

خطوط انتقال گاز یکی از مهمترین شریان های حیاتی در زندگی شهری و اخیراً روستایی محسوب می شود. رفتار لوله های انتقال گاز در برابر خوردگی یکی از مشکلات صنعت گاز می باشد. لوله های گاز حاوی مواد اشتعال پذیر هستند و نشت گاز و آتش سوزیهای پس از آن می تواند موجب صدمات جانی و خسارت های مالی و زیان های زیست محیطی گردد. در بسیاری از کشورها برای انتقال مطمئن، مداوم و ارزان گاز، از لوله های فولادی استفاده می شود. مشکل اساسی این نوع از لوله ها این است که در معرض شرایط مخرب محیطی دچار مشکلاتی از قبیل خوردگی و پوسیدگی می شوند. هزینه های مصرف شده برای جایگزینی لوله های یک خط انتقال و هزینه های مربوط به راه اندازی و نصب مجدد یک خط انتقال از فاکتورهای مهم در انتخاب سیستم حفاظت در مقابل خوردگی می باشد. یکی از اقتصادی ترین و مرسوم ترین راه های حفاظت در مقابل خوردگی استفاده از پوشش های محافظتی می باشد. پوشش در واقع یک سد فیزیکی بین مایع خورنده و سطح فلز ایجاد می کند و با این عمل مانع خوردگی می شود. مرسوم ترین پوشش های خارجی مورد استفاده در صنعت گاز عبارتند از: پوشش های کولتار، سه لایه پلی اتیان، پلی پروپیلن، بیتوسیپل و پلی یوریتان [۴ و ۵].

با وجود آنکه خطوط لوله، ارزان ترین و مطمئن ترین روش انتقال آب، نفت، گاز و فرآورده های نفتی به شمار می رود، گردش پول و سرمایه گذاری در این حوزه بسیار زیاد می باشد. به همین جهت توسعه خطوط لوله بعنوان یک شاخص معتبر در مطالعه توسعه یافتگی کشورهای دارای ذخایر زیرزمینی استراتژیک و منابع آبی تعبیر می شود.

یکی از مهمترین و تاثیرگذارترین روش ها برای جلوگیری از خوردگی داخلی و خارجی خطوط لوله، استفاده از یک سیستم پوشش محافظ با یا بدون حفاظت کاتدی است. هزینه های کلی حفاظت شامل قیمت پوشش و سیستم حفاظت کاتدی می باشد. انتخاب پوشش می تواند بطور مشخصی بر هزینه های حفاظت کاتدی بیفزاید [۶].

کاربرد اصلی پوشش های حفاظتی برای جلوگیری یا کنترل خوردگی بخش خارجی سازه های فولادی در زیر خاک یا غوطه وری در آب می باشد. پوشش باعث جداسازی فلز از تماس با محیط اطراف خود می شود، چون هر پوششی نمی تواند به طور کامل قابل اطمینان باشد، لذا حفاظت کاتدی متناسب با نوع آن برای جلوگیری از خوردگی دارای اهمیت است. از آنجا که انتخاب و بکارگیری صحیح پوشش باید ۹۹ درصد از حفاظت را تأمین

کند، بنابراین آگاهی از مزایا و معایب پوشش های موجود از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشد. استفاده صحیح از مواد به کار رفته در پوشش می تواند موارد خوردگی را کنترل کند. تعداد سامانه های پوشش موجود، ضرورت تجزیه و تحلیل دقیق خواص مطلوب برای یک پوشش موثر لوله را ایجاب می کند. بنابراین انتخاب بهینه و کاربرد صحیح پوشش های حفاظتی در مهندسی دارای اهمیت است [۷].

در طول گذشت زمان یک پوشش حفاظتی تخریب شده در اثر تماس با رطوبت، اکسیژن، مواد شیمیایی، تغییرات درجه حرارت، سایش، فشار و دیگر عوامل احتمالی، لازم است که به موقع و اصولی تعمیر گردد تا استفاده بهینه از پوشش حفاظتی حاصل شود. علاوه بر آن انتخاب و اجرای تعمیر پوشش بسیار پیچیده تر از نصب پوشش اولیه است.

شرایط آب و هوا، تماس با مواد شیمیایی، زمان کافی، بودجه، ایمنی و بهداشت محیط کار، درجه آماده سازی سطح، دارای تأثیر جدی بر برنامه ریزی طراحی بهینه پوشش دارند. آگاهی از شرایط اجرا و نصب، شروع فرآیند پوشش است. پوشش باید مناسب با محیط و محصولات نفتی انتخاب گردد و منابع تأمین فولاد و محل کار ممکن است محدودیت هایی برای اجرای پوشش هر پروژه ایجاد کند [۸].

هزینه سیستم حفاظت کاتدی به مقاومت الکتریکی پوشش مورد استفاده ارتباط دارد. جریان الکتریکی مورد نیاز برای حفاظت خطوط لوله پوشش دار با زمان افزایش می یابد. پوشش های با کمترین جریان اولیه مورد نیاز و بیشترین پایداری (حداقل تغییر در جریان مورد نیاز با زمان)، هزینه های نصب و اجرای سیستم حفاظت کاتدی را کاهش می دهد. خطوط لوله انتقال نفت و گاز بیشتر از فولادهای کربنی که بیشتر شامل آهن می شود، ساخته شده اند. اگرچه فولادهای کربنی نسبت به چند نوع خوردگی ناشی از انواع محیط و محصولات منتقل شونده، آسیب پذیرند هستند اما به دلیل دارا بودن مزایای بیشتر نسبت به دیگر مواد از جمله سادگی تولید و هزینه کم، از مواد مناسب برای خطوط لوله می باشد [۹].

تکنولوژی پوشش دهی در چند دهه اخیر تغییرات زیادی کرده است. بعد از جنگ جهانی دوم انتخاب پوشش ها بیشتر قیرهای زغالی بوده است که تا به امروز نیز در کشورهای کمتر توسعه یافته یا در حال توسعه مورد استفاده قرار می گیرد. امروزه بیشتر پوشش ها از رزین های سنتز شده ساخته می شود که تحت فرآیند های دشواری اعمال می شود. جریان مورد نیاز بطور مشخص بر اساس محیط (مقاومت خاک، دما و غیره) تغییر می کند. جدول ۱-۲ میزان نسبی جریان مورد نیاز برای پوشش های مختلف را با توجه به عمر سازه نشان می دهد [۱۰، ۱۱].

محدوده اختلاف پتانسیل پیشنهاد شده در زمان قطع جریان برای پوششهای زیرزمینی (در مقابل نیم پیل مس/سولفات مس) در جدول ۲-۲ آورده شده است [۱۱].

جدول ۲-۱- طراحی چگالی های جریان برای پوشش های مختلف خط لوله (دمای عملیاتی تا $30^{\circ}C$)

نوع پوشش	عمر خط لوله (سال)		
	۰-۵	۵-۱۵	۱۵-۳۰
	چگالی جریان (mA/m^2)		
لعاب گرم اجراء (قیر قطران، قیر نفتی و قیر اصلاح شده) (coal tar, bitumen and modified bitumen enamel)	۰/۰۴۰	۰/۱۰۰	۰/۲۰۰
اپوکسی پیوند همجوشی (FBE) اپوکسی مایع پلی اورتان	۰/۰۱۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵
پلی اتیلن پلی پروپیلن	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۱۰

جدول ۲-۲- محدوده اختلاف پتانسیل پیشنهاد شده در زمان قطع جریان برای پوششهای زیرزمینی (در مقابل نیم پیل مس/سولفات مس)

نوع پوششها	محدوده پیشنهاد شده برای قطع پتانسیل (ولت) بر اساس IPS-E-TP-270	حداقل پتانسیل خاموشی لحظه ای (ولت) بر اساس IGS-RTP-028	حداکثر پتانسیل خاموشی لحظه ای (ولت) بر اساس IGS-RTP-028

اپوکسی پیوند همجوشی (FBE)	-۱/۱	-۰/۸۵	-۱/۰۷
لعاب گرم اجراء (قیر قطران، قیر نفتی و قیر اصلاح شده)	-۲/۰	-۰/۸۵	-۱/۱۲
پلی اتیلن (۲ لایه)	-۱/۰	-	-
پلی اتیلن (۳ لایه)	-۱/۱	-۰/۸۵	-۱/۱
پلی پروپیلن (۳ لایه)	-۱/۱	-	-
پلی اورتان	-۱/۱	-۰/۸۵	-۱/۰۷

با توجه به جدول ۱-۲ هرچه جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی کمتر شود، هزینه های مربوط به سیستم حفاظت کاتدی کاهش می یابد. پس با انتخاب مناسب پوشش می توان تا حد قابل قبولی هزینه های حفاظت کاتدی را کاهش داد [۷،۱۱]. مباحث مربوط به انتخاب پوشش بهینه در بخش های بعدی گزارش ارائه شده است.

۲-۲ استانداردهای مورد استفاده برای پوشش های حفاظتی برای سازه های فولادی مدفون در خاک و غوطه ور در آب دریا

۲-۲-۱ انجمن آزمون و مواد آمریکا (ASTM)

"ASTM D5" روش انجام آزمایش نفوذپذیری مواد قیری

"ASTM D149" استاندارد روش انجام آزمایش تخریب ناشی از ولتاژ و قدرت عایق برقی مواد در فرکانس های برقی تجاری

"ASTM D257" استاندارد روش انجام آزمایش مقاومت جریان مستقیم یا هدایت DC برقی مواد عایقی

"ASTM D427" روش انجام آزمایش تعیین عوامل انقباض خاک ها به روش جیوه

"ASTM D785" آزمایش سختی پلاستیک و عایق های الکتریکی به طریق راکول

"ASTM D2240" روش انجام آزمایش سختی سنجی لاستیک

"ASTM G8, G95" روش انجام آزمایش جدایش کاتدی^۱ پوشش های خطوط لوله

¹ Cathodic disbondment

"ASTM G14, D2794" روش انجام آزمایش مقاومت پوشش خط لوله در برابر ضربه
"ASTM D4060" روش انجام آزمایش مقاومت پوشش خط لوله در برابر سایش
"ASTM G53" روش انجام آزمایش مقاومت پوشش خط لوله در برابر هوادهی^۲
"ASTM D714" روش انجام آزمایش مقاومت پوشش خط لوله در برابر مواد شیمیایی
"ASTM B117" روش انجام آزمایش مقاومت پوشش خط لوله در برابر اسپری نمک^۳

"ASTM D4541" روش انجام آزمایش چسبندگی پوشش ها به فولاد

"ASTM D522" روش انجام آزمایش انعطاف پذیری پوشش ها

"ASTM D570" روش انجام آزمایش جذب آب به پوشش

"ASTM G19" روش انجام آزمایش تعیین مشخصات جداشدن پوششهای لوله با دفن مستقیم زیر خاک

۲-۲-۲ انجمن امور آب آمریکا (AWWA)

"AWWA C 203" پوششهای حفاظتی قطران و آستری ها برای لعاب و نوار خطوط لوله فولادی آبرسانی به
روش گرم

"AWWA C 205" آستری حفاظتی ملات سیمان و پوشش برای لوله فولادی آب رسانی به قطر 4 اینچ یا بیشتر
که در کارگاه اعمال میشود

"AWWA C213" پوشش پیوند همجوشی اپوکسی برای قسمت های داخلی و خارجی خطوط لوله فولادی
آبرسانی

"AWWA C215" پوشش پلی الفین اکستروود شده برای بخش خارجی خطوط لوله فولادی آبرسانی

"AWWA C 217" پوشش های نواری پترولاتوم و موم نفتی برای اتصالات و لوازم خارجی خطوط لوله فولادی
آبرسانی

"AWWA C 222" پوشش های پلی اورتان برای بخش های داخلی و خارجی لوله فولادی آبرسانی و اتصالات

۲-۲-۳ موسسه استانداردهای بریتانیا (BSI)

"BS EN 1426" روش های آزمایش نفت و فرآورده های آن

² Weathering
³ Salt Spray

"BSI 4146,4147" مواد پوششی پایه قیری برای حفاظت آهن و فولاد با آستری های مناسب در محل های مورد نیاز به روش گرم

"BS 3900 F11" روش انجام آزمایش جدایش کاتدی پوشش های خطوط لوله

۴-۲-۲-۲ موسسه استانداردهای آلمان (DIN)

"DIN 30670, 30671" پوششهای پلی اتیلن لوله های فولادی و اتصالات

"DIN 30672" نوار و مواد انقباضی تولید خطوط لوله مدفون یا زیر آب بدون حفاظت کاتدی برای عملیات تا دمای 50 درجه سانتیگراد

۵-۲-۲-۵ استاندارد اروپا (EN)

"EN 10300, 10290" لوله ها و اتصالات فولادی برای خطوط لوله خشکی و فراساحلی - مواد پوشش خارجی گرم اجرا

۶-۲-۲-۶ سازمان بین المللی استاندارد (ISO)

"ISO 15711" روش انجام آزمایش جدایش کاتدی پوشش های خطوط لوله

"ISO 8501/1" آماده سازی سطوح فولادی قبل از اعمال رنگها و فرآورده های مربوطه - ارزیابی چشمی پاکیزگی سطح - بخش اول: درجات زنگ و درجات آماده سازی سطوح فولادی بدون پوشش و سطوح فولادی بعد از برداشتن کامل پوششهای قبلی

"ISO 2592" فرآورده های نفتی - تعیین نقاط اشتعال و سوختن

"ISO 2431" تعیین زمان جریان، رنگ و روغن جلا با روش فلوکاپ

"ISO 13436" تعیین نقطه اشتعال فرآورده های نفتی و دیگر مایعات

"ISO 3251" تعیین مواد غیرفرار، رنگها، روغن های جلا و پلاستیکها

"ISO 21809-1" صنایع ملی نفت و گاز - پوشش خارجی برای خط لوله مدفون یا غوطه ور در آب برای خطوط لوله سامانه های انتقال بخش اول: پوشش های پلی اولفین (سه لایه PE و سه لایه PP)

"ISO 2591-1" آزمایش الک - بخش اول: روشهای بکارگیری آزمایش الکهای بافته شده از پوشش سیمی و ورق فلزی سوراخ دار

”ISO 5256” لوله های فولادی و اتصالات مدفون یا غوطه ور در آب

۷-۲-۲ انجمن ملی مهندسين خوردگی (NACE)

”NACE RP-0169” استاندارد کاربرد مقررات، کنترل خوردگی خارجی سامانه های لوله کشی فلزی زیرزمینی
یا غوطه ور

”NACE RP-0375” کاربرد سامانه های پوشش موم در منطقه، برای خطوط لوله در زیرزمین: اجرا، کارآیی و
کنترل کیفیت

”NACE RP-0188” آزمایش ناپیوستگی (از جمله منفذ) پوشش های حفاظتی

۳-۲ مشخصات یک پوشش مناسب [۷،۱۱،۱۲]

۱-۳-۲ عایق الکتریکی موثر

از آنجا که خوردگی در خاک و نمک یک فرآیند الکتروشیمیایی است، پوشش یک خط لوله باید جریان خوردگی
را با جداکردن سازه از محیط، متوقف کند و از برقراری جریان برای انجام واکنش های خوردگی جلوگیری کند.

۲-۳-۲ سهولت کاربرد

مواد پوشش باید مناسب بوده و به طور صحیح به کار رود تا موثر واقع شود. اکثر پوشش های خوب لوله نیاز به
استفاده از روشهای دقیق داشته که نگهداری آنها مشکل است. حفظ کیفیت ممکن است از طریق یک سامانه
پوشش که کمتر تحت تأثیر متغیرها قرار دارد به دست می آید. مشخصات فنی اجرای پوشش و همراه با بازرسی
صحیح بر کیفیت پوشش نهایی تأثیر دارد.

۳-۳-۲ اجرای پوشش لوله با کمترین نقص

این ویژگی بستگی به سهولت کاربرد دارد. هیچ پوششی کامل نیست، به همین دلیل حفاظت کاتدی لازم می
باشد. پوشش با کمترین نقص اجرا شود تا کمترین جریان برای انجام حفاظت کاتدی نیاز باشد.

۴-۳-۲ چسبندگی به سطح فلز

چسبندگی پوشش به این دلیل مهم است که از حرکت آب بین سطح فلز و پوشش لوله جلوگیری می کند.
چسبندگی پوشش، پایداری و توان مقاومت در برابر جابجایی را در زمان نصب به طور موثر نشان می دهد.

۵-۳-۲ مقاومت در برابر پیوستگی

بعد از قرار گرفتن پوشش در زیر زمین، دو علت ممکن است پوشش را تخریب یا تجزیه کنند: فشار خاک و آلودگی محیط. در خاک های خاصی که به طور متناوب مرطوب و خشک می شوند، فشارهایی ایجاد می شود که باعث بوجود آمدن نیروی بزرگی شده و ممکن است جدایی و یا نازک شدن پوشش را بوجود آورد. ارزیابی خواص مهم پوشش مانند چسبندگی، انسجام و قدرت کشش برای کاهش این مشکل به کار می رود. مقاومت پوشش، در مقابل مواد شیمیایی، هیدروکربن ها و شرایط اسیدی و قلیایی باید به منظور ارزیابی عملکرد در خاک های آلوده مشخص شوند.

۶-۳-۲ ضریب مقاومت ویژه الکتریکی

از آنجائی که خوردگی یک واکنش الکتروشیمیایی است، استفاده از پوشش با مقاومت الکتریکی بالا در طول عمر سامانه مهم است. میزان درصد افت مقاومت اولیه، در مقایسه با میزان مقاومت سطح کل الکتریکی پوشش، شاخص کیفیت پوشش نیست.

۷-۳-۲ حمل، نگهداری و نصب

توان یک پوشش در مقابله با صدمات بستگی به شرایط ضربه، سایش و شکل پذیری آن دارد. پوشش های لوله به طور گسترده در معرض صدمات ناشی از جابجایی تا مرحله خاک ریزی هستند. در حالی که دقت برای جابجایی، حمل و نگهداری کردن به طور صحیح توصیه شده است. پوشش ها متناسب با توانشان آسیب پذیر هستند. در ضمن نگهداری در فضای باز نیاز به مقاومت در مقابل اشعه ماوراء بنفش و تغییرات دما دارد. تمام این شرایط برای اطمینان از عملکرد صحیح باید ارزیابی شود.

۷-۳-۲ مقاوم در برابر جدایش کاتدی

با توجه به اینکه بیشتر لوله ها در نهایت حفاظت کاتدی می شوند، لازم است که پوشش در مقابل جدایش کاتدی مقاومت کند. میزان حفاظت کاتدی با کیفیت و یکپارچگی پوشش متناسب می باشد. عدم وجود مقاومت قابل قبول به جدایش در حفاظت کاتدی باعث دو پدیده زیر می شود:

۱- آب را به درون پوشش که به طور عادی باید در مقابل نفوذ آب مقاومت کند، هدایت می کند.

۲- در محل هایی که جریان به آن میرسد، در سطح فلز هیدروژن آزاد کند، و هیدروژن آزاد شده باعث جدا شدن پوشش از سطح فلز گردد.

هیچ پوششی به طور کامل در برابر آسیب های ناشی از حفاظت کاتدی مقاوم نیست، اما بسیار مهم است که پوششی انتخاب شود که این اثرها را به حداقل برساند.

۸-۳-۲ سهولت تعمیر

محل هایی که صدمه دیده اند و نقاطی که جوشکاری شده اند باید در محل، پوشش داده شوند. برای مواردی که بعد از جوشکاری، تعمیر و تکمیل می شوند باید پوشش تعمیری با پوشش اصلی سازگار باشد. متغیر بودن شرایط در انتخاب مواد موثر است. علاوه بر موارد بالا عوامل زیر نیز باید همچنین در زمان انتخاب پوشش لوله در نظر گرفته شوند.

۹-۳-۲ نوع خاک و خاک ریزی

شرایط خاک و خاکریزی در انتخاب سیستم پوشش و ضخامت آن موثر است. خاک ها بر مبنای عامل انقباض و تورم آنها (تنش خاک) طبقه بندی می شوند. خاک های با انقباض و تورم بالا می توانند به پوشش ها آسیب برسانند. در شرایط مطلوب گودالهای مسیر باید عاری از برآمدگی و صخره باشند تا پوشش بتواند بر روی سطح صاف و نرم قرار گیرد. در زمان خاکریزی، صخره ها و نخاله ها نباید با پوشش لوله برخورد کند.

۱۰-۳-۲ دسترسی به خطوط لوله

زمانی که امکان دسترسی به خطوط لوله مشکل باشد و یا در محیط دریایی قرار داشته باشد، بهترین سامانه بدون توجه به هزینه های اولیه باید انتخاب شود. تجربه شرایط مشابه کاری برای حداقل پنج سال یا طراحی های درست بر مبنای آزمایش های آزمایشگاهی روی محصولات جدید بهترین معیار برای انتخاب پوشش هستند.

۱۱-۳-۲ درجه حرارت عملیاتی لوله

دمای سطح لوله و شرایط محیطی باید در نظر گرفته شوند، زیرا بعد از دفن، پوشش بلافاصله در شرایط مرطوب و گرم قرار می گیرد، که بیشترین تأثیر را نسبت به محیط گرم و خشک داشته و به موثر بودن پوشش صدمه وارد می کند.

۱۲-۳-۲ دمای محیط در زمان ساخت و نصب

درجه حرارت های ساخت و نصب، حساس تر از درجه حرارت عملیاتی هستند. برای مثال، بعضی سیستم های ترموپلاستیکی مانند ملات قیری، نوارها یا لعابها ممکن است در شرایط دمای انجماد، ترد و شکننده شوند (سامانه های پلی اتیلن، در 40- درجه سانتیگراد منطقه خم پذیر هستند). بالاتر از دمای عملیاتی پیشنهادی، سامانه های ترموپلاستیکی ممکن است نرم شوند. به همین دلیل در حمل، انتقال و انبار کردن پوشش ها در شرایط ویژه باید دقت بسیار بالایی مبذول گردد.

۱۳-۳-۲ هزینه ها

ارزیابی مشخصات پوشش لوله با توجه به نکات فوق به انتخاب آن کمک می کند، اما مهمترین عامل تعیین کننده هزینه ها هستند. هزینه های پوشش لوله در نهایت باید قابل توجیه باشد. در جدول های ۲-۳ و ۲-۴ بطور خلاصه مشخصات اصلی برخی پوشش ها آورده شده است [۷ و ۱۱].

جدول ۲-۳: مشخصات کارکرد و اعمال برخی پوشش ها

پلی یورتان	پلی اتیلن ۳ لایه	اپوکسی پیوند		کولتار	بیتوسیل	پوشش خواص
		همجوشی دولایه	همجوشی تک لایه			
Sa ۲/۵	Sa ۲/۵	Sa ۲/۵	Sa ۲/۵	Sa ۲/۵	Sa ۲/۵	حداقل تمیزی سطح
-۱۰	-۴۰	-۴۰	-۴۰	-۳۰	-۲۵	پایین ترین دمای کارکرد
۱۲۰	۸۰	۱۲۰	۹۰-۱۱۰	۸۰-۹۵	۷۰	بالاترین دمای کارکرد
۱-۱/۵	۲/۵-۳/۵	۰/۱-۰/۷	۰/۵-۰/۷۶	۴/۸	۴	ضخامت پوشش

جدول ۲-۴: نمونه مشخصات معرف سامانه های پوشش برای خطوط انتقال

سامانه پوشش	محل نصب پوشش	سهولت کاربرد در محل	عملیات اولیه	ضخامت پوشش mm	حساسیت به آسیب پذیری		
					تنش خاک	جدایش کاتدی	ضربه
پوشش لعاب قطران (Enamel Coal tar) پلی اتیلن اکستروود شده	منطقه (روی کانال) و محوطه	مشکل	برس سیمی به روش بلاست	3 to 6	متوسط	متوسط	متوسط
	کارگاه	---	روش بلاست	**	کم	کم	متوسط
پلی اتیلن ۳ لایه اپوکسی پیوند همجوشی (FBE) لعاب آسفالت	کارگاه	---	روش بلاست	2.5 to 3.5	کم	کم	کم
	کارگاه	مشکل	روش بلاست	0.5 to 0.76	کم	کم	کم
	منطقه و محوطه	مشکل	برس سیمی یا بلاست	3 to 6	متوسط	متوسط	متوسط
قیر اصلاح شده	کارگاه	مشکل	روش بلاست	4	متوسط	متوسط	متوسط
پلی یورتان	منطقه و کارگاه	مشکل	روش بلاست	1.0 to 1.5	زیاد	متوسط	زیاد
قیر قطران	منطقه و کارگاه	متوسط	روش بلاست	0.3 to 0.6	کم	متوسط	متوسط

۲-۴ پوشش های قیری^۴ و قطران^۵

لعاب ها از قطران یا قیرهای نفتی (قیر دمیده) گرم اجرا به دست می آیند و سالهاست که بطور گسترده به عنوان پوشش های حفاظتی مورد استفاده قرار می گیرند. قطران و لعاب قیری در درجات مختلف وجود دارد. این لعاب ها پوششی برای جلوگیری از خوردگی هستند که با ترکیب پشم شیشه، مقاومت مکانیکی قابل قبولی را برای حمل و نقل و جابجایی پیدا می کنند [۱۳]. پوشش های قیری شامل قطران و لعاب های قیر (آسفالت) به صورت مذاب اعمال می گردند. اعمال این پوشش ها در کارگاه یا در محل می باشد.

۲-۴-۱ پوشش کولتار

پوشش های لعاب که از قطران یا قیرهای نفتی گرم می باشند، مقاومت خوبی در مقابل اسیدها، قلیاهای رقیق، محلول های نمکی و آب دارند. اگر چه در مقابل هیدروکربن ها و دیگر حلال ها مقاوم نمی باشند. پوشش های پایه قیری به عنوان قدیمی ترین پوشش های حفاظتی همواره برای حفاظت سازه های فلزی از خوردگی مورد استفاده بوده و امروزه به عنوان یکی از پر کاربردترین پوشش های حفاظتی خطوط لوله های مدفون در خاک و یا غوطه ور در آب مورد توجه قرار دارند [۱۰].

سیستم های آسفالت قیری را می توان برای نصب و استفاده در محدوده دمای عملیاتی ۴/۴ تا ۸۸ درجه سانتی گراد طراحی نمود. در هنگام استفاده از این پوشش در دماهای بسیار پایین بایستی احتیاط نمود. دوغاب آهک و کاغذ روغنی روی سطح این پوشش برای حفاظت در برابر اشعه ماوراء بنفش استفاده می گردد و این موضوع در هنگام انبار آن ها نیز باید مدنظر قرار گیرد. چنین سیستم هایی برای استفاده بر روی زمین یا خاک های آلوده به هیدروکربن طراحی نشده اند. وزن زیاد، محدودیت های زیست محیطی و محدودیت دسترسی به آن منجر به توقف تولید پوشش های آسفالت قیری شده است [۱۳-۱۶].

پوشش های قدیمی تر لعاب حاصل از قطران زغال سنگ، معمولاً از روکشی نمدی جهت نگهداری و حفاظت پشت بند برخوردار هستند. البته لایه نمدی، از تمایل پوشش لعاب به خزش و تغییرشکل سرد ناشی از تنش های خاک در محدوده دماهای کاری بالای خط لوله جلوگیری نمی کند. این رفتار با استفاده از نمد های آزیست به مقدار زیادی کاهش می یابد. به هر حال در حال حاضر آزیست های نمدی تولید نمی شوند. امروزه استفاده از

⁴ Bituminous
⁵ Coal Tar

آستر اپوکسی دوجزئی در کنار پوشش های لعابی دما بالا، باعث افزایش دمای کاری سیستم پوشش لعابی به ۱۱۰ درجه سانتیگراد شده است. در حال حاضر، حصیرهای الیاف شیشه ای داخلی و خارجی، همزمان در داخل پوشش لعاب با به کاربردن لعاب داغ به کار می روند. حصیر الیاف شیشه ای داخلی به داخل پوشش کشیده می شود. حصیر الیاف شیشه ای خارجی معمولاً برای بهبود ترکندگی با قطران زغال سنگ اشباع می شود و به سطح خارجی پوشش لعاب کشیده می شود [۱۷].

پوشش های لعاب که از قطران یا قیرهای نفتی گرم می باشد، سال هاست که به طور گسترده به عنوان پوشش های حفاظتی مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا مقاومت خوبی در مقابل اسیدها، قلیاهای رقیق، محلول های نمکی و آب دارند. اگر چه در مقابل هیدروکربن ها و دیگر حلال ها مقاوم نمی باشند. پوشش های پایه قیری به عنوان قدیمی ترین پوشش های حفاظتی همواره برای حفاظت سازه های فلزی از خوردگی مورد استفاده بوده و تا یک دهه پیش به عنوان یکی از پر کاربردترین پوشش های حفاظتی خطوط لوله های مدفون در خاک و یا غوطه ور در آب مورد توجه قرار داشتند [۱۸].

تهیه پوشش لوله ها به صورت مایع از مواد قیری (قیرهای حاصل از پالایش نفت خام، قیرهای طبیعی و قیرهای حاصله از قطران زغال سنگ) سابقه زیادی دارد. ارزان ترین پوشش برای محافظت لوله زیر زمینی مواد قیری می باشد که به صورت زیر تهیه می شود:

الف) حل کردن قیر در حلال نفتی مناسب و تهیه مایعی روان، به طوری که بتوان با قلم مو و یا به صورت غوطه ور کردن لوله در آن سطح لوله را پوشاند. این مایع را در اصطلاح پرایمر می گویند.

ب) تهیه انامل یا بلوکه ای جامد قیری که معمولاً از امتزاج قیر با پودرهای مختلف مثل کربنات کلسیم سیلیس-سولفات باریوم و یا موادی مثل پنبه نسوز و الیاف پشم و پارچه تهیه می گردد.

ج) تهیه نوارهای آغشته به قیر همانند مشمع و یا گونی که در نهایت پس از بکارگیری پرایمر و انامل، این نوارها بر روی لوله پیچیده می شود.

عیب اساسی پوشش های قیری در کم بودن قدرت چسبندگی آنها است. بدین معنی که با سرد و گرم شدن بدنه لوله و در اثر ضربه هائی که به علت جمع شدن مایعات گازی در لوله ایجاد می شود، در نهایت لایه قیر از سطح بدنه جدا شده و راه برای نفوذ اکسیژن و رطوبت باز می گردد. قیرهای حاصله از قطران ذغال سنگ خاصیت چسبندگی بیشتر نسبت به قیره طبیعی و قیرهای حاصله از پالایش نفت داشته ولی چسبندگی آنها در حد ایده آل

نمی باشد. بنابراین، برای افزایش قدرت چسبندگی قیر را به سطح لوله حدود ۴۰ درصد اپوکسی رزین به قیر حاصل از قطران زغال سنگ افزوده می شود و از این طریق سطح لوله را با اطمینان بیشتری عایق می نمایند [۱۷-۱۸].

از جمله موادی که چسبندگی زیادی بر روی فلز داشته و کاربرد آن متداول گردیده است، پرایمرهایی هستند که از ترکیب لاستیک کلرینه شده و موادی قیری به دست می آید. این پرایمرها را قبل از آن که پوشش های قیری (انامل) بکار برده شود، روی لوله پوشش داده می شود و به علت این که مواد لاستیکی خاصیت چسبندگی خوبی دارند، به سرعت سطح لوله چسبیده و بلافاصله خشک می شوند و از آنجایی که مواد تشکیل دهنده انامل از قیر تشکیل گردیده و قسمت اعظم مواد تشکیل دهنده پرایمر نیز قیر است، بنابراین انامل به خوبی بر روی پرایمر چسبیده و تشکیل یک لایه ضخیم می دهد که باعث محافظت لوله می شود. پرایمر یا آستری، محلول قیر در حلال سبک نفتی است و در دمای معمول بسیار رقیق می باشد، به طوری که پس از آماده سازی و برداشتن زنگ از روی سطح لوله (توسط بلاستینگ و یا روشهای متداول دیگر)، این محلول مانند رنگ توسط اسپری یا قلم مو بر روی لوله اعمال می شود و به راحتی سطح لوله را آغشته و چسبنده می کند و در نتیجه به عنوان آستری یا زیرلایه رنگ برای لایه های بعدی مورد استفاده قرار می گیرد [۱۸-۱۹].

این پوشش ها در هوای سرد ترد و شکننده و در هوای گرم نرم می شوند. بنابراین پوشش های لعابی برای سازه های روی زمین مناسب نیستند. این پوشش ها ممکن است در محدوده درجه حرارت ۱۰- تا ۷۰ درجه سانتیگراد به کار روند. هنگامی که درجه حرارت به ۴- درجه سانتی گراد برسد، باید هنگام نصب در سایت و منطقه دقت کافی انجام شود تا پوشش ترک نخورده و جدا نشود.

نوارهای کولتار مقاومت زیادی در برابر رطوبت و چسبندگی قوی به خط لوله فولادی دارند و با نوارهایی همانند الیاف شیشه می توانند تقویت گردند. برای اعمال این نوارها، ابتدا باید سطح فلز آماده سازی شود و برای اعمال آستر بایستی قیر را ذوب نمود. مخزن قیر باید مجهز به دماسنج برای کنترل دما باشد در محل خروج قیر مذاب باید توری مخصوص نصب شود تا قیر خروجی صاف شود. ابعاد این شبکه های توری نباید از ۱/۵ میلیمتر تجاوز کند. عملیات نوار پیچی گرم لوله ها بایستی در کارگاه انجام گیرد. باید توجه داشت که آستر زنی بلافاصله بعد از تمیز کاری سطح انجام گیرد. آستر را می توان به صورت دستی با قلم مو و یا ماشین اتوماتیک انجام داد. قیر پاشی و یا نوار پیچی بایستی توأم و پس از خشک شدن کامل آستری با ماشین انجام گیرد. پس از نوار پیچی

و قبل از جابجایی خط لوله، جهت افزایش مقاومت پوشش در برابر آب و رطوبت، سطح پوشش داده شده باید بلافاصله با پاشش محلولی حاوی ۱۰۰ لیتر آب، ۳۰ کیلوگرم آهک زنده، ۲ لیتر روغن بزرگ و ۲ کیلوگرم نمک طعام سرد شود [۳، ۴، ۸-۱۰].

به دلیل افزایش مقبولیت استفاده از پوشش های پلاستیکی، اپوکسی پیوند ذوبی، پلی الفین اکستروژده و پوشش های ترکیبی پلی الفین اکستروژده-اپوکسی پیوند ذوبی، کاهش تولیدکنندگان پوشش لعاب قطران ذغال سنگ و قوانین محدودکننده برای به کار بردن این پوشش، انتظار نمی رود که استفاده از آن ها در آینده افزایش یابد. این نوارها شامل پوشش قیر (قطران ذغال سنگ) قابل انعطاف می باشند که به طور کامل اشباع شده وجود داشته و از دو طرف بوسیله یک بافت با مقاومت کششی بالا مقاوم شده است. به علاوه دارای یک لایه پلی استری می باشد که به سطح پوشش مذکور چسبیده و باز شدن لوله نوار را تسهیل می نماید. این لایه به صورت یک پوشش خارجی عمل می کند و مقاومت مکانیکی را در برابر تنش ناشی از خاک و عملیات خاک ریزی برای نوار فراهم می کند.

پوشش آسفالت قیری، مخلوطی متراکم از ماسه، سنگ آهک خردشده و الیاف شیشه به همراه آسفالت هوادمیده است. مخلوط این مواد باعث ایجاد پوششی با دانسیته ای در حدود ۲/۱ گرم بر سانتی متر مکعب می شود. قیر در انواع مختلفی وجود دارد و انتخاب آن بر مبنای دما و شرایط آب و هوایی است که باعث دستیابی به حداکثر انعطاف پذیری و ویژگی های عملیاتی می گردد. پوشش حاصل، ضخیم (۱۲/۷ تا ۱۶ میلی متر) بوده و در نتیجه اکستروژ قیر، پوشش مقاوم به خوردگی بدون درزی ایجاد شده است.

بیش از ۵۰ سال است که از پوشش های آسفالت قیری اکستروژده استفاده می شود و این پوشش، ضخیم ترین پوشش مقاوم به خوردگی می باشد که برای تاسیسات فراساحلی از لحاظ قیمت به صرفه است.

سیستم های آسفالت قیری را می توان برای نصب و استفاده در محدوده دمای عملیاتی ۴/۴ تا ۸۸ درجه سانتی گراد طراحی نمود. در هنگام استفاده از این پوشش در دماهای بسیار پایین بایستی احتیاط نمود. دوغاب آهک برای حفاظت از چنین پوشش های در برابر اشعه ماوراءبنفش استفاده می گردد و این موضوع در هنگام انبار آن ها نیز باید مدنظر قرار گیرد. چنین سیستم هایی برای استفاده بر روی زمین یا خاک های آلوده به هیدروکربن طراحی نشده اند. وزن زیاد، هزینه تولید بالا و محدودیت دسترسی به آن منجر به توقف تولید پوشش های آسفالت قیری شده است [۱۱-۱۳].

۲-۴-۲ پوشش بیتوسیل^۶

بیتوسیل، پوشش محافظی بر پایه قیر با ویسکوزیته کم است. این پوشش، در واقع ترکیبی از از چندین نوع قیر امولسیون با آب است که خشک گردیده تا فیلم قیر چقرمه ای را تشکیل دهد. بیتوسیل، پوشش قیر پایه نفتی است که خواص آن با مواد پلیمری بهبود داده شده است. از ویژگی های بارز این پوشش می توان به جدایش کاتدی کم، مقاومت در برابر تنش های خاک و چسبندگی بالا اشاره نمود.

سیستم پوشش بیتوسیل ترکیبی از چهار جزء همخوان است که عبارتند از:

الف) بیتوسیل پرایمر: ترکیبی مصنوعی و سازگار با بیتوسیل انامل است که با هدف افزایش چسبندگی پوشش فرموله شده است. بیتوسیل پرایمر قبل از اعمال پوشش اصلی بر روی سطح آماده سازی شده لوله به صورت یک لایه نازک با ضخامت ۲۰ تا ۳۰ میکرون اسپری می گردد.

ب) بیتوسیل انامل: حاصل اصلاح پلیمری بیتومن است که در دمای ۱۹۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد از طریق یک هد تخت و با ضخامت ۴ میلیمتر بر روی سطح پرایمر خورده اکستروود می شود.

ج) نوار خارجی بیتوسیل^۷: نوار رویی بیتوسیل ماهیتی بسیار محکم و درعین حال انعطاف پذیر دارد. این نوار از جنس پشم شیشه مقاوم شده با رشته های پلی استر می باشد که با بیتومن پلیمری شده آغشته شده است و همزمان با اعمال بیتوسیل انامل بر روی لوله پیچیده می شود. نوار خارجی بیتوسیل دارای منافذی است که سبب می گردد در حین کاربری بخش کوچکی از بیتوسیل انامل از این منافذ تراوش نماید. از این رو نوار خارجی و انامل کاملاً ممزوج گردیده و نهایتاً مقاومت مکانیکی پوشش تقویت می شود.

د) بیتوسیل ممبرین: بیتوسیل ممبرین آخرین جزء سیستم پوشش بیتوسیل است که به دو شکل آماده می گردد:

❖ نوارهای سرجوش بیتوسیل ممبرین

❖ نوار یا پیچ تعمیراتی بیتوسیل ممبرین که به ترتیب جهت پوشش دهی سرجوش ها و تعمیرات مواضع

آسیب دیده مورد استفاده قرار می گیرند. ضخامت و ترکیب شیمیایی بیتوسیل ممبرین همانند بیتوسیل

انامل است. از این رو یکپارچگی بی نظیری در تمام سطح پوشش خط لوله به این وسیله تامین می گردد.

از نوار بیتوسیل ممبرین به عنوان پوشش شیرآلات و اتصالات موجود در خط لوله استفاده می شود.

⁶ Bituseal

⁷ Bitusil outer wrap

بیتوسیل ممبرین با پوشش های پلی اولفین سه لایه^۸ و اپوکسی پیوند ذوبی^۹، کولتار و قیر (بیتومن) سازگاری دارد [۱۲،۱۵،۲۴،۲۵].

پوشش های بیتوسیل از مقاومت مکانیکی کافی در تحمل تنش های موجود در بازه زمانی تولید تا لوله گذاری برخوردار هستند، با این وجود می توان یک لایه پلی پروپیلن با ضخامت ۱ تا ۲ میلیمتر (بجای مرحله سفیدشویی) بر روی پوشش بیتوسیل اکستروود نمود تا در شرایط محیطی و اقلیمی بسیار دشوار مانند بسترهای سنگی و کوهستانی مورد استفاده قرار گیرد.

پوشش های بیتوسیل با طبیعت الاستیک خود و چسبندگی فوق العاده به سطح لوله حتی در دماهای پایین تا ۲۰- درجه سانتیگراد نیز به خوبی در برابر ضربه مقاومت می نماید. جدایش پوشش بیتوسیل در دماهای پایین به هر دلیل و از جمله ضربات مکانیکی، با بالارفتن دمای سطح لوله تعمیر می شود. به عبارت دیگر پوشش بیتوسیل مجدداً به سطح لوله می چسبد. جدول شماره ۵-۲ ویژگیهای لعاب قیر (آسفالت) را با لعاب قطران مقایسه کرده است [۶،۱۳].

جدول ۵-۲: مقایسه ویژگیهای لعاب قیر (آسفالت) با لعاب قطران

استفاده از پوشش های مقاوم	لعاب قطران (گرم اجرا)	لعاب قیر (گرم اجرا)
مقاومت در برابر حرارت	ضعیف	ضعیف
مقاومت در برابر سایش	نسبتاً خوب	نسبتاً خوب
مقاومت در برابر باکتری و قارچها	خوب	ضعیف
مقاومت در برابر مواد شیمیایی	خوب	خوب
سختی	نسبتاً خوب	ضعیف
اسید اکسید کننده	غیر مقاوم	غیر مقاوم
غیر اکسید کننده	خوب	خوب
آلی	غیر مقاوم	غیر مقاوم
قلیایی	خوب	خوب
نمکها: اکسید کننده ها	غیر مقاوم	غیر مقاوم
غیر اکسید کننده ها	آب دریا بلامانع	آب دریا بلامانع

^۸ 3 layer poly olephin

^۹ Fusion bonded epoxy

حلال: خطی	غیر مقاوم	غیر مقاوم
- حلقوی	غیر مقاوم	غیر مقاوم
- اکسیژنه	غیر مقاوم	غیر مقاوم
- آب	عالی	خوب
نفوذ رطوبت	کم	نسبتاً خوب
مشتقات نفتی	خوب	غیر مقاوم
انعطاف پذیر	خوب	خوب
نفوذ ریشه	خوب	ضعیف
مقاومت در برابر خاک	عالی	عالی
مقاومت در برابر هوا و پرتو فرابنفش	غیر مقاوم	خوب
موارد خطرناک کاربرد	بخارات قطران	--

سختی لعاب قطران بهتر از لعاب آسفالت است، اما مقاومت لعاب آسفالت در برابر شرایط آب و هوایی بهتر از قطران می باشد، به هر حال لعاب آسفالت سالم را می توان برای خطوط لوله انتقال آب زیرزمینی و گاز به کار برد، اما لعاب قطران برای محوطه های عملیات نفتی و خطوط لوله نفت و گاز به کار می رود.

پوشش بیتوسیل حاصل تحقیقات مشترک شرکت نفتی شل^{۱۰} و شرکت فینیکس^{۱۱} می باشد که ضمن برخورداری از ویژگی های یک پوشش برتر، به لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه است. از ویژگی های بارز این پوشش می توان به جدایش کاتدی، مقاومت در برابر تنش های خاک و چسبندگی بالا اشاره نمود [۲۶]. یکی از مزایای کلیدی هر سیستم پوششی، یکنواختی آن در کل خط لوله اعم از سر جوش ها 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 سر جوش بیتوسیل غشایی، امکان دستیابی به یکپارچگی عایق در کل خط لوله که همگی از جنس بیتوسیل یا قیر پایه نفتی است، را فراهم می سازد [۲۶].

پوشش بیتوسیل دارای استاندارد اروپایی EN10300 و استاندارد Shell به شماره DEP 31.40.30.33-Gen بوده و تاکنون در خطوط متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. نوار سر جوش بیتوسیل غشایی^{۱۲} به عنوان یکی از اجزاء سیستم پوششی مطابق با استانداردهای بین المللی تولید می گردد و به لحاظ فنی و اقتصادی یک پوشش

¹⁰ Shell International Petroleum

¹¹ Phoenix International A/S

¹² Bituseal® Membrane

سرجوش منحصربه‌فرد و جایگزین برتر 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 بیتومنی و بیتوسییل سازگار و هماهنگ است.

سیستم پوشش بیتوسییل ترکیبی از چهار جزء همخوان است که عبارتند از:

الف) بیتوسییل پرایمر: ترکیبی مصنوعی و سازگار با بیتوسییل انامل است که با هدف افزایش چسبندگی پوشش فرموله شده است. بیتوسییل پرایمر قبل از اعمال پوشش اصلی بر روی سطح آماده سازی شده لوله به صورت یک لایه نازک با ضخامت ۲۰ تا ۳۰ میکرون اسپری می‌گردد.

ب) بیتوسییل انامل: حاصل اصلاح پلیمری بیتومن است که در دمای ۱۹۰ تا ۲۲۰ درجه سانتیگراد از طریق یک هد تخت و با ضخامت ۴ میلیمتر بر روی سطح پرایمر خورده اکسترود می‌شود.

ج) بیتوسییل اوترپ: نوار رویی بیتوسییل ماهیتی بسیار محکم و درعین حال انعطاف پذیر دارد. این نوار از جنس پشم شیشه مقاوم شده با رشته‌های پلی استر می‌باشد که با بیتومن پلیمری شده آغشته شده است و همزمان با اعمال بیتوسییل انامل بر روی لوله پیچیده می‌شود. بیتوسییل اوترپ دارای منافذی است که سبب می‌گردد در حین کاربری بخش کوچکی از بیتوسییل انامل از این منافذ تراوش نماید. از این رو اوترپ و انامل کاملاً ممزوج گردیده و نهایتاً مقاومت مکانیکی پوشش تقویت می‌شود.

د) بیتوسییل ممبرین: بیتوسییل ممبرین آخرین جزء سیستم پوشش بیتوسییل است که به دو شکل آماده می‌گردد:

• نوارهای سرجوش بیتوسییل ممبرین

مراحل اعمال پوشش بیتوسییل عبارتند از:

- شستشوی سطح خارجی لوله با آب
- پیش گرم نمودن لوله خام
- آماده سازی سطح لوله
- بازرسی سطح لوله
- اعمال بیتوسییل پرایمر
- پیش عایق کاری خط جوش با بیتوسییل انامل
- اعمال پوشش اصلی بیتوسییل انامل و اوترپ

- خنک کاری با آب
- تمیزکاری دو سر لوله
- تست منفذیابی
- اعمال یک لایه نازک سفید رنگ
- بازرسی نهایی

پوشش های بیتوسییل با طبیعت الاستیک خود و چسبندگی فوق العاده به سطح لوله حتی در دماهای پایین تا ۲۰- درجه سانتیگراد نیز به خوبی در برابر ضربه مقاومت می نماید. جدایش پوشش بیتوسییل در دماهای پایین به هر دلیل و از جمله ضربات مکانیکی، با بالا رفتن دمای سطح لوله تعمیر می شود. به عبارت دیگر پوشش بیتوسییل مجدداً به سطح لوله می چسبد. این ویژگی منحصر به فرد بیتوسییل در تقابل کامل با پوشش های صلب از جمله پوشش های پلی اولفین سه لایه، اپوکسی پیوند ذوبی، پلی یورتان و ... است. در جدول ۶-۲ برخی مشخصات بیتوسییل آورده شده است [۲۰، ۲۱، ۲۷-۲۹].

جدول ۶-۲. ویژگی های بیتوسییل

زمان خشک شدن در ۲۳ درجه سانتیگراد	۶۰ تا ۹۰ دقیقه
انعطاف پذیری	خوب
مقاومت به کلرید	بسیار خوب
مقاومت به مواد شیمیایی	مقاومت عالی به آب، اسیدهای رقیق، قلیاها، کلریدها و سولفات ها
مقاومت به دما	۱۰- تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد

۵-۲ پوشش پلی اتیلن سه لایه

پوشش های سه لایه خطوط لوله می تواند به صورت یک غلاف پلی اتیلن با پلی پروپیلن اکستروژده شده باشد که بر روی لوله آستر شده پوشش داده شوند. اعمال این لایه می تواند به روش اکستروژده متقاطع منقبض باشد و یا

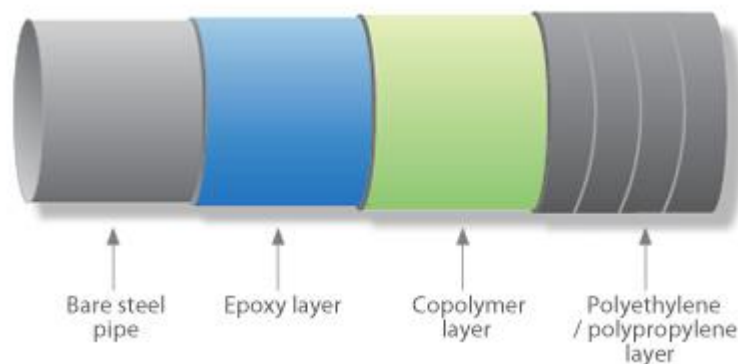
به صورت یک اکستروژن دوتایی. در هر دو روش خط لوله به صورت یکنواخت گرم شده و ناپیستی دمای آن از ۲۷۰ درجه سانتیگراد افزایش یابد [۳۰-۳۱].

سیستم های پوشش جدید شامل یک لایه با ضخامت ۲۵۰ میکرومتر FBE اولیه و یک لایه ی ۱/۴-۱/۶۵ میلی متر ضخامت از پلیمر فعال و تقویت کننده پلی اولفین بعنوان لایه ی رویی می باشد. مشابه با سیستم 3LPE، جز FBE اولیه از سیستم پوشش نوین سبب مقاومت به خوردگی، مانع خوبی بر سر راه اکسیژن و چسبندگی خوبی به نمونه ی فولادی دارد. به علت بالا بودن مقاومت الکتریکی پوشش ها، جریان حفاظت کاتدی کمی در طول عمر کاری آنها مورد نیاز می باشد. چگالی جریان طراحی پیشنهاد شده برای ۱۵ تا ۳۰ سال عمر کاری ۱۰ میکروآمپر بر مترمربع از سطح خارجی لوله است [۳۲].

ویژگی های پوشش پلی اتیلن که برای حفاظت لوله های فولادی انتقال آب، نفت و گاز تحت فشار به کار برده می شود عبارت است از:

- ۱- مقاومت شیمیایی عالی
- ۲- مقاومت عالی به ترک ناشی از تنش های محیطی
- ۳- مقاومت عایقی الکتریکی بالا و بنابراین این مصرف کم الکتریسیته برای حفاظت کاتدی
- ۴- چسبندگی خوب به سطح لوله
- ۵- مقاومت سایشی
- ۶- خواص مکانیکی خوب
- ۷- قابلیت تحمل خمش سرد

مزایای عمده پوشش های پلی اتیلن بر پوشش های دیگر عبارتند از : حوزه کاربردی وسیع تر، کاهش قابل ملاحظه آسیب پذیری پوشش حین حمل و نقل، امکان استفاده از لوله پوشش داده در محدوده وسیع تر شرایط آب و هوایی و اجرای خمش سرد لوله پوشش شده.

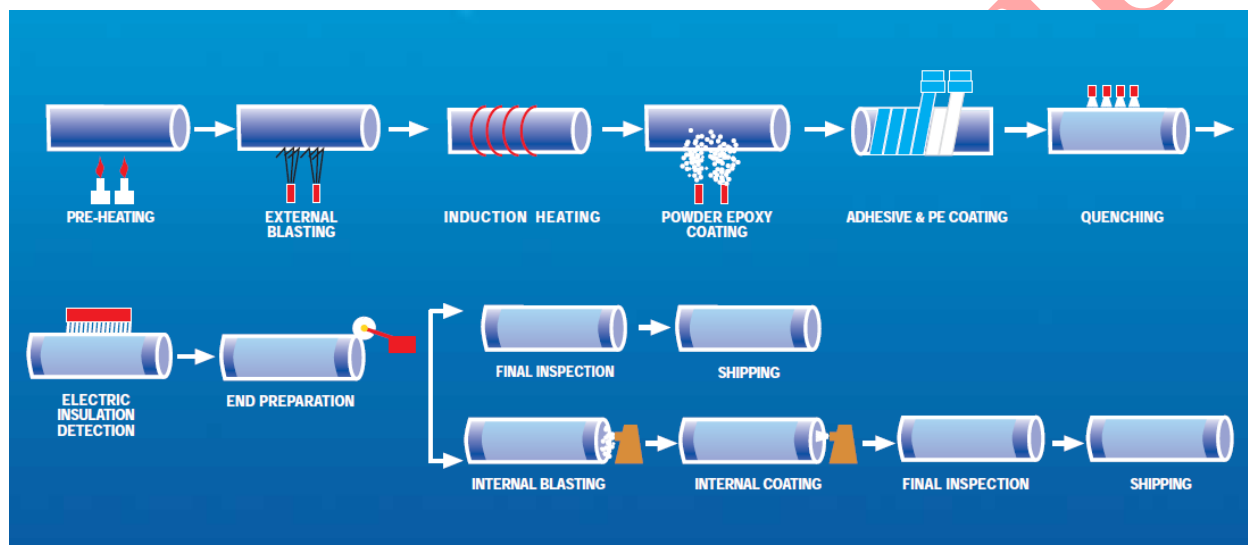


شکل ۱-۲ شماتیکی از پوشش سه لایه پلی اتیلن و پلی پروپیلن

مقاومت پوشش های پلی اتیلن و پلی پروپیلن در برابر ضربه و نفوذ نسبت به پوشش های گرم آسفالت یا لعاب و قطران بیشتر بوده و به علت مقاومت الکتریکی بالا، جریان مورد نیاز حفاظت کاتدی کمتری در طول عمر کاری نیاز خواهد داشت. بنابراین بدون تردید مطرح ترین پوشش های مصرفی جهت سطوح خارجی خطوط لوله پوشش های پلی اتیلن و پلی پروپیلن یا به عبارت دیگر پوشش های سه لایه پلی اولفینی می باشند. گرچه این سامانه به ترتیب برای خطوط لوله با دمای عملیاتی بیش از ۸۰ و ۱۱۰ درجه سانتی گراد توصیه نمی شود [۹، ۱۶].

- مراحل اجرای پوشش پلی اتیلن سه لایه عبارت است از:
- شستشوی سطوح خارجی لوله با آب داغ و بخار آب
- پیش گرم لوله های فولادی
- تمیزکاری مکانیکی با ساینده فلزی تا رسیدن به روشنائی سطح $Sa 2\frac{1}{2}$
- بازرسی
- شستشو با اسید در صورت نیاز
- اعمال لایه کرومات در صورت نیاز
- گرمایش القایی
- پاشش پودر اپوکسی به روش الکترواستاتیک در لایه اول
- اعمال لایه میانی چسب به روش اکستروژن در لایه دوم
- اعمال لایه پلی اتیلن با دانسیته بالا به روش اکستروژن در لایه سوم
- سرد کردن لوله پوشش شده با آب تا رسیدن به دمای محیط

- بازرسی
- تمیزکاری و پخ زنی پوشش خارجی دو سر لوله
- آزمون هالیدی بر روی تمام سطوح لوله ها
- کنترل نهایی، مارکینگ و آزمون های آزمایشگاهی
- صدور گواهینامه (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ شماتیکی از فرایند تولید پوشش سه لایه پلی اتیلن (PE)

مراحل اعمال پوشش که بصورت پیوسته بر روی چرخهای کانوایر صورت میگیرد بدین صورت است که در ابتدای خط، لوله ها جهت زدودن آلاینده های سطحی با پاشش آب گرم شسته و خشک می شوند. عملیات سند بلاست جهت ایجاد یک پروفایل مناسب بر سطح فلز و زدودن لایه اکسیدی و نهایتاً درجه تمیزی سطح $Sa2\frac{1}{2}$ انجام می گیرد [۳۳-۳۵].

بر اساس استاندارد ISO-8503-4 پروفایل هایی که جهت انجام این سامانه قابل قبول می باشد ۴۰ الی ۱۰۰ میکرون می باشد. در مرحله بعد، لوله ها با عبور از کویل القاگر به روش القائی در درجه حرارت ۸۰ الی ۲۱۰ درجه سانتیگراد گرم شده و سپس پوشش محافظ اپوکسی بر روش الکتروستاتیک در فشار ۲۰ الی ۴۰ psi و فشار هوای ۱۲ الی ۲۰ psi بوده و ولتاژ ۹۵ الی ۱۰۰ کیلو وات بر سطح فلز گرم شده که دارای حرکت دورانی است، پاشیده می شود. در این صورت پودر اپوکسی جذب سطح فلز شده و به سطح می چسبد. پس از اعمال

پوشش اپوکسی، در زمان ژله شدن، لایه چسب پلی اتیلن تحت درجه حرارت ۲۱۹ الی ۲۲۲ درجه سانتیگراد به عنوان لایه دوم اعمال می شود و چسب پلی اتیلن مخلوطی از پلی اتیلن پیوند خورده با اسید مالئیک و یا اسید اکریلیک می باشد. این چسب از یک سو با پلی اتیلن می تواند به لایه سوم که فیلم پلی اتیلن است بچسبد و از سوی دیگر بدلیل داشتن مالئیک یا اکریلیک می تواند به لایه اول اتصال شیمیایی برقرار کند. زمان در اجرای لایه های چسب و پودر اپوکسی یک فاکتور بسیار حساس می باشد. ابتدا چسب با گروه های شیمیایی در پودر اپوکسی که هنوز پخته شده یک پیوند شیمیایی محکمی برقرار می کند. لذا نباید در این مرحله اپوکسی کاملاً فراوری شده باشد. به عبارت دیگر چنانچه لایه چسب پس از اتمام ژله ای شدن یا کامل شدن شبکه پلیمری پوشش اپوکسی اعمال گردد و دیگر امکان انجام واکنش شیمیایی بین پوشش اپوکسی و چسب پلی اتیلن وجود نداشته و صرفاً چسبندگی بصورت فیزیکی خواهد بود. که نمی تواند پاسخگوی مقاومت بالا در مقابل شرایط حاد باشد.

اعمال لایه سوم که نوار پلی اتیلن است در دمای ۲۴۵-۲۳۵ درجه سانتیگراد پس از خروج از اکسترودر در سطح لوله را می پوشاند. درجه حرارت اعمال لایه پلی اتیلنی در نقطه ذوب پلی اتیلن انجام شده و می تواند بجزء پلی اتیلن لایه دوم در تحت فشار پرس غلتک سیلکونی بچسبد. میزان ضخامت لایه چسب پلی اتیلن و نیز میزان فشارناشی از غلطک نقش بسزائی دارند همچنین با توجه به اینکه چسب و لایه فوقانی پلی اتیلن بصورت فیزیکی متصل می شوند و این عمل توسط فشار غلطک ها صورت می گیرد، بنابراین پارامتر زمان بسیار حساس خواهد بود، زیرا از یک طرف اپوکسی برای پیوند با چسب نباید کاملاً پخته باشد و از طرف دیگر باید به اندازه ای حالت ژل مانند گرفته باشد تا بتواند در برابر فشار غلطک ها مقاومت نماید. کلیه اعمال این مراحل در کمتر از چند ثانیه باید انجام شود تا در نهایت یک پوشش سه لایه با ضخامتی معادل ۳/۵ تا ۶ میلی متر را ایجاد کند. سرعت خنک کردن خط لوله پوشش داده می تواند در کیفیت پوشش تاثیر گذار باشد و عدم کنترل آن می تواند تا ۳/۵ درصد نوسانات حجمی در پوشش لوله ایجاد کند [۳۳، ۲۱].

سه لایه در سامانه پوشش پلی اتیلن سه لایه عبارتند از:

لایه اول

که بعنوان لایه آستری با ضخامت حدود ۱۵۰ میکرون است از پودر اپوکسی استفاده می شود، زیرا که چسبندگی پلی اتیلن با فلز بسیار ضعیف می باشد. گرچه مقاومت مکانیکی اپوکسی ضعیف می باشد ولی به جهت پیوندهای عرضی که ایجاد می کند دارای چسبندگی بسیار خوبی بوده و در برابر واکنش های ناشی از خوردگی پودرهای اپوکسی که در پوشش های سه لایه استفاده می شوند به دو گروه مختلف تقسیم بندی می شوند: گروه اول که خاصیت پرایمر دارند و گروه دوم دارای کیفیت پوشش است.


لایه دوم

لایه دوم بعنوان لایه میانی با ضخامت حدود ۲۰۰ میکرون می باشد لایه چسبی از کوپلیمرهای پلی اتیلن است و قابلیت چسبندگی را به لایه های زیری و بالایی را باعث می شود. این سه لایه معمولا یا پلی اتیلن پیوند خورده با انیدرید مالئیک و یا پلی اتیلن پیوند خورده با اسید اکریلیک می باشد.

لایه سوم

لایه سوم که یک رزین ترمو پلاستیک است و با ضخامت حدود ۲۰۰۰ میکرون اعمال می شود [۳۳، ۲۱، ۳۷].

Coating Cross-Section	Material	Standard Thickness	
		microns (mils)	
	Polyethylene topcoat	500	(20)
	FBE/Adhesive Interlayer	125	(5)
	FBE	125	(5)
	TOTAL	750	(30)



شکل ۲-۳ شماتیکی از حداقل ضخامت برای سطح مقطع پوشش سه لایه

جدول ۲-۷ مشخصات فنی پوشش سه لایه با توجه به اپوکسی پیوند ذوبی (FBE^{۱۳})، لایه کوپلیمر چسبنده^{۱۴} و لایه خارجی از جنس پلی اتیلین سنگین اکستروژده شده (HDPE^{۱۵})

ویژگی	استاندارد	لایه FBE	لایه چسبنده	لایه HDPE
-------	-----------	----------	-------------	-----------

¹³ Fusion-Bonded Epoxy

¹⁴ Co-polymer Adhesive Layer

¹⁵ High Density Polyethylene

		ماده پوشش ترموستی که بر پایه رزین اپوکسی باشد	CSAZ245.20-02	
رزین پلی اتیلن طبیعی سیاه با دانسیته بالا که به آن پایدارکننده برای مقابله نور فرابنفش افزوده شده	لایه چسبنده ای بر پایه پلی اتیلن		CSAZ245.21-02	ترکیب پوشش
		مطابق با ویژگی مدنظر تولیدکننده	CSAZ245.20-02	Cure Time
حداقل ۰/۴۵ میلیمتر	حداقل ۰/۱ میلیمتر	حداقل ۰/۱۲ میلیمتر	CSAZ245.21-20	ضخامت
		به طور عمومی ۱۰۰°C		محدوده دمای عملیاتی
	۰/۹۱۵g/cm ³	۱۴۰۰g/l	CSAZ245.20-02	جذب آب
۰/۹۵۰g/cm ³			ASTM D 792	
۳ J/mm برای ضخامت های متفاوت		۱/۵ J	CSAZ245.20-02	مقاومت به ضربه
Peel: ۱۵۰ دقیقه		بین ۱ تا ۳	CSAZ245.20-02	استحکام پیوند یا چسبندگی
۱۰ ولت بر میکرون ضخامت تا حداکثر ۱۵۰۰۰ ولت		بزرگتر از ۵۵۰ V/mil	ASTM D 149.95	Dielectric strength
بزرگتر یا مساوی ۶۰		۹۰	ASTM D 2240	Shore Hardness D
۰/۴ گرم در ۱۰ دقیقه		۱/۵ گرم در ۱۰ دقیقه	ASTM D 1238	Flow Rate
	بزرگتر از ۸۵ درجه سانتیگراد		ASTM D 1505	Softening Point
	بزرگتر یا مساوی ۱۸ مگاپاسکال		ASTM D 638	Tensile strength at yield

حداقل ۳۰۰٪	حداقل ۳۰۰٪		ASTM D 638	Elongation / Ductility
۱۰۰۰ ساعت			ASTM D 1693	Environmental cracking stress resistance
		حداکثر ۷ میلیمتر (برای ۲۴ ساعت در ۳/۵ ولت و دمای ۶۵ درجه سانتیگراد)	CSAZ245.20-02	Cathodic Disbonding
Bend of 2.5° - 3.0° R=22.42t			CSAZ245.21-20 Table 1	Flexibility

پوشش خارجی لوله های فولادی مطابق استاندارد ISO 21809-1, IPS, IGS, DIN 30670 و الزامات مشتری انجام می شود.

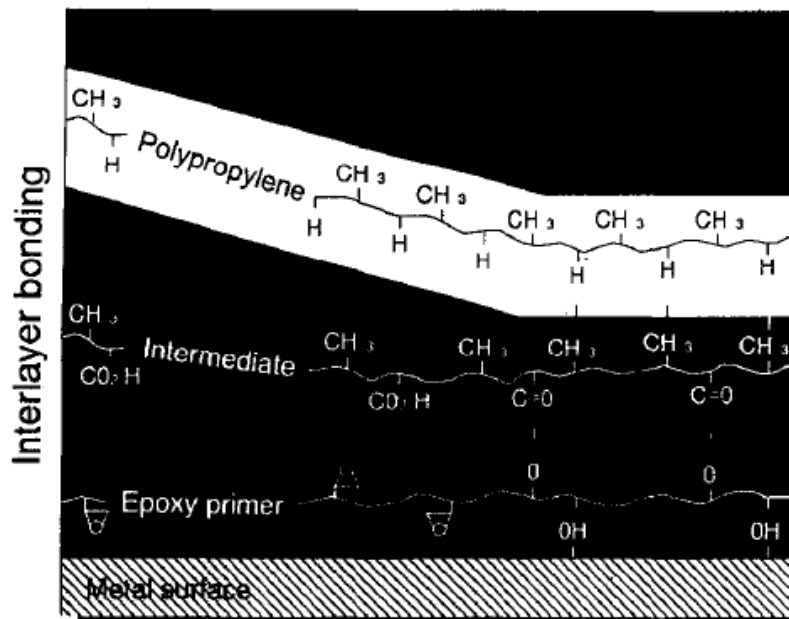
استاندارد DIN30670 الزامات و آزمایشات پوشش پلی اتیلن برای لوله و اتصالات فولادی و استاندارد IPS-G-TP-335 الزامات و آزمایشات پوشش پلی اتیلن برای لوله و اتصالات فولادی- شرکت ملی گاز ایران را بیان می دارند.

۶-۲ پوشش پلی پروپیلن

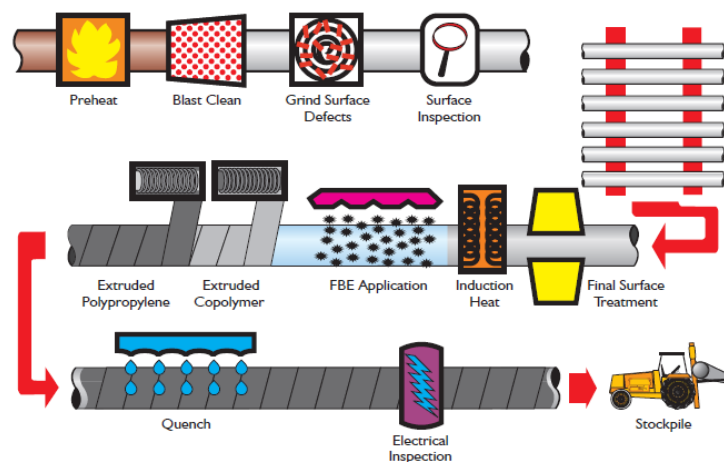
از سال ۱۹۵۷ تا کنون، پلی پروپیلن به بازار معرفی گردیده و رشد چشمگیری در استفاده از آن وجود داشته است. از دهه ۱۹۸۰ به بعد، کویلرهای پلی پروپیلن به عنوان پوشش های مقاوم به خوردگی به بازار راه یافته اند تا به عنوان پوشش خطوط لوله مورد استفاده قرار گیرند.

پوشش های سه لایه پلی پروپیلن از سه لایه مجزا شامل رزین اپوکسی، لایه میانی از جنس کویلر پلی پروپیلن اصلاح شده و لایه خارجی پلی پروپیلن تشکیل شده است. سطح داخلی لایه رزین اپوکسی با اکسید فلزات برهم کنش می کند و سطح خارجی آن با گروه های قطبی در لایه میانی این عمل را انجام می دهد. لایه میانی و خارجی با یکدیگر کاملاً سازگار بوده و باعث ایجاد چسبندگی بسیار خوبی می گردد که به نوبه خود مقاومت به جدایش کاتدی بسیار بالایی را فراهم می کند [۲۳].

در شکل ۲-۴ ترکیب شیمیایی پلی پروپیلن سه لایه نشان داده شده است. فرایند شماتیکی از ساخت آن نیز در شکل ۲-۵ آورده شده است.



شکل ۲-۴ نیروی اتصال بین سه لایه در پلی پروپیلن سه لایه



شکل ۲-۵ شماتیکی از روش ساخت پلی پروپیلن سه لایه

استفاده از اپوکسی پیوند ذوبی^{۱۶} در سیستم پلی پروپیلن سه لایه باعث ایجاد چسبندگی عالی به فولاد گردیده و همچنین، باعث می شود تا مقاومت به خوردگی و حفاظت از خطوط لوله برای سرویس در دماهای بالا به مدت

¹⁶ Fusion Bonded Epoxy (FBE)

طولانی فراهم گردد. خواص چسبندگی فوق العاده اپوکسی پیوند ذوبی باعث مقاومت عالی به جدایش کاتدی گردیده و هزینه کل در استفاده از سیستم حفاظت کاتدی در حین سرویس خط لوله را کاهش می دهد. این پوشش ها را می توان برای لوله های با قطر ۹۰ میلیمتر (۳/۵ اینچ) تا بیش از ۱۲۲۰ میلیمتر (۴۸ اینچ) به کار برد. همچنین آن ها را می توان در گستره وسیعی از ضخامت اعمال نمود.

لایه خارجی چقرمه از جنس پلی پروپیلن از خط لوله در حین حمل و نقل و همچنین نصب آن محافظت نموده و هزینه تعمیر و یا حفاظت در بستر زمینی در مقابل نیروهای برشی، مواد شیمیایی و شرایط ساینده خاک را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد.

با افزودن ضخامت لایه خارجی پلی پروپیلن در این سامانه پوشش سه لایه می تواند بالاترین حد از حفاظت مکانیکی در برابر محیط اطراف را ایجاد نمود، بدون آنکه نیاز به استفاده از پشت بندهای گران باشد [۳۳، ۲۱، ۲۳، ۳۸]. برخی از مشخصات این سامانه پوشش در جدول ۲-۲ آورده شده است.

جدول ۲-۸ برخی مشخصات سامانه پوشش پلی پروپیلن سه لایه

حداقل قطر لوله	۹۰ میلیمتر (۳/۵ اینچ)
حداکثر قطر لوله	بیش از ۱۲۲۰ میلیمتر (۴۸ اینچ)
حداقل طول لوله	۵/۵ متر (۱۸ اینچ)
حداکثر طول لوله	۲۴/۴ متر (۸۰ اینچ)
حداکثر/حداقل دمای سرویس (ساحلی)	۲۰- تا ۱۱۰ درجه سانتیگراد
حداکثر/حداقل دمای سرویس (فراساحلی)	۲۰- تا ۱۴۰ درجه سانتیگراد

۲-۷ پوشش پلی یورتان

پوشش دوجزبی ۱۰۰٪ جامد بر پایه رزین پلی یورتان آروماتیک، قابل اعمال با اسپری که به طور خاص برای محافظت سطوح خارجی خطوط لوله نفت و گاز و آب مدفون در برابر خوردگی در شرایط بسیار خورنده طراحی شده است. این محصول به عنوان پوششی جدید برای خطوط لوله، تعویض پوشش لوله، ترمیم و پوشش سرجوش ها بسیار مناسب می باشد. خواص عالی آن نظیر مقاومت مکانیکی، مقاومت سایشی و خمشی، چسبندگی فوق

العاده و سختی مناسب، این محصول را کاملاً متمایز می کند. از جمله مصارف این نوع پوشش ها می توان در حفاظت از خوردگی لوله ها، اتصالات و نقاط جوش در موارد زیر اشاره کرد:

- سطوح فلزی مدفون در خاک و یا روی زمین
- سطوح فلزی غرق در آب های شور یا شیرین
- تجهیزات نیروگاهی، پتروشیمی و پالایشگاهی

این پوشش ۱۰۰٪ جامد بوده و درصد مواد فرار در آن برابر صفر است. در برابر حلال ها، اسیدها و قلیاها بسیار مقاوم بوده و مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارد. دارای نفوذپذیری و زمان پخت کم و واکنش پذیری زیادی است. قابلیت اعمال در محدوده دمایی گسترده را داشته و جدایش کاتدی آن بسیار پایین بوده و چسبندگی و سختی بالا و در عین حال انعطاف پذیری مناسبی بر روی سطوح فلزی دارد. در محیط های دریایی و صنعتی دوام عالی داشته و در برابر آب، ضربه و سایش مقاوم است. پوششی با قابلیت اعمال در ضخامت بالا در یک لایه بدون نیاز به پرایمر می باشد [۳۹].

کاربرد خطوط لوله، ۱۰۰٪ پوشش پلی یورتان جامد، نشان داده است که یکی از موفق ترین سیستم پوشش حفاظت شده ی استفاده شده برای هر دو کاربرد داخلی و خارجی می باشد. پوششی ۱۰۰٪ جامد یکی از دو پوشش ترجیحی اعمال شده در محل به انتخاب صنعت لوله آب و فاضلاب آمریکا می باشد. انتظار می رود که در ۵ سال آینده تمام سیستم های پوشش نواری برای خطوط انتقال آب و فاضلاب متوقف خواهد شد و به وسیله پلی یورتان ۱۰۰٪ جامد جایگزین شود. همچنین تکنولوژی مشابهی در خطوط نصب و تعمیر نفت و گاز استفاده شده است [۴۰].

پوشش های پلی یورتان صد درصد جامد بر اساس یک سری فرآیند های شیمیایی در پلاستیک های محکم شده با حرارت (Thermo set) تولید می شوند. پوشش های پلی یورتان صد درصد جامد شامل دو نوع صلب و الاستومری هستند. در نوع صلب پلی یورتان، اجزا به محکمی به هم متصل هستند و تولید یک جز سخت و چگال با مقاومت خوردگی بالا می کنند. در پلی یورتان الاستومری اتصالات ضعیف تر است و بهمین دلیل نرمی پوشش و مقاومت به ضربه در آن بالاتر است. مشخص شده است که هیچ مشکلی در پوشش های پلی یورتان جدید که مونومر ایزوسیانات (Isocyanate monomer) در آنها کم می باشد از نظر مسائل زیست محیطی و

آلودگی وجود ندارد در حالی که در رزین های پایه آمینی مقادیری ترکیبات مضر برای انسان وجود دارد [۳۳، ۳۸].

۸-۲ اپوکسی پیوند ذوبی (FBE)

اپوکسی پیوند ذوبی یک جز از پودر رزین اپوکسی ترموست است که از گرما جهت ذوب استفاده کرده و به سطح فلز می چسبد. این پوشش دارای چسبندگی خوب، چقرمگی و مقاومت خوب نسبت به سایش و مقاومت شیمیایی مناسب می باشد. چندین فاکتور را برای انتخاب پوشش خارجی خطوط لوله در نظر می گیرند:

- پایداری شیمیایی و فیزیکی
- مقاومت در برابر تنش خاک
- چسبندگی و مقاومت به ضربه
- مقاومت به جدایش کاتدی

سیستم دولایه ی FBE از کاربرد دومین لایه بر روی پوشش اصلی استفاده می کند، که ماده ی پوشش FBE رویی در حین مرحله ذوب (پیش از ژله ای شدن) اعمال می شود. این محصولات یک پیوند شیمیایی نزدیک بین لایه هایشان ایجاد می کنند. هر لایه طوری طراحی می شود که دارای خواص خاصی بوده که در اثر ترکیب آنها عملکرد مشخص پیشرفته تر از یک لایه پوشش را ایجاد می کند. برای مثال پوشش رویی به عنوان جاذب ضربه عمل کرده و مقاومت بالایی در برابر سایش از خود نشان می دهد، در مقابل لایه زیرین به منظور حفاظت از خوردگی و جدایش کاتدی طراحی می گردد. [۴۱].

برخی از خواص پوشش های FBE که آن را نسبت به دیگر پوشش ها متمایز می کند:

- ۱- چسبندگی خوب به فولادی که خوب تمیز شده
- ۲- مقاومت شیمیایی خوب
- ۳- نفوذ پذیری کم اکسیژن
- ۴- هیچ گزارشی از خوردگی تحت تنش لوله های پوشش داده شده با FBE نیست.
- ۵- پوشش به نواحی متصل بوده که سبب جدایش خطوط لوله فولادی از محیط شیمیایی SCC می شود.
- ۶- اجازه گذر جریان در قالب تخریب پیوند را می دهد.

۷- مقاوم در برابر حملات بیولوژیکی

۸- مقاوم و سخت- که در دریا، کوههای صخره ای، صحرا و در شمال مرتباً نصب می شوند.

۹- مقاومت به نفوذپذیری

۱۰- مقاومت به ضربه خوب

۱۱- آسیب های ضربه، به نقطه تماس محدود می شود.

۱۲- آسیب به راحتی دیده می شود.

۱۳- آسیب به راحتی تعمیر می شود.

۱۴- مقاومت به سایش خوب

۱۵- انعطاف پذیری خوب [۴۱].

۱-۸-۲ پوشش های FBE دو لایه خطوط لوله

سیستم پوشش FBE دولایه در سال ۱۹۹۰ میلادی معرفی شد و توانایی های بسیار بزرگی را فراهم کرد. لایه رویی معمولاً و نه ضرورتاً در حین مرحله ذوب لایه ی اولیه (پس از ژله ای شدن)، اعمال می شود، در نتیجه یک پیوند شیمیایی بین دو لایه ایجاد می گردد. مزیت بارز تکنولوژی پوشش های چند لایه، خصوصیات منحصر به فرد آنهاست که می تواند با انتخاب لایه هایی متفاوت از پوشش ها، خواص منحصر به فردی را گسترش دهند. هر لایه برای ویژگی خاصی طراحی شده تا در اثر ترکیب با سایر لایه ها، نتایج کاربردی بهتری که سبب برتری آن نسبت به یک پوشش تک لایه می شود را ارائه دهد [۴۲].

در مصارف خطوط لوله، لایه ی زیرین به عنوان پوشش خوردگی طراحی شده و گاهی هم ماده ای مشابه با FBE به تنهایی استفاده می شود. همه ی پوشش های FBE به طور یکسانی ساخته نمی شوند. همچنین پوشش های اولیه ی نوین تحت ارزیابی هایی جهت دمای بالای سرویس می باشند.

لایه ی رویی سیستم FBE دو لایه، برای کاربرد های خاصی همانند موارد زیر طراحی شده اند:

▪ ضد لغزش (سطحی زیر و پراضطکاک)

▪ مقاوم در برابر اشعه ماورابنفش (هوازدگی)

▪ دمای بالا

▪ مقاومت به آسیب در حین ساخت [۴۲]

سیستم دولایه ی FBE مقاوم در برابر سایش، انتخاب خوبی برای زمانی است که لوله توسط عملیاتی طاقت فرسا نصب می گردد، و یا تمرینات سازه ای سخت بوده و ناحیه ی زیان آوری برای پوشش باشد. پوشش کاهش دهنده اصطکاک، زمانی که بتن برای ایجاد رانش منفی استفاده شده، اعمال می گردد. سایر سیستم های پوشش دولایه برای دماهای کارکرد بالای ۱۱۰ درجه سانتیگراد استفاده می گردد [۴۳].

بالاترین مزیت استفاده از پوشش اپوکسی لوله در مقایسه با سایر پوششها، مقاومت آنها در حرارت نسبتاً بالا حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد و تداوم عمر بدون عیب آنها، منوط به قرار داشتن در محیط خشک می باشد. برخی سامانه های فیلم نازک اپوکسی حتی می توانند در محیط های مرطوب و با افزایش درجه حرارت نیز ایستادگی نمایند. در عمل این نوع پوشش برای خطوط لوله در خشکی با درجه حرارت عملیات تا 65°C متداول می باشد [۴۱].

نقطه ضعف این سامانه پوششی حساسیت زیاد به ضربه اجسام تیز و صدمات ناشی از آن می باشد. به همین جهت هنگام حمل و نقل و جابجائی در منطقه، و لوله گذاری لوله، نیاز به دقت زیاد دارد. خوشبختانه صدمات ناشی از ضربه به طور عادی موجب جداشدن پوشش از لوله در سطح صدمه دیده نمی شود و قسمت صدمه دیده را می توان به راحتی با ذوب گرم یا مایع رزین اپوکسی تعمیر کرد [۴۱].

تجربه نشان داده است که آماده سازی صحیح سطح قبل از بکارگیری پودر رزین اپوکسی با این پوشش از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. برای به دست آوردن یک پوشش رضایت بخش، کنترل کیفیت در زمان اعمال پوشش به طور خیلی دقیق تأکید شده است. به علت بالا بودن مقاومت الکتریکی پوشش جریان حفاظت کاتدی نسبتاً کم در طول عمر پوشش مورد نیاز است. شدت جریان طراحی توصیه شده برای ۳۰ عمر پوشش ۵۰ میکروآمپر بر مترمربع سطح خارجی لوله می باشد [۱۱].

۹-۲ خواص پوشش های خط لوله

مساله ایجاد سپر الکتریکی در خطوط لوله هایی که پوشش آن ها به دلایل مختلفی دچار جدایش از روی سطح گردیده، از جمله مشکلاتی است که اصولاً کارشناسان حفاظت کاتدی بعد از وقوع خوردگی و احتمالاً بروز حادثه متوجه آن می شوند.

شیلدینگ همیشه یک خطر جدی است و به آسانی و به روش اندازه گیری عادی و معمولی قابل ردیابی و شناسایی نمی باشد. بکارگیری روش CIS می تواند ضعف یک سامانه حفاظت کاتدی و وضعیت پتانسیل های حفاظتی را نشان دهد، اما این که در کجا پدیده شیلدینگ رخ داده و یا در حال شکل گرفتن است را مشخص نمی نماید.

برای مشخص کردن محل شیلدینگ کاتدی در زیر پوشش ها، استفاده از توپک های هوشمند و تکنیک گرادپان ولتاژ یا DCVG می تواند راه گشا باشد. خوردگی ناشی از به وجود آمدن یک سپر الکتریکی در خطوط لوله های گاز که منشاء آن جدا شدن پوشش لوله است، برحسب نوع پوشش ها متفاوت می باشد.

چنانچه رطوبت کافی در پوشش نفوذ کرده و محیط الکترولیت در فضای بین پوشش و سطح سازه، تشکیل شود، حفاظت کاتدی با عبور از پوشش و الکترولیت به سطح دسترسی پیدا کرده و وظیفه حفاظتی خود را انجام می دهد. به این دسته از پوشش ها اصطلاحاً مقاوم در برابر تخریب^{۱۷} گفته می شود. شاخص ترین پوشش در این گروه می توان به پوشش اپوکسی پیوند ذوبی و پلی یورتان اشاره نمود. یعنی اگر پوشش دچار ضعف چسبندگی هم گردد، دچار شیلدینگ نمی شود و حفاظت کاتدی می تواند توزیع پتانسیل را ادامه دهد. نکته جالب و قابل توجه در مورد این نوع پوشش ها، نفوذپذیری مناسب آنها در مقابل رطوبت و آب و نفوذ ناپذیری آن ها در مقابل اکسیژن است. همین خصوصیت باعث می شود تا اکسیداسیون ایجاد نشود [۲۰، ۲۷، ۳۷، ۴۴-۴۶].

یکی از مزایای خیلی خوب پوشش هایی مایع مانند اپوکسی، عدم شیلدینگ آن ها در زمان جدا شدن پوشش از روی سطح به خاطر عملکرد سامانه حفاظت کاتدی و توزیع و برقرار شدن پتانسیل کاتدی در زیر لایه پوشش است.

زمانی که پوشش های قیری مانند قیر پایه نفتی و قیر ذغال سنگی دچار جدایش کاتدی شوند، بخاطر وجود منافذ داخل قیر و توانایی جذب رطوبت توسط پوشش، علیرغم جدا شدن پوشش از روی سطح لوله، امکان نفوذ الکترولیت به زیر پوشش از طریق منافذ وجود دارد. از این رو پتانسیل حفاظت کاتدی به مناطق دور تر از محل جدایش کاتدی در چنین پوشش هایی قابل نفوذ بوده و بنابراین، می تواند در فاصله و طول بیشتری از مناطق اطراف لوله که در آن جدایش کاتدی اتفاق افتاده است را از خوردگی محافظت نماید. البته بروز زنگ و حتی خوردگی در خطوط عایق شده با پوشش های یاد شده در فاصله ای دورتر از جدایش کاتدی می تواند حادث

¹⁷ Fail Safe

شود که میزان آن هم به عواملی همچون زمان، وسعت جدایش پوشش و محیط های اسیدی و pH نزدیک و خنثی^{۱۸} بستگی دارد و از این رو، شدت خوردگی در لوله های با پوشش قیری در قیاس با پوشش های اپوکسی بیشتر است، اما در مقایسه با پوشش های پلاستیکی و از خانواده پلی اولفین که لایه محافظ یا پوشش فوقانی آن از جنس پلی اتیلن یا پلی پروپیلن است، نسبتاً از شدت کمتری برخوردار می باشد [۲۰، ۴۷].

با توجه به جدایشی که در پوشش های پلی اتیلن سه لایه و به صورت گسترده در دنیا اتفاق افتاده، خطوطی که با این نوع پوشش عایق شده اند، علیرغم ضخامت بالا و مقاومتی که پوشش نسبت به جذب الکترولیت دارد، با این وجود بروز خوردگی در زیر لایه پوشش جدا شده از روی سطح به خاطر پدیده جدایش کاتدی به دلیل استفاده لایه محافظ رویی از پلی اولفین (پلی اتیلن/پلی پروپیلن)، منتفی نبوده و خوردگی در چنین خطوط با پوشش یاد شده وجود دارد. اما به خاطر این که نیروی چسبندگی و ضخامت پوشش پلی اتیلن سه لایه نسبت به پوشش های نوار سرد پلاستیکی بیشتر است، از این رو بروز خوردگی ناشی از سپر حفاظت کاتدی در بخش هایی که پوشش جدا شده در قیاس با نوارهای دولایه از نظر شدت و زمان وقوع کمی متفاوت است.

به طور کلی، پوشش های پلی اولفین مانند پلی اتیلن و پلی پروپیلن از نظر سپر الکتریکی مورد توجه می باشند. قابلیت نفوذ آب به پوشش های یاد شده مانند پوشش های پلی اتیلن سه لایه، سامانه سه لایه پلی پروپیلن، نوارهای دو لایه سرد پلاستیکی با لایه چسب بوتیل رابر و نوار دو لایه سرد پلاستیکی با لایه چسب بتیومن با لایه نوار روئی یا لایه محافظ پلی اتیلن/پلی پروپیلن و نوارهای سه لایه به مراتب کمتر بوده و جریان حفاظت کاتدی برای نفوذ و حفاظت لوله در نواحی که جدایش پوشش اتفاق افتاده، با مشکل روبرو می گردد. البته امکان نفوذ جریان حفاظتی از طریق سطوح مرطوب به زیر پوشش وجود دارد، اما اگر سطح زیر پوشش خشک باشد، امکان دسترسی جریان حفاظت کاتدی به سطح لوله و پیشروی به سایر نقاط، عملاً مشکل و تا حدودی غیر ممکن می شود [۱۷-۱۸، ۴۷].

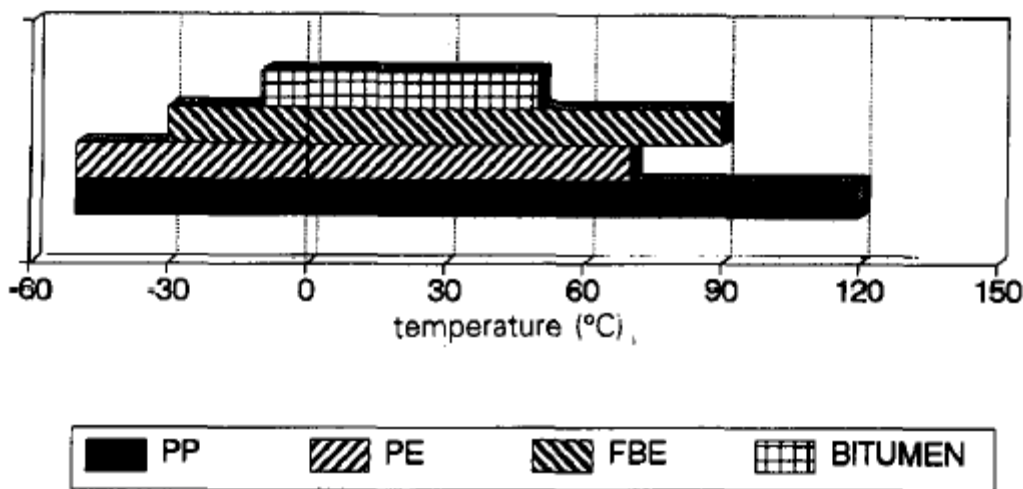
به عبارتی در چنین حالتی یعنی خشک بودن سطح زیر پوشش، جریان کاتدی نفوذ نمی کند. اما چنانچه آب شور بر روی سطح لوله نفوذ و باقی بماند، خوردگی لوله ادامه یافته و به علت عدم دسترسی و نفوذ پتانسیل کاتدی به سطح لوله، امکان متوقف کردن خوردگی از طریق پتانسیل حفاظت کاتدی نبوده و در چنین حالتی خوردگی موضعی به درون لوله نفوذ کرده و باعث نشت آن می شود.

¹⁸ Neutral

سیستم پوشش بیتوسیل از دو طریق ظهور جدایش کاتدی را بسیار محدود می سازد. اولاً ویژگی منحصر به فرد خود ترمیمی در نقاط آسیب دیده با ابعاد کوچک، عملاً بستر فعل و انفعال شیمیایی منجر به جدایش کاتدی در سطح لوله را مسدود می سازد و ثانیاً سازگاری پوشش بیتوسیل با جریان حفاظت کاتدی مانع از سپر حفاظت کاتدی گردیده و در صورت وجود مواضع آسیب دیده در پوشش، سطح لوله در مقابل اکسیداسیون و نهایتاً جدایش پوشش محافظت می گردد. مقاومت پوشش بیتوسیل در مقابل جدایش کاتدی بر اساس نتایج آزمایشگاهی در سطح بالاتری نسبت به پوشش های پلی اولفین سه لایه و هم ردیف با پوشش های اپوکسی پیوند ذوبی می باشد. به عبارت دیگر، پوشش های بیتوسیل و پوشش های اپوکسی پیوند ذوبی بالاترین مقاومت را در برابر جدایش کاتدی در بین پوشش های متداول خطوط لوله دارند [۴۸-۱۹ و ۱۹].

پوشش بیتوسیل از تماس الکترولیت با سطح لوله پیشگیری نموده و نیز از طریق ساختار سه بعدی دارای خلل و فرج بسیار ریز خود، با عبور جریان حفاظت کاتدی مانع از خوردگی و ایجاد خوردگی تحت تنش می شود. نوع ماده پوشش و ضخامت آن بر عملکرد حفاظتی سامانه پوشش مؤثر است. پوشش پلی اتیلن مناطق دچار تورق^{۱۹} کمتری را از خود نشان داده حفاظت بیشتری در مقایسه با پوشش کولتار از خود نشان می دهد که دلیل آن به تشکیل لایه اکسید متراکم تر و کاهش میزان جدایش لایه اکسیدی در فصل مشترک پوشش/زیرلایه بر می گردد. هرچه ضخامت پوشش بیشتر باشد، عملکرد حفاظتی سیستم پوشش در اثر افزایش مقاومت انتقال بار لایه اکسیدی بیشتر افزایش می یابد. مقاومت به دمای سرویس این پوشش ها در شکل ۶-۲ نشان داده شده است [۵۰-۵۲].

¹⁹ delamination



شکل ۶-۲ مقاومت به دمای سرویس برای پوشش های پلی پروپیلن (PP)، پلی اتیلن (PE)، اپوکسی پیوند ذوبی (FBE) و بیتومن.

سیستم پوشش بیتوسییل، یک سیستم غیر سمی و عاری از جنبه و اثرات زیست محیطی است و از این رو در پوشش دهی خطوط لوله ساحلی و فراساحلی قابل استفاده است. پوشش بیتوسییل به میزان کمی سمی می باشد، اما اقدامات ایمنی در خصوص آن بایستی مدنظر قرار گیرد. به هنگام اعمال آن یا بازرسی از دستکش و همچنین عینک های محافظ استفاده شود. چنانچه این ماده با پوست تماس یابد، با آب صابون باید شسته شود.

در میان پلاستیک های سنتزی (غیر طبیعی)، پلی اتیلن، پلی پروپیلن، پلی استایرن و پی وی سی بیشترین مصرف را (با بیش از ۷۵٪ مصرف) در دنیای امروز دارد بنابراین مشکلات محیط زیست امروزه عمدتاً ناشی از مصرف این دسته از پلاستیک ها می باشد.

پلی اتیلن به عنوان یک پلاستیک پر مصرف در بیشتر صنایع از جمله خودرو سازی، لوازم خانگی، بسته بندی، بهداشتی و پزشکی مورد استفاده قرار گرفته به طوری که صنایع بسته بندی بیشترین سهم را در مصرف این پلیمر مصنوعی نشان می دهد. پلی اتیلن هیچگونه آثار زیست محیطی ندارد و پوشش های پلی اتیلن نیز در مقابل حمله میکرو ارگانیسم ها مقاوم می باشند، چراکه پلی اتیلن ماده تغذیه کننده ای برای آن ها نمی باشد.

پوشش های کولتار به صورت داغ روی سطح سرد لوله قرار می گیرند و اغلب به وسیله یک لایه داخلی فایبر گلاس تقویت شده و در سطح خارجی آن یک لایه نمد قرار می گیرد. پوشش دهی لوله ها در محل نصب و با ماشین های خاص انجام می گرفت. وجود نگرانی های محیط زیستی در مورد سمی بودن بخارات حاصل از لعاب های کولتار و قیر، باعث شد استفاده از این پوشش ها بسیار محدود شود. با این حال، این پوشش ها هنوز هم

در بعضی موارد با کنترل‌های سخت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵۰، ۲۳، ۵۳]. مشخصات اصلی پوشش‌های مورد نظر و مشخصات ویژه این پوشش‌ها به طور جداگانه و مختصر در جدول ۹-۲ تا ۱۱-۲ بیان شده است [۷، ۱۱، ۵۴].

جدول ۹-۲: مقایسه کلیه خواص پوشش‌های خط لوله (۱- بسیار ضعیف، ۵= عالی)

قیر (بیتومن)	اپوکسی پیوند ذوبی	پلی اتیلن	پلی پروپیلن	
۱	۵	۴	۵	مقاومت به تنش خاک
۱	۳	۵	۵	مقاومت به قارچ و باکتری
۱	۵	۴	۵	مقاومت به نفوذ
۱	۳	۵	۵	انعطاف پذیری
۲	۴	۵	۵	مقاومت به دمای پایین
۱	۴	۳	۵	مقاومت به دمای بالا
۲	۵	۴	۵	چسبندگی
۴	۵	۵	۵	مقاومت به جدایش کاتدی
۲	۴-۲	۵	۵	نفوذ ناپذیری آب
۲	۵	۴	۴	نفوذ ناپذیری اکسیژن
۱	۴	۵	۵	مقاومت در برابر تغییر حجم
۲	۳	۴	۵	استحکام ضربه
۳	۴	۴	۴	مقاومت به هوازگی
۲	۵	۴	۴	مقاومت به سایش
۲	۳	۳	۵	مقاومت به تخریب

۲	۴	۵	۵	سازگاری با محیط زیست
---	---	---	---	-------------------------

جدول ۱۰-۲: مشخصات پوشش ها

پلی یورتان	اپوکسی مایع	پلی اتیلن ۳ لایه	FBE	انامل قیری	پوشش خواص
✓	-	✓	✓	-	ایمنی بالا- اپراتور دوست
✓	-	✓	✓	-	سازگاری با محیط زیست
✓	-	✓	✓	-	قابلیت کیورینگ در دمای پائین
✓	-	-	-	-	عدم نیاز به پیش گرم نمودن لوله
✓	-	-	-	-	قابلیت اعمال در هر ضخامت بر هر لوله
✓	✓	-	-	✓	قابلیت اعمال در سایت
✓	-	✓	-	-	مقاومت بالا در برابر آسیبهای مکانیکی
✓	-	✓	-	-	خواص فیزیکی عالی
✓	✓	✓	✓	-	مقاومت حرارتی بالا
✓	✓	-	-	-	قابلیت مصرف بعنوان پوشش سر جوشها
✓	✓	-	-	✓	تامین پوشش یکپارچه و بدون درز
-	-	✓	✓	✓	رکورد مصرف طولانی جهت پوشش لوله
✓	✓	-	-	-	تعمیر آسان-بدون نیاز به متعلقات
✓	✓	-	-	-	هزینه تعمیرات پائین

✓	✓	✓	✓	-	عمر سرویس طولانی
✓	✓	✓	✓	-	چسبندگی خوب به سطح
✓	✓	✓	-	-	مقاومت بالا در برابر ضربه و تنش
✓	✓	-	✓	-	حداقل جدایش کاتدی
✓	✓	-	✓	-	عدم افت چسبندگی در طی زمان
✓	-	✓	-	-	عدم آسیب پذیری در طی حمل و نقل
✓	✓	✓	✓	-	مقاومت بالا در برابر خوردگی
✓	✓	✓	✓	-	مقاومت بالا در برابر تنش خاک
✓	✓	-	-	✓	نصب آسان و سریع
✓	✓	-	-	-	نیاز به حداقل تجهیزات جهت اعمال
-	-	-	-	✓	حداقل نیاز به آماده سازی سطح
✓	✓	-	✓	-	تک لایه-عدم نیاز به پرایمر

MSRPCO

جدول ۱۱-۲: مزایا و معایب برخی پوشش ها

سیستم پوشش	مزایا	محدودیت ها	کاربردها
بیتوسیل انامل	اعمال راحت - کمترین نیاز به آماده سازی سطح - سابقه ی طولانی موفق - نفوذپذیر نسبت به حفاظت کاتدی - بسیار اقتصادی	اکسیداسیون و ترک های خوردگی به تنش خاک محدودیت در دماهای کارکرد کم نگرانی های محیطی و در معرض بودن	استفاده خارجی آن کاهش یافته است.
FBE	مقاومت به خوردگی عالی	مقاومت به ضربه کم - کاربرد میدانی	بیشتر خطوط اصلی نفت و گاز
پلی یورتان ۱۰۰٪ جامد و صلب	پخت در دمای کم - ست سریع - سایش عالی - مقاوم به ضربه و چسبندگی	احتیاج به استفاده از چندین جز سیستم - کاربرد پیچیده - حساس به رطوبت	خطوط اصلی و اتصالات فروشگاهی و میدانی

۱۰-۲ معیار انتخاب پوشش [۱۱و۷]

در جمع بندی انتخاب پوشش معیارهای زیر را باید به عنوان حداقل در نظر گرفت:

- ۱- مقاوم در مقابل تخریب ناشی از محیط خورنده.
- ۲- بسیار مقاوم در مقابل تخلیه الکتریکی.
- ۳- مقاوم در مقابل انتقال و نفوذ رطوبت.
- ۴- قابل اجرا با حداقل عیب.
- ۵- مقاوم در مقابل باکتری، رشد میکروبی و ریشه های گیاه.
- ۶- چسبندگی خوب به سطوح فلزی.
- ۷- مقاوم در مقابل آسیب مکانیکی در حین جابجایی و انبار کردن و نصب.
- ۸- مقاوم در مقابل جدا شدن کاتدی.
- ۹- سهولت تعمیر.
- ۱۰- پایدار بودن ویژگیهای فیزیکی با زمان.
- ۱۱- داشتن شرایط مناسب در حین جابجایی، انبار، ساخت و نصب.
- ۱۲- جدیدترین فناوری برای اجرای پوشش ها.
- ۱۳- سطح بازرسی و کنترل کیفی در حین اجرای پوشش.
- ۱۴- هزینه و در دسترس بودن.
- ۱۵- خدمات و تجربه تأیید شده.
- ۱۶- جذب کم آب.
- ۱۷- سازگاری با نوع حفاظت کاتدی سامانه لوله های زیر دریا.
- ۱۸- سازگاری با دمای عملیاتی.
- ۱۹- داشتن نرمی کافی به منظور کاهش شکستگی.

۲۰- مقاوم در مقابل تخریب در آینده در محیط های داخل آب.

۱۱-۲ آزمون های بررسی کیفیت و کارآیی پوشش ها

۱-۱۱-۲ تست انعطاف پذیری^{۲۰}

دستگاه خمش سنبه ای برای تست نمونه های فولادی پوشش داده شده در دمای اتاق استفاده می شود. موضوع اصلی تست خمش، بدست آوردن استحکام پوشش تحت شرایط خمش می باشد. قبل از خمش نمونه، آن را جهت پیدا کردن عیوب مورد بازرسی چشمی قرار می دهند. همچنین ضخامت نمونه را قبل از تست اندازه گیری می کنند. سپس نمونه را درون نگهدارنده قرار داده و از پهنا (سمت ضخیم تر) در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد خم کرده و این پدیده حدود ۳۰ ثانیه به طول می انجامد. سپس نمونه را مجددا جهت پیدا کردن عیب توسط شناساگر عیوب بررسی کرده و هرگونه ترک در پوشش بعد از خمش نمونه شناسایی می شود. استاندارد ASTM D522 نشان دهنده توانایی مقاوت پوشش در برابر ترک، جدایش یا سایر آسیب های مکانیکی پوشش می باشد. آزمون خمش پوشش اعمال شده بر روی لوله های فولادی نه تنها در محل بلکه در کارخانه نیز انجام می پذیرد [۸،۲۵،۵۵].

۲-۱۱-۲ تست ضربه^{۲۱}

برای محافظت فولاد در خوردگی، لایه ی پوشش آن باید پیوسته باشد. شکاف در پوشش، اجازه نفوذ یون های خورنده را در نمونه فولادی ایجاد کرده و باعث شروع تخریب و خوردگی می شود. تست ضربه برای زمانی که نتایج عملکرد پوشش خطوط لوله در اثر ضربه و مقاوت مکانیکی آنها پر اهمیت می شوند، صورت می گیرد [۵۶].

تست ضربه بر اساس استاندارد ASTM G14 توسط افتادن یک وزن از یک ارتفاع مشخص بر روی پوشش صورت می گیرد. تخریب در نقاطی که عیوبی دیده می شود صورت می گیرد. هدف از انجام این تست ارزیابی مقاومت پوشش برای آسیب توسط ضربه یک شی می باشد. نتایج، بر اساس میزان انرژی مورد نیاز تخریب

²⁰ Flexibility test
²¹ Impact test

پوشش و تولید عیوب و ناپیوستگی ها اندازه گیری می شود و واحد آن بر حسب ژول بر میلیمتر مربع (مساحت سطح تخریب شده) گزارش می شود. هرچه میزان این انرژی جذب شده بیشتر باشد، مقاومت به ضربه نیز بیشتر است [۵۶-۵۷].

۳-۱۱-۲ تست چسبندگی^{۲۲}

تست قدرت چسبندگی یا روش برش عرضی^{۲۳}، برای بررسی استحکام چسبندگی پوشش صورت می گیرد. وسیله انجام تست چسبندگی شامل قرقره های از جنس آلومینیوم است که در جهت عمود بر سطح پوشش به نمونه چسبانده می شود. بعد از پخت^{۲۴} چسب، ابزار آزمون به اتصالات اعمال نیرو متصل شده و برای اعمال نیروی کششی عمود بر سطح آماده می شود. نیروی اعمالی بر اتصالات اعمال نیرو به تدریج افزایش یافته و تا زمانی که اتصال پوشش گسسته شده و یا به یک مقدار مشخصی برسد، محاسبه می گیرد. در تست برش عرضی برای ارزیابی میزان چسبندگی پوشش، برش عرضی به کمک یک چاقو از سطح پوشش تا عمقی از سطح فلز صورت می گیرد. در ناحیه ی برش، تیغه ی چاقو در زیر پوشش فرو رفته و توسط یک نیروی اهرمی پوشش ورقه می شود. ناحیه ورقه شده زیر میکروسکوپ (با بزرگنمایی ۴۰ برابر) قرار گرفته تا گستره از بین رفته ی پوشش از سطح مشاهده شود [۲۵].

۴-۱۱-۲ مقاومت شیمیایی^{۲۵}

این تست بر اساس دو روش از استاندارد های ASTM استفاده می شود. برای مثال ASTM D714 است که تاثیر محلول، زمانی که پوشش را به فلز اعمال می کنیم را بررسی می کند. ارزیابی وقتی کامل می شود که صفحات جهت یافتن تاول هایی بعد از عملیات غوطه وری بازرسی شود. این تست شرایط "عمر حقیقی"^{۲۶} را بیان کرده و نتایج نهایی بیان می کنند که این عمر سرویس پوشش تنها همان مدت زمانی که تست روی آن صورت گرفته پیشنهاد می شود [۲۶].

در دومین روش که بر اساس استاندارد ASTM D543 می باشد، صفحاتی از پوشش در ابتدا وزن شده و سپس درون محلولی حداقل به مدت ۷ روز غوطه ور می گردد. بعد از زمان غوطه وری، نمونه ها خشک شده و دوباره

²² Adhesion test

²³ V-Cut

²⁴ Curing

²⁵ Chemical Resistance

²⁶ True-Life

وزن می شوند و سپس سایر خصوصیات آنها (مثل تغییرات اندازه و ظاهر کلی و ...) مورد ارزیابی قرار می گیرد. اگر تغییرات وزن در طی ۷ روز کم باشد یا هیچ گونه تغییرات وزنی نداشته باشد و اگر تغییرات وزن کمتر از ۳ درصد در طی ۳۰ روز باشد همچنین هیچ تغییراتی در سایز و ظاهرش نداشته باشد، پوشش برای غوطه وری ثابت و مستمر در محلول پیشنهاد می شود. در طی ۲۰ سال گذشته، این معیار بسیار مورد اعتماد بوده است [۲۴،۵۸].

۵-۱۱-۲ نفوذ پذیری^{۲۷}

تست نفوذپذیری در واقع اندازه گیری توانایی نفوذ آب حاوی مواد شیمیایی و گاز به درون پوشش می باشد. هرچه میزان نفوذ کمتر باشد، مقاومت پوشش در برابر تاول زدگی و جدایش بیشتر است. دستورالعمل ASTM D570 برای اندازه گیری نفوذپذیری آب درون پوشش نمونه بعد از ۳۰ روز استفاده می شود. نتایج گزارش شده بر اساس درصد نفوذ آب به پوشش گزارش می شود. هر چه درصد نفوذ کمتر باشد، مقاومت پوشش به نفوذپذیری بیشتر است [۲۴،۵۹].

۶-۱۱-۲ تست سختی^{۲۸}

این روش توانایی پوشش در برابر نیروهای دینامیکی را نشان می دهد. در این تست از یک فرو رونده استفاده می شود که با اعمال نیروی فشاری ثابت درون پوشش نفوذ می کند. هرچه عمق نفوذ بیشتر باشد، سختی پوشش کمتر است. نهایتاً سختی پوشش را به صورت یک عدد گزارش می کند که هرچه این عدد بیشتر باشد، سختی پوشش نیز بیشتر است. تست سختی بر اساس استاندارد ASTM D2240 صورت می گیرد که مقاوت بین ۸۸-۵۵ بدست می آید. سختی در این بازه به طور معمول در سیستم پوشش های خارجی مورد قبول می باشد [۲۴،۶۰].

۷-۱۱-۲ مقاومت به هوازگی

از آنجایی که لوله های پوشش دار ممکن است در محوطه بیرون برای مدت زمان طولانی قبل از دفن در محل نگهداری شوند، تست هوازگی برای ارزیابی پایداری پوشش هنگام نگهداری در اتمسفر مورد نیاز است. نتایج

²⁷ Permeability
²⁸ Hardness test

بدست آمده باید بر اساس تاثیرات کلی هوازدگی و تجزیه بر اساس اشعه ماورابنفش درجه بندی شود. روش تست ASTM C217 با استفاده از آزمونگر پر شتاب هوازدگی QUV می باشد [۶۱].

۸-۱۱-۲ اسپری نمکی

تست اسپری نمکی درون یک محفظه دارای مه نمک، مطابق ASTM B117 صورت می گیرد. نمونه های خش دار و یا بدون خش در معرض نمک قرار گرفته و با توجه به تغییرات وزن و تاول زدگی هایی که در اثر خوردگی ایجاد شده اند و همچنین از دست دادن چسبندگی در سطوح خش دار و بدون خش ارزیابی می شود [۶۲].

۹-۱۱-۲ مقاومت به سایش^{۲۹}

در هر کاربردی، پوشش داخلی خطوط لوله باید جریان ثابتی از سیال به همراه ذرات را تحمل کند. سرعت عادی خطوط لوله شهری در بازه ی ۸ تا ۱۶ فوت بر ثانیه (۲ تا ۴ متر بر ثانیه) می باشد، اما این نرخ ها در بعضی از شرایط افزایش یافته و ۳۰ فوت بر ثانیه را طی می کند. خطوط حفاظت کاتدی نشده، توانایی تحمل سایش ایجاد شده توسط گذر آب با سرعت های مختلف را دارد. تخریب نا بهنگام خطوط لوله زمانی می تواند رخ بدهد که سطح فولاد در معرض سیکل خوردگی قرار بگیرد.

در تست سایش بر اساس استاندارد ASTM D4060، نمونه تحت یک وزن مشخص (یک کیلوگرم) در مقابل چرخ های سایشی CS17 در تعداد دور تعریف شده ای (۱۰۰۰ سیکل) می چرخد. نمونه ها توسط اندازه گیری تغییرات وزن نمونه قبل و بعد از تست سنجیده می شود. اگر نتیجه کاهش وزن باشد، نشان دهنده توانایی مقاومت قابل قیاس پوشش در برابر سایش می باشد. هرچه کاهش وزن کمتر باشد، مقاومت به سایش پوشش بیشتر است [۶۳].

۱۰-۱۱-۲ جدایش کاتدی

خطوط لوله فولادی مستعد به خوردگی هم در زیر آب دریا و هم در زیر خاک می باشد. نرخ این خوردگی به جنس فولاد، دما، در دسترس بودن اکسیژن، آب و نمک های شیمیایی در سطح فلز بستگی دارد. برای محافظت از فولاد و کاهش نرخ خوردگی، پوشش های مخصوص به سطح خارجی لوله اعمال می گردد. پوشش های لعابی تحت شرایط خاصی اعمال می شود، گاهی در کارخانه و احتیاط های لازم جهت اطمینان از بی عیب بودن،

²⁹ Abrasion Resistance

که حین فرآیند پوشش دهی، حمل و نقل و بررسی ایجاد می شوند، انجام می شود. همچنین عیوب همواره ممکن است رخ دهند و به همین دلیل خطوط لوله همواره تحت یک حفاظت از خوردگی دیگر مثل حفاظت کاتدی می باشد. موثر و کارآمد بودن سیستم های حفاظت کاتدی را با اندازه گیری پتانسیل بین سطح فلز محافظت شده و الکترولیت اطراف آن بدست می آورند [۳۱].

حفاظت کاتدی تکنیکی برای جلوگیری از خوردگی سطح فلز (عموماً فولاد) می باشد، که توسط فراهم کردن جریان کاتدی کافی برای کم کردن حلالیت آندی یا خوردگی سطح فلز می باشد. هنگام محافظت از فولاد، این تکنیک می تواند برای عملکرد پوشش اعمالی مضر باشد. نواحی آندی در شکاف ها و عیوب موجود در پوشش گسترش می یابد. محیط مهاجم درون سطح مشترک پوشش-نمونه گسترش یافته و در این عیوب (کاتد) که در نتیجه ی حفاظت کاتدی بوده است جدایش کاتدی شروع شده و در اطراف عیوب منتشر می شود. دلیل این پدیده افزایش PH در محیط می باشد و این مفهوم را تحت عنوان جدایش کاتدی می نامند [۵۶].

تعمیم اقسام مختلف جدایش پوشش از سطح لوله به جدایش کاتدی، یک برداشت نادرست از این پدیده است. جدایش کاتدی مشخصاً در پیرامون حفره ها و منافذ^{۳۰} و یا نقاط آسیب دیده پوشش تعریف می شود. مکانیسم های متفاوتی در ظهور جدایش کاتدی تاکنون به اثبات رسیده است ولی شاید بتوان گفت که پیش نیاز پیدایش جدایش کاتدی در بیشتر مکانیسم های موجود، تشکیل یک بستر قلبائی ناشی از تولید گروه های هیدروکسیل در محدوده منافذ و نقاط آسیب دیده پوشش است. جدایش کاتدی یکی از عوامل عمومی تخریب انواع پوشش های آلی خطوط لوله است که با اعمال جریان حفاظت کاتدی (CP) تشدید می شود [۳۰].

۱۱-۱۱-۲ تست امپدانس الکتروشیمیایی بر روی پوشش^{۳۱} (EIS)

معمول ترین روش مورد استفاده برای آنالیز تجزیه ی پوشش های سطوح فلزی، روش های تغییرات پتانسیل با زمان، مقاومت DC، منحنی پلاریزاسیون، مقاومت پلاریزاسیون، جریان گالوانیکی، امپدانس AC در فرکانس ثابت یا در بازه ای گسترده می باشد.

در روش پتانسیل / زمان، تغییرات پتانسیل بر حسب زمان تعیین می گردد. در سایر روش های DC، برخی از پتانسیل های DC باید اعمال شوند تا بتوانند تعادل را در سطح مشترک پوشش / فلز به هم بزنند. در حین استفاده

³⁰ Holiday

³¹ Electrochemical Impedance Spectroscopy

از این روش ها، ذات بسیار مقاوم پوشش و افت اهمی می تواند سبب ایجاد اعوجاج شدیدی در منحنی پلاریزاسیون، در حین تخمین نرخ خوردگی شوند. همچنین در تست امپدانس AC، یک سیگنال کوچک AC اعمال می شود که می تواند اعوجاجی برای سیستم ایجاد نکند (5 mv peak to peak). در نتیجه تکنیک امپدانس AC یک وسیله اساسی برای ارزیابی پوشش سطوح فلزی، ممانعت کننده ها و هر سیستم خوردگی می باشد [۶۴].

تست الکتروشیمیایی امپدانس (EIS) کاربردهای وسیعی در تکنولوژی پوشش پیدا کرده است. این روش برای مطالعه فلزاتی که دارای پوششی پلیمری هستند، بسیار مناسب است. با استفاده از اطلاعات آزمایش ها، ایجاد ارتباط میان پارامترهای فیزیکی و شیمیایی با مقادیر برابری مثل جریان الکتریکی، تمایل به فرسایش، جذب آب تخلخل ها و نرخ خوردگی را امکان پذیر می کند.

برای بدست آوردن میزان جذب آب پوشش، توسط روش EIS، در واقع جریان الکتریکی گذرا از لایه ی پوشش را اندازه گیری می کنند. یک مانع خوب، اجازه گذر کمی از جریان را می دهد و اگر گذر جریان زیاد باشد، مانع ضعیف بوده و در واقع نمک و آب در پوشش در حال نفوذ است و شرایط خوردگی را فراهم می آورد [۶۵]. در سیستم دارای سه لایه پوشش اولیه / میانی / رویی، مانع خوبی در مقابل نفوذ آب و یون می باشد. نتایج محاسبات امپدانس نشان دادند که نفوذ نفوذ آب در پوشش ها نه تنها روی خواص دی الکتریکی آن اثر گذاشته، بلکه سبب ایجاد باد کردن پلیمر هم می شود. نتایج امپدانس در طی غوطه وری طولانی مدت نشان دادند که شروع فرآیند خوردگی تحت پوشش با مانع های زیاد، می تواند با تغییرات خواص دی الکتریک آن پوشش شناسایی شود.

۱۲-۱۱-۲ تست الکتروشیمیایی

یک سل خوردگی استاندارد برای اجرای تست پلاریزاسیون پتانسیودینامیک الکتروشیمیایی بر روی یک نمونه فلزی صاف استاندارد انجام می شود. آزمایشات پلاریزاسیون توسط دستگاه پتانسیواستات و با توجه به استاندارد ASTM G59 صورت می گیرد. این تست به منظور بررسی رفتار و نرخ خوردگی با استفاده از نمودارهای پلاریزاسیون انجام می گیرد [۶۶-۶۷].