شرکت مهندسی و بازرگانی تدوین صنعت ایرسا
دپارتمان مهندسی متریال، حفاظت از خوردگی و بازرسی فنی

TS-IRSA

TECHNICAL HANDBOOK | IRSA-ENG-CORR-۲۰۲۴

هندبوک جامع مهندسی انتخاب و کاربرد پوشش‌های ضدخوردگی خطوط لوله و سرجوش‌ها

Engineering Handbook of Pipeline Anti-Corrosion Coatings & Field Joint Systems

راهنمای تخصصی ارزیابی، انتخاب مهندسی، استانداردها (NACE, ISO, DIN, IPS, IGS)، مکانیزم‌های عملکردی سامانه‌های کارخانه‌ای (FBE, ۳LPE, ۳LPP) و سامانه‌های صحرایی سرجوش (نوارهای سرد، اسلیوهای حرارتی و ویسکوالاستیک) به انضمام چک‌لیست‌های بازرسی فنی و کنترل کیفیت.

Web: ts-irsa.com
Tel: ۰۲۱-۸۸۰۱۲۶۰۴
Date: Autumn ۲۰۲۴ / پاییز ۱۴۰۳

نسخه: ۲.۴ (ویرایش نهایی تخصصی)
استانداردهای مرجع: NACE SP۰۱۶۹, ISO ۲۱۸۰۹, DIN ۳۰۶۷۰, IPS, IGS

مقدمه و مبانی مکانیزم‌های خوردگی خطوط لوله مدفون

SECTION ۰۱

خوردگی خارجی خطوط لوله انتقال نفت، گاز، پتروشیمی و آب شرب، فرآیندی الکتروشیمیایی و ترمودینامیکی خودبه‌خودی است که طی آن فلز پایه به اکسیدها و ترکیبات پایدار تبدیل می‌شود. خطوط انتقال به عنوان شریان‌های حیاتی زیربنایی، تحت اثر عوامل تهاجمی گوناگون خاک شامل رطوبت، املاح معدنی، اسیدیته (pH)، جریان‌های سرگردان (Stray Currents) و فعالیت باکتری‌های احیاکننده سولفات (SRB) قرار دارند.

هم‌افزایی پوشش محافظتی و سامانه حفاظت کاتدی (CP)

بر اساس اصول استاندارد جهانی NACE SP۰۱۶۹ و ISO ۱۵۵۸۹-۱، حفاظت مؤثر از خط لوله بر پایه‌ی دو لایه‌ی مکمل دفاعی استوار است:

- **لایه اول (پوشش محافظتی ضدخوردگی):** ایجاد سد فیزیکی و دی‌الکتریک با مقاومت الکتریکی بالا جهت ایزوله نمودن سطح خارجی فولاد از الکترولیت خاک (بیش از ۹۹٪ سطح خط را حفاظت می‌کند).
- **لایه دوم (حفاظت کاتدی CP):** تأمین جریان الکتریکی مستقیم جهت قطبش کاتدی مناطقی که دچار نقص جزئی (Holiday)، خراشیدگی حین ترنچ‌ریزی یا آسیب‌های مکانیکی پوشش شده‌اند.

> **پدیده بحرانی محافظت‌گریزی حفاظت کاتدی (Cathodic Protection Shielding):**
> یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های فنی سامانه‌های پوشش سنتی (مانند نوارهای سرد بوتیلی نامرغوب)، جداشدن نوار از بدنه لوله تحت تنش برشی خاک (Soil Stress) و تشکیل یک فضای خالی زیرین است. در صورت نفوذ رطوبت به این فضا، جریان حفاظت کاتدی نمی‌تواند از بدنه عایق نوار عبور کند و فولاد دچار خوردگی شدید موضعی، حفره‌ای و ترک‌خوردگی SCC می‌شود. از این رو، استانداردهای مدرن الزامات سخت‌گیرانه‌ای برای چسبندگی و مقاومت در برابر Disbondment وضع نموده‌اند.

سامانه‌های پوشش کارخانه‌ای بدنه لوله (Plant-Applied Line Pipe Coatings)

SECTION ۰۲

۱. اپوکسی پودری ذوبی (Fusion Bonded Epoxy – FBE)

سامانه ترموست FBE که بر اساس استانداردهای NACE SP۰۳۹۴ و ISO ۲۱۸۰۹-۲ اعمال می‌شود، نخستین پوشش نسل نوین است که بر روی لوله پیش‌گرم‌شده تا دمای ۲۳۰ الی ۲۴۵ درجه سانتی‌گراد پاشش الکترواستاتیک می‌گردد.

- **پیوند شیمیایی کووالانسی:** چسبندگی فوق‌العاده قوی به سطح سندبلاست شده لوله (Sa ۲.۵).
- **بالاترین مقاومت در برابر جدایش کاتدی (Cathodic Disbondment):** شعاع جدایش کمتر از ۳ میلی‌متر در شرایط استاندارد.
- **عدم ایجاد شیلدینگ کاتدی:** در صورت ایجاد ترک یا نقص، جریان حفاظت کاتدی مستقیماً به نقطه معیوب دسترسی دارد.
- **پوشش دولایه (Dual-Layer FBE):** اعمال لایه دوم با مقاومت سایشی و ضربه‌ای بالا (ARO) جهت عبور از مناطق صخره‌ای و روش حفاری افقی هدایت‌پذیر (HDD).

۲. سامانه سه‌لایه پلی‌اتیلنی (۳LPE – ۳-Layer Polyethylene)

محبوب‌ترین سامانه پوشش خطوط انتقال گاز و نفت در ایران و جهان بر اساس DIN ۳۰۶۷۰ و ISO ۲۱۸۰۹-۱ و استاندارد ملی گاز IGS-M-TP-۰۲۶:

- **لایه زیرین (Primer)**: پودر اپوکسی FBE با ضخامت ۱۰۰ الی ۲۰۰ میکرون جهت تضمین چسبندگی شیمیایی و مقاومت در برابر جدایش کاتدی.
- **لایه میانی (Adhesive)**: چسب پیونددهنده کوپلیمری اصلاح‌شده با مالئیک انیدرید (ضخامت ۲۰۰ الی ۳۰۰ میکرون).
- **لایه خارجی (Topcoat)**: پلی‌اتیلن سنگین (HDPE) اکسترود شده با ضخامت ۲ الی ۳.۵ میلی‌متر جهت تأمین سد نفوذناپذیر رطوبت و مقاومت فیزیکی استثنایی در برابر ضربات سنگلاخ و خاک‌های تهاجمی.
- **محدوده دمایی مجاز:** از دمای ۴۰- درجه تا ۸۵+ درجه سانتی‌گراد.

۳. سامانه سه‌لایه پلی‌پروپیلنی (۳LPP – ۳-Layer Polypropylene)

ساختاری مشابه ۳LPE اما با استفاده از پلی‌پروپیلن سخت و اصلاح‌شده منطبق بر DIN ۳۰۶۷۸. این پوشش به صورت اختصاصی برای شرایط دمایی بالا (High Operating Temperature) تا دمای ۱۱۰ الی ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، خطوط فرآیندی خروجی کمپرسورها، چاه‌های نفت سنگین و لوله‌گذاری در بستر آب‌های عمیق (Offshore) طراحی گردیده است.

سامانه‌های پوشش سرجوش‌های صحرایی (Field Joint Coatings – FJC)

SECTION ۰۳

نقطه اتصال لوله‌ها (سرجوش‌ها) آسیب‌پذیرترین بخش در خطوط لوله مدفون است. هرگونه افت کیفیت در پوشش سرجوش می‌تواند کل سرمایه‌گذاری خط لوله را به خطر اندازد.

۱. اسلیوهای حرارتی انقباضی متقاطع (Heat Shrinkable Sleeves – HSS)

این اسلیوها بر پایه‌ی پلی‌الفین‌های تابش‌داده‌شده متقاطع (Radiation Cross-linked) تولید شده و دارای حافظه شکلی هستند که با اعمال حرارت مشعل، منقبض شده و چسب داخلی آن مذاب می‌گردد:

- **اسلیوهای سه‌لایه سرجوش (۳-Layer HSS):** استفاده از پرایمر مایع اپوکسی بدون حلال بر روی سرجوش سندبلاست شده، سازگاری ۱۰۰٪ با پوشش‌های کارخانه‌ای ۳LPE ایجاد کرده و مقاومت در برابر Disbondment کاتدی را به حداکثر می‌رساند.
- **استانداردهای مرجع:** ۳-۲۱۸۰۹ ISO، (Class C-HT) ۱۲۰۶۸ EN و استاندارد شرکت ملی گاز ایران IGS-M-TP-۰۲۶.
- **کاربرد در HDD:** اسلیوهای ویژه مسلح به الیاف فایبرگلاس (مانند DIRAX / Canusa ScarGuard) مقاوم در برابر کشش لوله در حفاری‌های جهت‌دار.

۲. نوارهای سردپیچ بوتیلی چندلایه (Cold-Applied Polymeric Tapes)

سامانه‌ای انعطاف‌پذیر با اجرای دستی یا مکانیزه بر اساس استاندارد AWWA C۲۱۴، DIN ۳۰۶۷۲ و IPS-G-TP-۳۳۵:

- **پرایمر مایع سنتزی:** جهت ترشوندگی کامل سطح فلز و افزایش نفوذ چسب بوتیل.
- **نوار لایه زیرین (Inner Tape):** تشکیل شده از حامل پلی‌اتیلنی و لایه ضخیم بوتیل رابر با چسبندگی بسیار بالا به فلز.
- **نوار محافظ مکانیکی (Outer Tape):** مقاوم به اشعه فرابنفش، بارهای دینامیکی خاک و تنش‌های مکانیکی، اعمال با همپوشانی ۵۰ درصدی.

۳. سامانه‌های پوشش ویسکوالاستیک (Visco-Elastic Coating Systems)

جدیدترین فناوری در زمینه آب‌بندی و ضدخوردگی بدون نیاز به پرایمر، بر پایه پلی‌ایزوبوتیلن غیرقابل خشک‌شدن:

- چسبندگی ۱۰۰٪ بدون نیاز به سندبلاست سنگین (حتی با تمیزکاری دستی St ۲ یا St ۳).
- خاصیت خودترمیمی (Self-Healing) در صورت بروز سوراخ یا خراش موضعی.
- بهترین راهکار مهندسی برای پوشش اتصالات پیچیده، فلنج‌ها، شیرآلات مدفون و تعمیرات سریع خطوط لوله در حال بهره‌برداری.

ماتریس مقایسه فنی و انتخاب سامانه‌های پوشش

SECTION ۰۴

سامانه پوشش	استاندارد مرجع	بازه دمای عملکردی	مقاومت به جدایش کاتدی	مقاومت ضربه‌ای / مکانیکی	کاربرد اصلی توصیه شده
۳LPE سه‌لایه	ISO ۲۱۸۰۹-۱ / DIN ۳۰۶۷۰	−۴۰°C تا +۸۵°C	عالی (با پرایمر FBE)	بسیار بالا	خطوط لوله گاز و نفت سراسری بین‌شهری
۳LPP پلی‌پروپیلن	ISO ۲۱۸۰۹-۱ / DIN ۳۰۶۷۸	−۲۰°C تا +۱۴۰°C	بسیار عالی	فوق‌العاده سخت	خطوط دمای بالا، نفت داغ، تزریق بخار و Offshore

سامانه پوشش	استاندارد مرجع	بازه دمای عملکردی	مقاومت به جدایش کاتدی	مقاومت ضربه‌ای / مکانیکی	کاربرد اصلی توصیه شده
FBE پودری ذوبی	NACE SP۰۳۹۴ / ISO ۲۱۸۰۹-۲	−۴۰°C تا +۱۰۰°C	برترین سطح (< ۳mm)	متوسط (نیاز به ARO در صخره)	خطوط با فشار بالا، خاک‌های همگن و بستر دریا
اسلیو حرارتی ۳ لایه	EN ۱۲۰۶۸ Class C / ISO ۲۱۸۰۹-۳	−۳۰°C تا +۸۰°C	عالی (همراه با پرایمر)	بسیار بالا	سرجوش خطوط ۳LPE و اتصالات پروژه‌ای
نوارهای سردپیچ بوتیل	AWWA C۲۱۴ / DIN ۳۰۶۷۲	−۲۰°C تا +۶۰°C	متوسط	خوب (در لایه‌های محافظ)	شبکه‌های گازرسانی شهری، آبرسانی و تعمیرات
پوشش ویسکوالاستیک	ISO ۲۱۸۰۹-۳	−۴۰°C تا +۷۰°C	عالی (عدم نفوذ آب)	نیاز به رپینگ محافظتی	شیرآلات، فلنج‌ها، مخازن و تعمیرات فوری بدون توقف خط

دستورالعمل‌های بازرسی فنی و کنترل کیفیت (QA/QC Procedures)

SECTION ۰۵

طول عمر عملیاتی پوشش ضدخوردگی ارتباط مستقیمی با سخت‌گیری در رعایت مراحل کنترل کیفی بر اساس رویه‌های استاندارد NACE و IPS دارد:

۱. آماده‌سازی سطح فولاد (Surface Preparation)

- **درجه تمیزی سطح:** سندبلاست / گریت‌بلاست مطابق استاندارد ISO ۸۵۰۱-۱ در درجه Sa ۲½ (Near-White Metal). تمام زنگ‌زدگی‌ها، پوسته‌های نورد و آلودگی‌ها باید پاکسازی شوند.
- **پروفیل زبری (Anchor Profile):** عمق زبری باید بین ۵۰ الی ۱۰۰ میکرون (تأیید با نوار تست Replica Tape و میکرومتر دیجیتال) باشد.
- **سنجش نمک‌های محلول (Bresle Test):** حداکثر غلظت نمک‌های کلرید باقیمانده بر روی فولاد طبق ISO ۸۵۰۲-۶ نباید از ۲۰ میلی‌گرم بر مترمربع فراتر رود.
- **شرایط محیطی:** دمای لوله در حین پاشش و اعمال باید حداقل ۳ درجه سانتی‌گراد بالاتر از نقطه شبنم (Dew Point) بوده و رطوبت نسبی زیر ۸۵٪ باشد.

۲. آزمون ضخامت‌سنجی پوشش خشک (DFT Measurement)

اندازه‌گیری ضخامت پوشش با ضخامت‌سنج‌های الکترومغناطیسی کالیبره منطبق بر دستورالعمل SSPC-PA ۲ انجام می‌شود. در سیستم ۳LPE، حداقل ضخامت کل در بدنه لوله معمولاً بین ۲.۵ تا ۳.۲ میلی‌متر (بسته به سایز لوله) کنترل می‌گردد.

۳. آزمون تخلخل‌سنجی ولتاژ بالا (High-Voltage Holiday Detection)

شناسایی کوچک‌ترین منافذ میکروسکوپی (Pinholes) با استفاده از هالیدی دتکتور اسپرینگ بر اساس استانداردهای NACE SP۰۱۸۸ و NACE TM۰۳۸۴ انجام می‌گیرد. ولتاژ اعمالی بر حسب ضخامت پوشش محاسبه می‌شود:

```
V (Volts) = 529 × √(Thickness in Microns)
```

برای پوشش ۳ میلی‌متری (۳۰۰۰ میکرون): ولتاژ بازرسی تقریباً ۲۵ الی ۲۸ کیلوولت تنظیم می‌گردد.

۴. آزمون چسبندگی پوسته‌ای (Peel Adhesion Test)

بر اساس استاندارد DIN ۳۰۶۷۰، با برش نواری به عرض ۲۰ میلی‌متر از پوشش و کشش با زاویه ۹۰ درجه بوسیله نیروسنج دیجیتال: حداقل نیروی جدایش در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد باید بیش از ۱۰۰ نیوتن بر سانتی‌متر برای ۳LPE کلاس n باشد.

تأمین تخصصی ملزومات حفاظت از خوردگی و بازرسی فنی – تدوین صنعت ایرسا

شرکت مهندسی و بازرگانی تدوین صنعت ایرسا با سابقه مشارکت در بزرگ‌ترین پروژه‌های گازرسانی، خطوط انتقال نفت خام و تأسیسات فرآیندی پتروشیمی کشور، آماده تأمین مستقیم انواع نوارهای سردپیچ بوتیلی (Altene, Polyken)، پرایمرهای صنعتی، اسلیوهای حرارتی انقباضی (Canusa, Raychem)، پوشش‌های ویسکوالاستیک، دستگاه‌های هالیدی دتکتور و تجهیزات بازرسی کنترل کیفی با سرتیفیکیت رسمی ۳.۱ و ۳.۲ می‌باشد.

دفتر مرکزی: تهران، یوسف‌آباد | تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۱۲۶۰۴ | ایمیل: info@ts-irsa.com | وب‌سایت رسمی: ts-irsa.com