حالات و مکانیسم های شکست لوله های چدنی

چکیده: شکست درشاه لوله های آب چدنی پیچیده ترومتنوع تر شده است و به طور گسترده ای در صنعت تجربه می شود. این مقاله حالات و علت های شکست لوله چدنی را که شورای تحقیقات ملی کانادا در طی بررسی سه ساله با آن مواجه شده است مورد بحث قرار می دهد. علاوه بر خوردگی(زنگ زدگی)، نقص ساخت، خطای انسانی و سطوح غیرمنتظره بارگذاری لوله ها همه در تعداد زیادی از شکست های لوله که هر سال رخ داده نقش ایفا می‌کنند.

۱- مقدمه

چدن جزء شایع ترین موادی بشمار می آید که درتاسیسات آب رسانی آمریکای شمالی مورد استفاده قرار می گیرد، حدود ۵۰ درصد کل طول شاه لوله های آب نصب شده را شامل می شود(کرمیر, ریچاردز و اسمیت ،۱۹۹۴). همچنین این مواد بیشتر مستعد شکست هستند. یک تاسیسات بزرگ آب رسانی ممکن است با ۳۰۰ بار یا حتی بیشتر شکست شاه لوله های آب در طول سال مواجه شود. هر شکست شاه لوله آب باعث اختلال در سیستم آب رسانی می شود و ممکن است نیازبه تعمیرات اضطراری داشته باشد. اگر شاه لوله با قطر بزرگ با شکست مواجه شود، منجربه میلیون ها دلار خسارت می شود. حتی بدون شکست شاه لوله بزرگ ، کل هزینه های شکست شاه لوله آب با قطر کوچک سهم قابل توجهی از بودجه عملیاتی سالانه تاسیسات آب را به خود اختصاص می دهد. با وجود اهمیت اقتصادی و اجتماعی شکست شاه لوله آب, تحقیقات اندکی در زمینه تجزیه و تحلیل شکست ها و درک مکانیسم هایی که باعث شکست می شود تا کنون انجام شده است. تحقیقات گذشته بروی خاک و رفتار خوردگی متمرکز شده است (رومانوف،۱۹۶۴ ؛ فیتگرالد ، ۱۹۹۰؛ فیتز جرالد ، ۱۹۶۸). این مطالعه به منظور بررسی خود شکست ها انجام شده است و تا حد زیادی به منظور اهداف قانونی وجهت تعیین مسئولیت برای شکست شاه لوله آب بوده است. این امر به یک عقیده فراگیرمنجر شده است و بر این باور است که فرآیند شکست فرایندی ساده می باشد، که در آن یک لوله از نقطه ای خورده(زنگ زده) می شود که آن نقطه دیگر نمی تواند در برابر نیروهای داخلی و خارجی مقاومت کند، و در نتیجه منجر به شکست شاه لوله آب می شود.

با این حال، مطالعات اخیر در شورای تحقیقات ملی کانادا (NRC) نشان داده است که فرایند شکست بسیار پیچیده تراز حد انتظار می باشد. خوردگی نقش مهمی را در شکست شاه لوله آب چدنی ایفا می کند, اما فعل و انفعالات خاک- لوله، روش های ضعیف قالب ریزی لوله ها و خطای انسانی نیز جزء مهم ترین عوامل هستند. شکست ها نیز اغلب در چند مراحه اتفاق می افتد، و نه در یک مرحله. این مقاله حالات مختلف شکست در لوله های چدنی و علل مرتبط با شکست آن را مورد بحث قرار می دهد.

نمونه هایی از شکست چدن نشکن نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در نهایت، یک مطالعه موردی ارائه خواهد شد که به طور خلاصه فرایند تجزیه و تحلیل شکست را مورد بحث قرار می دهد.

۲- نیرو بر لوله های ضمن خدمت (IN- SERVICE)

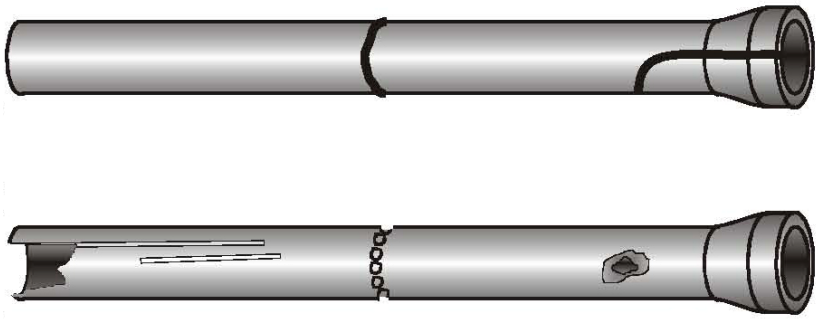
ابتدایی ترین سطح شکست لوله ها ازنیروهای اعمال شده بیش از قدرت باقی مانده فلزحاصل می شود. نیروهای اعمال شده به لوله ها به همراه جزئیات هر منطقه بررسی شده است (رجانی، ژان و کوراکا ۱۹۹۶)، اما خلاصه ای از آن دراینجا درادامه مقاله ارائه خواهد شد. نیروهای اعمال شده بر لوله های آب می تواند در پنج گروه در نظر گرفته شود:

فشار آب داخلی، نیروهای خمشی، نیروهای گسیختگی، نیروهای کششی ناشی از جنبش خاک و درجه حرارت ناشی ازنیروهای انبساطی. سیستم های لوله چدنی به طور کلی تنها مقاوم در برابر نیروهایی فشار داخلی و گسیختگی طراحی شده اند (AWWA 1975).بارهای ثانویه ای که اعمال می شود نیروهای هستند که با توجه به وزن زمین یا بارگیری کامیون در بالای لوله استاندارد در نظر گرفته شده اند. با این حال، بارگذاری یخبمدان و خاک رس گسترده ممکن است بارهایی مشابه در بالای لوله اعمال کنند. شکست های خورد شده درلوله های چدنی بسیار غیر معمول است. هیچ کدام از هشتاد چهار شکست لوله که توسط NRC بررسی شد شواهدی از این نوع شکست را نشان ندادند. بسیاری از بارهای مشابه نیز می تواند لوله را خم کند، که یک حالت از شکست رایج می باشد.

شرایط بارگذاری اضافی که می تواند سبب خم شود شامل برخی از انواع جنبش خاک و نیروهای احتمالی حرارتی ناشی از تفاوت بین دمای آب در لوله ها ودمای خاک پیرامون لوله می شود. یکی دیگر از شرایط ممکن بارگذاری که می تواند سبب شکست لوله شود شرایطی می باشد که توسط چسبیدن خاک به دیواره لوله از طریق اصطکاک حاصل می شود. جنبش های خاک ممکن است در لوله تولید تنش کند ، سپس شکست های کششی ساده را ایجاد می کند. در نهایت، Leaditeیک ترکیب آب بندی گوگردی دردهه های ۱۹۴۰ و۱۹۳۰ برای درزگیری شکست های لوله ناشی ازتفاوت بین ضریب انبساط حرارتی و ضریب این فلز در لوله ها مورد استفاده قرارگرفت. این مکانیزم دربخش بعدی مطرح شده است.

۳ - حالات شکست

اصطلاح "حالات شکست" به شیوه ای واقعی اشاره دارد که در آن لوله های چدنی شکست می خورد، نه مکانیسمی که باعث شکست می شود. این حالات بسته به قطر لوله متفاوت می باشند. لوله ها با قطرکوچکتر دارای فشار آب پایین تر بوده اما دارای گشتاور لختی کوچکترتر هستند، که آنها را بیشتر مستعد شکست خمشی طولی می کند. لوله های بزرگتر فشار آب بالا و گشتاور اینرسی بالاتر دارند، که آنها را مستعد ترک طولی و برش نرینگی لوله می کند.



شکل ۱: حالات شکست برای قطر لوله های کوچک کمتراز۳۸۰ میلی متر. لوله چپ: شکاف نرینگی لوله، ترک خوردگی محیطی در وسط لوله.

لوله پائینی: خوردگی ازطریق سوراخ در بالای لوله، زنجیره ای از خوردگی در وسط لوله ایجاد شده، خوردگی تا حفره ته لوله امتداد دارد. به طور کلی این حالات شکست درلوله های یکسان دیده نمی شود.

۳,۱ – سوراخ های فوران چاه نفت

همانطورکه در بخش زیر بحث شد، خوردگی دربسیاری از شکست های مکانیکی نقش دارد. با این حال، خوردگی خود به خود یا در ارتباط با فشار آب داخلی نیز می تواند سبب شکست های لوله گردد. دراین مورد حفره خوردگی رخ می دهد تا اینکه دیوار لوله نازک شده وبه نقطه ای می رسد که درآن فشار آب به سمت بیرون می رود، دیوار لوله همچنان بسیار باریک باقی می ماند. این نوع از شکست خوردگی ممکن است یک روزنه بسیار کوچک یا بزرگ ایجاد کند،که به نحوه محلی شدن فرآیند خوردگی و فشار تجربه شده توسط لوله بستگی دارد.

۳,۲- ترک دایره ای

ترک دایره ای رایج ترین حالت شکست برای لوله های چدنی قطر کوچک(قطر کوچکتر از ۳۸۰میلی متر) است (شکل۱). به طور معمول این نوع ازشکست با نیروهای خمشی اعمال شده به لوله ایجاد می شود. شکست حاصل شده به شیوه ای مشابه با ترک خوردگی، با انبساط ترک شکست در سراسر محیط لوله رخ می دهد. این نوع از شکست نیز ممکن است با حرکات خاک که در روی لوله نیرو های کششی ایجاد می کند ، تولید یک شکست کششی ساده کند.

۳,۳- شکاف نرینگی

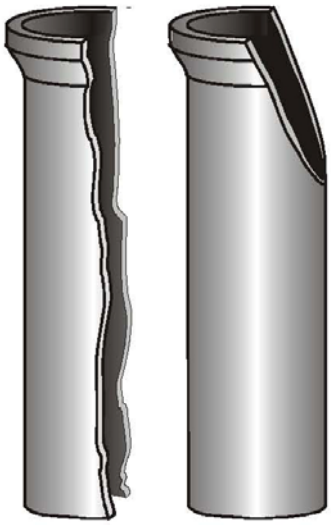
این حالت نیز شایع ترین شکست در لوله های با قطر کوچک به نظر می رسد. اتصالات در لوله های چدنی ابتدا با استفاده از کناف دسته شده محکم به هم چسبیده بین نرینگی لوله و مادگی لوله دیگر درزگیری شده است. پس از آن سرب مذاب به اطراف اتصال برای پر کردن درزها و تکمیل فرایند درزگیری ریخته شد. Leadite یک ترکیب گوگردی سخت می باشد که

دردهه های ۱۹۳۰و۱۹۴۰ به عنوان جایگزین سرب مورد استفاده قرار گرفت. با این حال، بـه عنـوان یـک ترکیـب غیـر فلـزی، leaditeدارای ضریب انبساط حرارتی متفاوت نسبت به سرب می باشد.

در نتیجه درجه حرارت، دماهای بسیارسرد در لوله می تواند باعث شکاف نرینگی لوله همانند شکل ۱ شود. این حالت شکست به دلیل شکاف درست در زیر نرینگی لوله ودلایل مختلف متفاوت از ترک های طولی بوده چنانچه در شکل ۲ می توان دید, پس از آن تنش تولید شده یکباره توسط انبساط حرارتی رها می شود.

۳,۴-شکاف طولی

شکاف طولی نیز در لوله های قطر بزرگ رخ می دهد. این حالت شکست ممکن است به علت فشار آب داخلی، نیرو های شکننده وارد بر لوله یا نیرو های تراکمی وارد بر سراسر لوله رخ دهد. هر یک از این بارگذاری ها منجر به شکاف طولی می شـود. یکبـاره شکاف شروع شده و این ممکن است طول لوله را در برگیرد. در برخی از نمونه های شکاف در جهت مخالف لوله رخ مـی دهنـد. معمولا این نوع شکست در قسمت بالای لوله خاتمه می یابد، سوراخی ایجـاد مـی کند که ممکن است به مدت طولانی در لوله ادامه داشته باشد.



تصویر۲- حالت شکست برای لوله قطر بزرگ (بزرگتر از ۵۰۰ میلی متر). لوله چپ، شکاف طولی.

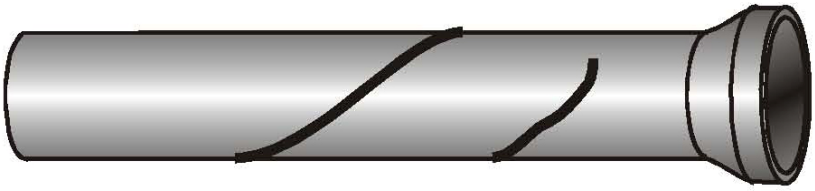
لوله راست = برش نرینگی لوله. حالات شکست حفره خوردگی نیز در این لوله هـا رایـج است.

۳,۵ - برش نرینگی لوله

لوله های قطر بزرگ به طور کلی دارای گشتاور اینرسـی بسـیار بـالا جهـت ایجـاد شکست های دایره ای همانند تصویر ۱ می باشند. در عین حال لوله هـای چـدنی خاکستری رنگ قطر بزرگ بواسطه برش نرینگی لوله خود همانند تصویر ۲ شکست می خورند. علت احتمالی این حالت شکسـت نیرو های تراکمی وارده از سوی مادگی لوله بر نرینگی لوله بعدی در خطوط لوله می باشد. در عین حـال نیـرو هـای خنثـی بـه احتمال زیاد سبب این نوع شکست می شوند. بارگذاری تراکمی ساده نیز تمایل به ایجاد ترک دارد که از قسمت پایین طول لوله گسترش پیدا می کند، اما نیروی خنثی نوعی از برش را همانند تصویر ایجاد می کند. مثال این حالت از شکست در سـال ۱۹۹۸ در شاه لوله ۹۱۴ میلی متر باستون دیده می شود. NPC

۳,۶- ترک مارپیچ

لوله های قطر متوسط (۳۸۰تا ۵۰۰ میلی متر)حالت شکست منحصر به فردی را تجربه می کنندکه شکست در لوله در حالتی استوانه ای شروع می شود سپس به سمت پایین در امتداد لوله به طور مارپیچ گسترش می یابد. این حالت شکست درخیابان دس مونیس, لویس و اوتاوا دیده شد. در دو مورد اول شکست ها با فشار ناگهانی مرتبط است. ظاهر این حالت از شکست نیز نشان می دهد که شکست توسط ترکیبی از نیروهای خمشی و فشارآب داخلی ایجاد شده است.



تصویر ۳ :حالت شکست مارپیچ در لوله های قطر متوسط (۳۸۰تا ۵۰۰ میلی متر). شکست های حفره خوردگی نیز در این لوله ها دیده می شود.

۴ علت شکست

۴,۱ - خوردگی (زنگ زدگی)

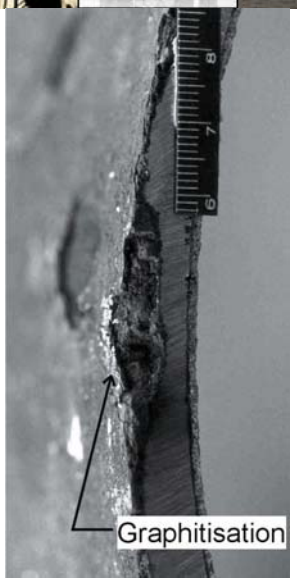
خوردگی باعث شکست هایی می شود که در تمامی قطر های لوله رایج می باشد. اگرچه بسیاری از حالات شکست در بخش ۳ تشریح شده است و از نظر ماهیت مکانیکی هستند, حفره خوردگی معمولا با این شکست ها مرتبط می باشد, سبب ضعف شدن لوله می شود که این خود لوله را مستعد شکست می کند.به عنوان مثال, از ۲۵ شکست استوانه ای در توسط NRC بررسی شد ۲۳ مورد با حفره خوردگی مرتبط می باشد. شکست های دیگر فقط به علت خوردگی می باشد(تصویر ۴). حفره خوردگی ساده یک حالت نادر شکست در لوله های قطر کوچک می باشد اما در لوله هایی با قطر بالاتر از ۳۰۰ میلی متر اهمیت بیشتری دارد.

بررسی اثرات خوردگی بروی شکست های لوله چدنی به ویژه توسط دو فرایند مجزا اما کاملا مرتبط با خوردگی همراه می باشد و ممکن است بروی لوله ها تاثیر بگذارد.حفره خوردگی ساده می توانند در لوله های پولادی نیز به همین صورت رخ دهد. این فرایند مقدار ی از آهن را در لوله از بین می برد, اما طبق ماتریکس فلس های گرافیت بایکدیگر در قسمتی از لوله توسط اکسید آهن ایجاد شده است .

تصویر ۴: لوله چدنی زنگ زده (شهر تورنتو)

گرافیتی شدن می تواند ماده ای جامد در روی لوله ایجاد کند, به طوری که در ظاهر لوله هیچ تغییری نمی کند. در بسیاری از موارد این خوردگی ممکن است به اندازه کافی در برابرمقاومت موقتی فشار آب داخلی لوله ها مقاوم می باشد. پاکسازی سطح لوله با استفاده از سمباده و دیگر روش ها اغلب تنها روش متوقف کردن خوردگی در لوله ها می باشد.

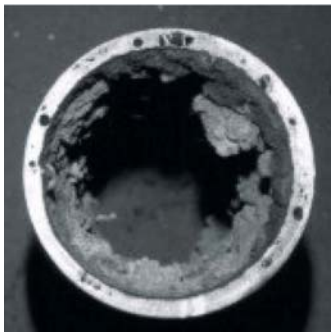
منطقه گرافیتی اغلب صرفا متشکل از فلس های گرافیت می باشد. در واقع, تحلیل شیمیایی نشان دهنده وجود اکسید آهن می باشد, که برای این فرایند ضروریست NRC .از سلول های خوردگی سرعت بالا در روی لوله چدنی به منظور ایجاد حفره های خوردگی مصنوعی استفاده کرد. این سلول ها قادر به ایجاد حفره هایی با عمق ۵ میلی متر و ۷ میلی متر عرض در ظرف مدت یک تا دو ساعت می باشند. این فرایند خوردگی در لوله گرافیت نرم را ایجاد کرد, فلس های کربن جدا شدنی گرافیت سخت را ایجاد نکرد. بنابراین اکسید آهن برای ایجاد خوردگی لازم است و به عنوان فرایند ایجاد گرافیت شناخته شده است. علاوه بر این, نشان می دهد که فرایند کند خوردگی برای ایجاد گرافیت به همراه اکسید آهن لازم است. بر خلاف چدن, چدن نشکن دارای ماتریکس فلس های چدنی نمی باشد. در عوض, فرایند تولید آن کره های کربن مرغوب را در فلز ایجاد می کند. این فلز نشکن قوی تری را نسبت به چدن تولید می کند که دارای خاصیت نشکن بیشتری متناسب با نامش می باشد. فقدان ارتباط بین کره های گافیتی در این مواد به نظر می رسد به معنای آن است که گرافیت شدگی نمی تواند رخ دهد. در عین حال, مرکز تحقیقات آب در انگلیس مثال های را از گافیت شدگی در لوله چدنی نشکن مشاهده کرد. NRC نیز شکست های لوله چدنی نشکن را در شهرهای اوتاوا و تورنتو بررسی کرد در حالیکه گرافیت شدگی نیز مشاهده شد (تصویر ۵). یک تجزیه عنصری ازگرافیت شدگی لوله شهر اوتاوا مقدار زیادی از کربن, آهن و اکسیژن را که تقریبا یکسان با خصوصیات گرافیت شدگی لوله های چدنی می باشد نشان داد. عناصر اضافی همانند خاک نیز دیده شد. در حالیکه گرافیت شدگی در لوله های چدنی نشکن نسبت به لوله های چدنی رواج کمتری دارد, و این هنوز یک احتمال می باشد. لوله های چدنی نشکن به ظاهر بدون تغییر و صرفا بدون خوردگی هستند.



تصویر ۵ سطح متقاطع لوله های چدنی نشکن نشان دهنده گرافیت شدگی(شهر اوتاوا).

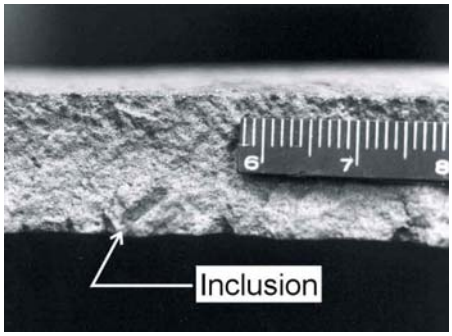
۴,۲ معایب ساخت

لوله های چدنی با استفاده از روشهای مختلف, با دو روش رایج قالب ریزی حفره و چرخان و قالب ریزی گریز از مرکز ساخته شده است. در روش نخست یک قالب عمودی از ماسه ای داخل یک حفره ساخته مـی شـود. چـدن ذوب شـده در داخـل قالـب ریخته می شود, سپس به آرامی سرد شده تا اینکه لوله قابل برداشتن و تست می باشد. لوله چدنی چرخیده شده در قالـب هـای افقی, ماسه ای یا چرخان تولید می شود که با روش اول نیازمند آب برای مرحله خنک سازی می باشد. در این روش یک ملاقـه وارد مرکز قالب می شود و چدن ذوب شده ریخته می شود درحالیکه قالب چرخانده می شود. چرخش لوله سبب مـی شـود فلـز ذوب شده در سطح قالب کاملا توزیع شود. قالب ریزی گریز از مرکز به علت تفاوت در ساختار میکروسکوپی ناشی از دو فراینـد یک لوله قوی تر تولید می کند.



تصویر ۶ لوله ساخته شده توسط قالب ریزی حفره نشان دهنده تخلخل می باشد(نقطه های سیاه در روی سطح برش فلز(شهر تورنتو).

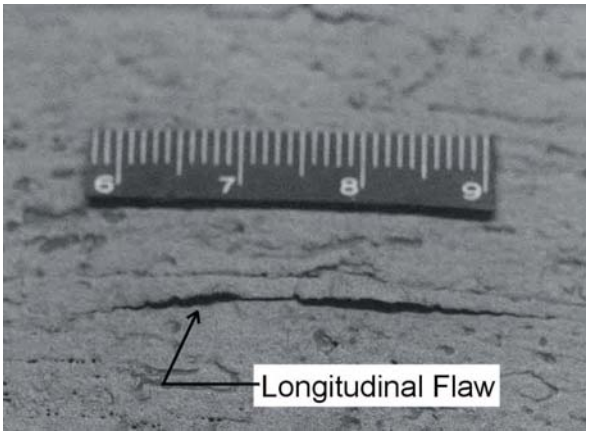
NPC نیز معایب ساخت را در دو نوع لوله چدنی تعیین کرد. جدید ترین لوله چدنی نشکن نیز توسط قالب ریزی چرخان ساخته شده است، اما هیچ کدام از شکست های لوله چدنی نشکن توسط NRC به علت معایب ساخت مورد بررسی قرار نگرفت. تخلخل (تصویر ۶) رایج ترین عیب ساخت در لوله ساخته شده توسط قالب ریزی حفره می شود. هوا در لوله ساخته شده توسط قالب ریزی حفره باید از انتهای لوله به بالای آن جهت خارج شده انتقال یابد، این روش فرصت بیشتری را برای حبس شدن هوا نسبت به لوله های ساخته شده توسط قالب ریزی چرخان ایجاد می کند، درحالیکه در این روش کافی است هوا به دیواره داخلی سطح لوله برسد تا بتواند خارج شود. در عین حال NRC نیز منافذ کوچک تر و خوشه ای بسیاری به تصویر ۶ در لوله های ساخته شده توسط قالب ریزی چرخان مشاهده کرد. تورفتگی اشیاء غیر ارادی می باشد که در فلزات در طول ساخت ایجاد شده است و جزء ساخت مداوم مواد (تصویر ۷) محسوب نمی شود. آنها با عمل خود لوله فلزی را ضعیف می کنند، همانند ترک مورد اول، مجموع سطح متقاطع فلزی را در لوله کاهش می دهند و تمرکز تنش را حاصل می کند. این تورفتگی از اکسید آن ساخته شده اما رایج ترین تورفتگی فرو سیلیکون حل نشده می باشد. روش بعدی ابزار رایج افزون سیلیکون به چدن می باشد که نقطه ذوب فلز را پایین تر می آورد و باعث تسهیل قالب ریزی آن می شود. در عین حال، اگر فلز خیلی سریع سرد شود، یک تورفتگی استوانه ای و سیاه بر جای می گذارد.



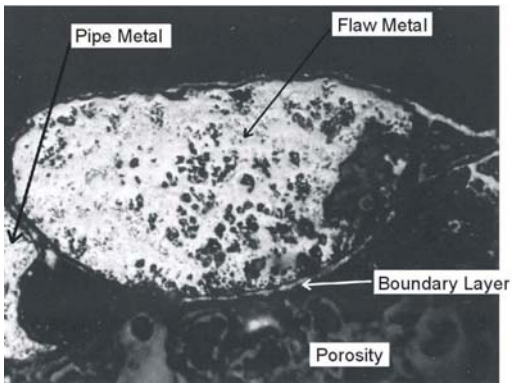
تصویر ۷: تورفتگی در سطح شکستگی (شهر اوتاوا)

لوله های ساخته شده توسط قالب ریزی چرخان به طور کلی دارای نقص قالب ریزی پایین تری نسبت به روش قالب ریزی حفره می باشد. در عین حال آنها نقص های متفاوتی را تجربه می کنند که تنها توسط فرآیند قالب ریزی چرخان ایجاد می شود تصویر ۸ نیز مثالی از نقص سطح طولی می باشد. لوله خاصی در تصاویر ۹ و ۱۰ نشان داده شده است که مثال های متعددی از این نوع نقص در روی سطح بیرونی و مرتبط با قالب لوله می باشد. در برخی موارد این نقص ها نیز مجزا از سطح لوله هستند که در تصویر ۸ نشان داده شده است، در حالیکه در دیگر موارد آنها تنها به عنوان خطوط موازی در روی لوله دیده می شوند. تصویر ۹ نیز سطح متقاطع دیوار لوله را در یکی از این معایب ساخت نشان می دهد. مواد ساخت و خود لوله از چدن تشکیل شده است.

در عین حال، سوراخ قابل توجهی در زیر شکاف و لایه موازی اکسید آهن بین شکاف و دیواره لوله دیده مـی شـود. وجـود لایـه مرزی شکل نیمه- مدور شکاف در سطح متقاطع نشان می دهد که مواد شکاف قبل از کشیدگی لوله سـخت شـده اسـت. لایـه اکسید آهن در تماس با هوا ایجاد شده و شکاف فلزی سرد شده در حالیکه شکل کشیده شده و سطح متقاطع آن توسط ترکیب کشش سطح و نیرو های گریز از مرکز و توسط قالب چرخشی ساخته شده است.



تصویر۸: شکاف طولی در لوله ساخته شده توسط قالب ریزی چرخان (شهر اوتاوا)

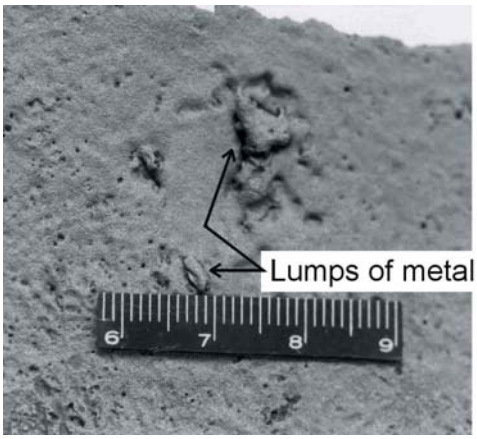


تصویر۹: سطح متقاطع شکاف طولی (شهر اوتاوا)

همان لوله نیز دارای برآمدگی های فلزی می باشد که در سطح لوله دیده می شود (تصویر۱۰)

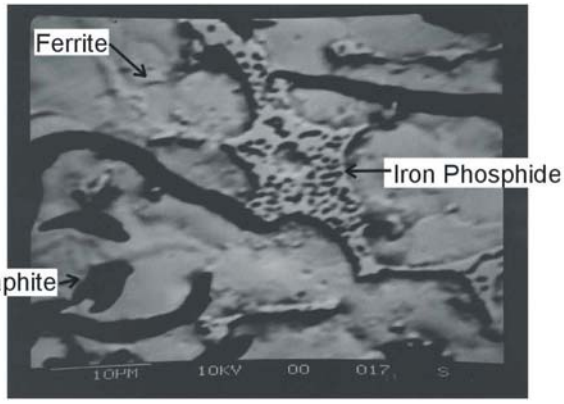
معمولا فلز ذوب شده توسط فرآیند های چرخشی پراکنده می شود. وجود برآمدگی ها نشان می دهد کـه لولـه فلـزی در طـول فرآیند قالب ریزی سرد تر از وضع مطلوب شده است و این سبب سخت شدگی برآمدگی ها می شود.تغییرات در ضخامت دیـوار لوله نیز می تواند لوله های چدنی را ضعیف تر کند. لوله های تولید شده از قالب ریزی سوراخ اغلب دارای ضخامت غیر- یکدست در اطراف لوله می باشند و علت هسته داخلی قالب ماسه ای استفاده شده برای ساخت لوله می باشد که در خارج- مرکز بیرونـی

قالب قرار دارد. این تفاوت ها کاملا بزرگ است، دارای ۸ میلی متر ضخامت در یک طرف لوله تـا ۴/ میلـی متـر در طـرف دیگـر هستند. لوله های قالب ریزی چرخشی این نوع مشکل را به علت ماهیت فرآیند های قالب ریزی، توزیـع فلـز ذوب شـده اطـراف دیواره لوله تجربه نمی کنند. در عین حال، این لوله در تصویر ۷ تا ۱۰ نشان داده شده و دارای دیـوار ضـخیم مـی باشـد کـه در سراسر طول لوله متفاوت است، از ۱۸ میلی متر تا ۱۵ میلی متر در یک فاصله ۲ متری متغییر است. این مقدار تغییر معنـا داری می باشد نظر به اینکه حداکثر فشار عملیاتی سبب می شود لوله تحت استاندارد های کاربردی بتوانند به طور معناداری برای لوله دیوار نازک تر کمتر باشد. این نوع کاهش در مقدار فلز در هر ثانیه ترکی در روی قالب لوله ایجاد می کند.



تصویر ۱۰: برآمدگی های فلزی روی سطح لوله (شهر اوتاوا).

نوع پایانی شکاف ساخت در تعدادی از لوله های چدنی دیده می شود که به علت شبکه های دو ظرفیتی فسـفر در سراسـر لولـه فلزی (تصویر ۱۱) ایجاد شده است. فسفر به چدن ذوب شده به منظور پایین آوردن نقطه ذوب فلز و سرعت آن افزوده می شود. این بدان معناست که دماهای قالب ریزی پایین می تواند استفاده شود، و مجموع هزینه تولید را کاهش می دهد.



تصویر ۱۱: قسمت شبکه ترکیب دوظرفیتی فسفر در سراسر لوله فلزی (شهر مانکتون).

در عین حال، وجود فسفر می تواند این نوع شبکه تصویر ۱۱ را ایجاد کند. این ترکیب دو ظرفیتی فسفر حتی شکننده تر از چدن می باشد و باعث ضعیف تر شدن لوله می شود. مدرن ترین پولاد و چدن به منظور به حداقل رساندن محتوی فسفر، با خصوصیات وابسته به کیفیت پولاد در حال ساخت است، اما معمولا زیر ۱/ درصد وزن و اغلب زیر ۰/۰۳ درصد وزنی است. لوله های چدن ممکن است دارای محتوی فسفری بالاتر از ۹/ درصد وزنی باشند و اغلب از ۵/۶ – ۰/۴ درصد وزنی است.

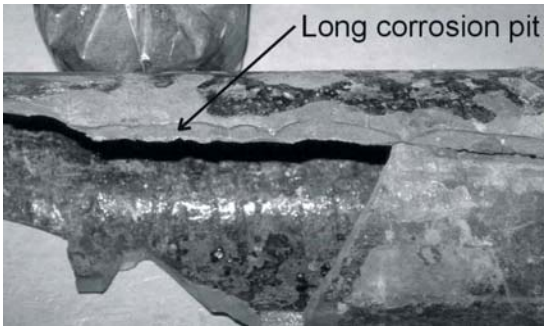
۴,۳ - نیرو های تبادلی

اکثر شکست های مشاهده شده لوله به علت ترکیب برخی از حالات آسیب یا شکاف ساخت و نیرو های کاربردی پیرامون لوله می باشد. در عین حال، همچنین ممکن است لوله ها بدون وجود حفره خوردگی یا شکاف ساخت در نقطه شکست دچار نقص شوند. در برخی موارد نقص در هر جای لوله ممکن است به علت شکست باشد. یک مثال از این اتفاق جایی است که لوله به علت کشیدگی و نیرو های جنبشی وارده زمین بر لوله و بوسیله حفره خوردگی دچار شکست می شود. در موارد دیگر نیرو های کاربردی ممکن است حتی بدون آسیب های قبلی سبب شکست لوله شود. این شکست ها ممکن است به ویژه برای محقق پیچیده باشد، به طوریکه آنها هیچ علت آشکاری ندارند. علاوه براین، این نوع از نقص گاهی اوقات جایی دیده می شود که هیچ بار گذاری اضافی آشکاری بروی سیستم وجود ندارد (همانند بار های کامیون، بار های یخ بندان، تغییر آب و هوایی و فشار) . چنین پدیده ای ممکن است ناشی از جایگزینی لوله شکست خورده و تحلیل کمتر باشد. در عین حال همیشه برای شکست لوله ها علتی وجود دارد. اگر هیچ نقص یا حفره خوردگی در روی لوله شکست خورده دیده نشود، موثر ترین علت نیرو های اعمال شده بر لوله می باشد که بیشتر از ظرفیت مقاومت لوله می باشد. این نیروها ممکن است رفته رفته در طول زمان ایجاد شود، و کشف آنها دشوار است اما اندازه و جهت آنها می تواند توسط ماهیت شکست موجود در لوله تعیین شود. آنها اغلب توسط حرکت زمین ایجاد شده اند و ممکن است ناشی از فاصله قابل توجه از لوله شکست خورده باشد. شکست ممکن است حاصل تغییر در جهت خطوط لوله باشد، برای مثال وقتی که زمین حرکت می کند سبب می شود نیرو های کاربردی دورتر از لوله رخ دهد. سوال اصلی مرتبط با این شکست آن است که آیا نیرو های وارده بر خطوط لوله توسط شکست لوله و فرآیند جایگزینی بعد از بین می روند. اگر نه، خطوط لوله باید در خط بالاتری از شکست بیشتر باشد. مطالعات بیشتری برای تعیین روش بهتر ارزیابی نیاز است. یک قسمت از این فرآیند از ایجاد نیرو هایی تشکیل شده که احتمال مسئول شکست هستند. در برخی موارد ظرفیت مقاومت خط ممکن است توسط اشتباهات فرضیات در مورد پوشش زمین، حداکثر بار های کامیون و فشار آب وارده بر خطوط بیش از حد مجاز برآورد شود. روش های نصب که امروزه نادرست قلمداد می شوند ممکن است در نصب اولیه خطوط لوله استفاده شده باشد. مثال مشکل بعدی استفاده از بلوک های چوبی در زیر لوله برای بالا نگه داشتن لوله از کف زمین است. این

روش بعد ها به عنوان عوامل دخیل در شکست ها معرفی شد، زیرا نیرو های روی لوله در بلوک ها متمرکز می شود و در سراسر طول و عرض لوله پراکنده نمی شود. در عین حال تشخیص شکست های ناشی از نیرو های تبادلی که حتی زمان بـدون عیـب و نقص طراحی و نصب خطوط لوله رخ می دهد حائز اهمیت است.

۴,۴ – خطای انسانی

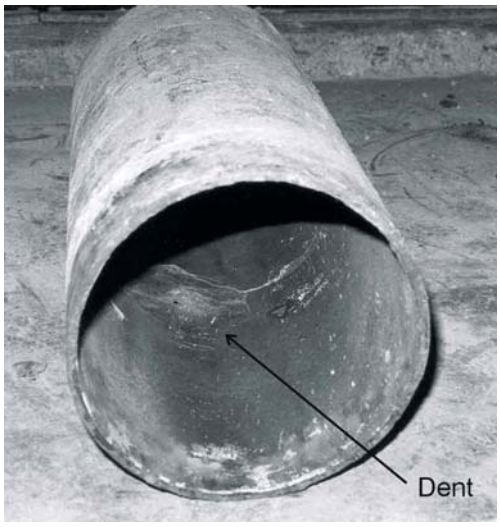
مشکلات طراحی یکی نوع از خطای انسانی محسوب می شود که می تواند منجر به شکست خط لوله شود. در عین حال اقدامات دیگری در طول ساخت و بعد از آن وجود دارد که می تواند سبب افزایش یا علت شکسـت لولـه باشـد. بـه ویـژه برخـی از انـواع شکست های ناشی از خوردگی به علت تکنیک های ضعیف انتقال یا نصب می باشد. تصویر ۱۲ نیز مثالی از یک لولـه مـی باشـد که به علت اعمال فشار زیادی بر یک طرف آن شکسته شده است. این لوله دارای جفت حفره های طویل خوردگی می باشد کـه در جایی قرار گرفته اند که در طول نصب پوشش سیاه بروی لوله خراشیده شده است. برخی خراش های اضافی نیز در روی لوله دیده می شود. این پوشش نیز در روی لوله چدنی دیده می شود و محصول اکسید آهن طبیعی در فرآیند تولیـد مـی باشـد کـه باعث حفاظت در برابر خوردگی می شود. هر دو لوله های چدنی قالب ریزی چرخشی و لوله چدن نشکن بـدون آسـیب پوشـش خورده شدند، اما آسیب به پوشش احتمال خوردگی را در ناحیه آسیب دیده افزایش می دهد.



تصویر۱۲: حفره های خوردگی ناشی از خراش لوله (شهر اوتاوا)

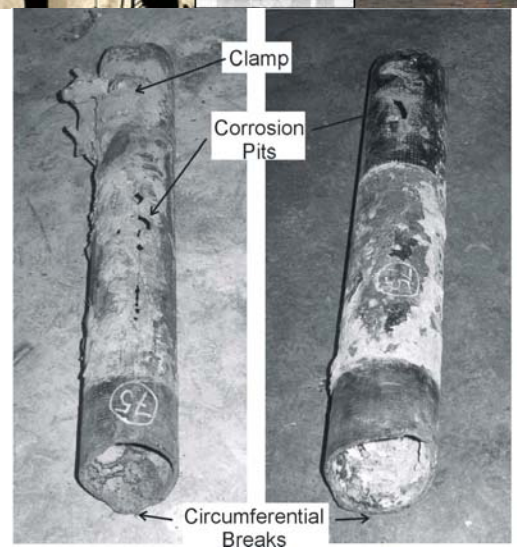
در موردی که در تصویر نشان داده شده، حفره های نازک طویل خورده شده بروی نقطه ای قرار دارد کـه فلـز در انتهـای حفـره همانند یک برگه کاغذ نازک شده است. فشار ناگهانی سبب شکست لوله از محل حفره می شود و سپس با فوران آب همراه است. شکست مشابهی نیز در لوله های چدن شهر تورنتو دیده می شود. در این مورد زنجیـره ای از خـراش در اطـراف لولـه در زمـان انتقال آن ایجاد شده است. هر حلقه از زنجیره پوشش لوله را تخریب کرده و منجر به یک سری از حفره های خوردگی در اطراف لوله می شود. (تصویر۱) منبع رایج دیگر شکست ها به علت خطای انسانی سومین عامل آسیب محسـوب مـی شـود حفـاری در

روی یا نزدیک خطوط لوله بدون دانش دقیق از مکان لوله سبب آسیب خطوط لوله یا شکست می شود. (تصویر ۱۳). این نوع شکست برای تمام تجهیزات دفن رایج است، از جمله هر دو خطوط لوله و خدمات دیگر همانند کابل گذاری تلوزیون یا تلفن.



تصویر ۱۳: حفره و فرو رفتگی در لوله چدنی نشکن به علت سومین عامل آسیب (شهر تورنتو) گاهی اوقات مشکلات می تواند از طریق روش های عملیاتی استاندارد تاسیسات آب به سادگی تشدید شود.

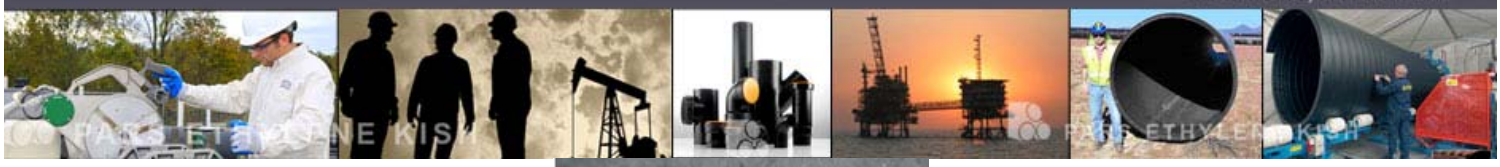
تصویر ۱۴ دو تکه از یک لوله را نشان می دهد که چهار شکست متفاوت را در خود نشان می دهد.پشت سمت چپ لوله توسط گیره در تصویر نشان داده شده است. هر یک از شکست ها مربوط به حفره خوردگی می باشد. این شکست در طول زمان رخ داده است و در پاسخ به سه مورد اول می باشد، یک گیره پولادی در روی ناحیه آسیب دیده وصل شده است. لوله برداشته نشد تا اینکه حفره خوردگی بسیار طویلی در سمت چپ نمایان شد. بررسی لوله نشان می دهد که شکست در یک محیط بسیار خورده شده رخ داده است. در حقیقت، تعدادی از شکست های لوله که توسط NRC بررسی شد کنار شکست قبلی و توسط گیره های پولادی سخت پوشش داده شده است. ممکن است که برخی جنبه های روش تعمیر خود مسئول شکست های بعدی باشد. که این نیازمند تحقیقات بیشتر است. این نتایج نشان می دهد که روش های متفاوتی برای مهار کردن لوله وجود دارد. یک روش که در برخی شهر ها استفاده شد، افزودن یک آنود به لوله در محل هر شکست می باشد. این از لوله در طول عمر آنود محافظت می کند و همچنین در صورت لزوم در اصل برنامه ریزی شده و از طریق تعمیر فوری جایگزین یا بررسی می شود.

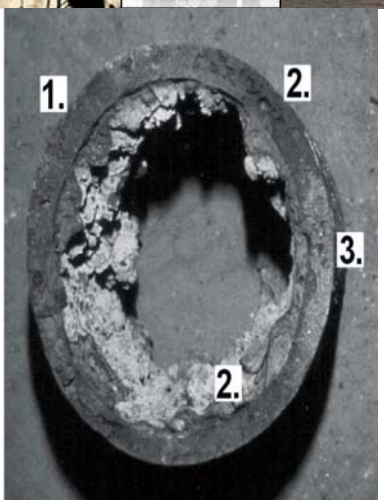


تصویر ۱۴: شکست های چندگانه روی لوله مشابه (شهر تورنتو)

۵- شکست های رویداد- چندگانه

اخیرا، اکثر شکست های مکانیکی لوله چدنی در یک رویداد به همراه ترک بروی نقطه شکست به علت برخورد نیرو های کاربردی بیشتر از مقاومت مواد لوله رخ می دهد. تحقیقات اخیر در NRC نشان می دهد که بسیاری از شکست های نوع شکاف نرینگی و استوانه ای به عنوان یک سری از وقایع چندگانه رخ می دهد. در این موارد لوله ترک می خورد و این منجر به نشست آب می شود. اگر ترک کشف نشود، رویداد دوم یا سوم و رویداد شکاف ممکن است رخ دهد و این فرآیند ادامه می باد تا اینکه لوله به طور کامل شکست می خورد و به علت کشف نشتی از خط انتقال خارج می گردد. تصویر های ۱۵ و ۱۶ نیز دو مثال از شکست های رویداد چندگانه را نشان می دهند. نقش آنها در شکست لوله می تواند توسط بررسی دقیق سطح شکست لوله کشف شود. در مورد این لوله در تصویر ۱۶ نشان داده شده است، تنها حدود ۸۰ درصد لوله در این لحظه ترک خورده است، اما از خط انتقال خارج می گردد. قسمت بدون نقص، به عنوان منطقه ۳ در تصویر برچسب گذاری شده و در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه آزمایش تنش شکسته شده است. آزمایش کل سطح شکست دو ترک را نشان می دهد که در حالی رخ داده است که لوله در حال استفاده بوده است. منطقه ۱ نیز توسط لایه نسبتا نازک خوردگی پوشش داده شده که دارای رنگ نارنجی مناطق مواد خاکستری می باشد. منطقه ۲ در تصویر دارای لایه نازکتری از خوردگی می باشد که با رنگ قرمز پررنگ نشان داده شده است. رنگ خاکستری فلس های گرافیت نیز در چدن نامگذاری شده و در قسمت برآیند خوردگی قابل روئیت می باشد. اگرچه تصویر ۱۶ نیز نشان می دهد که تمام شکست های استوانه ای نیازمند ترک کامل در اطراف لوله می باشد، تفاوت رویداد های ترک دارای ماهیت قابل روئیت می باشد. شواهد بیشتری برای این رویداد توسط تجزیه عنصری سطح شکست تهیه شده است.



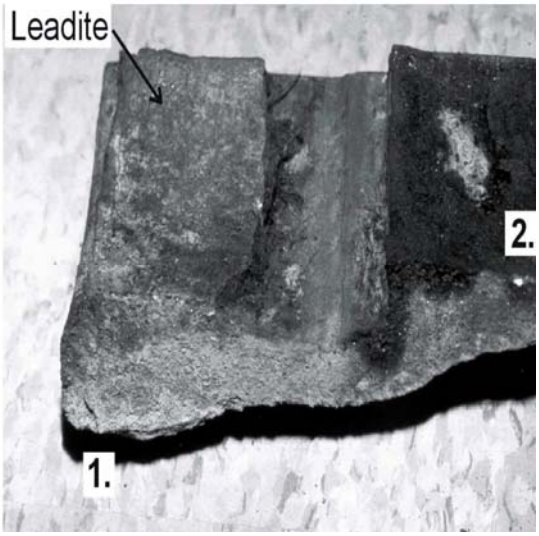


تصویر ۱۵: شکست استوانه ای رویداد- چندگانه.

۱ - رویداد ترک اول،

۲ - رویداد ترک دوم .

۳ - منطقه ای می باشد که تا زمان شکست در آزمایشگاه بدون نقص است.



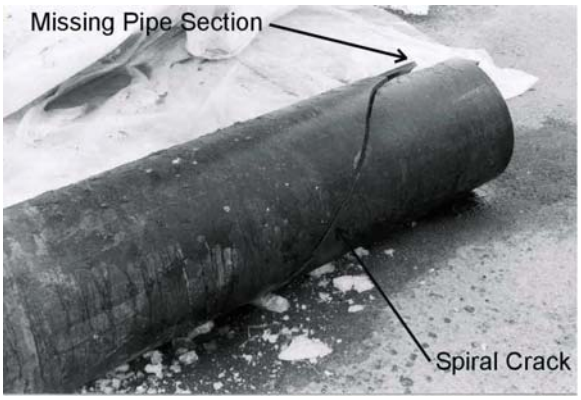
تصویر ۱۶

آزمایش تصویری نشان دهنده دو ترک می باشد، یکی در نزدیکی مادگی که دارای برآیند خوردگی نازک بـا رنـگ خاکسـتری- نارنجی می باشد و دیگری منطقه ای در نزدیکی انتهای ترک که دارای برآیند خوردگی نازک با رنـگ قرمـز پررنـگ مـی باشـد. تجزیه عنصری نشان دهنده وجود چند عنصر در روی دو منطقه سطح شکست می باشد که در لوله فلزی ظاهر نشده است. ایـن

عناصر بنابراین از خاک پیرامون لوله بدست آمده است. در عین حال، این منطقه با برآیند خوردگی نازک تر نشان دهنده وجود گوگرد، آلمینیوم، پتاسیم و مقدار بالای کلسیم می باشد، در حالیکه این منطقه با لایه نازکتر برآیند خوردگی مقدار کمتری از سه عنصر آخر را نشان داده است و هیچ گوگردی نیز دیده نمی شود. این تفاوت نشان می دهد که سطح شکست در لایه نازکتر برای مدت طولانی در معرض خاک پیرامون قرار گرفته است و شواهد بیشری را برای فرآیند ترک رویداد- چندگانه فراهم کند. تجزیه عنصری نیز برای سطوح شکست دیگر به همراه نتایج یکسان انجام شد. علت شکست رویداد چندگانه نامشخص است. شکست از تردی نیز به سرعت در سراسر کل طرح گسترش می یابد. اکثر تحقیقات، از جمله مدل سازی عنصر متناهی و مطالعات مکانیسم های شکستگی، برای درک کامل این جنبه از رفتار چدن ضروریست.

۶- شاه لوله بت گیت- مطالعه موردی

از NRC خواسته شد تا تجزیه شکست را در روی شاه لوله آب ۴۱۰ میلی متری شکسته شده در تابستان ۲۰۰۰ توسط شهرداری منطقه اوتاوا- کارلتون انجام دهد. این شاه لوله دچار شکست مارپیچ و علت شکنندگی می باشد. در عین حال گزارشات منطقه نشان می دهد که این لوله ها از جنس چدن نشکن بوده است. حالات شکست غیر متعارف، نامعین، در گزارشات دیده شد که باید آسیب پذیری بقیه خط لوله را براساس تجزیه شکست تعیین کند. نمونه تحویل داده شده به RRC توسط منطقه شامل تنها نیمی از لوله شکست خورده می باشد. علاوه بر این بخشی از لوله در نقطه ای که ترک ایجاد شده احتمالا مفقود شده است. این بخش گم شده از لوله نشان می دهد که علت شکست نمی تواند تعیین گردد. در عین حال، بررسی باقیمانده لوله و تعیین کیفیت آن مسیر است.



تصویر ۱۷: شکست لوله با قطر متوسط (شهر اوتاوا)

مرحله اول در بررسی برش لوله شکست خورده می باشد. هیچ شواهدی مبنی بر شکست رویداد چندگانه مشاهده نشد، اما سطح شکست تغییری را در جهت قسمت شکست در سراسر لوله نشان می دهد (تصویر۱۸). این تغییر جهت سطح در دیگر لوله هایی

که توسط NRC بررسی می شود دیده نشد. بررسی بعدی هیچ منطقه قابل توجهی از خوردگی را در روی سطح شکست یا در روی لوله به طور کلی نشان نداد. در عین حال، تعداد زیادی از نقص های ساخت پیدا شد. چندین روزنه کوچک در فلز لوله و در سراسر سطح لوله دیده شد. هر نقص قالب ریزی نیز در تصویر های ۷ تا ۱۰ در روی این لوله پیدا شد. چنانچه ابتدا گفته شد، معایب طولی در تصاویر ۸ و ۹ اغلب در روی سطح بیرونی لوله رخ داده است. این لوله نیز با تغییر ضخامت دیواره رو برو شده است. چنانچه تصویر ۹ نشان می دهد، ساختار میکروسکوپی لوله نیز به منظور تعیین نوع لوله بررسی شده است. وجود فلس های گرافیت در فلز، نسبت به کره های نشان داده شده در آن از جنس چدن خاکستری می باشد. تجزیه عنصری نیز تایید می کند که فلز لوله دارای مقدار اندکی از منیزیم می باشد که برای تولید چدن نشکن ضروریست. تجزیه ساختار میکروسکوپی نشان می دهد نوع و حالت فلس های گرافیت در لوله قسمتی از دیواره لوله را تغییر می دهد. این تغییر مسئول تغییر در سطح شکست می باشد چنانچه در تصویر ۱۸ نشان داده شده است. خصوصیات مکانیکی لوله نیز بررسی شد، پنج آزمایش کششی و هفت آزمایش خمش چهار نقطه بروی نمونه های لوله شکست خورده انجام شد. آزمایش های چندگانه به علت تنوع بالای چدن ضروریست. برخی لوله ها تنوع را نشان دادند و بیشتر از ۱۰۰ درصد بین ضعیف ترین و قوی ترین نمونه تنوع وجو داشت در این مورد نمونه ها از قسمتی از لوله برداشته شد که بدون معایب ساخت بود. آزمایشات کششی همگی قوی ترین لوله بالای ۱۲۴ یا ۱۴۵ MPA را نشان دادند که توسط دو استاندارد (ASA,1953,AWWA,1967) تدوین شده و ممکن است برای ساخت این لوله کاربردی باشد. در عین حال یکی از آزمایشات خمش ۴ نقطه قالب های شکست را به طور قابل توجهی ساخته اند که کمتر از استاندارد (310MPA یا 276MPA در مقابل 224MPA) می باشد. از ۷ آزمایش ۶ مورد زیر 310MPA استاندارد بود.

تصویر ۱۸: تغییر در سطح شکست در سراسر ترک مارپیچ

لوله دوم از خط انتقال جدا شده که به عنوان نمونه کنترل برای بررسی انتخاب شده است. این دارای معایب ساخت نیست. آزمایش های مکانیکی نیز بروی لوله کنترل انجام شد و نشان دهنده مقادیری بالاتر از استاندارد مورد نیاز است. این تجزیه نیز

نشان داد که شکست به علت معایب ساخت در لوله می باشد. مقاومت داخلی لوله در برابر خمش در مقایسه با مقادیر مورد نیاز استاندارد های کاربردی در بهترین شرایط قرار دارد. فراوانی معایب مشاهده شده دارای احتمال بسیار بالایی می باشد که در مکان شکست رخ داده است. ترکیب مواد ضعیف لوله و یک تورفتگی، ترک طولی یا خوشه ای از روزنه ها ظرفیت مقاومت لوله را برای نقطه ای که در آن شکست رخ داده است پایین می آورد.

۷- نتیجه گیری

شکست های لوله چدنی پیچیده تر و متفاوت از شکست هایی می باشد که توسط صنعت آب پیش بینی شده است. حالات شکست تنها شامل خوردگی و شکست های استوانه ای نمی شود، بلکه شامل ترک طولی، شکاف مادگی، برش مادگی و ترک مارپیچ می شود. علت شکست فراتر از خوردگی می باشد و بارگذاری مکانیکی شامل معایب ساخت و تنوع عوامل انسانی می شود. بسیاری از شکست ها نیز به عنوان رویداد های چندگانه رخ می دهد نه به عنوان حادثه ترک تنها. درک ماهیت و علت شکست های لوله در تصمیم گیری در مورد جایگزینی و نوسازی اهمیت دارد. شکست خط لوله نیز معمولا غیر ارادی می باشد و اغلب به طور ناگهانی رخ می دهد. این به ویژه موردی می باشد که برای خطوط آب رسانی قطر های بزرگ و متوسط رخ می دهد، که ممکن است آب رسانی را برای تعدا زیادی از مردم فراهم کند. اهداف اصلی تاسیسات آب رسانی حل چنین شکستگی می باشد که به طور طبیعی آب رسانی را ادامه و ناحیه اطراف لوله آسیب دیده را باز سازی و آب رسانی را تا حد ممکن خیلی سریع حل نماید. در عین حال جمع آوری داده و نمونه های ضروری برای تکمیل تجزیه شکست باید به عنوان قسمت ضروری فرآیند تغییر در نظر گرفته شود. با انجام تجزیه مهندسی بعد از شکست شاه لوله تعیین خطر شکست بعدی در همان خط ضروریست. ماهیت پیچیده شکست خط لوله و تنوع لوله های چدنی بدان معناست که اطلاعات در مورد لوله و شکست ضروری آن برای تجزیه مهندسی می تواند تنها توسط فرآیند تجزیه شکست بدست آید.