تشخیص خوردگی درون خط لوله با استفاده از سیستم بازرسی نوری غیرمخرب

(نویسنده: پویا نخعی اشتر)

در بیشتر صنایع برای آنکه از ورود اپراتور به داخل تانکرها یا لوله‌های حاوی سیالات جهت بازرسی جلوگیری شود، این کار با دوربین‌های مداربسته (CCTV) و از طریق آنالیز تصاویر انجام می‌شود. روش‌های بازرسی CCTV فاقد محدودیت نیستند به‌طور مثال کیفیت پایین تصاویر گرفته‌شده (به دلیل عدم وجود نور کافی) روی دقت بازرسی اثر منفی می‌گذارد. جهت غلبه بر این محدودیت‌ها از سیستم نوری استفاده می‌شود که شامل لیزر دیودی, ژنراتور نوری و دوربین مداربسته است. با استفاده از این سیستم، نقشه‌ای از سطح دیواره‌های داخلی تولید می‌شود و حفرات ناشی از خوردگی در تصاویر مشخص خواهند شد.

سیستم بازرسی نوری دارای پلتفرم متحرک مجهز به دوربین است که در سرتاسر طول خط لوله حرکت و تصویربرداری می‌کند. این دوربین توسط کابل به یک ایستگاه بازرسی متصل است و در این ایستگاه جهت بررسی ویدیوهای ضبط‌شده، یک مهندس حضور دارد که فرایندی زمان‌بر و هزینه‌بر است. علاوه بر آن تنها نقص‌های بزرگ و آشکار با چشم انسان قابل تشخیص است و نمی‌توان در مراحلِ اولیه ایجاد نقص را تشخیص داد. همچنین تشخیص عیوب با تکنیک‌های سنتی CCTV تا حدِ زیادی به تجربه و مهارت مهندس وابسته است بنابراین احتمال خطا در نتایج آن وجود دارد و برای افزایش دقت باید از سیستم بازرسی اتوماتیک استفاده کرد. ترموگرافی مادون قرمز به‌عنوان یکی از روش‌های در حال توسعهٔ بازرسی خط لوله است؛ اما این روش‌ها تاکنون نتوانسته‌اند به‌طور کاربردی جایگزین تکنیک بازرسی CCTV شوند. سیستم‌های روشن‌کننده که از حلقه یا نقاط نورانی روی دیواره‌های داخلی ایجاد می‌کنند ازجمله پیشرفت‌های صورت گرفته برای بهبود کیفیت تصاویر است. همچنین امکان استفاده از دیود لیزری به‌عنوان منبع نور به‌جای حلقه نوری نیز وجود دارد. تمام این روش‌ها تنها قادر به تشخیص عیوب ساختاری مانند حفره و ترک هستند. تشخیص و طبقه‌بندی نقص‌های سطحی داخلی با استفاده از آنالیز تصاویر دیجیتالی انجام می‌شود. بااینکه این سیستم‌ها بر نکات ضعف نسبی بازرسی با روش CCTV توسط انسان غلبه می‌کنند اما هنوز به کیفیت تصاویر خام گرفته‌شده وابسته‌اند. در این مقاله از پروفایلر لیزری(دستگاهی که شدت پرتو لیزر را ثبت می‌کند و نمایش می‌دهد) به‌منظور بهبود کیفیت تصاویر استفاده شده است. با این نوآوری بجای استفاده از اطلاعات مکانی حلقه نور، از اطلاعات شدت نور استفاده می‌شود تا تشخیص نقص بر اساس تحلیل تصویر انجام شود. این روش بازرسی، کامل‌کنندهٔ تکنیک CCTV است و امکان تشخیص و مکان‌یابی اتوماتیک نقص حاصل از خوردگی را با دقت میلی‌متری فراهم می‌کند[۱].

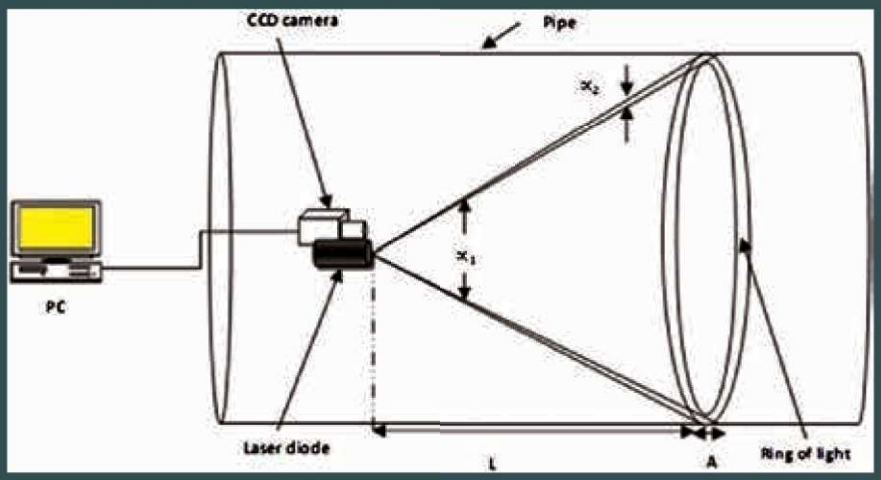
پروفایلر لیزری بر پایه CCTV

سیستم بازرسی نوری شامل دوربین کالیبره‌شده، پروژکتور حلقه نوری و یک منتشرکننده است که پرتو لیزر را درون حلقه نوری پخش می‌کند. پرتو نور تولیدی از دیود لیزری از پخش‌کنندهٔ نوری عبور می‌کند و الگوی نوری دایره‌ای شکل روی مقطعی از لوله ایجاد می‌کند. موقعیت محلی از لوله که در حال بازرسی است(نسبت به سیستم نوری) و مساحت روشن‌شده از دیواره لوله، به ترتیب عبارت‌اند از:

$$L = \frac{R}{\tan(\frac{\alpha_1}{2})}$$

$$A = R.(\frac{1}{\tan(\frac{\alpha_1}{2} - \alpha_2)} - \frac{1}{\tan(\frac{\alpha_1}{2})})$$

در این روابط R شعاع لوله و 1α و 2α زوایای تابش از پخش‌کننده هستند. این روابط در حالت ایده‌آل برقرار هستند که در آن لیزر منطبق بر محور مرکزی لوله است. در شرایط واقعی، عدم انطباق‌های زاویه‌ای می‌تواند باعث تغییر شکل ناحیهٔ روشن‌شده از دایره به بیضی شود[۱].



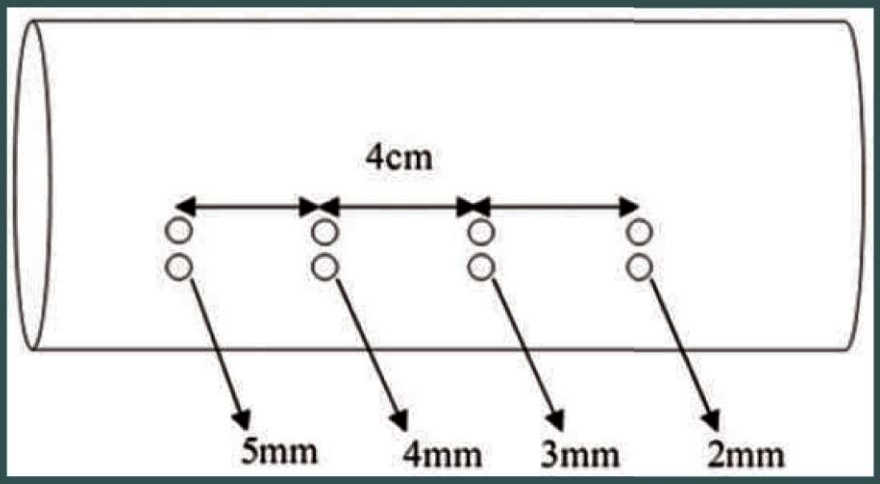
شماتیک سیستم نوری [۱]

تصویر واقعی از یک سیستم متحرک بازرسی نوری خط لوله [۲]

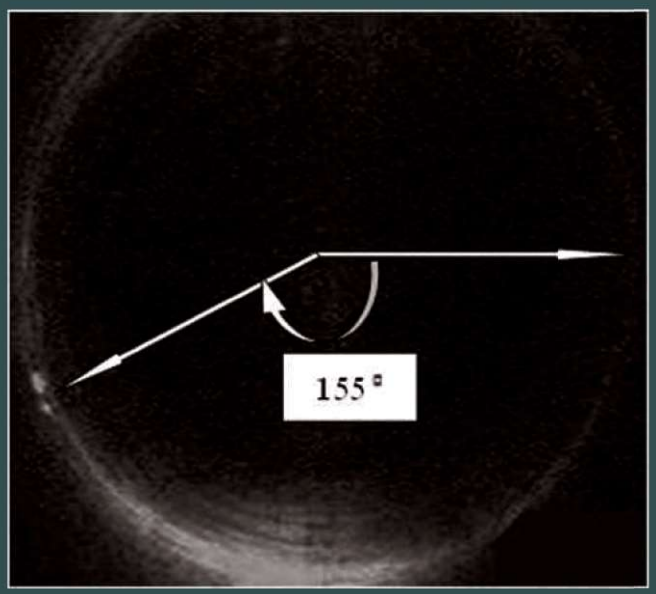
تصویر واقعی ثبت‌شده با سیستم بازرسی متحرک از درون خط لوله [۲]

آزمایش و بحث

برای آنالیز داده‌های خام به‌دست‌آمده از آزمون، از نرم‌افزار MATLAB به‌منظور پردازش تصاویر استفاده شده است. نمونه، یک لولهٔ فولادی است که حفره‌هایی جهت شبیه‌سازی خوردگی حفره‌ای، بر سطح داخلی آن ایجاد شده است. حلقه‌های نور لیزر روی دیواره داخلی لوله تابیده می‌شود و بازتاب توسط دوربین ذخیره می‌شود. در محل‌هایی که حفره و نقص وجود دارد نور لیزر پراکنده و باعث تغییر سطح شدت در تصویر می‌شود بنابراین با آنالیز سطوح شدت، می‌توان حفره‌ها و موقعیت آن‌ها را شناسایی کرد. برای بهبود کیفیت عکس و تشخیص ناحیهٔ نوری دایره/بیضی‌شکل از روش‌های پردازش تصویر استفاده می‌شود. به‌منظور تشخیص بهتر، کنتراست تنظیم و نویز کاهش داده می‌شود تا لبهٔ حلقه‌ها باقی بماند و درنهایت توسط دوربین لبه‌ها مشخص می‌شود. تابش نور دایره‌ای شکل به دوربین به دلیل عدم تطابق سیستم نوری با محور مرکزی لوله، به بیضی تبدیل می‌شود؛ بنابراین از یک الگوریتم برای تطبیق دادن این بیضی با مجموعه‌ای از نقاط که توسط دوربین لبه‌ها به‌دست‌آمده استفاده می‌شود. در نمونهٔ آزمایش، حفره‌ها در زاویه‌ی ۱۵۵ درجه نسبت به محور افق و با فاصله‌های یکسان از یکدیگر در سطح داخلی لوله تعبیه‌شده‌اند. [۱]



شماتیک حفره‌های تعبیه‌شده در سطح داخلی لوله [۱]



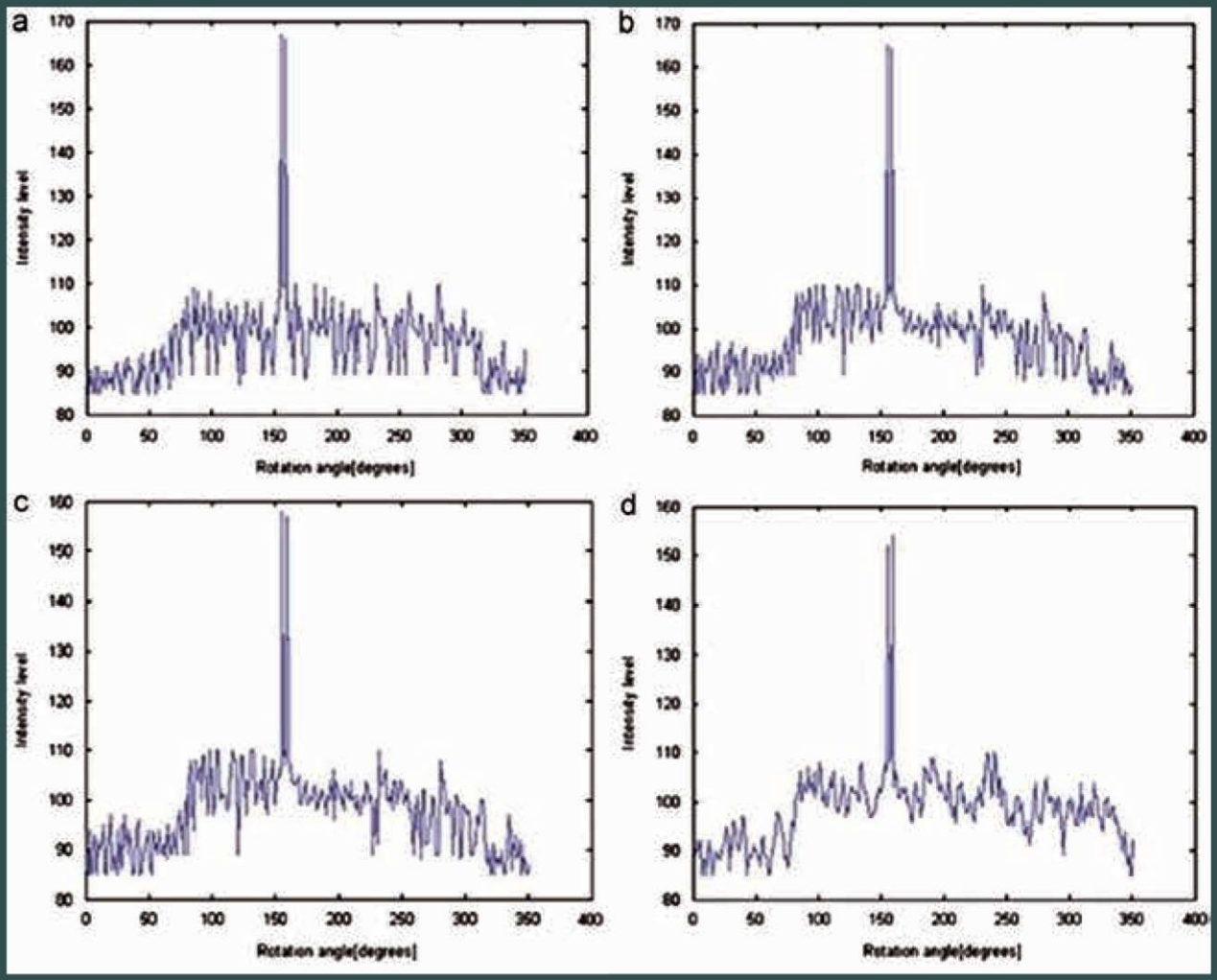
موقعیت زاویه‌ای حفره‌ها روی حلقه نوری لیزر نسبت به افق [۱]

برای تشخیص نقص‌ها، از یک الگوریتم استفاده می‌شود که میانگین شدت موضعی را در هر بیضی (نوری که به دوربین بازمی‌گردد) محاسبه می‌کند:

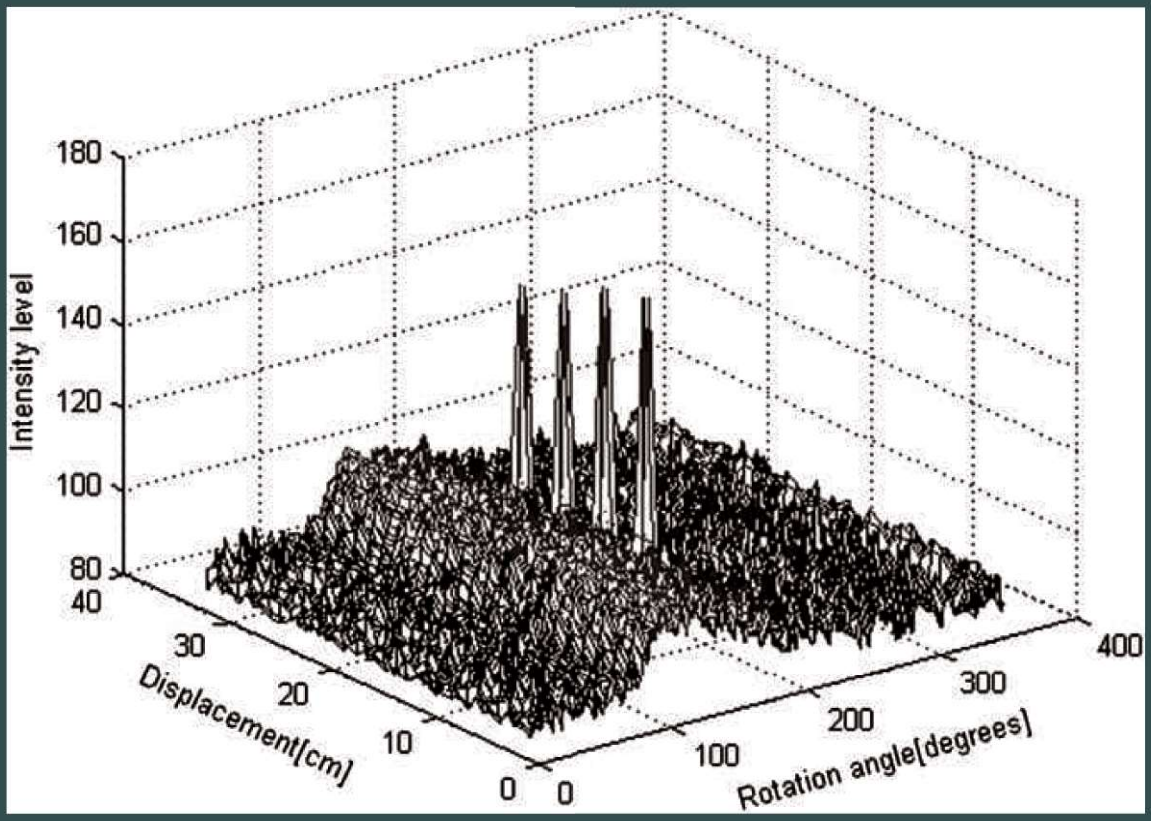
$$\mu_j = \frac{\sum i}{n \times m}$$

که در این رابطه μj میانگین شدت, i شدت سطح خاکستری یک نقطه‌ی خاص در تصویر و n*m اندازهٔ دریچهٔ اسکن‌کننده دوربین است.

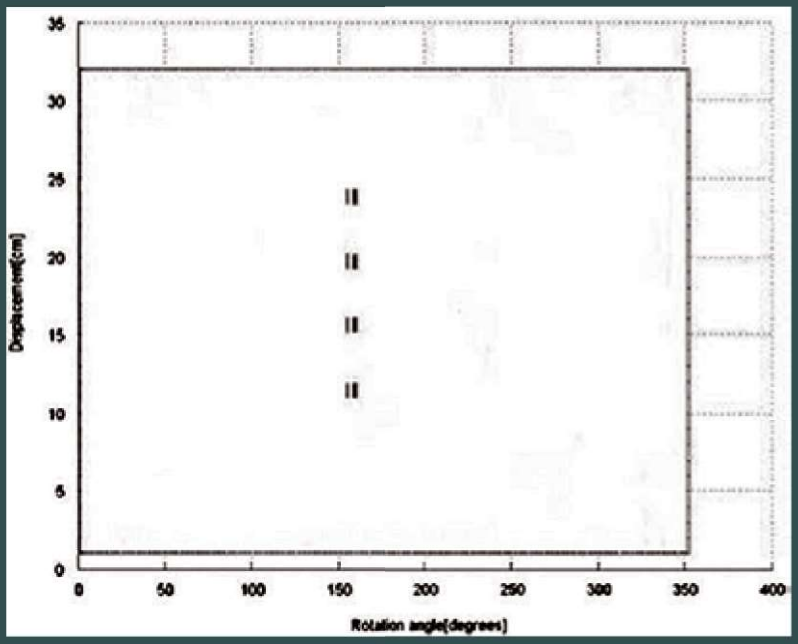
دیاگرام‌های شدت به شکل زیر هستند که در آن‌ها محور افقی نشان‌دهندهٔ زاویه روی حلقه نوری و محور عمودی نشان‌دهندهٔ شدت است. هر پیک شدت نشانگر وجود یک حفره است. در آزمون چهار پیک در زاویهٔ ۱۵۵ درجه نسبت به محور افق مشاهده می‌شود که حاکی از وجود چهار حفره در سطح داخلی لوله است:



زمانی که سیستم بازرسی درون لوله حرکت می‌کند یک نقشه از سطح داخلی لوله ایجاد می‌کند که در این نقشهٔ سطحی، ارتفاع نشانگر شدت است. با استفاده از نمای بالای نقشهٔ سطحی، لبه‌های حفرات را نیز می‌توان مکان‌یابی کرد. شدت در محل‌هایی که ناپیوستگی وجود دارد به‌شدت تغییر می‌کند. نقص‌های سطحی کوچک باعث افزایش شدت شده‌اند درحالی‌که نقص‌های سطحی بزرگ هم باعث افزایش شدت و هم کاهش آن شده‌اند؛ به این صورت که در لبه‌های نقص‌های بزرگ شدت افزایش اما درون آن‌ها شدت کاهش می‌یابد. این تغییرات در شدت به دلیل وجود تغییرات در هندسه سطح و تأثیر آن روی بازتاب نور از آن سطح است. در لبهٔ ناپیوستگی‌ها سطح از حالت افقی به مایل تغییر می‌کند و درنتیجه زاویهٔ انتشار نور تغییر می‌کند. با توجه به اینکه میزان نور بازتاب شده با زاویهٔ انتشار نور متناسب است، شدت نور بازتاب شده تغییر می‌کند. [۱]



نقشهٔ سطحی درون لوله [۱]



نقشه سطحی از نمای بالا و مشخص شدن حفرات با توجه به فاصله آن‌ها از سیستم نوری [۱]

با روش بازرسی غیر مخرب نوری، نقص‌های کوچک نیز مشخص می‌شوند حتی اگر مساحت نقص از پهنای حلقه نوری کوچک‌تر باشد. حداقل اندازه‌ی نقص قابل تشخیص توسط صافی سطح بازتاب‌کننده و حساسیت دوربین تعیین می‌شود. نقشه‌ی سطحی حاصل از سطوح صاف کنتراست بالاتری دارد و نقص‌های سطحی به‌راحتی قابل تشخیص‌اند درحالی‌که در سطوح زبر کاملاً برعکس است. کاهش زاویه 1α، شدت بازتاب بین سطوح سالم و سطوح دارای نقص را افزایش می‌دهد و تشخیص‌ها در تصویر را راحت‌تر خواهند کرد. این سیستم ساده، کارآمد و اتوماتیک می‌تواند حفرات، نقص‌ها و ناپیوستگی‌های سطح داخلی لوله را تشخیص دهد و عملکرد دقیق‌تری نسبت به تکنیک سنتی CCTV غیراتوماتیک دارد. [۱]

[۱]Corrosion detection of internal pipeline using NDT optical inspection system, M.S. Safizadeh, T. Azizzadeh, 2012.
[۲]drainskleen.com.au/cctv-drain-inspection