

پدیده خوردگی خاک و راهکارهای مقابله با آن در

لوله های چدن داکتیل

(مطالعه موردی طرح آبرسانی محور شرق اصفهان)

اصغر یزدآباد^۱، قاسمعلی احمدی^۲، علیرضا اکرام نیا^۳ و مهدی علیخاصی^۴

۱- مدیرعامل و رئیس هیئت مدیره شرکت مهندسين مشاور پديد آب سپاهان

۲- مدير بخش زمين شناسی-ژئوتکنیک، شرکت مهندسين مشاور پديد آب سپاهان

۳- مدير امور آبرسانی- شبکههای توزیع آب، شرکت مهندسين مشاور پديد آب سپاهان

۴- دانشجوی مقطع دکتری مهندسی کشاورزی-آب دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

چکیده:

پدیده خوردگی در خطوط لوله انتقال آب یکی از معضلات مهم جهان امروز بوده و خوردگی خاک یکی از اصلیترین عوامل خوردگی در لولههای انتقال آب میباشد. خاک خوردنده می تواند در اثر عوامل شیمیایی و میکروبی موجب خوردگی در لوله شود و اثرات زیان بار شدیدی را به پروژههای انتقال آب وارد نماید، لذا به منظور کاهش اثرات وارده به خطوط لوله، بایستی خوردگی خاک مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور خوردگی خاک در طرح آبرسانی محور شرق اصفهان در فواصل ۳ کیلومتری حد فاصل سه راهی سیان تا ورزنه به طول ۲۷ کیلومتر، با آنالیز تعداد ۹ نمونه خاک از عمق ۱/۵ متری مورد ارزیابی قرار گرفت. تعیین میزان خوردگی بر اساس آزمون ۱۰ امتیازی در استاندارد AWWA انجام شد. طبق این آزمون اندازگیری میزان پتانسیل خوردگی خاک بر اساس پارامترهای مقاومت الکتریکی، pH، پتانسیل اکسیداسیون و احیا، میزان سولفید و رطوبت خاک صورت گرفت. نتایج نشان داد در کلیه نمونه ها خاک خوردنده می باشد و از کیلومتر ۹ خط انتقال تا کیلومتر ۲۷، میزان خوردگی خاک در آزمون ۱۰ امتیازی بیش از دو برابر حد مجاز می باشد. لذا جهت جلوگیری از پدیده خوردگی باید تمهیدات حفاظتی صورت گیرد. جهت تعیین روش پیشگیری از پدیده خوردگی و محافظت لوله ها، از نمودار DDM استفاده گردید. نتایج نشان داد، مناسبترین راهکار جهت مقابله با خوردگی در خط انتقال آب محور شرق اصفهان استفاده از پوشش پلیاتیلن غیر چسبنده در اطراف لوله چدن داکتیل میباشد.

واژه های کلیدی: خوردگی خاک، لوله چدن داکتیل، آبرسانی، آزمون ۱۰ امتیازی، شرق اصفهان

خوردگی در لوله های فلزی انتقال آب یکی از پدیده های طبیعی است که وابسته به تغییرات شرایط محیطی مانند خوردگی خاک، استفاده از لوله های غیر همسان در خطوط انتقال و همچنین جریان های پراکنده الکتریکی می باشد. این شرایط باعث به وجود آمدن سلول های الکتروشیمیایی شده و ایجاد خوردگی نقطه ای در لوله های چدن داکتیل و خوردگی گرافیتی در لوله های چدنی خواهد شد. خوردگی الکتروشیمیایی فرآیندی است که معمولاً به دو صورت گالوانیکی و خوردگی الکتریکی اتفاق می افتد. خوردگی گالوانیکی شامل یک جریان الکتریکی مستقیم و دائم است که در بین سلولهای گالوانیکی تولید می گردد، در حالیکه در خوردگی الکتریکی جریان الکتریکی مستقیم و دائم در نتیجه یک منبع برق خارجی است (AWWA, 1987; Peabody, 2001). نوع دیگر خوردگی، خوردگی بیولوژیکی است که از طریق باکتری های غیرهوازی موجود در محیط اطراف لوله اتفاق می افتد (NACE, 1984).

خاک به عنوان یک محیط خورنده از پیچیدگی زیادی نسبت به سایر محیط ها برخوردار است. میزان خوردگی در خاک، محدوده بسیار وسیعی دارد و از خوردگی بسیار سریع تا خوردگی قابل اغماض تغییر می کند. این موضوع با توجه به این که در بعضی از حالات، لوله ها ظرف کمتر از یک سال دچار پوسیدگی می شوند تا اشیاء آهنی باستانی مدفون در خاک که صد ها سال بدون خوردگی شدید باقی مانده اند قابل اثبات است (Srikanth et al., 2005). عمده ترین انواع خوردگی در لوله های مدفون عبارت است از: خوردگی حفره ای بدلیل حضور یون کلرید و سولفات، خوردگی گالوانیکی در اثر غیر یکنواختی خاک، خوردگی تحت تنش و خوردگی بیولوژیکی (Neff et al., 2005). بدلیل محدوده بسیار وسیع خوردگی لوله های مدفون شده در خاک، متغیر های بسیار زیادی در بررسی میزان خوردگی خاک تاثیر گذارند که ارائه یک مدل واحد برای تعیین میزان خوردگی خاک را غیر ممکن می سازد (Neff et al., 2006).

یکی از پارامتر های مهم در خوردگی خاک، مقاومت الکتریکی آن می باشد با توجه به تغییر جنس مواد تشکیل دهنده لایه های خاک، مقاومت ویژه الکتریکی این لایه ها نیز تغییر می یابد. علاوه بر این، پارامتر های دیگر، از قبیل درجه تراکم، خلل و فرج موجود در خاک، وضع قرار گرفتن خلل و فرج، حجم خلل و فرج و میزان آب موجود در خلل و فرج، در مقاومت مخصوص الکتریکی خاک تاثیر گذار است (Richard, 2007). لایه های خاک با مقاومت الکتریکی متفاوت باعث می شوند که لوله فلزی قرار گرفته شده در خاک دچار خوردگی گالوانیکی شود. بخشی از لوله که در خاک با مقاومت الکتریکی بالا قرار دارد به عنوان کاتد و بخشی از لوله که در خاک با مقاومت الکتریکی پایین قرار دارد به عنوان آند عمل کرده و خورده می شود. بنابراین به منظور تعیین نرخ خوردگی لوله ها در زیر خاک، تعیین مقاومت الکتریکی خاک از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Peabody, 2001).

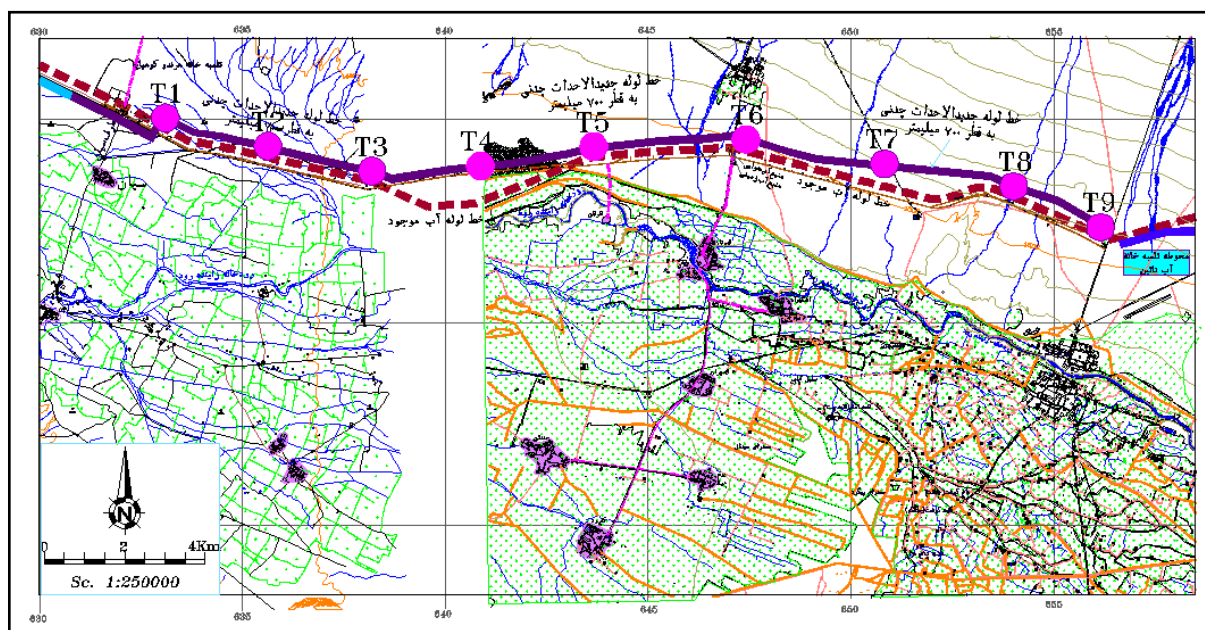
روش های معمول و متداول حفاظت لوله های چدنی عموماً استفاده از پوشش های محافظ بوده و در مواردی که خاک بسیار خورنده باشد استفاده از حفاظت کاتدی نیز پیشنهاد شده است (Corrpro, 2010). استفاده از پوششهای محافظ پلی اتیلنی برای اولین بار به طور آزمایشی در سال ۱۹۵۱ توسط موسسه تحقیقات لوله های چدن خاکستری (CIPRA) در ایالات متحده اجرا شد و متعاقب آن با موفقیت نتایج آزمایشات CIPRA استفاده از این پوششها در کشورهای مختلف متداول گردید. امروزه استانداردهای مختلفی برای این پوششها تدوین شده که از جمله مهمترین آنها می توان به ASTM و ANSI/AWWA CL05/A21.5(1972) و A647(1974) ایالات متحده، JCPA Z 2005(1975) ژاپن، BS6076(1981) بریتانیا، A.S.3680&3681(1989) استرالیا و استاندارد بین المللی ISO 8180 (1985) اشاره نمود. پوشش های محافظ باید به سادگی تعمیر و اجرا شوند، به خوبی لوله را بپوشانند و مقاوم در برابر فشارها و ضربه های وارده و تنش های مکانیکی زمین مانند خصوصیات شیمیایی و میکروبی خاک باشند. همچنین پوشش باید انعطاف پذیر، عایق در برابر انتقال برق و رطوبت باشد، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پوشش در طول زمان پایدار بماند و در برابر عوامل محیطی مقاوم باشد. علاوه بر این هنگامی پوشش به خوبی نصب شده است که بیش از ۹۹ درصد از سطح لوله را در

برگیرد (Zaki, 2006). تاکنون پوشش های متنوعی برای حفاظت از لوله های چدن داکتیل ارائه و اجرا شده است که می توان به پوشش های پلی اتیلن، گالوانیزه کردن لوله با روی، پلاستیک های سختی ناپذیر، پوشش های نواری و پوشش های قابل ارتجاع اشاره کرد (Nielsen, 1996; NACE, 1984). همچنین تحقیقات متعددی در خصوص کارایی انواع پوشش های محافظ در خصوص میزان کنترل خوردگی خاک انجام شده است (Marshl, 1981; Collins and Padley, 1983; Maillard, 1985; Jackson, 2000). روشهای حفاظت کاتدیک برای لوله های چدن داکتیل بسیار گران قیمت بوده و از لحاظ اجرایی نیز نسبت به لوله های فولادی بسیار مشکل تر و از کارایی کمتری برخوردار است و معمولاً توصیه نمی شود.

روشهای متفاوتی برای محاسبه میزان خوردگی خاک و تاثیر آن بر روی لوله های چدن داکتیل ارائه شده است که از جمله مهمترین آنها می توان به آزمون ۱۰ امتیازی بر اساس استاندارد ANSI/AWWA CL05/A21.5 و آزمون ۲۵ امتیازی (Spickelmire, 2002) اشاره نمود. در اکثر این روشها مهمترین پارامترهای خاک از جمله میزان مقاومت الکتریکی خاک، pH، درصد رطوبت، پتانسیل اکسیداسون و احیاء در تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک اندازه گیری شده است، لیکن نوع امتیاز بندی آنها تا حدودی متفاوت است در این مقاله ضمن معرفی آزمون ۱۰ امتیازی بر اساس استاندارد ANSI/AWWA CL05/A21.5، از این روش برای ارزیابی پتانسیل خوردگی خاک در مطالعه موردی بر روی قطعه ۲۷ کیلومتری چدن داکتیل محور شرق اصفهان پرداخته شده است. سپس برای تعیین نوع پوشش لازم برای حفاظت لوله ها از نمودار DDM استفاده شده است.

۲ - معرفی طرح

خط انتقال محور شرق اصفهان به طول حدود ۲۵۰ کیلومتر از مخزن ۷۰ هزار مترمکعبی گورت واقع در شرق شهر اصفهان آغاز شده و آب شرب ۱۷۰ شهر و روستای بخش شرقی اصفهان تا نائین و انارک را با جمعیت معادل ۷۳۰ هزار نفر تأمین می نماید. در طول خط انتقال متناسب با دبی و فشار مورد نیاز از لوله هایی با جنس، قطر، ضخامت و فشار پذیری متفاوت استفاده شده است. گزارش حاضر به بررسی و ارزیابی پتانسیل خوردگی خاک در قطعه حد فاصل سه راهی سیان تا ورزنه با جنس چدن داکتیل به قطر ۷۰۰ میلیمتر، طول ۲۷ کیلومتر (کیلومتر ۷۱ تا ۹۸) و فشار کاری ۱۶ اتمسفر می پردازد. نقشه شماره (۱) مسیر خط انتقال محور شرق اصفهان و موقعیت نقاط نمونه برداری را نشان می دهد.



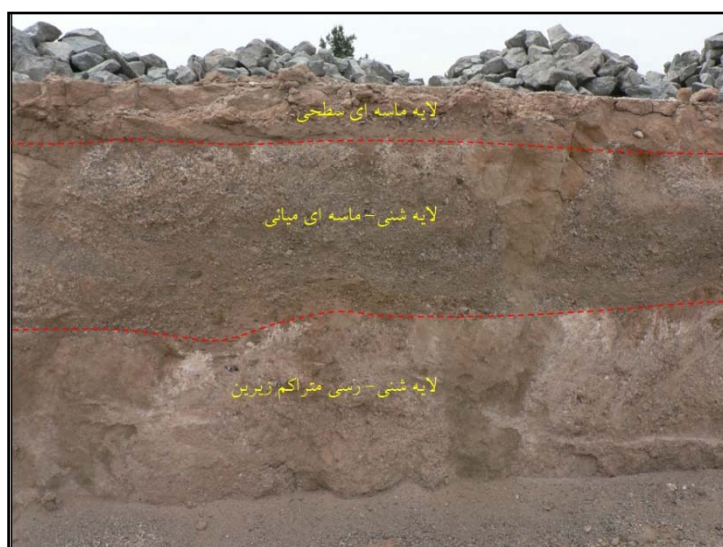
نقشه شماره (۱): پلان مسیر خط انتقال (قطعه چدن داکتیل به قطر ۷۰۰ میلیمتر) و موقعیت نقاط اندازه گیری مقاومت خاک

جنس لایه های خاک در قطعه مورد مطالعه را بر اساس ترانشه حفاری شده برای لوله گذاری تا عمق حفاری (۱/۸ تا ۲ متری) به طور کلی می توان به سه لایه به شرح زیر تقسیم نمود که گاه در طول مسیر تغییراتی در ضخامت لایه ها و ابعاد دانه دانه بندی دیده می شود:

- ۱- لایه سطحی که به طور متوسط در حدود ۴۰ سانتی متر ضخامت داشته و از ماسه های بادی به همراه قطعه سنگ و کمی رس و سیلت به رنگ قهوه ای تشکیل شده است (تصویر شماره ۱).
- ۲- لایه میانی که ضخامت آن بین ۶۰ تا ۱۲۰ سانتی متر متغییر بوده و از شن و ماسه و حدود ۱۰ درصد قطعه سنگ با تراکم متوسط تا کم تشکیل شده که در قسمت ۵۰ سانتی متری بخش سطحی آن بلورهای سوزنی و صفحه ای ژپس (گچ) به همراه املاح تبخیری سولفاته و کلروره قابل رویت است (تصویر شماره ۱).
- ۳- لایه زیرین که تا عمق ۲ متری ادامه داشته و از شنهای رس دار و ماسه دار نسبتاً متراکم همراه با املاح سولفاته و کلروره به رنگ متمایل به سفید سازمان یافته است (تصویر شماره ۲).



تصویر شماره (۱): نمایی از لایه ماسه ای سطحی و املاح تبخیری در لایه میانی در ترانشه خط لوله



تصویر شماره (۲): نمایی از لایه های سه گانه در ترانشه خط انتقال

سطح برخورد به آب زیرزمینی در قطعه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات چاه های مشاهده ای و اندازه گیری های انجام شده در مسیر بین ۱/۸ متر تا ۱۰ متر در طول مسیر متغیر است. سطح برخورد به آب زیرزمینی در ابتدای قطعه (سه راهی سیان) در عمق حدود ۳ متری بوده و تا کیلومتر حدود ۸ کاهش یافته و به ۱/۸ متری می رسد. از کیلومتر ۸ تا حدود ۹ کیلومتر سطح آب در عمق ۱/۸ متری بوده و ترانشه حفاری شده در این بازه به آب زیرزمینی برخورد کرده است. در ادامه تا کیلومتر حدود ۱۵، سطح آب پایین تر رفته و به حدود ۳ متر می رسد و تا انتهای مسیر (مخزن ورزنه) به تدریج افزایش یافته و به ۱۰ متر می رسد. کیفیت آب زیرزمینی بسیار شور و نامطلوب بوده و میزان املاح در دو نمونه آنالیز شده در طول مسیر بسیار بالا است (جدول شماره ۱).

جدول شماره (۱): آنالیز شیمیایی منابع آب زیرزمینی حدفاصل سه راهی سیان تا ورزنه

پارامتر	واحد	کیلومتر ۱۲	کیلومتر ۹
S.A.R	-	۳۹/۲۰۲۱	۷۵/۳۷۷۶
T.D.S	mg/ lit	۱۶۵۲۰	۱۰۹۴۸۰
هدایت الکتریکی (۲۵ ° C)	mmoh/cm	۲۳۶۰۰	۱۵۶۴۰۰
pH	-	۷/۱	۸
سختی کل	mg/ lit	۲۷۰۳	۵۰۰۵
سختی موقت	mg/ lit	۹۰	۹۰
سولفات ها	mg/ lit	۳۸۴۷/۲۰۳۰	۱۳۰۲۰/۹۳۳
بیکربنات ها	mg/ lit	۱۰۹/۸۱۸	۱۰۹/۸۱۸
کربنات ها	mg/ lit	-	-
کلورورها	mg/ lit	۶۲۴۰/۹۶	۱۳۱۲۰/۲
پتاسیم	mg/ lit	۷/۸	۳۸۶/۱
سدیم	mg/ lit	۴۶۸۵/۱	۱۲۲۵۹
منیزیم	mg/ lit	۱۹۴/۵۶	۳۶۴/۸
کلیسم	mg/ lit	۷۶۱/۵۲	۱۴۰۲/۸

۳ - مواد و روشها

۳-۱- آزمون ۱۰ امتیازی

آزمون ۱۰ امتیازی و تفسیر آن در ضمیمه A استاندارد ANSI/AWWA CL05/A21.5(1972) برای لوله های چدن داکتیل ارائه شده است. در این آزمون پارامترهای مختلفی برای اندازه گیری میزان خوردگی خاک بر روی لوله های چدن داکتیل و چدن خاکستری معرفی شده است. اندازه گیری میزان پتانسیل خوردگی خاک در این سیستم توسط پنج آزمایش زیر تعیین می شود:

۱: مقاومت الکتریکی خاک

۲: pH خاک

۳: پتانسیل اکسیداسیون و احیا (پتانسیل ردوکس)

۴: سولفیدها

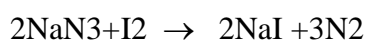
۵: رطوبت

برای تعیین میزان پتانسیل خوردگی خاک به هر کدام از ۵ پارامتر فوق براساس جدول شماره (۲) امتیاز داده می شود و مجموع امتیازات پارامترهای فوق محاسبه می گردد. اگر مجموع امتیاز برابر ۱۰ و بالاتر از آن باشد، خاک برای چدن داکتیل خورنده خواهد بود و خوردگی اتفاق خواهد افتاد مگر اینکه لوله ها محافظت گردد.

مقاومت خاک، میزان مقاومت خاک در برابر هدایت الکتریکی را نشان می دهد و با واحد اهم- سانتی متر مشخص می گردد. مقاومت پایین خاک نشان می دهد که خاک به عنوان یک الکترولیت عمل خواهد کرد. میزان مقاومت خاک معمولاً در محل اندازه گیری شود. میزان رطوبت خاک در اندازه مقاومت آن بسیار مؤثر می باشد. معمولاً با توجه به اینکه میزان رطوبت خاک متغیر می باشد در آزمایشگاه، مقاومت خاک اشباع شده با آب مقطر را اندازه گیری می کنند و یا اینکه شرایطی مشابه به وضعیت لوله گذاری را ایجاد می کنند. اما در هر صورت حداقل مقاومت باید در نظر گرفته شود.

pH کمتر از ۴ موجب می شود خاک مانند یک الکترولیت عمل نماید و دارای میزان هدایت الکتریکی زیادی باشد. در pH خنثی (۷/۵-۷/۵) اگر سایر شرایط نیز مناسب باشد، میزان زیادی از باکتری های احیاکننده در این شرایط در خاک موجود می باشد. در pH های قلیایی (۸/۵-۱۴) مقادیر زیادی از نمک های غیرقابل حل در خاک وجود دارد و معمولاً خاک دارای مقاومت کمی می باشد.

پتانسیل اکسیداسیون و احیای خاک بسیار مهم می باشد، زیرا باکتری های احیا کننده سولفات ها تنها در شرایط بی هوازی می توانند فعالیت کنند. پتانسیل احیاء بیشتر از ۱۰۰ mV بیانگر شرایط هوازی می باشد که در این شرایط باکتری های احیاکننده سولفات ها نمی توانند فعالیت کنند. پتانسیل احیاء بین ۵۰-۱۰۰ mV بیانگر محیط اکسیداسیون می باشد اما نمی تواند بیانگر شرایط غیرهوازی باشد. پتانسیل های ردوکس منفی بیانگر شرایط غیرهوازی می باشد. وجود سولفیدها در خاک، درصد احیاء یونهای سولفات توسط باکتری های احیاکننده را مشخص می کند. برای تعیین میزان سولفیدها در خاک از یک محلول سه درصد آزید سدیم + یدین ۰/۱ نرمال بر روی قطعه کوچکی از خاک عمق لوله گذاری استفاده می شود. اگر در خاک سولفید وجود داشته باشد به عنوان کاتالیزور عمل کرده و نیتروژن آزاد می شود. واکنش انجام شده به صورت زیر می باشد. در این آزمایش میزان سولفید خاک به صورت کیفی تخمین زده می شود.



میزان رطوبت خاک ممکن است باعث تشدید فرایند خوردگی گردد. میزان رطوبت خاک بسیار متغیر می باشد و تابع شرایط محیطی و لوله گذاری می باشد. میزان رطوبت در طول سال نیز متغیر می باشد. همچنین بالا بودن سطح آب زیرزمینی در افزایش میزان رطوبت خاک بسیار مؤثر می باشد.

جدول شماره (۲): ارزیابی آزمون خوردگی خاک برای لوله های چدن داکتیل و چدن خاکستری (آزمون ۱۰ امتیازی)

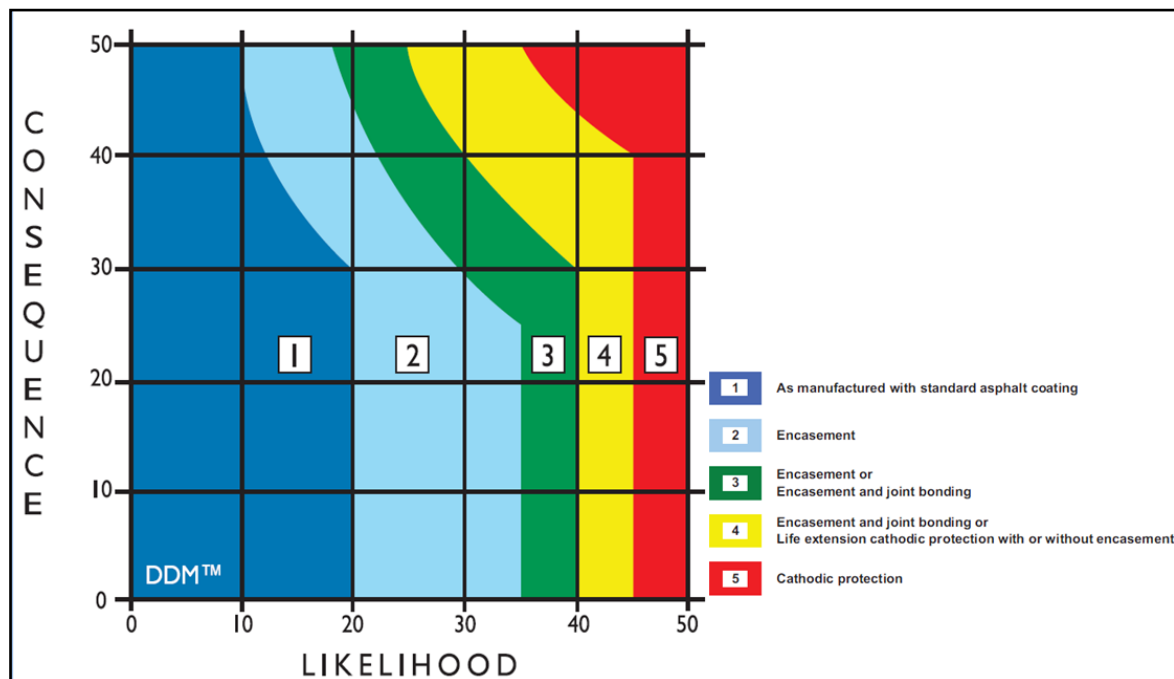
امتیاز	مشخصات خاک	
۱۰	< ۱۵۰۰	مقاومت خاک (اهم-سانتیمتر)
۸	۱۵۰۰-۱۸۰۰	
۵	۱۸۰۰-۲۱۰۰	
۲	۲۱۰۰-۲۵۰۰	
۱	۲۵۰۰-۳۰۰۰	
۰	> ۳۰۰۰	
۵	۰-۲	pH
۳	۲-۴	
۰	۴-۶/۵	
*	۶/۵-۷/۵	
۰	۷/۵-۸/۵	
۳	> ۸/۵	
۰	> +۱۰۰	پتانسیل ردوکس (mv)
۳/۵	+۵۰ - +۱۰۰	
۴	۰ - +۵۰	
۵	منفی	
۳/۵	مثبت	سولفیدها
۲	اثر یا نشانه (trace)	
۰	منفی	
۲	زهکشی ضعیف، مستمراً خیس	رطوبت
۱	زهکشی متوسط، معمولاً مرطوب	
۰	زهکشی خوب، معمولاً خشک	

* اگر سولفات وجود داشته باشد و پتانسیل ردوکس کم یا منفی باشد، امتیاز ۳ برای این ردیف در نظر گرفته می شود.

۳-۲- آزمون DDM^۱

آزمون DDM به منظور تعیین نوع حفاظت لوله بر اساس خوردگی محیط و همچنین اهمیت خط انتقال صورت می پذیرد. در این آزمون دو پارامتر میزان احتمال خوردگی (Likelihood) و درجه اهمیت خط انتقال (Consequence) ارزیابی شده و با استفاده از نمودار شماره (۱) نوع حفاظت از لوله در برابر خوردگی خارجی تعیین می گردد. در این نمودار عدد (۱) بیانگر لوله کارخانه با پوشش استاندارد آسفالت می باشد. عدد (۲) حفاظت از طریق پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده، عدد (۳) حفاظت از طریق پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده یا پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده به علاوه رابط اتصال دهنده لوله، عدد (۴) حفاظت به صورت پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده به علاوه رابط اتصال دهنده لوله یا حفاظت کاتدیک در طول عمر مفید لوله با یا بدون پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده و عدد (۵) بیانگر حفاظت کاتدیک در طول لوله می باشد. در این آزمون پارامتر میزان احتمال خوردگی با استفاده از آزمون ۱۰ امتیازی محاسبه شده و سپس در ضریب احتمال خوردگی که باتوجه به اندازه گیری سرعت خوردگی بر روی لوله های چدن داکتیل اجرا شده اندازه گیری شده، ضرب شده است.

پارامتر درجه اهمیت، اهمیت اجتماعی و اقتصادی خط انتقال را نشان می دهد. این پارامتر به اعتماد پذیری در بهره برداری خط انتقال و همچنین مشکل بودن تعمیر خط انتقال در صورت بروز حادثه بستگی دارد. موارد مؤثر در این تعیین این پارامتر شامل قطر لوله، موقعیت لوله، عمق کارگذاری و غیره می باشد. که معمولاً بر اساس نظریات کارشناسی در خط انتقال بیان می گردد.



نمودار شماره (۱): نمودار آزمون DDM

¹ Design Decision Model

۴ - ارزیابی پتانسیل خوردگی خاک در محور شرق اصفهان

نتایج آنالیز شیمیایی خاک شامل پارامترهای درصد سولفات های قابل حل، درصد کلروها، pH، هدایت الکتریکی و درصد رطوبت در مسیر انتقال آب در جدول شماره (۳) ارائه شده است. با توجه به پارامترهای این جدول میزان پتانسیل خاک لوله گذاری در پروژه محور شرق مورد بررسی قرار گرفت. مقاومت خاک در طول مسیر لوله گذاری بر اساس آزمایشات ژئوالکتریک با آرایش ورنر در جدول شماره (۴) ارائه شده است. با توجه به اینکه عمق لوله گذاری بین ۱/۵ تا ۲ متر می باشد از ستون مقاومت های ارائه شده با فاصله الکترودی ۳ متر در امتیاز دهی استفاده شده است.

با توجه به وجود سولفات های قابل حل در آب و شرایط pH، میزان سولفیدها در خاک تقریباً صفر می باشد ولی احتمال وجود سولفید متنی نمی باشد. بنابراین جهت اطمینان برای سولفیدها در خاک امتیاز ۳/۵ در نظر گرفته شده است. با توجه به بالابودن سطح آبهای زیرزمینی در منطقه و نیز میزان نفوذپذیری کم خاک به ویژه در قسمت اول (کیلومتر صفر تا ۱۰) شرایط زهکشی ضعیف و خاک مرطوب، امتیاز ۲ تخمین زده شده، برای قطعه ای که در آب زیرزمینی قرار می گیرد امتیاز ۳ و برای سایر قسمت های لوله شرایط زهکش نسبتاً مناسب و معمولاً مرطوب، امتیاز ۱ در نظر گرفته شده است.

میزان پتانسیل اکسیداسیون و احیا خاک لوله گذاری اندازه گیری نشده است اما با توجه به عمق لوله گذاری، میزان pH و درصد سولفات های موجود در خاک به نظر می رسد شرایط خاک محل هوازی بوده و خوردگی شیمیایی توسط باکتری های احیاکننده سولفات ها (خوردگی بیوشیمیایی) تقریباً متنی می باشد. با توجه به پارامترهای شیمیایی خاک ارزیابی پتانسیل خوردگی در خاک محور شرق اصفهان - حدفاصل سه راهی سیان تا ورزنه در جدول شماره (۵) ارائه شده است. همانطور که در این جدول ملاحظه می گردد، در پنج نقطه جمع امتیازات از ۱۰ بیشتر می باشد که بیانگر خورنده بودن خاک در مسیر خط انتقال می باشد و بایستی برای جلوگیری از خوردگی لوله از تمهیدات لازم استفاده کرد.

جدول شماره (۳): نتایج آزمایشات شیمیایی خاک

محل نمونه برداری	درصد سولفات های قابل حل در آب در عصاره (۱۰:۱) بر حسب SO ₃	درصد کلروها بر حسب CL	pH	هدایت الکتریکی (ml mose)	رطوبت (درصد)
Km=4+200	۰/۵۷	۰/۹۶	۸/۱۱	۲۸/۲	۱۵/۴۴
Km=10+800	۱/۳۸	۰/۰۹	۸/۲۶	۸/۶۸	۱۲/۲
Km=7+500	۰/۷۸	۰/۳۷	۸/۵۳	۵۱/۹	۷/۰۴
Km=15+700	۰/۴۷	۱/۷۶	۷/۹۸	۶۳/۶	۱۶/۱۱
Km=13+000	۱/۵۴	۰/۲۳	۸/۴۶	-	۶/۵
Km=22+000	۰/۴۴	۰/۵۶	۸/۴۹	-	۳/۱
Km=18+000	۰/۶۲	۰/۳۲	۸/۵۲	-	۴/۴
انتهای مسیر، ایستگاه پمپاژ	۰/۵۸	۰/۲۸	۸/۳۲	-	۲/۸

جدول شماره (۴): نتایج آزمایش های تعیین مقاومت ویژه الکتریکی زمین

گمانه	کیلومتر	مقاومت ویژه الکتریکی زمین با فاصله کترودی ۱ متر با آرایش ونر (Ωcm)	مقاومت ویژه الکتریکی زمین با فاصله کترودی ۲ متر با آرایش ونر (Ωcm)	مقاومت ویژه الکتریکی زمین با فاصله کترودی ۳ متر با آرایش ونر (Ωcm)	مقاومت ویژه الکتریکی زمین با فاصله کترودی ۴ متر با آرایش ونر (Ωcm)
T1	۳+۰۰۰	۱۸۸۰۰	۳۶۶۰۰	۵۰۷۰۰	۲۶۰۰۰
T2	۶+۰۰۰	۶۷۲۳۰۰	۹۸۰۲۰۰	۲۰۳۵۸۰۰	۳۵۵۰۰
T3	۹+۰۰۰	۱۴۰۰	۴۶۰۰	۴۰۰۰	۶۶۰۰
T4	۱۲+۰۰۰	۱۲۰۰	۹۰۰	۷۰۰	۷۰۰
T5	۱۵+۰۰۰	۱۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
T6	۱۸+۷۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰
T7	۲۲+۰۰۰	۵۰۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
T8	۲۵+۰۰۰	۲۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۵۰۰
T9	پمپاژ نایین	۱۳۰۰۰	۳۱۵۰۰	۵۸۳۰۰	۵۱۸۰۰

جدول شماره (۵): ارزیابی پتانسیل خوردگی خاک محور شرق اصفهان بر اساس آزمون ۱۰ امتیازی

گمانه	مقاومت خاک	pH	پتانسیل ردوکس	سولفیدها	رطوبت	جمع کل امتیازات
T1	۰	۲/۸	۰	۳/۵	۲	۸/۳
T2	۰	۲/۸	۰	۳/۵	۳	۹/۳
T3	۰	۲/۸	۰	۳/۵	۲	۸/۳
T4	۱۰	۲/۹	۰	۳/۵	۲	۱۷/۴
T5	۱۰	۲/۵	۰	۳/۵	۲	۱۸
T6	۱۰	۳	۰	۳/۵	۱	۱۷/۵
T7	۱۰	۲/۸	۰	۳/۵	۱	۱۷/۳
T8	۱۰	۲/۸	۰	۳/۵	۱	۱۷/۳
T9	۰	۲/۸	۰	۳/۵	۱	۷/۳

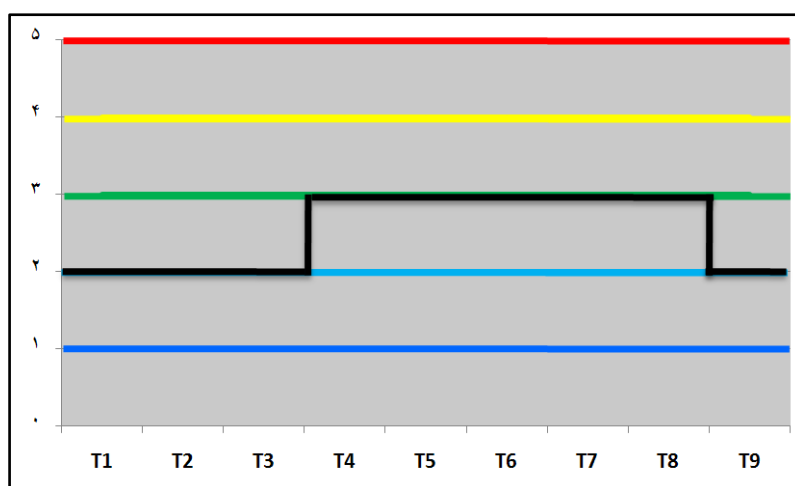
۵ - تعیین نوع حفاظت مورد نیاز

با توجه به اینکه مقدار خوردگی خاک در طول مسیر متفاوت می باشد بایستی نوع حفاظت مورد نیاز در طول خط مسیر انتقال تعیین گردد. همانطور که گفته شد، پارامتر درجه اهمیت به مسائل اجتماعی و اقتصادی بستگی دارد که با توجه به نوع و اهمیت پروژه متفاوت می باشد که معمولاً با توجه به نوع پروژه و با دید کارشناسی تعیین می گردد. با توجه به اهمیت زیاد محور شرق اصفهان و اینکه خط انتقال مربوط به انتقال آب شرب می باشد، مقدار پارامتر درجه اهمیت برابر ۳۰ در نظر گرفته شد. مقدار پارامتر میزان احتمال خوردگی بر اساس امتیاز آزمون ۱۰ امتیازی و برازش آن با نمودار بدست آمده در مطالعات

محققین صورت پذیرفت (Corrpro, 2010) که نتایج آن در جدول شماره (۶) ارائه شده است. سپس با توجه به نمودار DDM نوع حفاظت مورد نیاز در هر یک از نقاط پروژه تعیین شده و در نمودار شماره (۲) ارائه شده است. همانطور که در نمودار ملاحظه می گردد، تا نقطه T3 و همچنین نقطه T9 پوشش پلی اتیلنی غیرچسبنده به منظور حفاظت از لوله کفایت می کند. در نقاط T4 تا T8 باید از پوشش پلی اتیلنی غیرچسبنده یا پوشش پلی اتیلنی غیرچسبنده به علاوه رابط اتصال دهنده لولستفاده گردد. لذا همانطور که ملاحظه شد، خوردگی خاک در خط لوله انتقال در حدی نبوده که نیاز به اجرای سیستم حفاظت کاتدیک باشد. بر اساس جدول شماره (۲) ، بیشترین وزن در تعیین مقدار خوردگی خاک را پارامتر مقاومت خاک دارد. با دقت در جدول شماره (۵) و نمودار شماره (۱) ملاحظه می گردد، وجود خاک با مقاومت پائین در مسیر خط لوله می تواند به طور قابل ملاحظه ای در ایجاد خوردگی در لوله مؤثر باشد.

جدول شماره (۶): محاسبه میزان احتمال خوردگی خاک بر اساس روش DDM

گمانه	جمع کل امتیازات	احتمال خوردگی
T1	۸/۳	۲۴/۸
T2	۹/۳	۲۶/۳
T3	۸/۳	۲۴/۸
T4	۱۷/۴	۳۴/۷
T5	۱۸	۳۰/۱
T6	۱۷/۵	۳۴/۷
T7	۱۷/۳	۲۴/۶
T8	۱۷/۳	۳۴/۶
T9	۷/۳	۲۳/۱



نمودار شماره (۲): نوع حفاظت مورد نیاز در هر یک از نقاط نمونه برداری خط انتقال

پس از ارزیابی وضعیت خوردندگی خاک و تعیین نوع حفاظت مورد نیاز بر اساس نتایج بدست آمده در محور شرق اصفهان، به منظور جلوگیری از وقوع پدیده خوردگی در لوله ها، از پوشش پلی اتیلنی غیرچسبنده به ضخامت ۲۵ میکرون در طول خط انتقال در قطعه چدن داکتیل حدفاصل سه راهی سیان تا ورزنه استفاده شد و ترانشه بالای لوله با ماسه قرصه مناسب با مقاومت الکتریکی بالا پر شده است. تصاویر شماره (۳) و (۴) اجرای پوشش مذکور را در خط انتقال نشان می دهد.



تصویر شماره (۴): مراحل اجرای پوشش پلی اتیلن



تصویر شماره (۳): اجرای پوشش پلی اتیلنی غیر چسبنده

۶ - نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج این تحقیق خاک لوله گذاری در تمام طول مسیر خورنده بوده و نیاز به پوشش محافظ جهت انجام لوله گذاری می باشد. با توجه به میزان پارامترهای خاک، خوردندگی خاک مربوط به عوامل شیمیایی (خوردگی شیمیایی بوده) و خوردگی بیولوژیکی تقریباً صفر می باشد. همچنین با توجه به اهمیت لوله که جهت انتقال آب شرب به ۷۳۰ هزار نفر می باشد. جهت جلوگیری از خوردگی لوله استفاده از پوشش پلی اتیلنی غیرچسبنده و پر کردن ترانشه لوله با ماسه قرصه مناسب توصیه و اجرا گردید. لذا با استفاده از مدل DDM می توان نسبت به تشخیص نوع حفاظت در خط لوله انتقال اقدام نمود و از اعمال هزینه های زیاد در پروژه جلوگیری کرد.

- Collins H. H. and Padley, T. J. 1983. Protection of spun ductile iron pipes against corrosion by soils, 5th International Conference on the Internal and External Protection of Pipes, Innsbruck, Austria.
- Corpro. (2010). Corrosion Condition Assessment Report. Clifton Park Water Authority.
- Jackson 2000. CH2M Hill Consulting Engineers, Personal Communications, Sacramento, California. June.
- Maillard, J. 1985. Polyurethane-based external coating for the protection of buried ductile iron mains, 6th International Conference on the Internal and External Protection of Pipes, Nice, France, November.
- Marchal, R. 1981. Protection of Buried Ductile Iron Pipelines with a Zinc-based Coating – Healing Power of Coating Damages, 4th International Conference on the Internal and External Protection of Pipes, Noordwijkerhout, Netherlands.
- NACE. (1984). Corrosion Basics- An Introduction. National Association of Corrosion Engineers, Edited by A. deS. Brasunas.
- Neff, D. Dillmann, P. Descostes, M. Beranger, G. (2006). Corrosion of iron archaeological artefacts in soil, Estimation of the average corrosion rates involving analytical techniques and thermodynamic calculations Corrosion Science, Volume 48, Issue 10, Pages 2947-2970.
- Neff, D., Dillmann, P. Bellot-Gurlet, L. Beranger, G. (2005). Corrosion of iron archaeological artefacts in soil, characterisation of the corrosion system, Corrosion Science, Volume 47, Issue 2, Pages 515-535.
- Nielsen, K. (1996). International report on prevention of internal and external corrosion. Water supply, 14:3:4:253:262.
- Peabody, A. W. (2001). Control of pipeline corrosion. NACE International, Texas.
- Richard C. Selley, Robin Cocks, Ian Plimer. (2007). Encyclopaedia of Geology. Academic Press, London.
- Spickelmire, B. (2002) Corrosion Consideration for Ductile Iron Pipe. Cathodic & Anodic Protection, Material performance, 16.
- Srikanth, S. Sankaranarayana, P. S. N. and Gopalakrishna, K. (2005). Corrosion in a buried pressurised water pipeline. Engineering Failure Analysis, Volume 12, Issue 4, Pages 634-651.
- Zaki, A. (2006) “ Principles of corrosion engineering and corrosion control”, Elsevier science & technology.