" (508.0 mm) to ≤ 30" (762 mm)	3.0
≥ 32" (813.0 mm)	3.3



شکل ۱۴.۴. تصویر خط اعمال پوشش سه لایهٔ پلی‌اولفینی روی خط لوله [۲۸]

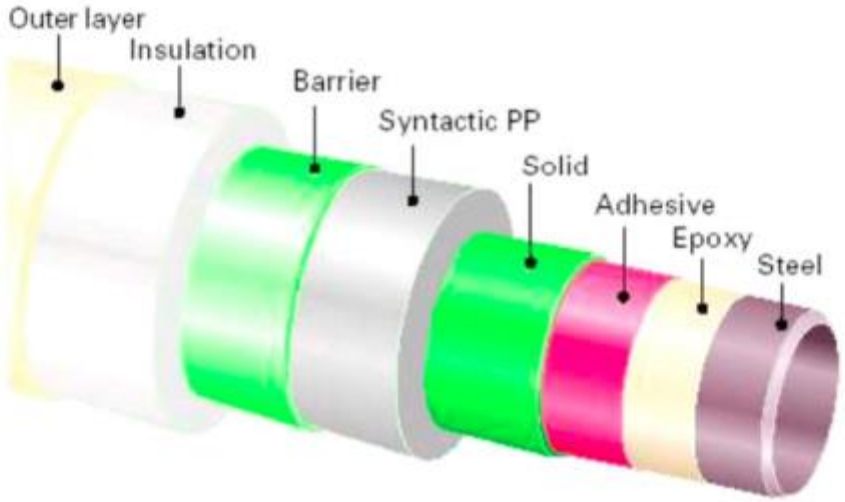
۵.۲.۴. پوشش چندلایهٔ پلی‌پروپیلن

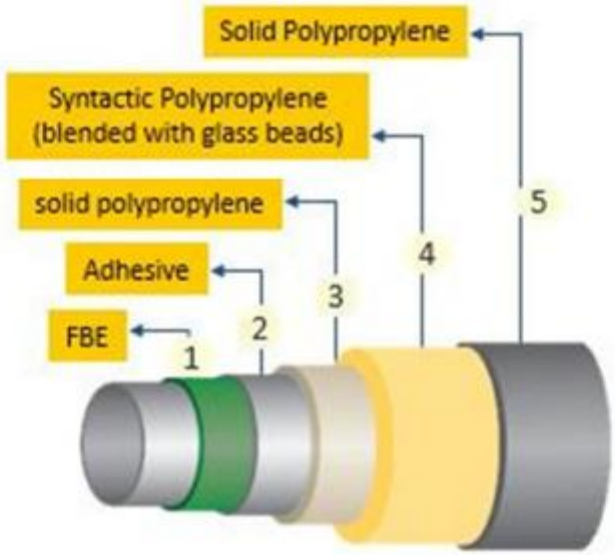
پوشش عایق پلی‌پروپیلن چند لایه (MLPP) به‌طور گسترده‌ای برای عایق‌کاری حرارتی خطوط لولهٔ زیر دریا استفاده می‌شود که به‌دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، داشتن چغرمگی مناسب و عملکرد حفاظتی در برابر خوردگی در دماهای بالا، کاربرد پیدا کرده است. این پوشش قابلیت تحمل دمای عملیاتی تا ۱۵۰°C را دارد و می‌تواند در برابر عمق آب تا ۷۰۰ متر برای فوم‌های PP معمولی مقاومت کند، ولی با فوم‌های PP خاص استفاده از آن را می‌توان تا عمق ۳۰۰۰ متری آب افزایش داد. شکل ۱۵.۴ تصویر دو نمونه پوشش ۷ و ۵ لایهٔ MLPP را نشان می‌دهد.

استانداردها و مشخصات برای MLPP محدود است و در مواردی مشخصات در دسترس عموماً براساس پوشش‌های سه لایهٔ پلی‌اولفین (3LPO) است. با توجه به کاربری این پوشش در یک دههٔ اخیر، هنوز گزارشات عملکردی آن استخراج نشده است.

در پوشش عایق حرارتی MLPP و پوشش 3LPP از گرمایش مادون قرمز برای ایجاد هم‌جوشی لایهٔ بیرونی و بهبود چسبندگی بین لایه‌های قبلی و متوالی استفاده می‌شود. پلی‌پروپیلن داغ روی لولهٔ گرم‌شده با پوشش 3LPP، اکسترود شده و سپس لوله کوئنچ و خنک

می‌شود. این مرحله هر چند بار که برای دستیابی به الزامات عایق حرارتی مورد نظر لازم باشد، تکرار خواهد شد. پس از اعمال پوشش نهایی فوم پلی‌پروپیلن، یک لایهٔ نهایی تک لایهٔ پلی‌پروپیلن تثبیت‌شده با فرایند اکستروژن روی پلی‌پروپیلن اعمال می‌شود.





شکل ۱۵.۴. تصویر پوشش هفت و پنج لایهٔ MLPP شامل FBE، چسب پلی‌پروپیلن، پروپیلن جامد، فوم پروپیلن عایق حرارتی، پروپیلن جامد، فوم پروپیلن برای عایقی حرارتی بیشتر، پروپیلن جامد بیرونی برای حفاظت مکانیکی [۳۰-۲۹]

در سال‌های اخیر با افزایش دمای دهانهٔ چاه‌ها به ۱۱۰°C و بالاتر، از FBEهای دمای بالا (HT) استفاده می‌شود. عملکرد و مکانیسم HT-FBEهای جدید فرموله‌شده از نظر حفظ چسبندگی کافی در طول ذخیره‌سازی طولانی‌مدت و مقاومت در برابر جدا شدن FBE قبل از نصب به‌خوبی توضیح داده نشده‌اند (شکل ۱۶.۴).

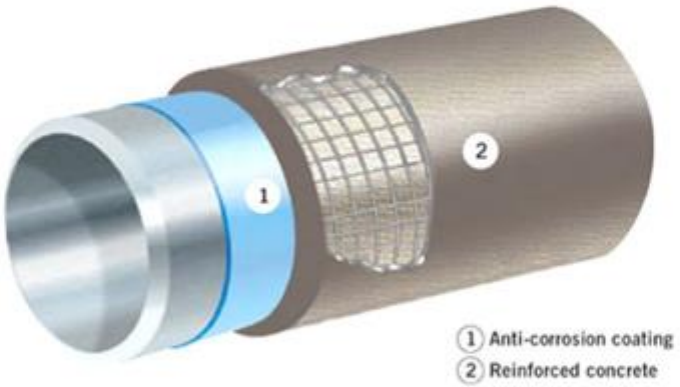
شکل ۱۶.۴. پوشش چندلایهٔ پلی‌پروپیلن برای استفاده در عمق دریا [۳۱]

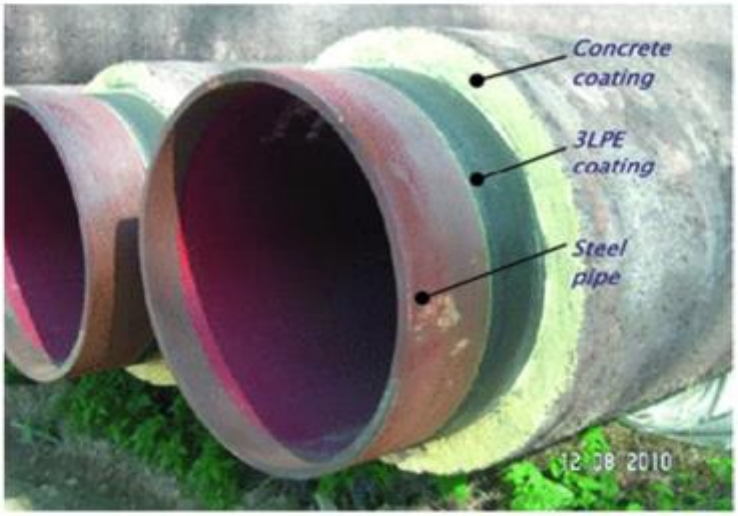
۶.۲.۴. پوشش‌های بتنی

در بعضی موارد استفاده از پوشش رویی بتنی به‌طور قابل توجهی باعث کاهش سرعت خوردگی لوله‌های پوشش‌دار می‌شود. پوشش بتنی بر روی تمامی پوشش‌های پایهٔ قیری و پلیمری خصوصاً بر روی پوشش FBE یا 3LPE قابل اجراست. شکل ۱۷.۴ تصویر پوشش بتنی روی لولهٔ فولادی را نشان می‌دهد. با افزایش قطر خطوط لوله و قرارگیری در عمق دریا و محیط‌های دشوارتر، به‌کارگیری پوشش وزن‌دار بتن (CWC-Concrete Weight Coating) نیاز به طراحی دقیق‌تری دارد. تقویت این پوشش بتنی (مخلوط با سیمان، سنگدانه‌ها و سنگدانه‌های آهنی برای افزایش چگالی پوشش) با میله‌های حداقل قطر ۶ میلی‌متر جوشکاری‌شده به‌صورت مش استفاده می‌شود که در این حالت محافظت بیشتری در برابر فشار آب ضربه از لنگر کشتی‌ها، فعالیت لایروبی، ماهیگیری، غرق شدن کشتی یا شناورها داشته باشد.

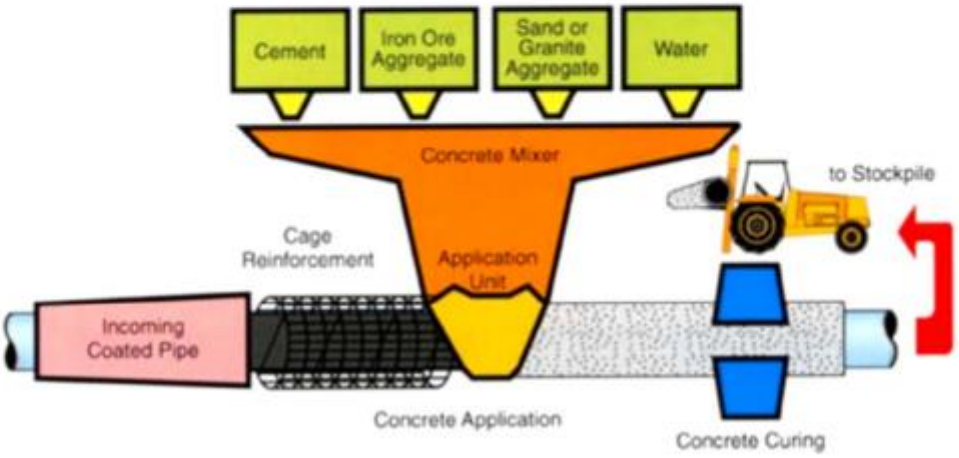
گرید سیمان مورد استفاده برای پوشش بتنی، سیمان پرتلند ASTM C 150 Type II مناسب برای مصارف دریایی خواهد بود. پوشش بتن دارای ضخامت ۱۱۰-۶۰ میلی‌متر و چگالی حداکثر ۳۰۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب خواهد بود. سنگ آهن ۷۰ درصد وزن پوشش را تشکیل می‌دهد. ۳۰ درصد باقی‌ماندهٔ بتن (سیمان و سنگ‌دانه) است. بر روی پوشش سیمانی،

نوار پلی‌اتیلنی نیز پیچانده می‌شود. شکل ۱۸.۴ تصویری از روش اعمال پوشش بتنی را نشان می‌دهد. وزن پوشش بتنی به این دلیل نیاز به طراحی دقیق دارد که برای مقابله با نیروهای شناوری، لوله‌های پوشش‌داده‌شده باید دارای وزن خاصی با تلرانس محدودی باشند.





شکل ۱۷.۴. تصویر پوشش سطح مقطع لوله با پوشش بتنی [۳۳-۳۲]



شکل ۱۸.۴. تصویر شماتیکی از روش پوشش‌دهی و سطح مقطع لولهٔ پوشش بتنی [۳۴]

۳.۴. پوشش تعمیری

قبل از قرار دادن لوله‌ها در خاک، در سر گودال‌ها، لوله‌ها به یکدیگر جوشکاری می‌شوند. محل اتصال نیاز به پوشش‌دهی دارند (شکل ۱۹.۴ و ۲۰.۴). محل اتصال فیتینگ‌ها مثل فلنج، شیر و سه‌راهی‌ها به لوله‌ها به‌دلیل جوشکاری باید به‌صورت موضعی، پوشش داده شوند. در این حالت از پوشش انقباضی و یا پوشش‌های مایع و یا پوشش نواری و یا ترکیبی از آنها استفاده می‌شود. به‌طور مثال ترکیب اپوکسی با پلی‌اورتان ازجمله موارد است. خود پوشش پلی‌اورتان با دستورالعمل ارائه‌شده در استاندارد BS EN 10290 کارساز است. تطابق بین پوشش اصلی و تعمیری ازجمله نکات کاربردی است که باید به آن توجه ویژه‌ای نمود. جدول ۱۵.۴ انواع پوشش برای محل اتصالات و تعمیرات که به‌طور موضعی اعمال می‌شوند را نشان می‌دهد. جدول ۱۶.۴ آزمون‌های مورد نیاز برای کنترل کیفیت پوشش‌های تعمیری را ارائه داده است.

شکل ۱۹.۴. تصویر اعمال پوشش در محل اتصال لوله‌ها به یکدیگر [۳۵]

شکل ۲۰.۴. تصویر اعمال پوشش در محل اتصال لوله‌ها به یکدیگر [۳۶]

جدول ۱۵.۴. انواع پوشش موضعی برای محل اتصالات و تعمیرات [۳۷]

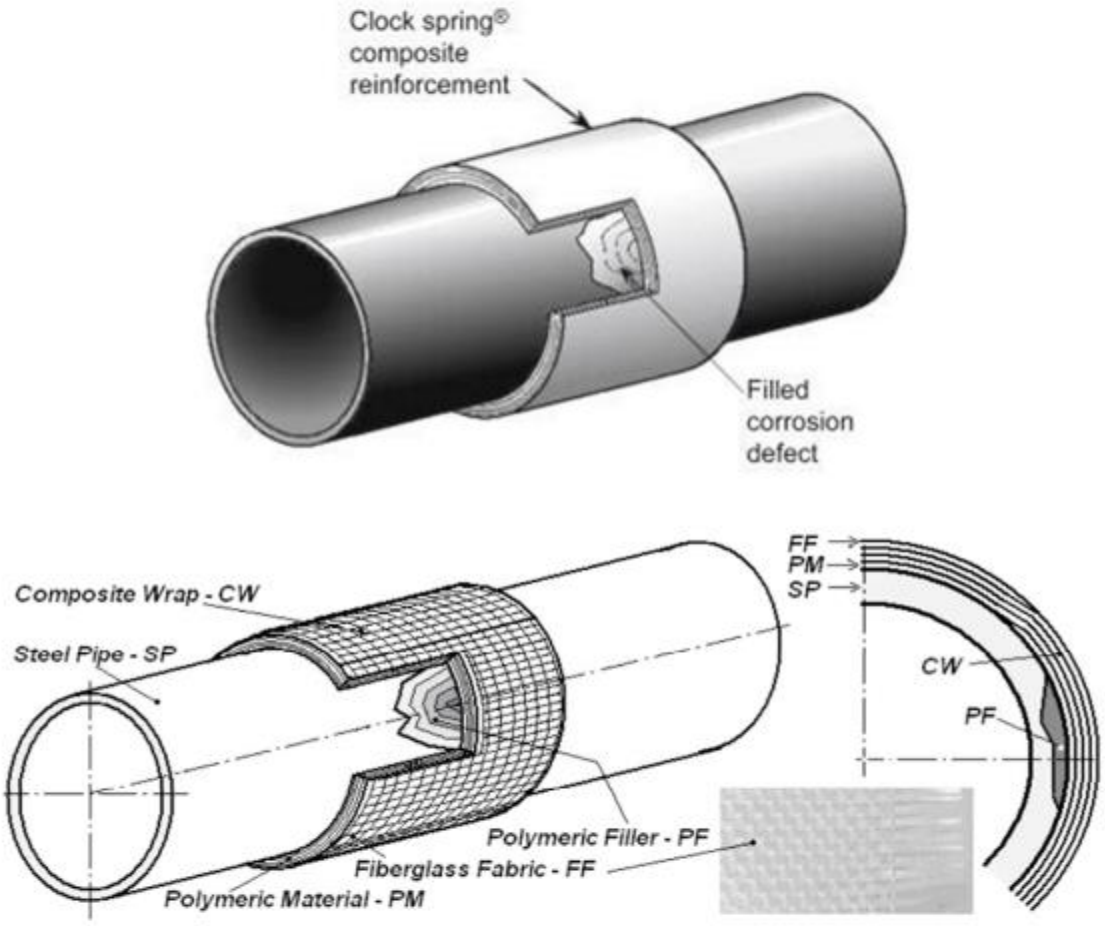
Mainline Coating	Typical Field Joint Coating
Fusion Bonded Epoxy (FBE)	FBE, 100% solids liquid, epoxy, epoxy-urethane, Heat-shrink sleeves (HSS) Cold-and hot-applied tapes
Two-Layer Polyethylene (PE)	Mastic coated two-layer HSS Cold-and hot-applied tapes
Three-Layer Polethylene	Three-layer HSS with epoxy primer and hot melt adhesive Multi-layer flame spray with PE
Three-Layer Polypropylene (PP)	Three-layer HSS with epoxy primer and hot melt adhesive Multi-layer flame spray with PP FBE, Spray-applied adhesive, coextruded PP tape
Polymeric Tapes	Cold-and hot-applied tapes Mastic coated HSS
Coal Tar Enamel/Asphalt	Hot applied molten coal tar enamel and asphalt coatings Heat shrinkable sleeves with asphalt based mastic adhesive

جدول ۱۶.۴. آزمون‌های مورد نیاز برای کنترل کیفی پوشش تعمیری بر روی لوله‌های با خوردگی موضعی [۳۸]

Material property	International test method	ASTM test method
Tensile strength, Young's modulus and Poisson's ratio	ISO 527	ASTM D 3039
In-plane shear modulus	NA	ASTM D 5379
Thermal expansion coefficient	ISO 11359-2	ASTM E 831
Glass transition temperature of polymer	ISO 11357-2	ASTM E 1640, ASTM D 6604 or ASTM E 831
Heat distortion temperature (HDT)	ISO 75	ASTM D 648
Barcol hardness	BS EN 5	ASTM D 2583
Shore hardness	ISO 868	ASTM D 2240
Lap shear adhesion strength (of composite bond to substrate)	EN 1465	ASTM D 3165, ASTM D 5868
Long-term strength (creep-rupture) (optional)	ASME PCC-2 mandatory appendix V	ASTM D2990, ASTM D2992
Toughness parameter, energy release rate (optional)	ASME PCC-2 mandatory appendix IV	NA
Structural strengthening (optional)	ASME PCC-2 mandatory appendix III	NA

در بعضی موارد ممکن است در حین اجرا و یا با گذشت زمان، بخشی از پوشش لوله نیز دچار تخریب مکانیکی یا خوردگی شوند. در این حالت نیز ترکیبی از پوشش‌های مذکور نواری و یا روش ذوبی را می‌توان به‌طور موضعی به‌کار گرفت. ابتدا باید محل خوردگی و حفره‌های ناشی از آن توسط

چسب مایع پلیمری پر شده، سپس با فایبرهای شیشه و ترکیب رزین‌های اپوکسی و پلی‌استر چند لایه پوشش را بر روی لوله‌ها اعمال کرد (شکل ۲۱.۴). تعداد لایه‌ها و ضخامت لازم با تحلیل تنش لوله با توجه به فشار سیال به دست می‌آید. انجام آزمون هیدروستاتیک برای مشخص شدن حد فشار تحمل ازجمله نکات کاربردی موضوع است (شکل ۲۲.۴). انواع پوشش موضعی برای محل اتصالات و تعمیرات در جدول ۱۴.۴ آمده است. میزان تخریب و به‌تبع آن هزینهٔ تعمیرات به‌ترتیب برای پوشش‌های سه لایه، همجوشی اپوکسی و انامل قیری کمتر است.

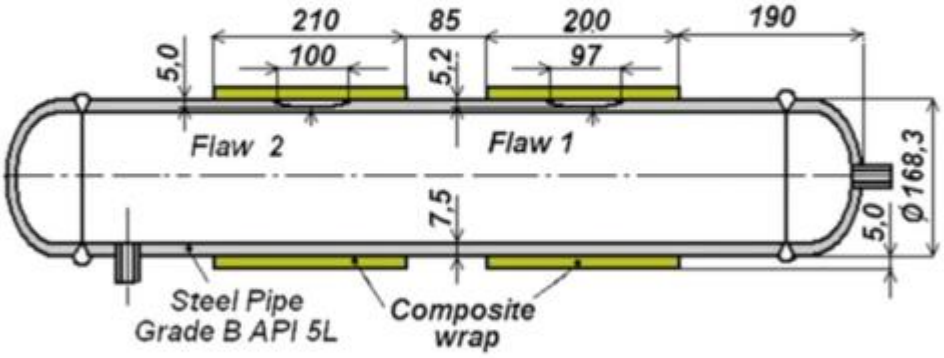


شکل ۲۱.۴. اعمال پوشش کامپوزیتی بر روی مناطق خوردگی [۳۸]

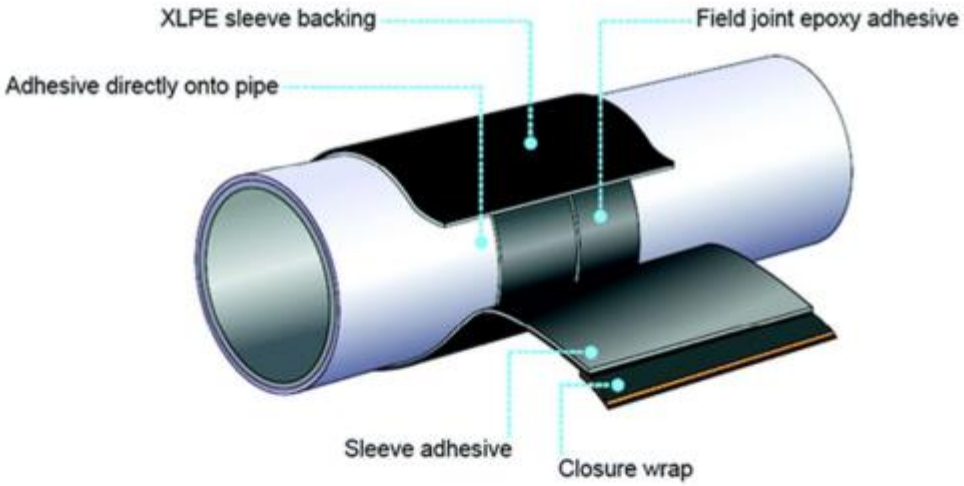
۱.۳.۴. پوشش انقباضی حرارتی

پوشش انقباضی حرارتی، یک پوشش محافظ در برابر خوردگی برای خطوط لوله به شکل غلاف یا نوار لوله‌ای است که در محل اجرای لوله‌گذاری اعمال می‌شود (شکل ۲۳.۴). این پوشش از پرمصرف‌ترین فناوری امروزی برای حفاظت در برابر خوردگی محل جوش و اتصالات به شمار می‌روند. نصب آنها آسان، محافظت عالی و مقرون‌به‌صرفه هستند. وقتی نوار پوشش حرارت

می‌بیند، اندازهٔ آن کوچک می‌شود و با سطحی که اطراف آن را احاطه کرده، به‌خوبی می‌چسبد. جنس غلاف حرارتی از ورق پلی‌اولفین اکسترودشدهٔ ضخیم (پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن) است. مشخصات و استانداردهای پوشش انقباض حرارتی در جدول ۱۷.۴ آمده است.



شکل ۲۲.۴. تصویر نمونهٔ آزمون هیدروستاتیک برای اطمینان از عملکرد خط لوله [۳۸]



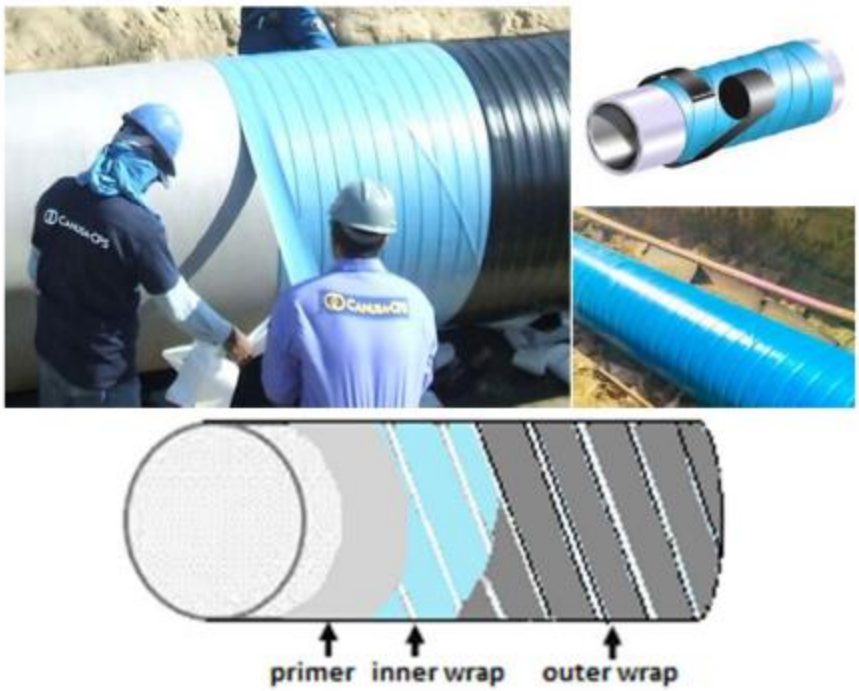
شکل ۲۳.۴. تصویر پوشش انقباضی حرارتی [۴۰-۳۹]

جدول ۱۷.۴. مشخصات و استانداردهای پوشش انقباضی حرارتی [۴۱]

PROPERTY	VALUE	TEST METHOD
SLEEVE BACKING		
Tensile Strength	2,200 psi min.	ASTM D-638
Elongation	500% min.	ASTM D-638
Heat Shock Penetration Resistance	No dripping, flowing or cracking 0.02 inch max.	ASTM D-2671 ASTM G-17
Tear Strength	500 lb./inch min.	ASTM D-624
MASTIC SEALANT		
Shear	45 psi min	ASTM D-1002
FINISHED SLEEVE		
Adhesive Peel	30PLI min.	ASTM D-1000 (Method B w/Jaw Sep. Speed 4"/min.
Impact Resistance	50 inch/lbs. min. (70 inch/lbs. min.)	ASTM G-14
Limestone Drop Test	50 drops min.	ASTM G-13 (35 lbs.)
Abrasion Resistance	No Holidays	ASTM G-6
Outdoor Weathering	No deterioration of performance	ASTM G-11
Low Temperature Flexibility	Below-15C	ASTM D-2671 (Proc. C, 1-inch Mandrel)
Cathodic Disbondment	<=10mm	ASTM G-8 (30 days)
Fungi Resistance	Rating <= 1	ASTM G-21
Bacterial Resistance	No growth 21 days	ASTM G-22
Water Vapor Transmission	.05 gr/24 hrs/100m²max	ASTM E-96 (Method B)
Dielectric Withstand	20,000 volts	ASTM D-149
Insulation Resistance	1012 ohmXcm min.	ASTM D-257
Thickness Backing	.030 inch min.	ASTM D-2671(Recovered)
Thickness Mastic – Wraparound	.045 inch	ASTM D-2671 (As Supplied)

۲.۳.۴. پوشش‌های نواری

پوشش‌های نواری اغلب برای تعمیر بخش‌هایی از پوشش آسیب‌دیدهٔ خط لوله به کار گرفته می‌شوند. متداول‌ترین آنها از انواع نوارهایی است که در آن پارچه‌ای آغشته به قیر با گرم شدن روی مناطق معیوب پوشش، اعمال می‌شوند. در مواردی هم ممکن است نوارهای سرد پلی‌اتیلنی یا پلی‌پروپیلنی چسبی نیز مورد استفاده قرار بگیرند (شکل ۲۴.۴). باوجود اینکه روش پوشش نواری نسبتاً ارزان است، ولی یک نقطه ضعف آن این است که در برابر دمای عملیاتی بالا و تنش خاک، تحمل کمی دارند. بعضی از پوشش‌های نواری از نوع پایهٔ نفتی هستند که عمدتاً در حالت سرد اعمال می‌شوند. در ابتدا، آنها از نوارهای اشباع‌شده با نفت خام ساخته می‌شدند. نفت خام از نظر شیمیایی خنثی است. پوشش‌های حاوی نوارهای اشباع‌شده با نفت خام، نیازی به آماده‌سازی سطح نداشته، چسبندگی بالا و نیز نسبت‌به نفوذ آب عملکرد مناسبی دارند. محدودهٔ دمای عملیاتی از $-۴۰^{\circ}C$ تا $+۴۰^{\circ}C$ است.



شکل ۲۴.۴. تصویر پوشش نواری سه‌لایه برای اصلاح مناطق معیوب پوشش خطوط لوله [۴۲]

خطوط لوله‌ای که تحت فشار و دمای بالا کار می‌کنند در حال حاضر توسط پارچهٔ فایبرگلاس عایق‌بندی می‌شوند که ضمن عایق بودن حرارتی، باعث افزایش استحکام پوشش‌ها نیز می‌شود. به‌طورکلی پارچه‌های الیاف شیشه، که مواد محکم، مقاوم در برابر خوردگی و ضدآب هستند، به‌عنوان پوشش‌های عایق برای محیط‌های خورنده‌تر استفاده می‌شوند.

در میان انواع پوشش‌های پلیمری نواری، پرکاربردترین آنها چسب پلیمری با لایهٔ چسب حساس به فشار است. زیرلایه‌های این نوارها از پلی‌وینیل کلراید، پلی‌پروپیلن یا پلی‌اتیلن با یک لایه چسب ساخته شده است. پوشش‌های نواری استحکام نسبتاً بالا و مقاوم در برابر سایش هستند.

از معایب عمدهٔ روکش‌های نوار پلیمری می‌توان به پایداری کم در برابر نیروی برشی در هنگام جاگذاری خط لوله در خاک، مقاومت کم در برابر ضربه و پایداری کم در برابر حملهٔ بیولوژیکی اشاره کرد. تجربهٔ بهره‌برداری از خطوط لولهٔ گاز و نفت نشان می‌دهد که طول عمر عملیات پوشش‌های نوار پلیمری در خطوط لوله با قطرهای ۱۰۰۰ میلی‌متر و بالاتر، ۷ تا ۱۵ سال است [۵]. استاندارد برای پوشش نواری AWWA C209 است. نوار پلی‌پروپیلن دارای چسب الاستومری یا لاستیک پایهٔ بوتیل است. نوار از نوع پلی‌اتین سنگین است. پلی‌اتیلن سنگین تطابق خوبی با دیگر پوشش‌های به‌کاررفته در لوله‌ها دارد. ممکن است مواد به‌کاررفته در نوارها ترکیبی از پلی‌اتین و پلی‌پروپیلن نیز باشد. این نوارها با چسب مخصوصی به‌صورت سربه‌سر بر روی لوله‌ها اعمال می‌شوند، تا دمای حدودی $110^{\circ}C$ هم دوام دارند.

۳.۳.۴. پوشش اپوکسی مایع

اپوکسی مایع مثل پوشش‌های کولتار اپوکسی و اورتان بر روی پوشش‌های معیوب خطوط لوله اعمال می‌شوند (شکل ۲۵.۴). با بخار شدن حلال پوشش سخت می‌شود. پوشش‌های مذکور عموماً دو جزئی بوده و ممکن است به‌صورت چند لایه بر روی سازه اعمال شوند. آماده‌سازی سطح و رعایت دستورالعمل اجرایی در کارایی پوشش مذکور تأثیر بسزایی دارد. کامپوزیت‌های پلیمری یا پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف که اصطلاحاً FRP نامیده می‌شوند از دو جزءِ اصلی الیاف و رزین تشکیل شده‌اند. البته نوع افزودنی‌ها و مقدار آنها نیز در خواص نهایی محصول نقش دارد. معمولاً از اپوکسی و پلی‌استر به‌عنوان رزین و از آرامید، شیشه یا کربن به‌عنوان الیاف کامپوزیت استفاده می‌شود که در این صورت به کامپوزیت‌های مربوطه به‌ترتیب AFRP، GFRP و CFRP گفته می‌شود.

شکل ۲۵.۴. پوشش مایع اپوکسی برای ترمیم پوشش معیوب [۱۲]

۴.۴. آزمون‌های کنترل کیفی پوشش

مهم‌ترین آزمون‌های لازم برای کنترل کیفی قبل از بهره‌برداری پوشش، ضخامت‌سنجی، چسبندگی، آزمون هالیدی، اندازه‌گیری مقاومت و جریان لازم برای حفاظت کاتدی در خاک و یا آب مورد نظر است. بعضی از آزمون‌ها قبل از نصب در کارخانه انجام می‌شود که می‌توان به بازرسی چشمی، ضخامت‌سنجی، چسبندگی، ضربه، سختی، چسبندگی در آب داغ، آزمون جدایش ناشی از اعمال پتانسیل حفاظت کاتدی و هالیدی اشاره کرد. استاندارد ISO 21809 تاحدود زیادی آزمون‌ها را ارائه داده است. در خصوص روش آزمون تخلل و ناپیوستگی یا آزمون هالیدی برای بررسی میزان عایقی پوشش می‌توان به استاندارد ASTM G62، NACE RP

0188 و NACE RP 0274 مراجعه کرد. در دستگاه هالیدی از یک باتری با ولتاژ بالا استفاده می‌شود. یک سیم از سر باتری به سر لوله (بدون پوشش) و یک سر دیگر به‌صورت حلقه به دور قطر لوله سطح پوشش را اسکن می‌کند. چون پوشش حالت عایقی دارد، جریانی برقرار نمی‌شود. درصورت تخلخل، عدم یکنواختی و وجود منافذی در پوشش، مسیری برای عبور جریان ایجاد می‌شود و دستگاه آلارم نوری، صوتی یا جرقه می‌دهد (شکل ۲۶.۴).

شکل ۲۶.۴. تصویر اندازه‌گیری محل عیب پوشش به روش هالیدی [۴۳]

با توجه به اینکه خطوط لوله پس از جاگذاری در محیط ممکن است دچار مشکل شده باشد، آزمون‌های میدانی در این ارتباط اهمیت پیدا می‌کند. پس از نصب و راه اندازی حفاظت کاتدی، روش‌های مختلفی برای بررسی کیفیت پوشش وجود دارد که عبارت‌اند از:

- اندازه‌گیری مقاومت پوشش به روش ایستگاه موقت،
- اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل خط لولهٔ تحت جریان مستقیم، (DCVG-Direct Current Voltage Gradient)،
- اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل تحت جریان متناوب، (ACVG -Alternating current voltage gradient)،
- پتانسیل‌سنجی نزدیک (CIPS-Close Interval Potential Survey)،
- تعیین نقشهٔ جریان لوله (PCM-Pipeline Current Mapper)،
- روش ارسال جریان متناوب در طول خط لوله و اندازه‌گیری تغییرات جریان (Current SCAN).

شکل ۲۷.۴ تصویری از حالت‌های مختلف بررسی عیوب پوشش خط لوله را در یک نگاه نشان می‌دهد. جهت ارزیابی و بررسی خطوط لوله زیرزمینی می‌توان از استانداردهای NACE SP 0502، NACE SP 0207 و NACE TM 0109 استفاده کرد. جدول ۱۸.۴ امکان‌پذیری بررسی عیوب پوشش توسط آزمون‌های مختلف بر روی پوشش سه لایهٔ پلی‌اتینی را نشان می‌دهد. تمامی روش‌های بررسی از نظر حساسیت به نوع و آرایش خاک، وجود سنگ، نوع پوشش مانند نوارهای دی‌الکتریک بالا، شیوه‌های ساخت، جریان‌های تداخلی، سازه‌های دیگر و غیره محدود می‌باشند. دو یا چند روش بررسی ممکن است برای به دست آوردن نتایج مطلوب و سطوح اطمینان مورد نیاز باشد. همهٔ روش‌های مذکور از نظر حساسیت به نوع و آرایش خاک، وجود لبه‌های سنگی و صخره‌ای، نوع پوشش، ملاحظات سازه‌ای، عمق قرارگیری خط لوله در خاک، جریان‌های تداخلی، سازه‌های دیگر و غیره بستگی دارند. حداقل دو یا چند روش بررسی ممکن است برای به دست آوردن نتایج مطلوب و سطح اطمینان مورد نیاز باشد.

اگر در اثر تخریب و جداشدگی پوشش، پیوستگی جریان الکتریکی بین خاک و سازه وجود نداشته باشد، هیچ‌یک از این ابزارهای بررسی قادر به تشخیص شرایط پوشش نیستند. اگر در مسیر پیوستهٔ الکتریکی پیوسته یک روزنهٔ کوچک وجود داشته باشد، روش DCVG یا روش‌های الکترومغناطیسی می‌توانند این نواحی نقص را شناسایی کنند. موردهای ۱ و ۲ قابل اجرا و مورد ۳ قابل اجرا نیست. در مورد ۲ ممکن است در سیستم حفاظت کاتدی نوسان ایجاد کند، ولی مورد ۱ به‌دلیل ایزولاسیون مناسب باعث نوسان نمی‌شود.

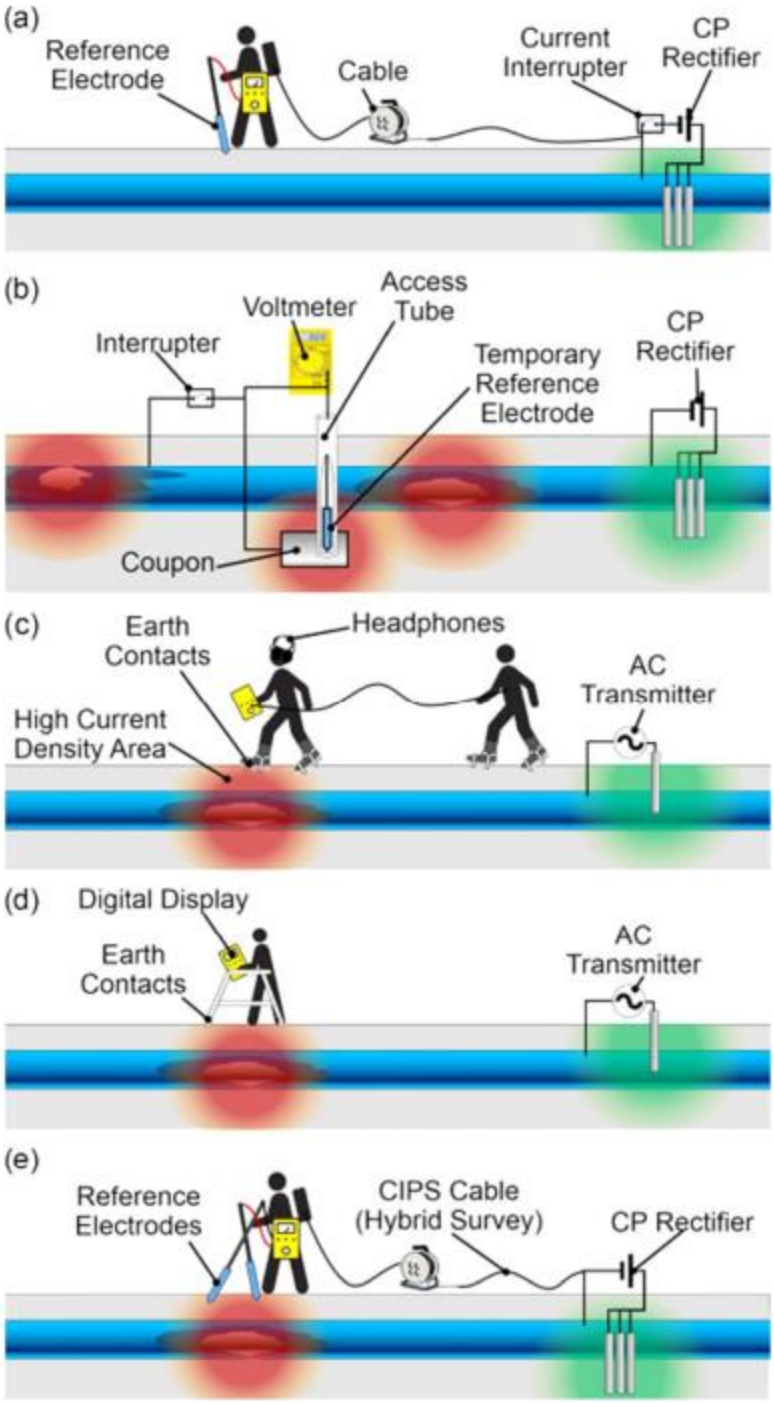
۱.۴.۴. اندازه‌گیری مقاومت پوشش

مقاومت پوشش به‌عنوان مقاومت سطح کاتد (سازه) به الکترولیت نیز مطرح می‌شود. مثال زیر روش اندازه‌گیری مقاومت پوشش یک خط لوله را توضیح می‌دهد. دادهٔ مقاومت پوشش در محاسبهٔ جریان حفاظت به روش محاسباتی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. جدول‌های استاندارد مربوط به دانسیتهٔ جریان حفاظت نیز براساس مقاومت پوشش ارائه شده‌اند. هرچه پوشش مقاومت بیشتری داشته باشد، جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی نیز کمتر خواهد شد.

مثال: مقاومت پوشش یک خط لوله را با توجه به داده‌های شکل ۲۸.۴ به دست آورید.

طول معینی از خط لولهٔ پوشش‌دار در حدود ۱۵۰۰ فوت به مساحت سطح $۵۰۰۷۰\ ft^2$ جهت اندازه‌گیری مقاومت پوشش و مقاومت کاتد_الکترولیت در نظر گرفته شده است. جهت اعمال جریان می‌توان از یک دستگاه مبدل یکسوکنندهٔ موقت به‌همراه یک کلید جهت قطع و وصل کردن جریان

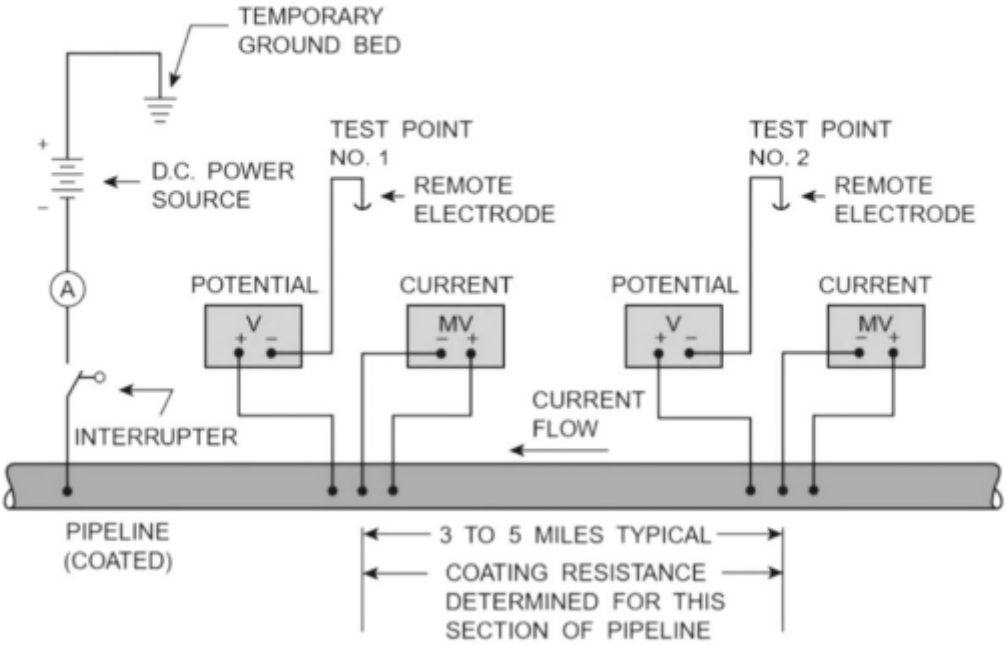
در یک فاصلهٔ زمانی مشخص (۱۰ ثانیه روشن- ۵ ثانیه خاموش) استفاده نمود. با توجه به معیار حفاظت ۸۵۰- میلی‌ولت نسبت‌به الکترود مس- سولفات مس و اندازه‌گیری‌های تغییرات جریان و پتانسیل در دو نقطه (۱) و (۲) در شکل ۲۸.۴، مقاومت پوشش توأم با مقاومت کاتد- الکترولیت را می‌توان اندازه‌گیری کرد [۴]. محاسبات مربوطه در جدول ۱۹.۴ آمده است.



شکل ۲۷.۴. تصویر بررسی و بازرسی عیوب احتمالی در خطوط لوله به روش‌های الف) پتانسیل‌سنجی نزدیک (CIPS)، ب) کوپن مادون قرمز، ج) پیرسون، د) روش پتانسیل‌سنجی تحت جریان متناوب (ACVG)، ه) پتانسیل‌سنجی تحت جریان مستقیم (DCVG) [۴۴]

جدول ۱۸.۴. امکان‌پذیری بررسی عیوب پوشش توسط آزمون‌های مختلف بر روی پوشش سه لایهٔ پلی‌اتیلنی [۴۵]

CONDITIONS	Close-Interval Survey (CIS)	Current Voltage Gradient Surveys (ACVG and DCVG)	Pearson	Electro-magnetic	AC Current Attenuation Surveys
Coating holidays	2	1, 2	2	2	1, 2
Anodic zones on bare pipe	2	3	3	3	3
Near river or water crossing	2	3	3	2	2
Under frozen ground	3	3	3	2	1, 2
Stray currents	2	1, 2	2	2	1, 2
Shielded corrosion activity	3	3	3	3	3
Adjacent metallic structures	2	1, 2	3	2	1, 2
Near parallel pipelines	2	1, 2	3	2	1, 2
Under high-voltage alternating current (HVAC) overhead electric transmission lines	2	1, 2	2	3	3
Shorted casing	2	2	2	2	2
Under paved roads	3	3	3	2	1, 2
Uncased crossing	2	1, 2	2	2	1, 2
Cased piping	3	3	3	3	3
At deep burial locations	2	2	2	2	2
Wetlands (limited)	2	1, 2	2	2	1, 2
Rocky terrain/rock ledges/rock backfill	3	3	3	2	2



شکل ۲۸.۴. طرح‌واره‌ای از ایستگاه موقت جهت اندازه‌گیری مقاومت پوشش [۲۱]

جدول ۱۹.۴. محاسبات اندازه‌گیری مقاومت مؤثر پوشش [۲۱]

اندازه‌گیری در نقطهٔ تست ۲	اندازه‌گیری در نقطهٔ تست ۱
$V_{on} = -1.7$ v $V_{off} = -0.88$ v $\Delta V = -0.82$ v $I_{on} = +2.03$ A $I_{off} = -0.05$ A $\Delta I = 2.08$	$V_{on} = -1.75$ v $V_{off} = -0.89$ v $\Delta V = -0.86$ v $I_{on} = +2.25$ A $I_{off} = +0.09$ A $\Delta I = 2.16$
$\Delta V = (-0.86 + -0.82) \div 2 = -0.84$ v $\Delta I = 2.16 - 2.08 = 0.08$ $R_{coat} = 0.84 \div 0.08 = 10.5$ ohm Effective coating resistance = $10.5 \times 50070 = 526000$ ohms-ft^2	

نکتهٔ پنهان این مسئله، تأثیر مقاومت زمین است. درصورتی‌که این محاسبات برای خاک، با مقاومت ۱۰۰۰ Ω.cm باشد، مقاومت کاتد به زمین برابر ۰/۰۰۶۲ اهم خواهد بود. با زیاد شدن مقاومت خاک، مقاومت کاتد نیز به‌طور خطی نسبت‌به زمین افزایش خواهد یافت (جدول ۲۰.۴). با افزایش مقاومت کاتد به زمین، مقاومت مؤثر پوشش نیز زیاد خواهد شد. مقدار مقاومت الکتریکی پوشش به‌طور قابل توجهی به اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمون مذکور بستگی دارد. مقایسهٔ داده‌های میدانی با مقاومت پوشش در آزمایشگاه می‌تواند خطاهای آزمایش میدانی را کاهش دهد. معمولاً محاسبات مربوط به حفاظت لوله‌ها براساس میزان تخلخل پوشش‌ها تعیین می‌شود. بعد از اجرای پوشش با انجام آزمون هالیدی (کیفیت پوشش براساس میزان عیوب)، نقاط صدمه‌دیده و دارای تخلخل مشخص خواهد شد. در این آزمایش با اعمال ولتاژ الکتریکی زیاد به سطح پوشش، درصورت وجود هرگونه عدم پیوستگی عایقی، یک تخلیهٔ الکتریکی صورت پذیرفته و محل عیب مشخص می‌شود. باید دقت کرد که اعمال ولتاژ زیاد ممکن است باعث تخریب پوشش نیز بشود. آزمون‌های هالیدی به‌سختی می‌تواند درصد تخلخل پوشش را نیز مشخص کند. درصد تخلخل همچنین براساس داده‌های آزمایشگاهی نیز قابل اندازه‌گیری است. هرچه میزان مقاومت الکتریکی پوشش بیشتر باشد، جریان لازم جهت حفاظت کمتر خواهد بود. پوشش‌های اعمالی ممکن است در اثر عوامل مختلف دچار مشکل شده و مقاومت آنها در نواحی صدمه‌دیده به‌شدت افت کند. این عوامل که باعث افت خواص محافظتی پوشش می‌شود به شرح زیر می‌باشد:

- معایب مربوط به مواد اولیهٔ پوشش،

- معایب ناشی از عدم تمیزکاری مناسب سطح،
- اشکالات تجهیزات پوشش‌دهی،
- ترک‌خوردگی، خراش و زخمی شدن ناشی از جاگذاری لوله در خاک،
- تأثیر عوامل محیطی خاک مثل میکروارگانسیم‌های موجود در خاک و ریشهٔ درختان.
- اعمال حفاظت بیش از حد (آزاد شدن گاز هیدروژن) و یا قلیایی شدن بیش از حد پوشش و واکنش‌های منجر به جداشدگی پوشش از روی سطح.

جدول ۲۰.۴. محدودهٔ جریان مورد نیاز حفاظت برای خط لولهٔ ۱۰ مایلی به قطر ۳۶ اینچ در خاک با مقاومت ۱۰۰۰ Ω.cm با پوشش‌های مختلف [۲۱]

میانگین مقاومت موثر پوشش بر حسب اهم در یک فوت مربع	جریان مورد نیاز بر حسب آمپر
لوله لخت *	۵۰۰
۱۰۰۰۰	۱۴/۹۱
۲۵۰۰۰	۵/۹۶۴
۵۰۰۰۰	۲/۹۸۲
۱۰۰۰۰۰	۱/۴۹۱
۵۰۰۰۰۰	۰/۲۹۸۲
۱۰۰۰۰۰۰	۰/۱۴۹۱
۵۰۰۰۰۰۰	۰/۰۲۹۸
پوشش کامل	۰/۰۰۰۰۵۸
* فرض بر این است که لولهٔ بدون پوشش، به جریان حداقل ۱ میلی‌آمپر به ازای هر فوت مربع نیاز دارد.	

در هر صورت با وجود مشکلات مربوط به اجرای پوشش، سیستم حفاظت کاتدی به‌طور قابل توجهی می‌تواند نواقص پوشش را که منجر به خوردگی موضعی در سازه (سطح آند به کاتد کم) می‌شود، تحت تأثیر قرار داده و میزان خوردگی را به‌شدت کاهش دهد. جدول‌های ۲۱.۴ و ۲۲.۴ مشخصات و دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت لوله‌های با پوشش مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲۱.۴. مشخصات بعضی از پوشش‌های مورد استفاده برای فولاد [۴۶]

Coating Type ↓ Unit →	$\rho_D{}^a$ Ω cm	s mm	r_u^x Ω cm²	r_u^{ob} Ω cm²	s mm	r_u^c Ω cm²
Bitumen coating	$>14^{10}$	4	4×10^9	3×10^5	4 to 10	-10^4
Polyethylene	14^{18}	2	4×10^{13}	10^{11}	2 to 4	-10^5
Epoxy Resin coating	14^{15}	0.4	4×10^9	10^8	0.4	-10^4
Polyurethane coating	3×14^{14}	2	6×10^9	10^9	2.5	

$\rho_D{}^a$=Specific Resistance of Coating, s=Thickness of Coating, r_u^x=Calculated Resistance Value Based on the ρ_D, r_u^{ob}=Resistance Value Obtained from the Laboratory Testing, r_u^c=Resistance Value Obtained from the Structure in Service Media

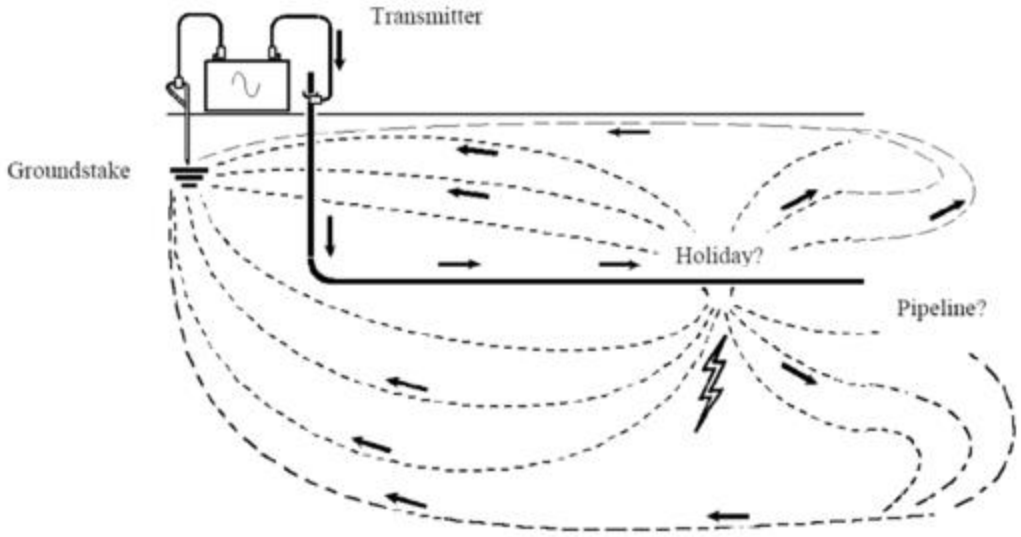
جدول ۲۲.۴. دانسیتهٔ جریان حفاظت کاتدی خطوط فولاد با پوشش‌های مختلف [۴۷]

coating	current density (mA/m2)		
	Initial	Mean	Final
Coal tar enamel coating and concrete, weight coating in seawater	2	9	15
Coal tar enamel coating and concrete weight coating in seamud	1	3	6
Polyethylene coating in seawater	5	18	30
Polyethylene coating in seamud	3	6	10

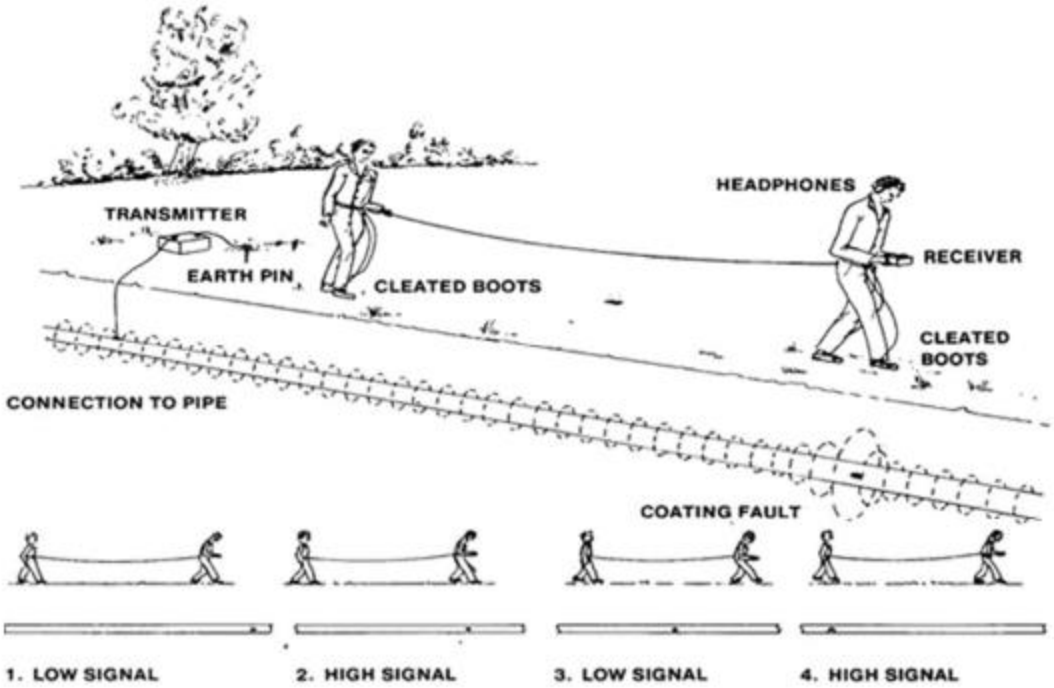
۲.۴.۴. آزمون پیرسون، ACVG و DCVG

بررسی پیرسون روشی برای یافتن موقعیت تخریب پوشش در خطوط لوله است. این روش در سال ۱۹۴۱ توسط پیرسون ارائه شد. در این روش یک سیگنال جریان AC در محدودهٔ فرکانس صوتی در حدود ۱۰۰۰ هرتز بر روی خط لوله توسط یک فرستنده و یک پین زمین اعمال می‌شود. فرستنده در یک مکان مناسب، معمولاً یک پست تست حفاظت کاتدی به خط لوله متصل می‌شود. سیگنال‌های واردشده به لوله در محل پوشش معیوب از لوله خارج و وارد زمین می‌شود (شکل ۲۹.۴). سیگنال از طریق زمین می‌تواند توسط دستگاهی دریافت شود. روش بررسی اولیه در شکل ۳۰.۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳۰.۴ مشخص است

دو نقشه‌بردار تقریباً ۷-۶ متر از هم فاصله دارند. کنتاکت‌های زمین معمولاً گیره‌های فلزی شبیه یخ‌شکن‌های کفش کوهنوردی هستند که به چکمه‌های هر نقشه‌بردار متصل می‌شوند.



شکل ۲۹.۴. تصویر خروج سیگنال از محل پوشش معیوب در روش پیرسون و ACVG [۴۸]



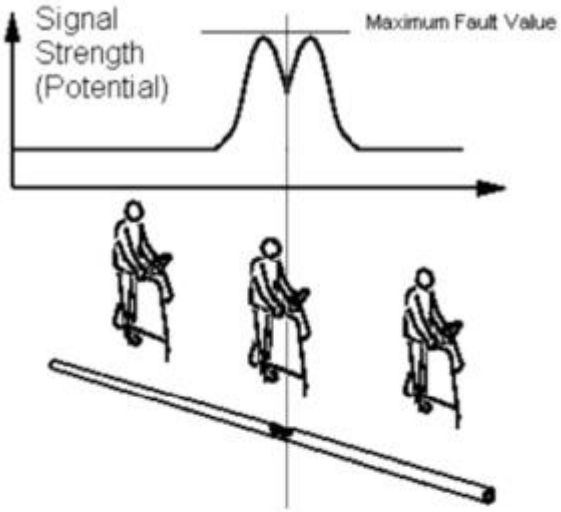
شکل ۳۰.۴. تصویر روش پیرسون در تشخیص محل پوشش معیوب در خط لوله [۴۹]

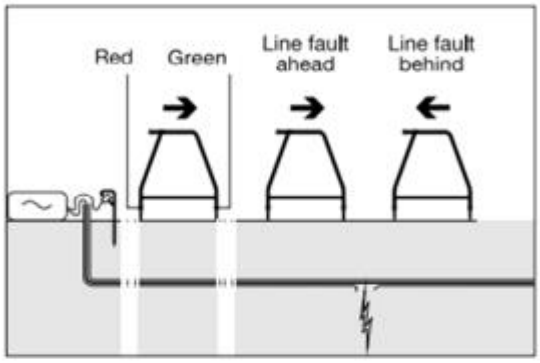
گیره‌ها توسط کابل عایق به گیرنده متصل می‌شوند. یک مجموعه از گیره‌ها به‌عنوان مرجعی برای مجموعهٔ دیگر عمل می‌کند. همان‌طور که نقشه‌بردار جلویی راه می‌رود، گیرنده افزایش

سیگنال را تشخیص می‌دهد که با عبور نقشه‌بردار دوم در پوشش معیوب، افزایش سیگنال تکرار می‌شود. سپس محل نقص برای حفاری و تعمیرات بعدی خطوط لولهٔ مدفون مشخص می‌شود. در شرایطی که تعداد عیوب پوشش در حد فاصل دو نفر زیاد باشد، تغییرات شدت سیگنال‌ها ممکن است منجر به خطا در تشخیص محل عیب باشد. با حرکت یکی از نفرات به‌صورت عمود بر راستای خط لوله تاحدودی این خطا را می‌توان کاهش داد. علاوه‌بر دریافت سیگنال با اندازه‌گیری پتانسیل، شدت تخریب پوشش را نیز می‌توان تخمین زد. برای نقاطی مثل جاده‌های آسفالتی که امکان اتصال زمین از طریق پین تعبیه‌شده در کفش‌ها وجود نداشته باشد، محدودیت وجود دارد.

اخیراً با روش گرادیان ولتاژ جریان متناوب (ACVG)، نیاز به اپراتور دوم با استفاده از دو چوب اسکی یا یک عصای دو پایهٔ A شکل، برای پشتیبانی از هر دو زمین حذف شده است (شکل ۳۱.۴). تماس‌ها (معمولاً ۱ متر از هم فاصله دارند). همچنین، خروجی صدا با یک صفحهٔ نمایش دیجیتال با فلش‌هایی که مکان‌های مؤثر را با قابلیت ثبت اطلاعات اضافی مشخص می‌کند، جایگزین شده است. اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل یا جریان در اثر وجود عیب و تبدیل آن به دسی‌بل صدا ($\text{Normalizing adjustment} = 20\times\log(i/i_{ref})$)، می‌تواند نقشه جریان خط لوله (PCM - Pipeline Current Mapping) را مشخص کند. این روش با استفاده از جریان‌های متناوب و با فرکانس‌های مختلف، قادر به تشخیص تداخل جریان استاتیکی و دینامیکی در محیط‌های شلوغ شهری است. در روش DCVG برخلاف نظرسنجی پیرسون و ACVG، به فرستنده نیاز ندارد. از جریان تحت تأثیر واحدهای CP استفاده می‌کند. به‌منظور تعیین محل عیوب پوشش، گرادیان ولتاژ توسط یک اپراتور با استفاده از دو الکترود مرجع در تماس با خاک در فاصلهٔ ثابت (معمولاً ۱ متر) اندازه‌گیری می‌شود. گرادیان ولتاژ جریان مستقیم (DCVG) دارای برخی از مزایای جالب توجه نسبت‌به نظرسنجی پیرسون که به‌تدریج منجر به ایجاد آن به‌عنوان روش ترجیحی برای تشخیص منافذ پوشش می‌شود. به‌طور مثال، نیروی کار در طول بررسی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، زیرا با یک اپراتور می‌تواند انجام شود و نیاز به نصب و جابجایی مداوم هیچ فرستنده دیگری در طی بررسی خط لوله ندارد. علاوه‌براین، شباهت تجهیزات اجازه می‌دهد تا این بررسی با بررسی پتانسیل فاصلهٔ نزدیک (CIPS) ترکیب و یک نظرسنجی ترکیبی حاصل شود. درحالی‌که هم DCVG و هم روش پیرسون ابزارهای بسیار مؤثری برای تعیین عیوب پوشش هستند، هیچ رابطهٔ کلی بین پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده و

اندازهٔ نقص را نمی‌تواند تشخیص دهد. روش DCVG هم به‌صورت دیجیتال و هم آنالوگ وجود دارد که هرکدام براساس نوع و میزان عیوب پوشش، کاربرد خاصی دارند. انتخاب نوع روش آزمون به ارزیابی‌های قبلی، جمع‌آوری اطلاعات بستگی دارد.



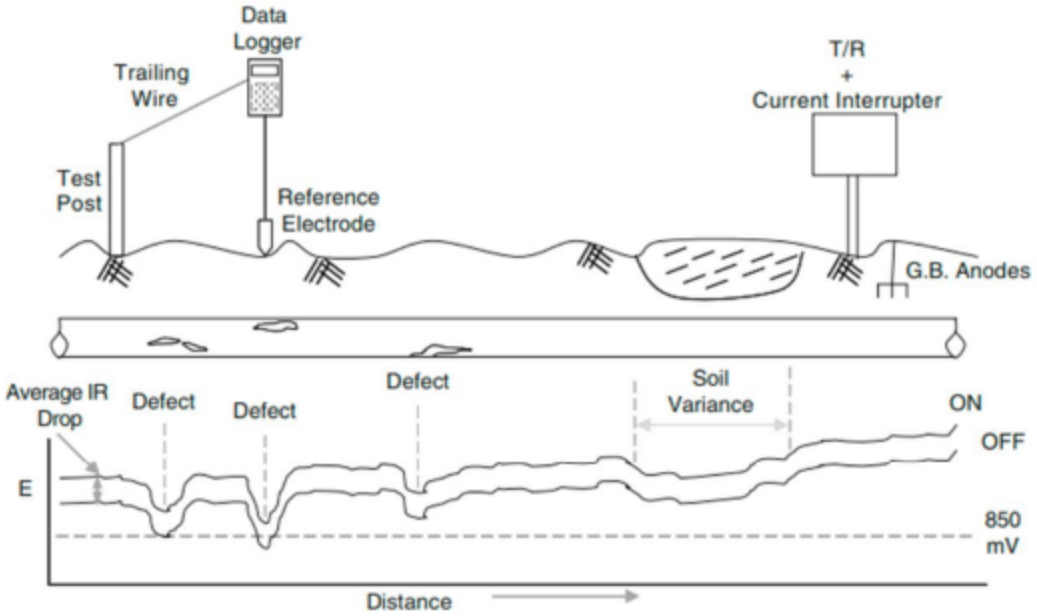


شکل ۳۱.۴. تصویر به‌کارگیری عصای دو پایه در روش ACVG [۵۱-۵۰]

۳.۴.۴. اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل نزدیک (CIPS) و افت IR

یکی از روش‌های اطمینان‌یابی از عملکرد حفاظت کاتدی، استفاده از روش قطع آنی است. رسم منحنی تغییرات پتانسیل برحسب طول خط لوله به‌صورت روشن و خاموش آنی می‌تواند کیفیت پوشش را نیز مشخص کند. پتانسیل در طول خط لوله به روش CIPS اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳۲.۴ تصویر روش اندازه‌گیری و تغییرات پتانسیل را در طول خط لوله نشان می‌دهد. وقتی جریان حفاظت به سازه می‌رسد، سطح سازه به‌صورت کاتدی پلاریزه و پتانسیل

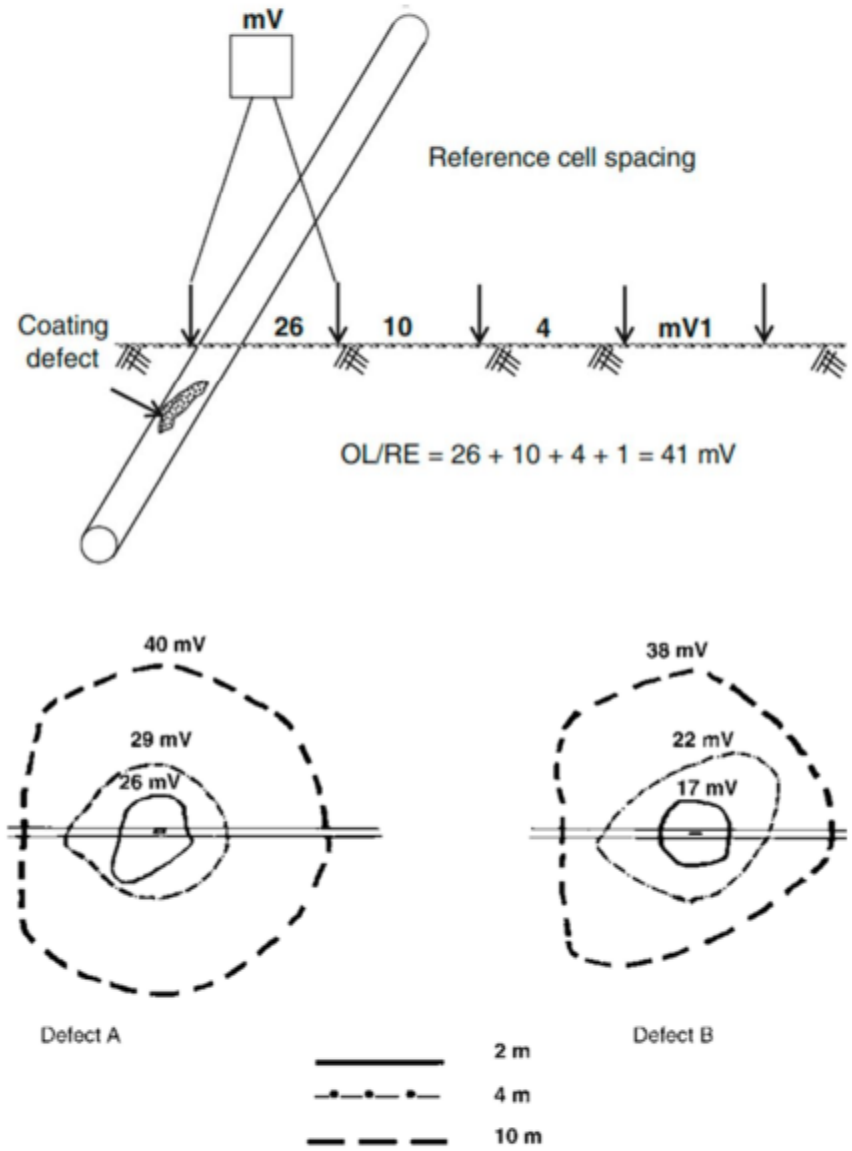
در محدودهٔ حداقلی ۸۵۰mV- می‌رسد. پس از پلاریزه شدن کامل سطح، چنانچه جریان حفاظت قطع شود، میزان پتانسیل سازه به الکترولیت پس از قطع شدن (در محدودهٔ زمان ۳ ثانیه پس از قطع شدن) می‌تواند نشان‌دهندهٔ جریان مورد نیاز و هم نشان‌دهندهٔ پتانسیل حفاظت باشد. با روشن و خاموش کردن مدار به‌نسبت ۴ به ۱، میزان دی‌پلاریزه شدن سطح جزئی بوده و خطایی متوجه معیار مذکور نخواهد شد. معیار افت IR در حفاظت کاتدی، این است که اختلاف پتانسیل البته بعد از روشن و خاموش کردن، باید در حدود و یا کمتر ۱۰۰mV باشد. این روش ممکن است پتانسیل لوله را از ۸۵۰mV- منفی‌تر نشان بدهد. شکل ۳۲.۴ اندازه‌گیری پتانسیل قطع آنی لولهٔ پلاریزه‌شده را نشان می‌دهد. این مسئله برای زمان روشن شدن هم اتفاق می‌افتد. اگر میزان افت IR بیش از اندازه شد، باید نسبت‌به تعمیر و بازسازی پوشش اقدام مقتضی به عمل آورد.



شکل ۳۲.۴. تصویر تغییرات پتانسیل در خط لوله در شرایط روشن و خاموش و افت IR [۵۲]

هرچه میزان عیوب پوشش بیشتر باشد، میزان افت IR بیشتر است. حتی درصد افت IR را می‌توان ملاکی برای لزوم تعمیرات پوشش سازه در نظر گرفت. درصد IR برحسب اندازه‌گیری پتانسیل خط لوله نسبت‌به زمین دور و پتانسیل روشن و خاموش کردن به‌صورت فرمول زیر به دست می‌آید. پتانسیل خط لوله نسبت‌به زمین دور در جهت عمود بر لوله اندازه‌گیری می‌شود. به‌طور مثال پتانسیل زمین در فاصلهٔ هر دو متر عمود بر لولهٔ بدون عیب تا فاصله‌ای که

پتانسیل به صفر نزدیک شود، ادامه می‌یابد. این فاصله به‌عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود. پتانسیل در همین فواصل در نزدیکی محل عیب اندازه‌گیری می‌شود. پتانسیل در هر دو متر با هم جمع و به‌عنوان پتانسیل OL/RE در فرمول جاگذاری می‌شود. به‌طور مثال درصد عیب در نزدیکی عیب با افت IR ۱۰۰ میلی‌ولتی برای سه مورد شکل ۳۳.۴ به‌ترتیب برابر ۲۹، ۴۹ و ۴۳ درصد برآورد می‌شود.



شکل ۳۳.۴. تصویر موقعیت اندازه‌گیری پتانسیل [۵۲]

مطابق استاندارد NACE SP0502-2008 (جدول ۲۳.۴) اگر میزان افت IR بیش از ۶۱ درصد شد، الزام به تعمیر فوری پوشش وجود دارد. میزان افت زیر ۱۵ درصد نیاز به بازسازی پوشش ندارد.

$$\%IR = \frac{OL/RE}{(ON_{POT.} - OFF_{POT.}) + OL/RE} \cdot 100\%$$

where:
- % IR - Severity of coating defect
- OL/RE - Over the line-to-remote earth potential
- $ON_{POT.}$ - ON potential of defect epicentre
- $OFF_{POT.}$ - Polarised (Instant OFF) potential of defect epicentre

جدول ۲۳.۴. میزان میزان درصد افت IR با میزان تخریب پوشش [۵۳]

Coating Damage Severity Classification	
Percent IR (% IR)	Coating Damage Severity Class
1 – 15	**Small**
16 – 35	**Medium**
36 – 70	**Large**
71 or above	**Very Large**

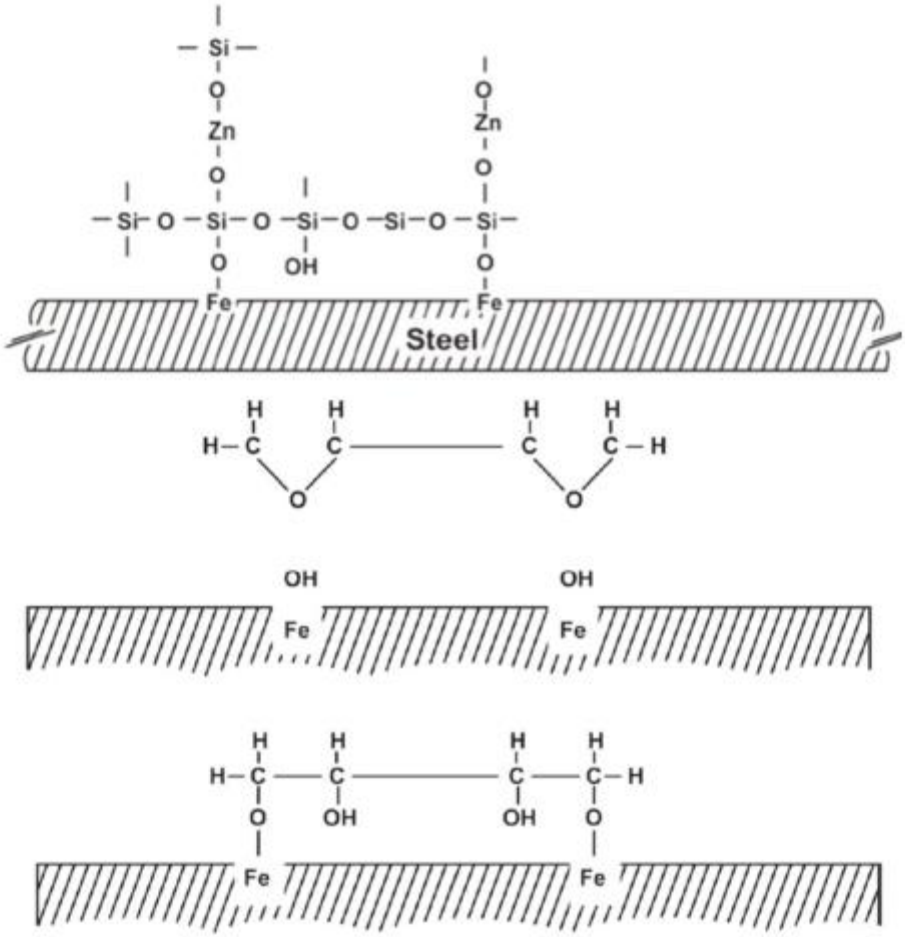
۵.۴. پوشش رنگ

رنگ محصولی مایع حاوی رزین، رنگ‌دانه، حلال و یک سری افزودنی است که وقتی روی یک سطح زمینه اعمال می‌شود، یک لایه با ویژگی‌های حفاظت‌کنندگی، تزیینی یا کاربرد خاصی را ایجاد می‌کند. رنگ در دسته‌بندی پوشش‌های آلی قرار دارد. هدف از اعمال رنگ بر روی سازه‌ها، تشکیل یک لایهٔ فیلم پلیمری به‌منظور حفاظت از خوردگی، ایجاد مقاومت مکانیکی، مقابله با میکرو و ماکروارگانیسم‌ها، علامت‌گذاری و در بعضی موارد هم برای سلامت و بهداشت مواد غذایی و دارویی است. فیلم با خاصیت ترموست یا ترموپلاست با مکانیسم شیمیایی، قطبی (فیزیکی) یا مکانیکی بر روی سطح می‌چسبد.

در مکانیسم شیمیایی، رنگ یک پیوند قوی شیمیایی با اتم‌های سطح فلز برقرار می‌کند. درواقع چسبندگی شیمیایی از طریق واکنش‌های شیمیایی بین پوشش و زمینه، نیروهای بین مولکولی یا پیوندهای شیمیایی ایجاد می‌کند. نیروهای بین مولکولی و پیوندهای شیمیایی مؤثرترین پیوند را در بین تمام روش‌های چسبندگی ارائه می‌دهند. به‌طور مثال، مولکول‌های اپوکسی به زمینهٔ فلزی مثل فولاد با گروه‌های هیدروکسید فلزی که از طریق واکنش تراکم تشکیل می‌شوند، چسبندگی ایجاد می‌کند (شکل ۳۴.۴). می‌توان گفت که چسبندگی شیمیایی یک ترکیب شیمیایی جدید است که محکم به پوشش و زمینه پیوند برقرار می‌کند.

چسبندگی قطبی یک مکانیسم ایجاد چسبندگی و اتصال برای پوشش‌های آلی است که با جذب مولکول‌های رزین به بستر ایجاد می‌شود (شکل ۳۵.۴). چسبندگی قطبی تنها زمانی

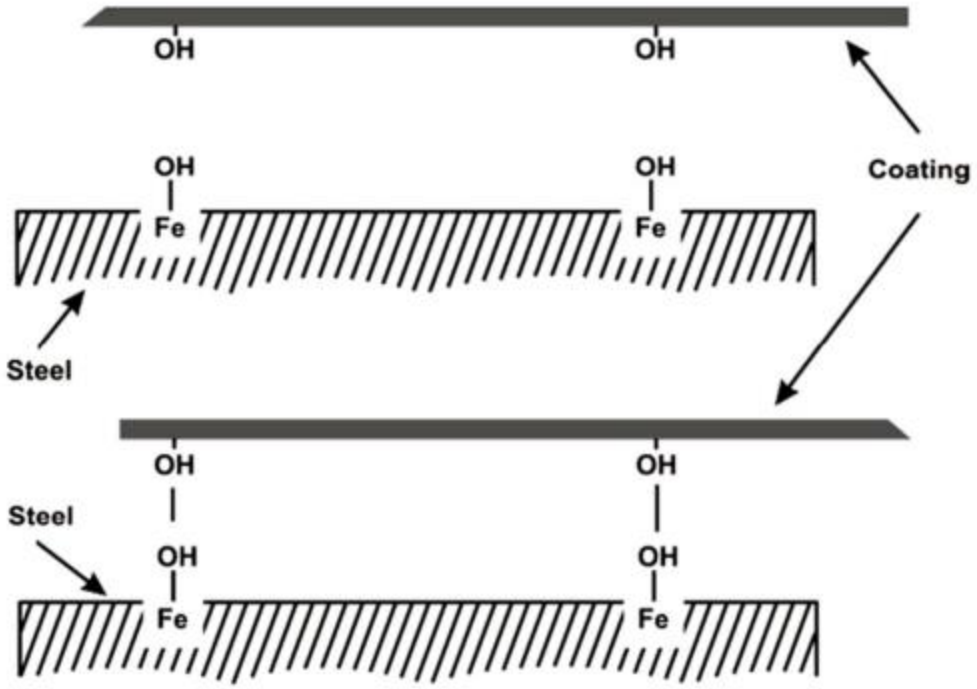
امکان‌پذیر است که پوشش و بستر دارای قطبیت یکسانی باشند. یعنی سطح پوشش و سطح فلز هر دو باید مثبت یا منفی باشند و به یک قطب منفی یا مثبت مابین دو قطب مثبت و منفی پوشش و زمینه پیوند قطبی ایجاد کنند. با توجه به اینکه کشش سطحی پوشش‌ها نسبت‌به زمینهٔ فلزی کمتر است با زاویهٔ تماس کمتر از ۹۰ درجه سطح فلز را خیس کرده و باعث می‌شود که پوشش به سطح بچسبد. مثل رنگ وینیل با فولاد. پیوند قطبی به دو صورت واندروالسی و هیدروژنی است. پیوند واندروالس از پیوند قطبی و پیوند قطبی از پیوند شیمیایی ضعیف‌تر است.

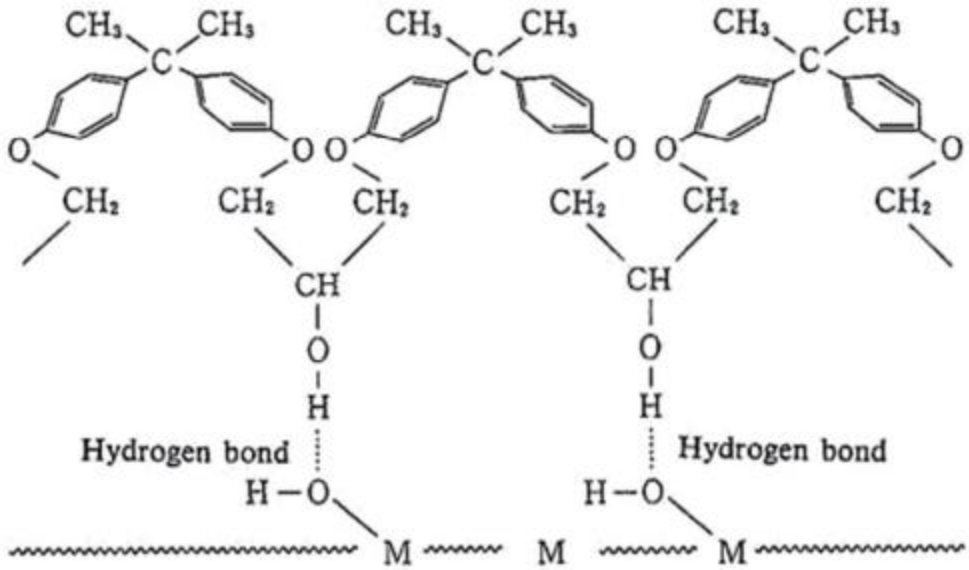


شکل ۳۴.۴. شماتیک پیوند شیمیایی رنگ سیلیکات روی آلی و اپوکسی با فولاد [۵۴]

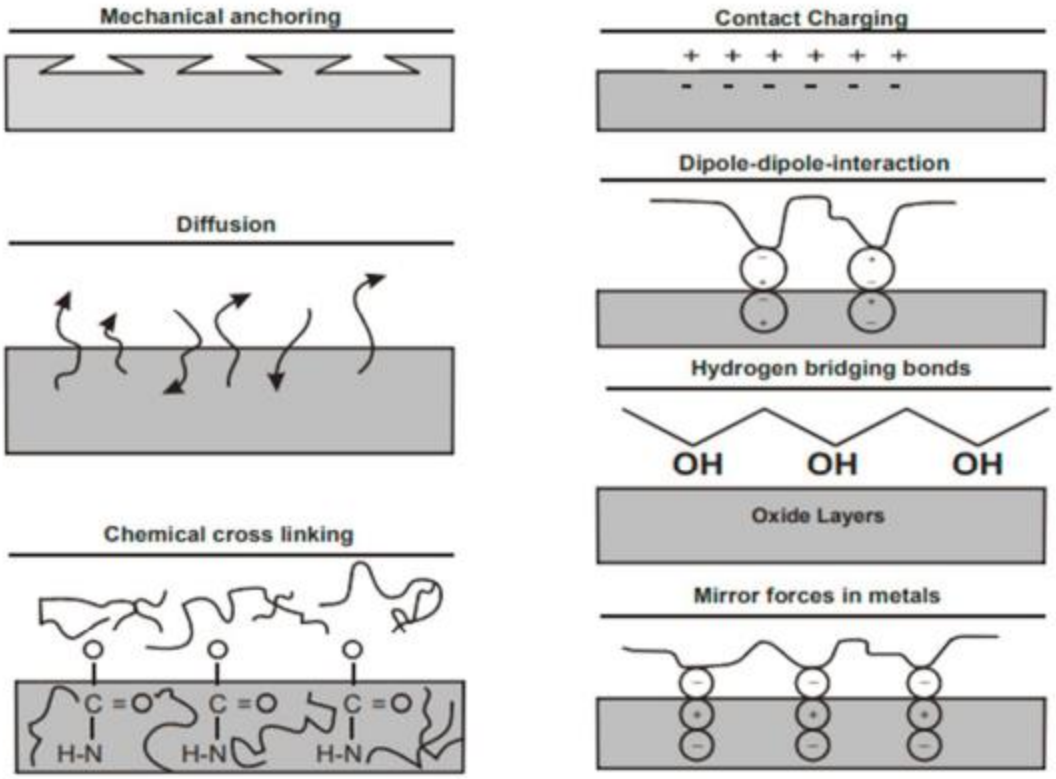
در مکانیسم چسبندگی مکانیکی هم در اثر فرورفتگی و قفل‌شدگی (مثل لنگر کشتی و یا قلاب دست) فیلم پوشش با سطح زبر فلز همراه با یکی از دو مکانیسم پیوند شیمیایی یا قطبی پیوند ایجاد می‌شود. چسبندگی مکانیکی با زبری سطح مرتبط است. مهم‌ترین عامل برای چسبندگی مکانیکی تعداد برآمدگی و فرورفتگی موجود بر روی زمینه است. توپوگرافی سطح به پوشش اجازهٔ نفوذ و پر کردن فرورفتگی را می‌دهد و درنتیجه مناطقی بین پوشش و بستر ایجاد

می‌شود. پوشش باید از منطقه برآمدگی هم بالاتر بیاید. قدرت پرکنندگی پوشش مستقیماً با ویسکوزیتهٔ آن مرتبط است. شکل‌های ۳۶.۴ و ۳۷.۴ تصویر مقایسهٔ انواع چسبندگی شیمیایی و مکانیکی به زمینهٔ فلزی را نشان می‌دهد. محیط اتمسفر یکی از کاربردهای اصلی رنگ محسوب می‌شود. براساس میزان و شدت آلودگی درجه‌بندی C1 تا C5 ارائه شده است (جدول ۲۴.۴).

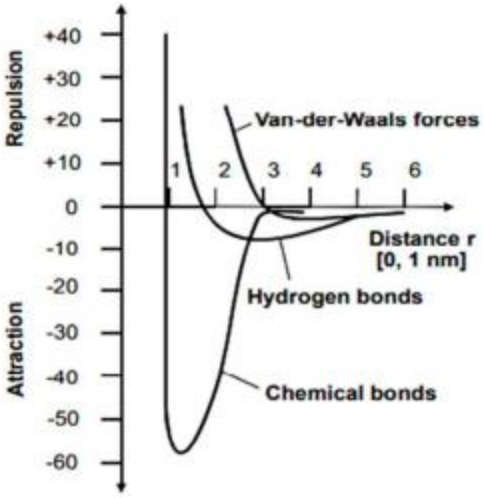




شکل ۳۵.۴. پیوند قطبی و هیدروژنی رنگ اپوکسی با زمینهٔ فلزی [۵۴]



شکل ۳۶.۴. تصویر مقایسه انواع چسبندگی شیمیایی و مکانیکی به زمینهٔ فلزی [۵۴]



Type of van-der-Waals forces	Average energy	Range
Orientation forces Dipole-dipole (Keesom forces	24 kJ / mol	$E = \frac{2\mu^4}{3k\,Tr^6}$
Induction forces Dipole-induced dipole (Debye forces)	15-20 kJ / mol	$E = \frac{2\alpha \cdot \mu^2}{r^6}$
Dispersion forces (London forces)	5-10 kJ / mol	$E = \frac{3h\nu_0 \cdot \alpha}{4r^6}$
Hydrogen bridging bonds	40-50 kJ / mol	$E = e^{-Kr}$

شکل ۳۷.۴. مقایسهٔ پیوندهای شیمیایی، هیدروژنی و واندروالس [۵۴]

۱.۵.۴. ترکیب رنگ

به‌طورکلی رنگ‌ها از چهار جزءِ اصلی رزین (بایندر)، رنگ‌دانه (پیگمنت)، حلال و مواد افزودنی تشکیل می‌شوند. رنگ با مخلوط شدن قاعده‌مند اجزای اصلی، افزودن محلول، آسیاب و اختلاط نهایی ساخته می‌شود. اسم رنگ‌ها براساس نوع رزین آنها مشخص می‌شود مثل رنگ آلکیدی

که نوع رزین آن آلکید و یا رنگ اپوکسی که رزین آن اپوکسی است. اینکه چه رنگی در چه محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌طورکلی در جدول‌های ۲۵.۴ تا ۲۶.۴ ارائه شده است. ممکن است سازندگان رنگ تجربه‌های دیگری دربارهٔ رنگ خود داشته باشند که در کاتالوگ‌های شرکتشان به آنها اشاره می‌کنند. رنگ‌ها به‌صورت مایع و پودر هستند. اصل کلی در رنگ پودری این است که یک پوشش از رزین‌های جامد، رنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی تحت هم‌زدن برشی فرموله و مخلوط و جامد حاصل پودر شود. پودر روی فلز، اعمال می‌شود و با پخت، به یک فیلم پیوسته تبدیل می‌شود. بیش از ۹۰ درصد رنگ‌های پودری ترموست هستند. از رنگ‌های پودری می‌توان به اپوکسی، پلی‌اورتان، آکریلیک و پلی‌استر یا حالت هیبریدی از این رزین‌ها اشاره کرد. اکثر پوشش‌های پودری با فرایند مشابه رنگ مایع تولید می‌شوند: پیش اختلاط، اکستروژن مذاب و پودر کردن. همهٔ مواد اصلی باید جامد باشند.

جدول ۲۴.۴. دسته‌بندی محیط اتمسفری براساس سرعت خوردگی در سال اول براساس استاندارد ISO223 [۵۵]

Corrosivity categories	Former AS/NZS 2312 Category	Corrosion rate for steel µm/year	Corrosion rate for zinc µm/year	Typical exterior environment	Examples of interior environments
C1: Very low	A	<1.3	<0.1	Few alpine areas	Offices, shops
C2: Low	B	1.3 to 25	0.1 to 0.7	Arid/rural/urban	Warehouses, sports halls
C3: Medium	C	25 to 50	0.7 to 2.1	Coastal	Food processing plants, breweries, dairies
C4: High	D	50 to 80	2.1 to 4.2	Sea-shore (calm)	Swimming pools, livestock, buildings
C5-I: (Industrial)	E-I	80 to 200	4.2 to 8.4	Within chemical plants	Plating shops, chemical sites
C5-M: Very high (Marine)	E-M	80 to 200	4.2 to 8.4	Sea-shore (surf)/ offshore	—
CX	—	200 to 700	8.4 to 25	Shoreline (severe surf)	Adjacent to acidic processes
T: Inland Tropical	F	—		Non-coastal tropics	

۱.۱.۵.۴. رزین

نقش رزین در رنگ شامل تشکیل فیلم محافظ، ایجاد پیوند، ایجاد پیوستگی بین اجزای رنگ و شفافیت را دارد. رزین درواقع پلیمری است که روی سطح فلز با مکانیسم پلیمریزاسیون به‌صورت ترموپلاست یا ترموست، جرم مولکولی‌اش بزرگ شده و نقش حفاظت را ایفا می‌کند. برخلاف

فرایندهای تشکیل فیلم از رنگ‌های ترموست و ترموپلاست، امکان هم‌جوشی بین ترکیبات پلیمری نیز وجود دارد. در بعضی موارد رزین با وزن مولکولی سنگین‌تر چسبندگی کمتری، ولی مقاومت مکانیکی بالاتری دارد. رزین با مکانیسم تبخیر حلال و یا ترکیب با اکسیژن یا بخار آب هوا و یا ترکیب با یک سخت‌کننده بر روی سطح خشک می‌شود. رزین‌ها عمدتاً سنتزی و در بعضی موارد به‌طور جزئی از شیرهٔ درختان تهیه می‌شود. از عمده رزین‌های سنتزی می‌توان به رزین‌های الکید، پلی‌استر، اپوکسی، پلی‌اورتان، سیلیکون، ونیل، آکریلیک و فنولیک اشاره کرد. جدول ۲۷.۴ مزایا و معایب رزین‌های مختلف و کاربرد آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۲۵.۴. پیشنهاد برای استفاده از رنگ‌ها در محیط‌های مختلف [۵۶]

	Acids	Alkalies	Salts	Solvents	Water	Weather	Oxidation	Abrasion
Oil base	1	1	6	2	7	10	1	4
Alkyd	6	6	8	4	8	10	3	6
Chlorinated rubber	10	10	10	4	10	8	6	6
Coal-tar epoxy	8	8	10	7	10	4	5	4
Catalyzed epoxy	9	10	10	9	10	8	6	6
Silicone aluminum	4	3	6	2	8	9	4	4
Vinyl	10	10	10	5	10	10	10	7
Urethane	9	10	10	9	10	8	9	10
Zinc (inorganic)	1	1	5	10	5	10	10	10

A value of 10 represents the best protection.

جدول ۲۶.۴. مقاومت رنگ‌های مختلف براساس نوع رزین در برابر انواع محیط‌ها [۵۷]

	Alkyd	Alkyd Amino	Baking Polyester	Modified (Styrenated) Alkyd	Acrylic	Cellulose (Lacquer)	Catalyzed Epoxy	Urethane
Exterior durability	E	E	E	G	E	E	G	E
Salt spray	E	G	G	G	E	E	E	E
Alkali resistance	P	F	G	G	G	P	E	F
Solvent aliphatic	G	E	E	F	F	F	E	E
Solvent ketone	P	P	G	P	P	P	G	E
Flexibility	E	G	E	G	E	E	F	E
Impact	G	E	E	G	E	E	G	E
Heat resistance	G	G	E	G	G	P	G	G
Color retention	G	G	E	G	E	E	F	E
Gloss retention	E	G	E	F	E	G	P	E

E = excellent; G = good; F = fair; P = poor.

جدول ۲۷.۴. مزایا و معایب و کاربرد رنگ‌های مختلف براساس نوع رزین [۵۸]

Resin	Favorable characteristics	Unfavorable characteristics	Uses
Acrylic	Water white, outdoor durability, chemical, heat resistance	Poor-fair adhesion tendency to be brittle	Automotive topcoats appliances, coil coatings, aluminum siding, general industrial use
Alkyd	High gloss, flexibility, good durability, versatility	Poor alkali resistance, generally not hard, tendency to yellow, depending on resin	Trade sales enamels, trim paints, exterior enamels, general metal finishing
Epoxy	Excellent adhesion, chemical resistance, flexibility, abrasion resistance, hardness	Rapid chalking on exterior exposure, poor resistance to oxidizing acids, yellows in clears	Maintenance paints, automotive primers, appliances, metal products
Vinyl	Chemical resistance, flexibility, fast air dry, formability, resistance to acid, alkali, abrasion	Generally low solids, low flash points	Can and tank linings, maintenance paints, metal decorating paints
Silicone	High heat resistance, exterior durability, gloss and color retention	Tendency toward brittleness. Unmodified types require high baking temperatures	Any finish for high heat resistance, exterior metal coatings
Polyester	High gloss, hardness, chemical resistance, high film build	Fair adhesion, may hydrolize under certain conditions	Wood finishes, coil coatings, specialty bake coats
Polyurethane	Chemical resistance, abrasion resistance hardness, exterior durability	Some types yellow and chalk readily on exterior exposure	Aircraft finishes, maintenance paints, metal and plastic coatings

۲.۱.۵.۴. رنگ‌دانه

رنگ‌دانه یا پیگمنت جزءِ دوم رنگ است. رنگ‌دانه مواد جامد و عمدتاً دارای ساختار کریستالی است که به‌منظور رنگ ظاهری یا فام، حجم‌دهنده، افزایش استقامت مکانیکی رنگ، ایجاد چسبندگی و براقیت بیشتر، تنظیم رئولوژی و یا افزایش مقاومت به خوردگی سطح سازه به ترکیب رنگ افزوده می‌شود. بعضی رنگ‌دانه‌ها مثل روی و ترکیبات مختلف آن، فقط در رنگ پرایمر (لایهٔ اول) اضافه می‌شوند. ترکیبات اکسید مس (رنگ دانهٔ قرمز) و برخی ترکیبات آلی فلزی، مانند اکسید تری‌بوتیل قلع (TBTO)، تری‌بوتیل قلع فلوراید (TBTF) و تری‌فنیل قلع فلوراید (TPTF) به‌عنوان رنگ‌دانه‌های آنتی‌فاولینگ در رنگ رویه برای سازه‌های دریایی استفاده می‌شوند (جدول ۲۸.۴).

جدول ۲۸.۴. انواع رنگ‌دانهٔ آلی و معدنی مصرفی در ساخت رنگ [۵۹]

Colour	Inorganic	Organic
Black	Carbon black Copper carbonate Manganese dioxide	Aniline black
Yellow	Lead, zinc, and barium chromates Cadmium sulphide Iron oxides	Nickel azo yellow
Blue/violet	Ultramarine Prussian blue Cobalt blue	Phthalocyanin blue Indanthrone blue Carbazol violet
Green	Chromium oxide	Phthalocyanin green
Red	Red iron oxide Cadmium selenide Red lead Chrome red	Toluidine red Quinacridones
White	Titanium dioxide Zinc oxide Antimony oxide Lead carbonate (basic)	—

شکل ذرات رنگ‌دانه به‌صورت ذرات میکرونی کروی، سوزنی، صفحه‌ای، الیافی کلوخه‌ای است. رنگ‌دانه به سه صورت نقش پُرکنندگی، ایجاد رنگ ظاهری و در مواردی هم به‌صورت نقش فلورسنتی در صنعت معرفی می‌شوند. ازجمله رنگ‌دانه‌های پرکننده یا اکستندرها که در بعضی موارد بیش از ۵۰ درصد وزنی رنگ را تشکیل می‌دهد می‌توان به کربنات کلسیم، سولفات باریم، سیلیکات منیزیم، میکا و پنبه نسوز اشاره کرد. اکستندرها درواقع ذرات پیگمنت بزرگ‌تری هستند که باعث افزایش چسبندگی و استحکام لایهٔ فیلم رنگ و نگهداری رزین می‌شود. رنگ دانه‌های پوششی به دو دستهٔ معدنی و آلی تقسیم می‌شوند. از رنگ‌دانه‌های سفید معدنی می‌توان به اکسید و سولفید روی، دی‌اکسید تیتانیم، تری‌اکسید آنتیموان و کربنات، سولفات و سیلیکات سرب اشاره کرد. از رنگ دانه‌های رنگی معدنی اکسید قرمز آهن، اکسید سیاه آهن، اکسید قهوه‌ای آهن، کروم زرد، کروم سبز، مولیبدات نارنجی، سرب قرمز، کرومات روی زرد نام برد. بعضی از رنگ‌دانه‌ها متالیک هستند و وقتی رنگ در معرض نور مستقیم قرار می‌گیرد، تلألو و براقیت خاصی دارند. از رنگ دانه‌های متالیک می‌توان به پودر خمیر آلومینیم، پودر برنز و پودر فلز روی اشاره کرد. رنگ دانه‌های آلی عمدتاً منشأ گیاهی دارند. مثل رنگ دانهٔ روناس، کلروفرم، گیاه نیل از مواد سنتزی پایهٔ آزول‌ها، آنتراکیون‌ها، اسید فسفومولبدیک و تنگسیت هم می‌توان رنگ‌دانه ساخت.

۳.۱.۵.۴. حلال

حلال، رقیق‌کننده یا به اصطلاح تینر (Thinner)، جزءِ سوم رنگ است. حلال‌ها یا آب و یا مواد آلی هستند که باعث تنظیم ویسکوزیته، متعادل کردن سرعت تبخیر فیلم تر، حل کردن اجزای رنگ در یکدیگر است. در بعضی موارد حلال‌ها نقش جلادهندگی نیز دارند. اینکه چه حلالی برای چه رزینی به کار می‌آید بستگی به قطبیت رزین و حلال دارد. از عمدهٔ حلال‌های غیرآبی می‌توان به وایت اسپریت، اگزالین، بوتانل، تریکلرواتیلن، آیزوپروپیل الکل، استن و متیل اتیل کتون اشاره کرد. با توجه به تبخیر حلال خصوصاً هیدروکربن‌ها، حلال‌های آب به‌لحاظ بو و تنفس اتمسفر بهتر است (جدول‌های ۲۹.۴ و ۳۰.۴).

جدول ۲۹.۴. انواع حلال مصرفی در ساخت رنگ [۵۹]

Solvent	BP (°C)	FP (°C)	TLV (ppm)
Ketones			
Acetone	57	−17	750
Methyl ethyl ketone	80	−4	200
Methyl isobutyl ketone	116	13	100
Diacetone alcohol	168	54[†]	50
Di isobutyl ketone		47	
Esters			
Ethyl acetate	77	−3	400
Isobutyl acetate	118	16	
n-Butyl acetate	127	25	150
2-Ethoxyethyl acetate	156	52[†]	50
2-butoxyethyl acetate	1	115[†]	
Alcohols			
Methanol	65	10	200
Ethanol	78	12	1000
n-Propanol	97	22	200
Isopropanol	82	10	400
n-butanol	118	33	50
Isobutanol	108	27	50
Sec butanol	100	14	
Hydrocarbons			
Toluene	111	5	100
Xylene	138–144	24	100
White spirit (LAWS)	155–195	39	500
SBP 6	138–165	28	—

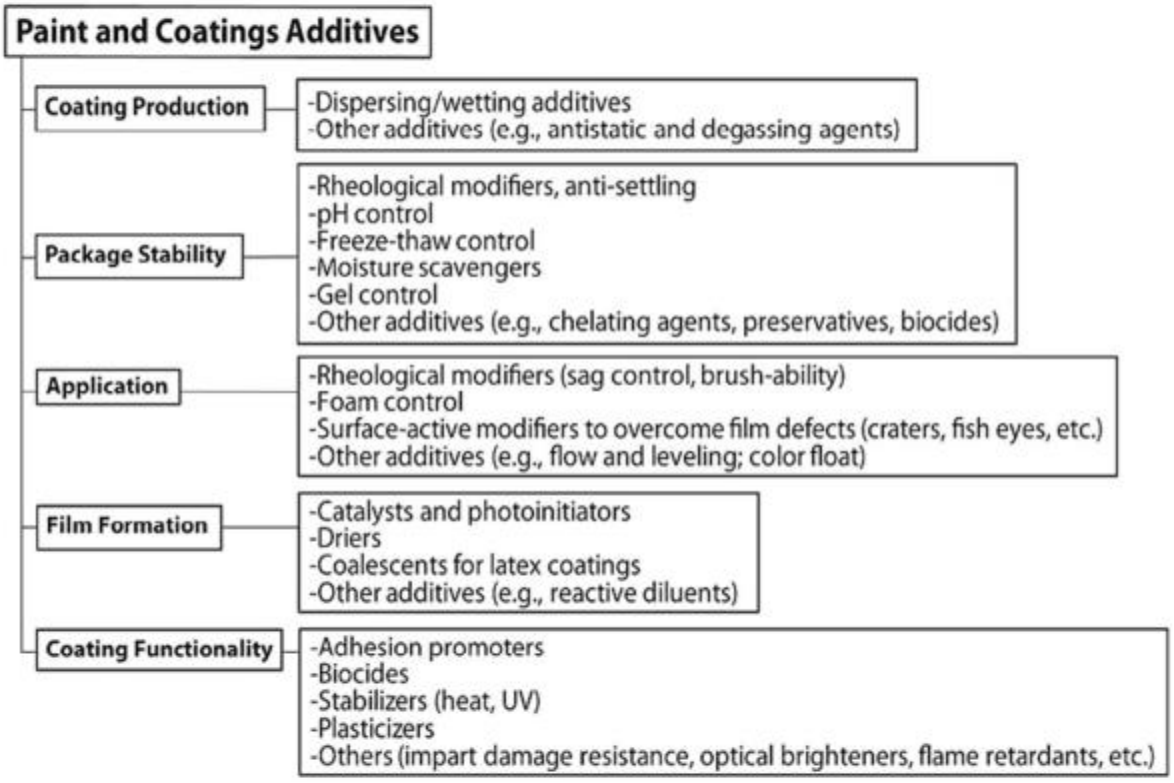
Boiling points (BP), flashpoints (FP), and threshold limit values (TLV) for some common solvents

جدول ۳۰.۴. انواع تینر برای رنگ‌های مختلف [۶۰]

Thinners	Coatings
Mineral spirits; Aromatics (benzene, xylol, toluol); Ketones (MEK, MIBK); Alcohols (isopropyl); Water.	Oils and alkyds; Coal tar epoxies, alkyds, chlorinated rubbers; Vinyls, epoxies, urethanes ; Phenolics, inorganic zincs ; Acrylics, some inorganic zincs.

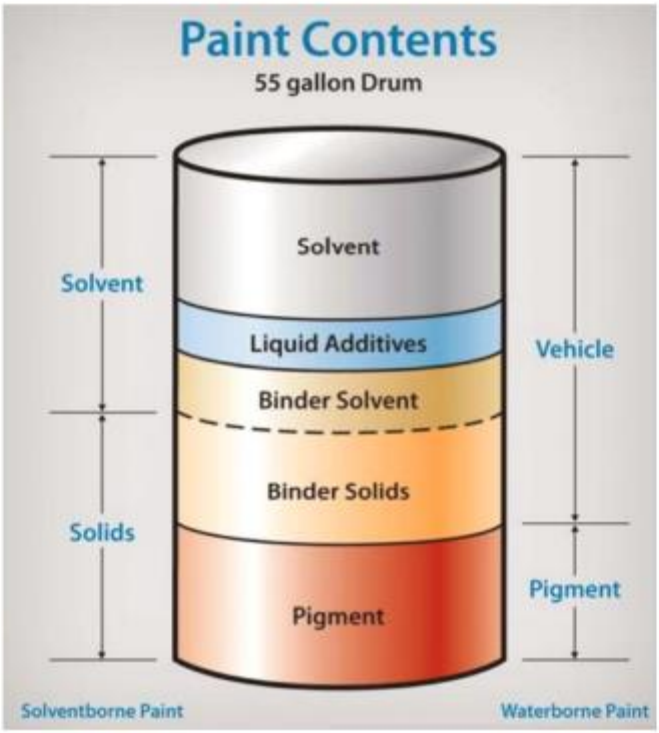
۴.۱.۵.۴. مواد افزودنی

مواد افزودنی چهارمین جزءِ رنگ هستند که با وجود درصد کم، تنوع و نقش‌های زیادی در بهبود خواص رنگ تر و فیلم خشک دارند. این موارد به‌لحاظ دسته‌بندی به ۲۱ مورد بالغ می‌شوند که عمده‌ترین آنها عبارت‌اند از مواد خشک‌کننده، مواد ضدپوسته، ضخامت‌دهنده، پخش‌کننده، هم‌سطح‌کننده، بازدارنده‌های خوردگی، مواد ضدکف، مواد ضدمیکرو و ماکروارگانیسم‌ها، تثبیت‌کنندهٔ pH، مواد ضدیخ و مواد جلوگیری از کلوخه‌ای شدن (شکل ۳۸.۴).

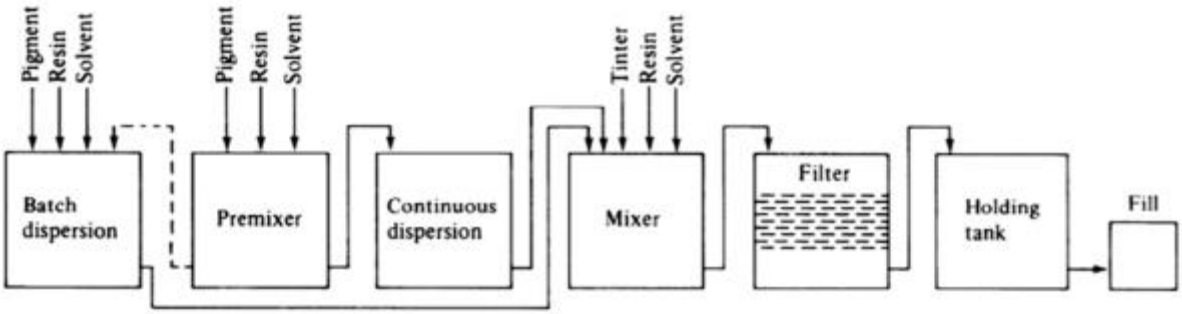


شکل ۳۸.۴. دسته‌بندی مواد افزودنی رنگ [۶۱]

بسته به نوع رنگ، ترکیب آن می‌تواند متفاوت باشد. رنگ‌دانه به‌صورت پرکننده (اکستندر) و یا ایجاد فام رنگ و حلال بیشترین حجم وزن را تشکیل می‌دهند. رزین و افزودنی‌ها در مرتبهٔ بعدی قرار دارند. شکل ۳۹.۴ تصویری از حجم بشکهٔ رنگ ۵۵ گالنی را برحسب محتویات آن برای رنگ قابل اعمال بر روی پلاستیک نشان می‌دهد. شکل ۴۰.۴ طرح‌وارهٔ فرایند و مراحل ساخت رنگ را نشان می‌دهد.



شکل ۳۹.۴. ترکیب یک نمونه رنگ و مقدار حجمی حدودی آنها [۶۲]



شکل ۴۰.۴. طرح‌وارهٔ فرایند و مراحل ساخت رنگ [۵۹]

۲.۵.۴. روش‌های کنترل کیفی رنگ

رنگ‌ها در سه حالت مایع، تر و خشک قبل، حین و بعد از اعمال روی سطح مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. تعداد آزمایشات رنگ بالغ بر ۷۰ آزمون است که در استاندارد ASTM D3358 ارائه شده است. آزمون‌ها در دسته‌بندی‌های خواص فیزیکی رنگ مایع، آزمون‌های شیمیایی، خواص فیلم تر، خواص نوری، خواص مکانیکی (خمش، خراش، ضربه، شکل‌پذیری، پاندول و سختی)، آزمون‌های دوام (مقاومت پرایمر به محیط قلیایی، مقاومت به رطوبت در شرایط چگالش، هوازدگی مصنوعی در برابر قوس کربن، پاشش نمک پیوسته، مقاومت در برابر نور، آزمون هوازدگی طبیعی، غوطه‌وری در آب، مقاومت در برابر جداشدگی پوشش در آب دریا و خاک، مقاومت به خوردگی فیلامنتی) آزمون‌های محیطی و عیوب رنگ نیز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

آزمون‌های مهم برای کنترل کیفیت رنگ قبل از اجرا شامل موارد زیر است:

- خواص ظاهری رنگ در قوطی شامل شرایط عمومی رنگ، پوستهٔ معلق، قابلیت انبار شدن (زمان عمر رنگ)،
- درصد ترکیب رنگ شامل مواد فرار و غیرفرار، درصد رنگ‌دانه، درصد آب،
- درجهٔ پخش‌شدگی رنگ‌دانه در رنگ توسط دستگاه گریندومتر،
- اندازه‌گیری ویسکوزیته،
- اندازه‌گیری وزن مخصوص
- اندازه‌گیری درصد مواد فرار مطابق استاندارد،
- اندازه‌گیری نقطهٔ اشتعال مطابق استاندارد،
- اندازه‌گیری قدرت پوشش‌دهی یا محوکنندگی سطح زیر رنگ،

آزمون‌های رنگ تر شامل موارد زیر است:

- آزمون قلم‌خوری،
- آزمون شره کردن در سطح عمودی،
- اندازه‌گیری ضخامت فیلم تر،
- اندازه‌گیری قدرت پوشش فیلم تر
- اندازه‌گیری زمان خشک شدن فیلم تر،

آزمون‌های فیلم خشک شامل موارد زیر است:

- اندازه‌گیری ضخامت به روش مخرب و غیرمخرب (روش مغناطیسی و الکتریکی)،
- خصوصیات فیلم نوری (دوام براقیت و درجهٔ هم‌رنگی)،
- خواص مکانیکی شامل سختی (به روش خراش، آونگ، مدادهای سخنی‌سنج، سوزن ته‌گرد)،
- انعطاف‌پذیری (خمش و اریکسون)، آزمون ضربه، مقاومت به سایش (با سمباده)،
- آزمون چسبندگی (کارد آرکو، هاندس فیلد و خراش متقاطع)،
- مقاومت به رطوبت و محیط خورنده (آزمون رطوبت، پاشش نمک، غوطه‌وری، آزمون شوره‌زدگی، ورآمدن رنگ، مقاومت در برابر حرارت).

جدول ۳۱.۴ استانداردهای آزمون رنگ قبل از اجرا را نشان می‌دهد.

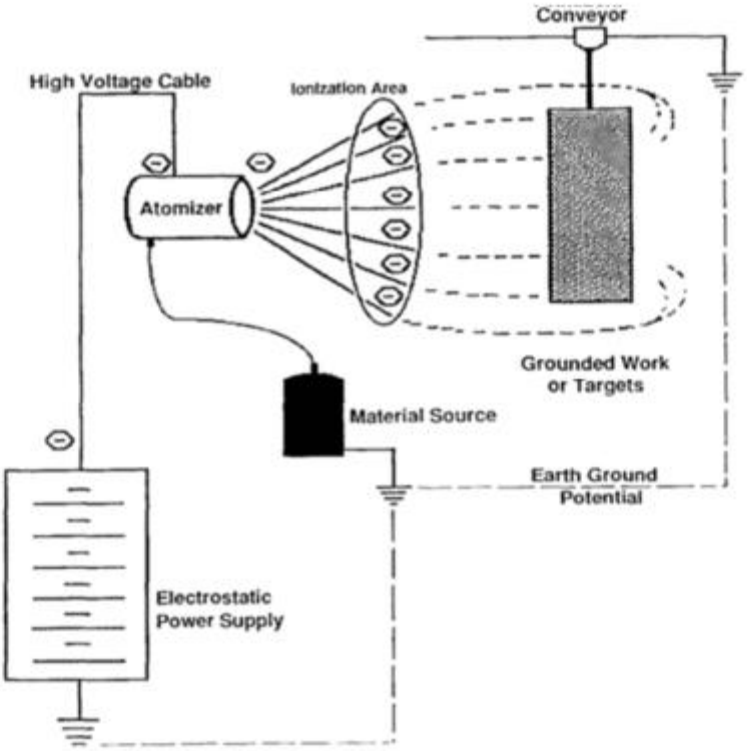
جدول ۳۱.۴. استانداردهای آزمون رنگ قبل از اجرا [۶۳]

Wet or liquid tests	ASTM	Dry film performance tests	ASTM
Nonvolatile (solids content)	D 2369	Hiding power	D 344, D 2805
Vehicle solids	D 2698	Specular gloss	D 523
Pigment content	D 2698	Abrasion resistance	
Weight per gallon	D 1475	Falling sand	D 968
Flash point	D 56, D 93, D 92	Taber abraser	D 1044
Viscosity		Adhesion	D 2197
Ford cup	D 1200	Dry film thickness	
Brookfield	D 2196	Magnetic gage	D 1186
Stormer	D 562	Mechanical gage	D 1005
Zahn	D 3794	Hardness	
Gardner Holt tubes	D 1545	Pencil	D 3363
Reducibility and dilution stability	.....	Sward Roeker	D 2143
Drying time	.....	Indentation	D 1474
		Humidity resistance	D 2247
		Salt spray resistance	B 117

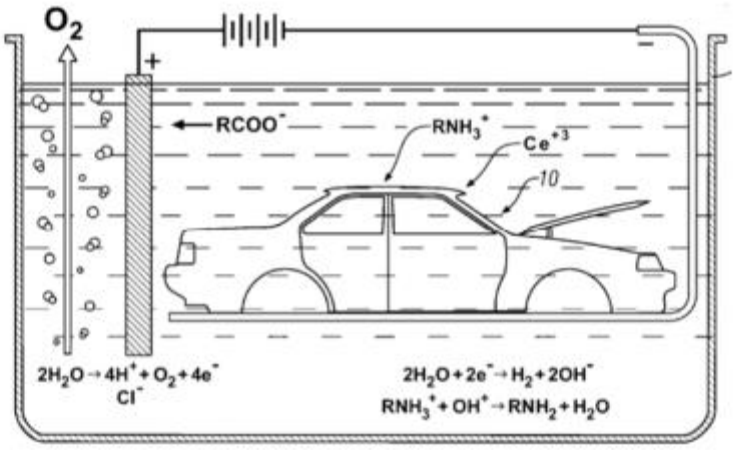
۳.۵.۴. روش‌های اعمال رنگ

روش‌های اعمال رنگ عبارت‌اند از روش برس، غلطک، اسپری، چرخش در مایع و غوطه‌وری. روش اسپری بسته به رنگ و سازه می‌تواند به‌صورت الکتروستاتیکی، با و بدون هوا و یا گرم هم باشد. شکل ۴۱.۴ تصویر اعمال رنگ به روش الکتروستاتیک را نشان می‌دهد.

در روش غوطه‌وری هم می‌توان به روش‌های رسوب الکتریکی (با عنوان الکتروفروتیک یا الکتروپینتینگ) به دو روش آنوفروتیک و کاتوفروتیک اشاره کرد. در آنوفروتیک، سطح سازهٔ آندشده و رزین با قطب منفی بر روی آن می‌نشیند. در روش کاتوفروتیک، سازه کاتد و رزین با قطب مثبت به سمت کاتد جذب می‌شود. روش کاتوفروتیک که برای اعمال رنگ در خودروها استفاده می‌شود، نسبت‌به روش آنوفروتیک، مقاومت به خوردگی بیشتر و جلای بالاتری دارد (شکل ۴۲.۴). جدول ۳۲.۴ ترکیب رنگ در روش کاتوفروتیک و آنوفروتیک را نشان می‌دهد.



شکل ۴۱.۴. تصویر اعمال رنگ به روش الکتروستاتیک [۶۴]



Deposition At the Cathode (+) Electrode :

$R\text{-}NH_3^+ + OH^- \rightarrow R\text{-}NH_2 + H_2O$

OH^- ions are generated (reduction) which raises the pH and precipitates the e-coat on the car body

At the Anode (-) Electrode:

H^+ + solubilizer anion → acid

H_2O is oxidized to form H^+

شکل ۴۲.۴. تصویر اعمال رنگ به روش غوطه‌وری کاتدی و واکنش‌های مربوطه [۶۶]

جدول ۳۲.۴. ترکیب و اجزای رنگ برای استفاده در روش کاتدی و آندی [۶۵]

Parameter	Cathodic	Anodic
Solid (2 h at 130°C), wt%	15 – 25	8 – 15
Ash (450°C), wt%	1 – 5	2 – 6
Solvent, wt%	1 – 4	4 – 10
pH	4 – 7	7 – 9
Specific bath conductivity (20°C), mS/cm	0.8 – 1.5	0.8 – 1.5
Voltage, V	250 – 450	150 – 350
Maximum current density, mA/cm²	4 – 6	4 – 6
Bath temperature, °C	25 – 35	20 – 28
Coating time, s	120 – 240	120 – 240
Deposition equivalent, mg/C	30 – 40	60 – 80

در استانداردهای ASTM D3358 و ISO 8502-4 شرایط اجرای پوشش را ارائه کرده‌اند. معمولاً شرکت‌های سازنده براساس مشخصات رنگ تولیدی دستورالعمل اجرایی را ارائه می‌دهند. بعضی از نبایدهای حین پوشش‌دهی شامل موارد زیر است.

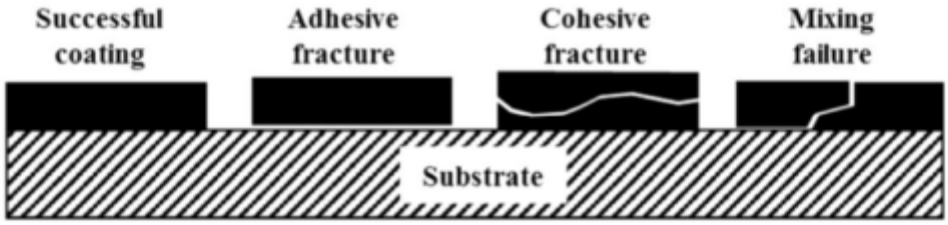
- وقتی که درجه حرارت سطح، ۳°C بالاتر از نقطهٔ شبنم هوای اطراف و یا رطوبت نسبی بیش از ۸۰ درصد باشد،
- وقتی که حرارت محیط زیر ۴°C باشد،
- زمانی که تغییرات آب‌وهوایی در عرض دو ساعت بعد از رنگ‌آمیزی رخ دهد،
- وقتی که رطوبت به‌صورت باران، کندانست، یخ‌زدگی و غیره روی سطح ایجاد شود، احتمال وقوع این شرایط زمانی است که میزان رطوبت بیش از ۸۰ درصد و دما کمتر از ۱۵°C باشد.
- وقتی که دمای سطح بیش از ۳۵°C (طبق توصیهٔ سازنده) باشد.

۵.۵.۴. عیوب رنگ

به‌طورکلی عیوب رنگ می‌تواند ناشی از زیرسازی نامناسب، کیفیت نامطلوب رنگ، شرایط محیطی نامناسب در حین اجرا و یا مربوط به ساختار سازه باشد. دسته‌بندی‌های مختلفی برای عیوب رنگ همراه با تصاویر ارائه شده است.

با بررسی نوع عیب علت اصلی ایجاد عیب را می‌توان شناسایی کرد. در مراجع مختلفی عیوب را با تصویر و علت ایجاد و به‌تبع آن روش کاهش و یا جلوگیری از تکرار معیوب شدن ارائه داده‌اند. درارتباطبا نقش حفاظت کاتدی بر روی رنگ معیوب و تأثیر حفاظت کاتدی بیش از حد در فصل پنجم توضیحاتی ارائه شده است.

عیوب رنگ شامل مواردی ازجمله لایه‌لایه شدن (Delamination)، ورقه شدن (Peeling)، تاول زدن (Blistering)، سوراخ‌شدگی (Pinhole)، ترک‌خوردگی (Cracking)، چروک شدن (Wrinkling)، رنگ‌تراوی (Bleeding)، گچی شدن (Chalking)، سینه دادن و شره کردن (Sagging)، شره کردن (Running)، پوست‌پرتقالی شدن (Orange Peeling)، اسپری خشک (Dry Spray)، تاول زدن (Blistering) تاول زدن الکترو اسمزی، ورقه شدن (Flaking/Scaling)، زنگ‌زدگی نقطه‌ای (Pin Point Rusting)، زنگ‌زدگی شیمیایی (Chemical Rusting)، ترک‌های ریز سطحی (موترک) (Checking)، ترک‌های عمیق (Deep Cracking)، ترک‌های بزرگ (Mud Cracking)، تغییر رنگ دادن (Discoloration)، چین‌وچروک (Wrinkling)، گچی شدن (Chalking)، گردی شدن رنگ (Spatter Coat)، سوختگی رنگ (Alligatoring or Lifting) است. خواننده ضمن جست‌وجو در مراجع مختلف و بررسی شکل ظاهری عیوب، می‌تواند علت ایجاد و روش‌های جلوگیری از آنها را دنبال کند. در بعضی موارد تنش‌های مکانیکی می‌تواند باعث تخریب پوشش شود (شکل ۴۳.۴).



شکل ۴۳.۴. رشد ترک در نواحی مختلف پوشش اپوکسی [۶۷]

۶.۵.۴. رنگ سازه‌های دریایی

مطابق استاندارد نفت ایران، تمام سازه‌های دریایی غوطه‌ور و یا قسمتی غوطه‌ور شامل پایه‌ها، خطوط لولهٔ زیردریایی، لنگرگاه شناور کوچک و بویه‌ها، تفکیک‌کننده‌های آب از نفت و سامانه‌های آب خنک‌کننده، علاوه‌بر پوشش‌های حفاظتی، هر کجا که لازم است باید حفاظت کاتدی شوند. سازه‌های دریایی در معرض سایش، ضربه، خوردگی، نفوذ آب و بایوفاولینگ‌ها قرار دارند. بسته به شرایط محیطی و عوامل تخریب خصوصاً تحمل دمایی نوع پوشش انتخاب می‌شود. بعد از آماده‌سازی سطوح مطابق استانداردها، همهٔ پوشش‌ها در سه لایهٔ آستری (پرایمر)، لایهٔ میانی و رویی اعمال می‌شوند. پوشش پرایمر ضمن چسبندگی به سطح فلز و همچنین پیوند با پوشش میانی، نقش محافظت از خوردگی را ایفا می‌کند. پرایمرها دارای پودر روی به‌عنوان نقش

حفاظت کاتدی، سطح فلز را از خوردگی محفاظت می‌کند. لایهٔ میانی به‌منظور افزایش خاصیت ضدخوردگی به طریق ممانعت از نفوذ عوامل خورنده اعمال می‌گردد. با توجه به وجود عوامل خورندهٔ در محیط دریا، این لایهٔ در رنگ‌های دریایی اهمیت پیدا می‌کند. لایهٔ رویه علاوه‌بر فام و شناسایی موقعیت تجهیزات، به‌منظور حفاظت در برابر اشعهٔ یو وی، مواد شیمیایی و خاصیت‌هایی از قبیل ضدخزه و سایش اعمال می‌شود. برای کشتی‌ها و شناورها رنگ رویه به‌دلیل چسبیدن فاولینگ‌ها و خزه‌ها و ایجاد زبری سطح و کاهش سرعت اهمیت زیادی دارد. به‌همین دلیل رنگ‌های رویه را رنگ ضدخزه جهت ممانعت از رشد خزه‌ها بر روی بدنهٔ کشتی‌ها، سکوهای نفتی و سازه‌های دریایی می‌نامند. بسته به شرایط کاری و بهره‌برداری از هر سازهٔ دریایی، روش آماده‌سازی، رنگ پرایمر، میانی و رویه متفاوت و ممکن است تا پنج لایه رنگ نیز برسد.

مواد پرایمر بر پایهٔ مواد ضدخوردگی انتخاب می‌شود. پرایمرهای رایج مورد استفاده شامل پرایمر غنی از روی اپوکسی، پرایمر سیلیکات روی معدنی و پرایمر ضدزنگ اپوکسی است. پرایمر غنی از روی یک پوشش آلی یا معدنی حاوی نسبت بالایی از پودر روی به‌عنوان پرکننده و نقش میکروآندهای فداشونده را دارد. پوشش‌های غنی از روی با زمینهٔ اپوکسی با مقدار جامد حجمی بیش از ۷۰ درصد، چسبندگی قوی و قابلیت تحمل سطحی پوشش را افزایش می‌دهد.

عملکرد لایهٔ میانی و رویی، ایجاد یک لایهٔ محافظ برای پرایمر، کند و محدود کردن نفوذ بخار آب، اکسیژن و یون‌های فعال شیمیایی است. لایه‌های معمولی مورد استفاده در سکوهای دریایی شامل رنگ پلی‌اورتان آلیفاتیک و پوشش‌های پلی‌سیلوکسان هستند. پوشش‌های پلی‌اورتان آلیفاتیک اغلب همراه با پرایمرهای غنی از روی و پوشش میانی اپوکسی با ساختار بالا استفاده می‌شود. پوشش پلی‌سیلوکسان مستقیماً با پوشش پرایمر غنی از روی مطابقت دارد. پوشش‌های پلی‌سیلوکسان اپوکسی مقاومت در برابر خوردگی قوی‌تری دارند و پوشش‌های پلی‌سیلوکسان اکریلیک از نظر ویژگی تزیینی بهتر هستند. جدول ۴۰.۴ مشخصات مذکور را در چند مکان و تجهیز را در کشتی نشان می‌دهد. ترکیب رنگ برای کاربرد مختلف در جدول‌های ۳۳.۴ تا ۳۶.۴ ارائه شده است.

برای دمای عملیاتی تا $150^{\circ}C$ تا $200^{\circ}C$، سیستم‌های رنگ متشکل از یک لایهٔ پرایمر سیلیکات روی (ضخامت لایهٔ خشک ۷۵ میکرونی) و دو لایهٔ سیلیکون رنگ‌دانهٔ آلومینیمی آلکید (ضخامت لایهٔ خشک ۲۵ میکرون در هر لایه) یا سیلیکون اکریلیک رزین (ضخامت فیلم خشک ۵۰ میکرون در هر پوشش) اغلب استفاده می‌شود. از پوشش اپوکسی با رنگ‌دانهٔ آلومینیمی نیز می‌توان به‌عنوان روکش استفاده کرد.

برای دمای عملیاتی تاحدود ۴۰۰°C، سیستم‌های فعلی معمولاً از یک لایهٔ پرایمر سیلیکات روی (ضخامت لایه خشک ۷۵ میکرونی) و دو لایهٔ رنگ سیلیکونی آلومینیمی مقاوم در برابر حرارت (ضخامت لایهٔ خشک ۲۵ میکرون در هر لایه) تشکیل می‌شوند. برای ایجاد یک فیلم مناسب، روکش سیلیکونی باید به‌تدریج تا حداکثر دمای ممکن گرم شود.

برای دمای عملیاتی تاحدود ۶۰۰°C، سیستم‌های فعلی شامل یک لایهٔ پرایمر سیلیکات روی (ضخامت لایهٔ خشک ۷۵ میکرونی) و یک لایهٔ روکش سیلیکات (ضخامت لایه خشک تقریباً ۷۵ میکرونی) می‌باشد.

جدول ۳۳.۴. مشخصات رنگ‌های مورد استفاده در قسمت‌های مختلف کشتی [۵۹]

Surface	Paint system	Binder type	Coats	Dry film thickness (μm)	Total average film thickness (μm)
Bottom	Primer	Oil-modified phenolic; bitumen	3–4	40–60	
	Barrier coat No.1 anti-corrosive	Bitumen/limed rosin	1	50–60	~265
	Anti-fouling	'Soluble matrix' based on boiled oil/limed rosin; Cu or tributyltin oxide (TBTO) toxicant[1]	1	50–75	
Boottopping	Primer 655	Tung/linseed-modified phenolic	2–3	40–60	~200
	Finish	Tung-modified phenolic	2	40–60	
Topside and superstructure	Primer (quick-drying)	Medium oil length (a) linseed alkyd (55–60% OL)	2	50	
	Undercoat	Medium oil length linseed alkyd (50–55% OL)	1	50	~220
	Enamel	Long oil length soya alkyd (65% OL)	1–2	35–50	

[1] Three grades are available, 'Atlantic', 'Tropical', and 'Supertropical' in which the level and choice of toxicant vary.

جدول ۳۴.۴. ترکیب رنگ برای پرایمر لاستیکی کلرینه‌شده [۵۹]

	% by weight
Aluminium paste, non-leafing (65% in naphtha)	20.0
Zinc oxide	1.0
Blanc fixe	10.0
Thixatrol ST (thixotropic agent)	0.5
Alloprene R10 (chlorinated rubber)	15.0
Cerechlor 70 (chlorinated wax plasticizer)	7.5
Cerechlor 42 (chlorinated wax plasticizer)	7.5
Propylene oxide (stabilizer)	0.1
Xylene	28.4
Solvesso 100 (Naphtha)	10.0
	100.0

جدول ۳۵.۴. ترکیب رنگ برای رنگ ضدفاولینگ [۵۹]

Cuprous oxide	24.0
Zinc oxide	5.0
Tributyltin oxide	2.0
Red iron oxide	8.0
Paris white	9.0
Talc (10μm)	6.0
Bentone 38	0.3
n-Butanol	0.1
Limed rosin/boiled linseed oil, 3:1, 60% in naphtha	41.0
White spirit	4.6
	100.0

جدول ۳۶.۴. ترکیب رنگ برای مخازن ذخیرهٔ دریایی [۵۹]

Paint system	Advantages	Limitations
Zinc silicate	outstanding neutral solvent resistance	poor acid and alkali resistance poor film formation at low humidity
Epoxy cured with polyamide	tolerant to application conditions wide range of solvent resistance	poor resistance to polar solvents minimum application temperature 5 °C
Epoxy cured with amine adduct		
Epoxy cured with isocyanate	low temperature, elastic and adhesive	poor alkali resistance dangerous to human health
Epoxy phenolic resin	outstanding overall resistance, including methanol	requires heat for ultimate cure
Polyurethane	excellent low-temperature curing	poor methanol alkali resistance and dangerous to human health

۷.۵.۴. روش‌های رنگ‌زدایی

برای حذف رنگ‌های کهنه و تخریب‌شده به‌منظور اعمال رنگ نو از روش‌های شیمیایی، حرارتی و مکانیکی مختلفی استفاده می‌شود. در روش شیمیایی لایه‌های رنگ را می‌توان با مواد حلال با پایهٔ اسید یا باز قوی از بین برد. این مواد بسته به کاربردشان، حاوی حلال پایه، فعال‌کننده‌ها (اسیدی یا قلیایی)، عوامل مرطوب‌کننده، امولسیفایرها، کندکننده‌های تبخیر، بازدارنده‌های خوردگی و عوامل ضخامت‌دهنده هستند. کارایی رنگ‌زداها با افزایش دما حداکثر تا ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد بالاتر رفته و زمان زدایش از ۶ ساعت به ۲ ساعت کاهش می‌یابد. مزایای رنگ‌زداهای شیمیایی این است که تقریباً برای همهٔ انواع رنگ‌ها، شکل‌های مختلف هندسی و قطعات حساس به حرارت، قابل استفاده هستند. سرمایه‌گذاری کمی نیاز دارند و هوای آلوده و مشکلات محیط‌زیستی جدی ایجاد نمی‌کنند. معایب آن این است که زمان حذف نسبتاً طولانی بوده و دوغاب رنگ تشکیل شده، نیاز به هزینه‌های بیشتر برای دفع پساب دارند. یکی از معروف‌ترین رنگ‌زداها محلول قلیایی داغ است. حذف رنگ در حمام داغ قلیایی (pH بالاتر از ۱۳) در دمای ۵۰-۹۵ درجهٔ سانتی‌گراد انجام می‌شود. قلیاییت با افزودن مقادیر زیادی هیدروکسیدهای فلزات قلیایی یا ترکیبات آمین آلی یا هیدروکسید، تنظیم می‌شود. پیوندهای شیمیایی موجود در بایندرهای رنگ در اثر قلیاییت با مکانیسم هیدرولیز شدن و نفوذ مواد قلیا به لایه رنگ با افزودن سورفکتانت‌ها از بین می‌روند. به‌طور مثال، ترکیب رنگ‌زدای قلیایی داغ شامل موارد زیر است:

- ۷۰-۵۰٪ هیدروکسیدهای سدیم یا پتاسیم.
- ۲۰-۰٪ هیدروکسی یا ترکیبات آمین آلی قوی مثل آلکانول آمین‌ها.
- ۵-۲٪ حلال‌های با نقطهٔ جوش بالا مثل گلیکول اترها.
- ۵-۲٪ اسیدهای آلی مثل اسید گلوکونیک و نمک‌های فلزات قلیایی آنها.
- ۵-۰٪ فعال‌کننده‌های سطحی یا همان سورفکتانت.

محلول با قدرت هیدرولیز بالا را می‌توان برای از بین بردن رنگ اعمال‌شده بر روی فولاد استفاده کرد. این در حالی است که از مادهٔ قلیایی پایه‌های آلی قوی برای فلزات سبک و غیرآهنی استفاده می‌شود. در مواد قلیایی داغ از یک ترکیب آلی با فراریت کم مثل روغن پارافین به‌صورت تشکیل یک لایه روی محلول نیز استفاده می‌شود تا از تبخیر آب و اجزای

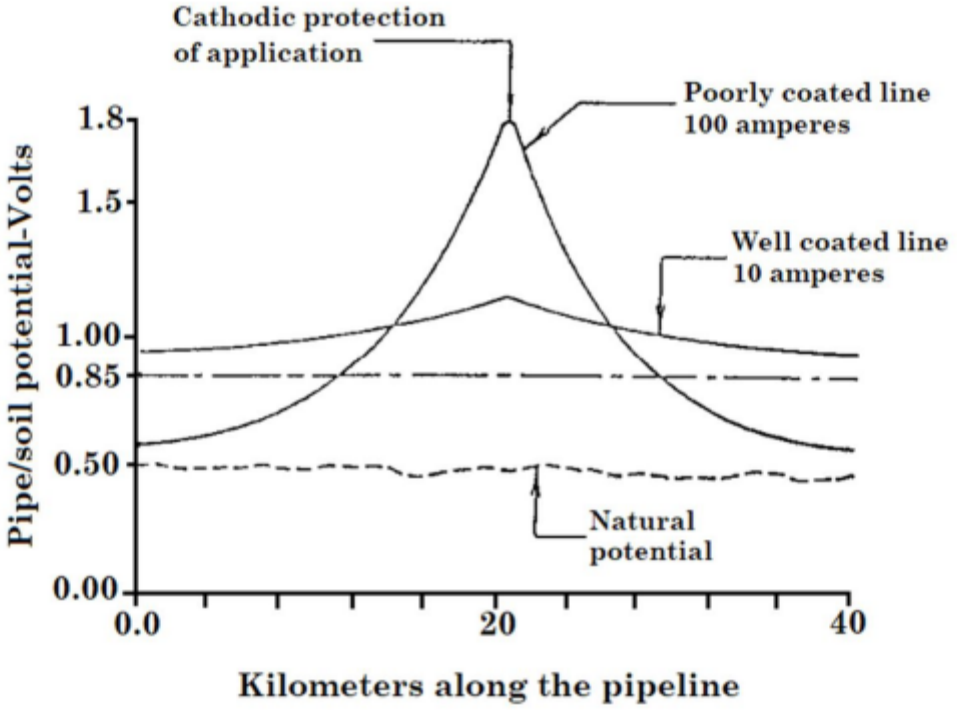
فعال جلوگیری شود. مواد رنگ‌زدای داغ قلیایی مقرون‌به‌صرفه و برای اکثر رنگ‌ها قابل استفاده هستند. از دیگر مواد شیمیایی رنگ‌زدا با ترکیب خنثی می‌توان به ترکیبی شامل حلال‌های آلی بدون هالوژن مثل گلیکول‌ها، گلیکول اترها، ۱- متیل۲- پیرولیدینون که در دمای ۲۰-۴۰ درجهٔ سانتی‌گراد استفاده می‌شوند، اشاره کرد. برخلاف رنگ‌زداهای قلیایی، رنگ‌زدای خنثی منجر به جدایش فیزیکی صرفاً رنگ به‌صورت ورقه‌ای از زیرلایه می‌شود. بنابراین استفاده از آنها محدود به حذف رنگ‌های خشک‌شده است. از دیگر رنگ‌زداهای شیمیایی رنگ‌زداهای اسیدی است که مانند رنگ‌زداهای قلیایی، عوامل حذف رنگ اسیدی ($pH < ۱$) منجر به تخریب شیمیایی رنگ می‌شوند. ترکیب آنها معمولا بر پایهٔ اسید سولفوریک همراه با یک لایهٔ محافظ از موم پارافین است. عوامل قلیایی باعث ایجاد تورم شدید می‌شوند، درحالی‌که عوامل اسیدی، منجر به تجزیهٔ بایندر می‌شوند. محصولات اسیدی فقط در موارد خاص به‌طور مثال برای حذف پوشش‌های پودری اپوکسی و پلی‌آمید در قطعات حساس به حرارت به‌دلیل خواص تهاجمی و خورندهٔ آنها استفاده می‌شود. دمای حمام ۵۰-۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. حذف رنگ با محلول سرد تا چند سال پیش، براساس مادهٔ دی‌کلرومتان (متیل کلرید) پرکاربردترین روش حذف رنگ بود. استفاده از این روش به‌دلیل نگرانی در مورد ایمنی محیطی و شغلی رو به کاهش رفته است.

از حرارت دادن در حد سوختن و یا ایجاد تنش حرارتی هم می‌توان برای رنگ‌زدایی از فولاد و آلومینیم استفاده کرد، اما برای زمینه‌های حساس به حرارت مانند روی و آلیاژهای آن استفاده نمی‌شوند. زمان کوتاه فرایند حذف و مقدار کم خاکستر تشکیل‌شده، از مزیت‌های این روش هستند. این روش با سرمایه‌گذاری بالا به‌دلیل مقررات ایمنی سخت‌گیرانه، نیاز به تجهیزاتی برای کنترل و خنثی‌سازی محصولات احتراق گازهای پیرولیز دارد.

با روش مکانیکی ازجمله جت آب و بلاستینگ هم رنگ‌زدایی را می‌توان انجام داد. رنگ را می‌توان با فشار بالای ۱۰۰-۷۰ مگاپاسکال از روی سطوح فلزی خصوصاً مواردی مثل شبکه‌ها، توری‌ها و تیرها پاک کرد. در روش پاششی مشابه سندبلاست سطوح فلزی، رنگ را می‌توان با هوا یا آب حاوی مواد ساینده مانند ماسه، پودر آلومینا، گرانول‌های پلاستیکی، ذرات فلز و سایر افزودنی‌ها مثل نمک‌های قلیایی حذف کرد. به‌طور مثال، رنگ هواپیما از روی فلز آلومینیم با جت آب حاوی مواد افزودنی خاص پاک می‌شود [۵۹].

۶.۴. تأثیر پوشش در حفاظت کاتدی

بررسی تأثیر پوشش بر خوردگی و حفاظت کاتدی با رویکرد الکتروشیمی از جهت کاهش سرعت خوردگی و کاهش جریان مورد نیاز برای حفاظت، می‌تواند برای خواننده جالب باشد. اینکه جریان خوردگی و جریان حفاظت در اثر اعمال پوشش بر روی سازه کاهش می‌یابد، می‌تواند به‌دلیل هدایت الکتریکی کمتر پوشش باشد. هرچه هدایت و میزان تخلخل پوشش کمتر باشد، سرعت خوردگی و جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی هم کمتر می‌شود. ازجمله مزایای دیگر پوشش، توزیع یکنواخت جریان در طول بیشتری از سازه است. سازه‌های بدون پوشش، ضمن اینکه جریان بیشتری را برای حفاظت نیاز دارند، به همان نسبت در کل سازه نمی‌توانند توزیع شوند. شکل ۴۴.۴ چگونگی توزیع جریان در یک خط لوله را نشان می‌دهد.



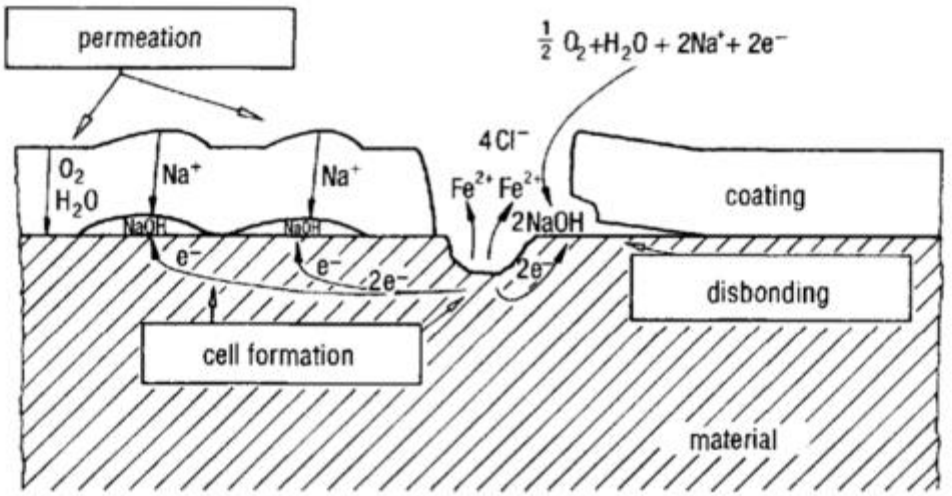
شکل ۴۴.۴. توزیع جریان حفاظت در طول خط لولهٔ دارای پوشش و بدون پوشش [۱۲]

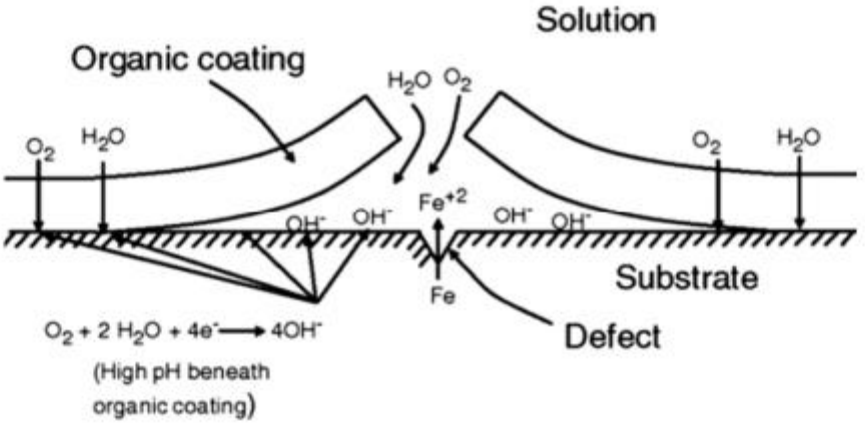
علت اینکه چرا پوشش به‌طور کامل نمی‌تواند سرعت خوردگی و جریان جهت حفاظت را به صفر برساند، یکی این است که ساختار پوشش حاوی مواد هادی و یا نیمه‌هادی ازجمله رنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی به رنگ است و به‌همین دلیل پوشش را نمی‌توان عایق کامل فرض نمود. دوم اینکه مواد رنگ و پوشش که عمدتاً پایهٔ آلی هستند، می‌توانند آب و یون‌ها را با

مکانیسم‌های اسمز یا نفوذ به‌دلیل اختلاف غلظت یونی بین محیط و پوشش، جذب کنند و هدایت پوشش را افزایش دهند و سوم اینکه پوشش‌ها در بهترین حالت باز هم درصدی تخلخل دارند و می‌توانند با جذب آب هدایت پوشش را بیشتر کنند. در بین پوشش‌های آلی، اپوکسی جذب آب بالا، ولی نفوذپذیری کمتری نسبت‌به اکسیژن و یون کلرید دارد. با ادامهٔ جذب آب و افزایش تخلخل، خوردگی در محل فصل مشترک پوشش و فلز آغاز و نهایتاً منجر به تخریب پوشش می‌شود. درصورت نفوذ یون کلرید، امکان اسیدی شدن و تشدید خوردگی موضعی مثل حفره‌دار شدن دور از انتظار نیست. در مناطق کاتدی سطح زیر پوشش پدیدهٔ لایه‌ای شدنِ کاتدی اتفاق می‌افتد. یعنی اینکه با انجام واکنش کاتدی و یا واکنش احیای اکسیژن $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ که در اثر انتقال الکترون به آن ناحیه و هیدرولیز شدن آب و تشکیل هیدروکسیل OH^- و افزایش pH اتفاق می‌افتد. با افزایش pH و قلیایی شدن محیط، رنگ‌دانه‌ها خاصیت خود را از دست می‌دهند و پدیدهٔ لایه‌ای شدن صورت می‌گیرد. این مسئله در زمان حفاظت کاتدی هم ممکن است اتفاق بیفتد. هرچه چسبندگی پوشش بیشتر باشد، نرخ خوردگی و تخریب پوشش از نوع لایه‌ای شدن هم کمتر خواهد بود. شکل ۴۵.۴ تصویر واکنش‌های الکتروشیمیایی خوردگی در محل فصل مشترک فلز و پوشش را نشان می‌دهد. استفاده از ترکیب پوشش، ضخامت و میزان پخت پوشش و همچنین پتانسیل و جریان مناسب ازجمله روش‌های کنترل لایه‌ای شدن کاتدی پوشش‌ها به شمار می‌رود. استفاده از پوشش‌های آلی غنی از روی، می‌تواند جریان مورد نیاز حفاظت برای فولاد را کم کرده و از تخریب لایه‌ای شدن کاتدی جلوگیری کند. با تشکیل هیدروکسید روی $Zn(OH)_2$ امکان آزاد شدن OH^- کمتر می‌شود، ولی از جهتی ترکیبات روی و آلومینیوم دارای هم دارای خواص بازی است و می‌تواند عاملی برای تخریب پوشش هم باشد.

یکی دیگر از مشکلات حفاظت کاتدی با طراحی و اجرای نامناسب برای سازهٔ پوشش‌دار، پدیدهٔ الکترو- اندواسمز است. در این مکانیسم آب به سمت سطح فلز جذب و باعث تاول زدن رنگ و پوشش می‌شود. هر دو پدیدهٔ قلیایی شدن و الکترو- اندواسمز در شرایط حفاظت بیش از حد (اورپروتکشن) اتفاق می‌افتد. افزایش بیش از ۱۱۰۰- میلی‌ولت پتانسیل سطح نسبت‌به الکترود مرجع Ag/AgCl باعث تولید یون و اتم هیدروژن می‌کند که علاوه‌بر تخریب پوشش،

امکان ایجاد تاول در فولاد و همچنین ترد شدن هیدروژنی را هم فراهم می‌سازد. ناگفته نماند، تجربه نشان داده است که حفاظت کاتدی می‌تواند دوام پوشش را نیز زیاد کند. یکی از علت‌های آن تشکیل لایهٔ محافظ کلکریوس بر روی پوشش در اثر کاتدی شدن سطح است.





شکل ۴۵.۴. تصویر شماتیک لایه‌ای شدنِ کاتدی (cathodic delamination) ناشی از نفوذ اکسیژن و آب و انجام واکنش‌های کاتدی [۱۳]

از روش‌های معمول دیگر کاهش خوردگی سازهٔ پوشش‌دار در اثر حفاظت کاتدی، آماده‌سازی مناسب سطح، استفاده از پوشش‌های با ترکیب و چسبندگی مناسب، قدرت جذب کم آب و رطوبت و همچنین قدرت نفوذپذیری کم اکسیژن و کلرید است. جدول‌های ۳۷.۴ تا ۳۹.۴ میزان نفوذ آب، اکسیژن و کلرید را در داخل پوشش‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳۷.۴. مقایسهٔ نرخ انتقال آب در داخل پوشش‌های آلی [۱۴]

Coating	Transmission rate in mg/cm^2 day	Film thickness in μm
Organic coating		
Epoxy/polyamide	15.5	10
Chlorinated rubber (plasticized)	9.5	10
Styrene acrylic latex	230	10
Vinyl chloride–vinylidene chloride copolymer	2.8	10
Polybutadiene	3	25
Polytetrafluoroethylene	0.48	25
Cellulose nitrate	63	25
Paint films		
Vinyl chloride–vinylidene chloride copolymer latex	6.8	10
Chlorinated rubber, unmodified	5.0	10
Coal tar epoxy	7.5	10
Acrylic water-borne primer	180	10
TiO_2-pigmented alkyd	65	10
Red lead-oil-based primer	54	10
Alkyd resin	2.3	100
Polyurethane	1.4	100
Phenolic resin	1.1	100

جدول ۳۸.۴. مقایسهٔ نرخ انتقال اکسیژن در داخل پوشش‌های آلی [۱۴]

Coating	Transmission rate in mg/cm^2 day	Film thickness in μm
Cellulose nitrate	0.106	100
Epoxy resin	7.3×10^{-3}	100
Vinyl chloride/vinyl acetate copolymer	7.5×10^{-3}	100
Chlorinated rubber	2.2×10^{-3}	100
Alkyd 15% poly (vinyl chloride)	6.8×10^{-3}	87
Epoxy/coal tar	4.1×10^{-3}	33
Epoxy/polyamide	6.4×10^{-3}	38
Polybutadiene	2.5×10^{-3}	25

جدول ۳۹.۴. مقایسهٔ نرخ انتقال کلرید در داخل پوشش‌های آلی [۱۴]

Organic coating	Transmission rate in mg/cm^2 day	Film thickness in μm
Chlorinated rubber	6.00×10^{-3}	59
Vinyl	0.31×10^{-3}	63
Epoxy	0.90×10^{-3}	19
Alkyd/iron oxide	0.52×10^{-3}	62
Alkyd/red lead	0.20×10^{-3}	75
Epoxy/polyamide	0.21×10^{-3}	100

استفاده از یک لایهٔ آستری با قدرت عایقی بیشتر روی فلز جهت جلوگیری از انتقال الکترون در روی سطح، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی و کنترل pH محیط و انتخاب پلیمرهای اسید لوئیس برای لایه‌های اکسید با خاصیت بازی و انتخاب پلیمرهای بازی لوئیس برای اکسیدهای اسیدی، چسبندگی پلیمر را به لایهٔ اکسیدی افزایش می‌یابد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده و با عنایت به مزیت استفادهٔ هم‌زمان حفاظت کاتدی و پوشش، نگرانی مهندسان نسبت‌به لایه‌ای شدن کاتدی در زمان حفاظت کاتدی به‌جای خود پابرجاست. همین اندازه دانسته شود که چه رنگ و پوشش‌های برای سازه‌هایی که می‌خواهند حفاظت کاتدی شوند مناسب است، می‌تواند راهنمای خوبی باشد. اولاً رنگ و پوشش مقاومت خوبی در برابر قلیایی شدن داشته باشد. نوع رزین (بایندر) و مواد افزودنی به پوشش که خاصیت پلاستیکی به آن می‌دهد نباید خاصیت صابونی شدن (قلیایی شدن) داشته باشند. رنگ‌دانه‌ها، پرکننده‌ها و افزودنی نباید با قلیا واکنش دهند. وقتی پوشش دچار عیب شد، جریان حفاظت کاتدی در محل ناپیوستگی پوشش، تشکیل قلیا می‌دهد به‌همین دلیل امکان ایجاد الکترو- اندواسمز و تولید گاز هیدروژن‌شده و باقی لایه‌ها را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌همین دلیل پوشش سریعاً باید تعمیر شود و در تجربهٔ بعدی از پوشش‌های ضخیم‌تر و با چسبندگی بیشتر و نفوذناپذیرتر اقدام شود. به‌همین دلایل رنگ و پوشش‌های با پایهٔ بایندرهای صابونی‌شونده (saponifiable binders) مثل رنگ‌های روغنی، رزین‌های آلکیدی و استرهای اپوکسی در سیستم حفاظت کاتدی نباید مورد استفاده قرار بگیرند. رنگ‌های پایهٔ قیر همراه با آندهای فداشوندهٔ روی و آلومینیمی مشکلی ندارند. به‌هرحال رنگ‌های ضدفاولینگ روی پوشش‌های پایهٔ قیری (رنگ حاوی عناصر مس، سرب، آرسنیک و جیوه) در برابر حفاظت کاتدی کمتر مقاوم هستند. رنگ‌های با کارایی بالا بر پایهٔ رزین اپوکسی/کولتار، رزین‌های پلی‌اورتان، پلی‌اورتان/کولتار، رزین‌های پایهٔ وینیل، وینیل/کولتار و لاستیک‌های کلرینه‌شده برای سیستم

حفاظت کاتدی اعمال جریان و آند فداشونده مناسب هستند. رنگ و پوشش‌های بر پایهٔ اپوکسی و پلی‌اورتان که با کولتار ترکیب شده‌اند، بهترین مقاومت در برابر حفاظت کاتدی و تاحدود زیادی مقاوم به اورپروتکشن هستند. وجود باقی‌ماندهٔ حلال‌های قطبی در پوشش، باعث کاهش مقاومت آن به حفاظت کاتدی رنگ می‌شود. اگرچه می‌توان از پودر آلومینیم یا روی در رنگ‌هایی برای سطوح محافظت‌شدهٔ کاتدی استفاده کرد، اما این رنگ‌دانه‌ها مقاومت قلیایی را نیز کاهش می‌دهند و در مجموع رفتار دوگانه‌ای از خود نشان می‌دهند. به‌ویژه به چنین رنگ‌هایی در شرایط بیش از حد حفاظت، دچار مشکل خواهند شد. به‌همین دلیل استفاده از کرومات روی، فسفات کلسیم یا سایر رنگ‌دانه‌های ضدخوردگی در رنگ که به قلیایی شدن حساس هستند، توصیه نمی‌شود. اعمال رنگ بر روی سازه‌های حاوی گردوخاک و بسترهای زنگ زده یا روی پوشش‌های قدیمی که تحت تأثیر گرما و نور قرار داشته‌اند، مقاومت بسیار کمتری در برابر محافظت کاتدی نشان می‌دهند. کولتار ترکیبی از فنل‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک پلی‌سیکلیک (PAH) و ترکیبات هیتروسیکلیک در حدود ۲۰۰ مورد است.

فصل پنجم

فصل پنجم

مشخصات محیط

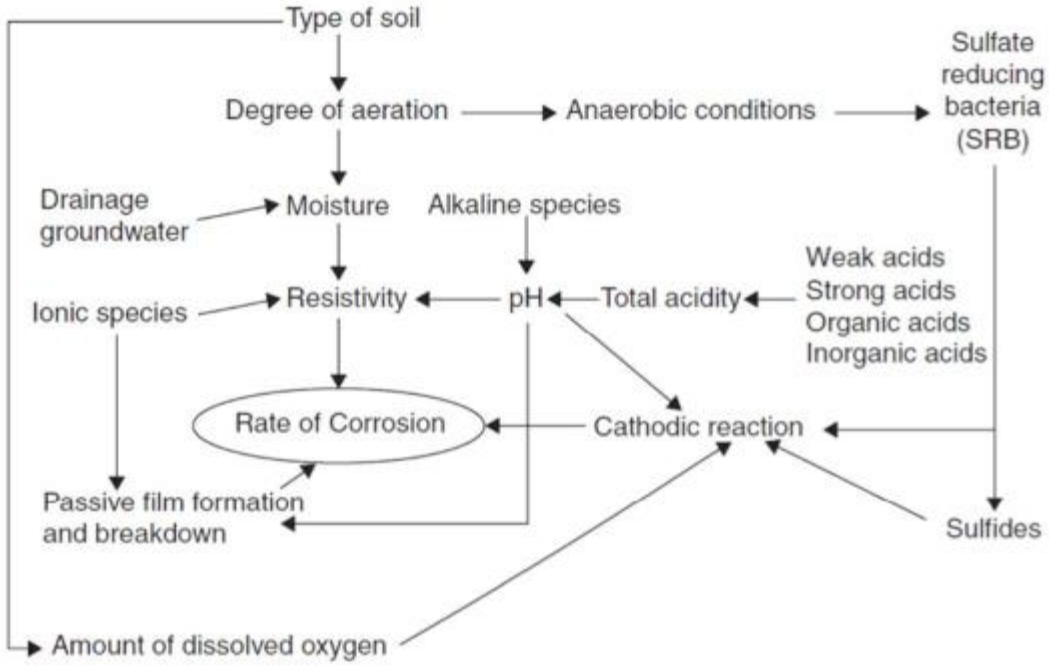
محیط و مشخصات آن مانند هدایت الکتریکی، نوع و میزان املاح موجود، وجود میکرو و ماکروارگانیسم‌ها و همچنین اسیدی و بازی بودن محیط، نقش کلیدی در حفاظت کاتدی دارند. خاک، آب (آب شرب، آب صنعتی و آب دریا)، بتن، اتمسفر، محیط شیمیایی (اسید، باز و...) و یا مواد هیدروکربنی ازجمله محیط‌های صنعتی هستند که سازه‌های فلزی در آنها تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند. در این فصل ضمن بررسی شرایط مذکور، روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای مهم محیطی که در آن سازه‌ها تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند ازجمله خاک، آب، اتمسفر، بتن و ترکیبات نفتی مورد توجه قرار گرفته شده است.

۱.۵. خاک

خاک یکی از محیط‌هایی است که به‌دلیل پیچیدگی ترکیب آن، می‌تواند برای سازه‌های فلزی پوشش‌دار ازجمله لوله‌های انتقال آب، نفت و گاز و همچنین کف مخازن خورنده باشد. نوع خاک و مشخصات آن در میزان خورندگی و به‌تبع آن در داده‌های طراحی حفاظت کاتدی نقش مهمی دارند. این مشخصات به‌طورکلی شامل بافت خاک، درصد آب و رطوبت، میزان عبور جریان هوا در خاک، مقاومت مخصوص خاک، pH، ترکیب شیمیایی، پتانسیل احیا، میزان و نوع باکتری‌های خاک هستند. شکل ۱.۵ تصویر کلی و جدول ۱.۵ متغیرهای مؤثر بر میزان خوردگی در خاک را نشان می‌دهد.

خاک‌ها در شکل طبیعی خود به‌صورت آبرفتی یا رسوبی، رسی و ماسه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند، که براساس درصد هریک از ترکیب فوق، ممکن است تحت عناوین دیگری هم مطرح شوند. ترکیب خاک در دیاگرام سه‌تایی بافت قابل بررسی است (شکل ۲.۵). منظور از بافت خاک، توزیع اندازهٔ ذرات معدنی تشکیل‌دهندهٔ خاک است. خاک رس با قطر کمتر از ۲

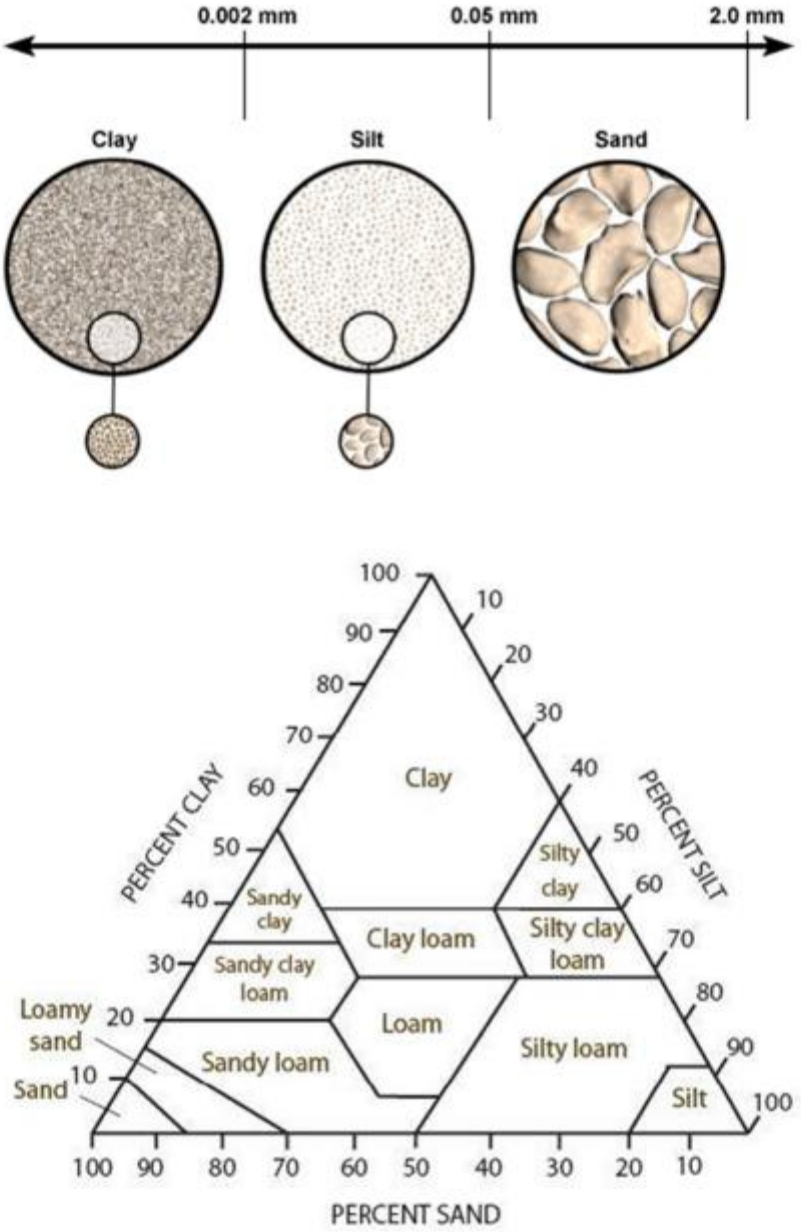
میکرون، گل‌ولای با قطر بین ۲ تا ۵۰۰ میکرون و ماسه‌ها دارای بزرگ‌ترین ذرات با قطر بیشتر از ۵۰ میکرون تشکیل شده است. خاک خورنده با ذرات ریزتر، بدترین شرایط را برای سازه‌های فولادی مدفون فراهم می‌کند. بنابراین خاک رس با عوامل خورندگی بالا مثل pH پایین و یا وجود آنیون‌هایی مثل کلرید، به‌دلیل ریز بودن و همچنین قابلیت جذب بیشتر آب نسبت‌به دیگر خاک‌ها، می‌تواند تماس بیشتری با سطوح فلزی داشته باشد و به‌تبع آن در تخریب فلزات نیز مؤثرتر باشد. خاک‌ها ممکن است به شکل‌های مختلف شور قلیایی، رسوبی شور، آهکی و ماسه‌ای نیز تقسیم‌بندی شوند که برای بررسی رفتار آنها باید از دانش کارشناسان زمین‌شناسی و شیمی بهره جست.



شکل ۱.۵. تصویر متغیرهای مؤثر بر میزان خوردگی در خاک [۱]

جدول ۱.۵. تأثیر برخی از پارامترهای خاک بر خورندگی آن [۲]

Variable	Relation
Soil texture	Direct
Presence of water	Direct
Aeration	Direct
pH	Inverse
Resistivity	Inverse
Redox potential	Direct
Ion contents	Direct
Bacteria	Direct

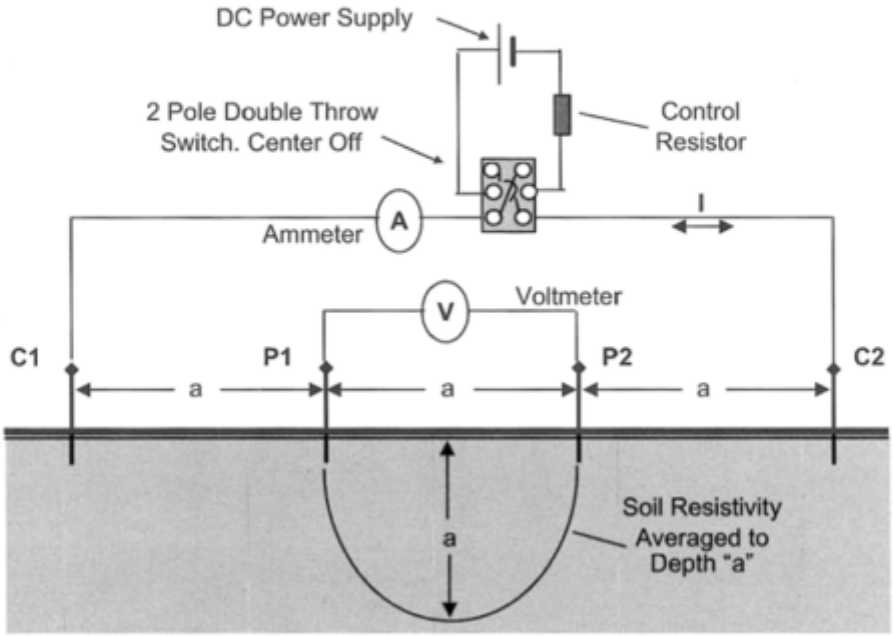


شکل ۲.۵. نمودار سه‌تایی گل‌ولای (آبرفتی یا رسوبی)، رسی و ماسه‌ای ترکیب خاک [۴-۳]

سطح آب زیرزمینی از ناحیه‌ای به ناحیهٔ دیگر در نوسان است. به‌دلیل حرکت آب از سطح ایستایی خود، آب برخلاف جهت گرانش به سطح بالاتر انتقال پیدا می‌کند. انتقال و جریان آب به اندازه و توزیع منافذ، بافت، ساختار و مواد آلی خاک بستگی دارد. حرکت آب در خاک می‌تواند توسط گرانش، عمل مویرگی، فشار اسمزی و یا برهم‌کنش الکترواستاتیکی با ذرات خاک رخ دهد. ظرفیت نگهداری آب در خاک بیشتر به بافت آن بستگی دارد. ماسه‌های درشت آب بسیار کمی را حفظ می‌کنند، درحالی‌که خاک‌های رسی ریز آب را تا حد زیادی در خود ذخیره می‌کنند.

۱.۱.۵. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک

مقدار مقاومت خاک در ارائهٔ میزان خورندگی خاک نقش کلیدی دارد. مقاومت الکتریکی خاک که با واحد اهم- سانتی‌متر (Ω.cm) مشخص می‌شود، بستگی به ترکیب شیمیایی خاک دارد و برای تعیین آن از روش‌های چهار پینه، دو پینه، جعبهٔ خاک و یا روش‌های دیگر استفاده می‌شود. در روش چهار پینه (روش ونر) از چهار میلهٔ فولادی تمیز و خشک (به طول ۵۰-۳۰ cm) استفاده می‌شود. میله‌ها در امتداد یک خط مستقیم و به فاصلهٔ a از یکدیگر درون زمین فرو برده می‌شوند. از دو پین بیرونی جریان و از دو پین درونی سطح افت پتانسیل ناشی از اعمال جریان خوانده می‌شود. با توجه به مشخص بودن میزان جریان تزریق‌شده و اندازه‌گیری مقاومت توسط پین‌های مرکزی با کمک قانون اهم، میزان مقاومت خاک را می‌توان اندازه‌گیری کرد. شکل ۳.۵ تصویر چگونگی قرارگیری پین‌ها در خاک را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. فاصله الکترودها تقریباً نشان‌دهندهٔ عمق اندازه‌گیری مقاومت خاک خواهد بود. به‌طور مثال اگر لوله‌ها در عمق ۲ متری از سطح مدفون شده باشند فاصلهٔ بین پین‌ها می‌باید حدود ۲ متر باشد. کمترین فاصلهٔ آخرین پین تا سر لوله نیز نصف a یعنی در حدود ۱ متر مناسب است. اگر هدف محاسبهٔ مقاومت خاک در نزدیکی بستر آندی باشد، از همین روش استفاده می‌شود. باید توجه کرد که کک موجود در اطراف آندها و همچنین خیسی خاک در مقدار مقاومت اندازه‌گیری‌شده تأثیر دارند.



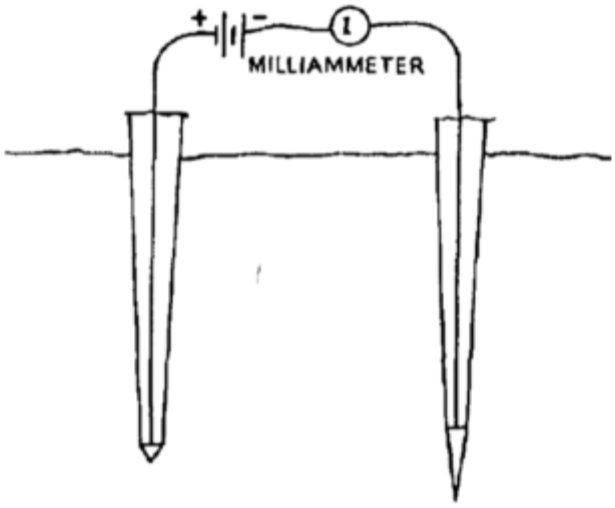
شکل ۳.۵. شکل شماتیک روش اندازه‌گیری مقاومت خاک به روش چهار پینه [۵]

مقاومت الکتریکی خاک از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$R = 19.2 \times (\Delta V/I) \times a$$

در این رابطه D برحسب فوت، ΔV برحسب ولت، I برحسب آمپر و درنتیجه R برحسب اهم‌سانتی‌متر خواهد بود. به‌طور مثال چنانچه فاصله دو پین (ft) ۵ و پتانسیل قبل و بعد از روشن کردن باتری به‌ترتیب (mV) ۵۰ و (mV) ۴۶۰ باشد و یک جریان (A) ۰/۵ به میله‌های بیرونی اعمال شود، مقاومت خاک مطابق رابطهٔ بالا (Ω.cm) ۷۸۴ برآورده می‌شود. تجربهٔ مؤلف در اندازه‌گیری مقاومت دو نوع خاک در دو منطقه نشان می‌دهد که نباید ظاهر و موقعیت خاک، طراح را به اشتباه بیندازد. مثلاً خاک مرجانی در جزیرهٔ لاوان به‌دلیل نزدیکی به دریا به نظر باید مقاومت کمی داشته باشد، درحالی‌که مقاومت آن در حدود (Ω.cm) ۲۰۰۰، ولی مقاومت خاک در ۱۰۰ متری از ساحل کارون در حدود (Ω.cm) ۱۷۵ است. به نظر می‌رسد که نفوذ کلرید در خاک مرجانی کم است.

در روش دو پینه، میله‌ها به‌طور کامل در خاک فرورفته و با اعمال پتانسیل به دو میله و قرائت جریان و با استفاده از قانون اهم، مقاومت مخصوص خاک به دست می‌آید. شکل ۴.۵ شماتیک روش اندازه‌گیری مقاومت خاک با دو پین را نشان می‌دهد.

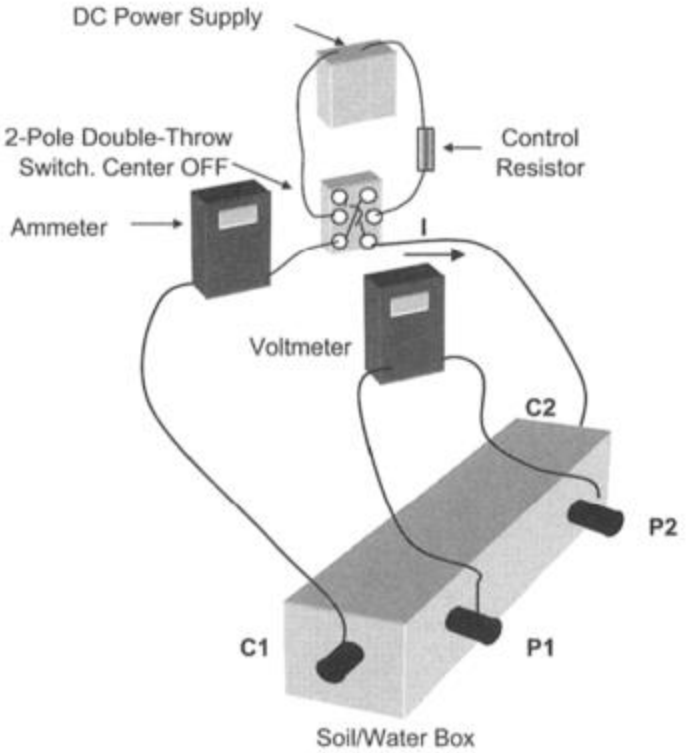


شکل ۴.۵. اندازه‌گیری مقاومت خاک به روش دو پینه، تأمین جریان از باتری سه ولتی بین دو الکترود آهنی کاملاً عایق‌شده (به‌جز نوک میله) [۶]

در روش جعبهٔ خاک، نمونه‌ای از محل خاکی که قرار است لوله در آن قرار داده شود، در یک جعبه به ابعاد $10 \times 1 \times 1/5 in^3$ ریخته شده و الکترودهای مربوطه کار گذاشته می‌شود. مثل

روش چهار پینه، مقاومت مخصوص خاک را می‌توان به دست آورد. وقتی به‌اندازهٔ کافی خاک برای آنالیز شیمیایی به آزمایشگاه ارسال می‌شود، اندازه‌گیری مقاومت نیز درآزمایشگاه انجام می‌شود. XRD و ICP دو روشی است که معمولاً برای آنالیز و تحلیل کیفیت خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۵.۵ شماتیک روش جعبهٔ خاک را نشان می‌دهد. مقاومت خاک براساس ابعاد جعبه و استاندارد ASTM G187 از رابطهٔ زیر به دست می‌آید. دو الکترود سر به آمپرمتر و دو الکترود بغل به ولت‌متر وصل می‌شود.

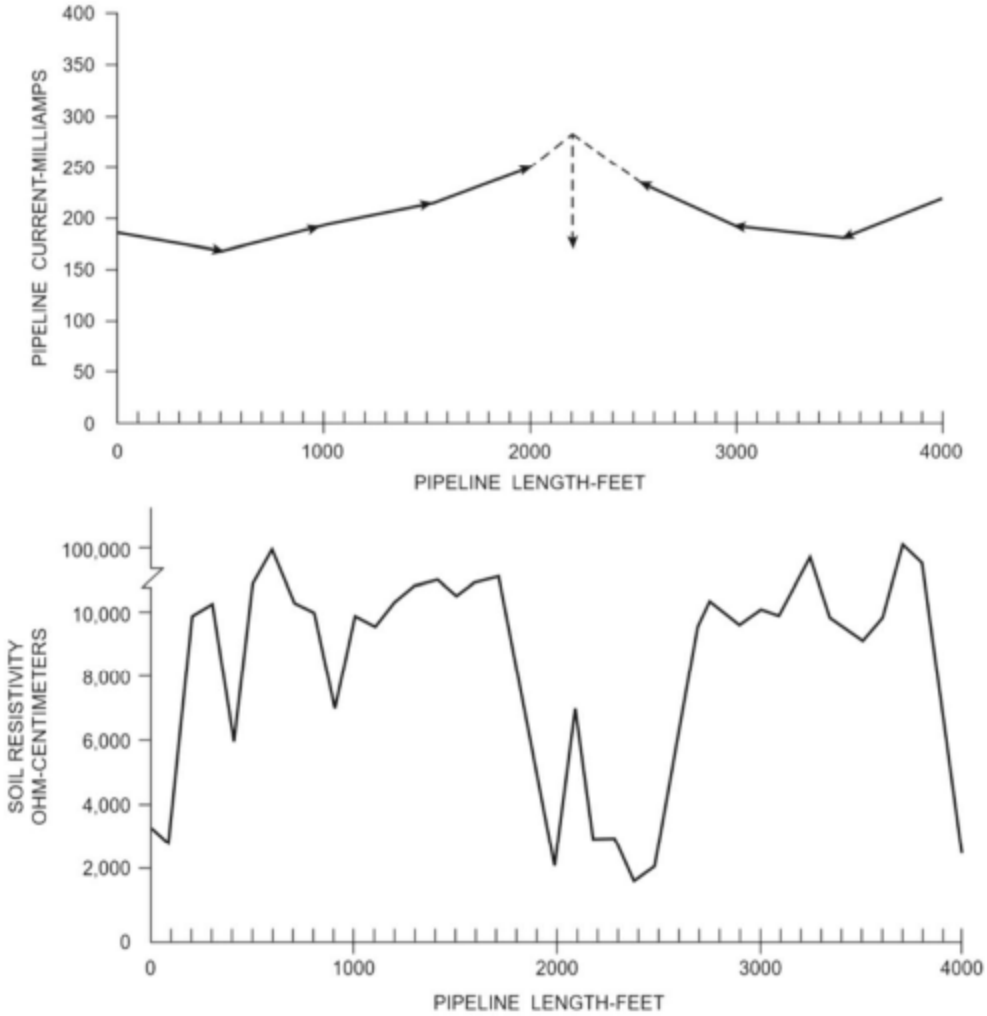
$$R = (\Delta V/I) \times (W \times D)/ I$$



شکل ۵.۵. شماتیک روش جعبهٔ خاک جهت اندازه‌گیری مقاومت مخصوص خاک [۵]

روش‌های دیگری نیز مثل روش تک میله‌ای با جریان AC (با دو الکترود عایق‌کاری‌شده در یک میله)، استفاده از اشعه‌های رادیویی و روش‌های القایی جهت اندازه‌گیری مقاومت خاک نیز وجود دارد. با وجود این در بین روش‌های مختلف اندازه‌گیری مقاومت خاک، روش چهار پینه بیشترین کاربرد را در محاسبات مربوط به اندازه‌گیری مقاومت خاک دارد. محل اندازه‌گیری مقاومت ممکن است در هر نقطهٔ اختیاری از طول مسیر جاگذاری لوله انجام شود. در نقاط حساس مثل مناطق با خورندگی بالا، باید به‌طور خاص، مقاومت خاک اندازه‌گیری شود. در

محلی که مقاومت خاک اندازه‌گیری‌شده پایین باشد، شدت جریان لازم جهت حفاظت بیشتر در نظر گرفته خواهد شد. شکل ۶.۵ تأثیر هم‌زمان جریان مورد نیاز جهت حفاظت و مقاومت خاک، برای یک خط لوله در فاصلهٔ ۴۰۰۰ فوتی را نشان می‌دهد. جدول ۲.۵ نیز رابطهٔ بین شدت خوردگی و مقاومت خاک را بیان می‌کند.



شکل ۶.۵. اطلاعات جریان و مقاومت خاک برای یک خط لولهٔ تحت حفاظت [۷]

جدول ۳.۵ میزان خورندگی خاک برحسب مقاومت با استناد به استاندارد NACE را نشان می‌دهد. اینکه مقدار خورندگی خاک‌های مختلف برای فولاد چقدر است تاحدودی در جدول‌های ۴.۵ تا ۷.۵ مشخص شده است. جدول ۵.۵ تأثیر باران بر مقاومت انواع خاک را نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به مقاومت خاک برای محاسبات تعداد آند و همچنین اندازه‌گیری مقاومت آند به الکترولیت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمان اندازه‌گیری مقاومت، باید بدترین شرایط خوردگی خاک در فصول مختلف در نظر گرفته شود. به‌دلیل خشکی زمین، معمولاً مقاومت خاک در فصل تابستان بیشتر از فصل زمستان است.

جدول ۲.۵. داده‌های مقاومت حدودی انواع خاک [۸]

Type of Soil or water	Typical Resistivity (Ω/m)	Usual Limit (Ω/m)
Sea Water	2	0.1 to 10
Clay	40	8 – 70
Ground well and spring water	50	10 – 150
Clay and Sand mix	100	4 – 300
Shale, Slates, Sandstone	120	10 – 1000
Peat, Loam and Mud	150	5 – 250
Lake and Brook Water	250	100 – 400
Sand	2000	200 – 3000
Morane Gravel	3000	40 – 10000
Ridge Gravel	15000	3000 – 30000
Solid granite	25000	10000 – 50000
Ice	100000	10000 - 100000

جدول ۳.۵. میزان خورندگی خاک برحسب مقاومت با استناد به استاندارد NACE [7]

درجهٔ خورندگی	مقاومت خاک (Ω. cm)
خیلی خورنده	۰ – ۵۰۰
خورنده	۵۰۰ – ۱۰۰۰
نسبتاً خورنده	۱۰۰۰ – ۲۰۰۰
خورندگی کم	۲۰۰۰ – ۱۰۰۰۰
ناچیز	بیشتر از ۱۰۰۰۰

جدول ۴.۵. میزان خوردگی فولاد و روی در خاک‌های مختلف [۹]

Category	Steel Corrosion Rate (mpy)	Zinc Corrosion Rate (mpy)
Highly Corrosive	1.5	0.4
Moderately Corrosive	0.9	0.2
Mildly Corrosive	0.5	0.1

جدول ۵.۵. داده‌های مقاومت خاک برحسب میزان بارندگی سالیانه [۱۰]

Type of soil	Climatic condition			
	Normal and high rainfall, i.e. > 500 mm/year		Low rainfall and desert conditions, i.e.< 250 mm/year	Underground waters (saline)
	Probable value	Range of values encountered	Range of values encountered	Range of values encountered
1	2	3	4	5
Alluvium and lighter clays	5	A)	A)	1–5
Clays (except alluvium)	10	5–20	10–100	1–5
Marls (e.g. Keuper marl)	20	10–30	50–300	—
Porous limestone (e.g. chalk)	50	30–100	—	—
Porous sandstone (e.g. Keuper sandstone and clay shales)	100	30–300	—	—
Quartzite, compact and crystalline limestone (e.g. carboniferous sediments, marble, etc.)	300	100–1000	—	—
Clay slates and slatey shales	1000	300–3000	1000 upward	30–100
Granite	1000	—	—	—
Fissiles shales, schists, gneiss and igneous rocks	2000	1000 upward	—	—
A) Depends on water level of locality.				

جدول ۶.۵. تأثیر نوع مقاومت خاک بر روی خوردگی فولاد بدون پوشش و بدون اعمال حفاظت کاتدی [۱۱]

Soil Type	Soil Resistivity (ohm-cm)	Moisture	Corrosion Rate (mm/year)
Muskeg/sloughs/ free water accumulations	<500	Always wet	Very corrosive (>1.0)
Loams/clays	500–2000	Mainly wet	Corrosive to moderately corrosive (0.5–1.0)
Gravels, sandy	2000–10,000	Mainly dry	Mildly corrosive (0.2–0.5)
Arid, sandy	>10,000	Always dry	Noncorrosive (<0.2)

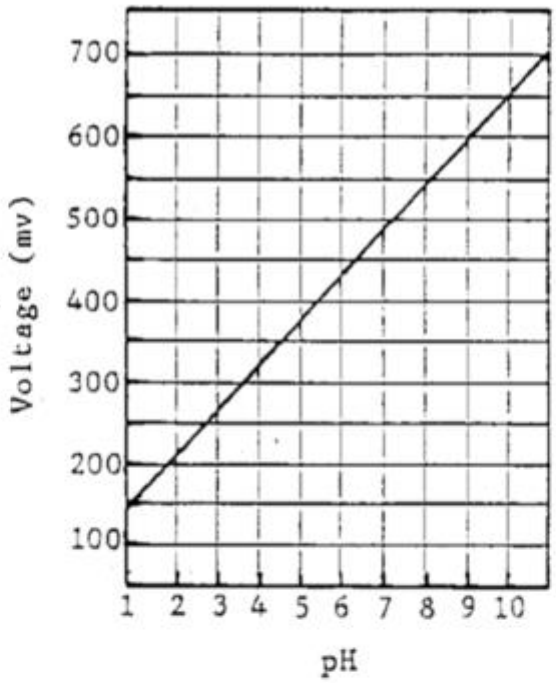
۲.۱.۵. pH و ترکیب شیمیایی خاک

pH خاک معمولاً بین ۵ تا ۸ متغیر است. در این محدوده، pH معمولاً به‌عنوان متغیر مؤثر بر نرخ خوردگی در نظر گرفته نمی‌شود. اسیدی شدن خاک که بیشتر توسط شست‌وشوی مواد معدنی، تجزیهٔ گیاهان اسیدی (مانند برگ درختان سوزنی)، ضایعات صنعتی، باران اسیدی، و

اشکال خاصی از فعالیت میکروبیولوژیکی اتفاق می‌افتد، خطر خوردگی جدی برای مصالح ساختمانی رایج مانند فولاد، چدن و پوشش‌های روی دارند. از سوی دیگر، خاک‌های قلیایی با داشتن مقادیر بالای سدیم، پتاسیم، منیزیم و کلسیم دارند که دو عنصر اخیر احتمالاً رسوبات کلکریوس- آهکی محافظی را بر روی سازه‌های مدفون تشکیل می‌دهند. فولاد در محیط قلیایی به‌دلیل تشکیل لایهٔ رویین، معمولاً مقاومت به خوردگی بهتری نسبت‌به حالت خنثی و اسیدی دارد. در شرایط اسیدی فولاد کمتر دچار پلاریزه شدن کاتدی شده، نیاز به جریان حفاظتی زیادی دارد، درحالی‌که در شرایط قلیایی، فولاد به‌راحتی پلاریزه می‌شود. اندازه‌گیری pH خاک معمولاً توسط معرف‌های رنگی مخصوص، انجام می‌شود. ریختن نمونهٔ خاک در آب مقطر و حل نمودن املاح آن و سپس اندازه‌گیری pH آب نیز pH خاک را می‌تواند مشخص کند. ممکن است با استفاده از الکترود مرجع مس- سولفات مس یا الکترود آنتیموان و با در نظر گرفتن رابطهٔ خطی پتانسیل، pH خاک نیز اندازه‌گیری شود. شکل ۷.۵ ارتباط بین الکترودهای آنتیموان و pH خاک را نشان می‌دهد. جدول ۸.۵ ارتباط میزان خورندگی با pH و مقاومت خاک را ارائه می‌دهد.

جدول ۷.۵. اثرات عوامل محیطی بر روی میزان خوردگی فولاد در خاک‌های مختلف [۱۲]

Environmental Factor	Overall Corrosion Rate (mm/year)			Maximum Pitting Rate (mm/year)		
	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average
Resistivity (Ω-cm)						
< 1000	0.063	0.018	0.033	0.31	0.11	0.20
1000–5000	0.058	0.006	0.017	> 0.45[b]	0.05	0.14
5000–12000	0.033	0.005	0.018	0.23	0.06	0.14
> 12000	0.036	0.003	0.014	0.26	0.03	0.11
Drainage						
Very poor	0.058	0.038	0.046	> 0.45[b]	0.16	0.28
Poor	0.037	0.010	0.024	0.23	0.05	0.14
Fair	0.063	0.018	0.022	0.31	0.08	0.16
Good	0.022	0.003	0.010	0.18	0.03	0.11
Air-pore space (%)						
< 5	0.033	0.010	0.021	0.20	0.05	0.13
5–10	0.063	0.009	0.024	0.31	0.10	0.17
10-20	0.037	0.006	0.017	0.26	0.05	0.15
20-30	0.058	0.012	0.025	> 0.45[b]	0.10	0.20
> 30	0.038	0.004	0.013	0.23	0.03	0.09



شکل ۷.۵. پتانسیل الکترود آنتیموان برحسب pH خاک [۱۳]

جدول ۸.۵. ارتباط pH و مقاومت خاک و میزان خورندگی [۱۴]

pH	Resistivity (Ω.cm)	Corrosion
<3.5	Any	High
3.5–4.5	<4500 >4500	High Medium-High
4.5–5.5	<4500 4500–5000 >5000	High Medium-High Medium
5.5–6.0	<1000 1000–5000 5000–10,000 >10,000	High Medium-High Medium Medium-Low
6.0–9.5	<1000 1000–3000 3000–10,000 10,000–20,000 >20,000	High Medium-High Medium Medium-Low Low

به‌لحاظ ترکیب شیمیایی، خاک دارای املاح فراوانی است. باید توجه نمود که دو نوع خاک، با مقاومت یکسان ممکن است به‌دلیل متفاوت بودن یون‌ها رفتار خورندگی مختلفی از خود نشان دهند. از مهم‌ترین پارامترهای شیمیایی خاک به‌لحاظ خورندگی، می‌توان به یون‌های

کلرید و سولفات اشاره کرد. کلسیم و منیزیم معمولاً دارای اکسیدهای غیرمحلول بوده و به‌صورت رسوبات بی‌کربناتی در محیط‌های مختلف ازجمله خاک مرطوب وجود دارند. این لایه‌های رسوبی، ممکن است باعث ایجاد لایهٔ محافظ شده و شدت خوردگی را کاهش دهند. در عمل کلریدها تمایل به شکست لایه‌های محافظ را افزایش داده و درنتیجه باعث ایجاد خوردگی حفره‌ای می‌شوند. به هر صورت باید دقت نمود که بی‌کربنات‌ها در حد فاصل خاک_ آب دارای مقاومت پایینی هستند، ولی میزان خوردگی آنها زیاد نیست. جهت تعیین آنالیز شیمیایی خاک، معمولاً در عمق جاگذاری لوله‌ها، نمونه‌برداری انجام می‌گیرد. روش آنالیز خاک باید مطابق استانداردهای معتبر در آزمایشگاه انتخاب شود. جدول‌های ۹.۵ تا ۱۲.۵ تأثیر کلرید، سولفات و pH خاک را بر روی خوردگی فولاد یا بتن در خاک‌های مختلف ارائه می‌دهد. جدول‌های ۱۳.۵ و ۱۴.۵ آنالیز نمونه‌های خاک را ارائه می‌دهد که می‌توانند به‌عنوان یک الگو برای طراحان حفاظت کاتدی مورد استفاده قرار بگیرند.

نمونهٔ آنالیز خاکی که مؤلف در خاک نزدیکی نیروگاه آبادان به روش ICP و XRD انجام داده که در جدول ۱۴.۵ و شکل ۸.۵ آمده است. ترکیب خاک شامل عناصر با ترکیب شیمیایی Al_2O_3 $CaCO_3$, $MgCO_3$, $MgSO_4$, $CaSO_4$, Na_2SO_4, NaCl است.

جدول ۹.۵. اثر کلریدها، سولفات‌ها و pH بر روی خوردگی خطوط لولهٔ فولادی مدفون [۷]

Concentration (ppm)	Degree of corrositivity
Chloride	
>5,000	Severe
1,500–5,000	Considerable
500–1,500	Corrosive
<500	Threshold
Sulfate[1]	
>10,000	Severe
1,500–10,000	Considerable
150–1,500	Positive
0–150	Negligible
pH	
<5.5	Severe
5.5–6.5	Moderate
6.5–7.5	Neutral
>7.5	None (alkaline)

جدول ۱۰.۵. محدودهٔ اثر کلریدها، سولفات‌ها و pH بر میزان خورندگی خاک [۱۴]

Exposure conditions				Exposure classification	
pH	Chlorides Cl		Resistivity ohm.cm	Soil condition A*	Soil condition B†
	In soil ppm	In groundwater ppm			
>5	<5000	<1 000	>5 000	Non-aggressive	Non-aggressive
4–5	5000–20,000	1 000–10 000	2 000–5 000	Mild	Non-aggressive
3–4	20,000–50,000	10 000–20 000	1 000–2 000	Moderate	Mild
<3	>50,000	>20 000	<1 000	Severe	Moderate

*Soil conditions A–high permeability soils (e.g., sands and gravels) that are in groundwater

†Soil conditions B–low permeability soils (e.g., silts and clays) or all soils above groundwater

جدول ۱۱.۵. تأثیر پارامترهای خاک بر میزان ریسک خوردگی [۱۵]

Risk of Corrosion	Resistivity	pH	Chlorides	Sulphates
High	< 10 Ω.m	< 4.5	> 0.1% (>1000 ppm)	> 0.5% (>5000 ppm)
Medium	10 -100 Ω.m	4.5 – 6.0	0.03 – 0.1% (300-1000 ppm)	> 0.1 - 0.5% (1000-5000 ppm)
Low	> 100 Ω.m	> 6.5	< 0.03 % (< 300 ppm)	< 0.1% (1000 ppm)

جدول ۱۲.۵. تأثیر مقاومت میزان کلراید و سولفات حل‌شده و pH بر روی شدت خورندگی خاک [۱۶]

Soil Resistivity (Ωm)	Water Soluble Chloride Concentration (ppm)	Water Soluble Sulphate Concentration (ppm)	pH Level	Degree of Corrosivity
0.5	Over 5,000	Over 10,000	-	Very Severe
5-10	1,500-500	1,500-10,000	<5.5	Severe
10-20	500-1,500	120-1,500	5.5-6.5	Moderate
20-100	Below 500	-	6.5-7.5	Mild
Above 100	-	0-150	> 7.5	Negligible

جدول ۱۳.۵. آنالیز یک نمونه خاک (اندازه‌گیری نشده ND: و آنالیز نشده :na) [۱۷]

Sample ID			B-1 25' Weathered	B-1 15-20' Silt Stone
Resistivity		**Units**		
as-received		ohm-cm	600	540
saturated		ohm-cm	480	480
pH			7.7	7.2
Electrical Conductivity		mS/cm	2.18	2.53
Chemical Analyses				
Cations				
calcium	Ca^{2+}	mg/kg	1,812	2,628
magnesium	Mg^{2+}	mg/kg	181	157
sodium	Na^{1+}	mg/kg	835	502
potassium	K^{1+}	mg/kg	113	93
Anions				
carbonate	CO_3^{2-}	mg/kg	ND	ND
bicarbonate	HCO_3^{1-}	mg/kg	143	88
fluoride	F^{1-}	mg/kg	2.0	5.6
chloride	Cl^{1-}	mg/kg	44	17
sulfate	SO_4^{2-}	mg/kg	3,555	4,129
phosphate	PO_4^{3-}	mg/kg	1.4	2.4
Other Tests				
ammonium	NH_4^{1+}	mg/kg	ND	ND
nitrate	NO_3^{1-}	mg/kg	0.4	14
sulfide	S^{2-}	qual	na	na
Redox		mV	na	na

۳.۱.۵. پتانسیل احیا و فعالیت میکروارگانیسم‌ها

پتانسیل احیا اساساً مقدار میزان هوادهی در خاک را نشان می‌دهد. پتانسیل احیای بالاتر نشان‌دهندهٔ اکسیژن بیشتر در خاک است. مقادیر کم پتانسیل احیا ممکن است نشانه‌ای از مساعد بودن شرایط برای فعالیت میکروبیولوژیکی بی‌هوازی باشد. غلظت اکسیژن معمولاً با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد. در خاک‌های با ترکیب شیمیایی خنثی یا قلیایی، غلظت اکسیژن درنتیجه مشارکت آن در واکنش کاتدی، تأثیر مهمی بر سرعت خوردگی دارد. حتی در شرایط بی‌هوازی و در حضور میکروب‌های خاص (مانند باکتری‌های احیاکنندهٔ سولفات)، نرخ خوردگی می‌تواند بسیار بالا باشد. انتقال اکسیژن در خاک‌های خشک و درشت بافت سریع‌تر از بافت‌های ریز و غرقابی است. بدیهی است که حفاری می‌تواند درجهٔ هوادهی را در خاک افزایش

جدول ۱۳.۵. آنالیز یک نمونه خاک (اندازه‌گیری نشده ND: و آنالیز نشده :na) [۱۷]

Sample ID			B-1 25' Weathered	B-1 15-20' Silt Stone
Resistivity		**Units**		
as-received		ohm-cm	600	540
saturated		ohm-cm	480	480
pH			7.7	7.2
Electrical Conductivity		mS/cm	2.18	2.53
Chemical Analyses				
Cations				
calcium	Ca^{2+}	mg/kg	1,812	2,628
magnesium	Mg^{2+}	mg/kg	181	157
sodium	Na^{1+}	mg/kg	835	502
potassium	K^{1+}	mg/kg	113	93
Anions				
carbonate	CO_3^{2-}	mg/kg	ND	ND
bicarbonate	HCO_3^{1-}	mg/kg	143	88
fluoride	F^{1-}	mg/kg	2.0	5.6
chloride	Cl^{1-}	mg/kg	44	17
sulfate	SO_4^{2-}	mg/kg	3,555	4,129
phosphate	PO_4^{3-}	mg/kg	1.4	2.4
Other Tests				
ammonium	NH_4^{1+}	mg/kg	ND	ND
nitrate	NO_3^{1-}	mg/kg	0.4	14
sulfide	S^{2-}	qual	na	na
Redox		mV	na	na

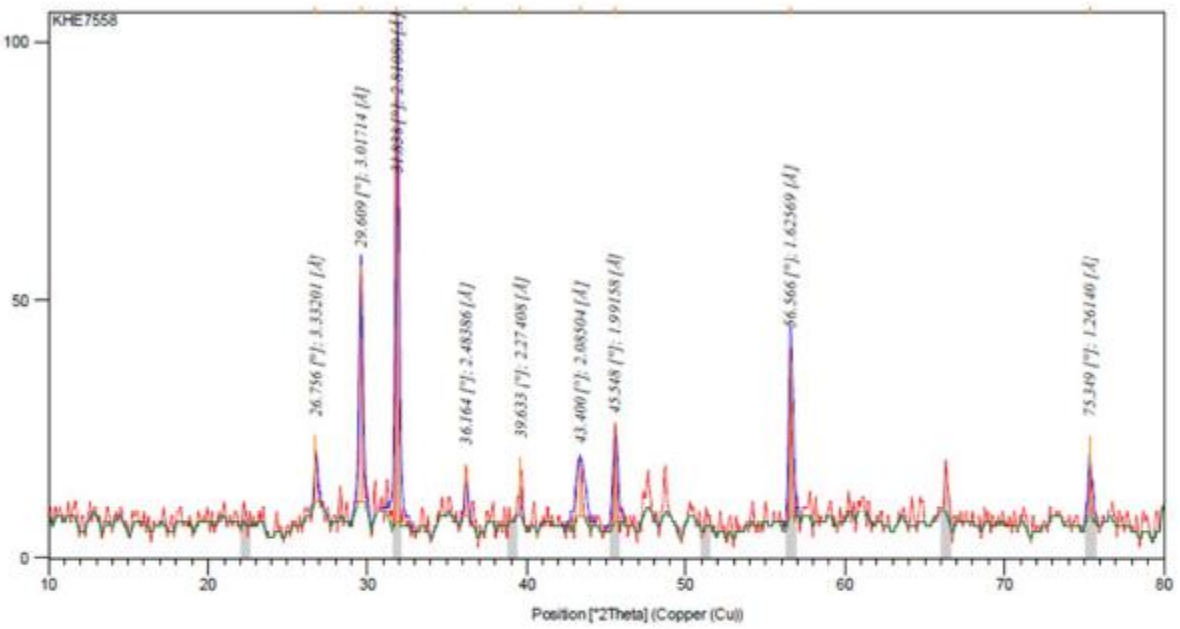
۳.۱.۵. پتانسیل احیا و فعالیت میکروارگانیسم‌ها

پتانسیل احیا اساساً مقدار میزان هوادهی در خاک را نشان می‌دهد. پتانسیل احیای بالاتر نشان‌دهندهٔ اکسیژن بیشتر در خاک است. مقادیر کم پتانسیل احیا ممکن است نشانه‌ای از مساعد بودن شرایط برای فعالیت میکروبیولوژیکی بی‌هوازی باشد. غلظت اکسیژن معمولاً با افزایش عمق خاک کاهش می‌یابد. در خاک‌های با ترکیب شیمیایی خنثی یا قلیایی، غلظت اکسیژن درنتیجه مشارکت آن در واکنش کاتدی، تأثیر مهمی بر سرعت خوردگی دارد. حتی در شرایط بی‌هوازی و در حضور میکروب‌های خاص (مانند باکتری‌های احیاکنندهٔ سولفات)، نرخ خوردگی می‌تواند بسیار بالا باشد. انتقال اکسیژن در خاک‌های خشک و درشت بافت سریع‌تر از بافت‌های ریز و غرقابی است. بدیهی است که حفاری می‌تواند درجهٔ هوادهی را در خاک افزایش

دهد. به‌طورکلی پذیرفته شده است که نرخ خوردگی در خاک آشفته با در دسترس بودن اکسیژن بیشتر به‌طور قابل توجهی بیشتر از خاک دست نخورده است.

جدول ۱۴.۵. آنالیز خاک در نزدیکی نیروگاه آبادان [۱۸]

Center No.	Al (ppm)	Fe (ppm)	Na (ppm)	S (ppm)	Mg (%)	Ca (%)
1	19593	11742	23496	21121	>2	>10
2	30188	18579	67536	12693	>2	>10
3	32678	17510	7685	3480	0.17927	>10
4	28527	17712	18985	1278	>2	>10
5	26046	14046	21943	11456	0.17546	>10
6	26519	14245	36761	1317	0.19848	>10
7	26539	15041	9019	2748	0.18510	>10



شکل ۸.۵. آنالیز خاک در نزدیکی نیروگاه آبادان به روش تفرق اشعهٔ ایکس [۱۸]

خورندگی خاک می‌تواند توسط میکروارگانیسم‌های بی‌هوازی مثل باکتری‌های نوع احیاکنندهٔ سولفات (SRB) انجام شود. باکتری‌های احیاکنندهٔ سولفات، سولفات اطراف لوله را احیا و به سولفید تبدیل می‌کنند. مصرف هیدروژن در واکنش احیا، باعث به هم خوردن

پلاریزاسیون فولاد (دی‌پلاریزه شدن در کاتد) می‌شود که در نهایت باعث خوردگی لوله خواهد شد. نهایتاً لایهٔ سیاه‌رنگ پیریت بر روی فولاد ایجاد می‌شود. با استفاده از اسید کلریدریک رقیق و ریختن آن بر روی محصول خوردگی، گاز H_2S متصاعد می‌شود. باکتری‌های SRB در محدودهٔ pH = ۵/۵-۹ فعال هستند و مناسب‌ترین pH برای فعالیت آنها حدود ۷ و درجه حرارت مناسب جهت رشد و نمو آنها ۱۰-۳۵°C درون خاک است. واکنش‌های مربوط به احیای سولفات و تشکیل سولفید و در نهایت تشکیل لایهٔ سیاه‌رنگ پیریت به‌صورت زیر است.

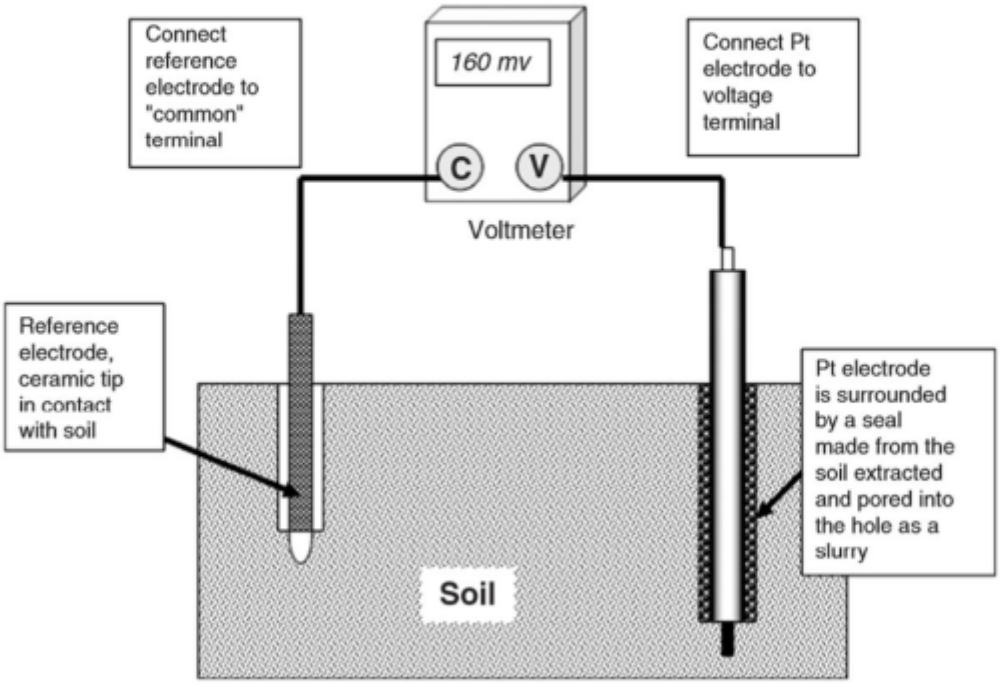
$$2SO_2 + 4H_2 \rightarrow 2S^{2-} + 4H_2O$$

محصول واکنش H_2S است که می‌تواند با یون Fe^{2+} سولفید آهن تولید نماید. واکنش کلی عبارت‌اند از:

$$Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 4H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_2 + FeS + 2OH^-$$

اندازه‌گیری پتانسیل احیای محیط نیز می‌تواند روش پیش‌بینی وجود یا عدم وجود باکتری‌های غیرهوازی باشد. در این حالت از یک الکترود پلاتین و یک الکترود مرجع استفاده می‌شود. مشخصات مربوط به این اندازه‌گیری‌ها در استاندارد BS-1377 آمده است (شکل ۵-۹). پتانسیل احیای هیدروژن در حالتی که از الکترود کالومل اشباع استفاده شود به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$E_H = E_P + 250 + 60\,(pH - 7)$$



شکل ۹.۵. تصویر شماتیکی از ست آپ اندازه‌گیری پتانسیل احیا [۵]

هرچه پتانسیل احیا بیشتر باشد، میزان خورندگی توسط باکتری‌های احیاکنندهٔ سولفات کمتر خواهد شد. جدول ۱۵.۵ نشان‌دهندهٔ این است که پتانسیل اندازه‌گیری‌شده، می‌تواند به‌عنوان معیاری برای فعالیت باکتری‌ها محسوب شود.

جدول ۱۵.۵. رابطهٔ بین پتانسیل احیا و میزان فعالیت باکتری‌ها (میزان خوردگی) [۱۹]

E_H (mV SHE)	E_H (mV CSE)	SRB corrosion probability
<100	< -200	High
100–200	−200 to −100	Moderate
200–400	−100 to 100	Limited
>400	>100	Nil

باید توجه نمود که رشد و نموّ باکتری SRB در زمین‌های لجن‌زار، خاک رس و یا باتلاق‌ها شایع‌تر است. معیار حفاظت که درواقع همان پتانسیل حفاظت است، در خاک‌های حاوی SRB در حدود ۱۰۰ میلی‌ولت منفی‌تر از پتانسیل حفاظت در شرایط معمولی است. در مورد ارتباط بین pH و پتانسیل احیا ذکر این نکته لازم است که اگر مقدار pH خارج از محدودهٔ ۸/۵-۵/۵ باشد، نیازی به اندازه‌گیری پتانسیل احیا نیست، چون میکروارگانیسم‌ها در این محدودهٔ از pH فعال نیستند. اینکه چه میکروارگانیسمی در چه پتانسیلی فعال است تاحدودی از روی داده‌های جدول ۱۶.۵ مشخص می‌شود.

جدول ۱۶.۵. پتانسیل احیای واکنش‌های بیوشیمیایی توسط میکروارگانیسم‌ها [۲۱-۲۰]

Reaction	E_h (V)	ΔG
Reduction of O_2 AEROBIC OXIDATION		
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	+0.812	-29.9
Reduction of NO_3^- DENITRIFICATION		
$2NO_3^- + 6H^+ + 6e^- \rightarrow N_2 + 3H_2O$	+0.747	-28.4
Reduction of Mn^{4+}		
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	+0.526	-23.3
Reduction of Fe^{3+}		
$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^- \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	-0.047	-10.1
Reduction of SO_4^{2-}		
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- \rightarrow H_2S + 4H_2O$	-0.221	-5.9
Reduction of CO_2 METHANOGENESIS		
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	-0.244	-5.6

ادامهٔ جدول ۱۶.۵

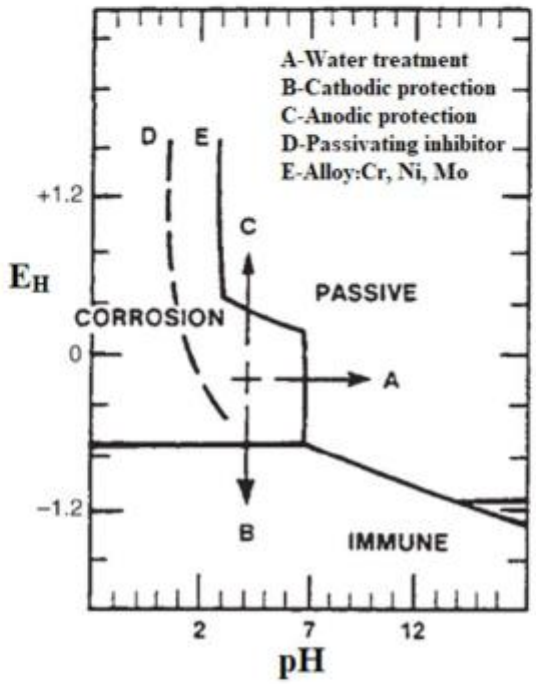
Biochemical Reactions and Corresponding ORP Values	
Biochemical Reaction	**ORP, mV**
Nitrification	+100 to +350
cBOD degradation with free molecular oxygen	+50 to +250
Biological phosphorus removal	+25 to +250
Denitrification	+50 to -50
Sulfide (H_2S) formation	-50 to -250
Biological phosphorus release	-100 to -250
Acid formation (fermentation)	-100 to -225
Methane production	-175 to -400

۲.۵. آب

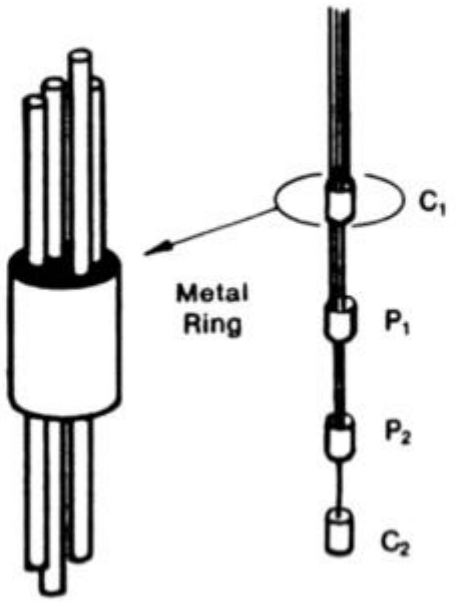
بسیاری از تجهیزات صنعتی که تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرند، در محیط آب قرار دارند. بسته به نوع و کیفیت آب، میزان خورندگی و به‌تبع آن داده‌های طراحی حفاظت کاتدی سازه‌ها، متفاوت خواهد بود. به‌همین دلیل میزان خورندگی آب و روش‌های کنترل خوردگی آن در صنایع همواره مورد بحث مهندسان خوردگی و تخصص‌های شیمی و مهندسی شیمی بوده است. آب مورد نیاز برای صنایع از منابع مختلفی ازجمله آب‌های سطحی مثل رودخانه‌ها و آب پشت سدها و یا آب‌های زیرزمینی مثل آب چاه و یا در بعضی موارد هم از آب دریا تأمین می‌شود. برای کنترل و کاهش خورندگی آب‌های سطحی و آب چاه مورد استفاده در صنعت، مستقل از نوع حفاظت و کنترل خوردگی به روش حفاظت آندی یا کاتدی، به‌کارگیری بازدارنده‌ها و یا انتخاب مواد (شکل ۱۰.۵)، باید از روش‌های پیش‌تصفیه، تصفیه، و درصورت نیاز از اسمز معکوس، تنظیم اندیس اشباع پایداری، مواد بایوساید و تزریق بازدارنده‌ها استفاده شود. در موارد خاص مثل بویلرها و یا صنایع داروسازی و... که نیاز به آب باکیفیت بالاتری هست، پس از عملیات تصفیه، نرم‌سازی و استفاده از اسمز معکوس، از روش‌های تبادل یونی برای حذف کامل آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در آب و در نهایت با توجه به نوع رژیم شیمیایی در نظر گرفته‌شده، از مواد شیمیایی مثل ترکیبات فسفات و آمونیاک برای تنظیم pH نیز استفاده می‌شود.

برای استفاده از آب دریا در صنایع، راهی جز شیرین کردن آب از طریق آب‌شیرین‌کن و یا اسمز معکوس وجود ندارد. به‌دلیل بالا بودن املاح آب دریا، هزینهٔ تصفیه و شیرین کردن بالاست. بسیاری از سازه‌های مجاور آب به‌وسیلهٔ حفاظت کاتدی توأم با پوشش رنگ، در برابر

خوردگی مقاومت خوبی دارند. آنچه که در آب مثل خاک اهمیت زیادی دارد، مقاومت مخصوص و یا کنداکتیویتهٔ آب است. روش اندازه‌گیری مقاومت آب تقریباً مشابه حالت چهار پینه، البته با مختصری تفاوت است (شکل ۱۱.۵). جهت اندازه‌گیری مقاومت مخصوص، می‌توان از دستگاه‌های اندازه‌گیری کنداکتیویتهٔ آب هم استفاده کرد.



شکل ۱۰.۵. روش‌های کاهش خوردگی فولاد مرتبط با نمودار پوربه [۲۲]



شکل ۱۱.۵. روش چهار پینهٔ بهینه‌شده برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی آب [۲۳]

به‌طور کلی در محیط‌های آبی، فاکتورهای مهمی که باید به آنها توجه نمود عبارت‌اند از: اندیس‌های پایداری، مقاومت الکتریکی آب، املاح و ناخالصی‌های آب، سرعت آب و pH. به‌طور مثال مقاومت آب دریا در حدود ۳۰-۲۰ اهم سانتی‌متر، مقاومت آب آشامیدنی معمولی حدود ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم سانتی‌متر، مقاومت آب مقطر حدود ۵۰۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر و مقاومت آب خالص ۲۰۰۰۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر است (جدول ۱۷.۵). البته براساس شرایط آب‌وهوایی هر منطقه مقاومت و درنتیجه میزان خورندگی محیط فرق می‌کند. به‌طور مثال با افزایش دما و غلظت املاح میزان کنداکتیویتهٔ آب زیاد خواهد شد.

جدول ۱۷.۵. داده‌های مقاومت مخصوص آب‌های مختلف [۱]

Water	ρ, Ω · cm
Pure water	20,000,000
Distilled water	500,000
Rainwater	20,000
Tap water	1000–5000
River water (brackish)	200
Seawater (coastal)	30
Seawater (open sea)	20–25

۱.۲.۵. کنترل شیمیایی آب در صنعت

هدف از کنترل شیمیایی آب، کاهش عوامل خورندگی و رسوب‌ساز و در مواردی هم کاهش فعالیت‌های میکروبی آن است. البته حفاظت کاتدی در بدترین کیفیت آب و بدون هیچ‌گونه عملیات تصفیه مثل شرایط آب دریا هم کاربری دارد و می‌تواند سازه‌های در معرض را تحت حفاظت قرار دهد. عملیات تصفیهٔ آب برای اهداف دیگری، بسته به نوع کاربرد، انجام می‌شود که در این ارتباط، مهندس طراح حفاظت کاتدی باید از آن اطلاع داشته باشد. به‌طور مثال امکان رسوب‌گذاری مناسب در سیستم آب شهری و یا سیستم خنک‌کن برای کنترل نسبی خوردگی، می‌تواند جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی سازه در سمت آب را کاهش دهد. خلاصه اینکه مهندسان طراح مستقل از اینکه حفاظت کاتدی بخواهد در سیستم آنها نصب شود یا نشود، باید کنترل شیمی و مواد تزریقی به آب را به‌نحوی انجام دهند که شاهد کمترین میزان خوردگی و رسوب باشند. بررسی مؤلف نشان می‌دهد وجود املاح زیاد خصوصاً وجود کاتیون‌های زیاد، باعث تشکیل رسوب بیش از حد بر روی سطح حفاظت‌شده می‌شود. به‌عبارتی مثل شرایط آبکاری کاتیون‌ها بر روی سطح کاتد رسوب می‌کنند.

بسته به نوع کاربرد و مصرف آب، روش‌های کنترل شیمیایی و فیزیکی آب متفاوت است. مهندس خوردگی باید تغییر شرایط محیطی را به‌عنوان یک روش مهم و تأثیرگذار در کاهش و کنترل خوردگی بااهمیت بداند. مراحل کنترل شیمیایی آب چاه و آب رودخانه برای مصرف شرب، عموماً شامل حذف مواد معلق، زلال‌سازی و حذف کدورت آب و بعضاً کاهش سختی است. در بعضی موارد که سختی آب بالاست، ممکن است عملیات نرم‌سازی و کاهش سختی هم انجام شود. استفاده از کلرزنی برای از بین بردن عوامل میکروبی نیز انجام می‌شود. برای کنترل شیمیایی آب برج در سیستم خنک‌کن علاوه‌بر حذف عوامل سختی، کلرزنی و تنظیم اندیس پایداری، از مواد بازدارنده نیز استفاده می‌شود. در ادامه برای مواردی که به آب باکیفیت بالاتری نیاز هست، استفاده از اسمز معکوس و رزین‌های تبادل یونی ضروری است.

عملیات پیش‌تصفیه: هدف اصلی عملیات پیش‌تصفیه، حذف مواد معلق و عوامل رسوب‌ساز و کاهش سختی می‌باشد. سختی آب برحسب کربنات کلسیم مشخص می‌شود (جدول ۱۸.۵).

جدول ۱۸.۵. میزان سختی آب برحسب میزان کربنات کلسیم [۲۷]

Hardness (as ppm $CaCO_3$)	Classification
< 15	Very soft
15 - 50	Soft
50 - 100	Medium hard
100 - 200	Hard
> 200	Very hard

عملیات پیش‌تصفیه با انجام مراحل ته‌نشینی، انعقادسازی، فیلتراسیون و تزریق بعضی مواد پلیمری صورت می‌گیرد. مراحل ته‌نشینی بیشتر برای آب‌های سطحی دارای املاح زیاد مثل آب رودخانه کاربرد دارد. آب چاه که از سفره‌های زیرزمینی تأمین می‌شود، معمولاً مرحله ته‌نشینی ندارد. مرحلهٔ بعدی، انعقادسازی آب خام است. در این مرحله ذرات ریز مولد کدری که به‌صورت معلق در آب هستند، توسط نمک‌های آهن یا آلومینیم به ذرات درشت‌تر تبدیل شده و رسوب می‌کنند. ترکیب حاصل از واکنش نمک‌های آهن و یا آلومینیم با بی‌کربنات‌های موجود در آب $Fe(OH)_3$ یا $Al(OH)_3$ است. واکنش‌های مربوطه به‌صورت زیر است [۲۵-۲۴]:

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2$$
$$2FeCl_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2$$
$$Al_2(SO_4)_3.4H_2O + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 + 4H_2O$$

ترکیبات هیدروکسید آهن سه ظرفیتی $Fe(OH)_3$ و هیدروکسید آلومینیم $Al(OH)_3$ و یا پلی‌آلومینیم کلراید (PAC = Aln(OH)mCl(3n-m)) دارای بار مثبت هستند که با آنیون‌های SO_4^{2-} و Cl^- خنثی شده و یک رسوب یا لختهٔ متخلخل و حجیم ایجاد می‌کنند. با نفوذ ذرات معلق، باکتری‌ها و مواد آلی به داخل لخته‌های متخلخل، لخته سنگین شده و به‌راحتی ته‌نشین می‌شود. هر مادهٔ منعقدکننده در یک محدودهٔ pH کارایی دارد. بهترین وضعیت pH آن است که میزان رسوب‌گذاری بالا و حلالیت لخته در کمترین مقدار باشد. پلی‌آلومینیم کلراید ترکیب معدنی و شبه آلی دارد و در اثر هیدرولیز مشابه آلئوم ترکیب هیدروکسید آلومینیم $Al(OH)_3$ ایجاد می‌کند. از مزایای مادهٔ پلی‌کلراید آلومینیم می‌توان به حذف مواد آلی در آب و کاهش مصرف اسید برای تنظیم pH نام برد. هزینهٔ نسبتاً بالای آن و نگهداری و همچنین مضرات بهداشتی از جهت سلامتی انسان، از معایب این ماده می‌باشد.

به تجربه ثابت شده است که کلرورفریک در محدودهٔ pH = ۴-۱۱ کاربرد دارد، که در محدودهٔ pH=۶-۷ به‌دلیل عدم حلالیت $Fe(OH)_3$، عملیات زلال‌سازی بهتر صورت می‌گیرد. با توجه به مزیّت کلرورفریک ($FeCl_3$) نسبت‌به آلئوم ($Al_2(SO_4)_3$) به‌لحاظ محدودهٔ کارایی pH، اکثر صنایع از کلرورفریک استفاده می‌کنند. کلرورفریک به‌صورت خشک و یا به‌صورت محلول ۴۰-۳۵ درصد جهت تزریق به آب، در دسترس است. جهت تعیین شرایط عملیات انعقاد از آزمون جار استفاده می‌شود. مقدار باقی‌ماندهٔ $FeCl_3$ در حدود ۳۰ppm-۲۵، معقول خواهد بود.

مرحلهٔ بعدی در عملیات پیش‌تصفیه، استفاده از کمک منعقدکننده‌ها است. در مواردی که میزان املاح به اندازه‌ای باشد که کلرورفریک نتواند کارایی مناسبی داشته باشد، از مواد کمک منعقدکنندهٔ آهک_ سودا و در مواردی هم از مواد پلیمری استفاده می‌شود. آهک و سودا جهت حذف سختی و کاهش ترسیب کربنات سدیم به کار برده می‌شود. سختی کربنات کلسیم و منیزیم توسط آهک و سودا حذف شده و به‌همراه مواد منعقدکنندهٔ کلرورفریک، یک لجن متراکم ایجاد می‌شود که در حذف مواد معلق نیز مؤثر خواهد بود. واکنش‌های مربوطه به‌صورت زیر است:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O$$
$$Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + Mg(OH)_2 + 2H_2O$$

آهک با سختی غیرکربناتی کلسیم و منیزیم نیز ترکیب شده و آنها را به‌صورت محلول و یا نامحلول تبدیل می‌کند. در این رابطه هیدروکسید منیزیم $Mg(OH)_2$ نامحلول تشکیل می‌شود که با عملیات ته‌نشینی و فیلتراسیون، از آب خارج می‌شود. در طی فرایند فوق محصولات

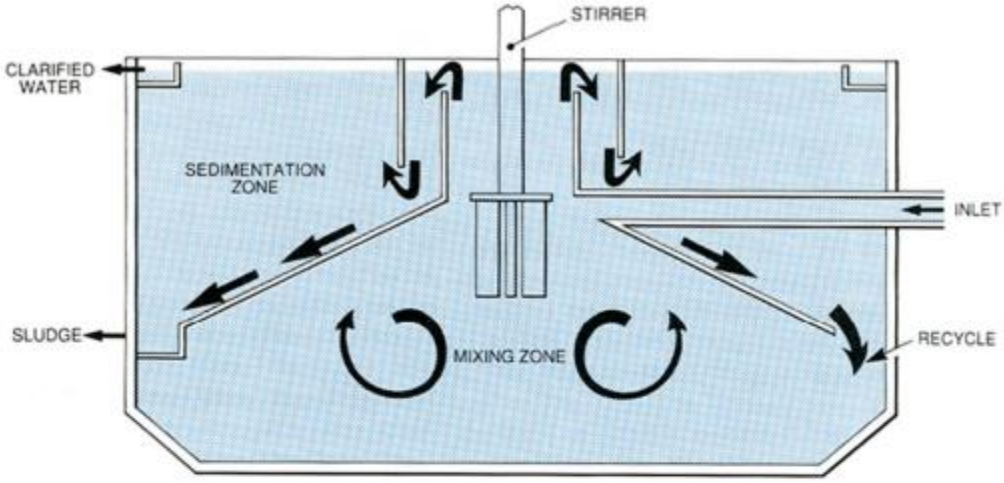
جانبی محلول شامل: سولفات کلسیم، کلرید کلسیم و غیره، طبق واکنش‌های زیر به وجود می‌آید که باید در فرایند نرم‌سازی از آب حذف شوند. واکنش‌های آهک با سختی غیرکربناتی کلسیمی و منیزیمی به‌صورت زیر است:

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4$$
$$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2$$

معمولاً نمک‌های $MgSO_4$ و $MgCl_2$ به‌طور طبیعی در آب حضور دارند و مجموعهٔ سختی غیرکربناتی کلسیمی یا درواقع سختی دائم آب را تشکیل می‌دهند. این مواد می‌توانند توسط سوداش (Na_2CO_3) به شکل رسوب از آب جدا شوند. واکنش‌های مربوطه به‌صورت زیر است:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$$
$$CaCl_2 + Na_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2NaCl$$

با وجود کاهش مقدار کلسیم موجود در آب، به نظر می‌رسد سولفات سدیم و کلرید سدیم به‌عنوان محصولات فرعی وارد آب شده و باعث بالا رفتن T.D.S می‌شوند. در واکنش‌هایی که آهک به‌عنوان نرم‌کننده به کار می‌رود، تاحدودی T.D.S کاهش می‌یابد. به‌همین دلیل برای آب‌هایی که دارای سختی کربناته می‌باشند استفاده از آهک بلامانع بوده و موجب کاهش T.D.S می‌شود. به گردش درآوردن لجن و افزایش درجه حرارت در کمک به کاهش سختی مفید خواهد بود. در موارد خاصی جهت کمک به عملیات انعقادسازی ممکن است از پلی‌الکترولیت‌ها نیز استفاده شود. پلیمرهای مورد استفاده، دیسپرسنت و یا لخته‌ساز هستند. مواد پلیمری به‌طورکلی می‌توانند به‌صورت دیسپرسنت کاتیونیک مثل پلی‌آمین‌ها و لخته‌سازهای کاتیونیک، آنیونیک و نانیونیک باشند. تمام فعل و انفعالات و واکنش‌های شیمیایی در مخازن تصفیهٔ خانه‌های آب شهری و یا مخازن کلاریفایرهای سر بسته یا سر باز انجام می‌شود. شکل ۱۲.۵ تصویر یک نمونه مخزن کلاریفایر به‌همراه چرخانندهٔ مرکزی آن را نشان می‌دهد. در بعضی از نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و پالایشگاه‌ها پس از عبور آب از کلاریفایر، جهت کاهش بار اضافی و اشباع زودهنگام اسمز معکوس و رزین‌های معاوضهٔ یونی، از فیلترهای ثقلی استفاده می‌شود. آب حاوی جامدات به‌جامانده از خروجی کلاریفایر با عبور از بستر فیلتر ثقلی ذرات مذکور از آب جدا شده و بر روی بستر فیلتر جمع می‌شوند. جنس ذرات فیلتر عموماً شن، زغال فعال، آنتراسیت، سنگ لعل و یا مگنتیت بوده، ولی اندازهٔ ذرات آنها متفاوت است. عموماً ذرات از ریز به درشت در جهت جریان آب طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۱۲.۵. تصویر شماتیکی مخزن کلاریفایر و عملکرد آن [۲۶]

تنظیم اندیس اشباع پایداری: در تصفیه خانه‌های آب شهری و صنایع مختلف پس از عملیات تصفیهٔ اولیه و قبل از ارسال آب به داخل لوله‌های انتقال با تنظیم اندیس اشباع سعی بیشتری برای کنترل خوردگی و رسوب می‌کنند. چند نمونه اندیس اشباع توسط محققان ارائه شده است که اندیس اشباع رایزنر، لانگلیر، خوردگی و پوکوریوس کاربری بیشتری در بین مهندسان تصفیهٔ آب دارد. مقدار اندیس‌های مذکور وابسته به میزان pH، کل جامدات محلول (T.D.S)، درجه حرارت، سختی کلسیم برحسب کربنات، قلیاییت متیل‌اورانژ مشخص می‌شود. در عمل اندیس پایداری را به‌نحوی تنظیم می‌کنند که آب کمی رسوب‌گذار باشد. اساس این اندیس‌ها بر پایهٔ شیمی اسید کربنیک و کربنات کلسیم توسط واکنش زیر است:

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O$$

اندیس لانگلیر (Langelier): $LI = pH - pH_S$

اندیس رایزنز (Ryznar): $RI = 2(pH_S) - pH$

اندیس پوکوریوس (Puckorius): $PI = 2pH_S - pH_{eq}$

اندیس خوردگی (Aggressiveness): $AI = pH + \log(A)\ (H)$ که A و H به‌ترتیب مقدار عددی قلیاییت و سختی برحسب میلی‌گرم بر لیتر کربنات کلسیم است. در این فرمول‌ها مقادیر pHواقعی آب است که توسط pH متر اندازه‌گیری می‌شود. $pH_S = (9.3+A+B) - (C+D)$ از داده‌های جدول‌های آنالیز آب (جدول ۱۹.۵) به دست می‌آید. مقدار pH_{eq} برای محاسبهٔ اندیس خوردگی از رابطهٔ $pH_{eq} = 1.465 \log (T.AIK) + 4.54$ به دست می‌آید. T.ALK قلیاییت کل

برحسب میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم است. معیارهای خورندگی و رسوب‌گذاری آب با اندیس‌های مختلف در جدول‌های ۲۰.۵ و ۲۱.۵ ارائه شده است. جدول ۲۲.۵ معیارهای خوردگی برای فلزات و آلیاژهای رایج در سیستم برج خنک‌کن را نشان می‌دهد.

جدول ۱۹.۵. مقادیر A, B, C, D برای محاسبهٔ pH_s [۲۸]

TDS (mg/l)	A	Temp. (°C)	B	Calcium hardness (mg/l, $CaCO_3$)	C	Alkalinity (mg/l, $CaCO_3$)	D
50-300	0.1	0-1	2.6	10-11	0.6	10-11	1.0
400-1000	0.2	2-6	2.5	12-13	0.7	12-13	1.1
		7-9	2.4	14-17	0.8	14-17	1.2
		10-13	2.3	18-22	0.9	18-22	1.3
		14-17	2.2	23-27	1.0	23-27	1.4
		18-21	2.1	28-34	1.1	28-35	1.5
		22-27	2.0	35-43	1.2	36-44	1.6
		28-31	1.9	44-55	1.3	45-55	1.7
		32-37	1.8	56-69	1.4	56-69	1.8
		38-43	1.7	70-87	1.5	70-88	1.9
		44-50	1.6	88-110	1.6	89-110	2.0
		51-55	1.5	111-138	1.7	111-139	2.1
		56-64	1.4	139-174	1.8	140-176	2.2
		65-71	1.3	175-220	1.9	177-220	2.3
		72-81	1.2	230-270	2.0	220-270	2.4
				280-340	2.1	280-350	2.5
				350-430	2.2	360-440	2.6
				440-550	2.3	450-550	2.7
				560-690	2.4	560-690	2.8
				700-870	2.5	700-880	2.9
				870-1000	2.6	890-1000	3.0

$A = (\log [TDS] - 1)/10$

$B = -13.12 \times \log (°C + 273) + 34.55$

$C = \log [Ca^{+2}] - 0.4$

$D = \log [Alk]$

جدول ۲۰.۵. پیش‌بینی وضعیت خوردگی و رسوب توسط اندیس رایزنر [۲۸]

Ryznar Stability Index	Tendency of Water
<4.0	Extremely scale forming
4.0-5.0	Strongly scale forming
5.0-6.0	Scale forming
6.0-7.0	Uncertainty zone, scale/pitting corrosion possible
7.0-8.0	Corrosive
8.0-9.0	Strongly corrosive
>9.0	Extremely corrosive

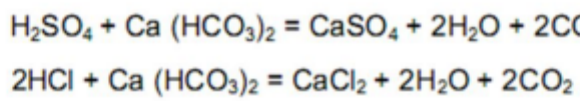
جدول ۲۱.۵. خلاصهٔ شاخص‌های اندیس‌های اشباع جهت پیش‌بینی خوردگی و رسوب [۲۹]

Index	Equation	Index value	Water condition
Langelier saturation index (LSI)	LSI = pH − pHs	LSI > 0	Supersaturated, tend to precipitate $CaCO_3$
	pHs = A + B − log (Ca^{2+}) − log (Alk) pH < = 9.3	LSI = 0	Saturated, $CaCO_3$ is in equilibrium
	pHs = (9.3 + A + B) − (C + D) (3) pH > 9.3	LSI < 0	Undersaturated, tend to dissolve solid $CaCO_3$
Ryznar stability index (RSI)	RSI = 2pHs − pH	RSI < 6	Supersaturated, tend to precipitate CaCO3
		6 < RSI < 7	Saturated, CaCO3 is in equilibrium
		RSI > 7	Undersaturated, tend to dissolve solid$CaCO_3$
Puckorius scaling index (PSI)	PSI = 2 (pHeq) − pHs	PSI < 6	Scaling is unlikely to occur
	pH = 1.465 + log (T.ALK) + 4.54	PSI > 7	Likely to dissolve scale
	pHeq = 1.465 × log(T.ALK) + 4.54		
Larson-skold index (LS)	Ls = (Cl− + SO_4^{2})/(HCO3 + CO_3^{2})	LS < 0.8	Chloride and sulfate are unlikely to interfere with the formation of protecting film
		0.8 < LS < 1.2	Corrosion rates may be higher than expected
		LS > 1.2	High rates of localized corrosion may be expected
Aggressive index (AI)	AI = pH + log[(Alk)(H)]	AI > 12	Nonaggressive
		10 < AI < 12	Moderately aggressive
		AI < 10	Very aggressive

جدول ۲۲.۵. معیارهای خوردگی برای فلزات و آلیاژهای رایج در سیستم برج خنک‌کن [۳۰]

Metal	Corrosion rate (mm/yr)	Classification
Mild steel piping	< 0.0254	Excellent
	> 0.0254 to 0.0762	Good
	> 0.0762 to 0.127	Fair
	> 0.127 to 0.254	Poor
	> 0.254	Unacceptable
Mild steel heat exchanger tubing	< 0.0051	Excellent
	> 0.0051 to 0.0127	Good
	> 0.0127 to 0.0254	Fair
	> 0.0254 to 0.0381	Poor
	> 0.0381	Unacceptable
Copper and copper alloys	< 0.0025	Excellent
	> 0.0025 to 0.0051	Good
	> 0.0051 to 0.0076	Fair
	> 0.0076 to 0.0127	Poor
	> 0.0127	Unacceptable
Galvanized steel	< 0.051	Excellent
	> 0.051 to 0.102	Good
	> 0.102 to 0.203	Fair
	> 0.203 to 0.254	Poor
	> 0.254	Unacceptable
Stainless steel	< 0.0025	Acceptable
	> 0.0025	Unacceptable

با تزریق اسید سولفوریک با تغییر pH، اندیس‌های مذکور را می‌توان تنظیم و از خورندگی و رسوب‌گذاری تا حد زیادی جلوگیری کرد. درواقع با تزریق اسید سولفوریک واکنش انحلال کربنات کلسیم اتفاق می‌افتد. استفاده از اسید معمولاً برای سیستم‌هایی که در آن تزریق منعقدکننده و کمک منعقدکننده باعث افزایش pH آب می‌شود، الزام‌آور است. درواقع تزریق اسید باعث انحلال نمک‌های رسوب‌ساز ازجمله کربنات کلسیم، سولفات کلسیم، فسفات کلسیم، نمک‌های منیزیم و سیلیس می‌شود. واکنش‌های مربوطه به‌صورت زیر است:



$$H_2SO_4 + Ca(HCO_3)_2 = CaSO_4 + 2H_2O + 2CO_2$$

$$2HCl + Ca(HCO_3)_2 = CaCl_2 + 2H_2O + 2CO_2$$

برای کنترل خوردگی و رسوب فقط به مقدار اندیس پایداری نمی‌توان بسنده نمود، زیرا تنها رسوب ایجادشدهٔ ترکیبات کربناتی نبوده و دیگر املاح رسوب‌گذار ازجمله رسوبات سیلیکاتی، سولفاتی و همچنین وجود بایوفیلم‌ها نیز باعث ایجاد رسوب می‌کنند. در بعضی موارد که میزان سولفات آب جبرانی بالا می‌رود، کارایی اسید سولفوریک کم می‌شود. در بعضی مراجع میزان سولفات کمتر از ۶۰۰ppm و در مواردی حتی ۱۲۰۰ppm و pH حدود ۷/۵-۷ جهت معیار استفاده از اسید سولفوریک ذکر شده است [۳۲-۳۱].

کنترل فعالیت‌های میکرو و ماکروارگانیسم‌ها: جانوران میکروسکوپی که در آب ایجاد می‌شوند، به سه دستهٔ عمدهٔ جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها تقسیم می‌شوند، عمدتاً باعث انسداد مسیر آب، خوردگی فلزات و مصرف مواد شیمیایی به‌کاررفته در سیستم خنک‌کن و همچنین تشکیل بایو فیلم و کاهش سطح انتقال حرارت در مبدل‌ها می‌شوند.

جهت کنترل فعالیت میکروارگانیسم‌ها، چند روش فیزیکی و شیمیایی وجود دارد. از عمده روش‌های فیزیکی می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- شست‌وشوی معکوس حرارتی.
- استفاده از اشعهٔ γ و ماورای بنفش.
- استفاده از جت آب.
- روش‌های مکانیکی مثل گلوله‌های اسفنجی، سمبه‌های فولادی و برس زدن.

در روش‌های شیمیایی از مواد بایوساید اکسیدکننده و غیراکسیدکننده استفاده می‌شود. از میان بایوسایدهای اکسیدکنندهٔ کلر، برم و ید، کلر بیشترین کاربرد را جهت کنترل بایو فاولینگ در سیستم‌های خنک‌کن دارد. وقتی کلر به‌صورت گاز یا هیپوکلریت سدیم به آب

تزریق می‌شود، ترکیبات مذکور به اسید هیپوکلریک و یا اسید هیپوکلرو، هیدرولیز شده به داخل دیواره‌های سلول میکروارگانیسم‌ها نفوذ می‌کند و آن را از بین می‌برد. باید توجه نمود که در pHهای خیلی بالا، به‌علت تفکیک بیش از حد اسید هیپوکلرو، هیچ‌گونه مسمومیتی برای میکروارگانیسم‌ها ایجاد نمی‌شود. بهترین pH جهت عدم تفکیک‌پذیری اسید هیپوکلرو در حدود ۵ است. کلر باقی‌مانده می‌باید در حدود ۲ppm-۱ باشد. درصورتی‌که کلر باقی‌مانده بیش از ۲ppm باشد، باعث خوردگی آلیاژهای به‌کاررفته در سیستم خنک‌کن می‌شود. جدول ۲۳.۵ تأثیر کلرزنی بر خوردگی این مواد را نشان می‌دهد. اخیراً استفاده از ازن برای شرایط آب دارای میکروارگانیسم‌ها نیز توجه شده است. به دلیل ایجاد خورندگی ازن در سازه‌های فولادی و آلیاژهای مس، باید توجه ویژه‌ای به آن نمود.

جدول ۲۳.۵. تأثیر کلرزنی بر خوردگی مواد [۳۳]

مواد و آلیاژ	مقدار کلر زنی	تأثیر مقدار کلر زنی بر خورندگی
Al-6X	تزریق ۲ ppm به طور پیوسته	ایجاد خوردگی شیاری پس از ۳ ماه
نوعی فولاد زنگ‌نزن	تزریق ۱۰ ppm به مدت ۴ ساعت در روز	ایجاد خوردگی شیاری پس از ۳ ماه
	تزریق ۰/۸-۰/۵ ppm	عدم خوردگی شیاری
316 SS	تزریق ۰/۲-۰/۱ ppm	عدم خوردگی
مس	تزریق ۳ ppm به طور متناوب	ایجاد خوردگی
فولاد کربنی	تزریق ۱ ppm به طور پیوسته	عدم خوردگی

از مواد بایوساید غیراکسیدکننده می‌توان به ترکیبات آلدهید، آرسنات‌ها، آمونیاک، آمین‌ها، ترکیبات سیانور، ترکیبات آلی فلزی و کلروفنل‌ها اشاره نمود. این مواد به‌دلیل پایداری بالای آنها در محدودهٔ وسیع‌تر pH، کارایی بالاتری نسبت‌به مواد اکسیدکننده دارند. استفاده از پوشش‌های اپوکسی حاوی مواد سمی مثل اکسیدهای مس در جعبهٔ آب و حتی لوله‌های آب و حفاظت کاتدی نیز ازجمله روش‌های کنترل تخریب‌های ناشی از میکروارگانیسم‌ها می‌باشد. مهم‌ترین روش‌های شیمیایی، استفاده از مواد بایوساید هستند. مواد بایوساید به دو دستهٔ اکسیدکننده و غیراکسیدکننده تقسیم‌بندی می‌شوند. کلر، ازن و برم سه نوع اکسیدکننده مهم مورد استفاده در صنعت هستند. بایوسایدهای غیراکسیدکننده بسیار مؤثرتر از بایوسایدهای

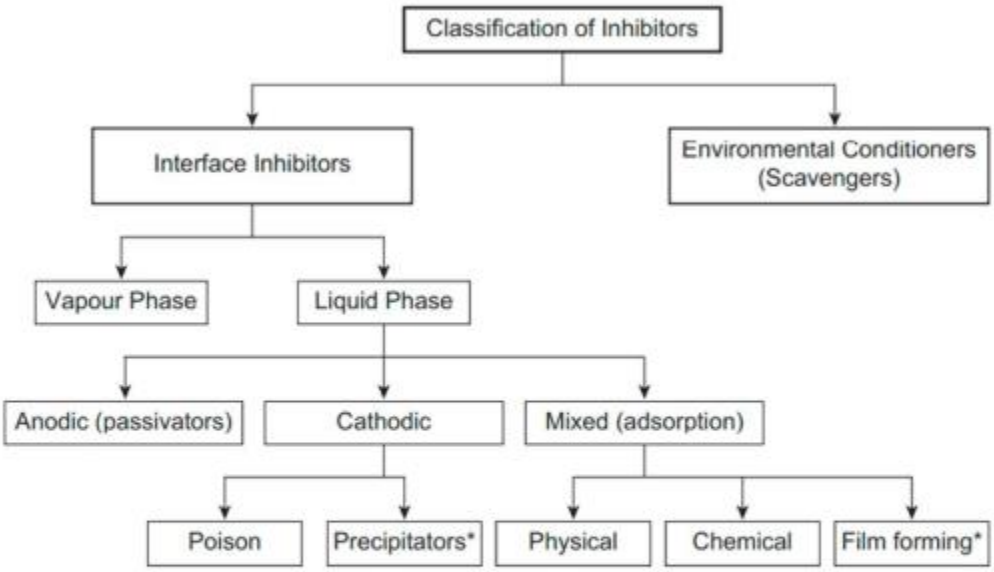
اکسیدکننده برای کنترل جلبک‌ها، قارچ‌ها و باکتری‌ها هستند. نکتهٔ اصلی این است که این مواد مستقل از pH هستند. مخلوط بایوسایدهای اکسیدکننده و غیراکسیدکننده اغلب برای کنترل بهینهٔ میکروارگانیسم‌ها کاربری دارند. بایوسایدهای معروف اکویید گلوتار اکویید، ایزو تیازول و ترکیبات آمونیوم چهار ظرفیتی (جدول ۲۴.۵) هستند. تجربه مؤلف نشان می‌دهد که ترکیبات آمونیوم چهار ظرفیتی برخلاف ظاهر حیرت‌انگیز آنها، درواقع کف‌کردگی باعث تجمیع عوامل رشد میکرو و ماکروارگانیسم‌ها در میان کف‌ها شده و به‌راحتی قابل‌جمع‌آوری هستند.

جدول ۲۴.۵. مواد بایوساید اکسیدکننده و غیراکسیدکننده و مقدار مصرفی آنها [۳۴]

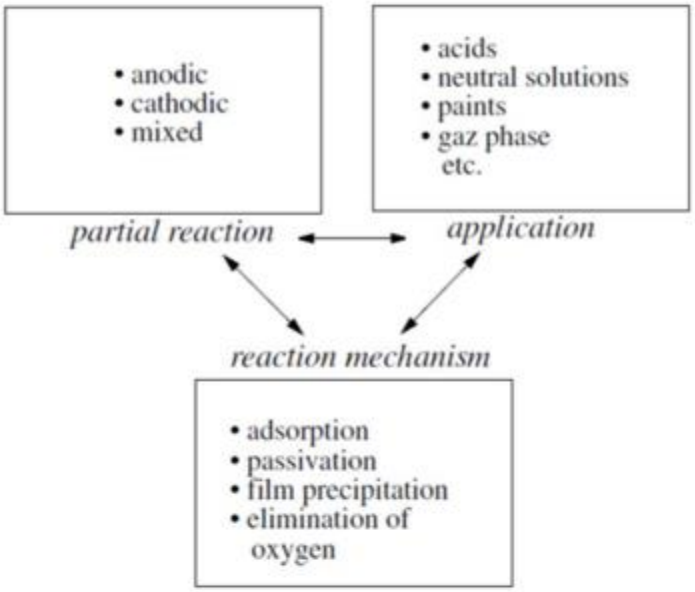
Biocides	Properties	Usual concentrations (mg/l)
Chlorine	Effective against bacteria and algae; oxidizing; pH dependent	0.1–0.2 continuous
Chlorine dioxide	Effective against bacteria, in a lesser extent against fungi and algae; oxidizing; pH-independent	0.1–1.0
Bromine	Effective against bacteria and algae; oxidizing; wide pH range	0.05–0.1
Ozone	Effective against bacteria and biofilms; oxidizing; pH-dependent	0.2–0.5
Isothiazolones	Effective against bacteria, algae and biofilms; non-oxidizing; pH-independent	0.9–10
QUATs[a]	Effective against bacteria and algae; non-oxidizing; surface activity	8–35
Glutaraldehyde	Effective against bacteria, algae, fungi and biofilms; non-oxidizing; wide pH range	10–70
THPS[b]	Effective against bacteria, algae and fungi; low environmental toxicity; specific action against sulfate-reducing bacteria.	—

[a]Quaternary ammonium compounds. [b]Tetrakis-hydroximethyl phosphonium.

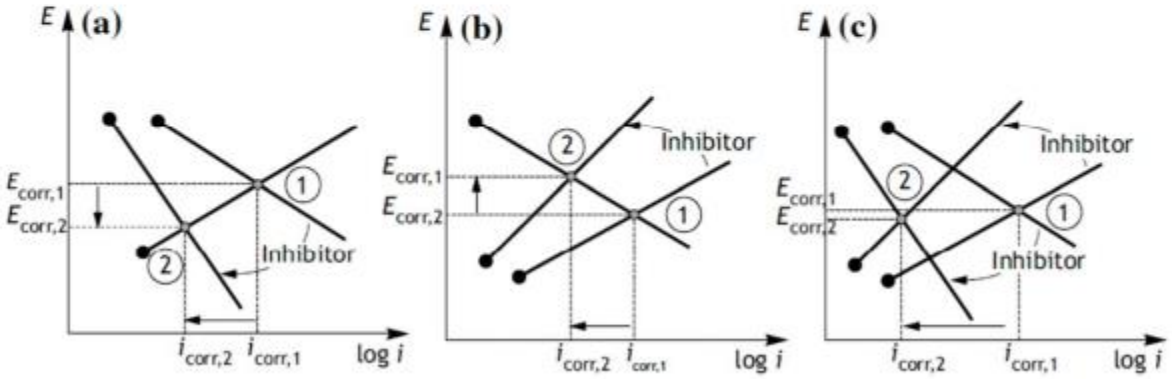
بازدارنده‌های خوردگی: استفاده از مواد بازدارنده‌ها و بایوسایدها به‌طور قابل توجهی می‌تواند مشکلات خوردگی، رسوب و فعالیت‌های میکروبی را کاهش دهد. دسته‌بندی‌های مختلفی برای بازدارنده‌ها به‌لحاظ عملکرد و تغییر پتانسیل سطح به عمل آمده است (شکل ۱۳.۵ تا شکل ۱۵.۵).



شکل ۵.۱۳. دسته‌بندی بازدارنده‌های خوردگی در صنعت [۳۵]



شکل ۵.۱۴. دسته‌بندی بازدارنده‌ها براساس مکانیسم واکنش‌ها، کاربرد محیطی و عملکرد کاتدی و آندی [۳۶]



شکل ۵.۱۵. دسته‌بندی بازدارنده‌ها براساس مکانیسم الکتروشیمیایی واکنش‌های کاتدی و آندی ترکیبی. نقطهٔ ۱: بدون تزریق بازدارنده. نقطهٔ ۲: کاهش سرعت خوردگی در حضور بازدارنده [۳۷]

جهت انتخاب یک بازدارندهٔ مناسب برای سیستم خنک‌کن بررسی موارد زیر ضروری است:

- شرایط آب به‌لحاظ ترکیب شیمیایی، فعالیت‌های میکروبی، سرعت و دما،
- میزان خوردگی و رسوب‌گذاری بر روی لوله‌ها و نمونه‌ها،
- تجربه و آشنایی با مواد بازدارندهٔ مؤثر،
- ملاحظات اقتصادی.

براساس مطالعات به‌عمل‌آمده، استفاده از بازدارنده‌های خوردگی بسته به شرایط آب دارای محدودیت‌هایی هستند. به‌طور مثال بازدارنده‌های خوردگی در شرایط آب با کلراید بالاتر از ۱۵۰۰ppm و سختی کل بالاتر از ۱۰۰۰ppm به‌ندرت کارایی دارند. ولی آنچه از وضعیت کلی سیستم خنک‌کن برمی‌آید این است که کنترل خوردگی، رسوب و فعالیت‌های میکروبی می‌باید توأم صورت بگیرد. به‌عبارتی استفاده از بازدارندهٔ رسوب باعث کاهش خوردگی زیر رسوبی و به‌تبع آن باعث عملکرد بهتر بازدارنده‌های خوردگی خواهد شد. نکتهٔ مهم این است که بازدارنده‌های خوردگی دربارهٔ رسوبات بایو فیلم به‌خوبی عمل نمی‌کنند و حتماً می‌باید از مواد بایوساید برای کنترل رسوبات مذکور استفاده نمود. افزایش سرعت آب عموماً باعث کاهش رسوب و در بعضی موارد کاهش خوردگی خواهد شد، ولی از جهتی می‌تواند باعث افزایش سرعت خوردگی سایشی شود. قابل توجه اینکه افزایش سرعت باعث انتقال حرارت بهتر در مبدل‌ها خواهد شد. افزایش دما باعث افزایش خوردگی و رسوب می‌شود. تاکنون بازدارنده‌های مختلفی جهت کنترل خوردگی و رسوب ارائه شده است. جدول ۲۵.۵ مواد بازدارنده برای فلزات به‌کاررفته در سیستم خنک‌کن را نشان می‌دهد. در جدول ۲۶.۵ دسته‌بندی مواد بازدارندهٔ مورد استفاده در اسیدها و انواع آب آمده است.

اسمز معکوس: یکی از روش‌های کاهش T.D.S آب، استفاده از روش اسمز معکوس است. در سیستم اسمز معکوس، آب دارای T.D.S بالا تحت فشار از یک غشای نیمه‌تراوا عبور کرده و میزان املاح آن کاهش می‌یابد (شکل ۱۶.۵). میزان فشار در حدود ۴۰-۲۰ بار است. غشا از جنس استات سلولز یا پلی‌آمید (نوع نایلونی) است. شکل ۱۷.۵ تصویر قرارگیری غشاها را در سیستم اسمز معکوس نشان می‌دهند.

شکل واقعی غشا به‌صورت فیبری مجوف (میان‌تهی) یا مارپیچی لایه‌ای است. راندمان غشاها بستگی به درجهٔ شوری آب تغذیه، درجه حرارت، فشار آب تغذیه و مدت‌زمان بهره‌برداری دارد. مواد آلی، کلر باقی‌مانده و کربنات‌ها و سولفات‌ها باعث تخریب غشاها

می‌شوند. جهت حذف مواد آلی بیشتر از ۰/۵ppm، از کلرزنی استفاده می‌شود، البته میزان باقی‌مانده نباید از ۰/۱ppm فراتر رود. جهت تقلیل تخریب‌های ناشی از کلر آزاد، از یک مادهٔ احیاکننده نظیر متابی‌سولفیت سدیم ($Na_2S_2O_5$) استفاده می‌شود. جهت حذف رسوبات ناشی از سختی آب از اسید سولفوریک رقیق استفاده می‌شود. استفاده از مواد ضدرسوب پایهٔ فسفاتی نیز مفید است.

جدول ۲۵.۵. دسته‌بندی مواد بازدارنده مورد استفاده در آب خنک‌کن [۳۸]

موارد	مواد تزریقی	نوع عملکرد	کارائی کلی	ملاحظات
خوردگی فولاد	کرومات	ممانعت کننده آندی	در حد بهینه	حفاظت کننده مس، عدم تخلیه
	روی	ممانعت کننده کاتدی	در حد بهینه	-
	پلی فسفات	ممانعت کننده کاتدی	تسبتاً مناسب	خورنده نسبت به مس
	فرو سیانید	ممانعت کننده آندی	محتاطانه	-
	نیتریت	ممانعت کننده آندی	محتاطانه	در حد مجاز
	سیلیکاتها	ممانعت کننده آندی	محتاطانه	-
	ارتو فسفات	ممانعت کننده کاتدی	ضعیف	-
	لیگنین سولفونات	ممانعت کننده آندی	ضعیف	تسریع کننده رشد باکتریها
خوردگی مس	تولی تری آزول	ممانعت کننده عمومی	در حد بهینه	مشکل فرموله کردن
	بنزو تری آزول	ممانعت کننده عمومی	مناسب	-
	مرکاپتو بنزو تری آزول	ممانعت کننده عمومی	مناسب	قابل اکسید شدن توسط گاز کلر
رسوب ، تمکها	پلی اکریلات با M.W=۵۰۰-۱۰۰۰	ضد رسوب	در حد بهینه	خورنده نسبت به مس
	پلی اکریلات با M.W=۱۰۰۰۰	ضد رسوب	مناسب	خورنده نسبت به مس
	فسفونات	ضد رسوب	در حد بهینه	خورنده نسبت به مس
	دی فسفونات‌ها	ضد رسوب	مناسب	خورنده نسبت به مس
	پلی فسفاتها	ضد رسوب	مناسب	قابل هیدرولیز به ارتو فسفات
	استرهای فسفاتی	ضد رسوب	مناسب	قابل هیدرولیز به ارتو فسفات
ذرات ، محصولات	فسفونات	پراکنده ساز	در حد بهینه	هیچ یک از این دسته مواد بر روی لایهٔ Fe_2O_3 تأثیر ندارد. ترخهای کارائی بسته به نگهداری Fe^{++} در محلول $77°F$ است.
	دی فسفونات	پراکنده ساز	در حد بهینه	
	پلی فسفونات	پراکنده ساز	تسبتاً مناسب	
	پلی اکریلات با M.W=۸۰۰-۱۰۰۰	پراکنده ساز	ضعیف	
	لایگنین سولفونات	پراکنده ساز	ضعیف	
ذرات مربوط به لجن	پلی اکریلات بامیلیون M.W=۴-۶	پراکنده ساز	مناسب	
	پلی آمیدها	منعقد کننده	مناسب	
ذرات مربوط به هیدروکربنها	آئروسل OT	امولسیون کننده	بهینه	ممکن است ایجاد کف کند

جدول ۲۶.۵. دسته‌بندی مواد بازدارندهٔ مورد استفاده در اسیدها و انواع آب [۱]

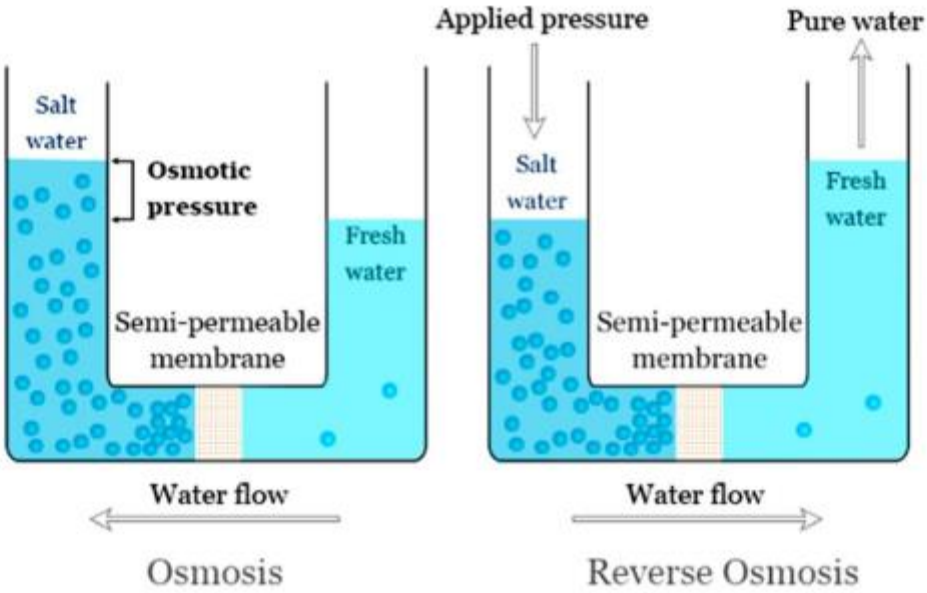
System	Inhibitor	Metals	Concentration
Acids			
HCl	Ethylaniline	Fe	0.5%
	MBT*	..	1%
	Pyridine + phenylhydrazine	..	0.5% + 0.5%
	Rosin amine + ethylene oxide	..	0.2%
H_2SO_4	Phenylacridine	..	0.5%
H_3PO_4	NaI	..	200 ppm
Others	Thiourea	..	1%
	Sulfonated castor oil	..	0.5–1.0%
	As_2O_3	..	0.5%
	Na_3AsO_4	..	0.5%
Water			
Potable	$Ca(HCO_3)_2$	Steel, cast iron	10 ppm
	Polyphosphate	Fe, Zn, Cu, Al	5–10 ppm
	$Ca(OH)_2$	Fe, Zn, Cu	10 ppm
	Na_2SiO_3	..	10–20 ppm
Cooling	$Ca(HCO_3)_2$	Steel, cast iron	10 ppm
	Na_2CrO_4	Fe, Zn, Cu	0.1%
	$NaNO_2$	Fe	0.05%
	NaH_2PO_4	..	1%
	Morpholine	..	0.2%
Boilers	NaH_2PO_4	Fe, Zn, Cu	10 ppm
	Polyphosphate	..	10 ppm
	Morpholine	Fe	Variable
	Hydrazine	..	O_2 scavenger
	Ammonia	..	Neutralizer
	Octadecylamine	..	Variable
Engine coolants	Na_2CrO_4	Fe, Pb, Cu, Zn	0.1–1%
	$NaNO_2$	Fe	0.1–1%
	Borax	..	1%
Glycol/water	Borax + MBT*	All	1% + 0.1%
Oil field brines	Na_2SiO_3	Fe	0.01%
	Quaternaries	..	10–25 ppm
	Imidazoline	..	10–25 ppm
Seawater	Na_2SiO_3	Zn	10 ppm
	$NaNO_2$	Fe	0.5%
	$Ca(HCO_3)_2$	All	pH dependent
	$NaH_2PO_4 + NaNO_2$	Fe	10 ppm + 0.5%

*MBT – mercaptobenzotriazole.

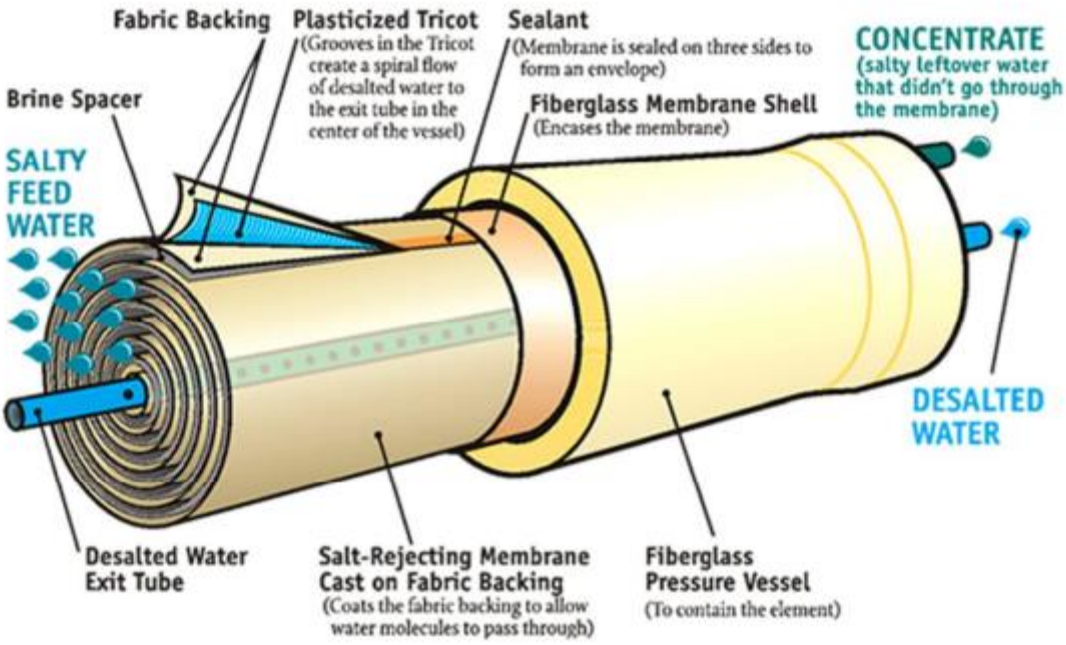
تأمین آب یون‌زدایی و گاززدایی‌شده: از مهم‌ترین مراحل تصفیهٔ آب باکیفیت، عبور آب خروجی از کلاریفایر یا اسمز معکوس به داخل مخازن معاوضهٔ یونی است. در این مخازن آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول در آب توسط مواد پلیمری (رزینی) از آب حذف می‌شوند. در این فرایند ابتدا کاتیون‌ها و سپس آنیون‌ها از آب گرفته می‌شوند. پلیمرهای کاتیونی دارای شاخهٔ

سولفونیک اسید (HSO_3^-) به‌عنوان کاتیون قوی بوده و مطابق واکنش زیر کاتیون‌های Ca^{++}، Mg^{++} و Na^+ را از آب می‌گیرند.

$$\begin{pmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} 2HCO_3 \\ SO_4 \\ 2Cl \end{pmatrix} + 2R-SO_3H \rightarrow 2R-SO_3 \begin{pmatrix} Ca \\ Mg \\ 2Na \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2H_2CO_3 \\ H_2SO_4 \\ 2HCl \end{pmatrix}$$



شکل ۱۶.۵. طرح‌وارهٔ عملکرد سیستم اسمز و اسمز معکوس [۳۹]



شکل ۱۷.۵. طرح‌وارهٔ غشاها در سیستم اسمز معکوس [۴۰]

آب در این مرحله کمی اسیدی است. ممکن است رزین کاتیونی ضعیف دارای شاخهٔ (-COOH) نیز در بعضی موارد استفاده شود. رزین‌های آنیونی قوی دارای شاخهٔ (-OH) هستند و مطابق واکنش زیر باعث حذف آنیون‌های خورنده می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} H_2SO_4 \\ 2HCl \\ 2H_2SiO_3 \\ 2H_2CO_3 \end{pmatrix} + 2R-OH \rightarrow 2R-\begin{pmatrix} SO_4 \\ 2Cl \\ 2HSiO_3 \\ 2HCO_3 \end{pmatrix} + 2H_2O$$

آنیون‌های ضعیف دارای شاخهٔ R-NH2 هستند و می‌توانند در بعضی موارد مورد استفاده قرار بگیرند. آب خروجی از قسمت آنیونی وارد ستون بستر مخلوط (حاوی مخلوط رزین کاتیونی و آنیونی) شده و باقی‌ماندهٔ یون‌ها نیز از داخل آب به‌طور کامل حذف می‌شوند. پس از مدتی ممکن است رزین‌ها به حالت اشباع برسند. رزین‌های اشباع کاتیونی و آنیونی با اسید و باز تا چند بار قابلیت احیا دارند. ممکن است این آب ارزشمند در مخازنی ذخیره شوند، ولی باید دقت کرد که به‌دلیل عدم وجود عوامل رسوب‌ساز درحدی‌که بتوان یک لایهٔ محافظ ایجاد کرد، شدت خوردگی آن ممکن است از حد آب شهری هم بالاتر برود. به‌همین دلیل با حذف عواملی مثل اکسیژن و تنظیم pH سعی می‌شود میزان خوردگی به حداقل برسد. پس از عملیات یون‌زدایی در ستون رزین کاتیونی و یا قبل از بستر مخلوط، آب عموماً دارای گازهای محلول ازجمله اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و دی‌سولفید هیدروژن است. این گازها باید حتی‌المقدور از آب حذف شوند. به‌طورکلی گاززدایی در بویلر در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحلهٔ اول در دی‌گازور و دی‌اریتور به‌طور قابل توجهی گازهای دی‌اکسیدکربن و اکسیژن حذف می‌شوند. با ایجاد خلأ یا وارد کردن بخار به دی‌گازور میزان دی‌اکسیدکربن تا حد (ppm) ۵ کم می‌شود. اگر هوازدایی به‌صورت گرم انجام شود تا حد زیادی اکسیژن نیز حذف خواهد شد. قسمتی از گازهای خورندهٔ غیرقابل تقطیر مانند اکسیژن و دی‌اکسیدکربن در دی‌اریتور به روش تماس مستقیم آب و بخار نیز قابل حذف است. بخار خروجی از توربین با افزایش دمای آب تغذیه این عمل را انجام می‌دهد.

در مرحلهٔ دوم به روش شیمیایی از هیدرازین برای بویلرهای با فشار بالاتر از ۹۰۰psi و یا از سولفیت سدیم برای بویلرهای فشار پایین، استفاده می‌شود. هیدرازین علاوه‌بر حذف اکسیژن، تاحدودی می‌تواند تنظیم‌کنندهٔ pH و همچنین تقویت‌کنندهٔ لایهٔ محافظ Fe_3O_4 باشد. یکی از مشکلات هیدرازین انحلال لایهٔ محافظ CuO در لوله‌های هیتر و همچنین کندانسور است.

واکنش‌های حذف اکسیژن توسط هیدرازین و سولفیت، تجزیهٔ هیدرازین و انحلال لایهٔ اکسیدی محافظ مس به‌صورت زیر است:

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O \quad T > 150^\circ C$$
$$3N_2H_4 \rightarrow 4NH_3 + N_2 \quad T > 400^\circ F$$
$$2CuO + N_2H_4 \rightarrow 2Cu + 2H_2O + N_2$$
$$1ppm\ N_2H_4 \cong 1ppm\ O_2\ (1.5-2)$$
$$Na_2SO_3 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4$$
$$7ppm\ Na_2SO_4 \text{ خالص } \approx 1ppm\ O_2$$

روش‌های کنترل شیمیایی آب دمین: بعد از تأمین آب یون‌زدایی‌شده جهت تشکیل لایهٔ محافظ و نگهداری آن در pH مناسب، کنترل شیمیایی آب دمین به یکی از روش‌های زیر صورت می‌گیرد [۲۵]:

- روش قلیایی در محیط بدون اکسیژن (AWT)،
- روش خنثی در محیط حاوی اکسیژن و کنداکتیویتهٔ کم (NWT)،
- روش ترکیبی (CWT)،
- استفاده از پلی‌آمین، پلیمر و آمین‌های قلیایی‌ساز.

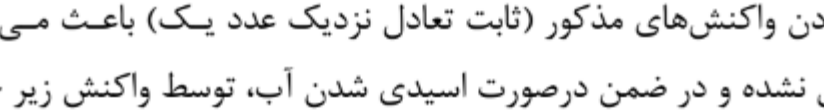
در شرایط قلیایی(pH=۹-۱۲) لایهٔ محافظ Fe_3O_4 مطابق واکنش زیر ایجاد می‌شود:

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

در فولادهای کروم‌دار، ابتدا لایهٔ Cr_2O_3 و بعد از آن لایه Fe_3O_4 تشکیل می‌شود. چسبندگی مناسب لایهٔ اکسیدهای مذکور عامل مهمی جهت کنترل خوردگی در لوله‌های حاوی آب یا بخار می‌باشد. جهت تأمین قلیاییت ممکن است از مواد جامد (سود، کربنات سدیم، تری و دی‌سدیم فسفات) و یا مواد فرار (آمونیاک و هیدرازین) استفاده شود. در این حالت آب بویلر بدون اکسیژن خواهد بود.

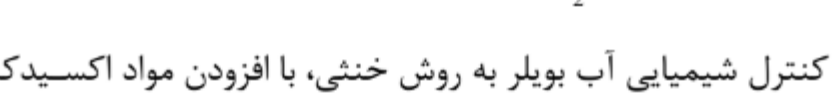
برای بویلرهای فشار پایین جهت تأمین قلیاییت از سود (pH=۹-۱۲) و یا کربنات سدیم (pH=۹-۱۱) و برای بویلرهای با فشار بالا به دلیل خوردگی ناشی از سود به علت پنهان شدن و تغلیظ قلیاها در بعضی نقاط با شار حرارتی بالا، به‌جای سود و کربنات سدیم از تری‌سدیم فسفات (pH= ۹/۵-۱۰) و یا روش هماهنگ دی و تری‌سدیم فسفات (pH=۹-۱۰) استفاده

می‌شود. ترکیبات مذکور طی فرایند هیدرولیز، قلیاییت لازم را ایجاد می‌کنند و واکنش‌های مذکور به‌صورت زیر می‌باشند:



$$Na_3PO_4 + H_2O \rightarrow Na_2(HPO_4) + NaOH$$
$$Na_2(HPO_4) + H_2O \rightarrow Na(H_2PO_4) + NaOH$$

تعادلی بودن واکنش‌های مذکور (ثابت تعادل نزدیک عدد یک) باعث می‌شود که سود اضافی تشکیل نشده و در ضمن درصورت اسیدی شدن آب، توسط واکنش زیر خنثی شود:



$$HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O$$

در روش کنترل شیمیایی آب بویلر به روش خنثی، با افزودن مواد اکسیدکننده به آب با کنداکتیویتهٔ خیلی کم و بدون یون، قلیایی شدن در سطح فولاد اتفاق می‌افتد. ابتدا مطابق واکنش زیر، لایهٔ محافظ هماتیت ایجاد و بعداً به مگنتیت تبدیل می‌شود. لایهٔ محافظ Fe_3O_4 / Fe_2O_3 بر روی سطح لوله تشکیل می‌شود.

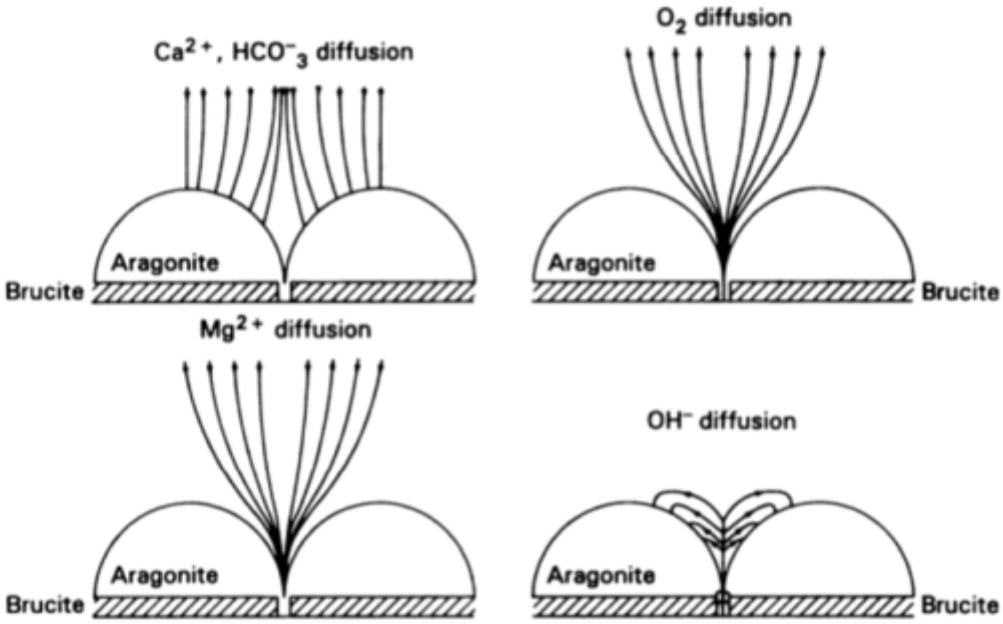
معمولاً لایهٔ هماتیت Fe_2O_3 در آب خنثی، مقاومت بیشتری نسبت‌به مگنتیت دارد. اکسیژن قبل از هیترهای فشار ضعیف به آب تغذیه تزریق می‌شود تا آهن دو ظرفیتی در آن وجود نداشته باشد. pH آب در محدودهٔ ۸-۷ بوده و میزان اکسیژن ۲۰۰-۵۰pbb است. روش خنثی ترجیحاً در بویلرهای یکبارگذر (فوق بحرانی) استفاده می‌شود. مشکلات این روش، تنظیم و کنترل pH، حفظ کنداکتیویتهٔ پایین و نگهداری میزان اکسیژن در محدودهٔ مجاز می‌باشد.

در روش کنترل شیمیایی آب دمین به روش ترکیبی جهت کنترل خوردگی از مواد اکسیدکننده و آمونیاک، استفاده می‌شود. در این حالت برخلاف روش خنثی احتمال خوردگی آلیاژهای مس نیز کمتر می‌شود. pH در این حالت در محدودهٔ ۸/۵-۸ و میزان اکسیژن ۱۰۰-۵۰pbb می‌باشد. این روش عمدتاً در بویلرهای با برج هلر کاربرد دارند. به‌دلیل حساس بودن لوله‌های بویلر و لوله‌های آلومینیمی در محدودهٔ pH مذکور در این روش، در مدار بودن واحد تصفیه (پالشینگ پلانت) ضروری است.

۲.۲.۵. رسوبات چسبنده

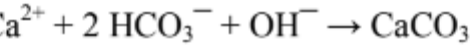
بر روی سازه‌های غوطه‌ور در آب تصفیه‌نشده و آب دریا، لایهٔ کلکریوس تشکیل می‌شود. لایهٔ کلکریوس لایهٔ کربناتی چسبنده‌ای است که باعث کاهش جریان مورد نیاز جهت حفاظت کاتدی لوله‌ها و سازه‌های فلزی می‌شود. باید فرض نمود که شارژ جریان در حفاظت کاتدی از

راه حفره‌های موجود در لایهٔ کلکریوس و آن هم توسط یون‌ها صورت می‌گیرد. حفره‌ها می‌توانند نقش یک الکترولیت قوی را ایفا کنند. حدود ۱۰ درصد از سطح دارای تخلخل است. جریان عبوری از میان تخلخل‌ها و حفره‌های موجود در سطح برابر با جریان لازم جهت حفاظت سازهٔ فولادی بدون پوشش می‌باشد. چگونگی عبور یون‌ها از میان حفره‌ها در شکل ۱۸.۵ نشان داده شده است. وجود میدان الکتریکی باعث می‌شود که کاتیون‌ها (Mg^{2+}) به سمت داخل و آنیون‌ها (OH^-) به سمت خارج حفره‌ها نفوذ کنند. لایهٔ آرگونایت از نفوذ یون‌های Ca^{2+} و HCO_3^- بر روی بروسایت تشکیل می‌شود.

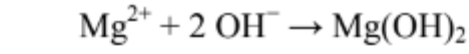


شکل ۱۸.۵. چگونگی انتقال یون‌ها در داخل لایهٔ کلکریوس [۴۱]

مهم‌ترین رسوباتی که ممکن است بر روی سطوح غوطه‌ور در آب ایجاد شود لایه‌های محافظ آهکی می‌باشد که خود شامل دو لایه آرگونایت ($CaCO_3$) و بروسایت ($Mg(OH)_2$) می‌باشد:



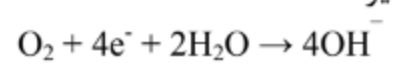
$$Ca^{2+} + 2\ HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$



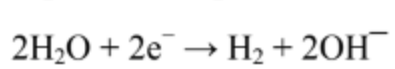
$$Mg^{2+} + 2\ OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$$

با اعمال سیستم حفاظت کاتدی، به‌خاطر کاتد بودن سازه، امکان ایجاد این ترکیبات زیاد می‌شود. وجود این لایه‌ها جریان لازم جهت حفاظت را کاهش می‌دهد. مقایسهٔ دانسیتهٔ جریان لازم برای فولاد بدون پوشش برای حالت بدون رسوب و با رسوب نشان می‌دهد که با وجود لایه‌های چسبنده میزان جریان لازم جهت حفاظت در مدت‌زمان طولانی به‌حدی می‌رسد که

باید در طراحی حفاظت کاتدی در نظر گرفته شود. به‌هرحال لایه‌های محافظ کلکریوس به‌طور موفقیت‌آمیزی تکمیل‌کنندهٔ حفاظت کاتدی می‌باشد. به‌دلیل وجود تخلخل سطحی، مقدار جریان مورد نیاز جهت حفاظت هیچ‌گاه به صفر نخواهد رسید. انتقال الکترون توسط واکنش‌های کاتدی به‌صورت زیر صورت می‌گیرد:



$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$$



$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

مورفولوژی سطح لایهٔ کلکریوس بر روی سازهٔ فولادی به‌صورت نیم‌کره‌های منظم است. اندازه و ابعاد نیم‌کره‌ها وابسته به پتانسیلی است که در حین تشکیل و رشد لایه به سازه اعمال شده است. بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که لایهٔ $CaCO_3$ بر روی لایهٔ یکنواخت $Mg(OH)_2$ تشکیل می‌شود. هر دو لایه به‌لحاظ الکتریکی عایق هستند. به نظر می‌رسد که رسوب کلکریوس در آب دریا دارای شرایط ناخالصی که می‌توان آن را نیمه‌هادی فرض کرد، ولی واقعیت امر این‌گونه نیست. با افزایش دما، کنداکتیویتهٔ لایه کمتر خواهد شد و این موضوع با آنچه معمول و استاندارد است مغایرت دارد. وجود هیدروژن باعث یکنواخت شدن لایه‌های ایجادشده می‌شود. شرایط لازم ایجاد چنین لایه‌هایی در جدول ۲۷.۵ آمده است. شرایط رسوب‌گذاری $Mg(OH)_2$ در دو جریان اعمالی جهت حفاظت کاتدی به‌لحاظ pH را نشان می‌دهد.

جدول ۲۷.۵. شرایط رسوب‌گذاری $CaCO_3$ در جریان‌های اعمالی جهت حفاظت کاتدی [۴۱]

دما (°C)	مقدار pH	i =10 (mA/m²)	i =10 (mA/m²)	i =10 (mA/m²)	i =100 (mA/m²)
۵	۸/۲۱	۸/۲۲	۸/۵۵	–	–
۱۵	۸/۱	۸/۰۲	۸/۳۱	–	–
۲۵	۸	۷/۸	۸/۰۸	۹/۳۶	۹/۴۴

باید توجه نمود که عدم طراحی صحیح حفاظت کاتدی باعث می‌شود که این لایه‌ها دارای چسبندگی مناسب نبوده و در حالت حفاظت بیش از حد و آزاد شدن هیدروژن لایه‌ها تخریب شوند. در سیستم‌های آبی همیشه سعی می‌شود که به‌همراه حفاظت کاتدی از پوشش رنگ هم استفاده شود. بهترین نوع رنگ‌ها در شرایط دریا رنگ با پایهٔ رزین اپوکسی می‌باشد. وابسته به کیفیت و اجرای زیرسازی میزان حفاظت تفاوت خواهد کرد.

۳.۵. بتن

از ترکیب سیمان، آب، ماسه و سنگ‌ریزه و با انجام واکنش شیمیایی هیدراته شدن، مادهٔ پراستحکامی به نام بتن به دست می‌آید که در ساختمان‌سازی، راه‌سازی، پل‌سازی کاربرد زیادی دارد. بیش از ۳۰ نوع بتن در صنعت وجود دارند که براساس نوع مصالح به‌کاررفته، طرح اختلاط، روش و محل کاربرد و نوع واکنش هیدراتاسیون از یکدیگر متمایز می‌شوند. ازجمله انواع بتن می‌توان به بتن سبک، بتن سنگین، بتن مسلح، بتن دارای هوا، بتن پلیمری، بتن مقاومت بالا، بتن خود متراکم، شاتکریت، بتن نفوذپذیر، بین آسفالتی، بتن شیشه‌ای و بتن آهکی اشاره نمود. در بتن مسلح استفاده از میلگردهای فولادی، الیاف و مواد پلیمری، حالت کامپوزیت هیبریدی به خود گرفته و در برابر نیرو و تنش‌های اعمالی از خود مقاومت مناسبی نشان می‌دهد. عوامل متعددی در تخریب بتن نقش دارند که می‌توان به بارگذاری نامناسب، سایش و فرسایش، انحلال در مواد شیمیایی، تأثیر عوامل محیطی و خوردگی آرماتورها اشاره نمود. شناسایی اجزای تشکیل‌دهندهٔ بتن و انواع و ترکیب آنها می‌تواند در تجزیه‌وتحلیل مشکلات مذکور مفید واقع شود.

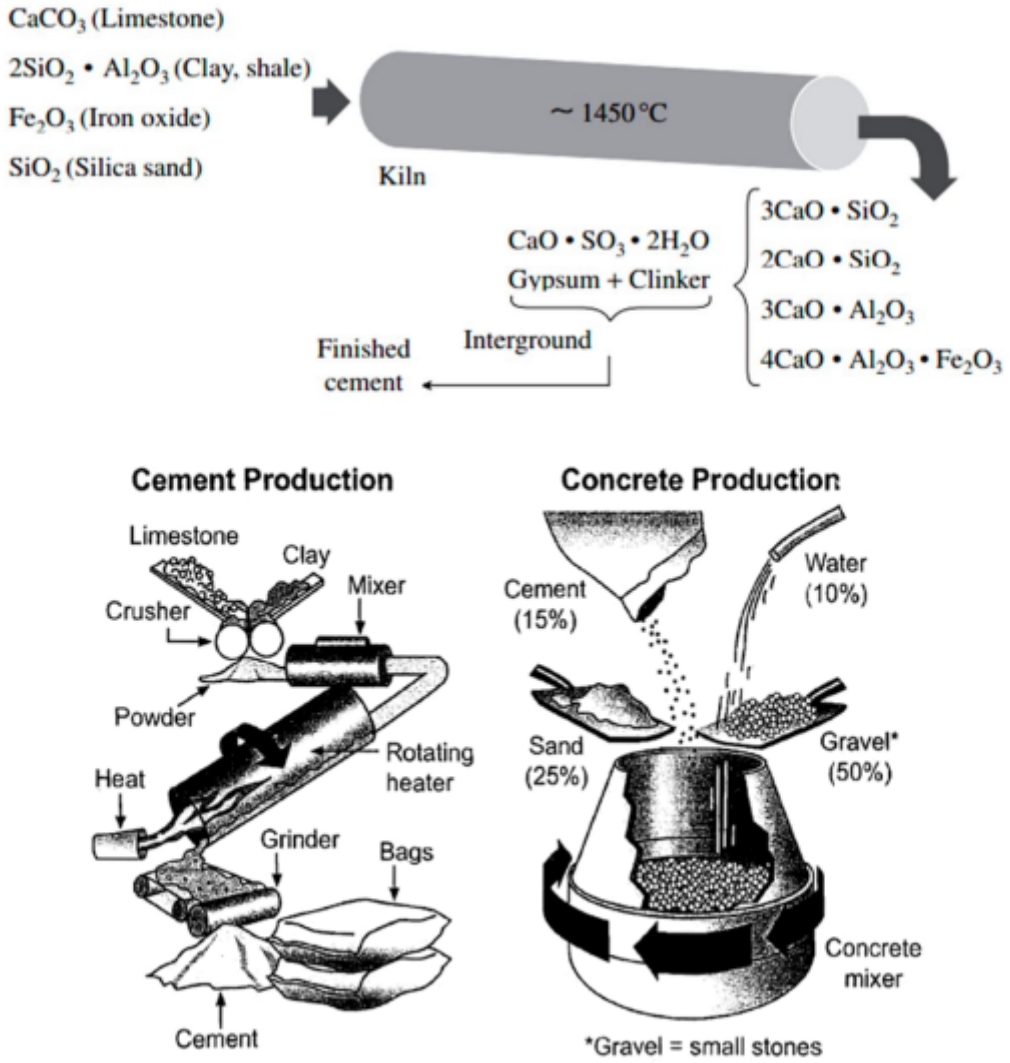
۱.۳.۵. روش ساخت سیمان

با آسیاب کردن ترکیب سنگ، آهک، آلومینا و سیلیس با نسبت‌های مشخص و با حرارت دادن در کوره‌های دوار تاحدود ۱۴۰۰-۱۵۰۰°C ماده‌ای به نام کلینکر به دست می‌آید. کلینکر پس از سرد شدن، با مقداری سنگ گچ مخلوط و آسیاب‌شده و پودر خاکستری‌رنگی حاصل می‌شود که سیمان پرتلند نام دارد. کلمهٔ پرتلند به‌خاطر شباهت رنگ سیمان تولیدی با سنگ آهکی است که در جزیرهٔ پرتلند واقع در جنوب انگلستان یافت می‌شود. شکل ۱۹.۵ تصویر شماتیک فرایند ساخت سیمان را نشان می‌دهد.

درواقع سیمان ترکیبی از اکسید کلسیم (آهک) با سایر اکسیدها مانند اکسید آلومینیم، اکسید سیلیسیم، اکسید آهن، اکسید منیزیم و اکسیدهای قلیایی است که تمایل به ترکیب با آب دارند و در حضور هوا هم سفت می‌شوند. ترکیب اصلی سیمان از چهار جزءِ اصلی شامل سه کلسیم سیلیکات ($3CaO.SiO_2 = C3S$)، دو کلسیم سیلیکات ($2CaO.SiO_2 = C2S$)، سه کلسیم آلومینات ($3CaO.Al_2O_3 = C3A$) و چهار کلسیم آلومینوفریت ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3 = C4AF$) تشکیل شده است. اکسیدهای CaO را با C و SiO_2 را با S و Al_2O_3 را با A و Fe_2O_3 را با F

نشان می‌دهند. ترکیبات دیگری نیز در سیمان وجود دارند که از نظر وزن قابل ملاحظه نیستند، ولی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در خواص سیمان دارند که عمدتاً عبارت‌اند از: MgO و TiO_2 وMn_2O_3 وK_2O و NaO_2 که اکسیدهای سدیم و پتاسیم به نام اکسیدهای قلیایی شناخته شده‌اند. جدول ۱۶.۵ ترکیب شیمیایی یک نمونه سیمان را نشان می‌دهد. بسته به درصد ترکیبات C2S، C3S، C3A و C4AF انواع مختلفی از سیمان به وجود می‌آید که در صنعت تحت عناوین نوع یا تیپ ۱ تا ۵ شناخته می‌شوند (جدول ۲۸.۵ تا ۳۰.۵).

هدف اصلی استفاده از بتن آرمه، واگذاری نیروهای کششی به‌وجودآمده به میلگردهاست. در این حالت، نیروهای کششی به بتن وارد نشده و سبب ترک‌خوردگی و در نهایت پوکیدن بتن نمی‌شود. مقاومت کششی بتن ۰/۱ مقاومت فشاری آن است.



شکل ۱۹.۵. تصویر فرایند ساخت سیمان و بتن [۴۳-۴۲]

جدول ۲۸.۵. ترکیب شیمیایی انواع سیمان استاندارد مطابق ASTM C 150 [۴۴]

Cement Type	I and IA	II and IIA	III and IIIA	IV	V
Aluminum oxide (Al_2O_3), max, %	...	6.0	...	...	...
Ferric oxide (Fe_2O_3), max, %	...	6.0	...	6.5	...
Magnesium oxide (MgO), max, %	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Sulfur trioxide (SO_3), max, %					
When (C_3A) is 8 % or less	3.0	3.0	3.5	2.3	2.3
When (C_3A) is more than 8 %	3.5		4.5		
Loss on ignition, max, %	3.0	3.0	3.0	2.5	3.0
Insoluble residue, max, %	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Tricalcium silicate (C_3S), max, %	...	...	...	35	...
Dicalcium silicate (C_2S), min, %	...	...	...	40	...
Tricalcium aluminate (C_3A), max, %	...	8	15	7	5
Sum of C_3S + 4.75 C_3A, max, %	...	100	...	...	...
Tetracalcium aluminoferrite plus twice the tricalcium aluminate (C_4AF + 2(C_3A)), or solid solution (C_4AF + C_2F), as applicable	...	...	...	...	25

جدول ۲۹.۵. ترکیب کلی شیمیایی انواع سیمان برحسب نوع ترکیب [۴۵]

	Classification	Characteristics	Applications
Type I	General Purpose	Fairly high C3S content for good early strength development	General construction (most buildings, bridges, pavements, precast units, etc)
Type II	Moderate sulfate resistance	Low C3A content (<8%)	Structures exposed to soil or water containing sulfate ions
Type III	High early strength	Ground more finely, may have slightly more C3S	Rapid construction, cold weather concreting
Type IV	Low heat of hydration (slow reacting)	Low content of C3S (<50%) and C3A	Massive structures such as dams. Now rare.
Type V	High sulfate resistance	Very low C3A content (<5%)	Structures exposed to high levels of sulfate ions
White	White color	No C4AF, low MgO	Decorative (otherwise has properties similar to Type I)

۲.۳.۵. تخریب و خوردگی در بتن

مسئلهٔ اصلی در سازه‌های بتنی، خورندگی آرماتورهای فولادی آن است. بسته به کاربرد بتن در خاک، آب و محیط‌های دیگر، رفتار خوردگی آرماتورهای آنها نیز تفاوت خواهد کرد. باید توجه نمود که آرماتورهای درون بتن را می‌توان حفاظت نمود. اصولاً فولاد در بتن به‌دلیل قلیاییت بالا در منافذ آب (pH=۱۲/۵-۱۳)، رویین شده و خوردگی کمی دارد. بااین‌حال، لایهٔ رویین با کاهش pH آب منافذ، به‌دلیل نفوذ یون‌های کلرید، کربناسیون و سولفاتسیون، از بین می‌رود. دسته‌بندی خرابی‌های بتن در شکل ۲۰.۵ آمده است. خوردگی در آرماتورهای فولادی

به‌کاررفته در بتن مسلح می‌تواند باعث کاهش خواص مکانیکی، یا ترک‌خوردگی بتن ناشی از ازدیاد حجم محصولات خوردگی و یا تولید گاز هیدروژن و ایجاد تردی شود (شکل ۲۱.۵). با اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورها تاحدودی تمایل خوردگی را می‌توان پیش‌بینی کرد (جدول ۳۱.۵). یکی از معیارهای خوردگی، پتانسیل مدار باز آرماتورهای فولادی است.

جدول ۳۰.۵. ترکیب شیمیایی انواع سیمان برحسب درصد ترکیبات اصلی [۴۲]

India/UK	USA (ASTM)	Typical Compounds[3]
OPC (IS 269, IS 8112 and IS 12269)	Type I[1]	C_3S 55%, C_2S 19%, C_3A 10%, C_4AF 7%, MgO 2.8%, SO_3 2.9%, Ignition loss 1.0%, and free CaO 1.0% ($C_3A < 15\%$)
	Type II[1]	C_3S 51%, C_2S 24%, C_3A 6%, C_4AF 11%, MgO 2.9%, SO_3 2.5%, Ignition loss 1.0%, and free CaO 1.0% ($C_3A < 8\%$)
Rapid hardening Portland cement (IS 8041:1990)	Type III[1]	C_3S 57%, C_2S 19%, C_3A 10%, C_4AF 7%, MgO 3.0%, SO_3 3.1%, Ignition loss 0.9%, and free CaO 1.3% Its seven day compressive strength is almost equal to Types I and II 28 day compressive strengths.
Low heat Portland cement (IS 12600:1989)	Type IV	C_3S 28%, C_2S 49%, C_3A 4%, C_4AF 12%, MgO 1.8%, SO_3 1.9%, Ignition loss 0.9%, and free CaO 0.8% ($C_3A < 7\%$ and $C_3S < 35\%$)
Sulphate resisting Portland cement (IS 12330:1988)	Type V	C_3S 38%, C_2S 43%, C_3A 4%, C_4AF 9%, MgO 1.9%, SO_3 1.8%, Ignition loss 0.9%, and free CaO 0.8% [$C_3A < 5\%$ and $(C_4AF) + 2(C_3A) < 25\%$]
PSC (IS 455:1989, IS 12089:1987)	Type IS	Made by grinding granulated high-quality slag with Portland cement clinker
PPC [IS 1489-Part 1:1991 (fly ash based), IS 1489-Part 2:1991 (calcined clay based)]	Type IP	A blended cement made by inter-grinding Portland cement and pozzolanic materials without burning
Ternary blended cement	Type IT(SX)(PY)[2]	A blended cement made by inter-grinding Portland cement, slag, and pozzolana without burning

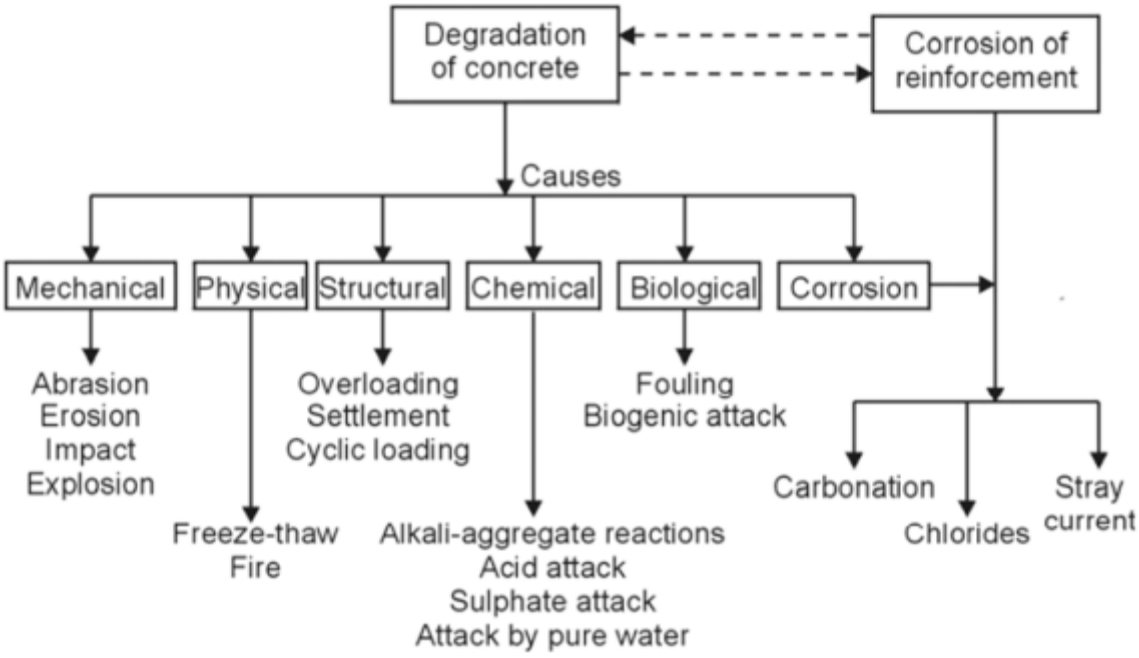
Notes:

[1] Types Ia, IIa, and IIIa have the same composition as Types I, II, and III, but have an air-entraining agent ground into the mix.

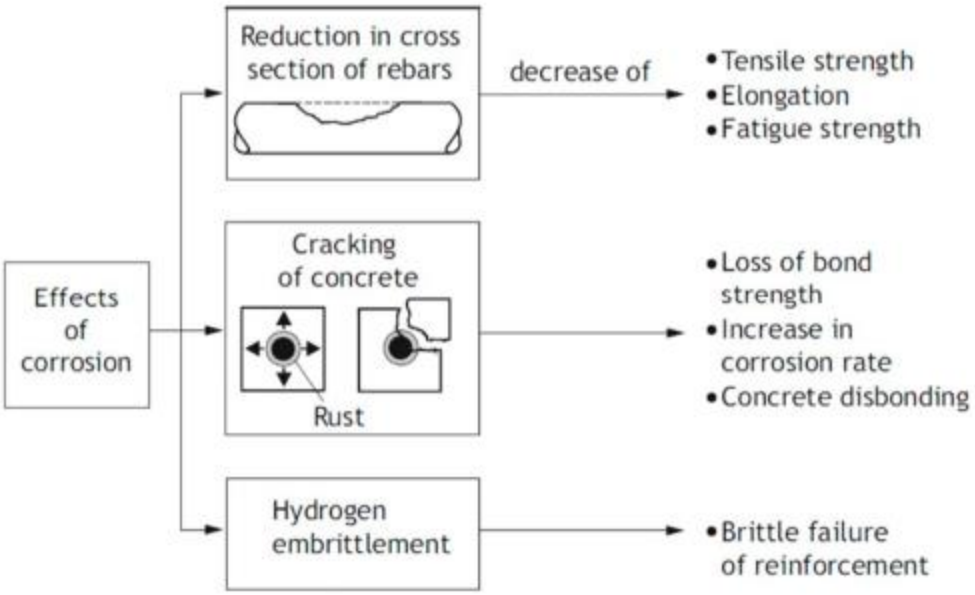
[2] The letters X and Y stand for the percentage of supplementary cementitious material (SCM) included in the blended cement, and S and P are the types of SCMs, where S is for slag and P for pozzolan. For example, Type IT(S25)(P15) contains 25 per cent slag and 15 per cent pozzolans.

[3] See Table 1.5 for explanation of these compounds.

نفوذ یون کلر: یکی از علت‌های اساسی خوردگی آرماتورهای تقویت‌کنندهٔ بتن، نفوذ یون کلر به داخل بتن است. وابسته به نوع سیمان، نحوهٔ اجرا به‌لحاظ دانه‌بندی ماسه و نسبت آب به سیمان، نفوذپذیری یون کلر نیز متفاوت خواهد بود. سازه‌های غوطه‌ور در آب دریا، اتمسفر دریایی و یا پل‌های بتنی که در زمستان برای جلوگیری از یخ‌زدگی برف و آب روی آنها نمک می‌پاشند و یا ماسه و آب آلوده به نمک و یون کلر که برای ساخت بتن استفاده می‌شود، همگی باعث می‌شوند که آرماتورهای بتن در معرض تخریب ناشی از کلرید قرار بگیرند. در شرایط خوردگی، به‌دلیل مثبت‌تر بودن پتانسیل نقاط آندی، مهاجرت آنیون‌ها بالأخص کلرید به سمت نقاط آندی باعث ایجاد واکنش‌های اتوکاتالیتیکی (تولید مداوم کلرید) و اسیدی شدن مدوام محیط اطراف آرماتورها می‌شود. اگر حد آستانه‌ای یون کلرید برای خوردگی آرماتور در حدود ۰/۴ درصد وزنی سیمان ($1/4\ kg/m^3$) برسد، باید نسبت‌به تعویض سازهٔ بتنی اقدام شود. حد آستانه‌ای کلرید بستگی به میزان تخلخل، پتانسیل رویین، pH آب منافذ و کیفیت بتن دارد (جدول ۳۲.۵ و ۳۳.۵ شکل ۲۲.۵). انتقال یون‌های کلرید از طریق بتن سخت‌شده توسط جذب، انتشار و عمل مویرگی یا فتیله کنترل می‌شود. قانون دوم انتشار فیک اغلب برای مدل‌سازی انتشار یون‌های کلرید در بتن استفاده می‌شود.



شکل ۲۰.۵. دسته‌بندی خرابی‌های بتن [۴۶]



شکل ۲۱.۵. اثرات خوردگی بر تخریب سازه‌های بتنی [۴۶]

جدول ۳۱.۵. پتانسیل مدار باز آرماتور فولادی و ارتباط آن با خطرپذیری خوردگی [۴۷]

Risk of Corrosion	OCP Values	
	mV vs. SCE	mV vs. CSE
Severe	<−426	<−500
High	<−276	<−350
Intermediate	−126 to −275	−350 to −200
Low	>−125	>−200

جدول ۳۲.۵. ضریب نفوذ یون کلرید در بتن در روز ۲۸ پس از عمل‌آوری [۴۸]

Concrete quality	Rate	Chloride diffusion coefficient (m^2/s)
Good	Low	$< 1 \times 10^{-12}$
Average	Average	$1 \times 10^{-12} - 5 \times 10^{-12}$
Poor	High	$> 5 \times 10^{-12}$

بعضی محققان برای شروع خورندگی آرماتور نسبت Cl^-/OH^- را بااهمیت‌تر دانسته‌اند. این نسبت برای pH =۱۲/۶ برابر ۰/۲۹ و برای pH = ۱۳/۳ برابر ۰/۳ است. دلیل این موضوع واکنش تولید Cl^- در واکنش دوم زیر است:

$$2Fe + 6Cl^- \rightarrow 2FeCl_3^- + 4e^-$$

$$FeCl_3^- + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2 + 3Cl^-$$

با نفوذ اکسیژن در داخل بتن در مجاورت آب و $Fe(OH)_2$، امکان تشکیل $Fe(OH)_3$ افزایش یافته و ازدیاد حجم محصولات در اطراف آرماتور باعث ترکیدگی بتن می‌شود.

$$2Fe(OH)_2 + H_2O + 1/2O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$$

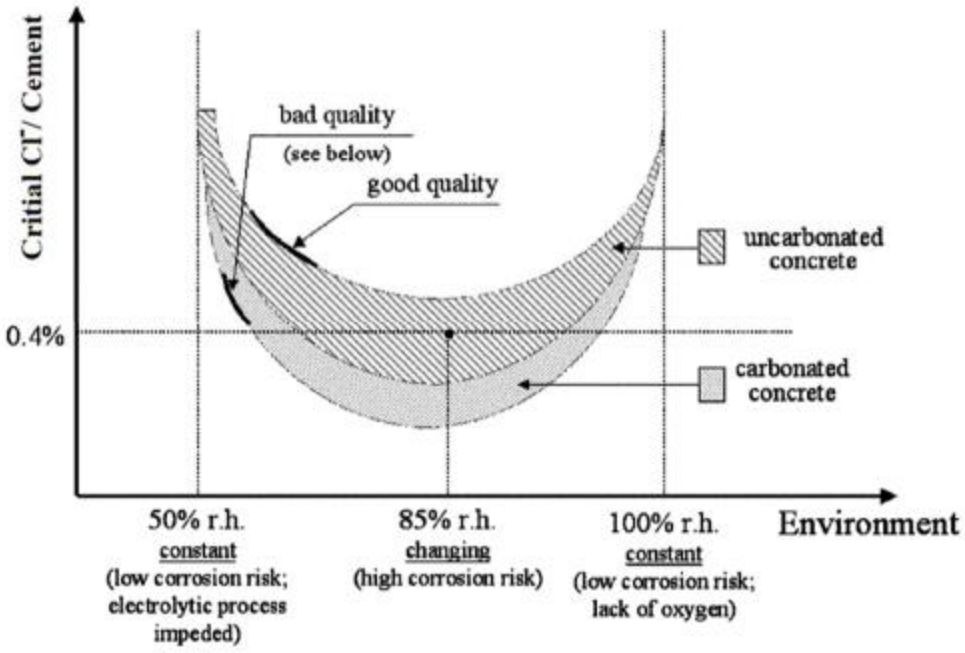
از طرفی خوردگی در اثر نفوذ اکسیژن در بتن غوطه‌ور در آب نیز کمتر از بتنی است که در اتمسفر قرار دارد.

کربناسیون: کربناسیون در بتن ناشی از واکنش دی‌اکسیدکربن اتمسفر صنعتی یا آب حاوی دی‌اکسیدکربن و واکنش آن با کلسیم درون بتن است که منجر به شکل‌گیری کربنات کلسیم می‌شود. این پدیده به‌دلیل کاهش pH هم باعث خوردگی آرماتور می‌شود و هم باعث کاهش مقاومت و ضعیف شدن بافت بتن برای نفوذ بیشتر یون کلر را فراهم می‌سازد.

جدول ۳۳.۵. حد مجاز کلرید در بتن [۴۹]

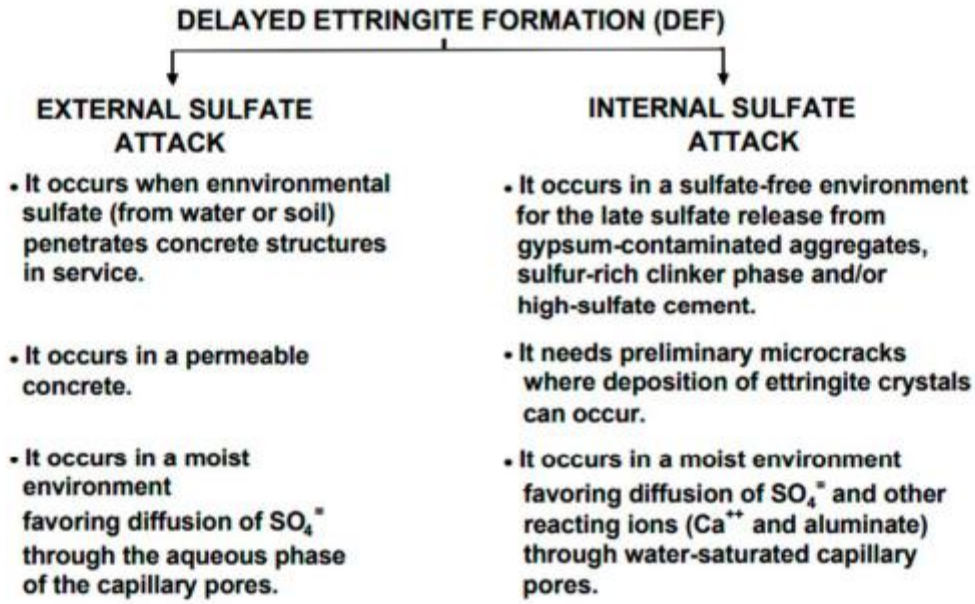
Category	Chloride limit for new construction (% by mass of cement)		
	Test method		
	Acid-soluble	Water-soluble	
	ASTM C 1152	ASTM C 1218	Soxhlet*
Prestressed concrete	0.08	0.06	0.06
Reinforced concrete in wet conditions	0.10	0.08	0.08
Reinforced concrete in dry conditions	0.20	0.15	0.15

*The Soxhlet test method is described in ACI 222.1.



شکل ۲۲.۵. تصویر تغییرات و مقدار بحرانی کلرید در بتن [۴۹]

سولفاتاسیون: پدیدهٔ سولفاتاسیون در اثر واکنش سولفات با بتن هم به‌صورت حملهٔ داخلی ناشی از وجود سولفات در ترکیب بتن با ساختار بتن و هم در اثر واکنش سولفات موجود در محیط آب دریا، خاک و یا حتی اتمسفر ایجاد می‌شود (شکل ۲۳.۵) [۵۰].



شکل ۲۳.۵. دسته‌بندی سولفاتاسیون داخلی و خارجی در بتن [۵۱]

در حملهٔ سولفاتی خارجی به بتن، یون‌های مهاجم سولفات با $Ca(OH)_2$ و C-S-H حاصل از هیدراتاسیون سیمان واکنش می‌دهد و باعث از دست دادن مقاومت می‌شوند. همچنین یون سولفات با C3A سیمان واکنش می‌دهد و تولید اترینگایت با نام شیمیایی سولفوآلومینات کلسیم ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) می‌کند که تحت تأثیر انبساط حاصل از آن، به بتن صدمه وارد می‌شود.

۳.۳.۵. حفاظت کاتدی آرماتورهای بتن

برای کاهش خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن می‌توان از روش‌های پوشش‌دهی، بازدارنده‌ها و حفاظت کاتدی استفاده کرد. پوشش گالوانیزه و یا رنگ بر روی آرماتورها می‌تواند تاحدودی خوردگی آن را کاهش دهد. ممکن است بعد از سخت شدن بتن، سطح بتن نیز پوشش‌دهی شود. استفاده از بازدارنده‌های خوردگی در داخل بتن ازجمله گروه $[C=S(NH_2)^-]$ هم می‌تواند فیلم محافظی روی سطوح فولادی ایجاد کند. با توجه به هدایت الکتریکی بتن و وجود عوامل خورنده مثل آنیون‌های کلریدی و سولفیدی، حفاظت کاتدی به‌طور قابل توجهی می‌تواند از

خورندگی آرماتورهای فولادی جلوگیری به عمل آورد. مقاومت الکتریکی بتن بستگی به یون‌های موجود در آب، رطوبت هوا و دما دارد. با استفاده از روش چهار الکترود ونر، آزمون‌های میدانی برای تعیین مقاومت انجام می‌شود (شکل ۲۴.۵). اندازه‌گیری مقاومت پس از مشخص شدن موقعیت آرماتورهای فولادی در بتن انجام می‌شود. اندازه‌گیری نباید مستقیماً بر روی فولاد انجام شود. بتن با مقاومت بیشتر از ۵۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر نیاز به حفاظت کاتدی ندارد. هرچه مقاومت الکتریکی بتن کمتر باشد، نرخ خوردگی آرماتور هم کمتر است. جدول ۳۴.۵ ارتباط مقاومت الکتریکی بتن با میزان خوردگی آرماتور را نشان می‌دهد.

شکل ۲۴.۵. تصویر اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن به روش چهار پینه [۵۲]

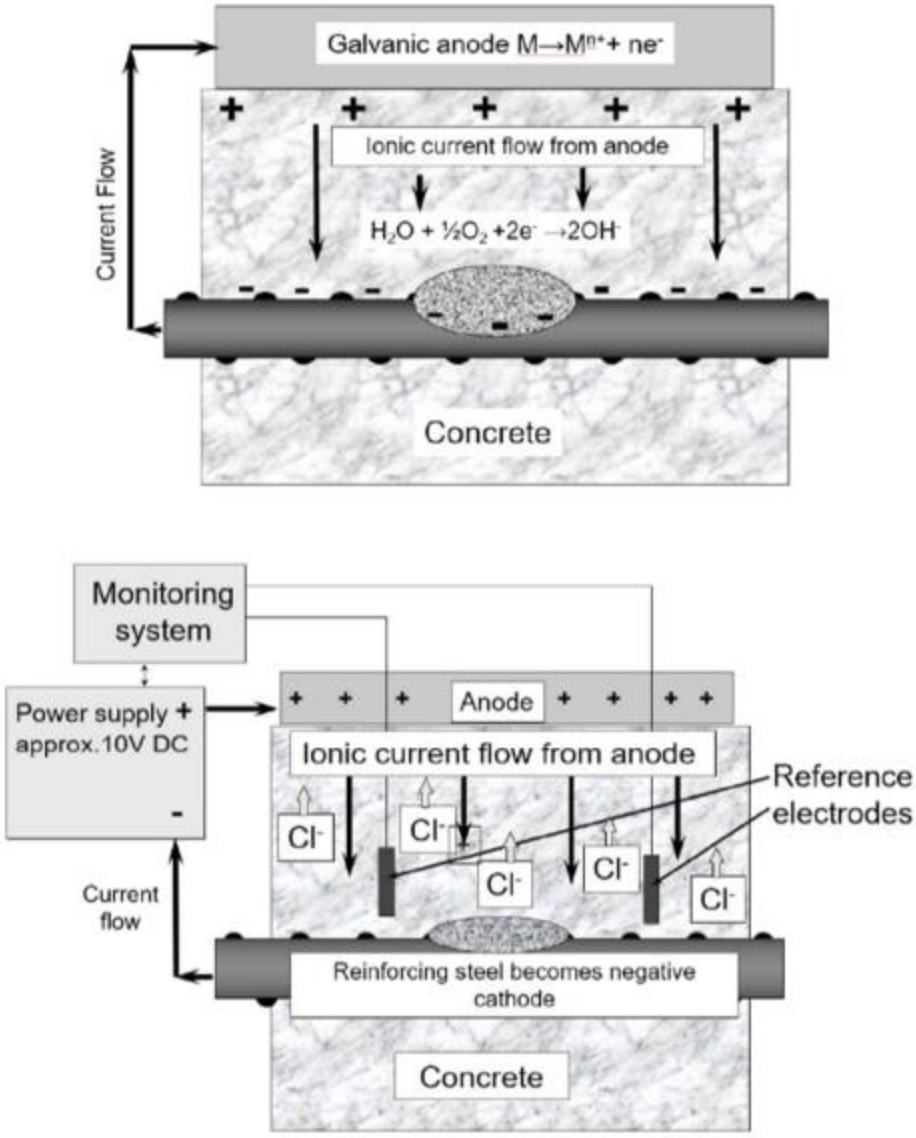
جدول ۳۴.۵. رابطهٔ شدت خوردگی آرماتور با مقاومت الکتریکی بتن [۴۹]

Resistivity, kΩ-cm	Corrosion rate
> 20	Low
10 to 20	Low to moderate
5 to 10	High
< 5	Very high

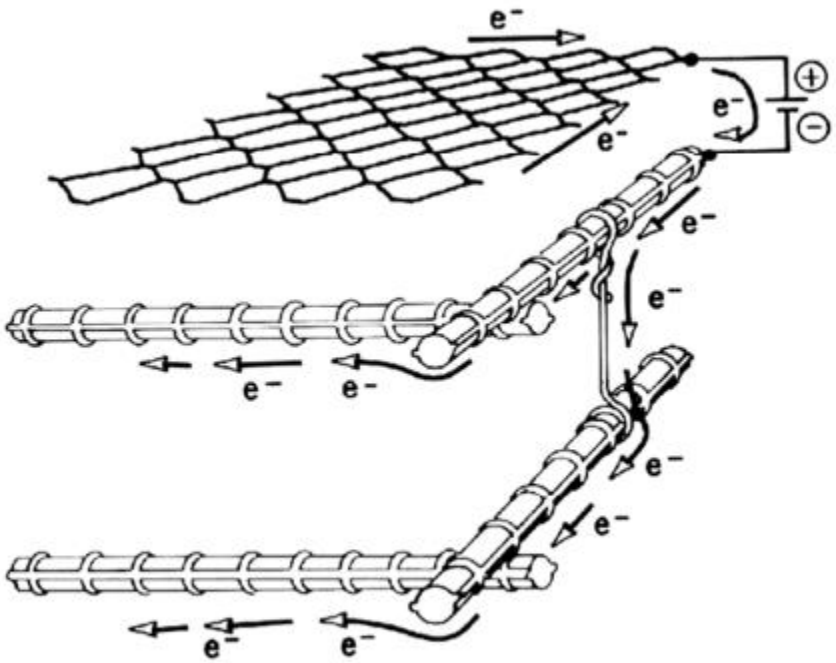
با اعمال حفاظت کاتدی برای آرماتورهای فولادی اثر نامطلوب کلرید به‌دلیل مهاجرت آن به سمت آندها، کمتر شده و بتن مسلح دارای طول عمر بیشتری خواهد شد. به هر دو روش آند فداشونده و اعمال جریان آرماتورهای داخل بتن را می‌توان تحت حفاظت قرار داد (شکل ۲۵.۵). در عمل روش اتصالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. استفاده از آندهای شبکه‌ای

برای توزیع مناسب جریان ازجمله نکات مهم این موضوع است. شکل ۲۶.۵ دو نمونه از روش‌های اتصال را نشان می‌دهد.

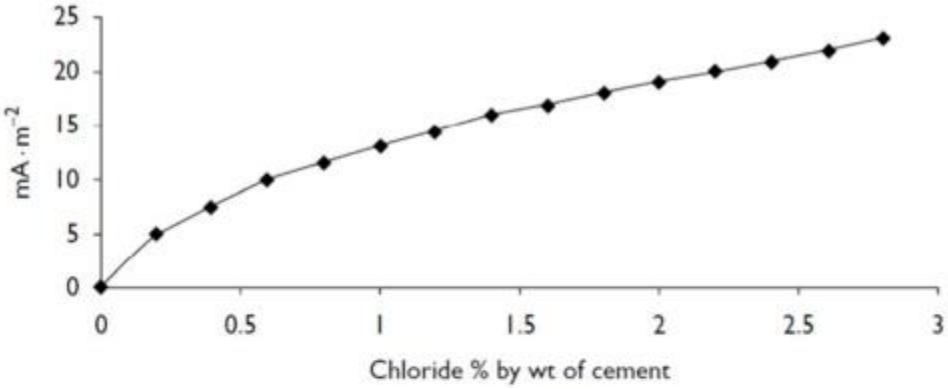
معیار پتانسیل حفاظت کاتدی آرماتور فولادی در بتن، همان پتانسیل ۸۵۰- میلی‌ولت براساس الکترود مرجع مس/ سولفات مس و یا نسبت‌به الکترود مرجع کالومل اشباع ۷۷۰- میلی‌ولت است. اگر پتانسیل منفی‌تر از ۱۱۵۰- میلی‌ولت باشد، امکان حفاظت بیش از حد و تصاعد گاز هیدروژن و درنتیجه ترد شدن فولاد را به‌همراه خواهد داشت. میزان دانسیتهٔ جریان حفاظت برای فولاد در بتن بسته به محیط خورنده، کیفیت بتن و پوشش روی آرماتورها در محدودهٔ ۱-۴۳ mA/m^2 گزارش شده است. در بعضی مراجع برای بیشترین مقدار کلرید در بتن ۲۰ mA/m^2 ارائه شده است (شکل ۲۷.۵ و جدول‌های ۳۵.۵ تا ۳۷.۵).



شکل ۲۵.۵. تصویر مکانیسم خوردگی و حفاظت کاتدی آرماتورهای فولادی در بتن [۵۳]



شکل ۲۶.۵. تصویری از نحوهٔ اتصال آند به آرماتور فولادی در بتن [۵۴]



شکل ۲۷.۵. منحنی تغییرات دانسیتهٔ جریان حفاظت برحسب درصد یون کلر در سیمان [۴۹]

جدول ۳۵.۵. دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت کاتدی آرماتور در سازهٔ بتنی [۵۵]

Chloride by mass of cement	*Chloride by mass of sample*	*Current needed (mA/m^2)*
<0.2	<0.6	0
0.2–0.3	0.6–1.2	5
0.3–0.8	1.2–13.0	13
0.8–1.6	13.0–6.0	17

جدول ۳۶.۵. دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت کاتدی آرماتور در سازهٔ بتنی نو و تعمیرشده در استانداردهای مختلف بین‌المللی [۵۶]

Standard	Rehabilitation	New Construction
European Standard pr EN 12696-1	2 mA to 20 mA/m^2	0.2 mA to 2 mA/ m^2
Standards Australia AS 2832-5-2002	2 mA to 20 mA/m^2	0.2 mA to 2 mA/ m^2
British Standard BS 7361 – Part 1	5 mA to 20 mA/m^2	N/A
NACE Standard RP0290-2000	N/A	N/A
Japanese JIS	N/A	N/A
Aramco Standard SAES-X-800	20 mA/m^2	N/A
Royal Commission Section 16645	N/A	2 mA / m^2
SABIC Standard B01-E04	20 mA/m^2	5 mA/m^2

جدول ۳۷.۵. دانسیتهٔ جریان لازم برای حفاظت کاتدی آرماتور در سازهٔ بتنی [۵۵]

Environment surrounding steel reinforcement	Current density in mA/m^2 of reinforcement
Alkaline, no corrosion occurring, low oxygen resupply	0.1
Alkaline, no corrosion occurring, exposed structure	1-3
Alkaline, chloride present, dry, good quality concrete, high cover, light corrosion observed on the rebar	3-7
Chloride present, wet, poor quality concrete medium-low cover, widespread pitting and general corrosion on steel	8-20
High chloride levels, wet fluctuating environment, high oxygen level, hot, severe corrosion on steel, low cover	30-50

برای حفاظت کاتدی آرماتورهای فولادی از آندهای اعمال جریان مثل آندهای تیتانیمی، یشتر از آند فداشونده استفاده می‌شود. معمولاً بر روی آند تیتانیمی در شرایط کلرید بالا، مکان آزاد شدن گاز کلر و تشکیل هیپوکلرو وجود دارد. در آندهای گرافیتی امکان تشکیل سید کربنیک و واکنش آن با محیط قلیایی وجود دارد. دقت کافی در اتصالات آند، انتخاب وکش مناسب برای کابل آند و اتصالات عایقی باید انجام شود. در محل کاتد امکان احیای یون کسیژن و یا آزاد شدن هیدروژن وجود دارد. در حالت اول با قلیایی شدن سطح فولاد، امکان شکیل لایهٔ محافظ وجود دارد، ولی واکنش دوم باعث تردی هیدروژنی و ترک‌دار شدن

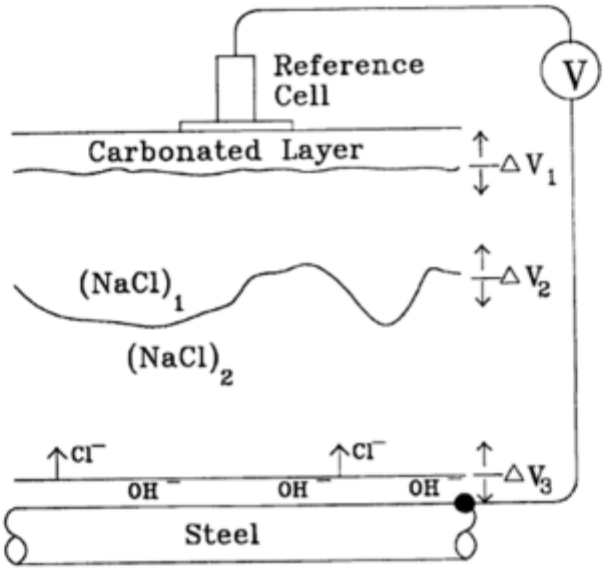
سازه‌های بتنی پیش‌تنیده خواهد شد. باید دقت کرد که برای دانسیتهٔ جریان کم (کمتر از ۰/۱ (mA/m^2)) امکان مهاجرت کلرید به سمت آند وجود ندارد. ولی ممکن است پتانسیل فولاد به یک ولت نیز برسد. به‌دلیل وجود لایه‌های مختلف در مسیر اندازه‌گیری پتانسیل آرماتورها برای اطمینان از عملکرد حفاظت کاتدی، باید دقت کافی به عمل بیاید. جدول ۳۸.۵ ویژگی‌های عملکردی و هزینه‌های بودجه برای سیستم‌های مختلف آند برای حفاظت کاتدی برای آرماتورهای بتن را نشان می‌دهد. شکل ۲۸.۵ ملاحظات مربوط به پتانسیل لایه‌های مختلف را نشان می‌دهد. افت IR به‌ازای هر میلی‌متر از ضخامت بتن، حدود ۲ میلی‌ولت است. بنابراین برای آرماتورهایی که در عمق ۵ سانتی‌متری کاشته شده‌اند، افت IR به‌حدود ۱۰۰ میلی‌ولت می‌رسد. به‌عبارت دیگر، پتانسیل‌های اندازه‌گیری‌شده در حدود ۱۰۰ میلی‌ولت منفی‌تر از پتانسیل‌های واقعی هستند.

جدول ۳۸.۵. ویژگی‌های عملکردی و هزینه‌های بودجه برای سیستم‌های مختلف آند برای حفاظت کاتدی برای آرماتورهای بتن (قیمت ۲۰۰۲) [۵۵]

Property	*Coated titanium mesh and cementitious overlay*	*Conductive coating*	*Discrete anode*	*Thermal sprayed zinc*
Installation	Fixing of mesh can be time consuming Roughened substrate required for overlay	Surface preparation of concrete must be correct and coating applied in good weather conditions	Care must be taken to avoid hitting steel when drilling holes to accept anodes	Correct surface preparation to ensure bond to substrat May require use of a humectant
Anode service life[a]	Up to 120 years	Up to 15 years	Up to 50 years	Up to 25 years
Ease of repair or replacement	Difficult as both overlay and mesh have to be removed and reinstated	Familiar technology Re-coating is generally relatively easy	Anode can be drilled out and replaced in the event of a defect	Zinc coating can be reapplied over existing sound substrate
Budget cost[b]	£60–£100/m^2	£20–£40/m^2	£40–£100/m^2	£60–£100/m^2

[a] Service life based on average current output. Life will be reduced at unduly high currents or for inadequately designed, installed or maintained systems. Replacement systems may be able to use some of the original wiring and connections.

[b] Figures do not include for concrete repairs prior to installation of system (Design Manual for Roads and Bridges, 2002).



$$V_{Meas.} = (V_{Steel} - V_{Ref.}) + \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$$

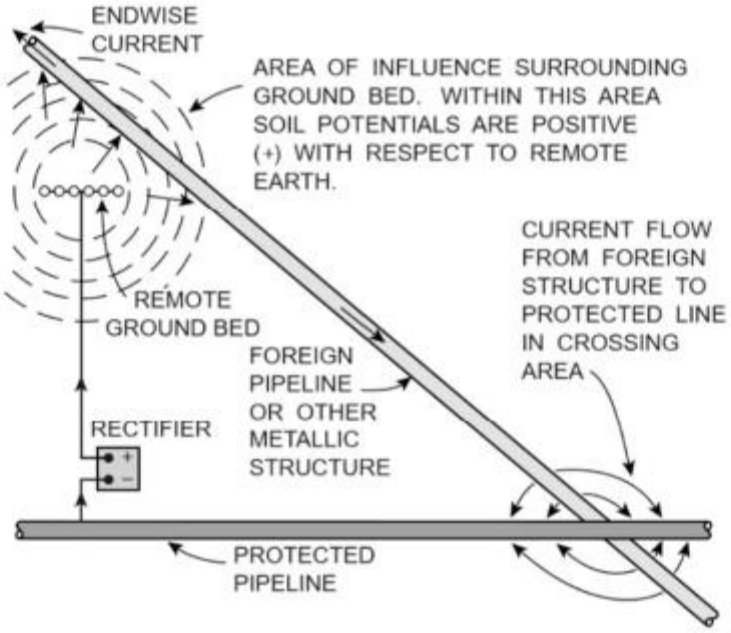
شکل ۲۸.۵. تصویر روش محاسبهٔ افت IR برای آرماتور داخل بتن [۵۷]

۴.۵. جریان تداخلی یا سرگردان

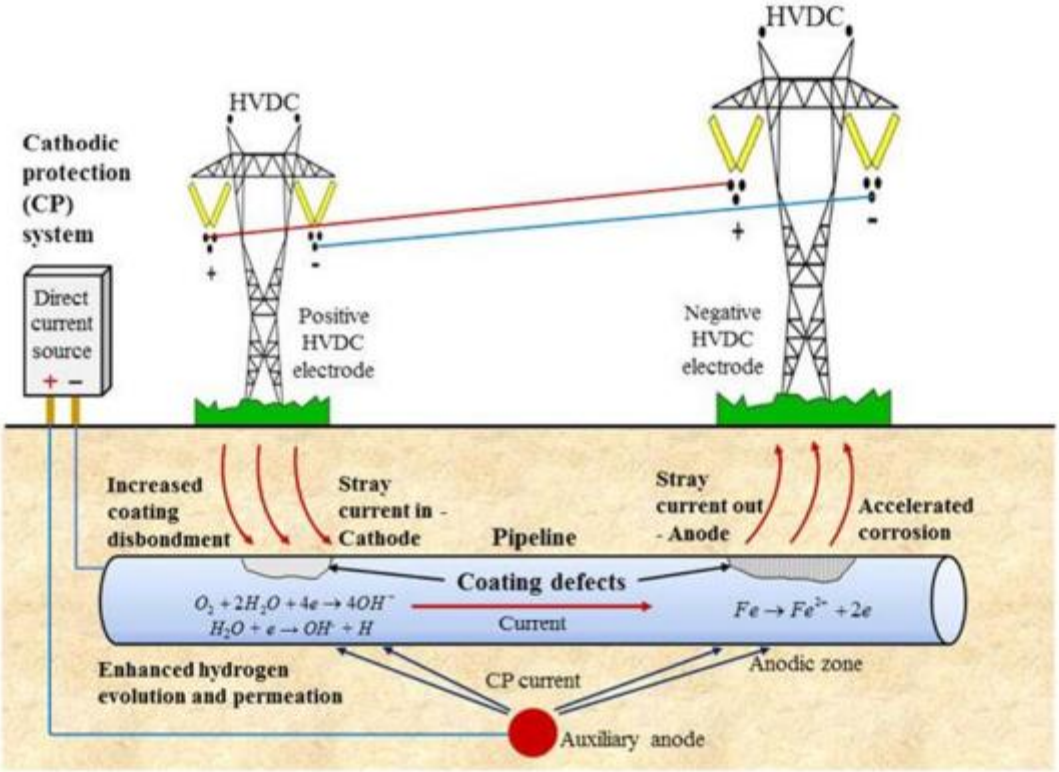
درنتیجهٔ حفاظت کاتدی سازه (سازهٔ اولیه) یک جریان الکتریکی مستقیم در الکترولیت انتشار می‌یابد. قسمتی از این جریان جذب سازه‌های مجاور (سازهٔ ثانویه) می‌شود که ممکن است تحت حفاظت نباشند، لذا در نقاط تخلیهٔ جریان از این سازه‌ها به سمت سازهٔ اولیه، خوردگی شدیدی ایجاد می‌شود که تحت عنوان خوردگی تداخلی یا خوردگی ناشی از جریان‌های سرگردان مطرح می‌شود. خوردگی در محل خروج جریان از سازهٔ ثانویه بیشتر رخ می‌دهد. پتانسیل در این نواحی به سمت آندی شدن می‌رود. این بدان معنا نیست که در سازهٔ اولیه مشکلی ایجاد نشود. در سازهٔ اولیه به‌دلیل کاهش جریان ممکن است پتانسیل لازم برای حفاظت تأمین نشود. شکل‌های ۲۹.۵ تا ۳۳.۵ نمونه‌های از توزیع جریان سرگردان که می‌تواند باعث خوردگی سازهٔ ثانویه شود، را نشان می‌دهند. تهیهٔ شکل و نقشه در درک جریان سرگردان اهمیت زیادی دارد. هرچه موقعیت سازه‌های اولیه و ثانویه، محل اتصالات و تقاطعات و همچنین توزیع پتانسیل مشخص‌تر باشد، ارائهٔ راه‌حل برای رفع مشکل، ساده‌تر خواهد شد. دربارهٔ شکل‌های ۳۰.۵ تا ۳۱.۵ جریان سرگردان ناشی از میدان مغناطیسی هادی‌های فشار قوی، چنانچه جریان متناوب i_{ac} حاصل کمتر از $20\ A/m^2$ باشد عدم خوردگی و اگر جریان مذکور بالاتر از $100\ A/m^2$ باشد خوردگی مورد انتظار است. در حد این فاصله هم نرخ خوردگی قابل پیش‌بینی نیست. این جریان از فرمول زیر به دست می‌آید.

$$i_{ac} = \frac{8V_{ac}}{\rho \pi d}$$

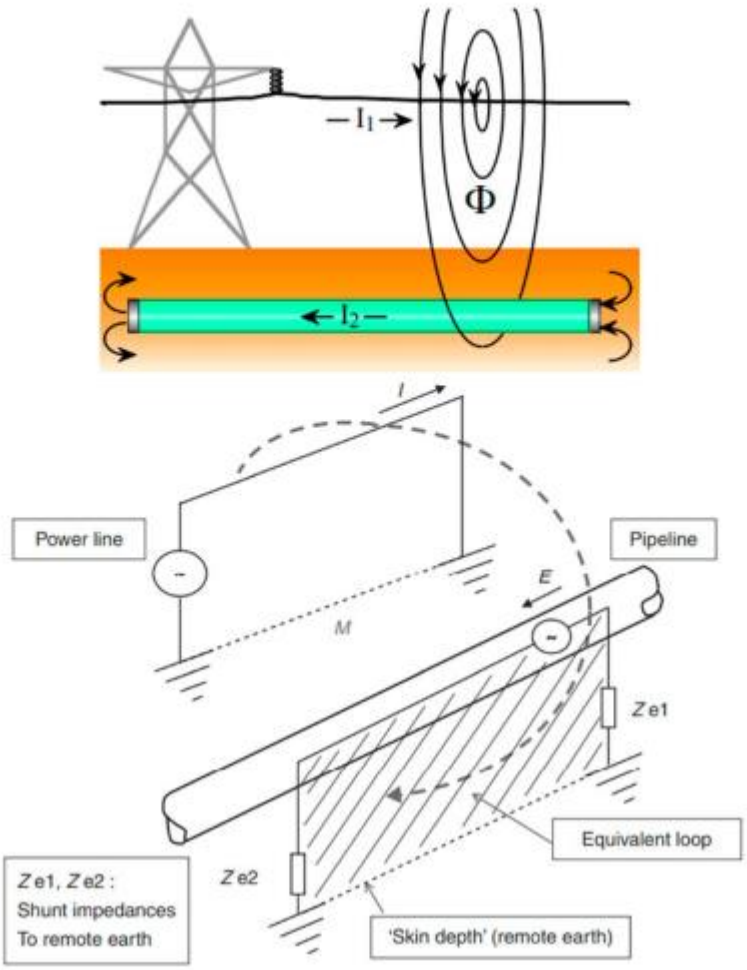
i_{ac} – AC current density (A/m^2)
V_{ac} – AC Volts (V)
ρ – Soil resistivity (Ω–m)
d- holiday diameter (m)



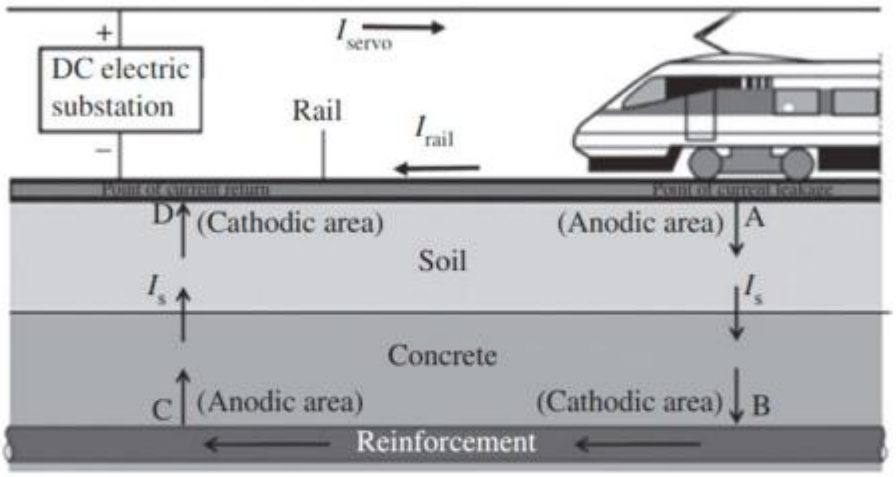
شکل ۲۹.۵. چگونگی توزیع جریان سرگردان و ایجاد خوردگی در سازهٔ ثانویه [۷]



شکل ۳۰.۵. تصویری از تأثیر جریان سرگردان ناشی از نشتی جریان دکل‌های برق فشار قوی به‌دلیل ناکارآمدی مقره‌ها بر روی تخریب پوشش و خوردگی لوله‌های تحت حفاظت [۵۸]



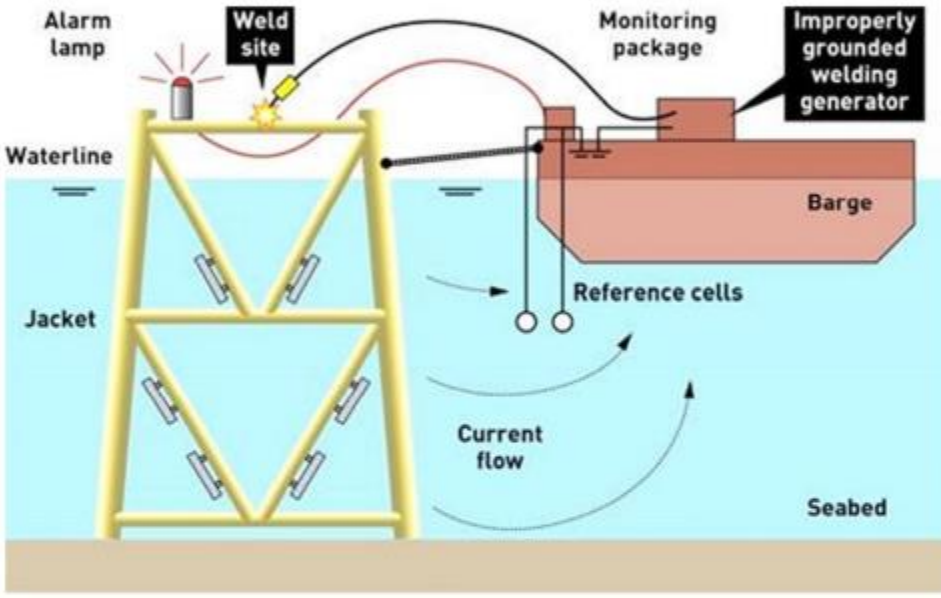
شکل ۳۱.۵. تصویری از تبدیل جریان القایی خطوط فشار قوی به جریان مستقیم سرگردان [۶۰-۵۹]



شکل ۳۲.۵. تصویر تأثیر جریان سرگردان قطار برقی بر خوردگی آرماتورهای فوندانسیون بتنی [۶۱]

جریان‌های سرگردان ناشی از سیستم‌های حفاظت کاتدی، علاوه‌بر ایجاد خوردگی می‌توانند سبب اختلال در مدارهای مخابراتی و نیز تجهیزات سیگنال‌رسانی قطارهای برقی شود. باید توجه نمود که جریان‌های سرگردان فقط از سازه‌های تحت حفاظت به وجود نمی‌آیند. به‌طور

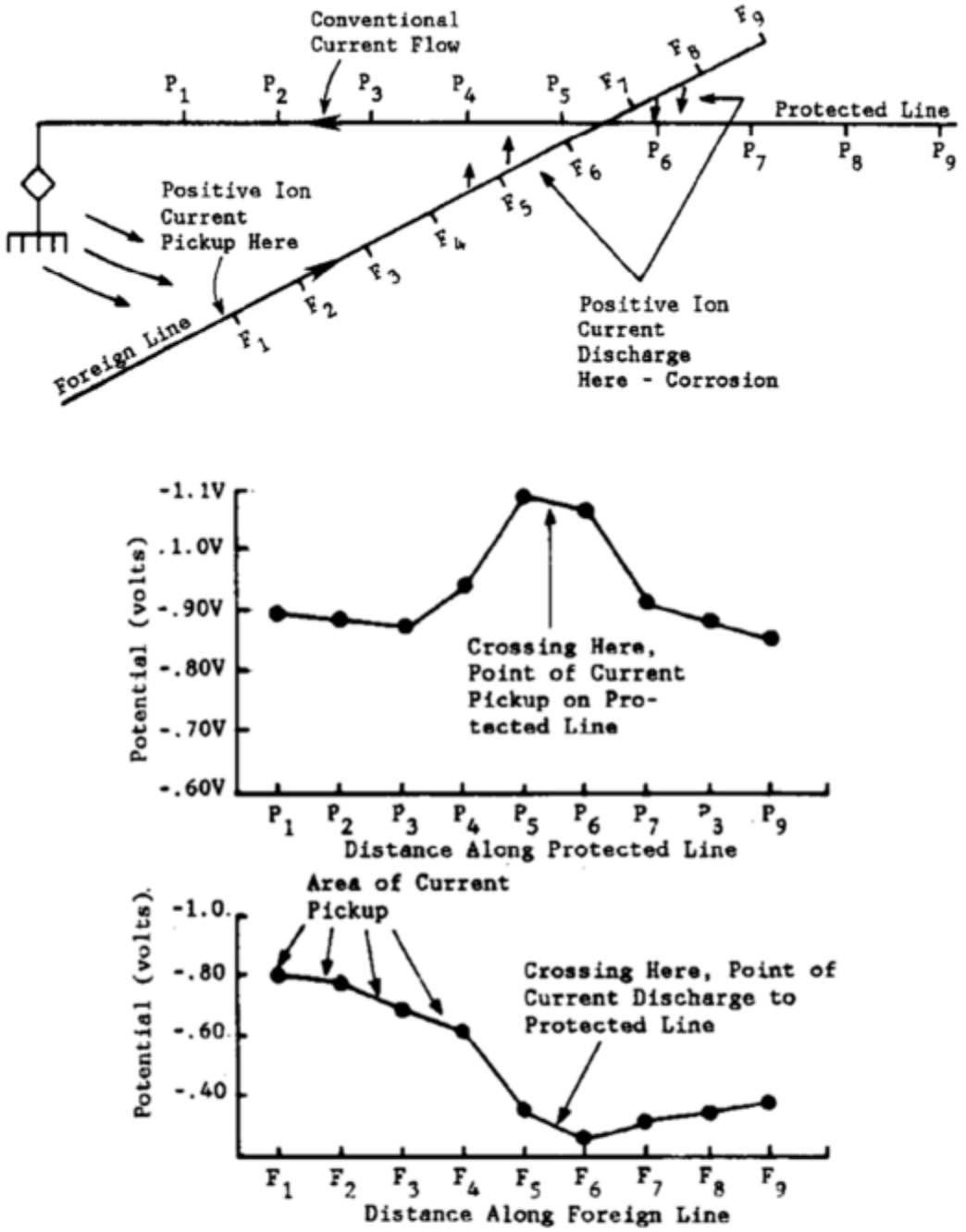
مثال در بعضی موارد ممکن است خطوط فشار قوی برق هوایی، جریان القایی را ایجاد کنند که وقتی این جریان‌ها به زمین می‌رسند به‌عنوان جریان سرگردان عمل کنند. در هر صورت صاحبان سازه‌های تحت حفاظت و سازه‌های انتشاردهندهٔ جریان، جهت جلوگیری از وارد شدن خسارت و زیان‌های احتمالی ناشی از جریان‌های تداخلی، باید ضمن اطلاع‌رسانی کافی به صاحبان سازه‌های ثانویه، تمهیدات لازم را به کار بگیرند.



شکل ۳۳.۵. جریان سرگردان ناشی از جوشکاری اسکله به‌صورت سیار از طریق کشتی [۶۲]

۱.۴.۵. آزمون‌های تشخیص خوردگی تداخلی

تغییرات پتانسیل سازه/الکترولیت ناشی از جریان تداخلی در طول سازهٔ مجاور ثانویه ممکن است متفاوت باشد. تغییر منفی پتانسیل در هر نقطه نشان‌دهندهٔ وجود تغییرات مثبت در قسمت دیگر سازه است و در اغلب فلزات تغییرات مثبت پتانسیل موجب تشدید خوردگی می‌شود. بنابراین هدف از آزمون‌های معمول در خوردگی تداخلی، پیدا کردن مناطقی است که تغییرات مثبت پتانسیل دارند و هدف از انجام آزمون در چند نقطه، مشخص کردن بالاترین تغییرات پتانسیل موضعی و نیز برآورد دقیق مقادیر حداکثر می‌باشد. باید توجه نمود تخلیهٔ جریان در سازهٔ اولیه می‌تواند باعث تخریب پوشش آن نیز شود. شکل ۳۴.۵ پلات تغییرات پتانسیل در سازه‌های اولیه و ثانویه را نشان می‌دهد. جدول ۳۹.۵ تغییرات عددی پتانسیل را نشان می‌دهد. شکل ۳۵.۵ تشخیص نواحی آندی ناشی از جریان سرگردان در محل تقاطع دو سازه را نشان می‌دهد.



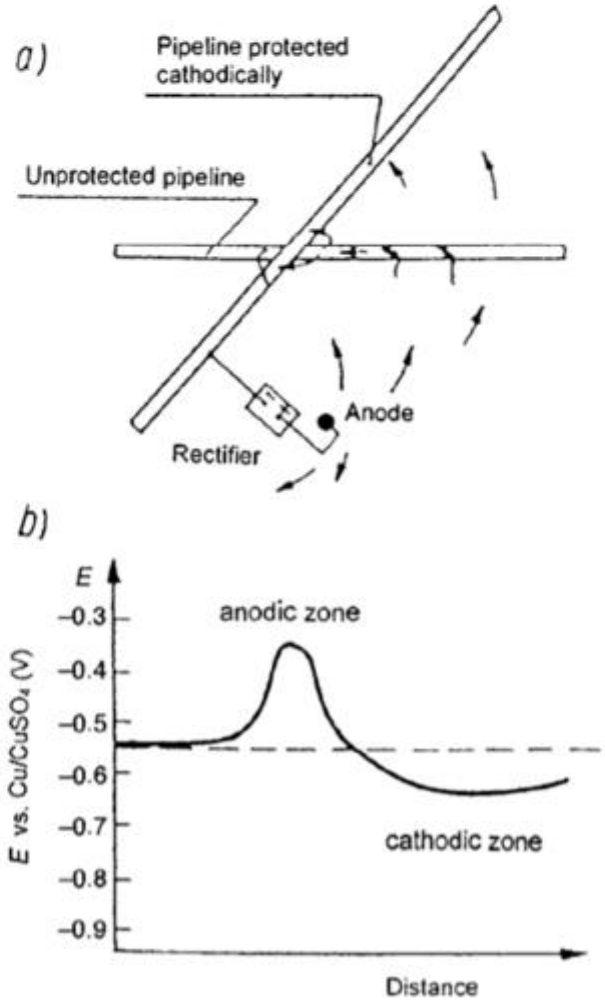
شکل ۳۴.۵. نقشهٔ تغییرات پتانسیل در سازهٔ اولیه و ثانویه [۱۳]

جهت بررسی اثر تداخلی، بیشترین مقدار جریان مورد نیاز برای حفاظت سازه که در طی بهره‌برداری عادی به کار می‌رود، در نظر گرفته می‌شود. جریان کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده، ممکن است حداکثر تغییرات پتانسیل را در سازهٔ ثانویه نشان ندهد. معیار آزمایشات، مقدار تغییر پتانسیل در سازهٔ ثانویه نسبت‌به الکترولیت خواهد بود. مقدار تغییرات پتانسیل در حین روشن کردن سیستم اعمال جریان و یا اتصال آندهای فداشونده مشخص می‌شود. تغییرات پتانسیل هنگام روشن و خاموش کردن معمولاً از نظر مقدار مساوی، ولی از نظر علامت مخالف

یکدیگرند. نقاط مربوط به پراب‌های اندازه‌گیری باید به‌اندازهٔ کافی به یکدیگر نزدیک باشند تا نمودار مشابه شکل ۳۰.۵ را ایجاد کند. حداکثر تغییر مثبت پتانسیل ناشی از جریان‌های تداخلی در هر قسمت از سازهٔ ثانویه نباید از ۲۰ میلی‌ولت بیشتر شود.

جدول ۳۹.۵. تغییرات عددی پتانسیل در سازهٔ اولیه و ثانویه [۱۳]

TEST POINT	POTENTIAL VERSUS COPPER/COPPER SULFATE (V)	TEST POINT	POTENTIAL VERSUS COPPER/COPPER SULFATE (V)
P1	-0.883	F1	-0.832
P2	-0.876	F2	-0.810
P3	-0.864	F3	-0.765
P4	-0.927	F4	-0.746
P5	-1.058	F5	-0.421
P6	-1.012	F6	-0.386
P7	-0.881	F7	-0.405
P8	-0.854	F8	-0.413
P9	-0.836	F9	-0.419



شکل ۳۵.۵. تشخیص نواحی آندی ناشی از جریان سرگردان [۶۳]

۲.۴.۵. روش‌های کاهش اثرات جریان تداخلی

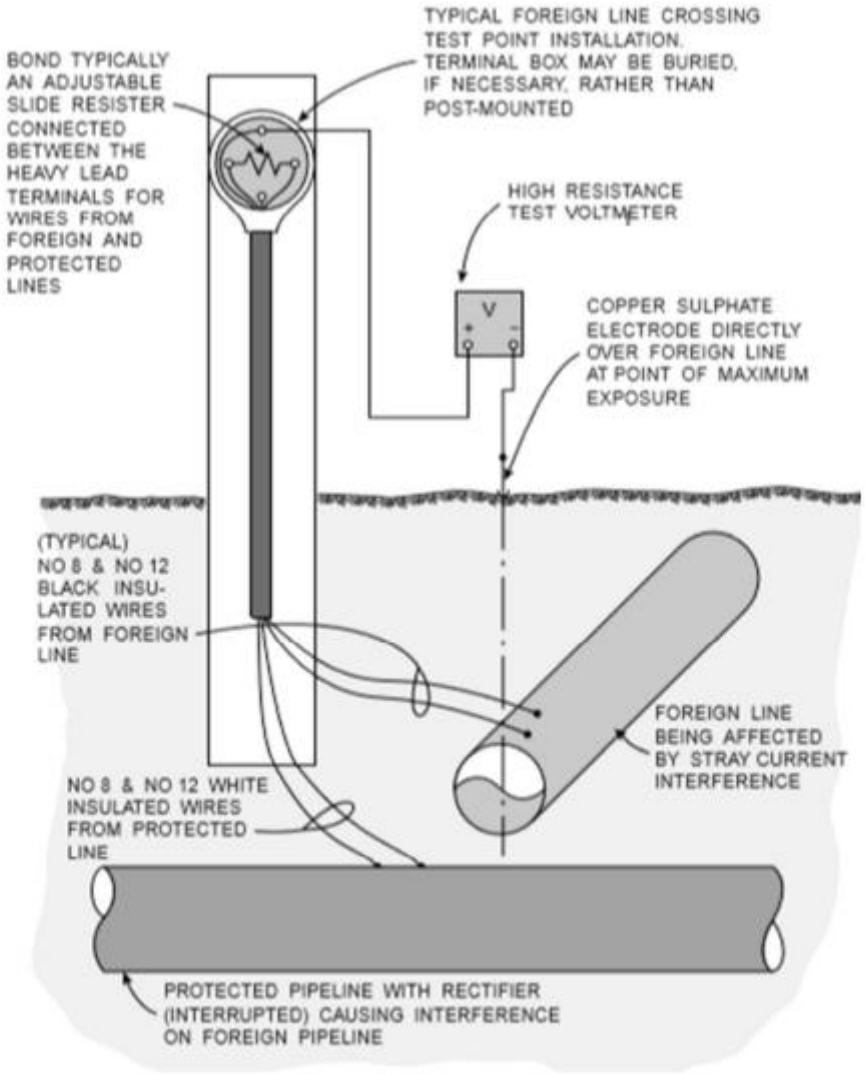
اصولاً میزان تأثیر جریان تداخلی بر روی سازه‌ها بستگی به موارد زیر دارد [۶۴]:

- کیفیت پوشش سازهٔ اولیه: پوشش مناسب سبب کاهش جریان مورد نیاز برای حفاظت و درنتیجه کاهش اثر جریان‌های تداخلی می‌شود.
- کیفیت پوشش سازهٔ ثانویه: وجود پوشش بر روی سازهٔ ثانویه سبب افزایش تغییرات مثبت پتانسیل می‌شود. ولی باید توجه نمود که درصورت عیوب موضعی در پوشش، تغییرات مثبت پتانسیل سازهٔ ثانویه_ خاک سبب ایجاد خوردگی شدید خواهد شد.
- مقدار تغییرات پتانسیل در نزدیکی سازه‌های اولیه نسبت‌به سازه‌های ثانویه: تغییر پتانسیل تقریباً متناسب با اثر جریان‌های تداخلی است. لذا باید این تغییرات در حداقل مقدار لازم بوده و در ضمن حفاظت نقاط دورتر را نیز در بر داشته باشد. چنانچه فاصلهٔ سازهٔ حفاظت‌شده از محل تزریق جریان حفاظت زیاد باشد، مقدار تغییر پتانسیل بیشتری در نقاط تزریق لازم خواهد شد. بنابراین با اعمال حفاظت در تعداد نقاط بیشتر اثر جریان‌های تداخلی را می‌توان کاهش داد. در این حالت تغییر پتانسیل در روی سازهٔ اولیه یکنواخت شده و اثر تغییر پتانسیل‌های بالا بر روی سازه‌های دیگر نیز جزئی خواهد بود.
- فاصلهٔ بین بسترهای آندی از سازهٔ ثانویه: سازه‌های نزدیک به سیستم آندی ممکن است تحت تأثیر شیب پتانسیل اطراف آند قرار بگیرند، لذا تا حد امکان بستر آندی باید دورتر از سازه‌ها قرار داشته باشند.
- مقاومت الکتریکی خاک یا آب: شیب پتانسیل در هر نقطه از خاک، بیان‌کنندهٔ مقاومت خاک و چگالی جریان می‌باشد. بنابراین، عموماً با نصب بستر آندی در محل‌های با مقاومت پایین، اثر جریان‌های تداخلی به کمترین مقدار خود می‌رسد.

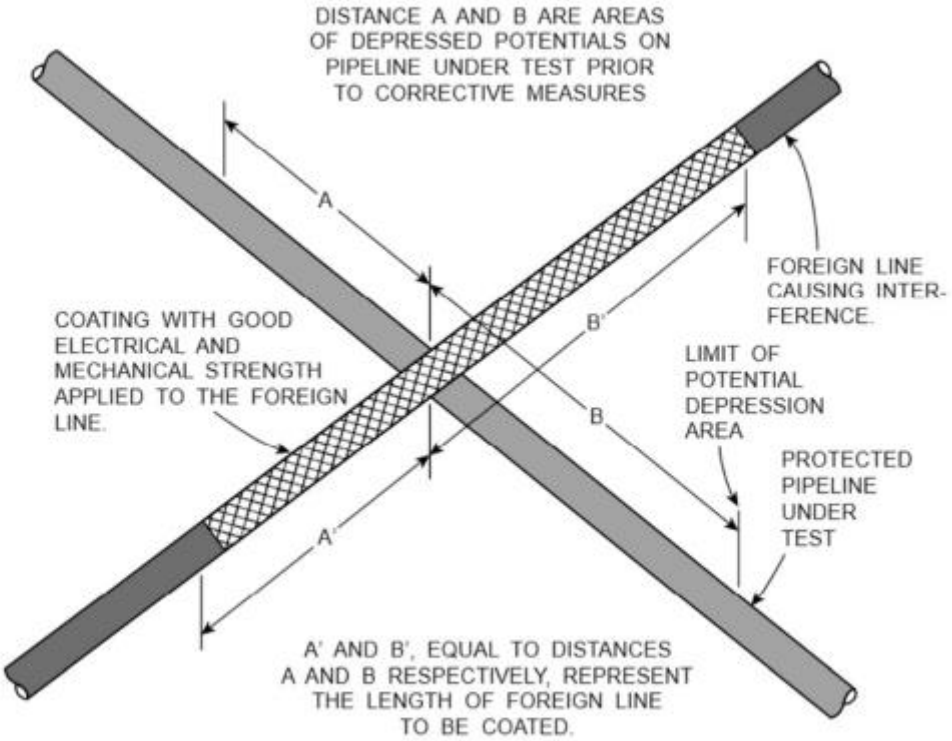
درصورتی‌که جریان حاصل از آندهای فداشونده کمتر از ۱۰۰ mA باشد، امکان بروز اثر جریان‌های تداخلی کم است. اگر جریان خروجی از آند بیش از ۱۰۰ mA باشد و یا یک بستر با چند آند نصب‌شده باشد، انجام آزمون‌های بررسی جریان‌های تداخلی پیشنهاد می‌شود. در سیستم اعمال جریان با توجه به توضیحات فوق‌الذکر جهت کاهش اثرات ناشی از جریان تداخلی تا حدّ امکان باید موارد تأثیرگذار مدنظر قرار بگیرد. علاوه‌بر احتیاط‌های مورد نظر و حصول اطمینان از کاهش جریان تداخلی، تمهیدات زیر پیشنهاد شده است:

- طراحی یک سیستم حفاظت کاتدی مشترک بین سازه‌ها،

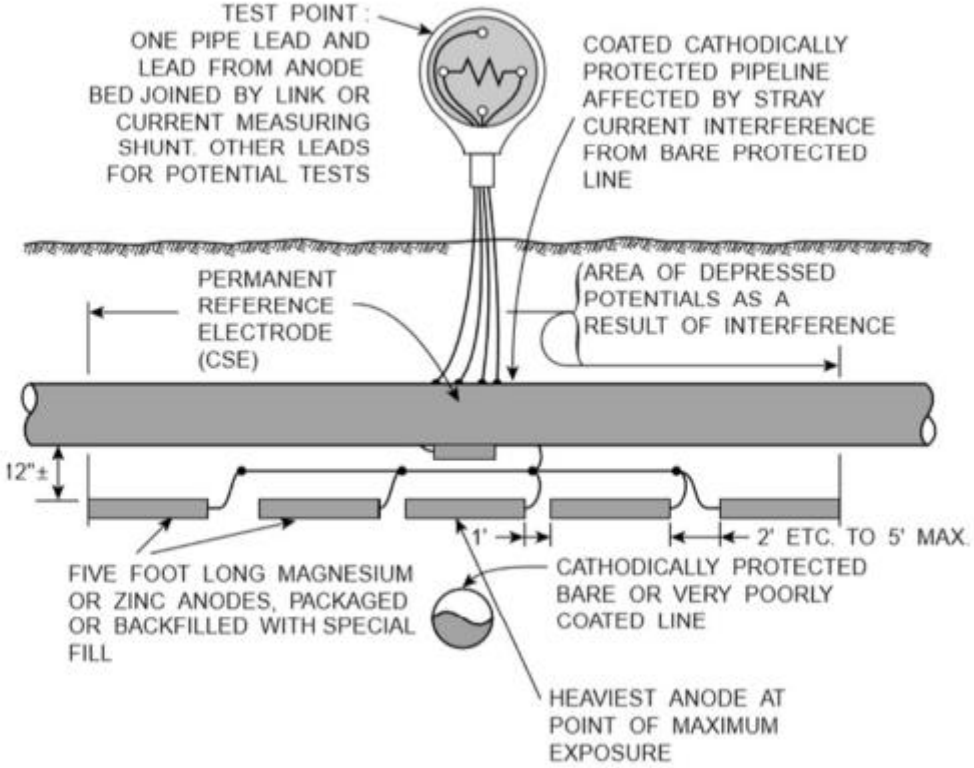
- اتصال الکتریکی سازه‌ها به یکدیگر: اتصال ترجیحاً بایستی در محلی از سازهٔ ثانویه که دارای حداکثر تغییرات مثبت پتانسیل سازه‌ای است، ایجاد شود. اگر سازه‌ها در محل حداکثر تغییرات پتانسیل فاصلهٔ زیادی از یکدیگر داشته باشند بهتر است دو سازه در فاصلهٔ نه چندان دور از این نقطه به‌هم متصل شوند که نتایج رضایت‌بخشی حاصل شود (شکل ۳۶.۵).
- نصب یک یا چند آند فداشونده بر روی سازهٔ ثانویه در محلی که تغییرات مثبت پتانسیل رخ می‌دهد (شکل ۳۷.۵).
- افزایش مقاومت الکتریکی بین دو سازه در نقاطی که تغییرات مثبت پتانسیل رخ می‌دهد. این کار توسط پوشش مضاعف بر روی سازهٔ اولیه و ثانویه و یا ایجاد عایق بین دو سازه صورت می‌گیرد (شکل ۳۸.۵ و ۳۹.۵).
- جداسازی سازهٔ اولیه توسط اتصالات عایق (شکل ۴۰.۵).



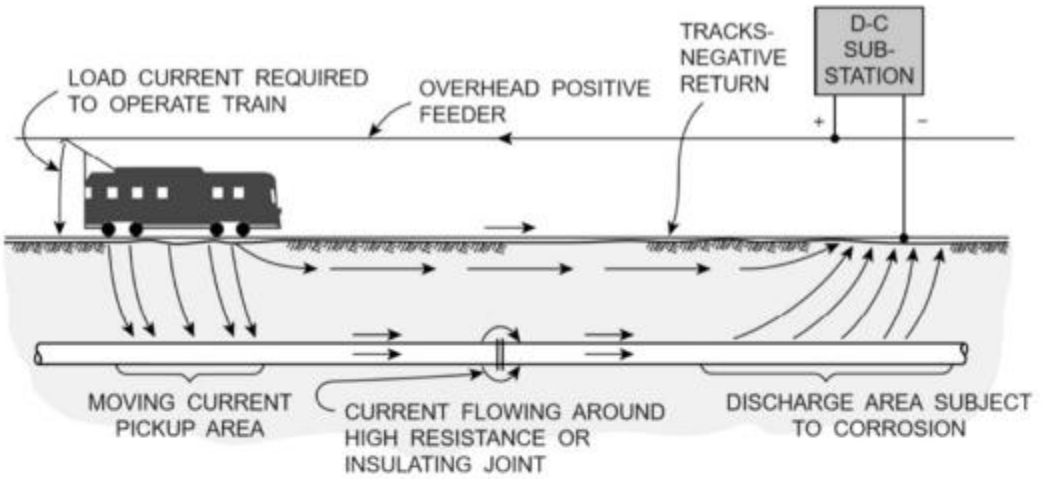
شکل ۳۶.۵. طرح‌وارهٔ نحوهٔ اتصال بین سازه‌ها جهت کاهش جریان تداخلی [۷]



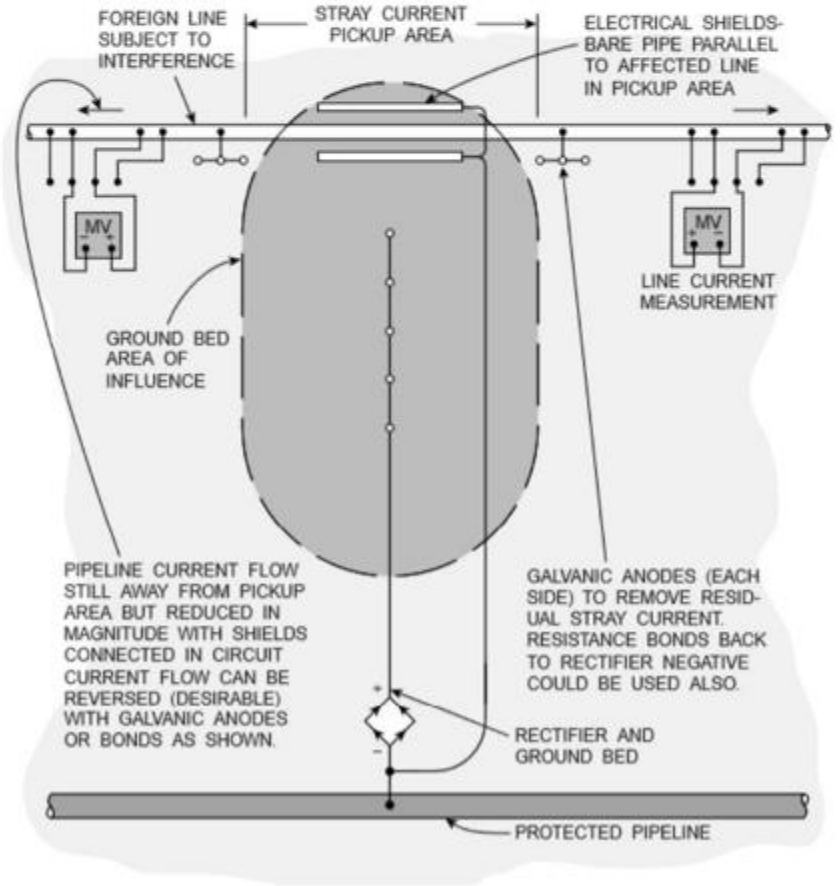
شکل ۳۷.۵. استفاده از پوشش مناسب در نزدیکی خطوط تقاطع [۷]



شکل ۳۸.۵. تصویر استفاده از آند فداشونده برای مقابله با جریان سرگردان [۷]



شکل ۳۹.۵. استفاده از اتصالات عایقی جهت کاهش اثرات جریان تداخلی [۷]



شکل ۴۰.۵. تصویر استفاده از صفحات عایقی برای جلوگیری از اثر جریان سرگردان [۷]

فصل ششم

فصل ششم

مبانی حفاظت کاتدی

وقتی سازه‌ای در محیط خورنده قرار می‌گیرد، به‌دلیل وجود اختلاف پتانسیل بین نقاط آندی و کاتدی، یک جریان الکتریکی بین این نقاط بر روی سطح ایجاد می‌شود. بعد از مدتی پتانسیل آند و کاتد به مقدار مشخصی می‌رسد که به آن پتانسیل مدار باز (تقریباً برابر پتانسیل خوردگی) می‌گویند. در این پتانسیل، جریان الکتریکی ناشی از واکنش‌های آندی و کاتدی برابر و تحت عنوان جریان خوردگی مطرح می‌شود. با اعمال پتانسیل لازم از یک بستر آندی، جریان الکتریکی بیشتر از جریان خوردگی را می‌توان به سمت سازه ارسال کرد. این جریان می‌تواند باعث پلاریزاسیون کاتدی و یا به‌عبارتی باعث انجام واکنش‌های کاتدی روی سطح سازه شده و واکنش‌های آندی (انحلال فلز) را مختل کند. در این حالت، پتانسیل سطح کاهش یافته و سازه تحت حفاظت کاتدی قرار گرفته شده است. در این فصل با استفاده از اصول ترمودینامیک و سینتیک خوردگی، مدارهای الکتریکی، معیارهای حفاظت کاتدی، چگونگی پلاریزاسیون کاتدی سطح مورد توجه قرار گرفته شده است.

۱.۶. مفهوم الکتروشیمی حفاظت کاتدی

اختلاف پتانسیل بین نقاط مختلف سازه، باعث می‌شود که جریان الکتریکی از طریق الکترولیت، توسط یون‌های موجود در الکترولیت از نقاط آندی به نقاط کاتدی برقرار شود (شکل ۱.۶). هرچه جریان مذکور بیشتر باشد، نرخ یا سرعت خوردگی هم بالاتر است. جهت این جریان در فلز که توسط الکترون‌های آزاد منتقل می‌شود، برخلاف جهت حرکت الکترون‌ها، از کاتد به آند خواهد بود. بنابراین برای ایجاد فرایند خوردگی، چهار عامل اختلاف پتانسیل روی سطح سازه، هدایت الکتریکی از طریق فلز، وجود الکترولیت خورنده و امکان هدایت الکتریکی از طریق الکترولیت ضروری است. با گذشت زمان و پلاریزه شدن سطح آند و کاتد، میزان جریان خوردگی نیز تغییر می‌کند.

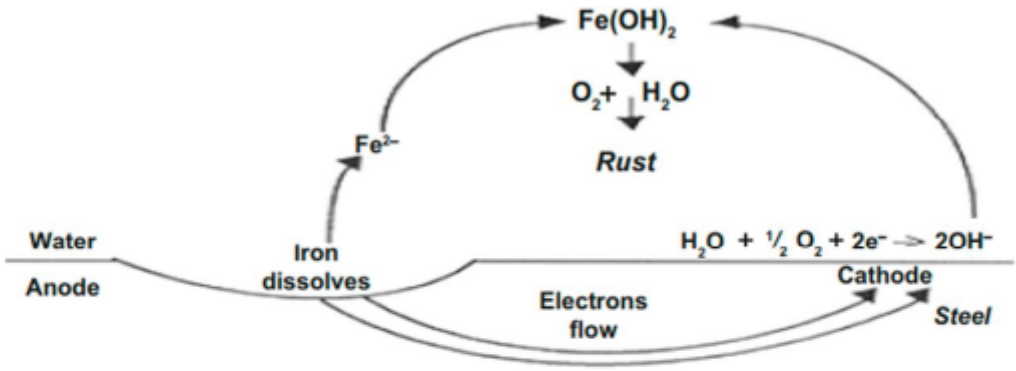
فصل ششم

مبانی حفاظت کاتدی

وقتی سازه‌ای در محیط خورنده قرار می‌گیرد، به‌دلیل وجود اختلاف پتانسیل بین نقاط آندی و کاتدی، یک جریان الکتریکی بین این نقاط بر روی سطح ایجاد می‌شود. بعد از مدتی پتانسیل آند و کاتد به مقدار مشخصی می‌رسد که به آن پتانسیل مدار باز (تقریباً برابر پتانسیل خوردگی) می‌گویند. در این پتانسیل، جریان الکتریکی ناشی از واکنش‌های آندی و کاتدی برابر و تحت عنوان جریان خوردگی مطرح می‌شود. با اعمال پتانسیل لازم از یک بستر آندی، جریان الکتریکی بیشتر از جریان خوردگی را می‌توان به سمت سازه ارسال کرد. این جریان می‌تواند باعث پلاریزاسیون کاتدی و یا به‌عبارتی باعث انجام واکنش‌های کاتدی روی سطح سازه شده و واکنش‌های آندی (انحلال فلز) را مختل کند. در این حالت، پتانسیل سطح کاهش یافته و سازه تحت حفاظت کاتدی قرار گرفته شده است. در این فصل با استفاده از اصول ترمودینامیک و سینتیک خوردگی، مدارهای الکتریکی، معیارهای حفاظت کاتدی، چگونگی پلاریزاسیون کاتدی سطح مورد توجه قرار گرفته شده است.

۱.۶. مفهوم الکتروشیمی حفاظت کاتدی

اختلاف پتانسیل بین نقاط مختلف سازه، باعث می‌شود که جریان الکتریکی از طریق الکترولیت، توسط یون‌های موجود در الکترولیت از نقاط آندی به نقاط کاتدی برقرار شود (شکل ۱.۶). هرچه جریان مذکور بیشتر باشد، نرخ یا سرعت خوردگی هم بالاتر است. جهت این جریان در فلز که توسط الکترون‌های آزاد منتقل می‌شود، برخلاف جهت حرکت الکترون‌ها، از کاتد به آند خواهد بود. بنابراین برای ایجاد فرایند خوردگی، چهار عامل اختلاف پتانسیل روی سطح سازه، هدایت الکتریکی از طریق فلز، وجود الکترولیت خورنده و امکان هدایت الکتریکی از طریق الکترولیت ضروری است. با گذشت زمان و پلاریزه شدن سطح آند و کاتد، میزان جریان خوردگی نیز تغییر می‌کند.



شکل ۱.۶. تصویر مسیرهای حرکت الکترون‌ها و یون‌ها در فرایند خوردگی فولاد [۱]

وقتی سطح سازه، توسط یک منبع جریان الکتریکی و یا آندهای فداشونده به‌صورت کاتدی پلاریزه شود، پتانسیل سازه از پتانسیل خوردگی کمتر می‌شود. جدول ۱.۶ مقایسه، مزایا و معایب دو روش حفاظت کاتدی آند فداشونده و اعمال جریان را در ۹ مورد نشان می‌دهد. زمان بهره‌برداری کمتر، نیرو محرکهٔ پایین‌تر، دانسیتهٔ جریان کمتر، اختلاف پتانسیل کمتر بین سازه و آند، استفاده در الکترولیت با مقاومت کمتر، باعث محدودیت در استفاده از سطح تحت حفاظت به روش آند فداشونده می‌شود. از معایب دیگر این روش، می‌توان به محدودیت در به‌کارگیری آن در الکترولیت با مقاومت پایین و نیاز به کنترل، تعویض و تعمیرات اشاره کرد. شکل ۲.۶ تصویر شماتیکی ساده‌ای از دو سیستم آند فداشونده و اعمال جریان را نشان می‌دهد. انجام واکنش‌های روی آند و سازه در دو سیستم قابل توجه است. بسته به شرایط محیطی، بستر آندی، نوع سیستم حفاظت و نوع آندها، واکنش‌های مختلفی بر روی سطح آندها اتفاق می‌افتد که در جدول ۲.۶ ارائه شده است. اینکه در چه پتانسیلی چه واکنشی اتفاق می‌افتد، جای فکر دارد. مثلاً در چه پتانسیلی بر روی کاتد امکان آزاد شدن گاز هیدروژن وجود دارد؟ قلیایی شدن سطح سازه چه تأثیر منفی‌ای بر کارایی پوشش دارد؟ آزاد شدن گاز کلر بر روی تخریب روکش کابل‌های مثبت چطور؟ آیا واکنش‌های مضر را می‌توان بر روی سطوح آند و کاتد به‌نحوی کنترل کرد که اخلالی در عملکرد سیستم حفاظت وارد نشود؟ شرایط ایجاد گاز هیدروژن، اکسیژن و یا هیدروکسید را در دیاگرام پوربه جست‌وجو کنید.

کاهش پتانسیل و جریان ناشی از اعمال حفاظت کاتدی توسط منحنی‌های ایوانز و خطوط تافل نیز قابل بررسی است. شکل ۳.۶ تصویر ساده‌ای از کاهش پتانسیل و کاهش جریان خوردگی سازه در حالت حفاظت در منحنی پلاریزاسیون را نشان می‌دهد.

جدول ۱.۶. مقایسهٔ حفاظت کاتدی با جریان الکتریکی و آند فداشونده [۲]

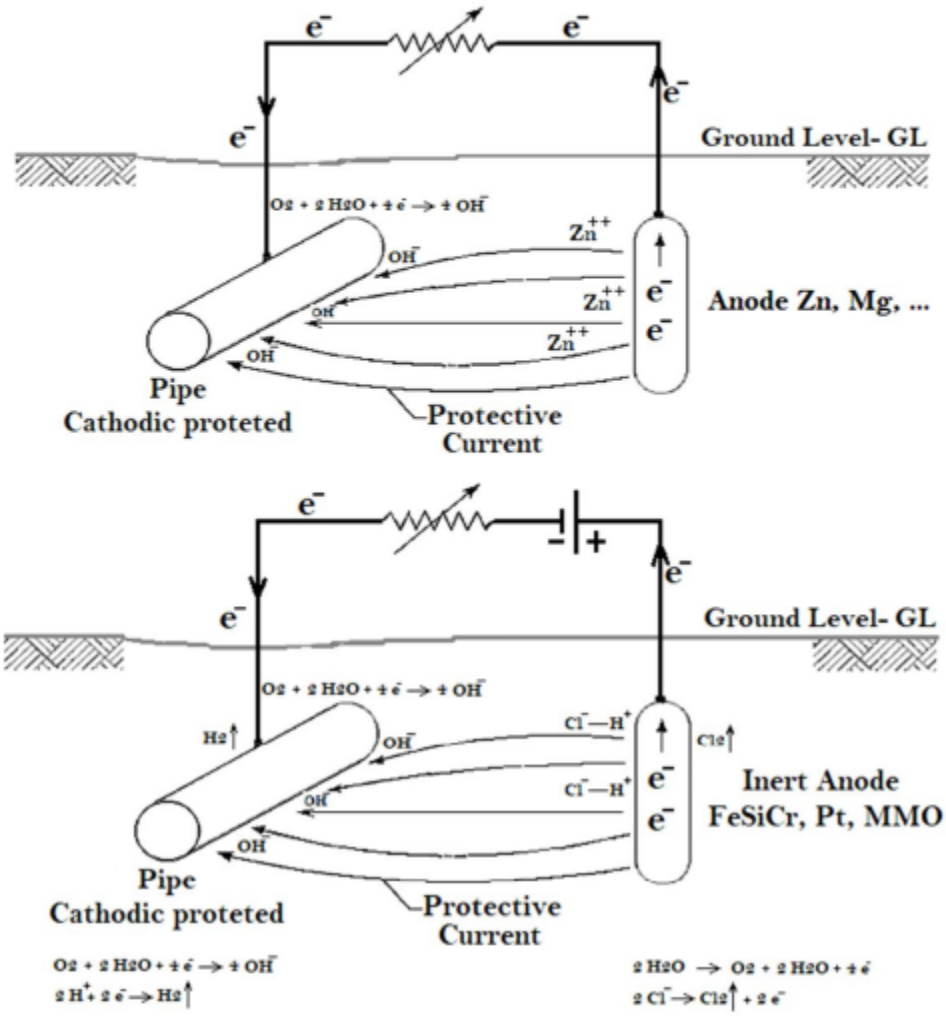
SN	Impressed Current CP System	Galvanic anode CP system
1	Longer Design Life (25+ Yrs.)	Short Design Life in comparison to ICCP anode.
2	Once installed only requires annual system checks.	Disruptive - repeating repair cycle. Replacement of anodes costly.
3	External power source required.	No external power source required
4	Impressed current Ti/MMO anodes are capable of operating at significantly higher current density discharge rates – up to 100 A/m^2; however, in most cases the operating levels are much lower.	Galvanic anodes are typically designed to operate at much lower current densities.
5	Current is controlled & variable	Cannot control limited current
6	High (5-25V) & variable driving force	Low (<1v) & fixed driving force
7	Works with any resistivity electrolyte	Requires low resistivity electrolyte
8	Proactive & Sustainable	Reactive
9	Today's standard for impressed current cathodic protection applications is typically a Titanium anode with a Mixed Metal Oxide coating (Ti/MMO). These anodes have extremely long service life and very low consumption rate measured in the 1-2 mg/amp-year.	Zinc and Magnesium anodes are typically used in galvanic systems and they have a nominal consumption rate of approximately 11.24 Kg/Amp-Yr. for Zinc and 7.9 Kg/amp-Yr. for Magnesium.

بسته به میزان کاهش پتانسیل، واکنش‌های انجام‌گرفته بر روی سطح، از نوع کاتدی و واکنش آندی به‌طور قابل توجهی کاهش، ولی ممکن است کاملاً حذف نشده باشند. در این حالت گفته می‌شود، سازه تحت پتانسیل کاتدی یا در اثر پلاریزاسیون کاتدی به‌دلیل مختل شدن واکنش‌های آندی، تحت حفاظت قرار گرفته شده است. به‌عبارت ساده‌تر اغلب نقاط آندی روی سطح به‌دلیل تغییر پتانسیل، به نقاط کاتدی تبدیل شده و واکنش آزاد شدن یون و الکترون با شدت کمتری اتفاق می‌افتد. در این حالت رفتار الکتروشیمیایی سازه توسط واکنش‌های کاتدی تحلیل و کنترل می‌شود. اینکه میزان کاتدی شدن سطح سازه چقدر باشد که اصلاً خوردگی اتفاق نیفتد، به کمک منحنی پلاریزاسیون، در شکل ۳.۶ قابل بررسی است.

براساس شکل ۴.۶ یک سازهٔ فولادی در محیط مرطوب یا یک محیط آبی حاوی یک مول یون آهن دو ظرفیتی با دو واکنش اصلی آندی و کاتدی زیر دچار خوردگی می‌شود:

$$A: 2Fe \rightarrow 2Fe^{++} + 4e^{-}$$

$$C: 2O_2 + 4e^{-} + 2H_2O \rightarrow 4OH^{-}$$



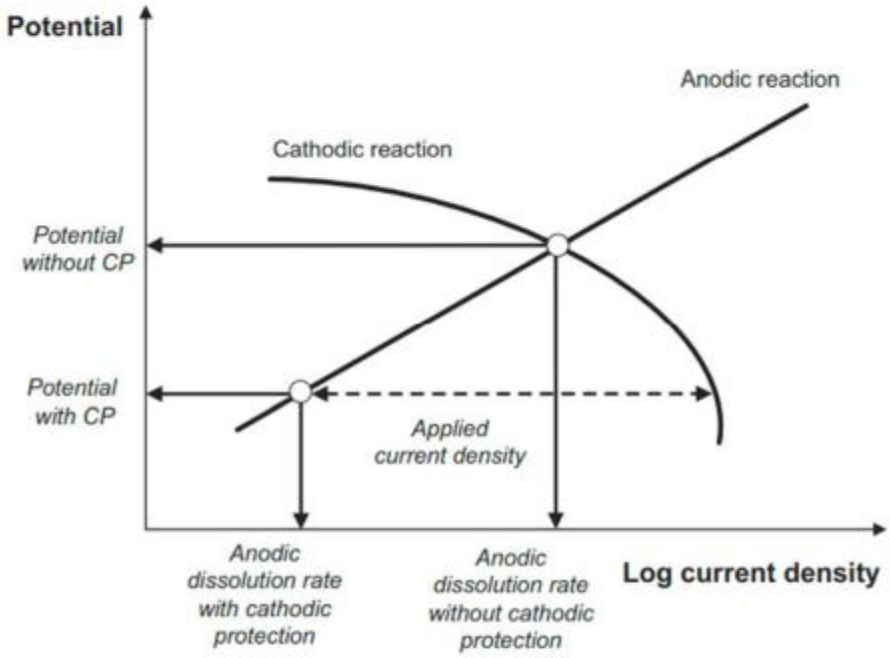
شکل ۲.۶. تصویری از ارسال جریان حفاظت به سازه به روش اتصال آند فداشونده و سیستم اعمال جریان [۳]

جدول ۲.۶. واکنش‌های آندی و کاتدی بر روی سطح آند و کاتد در سیستم‌های حفاظت کاتدی [۳]

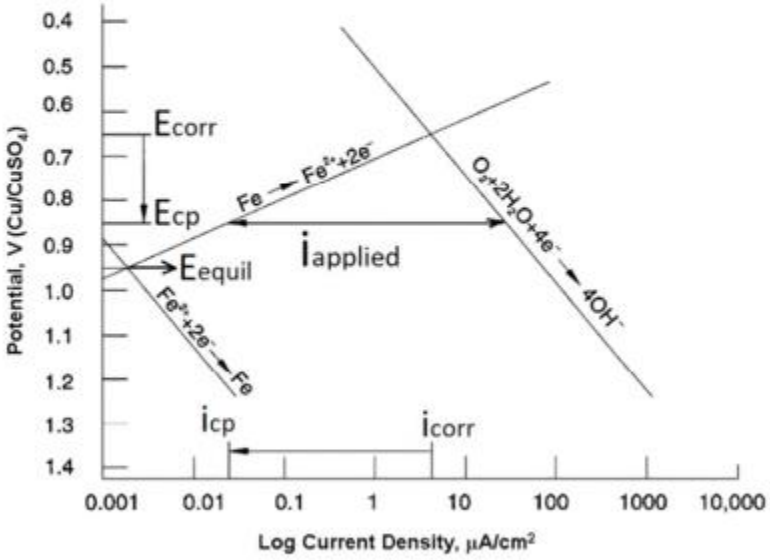
At Cathode	
$O_2 + H_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^-$ (At high Potential) $Ca^{++} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow H_2O + CaCO_3\downarrow$ (Calcareous scale) $Mg^+ + OH^- \rightarrow MgOH\downarrow$ (Calcareous scale)	
At Anode (Impressed Current System)	At Anode (Galvanic Anode)
$2H_2O \rightarrow O_2\uparrow + 4H^+ + 4e^-$ $2Cl^- \rightarrow Cl_2\uparrow + 2e^-$	$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e^-$ (Dissolution of Zinc) $Al \rightarrow Al^{+++} + 3e^-$ (Dissolution of Aluminum)

مطابق شکل ۴.۶ با اعمال جریان خارجی $i_{applied}$، پتانسیل سطح سازه از E_{corr} به E_{cp} کاهش پیدا می‌کند. در این حالت، عمدهٔ واکنش‌های کاتدی روی سطح در محیط مرطوب یا آبی $2O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$ خواهد بود. البته واکنش آندی بر روی سطح در حد معقول و

آزاد شدن یون آهن در حد $۱۰^{-۳}$ مول ادامه می‌یابد. تا زمانی که پتانسیل سطح به پتانسیل تعادلی یعنی E_{equil} یعنی پتانسیل ۴۴۰mV- در شرایط دمای محیط و وجود یک مول یون آهن دو ظرفیتی در الکترولیت نرسیده باشد، واکنش آندی $2Fe \rightarrow 2Fe^{++} + 4e^{-}$ به‌طور کامل از روی سطح متوقف نمی‌شود. در شرایطی که میزان یون آهن دو ظرفیتی در محیط کمتر از یک مولار باشد، بنا به رابطهٔ نرنست این پتانسیل از ۴۴۰mV- هم منفی‌تر خواهد شد.

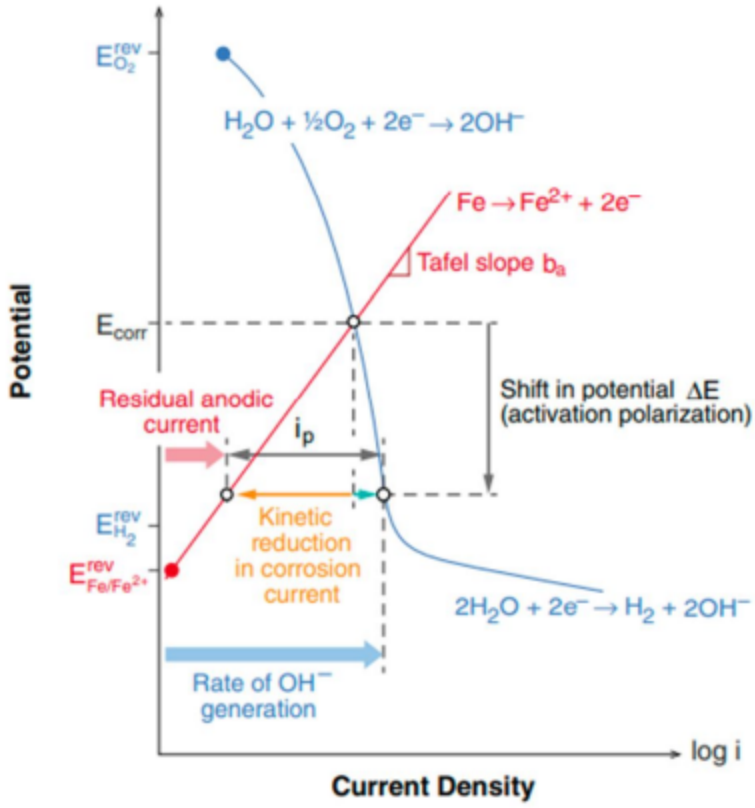


شکل ۳.۶. نمایش پتانسیل و دانسیتهٔ جریان حفاظت کاتدی بر روی نمودار ایوانز [۴]



شکل ۴.۶. دیاگرام ایوانز نشان‌داده‌شده برای حفاظت کاتدی فولاد در محیط آبی [۵]

در این حالت برای حفاظت کامل، به اعمال جریان و پتانسیل بیشتری نیاز خواهد بود. در پتانسیل کمتر از E_{equil} می‌توان ادعا کرد که هیچ واکنش آندی انجام نمی‌شود و کل سطح به‌طور کامل تحت حفاظت کاتدی قرار گرفته شده است. چنانچه پتانسیل سطح تحت حفاظت از حد مناسب پایین‌تر برود و حفاظت بیش از حد رخ دهد، گاز هیدروژن روی سطح مطابق واکنش $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ رخ می‌دهد و پوشش اعمالی بر روی سازه دچار تخریب می‌شود (شکل ۵.۶).

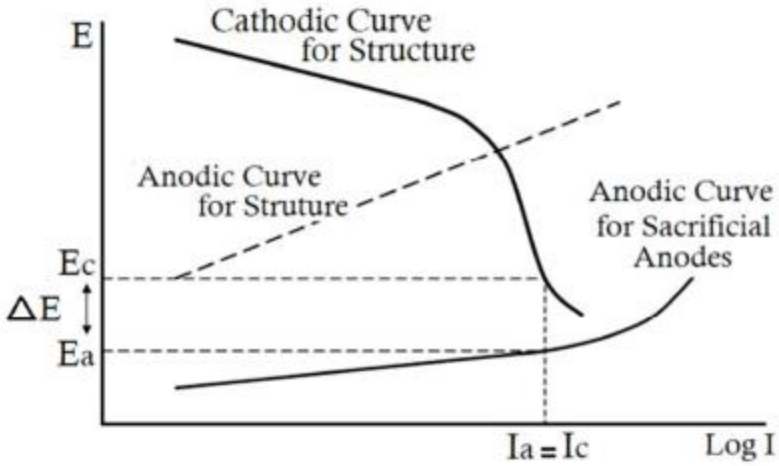


شکل ۵.۶. طرح‌وارهٔ واکنش‌های کاتدی در حالت حفاظت بیش از حد بر روی منحنی ایوانز [۶]

نظر مؤلف این است که به‌لحاظ عملی، کاهش پتانسیل سطح به کمتر از پتانسیل E_{equil} هزینه‌بر و مقرون‌به‌صرفه نیست. همچنین کاهش بیش از حد پتانسیل، باعث آزاد شدن هیدروژن و تخریب پوشش و سازه نیز می‌شود. بالا رفتن جریان در نقطهٔ خروج جریان از سازه، باعث گرم شدن بیش از حد و تخریب پوشش بیشتر در این ناحیهٔ از سازه می‌شود. تجربهٔ دیگر نشان می‌دهد که جریان زیاد، باعث آزاد شدن بیشتر گاز کلر در محل اتصالات کابلی در بستر آندی شده و تخریب زودهنگام کابل‌های مثبت را نیز به دنبال دارد. با وجود استفاده از کابل

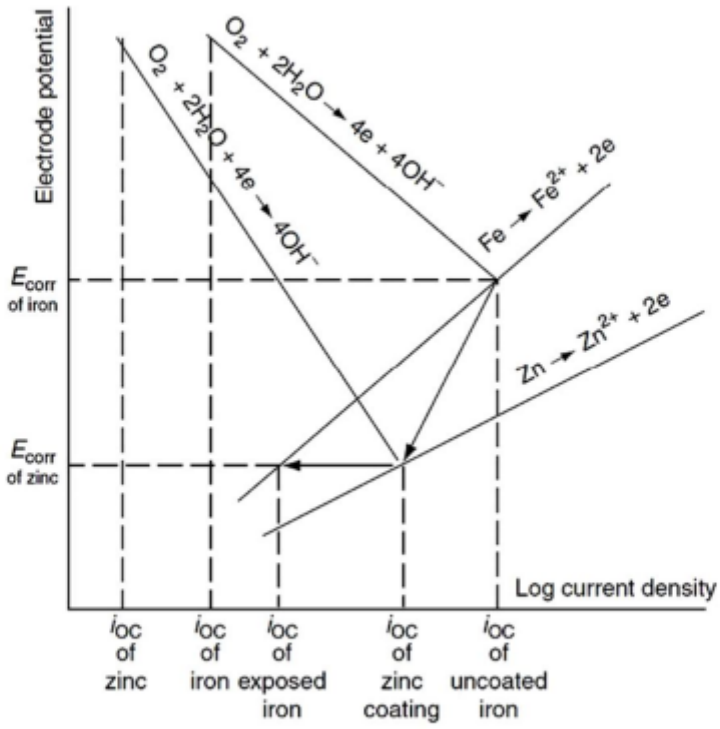
مقاوم مثل کاینار، باز هم امکان آزاد شدن گاز کلر وجود دارد. تعبیهٔ ونت جهت خروج گاز کلر ازجمله تمهیداتی است که در طراحی حفاظت کاتدی مدنظر قرار می‌گیرد. به‌هرحال، مهندسان با فرض یک طول عمر مشخص، با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی سعی می‌کنند با اعمال جریان خارجی مناسب $i_{applied}$، پتانسیل سطح را به E_{cp} رسانده و تاحدود زیادی واکنش آندی را روی سطح به حداقل برسانند.

با استفاده از دیاگرام ایوانز (شکل ۶.۶)، با دقت بیشتری تأثیر اتصال یک آند فداشونده را می‌توان تجزیه‌وتحلیل کرد. پتانسیل آند فداشونده کمتر از پتانسیل حفاظت ۸۵۰mV- است، جریان خوردگی آن با تقاطع با منحنی کاتدی قابل اندازه‌گیری است.



شکل ۶.۶. بررسی فداشوندگی آند در دیاگرام ایوانز [۷]

تحلیل تأثیر پوشش با خاصیت فداشوندگی مثل پوشش گالوانیزه در شکل ۷.۶ آمده است. مطابق شکل ۷.۶ باید توجه نمود که شیب خط کاتدی احیای اکسیژن به‌دلیل اختلاف دانسیتهٔ جریان تبادلی احیای اکسیژن بر روی سطح فلز روی (i_{oc}/Zn) و بر روی سطح آهن (i_{oc}/Fe) متفاوت است. با اتصال و یا اعمال پوشش فلز روی بر روی سطح فولاد، پتانسیل خوردگی فولاد به پتانسیل فلز روی کاهش یافته و جریان خوردگی فولاد نیز از حالت بدون پوشش نسبت‌به جریان خوردگی فولاد پوشش‌دار کمتر می‌شود. برای فولاد گالوانیزه به‌دلیل اتصال ساختاری فلز روی به فولاد، پتانسیل حفاظت برابر پتانسیل روی خواهد بود. در شرایط استفاده از آند فداشونده ممکن است پتانسیل فولاد کاهش پیدا کند، ولی نباید از معیار ۸۵۰mV- کمتر شود. معمولاً حفاظت بیش از حد برای سیستم آند فداشونده اتفاق نمی‌افتد.



شکل ۷.۶. نمایش حفاظت کاتدی فولاد با پوشش روی در منحنی ایوانز [۸]

تجربه نشان می‌دهد با کاهش پتانسیل سطح به میزان حدودی ۳۰۰mV کمتر از پتانسیل خوردگی، سازه تحت حفاظت کاتدی قرار می‌گیرد. این عمل توسط آند فداشونده و یا سیستم اعمال جریان انجام می‌شود. آندهای فداشونده و اعمال جریان به‌همراه سازه باید در الکترولیت قرار گرفته باشند. سعی می‌شود آندها در الکترولیت با مقاومت کمتر، در بستر کک قرار داده شوند تا مقاومت آند به الکترولیت کاهش یافته و جریان‌دهی بهتری داشته باشند. مرطوب نگه داشتن بستر آندی از دیگر تمهیداتی است که معمولاً بهره‌برداران از آن استفاده می‌کنند. نظر مؤلف این است که در محیط‌های صنعتی بر روی بستر آندی گل و چمن‌کاری کنند تا مجبور به آبیاری و مرطوب نگه داشتن آن شوند. درصورت به‌کارگیری کابل در اتصالات بین آند و سازه در سیستم آند فداشونده و یا اتصالات آند و سازه به مبدل یکسوکننده در سیستم اعمال جریان، حتماً باید از عایق بودن محل اتصالات اطمینان حاصل نمود. عدم عایقی مناسب در محل اتصالات کابلی، جریان الکتریکی هدر رفته و در مواردی هم باعث جریان سرگردان و خوردگی و تخریب کابل‌ها می‌شود. تجربهٔ مؤلف نشان می‌دهد که در اتصالات جوشی و پیچ‌ومهره‌ای در اتصال آندهای فداشونده به سازه نیز باید دقت کافی به عمل آید. اگر محل اتصال جوش و پیچ‌ومهره با پوشش مناسب عایق‌کاری نشود، به‌دلیل اختلاف پتانسیل بین آند و اتصالات، شدت خوردگی آند بیشتر شده و در نهایت باعث لقی و عدم کارایی آندها می‌شود.

نکتهٔ اساسی درارتباطبا پتانسیل حفاظت این است که تفاوتی بین پتانسیل لازم برای حفاظت فلزات و آلیاژهای مختلف برای هر دو حالت آند فداشونده و اعمال جریان در اغلب الکترولیت‌ها وجود ندارد. به‌عبارت ساده‌تر و به‌طور مثال پتانسیل حفاظت فولاد در خاک و آب دریا به هر دو روش آند فداشونده و اعمال جریان، نسبت‌به الکترود مرجع مس/سولفات مس در حدود ۸۵۰mV- در نظر گرفته می‌شود. اینکه عدد و معیار ۸۵۰mV- از کجا آمده است، محل سؤال مؤلف نیز بوده است. در بخش معیار پتانسیل، برای حفاظت کاتدی این مسئله مورد توجه قرار گرفته و به‌لحاظ تئوری به اثبات می‌رسد. با توجه به انجام واکنش‌های میکروبی، اگر در الکترولیت باکتری‌های بی‌هوازی باشد، برای حفاظت سطح فولاد، پتانسیل حفاظت به ۹۵۰mV- افزایش پیدا می‌کند. باید توجه کرد که پتانسیل حفاظت یا همان معیار حفاظت برای فلزات و آلیاژهای مختلف به‌دلیل تفاوت در پتانسیل خوردگی آنها با فولاد متفاوت و به‌عبارتی پتانسیل حفاظت آنها ۸۵۰mV- نخواهد بود. این موضوع نیز با معادلات ترمودینامیکی قابل بررسی است. پتانسیل حفاظت برای فلزات نجیب‌تر از فولاد، مثبت‌تر از ۸۵۰mV- است. به‌طور مثال پتانسیل حفاظت مس و آلیاژهای آن در آب و یا خاک در حدود ۳۰۰mV- تا ۵۰۰mV- و برای فولاد زنگ‌نزن در حدود ۴۰۰mV- است. جدول ۳.۶ معیار پتانسیل حفاظت را برای چند فلز و آلیاژ نشان می‌دهد.

جدول ۳.۶. پتانسیل حفاظت برای فلزات مختلف و آلیاژها در آب دریا و خاک [۹]

Metals	Soil	Seawater	
	V CSE	V Ag/AgCl	V Zn
Carbon steel:			
– Aerobic	−0.85	−0.80	+0.25
– Anaerobic	−0.95	−0.90	+0.15
– In concrete	−0.75	−0.70	+0.35
Copper	−0.30	−0.20	+0.70
Lead	−0.50	−0.45	+0.50
Zinc	−1.00	−1.05	0.00
Aluminium	−0.80	−0.90	+0.15
Stainless steel	−0.40	−0.50	+0.55

چند نکتهٔ قابل توجه درارتباطبا پتانسیل حفاظت سازه‌های فلزی وجود دارد:

- معیار پتانسیل حفاظت برای فلزات مختلف به‌دلیل اختلاف در پتانسیل خوردگی آنها متفاوت است (جدول ۴.۶ و ۵.۶).

جدول ۴.۶. معیار پتانسیل حفاظت برای فلزات مختلف [۱۰]

Metal or alloy	Reference electrode (and conditions of use)			
	Cu/CuSO4 (in soils and fresh water)	Ag/AgCl saturated KCl (in any electrolyte)	Ag/AgCl /sea-water (see note 1)	Zn/sea-water (see note 1)
	V	V	V	V
Iron and steel				
aerobic environment	−0.85	−0.75	-0.8	+ 0.25
anaerobic environment	−0.95	−0.85	-0.9	+ 0.15
Lead	−0.6	−0.5	-0.55	+ 0.5
Copper-based alloys	−0.5 to-0.65	−0.4 to−0.55	-0.45 to -0.6	+ 0.6 to + 0.45
Aluminium				
Positive limit	− 0.95	-0.85	-0.9	+ 0.15
Negative limit	− 1.2	-1.1	-1.15	− 0.1

1 For use in clean, undiluted and aerated seawater. The seawater is in direct contact with the metal electrode
2 All figures have been rounded to the nearest 0.05 V.

جدول ۵.۶. تغییر معیار پتانسیل حفاظت با تغییر ترکیب شیمیایی برای آلیاژهای پایهٔ آهنی [۱۱]

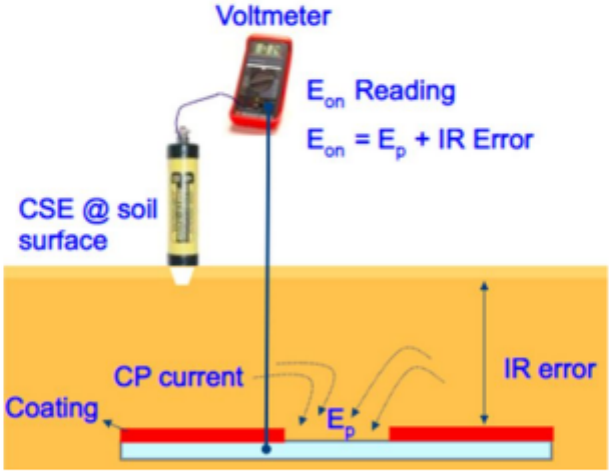
Materials	Minimum negative potential V	Maximum negative potential V
Carbon steels		
Immersed in seawater	− 0,80	− 1,10 SMYS > 550 MPa
Buried in sediments	− 0,90 SRB or $T > 60°C$	− 1,10 SMYS > 550 MPa
Austenitic stainless steels	for aerobic and anaerobic conditions	
PREN ≥ 40	− 0,30	− 1,10
PREN < 40	− 0,50	− 1,10
Duplex stainless steels	− 0,50	
Martensitic stainless (13 % Cr) **steels**	− 0,50	

The potentials are referenced to an SCE reference electrode, which are equivalent to a silver/silver chloride reference electrode (Ag/AgCl/seawater) in 30 Ω·cm seawater.
PREN = %Cr + 3,3 %(Mo+0,5W) + 16 %N.

- معیار پتانسیل حفاظت با تغییر ترکیب شیمیایی فلز می‌تواند تغییر کند (جدول ۵.۶).
- معیار پتانسیل حفاظت برای فلزات تا زمانی که جنس پوشش از نوع عایقی باشد، ربطی به نوع پوشش ندارد، ولی در پوشش‌های غیرعایقی مثل پوشش‌های فلزی پتانسیل حفاظت می‌تواند تغییر کند. در هر حال برای اطمینان از حفاظت‌کنندگی سیستم اعمال جریان و

یا آند فداشونده، سیم اتصال تست پوینت برای اندازه‌گیری پتانسیل، باید به سطح فلز پایه جوشکاری شود. محل اتصال و جوشکاری نیز باید کاملاً عایق‌کاری شود.

- اعمال پتانسیل حفاظت علاوه‌بر کنترل خوردگی فلز زمینه، می‌تواند باعث پایداری و طول عمر بیشتر پوشش نیز شود.
- پوشش‌های عایقی حتی با وجود تخلخل معمول، به‌دلیل مقاومت الکتریکی مناسب، می‌توانند باعث کاهش جریان حفاظت و بهره‌برداری باصرفه از تجهیزات سیستم حفاظت کاتدی شوند.
- ملاحظات مربوط به افت IR و در نظر گرفتن فاصلهٔ الکترود مرجع تا سطح سازه نیز در میزان پتانسیل حفاظت می‌باید مورد توجه قرار بگیرد (شکل ۸.۶).
- از عوامل دیگر مؤثر بر حفاظت کاتدی، نوع و کیفیت پوشش به‌کاررفته بر روی سازه‌ها و همچنین اتصالات عایقی و میزان کارایی آنها است. علاوه‌بر نوع، ضخامت و نحوهٔ اجرای پوشش، آماده‌سازی سطح جهت بالا بردن کارایی پوشش نیز نقش بسزایی در میزان کیفیت پوشش دارد.



شکل ۸.۶. محل اتصال کابل تست پوینت و ملاحظات مربوط به افت IR [۱۲]

بررسی واکنش‌های الکتروشیمیایی بر روی کاتد و آند در حین حفاظت کاتدی نیز جالب است. در هر دو روش آند فداشونده و سیستم اعمال جریان، بستگی به نوع محیط و میزان پتانسیل اعمالی، ممکن است بر روی سطح فلز واکنش‌های کاتدی متعددی انجام شود. به‌طور مثال سازهٔ فولادی در محیط مرطوب و آبی (شرایط قلیایی و خنثی) وقتی پتانسیل سطح سازهٔ

فولادی به حدود ۸۵۰mV- تا ۱۵۰۰mV- می‌رسد، بر روی سطح به‌طور غالب واکنش کاتدی‌های زیر اتفاق می‌افتد و درصورت وجود کاتیون‌های کلسیم و منیزیم، امکان تشکیل بیشتر و چسبنده‌تر کربنات و هیدروکسیدهای فلزی مثل $CaCO_3$ و $Mg(OH)_2$ تحت عنوان لایهٔ کلکریوس را فراهم می‌سازد (شکل ۹.۶). در پتانسیل بیش از حد حفاظت نیز امکان تولید گاز هیدروژن و تخریب پوشش سازهٔ تحت حفاظت وجود دارد. دو واکنش اول زیر باعث قلیاییت بیشتر محیط شده (pH در حدود ۹) و امکان تشکیل لایه‌های کلکریوس را افزایش می‌دهد. لایه‌های کلکریوس در دانسیتهٔ جریان بالاتر از ۱ mA/cm^2 ایجاد می‌شود [۱۳].

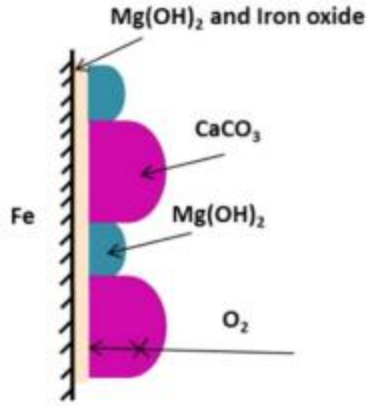
$$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$$

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$ (در پتانسیل‌های بیش از حد استاندارد)

$$OH^- + HCO_3^- \rightarrow CO3^{2-} + H_2O$$

$$Ca^{2+} + CO3^{2-} \rightarrow CaCO_3$$

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2$$



شکل ۹.۶. تصویر شماتیکی لایهٔ کلکریوس در طی حفاظت کاتدی سازهٔ فولادی در آب دریا [۱۳]

با اعمال پتانسیل بین سازه و آند، بسته به میزان مقاومت مدار، جریان الکتریکی از آند از طریق الکترولیت به سازه یا کاتد سرازیر می‌شود. این جریان در سیستم اعمال جریان از طریق مبدل یکسوکننده از طریق کابل مثبت به آندهای غیرمصرفی رسیده و بستر آندی به سمت سازه جریان پیدا می‌کند. در سیستم اعمال جریان، به‌دلیل مقاومت خورندگی بالای آندها خصوصاً وقتی آندها از جنس MMO یا تیتانیم پلاتینایزشده و یا گرافیتی باشند، به‌ندرت واکنش آزاد شدن یون اتفاق می‌افتد. عمدهٔ واکنش روی این آندها در محیط آبی یا مرطوب

حاوی یون کلرید، آزاد شدن گاز کلر و یا اکسیژن است. گاز کلر می‌تواند به بعضی از پوشش پلیمری کابل‌های متصل به آندها صدمه بزند و باعث مشکلاتی برای سیستم حفاظت کاتدی شود. به‌همین دلیل است که بر روی بستر آندی و یا چاه عمیق از ونت جهت خروج گاز کلر استفاده می‌کنند. واکنش‌های آزاد شدن گاز کلر و اکسیژن به‌صورت زیر است:

$$2Cl^- \rightarrow Cl_2 + 2e^-$$

$$2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$$

$$2OH^- \rightarrow 1/2O_2 + H_2O + 2e^-$$

با توجه به استفاده از کک در بستر آندی، درصورت خیس بودن، امکان تشکیل گاز دی‌اکسیدکربن و اسیدی شدن بستر مطابق واکنش‌های زیر وجود دارد:

$$C + H_2O \rightarrow CO + 2H^+ + 2e^-$$

$$C + H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^-$$

در سیستم آند فداشونده با انجام واکنش خوردگی آندها بار الکتریکی (جریان اعمالی) تأمین می‌شود. این جریان ایجادشده توسط فرایند خوردگی آندها، به ابعاد محدودی از سازه می‌تواند باعث کاهش پتانسیل سازه از E_{corr} به E_{cp} و به‌عبارتی حفاظت کاتدی سازه شود. بر روی سطح آندهای فداشونده بسته به جنس آنها واکنش‌های زیر اتفاق می‌افتد:

$$Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$$

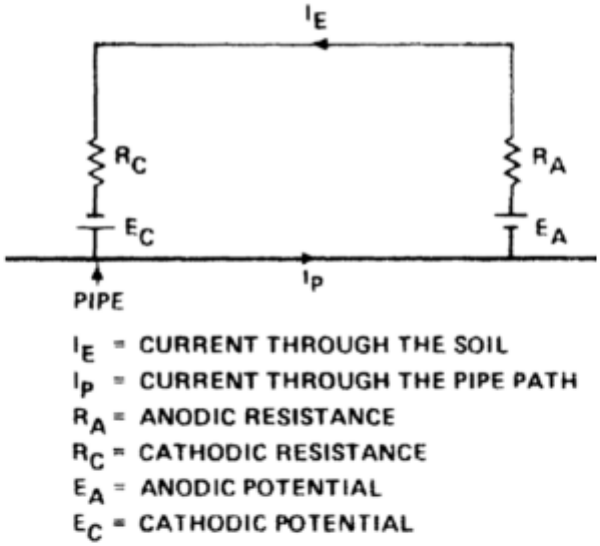
$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$$

$$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$$

۲.۶. مدار الکتریکی حفاظت کاتدی

در حفاظت کاتدی، جریان مستقیم (DC) از سوی آند فداشونده یا آند اعمال جریان به داخل الکترولیت ارسال شده و از طریق الکترولیت به سطح سازه می‌رسد. وقتی سازه جریان DC را دریافت می‌کند، پتانسیل آن به‌حدی کاهش پیدا می‌کند که واکنش‌های آندی در روی سطح سازه مختل شده و اغلب واکنش کاتدی رخ می‌دهد. در این حالت، سازه تحت حفاظت قرار گرفته می‌شود. میزان اختلاف پتانسیل لازم بین بستر آندی و سازه و جریان مستقیم، بستگی به جنس سازه، میزان پلاریزاسیون سازه، مقاومت الکترولیت، پوشش، مقاومت فلزی سازه و مقاومت کابل‌ها دارد. در مراجع [۱۹-۱۴] مختلف مدار الکتریکی متفاوتی ارائه شده است. اگر

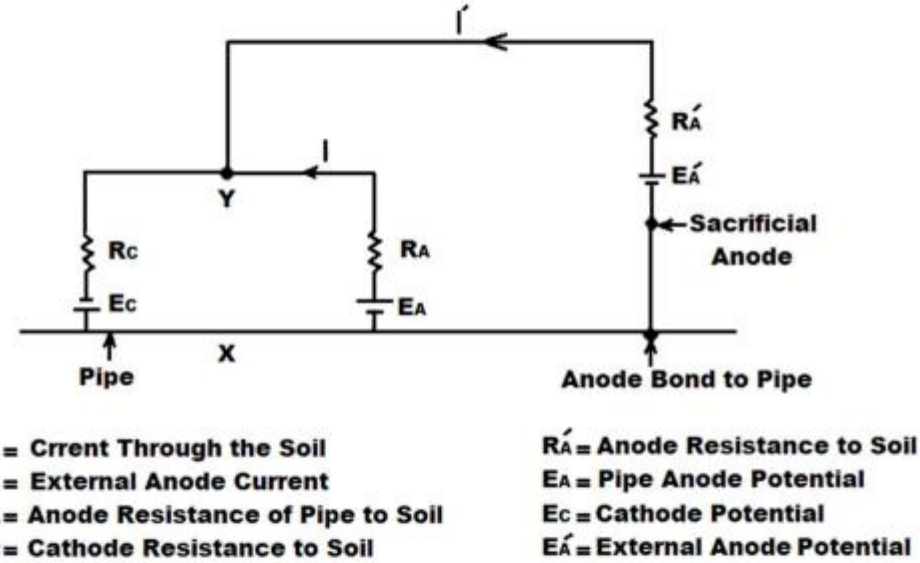
مدارهای الکتریکی به‌خوبی درک شوند، خواننده به‌راحتی اغلب مدارهای الکتریکی مربوط به خوردگی و حفاظت کاتدی ارائه‌شده را می‌تواند تحلیل نماید. مؤلف از ابتدا سعی کرده است که به‌صورت مفهومی مدار الکتریکی خوردگی را مورد تجزیه‌وتحلیلی قرار داده و به مرور با وارد کردن اجزای الکتریکی سیستم حفاظت کاتدی، آنها را توضیح بدهد. در این بخش ابتدا سعی شده که مدار حفاظت کاتدی براساس مدار خوردگی تحلیل شود. در مدار خوردگی (شکل ۱۰.۶) وجود دو پیل یا اختلاف پتانسیل ناحیهٔ آندی (E_A) و پتانسیل ناحیهٔ کاتدی (E_C) باعث ایجاد جریان عبوریافته از الکترولیت I_E می‌شود. در مدار شکل ۱۰.۶ نواحی آندی و کاتدی، هرکدام دارای مقاومت جداگانه R_A و R_A هستند. اگر مقاومت الکترولیت صفر در نظر گرفته شود، جریان مدار خوردگی در شکل ۱۰.۶ برابر $I = E_C - E_A / R_A + R_C$ خواهد بود. در فصل اول دربارهٔ روش اندازه‌گیری پتانسیل E_C و E_A توضیح داده شد. مقاومت‌های R_A و R_C چگونه اندازه‌گیری می‌شوند؟ فکر کنید!



شکل ۱۰.۶. تصویر مدار الکتریکی خوردگی [۱۴]

اگر آندهای فداشونده به سازهٔ تحت خوردگی وصل شود، بخش الکتریکی دیگری شامل یک منبع جریان و یک مقاومت کلی به مدار خوردگی اضافه می‌شود (شکل ۱۱.۶). تحلیل مدار مذکور در شکل ۱۱.۶ به این صورت است که اگر جریان خروجی از بستر آند فداشونده برابر I' باشد، جریان واردشده به نقاط آندی برابر $I' - I$ و جریان ورودی به ناحیهٔ کاتدی سازه برابر $I' + I$ خواهد شد. به‌عبارتی جریان خروجی از ناحیهٔ آندی سازه به سمت ناحیهٔ کاتدی کمتر خواهد شد. باید میزان I' به‌اندازه‌ای باشد که هیچ‌گونه جریانی از ناحیهٔ آندی سازه به سمت ناحیهٔ کاتدی سازه

نرود. اگر مقدار جریان خروجی از ناحیهٔ آندی سازه (I′ - I) صفر شود، تازه خورندگی آند فداشونده به میزان خورندگی سازه رسیده است. در این حالت، پتانسیل در مسیر مقاومت R_A صفر و پتانسیل بین نقطهٔ X و Y یکسان و برابر $E_A = E_C + R_C (I' + I)$ خواهد شد. بنابراین شرط حفاظت این است که حداقل جریان کافی به سازهٔ تحت خوردگی وارد شود تا بتواند پتانسیل در سراسر سازه را به پتانسیل مدار باز (جریان صفر) شیفت دهد. به‌عبارت ساده‌تر حداقل جریان ورودی به سازه برابر جریان خوردگی سازه در پتانسیل مدار باز خواهد بود. باید به‌خاطر داشت که در این حالت هرگونه تغییرات پتانسیل سطح ممکن است سازه را به سمت خوردگی شدیدتر سوق دهد. به‌همین دلیل جریان اعمالی باید به‌حدی برسد که پتانسیل سازه را به معیار پتانسیل تعریف‌شده برساند. معیار پتانسیل حفاظت برای فولاد ۸۵۰mV- است.



شکل ۱۱.۶. مدار الکتریکی سیستم آند فداشونده براساس مدار خوردگی (شکل ۶.۳) [۱۴]

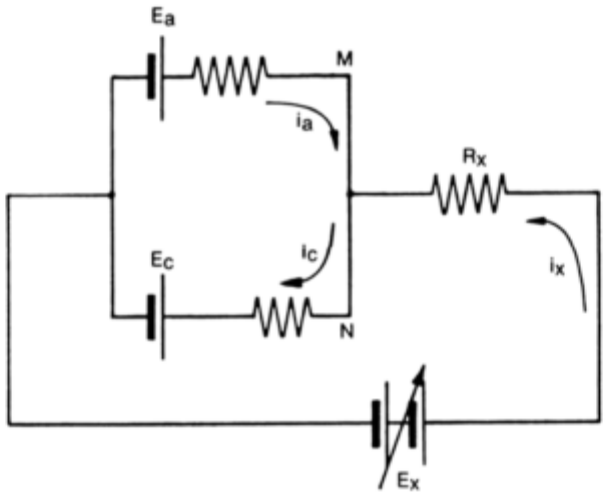
شکل ۱۲.۶ تصویر شماتیک دیگری از مدار حفاظت کاتدی مستقل از نوع سیستم اعمال جریان و آند فداشونده را نشان می‌دهد. در تحلیل این مدار جریان خروجی از ناحیهٔ آندی باید صفر باشد تا حفاظت کامل صورت بگیرد.

در شکل ۱۲.۶ بررسی جریان الکتریکی خارج‌شده از آندهای اعمال جریان یا آندهای فداشونده به سمت سازه مشابه شکل ۱۱.۶ است. مانند تحلیل مدار شکل ۱۱.۶، در شکل ۱۲.۶ با ارسال جریان مستقیم از بستر آندی و یا به‌عبارتی از مبدل یکسوکننده و یا آند فداشونده، جریان مستقیم i_x وارد الکترولیت و از آنجا به سطح سازه می‌رسد و پتانسیل سطح سازه را منفی‌تر می‌کند. در این حالت، جریان الکتریکی ورودی به سازه، مطابق قانون کیرشهوف برابر

$i_C = i_a + i_x$ خواهد بود. یعنی علاوه‌بر جریان i_x خارجی مقدار جریان آندی ناشی از واکنش‌های آندی نیز به نقاط کاتدی می‌رسد. پتانسیل نقطهٔ آندی با و بدون اعمال جریان مستقیم از روابط زیر به دست می‌آید.

$$E_a = i_a R_a + E_c + R_c i_c$$

$$E_a = i_a R_a + E_c + R_c (i_x + i_a)$$

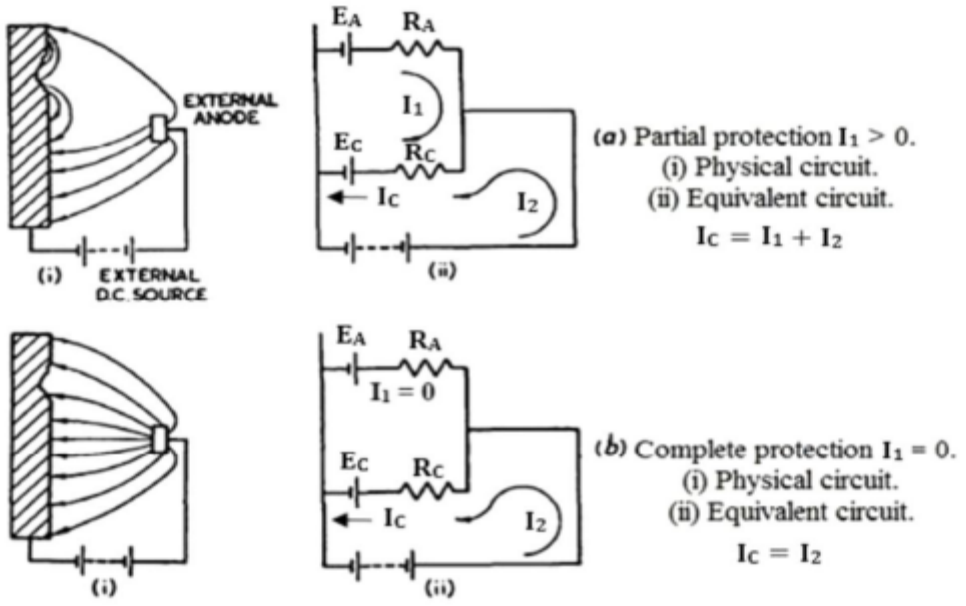


شکل ۱۲.۶. تصویر مدار الکتریکی مربوط به سازهٔ تحت حفاظت کاتدی مستقل از نوع سیستم حفاظت [۱۵]

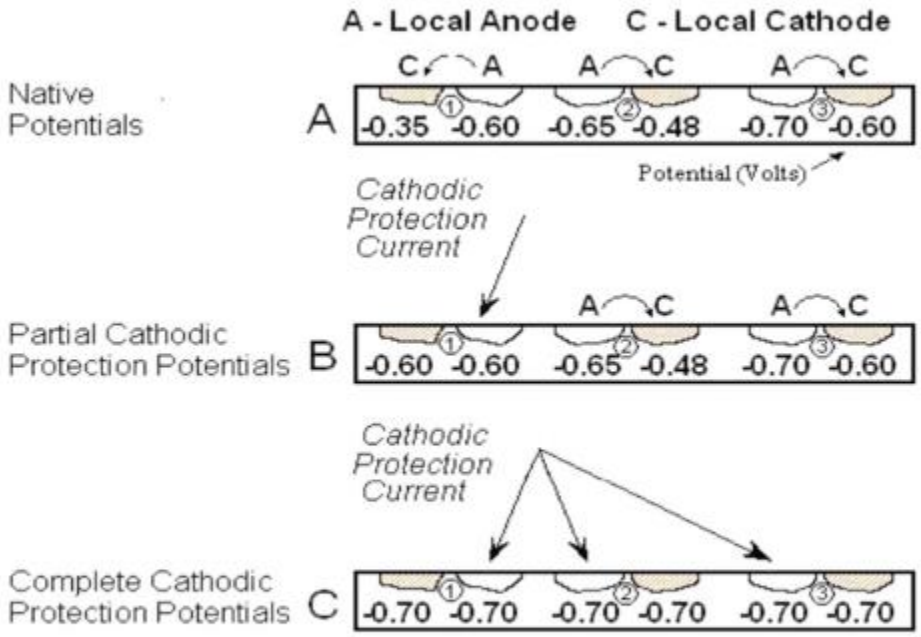
در حالت حفاظت ($i_a = 0$) معادلهٔ فوق می‌توان نوشت: $E_a = E_c + R_c i_x$ حفاظت کاتدی کامل سطح وقتی انجام می‌شود که جریان i_x بر جریان آندی i_a غلبه پیدا کرده و به‌عبارتی جریان خروجی از نقاط آندی سازه را به صفر برساند ($i_a = 0$). در این حالت، پتانسیل نقاط آندی وکاتدی با هم برابر می‌شوند. سؤال این است که جریان i_x باید به چه میزان باشد که جریان i_a را صفر کند؟

در مدار سادهٔ ارائه‌شدهٔ شکل ۱۲.۶ چنانچه در شرایطی در بعضی از نقاط سازه، جریان آندی قابل توجه باشد ($i_a > 0$) و یا اینکه جریان کاتدی به‌اندازهٔ کافی به تمام سطح سازه نرسد، امکان خوردگی در نقاط مذکور وجود خواهد داشت (شکل ۱۳.۶). این مشکل ممکن است برای سازه‌های صنعتی تحت حفاظت اتفاق بیفتد (شکل ۱۴.۶). حتی در مواردی کاربر از طرّاح و مجری سیستم حفاظت کاتدی انتقاد می‌کند که چرا با وجود نصب و راه‌اندازی سیستم، بخشی از سازه دچار خوردگی می‌شود؟ طراح و مجری حفاظت کاتدی می‌تواند ضمن ریشه‌یابی مسئله،

نسبت‌به رفع اشکال اقدام کند. این اشکال ممکن است ناشی از قرائت پتانسیل به‌دلیل افت IR، کم بودن جریان خروجی از بستر آندی، اشکال در اتصالات سیم کابل مثبت به مبدل یکسوکننده یا اشکال در اتصال به کلگی و سر آندها، خارج شدن تعدادی از آندها از مدار، وجود جریان‌های سرگردان، تخریب‌های موضعی پوشش و یا افزایش شدت خورندگی محیط در بعضی نقاط خاص سازه باشد. یکی از روش‌های معمول استفاده و نصب چند آند فداشونده در نزدیکی سطوح تحت خوردگی است. به‌هرحال در حفاظت کاتدی کامل سازه، جریان کاتدی باید به میزان یکسان در کل سطح سازه منتشر شده و پتانسیل مورد نیاز و یکنواخت حفاظت را تأمین کند. شکل ۱۳.۶ تصویر شماتیکی سازه تحت حفاظت ناقص و کامل را نشان می‌دهد. یکی از تفاوت‌های تحلیل مدار شکل ۱۲.۶ با شکل ۱۳.۶ در کامل بودن حفاظت کاتدی یعنی رساندن پتانسیل سازه به‌حد معیار پتانسیل حفاظت سازه است. در شکل ۱۲.۶ تأکید بر صفر شدن جریان خروجی از نقاط آندی است. در این حالت باید میزان جریان I_2 باید به‌اندازهٔ کافی باشد. حداقل این جریان در این تحلیل بیان نشده است. این در حالی است که در شکل ۷.۶ حداقل جریان حفاظت را برابر جریان خوردگی ذکر کرده بود. خاطرنشان می‌سازد که حذف کامل خوردگی در سیستم حفاظت کاتدی به‌لحاظ عملی مشکل و تاحدودی غیرممکن است. به‌لحاظ ترمودینامیکی پتانسیل واقعی حفاظت در محدودهٔ پتانسیل مصونیت از خوردگی در دیاگرام پوربه است. با توجه به روابط ترمودینامیک و سینتیک جریان و پتانسیل برای حفاظت کامل سازه از خورندگی را می‌توان به دست آورد.

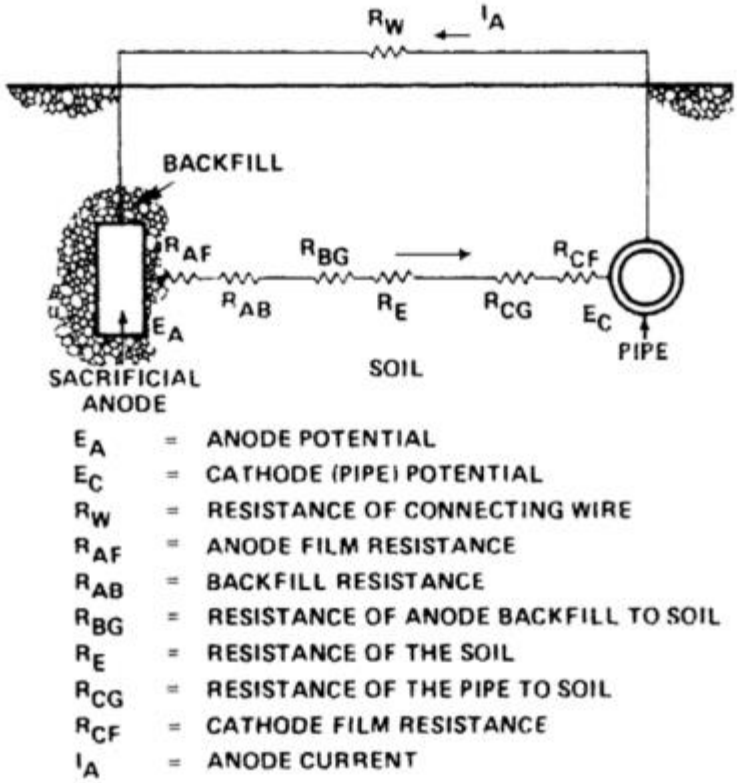


شکل ۱۳.۶. تصویر مدار الکتریکی حفاظت ناقص و کامل کاتدی [۱۶]

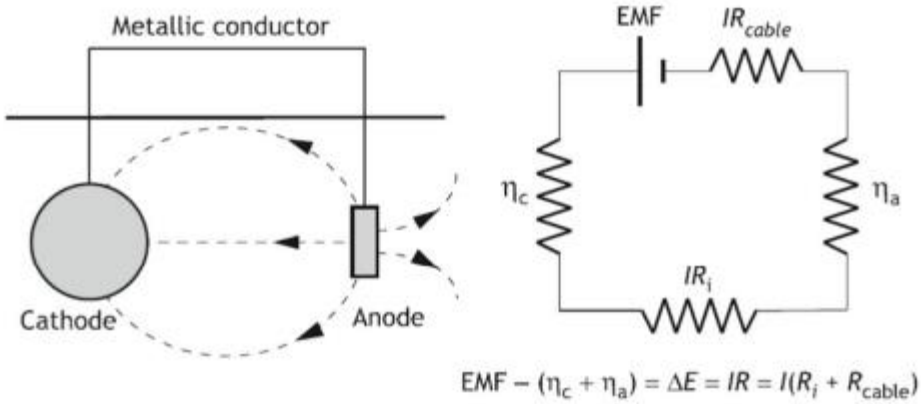


شکل ۱۴.۶. تصویر نواحی حفاظت ناقص و کامل کاتدی برحسب پتانسیل الکترود مرجع هیدروژن [۱۷]

تحلیل مدار الکتریکی پس از حفاظت برای طراحان جذاب‌تر است. شکل ۱۱.۶ مدار الکتریکی مربوط به سیستم آند فداشونده بعد از نصب آند به سازه و رسیدن پتانسیل سازه به‌حد پتانسیل معیار حفاظت را نشان می‌دهد. پتانسیل سطح سازهٔ تحت حفاظت E_C (-۸۵۰mV) و پتانسیل آند فداشونده E_A نشان داده شده است. بسته به جنس آند پتانسیل آند نیز متفاوت خواهد بود. به‌طور مثال برای آند منیزیم خالص پتانسیل آند را می‌توان -۱۷۰۰mV در نظر گرفت. در این حالت، نیروی محرکهٔ این مدار برابر ۸۵۰mV خواهد شد. ممکن است با احتساب پلاریزه شدن آند، این نیروی محرکه به ۸۰۰mV تقلیل پیدا کند. با مطالعهٔ مراجعی که در زیرنویس تصاویر آورده شده، روش محاسبه و اندازه‌گیری هریک از مقاومت‌ها، معادلات مربوط به محاسبهٔ مقاومت معادل و اختلاف پتانسیل بین سازه و آند، جریان لازم جهت حفاظت را می‌توان به دست آورد. در بعضی از مراجع برای ساده‌سازی ممکن است بعضی مقاومت‌ها مثل مقاومت کابل به شرط کوتاه بودن طول کابل، در نظر گرفته نشود. در مواردی که آند توسط پیچ‌ومهره و یا جوش به سازه متصل می‌شود، درواقع کابلی وجود ندارد که بخواهد مقاومت آن در فرمول مقاومت معادل بیاید. شکل ۱۵.۶ و شکل ۱۶.۶ مدارهای معادل دیگری را برای سیستم حفاظت کاتدی نشان می‌دهد.



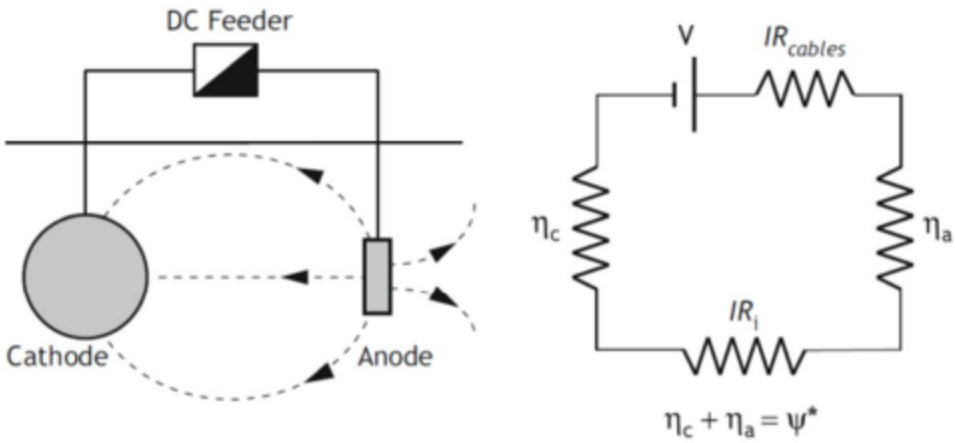
شکل ۱۵.۶. تصویر شماتیک مدار الکتریکی سیستم آند فداشونده براساس سازهٔ حفاظت‌شده [۱۴]



شکل ۱۶.۶. تصویر مدار الکتریکی معادل برای سیستم آند فداشونده [۹]

مطابق شکل ۱۶.۶ با داشتن اختلاف پتانسیل بین سازهٔ تحت حفاظت و آند فداشونده (ΔE) و همچنین مقاومت کابل (R_{cable}) و مقاومت الکترولیت (R_i)، میزان جریان مدار را می‌توان محاسبه نمود. باید دقت کرد که در این تحلیل، مقاومت کابل شامل تمامی مقاومت‌های فلزی مدار ازجمله مقاومت سیم کابل است. منظور از مقاومت الکترولیت، مقاومت آند به الکترولیت است که به میزان مقاومت الکترولیت و ابعاد و اندازهٔ آندها بستگی دارد. بنابراین خواننده باید به

این نکات توجه ویژه‌ای داشته باشد تا در طراحی خود دچار اشتباه نشود. در غیر این صورت اگر مقاومت الکترولیت صفر و مقاومت سیم کابل صفر شوند، رابطهٔ $\Delta E = I\,(R_i + R_{cable})$ بی‌معنا خواهد بود. مقدار ΔE با احتساب پتانسیل حفاظت سازه به میزان ۸۵۰mV-، با توجه به جنس آند فداشونده به‌ترتیب برای منیزیم برابر ۸۰۰mV برای آلومینیم برابر ۳۰۰mV و برای فلز روی برابر ۲۵۰mV برآورد می‌شود. اگر فاصلهٔ آند تا سازه کوتاه باشد، مقاومت کابل به‌دلیل کوتاه بودن طول آند، ناچیز خواهد بود. مقاومت الکترولیت هم نسبت‌به مقاومت آند به الکترولیت ناچیز است. همان‌طور که گفته شد، مقاومت آند به الکترولیت، به ابعاد آند و مقاومت مخصوص الکترولیت بستگی دارد که در فصل محاسبات حفاظت کاتدی به آن پرداخته خواهد شد. در شکل ۱۷.۶ مدار حفاظت کاتدی در سیستم اعمال جریان را نشان می‌دهد. ولتاژ یا ظرفیت مبدل یکسوکننده (V_m) با داشتن جریان و مقاومت کل مدار (R_{total}) با در نظر گرفتن ولتاژ برگشتی (ψ^*) که در حدود ۲ ولت برآورد می‌شود، قابل محاسبه است. رابطهٔ مورد نظر به‌صورت $V_m = I\,R_{total} + \psi^*$ نوشته می‌شود. مقاومت کل شامل مقاومت آند به الکترولیت، مقاومت کابل‌ها، مقاومت پوشش و... است. در طراحی حفاظت کاتدی، مقاومت کل مدار نباید بیش از ۲ اهم شود. اگر مقاومت مدار بیش از ۲ اهم شد، تعداد آندها بیشتر در نظر گرفته می‌شود تا مقاومت کل مدار کمتر شود.



شکل ۱۷.۶. تصویر مدار الکتریکی معادل برای سیستم اعمال جریان [۹]

بررسی نقش پلاریزاسیون در مدار و معادلات الکتریکی می‌تواند برای مهندسان و طراحان حفاظت کاتدی جالب باشد. بیان کلی مسئله این است که برای محاسبهٔ جریان حفاظت باید شرایط قبل از پلاریزاسیون کاتدی در نظر گرفته شود. این موضوع از دو جهت قابل تأمل است.

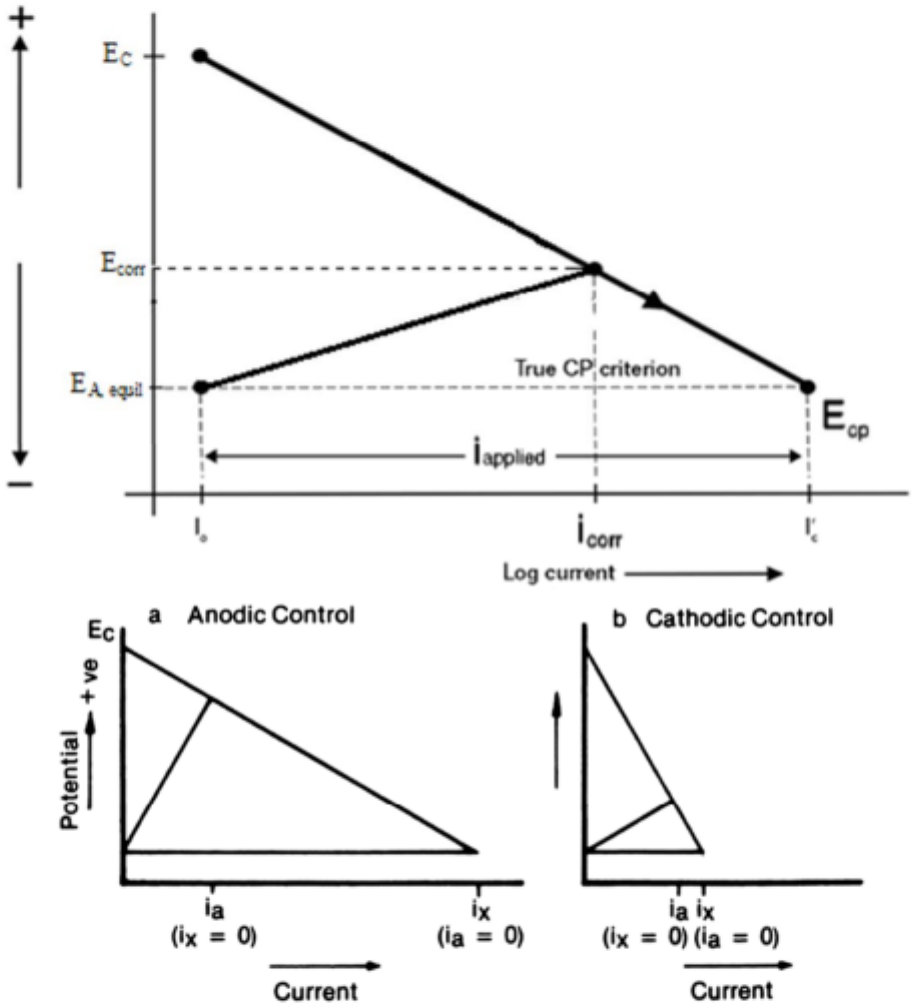
یکی اینکه با اعمال پتانسیل حفاظت، به مرور زمان با تشکیل لایه‌های محافظ کاتدی و عوامل دیگر، جریان مورد نیاز حفاظت کاهش و به حالت پایداری می‌رسد. اغلب جدول‌هایی که داده‌های دانسیتهٔ جریان برای طراحی را ارائه داده‌اند، مربوط به دانسیتهٔ جریان پس از پلاریزاسیون است. دوم اینکه در نظر نگرفتن جریان قبل از پلاریزاسیون، می‌تواند باعث کم در نظر گرفتن ظرفیت ولتاژ و جریان مبدل یکسوشونده شود. اما موضوع مدار الکتریکی حفاظت کاتدی از جهت دیگری هم می‌تواند مورد تحلیل قرار بگیرد. اگر سازه در محیط خورنده قرار بگیرد، قبل از اعمال جریان می‌تواند به‌صورت کاتدی و یا آندی پلاریزه شود. اگر پتانسیل سازه از پتانسیل اولیهٔ یا همان پتانسیل مدار باز کمتر شود، سازه به‌طور کاتدی پلاریزه شده است و جریان حفاظت کمتری، نسبت‌به حالت مدار باز لازم خواهد بود. بالعکس اگر پتانسیل سازه مثبت شود، پلاریزاسیون از نوع آندی می‌شود و جریان بیشتری برای حفاظت نیاز دارد. به‌هرحال قبل از اعمال حفاظت کاتدی بر روی سازه، معمولاً نواحی آندی و کاتدی سازه در اثر گذشت زمان پلاریزه می‌شوند. چنانچه میزان تغییر پتانسیل یا پلاریزه شدن در نقاط آندی و کاتدی به‌ترتیب برابر Φ_a (i_a/A_a) و Φ_c (i_c/A_c) باشد، که در این روابط A_c و A_a اندازهٔ سطح آندی و کاتدی و Φ_a و Φ_c تابع پلاریزه شدن سطح آند و کاتد هستند، در این حالت، با اعمال سیستم حفاظت و ارسال جریان I_x، رابطهٔ $E_a = E_c + R_c I_x$ به‌صورت زیر درمی‌آید: $(i_a = 0)$

$$E_A - E_C = (R_C - \frac{\varphi_c}{A_C}) I_X$$

$$E_A - E_C = R_C \cdot I_X - \varphi_c \cdot \frac{I_X}{A_C}$$

با اعمال حفاظت کاتدی پلاریزاسیون آندی وجود ندارد و فقط پلاریزاسیون کاتدی مطرح می‌شود. با توجه به اینکه Φ_c همواره منفی است، بنابراین پلاریزه شدن کاتدی سطح سازه (قبل از اعمال حفاظت)، باعث کاهش جریان مورد نظر حفاظت (i_x) خواهد شد. ممکن است در اثر پلاریزاسیون کاتدی سطح، محصولات خوردگی و یا لایه‌های کلکریوس بر روی سطح تشکیل شوند. لایه‌های محافظ مذکور باعث کاهش جریان لازم برای حفاظت می‌شوند. البته بعد از اعمال حفاظت، جریان حفاظت نیز باعث پایداری این رسوبات نیز می‌شود. مفاهیم مذکور بر روی منحنی‌های پلاریزاسیون نیز قابل بررسی است. خلاصه اینکه پلاریزه شدن سطوح آندی و کاتدی هم در حالت بدون جریان خارجی و هم در اثر اعمال جریان خارجی اتفاق می‌افتد.

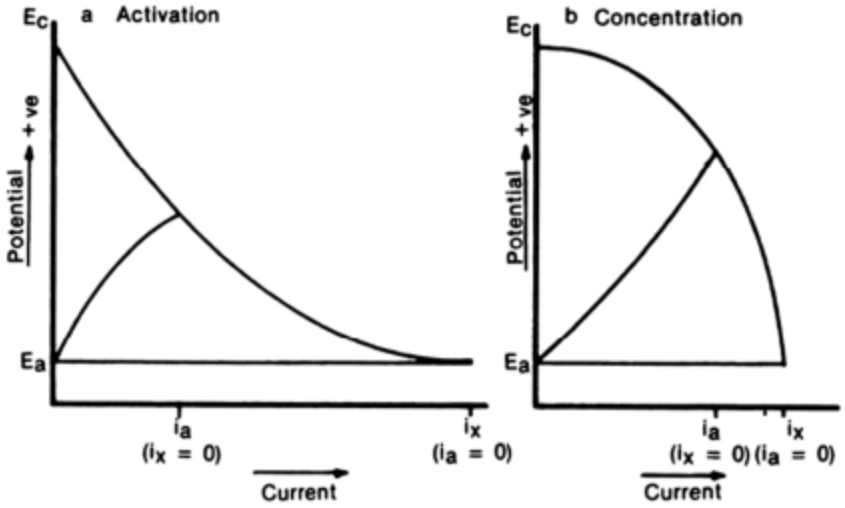
پلاریزه شدن سطوح بدون اعمال خارجی موقعی اتفاق می‌افتد که سازهٔ قرارداده‌شده در محیط با گذشت یک تا چند روز، در اثر واکنش‌های شیمیایی سازه با محیط، پتانسیل نواحی مختلف سازه نسبت‌به ساعت اول قرارگیری در محیط، تغییر کند. شکل ۱۸.۶ تصویر پلاریزه شدن سطوح آندی و کاتدی در شرایط بدون اعمال جریان خارجی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۸.۶. تصویر بدون پلاریزه شدن (تصویر بالایی)، پلاریزه شدن سطوح آندی و کاتدی در شرایط بدون اعمال جریان خارجی [۱۸ و ۱۵]

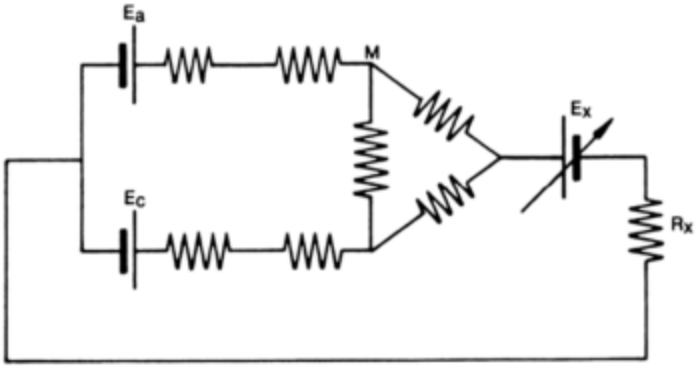
این شکل نشان می‌دهد که پلاریزه شدن کاتدی سطح، باعث کاهش جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی در اثر اعمال جریان خارجی خواهد شد. به‌عبارتی پلاریزه شدن کاتدی سطح باعث جبران بخشی از جریان حفاظت می‌شود. محل تقاطع خط آندی و کاتدی نشان‌گر پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و جریان خوردگی (i_a) خواهد بود. معنی پلاریزه شدن آندی این است که

پتانسیل نسبت‌به پتانسیل حالت اولیهٔ افزایش پیدا کرده است و بالعکس در حالت پلاریزه شدن کاتدی، پتانسیل سطح نسبت‌به حالت قبل از پلاریزه شدن کاهش پیدا می‌کند. در هر دو حالت سرعت خوردگی کم شده است. خط افقی در شکل ۱۸.۶ درواقع پتانسیل حفاظت کاتدی است که در هر حالت از E_{corr} کمتر است. با کمی دقت می‌توان فهمید که پتانسیل حفاظت کامل کاتدی، همان پتانسیل تعادلی است که قبلاً در شکل ۳.۶ توضیح داده شده بود. وقتی سطح کاتدی با مکانیسم غلظتی پلاریزه می‌شود، نسبت‌به پلاریزاسیون اکتیواسیون، نیاز به جریان حفاظتی کمتری دارد (شکل ۱۹.۶).



شکل ۱۹.۶. تأثیر پلاریزه شدن کاتدی با مکانیسم اکتیواسیون و غلظتی [۱۵]

با در نظر گرفتن مقاومت‌های پلاریزاسیون و مقاومت ستاره‌ای مبدل یکسوکننده (اتصال به زمین)، مدار الکتریکی شکل ۱۲.۶ به‌صورت شکل ۲۰.۶ کامل می‌شود.



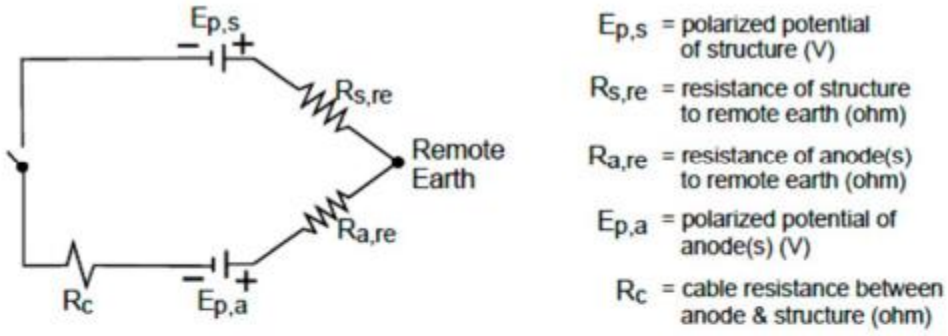
شکل ۲۰.۶. مدار الکتریکی معادل سیستم حفاظت کاتدی واقعی با در نظر گرفتن پلاریزاسیون [۱۵]

شکل ۲۰.۶ مدار معادل و به‌صورت کلی ارائه شده است. مقاومت‌های مورد نظر در طراحی حفاظت کاتدی به‌صورت تفکیک‌شده در نظر گرفته نشده است. این مقاومت‌ها عبارت‌اند از:

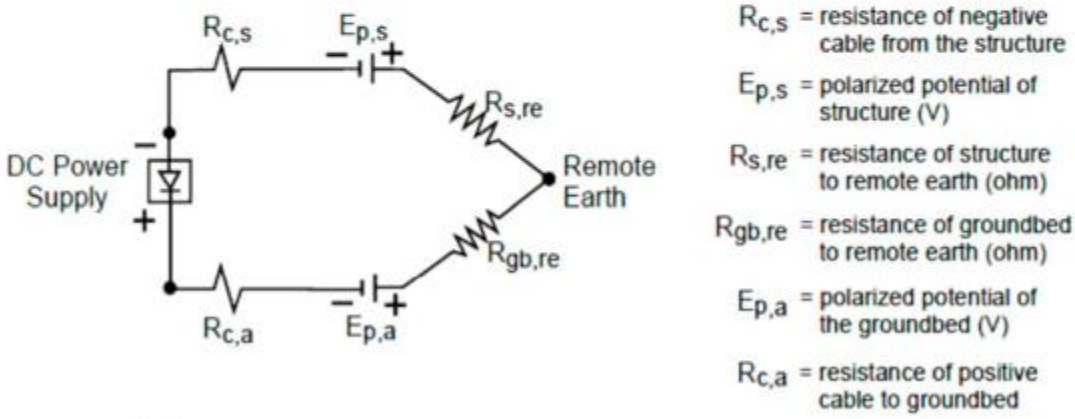
- مقاومت آند به الکترولیت در بستر آندی (R_{A-E})،
- مقاومت پوشش (R_{Coat})،
- مقاومت کاتد به الکترولیت (R_{C-E})،
- مقاومت کابل‌ها و اتصالات (R_{Cable})،
- مقاومت الکتریکی فلز (R_m).

نظر مؤلف این است که طراح حفاظت کاتدی باید تعداد آند، تعداد ایستگاه‌ها و... را به‌نحوی در نظر بگیرد که مقاومت کل مدار از ۲ اهم کمتر شود.

شکل‌های ۲۱.۶ و ۲۲.۶ مدار الکتریکی حفاظت کاتدی با در نظر گرفتن پلاریزاسیون سازه و آندها را نشان می‌دهد. دربارهٔ اجزای الکتریکی این مدارها چه فکر می‌کنید؟ آیا علامت منبع جریان در سازه و بستر آندی درست ترسیم شده است؟



شکل ۲۱.۶. طرح‌وارهٔ مدار حفاظت کاتدی به روش آند فداشونده [۱۹]



شکل ۲۲.۶. طرح‌وارهٔ مدار الکتریکی حفاظت کاتدی به روش اعمال جریان [۱۹]

۳.۶. معیارهای حفاظت کاتدی

نکتهٔ اصلی در طراحی سیستم حفاظت کاتدی این است که معیار حفاظت چیست؟ میزان جریان لازم جهت حفاظت سازه و رسیدن به پتانسیل حفاظت چه مقدار است؟ از کجا دانسته شود که سازهٔ تحت اعمال جریان و پلاریزه شدن کاتدی، دچار خوردگی نمی‌شود؟ بنا به تجربه، دو معیار اصلی پتانسیل و جریان توسط مؤسسات معتبر برای اطمینان از عملکرد سیستم حفاظت کاتدی بیان شده است. اما سؤال جدّی‌تر این است که خود معیار پتانسیل و جریان ارائه‌شده توسط مؤسسات معتبری مثل NACE، چگونه به‌دست آمده و رواج پیدا کرده‌اند؟ با توجه به تجربه و نظر مؤلف، با تأمل در مبانی و اصول علم خوردگی و حفاظت کاتدی معیار حفاظت را می‌توان از روش‌های زیر مورد بررسی قرار داد.

- معیار الکتروشیمی یا پتانسیل استخراج‌شده از دیاگرام پوربه.
- معیار پتانسیل پلاریزه شدن سطح به میزان ۱۰۰mV بیشتر نسبت‌به حالت قبل از پلاریزاسیون با روشن و خاموش کردن سیستم تحت حفاظت (روش قطع آنی پتانسیل).
- استفاده از شکست منحنی پلاریزاسیون E-logi برای به دست آوردن معیار پتانسیل و جریان.
- استفاده از شیفت پتانسیل ۳۰۰mV- کمتر از پتانسیل خوردگی از منحنی پلاریزاسیون.
- استفاده از جریان کافی عبوری از الکترولیت به سمت سازه.
- استفاده از مانیتورینگ خوردگی سازهٔ تحت حفاظت به روش تجربی مثل اندازه‌گیری سرعت خوردگی به روش کاهش وزن و یا روش‌های الکتروشیمیایی.

جدول ۶.۶ پنج مورد معیارهای حفاظت کاتدی، به محدودیت‌های این روش‌ها نیز اشاره می‌کند.

۱.۳.۶. معیار الکتروشیمیایی

تجربیات مؤلف نشان می‌دهد که برای شرایط آب در pHهای اسیدی، خنثی و تاحدودی قلیایی با در نظر گرفتن معیار حداقل یون آزادشده در محیط، پتانسیل مناسب حفاظت را می‌توان محاسبه کرد. به‌طور مثال با معیار و لحاظ ۲۰ ppb یون آهن (یعنی ۲۰ گرم یون آهن در یک‌میلیارد گرم آب معادل $۰/۳۵۷ \times ۱۰^{-۶}$ مول) از رابطهٔ خط ۲۳ در دیاگرام پوربه (شکل ۲۳.۶) می‌توان یک معیار پتانسیل ایمن (نسبت‌به الکترود مرجع هیدروژن) به دست آورد. پتانسیل حفاظت تابع pH، میزان یون آهن موجود در الکترولیت یا به‌عبارتی پتانسیل خوردگی و در نهایت وابسته به خط پتانسیل آزاد شدن هیدروژن است. رابطهٔ پتانسیل حفاظت کاتدی فولاد نسبت‌به الکترود مرجع مس/سولفات

مس (CSE) با رابطهٔ ریاضی زیر قابل دسترسی است [۱۸]:

$$Ep = -316\ mV\ vs.\ CSE + (-59\ mV \times pH)$$

به‌طور مثال پتانسیل حفاظت در pH=۹ برابر ۸۴۷mV- می‌شود. البته باید توجه کرد که این پتانسیل از پتانسیل آزاد شدن هیدروژن خیلی کمتر نباشد. پتانسیل حفاظت ماکسیمم تا ۸۰mV می‌تواند از خط آزاد شدن گاز هیدروژن پایین‌تر باشد. بیشتر از آن امکان تخریب پوشش و یا تخریب هیدروژنی سازهٔ فولادی وجود خواهد داشت [۲۱]. باید توجه نمود که واکنش آزاد شدن هیدروژن در محیط اسیدی و بازی با هم تفاوت دارد.

جدول ۶.۶. معیارهای حفاظت کاتدی و محدودیت‌های مربوط به افت IR [۲۰]

Criterion	Measurement Condition	Comments
1. Potential less than −0.85 V vs. Cu-saturated CuO_4 for steel	Current on (IR_Ω present)	Meaningful in some environments Uncertain due to IR_Ω
2. Cathodic polarization more than 300 mV active to corrosion potential of structure	Current on (IR_Ω present)	Uncertain due to interferences from IR_Ω
3. Cathodic polarization more than 100 mV active to corrosion potential of structure	Current interrupted (IR_Ω absent)	Interruption techniques difficult to implement
4. Cathodic polarization to a potential where Tafel behavior achieved	Current variable (IR_Ω present)	Difficult to determine in presence of IR_Ω
5. Net protective current flows from electrolyte into the structure surface	Unspecified	Correct in theory Difficult to determine in practice

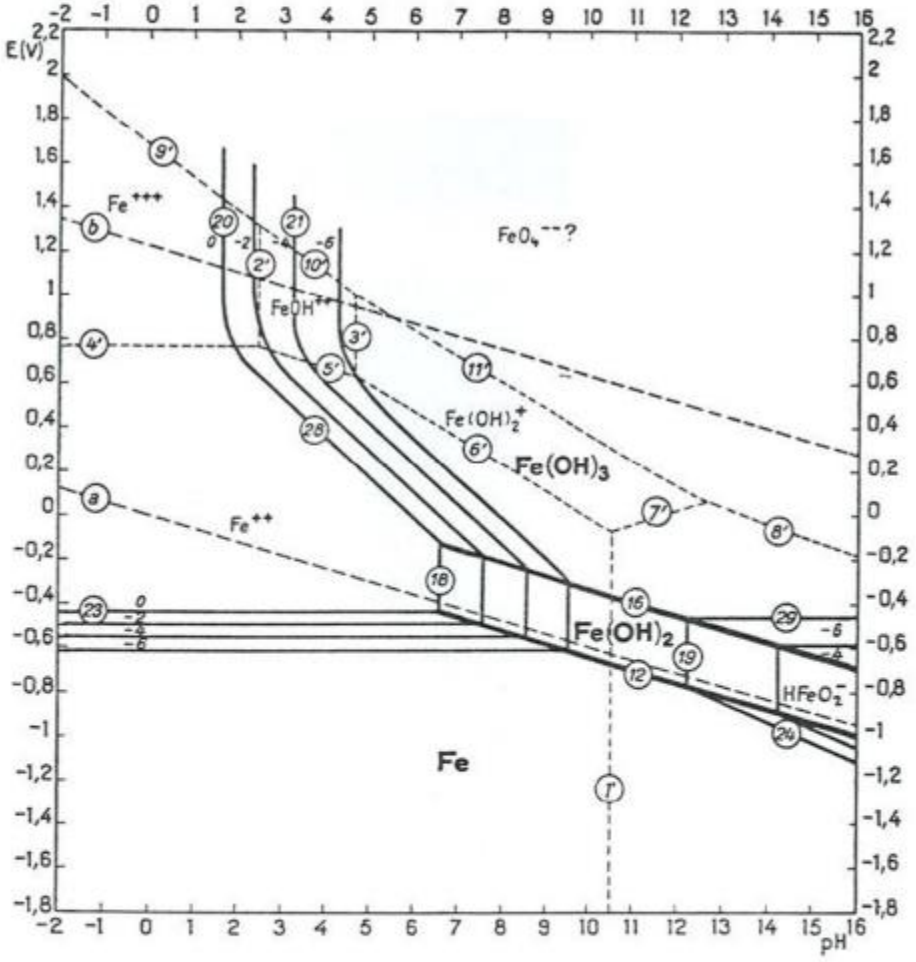
واکنش آزاد شدن هیدروژن در محیط اسیدی به‌صورت $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ و در محیط خنثی و باز به‌صورت $O_2 + 2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2(OH)^-$ است (شکل ۲۳.۶). مطابق معادلهٔ خط ۲۳ $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2\ e^-$ می‌توان نوشت:

$$23)\ Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad E = E^\circ + RT/nF \ln Fe^{2+}$$

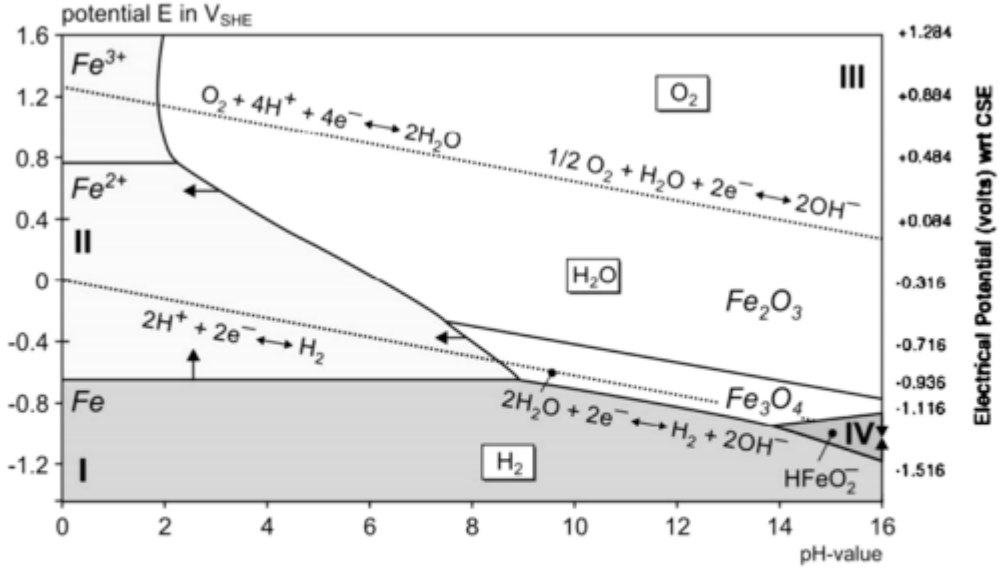
$$E = -0.44 + 0.0295 \log Fe^{2+} = -0.44 + 0.0295 \log 0.357 \times 10^{-6} = -0.630$$

محاسبات ترمودینامیکی نشان می‌دهد که با حداقل خوردگی ۲۰ ppb یون آهن در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد، پتانسیل باید کمتر از ۶۳۰mV- نسبت‌به الکترود هیدروژن باشد. این پتانسیل نسبت‌به الکترود مس/ سولفات مس برابر (mV) ۹۵۰- = ۶۳۰-۳۲۰- می‌شود (شکل ۲۴.۶). اگر این پتانسیل با معیار ۸۵۰mV- استاندارد RP-01-69 مؤسسهٔ NACE مقایسه شود، تا حد

زیادی آن را محافظه‌کارانه می‌توان خواند. با محاسبهٔ دقیق‌تر می‌توان گفت که استاندارد NACE، معیار یون آهن ناشی از خوردگی را حدود 10^{-3} مول یا ۵۶ppm فرض کرده است. اگر فرض شود که میزان پلاریزه شدن کاتدی فلز خالص آهن در محیط آب مطابق منحنی پلاریزاسیون E-logi (شکل ۴.۶) به‌گونه‌ای باشد که حفاظت کاتدی به‌طور کامل اجرا شود، پتانسیل تعادلی E_{equil} را می‌توان به‌عنوان معیار قرار داد. این پتانسیل نسبت‌به الکترود مرجع اشباع مس/سولفات مس ۹۵۰mV- یا نسبت‌به الکترود هیدروژن برابر ۶۳۰mV- خواهد شد. جذّابیت موضوع معیار پتانسیل حفاظت کاتدی برای فولاد را در منحنی پلاریزاسیون E-logi یا همان منحنی ایوانز برای حفاظت کاتدی برای شرایط معمول در شکل ۴.۶ دنبال کنید.



شکل ۲۳.۶. تصویر نمودار پوربه و نواحی ایمن از خوردگی در زیر خط ۲۳ با توجه به میزان یون موجود آهن برحسب مول در الکترولیت پایهٔ ۱۰ به توان ۰، ۲-، ۴- و۶- [۲۲]



شکل ۲۴.۶. تصویر نمودار پوربه و نواحی تحت حفاظت کاتدی نسبت‌به الکترود مرجع مس- سولفات مس و الکترود مرجع هیدروژن و واکنش آزاد شدن هیدروژن در شرایط باز و اسید [۲۱]

با توجه به مباحث ارائه‌شده، پتانسیل حفاظت باید منفی‌تر از پتانسیل خوردگی باشد که در این حالت جریان حفاظت نیز از جریان خوردگی بیشتر و مخالف جهت آن است. باید متذکر شد که پتانسیل حفاظت ممکن است در منطقهٔ مصونیت از خوردگی در دیاگرام پوربه قرار نگیرد. یعنی اینکه در حالت حفاظت کاتدی به میزان مشخصی آزاد شدن یون آهن به الکترولیت وجود دارد. براساس توضیحات و نمونهٔ پتانسیل حفاظتی که مؤلف آن را محاسبه کرد، خواننده در شرایط مختلف وجود کاتیون آهن در الکترولیت، پتانسیل حفاظت را محاسبه کند. این روش محاسبه می‌تواند برای دیگر فلزات نیز به کار گرفته شود. خاطرنشان می‌سازد که معیار حفاظت، مستقل از مقاومت‌ها و نوع پوشش است. ولی بستگی به جنس سازه و نوع محیط الکترولیت دارد. به‌عبارتی ممکن است پتانسیل حفاظت یک فلز در محیط‌های مختلف، متفاوت باشد، زیرا پتانسیل سازه‌های با جنس‌های مختلف در یک محیط با یکدیگر اختلاف دارند. جدول ۷.۶ و جدول ۸.۶ پتانسیل حفاظت برای فولاد و فلزات دیگر را در شرایط مختلف محیطی نشان می‌دهد.

۲.۳.۶. معیار روش قطع آنی

با استفاده از روش قطع آنی پتانسیل هم می‌توان از عملکرد سیستم حفاظت کاتدی اطمینان حاصل نمود. یکی از مشکلات در قرائت پتانسیل سازه، مسئلهٔ افت IR ناشی از وجود فاصلهٔ الکترود مرجع تا سازهٔ مدفون در خاک است. به‌عبارت ساده‌تر پتانسیل اندازه‌گیری‌شده توسط

الکترود مرجع دقیقاً برابر پتانسیل سطح سازه نیست و به‌اندازهٔ افت IR، مقدار بیشتری را نشان می‌دهد. ایده‌آل آن است که الکترود مرجع در نزدیکی و روی سازه قرار داشته باشد، ولی در اغلب موارد امکان‌پذیر نیست. وابسته به مقاومت محیط، مقاومت و کیفیت پوشش و همچنین میزان فاصلهٔ الکترود تا سازه، مقدار پتانسیل افت IR متغیر است. شکل ۲۵.۶ تصویر ماهیت افت IR را نشان می‌دهد. میزان افت پتانسیل IR به روش محاسباتی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$IR = \rho \cdot j \cdot d$

ρ: soil resistivity (Ω m);

j: protection current density (A/m^2);

d: the distance between the pipeline and the reference electrode (m).

جدول ۷.۶. پتانسیل حفاظت برای فولاد در شرایط مختلف محیطی [۲۳]

Metal or alloy	Medium		Protection potential, E_p
Non-alloy and low alloy Fe materials with $Y_S \leq 800\ Nmm^{-2}$	Water and soil aerobic conditions	T < 40 °C	- 0.85[a)]
		T > 60 °C	-0.95[a)b)]
		Aerated sandy soil 100<ρ<1000 Ωm	-0.75
		Aerated sandy soil ρ>1000 Ωm	-0.65
	Water and soil anaerobic conditions		-0.95

NOTE1: All potentials are IR free and refer to a copper/saturated copper sulphate reference electrode, $E_{Cu} = E_H - 0.32$ V.

a) For temperatures between 40 and 60 °C the protection potential may be interpolated.

b) Increasing risk of NaOH induced stress corrosion cracking with increased temperature.

دربارهٔ کیفیت پوشش و میزان ابعاد عیوب آن و همچنین مقاومت خاک در میزان پتانسیل اندازه‌گیری‌شده در فصل چهارم بخش ۳.۴.۴ توضیح داده شده است.

برای حذف افت پتانسیل IR و اطمینان از پتانسیل می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد:

- استفاده از روش برون‌یابی. در فواصل مختلف با یک الکترود مرجع پتانسیل اندازه‌گیری‌شده و منحنی پتانسیل- فاصله رسم می‌شود. با برون‌یابی خط در فاصلهٔ صفر تقریباً افت پتانسیل IR را می‌توان اندازه‌گیری کرد (شکل ۲۵.۶).

جدول ۸.۶. معیارهای پتانسیل‌های حفاظت برای فلزات مختلف در خاک و آب دریا [۲۴]

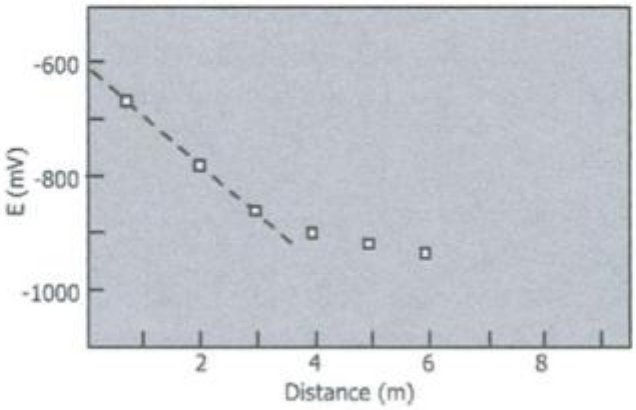
Material	Minimum negative potential volt	Maximum negative potential volt
Iron and steel		
aerobic environment	-0,80	-1,10
anaerobic environment	-0,90	-1,10
High strength steels	-0,80 (see Note 1)	-0,95 (see Note 1)
Aluminium alloys (Al Mg & Al Mg Si)	-0,80 (negative potential swing 0,10 V)	-1,10
Stainless steel		
Austenitic steel		
- (PREN ≥ 40)	-0,30	no limit
- (PREN < 40)	-0,60 (see Note 2)	no limit
Duplex	-0,60 (see Note 2)	(see Note 3)
Copper alloys		
without aluminium	-0,45 to -0,60	no limit
with aluminium	-0,45 to -0,60	-1,10
Nickel base alloys	-0,20	see Note 4

1 For high strength steels susceptible to hydrogen assisted cracking the maximum negative potential should be more positive (less negative) than -0,83 V (Ag/AgCl/sea water reference electrode).

2 For most applications these potentials are adequate for the protection of crevices although higher potentials may be considered.

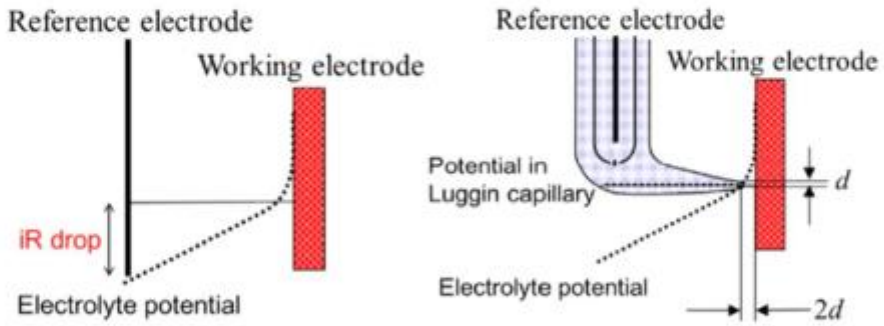
3 Depending on metallurgical structure these alloys can be susceptible to cracking and high negative potentials should be avoided (see 8.3.2.2).

4 High strength nickel copper and nickel chromium iron alloys can be subject to hydrogen assisted cracking and potentials that result in significant hydrogen evolution should be avoided.

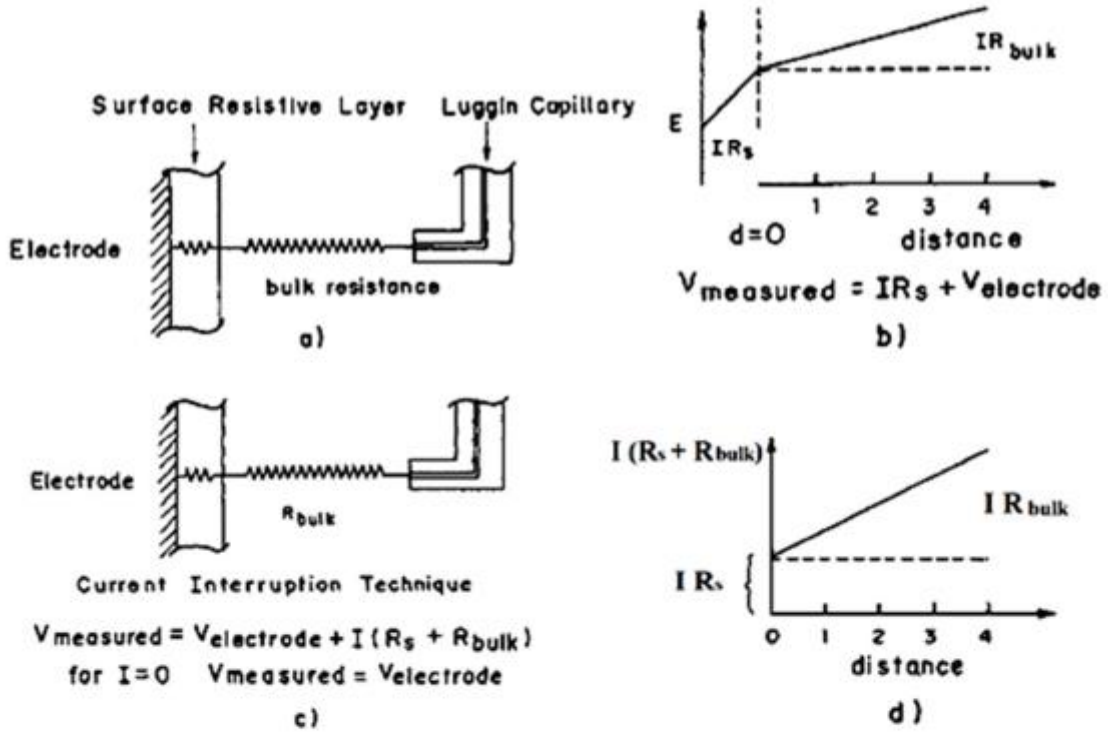


شکل ۲۵.۶. منحنی تغییرات پتانسیل نسبت‌به فاصلهٔ الکترود جهت برون‌یابی افت IR [25]

- استفاده از لولهٔ مویینگی هابر- لاگین که بیشتر برای شرایط آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲۶.۶ و شکل ۲۷.۶).
- روش قطع جریان. این روش کاربرد بیشتری در حفاظت کاتدی دارد.



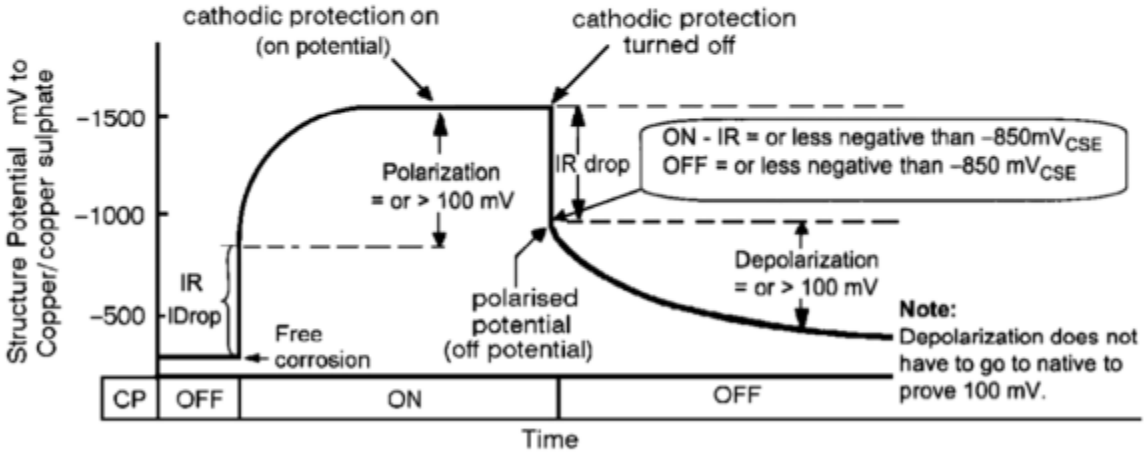
شکل ۲۶.۶. تأثیر قرارگیری لولهٔ مویین در کنار الکترود کار در بررسی‌های پلاریزاسیون [۲۶]



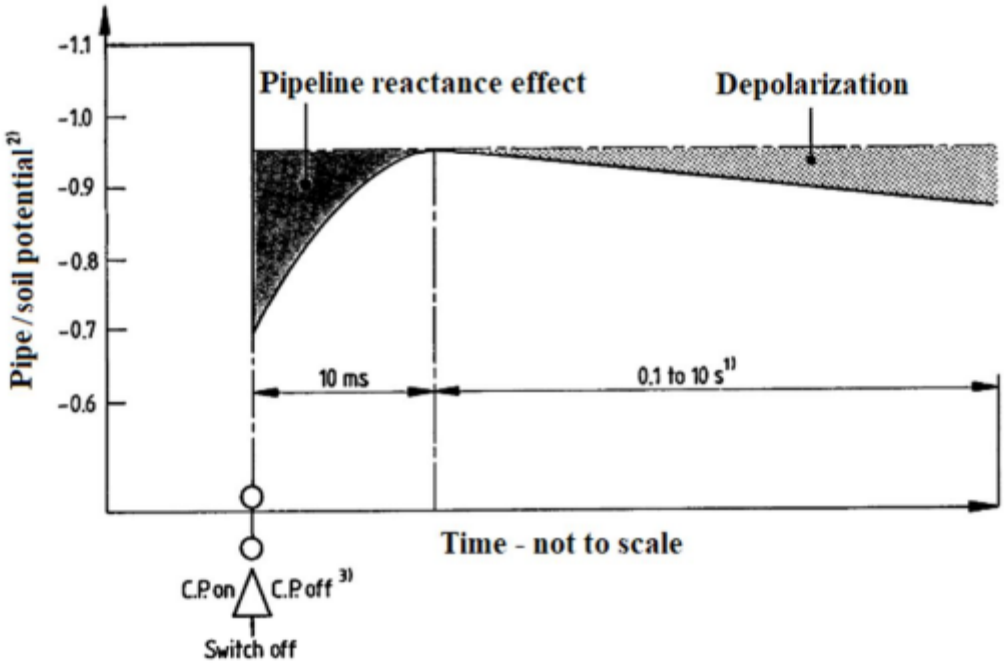
شکل ۲۷.۶. بررسی تأثیر افت IR ناشی از مقاومت سطحی و مقاومت محیط [۲۷]

با توجه به اهمیت پتانسیل حفاظت و اطمینان از کاتدی شدن کامل سطح سازه، محاسبهٔ افت IR ضروری است. جریان حفاظت به سازه، سطح سازه را پلاریزه می‌کند. پس از پلاریزه شدن کامل سطح، چنانچه جریان حفاظت قطع شود، میزان پتانسیل سازه به الکترولیت پس از

قطع شدن (در محدودهٔ زمان ۳ ثانیه پس از قطع شدن) می‌تواند نشان‌دهندهٔ جریان مورد نیاز و هم نشان‌دهندهٔ پتانسیل حفاظت باشد. با روشن و خاموش کردن مدار به‌نسبت ۴ به ۱، میزان دی‌پلاریزه شدن سطح جزئی بوده و خطایی متوجه معیار مذکور نخواهد شد، البته بعد از روشن و خاموش کردن، اختلاف پتانسیل مذکور باید در حدود و یا کمتر ۱۰۰mV باشد. مقدار اختلاف پتانسیل معادل برای فلزاتی مثل آلومینیم، مس، فولاد و سرب نیز هم صادق است. مقدار افت ۱۰۰mV معیاری برای حفاظت کاتدی و اطمینان از پتانسیل اعمال‌شده روی سازه تلقی می‌گردد. این روش ممکن است پتانسیل لوله را از ۸۵۰mV- منفی‌تر نشان بدهد. شکل ۲۸.۶ اندازه‌گیری پتانسیل قطع آنی لولهٔ پلاریزه‌شده را نشان می‌دهد. این مسئله برای زمان روشن شدن هم اتفاق می‌افتد. میزان پتانسیل بعد از پایداری باید ۱۰۰mV از پتانسیل لحظه‌ای روشن شدن بیشتر باشد ($E_{on} - E_{inst\ on} > 100$ mV). شکل‌های ۲۸.۶ و ۲۹.۶ دو نمونه منحنی تغییرات پتانسیل قبل و بعد از روشن شدن آنی را نشان می‌دهد. شکل ۲۸.۶ نمودار از ترکیب دو منحنی از مراجع [۲۸] و [۲۹] به‌دست آمده است. از مزایای این معیار، مستقل بودن از میزان افت IR است. این معیار نباید در مناطقی که در معرض جریان‌های سرگردان قرار دارند، به کار برده شود، زیرا هرگونه جریان خارجی امکان کاهش پلاریزاسیون را در نقاطی که جریان از آن خارج می‌شود دارد. محدودیت دیگر این معیار مربوط به زمان مورد نیاز برای دی‌پلاریزه کردن سازه است. در برخی موارد، ممکن است زمان کافی برای نظارت بر ثبت پلاریزاسیون سازه وجود نداشته باشد. زمان پایداری پتانسیل در عرض ۴۸-۲۴ ساعت اتفاق می‌افتد.



شکل ۲۸.۶. نمودار تغییرات پتانسیل برحسب زمان در طی روشن و خاموش کردن سیستم حفاظت کاتدی [۲۹-۲۸]



1) This period significantly shortened in the presence of sulphate-reducing bacteria.
2) With respect to copper/copper sulphate reference electrode.
3) C.P. = Cathodic protection.

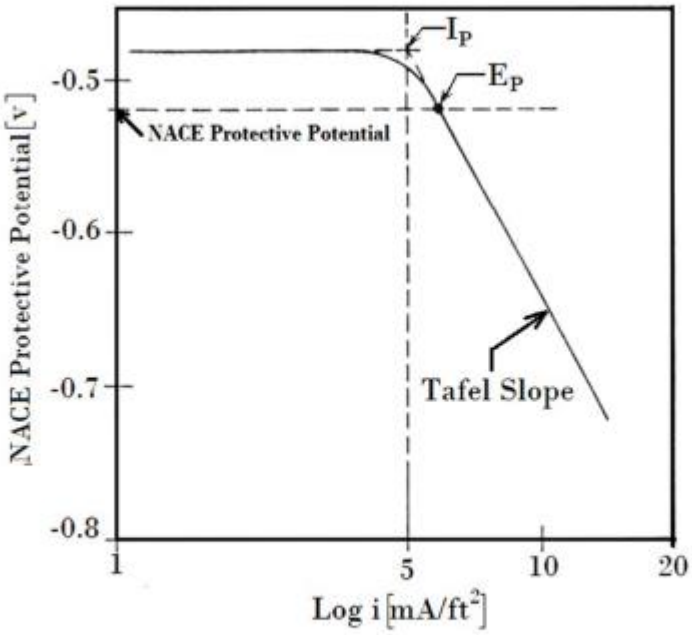
شکل ۲۹.۶. تغییرات پتانسیل قبل و بعد از روشن شدن آنی سیستم حفاظت کاتدی [۱۰]

۳.۳.۶. معیار پتانسیل منفی‌تر از نقطهٔ شکست منحنی تافل

از دیگر معیارهای پتانسیل حفاظت، پتانسیل منفی‌تر از نقطهٔ شکست منحنی تافل در شاخهٔ منحنی پلاریزاسیون است. شکل ۳۰.۶ نقطهٔ حفاظت را برای شاخهٔ کاتدی نشان می‌دهد. نکتهٔ اساسی در این روش این است که شاخهٔ کاتدی منحنی ابتدا با مکانیسم پلاریزاسیون غلظتی و سپس با مکانیسم اکتیواسیون کنترل می‌شود. به‌طوری که در محل شکست منحنی از حالت پلاریزاسیون غلظتی به پلاریزاسیون اکتیواسیون معیاری برای حفاظت در نظر گرفته شده است. موسسهٔ NACE با وجود اشاره به این معیار در گزارش RP-02-85 به این معیار اعتقاد چندانی ندارد. لوپز در مطالعات آزمایشگاهی خود نشان داد که این روش نسبت‌به معیار ۸۵۰mV- و قطع آنی به‌ترتیب حدود ۱۲۰mV و ۱۰۰mV کمتر نشان می‌دهد. به‌عبارتی معیارهای ۸۵۰mV- و قطع آنی محافظه‌کارتر هستند.

۴.۳.۶. معیار پتانسیل ۳۰۰mV- کمتر از پتانسیل خوردگی

علاوه‌بر معیار پتانسیل ۸۵۰mV-، روش قطع آنی پتانسیل و معیار پتانسیل منفی‌تر از نقطهٔ شکست منحنی تافل، با کاهش ۳۰۰mV از پتانسیل خوردگی (یا پتانسیل مدار باز) هم پتانسیل و دانسیتهٔ جریان مورد نیاز جهت حفاظت را می‌توان به دست آورد.



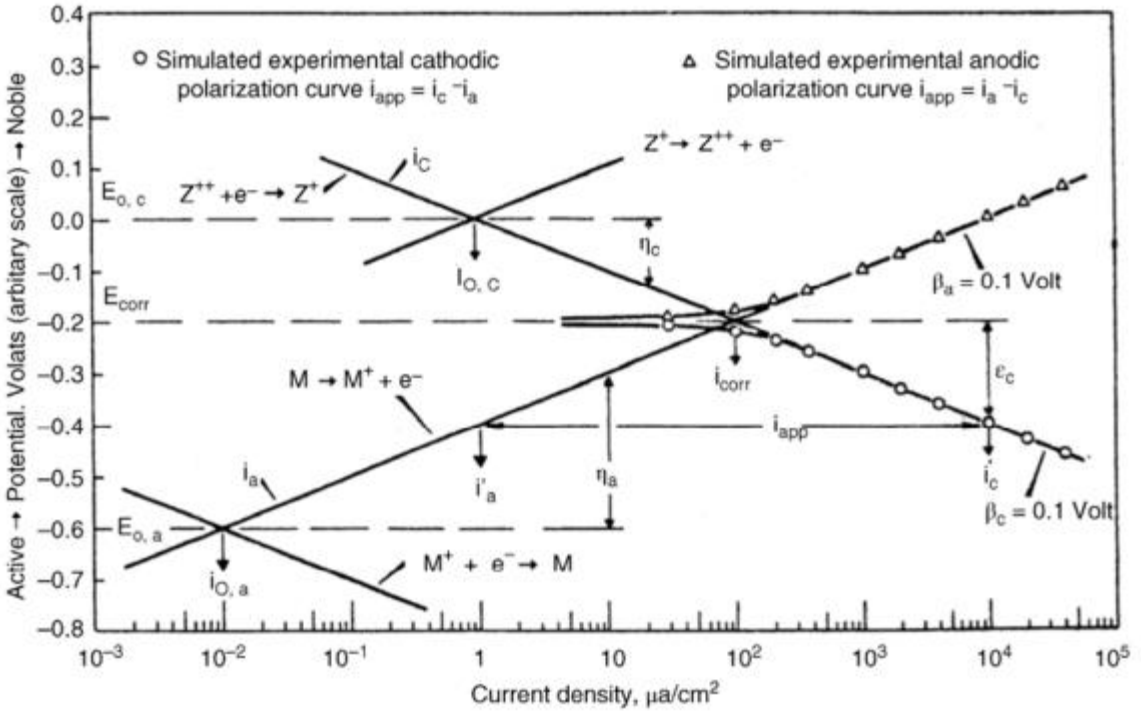
شکل ۳۰.۶. طرح‌وارهٔ معیار شیب تافل برای تعیین حفاظت کاتدی و منحنی پتانسیل و جریان مورد نیاز جهت حفاظت سازهٔ فولادی در آب حاوی اکسیژن [۳۰]

این روش توسط روش افت IR نیز می‌تواند مورد تأیید قرار بگیرد. با توجه به اینکه ممکن است این معیار نتواند به پتانسیل حفاظت به ۸۵۰mV- برسد، استانداردهای معتبر مثل استاندارد NACE آن را تأیید نمی‌کنند. شکل ۳۱.۶ تصویر ساده‌ای از شبیه‌سازی خوردگی و حفاظت برای یک نمونه فولاد در محیط خورنده را نشان می‌دهد. دقت در شیفت پتانسیل ۳۰۰mV- و تعیین دانسیتهٔ جریان خوردگی قابل توجه است. شکل ۳۲.۶ یک نمونهٔ واقعی از اعمال حفاظت کاتدی و لحاظ شیفت ۳۰۰mV- از پتانسیل مدار باز ۶۵۰mV- با اعمال جریان حفاظت از طریق منبع جریان را توضیح می‌دهد. در این مورد پتانسیل حفاظت بر روی دستگاه منبع جریان قرائت شده است. به‌عبارتی با در نظر گرفتن افت IR، ۱۰۰mV برای الکترود مرجع از محل منبع جریان تا خط لوله، معیار حفاظت را همان ۸۵۰mV- در نظر گرفته است. با توجه به کیفیت پوشش، ماکسیمم پتانسیل حفاظت ۱۳۰۰mV- لحاظ شده است.

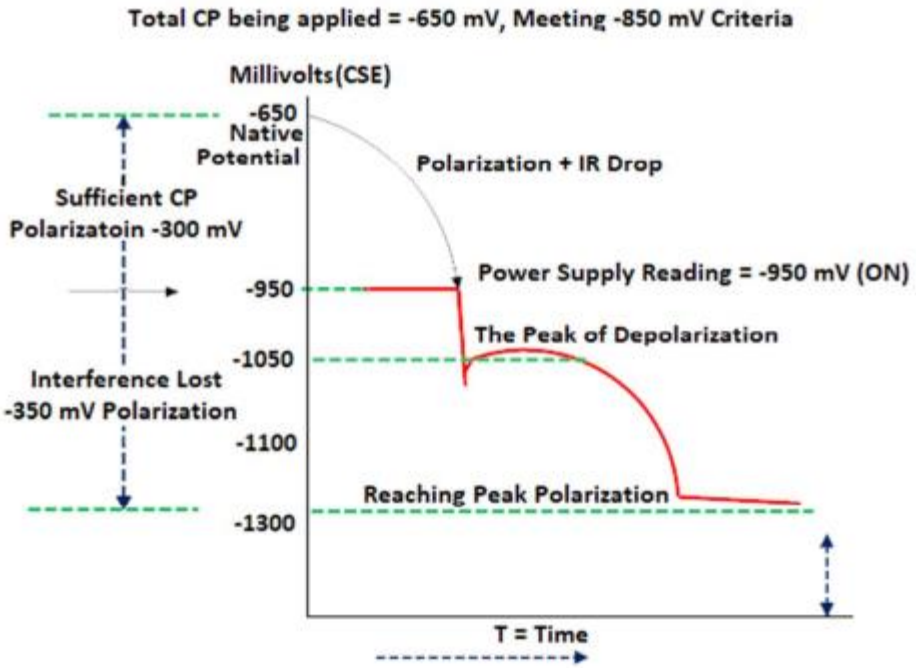
۵.۳.۶. معیار جریان جهت حفاظت

یکی از معیارهای حفاظت کاتدی دانسیتهٔ جریان یا جریان کافی برای حفاظت است. حاصل ضرب عددی اندازهٔ سطح در مقدار دانسیتهٔ جریان، جریان نهایی حفاظت را مشخص می‌کند. معیار جریان تعیین می‌کند که اگر جریان مستقیم به‌میزان کافی به سازه برسد، بر روی سطح

سازه واکنش‌های کاتدی انجام شده و سازه دچار خوردگی نمی‌شود. قاعدتاً با ارسال جریان مستقیم روی سازه، پتانسیل آن نیز کاهش و در محدودهٔ معیارهای پتانسیل قرار می‌گیرد.



شکل ۳۱.۶. منحنی کاهش پتانسیل mV300- نسبت‌به پتانسیل خوردگی در منحنی پلاریزاسیون [۳۱]



شکل ۳۲.۶. بررسی تغییر پتانسیل از حالت مدار باز ۶۵۰mV و شیفت پتانسیل ۳۰۰mV تا حد مجاز پلاریزاسیون ۱۳۰۰ mV [۳۲]

به‌عبارتی معیار جریان نافی دیگر معیارها نیست. حتی در مواقعی که نمی‌توان دانسیتهٔ جریان حفاظت را برای سازه در شرایط خاص بهره‌برداری پیدا کرد، جریان به‌اندازه‌ای به سازه رسانده می‌شود که پتانسیل آن به‌حد معیار ۸۵۰mV- برسد. بعداً طراح آن جریان را به‌عنوان معیار حفاظت ارائه می‌دهد. با استفاده از روش‌های زیر دانسیتهٔ جریان یا جریان مورد نیاز حفاظت را می‌توان به دست آورد:

- استفاده از جدول‌های معتبر،
- استفاده از معادلات ریاضی براساس توزیع جریان و پتانسیل بر روی سازه،
- استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون،
- استفاده از ایستگاه موقت.

جدول‌های معتبر: براساس تجربه و بسته به شرایط محیطی سازه ازجمله مقاومت و میزان عوامل خورنده و تغییرات خواص پوشش و یا سازه در طی بهره‌برداری، جدول‌هایی بر مبنای دانسیتهٔ جریان لازم جهت حفاظت ارائه شده است. درواقع ارائه‌دهندگان جدول‌های مذکور معتقدند که با اعمال جریان‌های مذکور، پتانسیل سازه به معیار حفاظت خواهد رسید. این دانسیتهٔ جریان‌ها برای حالت‌های مختلف پوشش و بدون پوشش و برای پلاریزه شدن و بعد از پلاریزه شدن سطح سازه ارائه شده‌اند. پوشش بسته به میزان مقاومت الکتریکی آن می‌تواند تاحدود زیادی دانسیتهٔ جریان جهت حفاظت را کاهش دهد. دانسیتهٔ جریان برای شروع پلاریزه شدن سطح، همیشه بیشتر از دانسیتهٔ جریان بعد از پلاریزه شدن است. بعد از اینکه سازه پلاریزه شد، جریان کاهش پیدا می‌کند. معمولاً طراحان، معیار را براساس جریان جهت پلاریزه در نظر می‌گیرند. زیرا ممکن است در اثر لحاظ نمودن جریان کم، در شروع حفاظت جریان زیادی از آندها عبور کند و نهایتاً آندها تخریب شوند. در بعضی موارد به‌دلیل پایین بودن کیفیت آندها، سعی می‌شود بالاترین معیار را برای آنها در نظر بگیرند تا در طی بهره‌برداری، آندها آسیب نبینند. هرچه جریان بیشتر باشد، تعداد آندها هم بیشتر در نظر گرفته می‌شوند و به‌تبع آن جریان عبوری از هر آند کاهش یافته و دچار مشکل نمی‌شوند. جدول‌های ۹.۶ تا ۱۵.۶ چند مورد دانسیتهٔ جریان مورد نیاز جهت حفاظت را برای فولاد با و بدون پوشش در محیط‌های مختلف ارائه می‌کنند.

به‌عبارتی معیار جریان نافی دیگر معیارها نیست. حتی در مواقعی که نمی‌توان دانسیتهٔ جریان حفاظت را برای سازه در شرایط خاص بهره‌برداری پیدا کرد، جریان به‌اندازه‌ای به سازه رسانده می‌شود که پتانسیل آن به‌حد معیار ۸۵۰mV- برسد. بعداً طراح آن جریان را به‌عنوان معیار حفاظت ارائه می‌دهد. با استفاده از روش‌های زیر دانسیتهٔ جریان یا جریان مورد نیاز حفاظت را می‌توان به دست آورد:

- استفاده از جدول‌های معتبر،
- استفاده از معادلات ریاضی براساس توزیع جریان و پتانسیل بر روی سازه،
- استفاده از منحنی‌های پلاریزاسیون،
- استفاده از ایستگاه موقت.

جدول‌های معتبر: براساس تجربه و بسته به شرایط محیطی سازه ازجمله مقاومت و میزان عوامل خورنده و تغییرات خواص پوشش و یا سازه در طی بهره‌برداری، جدول‌هایی بر مبنای دانسیتهٔ جریان لازم جهت حفاظت ارائه شده است. درواقع ارائه‌دهندگان جدول‌های مذکور معتقدند که با اعمال جریان‌های مذکور، پتانسیل سازه به معیار حفاظت خواهد رسید. این دانسیتهٔ جریان‌ها برای حالت‌های مختلف پوشش و بدون پوشش و برای پلاریزه شدن و بعد از پلاریزه شدن سطح سازه ارائه شده‌اند. پوشش بسته به میزان مقاومت الکتریکی آن می‌تواند تاحدود زیادی دانسیتهٔ جریان جهت حفاظت را کاهش دهد. دانسیتهٔ جریان برای شروع پلاریزه شدن سطح، همیشه بیشتر از دانسیتهٔ جریان بعد از پلاریزه شدن است. بعد از اینکه سازه پلاریزه شد، جریان کاهش پیدا می‌کند. معمولاً طراحان، معیار را براساس جریان جهت پلاریزه در نظر می‌گیرند. زیرا ممکن است در اثر لحاظ نمودن جریان کم، در شروع حفاظت جریان زیادی از آندها عبور کند و نهایتاً آندها تخریب شوند. در بعضی موارد به‌دلیل پایین بودن کیفیت آندها، سعی می‌شود بالاترین معیار را برای آنها در نظر بگیرند تا در طی بهره‌برداری، آندها آسیب نبینند. هرچه جریان بیشتر باشد، تعداد آندها هم بیشتر در نظر گرفته می‌شوند و به‌تبع آن جریان عبوری از هر آند کاهش یافته و دچار مشکل نمی‌شوند. جدول‌های ۹.۶ تا ۱۵.۶ چند مورد دانسیتهٔ جریان مورد نیاز جهت حفاظت را برای فولاد با و بدون پوشش در محیط‌های مختلف ارائه می‌کنند.

جدول ۹.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز جهت حفاظت قسمت‌های مختلف اسکله در آب دریا [۳۳]

	Current density, mA/ft²			
	Bare steel		Coated steel	
Environment	To polarize	After polarization	To polarize	After polarization
Moving seawater	30–35	7–10	3–5	1.0–1.5
Stagnant seawater	15–25	4–7	1–3	0.5–1.0
Soil zone	4–5	1–1.5	0.5–1.0	0.1–0.5

جدول ۱۰.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز حفاظت برای فولاد بدون پوشش [۳۴]

ENVIRONMENT	(mA/ft²)
Soil with resistivity <1,000 ohm-cm	6.0 - 25.0
Soil with resistivity 1,000 - 10,000 ohm-cm	3.0 - 6.0
Soil with resistivity 10,000 - 30,000 ohm-cm	2.0 - 3.0
Soil with resistivity >30,000 ohm-cm	1.0 - 2.0
Highly aggressive soil with anaerobic bacteria	15.0 - 40.0
Still fresh water	2.0 - 4.0
Moving fresh water	4.0 - 6.0
Turbulent fresh water	5.0 - 15.0
Hot fresh water	5.0 - 15.0
Still seawater	1.0 - 3.0
Moving seawater	3.0 - 25.0
Concrete	0.5 - 1.5

جدول ۱۱.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز حفاظت برای فولاد با پوشش‌های مختلف [۳۴]

ENVIRONMENT	(mA/ft²)
Pipeline, epoxy or other high performance coating	0.001 - 0.005
Pipeline, reinforced coal tar	0.005 - 0.025
Pipeline, grease coating with wrapper	0.05 - 0.150
Pipeline, asphalt mastic 1/2" thick	0.001 - 0.005
Pipeline, old asphalt, or other deteriorated coating	0.05 - 0.35
Pipeline, old paint coating	0.10 - 0.30
Tank bottoms	0.05 - 2.0
Tanks for cold potable water	0.05 - 2.0
Tanks for cold seawater	0.05 - 4.0
Turbulent cold water or hot potable water tanks	0.30 - 3.0
Steel sheet piling fresh water side	0.10 - 1.5
Steel sheet piling seawater side	0.10 - 2.0
Steel sheet piling soil side	0.05 - 1.0

جدول ۱۲.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز حفاظت براساس مقاومت الکترولیت [۳۵]

Environment	Current density (mA/m²)
Soil, 50 to 500 Ω.cm	20 to 40
Soil, 500 to 1500 Ω.cm	10 to 20
Soil, 1500 to 5000 Ω.cm	5 to 10
Soil, over 5000 Ω.cm	5
Fresh water	10 to 30
Moving fresh water	30 to 65
Brackish water	50 to 100
Sea-mud zone	20 to 30

جدول ۱۳.۶. دانسیتهٔ جریان حفاظت برای شرایط آب دریا [۳۶]

Organization	Location	Water Temp. (°C)	Design Current Density (mA/m²)		
			Initial	Mean	Final
NACE	Gulf of Mexico	22	110	55	75
	U.S. West Coast	15	150	90	100
	N. North Sea	0-12	180	90	120
	S. South Sea	0-12	150	90	100
	Arabian Gulf	30	130	65	90
	Cook Inlet	2	430	380	380
	Buried/Mud Zone	all	10-30	10-30	10-30
DNV	Tropical	>20	150/130	70/60	90/80
	Sub-Tropical	12-20	170/150	80/70	110/90
	Temperate	7-12	200/180	100/80	130/110
	Arctic	<7	250/220	120/100	170/130
	Buried/Mud Zone	all	20	20	20
ISO	Non-Buried	>20	-	70/60	90/80
		12-20	-	80/70	110/90
		7-12	-	100/80	130/110
		<7	-	120/80	170/130
		all	20	20	20
Note: DNV and ISO format: "(depths less than 30 m)/(depth greater than 30 m)"					

استفاده از معادلات ریاضی: براساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های پتانسیل و جریان در یک خط لولهٔ تحت حفاظت، مشخص شده است که از نقطهٔ خارج شدن جریان (کابل منفی متصل به سازه) پتانسیل و جریان در طول لوله به‌صورت اکسپانسیولی تغییر می‌کند (شکل ۳۳.۶). به‌دلیل عبور جریان، این نقاط همیشه دمای بالایی دارند. در انتخاب پوشش و عایق‌کاری آن باید دقت کافی به

جدول ۱۲.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز حفاظت براساس مقاومت الکترولیت [۳۵]

Environment	Current density (mA/m²)
Soil, 50 to 500 Ω.cm	20 to 40
Soil, 500 to 1500 Ω.cm	10 to 20
Soil, 1500 to 5000 Ω.cm	5 to 10
Soil, over 5000 Ω.cm	5
Fresh water	10 to 30
Moving fresh water	30 to 65
Brackish water	50 to 100
Sea-mud zone	20 to 30

جدول ۱۳.۶. دانسیتهٔ جریان حفاظت برای شرایط آب دریا [۳۶]

Organization	Location	Water Temp. (°C)	Design Current Density (mA/m²)		
			Initial	Mean	Final
NACE	Gulf of Mexico	22	110	55	75
	U.S. West Coast	15	150	90	100
	N. North Sea	0-12	180	90	120
	S. South Sea	0-12	150	90	100
	Arabian Gulf	30	130	65	90
	Cook Inlet	2	430	380	380
	Buried/Mud Zone	all	10-30	10-30	10-30
DNV	Tropical	>20	150/130	70/60	90/80
	Sub-Tropical	12-20	170/150	80/70	110/90
	Temperate	7-12	200/180	100/80	130/110
	Arctic	<7	250/220	120/100	170/130
	Buried/Mud Zone	all	20	20	20
ISO	Non-Buried	>20	-	70/60	90/80
		12-20	-	80/70	110/90
		7-12	-	100/80	130/110
		<7	-	120/80	170/130
		all	20	20	20
Note: DNV and ISO format: "(depths less than 30 m)/(depth greater than 30 m)"					

استفاده از معادلات ریاضی: براساس مطالعات و اندازه‌گیری‌های پتانسیل و جریان در یک خط لولهٔ تحت حفاظت، مشخص شده است که از نقطهٔ خارج شدن جریان (کابل منفی متصل به سازه) پتانسیل و جریان در طول لوله به‌صورت اکسپانسیولی تغییر می‌کند (شکل ۳۳.۶). به‌دلیل عبور جریان، این نقاط همیشه دمای بالایی دارند. در انتخاب پوشش و عایق‌کاری آن باید دقت کافی به

عمل آید. براین‌اساس و با فرض طولانی بودن خطوط لوله، محققان سعی کرده‌اند روابط ریاضی بـرای آن استخراج کنند که نتیجهٔ محاسبات آنها به‌صورت زیر ارائه شده است:

$$E_x = E_\circ \exp(-\alpha x)$$

$$I_x = I_\circ \exp(-\alpha x)$$

جدول ۱۴.۶. دانسیتهٔ جریان حفاظت برای فولاد در شرایط مختلف محیطی [۳۷]

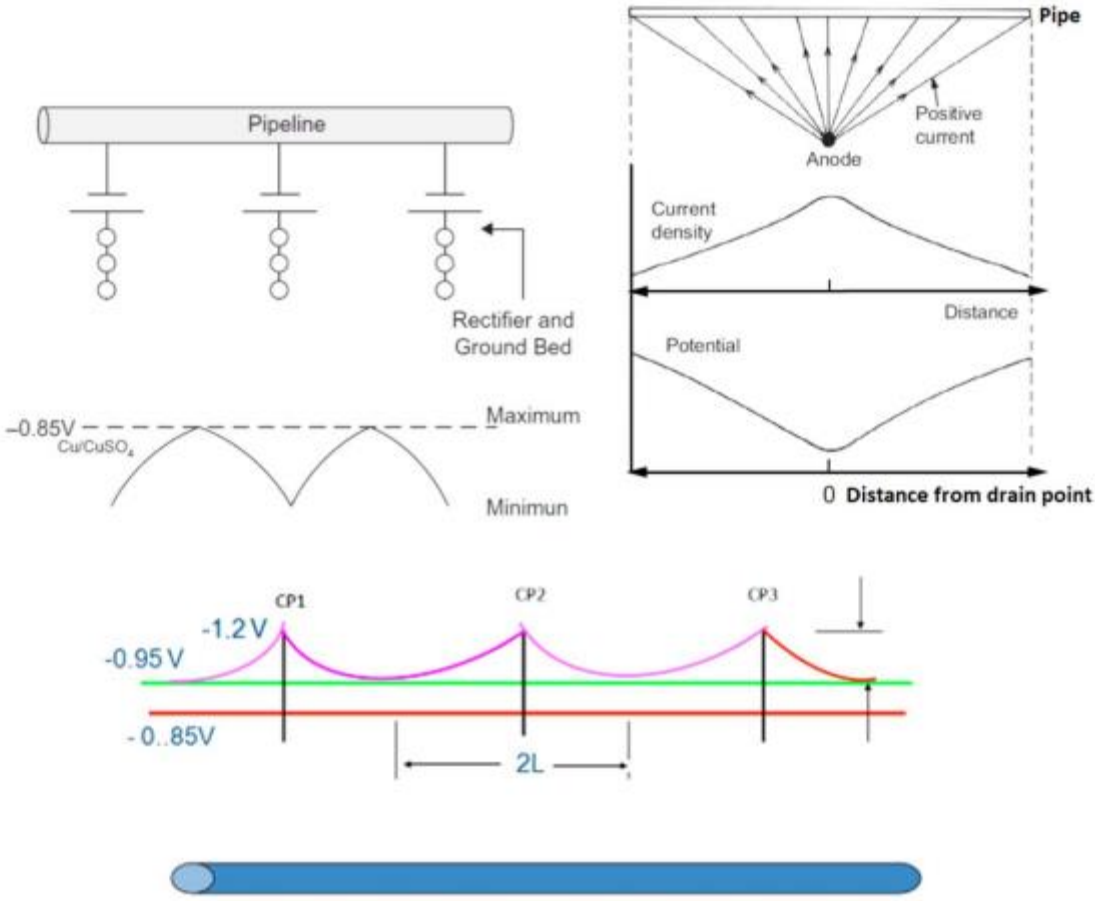
Environment	MA/m^2
Soil with resistivity < 1000 Ω-cm	66–275.0
Soil with resistivity 1000–10,000 Ω-cm	33–66
Soil with resistivity 10,000–30,000 Ω-cm	22–33
Soil with resistivity >30,000 Ω-cm	11–22
Highly aggressive soil with anaerobic bacteria	165.0–440.0
Still fresh water	22–44
Moving fresh water	44–66
Turbulent fresh water	55–165.0
Hot fresh water	55–165.0
Still seawater	11–33
Moving seawater	33–275.0
Concrete	0.55–1.65

جدول ۱۵.۶. دانسیتهٔ جریان مورد نیاز جهت حفاظت مبدل‌های حرارتی [۳۸]

Condenser materials			Design current density		Average water salinity
Waterbox	Tubesheet	Tubes	amp/ft^2	amp/m^2	ppm
Carbon steel	Aluminum bronze	90-10 Cu Ni	0.05	0.54	1000
Cast iron	Muntz	AL-6X stainless steel	0.1	1.08	35,000
Epoxy-coated carbon steel	Epoxy-coated copper-nickel	Titanium	0.07	0.75	35,000
Carbon steel	Muntz	Aluminum brass	0.06	0.65	1000
Carbon steel	Muntz	90-10 Cu Ni	0.06	0.65	1000
Carbon steel	Muntz	Aluminum brass	0.2	2.2	30,000

که Ex و I_x مقدار پتانسیل و جریان در فاصلهٔ x از نقطهٔ خارج شدن جریان از لوله (نقطهٔ دریناژ جریان) است. $E_\circ$ و $I_\circ$ جریـان و پتانسـیل ماکسـیمم در نقطـهٔ دریناژ جریـان اسـت. پتانسـیل ماکسیمم خروجی بستگی به کیفیت پوشش لوله، خصوصاً کیفیت عـایق‌کـاری کابـل منفـی در

نقطهٔ دریناژ دارد. این کابل به روش جوش انفجاری، لحیم کاری یا پیچ‌ومهره، روی لوله نصب، سپس به‌طور کامل توسط رنگ و رزین مناسب یا هندی‌کپ عایق‌کاری می‌شود (شکل ۳۴.۶). در بهترین حالت طراح نباید این پتانسیل را بیشتر از ۲ ولت در نظر بگیرد. حد معمول این پتانسیل در محدودهٔ ۱/۵-۱/۲ ولت است.



شکل ۳۳.۶. تصویر شماتیکی از توزیع جریان و پتانسیل در طول لوله از نقطهٔ خروج جریان [۴۱-۳۹]

ضریب α پارامتری است که بستگی به مقاومت پوشش ومقاومت فلزی لوله دارد. α را فاکتور لاغر شدن آند هم می‌گویند.

$$\alpha = \sqrt{(R_s/R_l)} = \sqrt{\rho/\pi r^2 \times g \times 2\pi r} = \sqrt{2\rho g/r}$$

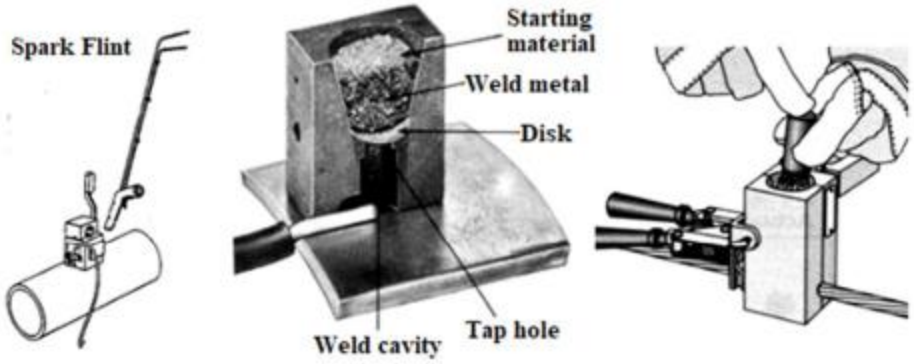
$R_l = 1/g$ مقاومت نشتی یا مقاومت کل فصل مشترک سازه به الکترولیت

g: m^2/ohm هدایت پوشش برحسب

R_s: ohm. m مقاومت اهمی سازه به‌ازای واحد طول

r: قطر لوله برحسب متر

ρ: ohm. m مقاومت ویژه فلز برحسب



شکل ۳۴.۶. تصویر روش نصب کابل منفی به سازه از طریق پیچ‌ومهره و جوش انفجاری [۱۲]

با حل معادلهٔ دیفرانسیل و در نظر گرفتن شرایط مرزی جریان لازم جهت حفاظت کاتدی خط لوله به طول 2×L را می‌توان از رابطهٔ زیر به دست آورد:

$$I_x = \alpha / R_s \,.\, E_\circ \,.\, \exp(-\alpha x)$$

$$I_A = 2\,(\alpha/R_s)\, E_m \sinh a{\times}L$$

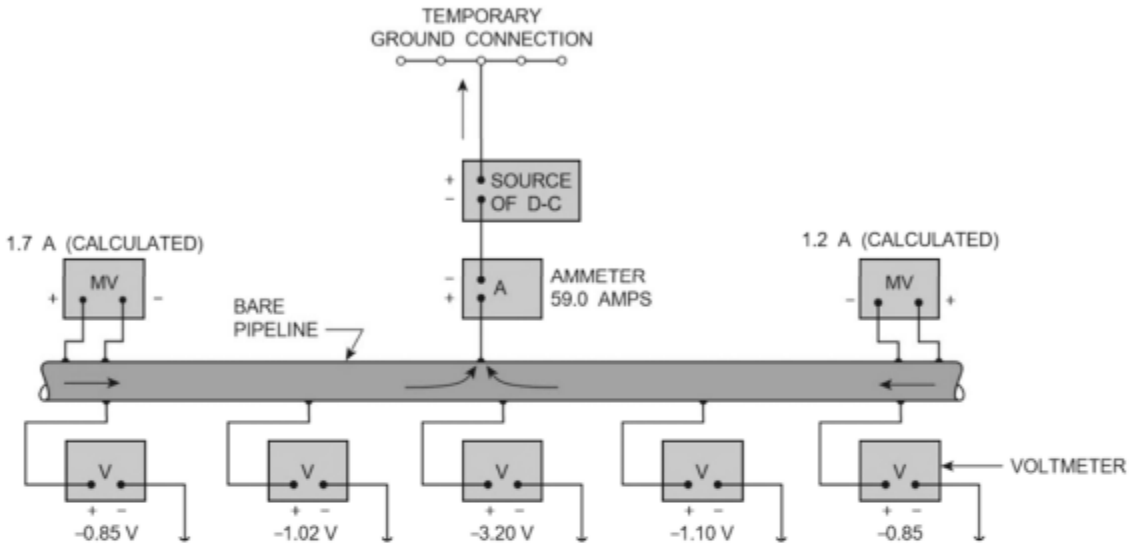
$$E_A = E_m \cdot \cosh(a \cdot L)$$

2×L: فاصلهٔ خط لولهٔ تحت حفاظت برحسب متر (شکل ۳۳.۶)

E_m: مینیمم پتانسیل در انتهای خط لوله در حدود ۰/۸۵ - ولت

استفاده از ایستگاه موقت: از دیگر روش‌های تعیین جریان مورد نیاز حفاظت، روش ایستگاه موقت است. در ایستگاه موقت با استفاده از یک بستر آندی (مثل آهن‌قراضهٔ فشرده) به‌عنوان منبع جریان و یک منبع DC سیار مثل موتور جوش، یک محدودهٔ معین از لوله، تحت جریان حفاظت قرار می‌گیرد. درصورت تأمین پتانسیل حفاظت در محدودهٔ مذکور، جریان مورد حفاظت به کمک یک آمپرمتر اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۳۵.۶ سیستم حفاظت کاتدی موقت برای اندازه‌گیری جریان مورد نیاز حفاظت را نشان می‌دهد. استفاده از مقاومت متغیر جهت

تنظیم جریان و جلوگیری از آسیب دیدن پوشش لوله‌ها ضروری است. البته طول خط لوله تحت آزمایش کوتاه و در حد دو شاخهٔ ۶ متری است، به‌طوری که بتوان در یک شرایط پایلوت در زمین و محیط نظر جریان و پتانسیل مورد نظر را تعیین کرد.



شکل ۳۵.۶. سیستم حفاظت کاتدی موقت برای اندازه‌گیری جریان مورد نیاز حفاظت [۵]

در بسترهای زمینی نزدیک، رابطهٔ زیر برای طول محدودی از خط لوله که عموماً توسط آند فداشونده، حفاظت می‌شود، ارائه می‌گردد.

$$V_x = (0.038 \,.\, I \,.\, \rho)/ (\pi \,.\, y) \times \log (y+\sqrt{y^2 +x^2})/x$$

V_x: پتانسیل در فاصلهٔ x ناشی از جریان آندهای زمینی برحسب ولت

I_x: جریان آند برحسب آمپر

ρ: مقاومت زمین برحسب اهم.سانتی‌متر

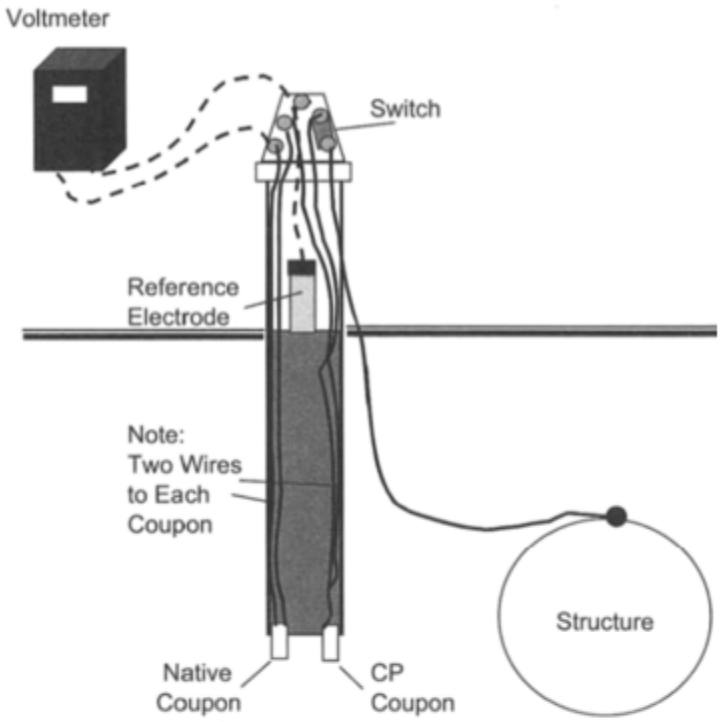
y: طول آند در زمین برحسب فوت

x: فاصلهٔ سازه از آند

به‌طور مثال حفاظت لوله‌ها توسط آند منیزیم نهایتاً ۱۰-۸ فوت است. این مقدار برای آند روی به ۴ تا ۵ فوت محدوده می‌شود.

از دیگر روش‌های محاسبهٔ دانسیتهٔ جریان مورد حفاظت در محیط آبی، استفاده از پلاریزه شدن سطح سازه توسط واکنش احیای اکسیژن است. احیای اکسیژن توسط مکانیسم نفوذ کنترل می‌شود.

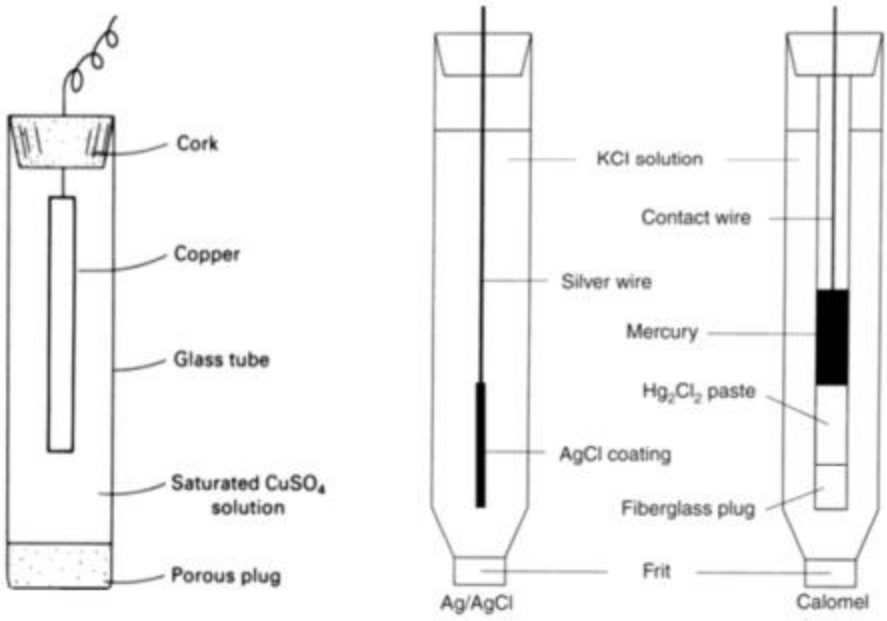
نصب نمونه‌های آزمایشی (کوپن‌گذاری): با استفاده از کوپن‌گذاری و بررسی وضعیت خوردگی سازهٔ تحت حفاظت، در طولانی‌مدت میزان حفاظت سازه را می‌توان نشان داد. نمونه‌ها معمولاً از جنس خود سازه بوده و در مجاورت سازه توسط سیم هادی دارای پوشش عایقی به آن متصل می‌شوند. با خارج کردن سیم از محیط و اندازه‌گیری پتانسیل آن وضعیت حفاظت لوله‌ها را می‌توان مورد بررسی قرار داد. برخلاف سازه، کوپن‌ها بدون پوشش هستند. پس از گذشت یک سال، نمونه‌ها از محیط خارج شده و با محاسبهٔ کاهش وزن و وضعیت سطح ظاهری نسبت‌به حفاظت از خوردگی لوله‌ها اظهارنظر می‌شود. شکل ۳۶.۶ چگونگی اتصال کوپن خوردگی به سازهٔ مدفون در خاک را نشان می‌دهد.



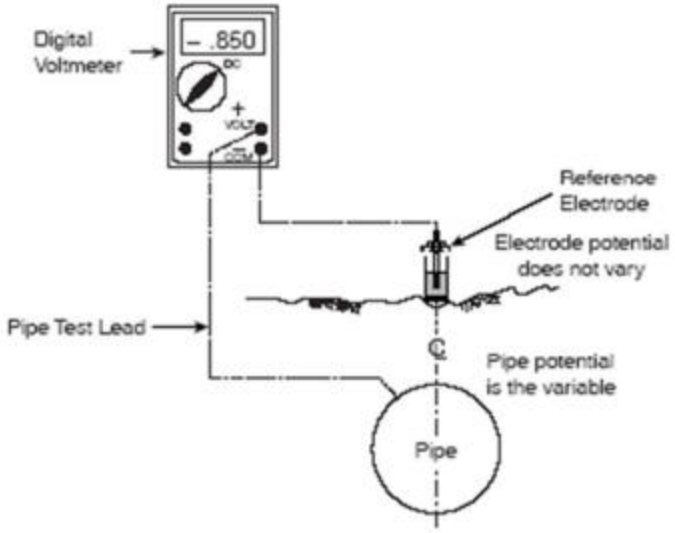
شکل ۳۶.۶. کوپن مورد استفاده در تعیین میزان حفاظت از خوردگی [۴۲]

۴.۶. روش اندازه‌گیری پتانسیل حفاظت

جهت اندازه‌گیری پتانسیل سازه‌های تحت حفاظت کاتدی از الکترودهای مرجع استفاده می‌شود. الکترود مرجع مس/ سولفات مس و الکترود کالومل برای محیط خاک و آب معمولی و الکترود نقره_ کلرید نقره در آب‌های شور و یا گرم کاربری دارند (شکل ۳۷.۶). الکترودهای روی خالص نیز در آب دریا کاربرد دارند. نحوهٔ اندازه‌گیری پتانسیل سازه در شکل ۳۸.۶ آمده است.



شکل ۳۷.۶. تصویر شماتیکی از ساختار الکترودهای مرجع [۳۳]



شکل ۳۸.۶. چگونگی اندازه‌گیری پتانسیل سازه توسط الکترود مرجع [۵]

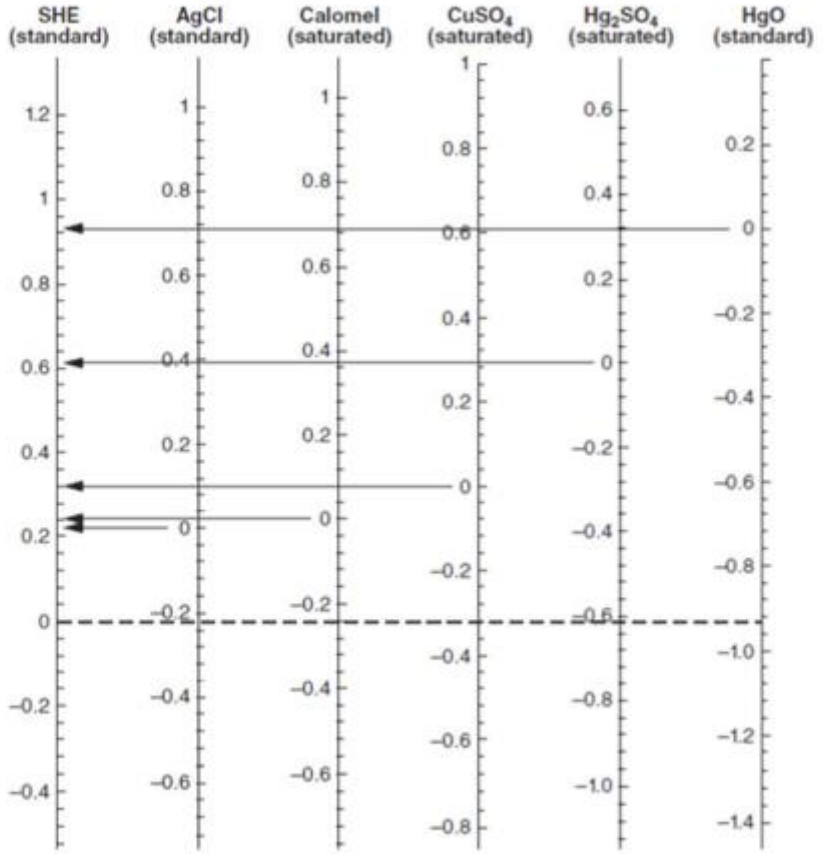
به‌جز الکترود روی، الکترودهای مرجع دیگر دارای یک سیم فلزی در تماس با محلول نمک غلیظ مثل سولفات مس، کلرید پتاسیم و یا کلرید نقره هستند. غلظت محلول نمک با اضافه کردن نمک جامد به‌صورت کریستال، ثابت باقی می‌ماند. تماس با الکترولیت توسط یک پل نمکی انجام می‌شود. که این پل نمکی به‌صورت جامد متخلخل از جنس چوب، سرامیک و یا محلول آگار ساخته می‌شود. حتی‌الامکان محلول نمکی نباید به بیرون از الکترود تراوش کند. قابل به ذکر است که الکترود کالومل درواقع الکترودی با محلول کلرید جیوه است که به‌دلیل مسائل محیط‌زیستی سعی در استفاده کمتر از الکترود کالومل شده است. پتانسیل الکترودهای مذکور در جدول ۱۶.۶ مقایسه شده است. شکل ۳۹.۶ مقایسهٔ بین پتانسیل الکترودهای مرجع را به‌صورت عددی نشان می‌دهد.

جدول ۱۶.۶. پتانسیل الکترودهای مرجع نسبت‌به الکترود هیدروژن استاندارد در دمای C°25 [۱۰]

نوع الکترود	پتانسیل بر حسب ولت
مس / سولفات مس	+ ۰/۳۲
نقره / کلرید نقره / کلرید پتاسیم اشباع	+ ۰/۲۰
نقره / کلرید نقره / آب دریا	+ ۰/۲۵ (تقریبی)
کالومل (کلرید پتاسیم اشباع)	+۰/۲۵
روی / آب دریا	− ۰/۷۸ (تقریبی)

توجه ۱ : تاثیر درجه حرارت معمولاً در طی آزمایش صحرایی به حساب نمی‌آید.

توجه ۲ : پتانسیل الکترودهای مرجع عموماً نسبت به الکترود هیدروژن استاندارد، سنجیده می‌شود (این الکترود در عمل برای اندازه‌گیری، به ندرت استفاده می‌شود). هدف از تشکیل این جدول قابلیت تبدیل پتانسیل‌های جسم به الکترولیت اندازه‌گیری شده توسط یک الکترود به الکترودهای دیگر است. به عنوان مثال، مشاهده می‌گردد که الکترود روی / آب دریا ۱/۱ ولت نسبت به الکترود مس / سولفات مس منفی‌تر است در نتیجه پتانسیلی که فرضاً با الکترود مس / سولفات مس اندازه‌گیری شده و مقدار ۰/۸۵− را نشان می‌دهد نسبت به الکترود روی / آب دریا ۱/۱ ولت مثبت‌تر خواهد بود (یعنی ۰/۲۵V+). شکل ۱۴ مقیاس تبدیل پتانسیل الکترودهای مرجع رایج را به یکدیگر نمایش می‌دهد.

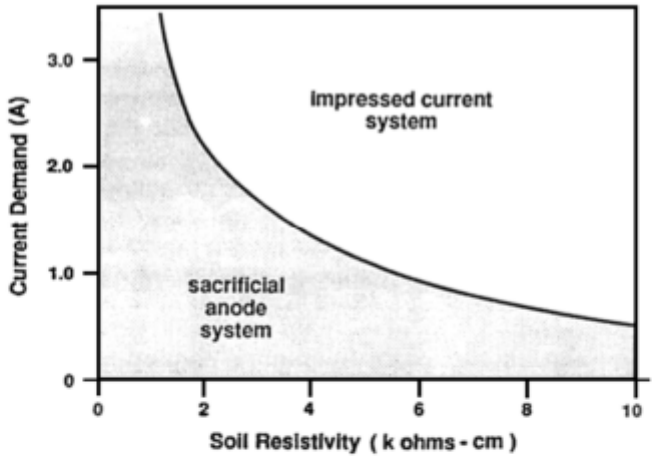


شکل ۳۹.۶. مقایسهٔ پتانسیل‌های سازه نسبت‌به الکترولیت با استفاده از الکترودهای مرجع مختلف [۴۳]

معمولاً در حین جاگذاری سازه‌ها در خاک و آب، اتصالات مربوط به نقاط آزمایش بر روی سازه نصب می‌شوند. نقاط مذکور باید به‌طور کامل عایق شوند و سر دیگر آنها به محل قابل دسترسی (در بیرون از خاک یا آب) جهت اندازه‌گیری پتانسیل آورده شود. الکترود مرجع در هنگام آزمایش باید مستقیماً بالای سازه قرار بگیرد. جهت پایین آوردن مقاومت الکترود/ الکترولیت سطح خاک را می‌توان مرطوب نمود. ولت‌متر مورد استفاده جهت اندازه‌گیری ولتاژ باید دارای مقاومت زیادی (بیشتر از ۱۰ MΩ) باشد. ولت‌مترهای استفاده‌شده جهت اندازه‌گیری ولتاژ نیز نباید نسبت‌به تغییرات مغناطیسی زمین حساس باشند.

۵.۶. انتخاب روش حفاظت کاتدی

تصمیم‌گیری جهت استفاده از سیستم اعمال جریان و یا آند فداشونده براساس ملاحظات اقتصادی و عملی بودن سیستم انجام می‌شود. چنانچه جریان کل حفاظت کمتر از ۲ آمپر باشد از روش آند فداشونده و در آمپرهای بالاتر از روش اعمال جریان استفاده می‌شود (شکل ۴۰.۶).

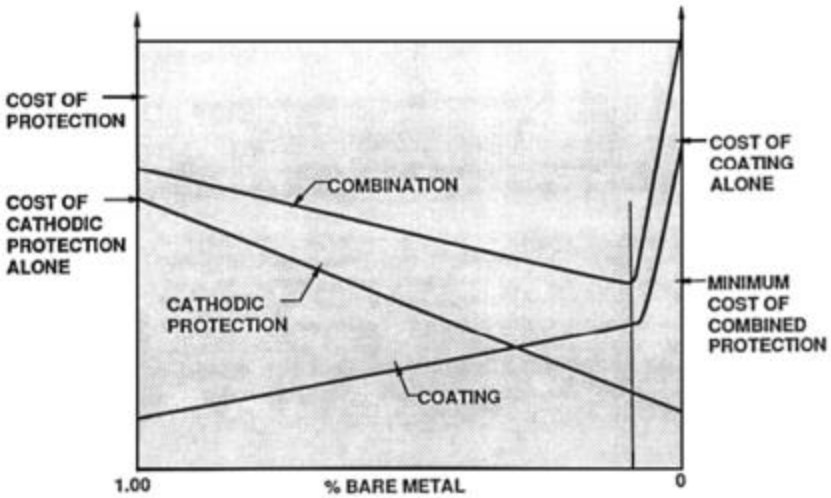


شکل ۴۰.۶. منحنی انتخاب سیستم حفاظت کاتدی برحسب مقاومت خاک و میزان جریان مورد نیاز [۴۴]

اگر استفاده از روش اعمال جریان برای بعضی سیستم‌ها (مثل مبدل‌های حرارتی متصل به سازه‌های فلزی دیگر مثل راکتورها، توربین و...) مشکل‌آفرین باشد استفاده از آندهای فداشونده ارجح است. گاهی اوقات طراحان دربارهٔ هزینه‌کرد بیشتر برای پوشش و عدم استفاده از سیستم حفاظت کاتدی هم فکر می‌کنند. بهتر این است که برای بهره‌برداری هرچه بیشتر از پوشش و نگهداری از آن، استفاده از سیستم حفاظت کاتدی در برنامه قرار بگیرد. شکل ۴۱.۶

ملاحظات اقتصادی را در این رابطه نشان می‌دهد. عوامل مهم دیگری که در انتخاب نوع سیستم حفاظت کاتدی تأثیر دارند، شامل موارد زیر است:

- چنانچه مقاومت خاک کمتر از (Ω.cm)۵۰۰۰ و جریان کم باشد از آندهای فداشونده استفاده می‌شود.



شکل ۴۱.۶. منحنی ملاحظات اقتصادی حفاظت کاتدی و پوشش [۴۴]

- در مقاومت بالاتر از (Ω.cm) ۱۰۰/۰۰۰ سیستم آند فداشونده به‌دلیل بالا بودن مقاومت مدار، کارایی ندارد.
- امکان دسترسی به سیستم برق‌رسانی.
- در بعضی از نواحی سازه که تحت جریان‌های سرگردان قرار دارد، استفاده از آندهای فداشونده در آن نواحی مفید است.
- برای طول عمر زیاد حفاظت، سیستم آند فداشونده خصوصاً در محیط‌های خورنده استفاده نمی‌شود.
- وجود تغییرات زیاد مقاومت الکترولیت، ممکن است استفاده از هر دو روش را تحت‌الشعاع قرار دهد.
- جهت جبران حفاظت سازه‌ها توسط اعمال جریان در محل‌هایی از سازه که دچار مشکل تأمین پتانسیل حفاظت می‌شود، استفاده از آندهای فداشونده اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.