اویل ایندااستری
Oilindustry.ir
CLICK HERE

پوشش‌های لوله و اتصالات

نویسندگان
مهندس سید حمزه علم‌الهدی
مهندس ا. شاهـوردی
مهندس عباس روستا

خوردگی لوله و اتصالات، مخازن‌ذخیره، بدنه کشـتی‌ها، پایه پل‌ها، اسـکلت‌های فلزی و ... سـالانه صدها میلیارددلار بـه اقتصاد جهان ضرر وارد می‌کنند. این درحالی اسـت که کشـورهای مختلف سـالیانه مبالغ زیادی نیز صرف پیشگیری از خوردگی و توسعه اسـتفاده از سیستم‌های کنترل‌کننده خوردگی می‌کنند. خوردگی یک فرایند ذاتی و مشـابه پیر شـدن می‌باشـد. همانگونه که برخی افراد در سـن بالای ۸۰ سـال نیز از سـلامت مناسـب برخوردارند، این امکان وجود دارد که خطوط لوله وتجهیزات نیز دارای عمرطولانی باشند، این مهم امکان‌پذیر نمی‌باشد مگر آنکه به موضوع خوردگی به صورت جدی و دقیق توجه شود. از طرف دیگر وقوع حوادث تلخ با تلفات جانی و مالی زیاد، اگرچه باعث از بین رفتن جان هزاران نفر و هزینه‌های سنگینی شده‌اند، اما در نهایت دولتمردان و دست‌اندرکاران صنایع را متقاعد کرده‌اند که برای جلوگیری از حوادث بیشتر، چاره‌اندیشی نمایند. همچنین باید توجه داشت خوردگی و فرسایش مربوط به بخش خاص و محدودی از صنایع نمی‌باشد و تقریباً به همه بخش‌های صنعتی و غیرصنعتی زندگی بشر ارتباط دارد. برای درک بهتر این تنوع به چند نمونه از حوادث مرتبط با خوردگی در بخش‌های مختلف اشاره می‌کنیم:

۱- حادثه Bhopal در کشورهند در سال ۱۹۸۴ میلادی که منجر به کشته شدن بیش از ۳۰۰۰ نفر و آسیب دیدن صدها هزارنفر شد. این حادثه در اثر خوردگی و نشت ۵۰۰ لیتر آب به داخل مخزن نگهداری متیل ایزوسیانات روی داد.

۲- انفجار ناشی از خوردگی در خط لوله انتقال Carlsbed در ایالت نیومکزیکو در سال ۲۰۰۰ میلادی باعث کشته شدن حداقل ۱۲ نفر شد.

۳- حادثه در راکتور تاسیسات هسته‌ای Davis-besse در سال ۲۰۰۲ میلادی نیز در اثر خوردگی روی داد.

۴- غرق شدن کشتی نفت‌کش Erika در آب‌های فرانسه در سال ۱۹۹۹میلادی، این حادثه نیز در اثر خوردگی روی داده است.

۱ مقدمه

خوردگی به صورت مستقیم و غیرمستقیم هزینه‌های متعددی تحمیل می‌کند. از طرف دیگر برای جلوگیری از خوردگی نیز باید مبالغ قابل توجهی هزینه کنیم. اما این هزینه‌ها درمقابل هزینه‌های ناشی از عدم حفاظت از لوله و تجهیزات، ناچیز می‌باشند. هزینه‌های عدم حفاظت از لوله و اتصالات را می‌توانیم به شکل زیر دسته‌بندی نماییم:

الف» هزینه‌های مستقیم

به صورت مستقیم در اثرخورده شدن لوله و تجهیزات در طی یک مدت مشخص، بخش قابل توجهی از سرمایه‌گذاری به هدر می‌رود. در ساخت یک کارخانه یا احداث یک خط لوله، هزینه مواد و تجهیزات، هزینه نیروی انسانی و هزینه ماشین‌آلات در کنار وقت صرف شده برای اجرای پروژه، هزینه‌های اصلی می‌باشند. با خورده شدن لوله و تجهیزات، علاوه بر لزوم هزینه مجدد به اضافه تورم احتمالی، باید هزینه بسیار زیادی نیز صرف بازکردن تجهیزات یا درآوردن لوله از زیرخاک کنیم. در محاسبات اقتصادی یک پروژه معمولاً مدت زمان مشخصی برای استهلاک هزینه و برگشت سرمایه در نظر گرفته می‌شود. به غیر از پروژه‌های خاص که به دلایل متعدد، بازگشت سرمایه در آنها اهمیت ندارد. غالباً پروژه‌های دیگر دارای یک زمان بازگشت سرمایه چندساله و منطقی می‌باشند. حال اگر در اثر خوردگی، عمرتجهیزات پروژه از مدت زمان بازگشت سرمایه کمتر باشد، سرمایه‌گذاری بدون سودی انجام شده است. به صورت معمول هر سرمایه‌گذار به غیر از دولت‌ها، هدفش رسیدن به سود مناسب، به میزان حداقل بیش از بهره بانکی و به صورت مستمر و پایدار می‌باشد. بنابراین برای بخش خصوصی بسیار اهمیت دارد که بر روی چه طرحی سرمایه‌گذاری می‌کند و بازگشت سرمایه او چگونه است. در این حالت طراح در مرحله مطالعات طرح و توجیه اقتصادی باید به تاثیر خوردگی در آینده طرح دقت نموده و برآورد مشخصی از میزان هزینه اولیه و عملیاتی، مواد مصرفی و تجهیزات حفاظت از خوردگی داشته باشد.

ب» هزینه‌های غیرمستقیم

این هزینه‌ها محدوده گسترده‌ای را دربرمی‌گیرند و محاسبه میزان هزینه بسیار مشکل می‌باشد. درواقع میزان آن بستگی به شرایط خاص هرپروژه دارد و نمی‌توان به صورت عام درباره آن صحبت کرد، اما می‌توان ادعا نمودکه هزینه‌های غیرمستقیم چندین برابر هزینه‌های مستقیم خوردگی می‌باشد. این هزینه‌ها عبارتند از:

۱- توقف: فرض نماییدکه تولید در یک بخش از پالایشگاه یا واحد نفتی دیگر در اثر خوردگی لوله یا تجهیزات فرایندی برای ساعاتی متوقف شود. در این حالت در ساعات توقف (Shutdown) درآمد واحد نیز متوقف می‌شود. از سوی دیگر نیروی انسانی و همچنین واحدهای مرتبط نیز دچار توقف شده و مجبور به پرداخت هزینه بدون کسب درآمد می‌شود. ضمن آنکه در این مدت برای نگهداری یا هدایت سیال به مسیر ایمن باید هزینه‌ای جداگانه نیز صرف شود. گاهی این توقف‌ها به صورت دنباله‌دار به بخش‌های دیگر نیز ضربه خواهد زد. به عنوان مثال فرض نمایید که یک خط لوله دچار خوردگی و نشت سیال و درنهایت توقف ارسال سیال شده است، در این حالت هم واحد ارسال‌کننده و هم واحد دریافت کننده دچار توقف می‌شوند. معمولاً در این حالات شرکت بهره‌بردار یا خدمات دهنده که دچار مشکل شده باید خسارت واحدهای دیگر را نیز جبران نماید.

۲- آلوده شدن سیال: یکی دیگر از هزینه‌های غیرمستقیم خوردگی، آلوده شدن (Contamination) سیال در اثر خوردگی داخلی لوله و تجهیزات می‌باشد. غالباً در خطوط انتقال آب و فرآوردهای نفتی این تاثیر بیشتر از تاثیر آن در خطوط انتقال نفت‌خام یا گازطبیعی قبل از پالایش می‌باشد. به هرحال گاهی آلودگی ایجاد شده تاثیر زیادی در قیمت محصول دارد. به عنوان مثال آلوده شدن بنزین صادراتی یک پالایشگاه می‌تواند روی قیمت این بنزین تاثیرگذار باشد.

۳- ازدست دادن محصول: سوراخ شدن لوله در خطوط انتقال یا پالایشگاه با توجه به فشار موجود دراین لوله‌ها می‌تواند باعث از دست‌رفتن سیال شود. گاهی تا زمان پیداکردن محل خوردگی و ترمیم آن مقدار بسیار زیادی از سیال ازدست می‌رود و هزینه زیادی نیز دربر خواهد داشت.

شکل ۱: خوردگی لوله و اتصالات در پالایشگاه نفت(پالایشگاه ریچموند شرکت شورون)

۴- ازدست دادن بازده: گاهی این خوردگی در داخل تجهیزات فرایندی رخ می‌دهد. در این حالت یک هزینه دیگر بنام ازدست دادن کارایی و بازده به سیستم تحمیل خواهد شد. فرض کنید این خوردگی در داخل یک مبدل حرارتی حادث شود. در این صورت ضمن کاهش کارایی، بازده این مبدل نیز به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت و غالباً این کاهش بازده به صورت دنباله‌دار بر روی تجهیزات و بخش‌های دیگر نیز تاثیرخواهد گذاشت.

۵- آسیب زیست‌محیطی: خورده شدن لوله و تجهیزات به سرعت بر روی محیط زیست تاثیر می‌گذارد. این تاثیر می‌تواند به صورت آلوده شدن جو، آلوده شدن آب‌های زیرزمینی، آلوده شدن محیط زیست حیوانات[نظیرجنگل‌ها] و محیط زیست آبزیان [نظیر رودخانه‌ها، برکه‌ها، تالاب‌ها، دریاچه‌ها و دریاها] باشد. باید توجه کرد که گاهی این آلایندگی نظیر نشت مواد سمی دارای خطرات فوری برای حیوانات و انسان‌ها نیز می‌باشد. باید توجه کرد که در مورد هیدروکربورها و بسیاری از موادشیمیایی، سیال قابل انفجار نیز می‌باشد. در این حالت خطرات جانی و مالی مضاعفی به مجموعه هزینه‌های اشاره شده اضافه می‌گردد. علاوه بر خطر جانی، درصورت بروز انفجار، محیط‌زیست نیز به صورت مضاعف آسیب خواهد دید. نمونه‌های متعددی از این نوع آسیب‌رسانی به طبیعت را سالانه مشاهده می‌کنیم. برخی از این اتفاقات ناشی از خرابی در تجهیزات و برخی دیگر در اثرخوردگی روی می‌دهند. گاهی ممکن است برای یک مدت طولانی نشت سیال در اثر خوردگی باعث آلوده شدن محیط زیست شده باشد. در سال‌های اخیر برای جلوگیری از هزینه ناشی از هدررفت سیال و همچنین هزینه آلوده شدن محیط زیست، به موضوع نشت‌یابی توجه ویژه‌ای شده است و بیشتر موارد نشتی نیز ناشی از خوردگی لوله و اتصالات می‌باشند.

۶- طراحی اضافه: یکی از راه‌های مقابله با مشکلات و هزینه‌های اشاره شده، افزایش ضخامت لوله و تجهیزات در راستای لحاظ کردن خوردگی مجاز در محاسبات و طراحی می‌باشد. اگرچه اضافه نمودن این ضخامت باعث افزایش هزینه‌های پروژه می‌شود. اما این هزینه درمقابل هزینه‌های اشاره شده ناچیز می‌باشد. درحالی که عدم شناخت کافی از محیط و شرایط سیال و همچنین مطالعه و محاسبات ناکافی یا نگرانی و بی‌تجربگی طراح می‌تواند به Overdesign تجهیزات منتهی شود. این طراحی اضافه، باعث تحمیل هزینه اضافی به پروژه می‌شود بدون آنکه این هزینه تاثیر مثبتی در ایمنی یا کارکرد سیستم داشته باشد.

۲ حفاظت در برابر خوردگی

انتخاب فولاد مقاوم در مقابل خوردگی اولین گام برای مقابله در برابر خوردگی می‌باشد. امروزه انواع زیادی فولادهای آلیاژی که در مقابل سیال‌های خورنده مقاوم‌تر می‌باشند وجود دارد. همچنین استانداردهای اصلی نظیر API سطح کیفی بالاتر لوله‌ها یعنی PSL۲ را در مقابل PSL۱ معرفی نموده‌اند. ساخت لوله با فولادهای مقاوم مطابق استاندارد اشاره شده، مقاومت در مقابل خوردگی‌های شیمیایی یا فرسایش را به میزان زیادی افزایش داده است. اما با این حال این فولادها در مقابل خوردگی به صورت کامل محافظت شده نمی‌باشند و باید برای آن چاره‌جویی نمود. از طرف دیگر در درازمدت فولادهای اشاره شده می‌توانند تحت حملات شیمیایی یا فیزیکی دچار خوردگی شوند. به همین دلیل این فولادها را باید به گونه‌ای اضافه‌ای حفاظت نمود.

از سوی دیگر پوشش لوله(Pipe coating) می‌تواند به منظور حفاظت حرارتی لوله[عایق حرارتی] یا حفاظت در مقابل آتش نیز صورت گیرد. در کاربردهای خاص و به ویژه پایپینگ داخل پالایشگاه‌ها و لوله‌های روباز از پوشش‌هایی استفاده نمود که علاوه بر حفاظت درمقابل خوردگی، حفاظت در مقابل آتش را نیز تامین نموده یا لوله و اتصالات را عایق نماید.

پوشش داخلی لوله(Pipe Lining) و اتصالات نیز می‌تواند به کاهش خوردگی سطح داخلی لوله و اتصالات منتهی شود. این موضوع ضمن کاهش فرسایش داخلی لوله باعث کاهش انرژی مصرفی برای انتقال سیال خواهد شد. پوشش داخلی لوله‌های انتقال گاز می‌تواند تا ۱۰٪ نیروی بازدارنده را کاهش دهد. به هر حال با برنامه‌ریزی درست می‌توان از پوشش لوله همزمان برای جلوگیری از خوردگی، کاهش اتلاف حرارتی انرژی و کاهش انرژی برای انتقال سیال استفاده نمود. برای رنگ کردن و اجرای پوشش داخل لوله در حال حاضر می‌توان به نسخه طرح‌ریزی شده ISO 15741:2001 مراجعه نمود.

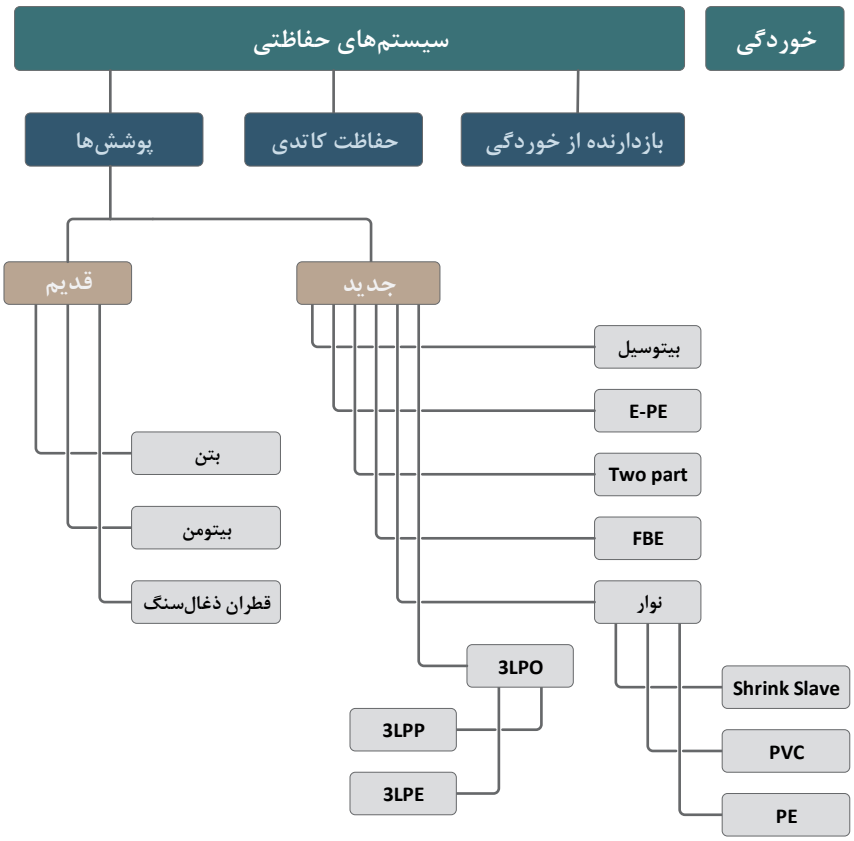
حفاظت کاتدی و پوشش به وسیله مواد مقاوم در مقابل خوردگی از کاربردی‌ترین روش‌های حفاظت لوله، شیرآلات، اتصالات و سازه‌ها در مقابل خوردگی می‌باشند. حفاظت کاتدی و پوشش مکمل یکدیگر می‌باشند و برای حفاظت کامل لازم است که علاوه بر استفاده از هردو عامل به تاثیرات متقابل این دوعامل نیز توجه شود. علاوه بر روش‌های اشاره شده استفاده از مواد بازدارنده از خوردگی برای جلوگیری از خوردگی داخل لوله، اتصالات و تجهیزات فرایندی کاربرد دارد. موثرترین روش حفاظت ازخوردگی سطح خارجی لوله‌های زیر زمینی، استفاده از پوشش محافظ به‌همراه حفاظت کاتدی است. بنابراین یکی از اساسی ترین وظایف سازندگان و مصرف کنندگان لوله از یک طرف بکارگیری پوشش با بهترین مشخصات فنی و در عین حال اقتصادی‌ترین پوشش برای افزایش بهینه عمر بهره‌برداری از آن می‌باشد و از طرف دیگر به هماهنگی پوشش و عدم تداخل پوشش در حفاظت کاتدی می‌باشد.

پوشش انتخابی بایستی از حفاظت کافی در مقابل تنش‌های مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و شیمیایی همراه با ضربه ناشی از حمله باکتری یا قارچ که حین بهره‌برداری، حمل و نقل، انبار کردن و خوابانیدن لوله پیش می‌آید، برخوردار باشد. نیازهای اساسی مواد پوشش ضد خوردگی عبارتند از : استحکام، چقرمگی(Toughness)، چسبندگی به سطح فولادی لوله و سهولت تعمیر عیوب سطحی احتمالی پوشش لوله قبل از مرحله خوابانیدن لوله در کانال می‌باشد. همچنین پوشش باید قابلیت استفاده در محدوده وسیعی از درجه حرارت در شرایط حمل و نقل، انبار و سرهم کردن[ریسه] و خوابانیدن کامل خط لوله در کانال و همچنین در شرایط بهره‌برداری را داشته باشد.

علاوه بر پوشش‌های فلزی، معدنی و آلی، امروزه استفاده از پوشش‌های نانو نیز مطرح می‌باشد. اگرچه هنوز زود است در مورد کیفیت و کاربرد این پوشش‌ها اظهار نظر نمود. اما با توجه به مشخصات ذاتی نانوساختارها که غالباً باعث می‌شوند استحکام و مقاومت در مقابل شکست و فرسایش مواد افزایش یابد می‌توان پیش‌بینی نمود که در آینده شاهد پوشش‌های به ویژه پلیمری با مشخصات کاملاً بهبود یافته خواهیم بود. به هرحال باید توجه نمود که در حال حاضر استفاده از فولادهای مقاوم‌تر، حفاظت کاتدی و استفاده از پوشش‌های پلیمری بیشترین نقش را در حفاظت لوله‌ها در مقابل خوردگی دارند. انواع روش‌های محافظت در مقابل خوردگی را می‌توان اینگونه دسته‌بندی نمود:

- استفاده از فولادهای آلیاژی مقاوم در مقابل خوردگی
- استفاده از مواد بازدارنده از خوردگی
- استفاده از حفاظت کاتدی
- استفاده از پوشش‌های فلزی، معدنی و آلی
- استفاده از پوشش نانو

شکل ۲ دسته‌بندی انواع روش‌های حفاظت در مقابل خوردگی را نشان می‌دهد. در ادامه ضمن معرفی مختصر پوشش‌های متداول برخی از پوشش‌های پرکاربرد در صنعت نفت و گاز، به بررسی بیشتر برخی از آنها پرداخته خواهد شد.



شکل ۲: دسته‌بندی انواع روش‌های حفاظت در مقابل خوردگی

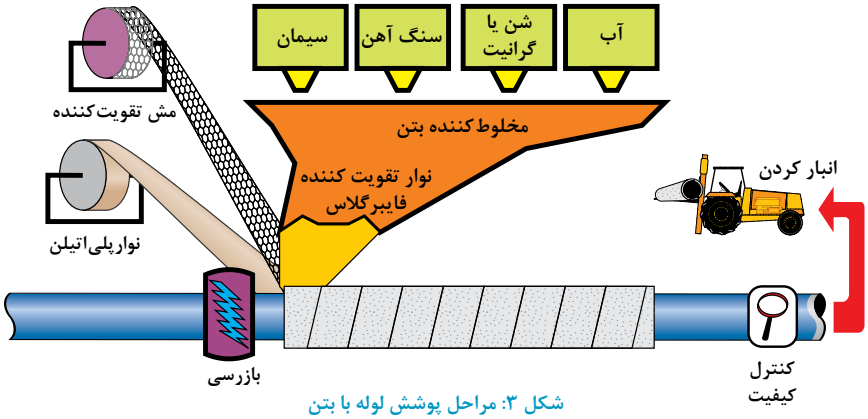
پوشش‌های فلزی

در صنعت، پوشش‌های فلزی دارای کاربرد وسیعی می‌باشند و از آنها برای جلوگیری از خوردگی یا افزایش دوام و استحکام استفاده می‌شود. آبکاری[گالوانیزه کردن] گرم و سرد، Cladding، رسوب از طریق جوشکاری، آستر تسمه‌ای، اتصال انفجاری و پاشش فلزات و پوشش‌های نفوذی روش‌های معمولی می‌باشند که از آنها برای ایجاد پوشش فلزی استفاده می‌شود. البته باید توجه کرد که هرکدام از این روش‌ها مناسب یک بخش از صنعت می‌باشند. استفاده از پوشش نیکل یا تیتانیوم به وسیله اتصال انفجاری برای پوشش داخلی راکتورها، رسوب از طریق جوشکاری فولاد زنگ نزن نوع ۳۴۷ راکتورها و همچنین پوشش نفوذی آلومینیوم در مهار خوردگی سولفیدی در برج‌ها نمونه‌ای از کاربرد و استفاده از روش‌های مختلف پوشش‌های فلزی در صنعت نفت و گاز می‌باشند.

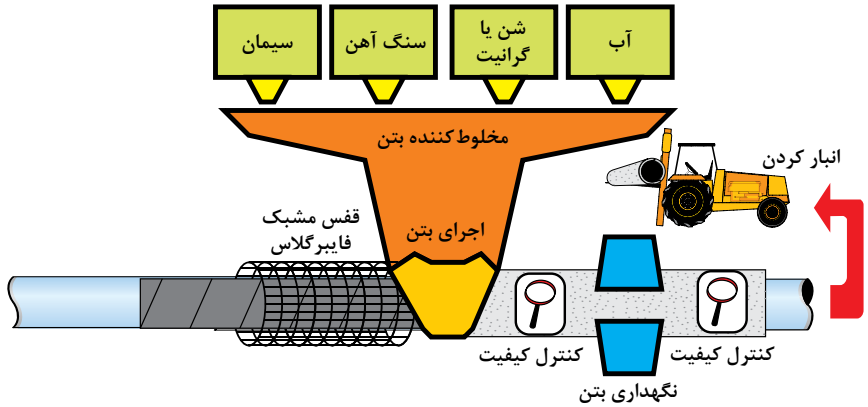
اما استفاده از این نوع پوشش در حوزه نفت و گاز تنها در ساخت تجهیزات فرایندی و برخی لوله، شیرآلات و اتصالات داخل پالایشگاه یا مجتمع‌های پتروشیمی کاربرد دارد. برای خطوط لوله استفاده از پوشش‌های فلزی اقتصادی نبوده و توجیه فنی نیز ندارد.

پوشش‌های قدیمی

پوشش‌های بر پایه مواد معدنی یا بر پایه قیرنفتی یا قطران ذغال‌سنگ و بیتومن نظیر لعاب قطران ذغال‌سنگ، بتن، لعاب آسفالت و لعاب بیتومن از اولین پوشش‌های لوله محسوب می‌گردند و تا دهه ۱۹۸۰ میلادی از کاربرد فراوانی برخوردار بودند و هنوز نیز در برخی موارد کاربرد دارند. این پوشش‌ها به دلیل مشکلات حین اجرا و همچنین ضعف مشخصات در دماهای پایین نظیر ترک خوردن و آلایندگی محیط زیست و همچنین نداشتن کیفیت پوشش‌های پلیمری به تدریج کنار گذاشته شدند و امروزه عمدتاً دارای کاربرد خاص می‌باشند. در گذشته از سیمان برای حفاظت از داخل لوله‌های آب استفاده می‌شده است. اما امروزه علاوه بر سیمان می‌توان از برخی پوشش‌های پلیمری نظیر FBE نیز استفاده نمود. سیمان و آسفالت هنوز هم برای پوشش خارجی لوله‌های عبوری از داخل رودخانه، باتلاق و بستر دریاها کاربرد دارند. این پوشش‌ها علاوه بر محافظت لوله، باعث می‌شوند که لوله سنگین‌تر شده و بهتر در زیر آب قرار گیرد. به عنوان نمونه پوشش خط لوله دریایی در بستر دریای شمال از پوشش آسفالت و بتن تشکیل شده است. باید توجه کرد که به تدریج پوشش‌های پلیمری به دلیل چسبندگی و دوام



شکل ۳: مراحل پوشش لوله با بتن



شکل ۴: مراحل پوشش لوله با بتن

بسیار خوب، ارزانی، اجرای آسان و آلایندگی کم در حال تسخیر این بازار می‌باشند. پوشش‌های زیر در دسته‌بندی پوشش‌های قدیمی یا به عبارت دیگر پوشش‌های آلی/ معدنی قرار می‌گیرند.

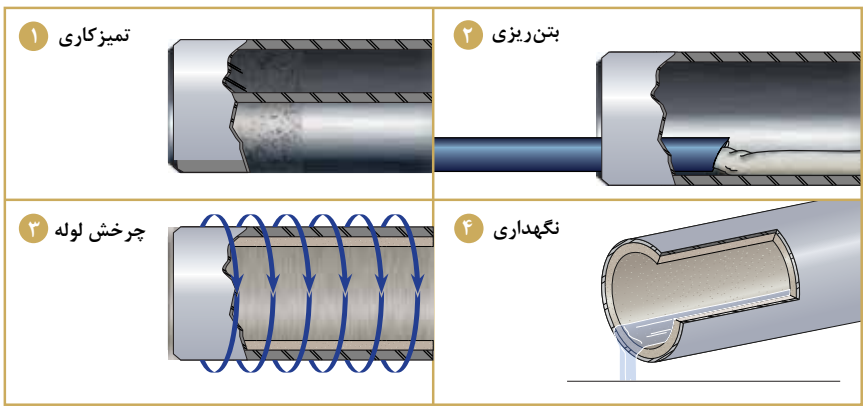
» بتن (Cement/Concrete)

» لعاب قطران ذغال‌سنگ (Coal tar enamel)

» لعاب آسفالت (Asphalt enamel)

پوشش‌ها لعاب قطران ذغال‌سنگ و لعاب آسفالت را پوشش‌های قیری یا Bitumenus نیز می‌نامند.

شکل ۳ و ۴ پوشش‌دهی خارجی به وسیله آسفالت و شکل ۵ روش پوشش‌دهی داخل لوله را نشان می‌دهد. میزان ضخامت پوشش بیرونی از نوع سیمان غالباً ۱ تا ۱۰ اینچ و ضخامت پوشش‌دهی داخلی خیلی کمتر می‌باشد، ضمن آنکه پوشش‌دهی داخلی با بتن برای لوله‌های با قطر کمتر از ۲ اینچ در عمل معنا ندارد. همانگونه که در شکل ۳ مشاهده می‌کنید برای اجرای پوشش خارجی، ابتدا بتن تزریق شده و یک مش/ توری بر روی آن کشیده می‌شود که ضمن تقویت استحکام بتن مانع ریختن بتن می‌شود. همچنین یک لایه نواری پلی‌اتیلن نیز برای محافظت بیشتر

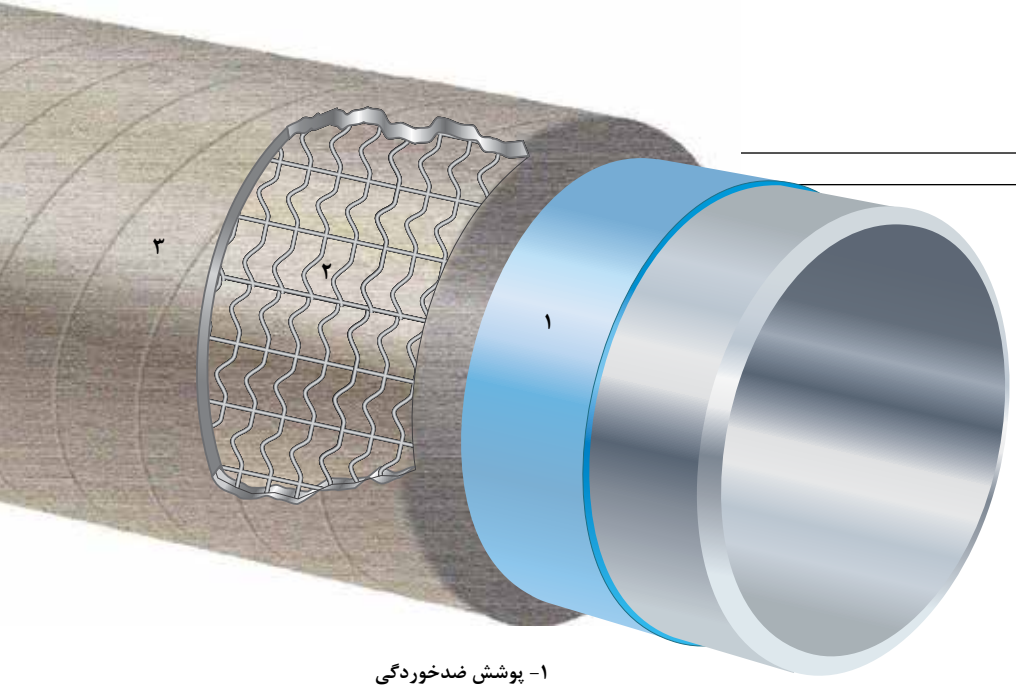


شکل ۵: مراحل اجرای پوشش داخلی(Lining) بتنی

بتن بر روی پوشش کشیده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان پوشش با ضخامت ۱ تا ۶ اینچ را بر روی لوله اجرا نمود. در شکل ۴ اجرای پوشش بتنی را با یک روش متفاوت مشاهده می‌نمایید. در این روش با استفاده از یک قالب از جنس توری، بتن به عنوان پوشش بر روی لوله اجرا می‌گردد. در این روش می‌توان پوشش با ضخامت ۱ تا ۹ اینچ را اجرا نمود.

برای اجرای پوشش داخل بتنی همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌نمایید، لوله با سرعت مناسب در حال چرخش می‌باشد و همزمان با ریختن یک نوار طولی بتنی در داخل لوله، این نوار بتنی به دلیل گریز از مرکز به سمت بیرون که همان دیواره می‌باشد حرکت کرده و یک لایه یکنواخت در داخل لوله ایجاد می‌شود. شکل ۷ لبه یک پوشش اجرا شده بتنی را نشان می‌دهد. برای رعایت موارد استاندارد می‌توان به DNV-OS-F101/2000 مراجعه نمود.

پوشش لعاب قیری یا آسفالت، از چندلایه پوشش قیری تقویت شده به وسیله فایبرگلاس تشکیل می‌شود. ضخامت این پوشش معمولاً ۶-۵ میلیمتر است، اما بر اساس مشخصات فنی جدید پوشش با ضخامت ۴ میلی‌متر نیز مجاز می‌باشد. دمای لوله در هنگام اجرای پوشش باید تقریباً ۴۰°C باشد. در



۱- پوشش ضدخوردگی
۲- بتن تقویت شده
۳- نوارمحافظ بیرونی

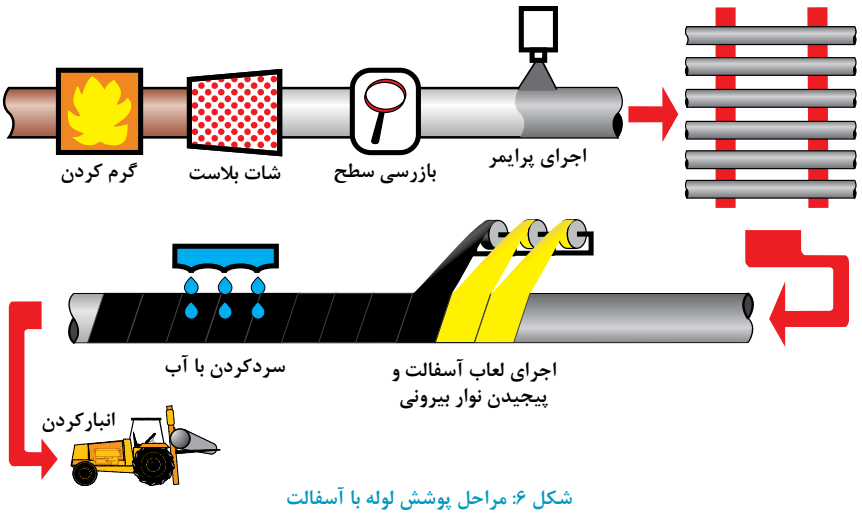
شکل ۸

صورت نیاز به گرم کردن لوله به وسیله هوای داغ از داخل گرم می‌شود. اجرای پوشش زمانی شروع می‌شود که آستر خشک شده اما هنوز چسبناک باشد. در درون اتاقک پوشش انامل (Enamel) بر روی لوله سیلان داده می‌شود و همزمان لایه فایبرگلاس به صورت مارپیچ با یک بار یا دوبار چرخش مواد روی لوله پیچانده می‌شود. پس از اجرای پوشش به وسیله آب، پوشش خنک می‌شود. برای تعمیر مک‌های احتمالی می‌توان از انامل گرم به تنهایی در محدوده بزرگتر از اندازه مک ایجاد شده استفاده نمود.

برای اجرای پوشش از نوع آسفالت همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌نمایید، ابتدا لوله پیش گرم شده و پس از تمیزکاری به وسیله ساچمه‌پاشی و بازرسی سطح لوله، یک لایه پرایمر بر روی لوله قرار می‌گیرد. سپس یک پوشش میانی نظیر یک یا دو لایه نوار بر روی پرایمر پیچانده شده و بر روی این لایه‌ها، لایه آسفالت کشیده می‌شود. لایه آسفالت به صورت یک لفاف شامل آسفالت و یک مش از جنس فیبر شیشه می‌باشد که به آن لعاب آسفالت گفته می‌شود. به جای لعاب آسفالت می‌توان از لعاب قطران ذغال‌سنگ نیز استفاده نمود. محدوده حرارتی مناسب برای پوشش آسفالت ۴۰°C- تا ۶۶°C می‌باشد. دمای بالاتر از ۷۰°C توصیه نمی‌شود و همچنین زمانی که دمای سطح مشترک تحت دمای ۶۰°C قرار می‌گیرد نیز باید محتاطانه به موضوع توجه شود. البته قیر بهبود یافته با مواد کشسان یا لاستیک می‌تواند تا دمای ۸۰°C نیز بکار برده شود.

برای دریافت اطلاعات بیشتر و آشنایی با مشخصات فنی این پوشش می‌توانید به استانداردهای زیر یا تجارب Shell در این رابطه مراجعه نمایید:

BS 4147, EN 10300, GAZ de France R 01,
DNV RP-F-106 و Shell DEP 31.40.30.33



شکل ۶: مراحل پوشش لوله با آسفالت

شکل ۷: پوشش بتنی

پوشش‌های جدید

پلیمرها موادی با مشخصات مناسب برای استفاده به عنوان پوشش می‌باشند. پوشش‌های پلیمری از چسبندگی و دوام بسیار خوبی برخوردار می‌باشند و در فرایند حفاظت کاتدی کمترین اختلال را ایجاد می‌کنند. به دلیل ماهیت ساختمانی، مشخصات یک پلیمر را می‌توان به گونه‌ای تغییر داد تا برای یک کاربرد خاص وضعیت بهتری پیدا نماید. به همین دلیل امروزه از پلیمرها در ساخت بسیاری از وسایل خانگی و صنعتی استفاده می‌شود. حتی انواعی از پلیمرها وجود دارند که رسانای جریان الکتریکی می‌باشند. به دلایل اشاره شده و همچنین آسانی اجرا، ضخامت کم لایه عایق و هزینه قابل قبول، امروزه بیشتر پوشش‌های خط لوله از نوع پلیمری می‌باشند. از میان پوشش‌های پلیمری برخی در صنعت نفت و گاز از کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشند. این پوشش‌ها عبارتند از:

» پوشش پلی‌اتیلن اکسترود شده

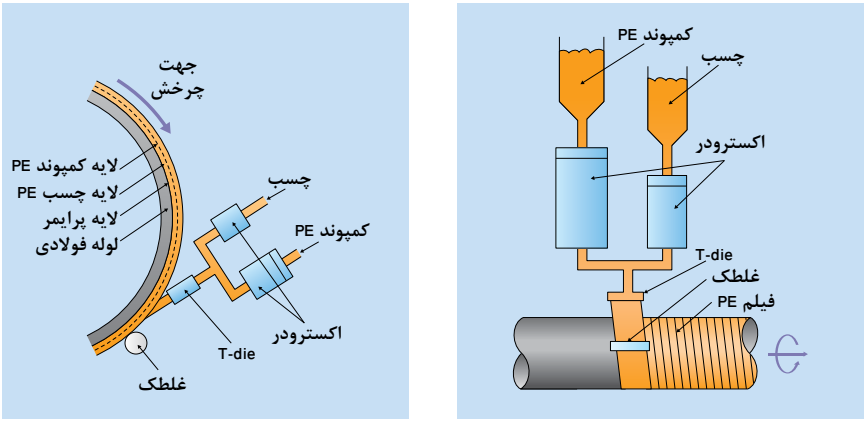
این نوع پوشش یعنی **Extruded PE** دارای قدمتی کمتر از نوار PE می‌باشد و قدمت آن به حدود ۴۰ سال پیش می‌رسد. این پوشش را با اکسترود از جلو برای لوله‌های تا ۲۴ اینچ و اکسترود از کنار برای لوله‌های تا ۱۲۰ اینچ می‌توان بکار گرفت. فرایند اکستروژن پوشش، معمولاً در کارخانه صورت می‌گیرد. این پوشش علاوه بر مقاومت عالی در برابر آب، گرما و سرما دارای مقاومت عالی در مقابل جداشدن از سطح لوله و نیز تنش‌های وارده از طرف خاک نیز می‌باشد. ضخامت ۱/۳mm ضخامت مناسبی برای بهترین مقاومت در مقابل صدمه می‌باشد. این نوع پوشش برای محدوده دمایی ۴۰°C- تا ۶۶°C مناسب می‌باشد.

» پوشش سه لایه پلی‌الفینی

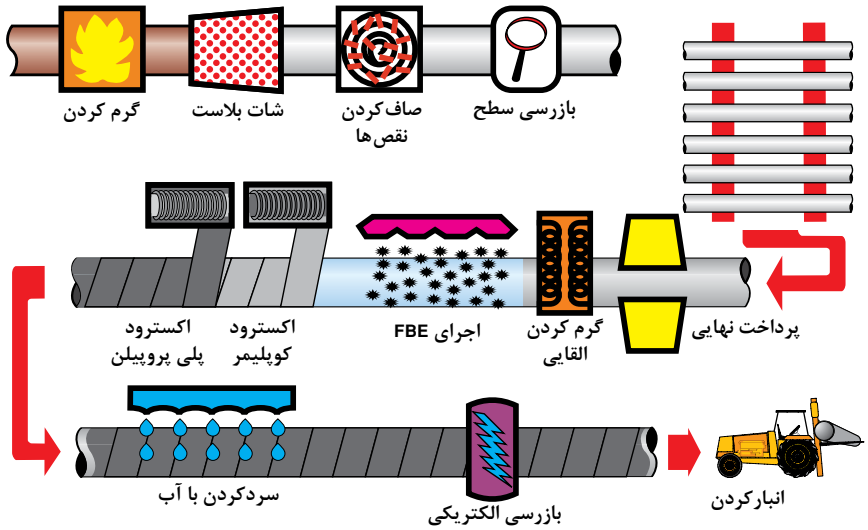
سیستم پوشش لوله پلی‌الیفینی سه لایه(PE/PU/PP) شامل آستر اپوکسی، چسبنده همبسپار(Copolymer) یک لایه پلی‌اتیلن، یک لایه پلی‌یورتان و یک لایه پلی‌پروپیلن می‌باشد. با توجه به دمای مجاز سه پوشش اشاره شده می‌تواند لایه‌های این نوع پوشش تغییر نماید و به سه لایه پلی‌پروپیلن یا پلی‌اتیلن و FBE تغییر کند. در ادامه دو نوع مختلف از پوشش‌های سه لایه شرح داده می‌شوند.

الف» پوشش سه لایه پلی‌پروپیلن

سیستم پوشش لوله پلی‌پروپیلن سه لایه(3LPP) یک پوشش چند لایه، مشابه پوشش سه لایه پلی‌اتیلن است که از لایه‌های FBE، چسب و پلی‌پروپیلن تشکیل شده است. پوشش پلی‌پروپیلن سه لایه ضمن مشخصات محافظتی مناسب در برابر خوردگی، از استحکام مکانیکی عالی نیز در دامنه دمایی گسترده برخوردار



شکل ۹: مرحله اعمال پوشش بر روی لوله

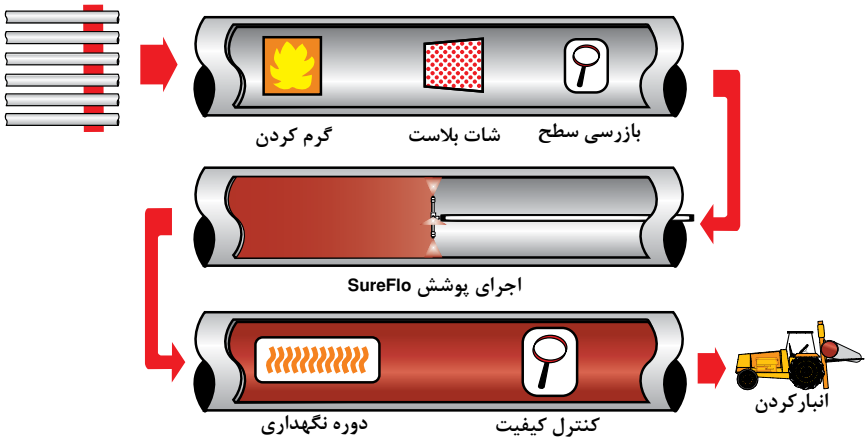


شکل ۱۰: پوشش FBE/PP

است. دمای کاربری پوشش پلی پروپیلن سه لایه تا ۱۱۰°C+ (قابل ارتقاء تا ۱۳۰°C+) می‌باشد. به همین دلیل این پوشش برای محیط‌های گرم یا سیال با دمای بالا نظیر انتقال نفت کوره مناسب‌تر از پوشش سه لایه پلی‌اتیلن می‌باشد.

ب» پوشش سه لایه پلی‌اتیلن

سیستم پوشش پلی‌اتیلن سه لایه، یک پوشش لوله چند لایه است که از FBE، چسب و پلی‌اتیلن با دانسیته بالا تشکیل شده است. پوشش لوله پلی‌اتیلن ۳ لایه از خواص مکانیکی مطلوبی به عنوان پوشش خطوط لوله با قطرهای پایین یا بالا در دماهای مختلف (تا ۸۰°C+) برخوردار می‌باشد. پوشش پلی اتیلن ۳ لایه برای حفاظت لوله‌های فولادی انتقال آب، نفت و گاز تحت فشار به کار برده می‌شود.



شکل ۱۱: پوشش داخلی اپوکسی یا دو جزئی

مزایای این پوشش به این شرح می‌باشد:

۱- مقاومت شیمیایی بالا
۲- مقاومت بالا در برابر ترک ناشی از تنش‌های محیطی
۳- مقاومت عایقی الکتریکی بالا و در نتیجه مصرف کم الکتریسیته برای حفاظت کاتدی
۴- چسبندگی خوب به سطح لوله
۵- مقاومت سایشی و خواص مکانیکی خوب
۶- قابلیت تحمل خمش
۷- توانایی کار در درجات حرارت ۴۰- تا ۸۰°C+
۸- مقاومت خوب به نفوذ آب و اکسیژن
۹- مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش
۱۰- پایداری بلند مدت

» پوشش نئوپرن

این پوشش به صورت ورقه‌های ضخیم ۱۲-۱۵mm از ورقه‌های کشسان پلی کلروپرن تشکیل شده است. این پوشش به صورت ورقه‌های کشسان اطراف لوله پیچیده شده و بر روی آن یک نوار نایلونی کشیده شده و سپس این مجموعه در داخل دیگ ولکانیزه آزمایشگاهی قرار داده می‌شود. این پوشش در دمای ویژه و فشار مشخص در زمانی در حدود ۲ ساعت بر روی لوله اجرا می گردد. واضح است که این پوشش برای کاربردهای عمومی، پوششی اقتصادی و عملی نمی‌باشد. این پوشش به صورت خاص مناسب لوله‌های Riser کنار سکوهای دریایی یا پوشش در خم‌های شدید کاربرد دارد.

» پوشش اپوکسی

پوشش اپوکسی، یک پوشش دو جزیی بر پایه رزین اپوکسی ویژه و سخت کننده پلی آمید خاص می‌باشد که به صورت تک لایه بر روی سطح اعمال می گردد و فیلم مقاومی در برابر عوامل خورنده ایجاد می کند. این رنگ بعد از کامل شدن واکنش، سطح بسیار سخت و مقاومی ایجاد می‌نماید که نسبت به خراش، سایش و مواد شیمیایی، مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. این پوشش در شرایط آب و هوایی حاد می تواند سطوح داخلی و خارجی لوله‌ها را در مقابل عوامل خورنده و مواد خارجی محافظت نماید. گستره وسیع مواد پایه اپوکسی، باعث تنوع خواص و کاربرد آن گردیده است. رزین این پوشش می تواند شامل اپوکسی، پلی اورتان و پلی اوره باشد.

» پوشش اپوکسی فنولیک

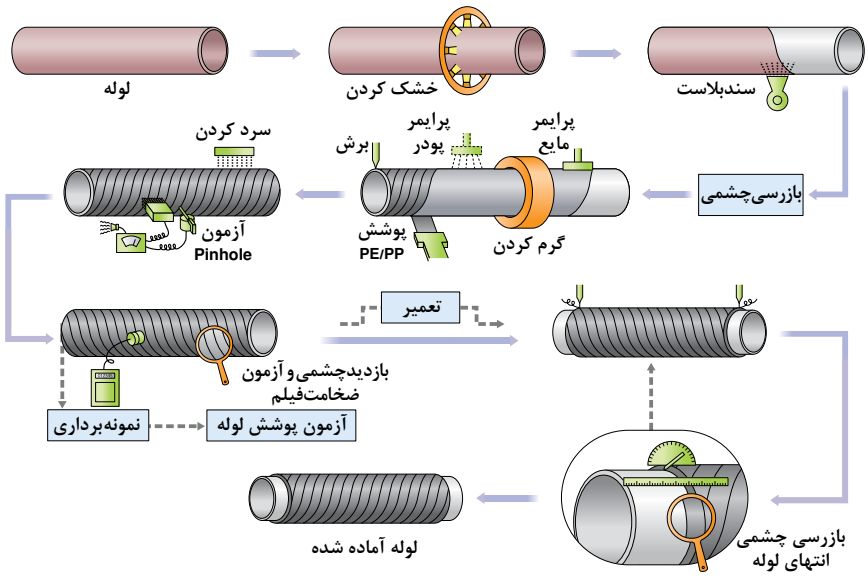
این پوشش با حلالیت آزاد را می توان به صورت پاششی تا ضخامت ۱/۲mm استفاده نمود. این پوشش دارای عمکردی مشابه FBE است به جز آنکه محدوده دمایی این پوشش تا ۱۶۰°C افزایش می‌یابد. این پوشش می‌تواند برای سرویس‌های داغ نظیر انتقال نفت‌خام یا سایر سیالات با گراویتی کم استفاده شود.

» سیستم پوشش بیتوسیل

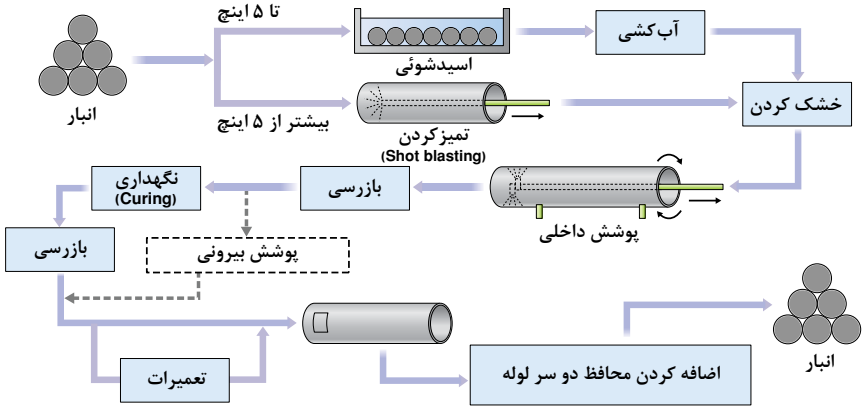
پوشش بیتوسیل (Bituseal® Coating System) حاصل تحقیقات مشترک شرکت نفتی شل و شرکت فنیکس (Phoenix) می‌باشد. این پوشش ضمن برخورداری از ویژگی‌های یک پوشش برتر به لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. بیتوسیل، پوشش قیر پایه نفتی است که خواص آن با مواد پلیمری بهبود یافته است. پوشش بیتوسیل به صورت گرم بر روی لوله با ضخامت حداقل ۴ میلیمتر اجرا شده و عملکردی عالی در طی دوره بهره‌برداری از خط لوله دارد. از ویژگی‌های بارز این پوشش می توان به عدم جدایش کاتدیک، مقاومت در برابر تنش‌های خاک و چسبندگی بالا اشاره نمود.

یکی از مزایای کلیدی هر سیستم پوششی، یکنواختی آن در کل خط لوله اعم از سر جوش‌ها و بدنه لوله می باشد. این نکته بخصوص در زمینه حفاظت کاتدی و طراحی ولتاژ لازم جهت حفاظت خط لوله، از اهمیت خاصی برخوردار است. استفاده از نوار سرجوش غشاء بیتوسیل امکان دستیابی به یکپارچگی عایق در کل خط لوله که همگی از جنس بیتوسیل یا قیر پایه نفتی است، را فراهم می سازد. پوشش بیتوسیل دارای استاندارد اروپایی EN۱۰۳۰۰ و مورد تائید شرکت‌های معتبری نظیر شل می‌باشد.

نوار غشا سرجوش بیتوسیل (Bituseal® Membrane) به عنوان یکی از اجزاء سیستم پوششی مطابق با استانداردهای بین‌المللی تولید می گردد و به لحاظ فنی و اقتصادی یک پوشش سرجوش منحصربه‌فرد و جایگزین مناسبی برای دیگر سیستم‌های پوشش نواری به شمار می‌رود که از نقطه نظر حفاظت کاتدی و خواص فیزیکی پوشش، کاملاً با پوشش قیر پایه نفتی، اعم از بیتومن و بیتوسیل سازگار و هماهنگ است.



شکل ۱۲: مراحل پوشش لوله با سه لایه پلی‌اتیلن



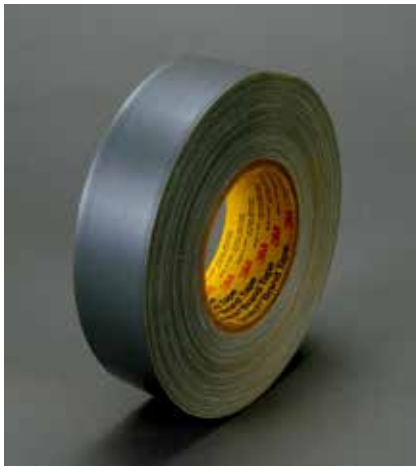
شکل ۱۳: مراحل پوشش داخلی لوله

در صورت نیاز یک لایه پلی پروپیلن به ضخامت ۲- ۱ میلیمتر نیز با هدف تقویت مقاومت مکانیکی، برروی پوشش بیتوسیل اکسترود می گردد. سیستم بیتوسیل همچنین پوششی بی‌نظیر جهت خطوط لوله دریایی، هم از لحاظ محافظت خط لوله و هم از لحاظ سازگاری با اندود سیمانی به شمار می‌رود. یکپارچگی پوشش بیتوسیل در سراسر خط لوله با استفاده از نوار غشا سرجوش بیتوسیل حفظ می‌شود.

از مهمترین ویژگی‌های نوار غشا می توان به سهولت کاربرد، صرفه اقتصادی، چسبندگی بالای آن به سطح فلز و پوشش اصلی و کاربرد بعنوان پوشش اتصالات و شیرآلات خطوط لوله اشاره کرد. غشا بیتوسیل علاوه بر سیستم بیتوسیل با انواع مختلف پوشش ها از قبیل پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن سه‌لایه، بیتومن و کلتار نیز سازگاری دارد. برخی از ویژگی های سیستم پوشش بیتوسیل عبارتند از:

۱- مقاومت خیلی زیاد در برابر جدایش کاتدی
۲- چسبندگی خیلی زیاد به سطح لوله
۳- خاصیت خود ترمیمی
۴- سازگاری با فرایند حفاظت کاتدی و عدم Shielding جریان
۵- خم‌پذیری و قابلیت ازدیاد طول خیلی زیاد
۶- مقاومت بالا در برابر تنش‌های خاک و SCC
۷- دمای کاربری تا ۹۰+ درجه سانتیگراد
۸- عاری بودن از اثرات نامطلوب زیست محیطی

سیستم بیتوسیل غالباً از ۳ بخش تشکیل می‌شود. بخش اول پرایمر می‌باشد که برای چسبیدن بیشتر به لوله، تقویت شده است. بخش دوم لعاب بیتوسیل می‌باشد که استحکام و دوام زیادی دارد. بخش سوم، لایه بیرونی می‌باشد که به منظور داشتن استحکام کافی در برابر ضربات مکانیکی از یک فیبر شیشه تقویت شده با پلی‌استر تشکیل شده است.



شکل ۱۴: نوار پلی‌اتیلن

شکل ۱۵: پوشش با نوار انقباضی حرارتی

» نوارهای PE or PVC

قدمت استفاده از این نوارها به عنوان پوشش به اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی می‌رسد. نوارپیچی می تواند داخل کارخانه یا در محل استفاده صورت پذیرد. هرکدام از این روش ها دارای محاسن و معایبی می‌باشند. نوارپیچی و اجرای پوشش در کارخانه از دقت بیشتری برخوردار است و سطح لوله قبل از نوارپیچی به خوبی باید تمیز و آماده شود. در عوض در موقع حمل و نقل احتمال آسیب دیدن پوشش وجود دارد. با این حال غالباً نوارپیچی در کارخانه ترجیح داده می‌شود. در این حالت بهتر است تعداد دفعات حمل و نقل کاهش داده شوند. نوارپیچی در محل اجرا مشکل تر بوده و تمیزکاری و آماده کردن سطح لوله نیز مشکل تر می‌باشد. اما پرسنل باتجربه قادرند نوارپیچی در محل را با کیفیت نوارپیچی در کارخانه به انجام رسانند. اما به صورت معمول جداشدن پوشش از لوله بیشتر در مورد نوارپیچی در محل روی می‌دهد. جریان مورد نیاز برای حفاظت کاتدی لوله‌های نوارپیچی‌شده کاهش می‌یابد و اگر جنس پوشش مناسب نباشد یا پوشش به خوبی اجرا نشود به جریان حفاظت کاتدی بیشتری نیاز است و در اثر آن امکان جداشدن پوشش از سطح لوله افزایش می‌یابد و امکان خوردگی از نوع تردی هیدروژنی نیز افزایش پیدا می کند. نوارهای PVC در حال حاضر کاربرد چندانی ندارند، اما از نوارهای PE همچنان در صنعت نفت و گاز به ویژه برای پایپینگ در سایزهای پایین یا حجم کم استفاده می‌شود. این نوع پوشش برای محدوده دمایی ۲۳°C- تا ۶۶°C مناسب می‌باشد. نوارهای PE در دو نوع سرد و نوع جمع‌شونده به وسیله حرارت وجود دارند. برای محافظت لوله و اتصالات در مسیرهای سنگلاخی از نوارهایی با استحکام بالا و ضخامت زیاد تحت عنوان Rock Shield استفاده می‌شود. شکل ۱۵ نوار پلی‌اتیلن ساخت شرکت ۳M و شکل ۱۶ نوارپیچی به وسیله نوار پلی‌اتیلن را نشان می‌دهد.

شکل ۱۶: پوشش با نوار پلی‌اتیلن

» پوشش Somastic

این پوشش یک ماستیک قابل اکسترود شامل قیر اکسید مخلوط با مواد پرکننده معدنی می‌باشد. ماستیک گرم به صورت مارپیچ روی لوله اکسترود می‌شود و پوششی بدون مرز با ضخامت تقریبی ۱۵mm را تشکیل می‌دهد. این پوشش از استحکام مکانیکی ضعیفی برخوردار است و امروزه کاربردی ندارد.

» پوشش FBE

پوشش [پودری] اپوکسی اتصال ذوبی که به آن FBE(Fusion Bonded Epoxy[Powder]) یک پوشش محافظ در مقابل خوردگی برپایه اپوکسی می‌باشد که به صورت گسترده برای پوشش خطوط لوله فولادی، شیرآلات، اتصالات و آرماتور (Reinforcing bars) داخل بتن کاربرد دارد. پوشش FBE یک پوشش لوله مدرن با کارایی بالا از جنس پلیمر گرماسخت (Thermoset polymer) است که ضمن چسبندگی عالی به سطح فولاد و حفاظت مناسب، هم‌خوانی بی‌نظیری با فرآیند حفاظت کاتدی دارد. علاوه بر آن این پوشش دوام زیادی داشته و اجرای آن نیز آسان می‌باشد. نام این پوشش برگرفته از رزین با اتصال عرضی (Cross-link) و همچنین روش استفاده از آن می‌باشد که آن را از سایر پوشش‌های متداول متفاوت کرده است. پوشش FBE ترکیبی جامد و فاقد حلال می‌باشد و از رزین اپوکسی نظیر DGEBA[DiGlycidyl Ether of Bisphenol A]، عوامل سخت کننده [Hardners] نظیر دی‌آمین‌های آروماتیک، رنگدانه، کاتالیست و تسریع کننده، عوامل روان‌کننده و تثبیت کننده و عوامل سازنده دیگر نظیر پرکننده‌ها، حجم‌دهنده‌ها و ... تشکیل شده است.

رزین و ترکیبات سخت کننده در حالت پودر و درکنار هم در شرایط عادی بدون تاثیر بر روی هم و انجام واکنش باقی می‌مانند. برای انجام پوشش دما تا محدوده ۱۸۰ تا ۲۵۰°C بالا برده می‌شود. در این حالت پودر ذوب شده و همانند مایع روان‌شده و همانند یک فیلم نازک سطح فولاد را می‌پوشاند. با کاهش دما FBE یک پوشش جامد Cross-link تشکیل می‌شود. به این فرایند، Fusion bonding گفته می‌شود. این پوشش جامد، در اثر حرارت مجدد نمی‌تواند ذوب شده و به حالت اول برگردد و یک پوشش Thermoset بر روی فولاد باقی خواهد ماند. این پوشش در حالت خاص قابلیت تحمل دما در محدوده ۷۳°C- تا ۱۵۰°C را بسته به درجه (Grade)، نوع خاک و رطوبت، ضخامت پوشش و سایر شرایط دارا می‌باشد. اما به صورت معمول در بیشتر کاربردها محدوده حرارتی مناسب این پوشش ۳۰°C- تا ۱۱۰°C می‌باشد. به صورت دسته‌بندی شده می‌توان مزایای این پوشش را اینگونه عنوان نمود:

۱- چسبندگی بسیار زیاد به سطح لوله
۲- مقاومت عالی در مقابل جدا شدن کاتدی (Cathodic disbandment)
۳- مقاومت مکانیکی و انعطاف‌پذیری بالا
۲- ثبات و مقاومت در مقابل دمای بالا
۳- مقاومت خوب در مقابل ترکیبات شیمیایی خاک یا محیط دریا
۴- تشخیص آسان آسیب پوشش و تعمیر آن
۴- عدم Shielding در سیستم حفاظت کاتدی
۵- یکپارچگی پوشش لوله، سرجوش‌ها و اتصالات
۶- امکان اجرای یک یا دو لایه

استفاده از این پوشش از اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی با پوشش نواحی جوش کاری شده[سرجوش] شروع شد و به تدریج به اتصالات، شیرآلات و بدنه لوله گسترش یافت. این پوشش کمترین زیان را برای محیط زیست دارد.

پوشش FBE را بسته به نوع کاربرد می‌توان در یک یا دو لایه اجرا نمود. در پوشش‌های دولایه، لایه زیرین حفاظت سطح لوله را در مقابل خوردگی و لایه رویی حفاظت مکانیکی پوشش را تامین می‌کند. امتیاز پوشش دولایه نسبت به پوشش تک لایه تنوع خواص فیزیکی لایه رویی متناسب با نیازهای خط لوله است. بر این اساس لایه دوم را می‌توان مقاوم در برابر خراشیدگی و نفوذ اجسام صلب یا انعطاف پذیر و یا حتی با زبری بالا به منظور ایجاد بستر مناسب جهت اندود سیمانی در خطوط لوله دریایی انتخاب نمود. ضخامت متعارف پوشش تک لایه ۵۰۰ -۳۵۰ و پوشش دولایه ۱۰۰۰- ۷۰۰ میکرون می‌باشد. از طرف دیگر در خطوط لوله روزمینی امکان اعمال لایه پودری سوم به منظور افزایش مقاومت پوشش در برابر اشعه UV وجود دارد. برای رعایت موارد استاندارد با توجه به تجارب می‌توانید به NACE RP 0394, CSA Z245.20, GAZ de France R 09, NF A 49 70 6, AWWA C 213, GBE/CW 6, AS3862:2002 مراجعه نمود.

» پوشش دولایه FBE

برای افزایش قابلیت‌های پوشش FBE می‌توان آن را در دولایه به کار گرفت. در این حالت لایه زیرین مشابه پوشش عادی FBE می‌باشد و پوشش‌دوم باعث تقویت مقاومت پوشش در مقابل خراش و فرسایش در شرایط سخت نظیر عبور لوله از زیر جاده‌ها یا عرض رودخانه‌ها در سیستم HDD[Horizontal Directional Drilling] می‌شود. این پوشش همچنین مقاومت در مقابل دمای بالا در شرایط محیطی مرطوب را بهبوده بخشیده و همچنین Anti slip می‌باشد.

» پوشش پلی‌اتیلن زینترشده

کاربرد این پوشش مشابه FBE می‌باشد.

» پوشش داخلی FBE

پوشش پودری FBE ایده‌آل‌ترین پوشش داخلی جهت محافظت لوله و اتصالات است که اجرای آن نیازمند دانش فنی بالا و خط تولید کاملا ویژه می باشد. کارآیی بسیار بالای پوشش های داخلی FBE در محافظت خطوط لوله انتقال گاز ترش و افزایش بازدهی انتقال گاز به اثبات رسیده است. ویژگی‌های دیگر این پوشش همانند پوشش‌های تک لایه FBE سطوح خارجی است، علاوه بر این، مشخصات زیر را نیز می توان ذکر نمود:

۱- سطح کاملا صاف و صیقلی
۲- مقاومت فوق العاده در برابر انواع واکنشگرهای شیمیایی و از جمله H_2S و CO_2
۳- مقاوم در برابر محیط های اسیدی و تغییرات pH
۴- عدم اثرگذاری شیمیایی بر روی سیال و بویژه آب آشامیدنی
۵- استفاده به عنوان پوشش داخلی لوله‌ها و سایر سازه‌های لوله‌ای شکل حفاری

» پوشش‌های دماهای خیلی بالا/ خیلی پایین

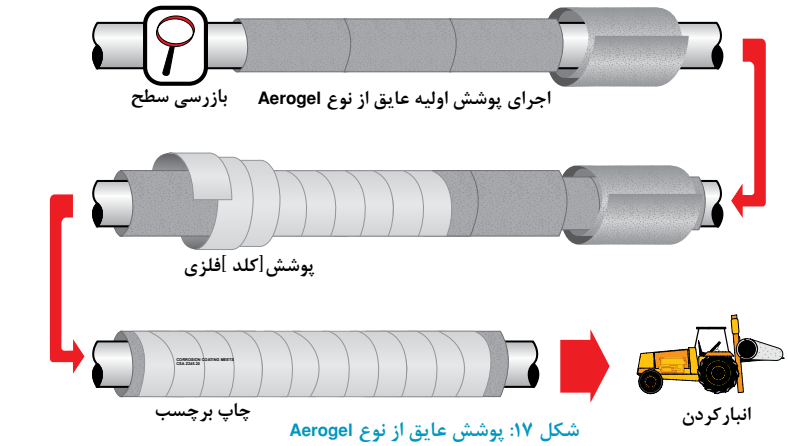
گاهی لازم است که یک سیال با دمای خیلی بالا یا دمای خیلی پایین در یک مسیر کوتاه یا مسیر طولانی انتقال داده شود. در بیشتر اوقات علاوه بر پوشش ضدخوردگی لازم است که تا حد ممکن پوشش در مقابل تغییرات حرارتی نیز عایق باشد. به عنوان مثال برای انتقال نفت کوره از پالایشگاه به یک ترمینال صادراتی کیلومترها باید نفت کوره منتقل شود. در دمای محیط نفت کوره دارای گرانروی بالایی است و در عمل به عنوان یک سیال قابل انتقال نمی‌باشد. به همین دلیل نفت کوره را حرارت داده و در دمایی نزدیک به ۱۲۰°C آن را به خط لوله تزریق می کنند. در این دما بیشتر پوشش‌ها کیفیت خود را ازدست می‌دهند و از سطح لوله جدا می‌شوند. از طرف دیگر لازم است لوله به اندازه کافی عایق حرارت باشد تا در مسیر انتقال لازم نباشد یک ایستگاه برای گرم کردن مجدد سیال احداث شود. باید دقت نمود که بیشتر اوقات دمای سیال داخل لوله نسبت به دمای محیط دارای دمای بیشتر یا کمتری می‌باشد و میزان این تفاوت نیز ممکن است زیاد باشد. به عنوان مثال انتقال یک سیال با دمای ۱۲۰°C با انتقال یک سیال با دمای ۱۲۰°C- دارای شرایط کاملاً متفاوتی می‌باشد. عایق‌های حرارتی معمول می توانند بر پایه مواد معدنی نظیر

پرلیت، پشم شیشه، پشم سنگ، گیاهی نظیر پشم چوب، مواد آلی نظیر EPDM، پلی پروپیلن یا پلی یورتان، ساختارهای متخلخل نظیر ایروژل (Aerogel) یا ترکیبی از آنها باشند. پوشش‌های عایق پلیمری در محدوده وسیعی برای انتقال سیال‌ها کاربرد دارند و به راحتی می‌توانند در یک سیستم در کنار پوشش ضد خوردگی قرار گیرند. این عایق‌ها برای عایق کاری داخل محدوده پالایشگاه‌ها یا مجتمع‌های پتروشیمی عایق‌های معدنی کاملاً کاربرد دارند. برای ایجاد پوشش عایق در دماهای خیلی پایین یا خیلی بالا Aerogelها کاربرد دارند. میزان عایق بودن این ماده در برابر حرارت ۰/۰۰۸W/m.K است که در مقابل میزان عایق بودن بتن در برابر حرارت که در حدود ۱/۵W/m.K می‌باشد، کاملاً قابل توجه است. شرکت Brederoshaw لوله‌هایی با پوشش عایق از نوع Aerogel معرفی کرده که در محدوده حرارتی ۲۷۰°C- تا ۶۵۰°C کاربرد دارد. کاملاً واضح است که این محدوده تقریباً همه کاربردهای ممکن را در بر می‌گیرد. در شکل ۱۷ می‌توانید مراحل اجرای این پوشش را مشاهده نمایید.

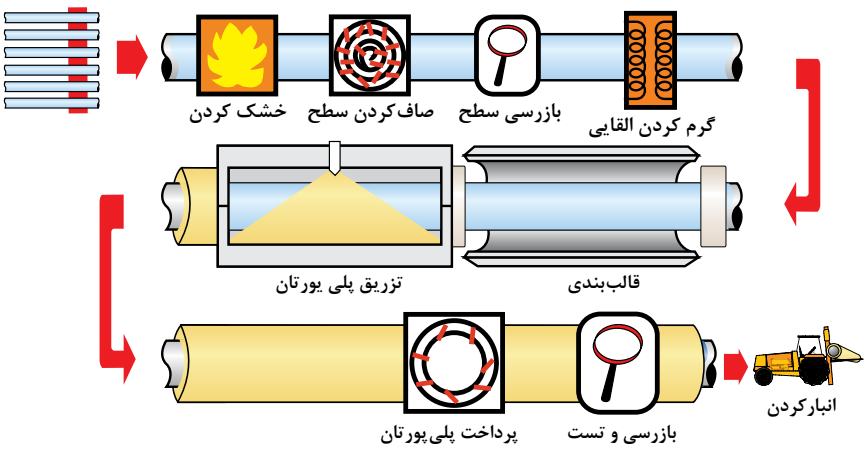
علاوه بر پوشش‌ضدخوردگی و عایق حرارتی در صنعت نفت و گاز عایق‌های ضد حریق یا مقاوم در مقابل آتش‌سوزی و گسترش آتش‌سوزی نیز کاربرد دارند. این پوشش‌ها خاص پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های پتروشیمی و سایر تاسیسات نفت و گاز می‌باشند و در خطوط لوله کاربرد ندارند. این پوشش‌ها نیز می‌توانند بر پایه مواد معدنی با نام Vermiculite یا بر پایه موادآلی و پلیمرهای بادکننده با نام Intumescent ساخته شوند. هنگامی که از این پوشش‌های استفاده می‌شود، می‌توان آنها را با پوشش‌های ضدخوردگی یا عایق‌ها در یک سیستم بکار برد. البته باید دقت نمود که این نوع پوشش چندان به بحث جاری ما ارتباط ندارد.

» پوشش‌های بستر دریا

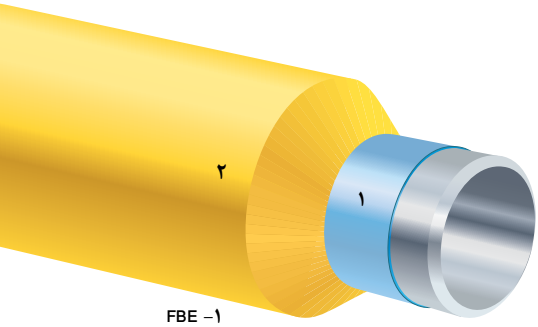
بستر دریا یکی از سخت‌ترین شرایط برای خطوط لوله می‌باشد. آب دریا غالباً دارای املاح خورنده می‌باشد و وجود آب کافی باعث تسریع در خوردگی لوله و اتصالات می‌شود. از طرف دیگر لوله و اتصالات می‌توانند مورد حمله موجودات آبزی قرار گیرند. چسبیدن مرجان‌ها، جلبک‌ها و برخی از آبزیان به سطح لوله نیز خوردگی را تسریع می‌بخشد. از طرف دیگر در بستر دریا حفاظت کاتدی نیز وجود ندارد و همچنین فشار آب باعث تخریب یا لغزیدن پوشش‌ها می‌شود. به همین جهت پوشش لوله و اتصالات برای استفاده در بستر دریا دارای تفاوت‌های



شکل ۱۷: پوشش عایق از نوع Aerogel



شکل ۱۸: پوشش عایق حرارتی پلی‌یورتان



۱- FBE
۲- پلی یورتان

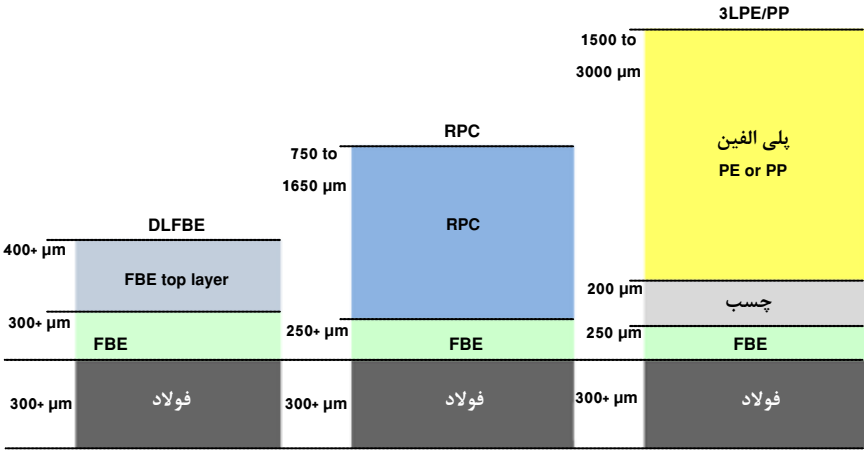
شکل ۱۸

اساسی با خطوط لوله زمینی دارد. لوله و اتصالات در این محیط می‌توانند تحت تاثیر خوردگی‌های شیمیایی، فرسایش و ضربات مکانیکی قرار گیرند. از گذشته به صورت گسترده از پوشش بتنی برای ایجاد حفاظت برای لوله و اتصالات در دریا استفاده می‌شد. این نوع پوشش علاوه بر تامین حفاظت خوردگی باعث سنگین شدن و ثابت باقی ماندن لوله می‌گردد. اما با این حال پوشش‌های بتنی دارای معایب متعددی می‌باشند. به همین جهت در سال‌های اخیر سعی شده تا از پلیمرها برای پوشش خطوط لوله دریایی و فراساحل استفاده شود.

پلیمرهایی نظیر FBE، پلی‌اتیلن یا پلی‌اورتان حفاظت خوبی برای سطح لوله ایجاد می‌کنند. برای ایجاد یک محافظت مضاعف می‌توان با یک روش مناسب از پوشش پلیمری اولیه به وسیله یک پوشش ثانویه محافظت نمود. خوشبختانه پوشش‌های پلیمری به خوبی می‌توانند به عنوان پوشش نهایی لوله استفاده شوند.

» پوشش‌های عایق حرارتی

عموماً خاک عایق خوبی است و زمانی که لوله در داخل خاک مدفون می‌شود، نباید زیاد نگران تبادل حرارتی آن با محیط بود. اما در داخل آب این قضیه متفاوت است و جریان آب به سرعت می‌تواند دمای لوله و سیال را به دمای محیط نزدیک کند. به همین دلیل برای خطوط لوله دریایی به عایق حرارتی لوله توجه می‌شود. شکل ۱۸ پوشش لوله دریایی که همزمان عایق حرارتی نیز می‌باشد را نشان می‌دهد. این لوله که ساخت شرکت Brederoshaw می‌باشد و با نام تجاری Thermoflo® به بازار ارائه می‌شود، می‌تواند در محدوده دمایی ۷۳°C- تا ۱۵۰°C و عمق ۲۸۰۰ متری آب مورد استفاده قرار گیرد. عایق بودن این پوشش ۰/۱۵۵-۰/۱۷W/m.K می‌باشد. می‌توان پوشش محافظ در مقابل خوردگی و عایق حرارتی را با هم به کار برد. این ترکیب مشابه پوشش‌های چند لایه می‌باشد که لایه رویی را عایق حرارتی تشکیل می‌دهد. در کاربردهای معمول این لایه عایق می‌تواند یک لایه اسفنجی از پلی پروپیلن یا پلی یورتان باشد.



شکل ۱۹: ضخامت معمول در استفاده از چند نمونه پوشش‌های مختلف

» خلاصه

در این مبحث بیشتر پوشش‌های مرسوم در خطوط لوله و پایپینگ معرفی شدند. توسعه سریع صنعت پتروشیمی و ساخت پلیمرهای جدید به صورت مستمر باعث ارتقاء کیفیت و کاهش هزینه‌ها و افزایش طول عمر و دوام پوشش‌ها شده است. در حال حاضر از پوشش‌ها با توجه به شرایط محیطی و مشخصات مورد نیاز به روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. به صورت خلاصه می‌توان گفت: می‌توان برای به‌دست آوردن پوشش مناسب، ترکیبی از برخی از پوشش‌های را به‌کار برد. پوشش‌ها را می‌توان به صورت گرم یا سرد به کار برد. در مرحله ساخت لوله، در پایان فرایند ساخت در کارخانه، لوله پوشش داده می‌شود. در این صورت سطح لوله، خوردگی و آلودگی کمتری نسبت به لوله‌های ساخته‌شده از قبل دارد. امروزه اجرای آسان پوشش و امکان اجرای پوشش گرم در محل اجرا، اهمیت بیشتری یافته است. برخی از پوشش‌ها به آسانی در محل اجرا شده و برای پوشاندن سرجوش‌ها و یکپارچه نمودن آن با پوشش لوله کاملاً مناسب می‌باشند. در گذشته از پوشش‌های سرد یا نواری برای پوشش سرجوش و همچنین پوشش لوله در مقادیر کم استفاده می‌شد و اجرای آنها در نزدیکی محل ساخت خط لوله یا تاسیسات انجام می‌شد. پوشش نواری PVC به دلیل برتری نوارهای پلی‌اتیلن، کاربرد چندانی ندارد. همچنین پوشش پلی‌پروپیلن نیز به دلیل گرانی فقط برای پوشش سیالات با دمای بالا کاربرد دارد. البته باید توجه کرد که که پوشش‌های پلیمری همواره در حال توسعه می‌باشند و هرکدام پس از یک دوره تحقیق و توسعه توسط موسسات تحقیقاتی و شرکت‌های مواد شیمیایی نظیر Depont, 3M, DOW, ... مجدد با کیفیت و قیمت رقابتی به صحنه بر می‌گردند.

			Rubber	
	FBE	3LPP	Polychloroprene	EPDM
حداکثر دمای عملیاتی	۸۵°C	۱۳۰°C	۹۵°C	۱۳۰°C
حداکثر عمق آب	نامحدود	نامحدود	نامحدود	نامحدود
حداکثر ضخامت	۱ mm	۲/۵ mm	۲۵ mm	۲۵ mm
K-Value	۰/۳ W/mK	۰/۲۲ w/mK	۰/۳۵ w/mK	۰/۳۵ w/mK
چگالی	۱۴۵۰ kg/m^3	۹۰۰ kg/m^3	۱۳۴۰ kg/m^3	۱۱۲۰ kg/m^3
OHTC (U Value)	-	-	۱۵ W/m^{2}K	۱۵ W/m^{2}K

جدول ۱: مقایسه مشخصات چند نمونه پوشش معمول

	ThermoFlo® Product Line			
	Solid Polyurethane	Syntactic Polyurethane	Glass Syntatic Polyurethane	Polyurethane Foam
حداکثر دمای عملیاتی	۱۲۵°C	۱۲۵°C	۱۱۵°C	۱۰۰°C
حداکثر عمق آب	نامحدود	۳۰۰ m	۲۴۰۰ m	۱۵۰ m
حداکثر ضخامت	۲۰۰ mm	۲۰۰ mm	۲۰۰ mm	۱۵۰ mm
K-Value	۰/۱۹۵ W/mK	۰/۱۲ w/mK	۰/۱۶۵ w/mK	۰/۰۶ w/mK
چگالی	۱۱۵۰ kg/m^3	۷۰۰ kg/m^3	۸۶۰ kg/m^3	۳۶۰ kg/m^3
OHTC (U Value)	۲ W/m^{2}K	۱ W/m^{2}K	۱/۵ W/m^{2}K	۱ W/m^{2}K

جدول ۲: مقایسه مشخصات پوشش ساخت شرکت Brederoshaw

» فعالیت‌های مرتبط با پوشش

به صورت خلاصه می‌توان برخی از فعالیت‌های مرتبط با پوشش لوله نظیر آماده‌سازی سطح و بازرسی را اینگونه شرح داد:

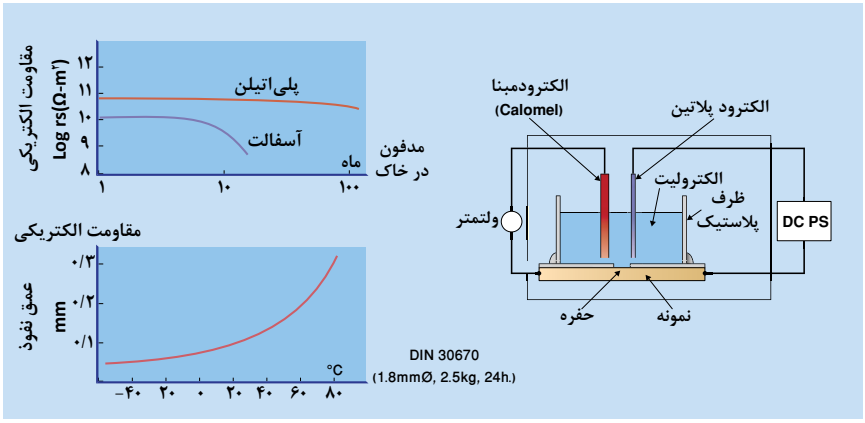
» بازرسی

قبل از شروع عملیات اجرای پوشش کیفیت لوله و سطح آن به صورت چشمی و در صورت نیاز به وسیله تجهیزات بازرسی می‌شود. پس از اجرای پوشش برای بررسی کیفیت و وضعیت پوشش، ابتدا به صورت چشمی و سپس به وسیله تجهیزات مخصوص پوشش بازرسی می‌شود. معمول‌ترین بازرسی پوشش، منفذیابی به وسیله آشکارسازی هالیدی (Holiday detection) می‌باشد. در طی این آزمون حفره‌ها و ناپیوستگی‌ها کشف می‌شود. این آزمون می‌تواند بر طبق استاندارد AS 3894.1, ASTM G62 یا استانداردهای ملی انجام شود. برای اطمینان از کیفیت پوشش آزمون‌های متعددی مطابق ASTM یا برخی استانداردهای دیگر وجود دارد که مناسب بودن کیفیت مواد مورد استفاده به عنوان پوشش را تضمین می‌کنند. همچنین آزمون‌های مخرب و غیرمخرب متعددی برای اطمینان از استحکام و چسبندگی یا مقاومت پوشش در مقابل شرایط مختلف آب و هوایی و پارامترهای دیگر وجود دارد. برخی از آزمون‌های معمول غیرمخرب در مرحله اجرا عبارت از Film thickness test و Pinhole test می‌باشند.

به صورت دسته‌بندی شده می‌توان بازرسی‌های داخلی را به: بازرسی چشمی، بازرسی ضخامت لایه خشک DFT[Dry Film Thickness]، زبری سطح و تست آزمایشگاهی تقسیم نمود. همچنین بازرسی‌های سطح خارجی لوله را می‌توان به: بازرسی چشمی، آشکارسازی غیریکنواختی و سوراخ‌های سوزنی توسط Holiday detection، بررسی ضخامت لوله، بررسی چسبندگی، عدم اتصال کاتدی نظیر تست ASTM G8 و تست آزمایشگاهی تقسیم نمود. تست‌های آزمایشگاهی نیز عبارتند از اندازه گیری: مقاومت نسبت به باکتری، جذب آب، قابلیت هدایت حرارتی، چگالی، مدول الاستیسیته، استحکام کششی، انبساط خطی و نقطه نرم گردانی (Softening point) و نفوذ [فقط انامل‌ها]

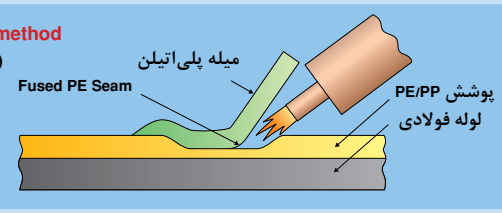
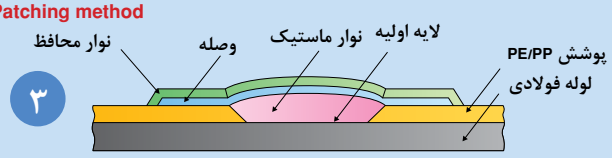
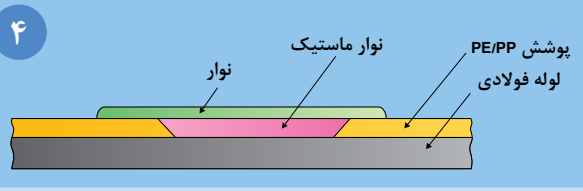
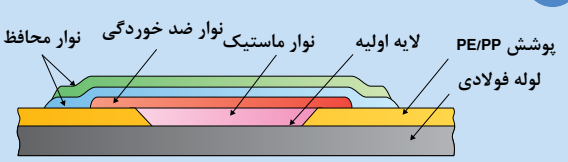
» آماده‌سازی سطح

ابتدا سطح فولاد با شستشو به وسیله آب داغ یا بخار و در موارد خاص به وسیله اسیدفسفریک رقیق تمیز می‌شود. سپس برای تمیزکاری و همچنین ایجاد زبری مناسب برای ایجاد بهترین شرایط برای چسبیدن پوشش به سطح لوله از ماسه‌پاشی (Sand blasting) یا ساچمه‌پاشی (Shot blasting) یا Grit blasting استفاده می‌شود. سندبلاست به وسیله پاشش دانه‌های



شکل ۲۰: Disbondment

سیلیس با دانه‌بندی با اندازه حداکثر ۲۰۰ میکرون یا مواد سخت دیگر نظیر سرباره مس انجام می‌شود. اما به دلایل مشکلاتی که پودر دانه‌های سیلیس برای تنفس و سلامتی ایجاد می کند، استفاده از آن در حال کاهش می‌باشد. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌هایی نظیر ساچمه‌پاشی (Grit/Shot Blasting) گسترش بیشتر یافته و استفاده از روش‌هایی نظیر ice blasting نیز در حال کاربردی شدن می‌باشد. برای تمیزکاری داخل لوله با قطر بیشتر از ۵ اینچ نیز از همین روش استفاده می‌شود، اما برای تمیزکاری لوله با قطر کمتر معمولاً از روش اسیدشویی استفاده می‌شود. در روش اسیدشویی ممکن است تمیزی مورد نظر حاصل شود، اما زبری کافی حاصل نمی‌شود. در انتهای این فرایند به وسیله هوای فشره ذرات جامد باقی مانده از سطح لوله زدوده می‌شوند. تمیزکاری سطوح لوله در صنعت نفت و گاز عموماً بر اساس کد استاندارد سوئدی SIS 055900 انجام می‌شود. اندازه‌گیری می‌تواند بر

نوع آسیب	روش تعمیر
آسیب خیلی کوچک عمق کمتر از ۰/۲mm	Grinding Method ۱ برداشتن آسیب به وسیله کاغذ سنباده
آسیب کوچک طول کمتر از ۰/۲۵۰mm و آسیب به سطح لوله نرسیده باشد.	Embedding method (PE/PP Stick) ۲ 
آسیب متوسط طول کمتر از ۰/۲۵۰mm و اینکه آسیب به سطح لوله رسیده باشد.	Patching method ۳ 
آسیب بزرگ طول بیشتر از ۰/۲۵۰mm و آسیب به سطح لوله رسیده باشد.	Shrinkable cover method ۴ 
همانند ردیف بالا	Anti corrosion tape method ۵ 

شکل ۲۱: تعمیر پوشش

شکل ۲۲: آزمایش هالیدی

اساس الگوی تمیزی Kean tator انجام شود. به صورت معمول سطح تمیز شده باید دارای ظاهر خاکستری[کیفیت سطح Sa 2.5 مطابق ISO 8501-1] باشد. بلافاصله بعد از تمیزکاری باید اجرای پرایمر و پوشش انجام شود. برای اجرای تمیزکاری رطوبت نسبی باید کمتر از ۸۵٪ بوده و دمای سطح فولاد نیز ۳°C بالاتر از نقطه شبنم باشد. گرم کردن لوله را می‌توان به وسیله شعله گاز انجام داد.

» پیش‌گرمایش

برای خشک کردن مایعات موجود بر سطح لوله قبل از هر نوع تمیزکاری لوله را گرم می‌کنند. به دلایل مختلف ممکن است لوله در چندین مرحله گرم شود.

» پرایمر

پس از تمیزکردن سطح لوله برای حفاظت سطح لوله از اکسیداسیون بلافاصله یک لایه اولیه رنگ یا نوار تحت عنوان پرایمر بر روی سطح لوله اجرا می‌گردد. بعد از اجرای لایه پرایمر نیز باید در اسرع وقت لایه پوشش اجرا گردد. این لایه علاوه بر محافظت اولیه لوله باعث چسبیدن بهتر پوشش به لوله نیز می‌گردد. پرایمر می‌تواند به صورت سرد یا گرم اجرا شود. پرایمرها علاوه بر مواد رزینی و پلاستیکی با استحکام بالا شامل مواد ضدباکتری و ضداکسیداسیون نیز می‌باشند. ضخامت پرایمر را استاندارد تعیین می‌کند، اما این ضخامت حداقل ۲۰۰ میکرومتر است. سفیرسید

منابع:

1: Fundamentals of Corrosion; Philip A. Schweitzer ; 2010 by Taylor & Francis Group
2: www.brederoshaw.com
3: www.crc-evans.com
4: www2.dupont.com/Powder/en_US
5: www.basf-coatings.com
6: www.ogp.org.uk
7: www.jfe-steel.co.jp/en
8: www.prdcompany.com
9: www.canadoilgroup.com
10: www.AltaAlten.com