

Polymerization
Quarterly, 2021
Volume 11, Number 3
Pages 22-33
ISSN: 2252-0449

A Review on the Durability in PVC Sewer Pipes: Structural and Performance Factors

Mahroo Khaleghi

Chemistry and Petrochemical Engineering Center, Standard Research Institute (SRI),
P.O. Box 31745-139, Karaj, Iran

Received: 7 November 2020, Accepted: 20 February 2021

Abstract

Currently, polyvinyl chloride (PVC) is one of the most valuable products in the petrochemical industry. In general, more than half of the PVC products is used in construction. In recent decades, due to its many advantages, it has become one of the dominant products used in sewage systems. However, as these sewer pipes have been operated in an aggressive environment for decades, concerns about their longevity have recently increased. In this regard, in this article, the main factors and mechanisms affecting the service life of PVC pipe, along with current methods for estimating their service life and their limitations are discussed. Investigation of related case studies shows that material degradation, if present, occurs slowly. However, inspections of some sewer lines in different countries show that severe defects in the pipes are growing at a rapid and unexpected rate. The main reason for this difference between studies and practices is the fact that a comprehensive test of PVC sewer pipe materials is rarely found in sources, although it is necessary to reliably assess the extent of degradation and its sources.

Key Words

plastic pipes,
polyvinyl chloride,
sewer,
degradation,
pipes lifetime

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.khaleghi@standard.ac.ir

مروری بر دوام لوله‌های فاضلاب پلی‌وینیل کلرید: عوامل ساختاری و عملکردی

ماهر و خالقی

کرج، پژوهشگاه استاندارد، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، صندوق پستی ۱۳۹-۳۱۷۴۵

دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۷، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲

در شرایط حاضر، پلی‌وینیل کلرید (PVC) یکی از ارزشمندترین محصولات صنعت پتروشیمی است. به‌طور کلی، بیش از نیمی از PVC تولیدی در ساختمان‌سازی استفاده می‌شود. در دهه‌های گذشته، پلی‌وینیل کلرید به دلیل مزایای بسیار، به‌عنوان یکی از محصولات غالب به‌کاررفته در سامانه‌های فاضلاب تبدیل شده است. با این حال، از آنجا که این لوله‌های برای دهه‌ها در یک محیط مهاجم فاضلاب کار می‌کنند، اخیراً نگرانی درباره طول عمر آن‌ها افزایش یافته است. در این راستا، عوامل اصلی و سازوکارهای اثرگذار بر طول عمر لوله PVC، همراه با روش‌های فعلی تخمین طول عمر و محدودیت‌های آن‌ها در این مقاله بحث شده است. بررسی مطالعات موردی مربوط نشان می‌دهد، تخریب مواد، در صورت وجود، به آرامی رخ می‌دهد. با این حال، بازرسی‌های انجام‌شده از برخی خطوط فاضلاب در کشورهای مختلف نشان می‌دهد، نقص‌های شدید ظاهر شده در لوله‌ها با شتاب زیاد و غیرمنتظره‌ای رشد می‌کند. دلیل اصلی این تفاوت بین مطالعات و عمل، این واقعیت است که آزمون جامع مواد لوله‌های فاضلاب PVC به‌ندرت در منابع یافت می‌شود، اگرچه برای ارزیابی قابل اعتماد وسعت تخریب و منابع آن ضروری است.

بسپارش
فصلنامه علمی
سال یازدهم، شماره ۳
صفحه ۲۲-۳۳، ۱۴۰۰
ISSN: 2252-0449

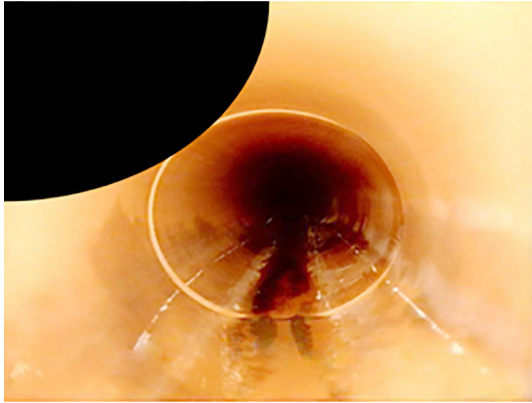
چکیده



ماهر و خالقی

واژگان کلیدی

لوله‌های پلاستیکی،
پلی‌وینیل کلرید،
فاضلاب،
تخریب،
طول عمر لوله



شکل ۱- لوله فاضلاب با انحراف بیش از حد مجاز [۳].

بنابراین نگرانی درباره طول عمر آن‌ها همواره باید مدنظر باشد. هنوز مشخص نیست، آیا انتظاراتی که از لوله‌های PVC مبنی بر دوام طولانی مدت آن استوار است، نگاهی واقع‌بینانه بوده یا مستلزم در نظر گرفتن رویکردهای جدید در آینده نزدیک است [۲-۴]. نکته اصلی در این موضوع، آگاهی از وجود یک پارچگی ساختاری در سامانه‌های فاضلاب برای ایجاد اقدامات مؤثر است که به تصمیم‌گیری بهتر و سرمایه‌گذاری مقرون به صرفه‌تر منجر می‌شود. در حال حاضر، آگاهی از پایدار بودن وضعیت سامانه‌های فاضلاب در کشورهای مختلف براساس بازرسی‌های تصویری (دوربین مداربسته) استوار است، بنابراین تصمیم‌گیری‌ها شامل جایگزینی، تعمیر یا پایش‌های بعدی در این امر، منوط به نتایج این بازرسی‌ها و بازرسی‌ها خواهد بود [۵]. با وجود این، ارتباط نقص‌های مشاهده‌شده به وسیله دوربین مداربسته با وضعیت فیزیکی واقعی یک لوله همچنان چالش برانگیز است. شرط لازم برای دستیابی به ارتباطی مؤثر و واقعی، داشتن درک جامعی از سازوکارهایی است که بر طول عمر لوله PVC اثر می‌گذارند. این مطالعه شامل مروری بر این سازوکارها و ریشه‌های ایجاد آن‌هاست. هدف اصلی این مقاله، ارائه مطالعات انجام‌شده در کشورهای مختلف، لوله‌های فاضلاب PVC موجود در منابع، مقایسه نتایج به‌دست‌آمده و همچنین وضعیت این سامانه‌ها در ایران است.

عوامل و سازوکارهای مؤثر بر طول عمر لوله‌های PVC

تولید و فرمول بندی مواد

در مراحل اولیه تولید تا آخرین مراحل عمر لوله‌های پلاستیکی، عوامل مختلفی وجود دارد که می‌تواند بالقوه بر خواص فیزیکی و شیمیایی و در ادامه بر خواص مکانیکی این لوله‌ها اثر بگذارد.

مقدمه

پلاستیک‌ها در طیف گسترده‌ای از کاربردهای لوله‌کشی تجاری و صنعتی استفاده می‌شوند. مشهورترین آن‌ها پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن (ABS)، پلی‌بوتیلن (PB) و پلی‌استر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GRP یا FRP) است. در فرایند تأمین آب، توزیع گاز و دفع فاضلاب PVC، PE و PP یکی از محبوب‌ترین مواد پلیمری هستند. PVC در دهه‌های گذشته، به‌ویژه در لوله‌های فاضلاب مدفون، بسیار استفاده شده و به‌عنوان ماده اصلی در صنعت ساختمان شناخته شده است. مقرون به صرفه بودن این لوله‌ها نسبت به سایر لوله‌ها شامل قیمت لوله، هزینه‌های حفاری، حمل و نقل، بسترسازی، آسانی نصب، گسترده‌گی دامنه قطرهای موجود (۳۰-۴۰ mm) و مقاومت زیاد شیمیایی آن‌ها، توجه کاربران و سازمان‌های ذی‌صلاح در زه‌کشی شهری را به خود معطوف ساخته است [۱، ۲].

عمر تخمینی لوله‌های فاضلاب PVC ممکن است، متفاوت باشد و این به تجربه متولی انجام پروژه تخمین طول عمر لوله بستگی دارد. در گزارش‌های انجمن‌های کشورهای مختلف، عمر مفید یک لوله PVC با گستره‌های متفاوت شامل ۴۰، ۵۰، ۸۶ و ۱۰۰ سال، تخمین زده شده است. اختلاف زیاد در عمر مفید تخمین زده‌شده لوله PVC سخت نشان می‌دهد، انجام اقدامات میدانی بیشتر برای به‌دست‌آوردن اطلاعات افزون‌تر درباره نوع، اندازه و تکرار نقص‌های رخ داده در تمام دوره‌های کارکرد لوله و همچنین مواد اولیه لازم است [۳].

به‌طور کلی، نقص‌های معمول مشاهده‌شده در لوله‌های PVC سخت، شامل فرورفتگی دیواره لوله ناشی از تغییر شکل پلاستیکی دائمی در سطح مقطع دایره‌ای شکل آن، از بین رفتن پایداری دیواره لوله (کمانش) و انحراف بیش از حد لوله‌ها هستند که در گزارش‌های مختلف آمده است (شکل ۱).

پژوهش‌های مختلف درباره لوله‌های فاضلاب PVC نشان می‌دهند، آسیب‌های مکانیکی علت اصلی خرابی (۴۹/۶٪) است. دلایل احتمالی دیگر شامل بی‌کیفیتی مواد (۱۶/۵٪)، خوردگی (۱۵/۳٪)، رانش زمین (۷/۳٪)، خطاهای انشعاب‌گیری گرم (hot-tapping errors) (۴/۶٪) و سایر علل ناشناخته (۶/۷٪) است [۳].

به‌طور کلی داشتن عمر مفید حداقل ۵۰ سال، نیاز بارزی است که در استفاده از لوله‌های پلاستیکی در توزیع آب و گاز احساس می‌شود. در حال حاضر، لوله‌های فاضلاب PVC به‌کاررفته در ساختمان‌ها، حداقل برای چهار دهه در حال کار هستند،



(ب)

(الف)

شکل ۲- حمله دی کلرومتان به لوله با درجه ژل شدن کم: (الف) حمله به پخ در اطراف لوله و (ب) حمله و حل شدن PVC با تشکیل خمیر [۷].

در تمام کاربردهای PVC، کیفیت محصول به نحوه ذوب رزین PVC و اختلاط آن با سایر افزودنی‌ها و اجزای موجود در فرمول بندی وابسته است [۶]. از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی مناسب بودن فرایند شکل دهی PVC، درجه ژل شدن آن است. کیفیت فرایند تولید PVC، تعیین کننده درجه ژل شدن یا ذوب آن است که به طور مستقیم کیفیت قطعات تولیدی را تعیین می‌کند. افزون بر نوع فرایند شکل دهی (مانند تزریق، اکستروژن لوله و فیلم و غیره)، دمای فرایند شکل دهی مؤثرترین پارامتر تعیین کننده درجه ژل شدن PVC است. برای مثال، اگر دمای فرایند شکل دهی کم باشد، مقدار ژل شدن PVC کم می‌شود (شکل ۲). همچنین اگر این دما زیاد باشد، می‌تواند به تخریب ساختار PVC و در نتیجه کاهش خواص فیزیکی مکانیکی آن منجر شود [۷].

مقدار ژل شدن یا پخت مناسب PVC در حین فرایند تولید، نه تنها موجب محافظت آن در برابر حملات شیمیایی ناشی از وجود حلال‌های شیمیایی می‌شود، بلکه خواص مکانیکی محصول تولیدی را نیز تعیین می‌کند. دو روش استفاده شده برای تعیین میزان پخت، وجود دارد. در هر دو روش پس از قرارگیری لوله یا محصول PVC در حلال استون (استاندارد ASTM D 2152) و در حلال دی کلرومتان (ISO 9852)، حمله مواد شیمیایی انجام می‌گیرد و نتایج به شکل مردود یا پذیرفته بیان می‌شوند. رد شدن نمونه زمانی اتفاق می‌افتد که مواد شیمیایی موجود، قابلیت حمله به PVC را داشته باشند و نتیجه حاصل از این حمله، برداشته شدن لایه‌ای از پلیمر از سطح قطعه (شکل ۲) است [۶، ۷].

به لحاظ فرایند تولید، محصولات PVC براساس ترکیب رزین PVC از طریق فرایند فشاری و دمایی حاصل می‌شوند. دو فرایند اصلی تولید، شامل اکستروژن کردن برای تولید محصولات پیوسته نظیر لوله و قالب‌گیری برای محصولات مجزا نظیر اتصالات

هستند. در فرایند تولید لوله‌های پلاستیکی که معمولاً با فرایند اکستروژن همراه با خنک کردن قوی دیواره خارجی با آب شکل می‌گیرند، ماده پلیمری به شکل پودر با جریان آزاد همراه با پایدارکننده‌ها و روان‌کننده‌های مختلف طبق فرمول بندی تعیین شده به کار می‌رود. بدین دلیل، انتخاب فرمول بندی و پس از آن اختلاط، دو عامل حیاتی در فرایند تولید محسوب می‌شوند [۸].

مواد با سرعت زیاد با یکدیگر مخلوط می‌شوند تا مخلوطی خشک و یکنواخت حاصل شود. در مراحل مختلف فرایند اختلاط، افزودنی‌ها ذوب شده و روی سطح دانه‌های PVC را پوشش می‌دهند. پس از آن، مواد مذاب وارد اکستروژر می‌شوند تا لوله نهایی شکل گیرد و خنک شود. این فن ساخت و ساز، اکستروژن نامیده می‌شود که به طور گسترده برای ساخت لوله‌ها استفاده می‌شود. اتصالات و محصولات مجزا، با استفاده از روش قالب‌گیری تزریقی تولید می‌شوند. در فرایند قالب‌گیری تزریقی، پلاستیک ذوب شده در قالب تزریق می‌شود که شکل مدنظر را به قطعه می‌دهد و پس از خنک شدن، محصول خارج می‌شود [۸، ۹].

در طول فرایند تولید، چند ماده افزودنی و مواد پرکننده ممکن است به ترتیب در ساختار پلیمرها گنجانده شوند تا خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها را بهبود دهند. اصلاح کننده‌های ضربه، مواد اصلی افزودنی هستند، زیرا بر رفتار و مقدار تخریب ماده در چرخه عمر آن، اثرگذارند [۹]. پایدارکننده‌ها برای افزایش مقاومت در برابر مواردی مانند تابش فرابنفش، حمله شیمیایی و سایر عوامل خارجی مرتبط، به آن اضافه می‌شوند. سرب تا اوایل سال ۲۰۰۰ برای لوله‌های PVC استفاده می‌شد، اما اخیراً در بیشتر کشورها با پایدارکننده‌های پایه کلسیم جایگزین شده است [۱۰].

عملکرد طولانی مدت محصول در هر مرحله از تولید لوله‌های PVC و اتصالات، می‌تواند تحت تأثیر این شرایط و ترکیبات قرار گیرد. از جمله، سطح آب و اکسیژن در جریان پلیمر شدن می‌تواند بر شکل‌گیری و کیفیت ذرات PVC تولید شده اثر بگذارد. پس از آن، فرایند ژل شدن تحت تأثیر درجه پلیمر شدن، نقش اصلی را در خواص مکانیکی ایفا می‌کند. این خواص به وسیله شکل شناسی مواد و جهت‌گیری پلیمر و تحرک مولکولی تعیین می‌شود. افزون بر این، خلوص و خلأهای موجود در ساختار پلیمر، که غالباً به عنوان نقص ذاتی شناخته می‌شوند، در حین تولید ایجاد و باعث تشکیل ترک‌های غیرقابل رقابت می‌شوند. سایش به وجود آمده در اکستروژن‌های لوله‌های پلیمری نیز ممکن است در بروز نقص‌های ذاتی نقش داشته باشد [۱۱، ۱۲].

تنش‌های باقی‌مانده یا پسماند که در حین تولید، در اثر

فیزیکی، تخریب مکانیکی، تخریب شیمیایی و ترک‌زایی تنش محیطی (ESC) هستند. مشخص شده است، پیرشدگی فیزیکی در پلیمرها پدیده‌ای است که باعث ایجاد تغییر در خاصیت ماده به‌عنوان تابعی از زمان در دمای ثابت و به‌طور مستقل می‌شود. پلیمرهای بی‌شکل (با اندکی بلورینگی) مانند PVC، به‌دلیل اینکه تا زیر دمای انتقال شیشه‌ای (T_g) سرد می‌شوند، به‌عنوان عامل خارجی، پیرشدگی فیزیکی را تجربه می‌کنند. از این رو، آن‌ها در حالت تعادل گرمایی قرار نمی‌گیرند. در حالت عدم تعادل، بخش بلوری پلیمر دارای ویژگی‌های گرمایی بیش از حد است و تلاش مداومی برای رسیدن به حالت تعادل با بخش بی‌شکل وجود دارد. پیرشدگی فیزیکی می‌تواند با کاهش حجم و آنتالپی، اما با تغییراتی در خواص مکانیکی بروز کند که در این حالت، پلیمر سفت و شکننده می‌شود. در اصل، پیرشدگی فیزیکی امری اجتناب‌ناپذیر است. این فرایند در پلیمرهایی شتاب می‌یابد که در دمای بیشتر فراوری می‌شوند [۱۷، ۱۸].

تخریب مکانیکی نتیجه تنش‌های اعمال‌شده بر لوله یا اتصال است که حد آن از آستانه شکست ماده عبور می‌کند و به‌شکل شکستگی ظاهر می‌شود. این تخریب‌ها از تنش‌های ناشی از فشار داخلی و انحراف‌های ناشی از پوشش خاک و روند تولید (تنش‌های پسماند) حاصل می‌شود. تنش‌های اضافی می‌توانند در اثر خم شدن محوری، به‌دلیل بستر نامناسب خاک و تراکم آن ایجاد شوند. کیفیت اکستروود کردن لوله می‌تواند عامل مهمی برای طول عمر لوله باشد، زیرا شروع ترک در نقص‌های داخلی و ناخالصی‌ها مشاهده می‌شود. پس از آن، گسترش ترک به‌وسیله اندازه و جهت تنش‌های اعمال‌شده کنترل می‌شود. این سازوکار شکست به‌عنوان رشد آهسته ترک (slow cracking growth, SCG) شناخته می‌شود. تخریب مکانیکی با عوامل خارجی (به‌عنوان مثال برخورد بیل مکانیکی)، می‌تواند به‌صورت انتشار سریع ترک ظاهر شود. جدا از کیفیت فرایند، دما نیز عامل مهمی برای خواص مکانیکی است. دمای کم به شکست‌های شکننده‌تری منجر می‌شود، زیرا به‌نظر می‌رسد، مقدار انرژی قابل جذب در لوله‌های PVC پیش از شکستگی به‌طرز چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۸].

ترک‌زایی تنش محیطی نوعی سازوکار شکست بوده که از نظر شکل بسیار شبیه رشد آهسته ترک است. این ترک‌برداری روندی فیزیکی است که با تنش اعمال می‌شود، اما با وجود محیط فعال شتاب می‌یابد [۱۸]. روش‌های پیش‌بینی طول عمر و محدودیت‌های آن‌ها، آزمون فشار هیدروستاتیک و روش برون‌یابی استاندارد، روش‌های معمول درجه‌بندی لوله‌های گرم‌انرم و تعیین

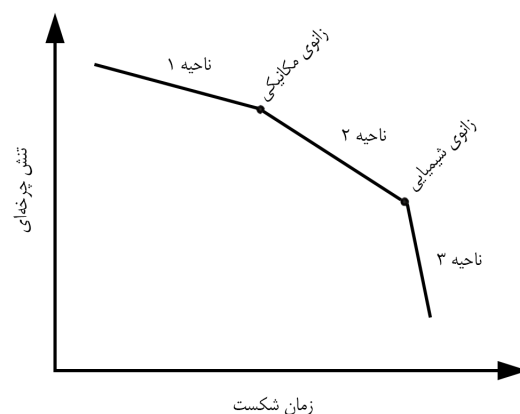
سرعت‌های مختلف سردکردن میان سطوح داخلی و خارجی لوله ایجاد می‌شوند، پارامتر دیگری است که خواص مکانیکی لوله تولیدشده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به‌طور کلی، سرعت سردکردن و ضخامت دیواره زیاد، صرف‌نظر از اندازه و مقدار، سبب ایجاد تنش‌های پسماند در ساختار محصول می‌شوند که بر انتشار ترک و طول عمر لوله‌های پلاستیکی تحت فشار بسیار اثرگذار است [۲، ۱۳]. در جریان عملیات سردکردن دیواره خارجی با آب، دیواره داخلی در مجاورت هوای ساکن قرار می‌گیرد. در نتیجه فرایند خنک‌سازی لوله، سبب انجماد مواد ناهمگن در سراسر دیواره آن و به‌وجود آمدن توزیعی از تنش پسماند می‌شود. مقدار تنش‌های پسماند تا حد درخور توجهی به زمان فرایند بستگی دارد. در فرآورده‌های لوله که برای کاربردها و مصارف طولانی‌مدت طراحی شده‌اند، مانند لوله‌های فاضلاب PVC که باید عمری بالغ بر ۵۰ سال را تضمین کنند، استحکام تنش پسماند در طول زمان عامل شایان توجهی به‌شمار می‌آید [۱۴، ۱۵].

روش‌های نصب

روش نصب لوله‌ها معمولاً شامل حفر یک ترانشه باز، قرارگرفتن لوله در ترانشه و پوشش دهی با خاک و متراکم کردن آن است. با این شرایط، در حین حمل و نصب لوله‌های پلاستیکی، احتمال ایجاد خراش‌ها و فرورفتگی روی سطح لوله وجود دارد. این تغییر شکل‌های پلاستیکی بعدها می‌توانند سبب افزایش تنش و در برخی شرایط ویژه حتی به‌شکل دو طرفه به خرابی منجر شوند. فشردگی نامناسب خاک نیز موجب دوپهنی و بیضی شدن مقطع لوله می‌شود، در نتیجه تنش‌های کششی زیادی به موقعیت‌های ساعت ۱۲ و ۶ سطح داخلی و موقعیت‌های ۳ و ۹ سطح خارجی می‌رسد. در سامانه‌های تحت فشار، ریزش همگن خاک می‌تواند فشار خارجی مناسبی بر لوله وارد کرده و فشار داخلی را خنثی کند. از این رو، احتمال تشکیل ترک را کاهش می‌دهد [۲، ۱۶].

افزون بر این، نصب نامناسب لوله‌ها در شیب خاک می‌تواند اثر دوپهنی را در لوله‌های پلاستیکی تقویت کند. در نتیجه، اندازه‌گیری شیب‌های طولی در سامانه‌های گرانشی چالش‌برانگیز است. عامل دیگری که می‌تواند تخریب مواد را تحت تأثیر قرار دهد، با توجه به شرایط انبارش لوله‌ها پیش از نصب تعیین می‌شود. در این ارتباط، افزون بر شرایط برهم‌نهی انبارش، تخریب نورشیمیایی ناشی از تابش فرابنفش نیز برای خواص مکانیکی لوله‌های PVC مضر است [۲].

در شرایط کاربرد، چهار سازوکار اصلی پیرشدگی شامل پیرشدگی



شکل ۳- انواع شکست‌های محتمل در لوله‌های گرم‌انرم که در معرض سطوح مختلفی از تنش چرخه‌ای قرار می‌گیرند [۲۱].

مجدد مقاومت در برابر فشار داخلی ثابت است. آزمون مقاومت به فشار هیدروستاتیک در محیطی خاص تحت تأثیر فشارها و همچنین دماهای مختلف انجام می‌گیرد. پدیده خرابی حاصل از رشد ترک، مسئله‌ای است که به عملیات واقعی وابسته است. بنابراین، شکست لوله‌های پلیمری را می‌توان با استفاده از مفاهیم مکانیک شکست توصیف کرد [۱۹].

همان‌طور که در استاندارد ISIRI 12181-1 شرح داده شده است [۲۰]، آزمون‌ها تحت چند فشار داخلی، دما و شرایط ویژه محیطی (به عنوان مثال آب در آب، آب در هوا و آب در مایع) انجام می‌شود. زمان بروز نقص و ترکیدگی ثبت شده و نتایج به شکل منحنی رسم می‌شود.

لوله‌های گرم‌انرمی که در معرض سطوح مختلفی از تنش چرخه‌ای قرار می‌گیرند، متحمل انواع مختلف شکست می‌شوند. به گونه‌ای که با رسم منحنی مقدار تنش چرخه‌ای وارد شده نسبت به زمان، سه نوع خرابی مشاهده می‌شود (شکل ۳). با برخورداری از مقادیر تنش زیاد (ناحیه I)، تنش تسلیم در نقطه شکست با ظهور شکستگی در کوتاه‌ترین زمان رخ می‌دهد. برای سطح تنش متوسط (ناحیه II)، این شکست در زمان آزمون طولانی‌تر و با رشد آهسته ترک و تغییر شکل موضعی پلاستیک فقط در برابر ترک ایجاد می‌شود. حتی در مدت زمان آزمون طولانی‌تر (ناحیه III)، هیچ تغییر شکلی در نقطه تسلیم وجود ندارد و شکستگی تقریباً مستقل از سطح تنش است. نقاط انتقال از منطقه I به II و از II به III اغلب به ترتیب زانوی مکانیکی و زانوی شیمیایی نامیده می‌شوند که با تغییر شکل‌های ناشی از همین تنش‌های وارد شده ارتباط دارند. دمای بیشتر باعث می‌شود تا منحنی‌ها در زمان کمتری دچار شکست شوند. برون‌یابی به دمای کاربرد می‌تواند مطابق با روش برون‌یابی

استاندارد (standard extrapolation method, SEM) مطابق با INSO 20060:1394 انجام شود. روش برون‌یابی استاندارد نیاز به آزمون جامع هیدروستاتیک در دو یا چند دما (>30 نمونه در هر دما) و استفاده از روش‌های آماری برای مجموعه داده‌های تجربی به دست آمده دارد [۲۱].

محدودیت آشکار در انجام آزمایش‌های فشار هیدروستاتیک، مدت زمان لازم برای انجام آزمون است. روش‌های استاندارد ISIRI 12181-1 نشان می‌دهد، فشارهای داخلی اعمال شده باید به گونه‌ای باشند که نمونه‌ها حتی تا بیش از ۱۰۰۰ دوره در معرض آزمون قرار گیرند [۲۲]. این واقعیت می‌تواند توجه کند که چرا فقط چند پژوهشگر و معمولاً به طور جزئی از این نوع روش‌ها استفاده کرده‌اند. یک مورد از اجرای کامل این روش توسط Krishnaswamy [۲۳] منتشر شده که هشت نوع مختلف رزین لوله HDPE را مورد آزمون قرار داده است. سایر محدودیت‌های گزارش شده از پیرشدگی گرمایی مربوط به این روش ناشی می‌شود. جذب و انتشار اکسیژن یا سایر مواد شیمیایی در ماتریس پلیمر، سازوکارهای وابسته به دما هستند که به روند خرابی کمک می‌کنند. با این حال روش برون‌یابی استاندارد، نقص‌هایی از لحاظ تغییرپذیری نرخ‌های مختلف وابسته به دما دارد که به وسیله فرایندهای مختلف فیزیکی و شیمیایی ایجاد می‌شوند.

مدل آرنیوس

ارزیابی تخریب با مدل آرنیوس بر این فرض استوار است که نرخ تخریب مواد از سینتیک مرتبه اول پیروی می‌کند. این روش ارزیابی، ارتباط زیادی با جنبه‌های شیمیایی دخیل در فرایند تخریب دارد که نشانگر خروج پایدارکننده‌های گرمایی و آغاز تخریب گرمایی در منطقه III است (شکل ۳). این جنبه‌های نظری معمولاً بیانگر کاهش زمان القای اکسایش یا تجمع هیدروپراکسیدها (ROOH) هستند. هدف این روش، آزمون در دمای بیشتر و دوره آزمون کوتاه‌تر است. پس از آن، مدل آرنیوس برای برون‌یابی میزان واکنش تخریب به سایر دماهای کاری استفاده می‌شود، که معیاری برای پیش‌بینی طول عمر را فراهم می‌کند.

البته فرض خطی بودن در مدل آرنیوس، ممکن است برای تمام آزمون‌ها معتبر نباشد. این واقعیت نشان می‌دهد، در استفاده از عوامل برون‌یابی که در INSO 20060 عنوان شده است، پیش‌بینی طول عمر، در صورت رخداد شکست در منطقه III براساس خطی بودن آرنیوس، باید با احتیاط تفسیر شود. به عنوان مثال، در پژوهش‌هایی درباره لوله‌های پلی پروپیلن نشان داده شد، در حدود

مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، خواص لوله‌ها کاهش یافته است. لوله آزمون شده از نروژ، که در مقایسه با لوله مرجع، دارای همان قطر ضخامت دیواره پایین لوله (مقدار SDR بیشتر) بود، تنها کاهش جزئی ۱۶/۸٪ از فشار در شکست را نشان داد، در حالی که تحت تنش عملکرد همچنان سالم ماند [۲]. این نقص ممکن است، با درجه ژل شدن کم توضیح داده شود. پیرشدگی فیزیکی نیز عامل مؤثری در کاهش فشار در شکست است، اگرچه انتظار می‌رود، تنش‌های عملکرد افزایش یابند. درجه ژل شدن به عنوان درصد حمله متیلن به PVC بیان می‌شود. بدیهی است، اکثر لوله‌ها با درجه ژل شدن کم از کیفیت تولید ضعیفی برخوردار هستند.

سفتی لوله به عنوان اصلی‌ترین ویژگی طراحی لوله‌های فاضلاب گرانشی در نظر گرفته می‌شود. این واقعیت باعث شده است تا برخی از رویکردهای پژوهشی درباره سازوکارها و خواص فاضلاب‌ها براساس سفتی لوله در نظر گرفته شده و بر تغییر شکل و کاهش مقدار تنش، متمرکز شوند. تغییر شکل لوله‌های انعطاف پذیر تابعی از پارامترهای مختلف از جمله مواردی مانند مواد لوله و مشخصات هندسی، مواد بستر، حجم خاک، درجه تراکم، عمق دفن لوله و وجود تقویت کننده زمین درجه (geo-grade) است که می‌تواند سطح تغییر شکل را به طور شایان توجهی تغییر دهد. صرف نظر از آسیب پذیری ساختاری، تغییر شکل هندسه لوله‌ها در لوله‌های فاضلاب، اثر عمیقی بر جنبه‌های عملیاتی و نصب و همچنین بر هزینه بازسازی بدون ترانشه در آینده دارند [۲۳].

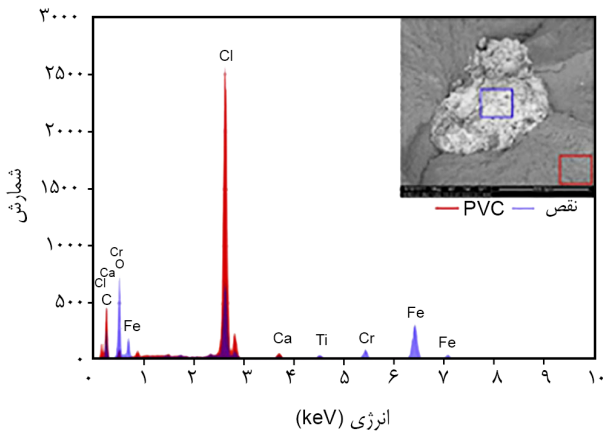
نتایج برنامه‌های اندازه‌گیری انحراف شکل و هندسه لوله‌های فاضلاب PVC در محل نصب در حدود ۳/۵ km از لوله‌های فاضلاب PVC نشان داد، مقدار میانگین انحراف در حالت نصب با کیفیت متوسط، تا ۵/۵٪ به دست می‌آید، در حالی که نصب ضعیف به تغییر انحراف تا ۱۳٪ و حداکثر آن تا ۲۰/۵٪ منجر می‌شود [۲۴]. بررسی‌های انجام شده درباره اثر سفتی لوله بر دوام نشان می‌دهد، پوشش خاک غالب‌ترین عامل است. در عمق ۱/۲ m با تراکم زیاد خاک، لوله با سختی کم نسبت به لوله با سختی زیادتر، بیشتر منحرف می‌شود. در عمق ۰/۶ m سختی لوله نقش مهم تری نسبت به مقدار تراکم نشان می‌دهد. از این رو به نظر می‌رسد، سختی لوله در اعماق کم از اهمیت بیشتری برخوردار است. در بررسی دیگری نشان داده شد، تحت انحراف مداوم، تنش به سادگی با کم شدن مدول کاهش می‌یابد. خاصیت کشسانی باعث ایجاد حالت آرامش در تنش می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد، اگر در هنگام بارگیری اولیه خرابی رخ ندهد، رخ دادن شکست در درازمدت خیلی بعید خواهد بود، زیرا تنش وارد شده به طور مداوم کاهش می‌یابد

۸۰ °C سرعت تخریب PP خطی بودن را از دست می‌دهد. به طور کلی، تخریب اکسایشی گرمایی مبتنی بر آزمون‌های پیرشدگی شتاب یافته، سازوکار پیچیده تری دارد که به فرایند و رفتار پایدارکننده‌های موجود در ماتریس پلیمر و سایر مواد افزودنی بستگی دارد [۲].

ویژگی‌های لوله

پژوهش‌هایی درباره لوله‌های فاضلاب PVC نصب شده و استفاده شده به وسیله حفاری، انجام شده است [۲]. در این مطالعات، لوله‌ها در معرض آزمون‌های مکانیکی مختلف قرار می‌گیرند تا مشخص شود، آیا کیفیت آن‌ها در حین بهره‌برداری دچار کاهش شده است. این مطالعات در دهه ۱۹۳۰، برای نخستین بار در آلمان انجام گرفت. در آن زمان فناوری اکستروژن کردن چندان مناسب نبود. مطالعه اولیه براساس الزامات استاندارد ASTM D 3034 درباره لوله‌های فاضلاب PVC ۱۵ ساله با قطر اسمی ۲۵۴ (diameter nominal, DN) نسبت قطر استاندارد ۳۵ (standard diameter ratio, SDR) در آمریکا انجام شد. اندازه‌گیری خواص کششی نشان داد، میانگین استحکام کششی و مدول براساس ASTM D 2412-11 به ترتیب در جهت محوری ۵۲/۳۶ و ۲۸۳۹ MPa و در جهت طولی ۵۵/۴ و ۳۰۵۹ MPa است [۲]. مجموعه‌ای از سایر آزمون‌ها نیز شامل کیفیت حفاری و نصب، اندازه‌گیری ابعاد، مقاومت در برابر ضربه انجام شد. طبق این مطالعه، تمام خواص اندازه‌گیری شده با ASTM D 3034 مطابقت دارند و هیچ تخریب قابل مشاهده‌ای رخ نداده است. همچنین، پژوهش‌های دیگری بر مبنای چند آزمون درباره لوله‌هایی، که نزدیک به ۵۰ سال مدفون بوده‌اند، در کشور آلمان انجام شد. همچنین، آزمون‌های شامل غوطه‌وری در استون و فشار هیدروستاتیک نیز به عمل آمد تا مشخص شود، کیفیت این لوله‌ها با کیفیت پس از تولید چه مقدار متفاوت است. نتایج مشخص کرد، اگر کیفیت پخت و تولید مناسب باشد، نتایج آزمون‌های کنترل کیفیت لوله‌های تحت بررسی نیز قابل قبول خواهند بود [۲۲، ۲].

نتایج مطالعات مشابه در اروپا براساس SDR درباره چند لوله فاضلاب PVC با عمرهای مختلف، بر اندازه‌گیری انحراف و روش‌های تولید یا نصب تأکید زیادی دارد. با این حال، هیچ یافته‌ای درباره کاهش خواص مکانیکی و خرابی بالقوه آن‌ها وجود ندارد. تنها مورد گزارش شده به دو لوله PVC در نروژ و سوئد در سال ۱۹۹۵ مربوط بوده که خواص آن‌ها با یک لوله کاملاً جدید



شکل ۵- تجزیه عنصری EDS در قسمت بروز نقص لوله [۲۸].

روش‌های آزمون مانند میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) و طیف‌های زیرقرمز تبدیل فوری (FT-IR) و طیف‌سنجی پرتو X با انرژی پاشنده (energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS) به کار گرفته شد. نتیجه این بود که عامل مشخصی حاصل از فرایند تولید به عنوان یک عامل تنش‌زا عمل می‌کند و به ایجاد ترک و شکست نهایی منجر می‌شود. در واقع، نقشه تجزیه عناصر EDS و آزمون SEM وجود عنصر آهن را در اجزای نمونه نشان داد (شکل ۵)، که حاکی از فرایند تولید بی کیفیت است. با این حال، هیچ تخریب ماده‌ای به دلیل تماس با فاضلاب در محل ترک در ناحیه لوله، تشخیص داده نشد.

جدا از نقص ذاتی، بریدگی‌های ایجاد شده در هنگام نصب نیز می‌توانند بر عملکرد لوله اثر بگذارند. بدین جهت، مطالعه‌ای در استرالیا درباره لوله‌های PVC تحت فشار چرخه‌ای از مشخصات خاص (DN110) طبقه ۲۰ در فشار چرخه‌ای $1/3 \pm 0/3$ MPa با بسامد ۰/۵ Hz انجام شد. نتایج نشان داد، عمق شکاف بیش از یک سطح خاص می‌تواند طول عمر یک لوله را به شدت کاهش دهد. برای لوله تحت آزمون، شکاف $1/2$ mm > احتمال خرابی را در صورت اعمال $1/7 \times 10^6$ cycle افزایش می‌دهد. این شرایط مشابه ۱۰۰ سال طول عمر برای شرایط کارکرد است [۲].

داده‌های بازرسی به دست آمده از پروژه‌های حفاری و بررسی در سطح کشور (تأمین شده از سوی انجمن لوله و اتصالات PVC) [۲۹] برای لوله‌های PVC نصب شده در سال ۱۳۷۰ را در بازه زمانی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ پس از ۲۸ سال بهره‌برداری در دشت مغان (شکل ۶) و همچنین لوله فاضلاب ۴۸ ساله در قزوین بهره‌برداری شده در سال ۱۳۵۰ بر مبنای آزمون‌های چشمی و بررسی تغییر شکل‌های هندسی نشانگر آن بود که این سامانه‌ها



شکل ۴- نمونه حفاری شده برای آزمون فشار هیدروستاتیک مجدد [۲۷].

[۲۴، ۲۵]. با این حال اینکه آیا سختی کوتاه مدت یا بلندمدت باید مدنظر قرار گیرد، به نوع خاک و اثر آن بر رفتار لوله بستگی دارد. اکثر قریب به اتفاق پژوهش‌ها در منابع مربوط به لوله‌های پلاستیکی گرانثی فاضلاب است و در آن تنش‌های اعمالی به اثر تعاملات لوله و خاک محدود می‌شود. در مقابل، درباره سامانه‌های فاضلاب تحت فشار، کمبود پژوهش وجود دارد. در این مرحله باید تأکید کرد، عملکرد سامانه‌های تحت فشار فاضلاب با فشار داخلی پایدار مانند سامانه‌های گاز و آب کنترل نمی‌شود، بلکه با نوعی الگوی فشار چرخشی (خستگی) اداره می‌شود. با وجود این، سازوکار شکست رشد آهسته ترک در هر دو مورد به همان صورت باقی مانده است [۲۶].

در سال ۲۰۱۳ Folkman و همکاران درباره لوله فاضلاب PVC تحت فشار ۲۰ ساله در آمریکا پژوهشی انجام دادند [۲۷]. این لوله، آزمون‌های یک پارچگی هیدروستاتیک و غوطه‌وری استون را با موفقیت پشت سر گذاشت (شکل ۴). نتایج این پژوهش برای لوله‌های ۴۹ ساله نشان داد، ۲ نمونه از ۸ نمونه، در آزمون غوطه‌وری در استون دچار نقص و شکست شده‌اند. شکست یکی از این دو نمونه نیز با پخت نامناسب آن مرتبط بود. این مسئله حاکی از این بود که به علت مشکل داربودن تجهیزات اکسترودر برخی از تولیدکننده‌ها، در زمان نصب لوله‌ها پخت مناسبی حاصل نمی‌شد. بنابراین، با توجه به آزمون‌های انجام گرفته نتیجه‌گیری شد، زمانی که PVC پخت خوبی داشته باشد، هیچ دلیلی برای کاهش کیفیت به هنگام بهره‌برداری وجود ندارد.

مطالعه دقیق‌تر [۲۸] درباره لوله فاضلاب PVC ۳۴ ساله در استرالیا نتایج خوبی دربرداشت. در این ارزیابی، مجموعه‌ای از



شکل ۷- لوله PVC حفاری شده پس از ۵۰ سال کاربرد در شهریار مغان [۲۹].



شکل ۶- لوله PVC حفاری شده پس از ۲۸ سال کاربرد در دشت مغان [۲۹].

تخریب و سایش شیمیایی است، واقعیتی که استفاده گسترده از آن را در سامانه‌های فاضلاب توضیح می‌دهد. چالش مهم برای لوله‌های پلاستیکی آب آشامیدنی و فاضلاب، وجود برخی مواد ضد عفونی کننده در آب آشامیدنی است [۳۰]. اثر هوا بر لوله‌های PVC به طور گسترده بررسی شد. آزمون‌های کشش و هیدروژن کلریدزداپی، که براساس اندازه‌گیری تغییر وزن مولکولی و آزمون SEM است، پیش و پس از قرارگیری در معرض ضد عفونی کننده‌های آب، یعنی هیپوکلریت سدیم کلردار (NaClO-Cl_2) و کلر دی اکسید (ClO_2) انجام گرفت. غلظت یکنواخت ۸ ppm از این مواد ضد عفونی کننده در دمای 40°C نتوانست تغییرات درخور توجهی در مواد ایجاد کند. در واقع، اتم‌های کلر اضافه شده به سدیم هیپوکلریت به عنوان دلیل احتمالی برای افزایش جزئی خواص مکانیکی PVC در نظر گرفته شده‌اند [۳۱]. مطالعات مشابهی درباره عملکرد لوله‌های پلی اتیلن در برابر محلول‌های کلردار منتشر شده است [۳۲]. در این موارد، قسمت بی شکل پلی اتیلن، به ویژه با کلر دی اکسید و کلریدریک اسید واکنش داد و به دنبال آن کاهش سریع ضد اکسندها و افزایش بلورینگی ایجاد شد. نتیجه مطالعات یاد شده نشانگر برتری بیش از حد مقاومت شیمیایی PVC نسبت به PE در مجاورت ضد عفونی کننده‌های با استفاده مکرر است. این روند به طور نسبی در تضاد با یافته‌های پژوهش مقایسه‌ای دیگری در این حوزه بود [۳۱]. نتایج پژوهش مزبور نشان داد، تغییرات شیمیایی در سطح ماده PVC عمیق تر از لوله‌های HDPE است، البته ویژگی‌های مکانیکی در هر دو ماده تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. پژوهش‌های گسترده‌ای درباره برآورد سختی لوله PVC تحت غلظت‌های مختلف سولفوریک اسید (H_2SO_4) یا هیدروکسید سدیم (NaOH) انجام گرفت. پس از دوره‌های آزمون بیش از ۱ سال، نتایج اثرهای ناچیزی بر سختی لوله نشان داد. پژوهش

همچنان قابل استفاده هستند.

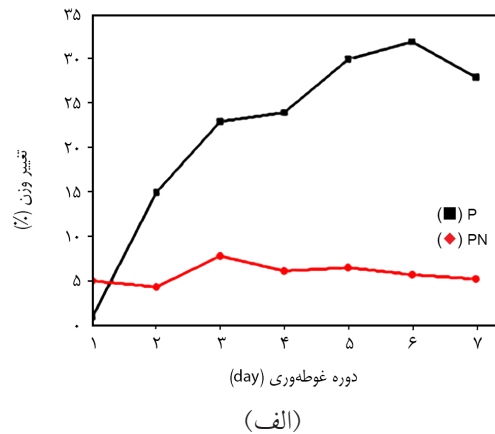
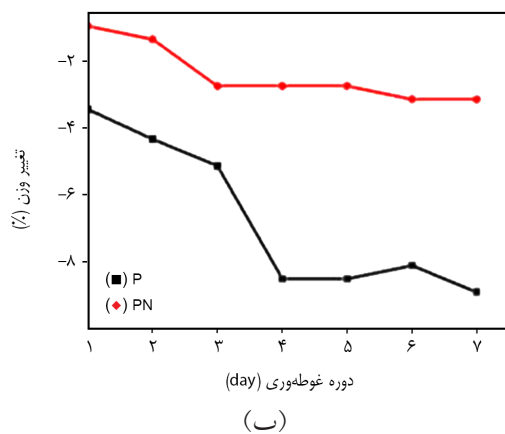
در سال ۱۳۹۸ نیز در جریان حفاری لوله‌های ۵۰ ساله در شهریار، گزارشی ارائه شد، مبنی بر اینکه لوله‌ها در کل مسیر، به جز در دو منطقه، همچنان بدون مشکل و خرابی هستند و هیچ کاهش کیفیتی در مواد این لوله‌ها رخ نداده است (شکل ۷). در این دو منطقه، برای لوله‌های اندازه ۳۱۵ به دلیل فرسایش خاک، به دلیل کاهش ارتفاع بیش از ۴۵ cm و در نقطه دیگر بیش از ۱ m، شکست‌هایی در لبه‌های کولپینگ دیده شد [۲۹].

تمام داده‌های بازرسی حاکی از کاربرد مناسب لوله‌های PVC در مصارف فاضلاب بوده و نقص‌های مشاهده شده معمولاً در اثر کاربرد مواد یا پخت نامناسب است. آزمون‌های کیفی که تولیدکننده در مراحل تولید انجام می‌دهد، از بروز نقص‌های احتمالی در این بخش جلوگیری می‌کند. اما، مهم‌ترین علت شکست‌های زود هنگام به دلیل روش نامناسب و اجرای نادرست فرایند نصب است. فرسایش خاک و نصب در شیب‌های متفاوت، بارگذاری و تراکم نامتعادل خاک نیز از عوامل شکست لوله‌ها در این حوزه است.

مقاومت شیمیایی

مواد و محیط‌های شیمیایی نیز بسته به دمای کاربرد و غلظت و تنش اعمالی در حین کار می‌توانند بر استحکام، انعطاف پذیری، ظاهر سطح، رنگ، ابعاد و وزن پلاستیک اثرگذار باشند. این تغییرات به تخریب شیمیایی در زنجیر پلیمر و تغییر فیزیکی، از جمله جذب حلال و در نتیجه نرم شدن و تورم پلاستیک منجر می‌شود.

موادی که برای تولید لوله‌های گرمانرم با کاربرد انتقال مایعات استفاده می‌شوند، باید مقاومت شیمیایی مناسبی داشته باشند. تصور کارشناسان بر این است، PVC مقاوم‌ترین ماده در برابر



شکل ۸- خواص تغییر وزن نمونه‌های PVC اصلاح نشده و اصلاح شده (PN) در: (الف) استون و (ب) سدیم هیپوکلریت در دمای محیط [۳۴].

است [۳۵]. برخی از پژوهشگران تنها بر عملکرد اتصالات در سامانه‌های لوله‌های پلاستیکی تمرکز داشته‌اند. آن‌ها با بررسی محل اتصال دو سوکت در لوله‌های ۳۰ ساله انتقال گاز PVC ارزیابی شرایط اتصالات براساس آزمون‌های نشت تحت خمش، مانایی فشاری و خواص مکانیکی، نشت را فقط برای خمش بیش از ۳۶٪ لوله‌ها مشاهده کردند [۲]. همچنین پژوهشگران نتیجه گرفتند، فقط زاویه‌های خمش شدید (بیش از ۱۰°) یا کشیدن کامل لوله می‌تواند به نشت در اتصالات مربوط به سامانه‌های آب آشامیدنی منجر شود. در اتصالات الاستومری، حالت‌های شکست که در اتصالات جفت‌شدنی فشاری شامل خم شدن محل اتصال، جابه‌جایی عمودی، جابه‌جایی افقی، خم شدن لوله، جابه‌جایی محوری، پیچش با چرخش محدود و دوپهنی لوله است، به نشت می‌انجامد. عملکرد اتصالات نری و مادگی در لوله‌های PVC با توجه به عمق دفن، شرایط بستر و موقعیت بارگیری نیز مطالعه شده است [۳۶]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد، با وجود ایجاد نقص‌های مختلف مانند تغییر شکل عمودی، تغییر قطر لوله، چرخش و نیروهای برشی، وجود نشت در اتصالات به اثبات نرسیده است.

لوله‌های پلاستیکی به‌طور گسترده برای اهداف تخلیه شهری استفاده می‌شود. پلی‌وینیل کلرید محبوب‌ترین ماده، به‌ویژه برای فاضلاب‌های گرانشی است. داده‌های بازرسی از لوله‌هایی که دو بار بازرسی شده‌اند، بررسی شده‌اند. این تجزیه و تحلیل، افزایش میزان وقوع نقص‌های اولیه و به دنبال آن موارد جدید (شکستگی و شکاف) را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ای درباره مقاومت شیمیایی PVC، PE و PP به سولفوریک اسید و سولفات سدیم (Na_2SO_4) در ۲۵°C و ۴۰°C منتشر شده است [۳۳، ۳۴]. در این پژوهش، میزان استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی برای چند دوره غوطه‌وری نشان داد، استحکام کششی پس از این دوره آزمون افزایش یافته است. در حالی که افزایش ازدیاد طول تا پارگی باعث کاهش تبلور در ماده می‌شود، اما تخریب شیمیایی وجود ندارد.

در ایران پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه اثر مواد شیمیایی و سیالات بر ماتریس و بدنه لوله انجام نشده است. در سال‌های اخیر، یک آزمون پژوهشی درباره اثر سدیم هیپوکلریت و استون در دماهای مختلف بر میزان ایجاد خرابی و تغییرات سطحی ظاهری شامل مقدار تورم، تغییر وزن یا ایجاد ترک و همچنین خواص مکانیکی و گرمایی نمونه‌های تهیه شده از رزین PVC استفاده شده در تهیه لوله‌ها، انجام شده است. در این بررسی، رزین PVC به صورت خالص و تقویت شده با افزودنی‌های مناسب برای اصلاح فرمول بندی، به کار گرفته شد. نتایج مقایسه‌ای بر میزان تأثیر این مواد شیمیایی بر ماتریس PVC و اصلاح شده و چگونگی کاهش مقدار تورم یا بروز نقص در جریان غوطه‌وری تأکید دارد (شکل ۸) [۳۴].

اتصالات الاستومری

انواع مختلفی از اتصالدهی لوله‌های گرمانرم به وسیله فن‌های مکانیکی و جوش وجود دارد. متداول‌ترین انواع اتصالات سامانه‌های فاضلاب، اتصالات جفت‌شدنی فشاری (push fit) است که در یک انتها دارای نری و مادگی و دو سر سوکت

نتیجه گیری

گسترده انجام نشده است. ولی، بازبینی های اندک انجام شده و بهره گیری از مطالعات انجام گرفته در کشورهای مختلف حاکی از میانگین زیاد طول عمر لوله ها دارد. شایان ذکر است، تمام این سامانه ها به نصب مناسب و باکیفیت نیز نیاز دارند و توجه به این بخش سبب افزایش طول عمر لوله ها خواهد شد.

قدردانی

از دبیر محترم انجمن لوله و اتصالات PVC، سرکار خانم مهندس فرزانه خرمیان، به دلیل همکاری مؤثر در تأمین اطلاعات مورد نیاز تدوین این مقاله سپاسگزاری می شود.

مراجع

- Agarwal S. and Gupta R.K., *Plastics in Buildings and Construction*, In *Applied Plastics Engineering Handbook*, William Andrew, 635-649, 2017.
- Makris K.F., Langeveld J., and Clemens F.H., A Review on the Durability of PVC Sewer Pipes: Research vs. Practice, *Struct. Infrastruct. Eng.*, **16**, 880-897, 2020.
- Kuliczowska E. and Zwierzchowska A., A Qualitative Analysis of Early Defects Present in PVC-U Sewers but not Observed in Rigid Pipes, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, **56**, 202-210, 2016.
- Folkman S., *PVC Pipe Longevity Report: Affordability and the 100+ Year Benchmark Standard*, Utah State University, 2014.
- Li D., Cong A., and Guo S., Sewer Damage Detection from Imbalanced CCTV Inspection Data Using Deep Convolutional Neural Networks with Hierarchical Classification, *Autom. Constr.*, **101**, 199-208, 2019.
- Karsa D.R., *Process Aids and Additives for Latices and Thermoplastics*, Blackwell, USA, 2020.
- Real L.P., João I.M., Pimenta S.I., and Diogo H.P., Evaluating the Degree of Gelation of PVC-U Pipes. Comparison of Currently Available Methods, *Polym. Test.*, **70**, 481-485, 2018.
- Das D., *Microbial Fuel Cell*, Springer, Chap. 2, 21-41, 2018.
- Titow M.V., *PVC Technology*, Springer Science & Business Media, 2012.
- Schilling C.L. III and Kelly K.K., Plasticizers Which Improve Compatibility in PVC Formulations, *U.S. Pat. 20180105673*, April 19, 2018.
- Everard M., Twenty Years of the Polyvinyl Chloride Sustainability Challenges, *J. Vinyl Addit. Technol.*, **26**, 390-402, 2020.
- Jonathan Y., Chapman R., Gormley A.J., and Boyer C., Up in the Air: Oxygen Tolerance in Controlled/Living Radical Polymerisation, *Chem. Soc. Rev.*, **47**, 4357- 4387, 2018.
- Lyashenko V., Ahmad M.A., Sotnik L., Deineko Z., and Khan A., Defects of Communication Pipes from Plastic in Modern Civil Engineering, *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, **1-8**, 253-262, 2018.
- Ghabeche W. and Chaoui K., An Investigation into Property Variances Between Outer and Inner HDPE Pipe Layers, *Mechanics*, **25**, 99-106, 2019.
- An J.S., Kang K.N., Song K.I., and Kim B.C., A Numerical Study on the Characteristics of Small Underground Cavities in the Surrounding Old Water Supply and Sewer Pipeline, *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, **20**, 287-303, 2018.
- Hutař P., Ševčík M., Frank A., Náhlík L., Kučera J., and Pinter G., The Effect of Residual Stress on Polymer Pipe Lifetime, *Eng. Fract. Mech.*, **108**, 98-108, 2013.
- Rojas D., Vargas K., Cortés A., Rocha S., Paris P., Riveros V., and Saldarriaga J., External Abrasion Caused by Leakages in Potable Water Distribution System Pipes, *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, **11**, 0402-046, 2020.
- Jemii H., Hammiche D., Boubakri A., Haddar N., and Guermazi N., Mechanical, Thermal and Physico-chemical Behavior of Virgin and Hydrothermally Aged Polymeric Pipes, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 2020. doi: org/10.1177/0892705720962167
- Weon J.I., Effects of Thermal Ageing on Mechanical and Thermal Behaviors of Linear Low Density Polyethylene Pipe, *Polym. Degrad. Stab.*, **95**, 14-20, 2010.
- Park J.I. and Lee C.S., Evaluation Method of Plastic Pipe for High-Strength Water Supply, *Korean J. Air-cond. Refrig. Eng.*, **30**, 44-49, 2018.

21. Plastics-Pipes, Fittings and Assemblies for the Conveyance of Fluids -Determination of the Resistance to Internal Pressure – Part 1: General Method, ISIRI 12181-1, 1389.
22. Plastics-Piping and Ducting Systems-Determination of the Long-Term Hydrostatic Strength of Thermoplastics Materials in Pipe Form by Extrapolation, INSO 20060, 1394.
23. Krishnaswamy R.K. and Lamborn M.J., The Influence of Process History on the Ductile Failure of Polyethylene Pipes Subject to Continuous Hydrostatic Pressure, *Adv. Polym. Technol. J. Polym. Proc. Inst.*, **24**, 226-232, 2005.
24. Standard Specification for Type PSM Poly(vinyl chloride) (PVC) Sewer Pipe and Fittings, ASTM Standard, ASTM D 3034.
25. Manufacturers A., 2.02 Poly(vinyl chloride) (PVC) Sewer Pipe, Project Manual, 15121, 2016.
26. Kuliczowska E., Influence of PVC Pipe Deflection on the Thickness of CIPP Rehabilitation Liners, *Undergr. Infrastruct. Urb. Areas*, **3**, 63-72, 2014.
27. Akhtar S., Reza B., Hewage K., Shahriar A., Zargar A., and Sadiq R., Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) for Selection of Sewer Pipe Materials, *Clean Technol. Environ. Policy*, **17**, 973-992, 2015.
28. Meerman M., Lifetime Expectancy of PVC-U Pipelines for Sewer Systems, *International Conference Plastics Pipes XIV*, Budapest, Hungary, 2008.
29. Gould S.J., Davis P., Beale D.J., and Marlow, Failure Analysis of a PVC Sewer Pipeline by Fractography and Materials Characterization, *Eng. Fail. Anal.*, **34**, 41-50, 2013.
30. Projects Carried out in the Association of PVC Pipe and Fitting Producers, <http://www.pvc-asso.it/>, Available in November 2020.
31. Szymiczek M., Mechanical and Chemical Properties of Sewage Pipes, *Arch. Mater. Sci. Eng.*, **53**, 38-45, 2012.
32. Kowalska B., Klepka T., and Kowalski D., Influence of Chlorinated Water on Mechanical Properties of Polyethylene and Polyvinyl Chloride Pipes, *WIT Trans. Built Environ.*, **165**, 63-74, 2016.
33. Ghabeche W., Alimi L., and Chaoui K., Degradation of Plastic Pipe Surfaces in Contact with an Aggressive Acidic Environment, *Energy Procedia*, **74**, 351-354, 2015.
34. Lasfar S., Mouallif I., Latrach A., Chergui H., Choukir A., and Diab A., Resistance of Different Materials Used in Sewers Systems: Polyvinyl Chloride (PVC), Polypropylene (PP) and High Density Polyethylene (HDPE), to Sulfuric Acid and Sodium Sulfate Attack, *Int. J. Eng. Res. Appl.*, **4**, 670-678, 2014.
35. Khaleghi M., Didehban K., and Shabani M., Simple and Fast Preparation of Graphene Oxide@Melamine Terephthaldehyde and Its PVC Nanocomposite via Ultrasonic Irradiation: Chemical and Thermal Resistance Study, *Ultrason. Sonochem.*, **43**, 275-284, 2018.
36. Barton N.A., Farewell T.S., Hallett S.H., and Acland T.F., Improving Pipe Failure Predictions: Factors Affecting Pipe Failure in Drinking Water Networks, *Water Res.*, **164**, 114926, 2019.
37. Laarhoven K.A.V. and Wols B.A., Combining Models to Simulate the Condition of the PVC Distribution Network, *Multidiscip. Digit. Publ. Inst. Proc.*, **2**, 591, 2018.