

# بازرسی خودکار خوردگی در یک پروفیل مستطیلی با استفاده از روبات

## روبش گر فراصوتی

مهدی ضیغمی	فرهنگ هنرور*	بهراد قاضی نوری
کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران	استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران	کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
zeighami.me@gmail.com	honarvar@kntu.ac.ir	ghazinouribehrad@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

### چکیده

در بازرسی فراصوتی پروفیل‌ها، معمولاً به دلیل دسترسی آسان‌تر، بازرسی از روی سطح بیرونی صورت می‌گیرد. در احداث پل‌های فلزی، پروفیل‌های با مقطع چند ضلعی به‌گونه‌ای در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند که دسترسی به دیواره بیرونی پروفیل‌ها وجود ندارد و در نتیجه بازرسی خوردگی باید از روی سطح داخلی پروفیل انجام شود. در این حالت، بازرسی فراصوتی پروفیل به صورت دستی غیرممکن است. جهت دسترسی به سطح داخلی این پروفیل‌ها، یک روبات روبش گر فراصوتی طراحی و ساخته شد. روبات ساخته شده به وسیله پیش‌ران‌های که درون خود آن تعبیه شده است در طول پروفیل حرکت می‌کند و موقعیت روبات همواره به کمک یک کدگذار اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه به کمک ۱۶ پروب غوطه‌وری، دیواره‌ها، کف و گوشه‌های پروفیل را مورد بازرسی قرار می‌دهد. اطلاعات به‌دست آمده به کمک پروب‌ها به وسیله کارت فراصوتی سرعت بالا دریافت و در نرم‌افزار فراصوتی پردازش و جهت تخمین ضخامت دیواره پروفیل به صورت تصاویر روبش B نمایش داده شده و ذخیره می‌شوند. برای اطمینان از صحت عملکرد روبات، پروفیلی به طول ۷ متر و با ضخامت دیواره ۱/۹ میلی‌متر مورد بازرسی قرار گرفت و کاهش ضخامت ۰/۲ میلی‌متر در بخشی از کف پروفیل با موفقیت شناسایی شد. نتایج به‌دست آمده پس از پردازش در قالب نتایج روبش C نیز قابل ارائه است.

### واژگان کلیدی: روبات، آزمون فراصوتی، ضخامت‌سنجی، روبش C

#### ۱. مقدمه

زیان‌بارترین معضلات صنایع مطرح می‌شود. از آن جا که فلزات مصارف گسترده‌ای در جهان صنعتی امروز دارند، خوردگی به پدیده‌ای تبدیل شده است که اطراف ما را احاطه

خوردگی یکی از رایج‌ترین و مهم‌ترین عوامل تخریب تجهیزات فلزی صنعتی و شهری است که به عنوان یکی از

کرده؛ وسایل منزل، خودروها، تجهیزات صنعتی، لوله‌های نفت و گاز، سازه‌های هوایی و ... مورد حمله خوردگی قرار می‌گیرند و این پدیده خسارت‌های مالی و بعضاً جانی فراوانی را موجب می‌شود [۱]. در ایران طبق آمار منتشر شده توسط وزارت نفت، هزینه‌های ناشی از نادیده گرفتن مقوله خوردگی، بالغ بر ۵ درصد تولید ناخالص داخلی کشور است [۲].

اگرچه بازرسی به صورت دستی، بخش عمده استفاده از فراصوت در صنعت را در بر می‌گیرد، اما در سال‌های اخیر به دلیل نیاز به اطلاعات با جزئیات بیشتر و دقیق‌تر از قطعات حساس در صنایع، استفاده از سیستم بازرسی خودکار افزایش یافته است. مخازن و خطوط لوله از جمله مواردی هستند که بازرسی فراصوتی خودکار در آن‌ها بسیار پرکاربرد است [۳]. سرعت و دقت بالای این روش به دلیل عدم وجود خطای انسانی و امکان بازرسی مناطق پرخطر و یا مناطقی که امکان دسترسی به آنها وجود ندارد علل اصلی افزایش استفاده از این روش برای بازرسی در صنایع هستند. به دلیل تنوع روبات‌های بازرسی لوله، برای ساخت یک روبات بازرسی پروفیلی با مقطع غیر مدور نیز باید در ابتدا پیشینه طراحی و ساخت روبات‌های پیمایش لوله بررسی شود. طرح اولین روبات برای پیمایش درون لوله در سال ۱۹۴۲ توسط پرکینز<sup>۱</sup> ارائه شد که به وسیله آن ایجاد پوشش محافظ بر روی دیواره‌های لوله انجام می‌شد [۴]. نمونه‌های پیشرفته‌تر این روبات در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ میلادی طراحی و ارائه شدند [۵، ۶]. این روبات‌ها بسیار ابتدایی و در واقع یک گاری متحرک بودند که تجهیزات پوشش‌دهی را با خود حمل می‌کردند و به وسیله یک کابل در لوله کشیده می‌شدند. اولین طرحی که به روبات‌های پیمایش لوله امروزی بیشتر شبیه بود و توسط رومن و همکاران در سال ۱۹۹۳ ارائه شد [۷]. نخستین روبات بازرسی لوله که یک روبات چرخ‌دار خودکار برای بازرسی مجاری فاضلاب بود در سال ۱۹۹۷ توسط ایلگ<sup>۲</sup> و همکاران ساخته شد. [۸] در سال ۱۹۹۹ هیروز<sup>۳</sup> و

همکاران، طرح یک روبات با قابلیت جمع و باز شونده در محدوده قطر ۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر را مطرح کردند که اولین نمونه از روبات‌های تک جزئی با قابلیت انطباق با دیواره داخلی لوله بود [۹]. در سال ۲۰۰۶ نصیری و همکاران اقدام به ساخت روبات جدید به نام کانتارو<sup>۴</sup> کردند که برای بازرسی فاضلاب‌های شهری به صورت سریع و با هزینه پایین کاربرد دارد [۱۰]. این روبات ضمن ضد آب بودن قابلیت انطباق با لوله‌های ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری را دارا است. در سال ۲۰۱۰ کوان و همکاران روباتی را طراحی کردند که علاوه بر قابلیت جمع و باز شونده، امکان خلاص کردن چرخ‌ها با استفاده از یک کلاچ مکانیکی را دارا بود تا در شرایط اضطراری امکان خارج کردن روبات از لوله به صورت خلاص مهیا باشد [۱۱]. دستگاه‌های بازرسی خودکار فراصوتی به‌طور کلی از ۴ بخش اصلی سیستم حرکتی، سیستم ارسال موج فراصوتی به داخل قطعه و دریافت آن (تراگذارها<sup>۵</sup>)، مولد موج و سیستم ذخیره، پردازش و نمایش اطلاعات تشکیل می‌شوند [۱۲]. در تحقیق انجام شده توسط آقای کتوینکل<sup>۶</sup>، انواع روش‌های بازرسی خودکار فراصوتی در لوله بررسی شده‌اند [۱۳]. مقارن بودن مقطع دایره باعث می‌شود که این مقطع برای هر دو حالت بازرسی (امواج هدایت شده و امواج حجمی) مناسب‌تر از دیگر مقطع‌ها باشد. نتایج آزمون فراصوتی به سه روش اصلی روبش A<sup>۷</sup>، روبش B<sup>۸</sup> و روبش C<sup>۹</sup> نمایش داده می‌شوند. روبش A نتایج مربوط به یک نقطه در حال بازرسی از قطعه را به صورت یک سیگنال زمانی نشان می‌دهد. روبش B نمایی از مقطع مورد بازرسی را نمایش می‌دهد. روبش C در مواردی که محیط مورد بازرسی وسیع است کاربرد دارد و نمای کلی درون قطعه را در قالب یک تصویر دو بعدی ارائه می‌کند که با استفاده از آن تحلیل نتایج بسیار آسان‌تر خواهد شد.

به منظور شناسایی خوردگی در یک پروفیل با مقطع غیرمدور به عرض ۵۶ میلی‌متر از جنس فولاد، یک روبات روبش‌گر فراصوتی در آزمایشگاه ارزیابی غیرمخرب دانشگاه خواجه

جنس پروفیل از فولاد و سطح خارجی آن به دلیل وجود روکش غیرقابل دسترسی است. بخش در معرض خوردگی شامل بخشی از دیواره‌ها، گوشه‌ها و کف پروفیل است. این روبات به کمک چهار چرخ درون پروفیل حرکت کرده و به بازرسی از کف و بخشی از دیواره‌ها می‌پردازد. نیروی محرکه مورد نیاز به وسیله یک موتور الکتریکی متصل به چرخ‌های جلو تأمین می‌شود. با توجه به محدودیت عرضی ابعاد در حد ۵۰ میلی‌متر، امکان قرارگیری یک موتور بین دو چرخ وجود ندارد. بنابراین باید موتور خارج از فاصله‌ی بین چرخ‌ها قرار گیرد. با توجه به شرایط مسأله، موتوری با توان بالا و ابعاد کم، غیر خود قفل و بدون ایجاد نویز مورد نیاز بود که ضدآب هم باشد. بدین منظور یک سروو موتور<sup>۱</sup> مدل MX-64R ساخت شرکت داینامیکسل<sup>۱۱</sup> مورد استفاده قرار گرفت که تمامی ویژگی‌های مورد نظر برای روبات به جز ضدآب بودن را دارا بود.

جدول ۱. مشخصات موتور داینامیکسل

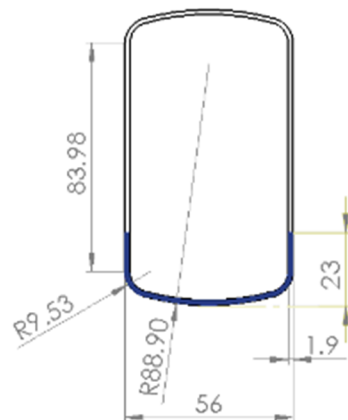
مدل	MX-64R
ابعاد (mm)	۴۱×۶۱×۴۰
ولتاژ (V)	۱۲
گشتاور (N.m)	۶
سرعت در حالت بدون بار (RPM)	۶۳

انتقال قدرت از موتور به چرخ‌ها به وسیله یک جعبه دنده قائم‌الزاویه با نسبت تبدیل ۲ به ۱ و چرخ‌دنده‌های مخروطی انجام می‌شود که خود قفل نمی‌باشد و با گردش محور خروجی، امکان گردش محور ورودی وجود دارد. غیر خود قفل بودن گیربکس و موتور از آن جهت مهم است که اگر به هر دلیل روبات در میانه پروفیل با مشکل حرکتی روبه‌رو شد بیرون کشیدن آن در حالت خاموش امکان‌پذیر باشد. با توجه به فولادی بودن پروفیل، از چرخ‌های مغناطیسی استفاده شده است تا از لغزش چرخ‌ها جلوگیری شود. همچنین، با توجه به محدودیت ابعاد داخلی پروفیل، از

نصیرالدین طوسی طراحی و ساخته شد. مزیت اصلی این روبات نسبت به روبات‌های بازرسی لوله، امکان بازرسی مقاطع غیرمدور به صورت خودکار است. در حال حاضر روبات قادر به بازرسی یک پروفیل مستطیلی شکل با شعاع انحنای کف و گوشه‌های متفاوت است. همچنین با تعویض قطعه نگهدارنده پروب‌ها، بازرسی مقاطع مشابه نیز امکان‌پذیر است. این روبات با حرکت درون پروفیل و بهره‌گیری از ۱۶ پروب فراصوتی به ضخامت‌سنجی از محل مورد بازرسی می‌پردازد. ضخامت‌سنجی به روش بازتابی و با استفاده از آب به عنوان ماده واسط (سیستم غوطه‌وری) صورت می‌گیرد. این مقاله در ابتدا به شرح مراحل طراحی روبات، محدودیت‌های پیش‌رو و ساخت روبات می‌پردازد. سپس به منظور بالا بردن دقت محاسبه ضخامت، سرعت دقیق صوت در پروفیل به همراه عدم قطعیت اندازه‌گیری تعیین شده و در نهایت نتایج به‌دست آمده از بازرسی کامل یک پروفیل ارائه می‌شود.

## ۲. طراحی روبات روبش‌گر

این روبات روبش‌گر برای بازرسی خوردگی در پروفیلی طراحی شده است که بخش پایینی دیواره‌ها تا ارتفاع ۲۳ میلی‌متر در معرض خوردگی قرار دارند که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مقطع پروفیل مورد بازرسی (اندازه‌ها به میلی‌متر)

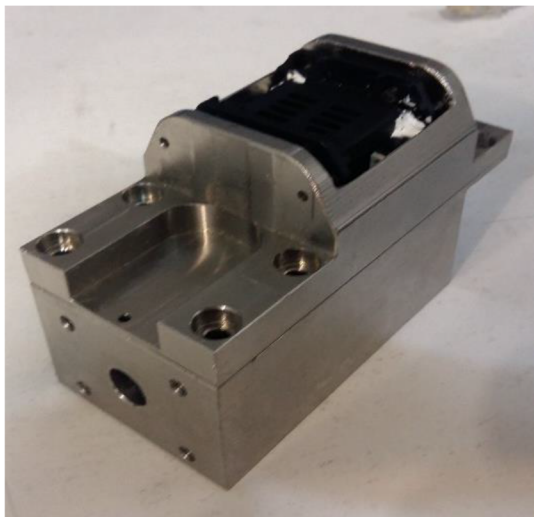
آهن‌رباهای حلقوی بسیار قوی با ضخامت ۵ میلی‌متر از نوع آهن‌رباهای نئودیموم<sup>۱۲</sup> با قدرت میدان مغناطیسی نیم تسلا استفاده شده است. دو حلقه فولاد ضد زنگ بگیر با ضخامت ۲ و ۳ میلی‌متر در دو طرف آهن‌ربا تعبیه شده است که با توجه به انحنای کف پروفیل، این حلقه‌ها نیز به صورت شیب‌دار (مخروط ناقص) و متناسب با شیب انحنای کف پروفیل در نظر گرفته شده‌اند. همچنین دو بازوی چرخ‌دار در جلو شکل ۲ و دو بازوی چرخ‌دار در عقب روبات برای تماس با دیواره تعبیه شده است. به منظور حفظ فاصله از دیواره‌های پروفیل نیز از فنرهای زاویه‌ای بین دو بازو استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از این بازوها حفظ زاویه عمودی بین پروب‌ها و سطح مورد روبش به منظور نفوذ هر چه بیشتر موج به داخل قطعه است.



شکل ۲. بازوهای چرخ‌دار جلوی روبات

از آنجا که موتور مورد استفاده ضدآب نیست محافظه‌ای برای آن طراحی و ساخته شد محدودیت‌های طراحی این محافظه، که باید تا حداکثر ارتفاع ممکن ضد آب باشد، عبارتند از: امکان تبادل حرارت موتور، امکان دسترسی به کویلینگ موتور و گیربکس، عدم برخورد با مکانیزم تماس با دیواره. محافظه طراحی شده ضمن ضد آب کردن موتور تا ارتفاع ۵۷ میلی‌متر (بیش از دو برابر ارتفاع مورد نیاز برای انجام بازرسی به صورت غوطه‌وری) امکان تبادل حرارت برای موتور را از بالا فراهم می‌سازد. علاوه بر این دو تکه بودن محافظه، دسترسی به کویلینگ را امکان‌پذیر می‌سازد. لازم به ذکر

است که تمامی سوراخ‌های این محافظه به جز سوراخ اتصال کویلینگ<sup>۱۳</sup> موتور به گیربکس غیر راه به در هستند که سوراخ کویلینگ نیز به وسیله کاسه نمد آب‌بندی شده که در شکل ۳ نشان داده شده است.

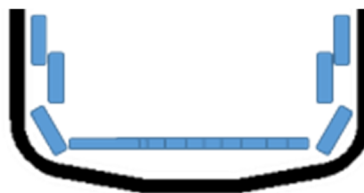


شکل ۳. محافظه ضدآب موتور

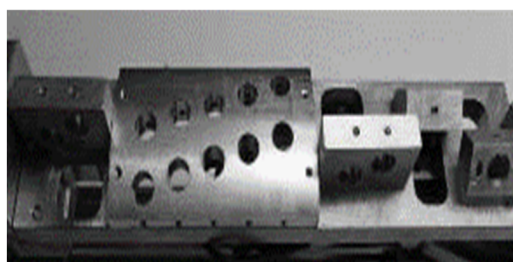
به دلیل نیاز به خودکار بودن فرایند بازرسی و محدودیت فضای داخلی پروفیل، روش بازرسی غوطه‌وری<sup>۱۴</sup> مورد استفاده قرار گرفت که یکی از رایج‌ترین روش‌های بازرسی فراصوتی خودکار محسوب می‌شود. در این روش آب به عنوان ماده واسط بین پروب و قطعه قرار دارد. برای بازرسی قسمت پایینی این پروفیل، در مجموع از ۱۶ پروب استفاده شده است؛ دو پروب برای بازرسی هر دیواره (مجموعاً ۴ پروب) یک پروب برای بازرسی هر گوشه (مجموعاً ۲ پروب) و ۱۰ پروب برای بازرسی کف پروفیل که در شکل ۴ نشان داده شده است. استفاده از این تعداد پروب در مقطع مورد روبش به علت محدودیت فضا و افزایش سرعت بازرسی است.

در بازرسی فراصوتی به روش غوطه‌وری برای نفوذ بیشترین مقدار ممکن از موج به داخل قطعه، لازم است که پروب به سطح مورد بازرسی عمود باشد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، قسمت کف و گوشه‌های پروفیل منحنی

شکل هستند و در نتیجه برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر نگهدارنده پروب‌ها، شکل ۵، باید به گونه‌ای طراحی می‌شد که پروب‌ها در راستای شعاع انحنای قطعه قرار گیرند. مطابق شکل ۵ از چپ به راست به ترتیب قطعه نگه‌دارنده دو پروب بازرسی دیواره، ۱۰ پروب بازرسی کف، دو پروب بازرسی دیواره دیگر و در نهایت دو پروب بازرسی گوشه‌ها نشان داده شده است.

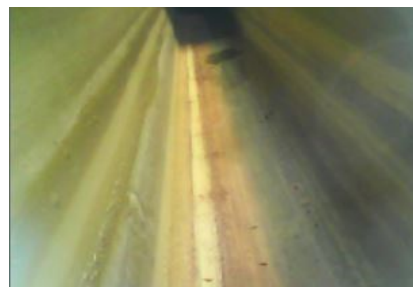


شکل ۴. جانمایی شماتیک پروب‌ها در پروفیل



شکل ۵. قطعات نگه‌دارنده پروب‌ها

جهت اطلاع از شرایط پیشروی روبات در پروفیل، یک دوربین با استاندارد مقاومت در برابر آب IP67، که از لامپ‌های LED کوچک برای روشنایی بهره می‌گیرد، در جلوی روبات استفاده شده است. مطابق شکل ۶ استفاده از دوربین علاوه بر مزیت ذکر شده امکان بازرسی چشمی از درون پروفیل را نیز مهیا می‌سازد.



شکل ۶. تصویر حاصل از دوربین از داخل پروفیل مورد بازرسی

موتور داینامیکسل به کار رفته در روبات، خود دارای یک کدگذار<sup>۱۵</sup> جهت موقعیت‌سنجی است. اما یک کدگذار مجزا با قطر چرخ ۶۳/۳ میلی‌متر و استاندارد مقاومت در برابر آب IP67 برای تعیین موقعیت روبات در جلوی آن تعبیه شده تا در صورت درجا زدن موتور به هر علت، موقعیت دقیق روبات دچار خطا نشود. کدگذار مورد استفاده به ازای هر دور چرخش، ۳۶۰۰ پالس تولید می‌کند. در نتیجه با داشتن قطر چرخ انکودر، دقت موقعیت‌سنجی  $e$ ، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$e = \frac{\pi d}{M} = \frac{63.3 \times \pi}{3600} = 0.05 \text{ mm} \quad (1)$$

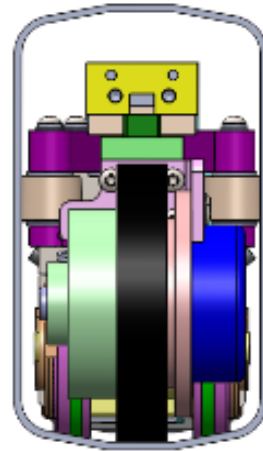
که در آن  $d$  قطر چرخ به میلی‌متر و  $M$  تعداد پالس کدگذار در هر دور چرخش است. برای حفظ شکل ظاهری روبات و همچنین محافظت از کابل‌های درون آن یک درپوش برای روبات طراحی شد. در ابتدا جنس درنظر گرفته شده برای درپوش، ورق آلومینیومی بود. به دلیل پیچیدگی این قطعه، ورقکاری آن بسیار سخت و با درصد خطای غیرقابل قبول بود. در نتیجه ساخت درپوش به وسیله پرینتر سه بعدی انجام شد. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این درپوش از بالا به محفظه عبور سیم‌های روبات پیچ می‌شود.



شکل ۷. درپوش روبات

به دلیل تماس مداوم مجموعه با آب، تمامی قطعات اصلی از جنس استیل 304 (نگیر مغناطیسی و ضدزنگ) و یا آلومینیوم‌های 7075 یا 6063 هستند.

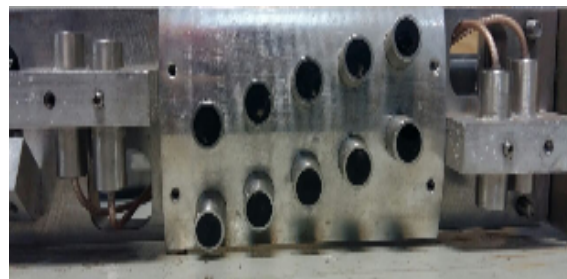
در شکل ۸ نحوه قرارگیری روبات طراحی شده در پروفیل و منطبق شدن چرخ‌های کف و بازوها بر روی سطح پروفیل مشاهده می‌شود.



شکل ۸. جای‌گیری روبات در پروفیل از نمای روبه‌رو

## ۲-۱. کارت و پروب فراصوتی

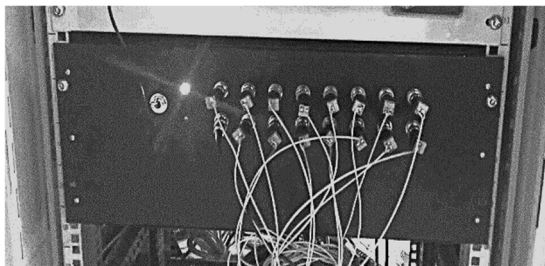
پروب‌های مورد استفاده در این روبات، از نوع غوطه‌وری و با ۱۱ متر کابل متصل به پروب هستند که در شکل ۹ نشان داده شده است. فرکانس مرکزی این پروب‌ها ۱۵ مگاهرتز با قطر بدنه ۹/۵ میلی‌متر و ارتفاع بدنه فلزی آنها ۲۵ میلی‌متر و جنس بلوره آنها پیزوکامپوزیت<sup>۱۶</sup> است. پیزوکامپوزیت‌ها در حقیقت بلوره‌های پیزوسرامیک هستند که در ماتریسی پلیمری جای گرفته‌اند. علاوه بر امکان ایجاد پیزو کامپوزیت به شکل‌های مختلف مورد نیاز، بالا بودن کوپلینگ الکترومکانیک<sup>۱۷</sup> پیزوکامپوزیت‌ها علت اصلی برتری آنها نسبت به انواع دیگر پیزوها است [۱۴].



شکل ۹. مونتاژ پروب‌ها روی روبات

کارت‌های رایج فراصوتی معمولاً دارای یک درگاه برای ارسال و دریافت اطلاعات و یک درگاه تنها برای دریافت اطلاعات هستند. با توجه به تعداد بالای پروب‌ها (۱۶ پروب)، در این پروژه استفاده این روش نیازمند مجموعاً ۱۶ بار پیمایش طول پروفیل برای بازرسی کل آن بود که باعث زمان‌بر شدن روند بازرسی می‌شد. از این‌رو از یک کارت USPC7100 ساخت کشور فرانسه استفاده شد. این کارت بر روی شیار PCI مادربرد نصب می‌شود. از قابلیت‌های مهم این کارت امکان استفاده از یک تسهیم‌کننده<sup>۱۸</sup>، است که جداگانه به کارت متصل می‌شود و امکان ارسال و دریافت اطلاعات به ۸ پروب را برای کارت فراهم می‌سازد.

به منظور اتصال ۱۶ پروب به تسهیم‌کننده هشت‌تایی از ۸ رله استفاده شد. شکل ۱۰ مجموعه طراحی شده برای قرارگیری ۸ رله را نشان می‌دهد. به وسیله این مجموعه، پروب‌ها به دو دسته هشت‌تایی تقسیم شدند که به وسیله درگاه BNC به محفظه متصل هستند و در هر نوبت روبش، یک دسته هشت‌تایی به تسهیم‌کننده متصل است. در نتیجه با یک حرکت رفت و برگشت روبات، کل مقطع مورد نظر روبش می‌شود (۸ پروب در رفت و ۸ پروب در برگشت).



شکل ۱۰. محفظه اتصال پروب‌ها به تسهیم‌کننده

مجموعه سیم‌های بخش حرکتی، دوربین، موقعیت‌یابی و پروب‌های بازرسی روبات به وسیله یک لوله خرطومی به طول ۱۰ متر از روبات تا واحد کنترل کشیده شده است. به منظور تأمین نیروی مورد نیاز برای حمل خرطومی در حرکت روبات درون پروفیل، یک مجموعه وینچ به همراه هرزگرد بر روی یک محفظه طراحی و ساخته شد. به کمک این مجموعه، در هنگام بازگشت روبات از انتهای پروفیل، خرطومی به صورت خودکار درون محفظه جمع می‌شود.

شکل ۱۱ مجموعه نهایی واحد کنترل، محفظه وینچ و روبات روبش گر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. مجموعه نهایی روبات، واحد کنترل و محفظه وینچ

سرعت صوت در قطعه به وسیله رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$v = \frac{2L}{t} \quad (2)$$

با استفاده از داده های جدول ۲ و اصل عدم قطعیت، سرعت صوت در قطعه محاسبه شد. رابطه ۳ سرعت محاسبه شده در پیوست ۱ را نشان می‌دهد.

$$v = 6127.16 \pm 20.17 \text{ m/s} \quad (3)$$

### ۳-۱. محاسبه بازه زمانی قابل قبول در نرم افزار

از مزایای کارت USPC7100 حفظ شکل پاسخ هر اکوی ارسالی با استفاده از تنها ۵۰۰ نقطه از اکوی دریافتی است. در نتیجه بازه زمانی تعریف شده در هر آزمایش به ۵۰۰ قسمت تقسیم می‌شود و دقت در این حالت ۱/۵۰۰ بازه زمانی خواهد بود. به‌طور مثال اگر بازه ۵ μs برای دستگاه تعریف شود، دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ μs خواهد بود. در بازرسی پروفیل، شناسایی حداقل ۱۰ درصد کاهش ضخامت به عنوان دقت معیار مد نظر است. با توجه به سرعت به‌دست آمده در بخش قبل، یک بار ضخامت قطعه از داخل به وسیله پروب غوطه‌وری و بار دیگر از بیرون به وسیله پروب تماسی اندازه‌گیری شد که دقت زمانی مورد نظر در این شرایط ۰/۰۶ μs بود. در نتیجه بازه زمانی  $T$  مورد نیاز برابر است با:

$$T = N\Delta t = 500 \times 0.06 = 30 \mu\text{s} \quad (4)$$

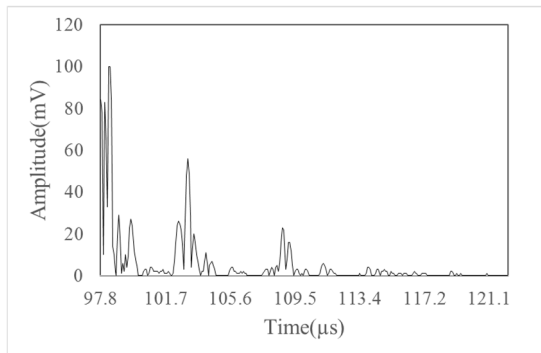
که در آن  $N$  تعداد نقاط در یک بازه زمانی و  $\Delta t$  دقت زمانی مورد نظر است. در بازرسی به روش غوطه‌وری، به‌دلیل آنکه سرعت صوت در قطعه فولادی تقریباً ۴ برابر سرعت صوت در آب است، لازم است که فاصله پروب تا سطح قطعه حداقل یک چهارم ضخامت قطعه باشد، تا بین هر دو اکوی سطحی یک اکوی دیوار پشتی قطعه قرار گیرد. بر اساس آزمایشی که انجام شد، فاصله دو اکوی دیوار پشتی ۰/۶۴ μs است. در نتیجه در حداقل شرایط (ضخامت آب یک چهارم قطعه)

### ۳.۳. آزمایش‌های تجربی

جنس پروفیل مورد بازرسی از فولاد است، در نتیجه سرعت صوت در قطعه باید حدود ۵۹۰۰ m/s باشد. از آنجا که برای محاسبه ضخامت قطعه، نیاز به سرعت دقیق صوت است در نتیجه با استفاده از یک میکرومتر ضخامت آن ۱۰ بار مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس به وسیله یک پروب تماسی<sup>۱۹</sup> ۱۰ مگاهرتز، زمان رفت و برگشت موج در همان نقطه مطابق جدول ۲ اندازه‌گیری شد. با داشتن ضخامت و زمان پیمایش آن، سرعت موج در قطعه محاسبه شد.

جدول ۲. داده‌های به‌دست آمده از میکرومتر و پروب تماسی

شماره آزمایش	ضخامت $L$ (mm)	زمان رفت و برگشت $t$ (s)
۱	۲/۶۴	۰/۸۷
۲	۲/۶۵	۰/۸۷
۳	۲/۶۵	۰/۸۶
۴	۲/۶۶	۰/۸۷
۵	۲/۶۴	۰/۸۶
۶	۲/۶۶	۰/۸۷
۷	۲/۶۴	۰/۸۷
۸	۲/۶۴	۰/۸۵
۹	۲/۶۶	۰/۸۶
۱۰	۲/۶۶	۰/۸۷
میانگین	۲/۶۵	۰/۸۶۵



شکل ۱۴. اکوهای دریافتی از محل عیب

با توجه به اختلاف زمانی به دست آمده از شکل ۱۳ ضخامت کف پروفیل برابر است با:

$$L_1 = \frac{(T_2 - T_1)}{2} \times \frac{c_L}{10^4} \quad (5)$$

$$= \frac{(112.1 - 105.8)}{2} \times \frac{6127}{10000} = 1.93 \text{ mm}$$

که در آن  $L_1$  ضخامت بخش سالم کف پروفیل،  $T_1$  و  $T_2$  زمان‌های رسیدن دو اکوی متوالی و  $c_L$  سرعت موج طولی در ماده کف پروفیل است. همچنین طبق شکل ۱۴ ضخامت بخش دارای عیب برابر است با:

$$L_2 = \frac{(T'_2 - T'_1)}{2} \times \frac{c_L}{10^4} \quad (6)$$

$$= \frac{(108.7 - 103)}{2} \times \frac{6127}{10000} = 1.75 \text{ mm}$$

که در آن  $L_2$  ضخامت بخش معیوب کف پروفیل،  $T'_1$  و  $T'_2$  زمان‌های رسیدن دو اکوی متوالی است. در نتیجه کاهش ضخامتی حدود ۰/۲ میلی‌متر توسط روبات قابل تشخیص خواهد بود.

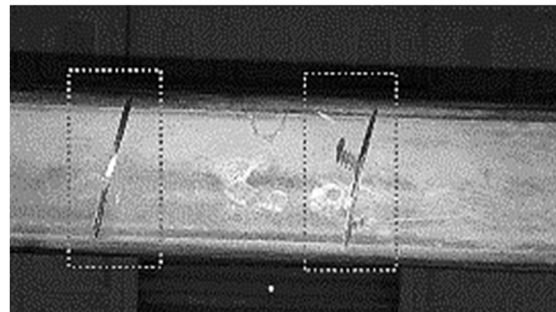
#### ۴-۱. روبش B

اگرچه تصاویر روبش A اولین و رایج‌ترین روش بازرسی فراصوتی هستند، اما تحلیل نتایج آن‌ها در کنار زمان‌بر بودن،

دو برابر این زمان یعنی  $1/28 \mu\text{s}$  کم‌ترین بازه زمانی مورد نیاز برای مشاهده یک اکو از سطح و یک اکو از کف قطعه خواهد بود. در نتیجه انتخاب بازه زمانی بین  $1/28 \mu\text{s}$  و  $1 \mu\text{s}$  ۳۰ دقت کافی برای بازرسی را فراهم می‌آورد.

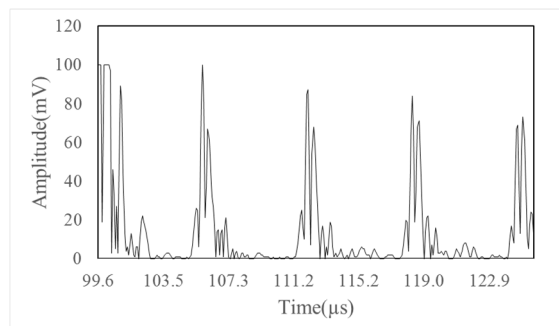
#### ۴. بازرسی داخل پروفیل

در نخستین آزمایش صورت گرفته، هدف دریافت تصاویر روبش A از پروفیل و تشخیص محل عیب‌های مصنوعی ایجاد شده به کمک این تصاویر است. به این منظور عیوب مصنوعی در بخشی از کف پروفیل ایجاد شد و با استفاده از ۸ پروب، این بخش مورد روبش قرار گرفت. که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. عیوب مصنوعی ایجاد شده در کف پروفیل

شکل ۱۳ اکو دریافت شده از سطح پیش از رسیدن به عیب و شکل ۱۴ اکوی دریافت شده در هنگام عبور از روی عیب را نشان می‌دهند که علاوه بر کاهش فاصله زمانی بین دو اکو، شکل اکوها نیز کاملاً تغییر کرده است.



شکل ۱۳. اکوهای دریافتی از سطح سالم



نیاز به افراد متخصص دارد. علاوه بر این، در بازرسی خودکار نرخ دریافت داده‌ها از نقاط مختلف بسیار بالا است. اگرچه امکان نمایش نتایج به صورت روبش A نیز با تعریف گیت‌های مختلف امکان‌پذیر است، اما نمایش نتایج به صورت تصاویر روبش C و B در اولویت قرار دارد.

در شرایط عادی تولیدکننده‌های پالس در یک زمان ثابت، تعداد دفعات معینی تراگذار را تحریک می‌کنند که این تعداد با معیار PRF<sup>۲۰</sup> برای دستگاه تعریف می‌شود. برای دریافت تصاویر روبش B (و روبش C) استفاده از این معیار امکان‌پذیر نیست زیرا تعداد دفعات تحریک به صورت خودکار بسیار بالاتر از سرعت حرکت دستگاه است و در نتیجه هنگام عبور از روی هر نقطه، تراگذار چندین بار موج را ارسال و دریافت می‌کند که باعث ایجاد چندین اکوی روبش A از یک نقطه می‌شود. در نتیجه هنگام به کارگیری اکوهای روبش A برای تولید تصویر روبش B از هر نقطه تعداد نامشخصی اکو وجود دارد و از کنار هم قرار دادن این نقاط تصویر درستی به دست نمی‌آید.

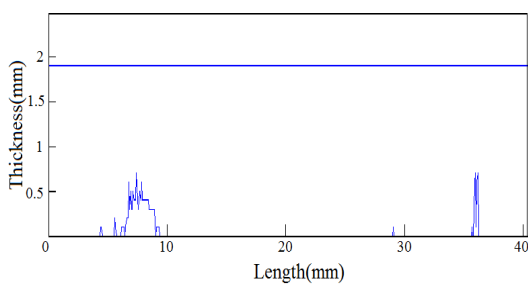
برای حل این مشکل، به جای استفاده از PRF برای تعیین زمان تحریک تراگذار از کدگذار استفاده می‌شود.

از آنجاکه به ازای پیشروی به اندازه هر ۰/۰۵ میلی‌متر، کدگذار یک پالس ارسال می‌کند، از پالس ارسالی علاوه بر موقعیت‌سنجی، برای فرمان دادن به تحریک کننده تراگذار نیز استفاده می‌شود. مستقل بودن کدگذار از سیستم حرکتی همچنین سبب می‌شود حتی در صورت درجا زدن موتور، اکوی تکراری از یک نقطه دریافت نشود.

با توجه به لرزش‌های ناشی از حرکت روبات در هنگام حرکت درون پروفیل، مکان دسته اکوهای نمایش داده شده از هر نقطه نسبت به نقطه‌های اطراف متفاوت است. البته فاصله هر دو اکو از یکدیگر که نمایانگر ضخامت است تغییری نمی‌کند، اما این اتفاق سبب می‌شود تا تشکیل تصاویر روبش B که از کنار هم قرار دادن سیگنال‌های روبش A حاصل می‌شود، دچار مشکل شود. از طرفی به دلیل نیاز به مشاهده

اطلاعات به صورت بهنگام<sup>۲۱</sup>، پردازش اطلاعات بعد از دریافت مجموعه آن‌ها امکان‌پذیر نیست. برای حل این مشکل دو گیت مجزا بر روی دو اکو پشت سر هم از دسته اکوهای دیوار پشتی تعریف شد. این گیت‌ها به گونه‌ای تنظیم شدند که انتهای گیت بر روی انتهای پیک دریافتی قرار گیرد. این کار به نرم‌افزار کمک می‌کند تا در صورت تغییر مکان اکو، گیت روی آن نیز تغییر موقعیت دهد و در نتیجه اکو در هیچ شرایطی از درون گیت خارج نشود. اختلاف زمانی دو گیت تعریف شده، نمایانگر ضخامت قطعه خواهد بود که با دست بودن سرعت صوت در قطعه این ضخامت قابل محاسبه است. سپس به کمک بخش توسعه داده‌های کارت، این اختلافات زمانی به صورت پشت سر هم رسم می‌شود که نتیجه آن نمودار ضخامت مقطع مورد روبش است و در صورت رسم اختلاف ضخامت اندازه‌گیری شده با ضخامت قطعه سالم، تصویر روبش B حاصل می‌شود. شکل ۱۵ تصویر روبش B به دست آمده از مقطعی که عیوب مصنوعی در آن ایجاد شده است را نمایش می‌دهد.

خط منطبق بر ضخامت ۱/۹ میلی‌متر نمایانگر سطحی است که روبات بر روی آن حرکت می‌کند و سطح منطبق بر ضخامت صفر نشانگر دیوار پشتی است که در برخی مناطق با کاهش ضخامت مواجه بوده است.

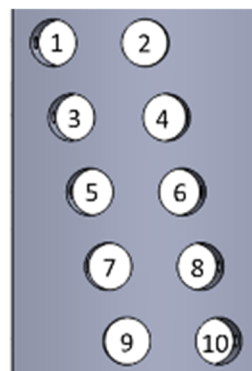


شکل ۱۵. تصویر روبش B دریافتی از کف پروفیل

#### ۴-۲. روبش C

از آنجا که حرکت روبات درون پروفیل در راستای یک محور انجام می‌شود، امکان استفاده از الگوریتم رایج برای تبدیل

تصاویر روبش A به روبش C نیست. در نتیجه در اثر حرکت پروب در راستای طول پروفیل، هر پروب یک تصویر روبش B را ثبت می‌کند و از کنار هم قرار گرفتن تصاویر روبش B، تصویر روبش C حاصل می‌شود. برای تولید این تصویر، در ابتدا تنظیمات تمامی ۱۶ پروب مطابق با توضیحات بخش ۴-۱ صورت گرفت و هر یک از پروبها سطحی به اندازه قطر پیزو را روبش کرد. از کنار هم قرار دادن این نتایج، تصویر روبش C کل مقطع مورد روبش به دست آمد. مطابق شکل ۱۶ پروبها با اختلاف زمانی به یک مقطع از پروفیل می‌رسند و در صورت کنار هم قرار دادن نتایج بدون در نظر گرفتن این بازه زمانی تصویر صحیحی به دست نخواهد آمد.



شکل ۱۶. چیدمان پروبهای بازرسی کف پروفیل

برای حل این مشکل، فاصله زمانی بین پروبها با توجه به فاصله مرکز تا مرکز هر دو پروب مجاور و همچنین سرعت حرکت روبات محاسبه شد تا در نمایش تصاویر این فاصله زمانی اعمال شود و تصویر حقیقی روبش شده از پروفیل به دست آید. همچنین طول قوس کف پروفیل برابر  $40/601$  میلی‌متر و تعداد پروبها ۱۰ عدد است. در نتیجه برای هر پروب منطقه مورد بازرسی برابر است با:

$$L_p = \frac{L_T}{N_p} = \frac{40.601}{10} = 4.06 \text{ mm} \quad (7)$$

که در آن  $L_p$  طول منطقه‌ی پوشش داده شده توسط هر پروب،  $L_T$  طول قوس کف پروفیل و  $N_p$  تعداد پروب است. همپوشانی پروبها نیز عبارتست از:

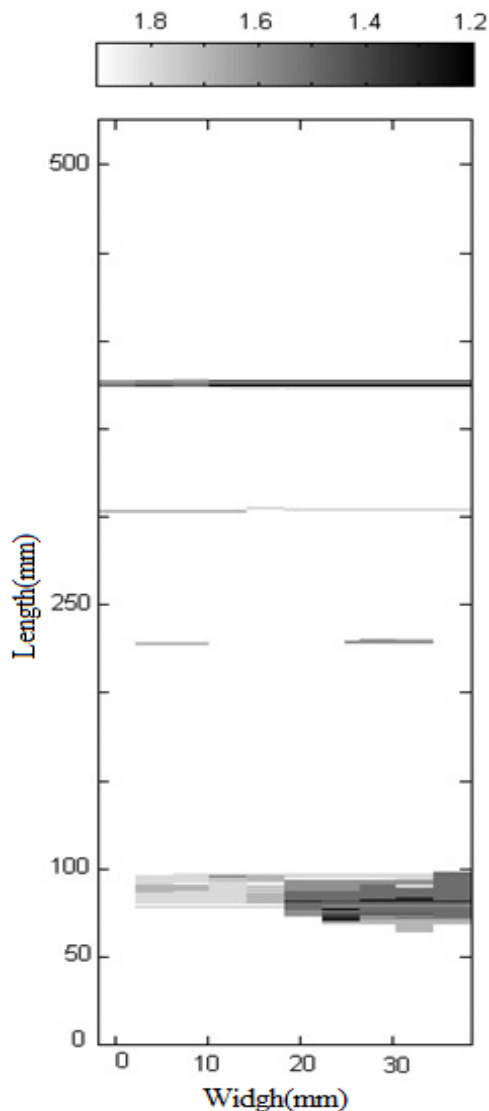
$$L_o = \frac{D - L_p}{D} = \frac{6 - 4.06}{6} = 32\% \quad (8)$$

که در آن  $L_o$  طول همپوشانی پروبها و  $D$  قطر هر پروب است. این همپوشانی علاوه بر بالا بردن دقت شناسایی عیوب به پیوستگی تصاویر روبش C به دست آمده نیز کمک می‌کند.

### ۵. نتیجه‌گیری

به منظور بازرسی خوردگی در پروفیلها با مقاطع غیردایروی، روباتی طراحی و ساخته شد که در نهایت طی بازرسی‌های انجام شده توسط این روبات نتایج زیر به دست آمد:

- استفاده از ۱۶ پروب به صورت هم‌زمان و کارت هشت کاناله سبب کاهش زمان بازرسی پروفیل شد. همچنین به دلیل همپوشانی مقطع پروبها، احتمال عدم شناسایی عیوب به حداقل رسید.
- یکپارچه‌سازی بخش‌های الکترومکانیکی و فراصوتی باعث شد تا به دلیل هماهنگی سرعت روبات با سرعت دریافت داده‌ها، از گرفتن داده اضافی و امکان ایجاد خطا در موقعیت عیب جلوگیری شود.
- با لحاظ کردن همپوشانی ۳۲ درصدی هر پروب با پروب مجاورش، تصویر روبش C کف پروفیل به دست آمد که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. در این تصویر، موقعیت و اندازه عیوب مصنوعی ایجاد شده در کف پروفیل به خوبی قابل مشاهده است.
- از مقایسه نتایج به دست آمده از تصاویر روبش C با ابعاد اندازه‌گیری شده روی قطعات، فاصله طولی عیوب با خطای ۰/۲ درصد محاسبه شد. دلیل پایین بودن درصد خطا، دقت بالای انکودر و استفاده از پالس انکودر



شکل ۱۷. تصویر روبش C دریافتی از عیوب ایجاد شده در کف پروفیل

به عنوان معیار PRF است. همچنین اندازه‌گیری عمق عیوب با دقت ۰/۱ میلی‌متر محاسبه شد.

- باتوجه به آنکه این روبات نمونه مشابهی ندارد صحت سنجی عملکرد آن تنها با بررسی استاندارد امکان‌پذیر است. طبق نتایج به‌دست آمده در بخش ۴، کاهش ضخامت ۰/۲ میلی‌متر توسط روبات شناسایی شد. با در نظر گرفتن ضخامت متوسط ۱/۹ میلی‌متر برای پروفیل، دقت اندازه‌گیری ۱۰ درصد است. طبق استاندارد API579-ASME/1 code [۱۵] میزان خوردگی قابل قبول در لوله، وابسته به بار داخلی و خارجی آن است و طبق استاندارد DNV [۱۶] میزان خوردگی مورد قبول برای سازه‌های دریایی تا ۲۰ درصد تخمین زده شده است. در نتیجه اگرچه میزان خوردگی مورد قبول برای پروفیل با توجه به کاربرد آن متفاوت است، می‌توان گفت که شناسایی خوردگی ۰/۲ میلی‌متر برای پروفیل‌های با ضخامت دیواره بیش از ۲ میلی‌متر، دقت قابل قبولی تلقی می‌شود.

## ۶. پیوست

ایجاد مدل خطای محاسبه سرعت صوت در قطعه مدل خطا بر اساس رابطه اصلی اندازه‌گیری و منابع خطا تعیین می‌شود. برای تعیین مدل خطا باید از رابطه ۹ نسبت به پارامترهای منابع خطا مشتق گرفته و آن‌ها را با هم جمع کرد [۱۷].

$$v = f(t, L) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \frac{\partial v}{\partial t} \varepsilon_t + \frac{\partial v}{\partial L} \varepsilon_L \\ &= a_t \varepsilon_t + a_L \varepsilon_L \end{aligned} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $a_i$  ضریب حساسیت منبع خطای  $i$  است.

به کمک اصل عدم قطعیت خواهیم داشت:

عدم قطعیت در اندازه‌گیری سرعت  $v$  مطابق با رابطه ۱۱ است [۱۸].

$$\begin{aligned} u_v &= t_{v,95} [(a_t u_t)^2 \\ &+ (a_L u_L)^2]^{1/2} \quad (95\%) \end{aligned} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱،  $u_i, a_i, t_{v,95}$  به ترتیب ضریب توزیع آماری، ضریب حساسیت و عدم قطعیت منبع خطای  $i$  است.  $v$  درجه آزادی است که با توجه به تعداد دفعات آزمایش مشخص می‌شود. درجه آزادی ۱۰ تکرار اندازه‌گیری برای متغیرها برابر ۹ و در نتیجه ضریب توزیع  $t_{v,95}$  برابر ۲/۲۶۲ خواهد بود.

عدم قطعیت اندازه‌گیری به دو قسمت سیستماتیک و تصادفی تقسیم می‌شود. عدم قطعیت تصادفی به وسیله روش‌های آماری محاسبه می‌شوند. خطاهای سیستماتیک توسط سازنده دستگاه‌های اندازه‌گیری تعیین می‌شوند. عدم قطعیت

سیستماتیک با احتمال ۹۵٪ برابر نصف خطای سیستماتیک

در نظر گرفته می‌شود.

به دلیل کمتر بودن تعداد تکرارها از ۳۰ تکرار برای محاسبه‌های آماری از آمار اندازه محدود و توزیع استیودنت تی استفاده می‌شود [۱۸].

برای محاسبه عدم قطعیت یک منبع خطا از جذر مجذور عدم قطعیت‌های سیستماتیک و تصادفی آن منبع خطا به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ استفاده می‌شود.

$$u_t = \sqrt{u_{t,sys}^2 + u_{t,ran}^2} \quad (12)$$

$$u_L = \sqrt{u_{L,sys}^2 + u_{L,ran}^2} \quad (13)$$

عدم قطعیت تصادفی با احتمال ۹۵٪ توسط روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$u_{t,ran} = S_{\bar{t}} \quad (14)$$

$$u_{L,ran} = S_{\bar{L}} \quad (15)$$

در روابط ۱۴ و ۱۵  $S_{\bar{t}}$  انحراف معیار مقادیر منبع خطای  $i$  است و از رابطه ۱۶ محاسبه می‌شود.

$$S_{\bar{t}} = \frac{S_i}{\sqrt{N}} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶،  $S_i$  انحراف معیار و  $N$  تعداد تکرار اندازه‌گیری برای منبع خطا است. عدم قطعیت تصادفی منابع خطا و عدم قطعیت سیستماتیک وسایل اندازه‌گیری در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. نتایج محاسبات عدم قطعیت برای ضخامت و زمان

$a_i$	$u_i$	$u_{ran}$	$S_{\bar{t}}$	$u_{sys}$	
2.312139	0.008395	0.006743	0.002981	0.005	$L$ (mm)
-0.76864	0.007112	0.005057	0.002236	0.005	$t$ (s)

است و طبق نتایج به دست آمده در جدول ۳ عدم قطعیت سرعت  $U_p$  برابر با  $20/17 \text{ m/s}$  خواهد بود.

میانگین سرعت صوت در قطعه  $\bar{V}$  با جایگذاری میانگین زمان و ضخامت به دست آمده از جدول ۲ برابر با  $6127/16 \text{ m/s}$

## ۷. مأخذ

- [1] Cramer, Stephen D., and Bernard S. Covino. *Corrosion: Environments and industries*. Vol. 13. ASM International, 2006.
- [۲] بیات، ع. ا. "بررسی راهبردی مدیریت و هزینه‌های خوردگی با رویکرد تحلیل سند مدیریت خوردگی وزارت نفت" اولین کنفرانس ملی نفت، گاز، پتروشیمی و توسعه پایدار، ۱۳۹۳.
- [3] McKetta Jr, John J. *Piping design handbook*. CRC Press, 1992.
- [4] Perkins, Albert G. "Pipe coating apparatus." U.S. Patent No. 2,373,638. 10 Apr. 1945.
- [5] Hart, Robert J. "Internal pipe coating apparatus." U.S. Patent No. 4,092,950. 6 Jun. 1978.
- [6] Cummings, James D., and Craig E. Hatcher. "Internal pipe coating apparatus." U.S. Patent No. 3,078,823. 26 Feb. 1963.
- [7] Roman, Harry T., B. A. Pellegrino, and W. R. Sigrist. "Pipe crawling inspection robots: an overview." *IEEE transactions on energy conversion*, Vol.8, No.3, 1993, pp.576-583.
- [8] Ilg, W., Berns, K., Cordes, S., Eberl, M., & Dillmann, R. "A wheeled multijoint robot for autonomous sewer inspection." *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*. Vol.3. IEEE, 1997, pp. 1687-1693.
- [9] Hirose, Shigeo, Hidetaka Ohno, Takeo Mitsui, and Kiichi Suyama. "Design of in-pipe inspection vehicles for  $\phi 25$ ,  $\phi 50$ ,  $\phi 150$  pipes." In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, Vol.3, IEEE, 1999, pp. 2309-2314.
- [10] Nassiraei, Amir AF, Yoshinori Kawamura, Alireza Ahrary, Yoshikazu Mikuriya, and Kazuo Ishii. "A new approach to the sewer pipe inspection: Fully autonomous mobile robot kantaro." In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, IEEE, 2006, pp. 4088-4093.
- [11] Kwon, Young-Sik, Bae Lee, In-Cheol Whang, and Byung-Ju Yi. "A pipeline inspection robot with a linkage type mechanical clutch." In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, 2010, pp. 2850-2855.
- [12] Tsimogiannis, A., A. Anastasopoulos, S. E. Kattis, and Envirocoustics Abec. "Ultrasonic Processing Methodologies with Alternative Thickness Computation for Massive Corrosion Mapping Tests." In *Proceedings of the 9th European Conference on NDT, Berlin, 2006*, pp. 25-29.
- [13] Karl, Deutsch, P. Schulte, M. Joswig, and R. Kattwinkel. "Automated ultrasonic pipe weld inspection. Part 1." *CINDE Journal*, Vol.27, no.5, 2006, pp.10-15.
- [14] Smith, Wallace Arden. "The role of piezocomposites in ultrasonic transducers." In *Ultrasonics Symposium, 1989. Proceedings. IEEE 1989*, IEEE, 1989, pp.755-766.
- [15] Attia, M. S., M. M. Megahed, M. Ammar Darwish, and S. Sundram. "Assessment of corrosion damage acceptance criteria in API579-ASME/1 code." *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, Vol.12, No.1, 2016, pp.141-151.

- [16] DNV. Allowable thickness diminution for hull structure. Classification Notes No. 72.1. Hovik, Norway 2013 (<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNV/cn/2013-07/Cn72-1.pdf>)
- [17] O'Connor, B. "Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods.", 2010, pp.1-23.
- [18] Figliola, Richard S., and Donald Beasley. *Theory and design for mechanical measurements*. 5th Ed., John Wiley & Sons, 2011.

پی نوشت:

1. Perkins
2. Ilg
3. Hirose
4. Kantaro
5. Transducer
6. Kattwinkel
7. A-Scan
8. B-Scan
9. C-Scan
10. Servo motor
11. Dynamixel
12. Neodymium
13. Coupling
14. Immersion
15. Encoder
16. Piezo Composite
  
18. Multiplexer
19. Contact probe
20. Pulse repetition frequency
21. Real Time

۱۷. قابلیت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی و بالعکس