

## تعیین اطلاعات مورد نیاز در تصویربرداری از خوردگی‌های لوله‌های نفت

حسین روان‌بد (استادیار)  
پژوهشکده الکترونیک، دانشگاه صنعتی شریف  
فریدون بهنیا (استادیار)  
دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف  
علی جلالی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه صنعتی شریف

به‌منظور آزمون غیرمخرب لوله‌های نفت، یک سیستم تصویربرداری ماورای صوت با استفاده از جریان نفت در داخل لوله‌ها حرکت کرده و با استفاده از مبدل‌های مناسبی که بر روی آن تعبیه شده است وجود و موقعیت نقاط خوردگی در طول لوله را اندازه‌گیری می‌کند. با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده، می‌توان پس از تعیین موقعیت نقاط بحرانی موجود در طول مسیر، به‌رفع مشکلات احتمالی پرداخت. در این روش از تأخیر رفت و برگشت پالس ماورای صوت برای اندازه‌گیری موقعیت یک ناپیوستگی در لوله استفاده می‌شود. انعکاس امواج ماورای صوت از ناپیوستگی‌های لوله، تعیین‌کننده‌ی وضعیت دیواره‌های داخلی و خارجی لوله و در نهایت ضخامت دیواره‌ی لوله است. کاهش ضخامت دیواره در هر ناحیه نشان‌دهنده‌ی وجود خوردگی در آن ناحیه خواهد بود. در این پژوهش، ابتدا مسائل زیربنایی تصویربرداری با استفاده از سیگنال ماورای صوت و عوامل مؤثر در اندازه‌گیری برای نیل به دقت مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس قدرت تفکیک عمق خوردگی، پهنای باند مبدل ماورای صوت، قدرت تفکیک طول خوردگی و پررود نمونه‌برداری یک مبدل از لوله را در راستای طولی تعیین و استخراج می‌گردند. با توجه به طراحی انجام شده و تأیید نتایج توسط شبیه‌سازی، می‌توان از نتایج این پژوهش در زمینه‌ی طراحی و انجام‌پذیری سیستم تصویربرداری از لوله‌های نفت استفاده کرد.

### مقدمه

در این نوشتار اطلاعات مربوط به سطح و عمق خوردگی موجود در لوله‌های نفت، که اطلاعات اصلی به‌شمار می‌آیند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. دقت اندازه‌گیری و معتبر بودن تصویر، بر کیفیت پردازش تصویر و تشخیص نقص تأثیر اساسی دارد. [۱] ابتدا به‌منظور به دست آوردن قدرت تفکیک مورد نظر، پهنای باند لازم مبدل ماورای صوت محاسبه می‌شود. آنگاه به‌منظور تشخیص خوردگی‌ها و تخمین ابعاد آنها، دوره‌ی تناوب نمونه‌برداری مکانی در راستای لوله محاسبه می‌شود. همچنین قدرت تفکیک لازم روی محیط لوله با محاسبه‌ی فاصله‌ی جانبی دو مبدل در راستای کمره تعیین می‌شود. سپس با بررسی روش‌های تحریک مجموعه مبدل‌ها، روش بهینه مشخص می‌شود. پس از بررسی تأثیر ناصافی سطوح در دقت اندازه‌گیری، با توجه به اثرات تغییرات شدت میدان در میدان‌های دور و نزدیک مبدل، فاصله‌ی بهینه‌ی مبدل از دیواره‌ی داخلی محاسبه می‌شود. تصویربرداری خام از تمامی لوله به حجم بسیار زیادی از حافظه نیاز دارد. ابتدا فقط اطلاعات مربوط به قسمت‌های ناسالم لوله در نظر گرفته می‌شود و سپس با استفاده از الگوریتم‌های رایج فشرده‌سازی حجم اطلاعات تا حد امکان کاهش می‌یابد. همچنین اطلاعات مربوط به دما، فشار و موقعیت نقص در لوله، که حجم کمی

در آزمون غیرمخرب لوله‌های نفت با استفاده از امواج ماورای صوت، بر اثر اعمال یک پالس الکتریکی ولتاژ بالا به یک کریستال پیزوالکتریک، یک پالس موج ماورای صوت تولید می‌شود که از طریق یک ماده‌ی واسط (فراآورده‌های نفتی) به لوله اعمال و در داخل آن منتشر می‌شود. این امواج با مقداری تضعیف و پراکنده‌شدن در داخل لوله پیش می‌روند و در برخورد به هر ناپیوستگی سطحی یا داخلی، نظیر خوردگی، منعکس یا پراکنده می‌شوند. این انرژی منعکس شده (یا پراکنده‌شده) توسط کریستال پیزوالکتریک مبدل، به ولتاژ الکتریکی تبدیل می‌شود. بدین ترتیب با اندازه‌گیری زمان بین فرستادن پالس و دریافت انعکاس آن امکان محاسبه‌ی فاصله‌ی ناپیوستگی از سطح ایجاد می‌شود. [۱] عواملی که در اندازه‌گیری این روش مؤثرند عبارت‌اند از: پهنای طیف مبدل ماورای صوت، بسامد پالس تحریک مبدل ماورای صوت، سرعت پخش صوت در ماده‌ی مورد نظر، و بسامد نمونه‌برداری. [۲]

اطلاعات لازم و مؤثر در تصویربرداری سیگنال ماورای صوت، با سطح و عمق نقص و همچنین با مکان نقص در لوله و اطلاعات محیطی (فشار و دمای موجود در نقطه‌ی اندازه‌گیری) در ارتباط است. [۳]

از حافظه را اشغال می‌کنند، محاسبه می‌شود. در چندین شبیه‌سازی به‌منظور تشخیص نقص در لوله، تحقق پارامترهای محاسبه‌شده مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### محاسبه‌ی قدرت تفکیک اندازه‌گیری عمق محاسبه‌ی پهنای باند مبدل به ازاء قدرت تفکیک

به وسیله‌ی مبدل ماورای صوت یک بسته انرژی به طرف دیواره‌ی لوله ارسال می‌شود که پس از برخورد به دیواره‌های داخلی و خارجی لوله بازتاب می‌شود. با توجه به نمونه‌برداری انجام شده از سیگنال بازگشتی درگیرنده در فواصل زمانی معین، و با توجه به اینکه فاصله‌ی دیواره‌های داخلی و خارجی تا مبدل از قبل مشخص نیست، قله‌ی پالس دریافتی نسبت به نقاط نمونه‌برداری از موقعیت تصادفی برخوردار خواهد بود. اگر لحظات نمونه‌برداری را با  $t_{si}$  و نقطه‌ی اتفاق افتادن قله را با  $t_p$  نشان دهیم، باید یکی از  $t_{si}$ ها را به عنوان  $t_p$  در نظر گرفت (شکل ۱ الف). همچنین می‌توان با توجه به رابطه  $Vt = 2h$ ، این گستره‌ی زمانی را برگستره‌ی مکانی نگاشت. [۴۲]

در شکل (۱-ب) اگر فاصله‌ی نقاط نمونه‌برداری برابر  $2^{mm}$  در نظر گرفته شود، خطا کمتر از  $\pm 0.2^{mm}$  و قابل قبول است. حال با جایگذاری  $V_s \cong 6000 \frac{m}{s}$  (سرعت موج در فولاد) در رابطه‌ی ۱، بسامد نمونه‌برداری به‌دست می‌آید.

$$f_s = \frac{1}{T_s} = \frac{V_s}{2|\delta h|} = \frac{6000 \frac{m}{s}}{2 \times 0.2^{mm}} = 15 \frac{M \text{ Samples}}{\text{sec}} \quad (1)$$

محاسبه‌ی پهنای باند مبدل براساس طیف ایده‌آل (هموار) پیش شرط لازم برای محاسبه‌ی پهنای باند این است که دامنه‌ی قله‌ی پالس باید دست‌کم ۲ برابر دامنه‌ی آن در نقطه‌ی نمونه‌برداری بعدی باشد. (این شرط با لحاظ کردن شرایط نویزی محیط و به‌عنوان شرط ساده‌ی که تحقق آن بدون توسل به پردازش‌های پیچیده میسر است، مورد استفاده قرار گرفته است). به‌عبارت دیگر، نقاط نمونه‌برداری عملاً هیچ‌گاه به‌طور کامل در قله‌ی پالس قرار نمی‌گیرند پس این شرط در مورد نزدیک‌ترین نقطه‌ی نمونه‌برداری به قله‌ی پالس و نقاط نمونه‌برداری مجاور آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در حالت طیف هموار پاسخ بسامدی مبدل به‌صورت هموار و پوش پاسخ زمانی آن به‌صورت تابع زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$P_e(t) = B \frac{\sin \pi B t}{\pi B t} \quad (2)$$

حال اگر اولین نمونه در  $t = 0$  و دومی در  $t = T_s$  گرفته شوند رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت:

$$\frac{P_e(T_s)}{P_e(0)} \leq \frac{1}{2} \Rightarrow B \geq 9 \text{ MHz} \quad (3)$$

اگر اولین نقطه‌ی نمونه‌برداری به‌جای انطباق بر قله‌ی پالس در نقطه‌ی  $t$ ، و نقطه‌ی دومی در  $t + T_s$  باشد، یکی از دو حالت زیر رخ خواهد داد.

الف) اگر  $\frac{t}{B} < T_s$ ، آنگاه هر دو نقطه‌ی نمونه‌برداری در لب اصلی قرار می‌گیرند و به‌ازاء  $T_s \geq \frac{t}{B}$  خواهیم داشت:

$$\frac{P_e(t + T_s)}{P_e(t)} \leq \frac{1}{2} \quad (4)$$

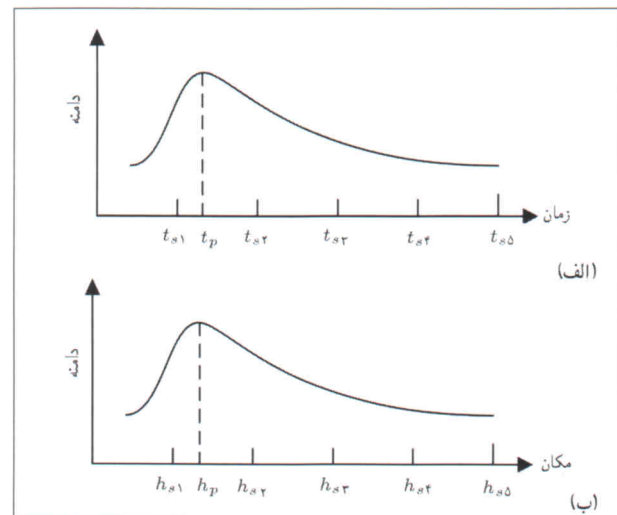
ب) اگر  $(\frac{t}{B} < t < T_s)$ ، آنگاه  $t + T_s$  در لب دوم قرار می‌گیرد. بدترین وضعیت در این حالت زمانی رخ می‌دهد که بیشترین انحراف  $t$  از قله‌ی پالس اتفاق می‌افتد و نتیجتاً  $t + T_s$  به قله‌ی دوم پالس نزدیک‌تر می‌شود. در این حالت خواهیم داشت:

$$\left| \frac{P_e(t + T_s)}{P_e(t)} \right| = \left| \frac{P_e(2T_s)}{P_e(T_s)} \right| \approx 0.31 < \frac{1}{2} \quad (5)$$

پس در هر حال رابطه‌ی ۳ برآورده خواهد شد. همچنین محاسبات مشابه در حالت طیف گاوسی نشان می‌دهد که اگر  $B \geq 4.65 \text{ MHz}$ ، آنگاه شرط مذکور ارضاء می‌شود. [۴۳]

### پریود مکانی نمونه‌برداری تک مبدل از لوله در راستای طولی

بسامد مکانی نمونه‌برداری در راستای طول به‌نحوی محاسبه می‌شود تا سیستم تصویربرداری قادر به تشخیص خوردگی‌هایی با قطر حداقل  $10 \text{ mm}$  باشد (شکل ۲).



شکل ۱. الف) زمان رسیدن قله‌ی پالس در گستره‌ی زمانی؛ ب) زمان رسیدن قله‌ی پالس در گستره‌ی مکانی.

که در آن  $D$  قطر مبدل،  $f$  بسامد کاری مبدل،  $V_s$  سرعت موج در فولاد و  $\theta$  زاویه‌ی بین خط واصل نقاط افت  $1^\circ$  در میدان دور مبدل با خط محور مبدل است.

حال می‌توانیم واریانس توزیع میدان را در دیواره‌ی خارجی لوله به دست آوریم. قطر پرتو روی دیواره‌ی خارجی لوله برابر است با:

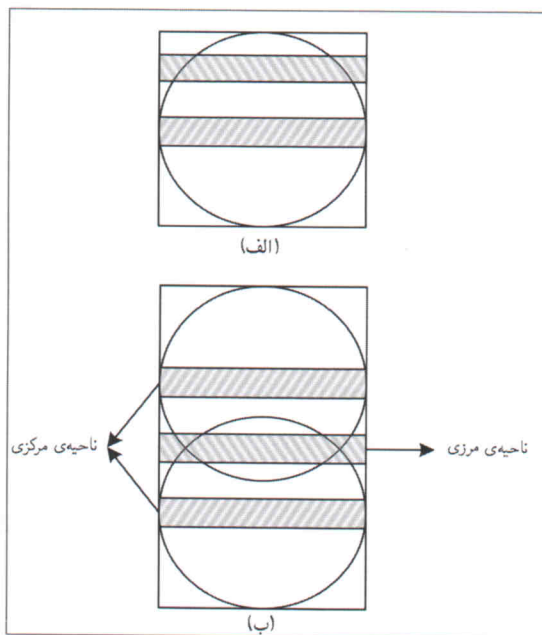
$$D_{EW} = D + 2W_t \tan \theta \quad (7)$$

که در آن  $D$  قطر مبدل،  $\theta$  زاویه بین خط واصل نقاط افت  $1^\circ$  در میدان دور مبدل با خط محور مبدل،  $W_t$  ضخامت دیواره‌ی لوله و  $D_{EW}$  قطر پرتو روی دیواره‌ی خارجی است. از آنجا که قطر محاسبه شده‌ی فوق قطر  $1^\circ$  پرتو است خواهیم داشت:

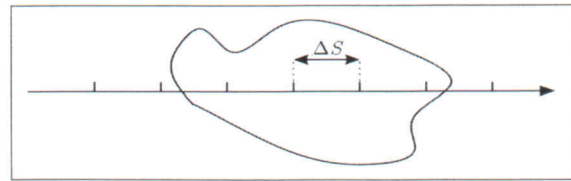
$$e^{-\frac{D+W_t \tan \theta}{2\sigma^2}} = 0.1 \Rightarrow \sigma^2 = \frac{(\frac{D}{2} + W_t \tan \theta)^2}{4.6} \quad (8)$$

حال برای  $\Delta L$  مقداری را قرار می‌دهیم که در مربع پوشش هر مبدل، نواری که توان دریافتی آن به کم‌تر از نصف توان مرکزی رسیده، توسط نوار مبدل مجاور روشن شود (شکل ۳ ب). به عبارت دیگر، مرز جداکننده‌ی دو ناحیه، مرز نیمه‌توان باشد. [۷] بنابراین:

$$\int_{-R}^R \int_{\Delta x_b} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} dx dy = \frac{1}{2} \int_{-R}^R \int_{\Delta x_c} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} dx dy \quad (9)$$



شکل ۳. الف) مربع محاط بر مبدل و نوارهای تصویربرداری؛ ب) موقعیت نسبی مبدل‌ها و نواحی مرکزی و مرزی تصویربرداری.



شکل ۴. نمایش مکان نمونه‌برداری طولی و یک خوردگی تصادفی.

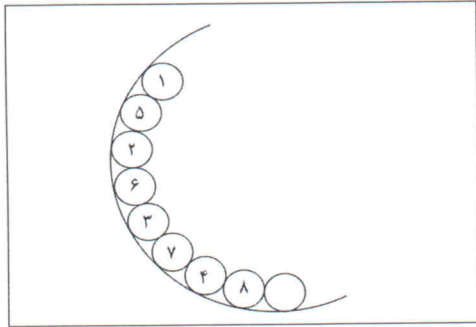
اگر  $\Delta S$  را پررود مکانی نمونه‌برداری طولی و  $D$  را قطر مبدل در نظر بگیریم، واضح است که برای پوشش کامل لوله باید  $\Delta S \leq D$  باشد. برای جلوگیری از اتلاف انرژی و برای آن که بیشینه انرژی صوتی ممکن وارد خوردگی شود (اگر چه در عمل، به علت تصادفی بودن موقعیت نقاط خوردگی و نقاط نمونه‌برداری، به هر حال بخشی از انرژی تلف خواهد شد) قطر مبدل برابر  $\Delta S$  در نظر گرفته می‌شود ( $\Delta S = D$ ). بنابراین اگر کمینه‌ی قطر خوردگی قابل تشخیص در سیستم مورد نظر برابر  $1^\circ mm$  باشد، قطر مبدل نیز  $1^\circ mm$  انتخاب می‌شود. در مورد فاصله‌ی نقاط نمونه‌برداری چنین استدلال می‌کنیم که اگر فاصله‌ی مکانی نقطه‌ی نمونه‌برداری زیر مضرب عدد  $1^\circ$  (قطر مبدل) باشد، همواره در هر فاصله  $1^\circ mm$  تعداد ثابتی از نقاط مورد نمونه‌برداری قرار خواهد گرفت. پس فاصله‌ی نقاط نمونه‌برداری را می‌توان  $5$  میلی‌متر،  $3/3$  میلی‌متر،  $2/5$  میلی‌متر یا حتی کمتر در نظر گرفت. هر چه این مقدار کم‌تر باشد درصد خطای موجود در تعیین حدود خوردگی کاهش خواهد یافت، و در مقابل حجم اطلاعات ذخیره شده افزایش می‌یابد و در نتیجه طول قابل بررسی لوله در یک مرحله کاهش می‌یابد. اگر برای پررود مکانی نمونه‌برداری طولی،  $2/5 mm$  در نظر گرفته شود،  $\pm 25\%$  خطا در تعیین حدود خوردگی ایجاد می‌شود. [۴،۲]

### فاصله‌ی جانبی دو مبدل و قدرت تفکیک جانبی

اگر  $D$  قطر مبدل و  $\Delta L$  فاصله‌ی جانبی دو مبدل (در روی دایره‌ی مقطع لوله) باشد، باید  $\Delta L \leq D$  باشد تا پوشش میدان صوتی برای لوله در راستای جانبی کامل باشد (همه‌ی بخش‌های دیواره تحت تابش انرژی صوتی قرار داشته باشند).

قدرت تفکیک جانبی سیستم توسط  $\Delta L$  مشخص می‌شود (غالباً قدرت تفکیک جانبی همان  $\Delta L$  است). اکنون مربع مماس بر مبدل و توزیع انرژی در آن را در نظر بگیرید. این مربع ناحیه‌ی از دیواره‌ی لوله است که در یک لحظه‌ی مشخص تحت پوشش مبدل قرار گرفته است (شکل ۳ الف). دیواره‌ی خارجی لوله در میدان دور مبدل قرار گرفته و توزیع انرژی مبدل در این میدان به صورت گاوسی است. برای میدان دور مبدل خواهیم داشت:

$$\sin \theta = 1.08 \frac{\lambda}{D} = 1.08 \frac{V_s}{f.D} \quad (6)$$



شکل ۴. ترتیب تحریک مبدل‌ها در یک مجموعه.

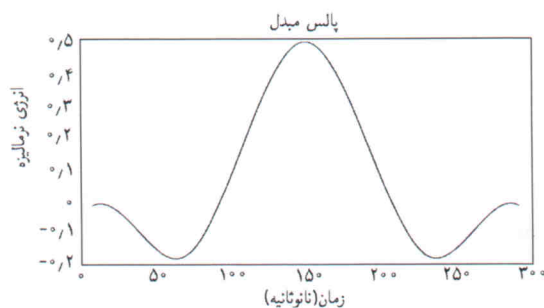
**دقت اندازه‌گیری عمق با توجه به ناصافی سطوح**  
 با این فرض که دیواره‌ی لوله‌ها و جداری داخلی نواحی خوردگی صاف است، قدرت تفکیک سیستم در اندازه‌گیری عمق خوردگی‌ها برابر  $\pm 0.2 \text{ mm}$  خواهد بود. با فرض برخورد یک پالس گاوسی به یک سطح ناصاف، مجموعه‌ی پالس‌های گاوسی با دامنه‌ها و تأخیرهای مختلف دریافت خواهد شد. اگر پالس دریافتی از سطح صاف  $P_s(t) = g(t)$  باشد، پالس دریافتی سطح ناصاف برابر است با: [۸، ۲]

$$P_r(t) = \sum \alpha_i g(t - t_i) \quad (13)$$

که در آن  $\alpha_i$  و  $t_i$  متغیرهای تصادفی‌اند و در حالت کلی به دلیل شیب محلی در نقاطی از سطح  $\sum \alpha_i \neq 1$  خواهد بود. در نتیجه علاوه بر پهن شدن سیگنال در حوزه‌ی زمان، انرژی دریافتی کاهش می‌یابد.

برای شبیه‌سازی رایانه‌ی توزیع سطح در یک ناحیه‌ی مشخص به صورت گاوسی فرض شده است. شکل پالس ارسالی توسط مبدل نیز به جای ضربه، گاوسی شکل در نظر گرفته شده است. شکل ۵، پالس حاصل از مبدل را نشان می‌دهد که پهنای باند آن  $4 \text{ MHz}$  و بسامد مرکزی آن  $5 \text{ MHz}$  است.

سیگنال  $P_r(t)$  در معادله‌ی ۱۳ قله‌های متعددی دارد و به همین دلیل نسبت‌دادن موقعیتی در حد قدرت تفکیک را با ناحیه‌ی مورد نظر غیرممکن می‌کند.



شکل ۵. پالس ارسالی مبدل.

که در آن  $\Delta x_c$  ناحیه‌ی مرکزی  $\Delta x_b$  ناحیه‌ی مرزی است. با ساده‌کردن عبارت فوق براساس رابطه‌ی ۸ و شکل ۳ خواهیم داشت:

$$\Delta L = 1.1 \left( \frac{D}{\gamma} + W_t \tan \theta \right) \quad (10)$$

و با توجه به پارامترهای سیستم  $\theta = 7.34^\circ$  و  $\Delta L = 1.6 \text{ mm}$  خواهد بود.

### آرایش تحریک مجموعه مبدل‌ها

به طور کلی به منظور تحریک مجموعه مبدل‌های ماورای صوت می‌توان از ۲ روش بهره جست. در روش اول که «روش تحریک موازی» نام دارد، همه‌ی مبدل‌ها به طور همزمان تحریک می‌شوند اما در روش دوم یا «روش سری»، مبدل‌ها یکی پس از دیگری تحریک می‌شوند. روش تحریک موازی در این کاربرد خاص دو اشکال عمده دارد:

۱. به دلیل لزوم تقویت همزمان خروجی تمامی مبدل‌ها، تعدادگیرنده‌های مورد نیاز به تعداد مبدل‌ها، و نیز تعداد فرستنده‌های مورد نیاز به تعداد مبدل‌ها (و یا حداقل یک فرستنده‌ی پر قدرت) خواهد بود.
۲. به دلایلی مانند شیب‌دار بودن سطح خوردگی ممکن است پالس بازگشتی مربوط به مبدل توسط مبدل دیگر دریافت شود.

بنابراین دو مشکل یاد شده ما را به این نتیجه می‌رساند که در این سیستم استفاده از روش «تحریک سری» بهینه است.

اگر  $N_g$  نشان‌دهنده‌ی تعداد مبدل‌ها در سیستم، و  $f_{ts}$  بسامد تحریک هر مبدل باشد؛ و نیز  $t_d$  تأخیر لازم برای دریافت پالس از دیواره‌ی خارجی باشد، خواهیم داشت:

$$N_g = \frac{T_{ts}}{t_d} \quad (11)$$

در واقع  $T_{ts}$  فاصله‌ی بین دو تحریک متوالی هر مبدل است که با تقسیم آن بر  $t_d$  تعداد مبدل‌ها در این مجموعه حاصل خواهد شد. برای محاسبه‌ی  $t_d$  از رابطه‌ی ۱۲ استفاده می‌کنیم:

$$t_d = \frac{2S_o}{V_l} + \frac{2W_t}{V_s} \quad (12)$$

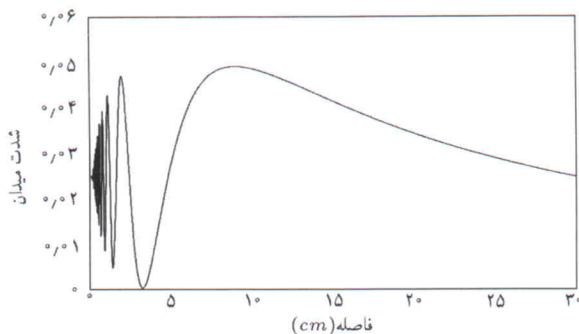
که در آن  $S_o$  فاصله‌ی مبدل از دیواره‌ی داخلی،  $V_l$  سرعت صوت در سیال،  $V_s$  سرعت صوت در دیواره و  $W_t$  ضخامت دیواره است که با توجه به مشخصات سیستم،  $N_g \cong 109$  خواهد بود. همچنین برای هر مبدل از یک فرستنده و یک گیرنده استفاده شده و با استفاده از یک سوئیچ مناسب، هر بار یک مبدل به این دو متصل می‌شوند.

اگر  $N_g < N_t$ ، اجباراً مبدل‌ها به چند دسته تقسیم می‌شوند، که هر دسته حداکثر شامل  $N_g$  مبدل است. در مورد تحریک سری به دلیل پژواک‌های متوالی سعی می‌شود هیچ‌گاه دو مبدل مجاور، به دنبال هم تحریک نشوند (شکل ۴). [۴]

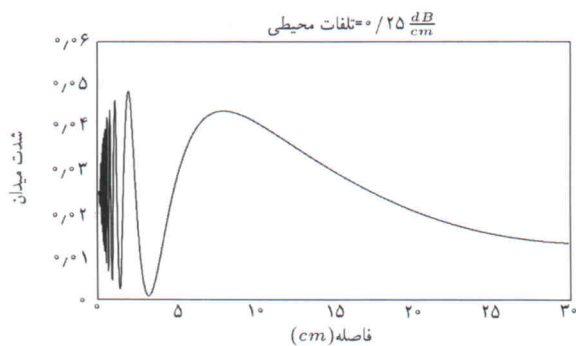
که در آن  $\lambda$  طول موج مورد استفاده،  $D$  قطر مبدل،  $f$  بسامد کاری مبدل و  $V$  سرعت صوت در مایع است. مقدار تقریبی  $Z$  با توجه به پارامترهای موجود در سیستم برابر  $9/6$  سانتیمتر خواهد بود. ولی در این سیستم باید دو نکته‌ی مهم را مدنظر قرار داد:

(الف) با توجه به تلفات موجود در محیط سیال و تضعیف موجی که در این محیط حرکت می‌کند، طول  $Z$  کاهش می‌یابد.

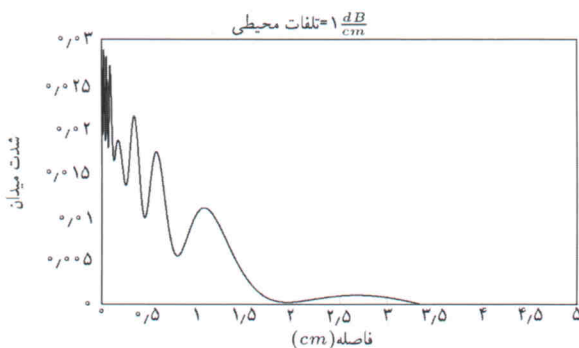
شکل ۸ تغییرات شدت میدان در میدان نزدیک در محیط بدون تلفات، شکل ۹ تغییرات شدت میدان صوتی در میدان نزدیک در شرایطی که تلفات محیط کم است، شکل ۱۰ شدت میدان را در لوله‌ی حامل نفت سفید، شکل ۱۱ شدت میدان را در لوله‌ی حامل نفت خام، و شکل ۱۲ همان سیستم را در لوله‌ی حامل نفت گاز نشان می‌دهد.



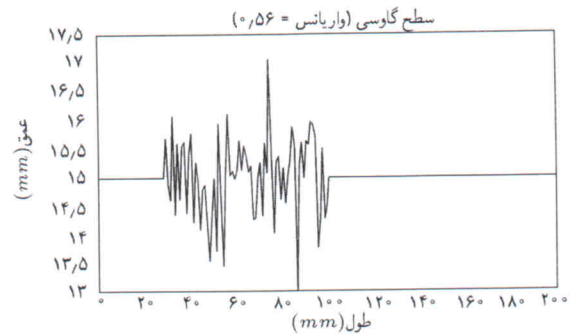
شکل ۸. تغییرات شدت میدان در میدان نزدیک در محیط بدون تلفات.



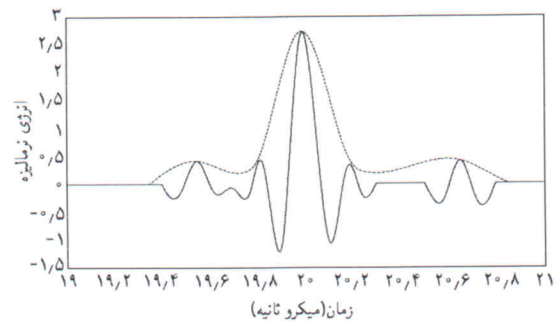
شکل ۹. تغییرات شدت میدان صوتی در میدان نزدیک در محیط کم تلفات.



شکل ۱۰. شدت میدان در لوله‌ی حامل نفت سفید.



شکل ۶. تصویر بزرگ شده‌ی دیواره‌ی داخلی با سطح ناصاف.



شکل ۷. پالس دریافتی از سطح ناصاف متعلق به شکل ۶.

در شکل ۶ یک بخش از دیواره‌ی لوله که ناصافی است، براساس توزیع گاوسی و با مقدار واریانس  $\sigma^2 = 0.056 mm^2$  با بزرگ‌نمایی نشان داده شده است. ضمناً برای آنکه امکان تعیین موقعیت پالس‌هایی که به دیواره‌ی ناصاف برخورد می‌کنند نسبت به پالس‌هایی که به دیواره صاف برخورد می‌کنند وجود داشته باشد، فرض بر آن است که نیمی از مبدل در مقابل سطح صاف و نیمی از آن در مقابل سطح ناصاف قرار گرفته است.

در شکل ۷ قله‌های فرعی به صورت کاملاً جدا از پالس مرجع دیده می‌شوند. حذف پالس مرجع از شکل به معنای قرار گرفتن کامل مبدل در مقابل ناحیه‌ی ناصاف است، و در این صورت تشخیص موقعیت واقعی دیواره‌ی داخلی با توجه به تعداد قله‌های فرعی ساده نخواهد بود و خطایی به مراتب بیشتر از قدرت تفکیک ایجاد خواهد کرد.

### تعیین فاصله‌ی مبدل از دیواره‌ی داخلی

یکی از شرایط اساسی در این سیستم قرار گرفتن دیواره‌ی داخلی لوله در میدان دور مبدل است، زیرا تغییرات میدان در میدان نزدیک بسیار شدید است. طول میدان نزدیک مبدل ماورای صوت از رابطه‌ی تقریبی ۱۴ به دست می‌آید: [۷]

$$Z = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V} \quad (14)$$

نخواهد داشت. لذا استفاده از حالت پالسی موجب کاهش اثر تداخلی امواج صادر شده از بخش‌های مختلف مبدل می‌شود این امر موجب کاهش طول میدان نزدیک خواهد شد و لذا حتی می‌توان فاصله‌ی مبدل تا دیواره‌ی داخلی را کم‌تر از  $2.6\text{ cm}$  در نظر گرفت.

### حجم اطلاعات

اطلاعات خام (قبل از پردازش اولیه)

اگر  $L$  طول لوله‌ی مورد بررسی،  $\Delta S$  پریود مکانی نمونه‌برداری،  $N_t$  تعداد کل مبدل‌ها و  $n_s$  تعداد نمونه‌ی گرفته‌شده به‌ازای شلیک هر مبدل باشد، حجم اطلاعات خام  $I_u$  از رابطه‌ی ۱۵ به دست می‌آید:

$$I_u = \frac{L}{\Delta S} \cdot N_t \cdot n_s \quad (15)$$

که در آن  $n_s$  برابر است با:

$$n_s = \frac{W_t}{\delta h} \quad (16)$$

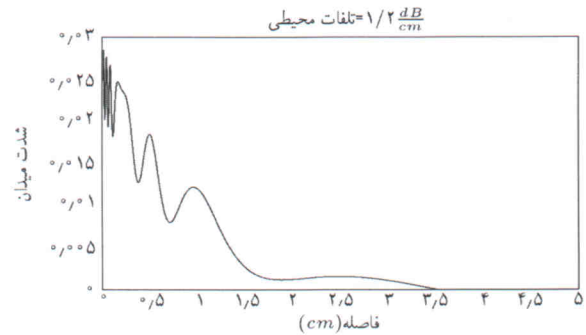
$W_t$  ضخامت لوله و  $\delta h$  و پریود مکانی نمونه‌برداری در راستای عمق (ضخامت لوله) است. اگر  $200$  کیلومتر طول لوله را با ضخامت  $22$  میلی‌متر در نظر بگیریم  $I_u = 1700 G$  خواهد بود، و اگر هر نمونه را یک بایت فرض کنیم این عدد  $1.7$  ترابایت خواهد شد.

### حجم اطلاعات پس از پردازش اولیه

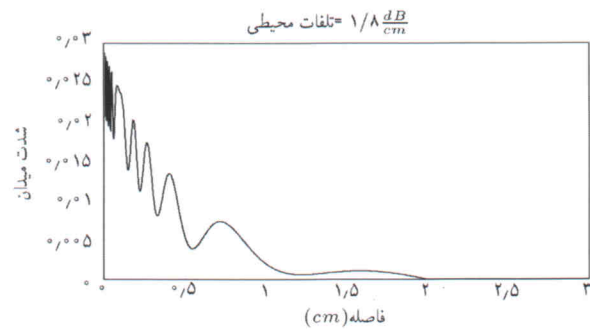
پس از پردازش اولیه و تشخیص موقعیت دو قله‌ی پالس (مربوط به دیواره‌ی داخلی و خارجی) مقدار  $n_s$  کاهش می‌یابد و در ادامه باعث کاهش حجم اطلاعات خواهد شد. به‌عنوان مثال برای طول  $200$  کیلومتر از یک لوله‌ی  $20$  اینچ حجم اطلاعات قبل از پردازش اولیه  $1.7$  ترابایت است. از آنجا که به‌طور معمول تنها  $1\%$  از لوله دارای خوردگی قابل ملاحظه است ابتدا با حذف اطلاعات مربوط به قسمت‌های سالم لوله، اطلاعات اولیه  $100$  برابر کاهش می‌یابد. سپس با استفاده از روش‌های معمول فشرده‌سازی، اطلاعات به  $48$  مگابایت کاهش می‌یابد.<sup>[۹]</sup> البته این حجم اطلاعات فقط لزوم فشرده‌سازی و پردازش داخل لوله را توجیه می‌کند. بحث فشرده‌سازی خود موضوعی مستقل از این پژوهش است.

### حجم اطلاعات فاصله

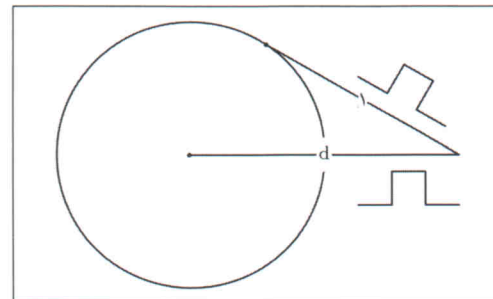
برای به دست آوردن فاصله‌ی طی شده توسط سیستم عیب‌یاب هوشمند از چرخ‌های ادومتر (فاصله‌سنج) استفاده می‌شود به طوری که با هر دور چرخش، ادومتر یک یا چند پالس تولید می‌کند که معیاری از فاصله‌ی طی شده خواهد بود.



شکل ۱۱. شدت میدان در لوله‌ی حامل نفت خام.



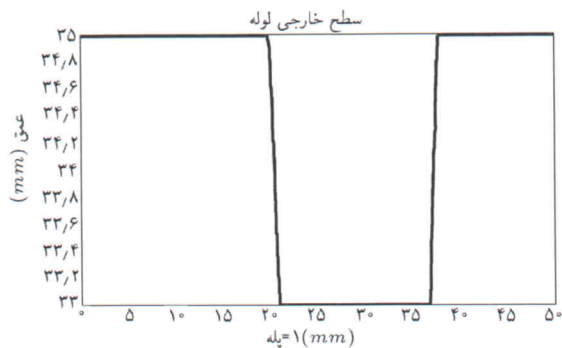
شکل ۱۲. شدت میدان در لوله‌ی حامل نفت گاز.



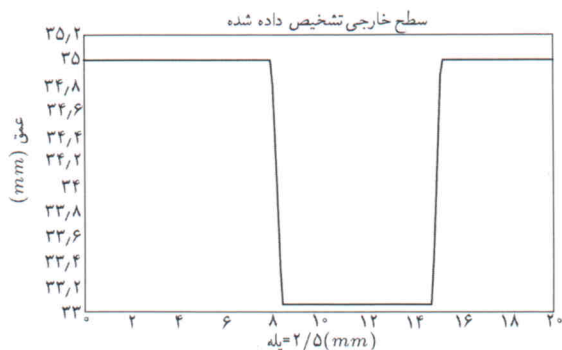
شکل ۱۳. فاصله‌ی مبدل از دیواره‌ی داخلی.

مورد تلفات نفت سفید و نفت خام مرز دو میدان دور و نزدیک برابر  $\text{cm}$   $2.6$  حاصل خواهد شد. لازم به ذکر است که تمامی شبیه‌سازی‌ها، از نتایج اندازه‌گیری سیگنال‌های ماورای صوت بر روی قطعاتی از لوله که طی یک مسافت از جنوب کشور آورده شده است، استفاده می‌کنند. از نفت سفید نیز به‌عنوان سیال استفاده شده است. همچنین تمامی پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی واقعی‌اند (تابع تبدیل پراب  $k$  H5Krautkramer، سرعت پخش صوت در فرآورده‌های نفتی ...). (ب) از آنجا که مبدل به‌صورت پیوسته کار نمی‌کند میان موج‌هایی که از کناره‌ی مبدل صادر می‌شوند و موج‌هایی که از مرکز مبدل صادر می‌شوند تداخلی به وجود نخواهد آمد.

دو موج مورد نظر فواصل  $l$  و  $d$  را طی می‌کنند، و اگر تفاوت  $l$  و  $d$  از عرض مکانی پالس بزرگ‌تر باشد دو جبهه موج شکل ۱۳ تداخل



شکل ۱۶. سطح واقعی خوردگی خارجی.



شکل ۱۷. سطح تشخیص داده شده خوردگی خارجی.

خارجی) اولین پالس دریافتی ضبط شده و بر مبنای آن شکل پروفیل لوله بازسازی می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ دیده می‌شود. شکل ۱۴ سطح واقعی خوردگی داخلی، شکل ۱۵ سطح تشخیص داده شده خوردگی داخلی، شکل ۱۶ سطح واقعی خوردگی خارجی، و شکل ۱۷ سطح تشخیص داده شده خوردگی خارجی را نشان می‌دهد. [۳ و ۱۰]

### نتیجه‌گیری

با بررسی مسائل زیربنایی تصویربرداری، پارامترهای اثرگذار در اندازه‌گیری سیگنال ماورای صوت به منظور نیل به دقت مورد نظر در تشخیص خوردگی‌ها تعیین و استخراج شدند. علاوه بر این در هر بخش معیارهای استفاده شده و روش استخراج پارامترها به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. در مرحله‌ی بررسی انجام‌پذیری و طراحی اولیه‌ی سیستم تصویربرداری، پارامترهای اثرگذار در اندازه‌گیری به همراه شرایط واقعی اندازه‌گیری، بهینه می‌شوند. به طوری که می‌توان با اصلاح معیار به‌کار رفته، مقدار جدید کمیت مورد نظر را به سهولت محاسبه کرد. با توجه به طراحی انجام شده و استخراج پارامترهای لازم برای رسیدن به یک اندازه‌گیری مناسب، و تأیید نتایج از طریق شبیه‌سازی، در طراحی و انجام‌پذیری سیستم تصویربرداری از لوله‌های نفت، می‌توان از نتایج این پژوهش استفاده کرد.

اگر پس از طی مسافت  $d_0$ ، ادومتر یک عدد پالس تولید کند و برای هر پالس شماره و زمان دریافت آن را ضبط کنیم، حجم اطلاعات فاصله پس از طی مسافت  $L$ ، از رابطه‌ی ۱۷ حاصل خواهد شد:

$$I_d = 2 \frac{L}{d_0} \quad (17)$$

حجم این اطلاعات به مراتب کم‌تر از حجم اطلاعات ماوراء صوت خواهد بود. اگر فرض کنیم چرخ ادومتر به‌ازای هر ۴ سانتی‌متر یک پالس بدهد، برای طول لوله  $200$  کیلومتر  $I_d \approx 5MByte$  خواهد بود.

### شبیه‌سازی به‌منظور تعیین موقعیت طولی خوردگی

در این قسمت نتایج یک شبیه‌سازی را که برای تشخیص موقعیت خوردگی‌های داخلی و خارجی انجام شده است ارائه می‌گردند.

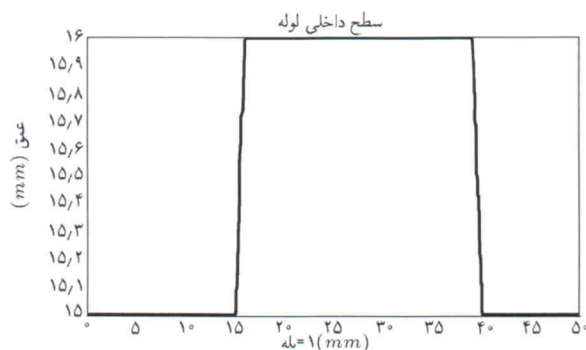
پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده عبارت‌اند از:

$$V_s = 5800 \frac{m}{s} \text{ : سرعت صوت در فولاد}$$

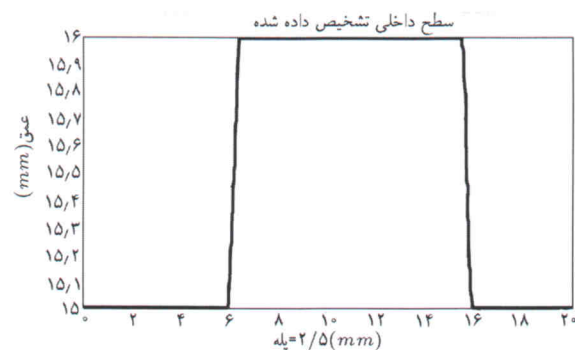
$$V_l = 1300 \frac{m}{s} \text{ : سرعت صوت در سیال}$$

$$D = 100 \text{ mm} \text{ : قطر مبدل مورد استفاده}$$

$\Delta S$ : پریود مکانی نمونه‌برداری در راستای طولی  $\Delta S = 2/5 \text{ mm}$  پالس ارسال توسط مبدل در این حالت به صورت ضربی است. در هر موقعیت نمونه‌برداری (دریافت پالس از دیواره‌ی داخلی یا



شکل ۱۴. سطح واقعی خوردگی داخلی.



شکل ۱۵. سطح تشخیص داده شده خوردگی داخلی.

## منابع

1. Tiratsoo, JNH. "Pipeline pigging technology", 2nd Edition, Gulf Publishing Company, p. 460 (1992).
2. Schmitz V, Kappes W. "Data acquisition and evaluation with microprocessor controlled automated ultrasonic testing system", IEE- Colloquium on Advanced Techniques for Collection and Interpretation of NDT Data, London, (1994).
3. Dunlop I, McNab A. "Automated parameter extraction for ultrasonic flaw analysis", *IEE Proceeding on Science, Measurement and Technology*, **144**, pp. 93-99 (1997).
4. روان بد، حسین. بهنیا، فریدون. تیبانی، محمود. شیپانی، شاهرخ. نایی، کامبیز... «انجام پذیری سیستم عیب‌یاب هوشمند به‌منظور بررسی غیرمخرب لوله‌های نفت»، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۰ جلد، ۱۳۷۵-۱۳۷۷.
5. Gunarathne GPP, Zhou Q, Christidis K. "Ultrasonic feature extraction techniques for characterization and quantification of scales in petroleum pipelines," *IEEE Ultrasonic Symposium*, **1**, pp. 859-864 (1998).
6. Ravanbod, H. "Application of neuro-fuzzy techniques in oil pipeline ultrasonic nondestructive testing", *NDT & E International Journal, Science Direct, Elsevier*, **38**, pp. 643-653 (December 2005).
7. Busse, L.J. "Three-Dimensional imaging using a frequency-domain synthetic aperture focusing technique", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **39**(2), pp. 174-179 (1992).
8. Shmitz V, Kappes W. "Nondestructive acoustic imaging techniques, imaging of complex media with acoustic and seismic waves", *Topic Applied Physics*, **84**, pp. 167-189 (2002).
9. Wadaka S, Nagatsuka T, Misu K, Urasaki S and Koike M. "An ultrasonic pulse compression system for nondestructive testing using complementary series phase modulation", *Japanese Journal of Applied Physics, Suppl.* **29**, pp. 212-214 (1989).
10. Iizuka, Y. Komiya, Y. Nakazawa, S. Nagamune, A. "Real time digital processing of on-line ultrasonic flaw detection", *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IEEE Proceeding*, **2**, pp. 867-871 (1995).