



اندازه‌گیری، تعیین پروفیل سطح مقطع و مدل‌سازی هندسی لوله به کمک رابط برنامه‌نویسی کاربردی

محمدرضا حسن‌زاده تلوقی¹، محسن شاکری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
* بابل، صندوق پستی 16471-47148، shakeri@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 16 شهریور 1394
پذیرش: 08 آذر 1394
ارائه در سایت: 29 آذر 1394
کلید واژگان:
اندازه‌گیری
سطح مقطع لوله
پروفیل‌گیری
مادون قرمز
سالیدورکز API

چکیده

منابع اصلی جمع‌آوری اطلاعات از وضعیت لوله‌های فاضلاب در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، استفاده از دوربین‌های CCTV است که اطلاعاتی قطعی ارائه نمی‌کنند. مدیریت بر تاسیسات فاضلاب نیازمند داشتن اطلاعات مطمئن از وضعیت تجهیزات است. لذا ضروری است تا اطلاعات مطمئن به صورت کمی و هندسی از وضعیت لوله‌ها پس از نصب و حین خدمت‌رسانی، وجود داشته باشد. اندازه‌گیری میزان گرفتگی خطوط لوله‌های فاضلاب همواره کار مشکلی بوده است. تاکنون اقدامات مختلفی برای بهبود و کاربرد تکنیک‌های مختلف اندازه‌گیری گرفتگی لوله صورت گرفته است ولی بیشتر آن‌ها به مرحله کاربردی، واقعی و فراگیر نرسیدند. تعیین پروفیل یک روش جدید در این ارتباط است. تکنیک جدیدی که در این مقاله ارائه شده است با هدف اندازه‌گیری سطح مقطع و به دست آوردن پروفیل مقطع لوله‌ها است. این روش شامل دو حسگر مادون قرمز و یک سروموتور است که بر یک مکانیزم ابزار اندازه‌گیری متصل می‌باشد. مجموعه در داخل یک لوله فاضلاب قرار می‌گیرد و مختصات نقاط مقطع لوله را اندازه‌گیری می‌کند. اطلاعات خام اندازه‌گیری شده به وسیله سروموتور و حسگرها، به خارج لوله انتقال یافته و پس از پردازش، در قالب فایل متنی ذخیره می‌شود. با استفاده از بسته نرم‌افزاری توسعه یافته و پیشنهادی در محیط نرم‌افزار سالیدورکز، اطلاعات ذخیره شده، به صورت پروفیل دوبعدی سطح مقطع لوله، رسم و در ادامه آن مدل سه‌بعدی لوله تحت بازرسی در دسترس خواهد بود و پارامترهای مختلف لوله در هر مقطع دلخواه قابل اندازه‌گیری است.

Measuring, cross-sectional profiling and geometrical modeling of the pipe by an application programming interface

Mohammadreza Hassanzadehtalouki, Mohsen Shakeri*

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran.
* P.O.B. 47148-16471 Babol, Iran, shakeri@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 07 September 2015
Accepted 29 November 2015
Available Online 20 December 2015

Keywords:
Measurement
Pipe Cross-section
Profiling
Infrared
Solidworks API

ABSTRACT

CCTV cameras are the main sources of inspecting sewer pipeline conditions, although they do not provide decisive information in both developing and developed countries. Managing sewage installations requires reliable quantitative and geometrical data on the conditions of pipes both in-service and after installation. Measuring the rate of sewage blockage has always been challenging. Various attempts have been made to develop and apply different techniques for the determination of pipe blockage, but most of them were not practical or comprehensive. Pipe profiling could be a novel method in this regard. The method proposed in this paper would be able to measure both the cross-section and profile of sewer pipes. This includes two infrared sensors and a servomotor attached to a measurement device mechanism. The set enters a sewer pipe and measures the coordinates of pipe cross-section points. Then, the collected raw data are transferred outside in order to be processed and later saved in a text file format. The saved data will be depicted as pipe cross-section 2D profile using the suggested and developed API package at SOLIDWORKS environment, which in turn will result in the availability of a 3D model of under-inspection pipes. It should be mentioned that different parameters of every desired pipe cross-section will be measurable as well.

1- مقدمه

شبکه و ایجاد خسارت می‌شوند. از این رو لازم است برای نگهداری از این تجهیزات و اطمینان از صحت عملکرد، به طور منظم مورد بازرسی قرار گیرند. بازرسی وضعیت و اندازه‌گیری میزان گرفتگی و انسداد خطوط لوله‌های فاضلاب همواره کار مشکلی بوده است. در سطح بین‌المللی، بازرسی‌های

امروزه در کشورهای در حال توسعه و یا توسعه‌یافته، شبکه‌های فاضلاب، در حال نصب بوده و یا نصب شده‌اند. این شبکه‌ها در حین خدمت‌رسانی و یا پس از نصب و راه‌اندازی، دچار عیوبی می‌شوند که موجب بروز نارسایی در

Please cite this article using:

M. Hassanzadehtalouki, M. Shakeri, Measuring, cross-sectional profiling and geometrical modeling of the pipe by an application programming interface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 72-80, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Hassanzadehtalouki, M. Shakeri, Measuring, cross-sectional profiling and geometrical modeling of the pipe by an application programming interface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 72-80, 2015 (in Persian)

یکپارچه بازرسی غیر مخرب برای لوله‌های آب مدفون شده در نظر گرفته شده است. حسگر لیزر به‌عنوان پروفیل‌گیرنده برای بازرسی و تصویربرداری در ارزیابی خط لوله، بر پیگ‌های هوشمند و پلتفرم‌های رباتیک مختلف از جمله ساب‌سی، کول‌ویژن، کیوز، ربات‌های ارائه شده توسط مرکز اندازه‌گیری نوری و شرکت هنکور و مدل پیشنهاد شده به وسیله دتمر و همکاران استفاده شده است [4-9]. لیزر پروفیل‌گیرنده می‌تواند در دو حالت کاری عمل کند. در حالت اول، حلقه لیزر بر سطح داخل لوله افکنده شده و دوربین بازرسی نوارهای داخل لوله را به صورت ویدئویی می‌گیرد. واحد پس پردازش، نوار نور لیزر را از تصویر ویدئویی استخراج و پروفیل را باسازی و سطح لوله را مشخص می‌کند. این حالت به وسیله دوران و همکاران، متسوی و همکاران، ژنگ و همکاران و جانسون و همکاران تحت پژوهش قرار گرفت [10-13]. حالت دوم اندازه‌گیری مستقیم فاصله را که قادر به تعیین ناهنجاری‌های هندسی و سطح است پیاده‌سازی می‌کند، اگرچه اصول اندازه‌گیری فاصله ممکن است متفاوت باشد [4,14,15].

روش معمول برای ردیابی موقعیت و جهت پلتفرم، استفاده از یک دستگاه موقعیت‌یاب نسبی مانند ژيروسکوپ یا شیب‌سنج است [8]. به‌هرحال، این نوع از ردیابی مستعد خطاهای بسیاری است. بنابراین، حسگر لیزر برای هدف ردیابی استفاده شده است. در پژوهش اونیکریشن و همکاران، یک نور مخروطی لیزر که بر دیوار لوله افکنده شد با دوربین تصویر برداری شد. ویژگی‌های تصویر، یعنی مرکز و شکل، استخراج و با ویژگی‌های موجود در پایگاه داده برای برآورد موقعیت نسبی و جهت تطابق داده شد [16]. نصیرایی و همکاران، از اسکنر لیزر چرخان بر نمونه ربات‌شان استفاده کردند، تا آدم‌روهای لوله و اتصال‌ها را به‌عنوان نشانه نوبری شناسایی کنند [17,18]. اطلاعات اسکن لیزری از طریق اطلاعات تصویری که با استفاده از دوربین چشم ماهی⁵ برای پیاده‌سازی تشخیص خرابی لوله گرفته می‌شود، به دست می‌آید [17]. خط پرتو لیزر که بر سطح داخلی لوله افکنده شده است با تطابق دادن الگوی خط به‌منظور شناسایی نشانه، مانند زانویی‌ها و انشعاب‌ها، استفاده شد [19,20].

ژنگ و همکاران ظرفیت استفاده از روش برش نوری دایره‌ای را برای بازرسی دیوار داخلی لوله ارائه کردند [21]. سیستم پیشنهادی شامل یک منبع نوری دیود لیزر، یک مولد الگوی حلقوی نوری و یک دوربین CCD⁶ بود. با این حال، بحث درباره نتایج بازرسی در انتشار آن‌ها با جزئیات در دسترس نبود. دوران و همکاران، از یک تصویرکننده لیزر به همراه منتشرکننده⁷ استفاده کردند تا پروفیل نوری را بر سطح داخلی لوله‌های فاضلاب بیفکنند [10]. یک دوربین CCD، حلقه افکنش‌ها⁸ را گرفته و یک شبکه عصبی⁹ برای تمایز دادن شکل عیب‌ها آموزش داده شد. یک امتیاز این روش این است که از تغییرات شدت افکنش برای تشخیص عیب‌ها بهره می‌برد و از ناهمراستایی با خط مرکزی اثر نمی‌پذیرد. سینها و همکاران کاربرد الگوریتم عصبی فازی برای دسته‌بندی عیب‌هایی که از طریق CCTV¹⁰ است را ارائه دادند [22]. باین‌حال، یادگیری اکتشافی مانند رویکرد مبتنی بر شبکه عصبی نیازمند اطلاعات آموزشی خوب است که ممکن است در عمل همیشه در دسترس نباشد. ونگ و همکاران، استفاده از روش توزیع نقطه لیزر را پیشنهاد کردند، که در آن پرتوهای چندگانه لیزر به‌طور هم‌زمان

بصری¹ با استفاده از ارابه‌های² مجهز به دوربین یا با استفاده از روش‌های سنتی و دستی صورت می‌گیرد. طی انجام عملیات بازرسی بصری، اپراتور با هدایت ارابه حامل دوربین به داخل شبکه، به بازرسی شبکه می‌پردازد. اپراتور می‌تواند وجود ترک، اتصالات معیوب و مصالح به‌جامانده را از طریق مشاهده فیلم ارسالی از دوربین ارابه تشخیص دهد. هرچند انجام عملیات بازرسی بصری از شبکه‌های در حال بهره‌برداری با هر سنی مورد نیاز است، امکان وجود تمامی این عیوب در شبکه‌های فاضلاب تازه نصب شده نیز وجود داشته و انجام عملیات بازرسی بصری قبل از تحویل گرفتن شبکه از پیمانکار بسیار حیاتی است.

طبق بررسی عیوب محتمل از دیدگاه اهمیت و درصد وقوع در شبکه‌های تازه نصب شده و با توجه به هزینه‌ها و عواقب تحمیلی ناشی از هر عیب، انجام عملیات بازرسی بصری قبل از تحویل موقت، در صرفه‌جویی منابع کشور بسیار حائز اهمیت است. با توجه به نتایج تحقیقات صورت گرفته به وسیله ارباب تفتی و همکاران، بیان شد که با صرف هزینه کمتر از 0.4 درصد هزینه اجرا، جهت انجام عملیات بازرسی بصری، می‌توان از ضررهای احتمالی شرکت فاضلاب، که بین 15 تا 20 درصد هزینه اولیه است، جلوگیری کرد. همچنین بیان شد که در مجموع با توجه به اینکه درصد وقوع عیوب در شبکه‌های تازه نصب شده بالاست و از آنجایی که هزینه انجام بازرسی بصری نسبت به هزینه اجرا بسیار ناچیز است، لزوم انجام این بازرسی برای 100 درصد شبکه تازه نصب شده کاملاً مشهود و منطقی است [1].

اطلاعات به دست آمده به وسیله اپراتور، به صورت کمی نبوده و قابلیت اطمینان و استفاده به نحو مطلوب را در حوزه مدیریت، تصمیم‌گیری و طراحی شبکه‌های فاضلاب ندارند. در این مطالعه، اندازه‌گیری سطح مقطع و دستیابی به پروفیل مقطع لوله با استفاده از روشی جدید بررسی می‌شود. به‌جای استفاده از نور لیزر، حسگر مادون قرمز برای اندازه‌گیری مستقیم فاصله و تعیین پروفیل لوله، به کار برده شد. این چنین ابزار اندازه‌گیری، هم برای هم‌راستا کردن خط مرکزی و هم برای تشخیص ناهنجاری‌های سطح استفاده شد.

این مقاله شناسایی ناهنجاری‌های سطح داخلی لوله و دستیابی به پروفیل سطح مقطع و مدل‌سازی لوله با استفاده از اندازه‌گیری دقیق فاصله را هدف قرار داده است. در بخش دوم این مقاله پیشینه پژوهش و در بخش سوم طراحی و ساخت سامانه ارائه شدند. در بخش چهارم به توسعه نرم‌افزار مهندسی و الگوریتم ورودی و خروجی پرداخته شد. در بخش پنجم تست موردی و بحث روی نتایج ارائه و نتیجه‌گیری نیز در بخش ششم ارائه شده است.

2- پیشینه پژوهش

بازرسی غیر مخرب³ یا تست غیر مخرب⁴ نقش مهمی را برای ارزیابی عملکرد و وضعیت لوله ایفا می‌کند. ارزیابی وضعیت لوله معمولاً نیازمند ورودی‌های متعددی از بازرسی غیر مخرب است [2,3]. به این معنی که هر تکنیک بازرسی غیر مخرب محدودیت خود را دارد؛ بنابراین، در یک بازرسی، برای ارائه اطلاعات تکمیلی، تکنیک‌های متعدد ترجیح داده می‌شوند.

یک پلتفرم رباتیک خودمختار می‌تواند ارابه‌ای باشد که چندین حسگر بازرسی غیر مخرب را به همراه داشته و بازرسی لوله را انجام دهد. اندازه‌گیری دامنه با لیزر یکی از تکنیک‌های بازرسی غیر مخرب است که در یک سیستم

5- Fish Eye Camera
6- Charge-Coupled Device
7- Diffuser
8- Projections
9- Neural Network
10- Closed-circuit television

1- Visual Inspections
2- Crawlers
3- NDI
4- NDT

برابر ضریب زبری منینگ¹، R_h برابر شعاع هیدرولیک² (طول) و S برابر شیب³ لوله است. کاهش در سطح مقطع یا شیب لوله منجر به کاهش متناسب در ظرفیت جریان خواهد شد.

خرابی به دلیل ظرفیت هیدرولیکی اغلب علامتی از عیوبی مانند عیوب ساختاری است. خرابی ساختاری به دلیل عیوب دیواره لوله و یا پوشش خاک که برای حمایت لوله استفاده می‌شود، رخ می‌دهد. به‌طور کلی نوع عیبی که مربوط به خرابی ساختاری می‌شود شامل ترک‌ها، ناهمراستایی یا جابه‌جایی اتصال‌ها، تغییر شکل لوله، درپوش و قاب ترک‌دار آدم‌روها و خوردگی داخلی و خارجی است. خوردگی داخلی به‌وسیله تشکیل سولفید هیدروژن رخ داده و خوردگی خارجی نیز مربوط به خاک است. لوله به‌وسیله خاک پوشش داده می‌شود که شامل بستر خاک و پوشش پشتیبانی است. بسترسازی با خاک همانند پی برای لوله عمل کرده و بار قائم را اطراف خارجی دیواره لوله توزیع می‌کند. لوله در معرض بارهای زنده و بارهای متمرکز بر خود است. از دست رفتن بستر می‌تواند منجر به خیز لوله در آن منطقه شود، که ممکن است انحراف لوله، تغییر شکل و ترک‌دار شدن در جهت طولی را در پی داشته باشد. بار ترافیکی افزایش‌یافته یا از دست دادن پوشش خاک، عوامل دیگر خرابی است.

نوع و درجه خرابی با توجه به جنس لوله متفاوت است. برخی از جنس‌های لوله (مانند $PCCP^4$) مستعد ابتلا به خرابی ناگهانی‌اند؛ درحالی‌که جنس‌های دیگر به تدریج خراب می‌شوند و به‌راحتی با بازرسی بصری قابل‌شناسایی‌اند. حالت‌های متداول خرابی برای انواع مختلف جنس لوله که در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب استفاده می‌شود در زیر آورده شده است.

لوله آهنی (آهن داکتیل، چدن و فولاد) - حالت خرابی اول برای لوله‌های فلزی، خوردگی داخلی و خارجی است که منجر به شکستگی و سوراخ شدن دیواره لوله می‌شود. لوله‌های چدنی، به دلیل ترد بودن مستعد ابتلا به ترک‌خوردگی است و لوله‌های فولادی با قطر بزرگ نیز نسبت به فروپاشی با خوردگی حساس‌اند.

لوله‌های بتنی ($PCCP^5 - RCP^5$) - اغلب عامل مهم در خرابی ساختاری لوله‌های بتنی، خوردگی است. به‌طور معمول در نوع $PCCP$ پس از آن‌که سطح دیواره داخلی لوله به درجه در معرض خوردگی قرار گرفتن مسلح کننده‌های فولادی برسد، خراب می‌شود. با خورده شدن، مسلح کننده‌های فولادی، شروع به متورم شدن و شکسته شدن در اطراف بتن می‌کنند و منجر به فروپاشی می‌شود. $PCCP$ مکانیزم خرابی متمایزی دارد. خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که سیم‌های پیش تنش داده‌شده، در نتیجه خوردگی یا آسیب مستقیم فیزیکی به لوله بشکنند.

لوله‌های پلاستیکی (پلی ونیل کلراید (PVC^6) ، پلی‌اتیلن چگالی بالا $(HDPE^7)$) - حالت خرابی اولیه لوله پلاستیکی ترک‌دار شدن تحت تنش محیطی است، طوری‌که به دلیل توسعه و گسترش تنش در لوله تغییر شکل داده‌شده یا به‌وسیله رشد آرام ترک رخ می‌دهد؛ این پدیده زمانی به وقوع می‌پیوندد که لوله در معرض تنش کششی برای مدت طولانی به کار گرفته‌شده باشد. همچنین اتصال‌های نشت‌دار نیز می‌تواند در خرابی‌های لوله‌های پلاستیکی نقش داشته باشند.

بر روی سطح لوله تصویر می‌شود [23]. مدل آبی برای محاسبه مختصات این نقطه‌های لیزری توسعه داده و کانتور سه‌بعدی ساخته شد. با این حال، این کاربرد، بازرسی از سطح داخلی لوله را هدف قرار نداد. همچنین بهره‌گیری از دامنه یاب لیزری برای بازرسی تونل راه‌آهن گزارش شده است [24]. محدودیت‌های سیستم‌های تجاری که در حال حاضر در دسترس است ممکن است اندازه‌های نادقیق از لوله را تولید کنند و به دلیل خطا در نصب و قرار بین لیزر و محور مرکزی دوربین، اثر منفی بر اطلاعات دارند.

2-1- دینامیک خرابی لوله

در پرداختن به ارزیابی وضعیت، درک دینامیک خرابی لوله شامل سطح، نوع و شدت مکانیزم خرابی نیز مهم است. حالت‌های خرابی می‌تواند شامل فروپاشی ناگهانی و فاجعه‌بار بخشی از لوله یا محدود شدن ظرفیت هیدرولیکی باشد. هدف از ارزیابی وضعیت، شناسایی عیوب در لوله است که احتمال خرابی لوله را برای ارزیابی کارایی سیستم جمع‌آوری فاضلاب نشان می‌دهد. در ابتدا لازم است پیرامون مکانیزم‌های خرابی و انواع عیب‌های لوله توضیحاتی ارائه شود. همچنین لازم به ذکر است که خرابی لوله به جنس لوله، قطر و نوع شبکه فاضلاب (گرانشی یا تحت فشار) بسیار وابسته است. خرابی‌های لوله با توجه به علت وقوع و از نظر مکانیزم خرابی می‌تواند به سه دسته کلی محدودیت‌های هیدرولیکی (مانند انسداد)، ظرفیت هیدرولیکی و وضعیت ساختاری تقسیم شود.

اولین وظیفه سیستم جمع‌آوری فاضلاب، انتقال فاضلاب است؛ بنابراین ظرفیت هیدرولیکی و فاکتورهایی که آن را محدود می‌کند بسیار مهم‌اند. محدودیت‌های هیدرولیکی شایع‌ترین شرایطی است که سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب با آن مواجه‌اند. در شبکه‌های فاضلاب، هنگامی که موانع و محدودیت‌های سریع هیدرولیکی ایجاد می‌شود، چنین موقعیت‌هایی به وجود می‌آید که می‌تواند موجب آب‌گرفتگی و جاری شدن سیل در معابر شود.

استانداردهای مورد استفاده برای طراحی هیدرولیکی، کمترین شیب‌ها را برای قطرهای مختلف لوله جهت رسیدن به سرعت‌های شویندگی برای کاهش احتمال تجمع بقایا و رسوبات، ارائه می‌دهد. نفوذ ریشه، تجمع رسوب و چربی از انواع عیوبی هستند که در دسته محدودیت‌های هیدرولیکی قرار می‌گیرند. لازم به یادآوری است که اتصال‌های جابه‌جاشده و خیز لوله‌ها به‌طور مستقیم می‌تواند با به وجود آوردن سرعت کم که موجب رسوب مواد جامد می‌شود، بر جریان در لوله اثر گذار باشد.

خرابی از نوع ظرفیت هیدرولیکی، به‌صورت بخشی از لوله که ظرفیت موجود کافی برای شرایط طراحی شده را ندارد تعریف می‌شود. شرایط خرابی می‌تواند به‌وسیله ورود نشتاب و آب‌های نفوذی بیش از اندازه، تغییر فرم لوله و یا شیب ناکافی رخ دهد. ورود نشتاب و آب‌های نفوذی، اثر مستقیم بر ظرفیت موجود برای انتقال فاضلاب دارد. آب زیرزمینی و روان آب‌ها از طریق اتصال‌های مستقیم یا به‌وسیله ترک‌ها و عیوب، به‌طور غیرمستقیم وارد سیستم جمع‌آوری می‌شود. در طراحی هیدرولیکی شبکه‌های فاضلاب جدید، سطح تغییر شکل لوله و شیب ناکافی به‌طور مستقیم بر ظرفیت هیدرولیکی یا ظرفیت جریان لوله اثر می‌گذارد. ظرفیت جریان می‌تواند بر اساس معادله منینگ محاسبه شود:

$$Q = \frac{1}{n} \times A \times R_h^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن Q برابر ظرفیت جریان (حجم بر زمان)، A برابر سطح مقطع، n

1- Manning's Roughness Coefficient
2- Hydraulic Radius
3- Slope
4- Pre-stressed Concrete Cylinder Pipe
5- Reinforced Concrete Pipe
6- Polyvinyl Chloride
7- High-density polyethylene

محور سروموتور، با استفاده از اهرم‌بندی طراحی شده، موقعیت قرارگیری حسگرها نسبت به سطح داخلی لوله کالیبر و تنظیم می‌شود. با کالیبر کردن مکانیزم ابزار اندازه‌گیری، خروجی حسگرها در محدوده قابل قبول قرار گرفته و اطلاعات اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای مادون قرمز قابل اطمینان‌تر می‌شوند. با چرخش سروموتور، بازوهای مکانیزم، حول محور سروموتور چرخیده و حسگرهای انتهایی بازوها موقعیت قرارگیری سطح روبه‌روی خود از لوله را می‌سنجد و اطلاعات به دست آورده را از طریق کابل USB به بیرون لوله انتقال می‌دهند. این اطلاعات در قالب فایل متنی در پوشه‌ای از پیش تعریف شده در حافظه لپتاپ ذخیره می‌شود.

طبق دستورالعمل ارائه شده توسط سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور در خصوص عملیات بازرسی از لوله‌های فاضلاب [25]، میزان انحراف تا ده درصد بزرگ‌ترین قطر مقطع فاضلاب رو قابل قبول است و تغییر شکل لوله با خطای زیادی همراه نیست، به همین خاطر در عین کم بودن میزان انحراف محور مرکزی ابزار اندازه‌گیری از محور مرکزی لوله تحت بازرسی، در این پژوهش فرض می‌شود محور مرکزی ابزار اندازه‌گیری در حین اندازه‌گیری بر محور مرکزی لوله منطبق است.

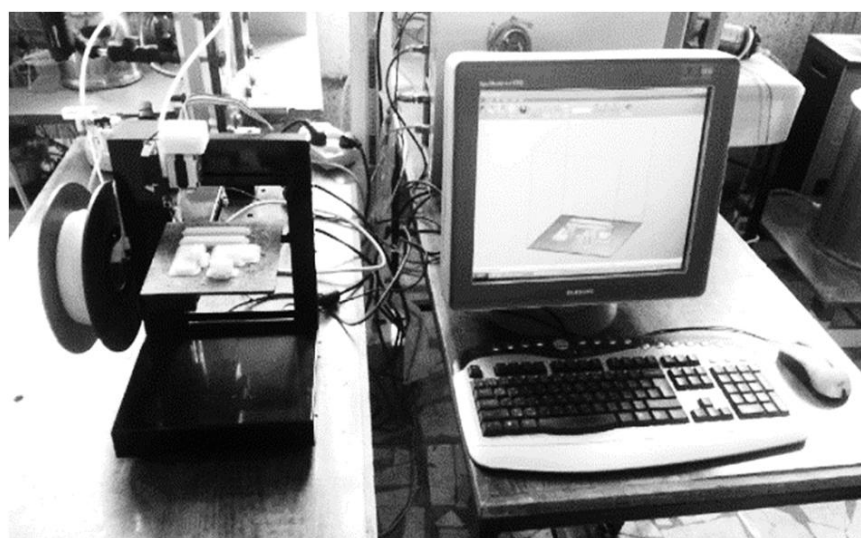


Fig. 1 UP! rapid prototyping machine while producing the measurement device mechanism parts

شکل 1 دستگاه نمونه سازی سریع مدل UP! در حال ساخت قطعات مکانیزم ابزار اندازه‌گیری

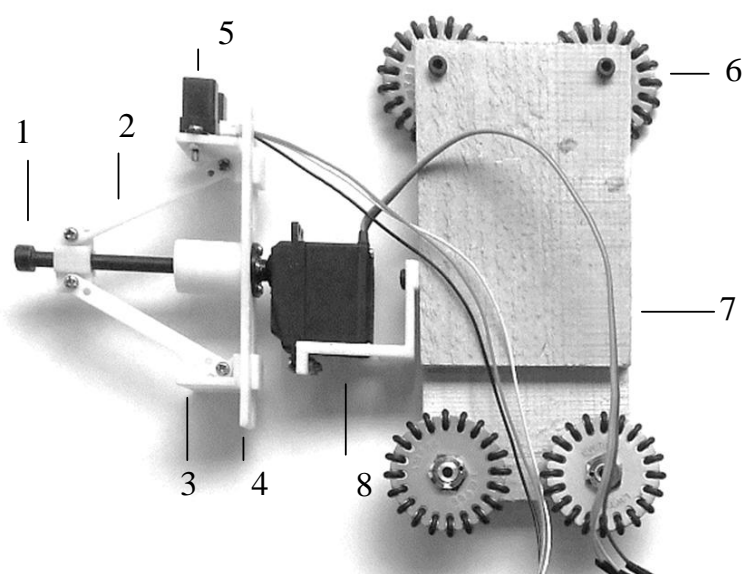


Fig. 2 The measurement device mechanism 1- adjustment screw 2- adjustment arm 3- sensor locating place 4- guide 5- infrared sensor 6- multidirectional wheels 7- holding support 8- servomotor

شکل 2 مکانیزم ابزار اندازه‌گیری 1- پیچ تنظیم‌کننده 2- بازوی تنظیم‌کننده 3- محل جایگیری حسگر 4- راهنما 5- حسگر مادون قرمز 6- چرخ‌های چندجهته 7- پایه نگهدارنده 8- سروموتور

عیوب شبکه‌های فاضلاب به صورت سازه‌ای یا خدماتی دسته‌بندی می‌شوند. عیوب سازه‌ای شامل ترک‌ها، شکستگی‌ها، فروپاشی‌ها، تغییر شکل‌ها، جابه‌جایی اتصال‌ها و اتصال‌های باز می‌شود. عیوب خدماتی نیز شامل ریشه‌های درخت، تجمع رسوبات و انسداد می‌شود.

شایع‌ترین عیوب در سیستم‌های جمع‌آوری فاضلاب، لوله شکسته یا ترک‌دار، نفوذ ریشه، رسوب، تجمع چربی، اتصال جابه‌جا، خوردگی، نشستی درپوش و قاب و خیز لوله هستند. به هر رو، عیوب لوله‌ها متناسب با جنس لوله و قطر لوله متفاوت است. به دلیل این‌که خطوط گرانثی یا تحت فشار، به طور کلی از جنس‌های مختلفی ساخته شدند، مستعد ابتلا به انواع مختلف عیوب می‌باشند.

لوله‌های نوع گرانثی به طور معمول از PVC یا VCP¹ ساخته شدند که مستعد تجمع چربی و ناهم‌راستایی اتصال‌ها و نشستی هستند. با این حال، VCP بیشتر عیب‌های ترک، شکستگی و نفوذ ریشه را تجربه می‌کند در حالی که PVC بیشتر درجه انحراف شدید یا مسائل ناهم‌راستایی و عیب‌های اتصال انشعاب را تجربه می‌کند.

برخلاف لوله‌های گرانثی، بیشتر شبکه‌های تحت فشار از مواد آهنی (مانند فولادهای جوش داده‌شده، آهن داکتیل و چدن) یا پلاستیکی (PVC و HDPE) ساخته شدند.

3- طراحی و ساخت سامانه

اولین گام برای رسیدن به هدف این پژوهش، دستیابی به اطلاعات ورودی است. در این پژوهش برای اندازه‌گیری سطح مقطع لوله‌ها به عنوان اطلاعات ورودی، مکانیزم ابزار اندازه‌گیری، طراحی و با روش نمونه‌سازی سریع ساخته شد (شکل 1). این مکانیزم باید ابزار اندازه‌گیری را تا حد ممکن در محور مرکزی لوله نگه داشته و قابلیت انتقال مجموعه را در راستای طولی لوله داشته باشد. طراحی این مکانیزم در نرم‌افزار سالیدورکز نسخه 2015 انجام شد. قطعات مربوط به مکانیزم ابزار اندازه‌گیری از جنس ABS و به کمک دستگاه نمونه‌سازی سریع مدل UP! موجود در آزمایشگاه پیل سوختی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ساخته شد (شکل 1).

همان‌طور که در شکل 2 قابل مشاهده است این مکانیزم شامل یک سروموتور، دو حسگر مادون قرمز، ریل‌های راهنمای قابل تنظیم و ثابت، مفصل‌ها، رابط‌ها، تعدادی پیچ و مهره جهت مونتاژ قطعات به یکدیگر، یک پایه نگهدارنده و چهار چرخ چندجهته² است. دو حسگر مادون قرمز پشت به یکدیگر و روبه دیواره داخلی لوله بر ابزار اندازه‌گیری جای گرفته‌اند. با حرکت پیچ تنظیم، دو بازوی تنظیم‌کننده به محل جایگیری حسگرها نیرو وارد کرده و حسگرها با جابه‌جایی برابر، روی راهنما حرکت کرده و به سطح دیواره داخلی لوله نزدیک یا از آن دور می‌شوند. محور مرکزی ابزار اندازه‌گیری بر محور خروجی یک سروموتور منطبق شده است. مجموعه مکانیزم ابزار اندازه‌گیری بر یک پایه نگهدارنده که دارای چهار چرخ چندجهته است قرار گرفته است. از چرخ‌های چندجهته به منظور قرارگیری آسان‌تر و قابل اطمینان‌تر محور ابزار اندازه‌گیری بر محور مرکزی لوله همراه با قابلیت حرکت دادن مجموعه در راستای طولی لوله بهره گرفته شده است.

برای تامین انرژی، کنترل سروموتور و خواندن اطلاعات خروجی حسگرها و ذخیره اطلاعات در حافظه لپتاپ، یک مدار کنترل طراحی و ساخته شده است (شکل 3). در ابتدا با استفاده از پیچ تعبیه‌شده بر روی

1- Vitrified Clay Pipe
2- Omni-directional

یکی از روش‌های نوشتن ماکرو، استفاده از مجموعه ابزار مبتنی بر VBA است. VBA اجازه نوشتن و ویرایش برنامه را در نرم‌افزار سالی‌دورکز می‌دهد و بر پایه ویژوال بیسیک شش می‌باشد که از محبوب‌ترین برنامه‌های توسعه داده شده توسط مایکروسافت است. همچنین VBA برای ماکروهای تجاری و برنامه‌هایی مانند اکسل یا ورد نیز استفاده می‌شود.

برای مدل‌سازی لوله با استفاده از اطلاعات به دست آمده، الگوریتمی طراحی شد. این الگوریتم در شکل 4 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا لازم است یکی از صفحات اصلی روبه‌رو، پهلو و یا بالا برای شروع فرایند، انتخاب شده و یک صفحه به عنوان مرجع در آن ایجاد شود. از آن‌جا که برای مدل‌سازی لوله در نرم‌افزار، نیاز به تعیین موقعیت مقطع‌های اندازه‌گیری شده نسبت به صفحه مرجع است، در گام بعدی صفحه‌های مرجع بعدی با فاصله‌های تعیین شده ایجاد می‌شود. در مرحله بعد طبق الگوریتمی که در شکل 5 بیان شده است، بسته نرم‌افزاری، هر بار به محیط ترسیم وارد می‌شود و پس از نام‌گذاری جدید بر محیط ترسیم، فایل متنی حاوی اطلاعات مختصات مقطع را فراخوانی کرده و خط به خط اطلاعات را از آن استخراج می‌کند.

اطلاعات استخراج شده توسط این زیربرنامه در محیط ترسیم به صورت نقطه‌های کنترلی رسم می‌شود. API پس از عبور یک منحنی اسپیرالین از این نقاط از محیط ترسیم خارج می‌شود. تا این مرحله پروفیل یک مقطع از لوله ترسیم شده است. برای رسم پروفیل‌های بعدی این مراحل تکرار می‌شود. پروفیل‌های رسم شده همه در نخستین صفحه مرجع و روی هم قرار گرفته‌اند. در گام بعدی، زیربرنامه بعدی، هر ترسیم را به صفحه مرجع متناظر با خود انتقال می‌دهد و در آخرین مرحله یک رویه از کلیه پروفیل‌های ترسیم شده عبور داده شده و لوله در نرم‌افزار مدل‌سازی می‌شود.

برای ارزیابی لوله برنامه‌ای نوشته شده است که دستورالعمل تعیین شده از سوی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران در خصوص عملیات ویدئومتری، در آن لحاظ شده است. برای این برنامه همان‌طور که در شکل 6 قابل مشاهده است یک پنجره محاوره‌ای دارای ورودی‌های متعدد طراحی شده است.

کاربر می‌تواند مساحت مقاطع رسم شده (به میلی‌متر مربع)، میزان شیب لوله، مقدار شعاع هیدرولیکی و ضریب منینگ را در مکان‌های مربوطه وارد

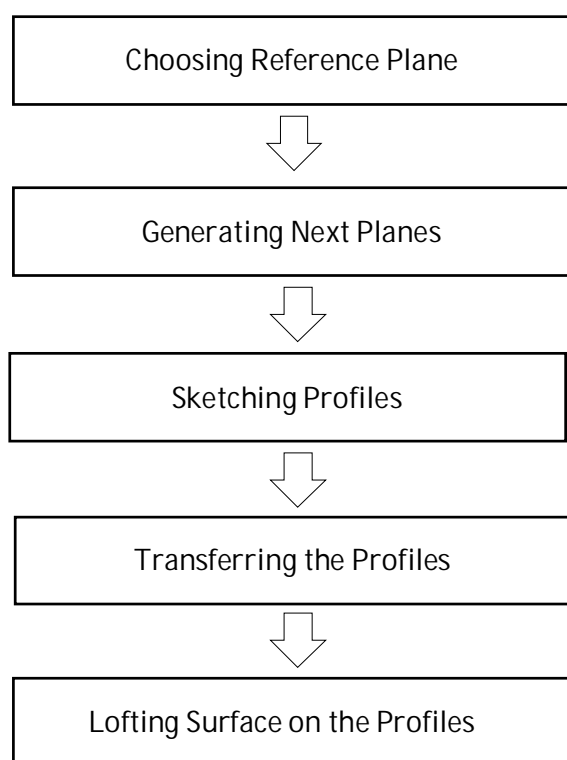


Fig. 4 Written API algorithm for Pipe reconstruction

شکل 4 الگوریتم برنامه نوشته شده در این پژوهش برای بازسازی لوله

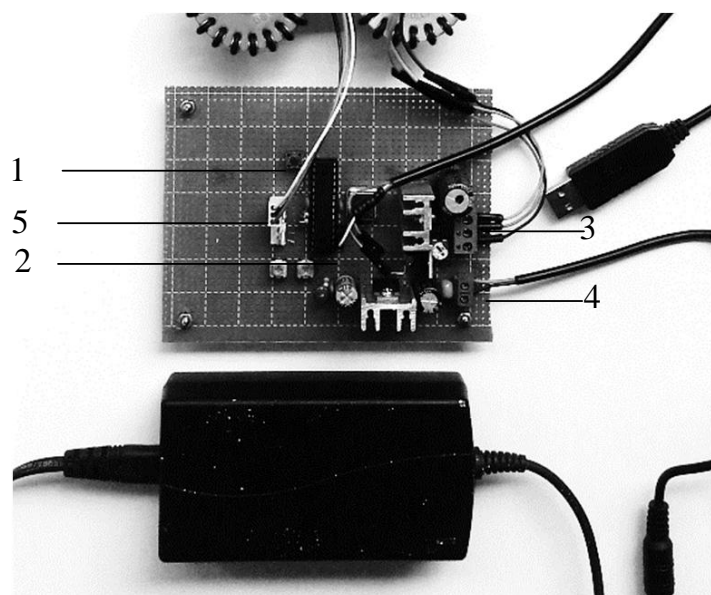


Fig. 3 The measurement device control board 1- start key 2- outlet circuit 3- servomotor connector 4- power supply 5- sensor connector

شکل 3 مدار کنترل ابزار اندازه‌گیری 1- کلید شروع 2- خروجی مدار 3- ارتباط با سروموتور 4- منبع تغذیه 5- ارتباط با حسگر

4- توسعه بسته نرم‌افزاری به کمک API¹

در این پژوهش برای ارزیابی کمی فضای داخلی و مدل‌سازی لوله مورد بازرسی، یک بسته نرم‌افزاری در محیط نرم‌افزار سالی‌دورکز توسعه داده شده است. به دلیل اینکه نرم‌افزار طراحی مهندسی مکانیک دارای بستری آماده برای کار با محیط طراحی است بهترین بهره را می‌توان با مدل‌سازی لوله در آن به دست آورد. برای این کار لازم بود تا API‌هایی به صورت مستقل یا درون برنامه‌ای در نرم‌افزار مورد نظر نوشته شود تا اطلاعات را گردآوری و پس از پردازش آن‌ها، خروجی مورد نظر را ارائه دهد.

API، رابط بین کتابخانه یا سیستم عامل و برنامه‌هایی است که از آن تقاضای سرویس می‌کنند. رابط کارکردهایی را تعریف می‌کند که کتابخانه یا سیستم عامل می‌تواند ارائه دهد. این کارکردها در قالب یک نرم‌افزار یا کتابخانه پیاده‌سازی می‌شوند. به عبارت ساده‌تر، یک API، کدی است که به دو برنامه نرم‌افزاری اجازه ارتباط با یکدیگر را می‌دهد و مجموعه توابعی بوده که یک برنامه می‌تواند از برنامه‌ای دیگر فرا بخواند. از مهم‌ترین فواید استفاده از API در نرم‌فزارها می‌توان صرفه‌جویی قابل توجه در وقت، افزایش دقت در عملیات و کاهش هزینه را نام برد.

بسته نرم‌افزاری که برای این پژوهش توسعه داده شد در محیط نرم‌افزار سالی‌دورکز نسخه 2015 بوده است. بسته نرم‌افزاری API در نرم‌افزار سالی‌دورکز به چند صورت امکان‌پذیر است. در این نرم‌افزار می‌توان از طریق ماکروها، زبان‌های برنامه‌نویسی برای توسعه مستقل² یا برنامه‌های افزونه³ و یا از طریق برنامه‌های سازگار با ویژوال بیسیک برای کاربردها یا VBA⁴ دیگر مایکروسافت، بسته نرم‌افزاری API را توسعه داد. برای استفاده موفقیت‌آمیز از بسته نرم‌افزاری API در سالی‌دورکز، نیاز به دانشی پیرامون زبان‌های برنامه‌نویسی است. برای بسته نرم‌افزاری API در سالی‌دورکز، زبان‌های برنامه‌نویسی مختلفی⁵ وجود دارند. برای برنامه‌نویسی به صورت مستقل، نیاز است برنامه در محیطی خارج از سالی‌دورکز نوشته شده و سپس تفسیر شود. این برنامه قادر است نرم‌افزار سالی‌دورکز را نیز اجرا کند. برخلاف برنامه‌نویسی مستقل، ماکرونویسی نیازی به تفسیر نداشته و به همراه سالی‌دورکز قابل نصب و اجرا است. در این پژوهش از روش ماکرونویسی استفاده شده است.

1- Application Programming Interface

2- Standalone

3- Add-in Applications

4- Visual Basic for Applications

5- Visual C++ /Visual C# /VB.Net /VBA

می‌شود. همچنین کاربر می‌تواند اطلاعات خروجی را به صورت گزارش چاپ و ذخیره نماید.

5- تست موردی و بحث روی نتایج

برای آزمون مورد مکانیزم ابزار اندازه‌گیری و بسته نرم‌افزاری، یک مجموعه آزمایشگاهی طراحی شد. مجموعه آزمایشگاهی شامل و یک لوله فاضلاب استاندارد، یک نگهدارنده V شکل برای نگهداری لوله و تعدادی بلاک به عنوان مانع‌های از پیش طراحی شده است. موقعیت قرارگیری و نصب چرخ‌ها و مکانیزم ابزار اندازه‌گیری بر پایه نگهدارنده به گونه‌ای است که در زمان قرارگیری مکانیزم در داخل لوله، محور خروجی سروموتور با دقت خوبی بر محور مرکزی لوله منطبق می‌شود. مرکز ریل راهنما بر محور خروجی سروموتور متصل می‌باشد. سروموتور مدل SG5010 بوده و قابلیت چرخش از زاویه صفر تا 180 درجه را به همراه کنترل زاویه در هر گام چرخش دارد. حسگرهای مورد استفاده در این پژوهش، دو حسگر فاصله‌سنج دارای فرستنده - گیرنده امواج مادون قرمز مدل GP2Y0A41SK0F است. این حسگرها بر جایگاه طراحی شده در مکانیزم تنظیم‌کننده قرار می‌گیرند. وجود این مکانیزم برای رعایت فاصله میان حسگرها نسبت به مرکز ریل راهنما بوده و با تنظیم آن، فاصله بین حسگرها و سطح داخلی لوله، جهت اندازه‌گیری بهینه می‌شود. با قرارگیری حسگرهای فاصله‌سنج مادون قرمز در انتهای بازوها، می‌توان در یک بار چرخش 180 درجه‌ای سروموتور، فاصله نقاط روی محیط مقطع تحت بازرسی تا گیرنده حسگرها را اندازه گرفت.

اساس کار حسگر فاصله‌سنج مادون قرمز استفاده شده در این است که یک پالس موج مادون قرمز توسط فرستنده ارسال می‌شود. نور مادون قرمز گسیل شده، در میدان دید حسگر حرکت کرده تا به یک مانع برخورد کند یا به مسیر خود ادامه دهد. اگر در مسیر نور ارسالی شیئی وجود نداشته باشد، نور به مسیر خود ادامه داده و در نتیجه هیچ بازتابی نخواهد داشت و خروجی به معنی عدم وجود مانع است. اگر نور از یک مانع بازتابش کند، آشکارساز حسگر، آن را دریافت می‌کند. بین نقطه ارسالی، نقطه بازتاب و آشکارساز حسگر، یک مثلث تشکیل می‌شود. زاویه این مثلث بسته به فاصله مانع تا حسگر متفاوت است. لازم به ذکر است که مخروط مادون قرمز گسیل شده از فرستنده همواره ثابت بوده و نور با یک زاویه ارسال می‌شود. این زاویه بازتاب است که با توجه به تغییر فاصله مانع نسبت به فرستنده و گیرنده حسگر متفاوت است. این حسگرهای فاصله‌سنج در محدوده‌ای خاص فاصله را به درستی اندازه می‌گیرند، لذا کالیبر کردن مکانیزم ابزار اندازه‌گیری به منظور قرارگرفتن حسگرها در محدوده مورد اطمینان است تا اطلاعات خروجی آن‌ها قابل اعتماد باشد. محدوده اندازه‌گیری فاصله برای حسگر مورد استفاده در این پژوهش بین 40 تا 30 سانتی‌متر می‌باشد.

برای انجام آزمایش، مجموعه اندازه‌گیری از یک انتها وارد لوله می‌شود و در موقعیت اولیه‌ای برابر لبه لوله قرار می‌گیرد. سروموتور در حالت پیش‌فرض در زاویه صفر درجه (نسبت به افق) قرار دارد. تنظیم‌های اولیه برای کالیبر کردن فاصله حسگرها تا دیواره لوله جهت بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. سپس با انتخاب کلید شروع² فرایند اندازه‌گیری اطلاعات لازم برای پروفیل‌گیری مقطع لوله در آن موقعیت شروع می‌شود (شکل 3). در شکل 6 نحوه قرارگیری ابزار اندازه‌گیری در حال کار داخل لوله

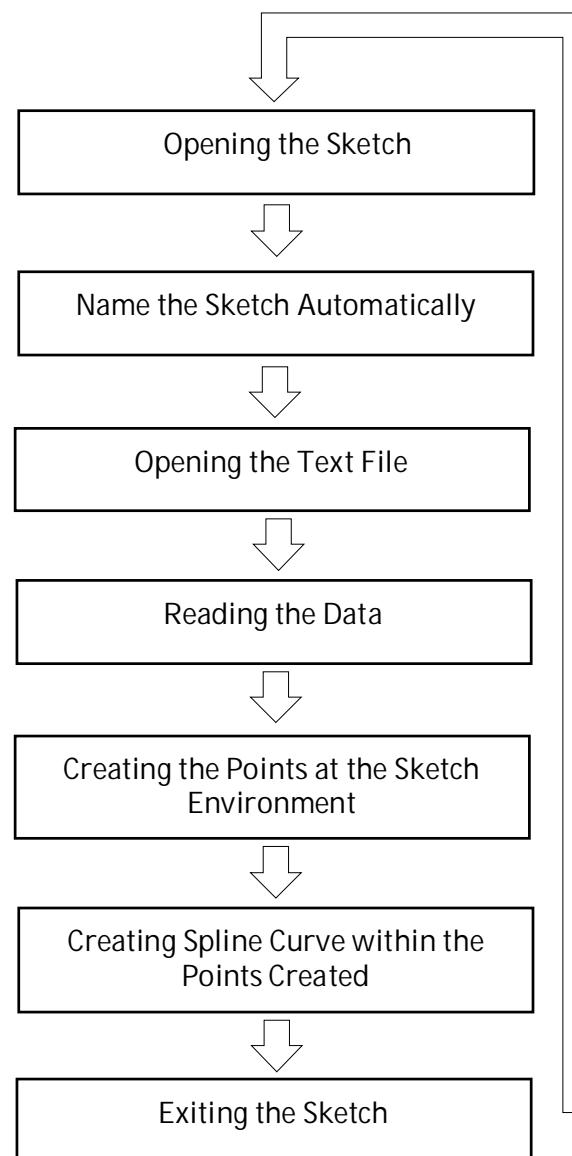


Fig. 5 API algorithm for Cross-section profiling at the sketch environment

شکل 5 الگوریتم برنامه رسم سطح مقطع در محیط ترسیم

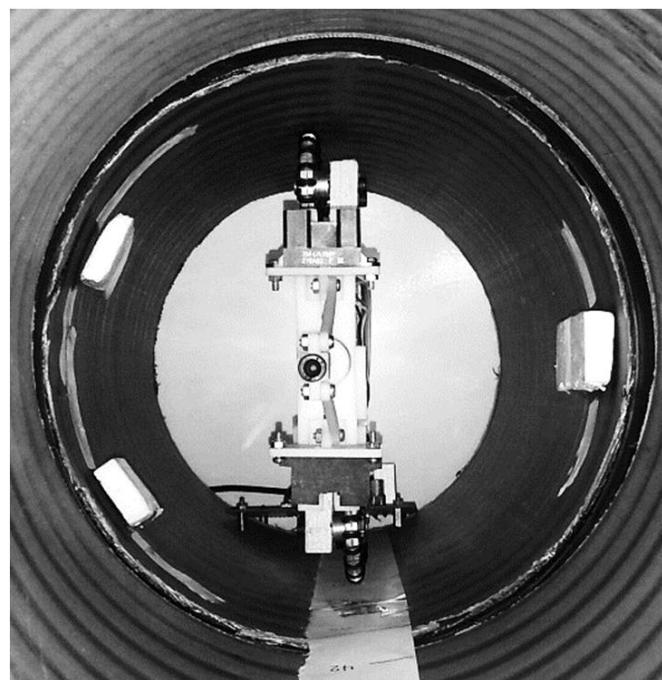


Fig. 6 Placement of the measurement device inside the pipe

شکل 6 نحوه قرارگیری ابزار اندازه‌گیری در حال کار داخل لوله

نماید. پس از تایید کلید محاسبه و ارزیابی¹ توسط کاربر، برنامه اطلاعات را به عنوان ورودی پذیرفته و خروجی مطلوب را نمایش می‌دهد. خروجی‌های قابل مشاهده شامل میزان سلامت در عین تغییر شکل سطح مقطع لوله و میزان دبی خروجی طبق سطح مقطع وارد شده است. عدم تغییر شکل سطح مقطع هم به صورت کمی از نوع درصد و هم به صورت کیفی از نوع بیان شرایط کنونی مقطع لوله است. دبی خروجی سطح مقطع به مترمکعب بر ثانیه بیان

برای آن‌ها مقداری به صورت پیش‌فرض تعیین شده است (همچنین این امکان فراهم شده است که کاربر بتواند متناسب با شرایط، با وارد کردن اطلاعات جدید در پنجره، مقادیر پیش‌فرض را تغییر دهد).

حال با استفاده از سربرگ ارزیابی¹ و قسمت مشخصات بخش²، در نرم‌افزار سالی‌دورکز، برای هر پروفیل، مساحت مربوط به آن قابل محاسبه می‌باشد و می‌توان مساحت مربوط به هر پروفیل را در محل متناظر در پنجره محاوره‌ای طراحی شده وارد نمود. بسته‌های نرم‌افزاری (API‌های) نوشته شده، توانایی سنجش و شناسایی میزان آسیب‌دیدگی لوله را داشته و پس از پردازش، اطلاعات مورد نظر را نمایش می‌دهد.

در اواخر سال 1393، سازمان برنامه‌ریزی و بودجه کشور، دستورالعمل انجام عملیات ویدئومتری شبکه‌های فاضلاب را تدوین کرد که دستیابی به راهی جهت بررسی کمی برخی از موارد آن در رابطه با تعیین تغییر شکل لوله، اندازه‌گیری سطح مقطع، مدل‌سازی لوله و غیره، در این پروژه محقق شد.

با اجرای کلید محاسبه و ارزیابی، بسته‌های نرم‌افزاری مربوطه اجرا می‌شوند و اطلاعات شیب، ضریب زبری منینگ، شعاع هیدرولیکی و مساحت مقاطع را به عنوان ورودی دریافت کرده و در سه ستون خروجی‌ها را ارائه می‌دهد. ستون اول درصد سلامت در عین تغییر شکل سطح مقطع لوله را بیان می‌کند. ستون دوم سطح مقطع را طبق دستورالعمل ارزیابی کرده و به صورت کیفی نتایج را ارائه می‌دهد. ستون سوم نیز بیان‌گر ظرفیت هیدرولیکی برای هر سطح مقطع است. این اطلاعات خروجی به همراه اطلاعات ورودی می‌توانند با اجرای بسته نرم‌افزاری نوشته شده در ارتباط با کلید چاپ، به صورت گزارش، چاپ یا ذخیره شود. تمامی این نتایج در شکل 7 ارائه شدند. جدول 1 مساحت مقاطع واقعی و مساحت پروفیل متناظر ترسیمی طبق اطلاعات اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین این دو مساحت اختلاف اندکی وجود دارد. این اختلاف به طور عمده به دلیل فاصله بین زاویه‌های اندازه‌گیری از محیط مقطع می‌باشد (تعیین گام 5 درجه برای دستیابی به مختصات 72 نقاط کنترلی) و با افزایش تعداد نقاط کنترلی (کاهش زاویه گام بین نقاط کنترلی)، برخلاف افزایش زمان اندازه‌گیری و ترسیم پروفیل، دقت در رسم پروفیل و مدل‌سازی لوله بیشتر شده و این اختلاف کاهش می‌یابد.

مقاطع واقعی تحت بازرسی و پروفیل‌های رسم شده از مقاطع متناظر در نرم‌افزار سالی‌دورکز، در شکل 8 ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است پروفیل‌ها با دقت قابل قبولی در نرم‌افزار رسم شدند. در شکل 9 لوله مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز نمایش داده شده است. این لوله مدل‌سازی شده و اطلاعات مستخرج از این فرایند می‌تواند به‌عنوان یک مرجع قابل اطمینان و کمی برای پیمان‌کارها و کارفرماها مورد استفاده قرار گیرد.

این اندازه‌گیری‌ها بر لوله‌های فاضلاب پلی‌اتیلن با چگالی بالا که در کشور برای نصب شبکه خطوط فاضلاب متداول است انجام شد. قطر لوله مورد آزمایش برابر 200 میلی‌متر انتخاب شد که برای اندازه‌گیری اولیه بسیار مناسب است و از نظر تجمع توده شناسایی شده است. طول لوله مورد بازرسی 70 سانتی‌متر بوده و به همراه موانع از پیش تعیین شده به صورت بلاک‌های مکعب مستطیلی برای اندازه‌گیری انتخاب شده است. ابعاد مانع‌های مورد استفاده در این پژوهش و موقعیت طولی و دورانی قرارگیری آن‌ها در لوله مورد آزمایش در جدول 2 ارائه شده است.

گونه است که با شروع فرایند، سروموتور در زاویه صفر درجه حسگرها را موقعیت‌دهی کرده و حسگرها فاصله نقطه مقابل خود را تا گیرنده در زاویه‌های صفر و 180 درجه اندازه می‌گیرند. سپس سروموتور مکانیزم ابزار اندازه‌گیری را به اندازه پنج درجه دوران می‌دهد. این بار حسگرها فاصله نقاط را در زاویه‌های پنج و 185 درجه اندازه می‌گیرد. از آن‌جا که گام دوران برای سروموتور پنج درجه تعیین شده، برای جاروب کردن فضای 360 درجه کافی است تا سروموتور در 36 موقعیت دورانی با همین گام برای اندازه‌گیری توقف کند. با این شرایط، برای هر مقطع، مختصات 72 نقطه از محیط مقطع به دست می‌آید. بنابراین به همین ترتیب مختصات نقاط محیط مقطع، یک به یک اندازه‌گیری می‌شود.

مکانیزم ابزار اندازه‌گیری با مختصات قطبی کار می‌کند. به این صورت که زاویه چرخش سروموتور از پیش قابل تعریف و مشخص بوده و فاصله بین نقطه روی محیط مقطع تحت بازرسی، نسبت به محور مرکزی مکانیزم ابزار اندازه‌گیری، سنجیده می‌شود. مقدار اندازه‌گیری شده بیان‌گر فاصله بین روبه‌روی حسگر تا گیرنده موج است. حال آنکه حسگرها با فاصله‌ای نسبت به محور راهنما قرار دارند. از آنجا که قبل از شروع فرایند اندازه‌گیری فاصله بین حسگرها تا دیواره لوله بهینه می‌شود، بنابراین فاصله حسگر تا محور راهنما مشخص است. این فاصله قبل از شروع راه‌اندازی مکانیزم، اندازه‌گیری شده و به واحد کنترل مکانیزم فرستاده می‌شود. واحد کنترل، اطلاعات اندازه‌گیری که شامل زوج مرتب به صورت θ و r است را دریافت و طبق رابطه‌های زیر آن‌ها را از مختصات قطبی به مختصات در دستگاه کارتزین تبدیل می‌کند:

$$x = \frac{\rho \cos \theta}{1000} \quad (2)$$

$$y = \frac{\rho \sin \theta}{1000} \quad (3)$$

که در آن θ اطلاعات زاویه مربوط به هر نقطه روی محیط مقطع تحت بازرسی، r فاصله‌ی مربوط به آن نقطه نسبت به حسگر، R فاصله حسگر تا مرکز راهنما و ρ برابر فاصله نقطه مورد نظر تا مرکز مبدأ مختصات است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho = r + R \quad (4)$$

با مشخص بودن θ و ρ ، طبق روابطی که بیان شد واحد کنترل مختصات کارتزین نقاط تحت بازرسی را تعیین می‌کند. با هر بار شروع فرایند اندازه‌گیری، سروموتور در 72 نقطه از محیط هر مقطع با گام پنج درجه، عملیات اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. تقسیم بر هزار در معادله‌های 2 و 3، به این معنی است که اندازه‌های x و y باید در واحد متر در فایل متنی ذخیره شوند. هر فایل متنی شامل مختصات X-Y-Z نقاط در آن مقطع است. در این آزمایش فاصله بین هر بار اندازه‌گیری، هفت سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در هر بخش، اندازه‌گیری‌ها توسط مکانیزم ابزار اندازه‌گیری انجام و اطلاعات اندازه‌گیری هر مقطع، همزمان به‌وسیله یک کابل USB به حافظه لپ‌تاپ فرستاده و در قالب فایل متنی متناظر با هر مقطع ذخیره می‌شود.

در این پژوهش برای دسترسی بهتر و کارآمدتر به بسته‌های نرم‌افزاری نوشته شده، یک پنجره محاوره‌ای طراحی شد. در بالاترین بخش این پنجره محاوره‌ای کلید ساختن پروفیل لوله قرار دارد. با اجرای این کلید، همه بسته‌های نرم‌افزاری (API‌های) نوشته شده طبق الگوریتمی که در شکل 4 بیان شد به ترتیب و خط به خط اجرا شده و لوله تحت بازرسی به صورت کامل در محیط طراحی قطعه نرم‌افزار سالی‌دورکز، مدل‌سازی می‌شود. در بخش زیرین آن پنجره‌هایی برای ورود اطلاعات مربوط به شیب، شعاع هیدرولیکی و ضریب زبری منینگ طراحی شده و طبق استانداردهای رایج

1- Evaluate
2- Section Properties

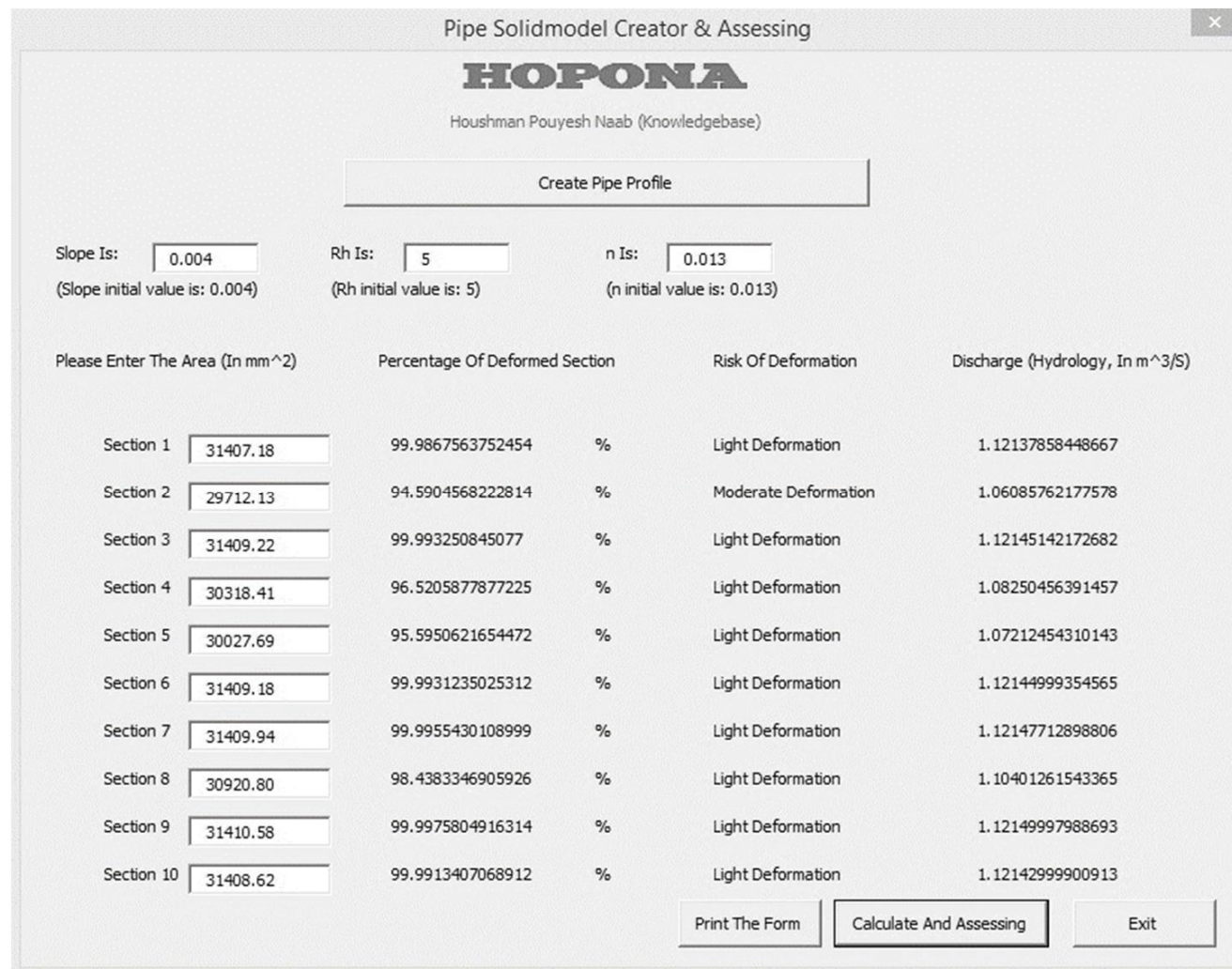


Fig. 7 The user-form containing all APIs in SOLIDWORKS

شکل 7 پنجره محاوره‌ای در برگزیده تمام بسته‌های نرم‌افزاری نوشته شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز در این پژوهش

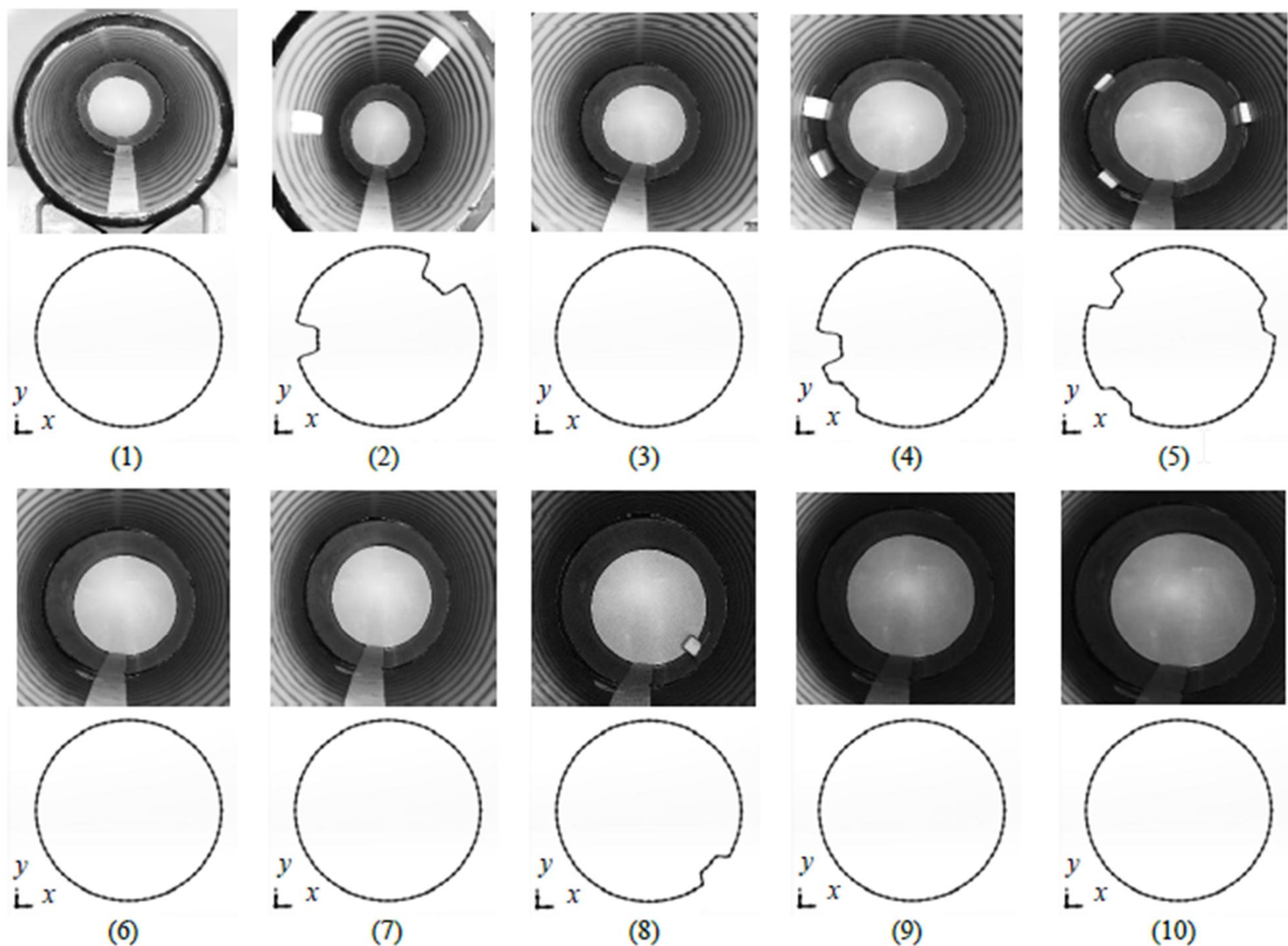


Fig. 8 Generated profiles from cross-sections by means of coded APIs in SOLIDWORKS with their real cross-sections (corresponding numbers) - Top: real cross-section, bottom: generated cross-section, for every view

شکل 8 پروفیل‌های رسم شده از مقاطع توسط بسته‌های نرم‌افزاری نوشته شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز، به همراه مقطع واقعی متناظر با آن (به ترتیب شماره) - در هر نما، تصویر بالا مقطع واقعی و تصویر پایین مقطع پروفیل رسم شده را نمایش می‌دهد

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای دستیابی به اطلاعات کمی و ارزیابی وضعیت لوله، یک مکانیزم ابزار اندازه‌گیری، طراحی، ساخته و چند بسته نرم‌افزاری (API‌های) در نرم‌افزار مهندسی سالی‌دورکز نوشته و توسعه داده شد و در قالب پنجره محاوره‌ای در این نرم‌افزار به صورت افزونه قرار گرفت. برای آزمون موردی این ابزارها و صحت‌سنجی عملکرد آن‌ها، آزمایش و مانع‌هایی طراحی شدند. طی این آزمایش مختصات ده پروفیل سطح مقطع در هر هفت سانتی‌متر از لوله تحت بازرسی، اندازه‌گیری شد و پروفیل همه سطح مقطع‌ها در محیط طراحی نرم‌افزار رسم و لوله تحت بازرسی، به صورت سه بعدی مدل‌سازی شد. مساحت سطح مقطع‌های مورد بازرسی، در هر بخش محاسبه شده و با مساحت واقعی سطح مقطع متناظر آن مقایسه شد و نشان داده شد که پروفیل‌های مدل‌سازی شده و واقعی بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و دقت فرایند مناسب است. همچنین شرایط لوله از نظر کیفی و کمی، طبق دستورالعمل اجرایی بازرسی از لوله و رابطه مینینگ، به وسیله بسته‌های نرم‌افزاری (API‌های) توسعه داده شده، ارزیابی و نتایج در پنجره محاوره‌ای ارائه شدند.

جدول 1 مساحت مقاطع - واقعی و اندازه‌گیری شده (میلی‌متر مربع)

Table 1 Real and measured cross-sections areas (mm²)

شماره مقطع	واقعی	اندازه‌گیری شده	اختلاف
1	31415.93	31407.18	-8.75
2	30406.00	29712.13	-693.87
3	31415.93	31409.22	-6.71
4	30628.25	30318.41	-309.84
5	30330.63	30027.69	-302.94
6	31415.93	31409.18	-6.75
7	31415.93	314.9094	-5.99
8	3095.78	30920.80	-37.98
9	31415.93	31410.58	-5.35
10	31415.93	31408.62	-7.31

جدول 2 ابعاد مانع‌های مورد استفاده و موقعیت قرارگیری آن‌ها از نقطه شروع فرایند

Table 2 Dimensions and locations of used obstacles from process starting point

شماره مانع	ارتفاع (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	طول قرارگیری (cm)	زاویه قرارگیری (درجه)
1	24	21.2	55.8	10	40
2	23	21.1	45	10	175
3	24	21	58.3	30	180
4	9.4	27.5	79.2	30	215
5	10	26.8	79.7	40	5
6	11	25	36.8	40	140
7	10	25	37	40	220
8	21.4	21	54	70	310

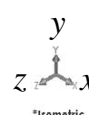


Fig. 9 Modeled pipe by gathered data through measuring device in SOLIDWORKS within coded APIs

شکل 9 لوله مدل‌سازی شده در نرم‌افزار سالی‌دورکز به وسیله برنامه نوشته شده در این نرم‌افزار با استفاده از اطلاعات به دست آمده به کمک ابزار اندازه‌گیری

7- فهرست علائم

r فاصله نقطه نسبت به حسگر (mm)

R فاصله حسگر تا مرکز راهنما (mm)

علائم یونانی

θ زاویه نقطه روی محیط مقطع تحت بازرسی نسبت به موقعیت اولیه شروع فرایند (درجه)

ρ فاصله نقطه تحت اندازه‌گیری تا مرکز مبدأ مختصات (mm)

8- مراجع

- [1] M. Arbabafti, D. Ebrahimi, Study on importance of doing visual inspection before temporary delivery to save resources, *National Conference on Water and Wastewater Engineering (NCWWE)*, 2011. (in Persian فارسی)
- [2] Y. Kleiner, B. B. Rajani, Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models, *Urban Water*, Vol. 3, No. 3, pp. 131-150, 2001.
- [3] B. B. Rajani, Y. Kleiner, Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models, *Urban Water*, Vol. 3, No. 3, pp. 151-164, 2001.
- [4] Smart Light Devices, *Innovative subsea laser and imaging technology*, Accessed on December 2011, <http://www.sldltd.com>.
- [5] *Cool Vision 3D profiling accuracy and reliability*, Accessed on December 2011, <http://www.coolvision.com>.
- [6] *CUES laser profiler*, Accessed on December 2011, <http://www.cuesinc.com/Laser-Profiler.html>.
- [7] *OMC laser profiler*, Accessed on December 2011, <http://www.optical-metrology-centre.com>.
- [8] Hancor, *Laser profiling of flexible pipe*, Technical Note, Accessed on December 2011, <http://www.hancor.com>.
- [9] A. Dettmer, D. Hall, H. Hegab, M. Swanbom, Refining laser profiling methods used for pipeline assessment, *North American Society for Trenchless Technology (NASTT) NO-DIG*, Orlando, FL, pp. 1-9, 2005.
- [10] O. Duran, K. Althoefter, L. D. Seneviratne, Pipe inspection using a laser-based transducer and automated analysis techniques, *IEEE Transactions Mechatronics*, Vol. 8, pp. 401-409, 2003.
- [11] K. Matsui, A. Yamashita, T. Kaneko, 3-d shape measurement of pipe by range finder constructed with omni-directional laser and omni-directional camera, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2537-2542, 2010.
- [12] G. Zhang, J. He, X. Li, 3D vision inspection for internal surface based on circle structured light, *Sensors Actuators A: Physical*, Vol. 122, pp. 68-75, 2005.
- [13] M. Johnson, G. Sen Gupta, A robotic laser pipeline profiler, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vol. 2, pp. 1488-1491, 2003.
- [14] E. Wu, Y. Ke, B. Du, Noncontact laser inspection based on a PSD for the inner surface of minidiameter pipes, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, pp. 2169-2173, 2009.
- [15] Z. Liu, D. Krys, B. Rajani, H. Najjaran, Processing laser range image for the investigation on the long-term performance of ductile iron pipe, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, pp. 65-75, 2008.
- [16] P. Unnikrishnan, B. Thornton, T. Ura, Y. Nose, A conical laser light-sectioning method for navigation of autonomous underwater vehicles for internal inspection of pipelines, in: *OCEANS 2009: Balancing Technology with Future Needs*, Bremen, Germany, pp. 1-9, 2009.
- [17] A. Nassiraei, Y. Kawamura, A. Ahrary, Y. Mikuriya, K. Ishii, A new approach to the sewer pipe inspection: fully autonomous mobile robot "KANTARO", *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pp. 4088-4093, 2006.
- [18] A. Ahrary, A. A. Nassiraei, M. Ishikawa, A study of an autonomous mobile robot for a sewer inspection system, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 11, pp. 23-27, 2007.
- [19] D. H. Lee, H. Moon, H. R. Choi, Autonomous navigation of in-pipe working robot in unknown pipeline environment, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1559-1564, 2011.
- [20] D. H. Lee, H. Moon, H. R. Choi, Landmark detection of in-pipe working robot using line-laser beam projection, *International Conference on Control Automation and Systems*, pp. 611-615, 2010.
- [21] B. Zhuang, W. Zhang, D. Cui, Noncontact laser sensor for pipe inner wall inspection, *Optical Engineering*, Vol. 37, pp. 1643-1647, 1998.
- [22] S. K. Sinha, F. Karray, Classification of underground pipe scanned images using feature extraction and neuro-fuzzy algorithm, *IEEE Transactions Neural Networks*, Vol. 13, pp. 393-401, 2002.
- [23] Z. Wang, Z. Hui, T. Wei, T. Yan, A new structured-laser-base system for measuring the 3D inner-contour of pipe figure components, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 43, pp. 414-422, 2007.
- [24] J. S. Yoon, M. Sagong, J. Lee, K. sung Lee, Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3d laser scanning data, *NDT & E International*, Vol. 42, pp. 97-105, 2009.
- [25] *Instructions of sewer network visual inspection*, Management and Planning Organisation of Islamic Republic of Iran, Iran, p. 25, 2015. (in Persian فارسی)