

مروری بر روش‌های بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب

تورج عزیززاده^۱، محمد ریاحی^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

* riahi@iust.ac.ir

چکیده

خطوط لوله به‌طور گسترده‌ای برای انتقال مقادیر عظیمی از آب و فاضلاب در مسافتهای طولانی به‌کار می‌روند. این زیرساخت‌های ارزشمند زمانی توجه همگانی را به خود جلب می‌کنند، که آسیب دیده‌اند. به‌منظور اجتناب از وقوع حوادث ناگوار، تشخیص اولیه عیوب موجود در خطوط لوله آب و فاضلاب و تعیین کمیتی این عیوب، بسیار حائز اهمیت است. در تعداد زیادی از کشورها، بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب معمولاً با استفاده از روش بازرسی دوربینی انجام می‌شود که یک اپراتور با ارزیابی تصاویر خام دوربین به شناسایی مکان آسیب‌دیدگی‌ها می‌پردازد. روش‌های بازرسی دوربینی دارای تعدادی معایب هستند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌سازد. یکی از معایب روش بازرسی دوربینی، نبود نور کافی و روشنایی در داخل لوله‌ها است. عیب دیگر روش بازرسی دوربینی این است که کیفیت تصاویر به‌دست آمده به‌دلیل شرایط روشنایی نامطلوب، پایین است. در نتیجه روش‌های بازرسی دوربینی می‌توانند صرفاً عیوب بزرگ را به‌طور مطمئنی تشخیص دهند. در دهه‌های اخیر، روش‌های حرارت-نگاری، میکروویو، لیزر و سونار پیشنهاد شده‌اند تا در ترکیب با روش بازرسی دوربینی، نتایج بازرسی را بهبود دهند. همچنین، تجهیزات جدیدی که چندین سنسور را به‌کار می‌برند و قادر به انجام بازرسی در مسافتهای دور هستند، پیشنهاد گردیده‌اند. مقاله حاضر به مرور روش‌های بازرسی متداول و جدید در خطوط لوله آب و فاضلاب می‌پردازد. بعلاوه، انواع متفاوت ربات‌ها برای بازرسی داخل لوله‌ها بحث می‌گردند.

واژگان کلیدی: خطوط لوله آب و فاضلاب، روش بازرسی دوربینی، روش بازرسی چندسنسوری، ربات‌های بازرسی لوله

۱- مقدمه

روش‌های تشخیص عیب که در دهه‌های اخیر ارائه شده‌اند [2]، پردازش می‌شوند. فرآیند تشخیص عیوب موارد زیر را در بر می‌گیرد: وجود عیب، مکان عیب، نوع عیب، شدت عیب [3].

بازرسی مستقیم خطوط لوله توسط انسان، کاری دشوار و پرهزینه است. دلایل این دشواری عبارتند از: ۱- خطوط لوله اغلب در زیرزمین یا در داخل دیوارها قرار دارند. مخفی نگهداشتن خطوط لوله از محیط اطراف برای حفاظت بهتر آن‌ها لازم است. ۲- به‌منظور انتقال سیالات در مسافت طولانی یا به دلیل فضای محدود سازه‌ای، ساختار خطوط لوله معمولاً طولانی، باریک و پیچیده طراحی می‌شوند (شکل (۱)). ۳- محیط داخل خطوط لوله می‌تواند کثیف و خطرناک باشد.

ایمنی زیرساخت‌هایی نظیر خطوط لوله، راه آهنها، بزرگراهها، سکوها، دریایی و دیگر المان‌های سازه‌ای ضروری است تا از وقوع حوادث فاجعه‌بار که ممکن است سبب پیامدهای شدیدی برای محیط زیست و از دست دادن زندگی انسان‌ها و تولید مقادیر عظیمی مواد زاید شود، جلوگیری گردد [1]. هدف روش‌های پایش سلامت سازه^۱ و ارزیابی غیرمخرب، بررسی سلامت سازه‌های موجود است. با تشخیص عیوب در مرحله اولیه، طول عمر این سازه‌ها افزایش می‌یابد. ارزیابی غیرمخرب معمولاً توسط پرسنل مخرب و با استفاده از روش‌های تجاری شده موجود انجام می‌شود. سیستم‌های پایش سلامت سازه، داده‌ها را از سنسورهایی که بر روی سازه‌های معینی نصب شده‌اند، جمع‌آوری می‌کنند. سپس، این داده‌ها با استفاده از

^۱ structural health monitoring (SHM)

هفته بعد دومین شکستگی منجر به بسته شدن خیابان ۸۸ شد. جریان خروشان آب سبب شد کف خیابان خم شود. در سپتامبر ۲۰۰۹، یک شبکه آبرسانی ۶۲ اینچی در منطقه لس آنجلس شکست که منجر به بسته شدن جاده به مدت سه روز شد و به خانه‌های اطراف آسیب رساند [8].

بنابراین، تشخیص اولیه عیوب و ترکها در خطوط لوله می‌تواند از آسیبهای شدیدی که شامل فجایع زیست محیطی و هزینه‌های اقتصادی بالا است، جلوگیری کند. در حال حاضر اکثر سیستمهای بازرسی فاضلاب از دوربینهای مدار بسته^۲، بعنوان سنسور استفاده می‌کنند. دوربین بر روی یک ربات نصب می‌شود و در داخل لوله حرکت می‌کند و تصاویر داخل لوله را در یک نوار ویدئویی ضبط می‌کند. سپس، این تصاویر ضبط شده توسط یک اپراتور به صورت غیرهمزمان بررسی می‌شود. این روش بازرسی دارای تعدادی معایب است: از قبیل کند بودن، پرهزینه بودن و در معرض خطاهای انسانی قرار دارد. روش‌های نوظهور برای بازرسی لوله‌های فاضلاب شامل سیستمهای حرارت‌نگاری اینفرارد، روش رادار نفوذکننده زمینی^۳، روش‌های فراصوتی و سیستمهای بازرسی لیزری هستند.

۳- ویژگیهای خطوط لوله آب و فاضلاب

تنوعی از مواد و تکنولوژی در ساخت و تولید لوله‌های انتقال آب و فاضلاب، استفاده می‌شوند. برای خطوط لوله با قطر بیش از سیصد میلیمتر، معمولاً نوع فولادی یا بتنی استفاده می‌شوند. لوله‌های موجود در شبکه‌های توزیع آب قدیمی‌تر، معمولاً از چدن یا سیمان آریست ساخته شده‌اند. در شبکه‌های آبرسانی جدیدتر عمدتاً از لوله‌هایی از جنس آهن داکتیل و پلی وینیل کلراید استفاده می‌شود [9]. بخش عمده‌ای از لوله‌هایی که در شبکه‌های فاضلاب شهری استفاده می‌شوند، دارای سطح مقطع دایروی است. لوله‌هایی با قطر داخلی بیش از یک متر، قابل دسترس برای انسان‌ها در نظر گرفته می‌شوند و با رفتن در داخل آن‌ها به صورت مستقیم بازرسی انجام می‌شود. اگرچه اندازه لوله‌های فاضلاب در کشورهای مختلف فرق می‌کند، اکثر آن‌ها غیرقابل دسترسی و غیرقابل بازرسی مستقیم توسط انسان هستند که قطر آن‌ها به کمتر از ۱۰۰ میلیمتر می‌رسد



شکل ۱- سیستم خط لوله پیچیده [4]

۲- اهمیت بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب

شبکه فاضلاب شهری معمولاً یکی از بزرگترین زیرساختهای یک کشور صنعتی است. معمولاً برای هر یک میلیون شهروند، تقریباً پنج هزار کیلومتر لوله فاضلاب وجود دارد. برای مثال، طول شبکه فاضلاب بریتانیا در حدود دویست و پنجاه هزار کیلومتر تخمین زده شده است. طول شبکه فاضلاب در ژاپن سیصد و چهل هزار کیلومتر و طول شبکه فاضلاب در آلمان سیصد و شصت هزار کیلومتر است [5]. بر طبق گزارش سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا، تقریباً دو میلیون کیلومتر لوله فاضلاب در این کشور وجود دارد.

اخیراً سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا گزارش کرده که در هر سال حدود دویست و چهل هزار خرابی و شکست در شبکه آبرسانی در آمریکا رخ می‌دهد. شکستگی خطوط لوله در میدوست از دویست و پنجاه عدد در هر سال به دوهزار و دویست عدد در هر سال، در طی یک دوره ۱۹ ساله افزایش یافت. بر طبق گزارشات سازمان زمین شناسی آمریکا، سیستمهای ناکارای توزیع آب، سبب هدرروی آب به میزان ۱،۷ تریلیون گالن در هر سال به ارزش ۲.۶ میلیارد دلار می‌گردند [6].

برای مثال در پنسیلوانیا، دو خرابی در سال ۲۰۰۹ رخ دادند. یک شکستگی در شبکه آبرسانی، گودالی با پهنای ۷،۶ متر در خیابان ایجاد کرد که سبب شد مسئولان آب و فاضلاب پیتسبورگ، خیابان را ببندند. مسئولان آب و فاضلاب پیتسبورگ، شکستگی در یک لوله ۸ اینچی پیدا کردند که سبب تخریب یک شبکه فاضلاب شد [7]. چند

^۲ Closed-Circuit Television (CCTV)

^۳ ground penetrating radar (GPR)

شامل نوع لوله، محیط اطراف آن و شرایط عملکردی آن هستند. لوله‌هایی که یکپارچگی ساختاری آن‌ها توسط خوردگی، فرسایش، نصب نامناسب یا عیوب تولید، کمتر شده است، زمانیکه تحت تنشهای عملیاتی و محیطی قرارگیرند، احتمال شکستگی آن‌ها زیاد است.

ویژگیهای دیگر لوله‌های فاضلاب بایستی در نظر گرفته شوند، به دلیل اینکه آن‌ها ممکن است سبب ایجاد مشکلاتی در طول بازرسی شوند. یکی از این ویژگیها میزان سطح آب در داخل لوله است. عموماً کمترین میزان سطح آب در لوله فاضلاب، حدود ۵٪ است [17]. مشکل دیگر، عدم نور در داخل لوله است که تأثیر سوء در کیفیت اندازه‌گیری‌های سنسور می‌گذارد (به‌خصوص زمانیکه سنسورهای نوری در داخل لوله به‌کار برده می‌شوند). همچنین، سطوح داخلی لوله‌ها صاف و هموار نیستند. زمانیکه روش‌هایی مانند فراصوتی و اسکن لیزری به‌کار می‌روند، زبری سطح می‌تواند دامنه سیگنالها را با پخش کردن پرتو (صوتی یا لیزری) کاهش دهد.

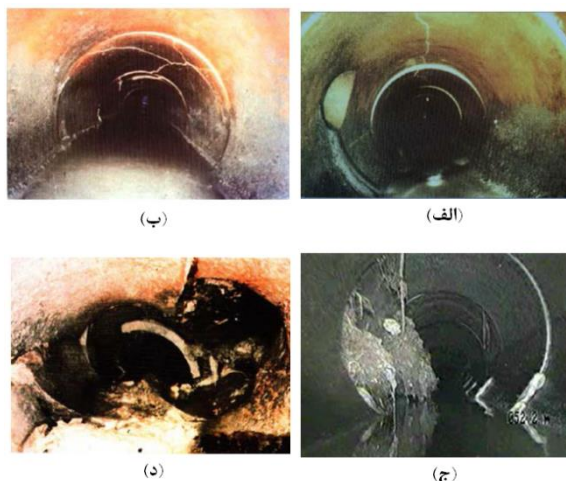
۴- روش‌های بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب

به‌واسطه توپولوژی و مشخصات هیدرولیکی متفاوت خطوط لوله فاضلاب، روش‌های تشخیص عیب گوناگونی در گذشته پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها عمدتاً بر طبق پدیده فیزیکی (الکترومغناطیسی- مکانیکی یا چشمی) که به‌کار می‌برند، می‌توانند دسته‌بندی شوند. توصیف کامل اصول، مزایا و محدودیتهای هر یک از این روش‌ها فراتر از محدوده این بحث است. خوانندگان علاقه‌مند می‌توانند به تعدادی از کتابها در زمینه آزمون غیرمخرب و پایش سلامت سازه مراجعه کنند [18]-[19].

انتخاب روش بازرسی عمدتاً به اندازه و جنس لوله بستگی دارد. برای مثال روش جریان گردابی (EC)، آزمون الکترومغناطیسی (EMT) و آزمون فراصوتی (UT) در لوله‌های فلزی استفاده می‌شوند. آزمون نشر آوایی (AE)، روش ایمپکت اکو (IE)، سونار و بازرسی چشمی در لوله‌های بتنی به‌کار می‌روند [20].

[10]-[11]. برای مثال در بریتانیا، حدود ۹۶٪ از دویست و پنجاه هزار کیلومتر خط لوله فاضلاب موجود، دارای قطر کمتر از یک متر هستند. معمولاً حفره‌هایی بنام منهول وجود دارند که از آجر یا بتن تقویت شده ساخته شده‌اند و از طریق این منهولها، لوله قابل دسترسی می‌شود [12].

علاوه بر جنس لوله و ویژگیهای هندسی آن، در نظر گرفتن ماهیت عیوب و نوع عیوبی که بایستی تشخیص داده شوند، مهم است. عیوب ساختاری در لوله‌ها شامل ترکها، عیوب افقی و عمودی، مفاصل باز، خمیدگی، نفوذ ریشه درخت و... هستند (شکل (۲)). اکثر عیوب ساختاری توسط عوامل خوردگی، حرکت خاک یا ریشه‌هایی که در داخل لوله نفوذ و رشد می‌کنند، ایجاد می‌شوند [13]. نوع خاکی که لوله را احاطه کرده نیز فاکتور مهمی است که بایستی در نظر گرفته شود. پایداری لوله فاضلاب تضعیف شده، به حفاظت جانبی که توسط خاک اطراف لوله ایجاد می‌شود، بستگی دارد [14].

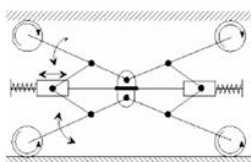


شکل ۲- عیوب در لوله‌های فاضلاب: الف- ترک طولی، ب- ترکهای چندگانه، ج- نفوذ ریشه درخت و د- فروپاشی و تخریب [15]

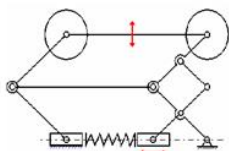
کلینر و همکارانش، تخریب و فروپاشی لوله‌ها را به تخریب سازه‌ای و تخریب داخلی دسته‌بندی کرده‌اند [16]. تخریب سازه‌ای لوله زمانی رخ می‌دهد که استحکام لوله و توانایی تحمل تنش لوله کاهش می‌یابد. تخریب داخلی هنگامی رخ می‌دهد که ظرفیت هیدرولیک یا کیفیت آب داخل لوله کاهش می‌یابد و خوردگی داخلی شدیدی رخ می‌دهد. مکانیزم‌های تخریب سازه‌ای متأثر از فاکتورهای زیادی

مانند [23] منحصرأً به مغناطیس وابسته‌اند. اگرچه طراحی این ربات‌ها طوری است که به قطر لوله وابسته نیستند، استفاده آن‌ها از آهنرباها محیط عملکردی‌شان را به لوله‌هایی که عمدتاً از مواد آهنی ساخته شده‌اند، محدود می‌کند.

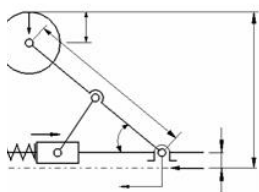
سایر ربات‌های چرخدار بازرسی لوله، از طریق فشردن چرخه‌هایشان بر روی سطح داخلی لوله با وسایل منفعل مانند فنرها یا با وسایل فعال مانند محرکها به‌کارگیری می‌شوند. مثالهایی از چنین ربات‌هایی شامل ربات Mogre [24]، ربات ارائه شده در مرجع [25] و ربات‌های MRINSPECT (شکل (۳)) [26] هستند. اگرچه هر یک از این ربات‌ها طرحهای متفاوتی دارند، همه آن‌ها اصول کلی یکسانی دارند که چرخه‌هایشان را بر روی سطح داخلی لوله می‌فشارند و به جلو حرکت می‌کنند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- الف- ربات MRINSPECT I، ب- ربات MRINSPECT II، ج- ربات MRINSPECT IV [26]

ربات کاوشگر^۸ یک ربات ماژولار است که برای بازرسی خطوط لوله گاز استفاده می‌شود (شکل (۴)). برخلاف

۵- ربات‌های بازرسی خطوط لوله

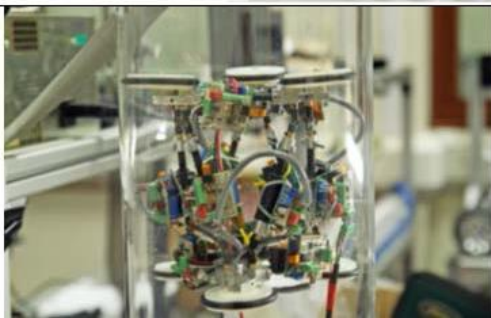
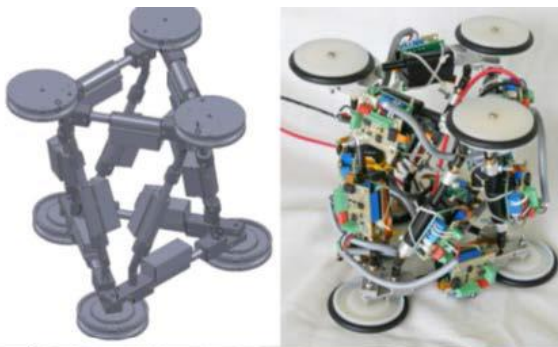
بدون یک روش مطمئن برای تعیین مکان دقیق عیب در یک خط لوله، بخشهای وسیعی از خط لوله باید حفاری شده و مورد بازرسی قرار گیرد. اگر لوله‌ها در یک ناحیه شهری واقع باشند، حفاری مشکلتر است و کار تعمیر می‌تواند تأثیر منفی روی کسب و کار و زندگی ساکنان محلی داشته باشد. یک ربات که توانایی حرکت در داخل لوله را داشته باشد، می‌تواند مکان دقیق عیوب را به‌دقت نشان دهد و حتی درگیر در کار تعمیر شود. ساخت چنین رباتی که توانایی عملکرد در حالیکه خط لوله فعال است را داشته باشد، مزیت صنعتی و تجاری زیادی خواهد داشت، به سبب آنکه تعمیرات و بازرسی هیچ خللی به کار خط لوله وارد نمی‌کند. اگرچه تعداد زیادی ربات وجود دارند که برای بازرسی لوله طراحی شده‌اند، اکثر این ربات‌ها برای کاربرد در لوله‌های خالی طراحی و ساخته شده‌اند و تأثیرات سیال پرفشار بر روی حرکت و پایداری ربات در نظر گرفته نشده‌اند. ربات‌های بازرسی خطوط لوله می‌توانند بر طبق روش‌های حرکتشان دسته‌بندی شوند: مانند ربات‌های چرخدار^۴، ربات‌های اینچ‌ورم^۵، ربات‌های اسنیک^۶ و ربات‌های پادار^۷.

۵-۱- ربات‌های چرخدار

ربات‌های چرخدار به‌واسطه روش‌های کنترل و طراحی ساده، بازده انرژی و پتانسیل کوچک‌سازی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. این ربات‌ها، برای برقراری تماس بین چرخه‌هایشان و دیواره لوله به وزنشان وابسته‌اند. مثالهایی از چنین ربات‌هایی در مراجع [21]-[22] بحث شده‌اند. اگرچه این ربات‌ها هیچ محدودیتی در ارتباط با قطر داخلی لوله‌ها ندارند، آن‌ها فقط می‌توانند در لوله‌های افقی یا نزدیک به حالت افقی حرکت کنند. چنین ربات‌هایی قادر به حرکت در لوله‌های عمودی نیستند و توانایی عملکرد در لوله‌هایی با نرخ بالای جریان سیال را ندارند.

به‌منظور غلبه کردن بر این مشکلات، در تعدادی از ربات‌های چرخدار بازرسی لوله از روش جذب چرخها به دیواره لوله استفاده شده است. مثالهایی از چنین ربات‌هایی

^۴ wheeled robots
^۵ Inchworm robots
^۶ Snake robots
^۷ Legged robots
^۸ explorer



شکل ۵- ربات اینچ‌ورم [30]

۳-۵- ربات‌های اسنیک و پادار

هر دوی ربات‌های اسنیک و پادار، درجه آزادی زیادی دارند که امکان رنج وسیعی از حرکت‌های مختلف را به آن‌ها می‌دهد. بنابراین، این ربات‌ها از محرک‌های بیشتری استفاده می‌کنند و سیستم‌های کنترل پیچیده‌تری دارند. مثالهایی از ربات‌های بازرسی پادار، در مراجع [31]-[32] اشاره شده‌اند و توانایی حرکت در خمها و تقاطع‌های لوله را دارند. ربات‌های اسنیک که برای بازرسی لوله استفاده می‌شوند، در مرجع [33] ارائه شده‌اند. این ربات‌ها از چندین ماژول تشکیل می‌شوند که با استفاده از مفاصل به همدیگر متصل می‌شوند.

۶- روش دوربینی متداول برای بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب

روش‌های بازرسی دوربینی بر اساس به‌کارگیری دوربین مدار بسته هستند. در اکثر کشورها این روش، یک روش متداول برای بازرسی داخلی لوله‌های آب و فاضلاب است [34]. روش بازرسی دوربینی شامل به‌کارگیری دوربین زوم و پن‌تیلت و سیستم نورپردازی است. این تجهیزات بر روی یک ربات نصب می‌شوند و در داخل خط لوله حرکت کرده و بازرسی سطح داخلی لوله را انجام می‌دهند (شکل ۶).

ربات‌های دیگر، ربات کاوشگر قابلیت به‌کارگیری در لوله‌های گاز پر فشار را دارد. هر قطعه ربات طوری طراحی شده است تا قطعات داخلی را از فشار گاز بالا در داخل لوله محافظت کند و شکل ربات طوری طراحی شده است تا مقاومت حداقل در برابر جریان گاز ایجاد کند [27].



شکل ۴- ربات کاوشگر [27]

۲-۵- ربات‌های اینچ‌ورم

کنترل ربات‌های اینچ‌ورم همانند ربات‌های چرخدار نسبتاً ساده است و امکان حرکت ربات در داخل لوله‌هایی با ویژگی‌های مختلف را فراهم می‌سازند. تعدادی از این ربات‌ها در مرجع [28] اشاره شده‌اند. این ربات‌ها از یک منبع لرزشی بعنوان نیروی محرک اصلی استفاده می‌کنند که با یک سیستم مکانیکی منفعل که فشار بر روی دیواره لوله ایجاد می‌کند، کوپل شده است. ماهیت ساده این ربات‌ها امکان کنترل آسان آن‌ها را فراهم می‌کند و معمولاً قطعات بسیار کمی دارند، اما توانایی عبور از تقاطع‌ها را ندارند.

سایر ربات‌های اینچ‌ورم از یک روش فعال برای ایجاد فشار بر روی دیواره لوله استفاده می‌کنند. اگرچه این ربات‌ها نسبت به انواع دیگرشان که از روش منفعل استفاده می‌کنند پیچیده‌تر هستند، کنترل بیشتری روی حرکتشان دارند و به‌طور راحت‌تری تغییر جهت می‌دهند. مثالهایی از چنین ربات‌هایی در مرجع [29] بحث شده‌اند. برخلاف ربات‌های چرخدار، ربات‌های اینچ‌ورم نمی‌توانند به‌طور پیوسته به جلو حرکت کنند بلکه گام به گام به جلو حرکت می‌کنند که این سبب می‌شود این ربات‌ها کندتر از ربات‌های چرخدار باشند. با این حال، ربات‌های اینچ‌ورم در موارد بالا رفتن از لوله عمودی کارا تر هستند (شکل ۵).

در برخی موارد، کاربرد دوربین در لوله فاضلاب به علت وجود موانع امکان پذیر نیست. عدم دید و نور ناکافی در داخل لوله‌ها، مشکل دیگر است. البته سیستم‌های نورپردازی جدید و دوربین‌های با حساسیت نوری بالا ارائه شده‌اند که تا حدی مشکل عدم دید را کاهش می‌دهند [36]. هنگامی که دوربین در داخل لوله پر از آب قرار می‌گیرد، این عامل سبب تغییر و انحراف در تصاویر دوربین می‌گردد. به همین دلیل میزان زیادی از لوله‌های فاضلاب (بین ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ کیلومتر در بریتانیا [5])، توسط روش بازرسی دوربینی نمی‌توانند بازرسی شوند. خالی کردن لوله‌ها از آب هم انتخاب مناسبی نیست، چون هزینه‌های بالایی داشته و سبب اختلال در عملکرد شبکه فاضلاب می‌گردد. مشکل دیگر روش بازرسی دوربینی متداول این است که این روش نمی‌تواند اندازه‌گیری کمی از اندازه عیوب موجود در داخل لوله و یا تورفتگیها و تغییر شکل‌های لوله را انجام دهد.

۷- سیستم‌های بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب بر اساس اسکن لیزری

در پروفایل‌سنجی، دقت الگوی نوری که توسط پروژکتور تولید می‌شود، برای کیفیت اندازه‌گیری‌ها ضروری است. به همین دلیل سیستم‌های نوری پیشرفته، یک سیستم نوری سازمان‌یافته را به عوض یک سیستم نورپردازی استاندارد (مثلاً لامپ هالوژن) به کار می‌برند. منابع نوری سازمان‌یافته قادرند الگوهای بهتری از نور را بر روی دیواره لوله تصویر کنند. این آرایش بعنوان روش پروفایل‌سنجی لیزری شناخته می‌شود و در اکثر موارد یک دیود لیزری به‌عنوان منبع نوری استفاده می‌شود [37]-[38].

با در نظر گرفتن پیکربندی وسیله‌ای که برای تولید رینگ نور به کار می‌رود، روش‌های پروفایل‌سنجی لیزری می‌توانند به دو صورت به کار برده شوند [39]. روش اول متشکل از یک مولد الگوی نوری است که در یک مرحله، رینگ کامل نور را بر روی دیواره لوله تصویر می‌کند. مولد‌های رینگ نوری معمولاً از یک مجموعه از لنزها و منشورها یا آینه‌های منعکس‌کننده مخروطی ساخته شده‌اند. نور منعکس شده، یک الگوی نور دایروی با پهنا ثابت را تشکیل خواهد داد.

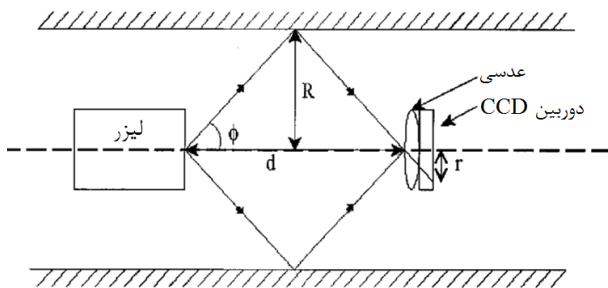
تجهیزات بازرسی دوربینی، توسط افراد مجربی که آموزش دیده‌اند به کارگیری و کنترل می‌گردند. تصاویر ویدیویی به دست آمده نیز توسط این افراد تفسیر می‌شوند. روش بازرسی دوربینی می‌تواند عیوبی نظیر ترک‌های طولی و محیطی، شکستگیها، تغییر شکل، فروپاشی و تخریب، مفاصل جابه‌جا شده یا باز، ساییدگی سطح یا خوردگی، نفوذ ریشه درخت، پوسته پوسته شدن و اتصالات جانبی را در سطح داخلی لوله شناسایی کند. هر لوله فاضلاب بر اساس تعداد و شدت عیوب، ارزیابی می‌شود. به عیوب تشخیص داده شده بر اساس شدت عیب، نمره اختصاص داده می‌شود. بر اساس این نمره‌ها، یک درجه وضعیت با مقیاس ۵-۱ محاسبه می‌شود [35]. روش بازرسی دوربینی تنها محدود به بازرسی قسمت خشک لوله و بالای سطح سیال است.



شکل ۶- سیستم دوربینی متداول برای بازرسی سطح داخلی لوله [15]

میزان اطلاعاتی که در روش بازرسی دوربینی تولید می‌شوند (تقریباً ۳۰ ساعت برای بازرسی ۱۰ کیلومتر خط لوله)، زیاد است که این یک مانع اصلی برای بازرسی خطوط لوله در مسافتهای زیاد است. در این روش، زمان مورد نیاز برای بازرسی لوله، به تعداد عیوب بستگی دارد. چون در هر عیب اپراتور بایستی ربات داخل لوله را متوقف و وضعیت را بررسی و ثبت کند. بنابراین زمان مورد نیاز برای بازرسی لوله‌ای با عیوب زیاد، طولانیتر از بازرسی لوله بدون عیب و سالم خواهد بود [14]. بنابراین، تخمین زمان و هزینه برای بازرسی‌های دوربینی متداول دشوار است.

لوله انجام می‌شود و همه نقاط با دقت یکسانی اندازه‌گیری می‌شوند.



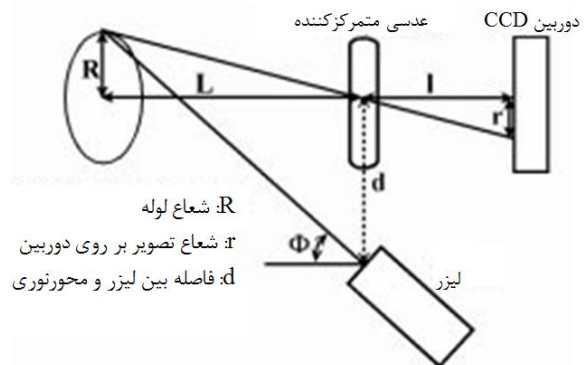
شکل ۸- آرایش متقارن در سیستم پروفایل‌سنجی لیزری (پروژکتور و دوربین در امتداد محور نوری یکسانی واقع شده اند) [39]

در سیستم‌های پروفایل‌سنجی متداول، آشکارگر و پروژکتور به صورت پهلو به پهلو قرار می‌گیرند (شکل (۷)). در نوع دیگر از سیستم‌های پروفایل‌سنجی، آشکارگر و پروژکتور بر روی محور نوری یکسانی قرار می‌گیرند (شکل (۸)) [41]. ساختار دیگری در ربات karo استفاده می‌شود [42]. این ربات بازرسی متشکل از یک پروژکتور نوری، یک دوربین برای بازرسی چشمی و یک دوربین برای اندازه‌گیری پروفایل لوله است. به وسیله یک سیستم لنز مناسب، این المان‌ها روی محور نوری مجازی یکسانی هستند.

سنسورهای پروفایل‌سنجی لیزری در مقایسه با ابزارهای پروفایل‌سنجی فراصوتی، دقت و رزولوشن بهتری در بازرسی لوله فاضلاب دارند. با این حال، دوربینها معمولاً برای بازرسی قسمتهای خشک لوله به کار می‌روند. در هنگام کار در آب یا مایعات دیگر، دوربین و سیستم‌های نورپردازی خاصی بایستی به کار روند (به علت نور ناکافی). دغدغه دیگر این است که روش‌های پروفایل‌سنجی تنها دیواره داخلی لوله را بازرسی می‌کنند و قادر به بازرسی سطح خارجی لوله نیستند. همانطور که قبلاً اشاره گردید یک مشکل استفاده از سیستم دوربینی متداول، عدم کالیبراسیون است که سبب دشوار شدن اندازه‌گیری و تشخیص دادن تغییرات در شکل لوله می‌شود. سیستم‌های پروفایل‌سنجی لیزری با تاباندن رینگ نور لیزر بر روی دیواره داخلی لوله، بر این مشکل فایق می‌آیند.

روش اسکن لیزری نقطه‌ای، پرتوهای نقطه به نقطه را به صورت متوالی می‌فرستد. یک مکانیزمی که یک سنسور حساس نوری و یک لیزر را به کار می‌برد، به طور متوالی می‌چرخد تا نقطه‌های نور تکی را عمود بر محور لوله منتشر کند و انعکاس آن‌ها را از سطح لوله اندازه‌گیری کند. ابزار پروفایل‌سنجی لوله تامس واتر یک نمونه از چنین روش تک نقطه‌ای است. این سیستم، بازرسی اندازه و شکل لوله را با گرفتن ۱۰۰۰ اندازه‌گیری در یک اسکن ۳۶۰ درجه‌ای در ۵ ثانیه انجام می‌دهد. رزولوشن این وسیله ۰.۲۵ میلی‌متر و قطر لوله‌هایی که می‌توانند با این روش اندازه‌گیری شوند، از ۲۲۵ میلی‌متر تا ۱.۵ متر تغییر می‌کند [40]. روش رینگ نور کامل، سریعتر از روش اسکن کردن نقطه به نقطه است اما دقت کمتری دارد [41].

در سیستم‌های پروفایل‌سنجی لیزری، محاسبات بر اساس مکان قرارگیری دوربین و سیستم نورپردازی و اصل مثلث بندی نوری^۹ هستند. شکل (۷) اصول اندازه‌گیری را نشان می‌دهد [37]-[38]. نقطه نور لیزر منعکس شده از دیواره لوله، بر روی آشکارگر CCD تصویر می‌شود و سیگنالی متناسب با مکان نقطه به وجود می‌آورد. اگر ارتفاع جسم هدف تغییر کند، نقطه تصویر نیز تغییر می‌کند.



شکل ۷- مسیر نوری و اصل مثلث بندی نوری در سیستم‌های پروفایل‌سنجی لیزری [39]

این محاسبات، زمانیکه منبع نورپردازی و آشکارگر بر روی محور نوری یکسانی قرار داشته باشند، ساده‌تر هستند. همانطور که در شکل (۸) نشان داده شده است به علت تقارن محور نوری، نورپردازی یکسانی بر روی سطح داخلی

^۹ Optical triangulation

لوله را تشخیص دهد. دوربین، رینگهای نور تصویر شده بر دیواره داخلی لوله را ضبط می‌کند و موانع و تغییر شکلهای لوله را تشخیص می‌دهد. نهایتاً، سنسورهای فراصوتی قادر به اندازه‌گیری موانع، ترکها و ضخامت دیواره لوله هستند. به‌منظور ترکیب کردن داده‌های این سنسورها، روش‌های ریاضی و منطق فازی به‌کار برده می‌شوند [43].

سیستم بازرسی PIRAT^{۱۰}، سیستم آزمایشگاهی دیگری است که توسط کمپانی ملبورن واتر استرالیا ساخته شده است (شکل (۱۰)). سیستم PIRAT، هندسه داخلی لوله فاضلاب را اندازه‌گیری کرده و این داده‌ها را تحلیل می‌کند. هندسه سطح داخلی لوله با توجه به سطح سیال موجود در داخل لوله، با ابزارهای پروفایل‌سنجی لیزری یا پروفایل-سنجی سونار اندازه‌گیری می‌شود. این سیستم، متشکل از یک دوربین، یک اسکنر لیزری برای بازرسی قسمت خشک لوله و یک اسکنر سونار برای بازرسی قسمت حاوی سیال لوله است. اسکنر لیزری با استفاده از دوربین، نور منعکس شده از سطح داخلی لوله را ثبت می‌کند. اسکنر سونار، اکوهای منعکس شده از سطح داخلی لوله را ثبت می‌کند. حداکثر رزولوشن به‌دست آمده با اسکنر لیزری، تقریباً ۱،۵ میلیمتر است [44]. دسته‌بندی و تشخیص اتوماتیک عیوب لوله، توسط نرم‌افزارهای هوش مصنوعی انجام می‌شوند. نهایتاً گزارش ارزیابی وضعیت نهایی لوله با یک تصویر گرافیکی به کاربر ارائه می‌شود.



شکل ۱۰- سیستم بازرسی PIRAT [44]

۸- سیستمهای بازرسی چندسنسوری برای بازرسی خطوط لوله آب و فاضلاب

هر روش بازرسی، ویژگیهای خاصی دارد که آن را مناسب برای تشخیص عیوب خاصی می‌کند. معمولاً تعداد محدودی از عیوب را با داده‌های به‌دست آمده از یک سنسور تکی، می‌توان تشخیص داد. در اکثر موارد با ترکیب کردن سیگنالهای چندین سنسور مختلف، می‌توان عیوب را تشخیص داد. در سالهای اخیر، سیستمهایی که چندین روش بازرسی متفاوت را ترکیب می‌کنند، پیشنهاد شده‌اند. داده‌هایی که توسط این سیستمها جمع‌آوری می‌شوند، معمولاً به‌طور مجزا ذخیره می‌شوند و پس از آنکه بازرسی کامل شد، ترکیب داده‌ها صورت می‌گیرد [42].

ربات Karo، یک ربات بازرسی چندسنسوری پیشرفته است که در یک موسسه تحقیقاتی و صنعتی آلمان ساخته شده است (شکل (۹)). ربات karo از دو واحد عملیاتی تشکیل شده است: ایستگاه نگهداری و کنترل متحرک و ربات متحرک که چندین سنسور هوشمند را حمل می‌کند. هر دو واحد توسط یک کابل به‌هم مرتبط شده‌اند. این ربات که برای بازرسی لوله‌هایی با حداقل قطر داخلی ۲۰۰ میلیمتر طراحی شده است، دارای طول ۸۰۰ میلیمتر و قطر ۱۶۰ میلیمتر است.

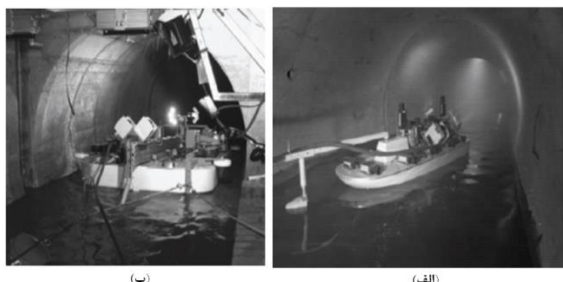


شکل ۹- ربات KARO [43]

ربات karo، دارای یک هد پن‌تیلت است که سنسورها را نگه می‌دارد. سنسورها شامل یک دوربین، سنسورهای فراصوتی و نیز سنسورهای میکروویو هستند. سنسور میکروویو می‌تواند عیوب شامل سوراخهای ناشتی و ترکها در

^{۱۰} Pipe Inspection Real-time Assessment Technique (PIRAT)

می‌کند. در مرحله سوم، یک وسیله بررسی عیوب، لوله فاضلاب را به‌طور کامل بازرسی می‌کند و با دقت بیشتر از SEK پهنای مفصل، انحرافات لوله و ترکها را اندازه‌گیری می‌کند. سیستم بازرسی SEK با چندین چراغ قوه برای نورپردازی تجهیز شده است. سیستم بازرسی SVM در مقایسه با SEK دقت بیشتری به‌دست می‌دهد. برای لوله‌های فاضلاب با قطر بزرگتر، SVM با سیستمهای شناور حمل می‌شود و برای لوله‌های با قطر کوچکتر از پلت‌فرمهای چرخدار استفاده می‌شود. سنسورهای برای تعیین موقعیت در لوله فاضلاب (سنسورهای مسافت‌یابی لیزری و سنسورهای جابه‌جایی) و سنسورهای برای بررسی عیوب (اسکنرهای لیزری و اسکنرهای فراصوتی) بر روی سیستم SVM نصب می‌شوند. اسکنرهای فراصوتی، اسکنرهای لیزری و سیستمهای دوربینی بر روی یک محور نصب می‌شوند و می‌توانند به دقت پروفایل داخل لوله را از مسافت تقریباً ۱٫۵ متری اندازه‌گیری کنند.



شکل ۱۲- الف- سیستم بازرسی SEK، ب- SVM [45]

علاوه بر سیستمهای ذکر شده، سیستم دیگری که چندین سنسور را برای بازرسی لوله آب و فاضلاب به‌کار می‌برد، سیستم بازرسی SAM^{۱۳} است که توسط یک موسسه تحقیقاتی آلمان ساخته شده است. سیستم بازرسی SAM شامل موارد زیر است [46]: ۱- یک سیستم دوربینی که امکان اندازه‌گیری سه بعدی شکل لوله (قطر و تغییر شکل لوله) را فراهم می‌کند، ۲- یک سنسور میکروویو که سنسوری چرخان برای بازرسی وضعیت خاک حول لوله فاضلاب است، ۳- یک سنسور ژئوالکتریکی برای شناسایی نقاط نشتی، ۴- سنسورهای هیدروشمیایی برای تشخیص نفوذ آب زیرزمینی، ۵- سنسورهای رادیاکتیو برای

سیستم بازرسی SSET^{۱۱}، یک ابزار بازرسی و جمع‌آوری داده است که تصاویر اسکن شده از داخل لوله و داده‌های چرخش از یک ژيروسکوپ مکانیکی سه‌محوره را به‌دست می‌آورد. یکی از ویژگیهای اصلی SSET، تحلیل تصویر اسکن شده برای مکانیابی خوردگی در مفاصل و دیواره‌های لوله است (شکل (۱۱)). در این سیستم بازرسی از روش‌های فازی برای شناسایی و دسته‌بندی عیوب استفاده می‌گردد.



شکل ۱۱- سیستم بازرسی SSET [15]

سیستم بازرسی دیگری که از دوربین و سنسور برای انجام بازرسی لوله بهره می‌گیرد، سیستم بازرسی tiscit است. این سیستم بازرسی، قسمت‌های خشک لوله را با دوربین و قسمت‌های حاوی سیال لوله را با سنسورهای سنسار بازرسی می‌کند. سنسورهای سنسار و دوربینها بر روی پلت‌فرم یکسانی نصب می‌شوند و کاربرد آن در لوله‌هایی با قطر بیش از ۶۰۰ میلی‌متر امکان‌پذیر است. در این سیستم بازرسی، زمان مورد نیاز برای انجام یک اسکن ۳۶۰ درجه‌ای، کمتر از یک ثانیه است.

سیستم بازرسی دیگری که دوربین و سنسور را ترکیب می‌کند، سیستم بازرسی SEK^{۱۲} است. این سیستم بازرسی در آلمان ساخته شد تا لوله‌های فاضلاب را بازرسی کند (شکل (۱۲)). سیستم بازرسی SEK، امکان بازرسی لوله‌های فاضلاب زیرزمینی با قطرهای بزرگتر را که عموماً به خاطر پر بودن حجمشان غیرقابل دسترسی‌اند، فراهم می‌سازد [45]. بازرسی شامل سه مرحله است. در مرحله اول، SEK در لوله فاضلاب برای بازرسی به‌کار گرفته می‌شود. سیستم SEK کل خط لوله فاضلاب را بازرسی و اندازه‌گیری می‌کند و بازرسیهای دوربینی را انجام می‌دهد و عیوب بزرگ مانند فرسایش، رسوبات، موانع و نشتیها را ثبت می‌کند. در مرحله دوم، یک وسیله تمیز کننده، رسوباتی که توسط SEK شناسایی شده‌اند را برطرف می‌کند و دیواره لوله را تمیز

^{۱۱} Sewer Scanner and Evaluation Technology (SSET)

^{۱۲} cable-guided swimming system

^{۱۳} Sewer Assessment by Multi-sensors (SAM)

<http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600f07015/600f07015.pdf>

[7] Sewer collapse closes chateau street on north side, 2009. URL <http://www.post-gazette.com/pg/09134/970143-100.stm>.

[8] URL <http://latimesblogs.latimes.com/lanow/2009/09/coldwatercanyon-could-be-closed-for-3-days-due-to-destructive-water-main-break.html>.

[9] Misiūnas, D. (2008). *Failure monitoring and asset condition assessment in water supply systems*. Vilnius Gedimino technikos universitetas.

[10] Gokhale, S. R., Abraham, D. M., Iseley, T. (1997). Intelligent sewer condition-Evaluation technologies. An analysis of three promising options. In *North American No-Dig 1997 Conf.* (pp. 253-265).

[11] Rome, E., Hertzberg, J., Kirchner, F., Licht, U., Christaller, T. (1999). Towards autonomous sewer robots: the MAKRO project. *Urban Water*, 1(1), 57-70.

[12] Schilling, K., Roth, H. (1999). Navigation and Control for Pipe Inspection and Repair Robots. *IFAC Proceedings Volumes*, 32(2), 8446-8449.

[13] Wirahadikusumah, R., Abraham, D. M., Iseley, T., Prasanth, R. K. (1998). Assessment technologies for sewer system rehabilitation. *Automation in Construction*, 7(4), 259-270.

[14] Read, G. F., Vickridge, I. (1997). Sewers: Rehabilitation and New Construction: Repair and Renovation, Butterworth-Heinemann, London, UK.

[15] Sewer Scanner and Evaluation Technology. URL www.new-technologies.org.

[16] Kleiner, Y., Adams, B. J., Rogers, J. S. (2001). Water distribution network renewal planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(1), 15-26.

[17] Pace, N. G. (1994). Ultrasonic surveying of fully charged sewage pipes. *Electronics & communication engineering journal*, 6(2), 87-92.

[18] Adams, D. (2007). *Health monitoring of structural materials and components: methods with applications*. John Wiley & Sons.

[19] Bray D.E. (1997). *Nondestructive Evaluation. A Tool in Design, Manufacturing, and Service*. CRC Press, Boca Raton, Fla, USA.

[20] Trenchless Technology Network, Underground Mapping, Pipeline Location Technology and Condition Assessment, Infrastructure Engineering and Management Research Centre, The University of Birmingham, (2002).

[21] Ong, J. K., Kerr, D., Bouazza-Marouf, K. (2003). Design of a semi-autonomous modular robotic vehicle for gas pipeline inspection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 217(2), 109-122.

[22] Kuntze, H. B., Haffner, H. (1998, May). Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on* (Vol. 2, pp. 1773-1778). IEEE.

[23] Täche, F., Fischer, W., Moser, R., Mondada, F., Siegwart, R. (2007). Adapted magnetic wheel unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures. In *advanced intelligent mechatronics, 2007 IEEE/ASME international conference on* (No. LSRO-CONF-2007-013, pp. 1-6). IEEE Press.

[24] Fujiwara, S., Kanehara, R., Okada, T., Sanemori, T. (1993). An articulated multi-vehicle robot for

تشخیص دادن نشیتهای فاضلاب، سوراخهای لوله فاضلاب و اریفیسهای کوچک در شبکه آب‌رسانی و ۶- سیستمهای آکوستیک که برای تشخیص دادن ترکها و تعیین وضعیت اتصالات و انحنای لوله مناسب می‌باشند.

۹- نتیجه‌گیری

بازرسیهای مکرر و پایشهای منظم، برای سالم نگذاشتن خط لوله ضروری‌اند. خطوط لوله بعنوان اقتصادی‌ترین روش انتقال گاز، نفت، آب، فاضلاب یک بخش لاینفک از زندگی ما شده‌اند. به‌رحال خطوط لوله همواره در معرض آسیب و فرسوده شدن هستند که سبب اتلاف انرژی، آلودگی محیط زیست و بسیاری از حوادث دیگر می‌شوند. نگهداری و بازرسی منظم خطوط لوله، برای در حال کار نگهداشتن آن‌ها ضروری است. در این مقاله مروری، بازرسی خطوط لوله با استفاده از روش‌های مبتنی بر دوربین و ربات و پیشرفتهای حاصل شده در این زمینه مرور گردید. سیستمهای بحث شده در اینجا مزایای زیادی دارند و همچنین تعدادی محدودیت دارند. بازرسی خطوط لوله با دوربین، اسکن لیزری یا سونار، می‌تواند با افزایش دادن رزولوشن تصویر بهبود داده شود. با این وجود، این روش‌ها محدود به تشخیص عیوب سطحی هستند. رشد و توسعه روش‌های پردازش تصویر، تحلیل تصاویر به‌دست آمده را اتوماتیک خواهد کرد.

10- منابع

[1] Lynch, J. P., Loh, K. J. (2006). A summary review of wireless sensors and sensor networks for structural health monitoring. *Shock and Vibration Digest*. 38(2), 91-130.

[2] Doebling, S. W., Farrar, C. R., Prime, M. B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest*. 30(2), 91-105.

[3] Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., Park, G. (2007). The fundamental axioms of structural health monitoring. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 463, No. 2082, pp. 1639-1664). The Royal Society.

[4] Iyengar, S. S., Boroojeni, K. G., Balakrishnan, N. (2014). *Mathematical Theories of Distributed Sensor Networks*. Springer.

[5] Pace, N. G. (1994). Ultrasonic surveying of fully charged sewage pipes. *Electronics & communication engineering journal*, 6(2), 87-92.

[6] US Environmental Protection Agency, Addressing the challenge through innovation, 2007. URL

Systems, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on (pp. 2609-2614). IEEE.

[34] Water Environment Research Foundation, 2009. URL <http://www.werf.org/AM/CustomSource/Downloads/uGet-ExecutiveSummary.cfm?FILE=ES-01-CTS-7.pdf&Content-FileID=1960>.

[35] Sarshar, N., Halfawy, M. R., Hengmeechai, J. (2009). Video processing techniques for assisted CCTV inspection and condition rating of sewers. *Journal of Water Management Modeling*, 129-147.

[36] Morici, P. (1997). Small cameras: diagnosing sewer laterals quickly and easily. *Trenchless Technol.*, 6(10), 40-45.

[37] Roberts, R. (1999). Laser profilometry as an inspection method for reformer catalyst tubes. *Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonic (Germany)*, 4(2).

[38] Applications of laser profilometry for boiler tube inspection, vol.3, no. 7, July 1998.

[39] Zhuang, B. H., Zhang, W., Cui, D. Y. (1998). Noncontact laser sensor for pipe inner wall inspection. *Optical Engineering*, 37(5), 1643-1648.

[40] Thames Water/OMC Pipe Profiling Tool. URL http://www.optical-metrology-centre.com/gallery_sewer_profiling.htm.

[41] Hartrumpf, M., Munser, R. (1997). Optical three-dimensional measurements by radially symmetric structured light projection. *Applied Optics*, 36(13), 2923-2928.

[42] Doyle, J. (1999). The expanding use of lasers in nondestructive testing. *Materials evaluation*, 57(4), 426-430.

[43] Kuntze, H. B., Schmidt, D., Haffner, H., Loh, M. (1995). KARO-A flexible robot for smart sensor-based sewer inspection. In *Proc. Int. Conf. No Dig'95, Dresden, Germany*, 19 (pp. 367-374).

[44] CSIRO annual report, 1994-95.

[45] Teichgräber, B., Stemplewski, J., Althoff, H., Elkmann, N. (2006). Remote controlled inspection device for large sewers. *Water Practice and Technology*, 1(4), wpt2006080.

[46] Eiswirth, M., Frey, C., Herbst, J., Jacobasch, A., Held, I., Heske, C., Wolf, L. (2001). Sewer assessment by multi-sensor systems. In: *Proceedings of the 2nd World Water Congress of the International Water Association*.

inspection and testing of pipeline interiors. In *Intelligent Robots and Systems' 93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 1, pp. 509-516). IEEE.

[25] Li, P., Ma, S., Li, B., Wang, Y. (2008). Design of a mobile mechanism possessing driving ability and detecting function for in-pipe inspection. In *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on* (pp. 3992-3997). IEEE.

[26] Roh, S. G., Lee, J. S., Moon, H., & Choi, H. R. (2009). In-pipe robot based on selective drive mechanism. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 7(1), 105-112.

[27] Schempf, H., Mutschler, E., Gavaert, A., Skoptsov, G., Crowley, W. (2010). Visual and nondestructive evaluation inspection of live gas mains using the Explorer™ family of pipe robots. *Journal of Field Robotics*, 27(3), 217-249.

[28] Wang, Z., Gu, H. (2008). A bristle-based pipeline robot for ill-constraint pipes. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(3), 383-392.

[29] Aracil, R., Saltarén, R., Reinoso, O. (2003). Parallel robots for autonomous climbing along tubular structures. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(2), 125-134.

[30] Bekhit, A., Dehghani, A., Richardson, R. (2012). Kinematic analysis and locomotion strategy of a pipe inspection robot concept for operation in active pipelines. *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, 1929, 2724.

[31] Neubauer, W. (1994). A spider-like robot that climbs vertically in ducts or pipes. In *Intelligent Robots and Systems' 94. Advanced Robotic Systems and the Real World', IROS'94. Proceedings of the IEEE/RSJ/CI International Conference on* (Vol. 2, pp. 1178-1185). IEEE.

[32] Zagler, A., Pfeiffer, F. (2003). "MORITZ" a pipe crawler for tube junctions. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on* (Vol. 3, pp. 2954-2959). IEEE.

[33] Wright, C., Johnson, A., Peck, A., McCord, Z., Naaktgeboren, A., Gianfortoni, P., Choset, H. (2007). Design of a modular snake robot. In *Intelligent Robots and*

A Review on Inspection Methods of Sewer Pipelines

Turaj Azizzadeh¹, Mohammad Riahi^{2*}

1- Ph.D Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and technology, Tehran

2- Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and technology, Tehran

*riahi@iust.ac.ir

Abstract:

Pipelines are widely used in transporting large quantities of water and sewage over long distances. These valuable infrastructures attract public attention only when they fail. The quantitative and early detection of defects in sewer pipelines is very important in order to avoid severe consequences. In many countries, sewer pipeline inspection is usually carried out using CCTV (Closed-Circuit TV) cameras and off-line human surveys through raw image assessment for failure identification. CCTV-based techniques have some limitations that restrict their implementation. One of the disadvantages of CCTV-based techniques is the lack of visibility in the interior of the pipes. The other disadvantage of CCTV-based techniques is the poor quality of the obtained images because of difficult lighting conditions. In consequence, CCTV-based techniques can only detect gross defects reliably. In recent decades, thermography, microwave, laser, and sonar-based techniques have been proposed to complement the conventional CCTV-based technique and to improve inspection results. Also, new inspection devices employing multiple sensors and being capable of carrying out remote sewer inspection tasks have been proposed. This paper presents an overview of the conventional and novel inspection technologies for sewer pipelines. Furthermore, different types of robots for in pipe inspection tasks are discussed.

Keywords: Sewer pipelines, CCTV-based inspection technique, Multi-sensor inspection technique, Pipe inspection robots