



## پوشش‌های سطوح داخلی خطوط لوله پساب صنعتی

مریم اکبریان<sup>۱</sup>، محمدابراهیم علیا<sup>۲</sup>، مریم عطائی فرد<sup>۳</sup>، محمد مهدویان<sup>۴\*</sup>

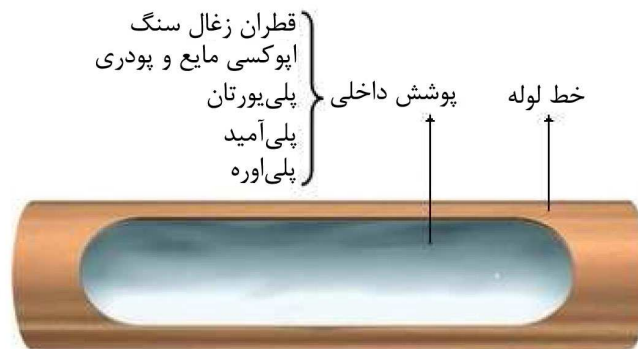
- ۱- کارشناسی ارشد، مهندسی رنگ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
  - ۲- استادیار، گروه رنگ و محیط زیست، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
  - ۳- استادیار، گروه علوم و فناوری چاپ، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
  - ۴- استادیار، گروه پوشش‌های سطح و خوردگی، موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵
- تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۲۱ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۳/۸/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۱ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۳/۱۱/۱۴

### چکیده

لوله‌های خطوط انتقال پساب به دلیل حضور انواع عوامل تخریبی موجود در پساب در معرض انواع تخریب‌ها، اعم از میکروبی و غیرمیکروبی قرار دارند که به جهت جلوگیری از تخریب و افزایش بازده عملکرد لوله‌ها در محیط پسابی پوشش‌هایی را به عنوان محافظ داخل لوله‌ها اعمال می‌کنند. از جمله پوشش‌های سطوح داخلی لوله‌ها می‌توان به لعاب قطران زغال سنگ، اپوکسی مایع، اپوکسی پودری، پلی یورتان، پلی آمید و پلی اوره اشاره کرد. این مقاله، به طور اجمالی ویژگی‌ها و نحوه عملکرد پوشش‌های متداول سطوح داخلی خطوط لوله پساب را مورد بررسی قرار داده و به روش‌های اخیر در تهیه پوشش‌های حفاظتی می‌پردازد که شامل استفاده از پوشش‌های تابش‌پز، وینیل استری، فوران، فنولیک، فلوروپلیمری می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی

لوله‌های پساب، لعاب قطران زغال سنگ، اپوکسی مایع، اپوکسی پودری، پلی یورتان، پلی آمید، پلی اوره آ.





## Interior Coatings for Industrial Wastewater Pipeline

Maryam Akbarian<sup>1</sup>, Mohammad Ebrahim Olya<sup>2</sup>, Maryam Ataefard<sup>3</sup>, Mohammad Mahdavian<sup>4\*</sup>

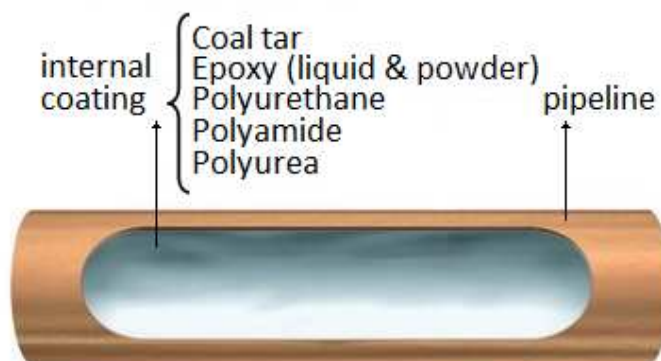
- 1- MSc Student, Environmental Research Department, Institute for Color Science and Technology, B.O. BOX. 16765-654, Tehran, Iran.
- 2- Assistant Professor, Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, B.O. BOX. 16765-654, Tehran, Iran.
- 3- Assistant Professor, Printing Science and Technology Department, Institute for Color Science and Technology, B.O. BOX. 16765-654, Tehran, Iran.
- 4- Assistant Professor, Surface Coating and Corrosion Department, Institute for Color Science and Technology, B.O. BOX. 16765-654, Tehran, Iran.

### Abstract

Due to the presence of various bacterial and non-bacterial aggressive agents in the wastewater, coatings are applied to protect the interior of the wastewater pipelines. From the protective coatings, coal-tar enamel, liquid epoxy coating, epoxy powder coating, polyurethane, polyamide, polyurea can be used to protect the interior of the wastewater pipelines. This paper, briefly reviews the properties and protective performance of the general coatings and the recent methods to provide high performance protective coatings including the application of radiation cure, vinyl ester, furan, phenolic, fluoropolymers.

### Keywords

Wastewater pipes, Coal-tar enamel, Liquid epoxy, Epoxy powder coating, Polyurethane, Polyamide, Polyurea.



۱- مقدمه

پساب از نظر منشاء آن ممکن است خانگی، صنعتی، کشاورزی یا به صورت ترکیبی باشد. از نظر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی و قدرت آلاینده‌گی دارای چهار حالت ضعیف، متوسط، قوی و خیلی قوی می‌باشد. اهمیت بهداشتی پساب به عواملی نظیر وجود عوامل شیمیایی و عوامل بیماری‌زای زنده و مواد آلی متعفن که علاوه بر ایجاد بیماری‌های مختلف موجب تعفن و بد منظر شدن محیط نیز می‌گردد، بستگی دارد. خواص پساب صنعتی بستگی به نوع صنعت دارد. فرآیند تصفیه نیز بسیار متغیر می‌باشد. بسیاری از فرآیندهای مورد استفاده جهت تصفیه پساب شهری در مورد پساب صنعتی نیز استفاده می‌شود. پساب‌های صنعتی غالباً شامل فلزات سنگین، ترکیبات آلی و pH اسیدی می‌باشند. از نظر اقتصادی علاوه بر اینکه پساب به خودی خود غیرقابل استفاده است، خود نیز باعث آلودگی منبع آب سطحی و زیرزمینی می‌شود و بنابراین آب به عنوان منبع حیاتی محدود با کمبود شدیدی که در جهان دارد در معرض تهدید قرار می‌گیرد. با توجه به مخاطرات بهداشتی و ملاحظات اقتصادی توجه به تولید، جمع‌آوری و به‌سازی پساب امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. ترکیب پساب می‌تواند به دو گروه مختلف همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تقسیم گردد [۱]. صنایع آب و پساب یکی از مهم‌ترین صنایع موجود است که به‌طور مستقیم با سلامت جامعه در ارتباط می‌باشد. از بخش‌های مهم و کلیدی این صنعت می‌توان به خطوط لوله‌های انتقال آب و پساب و حفاظت‌های مربوط به آنها اشاره نمود.

۲- خطوط لوله پساب صنعتی

انواع لوله‌های مورد استفاده در پساب را به صورت زیر می‌توان دسته‌بندی نمود که هر کدام از این لوله‌ها مزایا و معایبی را دارا می‌باشند [۱، ۲]. از این میان لوله‌های فولادی، لوله چدن‌نشکن و لوله بتنی عمده‌ترین لوله‌های مورد استفاده در انتقال پساب صنعتی می‌باشد.

جدول ۱- ترکیب پساب [۲].

اثر محیط زیستی	توجه ویژه	ترکیب
مضر در استحمام و نوشیدن	باکتری، ویروس و سایر موجودات بیماری‌زا	میکروارگانسیم‌ها
تغییر در زندگی وابسته به آب	کاهش اکسیژن در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و رودها	مواد آلی زیست تجزیه
اثر سمی، اسباب ناراحتی، انباشتگی زیستی	مواد شوینده، روغن‌ها، چربی‌ها، رنگ‌ها، حلال‌ها، سیانید، فنل	سایر مواد آلی
اثر سمی، کاهش اکسیژن، انباشتگی انباشت آب	نیتروژن، فسفر، آمونیاک	مواد غذایی
اثر سمی، انباشتگی زیستی	جیوه، سرب، کادمیم، کروم، مس، نیکل	فلزات
اثر سمی، خوردگی	اسیدها به‌عنوان مثال هیدروژن سولفید، بازها	سایر مواد معدنی
اثر سمی، اسباب ناراحتی	سولفید هیدروژن	بو و مزه
تغییر شرایط زندگی گیاهان و جانوران	آب گرم	اثرات دمایی
اثر سمی، اسباب ناراحتی	اثر سمی، انباشتگی	میزان رادیواکتیویته

لوله‌های رسی<sup>۱</sup>

لوله‌های بتنی<sup>۲</sup>

لوله چدن<sup>۳</sup>

لوله چدن نشکن<sup>۴</sup>

لوله فولادی

لوله‌های آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن<sup>۵</sup>

لوله‌های پلی وینیل کلراید<sup>۶</sup>

۱-۲- لوله‌های رسی

این نوع لوله‌ها در اندازه‌های ۴ تا ۳۶ اینچ ساخته می‌شوند. از ۱۸ اینچ به بالا بسیار سنگین بوده و کاربرد زیادی ندارند. لوله‌های رسی به دو صورت لعابی<sup>۷</sup> و غیرلعابی<sup>۸</sup> می‌باشند. لوله‌های رسی لعابی به صورت مستقیم می‌توانند داخل خاک استفاده شوند، در حالیکه لوله‌های رسی غیرلعابی باید در برابر رطوبت خاک محافظت شوند [۳، ۴]. این نوع لوله‌ها در برابر گازهای ناشی از پساب مانند گاز متان، سولفید هیدروژن و آمونیاک مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند، اما مقاومت کافی در برابر عبور مواد سنگین مانند عبور خطوط راه‌آهن از روی خود را ندارند [۳].

<sup>1</sup> Clay pipe

<sup>2</sup> Concrete pipe

<sup>3</sup> Cast iron pipe or CIP

<sup>4</sup> Ductile iron pipe or DIP

<sup>5</sup> Acrylonitrile butadiene styrene or ABS

<sup>6</sup> Polyvinyl chloride or PVC

<sup>7</sup> Vitrified clay pipe or VCP

<sup>8</sup> Unglazed

## ۲-۲- لوله‌های بتنی

این نوع از لوله بیشتر برای انتقال پساب بهداشتی در محلهایی که حاوی مواد خورنده می‌باشد استفاده می‌شود. لوله‌های بتنی مقاومت در برابر فشار بالا و مقاومت در برابر مواد خورنده را دارا می‌باشند. لوله‌های بتنی به‌طور عمده به سه صورت وجود دارند. (۱) لوله بتنی تقویت نشده<sup>۱</sup>، (۲) لوله بتنی تقویت شده<sup>۲</sup> (۳) لوله بتنی پیش‌فشرده و تقویت شده<sup>۳</sup> [۴]. لوله بتنی تقویت نشده یا لوله بتن معمولی در اندازه ۴-۲۴ اینچ ساخته می‌شود. این نوع لوله معمولاً برای انتقال پساب‌های کوچک و در نهرها استفاده می‌شود. لوله بتنی تقویت شده در اندازه بزرگتر از ۲۴ اینچ ساخته می‌شوند. این نوع لوله بیشتر برای انتقال پساب‌های صنعتی استفاده می‌شود. در لوله‌های بتنی تقویت شده، بتن با میل و سیم‌های فولادی با کشش سطحی زیاد که به‌دور آن پیچیده می‌شوند تقویت می‌شود. لوله بتنی پیش‌فشرده و تقویت شده در فشارهای بالا (بزرگتر از ۶۰۰۰ پاسکال) استفاده می‌شوند [۴]. مشکل انواع لوله‌های بتنی خورده شدن در حضور اسید سولفوریک موجود در پساب و هم‌چنین حضور انواع باکتری‌ها از جمله تائوباسیلوس<sup>۴</sup> و خوردگی‌های ناشی از حملات میکروبی می‌باشد [۵].

## ۲-۳- لوله چدن و لوله چدن نشکن

این نوع لوله‌ها از نظر ظاهر و برخی ویژگی‌ها مانند یکدیگر می‌باشند. گرافیت موجود در لوله چدن به شکل کروی و گره‌مانند می‌باشد. در حالی که گرافیت درون لوله چدن نشکن به شکل ورقه‌ای است. به همین علت لوله چدن نشکن مقاوم‌تر و پایدارتر از لوله چدنی می‌باشد. لوله چدن نشکن قدرت انعطاف بالا و مقاومت خوردگی خوبی از خود نشان می‌دهد. لوله چدن نشکن نسبت به لوله چدن سبک‌تر بوده و حمل آن ساده‌تر می‌باشد. با این حال لوله چدن نشکن محافظت نشده اگر در محیط خورنده قرار گیرد، می‌تواند تحت تاثیر این محیط آسیب ببیند [۴].

## ۲-۴- لوله فولادی

لوله فولادی معمولاً در جاهایی که فشار زیاد باشد و یا مسافت طولانی برای لوله‌کشی نیاز است، استفاده می‌شود. این نوع از لوله کشش سطحی زیادی دارد. با این حال مقاومت خوردگی ضعیف در خاک‌های اسیدی و قلیایی دارد [۴]. این نوع لوله‌ها در برابر گازهای ناشی از پساب (متان، هیدروژن سولفید و آمونیاک) مقاومت چندان خوبی از خود نشان نمی‌دهند و تحت تاثیر این گازها قرار می‌گیرند. ولی مقاومت خوبی در برابر وزن اجسام سنگین دارا می‌باشند. به عنوان مثال از این لوله‌ها می‌توان در زیر خطوط راه آهن استفاده کرد [۳].

## ۲-۵- لوله‌های آکریلونیتریل بوتادی‌ان استایرن

این نوع لوله‌ها از جنس پلاستیک است و مقاومت خوبی را در مقابل گازهای ناشی از پساب از خود نشان می‌دهند. مواد پتروشیمی روی این لوله‌ها تاثیری ندارند ولی این لوله‌ها در برابر عبور اجسام سنگین مقاومت چندان خوبی را از خود نشان نمی‌دهند [۳].

## ۲-۶- لوله‌های پلی وینیل کلراید

این نوع لوله‌ها بسیار نرم و انعطاف‌پذیر بوده و برای اجرا مناسب می‌باشند. گازهای حاصل از پساب و محصولات پتروشیمی تاثیری روی این لوله‌ها ندارند ولی مانند لوله‌های پلاستیکی در مقابل عبور اجسام سنگین عملکرد ضعیفی دارند [۳]. همانطور که اشاره شد به دلیل حضور آب و اکسیژن در پساب و انواع میکروارگانیسم‌ها درون لوله‌های پسابی و تحت تاثیر قرارگرفتن لوله‌ها امکان ایجاد انواع تخریب‌ها اعم از میکروبی و غیرمیکروبی بر روی لوله‌ها فراهم می‌گردد که این تخریب لوله‌ها درون پساب معمولاً به صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد [۶].

۱- تخریب میکروبی<sup>۵</sup>، ۲- تخریب شیمیایی و الکتروشیمیایی<sup>۶</sup>، ۳- سایش خوردگی شیمیایی بطور عمده از طریق اکسیداسیون عوامل خورنده‌ای چون یون کلرید و ترکیبات حاوی کلر، اسیدها، بازها و نمک‌های فلزی موجود در پساب صورت می‌گیرد. هم‌چنین حضور انواع باکتری‌ها درون پساب و تولید انواع اسیدهای آلی (اسید استیک و یا بوتیریک اسید) و اسیدهای غیرآلی (اسید سولفوریک) سبب خوردگی می‌شوند. اسید سولفوریک تشکیل شده از اکسیداسیون سولفید هیدروژن توسط باکتری‌های اکسیدکننده سولفید (تائوباسیلوس) اصلی‌ترین عامل خوردگی لوله‌ها به خصوص لوله‌های بتنی می‌باشد. سولفید هیدروژن را می‌توان توسط کربن فعال، استفاده از اکسیدکننده‌هایی مانند کلر و پراکسید هیدروژن و یا نمک‌های آهن از بین برد [۷]. خوردگی میکروبی زمانی اتفاق می‌افتد که پساب از نظر آلودگی‌های مواد آلی غنی، pH خنثی و محیط عاری از اکسیژن باشد. در این هنگام اسید سولفوریک توسط فعالیت باکتری‌های بی‌هوازی از سولفید هیدروژن در فاز گازی ایجاد می‌شود. باکتری دیگری بنام اسیدیتائوباسیلوس<sup>۷</sup> فرواکسیدان<sup>۸</sup> به عنوان عامل خوردگی لوله‌های آهنی و پمپ‌ها شناخته می‌شود. این باکتری‌ها کاهنده سولفات<sup>۸</sup> هستند که تشکیل سولفید هیدروژن را سبب شده و یون سولفات را به یون سولفید احیا می‌کنند. برای فعالیت به یون سولفات، زمینه فلزی، شرایط بی‌هوازی و گاز هیدروژن به عنوان محمل نیاز دارند. نحوه عملکرد آنها به‌صورت رابطه‌های ۱ تا ۶ می‌باشد [۸].



<sup>5</sup> Biodegradation

<sup>6</sup> Chemical and Electrochemical degradation

<sup>7</sup> Acidithiobacillus Ferrooxidans

<sup>8</sup> Sulphate-reducing bacteria (SRBs)

<sup>1</sup> Nonreinforced

<sup>2</sup> Reinforced

<sup>3</sup> Reinforced and prestressed concrete pressure pipe

<sup>4</sup> Thiobacillus

انواع حلال‌ها، شرایط قلیایی و اسیدی قرار گیرند تخریب خواهند شد [۱۲]. لوله‌های مورد مطالعه تحت تاثیر عوامل مختلفی می‌توانند تخریب شوند، که این مساله منجر به استفاده از پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی، برای افزایش مقاومت لوله‌های پسابی شده است.

### ۳- پوشش‌های متداول مورد استفاده در سطوح داخلی خطوط لوله پساب صنعتی

انواع مختلفی از پوشش‌ها برای حفاظت از سطوح مختلف در محیط‌های متفاوت مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ خواص مختلفی را نشان می‌دهد که با استفاده از پوشش‌های سطح بهبود می‌یابد [۱۳]. لوله‌های پسابی تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله گازهای ناشی از پساب، عوامل میکروبی، حضور انواع اسیدها و بازها و سایر عوامل موجود در پساب می‌توانند تخریب شوند. این امر سبب شده است تا برای افزایش عملکرد لوله‌ها درون پساب، بر روی آنها پوشش‌هایی را اعمال کنند. این پوشش‌ها، متناسب با محل و نوع خوردگی می‌توانند داخل و یا خارج لوله اعمال شوند. برخی از انواع پوشش‌های مورد استفاده برای داخل خطوط لوله فولادی، لوله چدن نشکن و لوله بتنی بدین شرح می‌باشد [۱۴-۱۶]:

◀ لعاب قطران زغال سنگ

◀ اپوکسی مایع

◀ اپوکسی پودری

◀ پلی‌یورتان

◀ پلی‌آمید

◀ پلی‌اوره

مشخصات پنج مورد اول در استاندارد انجمن واحدهای صنعتی آب آمریکا<sup>۱</sup> آورده شده است. اما پوشش‌های پلی‌اوره دارای فناوری جدید بوده و هنوز استاندارد برای آنها ارائه نشده است. در ادامه به اختصار، ویژگی‌های عمومی این پوشش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- لعاب قطران ذغال سنگ<sup>۲</sup>

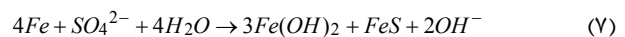
این پوشش جزو پوشش‌های لعاب قیری می‌باشد. استاندارد AWWA C203 مواد، تجهیزات و شرایط اعمال این پوشش را بیان می‌کند. این نوع از پوشش‌ها به‌طور عمده برای سطوح داخلی و سطوح خارجی لوله‌های فولادی مورد استفاده درون خاک و زیر آب در شرایط خاصی که دمای آب متجاوز از ۹۰ °F (۳۲ °C) نباشد، استفاده می‌شوند. پوشش قطران زغال سنگ جزو قدیمی‌ترین انواع پوشش‌ها می‌باشند که برای تمام اندازه‌های مختلف لوله قابل استفاده می‌باشند. این لوله‌ها از مقاومت خوردگی بالایی برخوردار می‌باشند [۱۷].

<sup>1</sup> AWWA (American Water Works Association)

<sup>2</sup> Coal tar enamel



واکنش عمومی این فرآیند عبارت است از:



به‌طور کلی متابولیسم بی‌هوازی شامل سه مرحله می‌باشد که مرحله اول آن آبکافت می‌باشد. در این مرحله مولکول‌های بزرگ محلول و نامحلول به مولکول‌های کوچک توسط آنزیم‌های خارج سلولی وابسته به میکروبی تبدیل می‌شوند. سپس در مرحله دوم اسید تشکیل شده و محصول به‌دست آمده از آبکافت به اسید آلی تبدیل می‌شود که عمدتاً از نوع اسید استیک، هیدروژن و دی‌اکسید کربن می‌باشد. تشکیل متان در مرحله نهایی از طریق تبدیل اسید استیک، هیدروژن و دی‌اکسید کربن بر طبق واکنش‌های ۸ و ۹ صورت می‌گیرد [۹].



نقش پوشش‌ها در کنترل خوردگی میکروبی تعیین کننده است چرا که می‌توانند دسترسی باکتری‌ها به فلز زیرآیند را کند یا متوقف کنند که در این صورت فعالیت باکتری‌هایی نظیر باکتری‌های کاهنده سولفات متوقف می‌شود. همچنین در صورت استفاده از عوامل باکتری‌کش در پوشش‌ها، نظیر نانوذرات نقره، فعالیت باکتری‌های در مجاورت پوشش کند یا متوقف خواهد شد [۴، ۵]. عامل مهم دیگری که در تخریب لوله‌ها نقش دارد، سایش می‌باشد. پساب‌ها عمدتاً دارای حجم زیادی از ذرات شامل سنگ‌ریزه، شن و ذرات جامد حل نشده می‌باشند که در طول مسیر عبور خود از لوله می‌توانند سطح داخلی را دچار سایش نمایند [۶]. در نتیجه لوله و به طبع آن پوشش داخلی لوله باید در برابر این نوع ساینده‌ها مقاوم باشد [۷]. گزارش شده است که استفاده از نانوذرات، نظیر نانوذرات سیلیس و اکسید روی، با بهبود خواص فیزیکی- مکانیکی می‌تواند مقاومت پوشش‌ها را در برابر سایش افزایش دهند [۱۰، ۱۱]. مشکلات فلزات زمانی افزایش می‌یابد که، پساب حاوی غلظت‌های بالایی از یون کلرید باشد. کلرید سبب افزایش خوردگی کلیه فلزات حتی فولاد با درجه بالا (ضد زنگ) می‌گردد. پتانسیل خوردگی علاوه بر غلظت یون کلرید به عوامل گوناگونی از جمله کیفیت آلیاژ، کیفیت تولید (اعم از عملیات حرارتی، نوع نورد و کیفیت جوشکاری)، پتانسیل کاهشی آلاینده‌ها، دبی جریان، pH و دما وابسته است. مواد سنتزی در مقابل خوردگی مقاوم می‌باشند، اما حتی اگر چنین موادی در حضور اسیدهای آلی یا معدنی،



شکل ۱- افزایش کارایی سطح با کمک پوشش‌های الی و معدنی [۱۳].

جدول ۱- گزیده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی پوشش قطران ذغال سنگ [۱۸].

قطران نوع ۲		قطران نوع ۱		نتیجه آزمون آزمون
حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	
۱۱۶ °C	۱۰۴ °C	۱۱۶ °C	۱۰۴ °C	نقطه نرم‌شدگی مطابق ASTM D36
۳۵	۲۵	۳۵	۲۵	درصد وزنی پرکننده مطابق ASTM D2415
۱/۶	۱/۴	۱/۶	۱/۴	وزن ویژه در (۲۵ °C) مطابق ASTM D71
۲۰	۱۰	۱۰	۵	عمق نفوذ (۲۵ °C) (دهم میلی‌متر) مطابق ANSI/AWWAC203
۵۵	۱۵	۳۰	۱۲	عمق نفوذ (۴۶/۱ °C) (دهم میلی‌متر) مطابق ANSI/AWWAC203

### ۳-۲- اپوکسی مایع<sup>۲</sup>

پوشش اپوکسی مایع دارای انواع مختلفی می‌باشد. برخی حلالی و برخی ۱۰۰٪ جامد می‌باشند. برخی گرما پخت و برخی در دمای محیط پخت می‌شوند. عامل پخت می‌تواند یک آمین، آمید و یا از مشتقات آمین باشد. هم‌چنین ممکن است اپوکسی با موادی چون قطران زغال سنگ، رزین فنلیک و خاکستر پرا<sup>۱</sup> بهبود داده شود. استاندارد AWWA C210 مواد،

طی دهه‌های اخیر استفاده از لعاب قطران ذغال سنگ به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. اکثر بنیان‌گذاران استانداردهای محیط زیستی و سلامت دنیا<sup>۱</sup> استفاده از این نوع پوشش را به خاطر طبیعت خطرناک مواد قیری ممنوع کرده‌اند [۱۸]. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی پوشش قطران زغال سنگ مورد استفاده در استاندارد ذکر شده را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> OSHA, EPA, FDA, and NSF

<sup>۲</sup> Liquid-Epoxy

### ۳-۳- اپوکسی پودری

این نوع از پوشش که بیشتر در خطوط لوله انتقال نفت و گاز استفاده می‌شود، به عنوان پوشش خطوط لوله آب و پساب نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که به عنوان مثال به لوله و اتصالات فولادی و چدن نشکن می‌توان اشاره نمود. استاندارد AWWA C213 شرایط و تجهیزات مورد نیاز برای اعمال این نوع از پوشش را برای سطوح داخلی و خارجی لوله‌های مورد استفاده در زیر خاک و یا زیر آب، در شرایط معمول را بیان می‌نماید. این پوشش به سطح لوله‌های از پیش گرم شده تا  $500^{\circ}\text{F}$  ( $260-204^{\circ}\text{C}$ ) در ضخامت ۳۰۵-۶۳۵ میکرون با و یا بدون آستر اعمال می‌شوند. در سیستم‌های انتقال آب آشامیدنی دارای دمای عملیاتی کمتر از  $140^{\circ}\text{F}$  ( $60^{\circ}\text{C}$ )، پوشش اپوکسی پودری توصیه می‌شود. پوشش اپوکسی پودری، قادر به پوشاندن نواقص سطح به‌طور کامل نمی‌باشد. به همین علت سطح لوله نیازمند بازرسی دقیق قبل و بعد از اعمال پوشش بر روی آن می‌باشد [۲۱]. جدول ۳ نشان‌دهنده ویژگی‌های فیزیکی مورد انتظار از این پوشش طبق استاندارد می‌باشد.

تجهیزات و شرایط اعمال پوشش اپوکسی مایع، برای سطوح داخلی و خارجی لوله‌های فولادی برای انتقال آب آشامیدنی را بیان می‌کند. استفاده از این پوشش برای سامانه‌هایی توصیه شده است که در شرایط دمایی کمتر از  $60^{\circ}\text{C}$  استفاده می‌شوند [۱۹]. امروزه استفاده از اپوکسی پایه حلالی کم جامد به خاطر مشکلات و آلودگی‌های ناشی از مصرف حلال و حضور حلال‌های آلی فرار ممنوع شده است. در نتیجه این ممنوعیت، اپوکسی پایه حلالی با پلی‌پورتان ۱۰٪ جامد سخت یا اپوکسی بدون حلال پر جامد جایگزین شده است. پوشش اپوکسی-قطران زغال سنگ<sup>۲</sup> مایع به عنوان پوشش سطوح داخلی لوله‌های پساب و لوله‌های انتقال آب غیر آشامیدنی برای هر سه نوع لوله فولادی، چدن نشکن و بتنی استفاده می‌شود. بعضی از انواع پوشش اپوکسی-قطران زغال سنگ در حضور نور آفتاب شکننده بوده و بعضی دیگر چسبندگی کمی به زمینه دارند [۲۰]. جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی لازم برای اعمال پوشش اپوکسی مایع را نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Fly ashes

<sup>2</sup> Coal-tar epoxy

جدول ۲- گزیده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی پوشش اپوکسی مایع [۱۹].

حداکثر	حداقل	نتیجه آزمون / آزمون
بسته به توصیه سازنده	۴۰۶	ضخامت فیلم خشک ( $\mu\text{m}$ ) مطابق روش AWWA C210
۳/۲	-	چسبندگی بر حسب mm مطابق روش برش V
-	۲/۷۵۸	چسبندگی ( $\text{kPa}$ ) مطابق روش AWWA C210

جدول ۳- گزیده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی پوشش اپوکسی پودری [۲۱].

حداکثر	حداقل	نتیجه آزمون / آزمون
-	۳۰۵	ضخامت پوشش داخلی ( $\mu\text{m}$ )
-	۳۰۵	ضخامت پوشش خارجی ( $\mu\text{m}$ )
-	۱۰۰ (۱۱/۳)	ضربه (Nm) مطابق روش AWWA C213 بخش ۵.۳.۲.۵
-	۳۰۰۰ (۲۰۶۸۵)	چسبندگی برشی ( $\text{kPa}$ ) مطابق روش AWWA C213 بخش ۳.۵.۲.۷
-	$1/1 \times 10^{15}$	مقاومت ویژه حجمی مطابق روش ASTM D257

## ۳-۴- پلی‌یورتان

این پوشش ابتدا به صورت پوشش پلی‌یورتان با درصد جامد بالا در شمال آمریکا برای حفاظت خوردگی مخازن ذخیره‌کننده سوخت مدفون در خاک در اواسط ۱۹۷۰ میلادی استفاده شد. به‌صورت هم‌زمان این پوشش در اروپا برای خطوط لوله نفت و گاز نیز مورد استفاده قرار گرفت. به‌دلیل پیشرفت فناوری در دهه ۸۰ این پوشش برای محافظت خطوط لوله آب و پساب نیز به‌صورت موفقیت‌آمیزی مورد استفاده قرار گرفت. استاندارد AWWA C222 شرایط و تجهیزات مورد نیاز برای اعمال پوشش پلی‌یورتان با درصد جامد بالا جهت اعمال درون و بیرون لوله‌های فولادی انتقال آب و پساب را توضیح می‌دهد. جدول ۴ ویژگی‌های مورد انتظار از این پوشش را نشان می‌دهد [۲۲]. این پوشش به‌دلیل دو جزئی بودن و دارا بودن حداقل میزان مواد آلی فرار جایگاه خوبی را در بین پوشش‌های محافظت‌کننده سطوح دارا می‌باشد. هم‌چنین پوشش پلی‌یورتان از مقاومت خوردگی بالایی برخوردار می‌باشد، که این امر سبب گسترش روز افزون این پوشش در محافظت خطوط لوله در محیط‌های خورنده از جمله خطوط لوله انتقال نفت و گاز شده است [۲۳]. به‌عنوان پوشش، پلی‌یورتان‌ها چسبندگی بسیار خوبی به بیشتر زمینه‌ها دارند. مقاومت سایشی بالا، خواص الکتریکی و مقاومت آب و هوایی خوبی را نیز در بسیاری از صنایع از خود نشان می‌دهند [۲۳].

## ۳-۵- پلی‌آمید

پوشش‌های پلی‌آمید جزو پوشش‌های ترموپلاستیک می‌باشند. به‌طور عمده پلی‌آمیدها به صورت پودر پلی‌آمید خشک روی فولاد از پیش پوشیده شده با لایه نازکی از اپوکسی قابل اعمال می‌باشند. زمانیکه این پوشش در دمای مناسب قرار گیرد، پودر پلی‌آمید خشک، ذوب شده و یک پوشش یکنواخت پیوسته‌ای را روی سطح فولاد تشکیل می‌دهد. به‌طور هم‌زمان در طی این تغییرات حرارتی واکنش شیمیایی بین اپوکسی و پلی‌آمید صورت می‌گیرد. این واکنش‌های شیمیایی پیوند بین پلی‌آمید و سطح فولاد را فراهم می‌کنند. استاندارد AWWA C224 شرایط و تجهیزات مورد نیاز برای اعمال پوشش پلی‌آمید دو لایه بر پایه نایلون ۱۱ جهت اعمال درون و بیرون لوله‌های فولادی انتقال آب و پساب را توضیح می‌دهد. جدول ۵ ویژگی‌های مورد انتظار از این پوشش را نشان می‌دهد [۲۴].

پوشش پلی‌آمید مورد اشاره استاندارد به‌صورت دو لایه جهت سطوح داخلی و خارجی لوله‌های فولادی در روی زمین، مدفون در خاک، زیر آب در شرایط عادی استفاده می‌شود. پوشش پلی‌آمید-اپوکسی در معرض نور، گچی می‌شود.

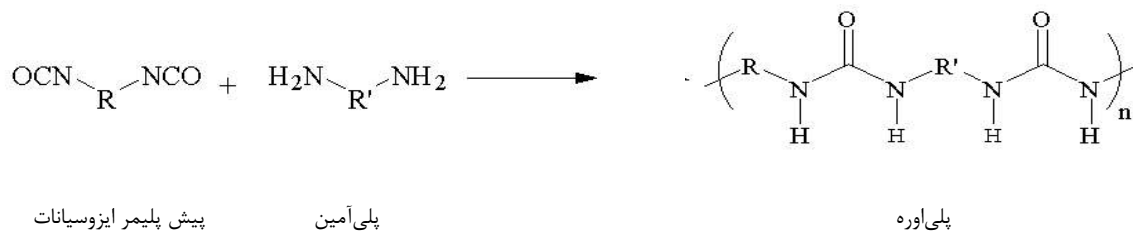
جدول ۴- گزیده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی پوشش پلی‌یورتان [۲۲].

نتیجه آزمون	آزمون
حداقل ۱۰۳۵۰ kPa	چسبندگی به فولاد (مطابق ASTM D4541)
حداکثر ۱۲ mm	جدایش کاتدی (مطابق ASTM G95)
فاقد جدایش یا شکست	انعطاف پذیری با خمش ۱۸۰° (مطابق ASTM D 522)
حداقل ۰.۶۴ kg.m	مقاومت ضربه (مطابق ASTM D2794)
حداکثر ۱۰۰ mg کاهش به ازای ۱۰۰۰ دور	مقاومت سایش در برابر چرخ CS17 با وزن ۱kg (مطابق ASTM D4060)
حداکثر ۵٪ تغییر در جرم، طول یا پهنا بعد از ۳۰ روز غوطه‌وری	مقاومت شیمیایی در برابر ۱۰٪ H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ، ۳۰٪ NaCl، ۳۰٪ NaOH و ۲٪
حداکثر ۳٪	سوخت دیزل (مطابق ASTM D543)
حداقل ۶۵ Shore D	جذب آب (مطابق ASTM D570)
	سختی (مطابق ASTM 2240)

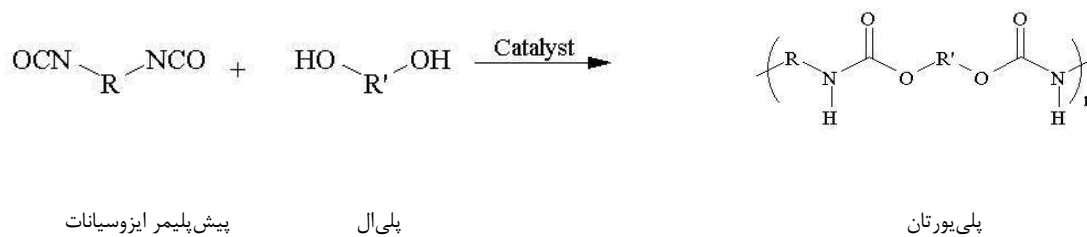
جدول ۵- ویژگی‌های فیزیکی پوشش پلی‌آمید مورد استفاده در استاندارد [۲۴].

حداکثر	حداقل	نتیجه آزمون آزمون
۱/۲۰	۱/۰۵	وزن ویژه (g/cm <sup>3</sup> ) مطابق ASTM D792
۴۵	۵	توزیع اندازه ذره مطابق ASTM D1971
۱۹۱/۴	۱۸۲/۴	نقطه ذوب مطابق ASTM E324 (°C)
۲/۷	۱	جذب آب (درصدوزنی) مطابق ASTM D570
-	۰/۷۲	مقدار پلی (۱۱ آمینون دکانویک اسید) (درصد وزنی) مطابق ASTM D789





شکل ۲- واکنش تشکیل پلی اوره آ [۲۶].



شکل ۳- واکنش تشکیل پلی یورتان [۲۶].

### ۳-۶- پلی اوره آ

اواخر ۱۹۸۰ میلادی خانواده پوشش پلی یورتان الاستومری صاحب عضو جدیدی بنام پلی اوره گردید. پلی اوره از واکنش ایزوسیانات با آمین به دست آمد (شکل ۲). در حالیکه پلی یورتان از واکنش پلی ال با ایزوسیانات به دست می آید (شکل ۳). پوشش پلی اوره مقاومت خوردگی، مقاومت آب و هوایی و مقاومت در برابر پرتو فرابنفش مناسبی دارد. این پوشش می تواند برای پوشش سطوح خارجی لوله هایی که روی زمین می باشند، استفاده شود [۲۵]. همچنین، پوشش پلی اوره برای محافظت خطوط لوله بتنی مورد استفاده قرار می گیرد. پوشش پلی اوره با خطر واکنش پذیری سریعی که بین اجزاء آن وجود دارد، نیازمند تجهیزات خاصی برای اعمال می باشد، که گاه مستلزم صرف هزینه های زیاد می باشد [۲۶].

باشند. برای پخت این پوشش ها وجود یک عامل آغاز گر نوری<sup>۱</sup> که توسط نور فرابنفش واکنش های پلیمریزاسیون رادیکالی را آغاز نماید و یک رزین یا مونور دارای پیوند دوگانه (اشباع نشده) که تحت واکنش های پلیمریزاسیون قرار گیرد ضروری است. پوشش های پخت شونده با فرابنفش بر پایه رزین و مونومرهای خانواده متاکریلات برای پوشش دهی سطوح داخلی خطوط لوله پیشنهاد شده اند [۲۷-۲۹]. در این پوشش ها از بهبوددهنده چسبندگی نظیر ترکیبات آلی سیلانی، ترکیبات بازدارنده خوردگی نظیر رنگدانه های خانواده فسفات، مواد نانوذره نظیر سیلیس جهت بهبود مقاومت در برابر سایش، رنگدانه ها مانند اکسید آهن و پرکننده ها نظیر تالک مورد استفاده قرار گرفته اند [۳۰]. مقاومت عالی در برابر سایش و مواد شیمیایی برای این پوشش گزارش شده است.

### ۴-۲- پوشش های وینیل استری

پیونده این پوشش ها از طریق واکنش استری شدن رزین اپوکسی و یک مونومر کربوکسیلیک اسید غیراشباع سنتز می شوند. با توجه به عاملیت غیراشباع بر روی زنجیر پلیمری از رقیق کننده های فعال نظیر استایرین می توان برای سهولت اعمال پوشش استفاده نمود. استفاده از پوشش های بر پایه وینیل استر برای پوشش دهی سطوح داخلی خطوط لوله پساب صنعتی تحت فشار توصیه شده است [۳۱]. گزارش شده است استفاده از نانو مواد نظیر نانوپرک شیشه می تواند تا حد زیادی خواص حفاظتی این پوشش را بهبود دهد [۳۱، ۳۲].

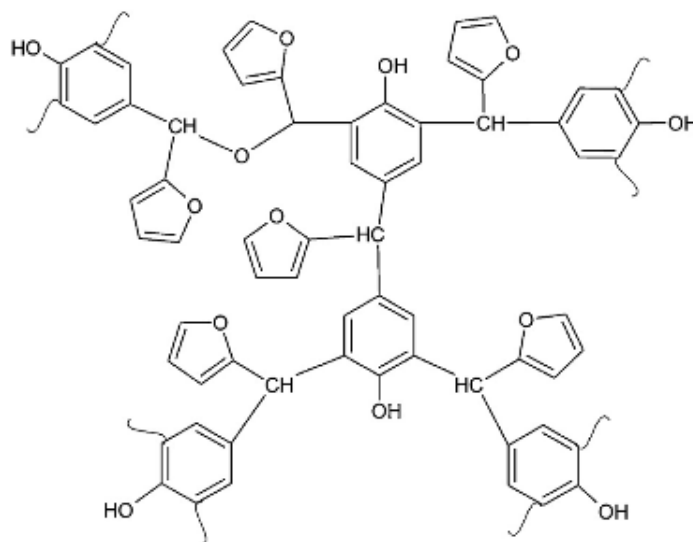
### ۴- روش های اخیر در تهیه پوشش های حفاظتی سطوح داخلی خطوط لوله

در سال های اخیر استفاده از سامانه های پوششی دیگری غیر از سامانه های پوششی متداول در تهیه پوشش های حفاظتی سطوح داخلی خطوط لوله پساب مورد توجه قرار گرفته اند که در این قسمت به آنها پرداخته می شود.

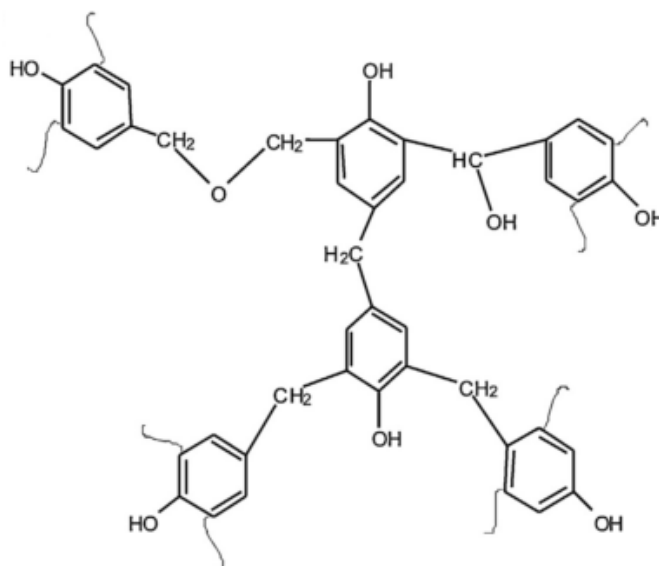
### ۴-۱- پوشش های تابش یز

پوشش های پخت شونده با پرتو فرابنفش را می توان تا درصد جامد ۱۰۰ درصد نیز فرموله کرد چرا که این پوشش ها می توانند فاقد جزء فرار

<sup>۱</sup> Photoinitiator



شکل ۴- ساختار شیمیایی رزین فوران [۳۳]



شکل ۵- ساختار شیمیایی رزین فنولیک [۳۳]

پخت احتیاج به کاتالیست اسیدی دارند. خواص مکانیکی آنها نسبت به پوشش‌های برپایه فوران بهتر است. ساختار شیمیایی پیونده پس از پخت در شکل ۵ نشان داده شده است [۳۳].

#### ۴-۵- پوشش‌های فلوروپلیمری

پلیمرهای فلورینه به دلیل داشتن خواص سطحی منحصر به فرد سطحی اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. خواص منحصر به فرد این ترکیبات به الکترون‌گاتیویته بالای اتم فلور، استحکام بالای پیوند فلور-کربن و شعاع واندروالس بزرگ فلور مربوط می‌شود. پوشش‌های حاصله از این نوع پیونده مقاومت حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی بالایی دارند [۳۴]. همچنین این نوع پوشش‌ها انرژی سطحی بالایی دارند که خاصیت

#### ۴-۳- پوشش‌های فوران<sup>۱</sup>

پیونده این پوشش‌ها از طریق واکنش تراکمی بین فنل و فورفورال تهیه می‌شوند. در برابر قلیا، اسید و مواد شیمیایی مقاوم هستند اما خواص مکانیکی نسبتاً ضعیفی دارند. این پوشش‌ها برای پخت احتیاج به کاتالیزور اسیدی دارند. ساختار شیمیایی پیونده پس از پخت در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۳].

#### ۴-۴- پوشش‌های فنولیک

پیونده این پوشش‌ها از طریق واکنش تراکمی بین فنل و فرمالدهید تهیه می‌شوند. این پوشش‌ها مقاومت شیمیایی و حرارتی بالایی دارند و برای

<sup>۱</sup> Furane

مورد نیاز استفاده کرد. با این وجود تحقیقات در خصوص پوشش‌هایی که مقاومت خوردگی و شیمیایی بالا و مقاومت قابل قبول در برابر تخریب بیولوژیکی داشته باشند ادامه دارد. از جمله این پوشش‌ها می‌توان به پوشش‌هایی نظیر پوشش‌های تابش‌پز، پوشش‌های وینیل استری، فورانی، فنولیک و فلوروپلیمری اشاره کرد که هنوز استاندارد نشده‌اند و انتخاب آنها بسته به کارایی مربوطه می‌بایست با دقت صورت گیرد. استفاده از نانوذرات برای حصول مقاومت‌های بالاتر خوردگی، شیمیایی، سایشی و بیولوژیکی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این رو یکی از چشم‌انداز پیشرفت‌های آتی در این صنعت استفاده از نانوذرات مختلف در تهیه پوشش‌های سطوح داخلی خطوط لوله می‌باشد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به پوشش‌های متداول سطوح داخلی لوله‌ها بر پایه لعاب قطران زغال سنگ، اپوکسی مایع، اپوکسی پودری، پلی‌یورتان، پلی‌آمید و پلی‌یوره‌ا اشاره شد. این پوشش‌ها عموماً استاندارد شده هستند و با توجه به خواص و ویژگی‌های فنی و اقتصادی ذکر شده در رابطه با انواع پوشش‌های خطوط لوله پساب می‌توان از این پوشش‌ها بسته به شرایط

## ۶- مراجع

۱. م. شریعت پناهی، "اصول کیفیت و تصفیه آب و پساب"، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۵، ۱۳۶۸.
2. M. Henze, P. Harremoës, E. Arvin, C. Jansen, "Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes", Springer, 3, 27, 2002.
3. R. Arbour, K. D. Kerri, "Methods for evaluating and improving performance, United States. Environmental Protection Agency. Office of wastewater management", California State University, acramento, 253, 1998.
4. I. Iraj Kaspar, I. Jeffrey Enyart, "Concrete pipe for the new millennium", ASTM (STP1368), 4, 2000.
5. M. J. Parcher, "Wastewater Collection System Maintenance", Taylor & Francis, 145, 1997.
6. K. M. Usher, A. H. Kaksonen, I. Cole, D. Marney, "Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes", International Biodeterioration & Biodegradation, 93, 84-106, 2014.
7. G. Bitton, "Wastewater microbiology", fourth edition, Wiley-Blackwell, 571, 2011.
8. S. W. Borenstein, "Microbiologically influenced corrosion handbook", Woodhead publishing limited, 89, 1994.
9. H-J. Jördening, J. Winter, "Environmental biotechnology: concepts and applications", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA., 55, 2005.
10. M. Akbarian, M. E. Olya, M. Ataefard, M. Mahdavian, "The influence of nanosilver on thermal and antibacterial properties of a 2 K waterborne polyurethane coating", Prog. Org. Coat. 75, 344-348, 2012.
11. M. Akbarian, M. E. Olya, M. Mahdavian, M. Ataefard, "Effects of nanoparticulate silver on the corrosion protection performance of polyurethane coatings on mild steel in sodium chloride solution", Prog. Org. Coat. 77, 1233-1240, 2014.
12. M. J. Parcher, "Wastewater collection system maintenance", CRC Press, 1997.
13. M. F. Montemor, "Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances Surface and Coatings Technology", 258, 17-37, 2014.
14. F. R. Spellman, "Handbook of Water and Wastewater Treatment Plant Operations", Third Edition, CRC Press, 2013.
15. C-F. Zheng, Z-F. Yang, C-C. Lv, X-P. Zhou, X-L. Xie, "Thermal stability and abrasion resistance of polyacrylate/nano-silica hybrid coatings", Iranian Polym. J. 22(7), 465-471, 2013.
16. M. Kathalewar, A. Sabnis, G. Waghoo, "Effect of incorporation of surface treated zinc oxide on non-isocyanate polyurethane based nano-composite coatings", Prog. Org. Coat. 76, 1215-1229, 2013.
17. M. Gray, "The activity of immobilized anaerobic bacteria in the treatment of industrial wastewater", WPI, 5, 2008.
18. American Water Works Association ANSI/AWWA C203-91, "Coal-tar protective coatings and linings for steel water pipelines-enamel and tape-hot applied", 1999.
19. S. W. Guan, "Corrosion protection by coatings for water and wastewater pipelines", Water and Wastewater Program West Virginia University, PA, 2001.
20. American Water Works Association ANSI/AWWA C210-97, "Liquid epoxy coating systems for the interior and exterior of steel water pipelines", 1997.
21. American Water Works Association ANSI/AWWA C213-07, "Fusion-bonded epoxy coating for the interior and exterior of steel water pipelines", 1997.
22. American Water Works Association ANSI/AWWA C222-99, "Polyurethane coatings for the interior and exterior of steel water pipe fittings", 1999.
23. G. T. Howard, "Biodegradation of polyurethane: a review", Int Biodeter Biodegr. 49, 45- 252, 2002.
24. American Water Works Association ANSI/AWWA C224-01, "Two layer nylon 11 based polyamide coating system for the interior and exterior of steel water pipe, connections, fittings, and special sections", 2001.
25. W. De Muynck, N. De Belie, W. Verstraete, "Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete", Cement Concrete Comp., 31, 3, 163-170, 2009.
26. T. Ippoliti, "Waterborne coatings for water and wastewater treatment plants: Part 2", Water Engineering & Management, 148, 2, ABI/INFORM Global, 30, 2001.
27. T. Ippoliti, "Waterborne coatings for water and wastewater treatment plants", Water engineering and management, Scranton Gillette Communications, Inc., 34, January 2001.
28. X. Shi, "On the use of Nanotechnology to Manage Steel Corrosion", Recent Patents on Engineering, 4, 44 -50, 2010.
29. P. Legros, V. W. M. stone, G. E. Diaz, "Pipes for pipelines having internal coating and method for applying the coating", World Intellectual Property Organization, Patent number WO2014006181 A1, 2014.
30. G. D. Hulster, J. Gould, "Method and device for repairing piping", United State Patent, Patent number US 20130139922 A1, 2013.
31. A. Ghadami, M. Ehsani, H. A. Khonakdar, "Vinyl ester/

- glass flake nanocomposites: An overview of chemical and physical properties", *J. Compos. Mater.* 48(13), 1585-1593, **2014**.
32. M. Ehsani, H. A. Khonakdar, A. Ghadami, "Assessment of morphological, thermal, and viscoelastic properties of epoxy vinyl ester coating composites: Role of glass flake and mixing method", *Prog. Org. Coat.* 76, 238-243, **2013**.
33. G. Rivero, L. A. Fasce, S. M. Cere, L. B. Manfredi, "Furan resins as replacement of phenolic protective coatings: Structural, mechanical and functional characterization", *Prog. Org. Coat.* 77, 247-256, **2014**.
34. Q. Zhang, Q. Wang, X. Zhan, F. Chen, "Synthesis and performance of novel fluorinated acrylate polymers: preparation and reactivity of short perfluoroalkyl group containing monomers", *Ind. Eng. Chem. Research* 53, 8026-8034, **2014**.
35. D-H. Lee, F. Fattahi, K. Chen-Ho, S. M. Ahmed, K. Gosain, Y. Lu, "Coatings, compositions, coated articles and methods", World Intellectual Property Organization, Patent number WO 2014066633 A1, **2014**.