



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده برق

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی

بررسی روش های تشخیص خوردگی در خطوط لوله

نفت و گاز توسط توپک هوشمند

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا تقی راد

نگارش

سارا خیامیم و سپیده سماواتیان

خرداد ۱۳۸۲

۱.....	فصل اول	۱
۱.....	مقدمه‌ای بر توپکرانی	۱
۲.....	۱-۱ مقدمه	۲
۲.....	۲-۱ توپک چیست؟ [1], [2]	۲
۳.....	۳-۱ تاریخچه توپکرانی [2]	۳
۳.....	۳-۱ تاریخچه توپکرانی [2]	۳
۴.....	۴-۱ تاریخچه توپک هوشمند [3]	۴
۶.....	۵-۱ مقایسه بین توپک‌های مغناطیسی و ماوراء صوتی [3]	۶
۷.....	۶-۱ ساختار پایان‌نامه	۷
۹.....	فصل دوم	۹
۹.....	هدف از توپکرانی و انواع توپک	۹
۱۰.....	۱-۲ مقدمه	۱۰
۱۰.....	۱-۲ مقدمه	۱۰
۱۰.....	۲-۲ ضرورت اجرای توپکرانی [2], [6], [9]	۱۰
۱۰.....	۱-۲-۲ بالا بردن کیفیت جریان مواد در خطوط لوله	۱۰
۱۰.....	۲-۲-۲ کنترل خوردگی	۱۰
۱۰.....	۳-۲-۲ جدا کردن محصولات	۱۰
۱۱.....	۴-۲-۲ مشخص کردن محل گرفتگی در خط لوله جدید	۱۱
۱۱.....	۵-۲-۲ هواگیری و آب‌زدایی (تست هیدروستاتیکی)	۱۱
۱۱.....	۶-۲-۲ تایید اندازه‌گیری	۱۱
۱۲.....	۷-۲-۲ توپکرانی ژلاتینی	۱۲
۱۲.....	۳-۲ انواع توپک‌ها [2], [6], [9]	۱۲
۱۳.....	۱-۳-۲ توپک‌های هوشمند [1]	۱۳
۱۳.....	۲-۳-۲ توپک‌های عملیاتی [2]	۱۳
۱۴.....	۳-۳-۲ چند نمونه از توپک‌های عملیاتی [2], [3]	۱۴
۱۵.....	۳-۳-۲ توپک‌های تعیین پیکربندی [2], [9]	۱۵
۱۵.....	۴-۲ توپک‌ها چگونه کار می‌کنند؟ [2], [7]	۱۵
۱۷.....	۵-۲ خصوصیات و ابزار لازم خط لوله جهت توپکرانی	۱۷
۱۷.....	۱-۵-۲ توجه به طرح خط لوله [2]	۱۷
۱۷.....	۱-۱-۵-۲ طول توپکرانی (حداکثر مسافت بین دو تله توپک) [7]	۱۷
۱۷.....	۲-۱-۵-۲ خمیدگی‌ها [7]	۱۷
۱۸.....	۳-۱-۵-۲ شیرها [7]	۱۸
۱۸.....	۲-۵-۲ ابزار لازم	۱۸
۱۸.....	۱-۲-۵-۲ آشکار ساز (سیگنالر) توپک [8]	۱۸
۲۱.....	۲-۲-۵-۲ تله‌های توپک [11]	۲۱
۲۲.....	۳-۲-۵-۲ محک زن زمانی [12]	۲۲
۲۳.....	۶-۲ انواع خرابی‌ها [10]	۲۳
۲۵.....	۷-۲ جمع‌بندی	۲۵

فصل سوم ۲۶

روش‌های تشخیص نقص در خطوط لوله ۲۶

۱-۳ مقدمه ۲۷

۲-۳ روش‌های تشخیص نشتی ۲۷

۱-۲-۳ تحلیل فشار یا جریان در یک خط لوله [14] ۲۷

۲-۲-۳ روش شناسایی فشار موج [14] ۲۸

۳-۲-۳ آزمایش حجمی با جبران سازی حرارتی [15] ۲۸

۴-۲-۳ ردیاب‌ها [15] ۳۲

۵-۲-۳ کابل دو لایه حساس [15] ۳۳

۶-۲-۳ فیبرهای نوری [16] ۳۴

۷-۲-۳ روش شناسایی نشتی با اشعه مادون قرمز [17] ۳۵

۸-۲-۳ نشت یاب صوتی [18] ۳۷

۹-۲-۳ توپک نشت یاب صوتی [20] ۴۰

۱۰-۲-۳ مواد رادیواکتیو [21] ۴۰

۱۱-۲-۳ مبدل صوتی الکترومغناطیسی (EMAT) [20] ۴۰

۱۲-۲-۳ نشتی فلوی مغناطیسی (MFL) [20] ۴۱

۱۳-۲-۳ جریان گردابی [20] ۴۳

۳-۳ استفاده از امواج مافوق صوت در تشخیص نقص ۴۳

۱-۳-۳ انواع موج‌های تنشی و ویژگی‌های آن [22] ۴۴

۲-۳-۳ اصول اولیه روش ماوراء صوت [22] ۴۵

۳-۳-۳ انواع پروب‌ها [23] ۴۹

۴-۳-۳ شکست و تغییر فرم [23] ۵۰

۵-۳-۳ روش آزمایش و تکنولوژی ابزار [23] ۵۲

۶-۳-۳ انواع روش‌های تصویربرداری مرسوم در آزمایش‌های ماوراء صوت [25] ۵۵

۱-۶-۳-۳ روش A-MODE ۵۵

۲-۶-۳-۳ روش B-MODE ۵۵

۳-۶-۳-۳ روش C-Mode ۵۶

۷-۳-۳ توپک ماوراء صوتی [26] ۵۷

۱-۷-۳-۳ روش بازرسی ۵۸

۲-۷-۳-۳ ساختار توپک ماوراء صوت ۶۰

۳-۷-۳-۳ قابلیت تکرار ۶۱

۴-۷-۳-۳ تفکیک عیوب ۶۲

۵-۷-۳-۳ محاسبات اطلاعات جمع‌آوری شده (OFF-LINE) ۶۳

جمع بندی ۱-۳ ۶۴

فصل چهارم ۶۶

استفاده از نشتی شارمغناطیسی در تشخیص عیوب خطوط لوله نفت و گاز ۶۶

۱-۴ مقدمه [27] ۶۷

۲-۴ تکنولوژی MFL ۶۸

۱-۲-۴ اجزاء و مؤلفه‌های ارزیابی MFL [27], [29] ۶۸

۷۰	سیستم درایو یا جلو برنده	۱-۲-۴
۷۰	سیستم مغناطیس کننده	۲-۱-۲-۴
۷۰	سیستم حس گر	۳-۱-۲-۴
۷۰	سیستم ثبت و ضبط داده ها و تحلیل آنها	۴-۱-۲-۴
۷۰	سیستم تغذیه	۵-۱-۲-۴
۷۰	راه اندازی سیستم ارزیابی	۶-۱-۲-۴
۷۱	اهمیت مغناطیس کنندگی [27]	۲-۲-۴
۷۱	خصوصیات میدان مغناطیسی و عوامل موثر در اندازه آن [27]	۳-۲-۴
۷۳	تاثیر نشتی بر میدان مغناطیسی [27]	۳-۴
۷۴	موضوعات ارزیابی [27]	۴-۴
۷۵	خرابی های کاهش فلز (Metal loss) [27]	۵-۴
۷۵	عمق [27]	۱-۵-۴
۷۶	عرض	۲-۵-۴
۷۷	طول	۳-۵-۴
۷۸	تیزی	۴-۵-۴
۷۸	کاهش فلز بصورت مدور	۵-۵-۴
۷۹	تعیین نوع خوردگی	۶-۵-۴
۸۰	سایر انواع خرابی ها	۷-۵-۴
۸۱	منابع دیگر نشت فلو	۸-۵-۴
۸۲	متغیرهای اندازه گیری	۹-۵-۴
۸۲	حس گرها [27]	۶-۴
۸۴	تعیین جهت حس گرها [27]	۱-۶-۴
۸۵	اندازه گیری محیطی	۲-۶-۴
۸۶	موقعیت محوری	۳-۶-۴
۸۷	اثر هال [31], [32], [33]	۷-۴
۸۸	پروب هال	۱-۷-۴
۸۹	جریان های گردابی [33], [34]	۸-۴
۸۹	فلوی جریان در مدارهای DC	۱-۸-۴
۸۹	القاء الکترو مغناطیسی	۲-۸-۴
۹۱	سیم پیچ ساده در بالای سطح فلزی	۳-۸-۴
۹۳	عوامل مؤثر در پاسخ جریان گردابی	۴-۸-۴
۹۳	ویژگی هدایت فلز	۱-۴-۸-۴
۹۳	نفوذپذیری	۲-۴-۸-۴
۹۳	فرکانس	۳-۴-۸-۴
۹۳	هندسه	۴-۴-۸-۴
۹۴	مجاورت / lift off	۵-۴-۸-۴
۹۴	عمق نفوذ	۶-۴-۸-۴
۹۵	سطح امپدانس	۷-۴-۸-۴
۹۶	شکل سیم پیچ	۵-۸-۴
۹۷	مدارهای الکتریکی مهم جهت اندازه گیری ولتاژ پروب جریان های گردابی	۶-۸-۴

۹۷	..... ۱-۶-۸-۴ پل
۹۸	..... ۲-۶-۸-۴ محرک بالابرنده
۹۸	..... ۷-۸-۴ اصول روش میدان دور جریان گردابی [35], [36]
۱۰۰	..... ۱-۷-۸-۴ کاربرد میدان جریان های گردابی از راه دور [36]
۱۰۱	..... ۹-۴ چگونگی بهره گیری از اطلاعات [27]
۱۰۱	..... ۱-۹-۴ کتابخانه‌هایی از سیگنال‌های خرابی
۱۰۳	..... ۲-۹-۴ آنالیز داده‌های فلوی نشتی
۱۰۳	..... ۱-۲-۹-۴ دقت تعیین محل
۱۰۴	..... ۲-۲-۹-۴ آستانه‌های آشکار سازی
۱۰۵	..... ۳-۲-۹-۴ احتمال آشکار سازی
۱۰۵	..... ۴-۲-۹-۴ تعیین مشخصه خرابی‌های خوردگی فلز
۱۰۷	..... ۵-۲-۹-۴ دقت شدت خرابی
۱۰۸	..... ۶-۲-۹-۴ قابلیت‌های آشکار سازی MFL
۱۰۸	..... ۷-۲-۹-۴ قابلیت‌های تعیین خصوصیات سیگنال دریافتی
۱۰۹	..... ۱۰-۴ آنالیز سه بعدی داده‌ها [37]
۱۱۱	..... ۲-۱۰-۴ مقایسه آنالیز خطی و غیر خطی
۱۱۳	..... ۳-۱۰-۴ تاثیرات طول و عرض ترک
۱۱۴	..... ۴-۱۰-۴ رفتار شار نشتی در نزدیکی دو ترک
۱۱۵	..... ۱۱-۴ استفاده از مدل المان محدود [38]
۱۱۵	..... ۲-۱۱-۴ مدل المان محدود
۱۱۹	..... ۱۲-۴ معرفی یک توپک نمونه [39]
۱۲۰	..... ۱-۱۲-۴ عیب یاب محوری دقت بالا
۱۲۰	..... ۲-۱۲-۴ قابلیت‌ها و مشخصات
۱۲۰	..... ۳-۱۲-۴ روش تست کارآیی
۱۲۱	..... ۴-۱۲-۴ چگونگی پردازش اطلاعات
۱۲۱	..... ۵-۱۲-۴ تعیین محل فرسایش (نقشه برداری)
۱۲۱	..... ۶-۱۲-۴ تعیین مشخصه هندسی خط لوله:
۱۲۲	..... ۸-۱۲-۴ تعیین مشخصات XYZ خط لوله
۱۲۲	..... ۱۳-۴ زمینه‌های توسعه و رشد در آینده
۱۲۵	..... فصل پنجم
۱۲۵	..... جمع بندی و پیشنهادات
۱۲۶	..... ۱-۵ مقدمه
۱۲۶	..... ۲-۵ مروری بر دو عملیات توپکرانی در خطوط لوله‌های نفتی ایران [40]
۱۳۲	..... 5-3 توپکرانی در یک خط لوله نمونه [1]
۱۳۲	..... ۱-۳-۵ مرحله انتخاب
۱۳۳	..... ۲-۱-۳-۵ شرایط عملیاتی
۱۳۶	..... ۴-۱-۳-۵ به دست آوردن نتایج
۱۳۸	..... ۴-۵ نظرات و پیشنهادات
۱۴۰	..... ۱-۴-۵ ساخت یک نمونه عیب‌یاب آزمایشگاهی [41], [42], [43]
۱۴۰	..... ۱-۱-۴-۵ مقدمه

.....

- ۱۴۰ بلوک دیاگرام ۲-۱-۴-۵
- ۱۴۱ بخش مغناطیس کننده ۳-۱-۴-۵
- ۱۴۱ بخش حسگر ۴-۱-۴-۵
- ۱۴۲ بخش الکترونیکی ۵-۱-۴-۵
- ۱۴۳ منبع تغذیه ۶-۱-۴-۵
- ۱۴۳ بخش راهبر ۷-۱-۴-۵

فصل اول

مقدمه‌ای بر توپکرانی

۱-۱ مقدمه

موضوع این پایان‌نامه به منظور ارائه مطالعه مقدماتی از تکنولوژی نوینی است که با توجه به منابع غنی نفت و گاز ایران، می‌تواند انگیزه‌ای برای کارشناسان و متخصصین کشور باشد تا درصدد ایجاد فناوری توپک و کاربردهای متنوع آن در خطوط گاز و نفت قرار گرفته و بدین وسیله به راه‌کارهایی برای استقلال کشور از شرکت‌های خارجی در زمینه استفاده از این وسیله دقیق بازرسی دست یافت.

مطالعه پدیده‌های فیزیکی و استفاده از آنها، موجب برانگیختن فکر و در عین حال به مبارزه طلبیدن اندیشه می‌شود و شایان ذکر است علمی که پایه وجود آمدن سیستم دقیقی چون توپک را بنیان نهاده‌اند اصول و پدیده‌های فیزیکی ساده‌ای هستند که در ادامه مباحث به بررسی آنها می‌پردازیم. در این فصل، ابتدا به معرفی مختصری از توپک و تاریخچه توپک‌رانی و سیر پیشرفت آن و نهایتاً به ساختار و اهداف پایان‌نامه می‌پردازیم.

۱-۲ توپک چیست؟ [1], [2]



شکل ۱-۱. نمایی از ارسال توپک

توپک‌ها، ابزارهایی هستند که داخل خط لوله فرستاده می‌شوند و توسط جریان خط لوله اعم از نفت، گاز، آب و ... حرکت می‌کنند. معمولاً برای از بین بردن مواد ته نشین شده که موجب مسدود شدن یا کند شدن جریان در خط لوله می‌شوند و یا شناسایی نقاط آسیب دیده، ترک‌ها و خوردگی‌ها در خطوط لوله از این وسیله بازرسی استفاده می‌شود. توپک‌هایی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند، در یک تقسیم بندی کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱) توپک‌های عملیاتی^۱: این نوع توپک‌ها برای انجام اموری از قبیل تمیز کردن، جداسازی، آب‌زدایی خطوط لوله استفاده می‌شوند.

۲) توپک‌های بازرسی خط لوله^۲: این نوع توپک‌ها که به توپک‌های هوشمند^۴ نیز معروفند برای فراهم کردن اطلاعاتی در مورد شرایط خط لوله، وسعت و موقعیت هرگونه نقص در خط لوله به کار می‌روند. در فصل دوم به طور مفصل در مورد انواع توپک و وظایف آنها صحبت خواهیم کرد.

¹ PIG

² Utility PIG

³ In-Line Inspection Tool

⁴ Intelligent PIG

۱-۳ تاریخچه توپک‌رانی [2]

اولین عملیات توپک‌رانی در سال ۱۸۷۰، چند سال بعد از این که کلنل درک^۱ نفت را در تیتوسویل^۲ پنسیلوانیا^۳ کشف کرد، انجام شد. در ابتدا، قبل از استفاده از خطوط لوله برای حمل و نقل، بشکه‌های نفت را برای پالایش توسط ارابه‌هایی که توسط اسب جا بجا می‌شد منتقل می‌کردند. در زمستان، به خاطر برف‌های سنگین و همچنین یخبندان و در نتیجه انجماد ارابه‌ها، حمل و نقل به سختی انجام می‌گرفت. در زمان بارندگی هم به علت وجود گل و لای و امکان گیرکردن ارابه در گل و لای حمل و نقل امکان‌ناپذیر بود. به همین دلیل برای پیشرفت روش حمل و نقل، خطوط لوله بکار گرفته شد. ماده اولیه‌ای که توسط آن خطوط لوله اولیه ساخته شدند، گزارش نشده است ولی خطوط لوله توسط روش Bell and Spigot که یک نوع اتصال خطوط است و امروزه در لوله‌های پلاستیکی دیده می‌شود، به هم اتصال پیدا کرده‌اند. در این روش لبه لوله‌ها در انتها پهن‌تر می‌شوند و در نتیجه در داخل همدیگر فرو می‌روند.

پس از گذشت چند سال از حمل و نقل نفت سیاه در این خطوط لوله جریان نفت در این خطوط کاهش پیدا کرد و سبب شد که هزینه پمپاژ مواد افزایش یابد که این مساله نشان‌دهنده تجمع مواد زاید و جرم در دیواره داخلی خطوط لوله بود. راه‌های مختلفی برای از بین بردن این مواد زاید به کار بردند ولی در هر بازه زمانی هرکدام رد شد. تا این که در سال ۱۸۷۰ ایده فرستادن یک وسیله در داخل لوله مطرح شد. در ابتدا پیشنهاد شد که دسته‌ای از پارچه‌های کهنه را به صورت توپهای متصل به هم مورد استفاده قرار دهند ولی بعدها به جای پارچه‌های کهنه از چرم استفاده کردند. چرم زمانی که خیس می‌شد باد می‌کرد بنابراین کاملاً چسبیده به دیواره خطوط لوله از آن عبور می‌کرد، و جهت تمیز کردن خط لوله کارآمد بود.

در سال ۱۹۰۴ زمانی که خطوط گاز ۴ اینچی، در مونتانا آمریکا نصب می‌شد، در اثر ریزش کوه، قسمتی از خط لوله کاملاً مدفون شد و اطلاع از سالم بودن آن قسمت میسر نگردید. بدین ترتیب توپ پارچه‌ای ساخته شده را به منظور شناسایی نقاط خرابی و همچنین نشان دادن وجود مواد زائدی مانند خرده سنگ، شن و ماسه در داخل لوله ارسال کردند و از آن زمان توپهای لاستیکی^۴ یا Spheres به عنوان توپک‌های جابجا کننده و اندازه‌گیری ابعاد خط لوله^۵ مورد استفاده قرار گرفت.

انتخاب لغت توپک یا PIG برای این وسیله ارسال که با گذشت زمان دامنه وظایف آن وسعت یافته است توسط دو نفر از مسئولان تمیزکردن خط لوله در آمریکا که عقیده داشتند هنگام عبور وسیله در خط لوله و انجام عملیات تمیزکاری صدایی شبیه به فریاد خوک به وجود می‌آید، انجام شده است. از طرف دیگر PIG را می‌توان اختصار Pipeline Industrial Guide نیز در نظر گرفت.

نیم قرن پس از ساخت توپک‌های عملیاتی با بدنه پارچه‌ای و یا چرمی، از توپک‌هایی با بدنه‌ای از جنس استیل، لاستیک، چرم و یا کلاک‌ها و دیسک‌هایی از جنس پلیمری به نام اورتان^۶ استفاده شده است.

¹ Colonel Drake

² Titusville

³ Pensilvania

⁴ Rubber balls

⁵ Meter Proving

⁶ Urethane

آنها کم کم به وسائلی چون برس‌های سیمی، کاردک‌ها^۱ و تیغه‌های چاقو مانند^۲ و ابزارهای دیگری برای تمیز کردن مجهز شده‌اند. تا سال ۱۹۶۰، بیشتر توپک‌رانی در خطوط گاز و نفت انجام می‌شد. سپس توپک‌های اسفنجی گلوله شکل^۳ مرسوم شدند، که بعدها به خاطر جنسشان در گروه توپک‌های پلیمری قرار گرفتند. با وجود این صنعت گاز و نفت بزرگترین استفاده کننده از این نوع توپک‌ها است. صنایع دیگر از قبیل آب و فاضلاب شهری، صنعت پردازش، پتروشیمی، معدن در خطوط لوله خود به منظور افزایش بازدهی از جمله ذخیره انرژی، افزایش جریان و کاهش فشار پمپاژ و تمیز کردن محصولات و بازیافت زباله‌ها از توپک استفاده می‌کنند.

از سال ۱۹۶۰ به بعد توپک‌ها وظایف دیگری را نیز بر عهده گرفتند و تا امروز پیشرفت‌های زیادی در این فناوری مشاهده می‌کنیم. توسعه و تکوین انواع مختلف توپک‌های خطوط لوله یک فناوری پیوسته و رو به گسترش است. هم اکنون هزاران نوع مختلف توپک وجود دارد. بعضی از آنها در مصارف خاص و بسیاری دیگر به طور استاندارد و برای مصارف عمومی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از جمله می‌توان به تمیز کردن^۴ خط لوله، خشک کردن، زدودن مواد زاید^۵، تمیز کردن توسط کاردک^۶، بازرسی^۷ و زیر نظر داشتن درستی^۸ عملیات اشاره کرد. همچنین به تازگی توپک‌های شبه هوشمند که عملیات اضافه‌ای چون اخطار، آغاز کردن عملیاتی چون به کار انداختن پمپها و باز و بسته کردن شیرها^۹ و کنترل کامپیوتری عملیات هنگام ارتباط با دیواره خط لوله را انجام می‌دهند ساخته شده است. بدون شک صنعت توپک‌رانی به منظور پیشرفت‌های بهتر برای فرداها، ادامه و پیشرفت پیدا خواهد کرد.

امروزه در دنیای صنعت سازندگان بسیاری وجود دارند که انواع توپک‌های عملیاتی مورد نیاز در مراحل مختلف مخصوصا توپک‌های تمیزکننده را تولید می‌کنند. در ایران نیز شرکت‌هایی چون شرکت Savay هستند که تولیدکننده انواع توپک‌های تمیزکننده می‌باشند و به علت رعایت کردن استانداردهای مورد نیاز، شرکت نفت و گاز ایران را بی نیاز از شرکتهای خارجی نموده‌اند.

۱-۴ تاریخچه توپک هوشمند^[3]

از سال‌های ۸۰-۱۹۷۹، فناوری توپک‌های بازرسی مورد بررسی قرار گرفته است و آزمایش‌های مختلف و بررسی نتایج آن باعث شهرت روزافزون توپک‌ها یا بهتر بگوییم نسل جدید توپک‌های مغناطیسی شده است. این توپک‌ها که به عنوان توپک‌های تشخیص خوردگی مشهورند بر اساس نشتی شار مغناطیسی، که در فصل ۴ به تفصیل توضیح داده می‌شود، عیوب خطوط لوله را شناسایی می‌کنند.

در سال ۱۹۸۱، اولین بازرسی توسط توپکی به نام Linalog در خط لوله گاز در بندر Frigg انجام شد. این عملیات در شش مرحله انجام گرفت که در چهار مرحله کل خط لوله و در دو مرحله نیز بازرسی دوباره خط لوله انجام گردید. در طول بازرسی اولیه خط، مشکلات موجود نشان می‌داد که نیاز به تحقیقات بیشتری برای

¹ Scraper

² Knife blade

³ Bullet-shaped foam PIG

⁴ Sweeping

⁵ Wiping

⁶ Scraping

⁷ Inspection

⁸ Integrity Monitoring

⁹ Valves

¹⁰ Intelligent PIG

رسیدن به نتیجه مطلوب وجود دارد. اگرچه موارد بسیاری خرابی نیز گزارش شد که در مرحله دوم همگی بازرنگری و تایید شدند.

به طور کلی از این بازرسی نتایج زیر حاصل شد:

۱. بعضی موارد نقص‌هایی که در مرحله اولیه نشان داده شده بود در مرحله بعدی گزارش نشد.

۲. دقت شناسایی به اندازه‌ای خوب نبود که بتوان به آن اعتماد کرد. و توپک Linalog تنها قابلیت شناسایی عیوب تا ۵۰٪ را دارد.

حتی امروزه با وجود دقت بسیار بالای تمیزکردن خطوط لوله که تاثیر زیادی در دقت بازرسی دارد، هنوز هم در خطوط طولی که بالای 170km طول دارند، موارد کوچکی از عیوب به درستی دیده نمی‌شود.

در سال ۱۹۸۷، شرکت Total Oil Marine plc نسل جدیدی از توپک هوشمند به نام‌های British Gas نسل دوم از نوع توپک مغناطیسی و Pipetronix از نوع ماوراء صوت را به بازار عرضه کرد. خصوصیات توپک British Gas را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

نوع عیب	قابلیت شناسایی
حفره ناشی از خوردگی (مساحت کمتر از 3t x 3t)	حداقل عمق 0.4t
	دقت اندازه گیری +/- 0.1t
خوردگی معمولی (مساحت بیشتر از 3t x 3t)	حداقل عمق 0.2t
	دقت اندازه گیری +/-0.1t
کندگی محیطی	حداقل عمق 0.4t
	دقت اندازه گیری +/-0.1t
کندگی محوری	حداقل عمق 0.2t
	دقت اندازه گیری +/-0.1t
موقعیت عیوب	دقت موقعیت محوری +/- 15m
	دقت موقعیت محیطی +/-5°

هر دو نوع توپک دارای دقت اندازه‌گیری بالایی بودند و قابلیت عبور و شناسایی درز جوش را نیز داشتند ولی زمانی که توپک ماوراء صوتی را در داخل خط لوله گاز Frigg فرستادند، با مساله جدیدی روبرو شدند. توپک ماوراء صوتی برای عملکرد خود نیازمند یک محیط مایع به عنوان محیط واسط دارد. هر گونه حباب گاز در این مایع می‌تواند اتصال توپک ماوراء صوتی را از دیواره خط لوله و در نتیجه درستی نتایج بازرسی را از بین برده و صحت نتایج را مورد تهدید قرار می‌دهد. البته این مساله قابل حل است و راه حل آن این است که توپک را در صدها تن مایع در دو سوی خط لوله ارسال می‌کنند که در آن زمان میسر نبوده فلذا برای خط لوله Frigg همان توپک British Gas ارسال شد.

امروزه شرکت‌هایی چون Total Pipeline Integrity (PII) و Rosen و Platypus که از تولیدکننده‌های بزرگ توپک‌های هوشمندی با دقت بالا هستند عموماً از فناوری نشتی شار مغناطیسی استفاده می‌کنند. توپک‌رانی و

پردازش اطلاعات بدست آمده از سیگنال‌های دریافتی به اندازه‌ای پیشرفت کرده است که امروزه کمتر نیازی به نیروی انسانی برای انجام عملیات توپکرانی مشاهده می‌شود. انجمن پژوهش گاز (GRI)¹ که در ایالات متحده آمریکا قرار دارد دو استاندارد برای توپکرانی تصویب کرده است که عبارتند از GRI 91/0365 برای بازرسی داخلی خطوط لوله گاز طبیعی [4] و GRI 91/0367 که در واقع برای کاربرد نشتی شار مغناطیسی² در خطوط لوله گاز طبیعی [5] است.

با توجه به اینکه در این پایان‌نامه به بررسی تکنولوژی به کار گرفته شده در توپک‌های هوشمند به خصوص روش‌های MFL و UT³ پرداخته خواهد شد در ابتدا لازم است مقایسه اجمالی بین این روش‌ها صورت پذیرد.

۱-۵ مقایسه بین توپک‌های مغناطیسی و ماوراء صوتی [3]

توپک‌های ماوراء صوتی دارای دقت بیشتری نسبت به توپک‌های مغناطیسی هستند. با این حال برای سوراخ‌های عمیق ناشی از خوردگی قابلیت عملکرد توپک‌های مغناطیسی بیشتر است. هر دو نوع توپک قابلیت شناسایی تشخیص عیوب داخلی و خارجی را داراست. در یک عملیات توپکرانی بیشترین موفقیت در این است که علت خرابی مشخص شود و بدان وسیله جهت رفع آن اقدامات لازم به عمل آید. جدول‌های زیر مشخصات معایب و مزایای هر کدام از توپک‌های ماوراء صوتی و مغناطیسی را مشخص می‌کند:

توپک مغناطیسی

معایب	مزایا
گران	+ حساس نبودن به ماده داخل لوله
- محدودیت در برابر ضخامت	+ حساس نبودن به عدم صافی خط لوله
- حساسیت کم در برابر عیوب کم عمق	+ حساس به عیوب داخلی و خارجی
- نداشتن امکان گزارش در محل	+ حساس در نزدیکی نقاط جوش
- حساسیت بالا نسبت به ذرات فلز	+ حساس به ذرات غیرفلز
- محدودیت دمایی	+ طول متناسب توپک
	+ امکان رانش آن در فاصله طولانی
	+ دارای دقت بالا در اندازه گیری عیوب
	+ پوشش کامل خمش‌ها
	+ نیاز به تمیزکردن معقول
	+ امکان ردیابی
	+ امکان خبررسانی خوب

¹ Gas Research Inspection

² Magnetic Flux Leakage

³ Ultrasonic Test

توپک ماوراء صوت

مزایا	معایب
+ قیمت متعادل برای راندن	□ محدود به خطوط مایع
+ حساس به عیوب داخلی و خارجی	□ حساس به ورقه ورقه شدن
+ دارای دقت اندازه گیری بالا	□ نداشتن قابلیت رانش در فاصله زیاد
+ نداشتن محدودیت در قبال ضخامت	□ نداشتن قابلیت هم پوشانی در خمش ها
+ نداشتن حساسیت در حضور درات فلزی	□ نداشتن حساسیت به ذرات غیر فلز
+ حساس در حضور نقاط جوش	□ طولی شدن توپک
+ قابلیت گزارش دهی در محل	□ محدودیت در فاصله ردیابی ¹
	□ محدودیت دمایی
	□ نادیده گرفتن خطاهای کوچک

به نظر می‌رسد که توپک ماوراء صوتی برای خطوط لوله که محتوای مایع است مناسب‌تر است. از توپک ماوراء صوتی Pipetronix نخست در خطوط لوله بین Alwyn و Ninian که طول آن 15.4km است استفاده شد. مشکل به وجود آمده وجود واکس روی دیواره خط لوله بود. در ابتدا باید نقاط مشکل‌زا را به گونه‌ای شناسایی کرد و یا دیواره خط لوله را کاملاً تمیز نمود زیرا موم و ناخالصی از دسترسی پالس‌های ماوراء صوتی به دیواره خط لوله جلوگیری می‌کند. در فصل‌های سوم و چهارم به تفصیل به بررسی توپک‌های UT و MFL می‌پردازیم.

۱-۶ ساختار پایان‌نامه

در این پژوهش، فناوری لازم به منظور طراحی توپک‌های هوشمند از نوع MFL, UT مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب پس از ارائه مطالب مقدمه پایان‌نامه در فصل اول، به معرفی خصوصیات و ویژگی‌های خط لوله و دلایل توپک‌رانی در آن و انواع توپک‌ها و ابزار مورد نیاز در خطوط لوله جهت توپک‌رانی در فصل دوم می‌پردازیم. فصل سوم را به معرفی روش‌های مختلف تشخیص نقص در خط لوله اختصاص داده‌ایم. از آنجا که در این پایان‌نامه هدف بررسی توپک‌های هوشمند است در نتیجه روی روش‌های دیگر کمتر تأمل می‌کنیم و منظور تنها معرفی آنهاست. در انتهای بخش سوم روش UT مفصل‌تر معرفی خواهد شد. چون فناوری MFL گسترده‌تر و کاربرد آن در ایران بیشتر است و تجربه‌های گذشته در ایران هم از این فناوری بهره گرفته‌اند فصل چهارم را منحصراً به معرفی این فناوری اختصاص خواهیم داد. امروزه برای بالا بردن دقت فناوری MFL، علاوه بر پروب هال از پروب جریان‌های گردابی نیز استفاده می‌کنند که این مطالب هم در فصل چهارم ارائه خواهد شد. در پایان در فصل پنجم به ارائه جمع‌بندی از کل فعالیت توپک‌رانی از ابتدای پیش آمدن ضرورت انجام آن تا مرحله پردازش اطلاعات و انجام تعمیرات روی خطوط لوله با مد نظر داشتن دو عملیات توپک‌رانی در خطوط لوله ایران می‌پردازیم و در نهایت نتایج به دست آمده و پیشنهادات خود جهت ادامه این فعالیت را ارائه می‌دهیم. به منظور تهیه مطالب این پایان‌نامه از مراجع بسیار متنوعی استفاده شده است، از آن جمله به کتاب AN INTRODUCTION TO PIPELINE PIGGING در زمینه معرفی توپک و توپک‌رانی در فصل‌های اول و دوم،

¹ Limited track record

مقاله Nondestructive Material Testing with Ultrasonic متعلق به شرکت Krautkramer و جزوه ترک‌یاب آلتراسونیک شرکت Pipetronix و مقاله‌های ؟ و؟ در زمینه معرفی MFL و جریان گردابی در فصل چهارم و جزوات تهیه شده در شرکت ملی نفت ایران در زمینه ارائه گزارش‌های عملیات‌های توپکرانی در ایران در فصل پنجم می‌توان اشاره کرد. با توجه به اینکه مهمترین منابع اطلاعاتی ما مقاله‌هایی بوده که از اینترنت به دست آمده لازم به ذکر است که از ترجمه و بررسی سطحی این مراجع پرهیز شده است و سعی شده با دریافت ایده‌های اصلی طراحی و محتوای روش‌های به کار گرفته شده مطالبی تهیه شود که علاوه بر آشنا سازی خواننده با موضوع توپک هوشمند مقدمات تئوریک و فناوری به کار گرفته شده در این نوع توپک‌ها به زبان نسبتاً ساده‌ای بیان گردد. امید است که نتیجه این تلاش جمعی که بدون کمک استاد محترم آقای دکتر تقی‌راد و متخصصین شرکت ملی نفت ایران امکان‌پذیر نبوده است مورد استفاده دانشجویان، محققین، متخصصین و ارباب صنعت کشور قرار گیرد.

فصل دوم

هدف از توپک‌رانی و انواع توپک

در این فصل به بررسی مختصری از ویژگی‌ها و نقص‌های خطوط لوله همچنین ضرورت توپکرانی، انواع توپک‌ها و ابزار مورد نیاز جهت نصب در خطوط لوله به منظور توپکرانی پرداخته می‌شود. با توجه به این که هدف این پایان‌نامه پرداختن به ساختار سیستم‌های عیب یاب است، مطالب این فصل مختصر و تنها برای اطلاع خواننده ذکر شده است.

۲-۲ ضرورت اجرای توپکرانی [9], [6], [2]

هدف اصلی برای توپکرانی، بالابردن طول عمر و توانایی یک خط لوله است. موارد زیر هدف‌های معمول توپکرانی را نشان می‌دهد.

۱-۲-۲ بالا بردن کیفیت جریان مواد در خطوط لوله

هر کاهشی در کیفیت خطوط لوله موجب کاهش طول عمر خط می‌شود. برای یک خط لوله این که کیفیت آن ۱۰۰٪ باشد، غیر ممکن است. همچنین اصطکاک و سایر فاکتورهای فیزیکی موجب مسدود شدن جریان می‌شوند. در انتقال گاز طبیعی، در کمپرسورهای نفتی با گذشت زمان گرد و غبار و مواد ته نشین شده تولید اشکال می‌کنند و می‌توانند لحظه‌ای با قطرات آب موجود در گاز آمیخته شده و درون لوله را مسدود کنند. پارافین، شن و ماسه، کثیفی و آبی که در سیال موجود در خطوط لوله است تولید یک سری مشکلات می‌کند. در همه موارد، این آلودگی‌ها موجب افزایش مقاومت در برابر جریان و در نتیجه کاهش کیفیت خط لوله و افزایش قیمت انتقال می‌شود.

تست‌های کیفیت به منظور تعیین این که یک خط لوله نیاز به توجه خاص دارد یا خیر، انجام می‌گیرد. حتی افزایش ۱ درصد در کیفیت یک خط لوله شامل گاز طبیعی، در روز می‌تواند موجب افزایش یک میلیون فوت مکعب افزایش تولید شود.

۲-۲-۲ کنترل خوردگی

توپک به منظور حفاظت و نگهداری و تمیزی خطوط لوله، با از بین بردن مواد زاید و ته نشین شده در یک لوله، از خوردگی جلوگیری می‌کند.

۳-۲-۲ جدا کردن محصولات

به وجود آوردن یک رابط^۱ (واسط) بین دو محصول در منطقه ای که آنها با هم تماس دارند مانند زمانی که دو ماده مختلف به فاصله کوتاهی از هم در یک خط لوله پمپاژ می‌شود، اهمیت زیادی دارد. برای جلوگیری از این آلاینش، دسته‌ای از توپک‌ها به نام Batching PIG داخل این مسیر یا در ابتدا و انتهای یک محفظه بافر^۲ که بین دو محصول قرار دارد فرستاده می‌شوند. توپک می‌تواند از این اتصال^۳ در برابر جریان زیاد یا کم یا قطع شدن متناوب جریان در بین شیرها^۴، در خمیدگی‌ها^۵ و گرفتگی‌های کوچک حمایت کند.

¹ Interface

² Buffer Batch

³ Seal

⁴ Valve

⁵ Bend

۴-۲-۲ مشخص کردن محل گرفتگی در خط لوله جدید

بعد از این که یک خط لوله جدید نصب می‌شود لازم است که از عدم وجود کوچکترین گرفتگی و یا ضربدیدگی در طول نصب و همچنین از خارج شدن کلیه مواد اضافی و خرده‌های زائد فلزی ناشی از عملیات احداث لوله، جوشکاری و غیره اطمینان حاصل شود. تورفتگی یا خمیدگی تولید نواحی فشار^۱ می‌کند که موجب افزایش آشفته‌گی و اغتشاش و مسدود شدن لوله و در نتیجه گیرکردن توپک می‌شود.

برای مشخص کردن محل گرفتگی از Gauging PIG و یا Caliper PIG استفاده می‌کنند که در خط لوله قبل از ارسال توپک هوشمند فرستاده می‌شوند. این نوع توپک که به Calscan نیز مشهور است، قابلیت تغییر شکل حداکثر تا ۲۵٪ را دارد.

سیستم‌های موقعیت یاب الکترونیکی^۲ شامل یک ترانس‌میتور با فرکانس خیلی پایین است که روی توپک نصب می‌شود و یک گیرنده دستی دارد. این گیرنده برای دریافت هر نوع سیگنال نمایانگر چسبیدن خرده‌های کوچک به توپک است که عبور توپک را غیر ممکن می‌کنند. [11]

۵-۲-۲ هواگیری و آب‌زدایی (تست هیدروستاتیکی)

تست هیدروستاتیکی شامل ایجاد خلأ در خط لوله و پرکردن آن توسط آب و سپس در فشار قراردادن خط لوله در یک فشار مشخص برای مدت زمان معینی است. پس از انجام تست، آب موجود باید کاملاً از خط لوله خارج شود. برای این منظور از Batching/Displacement PIG برای خارج کردن هوا و آب‌زدایی بعد از انجام تست هیدروستاتیکی استفاده می‌شود.

۶-۲-۲ تایید اندازه‌گیری^۳

برای اپراتور که وظیفه کنترل جریان را بر عهده دارد، اطلاع سرعت جریان مواد در خط لوله اهمیت دارد. برای این منظور می‌توان از توپک برای تعیین اندازه دقیق جریان و در نتیجه کالیبره کردن دستگاه‌ها از جمله جریان‌سنج‌ها استفاده کرد. برای مقرون به صرفه‌بودن هزینه حمل و نقل، از توپک‌های دو جهته که با معکوس نمودن جریان در خط لوله به سادگی به عقب برمی‌گردند، استفاده می‌گردد. بنابراین توپک‌های کره‌ای^۴ که در حلقه‌های متوالی خط لوله با یک شیر on/off جهت جدا کردن بالا از پایین، مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای پیشرفت بهتری هستند. در ساده‌ترین شکل‌ها، کالیبراتورها شامل یک لوله حاوی یک کره توپر است به همراه سیگنال دهنده‌های الکترونیکی توپک^۵ و تله توپک^۶ (برای پرتاب کردن و گرفتن کره‌ها) که در هر دو انتهای لوله نصب شده‌اند. حجم محصول داخل لوله که بین آشکارسازها قرار می‌گیرد به عنوان Certified Columetric tanks برای کالیبراسیون استفاده می‌شوند.

¹ Stress area

² Electronic Tool Location System

³ Meter Prove

⁴ Spheres

⁵ PIG Signaller

⁶ PIG Trap

۷-۲-۲ توپک‌رانی ژلاتینی

در واقع در این نوع توپک‌رانی، یک ماده ژله مانند به داخل خط لوله تزریق می‌شود یا به درون خود توپک در محفظه سیلندرمانندی ریخته می‌شود. ژله رسوباتی را که در خط لوله یافت می‌شود، جمع کرده و نگه می‌دارد. مواد حاصله به صورت خمیر بوده و تحت فشار می‌تواند از خط لوله در محل‌های مشخص خارج شود.

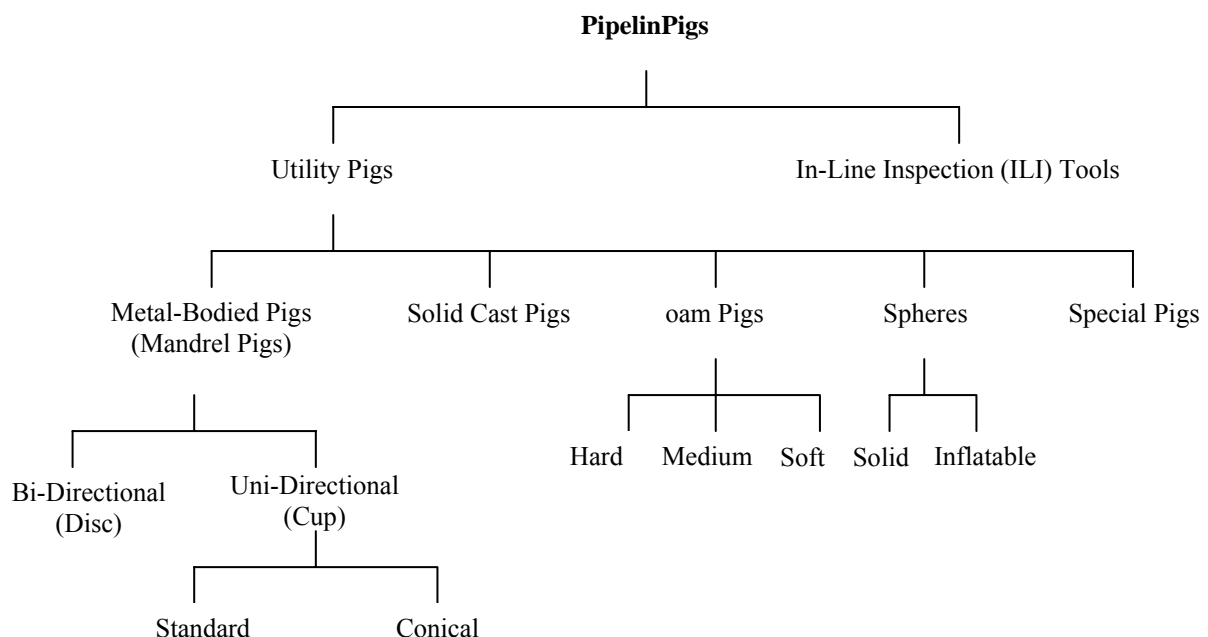


شکل ۱-۲. نمایی از توپک‌رانی ژلاتینی

۳-۲ انواع توپک‌ها [2], [6], [9]

اگر هدف از توپک‌رانی اطمینان از عبور کامل توپک هوشمند از ابتدا تا انتها باشد، یک gauging PIG می‌تواند استفاده شود. یک gauging pig همچنین می‌تواند مواد زائد مانند تکه‌های بازمانده جوشکاری و تراش را تمیز کند. اگر هدف برای تمیز کردن زنگ زدگی باشد یا کثیفی و یا ذرات تراش یک توپک تمیز کننده استاندارد استفاده می‌شود. اگر هدف خارج کردن هوا یا تست هیدروستاتیکی باشد از یک batchig/displacement PIG استفاده می‌شود. بنابراین توپک‌ها بر اساس کاربرد و ساختمانشان باید دسته‌بندی شوند. در این بخش به بررسی انواع توپک‌ها می‌پردازیم.

در نمودار زیر تقسیم بندی مربوط به انواع توپک آمده است:



در بالاترین سطح دو نوع دسته بندی وجود دارد:

۱- توپک‌های بازرسی درون خطی (توپک‌های هوشمند)

۲- توپک‌های عملیاتی^۱

۳- توپک‌های تعیین پیکربندی^۲

۲-۳-۱ توپک‌های هوشمند^۳ [1]

ابزاری است که اطلاعات راجع به مشکلات خطوط لوله از قبیل حفره‌های خورده شده، خرابی‌های مکانیکی، تورفتگی‌ها، عیوب دندانانه، چین خوردگی خمیدگی‌ها، نواحی سخت و تاول‌های هیدروژنی و مکان آنها، اطلاعات دقیقی می‌دهند.



شکل ۲-۲. توپک هوشمند

۲-۳-۲ توپک‌های عملیاتی [2]

توپک‌های عملیاتی به پنج زیر مجموعه با مشخصات ساختاری زیر تقسیم می‌شوند:

توپک‌های با بدنه فلزی^۴: همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌کنید، در این نوع از توپک، اجزاء مربوط به

آب بندی به صورت محوری در یک جسم لوله‌ای شکل یا جسم فلزی نصب می‌گردند.

توپک‌های یک تکه^۵: این نوع از توپک به صورت یک قطعه ریخته‌گری شده از پلی اورتان^۶ می‌باشند. این نوع

توپک‌ها معمولاً جهت اطمینان اپراتور از مسدود نبودن خط لوله در خط فرستاده می‌شود. به این نوع توپک‌ها

Dummy PIG گویند. (شکل ۲-۴)

توپک‌های کفی^۷: از جنس پلی اورتان در سه دانسیته نرم و متوسط و سخت ریخته‌گری می‌شود و جهت

تمیز کردن خطوط لوله استفاده می‌شود. (شکل ۲-۵)

توپک‌ها کروی: این نوع توپک‌ها از پلی اورتان ساخته شده و از گستره‌ای از لاستیک‌ها بسته به مورد استفاده

تولید می‌شود. (شکل ۲-۶)

¹ Utility PIG

² Configuration PIG

³ Intelligent PIG

⁴ Metal Body Pigs

⁵ Solid Cast PIG

⁶ Poly Urthan

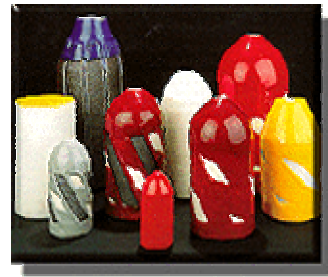
⁷ Foam PIG



۵-۲. توپک‌های کفی



۴-۲. توپک‌های یکپارچه



۳-۲. توپک‌های بدنه فلزی



۶-۲. توپک‌های کروی

توپک‌های مخصوص^۱: ساختاری شبیه Metal-bodied Pigs دارند. دسته بندی‌های خاص با وظیفه توپک و نوع کارکرد آن برای برآورده کردن یک نیاز مشخص می‌گردد. اگرچه عملکرد به مجموعه اشاره می‌کنند، شرایط عملکردها برای مرحله توسعه خطوط لوله تغییر خواهند کرد. (Gauging , Cleaning و غیره)

این مطلب بر پارامترهایی از قبیل نرخ سایش قطعات که بر تعداد یدکی یا کل توپک‌هایی که نیازمند کامل نمودن وظیفه شان هستند، اثر خواهد داشت.

این توپک‌ها شامل ساختارهای زیر هستند:

توپک‌های دو قطر

توپک‌های مفصل

توپک‌های تفاضلی

با این تعریف توپک‌های مخصوص باید بر مشکلات زیادی که به عوامل طراحی خط لوله اعمال می‌شوند، فائق آیند. بنابراین طراحی آنها خیلی بحرانی است. در طراحی بدنه، آب بندها و انطباق‌ها ممکن است از اجزاء استاندارد استفاده نمایند، اما بیشتر اینگونه است که آنها یک مشخصاتی را در جایی که اطلاعات دقیقی در همه جنبه‌های خطوط لوله و فاکتورهای طراحی شان مورد نیاز است، شامل باشند.

۳-۳-۲ چند نمونه از توپک‌های عملیاتی [2], [3]

در این جا به بررسی چند توپک عملیاتی می‌پردازیم:

(۱) **توپک جدا کننده^۲:** این نوع توپک با حرکت دادن یک صفحه محیط گاز را از محیط مایع، یا دو محصول متفاوت که در خط لوله جابجا می‌شوند، جدا می‌کند. شکل متعارف آن به صورت توپک‌های کروی^۳ یا توپک‌های فنجان شکل^۴ است.

¹ Special PIG

² Batching PIG

³ Spheres

⁴ Cup PIG

۲) توپک‌های تمیزکننده^۱: توپک‌هایی که با استفاده از کلاهک‌ها، خراشنده‌ها، برس‌ها، می‌تواند کثیفی، زنگ زدگی و ... را از دیواره خط لوله پاک کند.

۳) توپک‌های فنجان شکل^۲: توپک‌هایی هستند که توسط کلاهک‌هایی که از جنس یک ماده قابل انعطاف مانند Neoperene یا Polyurethane هستند به جلو رانده می‌شوند.

۴) توپک‌های اندازه‌گیر^۳: این توپک‌ها قابلیت تغییر شکل در مقابل انسداد خط لوله را دارند و بنابراین پس از بازیافت توپک هر گونه تغییری گواهِ بر هر قطعه از خط لوله است.

۵) توپک ژلاتینی^۴: توپکی که ژلاتینی با ویسکوزیته بالا جهت تمیزکردن خط لوله تولید می‌کند.

۲-۳-۳ توپک‌های تعیین پیکربندی [9], [2]

این نوع توپک اطلاعات مربوط به محیط مرئی دیواره داخلی خط لوله را جمع آوری می‌کند. به این نوع توپک‌ها ابزارهای شبه بازرسی نیز گویند. به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شود:

۱) توپک‌های عکاس^۵: این نوع توپک دارای دوربین‌ها و نورافکن‌های مخصوص جهت عکس‌برداری از دیواره خط لوله می‌باشد.

۲) توپک‌های تعیین مشخصه هندسی^۶: برای ضبط اطلاعاتی در رابطه با موقعیت‌های تورفتگی‌ها، نقاط آسیب دیده، مقدار زاویه خمش و در کل مشخصات داخلی خط لوله استفاده می‌شود.

۳) توپک‌های نقشه بردار^۷: دارای حس‌گرهای بسیار ضعیفی برای انتخاب اطلاعاتی در رابطه با کشیدن نقشه خطوط لوله، است.

۴) تجهیزات شناساگر^۸ [10]: این تجهیزات در واقع توپک‌های شناساگری هستند که در ابتدای بازرسی قبل از ارسال توپک هوشمند یا توپک تعیین کننده مشخصات هندسی به درون خط لوله ارسال می‌شوند. این نوع توپک‌ها دارای قابلیت بد شکل شدن دارند و عیوب خط لوله را که باعث تغییر شکل توپک می‌شود مشخص می‌کنند. به این نوع توپک‌ها Calscan نیز گفته می‌شود. این نوع توپک‌ها در دسته توپک‌های تعیین پیکربندی قرار می‌گیرند.

۲-۴ توپک‌ها چگونه کار می‌کنند؟ [7], [2]

توپک، تحت فشار ناشی از ماده داخل خط لوله که از پشت آنها پمپ می‌شود، از میان خط لوله حرکت می‌کند در این حالت ماده واسطه^۹ در دو شکل وجود دارد:

۱- Gas (گاز).

۲- Liquid (مایع).

¹ Cleaning PIG

² Cup PIG

³ Gauging PIG

⁴ Gel PIG

⁵ Camera PIG

⁶ Geometry PIG

⁷ Mapping PIG

⁸ Profile Equipment

⁹ Medium

هر چیزی که ماده واسط است (گاز یا مایع) تأثیر قابل توجهی بر مشخصات توپکرانی کاربردی، بخصوص در مشخص کردن مؤلفه‌های سرعت توپک دارد.

صرفنظر از نوع ماده واسط، سرعت توپک تأثیر زیادی بر راندمان توپکرانی دارد. توپک‌ها جهت کارکرد با راندمان مناسب با یک دامنه محدود سرعت که ممکن است دسترسی به آن مشکل باشد، طراحی می‌شوند، که این بسته به ماده واسط یا دیگر عوامل مانند قابلیت نرخ جریان محصول موجود است.

توپک‌ها در خط لوله تحت تأثیر یک اختلاف فشار در طول لوله حرکت می‌کنند. آن عبارتست از فشار پشت توپک (P_1) منهای فشار جلوی توپک (P_2). این اختلاف فشار (ΔP) سرعت یک توپک را ایجاد خواهد کرد. (سرعت وجهت را می‌دهد) واضح است که اگر P_1 کمتر از P_2 باشد، توپک به سمت عقب حرکت خواهد کرد و این زمانی مهم است که استفاده از توپک‌های دوجهته لازم است.

اختلاف فشار راندمان عملکردهای توپکرانی را در حالت‌های زیر افزایش می‌دهد:

۱) با اعمال نیرو از طرف آب بندها بر دیواره لوله راندمان آب بندی^۱ را بهبود می‌بخشد. این باعث می‌شود که آنها مانند شیرهای یک‌طرفه عمل نمایند.

۲) از آن به عنوان By-Pass در فرآیندهای تمیزکاری استفاده شود.

By-Pass در واقع انحراف یک جریان کنترل شده از ماده واسط، گاز یا مایع است که از داخل یا اطراف توپک عبور می‌کند. دارای دو اثر است:

۱. فشار پشت توپک (P_1) را کاهش داده و بنابراین اختلاف فشار (ΔP) در طول توپکرانی متغیر است این اختلاف فشار بر سرعت توپک تأثیر می‌گذارد. اگر توپک با سرعت کمتری حرکت کند مانند اینکه اختلاف فشار کاهش یافته است.

۲. راندمان توپک‌های تمیز کاری را افزایش می‌دهد و این امر با ممانعت جاروبک‌ها از یکپارچه شدن با ذرات جدا شده و نگه داشتن این ذرات به صورت معلق در جلوی توپک به جای اجازه دادن به آنها جهت تبدیل به یک رسوب جامد محقق می‌گردد. این رسوبات در ارتباط با دریافت کننده^۲ مشکل‌ساز خواهند بود. اما مهمتر اینکه ممکن است باعث از کار افتادن توپک گردند.

مطالعات نشان داده است که بهتر است در راه انداختن توپک در داخل لوله فقط از آب بندهای^۳ جلویی استفاده شود و آب بندهای عقبی مانند تکیه‌گاه عمل می‌کنند. درگاه‌های By-Pass که قابل نصب و یا جداسازی است، بدنه توپک را برای این هدف آماده می‌کنند و اجازه می‌دهند تا فشار از میان بدنه توپک جریان یابد و مستقیماً به فضای بین دو مجموعه آب بندها برود.

درگاه‌های بیشتری جهت ایجاد مسیر جریان راست از میان توپک، اضافه می‌گردند. این امر باعث می‌گردد تا فشار P_1 پشت توپک و اختلاف فشار (ΔP) در طول توپک کاهش یابد. در نتیجه توپک می‌تواند در داخل خط لوله در سرعت پایین‌تری با نرخ جریان ثابت به حرکت درآید.

¹ Sealing
² Receiver
³ Sealing

۲-۵ خصوصیات و ابزار لازم خط لوله جهت توپکرانی

هنگام اجرای عملیات توپکرانی علاوه بر اینکه خطوط لوله نفت از نظر قطر و خمش‌ها و ... می‌باید استاندارد باشند تا قابل توپکرانی باشند، ابزارهایی مانند فرستنده و گیرنده توپک و ... نیز باید روی خط نصب شوند. در ادامه ابتدا ویژگی‌هایی از خط لوله که باید مورد توجه قرار گیرند و سپس ابزارهایی که به منظور توپکرانی نصب می‌شوند را معرفی می‌کنیم.

۲-۵-۱ توجه به طرح خط لوله [2]

ابتدا به این مساله می‌پردازیم که خط لوله در چند مرحله احداث می‌شود. عملکردهای توپکرانی وابسته به عمر کاری خط لوله‌ای است که در آن توپک می‌بایست وظیفه‌اش را انجام دهد. بیشترین مراحل در توسعه خط لوله عبارتند از: (۱) مرحله احداث^۱ (۲) Pre-Commissioning (۳) Commissioning (۴) در طول عملیات^۲ (۵) بازرسی^۳ (۶) تعمیر و نگهداری^۴ (۷) بهبود و ترمیم^۵ (۸) Decommissioning

طرح لوله کشی باید بدون اشکال و دارای امنیت برای تمیز کردن و بازرسی و تعمیر توسط توپک‌ها باشد. در هر کدام از مراحل ذکر شده نیاز به توپکرانی دیده می‌شود. به طور مثال پس از احداث خط به منظور رفع مواد باقیمانده، تمیز کردن خط لوله، اندازه گیری پارامترهای اولیه، تعیین مشخصه هندسی، تست هیدروستاتیکی، آب‌زدایی، خشک کردن توپکرانی انجام می‌شود و یا در امر بازرسی خط لوله از توپک‌های تعیین خوردگی، توپک‌های تعیین مشخصه هندسی، توپک تعیین نشستی و تعیین دقیق محل آن، توپک‌های تعیین محل خمش، ... استفاده می‌شود.

در این قسمت به بررسی فاکتورهایی از خط لوله که جهت توپکرانی اهمیت دارد می‌پردازیم:

۲-۵-۱-۱ طول توپکرانی (حداکثر مسافت بین دو تله توپک)^۶ [7]

فرمولی برای مشخص کردن حداکثر طول توپکرانی وجود ندارد. مدت زمان کار کردن یک توپک به کیفیت خط لوله، سرعت توپک و طرح توپک، موقعیت‌های داخلی خط لوله (ناهموار، نیم خشن و یا صاف) و محیطی که توپک در آن حرکت می‌کند بستگی دارد.

در این جا به راهبردهای معمول توجه کنید:

160km برای خطوط لوله گاز جاری که به تازگی ساخته شده است.

240km برای خطوط لوله نفت جاری که به تازگی ساخته شده است.

320km برای خطوط لوله نفت خام که به تازگی ساخته شده است.

باید توجه کرد که فاصله‌های بالا ماکزیمم فاصله‌ای است که هر توپک در یک مسیر طی می‌کند.

۲-۵-۱-۲ خمیدگی‌ها [7]

هر توپک برای طی کردن یک حداقل خمش معین، ساخته شده است. یک توپک ممکن است ۳/۲ دایره را بپیماید در حالیکه یک توپک دیگر ممکن است قادر به طی کردن ۳ شعاع خمش باشد.

¹ During Construction

² During Operation

³ Inspection

⁴ Maintenance and repair

⁵ Renovation and Rehabilitation

⁶ Pig Trap

به هر حال برای یافتن یک زاویه خمش کمینه که یک توپک نیاز به طی کردن دارد بهترین راه مراجعه کردن به کاتالوگ ساخت آن است.

۲-۵-۱-۳ شیرها [7]

بازشدن کامل مجرای یک شیر یک راه بدون مسدود شدن برای توپک در یک خط لوله را تهیه می‌کند. به طور مثال اگر از شیر دروازه‌ای^۱ استفاده شده باشد، ماکزیمم فاصله جایگاه حلقه آن باید با ماکزیمم جایگاه مشخص شده توپک یکی باشد.

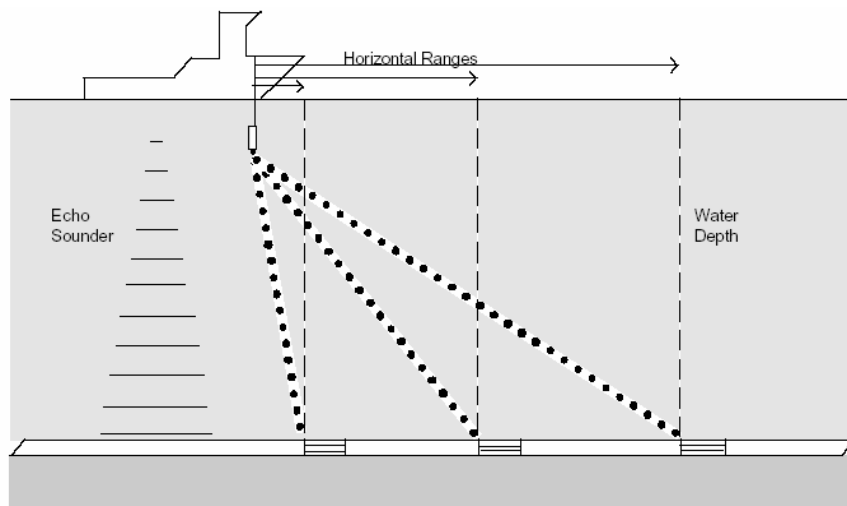
۲-۵-۲ ابزار لازم

این ابزار جهت انجام عملیات توپک‌رانی باید روی خط لوله نصب شوند.

۲-۵-۲-۱ آشکار ساز (سیگنالر) توپک [8]

وقتی یک توپک به داخل لوله فرستاده می‌شود موقعیتش به طور مستقیم مشخص نمی‌شود. به همین علت به سیستمی نیازمندیم تا موقعیت توپک را به صورت پیوسته یا ناپیوسته در نقاطی از لوله که از قبل مشخص شده‌اند نشان دهد. تشخیص پیوسته موقعیت توپک را ردیاب توپک^۲ و تشخیص ناپیوسته موقعیت را علامت دهی می‌نامیم. هر روش نیازمند امکانات اولیه‌ای است که قبل از فرستادن به داخل لوله باید این وسایل با لوله و خود توپک هماهنگی پیدا کرده باشند.

ردیاب توپک نیازمند یک سیستم فرستنده فعال است که با تکنولوژیهای مختلف که در منبع استفاده می‌شود مانند الکترومغناطیس، اکوستیک یا رادیواکتیویته به توپک متصل شود.



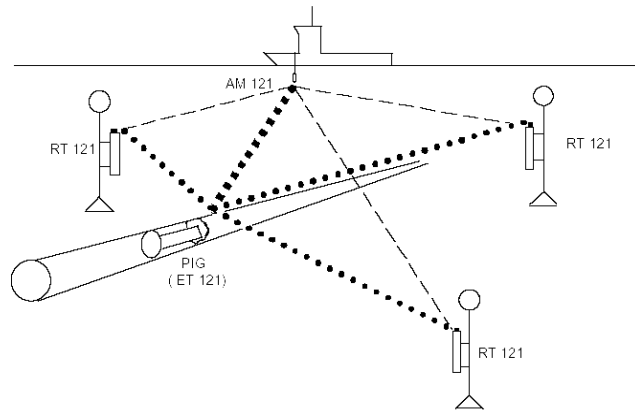
۲-۷. ردیاب چند توپک پشت سر هم که به طور جداگانه بررسی می‌شوند

علامت گذاری توپک به دو بخش تقسیم می‌شود : intrusive و non-intrusive .

Non-intrusive سیستم الکترومغناطیسی است که عموماً در ردیابی توپک جاهایی که می‌خواهیم پوشش بیشتری داده شود استفاده می‌شود. Intrusive pig signaller ها ساکن هستند و به طور مکانیکی در مکان‌هایی

¹ Gate Valve
² PIG Tracking

خاص از لوله، توپک را تشخیص می دهند. چون مکانیزم، تشخیص یک تریگر مکانیکی است باید توجه کنیم که علامت دهنده ما با فشار داخل لوله هماهنگی داشته باشد. هر علامت دهنده ای باید مکانیزمی داشته باشد که ما را از عبور توپک مطلع کند. این مسأله به دو روش صورت می گیرد :



۸-۲. تعیین دقیق موقعیت توپک با استفاده از روش رله

- مکانیکی / تصویری (یک شاخص نشاندار محلی)
- الکتریکی (سوئیچ های مغناطیسی که یک سیگنال الکتریکی برای کنترلر فراهم می کنند).

بر اساس نحوه نصب سیگنالر بر خطوط لوله ما سه نوع سیگنالر داریم:

۱. UniSig Boss
۲. UniSig Flange
۳. UniSig Valve

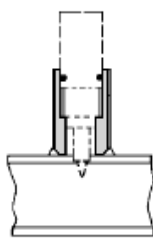


fig. 1a
Welding boss
mounted

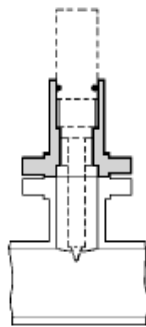


fig. 1b
Flange mounted

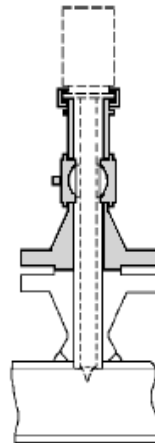


fig. 1c
Ball valve mounted
on 2" weld neck flange

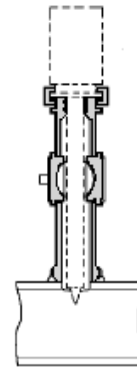


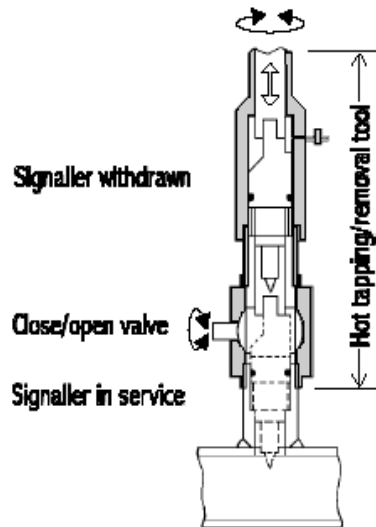
fig. 1d
Ball valve mounted
on 1½" nipple

۹-۲. روشهای نصب سیگنالرها

سیگنالر می تواند در دو حالت روی خطوط لوله نصب شود:

وقتی خطوط لوله در حال استفاده هستند و تحت فشار می‌باشند. (به این حالت hot

tapping می‌گوییم.)



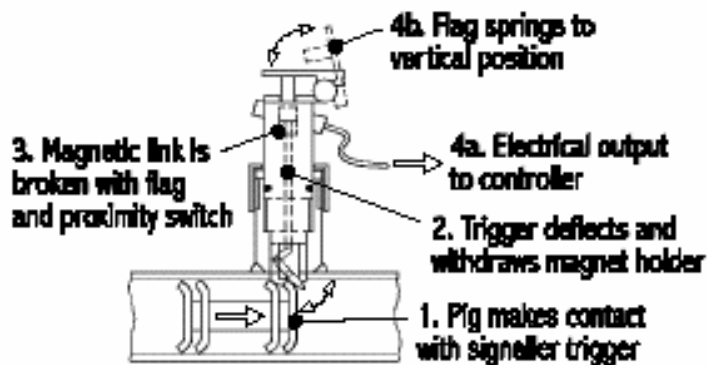
۱۰-۲. Hot tapping (وقتی خطوط تحت فشار هستند)

وقتی که در مرحله ساخت خطوط لوله هستیم یا به هر صورت فشاری داخل خطوط

لوله نمی‌باشد.

hot tapping در واقع عملیاتی دقیق با خطرات خاص خود و ضریب اطمینان قابل قبول می‌باشد. این پروسه در پیشرفت UniSig اثرگذار است. این تأثیرات به مجریان پروژه‌های عملیاتی اجازه می‌دهد بدون تغییرات عمده روند اجرای پروژه را تعقیب کنند.

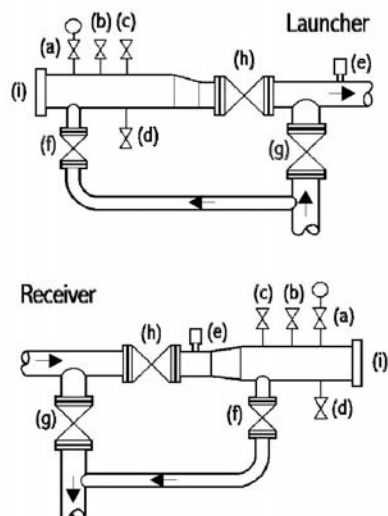
هنگامی که توپک مستقیماً از زیر یک سیگنالر نصب شده عبور می‌کند، توپک صفحه تریگر دو جهتی بیرون آمده از سیگنالر را در جهت حرکت خود فشار می‌دهد. تریگر از دو نقطه به سیگنالر متصل است که از آنجا حرکت زاویه‌ای در اثر برخورد با توپک را به حرکت عمودی تبدیل می‌کند، با عقب کشیدن دوباره فنر دسته مغناطیس دائم به سمت کلاhek پایین می‌آید. بالاخره با مجاورت مغناطیس با بالای کلاhek و یا برخورد خارجی سوئیچ مجاور نصب شده پرچم (flag) مکانیکی فنر را نگه می‌دارد. وقتی مغناطیس برداشته می‌شود، فلوی مغناطیسی که روی قسمت‌های مختلف تأثیر داشت کم می‌شود، flag عمودی می‌شود و یا ارتباط سوئیچ مجاور قطع می‌شود. (این مسأله با یک کنترلر متصل شده قابل تشخیص است.) بلافاصله پس از اینکه توپک عبور کرد، فنر کلاhek مغناطیس و تریگر متصل شده را برمی‌گرداند به مکان مخصوص خود تا آماده شود برای تشخیص توپک بعدی که از هر جهت ممکن است از برابر سیگنالر عبور کند. سوئیچ‌های مجاور با صفحه کنترل می‌توانند reset شوند.



۱۱-۲. اصول عملکرد intrusive pig signaller

۲-۲-۵-۲ تله‌های توپک^۱ [11]

این تجهیزات امکان داخل شدن و خارج شدن توپک را فراهم می‌کنند. تله‌های توپک بر اساس وظایفی که به عهده دارند، نامگذاری می‌شوند. پرتاب کننده‌ها^۲، دریافت کننده‌ها^۳، تله‌های برنده^۴، تونل‌های برنده^۵، تله‌های عمومی^۶، تله‌های دو منظوره^۷، تله‌های کروی^۸ از مهمترین انواع تله‌ها می‌باشد. همچنین بر اساس نحوه اتصال می‌توانند عمودی، افقی، شیبدار^۹، موقتی نصب شود. اگر یک خط لوله نیاز به توپکرانی داشته باشد، قابلیت‌های ارسال و دریافت باید روی آن نصب شده باشد. در واقع این تله‌ها به گونه‌ای عمل می‌کنند که بدون ایجاد کوچکترین تاثیری در پارامترهای خط لوله مانند فشار، توپک‌ها را وارد یا خارج می‌کنند.



Key

- a. Pressure Gauge
- b. Vent
- c. Pressure Relief
- d. Drain
- e. Pig Signaller
- f. Kicker Valve (Launcher) Bypass Valve (Receiver)
- g. Mainline Bypass Valve
- h. Mainline Trap Valve
- i. Quick Release Closure

¹ Launch Equipment

² Launcher

³ Receiver

⁴ Scraper trap

⁵ Scraper barrels

⁶ Universal Trap

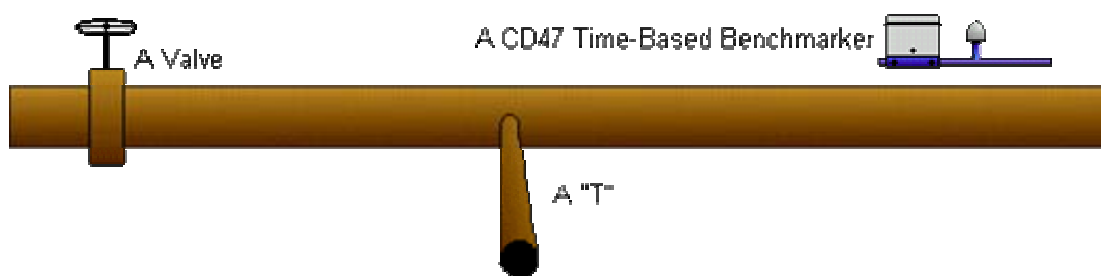
⁷ Bi-directional trap

⁸ Sphere Traps

⁹ Inclined

تحویل دقیق زمان عبور یک توپک از موقعیت شناخته شده در خط لوله مساله بسیار مهمی جهت شناسایی موقعیت دقیق توپک در هر لحظه از زمان می‌باشد. برای این کار از یک محک زن زمانی به نام CD47 استفاده می‌کنند.

CD47 یک سیستم محک زنی برای استفاده هر نوع از توپک‌های هوشمندی است که خوردگی را تشخیص می‌دهند. توپک‌ها خودشان عموماً چند روش برای اندازه گیری اینکه محل خوردگی در چه فاصله‌ای در خط لوله ممکن است باشد، دارند. اغلب، یک سری چرخ‌هایی هستند که "چرخ‌های مسافت سنج" نامیده می‌شوند. که با دیوار لوله اتصال برقرار می‌کنند و در هر زمان که توپک چند اینچی پیش رفته است سیگنال به کامپیوتر می‌دهند. (همانطور که مسافت سنج در اتومبیل با حرکت انتقالی تاثیر افزایش می‌یابد). در این روش توپک می‌تواند مسافتی که در لوله حرکت کرده است را اندازه بگیرد و بداند که خوردگی کجاست. متأسفانه چیزهای زیادی هست که می‌تواند باعث چرخش چرخ‌های مسافت سنج بر روی دیواره لوله شود. این خطا باعث می‌شود، اگر چرخ‌های مسافت سنج توپک تنها ۰/۱٪ در هر مایل بلغزد، در آخر یک ۲۵ مایل کوتاه که توپک رانده شده، توپک ۱۳۲ فوت خطا داشته است. ۱۳۲ فوت در ۲۵ مایل رانده شدن توپک یک میزان خطای غیر قابل قبول است، چرا که داده توپک هوشمند عهده‌دار اعلام مکان کاوش و تعمیر خرابی به شرکت خط لوله است. اپراتور خط لوله نمی‌تواند صدها فوت از خط لوله را برای تعمیر یک قطعه کوچک خرابی کاوش کند. او به دانستن درست محل خرابی احتیاج دارد، به ویژه اگر خط لوله‌اش از یک شهر، فرودگاه، ایستگاه خط راه آهن و ... بگذرد. یک راه حل این است که هر یک مایل یا به هر فاصله‌ای که برگزیده می‌شود، سایت محک زنی روی خط لوله قرار دهید. این دقیقاً همان چیزی است که CD47 انجام می‌دهد. هر یک مایل، توپک این نقاط را خواهد دید و با اطلاعاتی در مورد خوردگی، ضبط می‌کند. در شکل ۱۴ یک مثال گرافیکی از سه نوع مختلف از نقاط محک زنی روی خط لوله هست: یک شیر، یک "T" و یک محک زنی زمانی CD47 هر کدام از این نقاط می‌تواند در دانستن نقطه دقیق خرابی در خط لوله به ما یاری برساند.



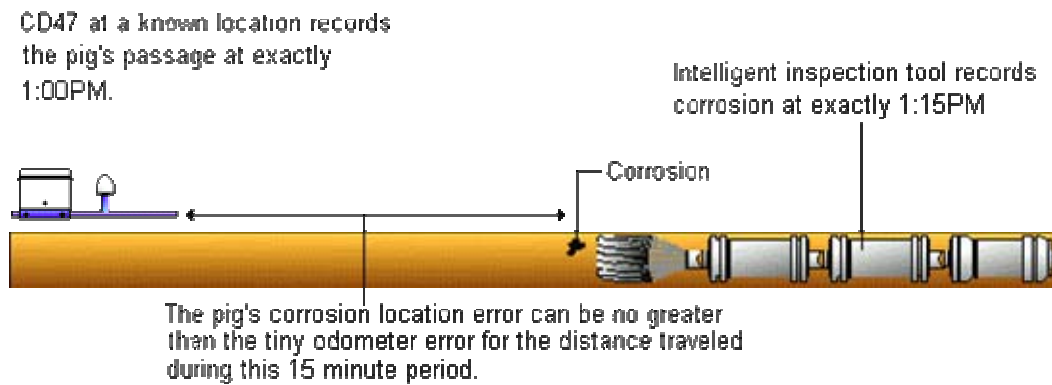
۱۴-۲. واحدهای محک زنی CD47

واحدهای محک زنی CD47، توانایی گرفتن زمان دقیق را از سیستم GPS دارند. توپک خودش یک ساعت دارد و وقتی که توپک برای انجام کارش در خط لوله جای داده می‌شود، ساعتش با ماهواره‌های GPS که واحد CD47 از آن استفاده می‌کند، همزمان می‌شود. بنابراین بخش‌های محک زنی CD47 و توپک همگی همزمان هستند.

همان‌طور که توپک در طول خط لوله حرکت می‌کند و داده ضبط می‌کند، مسافت بر طبق چرخ‌های مسافت سنج در ساختار توپک، آن داده و زمان ضبط داده را مشخص می‌کند و همان‌طور که در خط لوله حرکت

می‌کند، توپک از یک انتقال دهنده مغناطیسی استفاده می‌کند و سیگنالی که ساعت می‌کند از دیواره‌های لوله و خاک می‌گذرد و به گیرنده‌های محک زنی بیرون لوله می‌رسد. وقتی که واحدهای محک زنی این سیگنال مغناطیسی را دریافت می‌کنند، آنها می‌دانند که توپک دارد از این محل می‌گذرد. در یک لحظه عبور، واحدهای محک زنی، زمان آن موقع GPS را از آنتن‌های GPS می‌گیرند و می‌فهمند که دقیقاً توپک در چه زمانی عبور کرده است. در آخر حرکت توپک، اطلاعات واحدهای محک زنی جمع‌آوری می‌شوند که هر کدام حاوی زمان و مکان دقیق عبور توپک هستند.

سپس این زمان‌های عبور را با زمان‌های مشخص اطلاعات خوردگی در توپک همبسته می‌کنند. در شکل زیر یک مثال تصویری شامل تئوری استفاده از CD47 است.



۱۵-۲. مثال تصویری شامل تئوری استفاده از CD47

۶-۲ انواع خرابی‌ها [10]

در این قسمت جهت آشنایی به معرفی خرابی‌های به وجودآمده در خط لوله می‌پردازیم.

	خوردگی خارجی ^۲		خم شدگی ^۱
	از بین رفتن جوشکاری ^۴		از دست دادن سختی ^۳
	سوراخ ^۶		تا خوردگی ^۵

¹ Buckle

² General External Corrosion

³ Conceret-Loss

⁴ Weld missing

⁵ Lap

⁶ Pitting

	ترک‌های تنشی ^۲		ورقه ورقه شدن ^۱
	خوردگی پیش رفته ^۴		تاول به همراه ترک ^۳
	نشستی ^۵		HIC
	خوردگی ناشی از فرسایش ^۷		کندگی ^۶
	فرورفتگی ناشی از سقوط یک درخت		تورفتگی ^۸
	انفجار		سوراخ و فرورفتگی
	ترک کج		ترک عمقی
	پیچ خوردگی		سوراخ
	پیچ خوردگی شدید		خوردگی پیچشی

جدول ۱-۲. انواع خرابی‌های خط لوله

- ¹ Laminations
² SCC
³ HIC blisters
⁴ Extensive corrosion
⁵ Leak
⁶ Gouging
⁷ Erosion corrosion
⁸ Dent

۷-۲ جمع‌بندی

در این فصل به طور خیلی مختصر به معرفی توپک، انواع، کاربردها، چگونگی عملکرد و ضرورت‌های به کارگیری آن پرداخته شد. سپس از شرایط استاندارد هر خط لوله برای انجام عملیات توپکرانی مطالبی ارائه شد و در ادامه ابزار ضروری جهت نصب روی خط لوله به منظور اجرای عملیات معرفی شدند. در نهایت با نشان دادن نمایی انواع نقص‌ها، کمترین ملزوماتی که خواننده جهت ادامه مطالعه این پایان‌نامه به آنها نیاز داشت در قالب این فصل بیان شد.

فصل سوم

روش‌های تشخیص نقص در خطوط لوله

۳-۱ مقدمه

جهت ارزیابی عملکرد درست خطوط لوله پیش‌بینی استحکام عیوب مربوطه بسیار ضروری است. طی سال‌های گذشته توسعه دستگاه‌های بازرسی هوشمند درون لوله باعث پیشرفت تشخیص عیوب و اندازه‌گیری حدود مکان‌های آسیب دیده در خط لوله شده است. بر اساس روش‌های موجود در آزمایش‌های غیر مخرب مانند آزمایش نشتی میدان مغناطیسی^۱ یا آزمایش امواج ماوراء صوت^۲ دستگاه‌های مدرن بازرسی قادر به محاسبه پارامترهای مهمی مثل MAOP^۳ گردیده‌اند.

حدود استفاده از دستگاه‌های هوشمند به تازگی مشخص شده است. این محدوده به نوع عیوب - مانند گودی، برآمدگی یا انواع خوردگی - وابسته است. پیشرفت دستگاه‌ها برای شناسایی مطمئن عیوب - ترک ناشی از خستگی، ترک ناشی از تنش^۴، عیوب جوش، شیار و غیره - به دلیل عدم دست‌یابی به نیازهای فنی بالا در زمینه نرم‌افزاری در گذشته میسر نبوده است.

در این فصل به بررسی روش‌های تشخیص عیوب خطوط لوله (از جمله انواع ترکها، خوردگی‌ها، نشتی‌ها و ...) می‌پردازیم. ابتدا روش‌های غیر هوشمند مثل روش حجمی یا مادون قرمز و... را توضیح می‌دهیم و در ادامه روش‌های به کار گرفته شده در توپک هوشمند (نشتی فلوی مغناطیسی، جریان گردابی، امواج ماوراء صوت) معرفی می‌شود. با توجه به اینکه به روش‌های نشتی فلوی مغناطیسی و جریان گردابی در فصل چهارم با تفصیل بررسی شده‌اند، در این بخش تنها روش استفاده از امواج ماوراء صوت به شکل جامع‌تری توضیح داده می‌شود.

۳-۲ روش‌های تشخیص نشتی

با توجه به اینکه هدف این فصل معرفی روش‌های تشخیص نقص است، این قسمت در حقیقت تعدادی از این روش‌ها را مرور می‌کنیم. لازم به ذکر است که چون به دلایل مختلف از جمله دقت کم، نداشتن قابلیت بررسی انواع مختلف عیوب مثل خوردگی، به صرفه نبودن اقتصادی، نداشتن کاربرد صنعتی به خصوص در صنعت نفت و حتی شناخته نشده بودن این روش‌ها مورد نظر ما نبوده است تنها به معرفی آنها بسنده کرده‌ایم تا خواننده کمی با دنیای عیب‌یابی آشنا شود و شاید با بهره‌گیری از یکی از این ایده‌ها راهی نو در فناوری‌های یافتن عیب در صنایع مختلف ابداع کند.

۳-۲-۱ تحلیل فشار یا جریان در یک خط لوله [14]

عملیات بازرسی داخل یک خط لوله توسط جریانی که از داخل خط لوله عبور می‌کند، یا تغییرات فشار در قسمتهای مختلف خط لوله مشخص می‌شود. اندازه فشار و یا جریان در طول خط لوله با مقاومتی که یک خط لوله در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهد رابطه دارد. نشتی روی فشار نرمال لوله و همچنین جریان در خط لوله تأثیر می‌گذارد.

اگر یک نشتی بزرگ مخصوصاً در نقاط پر فشار اتفاق بیفتد، فشار درونی کاهش می‌یابد. بنابراین فشار پایین‌تر از حد، علامت وجود نشتی است. سیستم شناسایی فشار معمولاً به یک سیستم خاموش کننده اتوماتیک

¹ MFL

² UT

⁴ SCC

متصل است. برای این که آلام‌های اشتباه به وجود نیاید معمولاً سیستم را به گونه‌ای تنظیم می‌کنند که تنها نشستی‌های بزرگ را بتواند شناسایی کند. کاهش در جریان نشستی که نتیجه این تغییرات است از فشار درون لوله محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده احتمال وقوع یک نشستی بزرگ است. سرعت تغییر فشار و یا جریان که خود نشانه‌ای از وجود نشستی است مونی‌تور شده و تغییرات ناگهانی آن مشاهده می‌شود.

در حقیقت ترکیبی از روش افزایش فشار و یا جریان در جایی که نشستی موجب تغییرات جریان و کاهش فشار می‌شود کار برد دارد.

۲-۲-۳ روش شناسایی فشار موج [14]

زمانی که نشستی اتفاق می‌افتد یک فشار ناگهانی در محلی که نشستی وجود دارد به همراه یک سری فشارهای سریع تولید شده که در میلی‌ثانیه‌های بعدی اتفاق می‌افتد ایجاد می‌شود. این فشارهای ناگهانی موجب به وجود آمدن یک موج فشار سوار بر امواج صوتی می‌شود که در اثر سرچشمه و انتهای نشستی است. دیواره‌های لوله به عنوان هدایت کننده موج عمل می‌کنند بنابراین موج می‌تواند در فواصل دور نیز منتقل شود و میرایی که در دامنه‌ی این موج ایجاد می‌شود زیاد نخواهد بود. موج فشار منفی توسط حس‌گرهای پیزوالکتریک زمانی شناسایی می‌شوند که به خروجی آنها نیرو وارد شود. حس‌گرها در فواصلی از طول خط لوله قرار دارند و زمانی که موج از آنها عبور کند تحریک می‌شوند و موقعیت نشستی با توجه به اختلاف زمانی بین شناسایی نزدیکترین حس‌گر و حس‌گر دیگر حساب می‌شود.

زمان پاسخ موج فشار منفی خیلی کوتاه است زیرا به امواجی پاسخ می‌دهد که با سرعت‌های صوت حرکت می‌کنند. این سیستم تنها برای نشستی‌های نه چندان کوچک استفاده می‌شود. بنابراین این سیستم‌ها حساسیت چندان بالایی ندارند زیرا معمولاً برای این که از آلام‌های اشتباهی که گاهی در نتیجه نویزهای محیطی مانند پمپ‌ها، کمپرسورها ایجاد می‌شود جلوگیری کنند آستانه اعلام آلام آنها بالا است. شناسایی نشستی بر پایه موج فشار منفی تنها برای شناسایی نشستی‌های بزرگ است. اگر موج فشار به صورت لحظه‌ای در اثر نشستی حاصل شود شناخته نمی‌شود و لذا نشستی مشخص نمی‌گردد.

۳-۲-۳ آزمایش حجمی با جبران سازی حرارتی [15]

یک آزمایش حجمی، تغییرات حجم سوخت را در طول خط لوله اندازه‌گیری می‌کند. آزمایش حجمی حجم سیالی که باید به خط لوله وارد یا خارج شود تا سطح فشار ثابت بماند را به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. برای این کار از دو روش استفاده می‌شود: اولین روش از یک پمپ برای اضافه کردن یا کم کردن سیال استفاده می‌کند. در روش دوم سیال بین لوله و یک سیلندر اندازه‌گیری - که در آن فشار ثابت با یک نمایش‌گر گازی نشان داده می‌شود - آزادانه حرکت می‌کند. این ابزار در هر نقطه خط لوله به آن وصل می‌شود و از آن می‌توان هم به صورت دائمی و هم به صورت موقت استفاده کرد. تست حجمی نرخ جریان نشستی را به صورت دبی حجمی مشخص و اندازه‌گیری می‌کند.

این روش‌ها در خطوطی که طولانی هستند و قطر آنها زیاد است روش‌های خوبی نیستند. البته در سال‌های اخیر روش‌هایی برای تست حجمی خطوط بزرگتر ابداع شده است. نتایج تست‌های حجمی از نتایج تست فشار دقیق‌تر است و احتیاج به تفسیر کردن ندارد. برای فهمیدن اینکه یک تست حجمی (یا تست فشار) به چه صورت کار می‌کند باید بفهمیم که فشار در طول خط چگونه تغییر می‌کند. هر دو تغییر ظاهری و واقعی حجم

در فشار تأثیر می‌گذارد. دو نوع تغییر حجم است که باعث تغییر فشار می‌شود. یک نوع آن در اثر افزایش یا کاهش فیزیکی سیال در داخل لوله است و نوع دیگر در اثر تغییر دما. اهمیت تحریک حرارتی که باعث تغییر حجم می‌شود وابسته است به حجم سیال داخل لوله، ضریب حرارتی انبساط سیال و میزان تغییرات دما. حجم سیالی که لازم است به خطوط لوله افزوده یا از آن کم شود برای رسیدن و یا نگه‌داشتن فشار در یک مقدار مشخص به تراکم این خصوصیات بستگی دارد:

۱. سوخت داخل خط

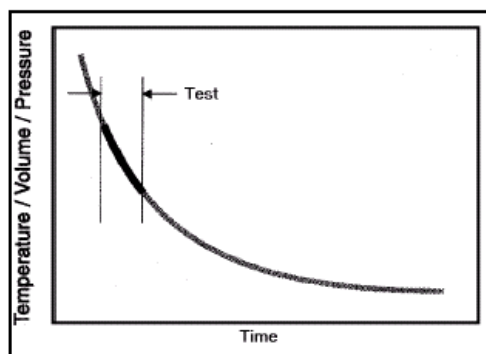
۲. حجم بخار مسدود شده داخل لوله

۳. سیستم لوله کشی

هر چه سیستم متراکم‌تر باشد حجم سیالی که لازم است اضافه یا کم شود تا فشار تغییر یابد بیشتر می‌شود. در نتیجه مثلاً در سیستمی که بخار مسدود شده دارد نسبت به سیستمی که بخار مسدود شده ندارد برای تغییر فشار نیاز به حجم بیشتری سیال است. خطوطی که از مواد قابل انعطاف (مانند فایبرگلاس) ساخته شده‌اند نیز نسبت به لوله‌هایی که از جنس سختی می‌باشند برای تغییر فشار نیاز به سیال بیشتری دارند.

در خطوط تحت فشار زمانی که سطح فشار به یک آستانه از پیش تعریف شده برسد، نشتی تشخیص داده می‌شود. برای آنکه نتیجه آزمایش درست باشد، لازم است که به اندازه کافی زیاد باشد تا حس‌گرها بتوانند آن را تشخیص دهند و همچنین کاهش فشار از منابع نویزی که ممکن است نشتی را تحت‌الشعاع قرار دهند یا اشتباهاً اعلام کنند بیشتر باشد. حتی اگر تغییرات دما در طول آزمایش ناچیز باشند باز هم این امکان وجود ندارد که آزمایش را قبل از فهمیدن رابطه بین فشار و حجم جریان تفسیر کنیم. متأسفانه در هر خط لوله و حتی در طول هر آزمایش به علت وجود بخار مسدود شده در لوله رابطه متفاوت است. این رابطه به وسیله یک مرحله درجه‌بندی ساده بدست می‌آید.

شکل ۱ یک نمونه واقعی از دمای سیال را بلافاصله پس از انتقال به خط زیرزمین نشان می‌دهد. (در نقطه‌ای شروع شده است که سیال داخل لوله ساکن است) سرعت تغییر دما که احتمالاً زیاد نیز هست غیر خطی است. این تغییر دما در اثر تفاوت دمای مایع داخل لوله و دمای لوله و یا محیط اطرافش بوجود می‌آید. بالاترین نرخ تغییر دما بلافاصله پس از انتقال به زیر زمین اتفاق می‌افتد.



شکل ۱-۳. نرخ تغییر دما در برابر تغییر سیال داخل لوله

سه روش پایه‌ای برای جبران‌سازی حرارتی وجود دارد:
صبر شود تا تغییرات حرارتی کم شود.

۱. از ترمیستور برای اندازه‌گیری تغییرات دما در خط استفاده شود. دمایی که باعث تغییر حجم می‌شود و روی اندازه‌گیری حجم تأثیر می‌گذارد به دست آید.

۲. دمایی که باعث تغییر حجم می‌شود مستقیماً به صورت یک بخش از آزمایش به دست آید.

دو تکنولوژی جدید برای شناسایی نشتی‌های کوچک در کنار جبران‌سازی حرارتی تکنولوژیهای HT-100 و LT-100 می‌باشد. در این روش‌ها جبران‌سازی بدون آزمایش قبلی یا اندازه‌گیری دمای خطوط انجام می‌شود. تست نشتیابی در ۲ ساعت قابل اتمام است، در حالی که دقت جبران‌سازی حرارتی نیز در طول هر آزمایش اندازه‌گیری می‌شود. این تکنولوژی بر مشکلات بزرگ عملیاتی و اجرایی که وابسته به سطح فشار و آزمایش حجمی است غلبه می‌یابد.

LT-100: یک سیستم نشتیابی خودکار است که از باتری برای انرژی‌رسانی به حس‌گرها و سیستم دستیابی به اطلاعات استفاده می‌کند. LT-100 عموماً در مکانهای دور یا جاهایی که انرژی الکتریکی در دسترس نیست یا جاهایی که مسائل امنیتی باعث استفاده نکردن از خروجیهای الکتریکی می‌شود مورد استفاده دارد. LT-100 یک سیستم ایمن مطابق با استاندارد ASTM با شیرها و وسایل ضد حریق است.

حس‌گر حجمی LT-100 از این بخش‌ها تشکیل شده است:

۱. یک سیلندر فشار به قطر ۱۶ اینچ

۲. یک سیلندر اندازه‌گیری به قطر ۱/۲-۲ اینچ

۳. روش‌های اندازه‌گیری تغییرات سطح در اندازه‌گیری تصویری سیلندر (با یک نمایش‌گر شیشه‌ای) و الکترونیکی (بوسیله یک حس‌گر فشار تفاضلی)

۴. سه شیر که باز و بسته می‌شوند تا یک قسمت را به کار بباندازند یا یک بخش را به خط لوله متصل یا از آن جدا کنند و فشار خود را تنظیم کنند.

بخش دسترسی به اطلاعات LT-100 یک پرونده ثابت از همه آزمایشهای انجام‌شده را می‌سازد.

HT-100: برای آزمایش خطوط طولانی با قطر زیاد و زیرزمینی استفاده می‌شود. HT-100 سیستمی کاملاً اتوماتیک و کنترل‌شده با رایانه است. HT-100 از دو مخزن ذخیره، دو حس‌گر فشار تفاضلی (یکی برای هر مخزن) و یک سیستم کنترل فشار تشکیل شده از پمپ، شیرهای تنظیم‌کننده فشار، نمایش‌گر فشار، شیرهای سلونوئید و بخش کنترل الکترونیکی و رایانه‌ای تشکیل شده است. مخزن ذخیره فشار برای تغییر یا نگهداری فشار روی یک مقدار ثابت در طول تست نشتیابی استفاده می‌شود. HT-100 با یک شیر به خط لوله متصل می‌شود. وقتی شیر باز شود، اجازه تغییر سوخت بین یکی از مخازن (سیلندر اندازه‌گیری) و خط را می‌دهد. حس‌گر تفاضلی حجم سوختی را که باید از سیلندر اندازه‌گیری اضافه یا کم شود تا فشار در یک مقدار ثابت باقی بماند را اندازه می‌گیرد. مخزن دیگر سوخت اضافی را که برای رسیدن به دو فشار مشخص بکار می‌رود را اندازه می‌گیرد. فشار بوسیله سیستم کنترل فشار در خط افزایش، کاهش یا ثابت می‌ماند.

آزمایش نشتیابی با سیال موجود در خط انجام می‌شود. خط لوله اول از تانک‌ها و خطوط دیگری که به آن وابسته است ایزوله می‌شود. در طول آزمایش LT-100 یا HT-100 سوخت داخل لوله را در دو فشار متفاوت که هر کدام در طول اندازه‌گیری ثابت نگه داشته شده‌اند اندازه‌گیری می‌کنند.

تکنولوژی Vista از مجموعه اطلاعات و آنالیز الگوریتم برای جبران‌سازی تغییرات حرارتی محصولات استفاده می‌کند. سیستمی که بر این مبنا کار می‌کند تغییرات حجم را در خطوط لوله در دو نقطه با مقدار ثابت

اندازه‌گیری می‌کند. این مسئله بر اساس این واقعیت است که تغییرات میزان نشتی به فشار داخل لوله وابسته است ولی تغییرات حجمی در اثر حرارت به فشار داخلی لوله بستگی ندارد.

عموماً دو فشاری که برای اندازه‌گیری فشار انتخاب می‌شوند دارای فشار نرمال و عموماً فشار اتمسفر است. اگر چه هر فشاری می‌تواند باشد. ترتیب انتخاب دو فشار اهمیت ندارد. روش‌هایی برای آنالیز داده‌های حجمی به منظور رسیدن به نتایج آزمایش و یافتن خطاهای آزمایش موجود می‌باشد. یکی از این روشها استفاده از پاسخ فرکانسی و به کار بردن سری فوریه است. یک روش در شکل ۲ نشان داده شده است. روش بدین صورت است که آزمایش ۲ ساعته را به سه بخش مساوی تقسیم کنیم به طوری که یک بخش از آزمایش دارای فشار متفاوتی از دو بخش دیگر باشد. تغییرات حجم مایع در خط در طول هر قسمت اندازه‌گیری می‌شود.

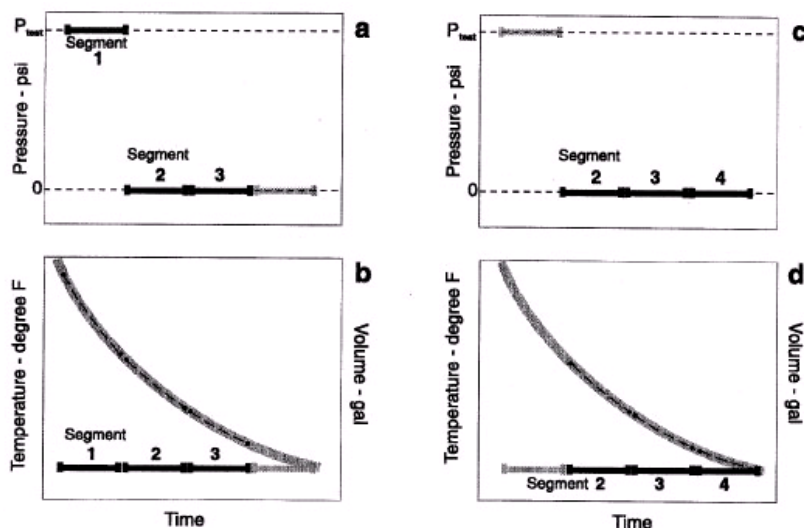
نقاط "a" و "b" نشان‌دهنده این هستند که نتایج چگونه بدست آمده است. نقاط "c" و "d" نشان‌دهنده این هستند که خطاها چگونه شناسایی می‌شوند. نقاط "a" و "c" نمایشگر فشاری است که اندازه‌گیریهای حجمی در آن انجام شده در حالیکه "b" و "d" نمایش‌دهنده تغییرات حجمی است که در اثر حرارت ایجاد شده است. نتیجه آزمایش "TR" که برابر نرخ نشتی است، در صورت وجود، با محاسبه میانگین داده‌ها در طول سه بخش اول آزمایش در شکل ۲ بدست می‌آید:

در حالیکه V_i حجم در طول هر قسمت در زمان "t" است (i شماره هر قسمت را نشان می‌دهد). نتیجه تخمینی غیر صفر آزمایش معنی این را نمی‌دهد که لوله ما سالم نیست. به عنوان مثال ممکن است نرخ جریان مخالف صفری بدست آید که در نتیجه باقیمانده تأثیرات حرارتی بعد از جبران‌سازی بوجود آمده باشد.

$$TR = [(V1+V3)*0.5 - V2] / t$$

اگر فشار در طول سه قسمت مقدار برابری داشته باشد، آنگاه تخمینی از اشتباه در جبران‌سازی حرارتی ممکن است ایجاد شده باشد که خطای آزمایش می‌باشد. خطای آزمایش "TE" با محاسبه میانگین داده از سه بخش آخر شکل ۲ تخمین زده می‌شود:

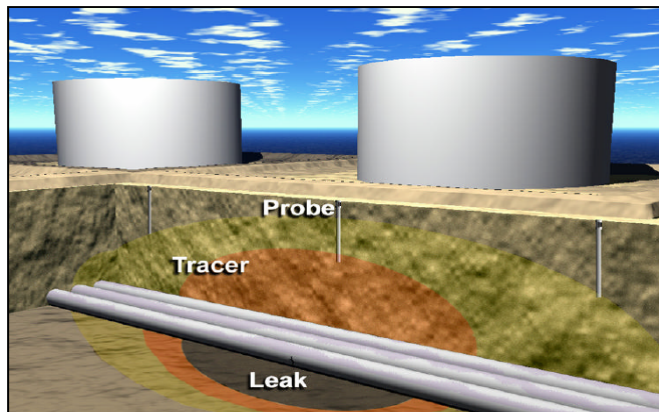
$$TE = [(V2+V4)*0.5 - V3] / t$$



شکل ۲-۳. روش تست حجمی

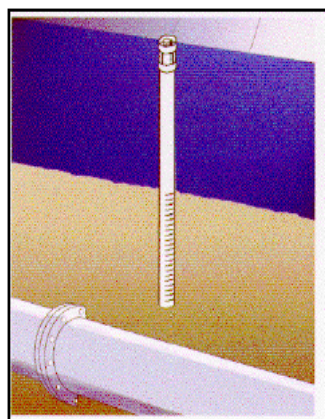
۴-۲-۳ ردیاب‌ها [15]

استفاده از ردیاب در نشت‌یابی یعنی وارد کردن یک ماده ترکیبی ردیاب داخل سیستم و بررسی اینکه اگر ماده خارج از سیستم یافته شود پس نشتی در سیستم هست. نشت‌یاب‌های ردیاب در هر شکلی از خطوط قابل استفاده هستند. این روش به مسائلی مانند جنس لوله، ابعاد، فشار یا روکش کردن خطوط بستگی ندارد.



شکل ۳-۳. پراکنده شدن ردیاب در اطراف محل نشت

یک سری پروب میان تهی، عموماً به مرکزهای ۲۰ فوتی، داخل خاک بالای لوله قرار می‌گیرد و پس از مدتی پروبها تخلیه می‌شود. (شکل ۴) سپس نمونه خاک در حضور ردیاب آنالیز می‌شود. نمونه‌ها در محیط‌هایی که خاک، آسفالت یا پوشش بتونی باشد بدست می‌آید. آنالیزهای با سطح شناسایی حساس حتی در قسمت‌های پایین نشتی‌هایی به کوچکی ۰/۰۵ گالن در ساعت را شناسایی می‌کند. مؤثرترین تست‌های ردیابی در خاک‌های رس یا شنی و عموماً نواحی که خاک اشباع نشده در بالای خطوط لوله است انجام می‌شود تا ردیاب بتواند به خوبی در اطراف محل نشتی پراکنده شود. وقتی خطوط لوله زیر آب هستند محدودیت‌های دیگری پیش می‌آید. اگر غلظت محصولی که در خطوط لوله جریان دارد از آب کمتر باشد، مایع داخل لوله از سطح آب بالاتر می‌رود و ردیاب در نقطه غیر اشباعی قرار می‌گیرد. ولی اگر مایع داخل لوله سنگین‌تر از آب باشد مکانیزمی وجود ندارد که ردیاب را در نقطه غیر اشباع قرار دهد در نتیجه خط لوله خوب تست نمی‌شود.

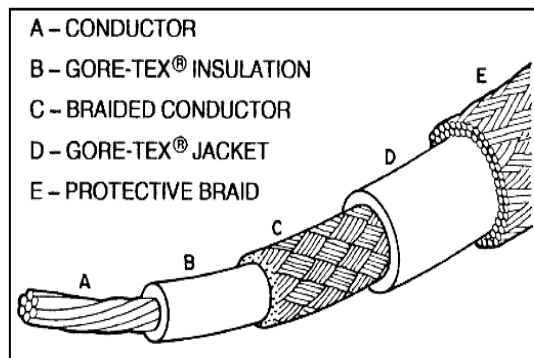


شکل ۴-۳. قرار دادن پروب ردیاب

ردیابها برای تستهای سالانه، ماهانه یا مونیتورینگ پیوسته خودکار استفاده می‌شوند. وقتی که نشستی اتفاق می‌افتد، بخارهای ردیاب به سمت خاکی که لوله سیستم جمع‌آوری بخار در آن قرار دارد می‌رود. سیستم حضور ردیاب را تشخیص می‌دهد و آلام می‌دهد. این آلام معمولاً تصویری، صوتی یا به شکل متناوب است. ردیابها برای مکان‌یابی نشستی‌ها نیز مفید هستند. به این صورت که وقتی نشستی مشخص می‌شود، بیشتر نمونه‌ها در "صفر" محل نشستی جمع‌آوری می‌شوند. مکان‌یابی سریع نشستی با روش ردیابی در خطوطی که احتمال نشستی آن می‌رود اجراء می‌شود. تست سریع نیازمند این است که لوله‌ها از سوخت خالی شوند و سپس با هوا و ماده ردیاب تحت فشار قرار گیرند. یک زمان کم، عموماً ۱۲ ساعت یا کمتر، برای ماده ردیاب کافی است تا نشستی را به سطح خاک برساند. پس از آن نمونه‌ها جمع‌آوری می‌شوند. نمونه‌ها عموماً در ایستگاه آنالیز می‌شوند تا در آنجا اختلاف نمونه‌ها با نتایج زمان واقعی مطابقت داده شود.

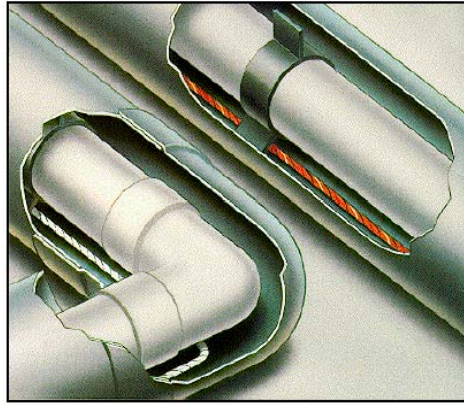
۳-۲-۵ کابل دو لایه حساس [15]

کابل‌های دو لایه حساس از موادی ساخته شده‌اند که وقتی با یک سری سیالات خاصی برخورد داشتند خاصیت الکتریکی آنها تغییر می‌کند. کابل‌های مختلف انواع سوختها، حلالها و ترکیبات شیمیایی را شناسایی می‌کنند. عموماً کابل‌ها از سیم هادی سیگنال، یک سیم هادی مونیتورینگ پیوسته، و حس‌گرهای نیمه‌هادی پوشش‌دار که با نوار فلئوروپلیمر پوشیده شده است تشکیل شده‌اند. (شکل ۵)



شکل ۳-۵. جزئیات کابل دو لایه حساس

لایه هادی پلیمری وقتی در برابر حلالهای هیدروکربنی و سوختها قرار می‌گیرد برآمده می‌شود. نوار بیرونی از برآمدگی جلوگیری می‌کند. وقتی حلال یا سوخت با کابل برخورد می‌کنند پلیمر هادی به سمت داخل برآمده می‌شود و با دو سیم حس‌گر ارتباط الکتریکی برقرار می‌کند. کابل باید در قسمتی جایگزین شود که در تماس با سوخت یا حلال باشد. کابلها همچنین باید سخت و قابل انعطاف باشند تا به راحتی به داخل لوله‌ها وارد شوند (شکل ۶). لایه پلیمری هادی باید پیوسته باشد و شبیه سد آبی عمل کند تا حس‌گرها را از آلام‌های اشتباهی محافظت کند.

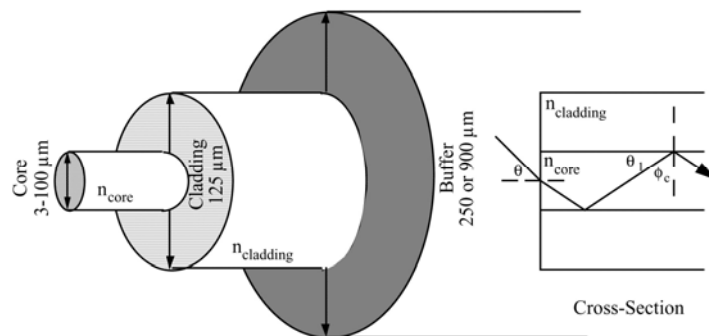


شکل ۳-۶. کابل دو لایه حساس

۶-۲-۳ فیبرهای نوری [16]

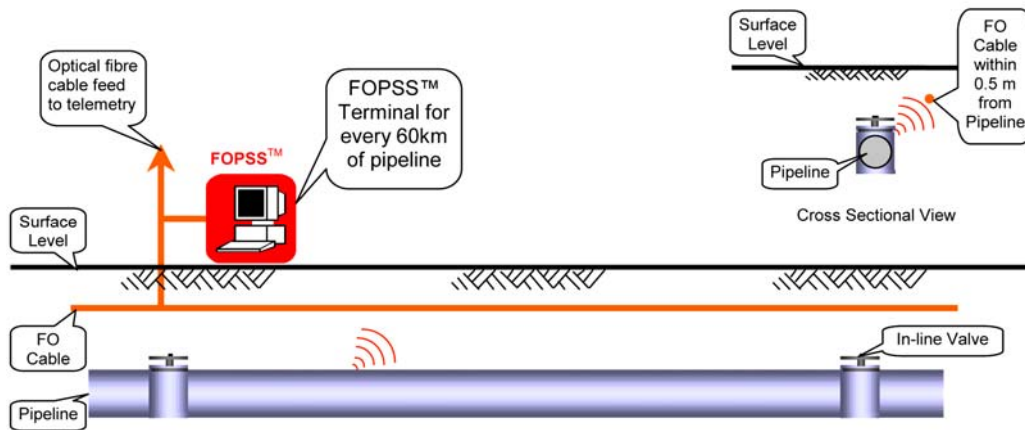
واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی که در برابر انتقال نور از فیبر نوری اغتشاش ایجاد می‌کنند می‌توانند به عنوان مکانیسم‌هایی در برابر نشت‌یابی مورد استفاده قرار گیرند. تکنولوژی‌هایی که بر پایه امکانات حس‌گرهای شیمیایی فیبر نوری هستند با مونیتورینگ گسترش یافته‌اند.

فیبرهای نوری از شیشه یا پلاستیک و پوششی از پلیمرها یا سیلیکن تزریق شده ساخته شده‌اند. بیشتر فیبرهای نوری نشت‌یاب از پوشش فعال در قسمتهای کوچک یا بزرگ فیبر استفاده می‌کنند که با یک آلودگی مشخص وارد واکنش فیزیکی یا شیمیایی می‌شوند. حضور این آلودگیها، باعث بروز یک تغییر در اجزاء شکست‌دهنده نور پوشش می‌شود به گونه‌ای که توان نور را در رشته نوری کم می‌کند و در نتیجه آن شدت سیگنال نوری منتشر شونده در فیبر کم می‌شود. استفاده از این خاصیت می‌تواند راهی برای آشکارسازی آلودگیها باشد.



شکل ۳-۷. برش عرضی از یک فیبر نوری معمولی

دو نوع حس‌گر فیبر نوری وجود دارد: داخلی و خارجی. فیبر داخلی خودش مانند حس‌گر عمل می‌کند. این حس‌گر می‌تواند با اصلاح شیمیایی شیشه هسته یا جایگزینی پوشش با مواد خاص عمل کند. این مواد خاص می‌توانند برای اندازه‌گیری دما، فشار، یا قدرت میدان الکتریکی و مغناطیسی مورد استفاده قرار گیرند. فیبر نوری خارجی برای انتقال نور بین ابزار اندازه‌گیری و مبدل‌های خارجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حس‌گرها به صورت مستقیم در امتداد رشته و یا در یک کپسول با پوسته پلیمری قرار می‌گیرند.

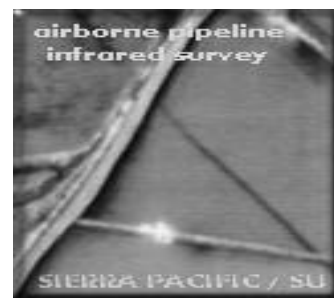


شکل ۳-۸. سیستم حفاظت از خط لوله به وسیله فیبر نوری - نشت یابی

حس گرهای فیبر نوری با پایداری سیستم پوشش فعال خود مشکل دارند. سیستم های فیبر نوری که امروزه در بازار وجود دارد هزینه سنگینی برای اجراء دارند. سیستم هایی که بر پایه رشته های بلند فیبر راکتیو هستند باید از تکنیک انعکاس سنج نوری محدوده زمان (OTDR) (قیمتت بستگی به حساسیتش دارد) استفاده کند. یک سری سیستم هایی که بر پایه فیبرهای راکتیوهای شیمیایی ساخته شده اند با قیمت قابل قبول در دسترس است. (با توجه به اینکه این امکان وجود دارد که نشتی هایی را تشخیص ندهد).

۳-۲-۷ روش شناسایی نشتی با اشعه مادون قرمز [17]

موارد مصرف تصویر بردارهای گرماسنجی مادون قرمز: (۱) خطوط لوله زیرزمینی، (۲) خطوط لوله نصب شده روی زمین
تصویر بردارهای مادون قرمز حرارتی تشخیص دهنده های با کیفیت بالا هستند و ترکیب لنزهای آنها به گونه ای است که یک نمایش ویژه از انرژی مادون قرمز خارج شده از تمام اشیایی که دمای بالای صفر درجه کلون دارند را تولید می کنند.



شکل ۳-۹. نمایی از شکل های ثبت شده توسط تصویر بردارهای مادون قرمز

تصویر بردار حرارتی^۱ توانایی آن را دارد که تصویرهای فوق العاده واضحی از موقعیت هایی که با چشم دیده نمی شود به وجود آورد. به همین علت از این روش برای بازرسی خطوط لوله زیر زمین یا روی زمین استفاده می کنند.

بازدیدها و کیفیت شناسایی دو نوع است:

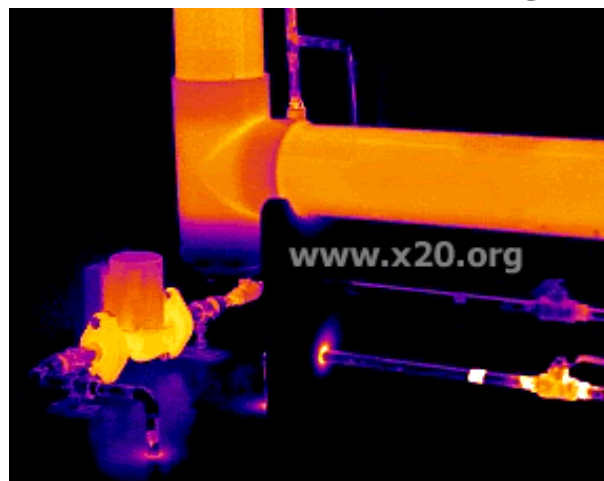
^۱ THERMO GRAPHY

بازدید سطح پایین^۱ در اطراف خطوط لوله‌ای است که در بیرون شهرها هستند. با انجام این بازدید تصاویر باکیفیت بالا^۲ حاصل می‌شود و اطلاعات ارزشمندی در رابطه با نشتی و مکان آن و اینکه تا چه حد جدی هست تولید می‌کند و موقعیت خط لوله را مشخص می‌کند.

۱. بازدید سطح بالاتر در خطوط لوله زیرزمینی در مکان‌های پر ازدحام، جاهایی که

می‌دانند خطوط لوله وجود دارد ولی مکان دقیق آن مشخص نیست، استفاده می‌شود.

تشخیص خط لوله به خاطر ترکیب زمین و نحوه پوشش آن اتلاف زمانی دارد. تصاویر های با دقت بالا قدرت فوق‌العاده و تکنیک بالایی برای مشخص کردن عیوب خط لوله ایجاد می‌کند. همچنین تاثیرات محیطی از قبیل ترشح در محیط آبی را نیز مشخص می‌کند.



شکل ۳-۱۰. تصویربرداری حرارتی از لوله‌های زیر زمین

چگونه تصویر بردارهای مادون قرمز حرارتی کار می‌کنند؟

تصویر بردار حرارتی نمی‌تواند بین دیوارها را ببیند با وجود این ما اطلاعات زیادی را در رابطه با آن چه در طرف دیگر دیوار اتفاق می‌افتد جمع آوری می‌کنیم. انرژی گرمایی که از داخل ساختمان خارج می‌شود خود منشاء اطلاعات است. در نتیجه اشیاء به صورت نقاط روشن دیده می‌شوند، حتی نقاط کوچک خرابی نیز به صورت طول موج‌هایی از نور دیده می‌شوند.



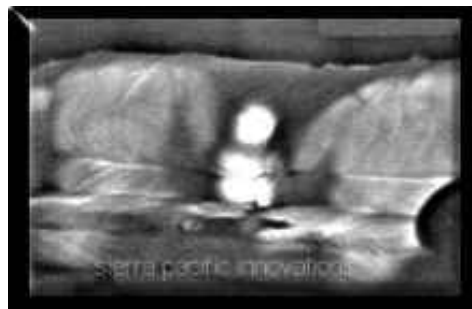
شکل ۳-۱۱. طیف اشعه مادون قرمز

انرژی گرمایی به صورت اشعه مادون قرمز منتقل می‌شود (از ۱ میکرون تا ۱۰۰ میکرون) در یک تصویر انرژی گرمایی رابطه نزدیکی با نور مرئی دارد که به صورت موج منتقل می‌شود. تصویر بردار حرارتی انرژی را توسط طول موج های مادون قرمز به همراه اطلاعات منتقل می‌کند تا به صورت تصاویر نوری بتوان آن را

^۱ LOW SERVEY
^۲ HIGH RESOLUTION

مشاهده کرد. نور مری به منبع نور (خورشید یا منبع مصنوعی) وابسته است. این نور به جسم می‌خورد و برمی‌گردد و در نتیجه انعکاس جسم دیده می‌شود.

هر جسمی که بالای صفر درجه کلون دما داشته باشد انرژی گرمایی از خود ساطع می‌کند. بنابراین تصویر بردارهای مادون قرمز می‌توانند همه اشیایی را که محدود به فرکانس های امواج نور باشند مشخص کنند. این مسأله باعث می‌شود تصویر بردار حرارتی توسط مادون قرمز در طیف وسیع تری از محیط اطراف نسبت به تکنولوژی های دیگر مورد بررسی قرار گیرد.



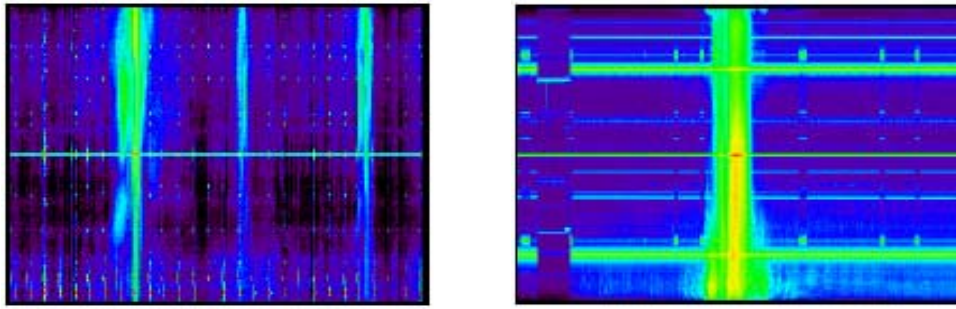
شکل ۳-۱۲. تصویر برداری حرارتی توسط مادون قرمز و باقی ماندن اثر آن پس از چند دقیقه

به طور مثال در شکل ۱۲ از دو انسان و یک بچه ما بین آنها که روی مبل نشسته‌اند تصویر گرفته شده است. تصویر سمت چپی، بعد از گذشت یک دقیقه از رفتن آنها را نشان می‌دهد که هنوز از جای آنها پس از برخاستن انرژی ساطع می‌شود. بنابراین تکنولوژی نور می‌تواند اطلاعات مفیدی را ذخیره کند. این خاصیت کاربردهای مختلفی - مانند نشت یابی - دارد.

۳-۲-۸ نشت یاب صوتی^۱ [18]

خطوط لوله ای که زیر دریا قرار دارند در اثر مدفون و یا پوشیده شدن با موادی که از فرآیند های طبیعی حاصل می‌شود دچار نشتی می‌شوند. این به معنای ضرر اقتصادی و خطری زیست محیطی برای موجودات است. نشت یاب صوتی سال ۱۹۹۸ طراحی و ساخته شد و اواخر همان سال با موفقیت در دریای زرد (PINGHU) آزمایش شد. سایر روشهای تشخیص نشتی برای مکان یابی و شناسایی نشتی تلاش بسیار کردند ولی همگی به علت شرایط سخت محیطی و میدان دید صفر و جریان بالای ۶ گره دریایی با شکست مواجه شدند. در این آزمایش با استفاده از سیستم ALD پس از گذشت چند ساعت مکان نشتی مشخص شد. شکل ۱۳-الف صوتی که یکی از نشتی‌ها در زمان حقیقی ایجاد کرده است را نشان می‌دهد. شکل ۱۳-ب تصویر صوتی که توسط ALD در حالتی که ROV سه بار از موقعیت نشتی عبور کرده است را نشان می‌دهد. این روش به توپک‌رانی وابسته نیست و تلاشی است برای مونتور کردن شرایط خطوط لوله بدون استفاده از توپک. سیستم تشخیص نشتی توانایی شناسایی نشتی های کوچک در حد ۰/۱۵ بار در هر ساعت در فشار ۱۷۰ بار را داشت.

^۱ Acoustic Leak Detector (ALD)

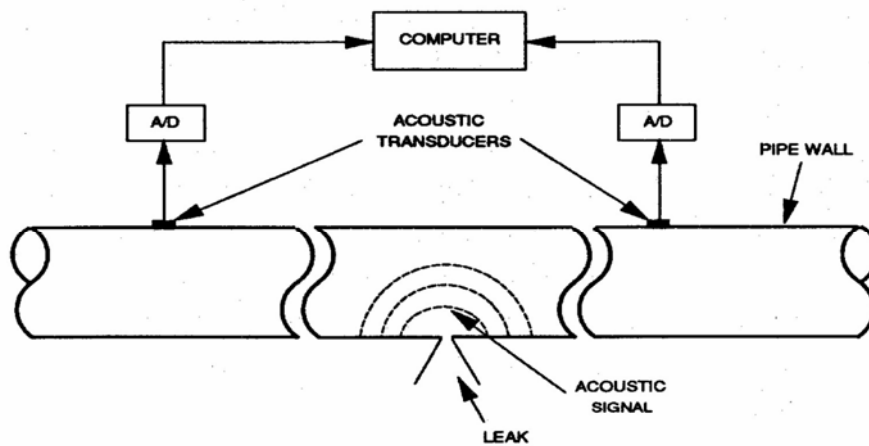


(ب)

(الف)

شکل ۳-۱۳. تصویربرداری صوتی توسط ALD

نشستی خط لوله در اثر انتقال مایع از فشار داخلی به سمت فشار کمتر به وجود می‌آید. کاهش فشار به صورت یک سیگنال صوتی قابل تشخیص است. پس اغتشاش و انبساط ناگهانی حجم مایع باعث به وجود آمدن سیگنالهای صوتی می‌شود. با بزرگ شدن اندازه نشستی دامنه سیگنال صوتی افزایش می‌یابد. ALD قادر است که سیگنال نشستی را از نویز محدود تشخیص دهد.



شکل ۳-۱۴. نشت یاب فرستنده صوتی

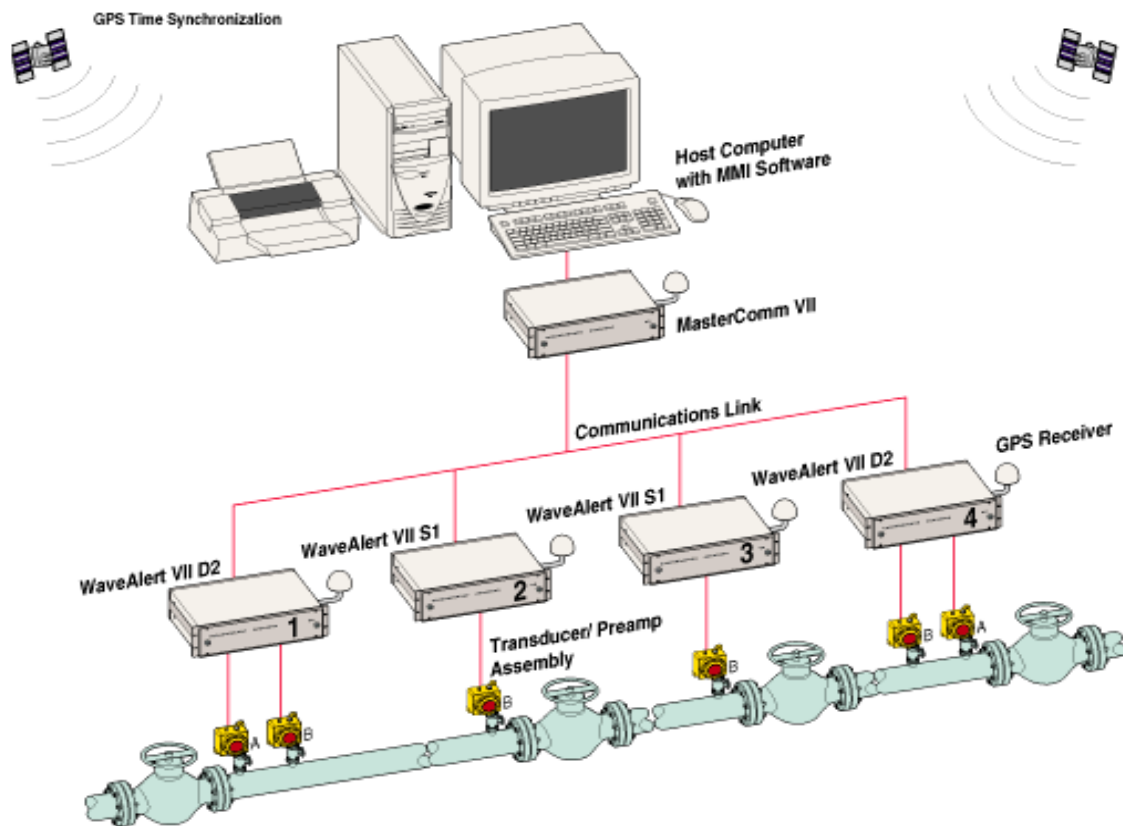
حس گر زیر آب اطلاعات صوتی را در طول خط به دست می‌آورد. اطلاعات با یک کابل همزمان به رایانه منتقل می‌شود تا در آنجا نمایش داده شود و روی آن تجزیه و تحلیل صورت گیرد و ذخیره شود. یک نرم‌افزار نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل روی سیگنالها را نمایش می‌دهد به طوری که بتوان تغییرات سیگنالها و ارتباطشان با حضور نشستی در زمان واقعی را بررسی کرد.

با توجه به کاربرد و نوع عملیات، حمل‌کننده حس گر متفاوت است. ممکن است با لوله کوچکی که روی ROV وصل است حرکت کند یا با یک شناگر در حال بازرسی فلنج.

دلایل استفاده از ALD: [19]

- ۱- سیستم بر اساس تشخیص و پردازش سیگنالهای صوتی کار می‌کند، در نتیجه بر خلاف سیستم‌های نوری از جریان یا کمی میدان دید یا گل و لای مدفون داخل آب آسیب نمی‌بیند. ALD نشستی‌هایی که قبلاً دوربین‌های ویدیویی یا ردیابهای رنگی تشخیص نمی‌دادند را می‌یابد.

- ۲- برخلاف توپکهای صوتی پردازش اطلاعات در زمان واقعی انجام می‌شود. (بدون خارج کردن دستگاه از لوله یا ایجاد وقفه در جریان سوخت داخل لوله)
 - ۳- کل ساختار از طریق تعداد معدودی مکان مونیتر می‌شود.
 - ۴- با وجود اخطارها ادامه مونیترینگ امکان دارد.
 - ۵- نیاز نیست که خط لوله را خالی کرده و با رنگ یا دیگر مواد رنگی پر کنیم.
 - ۶- مکان یابی نشتی در حدود ± 500 فوت. اگر انرژی کافی آزاد شود تغییرات میکروسکوپی هم قابل تشخیص است.
 - ۷- قادر به تفکیک عیوب داخلی، خارجی و بین دیواره است.
 - ۸- سیستم به گونه‌ای ارتقاء یافته که بتواند نشتی خطوطی که حدود ۲ تا ۳ متر زیر گل و لای مدفون شده‌اند را هم تشخیص دهد.
 - ۹- پردازش سیگنال ALD حتی در شرایط بسیار بد و محدود صوتی نشتی را تشخیص می‌دهد. نویزهایی که مونیتر می‌شود ممکن است به علت اصطکاک، وجود ترک، اغتشاش (همراه با نشتی) و یا تغییرات فلز مانند خوردگی باشد.
- از جمله معایب این سیستم دقت محدود است و دیگر اینکه روشی جامع برای بازرسی نیست و فاقد کاربرد در مقیاسهای بزرگ است.



شکل ۳-۱۵. نمایی از سیستم ارتباطی نشت یاب صوتی

۳-۲-۹ توپک نشت یاب صوتی [20]

همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد هر نوع نشتی نويز صوتی تولید می‌کند که با حس‌گر قابل تشخیص است. دامنه سیگنال صوتی حین دور شدن از منبع عموماً به اندازه‌ای هست که بتوان محل نشتی را از مکان‌های دور هم تشخیص داد. تکنولوژی توپک به منظور دقت بیشتر این امکان را فراهم کرده که به جای اینکه حس‌گرها ثابت باشند و سیگنال صوتی در حرکت باشد حس‌گرها را در طول خط لوله به حرکت درآوریم تا از نزدیکترین فاصله نشتی سیگنال صوتی را دریافت کند.

دستگاه متحرک خودکار برای اینکه حداقل نويز اضافی را ایجاد کند باید منبع انرژی، حس‌گر، گیرنده اطلاعات و بخش ذخیره‌سازی داشته باشد. این نوع توپک می‌تواند نشتی‌هایی به کوچکی ۵ یا ۱۰ l/h-r را با توجه به فشار حین کار و نوع مایع منتقل شده در خط تشخیص دهد. با طراحی ویژه‌ای که انجام شده است چشمه‌های اصلی نويز (نشتی‌ها) از نويزهای اتفاقی و اغتشاشات دیگر قابل تفکیک است و همچنین با تخمین بسیار خوبی موقعیت نشتی مشخص می‌شود.

معایب: [21]

- چون با باتری کار می‌کند زمان محدودی دارد.
- امواج صوتی در همه جهت پخش می‌شود در نتیجه دقت مکان‌یابی‌اش ضعیف است.
- به مایعی داخل لوله نیاز دارد در نتیجه در لوله‌های خشک مانند لوله‌های گاز غیرقابل استفاده است.
- در خطوط زمینی استفاده نمی‌شود.
- اندازه فیزیکی بزرگی دارد.
- به علت لرزش/ شوک برای محیط خطرناک است.
- در یک فرکانس مشخص کار می‌کند.

۳-۲-۱۰ مواد رادیواکتیو [21]

مواد رادیواکتیو در محفظه‌ای کپسول مانند درون توپک قرار می‌گیرد. این روش به دلایل زیر پیشنهاد نمی‌شود:

- برای سلامتی خطرناک است.
- امکان دارد خطوط لوله را آلوده کند.
- نیاز به سطح بالایی از مواد رادیواکتیو دارد تا مؤثر باشد.
- قادر به مونیتورینگ از راه دور نیست.
- در بسیاری از کشورهای جهان پذیرفته شده نیست.

۳-۲-۱۱ مبدل صوتی الکترومغناطیسی (EMAT) ^۱ [20]

استفاده از EMAT در ILI هنوز در مرحله توسعه یافتن است. EMAT از یک سیم‌پیچ داخل میدان مغناطیسی در سطح داخلی دیواره لوله تشکیل شده است. جریان متناوب داخل سیم‌پیچ به دلیل نیروی لورنتز (که نیروی

^۱ Electromagnetic Acoustic Transducer

بارهای در حال حرکت در میدان مغناطیسی هستند) جریانی در دیواره لوله القاء می‌کند که باعث تولید امواج ماوراءصوت می‌شود. شکل مبدل به کار رفته، نوع امواج ماوراء صوت تولید شده و خصوصیات انتشار آن در طول دیواره خط لوله را تعیین می‌کند. این روش به دلیل اتصال خشک برای استفاده در خطوط گاز مناسب است. بازرسی خطوط لوله با EMAT مزایایی نسبت به UT دارد که به کولپینگ مایع مربوط است.

انواع نقصهایی که تشخیص می‌دهد:

- کاهش داخلی/خارجی فلز
- شیار طولی
- تاول/ناخالصی
- تغییر شکل
- خوردگی لایه لایه (Sloping & hydrogen induced)
- ترک
- ویژگیهای جوشکاری
- ضخامتهای مختلف دیواره
- مفید برای شیرها، کمرگاهها، زانوها و فلنچها

ایراداتی که به روش EMAT وارد است این موارد است: (۱) EMAT باید در فاصله ۱ میلی‌متری از قطعه مورد آزمایش قرار گیرد. (۲) انرژی ماوراءصوت فرستاده شده پایین است. به همین علت، طیف دینامیکی مشخص شده (در بسیاری از حالتها) نویز الکترونیکی است. (۳) فرکانس‌های بالا قابل دستیابی نیستند.

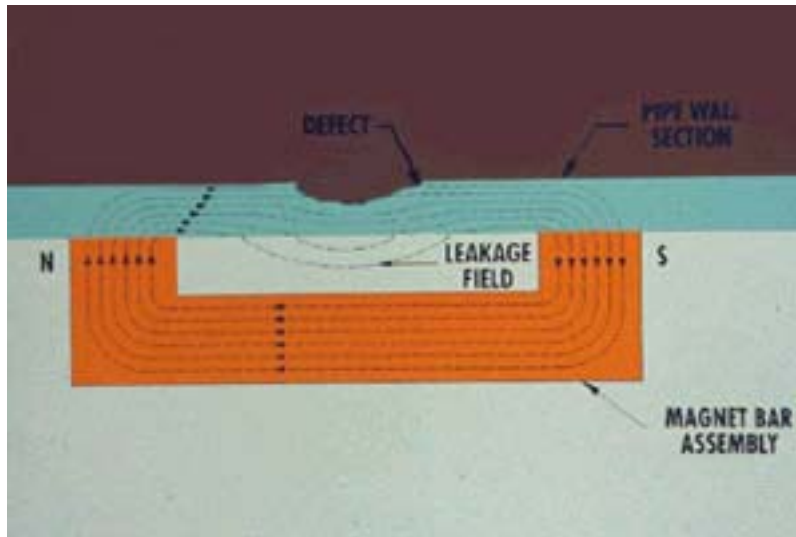
تا به اینجا در مورد روش‌هایی صحبت کردیم که به دلایل مختلف قصد پرداختن به آنها را نداشتیم. مثلاً روش‌هایی مثل تحلیل فشار یا شناسایی فشار موج و یا کابل دو لایه حساس و ... تنها اختصاص به نشت یابی داشتند و به هیچ وجه برای ترک یابی یا تشخیص خوردگی کاربرد ندارند. از طرفی برخی از آنها مثل ردیابها در مقیاس‌های بزرگی مثل خطوط لوله نفت کاربرد ندارند و به صرفه نمی‌باشند. بعضی از این روش‌ها نیز مانند روش EMAT هنوز در مرحله تحقیقاتی است و بهره برداری از آن به عمل نیامده است. از این رو به روش‌هایی که در ادامه می‌آید می‌پردازیم. روش‌های MFL,ET,UT روش‌هایی صنعتی هستند که سالهاست در خطوط لوله نفت کاربرد دارند و نتایجی قابل قبول و با دقتی بسیار خوب ارائه داده‌اند.

۳-۲-۱۲ نشتی فلوی مغناطیسی (MFL) ^۱[20]

تکنولوژی MFL (نشتی فلوی مغناطیسی) مرسوم‌ترین تکنولوژی برای بازرسی داخل خطوط لوله (ILI) است. برای تشخیص محل عیوب خطوط لوله توسط روش MFL ابتدا لوله را بامغناطیس‌های بزرگ در حد اشباع مغناطیسی می‌کنند و سپس تغییرات محلی میدان ایجاد شده را بررسی می‌کنند. از مزیت‌های MFL، انجام بررسی دقیق روی اطلاعات دریافتی و قابل انتخاب بودن سطح حساسیت دستگاه است. حساسیت دستگاه در این سطوح است: (۱) ابزار استاندارد یا ابزار با دقت کم (LOW RES). (۲) ابزار با دقت

¹ Magnetic Flux Leakage

بالا (High-Res). (۳) "جدیدترین نسل" که به XHR معروف است. این نوع سیستم از تعداد بسیار زیادی حس گر تشکیل شده است.



شکل ۳-۱۶. تشکیل میدان مغناطیسی و تشخیص عیب

نوع نقص‌هایی که تشخیص می‌دهد:

پاسخ MFL به نقص‌های خط لوله بستگی دارد به :

- خصوصیات مغناطیسی فلز خط لوله. کاهش فلز، مثل آهنی که از بین رفته باشد یا خوردگی‌هایی که فلز را به اکسید آهن غیر مغناطیسی تبدیل می‌کنند قابل تشخیص هستند زیرا توانایی محلی لوله را برای در برداشتن فلوی مغناطیسی کاهش می‌دهد.
- نقص‌های هندسی. خرابی‌های مکانیکی قابل تشخیص است زیرا خصوصیات مغناطیسی فلز تغییر می‌کند.

مقایسه حس گر و ثبات اطلاعات:

سطوح مختلف تکنولوژی بین سطوح با دقت بالا و استاندارد وجود دارد. دستگاه‌های با دقت بالا از حس گرهای "اثر هال" استفاده می‌کنند. حس گرهای اثر هال نشتی فلوی خطی را اندازه‌گیری می‌کنند. دستگاه‌های جدید از حس گرهای با سیم‌پیچ تحریک استفاده می‌کنند. حس گرهای با سیم‌پیچ مقدار غیر خطی فلوی مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند.

در دستگاه‌های با دقت بالا و با دقت خیلی بالا اطلاعات به صورت دیجیتال ذخیره می‌شود در حالی که در دستگاه‌های با دقت پایین یا استاندارد اطلاعات به صورت آنالوگ و به فرم نوار مغناطیسی ذخیره می‌شود. مزیت ذخیره کردن دیجیتال آسان ذخیره شدن حجم زیادی از اطلاعات است. یکی دیگر از مزیت‌ها این است که این روش نسبت به اثرات لرزشی و شوک‌هایی که در حین عبور از داخل خط لوله ایجاد می‌شود حساسیت زیادی ندارد.

قابلیت‌های تشخیص: بیشترین تفاوت بین دستگاه‌های با دقت بالا و دقت پایین تفاوت در تفکیک‌پذیری و دقت اطلاعات ذخیره شده است. دستگاه‌های استاندارد حس گرهای بزرگتر و کمتری دارند که تشخیص نقص را

به خصوص وقتی تعداد زیادی از نقص‌های کوچک در فاصله کمی از هم قرار می‌گیرند مشکل می‌کند. دستگاه‌های با دقت بالا از تعداد بیشتری حس‌گرهای کوچکتر استفاده می‌کند. معایب MFL: نیاز به حجم زیادی اطلاعات دارد که به طور خاص توسط کاربر تفسیر می‌شود. جریان جریان تولیدی محدودی دارد. مغناطیس دائم کردن لوله مشکلاتی به همراه دارد. در فصل بعد درباره این تکنولوژی به تفصیل صحبت می‌کنیم.

۳-۲-۱۳ جریان گردابی [20]

آزمایش جریان گردابی (ET)^۱ یک آزمایش الکترومغناطیسی از تکنولوژی NDT^۲ است که فقط در مورد فلزات هادی کاربرد دارد. ET عموماً در صنایع فضایی، دریایی و خودرو استفاده می‌شود. کاربرد آن از تشخیص ترک تا طبقه بندی سریع اجزاء عیب و یا تشخیص انواع فلز است. وقتی یک سیم‌پیچ تحریک شده (انرژی دار) را به سطح یک هادی نزدیک کنید جریان های گردابی الکترومغناطیسی به قطعه هادی القاء می‌شود. این جریان های گردابی میدان مغناطیسی داخل هادی ایجاد می‌کنند که تمایل به مخالفت با میدان مغناطیسی اصلی دارد. امیدانس سیم‌پیچ با جریان های گردابی القاء شده در هادی تغییر می‌کند. وقتی جریان گردابی در اثر وجود عیب یا تغییر نوع فلز تغییر کند، امیدانس سیم‌پیچ هم دچار تغییر خواهد شد. این تغییر اندازه‌گیری شده و نمایش داده می‌شود تا نوع عیب یا وضعیت فلز را مشخص کند. بعضی مزایای ET عبارتند از: آزمایش بدون تماس؛ بدون تاثیرات باقیمانده؛ جریان های القا شده MFL با حس‌گرهای ET قابل تشخیص هستند. انواع نقص‌هایی که تشخیص می‌دهد: ۱- ترک (Crack)؛ ۲- نقص‌های لایه لایه؛ ۳- تخمین ضخامت دیوار تست جریان گردابی تکنولوژی NDT مربوط به خطوط لوله گاز عموماً یک روش بازرسی خارجی است اما به وسیله یک سری تکنولوژی‌های ویژه می‌توان از آن در بازرسی داخل خط استفاده کرد. معایب ET عبارتند از: ۱- سرعت کم پاسخ آن باعث محدود شدن کاربرد ILI در سرعت توپک‌های کنونی است. ۲- نگه داشتن فاصله lift off مناسب ۳- به تغییر اتصالات حساس است. در فصل بعد بیشتر به این تکنولوژی می‌پردازیم.

۳-۳ استفاده از امواج مافوق صوت^۳ در تشخیص نقص

در این قسمت به بررسی روش تست امواج مافوق صوت^۴ می‌پردازیم. با توجه به اینکه این روش هم یکی از روش‌هایی است که در بازرسی داخلی خطوط لوله نفت و گاز به وسیله توپک کاربرد دارد در واقع باید از آن در دسته بندی بخش ۳-۳ یاد می‌کردیم ولی چون هدفمان توضیح مفصل‌تر این تکنولوژی بود، لذا در این بخش به طور جداگانه آن را بررسی می‌کنیم.

¹ EDDY Current Test

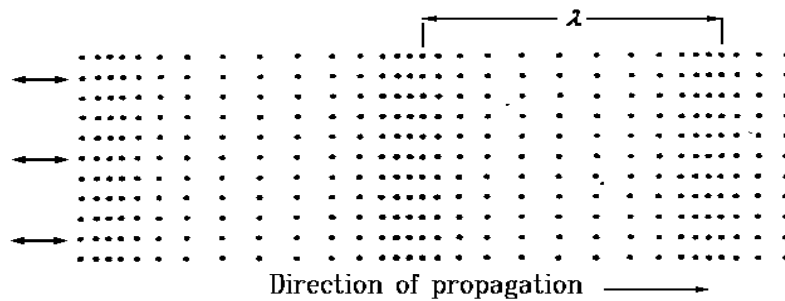
² Non Destructive Test ()

³ Ultrasonic

⁴ UT

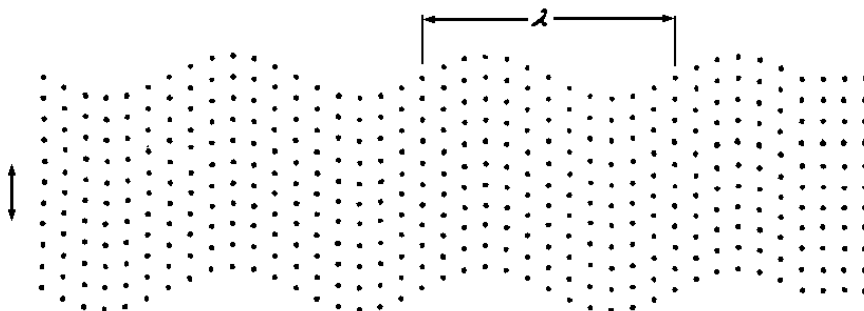
۳-۳-۱ انواع موج‌های تنشی و ویژگی‌های آن [22]

امواج ماوراء صوت، امواج صوتی با فرکانس بالای ۲۰KHz هستند که عموماً به عنوان فرکانس‌های بالاتر از حد شنوایی انسان معرفی می‌شوند. امواج صوتی در طبیعت به صورت مکانیکی هستند. هر موج مکانیکی (یا امواج تنشی که نوع عمومی‌تر آن است) در اثر نوسان بخش جداگانه‌ای از ماده بوجود می‌آید. وقتی لایه بالایی ماده شروع به نوسان می‌کند اتصالات ارتجاعی نوسان را به اجزاء لایه دوم منتقل می‌کنند و آنها هم به لایه سوم و به این ترتیب موج تنشی به کل ماده منتقل می‌شود. سرعت انتشار موج تنشی در مواد گوناگون متفاوت است و به چگالی فلز و خواص ارتجاعی آن در جهت حرکت اجزاء وابسته است. بسیاری از مواد ویژگی‌های ارتجاعی نامنظمی دارند در نتیجه سرعت انتشار امواج تنشی عبوری از آنها به جهت انتشار مربوط می‌شود. در این حالت حرکت اجزاء در جهت انتشار است. شکل ۱۷ نمونه‌ای از این موج‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اجزاء در جهت‌های خاصی فشرده شده‌اند یا از هم فاصله گرفته‌اند. به همین علت آنها را امواج فشرده^۱ یا طولی^۲ می‌نامیم.



شکل ۳-۱۷. موج فشرده

موج فشرده تنها گونه‌ای از امواج تنشی است که از گازها و مایعات عبور می‌کند در حالی که خواص ارتجاعی را فقط در حالت فشرده نشان می‌دهد. هر چند جامدات خواص ارتجاعی را در حالت برشی از خود نشان می‌دهند و به طور پیوسته موج‌ها را در جهت انتشار انتقال می‌دهند. (شکل ۱۸) این امواج به امواج برشی یا مورب^۳ معروف هستند. سرعت موج‌های برشی تقریباً نصف سرعت امواج فشرده است.



شکل ۳-۱۸. موج برشی

¹ Compression Wave

² Longitudinal Wave

³ Shear or transverse Wave

نوع دیگر انتشار موج که در جامدات وجود دارد موج سطحی^۱ است. (موج Reyleigh نیز نامیده می‌شود) همان‌طور که از اسمش مشخص است این موج بر سطح مواد حرکت می‌کند. عمق نفوذ این موج داخل سطح تقریباً یک طول موج است. سرعت موج سطحی تقریباً ۹۰ درصد سرعت موج برشی است. اگر ضخامت ماده کمتر از طول موج امواج سطحی باشد این امواج نمی‌توانند حضور داشته باشند و انتشار به صورت دیگری خواهد بود که آن را امواج صفحه‌ای^۲ (یا Lamb Wave) می‌نامند. این امواج به دو شکل متقارن و غیر متقارن هستند. این امواج پیچیده هستند و کاربرد چندانی ندارند. امواجی که عموماً در NDI^۳ استفاده می‌شوند امواج فشرده و برشی هستند.

۳-۲ اصول اولیه روش ماوراء صوت [22]

روش ماوراء صوت بر پایه این خاصیت که مواد جامد هادی‌های خوب امواج صوتی هستند بنا شده است. در نتیجه امواج نه تنها در برخورد با سطح مشترک بلکه در برخورد با نقص‌های داخلی هم منعکس می‌شوند. عکس‌العمل امواج صوتی در برابر فلز با کاهش طول موج افزایش می‌یابد، این به معنای افزایش فرکانس موج است:

$$\lambda = c/f$$

پس باید از امواج ماوراء صوت در فرکانس‌هایی بین ۰/۵ MHz تا ۲۵ MHz استفاده کنیم تا طول موجی در حد میلی‌متر داشته باشیم. با در اختیار داشتن فرکانس‌های کمتر عکس‌العمل متقابل امواج در برابر نقص داخلی ضعیف‌تر می‌شود و در نتیجه دقت بسیار کاهش می‌یابد.

در این روش یک المان پیزوالکتریک^۴ به وسیله دشارژ الکتریکی تحریک می‌شود و موج مافوق صوتی را انتقال می‌دهد. المان مشابهی وقتی سیگنال ماوراء صوت ارسالی را دریافت می‌کند سیگنال الکتریکی دریافت می‌کند در نتیجه باعث نوسان آن می‌شود. پروب به وسیله یک مایع یا نوعی ماده واسط^۵ با سطح مرتبط می‌شود تا امواج صوتی بتوانند از پروب به سطح مورد آزمایش منتقل شوند.

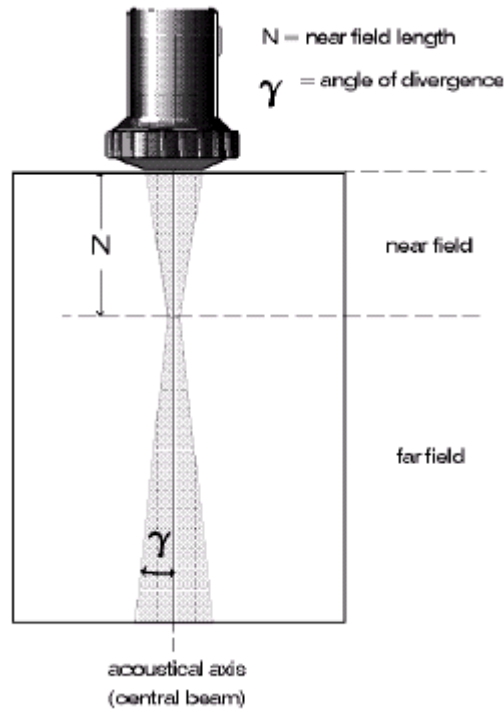
هر پروب یک ناحیه مشخص را تحت پوشش قرار می‌دهد. به ناحیه مؤثر برای تست ماوراء صوت ناحیه «اشعه صوتی»^۶ می‌گویند. ناحیه اشعه صوتی همان‌طور که در شکل ۱۹ نشان داده شده است به دو قسمت میدان نزدیک^۷ و میدان دور^۸ تقسیم شده است. طول N میدان نزدیک و واگرایی زاویه‌ای آن به قطر، فرکانس و سرعت صوت در ماده مورد آزمایش بستگی دارد.

¹ Surface Wave

² Plate Wave

³ Non-Destructive instrument

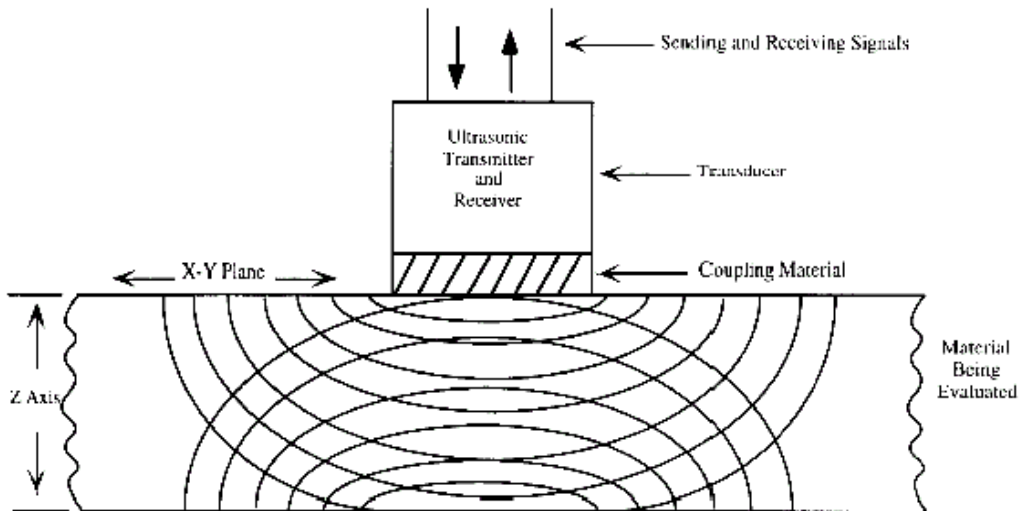
⁵ Coupling
Sound beam
the near field
the far field



شکل ۳-۱۹. میدان صوتی

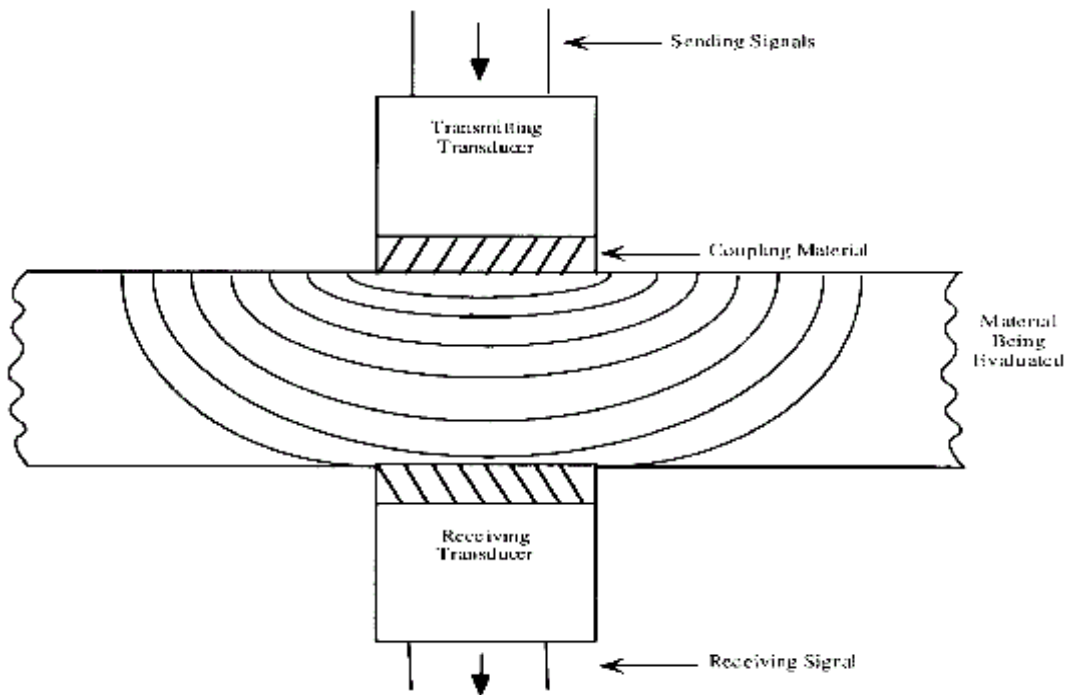
همان‌طور که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است، سه روش اصلی برای آزمایش ماوراء صوت فلزات وجود دارد: ۱- روش پالس-پژواک^۱، ۲- روش انتقال مستقیم^۲، ۳- روش pitch-catch^۳ [23].

۱. روش پالس-پژواک (شکل ۲۰). در روش پالس-پژواک، یک مبدل پیزوالکتریک همراه محور طولی‌اش عمودی روی یا نزدیک سطح فلز مورد آزمایش نصب شده است تا انرژی ماوراء صوت را فرستاده و دریافت کند. امواج ماوراء صوت توسط سطح روبرویی فلز یا به علت ناپیوستگی در فلز (نقص) منعکس می‌شوند و به وسیله همان مبدل در حالی که انرژی منعکس شده به سیگنال الکتریکی تبدیل شده است دریافت می‌شوند. سیگنال‌های الکتریکی توسط کامپیوتر پردازش می‌شوند تا روی صفحه تصویری یا صفحه تلویزیون نمایش داده شوند. صفحه نمایش ضخامت نسبی فلز، عمقی از فلز که عیب در آن قرار دارد و (با بررسی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری مناسب) مکان عیب در صفحه X-Y را مشخص می‌کند. امواج ماوراء صوتی در روش پالس-پژواک عموماً در فرکانس‌های بین ۱ و ۱۰ مگاهرتز به کار می‌روند. عموماً این روش برای تشخیص ابتدایی به کار می‌رود. (هر پالس فرستاده/گرفته شده شکل ۲۰ متعلق به یک پالس انرژی است.)



شکل ۳-۲۰. روش پالس-پژواک

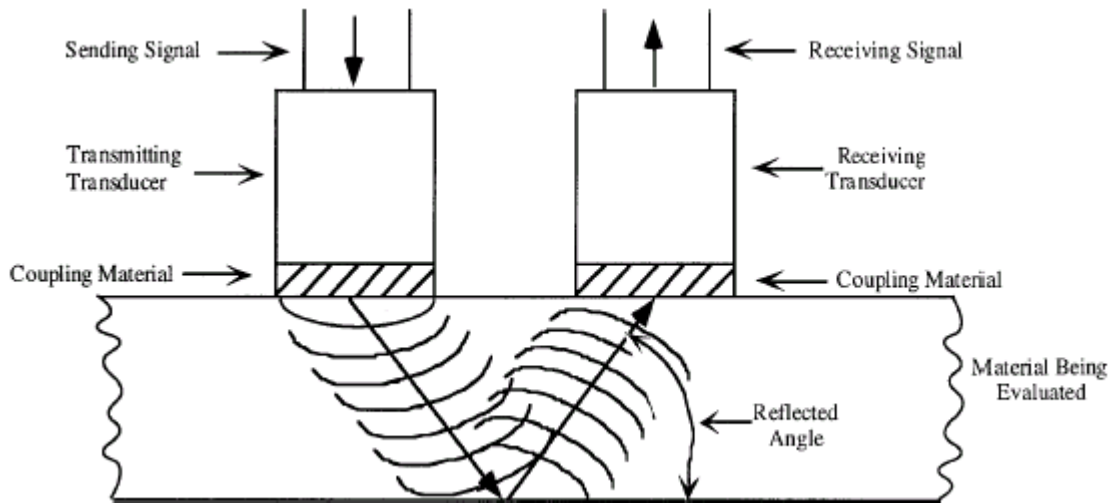
۲. روش انتقال مستقیم (شکل ۲۱). در این روش یک فرستنده ماوراء صوت در یک سمت فلز استفاده می‌شود و یک گیرنده (تشخیص دهنده) در سمت مقابل قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش در بازرسی فلزات مکان عیوب و ناخالصی‌ها در صفحه X-Y مشخص می‌شود. (هر موج فرستاده / گرفته شده در شکل ۲۱ متعلق به یک پالس انرژی است.)



شکل ۳-۲۱. روش انتقال مستقیم

۳. روش Pitch-Catch (شکل ۲۲). در این روش انرژی ماوراء صوت با هر زاویه‌ای به سطح فلز فرستاده می‌شود و به صورت انرژی منعکس شده که با زاویه انعکاس برمی‌گردد دریافت می‌شود. این روش قادر به تشخیص عمق نقص فلز و همچنین مکانش در صفحه X-Y است. (هر موج فرستاده / گرفته شده در شکل ۲۲ به یک پالس انرژی تعلق دارد.)

هر سه این روش‌ها برای سطوحی با وجه‌های موازی هم مفید هستند. این سه روش ماوراء صوت در طول آزمایش از پالس‌های انرژی استفاده می‌کنند.



شکل ۳-۲۲. روش Pitch-Catch

احتیاط‌هایی که در آزمایش ماوراء صوت باید انجام داد :

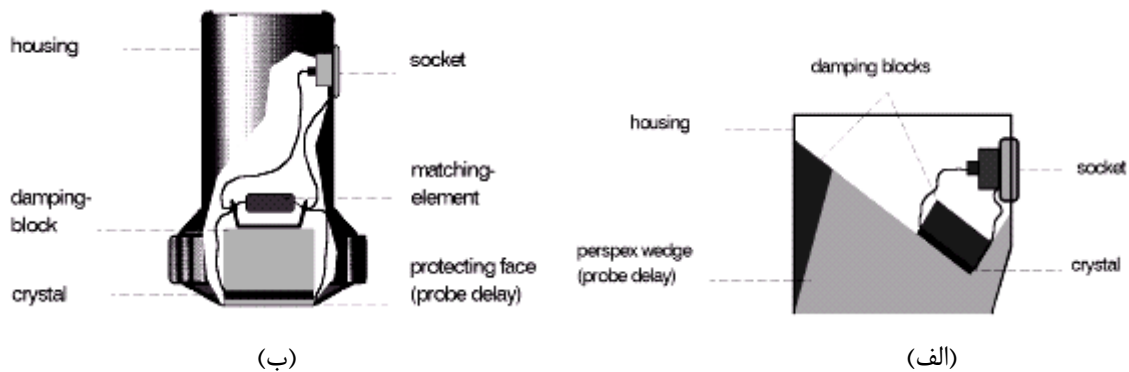
- با استفاده از محیط واسط صحیح، تطبیق امپدانس صوتی حس‌گرها با فلز مورد آزمایش
- استفاده از واسط هوایی برای فلزاتی که به رطوبت حساس هستند.
- دقت تشخیص باید به حدی باشد که عیوب مجاور را از هم تمیز دهد.
- استفاده از روش‌های الکترونیکی هر جا که امکان دارد تا بتوان به دقتی در فاصله‌ها دست یافت در حالی که اشعه ماوراء صوت گسترده می‌شود.
- ویژگی‌های مبدل
- هنگام استفاده از بازرسی خودکار، دقت به سرعت بازرسی، تکرار فرکانس، سرعت کامپیوتر و ... وابسته است.

آب به علت در دسترس بودن و غلظت پایین بهترین ماده برای محیط واسط است. زمانی که به علت جذب رطوبت، ناخالصی فلز یا اندازه اجزاء و شکل آن تمایل به غوطه‌وری در آب نداریم، به وسیله انواع مختلف "Squitter"¹ یا "bubbler"² لایه‌ای از آب بین حس‌گر و فلز قرار می‌گیرد تا ارتباط صوتی برقرار شود. روش پالس-پژواک عموماً نقص‌هایی تا حدود ۰/۱۱۹۳۸ سانتی‌متر قطری را تشخیص می‌دهد. روش انتقال سیستم نقص‌هایی تا حدود ۰/۱۲۷ سانتی‌متر قطری را تشخیص می‌دهد.

توانایی ماوراء صوت برای تشخیص عیوب به طول موج آن بستگی دارد. (که از فرکانس و سرعت موج نشأت می‌گیرد). یک قاعده سرانگشتی حد تشخیص بیان می‌دارد که: «اندازه کوچکترین نقص قابل تشخیص نصف طول موج است.» استفاده از فرکانس‌های بالا باعث افزایش حساسیت برای نقص‌های کوچک می‌شود، اگرچه باعث بالا رفتن دامنه موج و نویز پخش شده می‌شود.

۳-۳-۳ انواع پروبها [23]

امواج ماوراء صوت دو نوع پروب دارند که در شکل ۲۳ نشان داده شده است :



شکل ۲۳-۳. انواع پروب : (الف) پروب اشعه مستقیم (ب) پروب اشعه زاویه‌ای

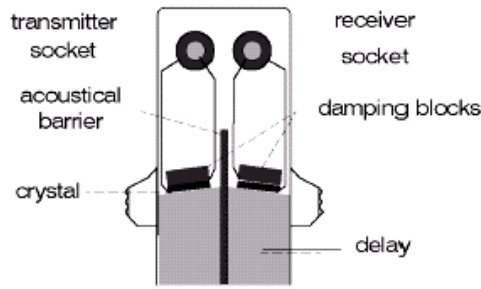
۱- پروب اشعه مستقیم^۱ : این پروب امواج طولی تولید می‌کند. نمونه‌ای از پروب اشعه مستقیم در شکل ۲۵ نشان داده شده است. مهمترین مشکل این پروب ضعف تشخیص آن در ناحیه میدان نزدیک است. [24].



شکل ۲۴-۳. انواع پروب اشعه مستقیم

برای فائق آمدن بر این مشکل از پروب TR^2 که در شکل ۲۴ نشان داده شده است می‌توان استفاده کرد. در این پروب از دو المان کریستالی که به صورت صوتی و الکتریکی در یک محفظه جدا از هم هستند استفاده شده است. به علاوه هر دو المان به یک مسیر تأخیر طولانی وصل هستند و به طور جزئی به هم مایل هستند. یک المان به فرستنده متصل است و دیگری به ورودی تقویت کننده گیرنده متصل است.

¹ Straight-beam probe



شکل ۳-۲۵. پروب TR

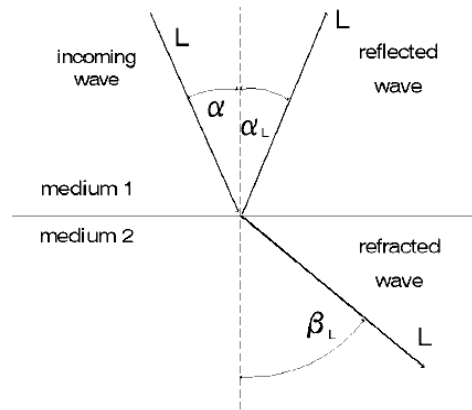
۲- پروب اشعه زاویه‌ای^۱: این پروب امواج برشی یا مورب تولید می‌کند که از امواج طولی بسیار دیرتر منتشر می‌شوند. در حقیقت پروب اشعه زاویه‌ای نمی‌تواند امواج طولی ارسال کند. پروب اشعه زاویه‌ای امواج صوتی را با یک زاویه نسبت به سطح مورد آزمایش فرستاده و دریافت می‌کند. شکل ۲۶ تعدادی از این نوع پروب‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲۶. تعدادی پروب اشعه زاویه‌ای

۳-۳-۴ شکست و تغییر فرم [23]

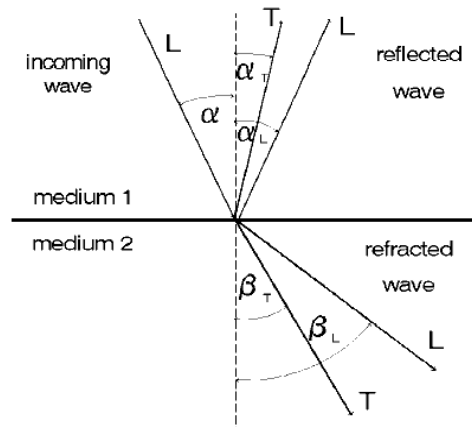
با توجه به قانون شکست و بازتابش زمانی که موج طولی با زاویه به مرز بین دو ناحیه برخورد می‌کند هم شکست و هم بازتابش مطابق شکل ۲۷ روی می‌دهد که اندازه زوایای آن از قانون بازتابش (اندازه زاویه تابش برابر است با زاویه بازتابش) و اندازه زاویه شکست از قانون شکست به دست می‌آید:



شکل ۳-۲۷. شکست و بازتابش بدون امواج مورب

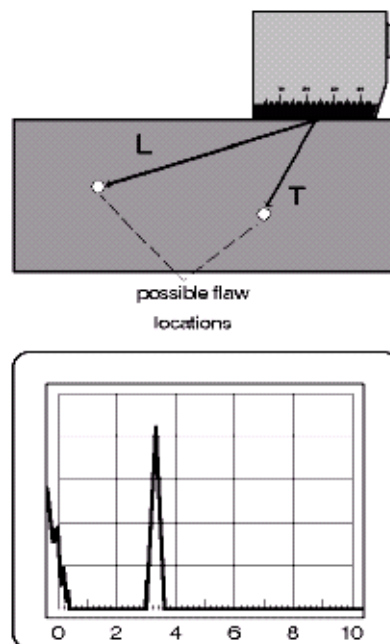
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

زاویه تابش α ، زاویه شکست β ، سرعت صوت در محیط ۱ $c_1 = 1$ ، سرعت صوت در محیط ۲ $c_2 = 2$ ولی در واقع برخلاف شکل ۲۷ در مرز بین دو ناحیه امواج موربی ایجاد می‌شود که مطابق شکل ۲۸ هم زاویه شکست و هم زاویه بازتابش دارند. به این حالت تغییر فرم موج می‌گویند.



شکل ۲۸-۳. تغییر فرم پس از شکست

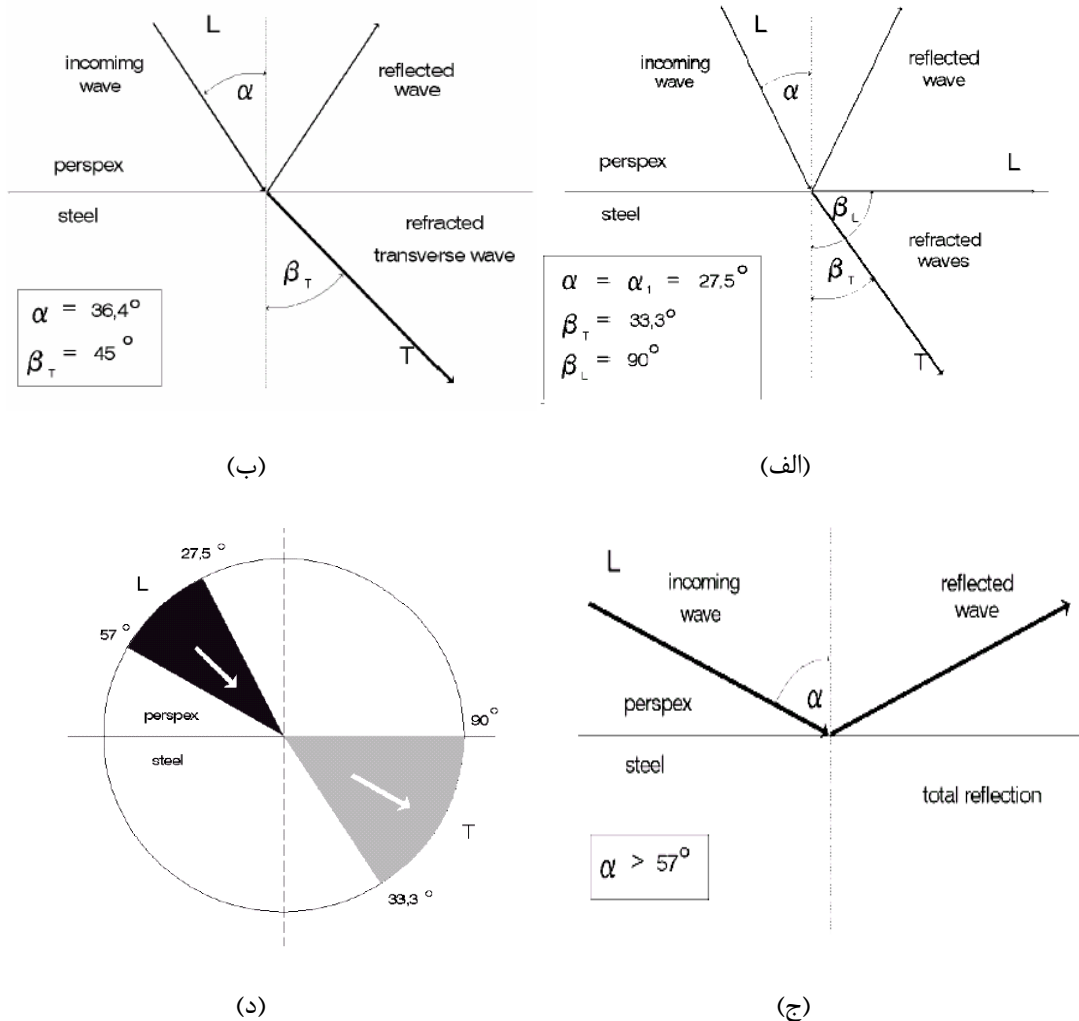
اگر هنگام بررسی، تغییر فرم موج مد نظر قرار نگیرد نتایج اشتباه یا غیر دقیقی حاصل می‌شود چرا که با یک پژواک روی صفحه نمایش دو انعکاس متفاوت اتفاق می‌افتد که ممکن است در نتیجه امواج طولی یا برشی باشد. (شکل ۲۹)



شکل ۲۹-۳. تابش یک پالس و انعکاس دو پژواک

جهت تشخیص عیب با در نظر گرفتن تغییر فرم بهترین کار استفاده از تعیین شرایط اولیه است. نخست به این مسئله توجه می‌کنیم که زاویه شکست امواج طولی برای فلزات تقریباً دو برابر امواج مورب است.

برای تشخیص شرایط اولیه دو محیط مانند Steel/Perspex بررسی می‌شود. با توجه به شکل ۳۰ به ناحیه‌ای (بین 27.5° و 57°) می‌رسیم که در آن می‌توانیم ارزیابی دقیقی از امواج صوتی به عمل آوریم. در این محدوده زاویه شکست موج طولی بین 33.3° و 90° (که در این حالت موج سطحی ایجاد می‌شود.) تغییر می‌کند. در این محدوده ما با زاویه شکست طولی 90° مواجهیم، یعنی در فاصله‌ای که موج مورب شکست حاصل می‌کند و سطح مورد آزمایش را طی می‌کند موج طولی مرز بین دو ناحیه را می‌پیماید. (شکل ۳۰- الف این مسئله را به خوبی نشان می‌دهد) شکل ۳۰- د طیف قابل استفاده پروب اشعه زاویه‌ای برای Steel را نشان می‌دهد.



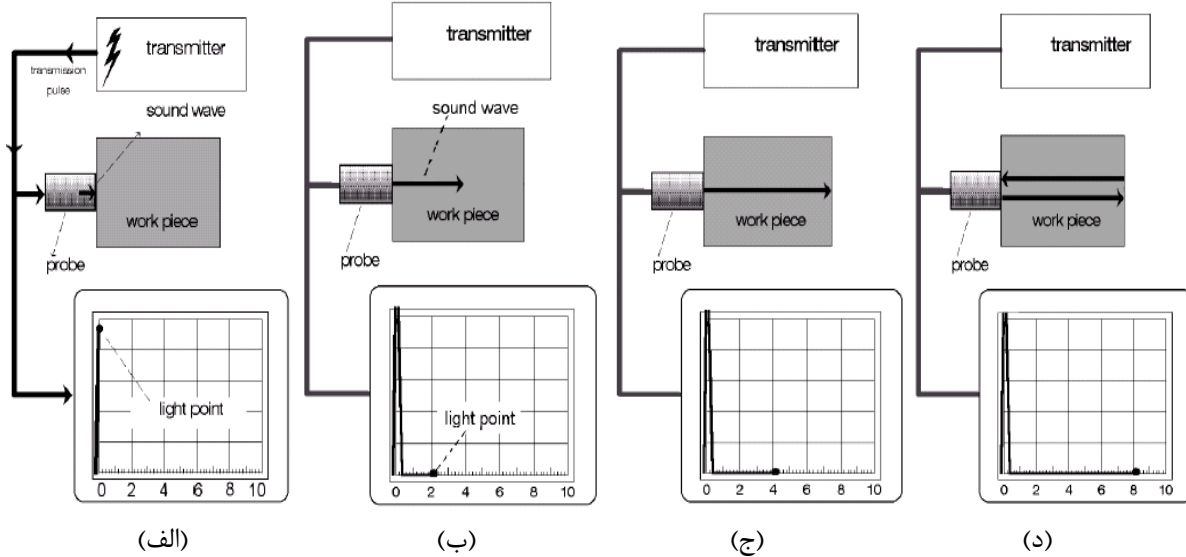
شکل ۳۰-۳. الف) کوچکترین حد طیف (ب) موج برشی با زاویه 45° (ج) انعکاس کامل (د) طیف کاربردی پروب اشعه زاویه‌ای

۳-۳-۵ روش آزمایش و تکنولوژی ابزار [23]

به منظور تشخیص محل گسستگی (نقص) در قطعه مورد آزمایش، نخست پالس الکتریکی کوتاهی که یک پالس صوتی در کریستال به وجود می‌آورد به سمت قطعه فرستاده می‌شود و به این صورت اندازه‌گیری زمان شروع می‌شود. این پالس در طول جسم حرکت می‌کند و در اثر برخورد با یک گسستگی یا دیواره روبرو منعکس می‌شود و به پروب برمی‌گردد. نوسان‌های برگشته به پالس‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند که اندازه‌گیری زمان را متوقف می‌کنند. فاصله مکان انعکاس با فرمول مقابل قابل تشخیص است:

$$S = C \cdot t / 2$$

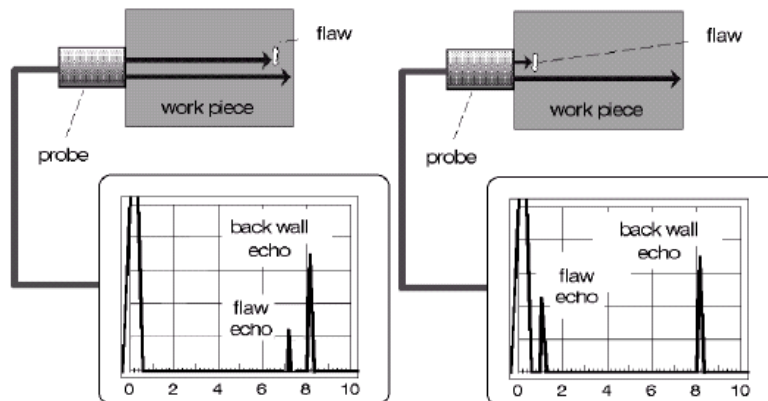
با نمایش سیر زمانی ما از طریق مافوق صوتی توانسته‌ایم نقص قطعه را دریابیم. همان‌طور که گفته شد با فرستادن پالس الکتریکی و به وجود آمدن پالس صوتی در کریستال پروب، پالس ولتاژ به ورودی تقویت‌کننده می‌رود در نتیجه یک جهش عمودی در نقطه شروع صفحه نمایش ایجاد می‌شود که پالس اولیه^۱ نام دارد. (شکل ۳۱- الف)



شکل ۳-۳۱. سیر حرکت پالس از آغاز تا بازگشت آن به نقطه آغاز

شکل‌های (۳۱ الف و ب و ج و د) ، حرکت پالس از نقطه آغاز، رسیدن آن به دیواره مقابل و انعکاس و بازگشت آن به جای اول را نشان داده‌اند. یک بخش از پالس صوتی که پس از برگشت به ماده واسط و پروب می‌رود، یک سیگنال دریافتی کوچک الکتریکی روی کریستال ایجاد می‌کند که به علت تقویت شدن یک جهش عمودی کوچک به وجود می‌آورد و پژواک پشت دیواره^۲ نامیده می‌شود.

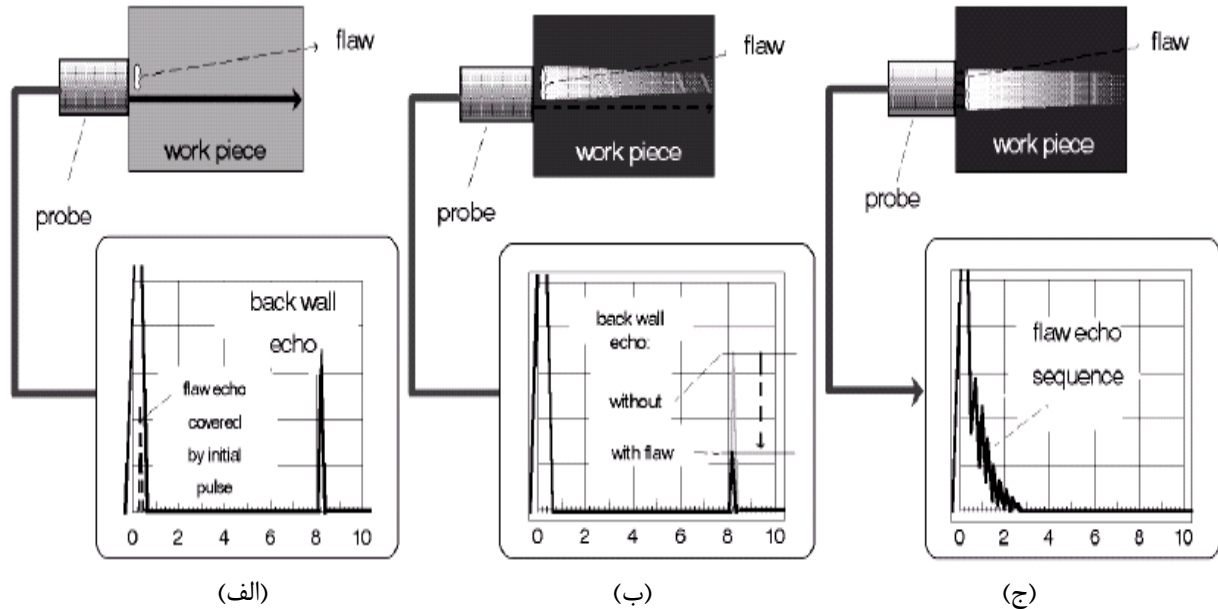
با توجه به توضیحات بالا به راحتی می‌توان حدس زد که هنگام حضور عیب در قطعه چه سیگنالی را روی صفحه نمایش مشاهده خواهیم کرد. با توجه به این مسئله که هر عیب (گسستگی) مانند یک انعکاس‌دهنده عمل می‌کند. شکل ۳۲ عیب را در موقعیت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۲. نمایش نقص در موقعیت‌های مختلف

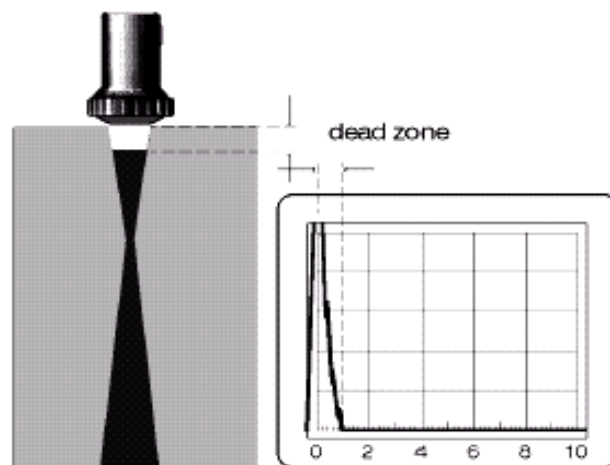
^۱ initial pulse
^۲ back wall echo

اگر نقص بسیار به سطح فلز نزدیک باشد تشخیص آن غیر ممکن به نظر می‌رسد (شکل ۳۳-الف). اگر نقص نزدیک سطح به اندازه‌ای بزرگ باشد که بتواند سایه‌ای قابل تشخیص روی طیف بیاندازد به صورتی که پژواک دیواره کوچک شود، آنگاه قابل تشخیص است (شکل ۳۳-ب). اگر نقص (گسستگی) دقیقاً موازی سطح فلز و نزدیک به آن باشد باعث به وجود آمدن چندین پژواک در ابتدای نمایش می‌شود (شکل ۳۳-ج) که باز هم



شکل ۳-۳۳. (الف) نقص غیرقابل تشخیص در نزدیکی سطح (ب) زیر سایه قرار گرفتن پژواک پشت دیواره توسط انعکاس گسستگی نزدیک سطح (ج) تسلسل پژواک‌ها توسط گسستگی نزدیک سطح

حکایت‌گر حضور نقصی در فلز است. در هر حال، ناحیه‌ای که بسیار به سطح فلز نزدیک است به "ناحیه مرگ" موسوم است و تشخیص نقص در این ناحیه بسیار سخت است و به دقت دستگاه بستگی دارد (شکل ۳۴).



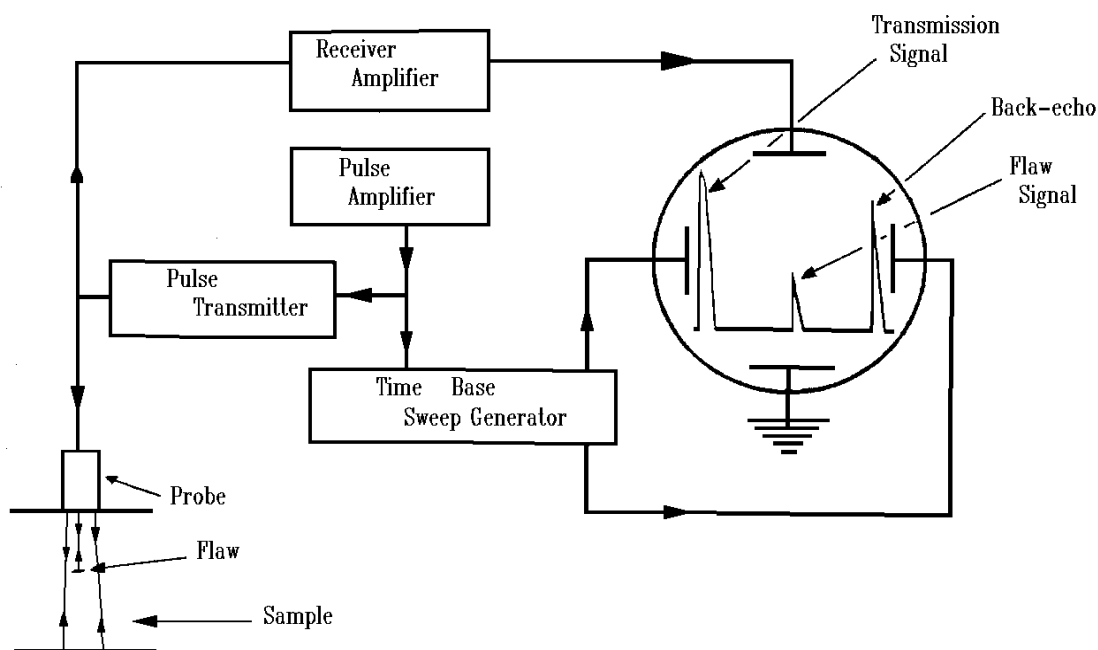
شکل ۳-۳۴. ناحیه مرگ

۳-۳-۶ انواع روش‌های تصویربرداری مرسوم در آزمایش‌های ماوراء صوت [25]

۳-۳-۶-۱ روش A-MODE

این روش مانند اکثر روش‌های تصویربرداری بر پایه تکنیک پالس-پژواک است. روش فوق می‌تواند یک تصویر تک بعدی در راستای انتشار موج صوتی از وضعیت و ضخامت ناحیه‌های متفاوت را ایجاد کند. حرف A در روش A-Mode بیان‌کننده دامنه است. در این روش عمق گسستگی با محور زمان و اندازه آن با دامنه سیگنال انعکاسی اندازه‌گیری می‌شود.

خصوصیت منحصر به فرد روش A-Mode این است که تصویر یک بعدی نسبتاً دقیقی را بدون نیاز به ابزارهای خیلی پیشرفته در اختیار ما قرار می‌دهد اما ضعف آن تک بعدی بودن تصویر حاصله است.

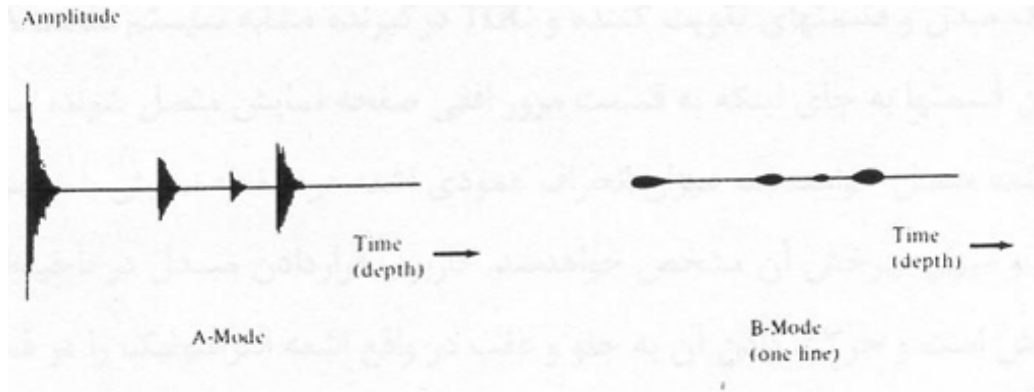


شکل ۳-۳۵. اجزاء اصلی سیستم تشخیص نقص A-Scan

۳-۳-۶-۲ روش B-MODE

برای اینکه درک درستی از سیستم B-Mode داشته باشیم فرض کنید که در سیستم A-Mode به جای اینکه دامنه انعکاسهای دریافتی روی محور عمودی صفحه نمایش تأثیر بگذارند روی هر دو محور تأثیر می‌گذارند در این صورت ما یک سیستم B-Mode خواهیم داشت. به این معنی که در B-Mode، محور X نمایش‌گر مکان در طول مسیر تصویربرداری و محور Y نمایانگر گذر اطلاعات در طول زمان است. حرف B در این سیستم مخفف کلمه Brightness است. شکل ۳۶ نشان‌دهنده خروجی یک سیستم B-Mode در مقایسه با خروجی یک سیستم A-Mode است.

مدار تحریک مبدل و قسمت‌های تقویت‌کننده و TGC در گیرنده مشابه سیستم A-Mode است ولی خروجی این قسمت‌ها به جای اینکه به قسمت مرور افقی صفحه نمایش متصل شوند به مدار کنترل روشنایی اشعه متصل خواهند شد. میزان انحراف عمودی اشعه در صفحه نمایش با توجه به موقعیت‌های مبدل و میزان چرخش

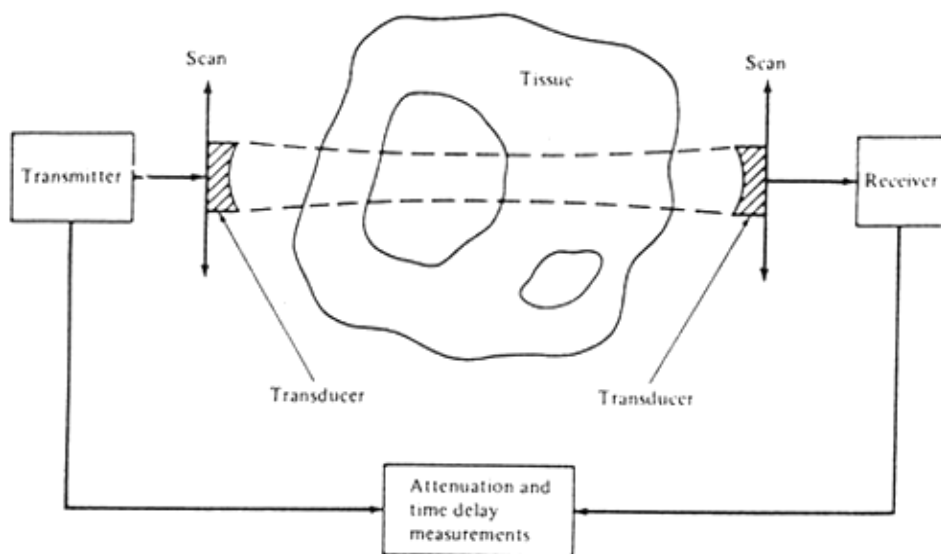


شکل ۳-۳۶. مقایسه بین دو روش A-Mode و B-Mode

آن مشخص خواهد شد. کاربر با قرار دادن مبدل در لوله و حرکت دادن آن به جلو و عقب در واقع اشعه ماوراء صوت را در قسمتی از لوله جاروب می‌کند که این جاروب به مرور عمودی صفحه نمایش منتقل می‌شود. به علت جابجایی مبدل بالطبع سرعت تصویربرداری طوری است که باید سیستم نمایش مانند اسیلوسکوپ‌های حافظه دار قابلیت ذخیره سازی اطلاعات را داشته باشد. به این ترتیب تصویر حاصله در واقع یک برش از ناحیه‌ای است که مبدل روی آن حرکت داده شده و در نتیجه دو بعدی نیز خواهد بود. در سیستم‌های جدید B-Mode شدت روشنائی نقطه صفحه که بستگی به دامنه انعکاسهای دریافتی دارد، با طیفی از سفید تا سیاه (شامل خاکستری با شدت‌های گوناگون) نمایش داده می‌شود.

۳-۳-۳-۶ روش C-Mode

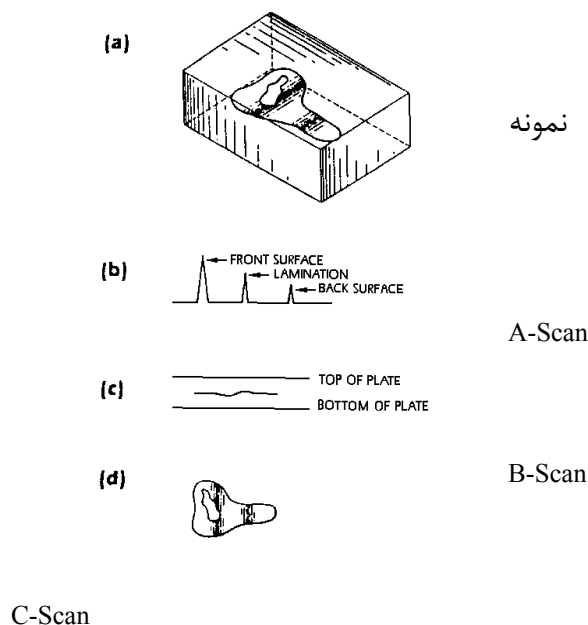
در روش‌های قبلی اصل تصویربرداری بر فرستادن یک موج صوتی و دریافت انعکاس‌های آن بنا شده بود در حالی که در این سیستم موجی از یک طرف جسم تحت آزمایش فرستاده می‌شود و از طرف دیگر آن دریافت خواهد شد.



شکل ۳-۳۷. طرح ساده یک سیستم C-Mode

یک کریستال که به عنوان فرستنده عمل می‌کند، از یک طرف به جسم تحت آزمایش امواج مافوق صوت می‌فرستد. کریستال دیگر در آن سوی جسم، امواج عبوری از جسم را دریافت می‌کند. در این میان دامنه امواج دریافتی نشان دهنده میزان تضعیف امواج و زمان دریافت آن نشان‌دهنده ضخامت جسم مورد نظر خواهد بود. این روش از نظر ساختار کلی شبیه به تصویر برداری با اشعه X است. دو مشخصه از هر ناحیه را می‌توان از اطلاعات حاصله با روش C-Mode به دست آورد:

الف: با مقایسه دامنه موج دریافتی و دامنه موج تحریک، میزان تضعیف دریافت را می‌توان به دست آورد. این تضعیف متاثر است از تضعیف انرژی عبوری از لایه‌هایی که باعث ایجاد انعکاس و پراکندگی‌های داخلی می‌شوند.
ب: با اندازه‌گیری دقیق ابعاد ناحیه تحت آزمایش و داشتن زمان بین تحریک و دریافت موج در گیرنده می‌توان سرعت امواج صوتی را در ناحیه مورد نظر اندازه‌گیری نمود.
شکل ۳۸ سه روش پایه‌ای برای ارائه اطلاعات آزمایش مافوق صوت را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۸. نمایش یک شکل نمونه توسط سه روش پایه‌ای تصویربرداری

۷-۳-۳ توپک ماوراء صوتی [26]

دستگاه توپک ماوراء صوت در سالهای ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴ توسط شرکت پایپ‌ترونیکس طراحی گردید. دستگاه مزبور جهت تشخیص عیوبی که به عنوان ترکهای محوری در خط لوله ایجاد می‌شود، مخصوصاً ترکهای ناشی از خستگی فلز^۱ و ترکهای ناشی از خوردگی تحت تنش^۲ یا ترکهای عیوب جوش، به کار می‌رود. این دستگاه از پائیز ۱۹۹۴ به طور عملی به کار گرفته شده است. توپک هوشمند قابلیت جمع‌بندی اطلاعات انتخاب شده به صورت دو بعدی، نمودارهای هیستوگرام، محیط‌های مرئی مانند C-Scan و B-Scan و نمایش جدول را دارد.

^۱ FATIGUE

^۲ STRESS CORROSION CRACKS (SCC)

توپک‌های هوشمند از نوع THE FURNANCE TUBE INSPECTION SYS [25] هم از نظر کیفیت بررسی اطلاعات و هم از نظر بی‌خطری همه‌جانبه در هنگام عملکرد کوره‌های پالایشگاه‌ها ترقی پیدا کرده است. عملکرد توپک هوشمند FTIS [25] بر پایه ویژگی‌های مافوق صوت و آزمایش‌های غیر مخرب NDT جهت تعیین و اندازه‌گیری قطر داخلی و ضخامت دیواره در خطوط لوله نفت کوره است. اندازه‌گیری‌های دایروی وابسته به اندازه‌گیری‌های ضخامت دیواره لوله است.

به دلیل بهره‌گیری از تکنیک تشخیص ضخامت مضاعف و مهارت فنی به علاوه تکنولوژی پیشرفته رایانه‌ها، این دستگاه علاوه بر تشخیص صد در صد ترک با حساسیت بالا قادر به طبقه‌بندی عیوب نیز هست. مهمترین خصوصیات فنی دستگاه مذکور به شرح ذیل است :

حدافل تشخیص طول عیب	۳۰ میلی‌متر
حدافل تشخیص عمق عیب	۱ میلی‌متر
سرعت اندازه‌گیری (بازرسی)	تا ۱ متر در ثانیه
	(حدافل طول عیب ۳۰ میلی‌متر)
	تا ۲ متر در ثانیه
	(حدافل طول عیب ۶۰ میلی‌متر)
اندازه‌های موجود	۶۰/۹۶ تا ۱۴۲/۲۴ سانتی‌متر

بررسی کلیه داده‌های به دست آمده از توپک ماوراءصوتی تماماً نرم‌افزاری انجام می‌شود. تنها مرحله نهایی که طبقه‌بندی عیوب است توسط افراد مجرب با بهره‌گیری از رایانه انجام می‌پذیرد. علاوه بر تشخیص ترک این دستگاه قادر به تشخیص عیوب دیگر نیز هست :

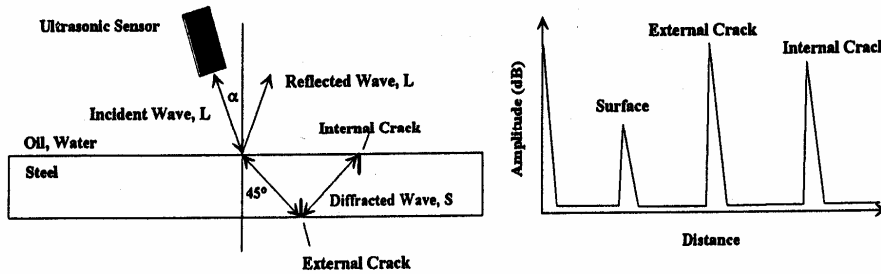
- خوردگی ورقه‌ورقه / ناخالصی / تاول
- برخی از انواع کاهش داخلی / خارجی فلز
- تو رفتگی (گودی)
- شیار طولی
- تغییر شکل
- فلنج
- ویژگیهای جوشکاری
- ضخامت‌های مختلف دیواره
- مفید برای شیرها , کمرگاه‌ها و زانوها

۳-۳-۷-۱ روش بازرسی

دستگاه ماوراء صوت در تشخیص ترکهای داخلی و خارجی با حساسیت و وضوح بالا کاربرد دارد. به همین علت در این ابزار از امواج برشی استفاده می‌شود که همان طور که قبلاً گفته شد از جدار لوله به صورت زاویه‌گون انتقال می‌یابد و با ایجاد ارتعاشات ماوراء صوتی از درون مایعی (نفت، آب و غیره) که به عنوان واسط

¹ HIGH-RESOLUTION

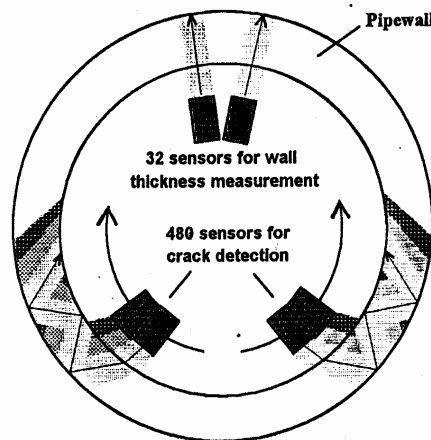
عمل می‌کند عبور می‌نماید. زاویه برخورد به صورتی تنظیم می‌شود که زاویه شکست ۴۵ درجه‌ای در لوله فلزی به وجود آید (شکل ۳۹). به دلیل آنکه ترکهای ناشی از خستگی فلز و همچنین ترکهای خوردگی تحت تنش معمولاً عمود بر عامل اصلی تنشی^۱ - مانند تنش حلقه‌ای - در لوله هستند، ارتعاشات ماوراء صوت در جهت



شکل ۳-۳۹. نمای هندسی در چپ و تصویر دامنه A-Scan در راست

محیطی ارسال می‌شوند تا به این وسیله حداکثر بازتاب صوتی به دست آید. حمل کننده حس گرهای^۲ توپک ماوراء صوت به صورتی طراحی شده است که کل محیط لوله با دقت در جهت عقربه‌های ساعت و عکس عقربه‌های ساعت بازرسی شود. تعداد ۴۸۰ حس گر بر روی ۱۶ پایه حمل کننده حس گرها قرار گرفته‌اند (برای لوله‌هایی به قطر ۶۶/۰۴ یا ۶۰/۹۶ سانتی‌متر) که برای تشخیص ترک است (شکل ۴۰). این روش موجب پوشش کل قطر لوله می‌شود و اطمینان می‌دهد که امواج منعکس شده مناسب توسط حداقل ۱۰ حس گر تشخیص داده شده است. علاوه بر این حس گرها دو حس گر در هر ردیف به طور مداوم ضخامت اولیه و جوشهای محیطی را اندازه‌گیری می‌کنند. حس گرها روی حمل کننده‌ای که قابلیت انعطاف بالایی دارد و از جنس پلی‌اورتان است نصب شده‌اند و فاصله حس گرها تا جدار لوله ثابت است و باعث می‌شود که همواره زاویه برخورد امواج یکسان و دقت قابل قبولی داشته باشد.

با توجه به زاویه برخورد، فاصله بین حس گر و گسستگی (نقص)، مشخصات حس گر و عوامل دیگر، انعکاس امواج ماوراء صوت از دیواره به علائم نمونه پیچیده‌ای منتهی می‌شود. به منظور درک بهتر علائم ثبت شده، محاسبات المان محدود^۳ متعدد با استفاده از روشهای الگویی انجام شده است.

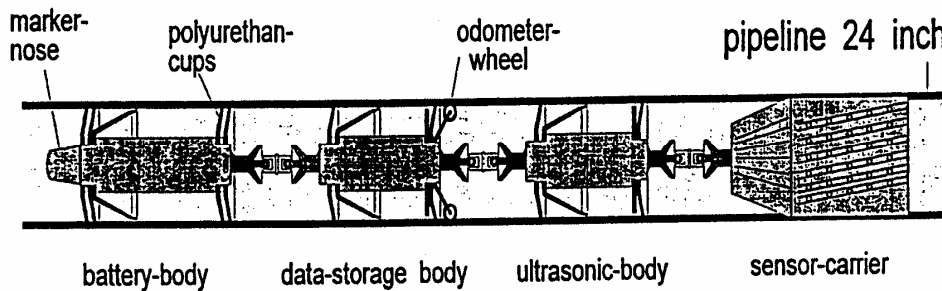


شکل ۳-۴۰. ترتیب قرار گرفتن حس گرها برای بازرسی داخل خط لوله

^۱ HOOP-STRESS
^۲ SENSOR CARRIER
^۳ Finite Element

۳-۷-۲ ساختار توپک ماوراء صوت

ساختار کلی دستگاه در شکل ۴۱ نشان داده شده است. قسمت مکان‌نما در جلو دستگاه، علائم را از فرستنده‌های نشانگر^۱ که در محل‌های معینی روی زمین قرار دارند و مرجع ثبت مسافت‌یاب^۲ هستند دریافت می‌کند. این موجب اطمینان کامل در تعیین نقاط معیوب مشخص شده نسبت به وضعیت مطلق در لوله است و انتخاب محل گود برداری را میسر می‌کند. نشانگر با سیستم نشانگر پایه زمانی^۳ قابل تنظیم است. برای همزمان کردن زمان سنج‌های دستگاه و نشانگرهای روی زمین، زمان مرجع از طریق GPS به دست می‌آید.



شکل ۴۱-۳. آماده سازی دستگاه ترک‌یاب ماوراء صوت

قسمت محفظه باتری توپک، برق دستگاه را جهت عملیات فراهم می‌کند. قسمت ثبت اطلاعات جهت ذخیره فشرده اطلاعات دریافتی است. دستگاه حاوی ۱۲ واحد اطلاعات ۲ گیگا بایتی است که جهت بازرسی و ذخیره اطلاعات ۱۰۰ کیلومتر کفایت می‌کند. دستگاه ماوراء صوت حاوی ۱۶ واحد ماوراء صوت مجزا است. هر کدام از این واحدها ۳۲ واحد کانال فرستنده/گیرنده قابل برنامه‌ریزی دارند که از روش ALOK استفاده می‌نمایند و ظرفیت آنها (۸۰ dB) است. روش فوق برای سالیان متمادی است که در بازرسی ماوراء صوتی در نیروگاه‌های برق استفاده می‌شود. واحدهای ماوراء صوت متصل به سیستم‌های مخصوص کاهش‌دهنده اطلاعات هستند تا آن دسته از اطلاعات مفید که موجب شناسایی عیوب شبه ترکی با منشأ طولی می‌شوند را جداسازی و تفکیک کنند. بعد از جداسازی اطلاعات، روش‌های تراکم به کار می‌رود و اطلاعات باقیمانده در یک دستگاه ضبط‌کننده DAT ۱۲ که در محل موجود است ذخیره‌سازی می‌شود. برای جلوگیری از خطر هدر رفتن اطلاعات به دلیل پیچیدگی مکانیکی دستگاه‌های ضبط آن، دستگاه‌های ضبط‌کننده در یک محفظه ضد ضربه قرار گرفته‌اند. حمل‌کننده حس‌گرهای دستگاه ترک‌یاب ماوراء صوت به گونه‌ای طراحی شده است که محیط کامل لوله به صورت یکنواخت عکس‌برداری می‌شود. (شکل ۴۲)

حس‌گرهای لیزری و مافوق صوتی شامل دو سری اولیه و ثانویه هستند. حس‌گرهای اولیه آنچه طی شده را تشریح می‌کنند. هر کدام از این حس‌گرها یک واحد پردازشگر دیوار به دیوار دارد که شامل DSP اختصاصی است. هر کدام از DSPها وظیفه دیجیتال کردن و پردازش و ذخیره در واحدهای حافظه غیر فرار را بر عهده دارند. هر واحد پردازشگر ظرفیت ذخیره اطلاعات تا ۵۳۰۰ فوت و یا ۱۶۱۶ متر را دارد. واحد اضافه، موقعیت محوری را

¹ Bench marker

² Odometer

³ TIME BASE MARKER SYSTEM

ذخیره می‌کند. این عمل از طریق دو انکودر مستقل صورت می‌گیرد. انکودرها چرخهایی دارند که دیواره داخلی خط لوله را طی کرده و اطلاعات را ذخیره می‌کند.

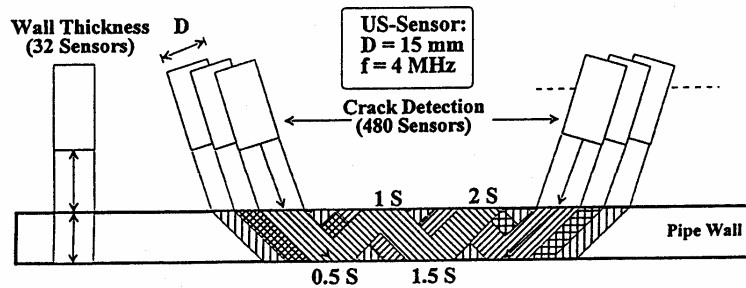
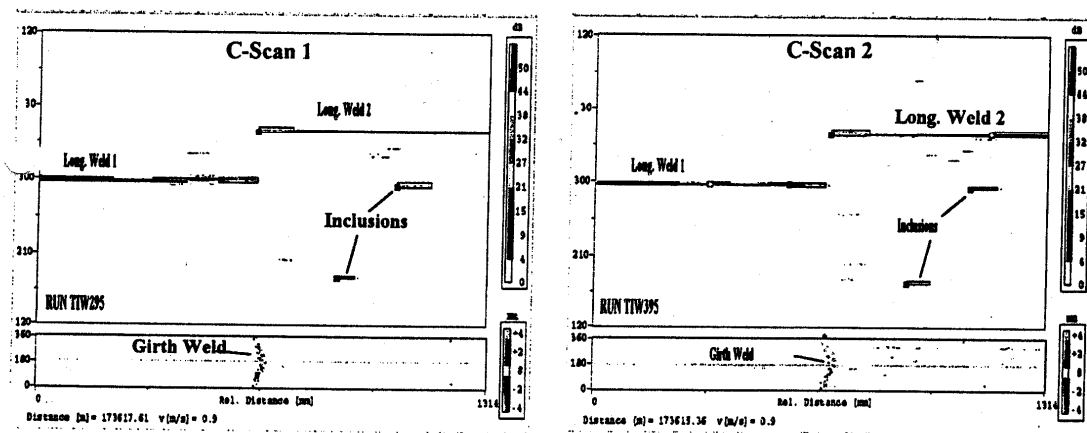


Figure 4. Sensor arrangement (schematic).

شکل ۳-۴۲. ترتیب قرار گرفتن حس گرها

۳-۷-۳-۳ قابلیت تکرار

برای آزمایش قابل تکرار بودن دستگاه، یک خط لوله نفت به قطر $66/04$ سانتی‌متر دو بار بازرسی گردید. تعداد ۸۰ نقطه شبه شکاف با در نظر گرفتن طول، دامنه و وضعیت محیطی آنها با یکدیگر مقایسه شدند، نقاط انتخابی اختیاری دارای عمق پایین‌تر از ۱ میلی‌متر بودند که توسط خاک‌برداری نیز مشخص شدند. به احتمال زیاد این نقاط شیارهای مکانیکی و خراش بودند. در هر دو بازرسی موارد فوق به طور یکسان مشاهده گردید و قابل تکرار بودن بازرسی فوق با در نظر گرفتن پارامترهای مربوطه بسیار خوب بود.



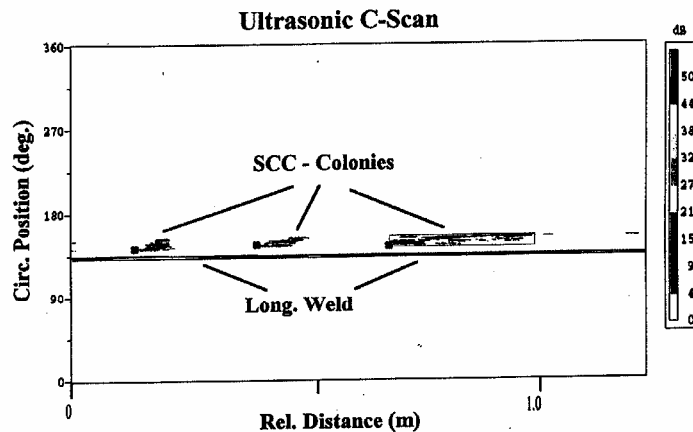
شکل ۳-۴۳. مقایسه نمودارهای C-Scan دو بازرسی مختلف

شکل ۴۳ مقایسه نمودارهای C-Scan یک اتصال لوله است که در دو بازرسی ثبت شده. (خط لوله نفت خام به قطر $66/04$ سانتی‌متر). قسمت پایین نمودار C-Scan نمایانگر نتایج ضبط کننده‌های ضخامت دیواره لوله است که محل جوشهای محیطی را نیز مشخص نموده است. در نمودار C-Scan جوشهای طولی و نیز اثر دو ناخالصی انعکاس یافته بطور دقیق و مؤثری با یکدیگر منطبق هستند.

۳-۷-۴ تفکیک عیوب

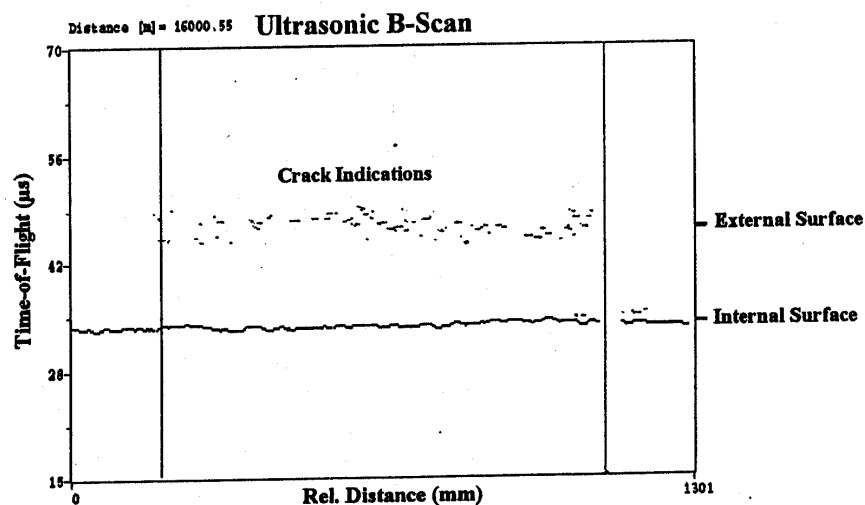
بسیاری از اطلاعات به دست آمده از عملیات خطوط لوله علامت وجود نقاطی مانند شکاف است. اکثر آنها از شیارها یا خراش‌هایی به وجود می‌آید که معمولاً در حین ساخت و یا حمل لوله‌ها حاصل می‌شود. عمق این نوع نقص‌ها معمولاً کمتر از ۱ میلی‌متر است ولی چون آنها به صورت مرکز تنش عمل می‌کنند باید همواره به عنوان آغاز پیدایش ترک بررسی شوند.

شکل ۴۴ نمودار C-Scan یک اتصال لوله را نشان می‌دهد که حاوی سه تجمع SCC در حوالی جوش طولی است. در تصویر C-Scan داده‌های ماوراء صوت کلیه حس‌گرهای ثبت‌کننده بر روی سطح لوله متمرکز هستند.



شکل ۳-۴۴. نمایش سه تجمع SCC در نزدیکی محل جوش طولی

از نمودار C-SCAN اندازه و محل تجمع به سادگی قابل رؤیت است. اطلاعات جامعتری از نمودار B-SCAN به دست آمده که نشان‌دهنده ترک‌هایی است که توسط تک‌تک حس‌گرهای ثبت‌کننده جمع‌آوری شده است. (شکل ۴۵) در نمودار بررسی وضعیت B، هر ترک به تنهایی قابل تجربه بوده و طول و فاصله آنها تا ترک بعدی قابل تخمین است. در اکثر تجمع‌های SCC، طول ترکها زیر ۳۰ میلی‌متر است. دسته‌بندی تجمع ترک بستگی به ترکهای مخصوصی دارد که دارای اندازه بزرگتر و دامنه بیشتری باشند. به خاطر اینکه بتوان تجمع ترکها را با دقت بیشتری دسته‌بندی نمود تجزیه آماری از اثرات ترک در تجمع ترک صورت می‌گیرد.



شکل ۳-۴۵. نمودار B-Scan

۳-۳-۷-۵ محاسبات اطلاعات جمع‌آوری شده (OFF-LINE)

نهایت انجام کارها بررسی اطلاعات جمع‌آوری شده برای مشخص کردن و درجه‌بندی ترک شناسایی شده است. فرآیند بررسی این نکات در حال حاضر به صورت نیمه اتوماتیک با مراحل ذیل است^۱: [?]

- خواندن و دست چین کردن اطلاعات

- شناسایی نشانه‌های شبه ترک‌ها

- درجه‌بندی نشانه‌های شبه ترک‌ها

در مرحله اول تمامی اطلاعات غیرضروری از جمع کل اطلاعات جمع‌آوری شده (ON-LINE) خارج می‌گردد. موقع آماده کردن اطلاعات (DATA) سیستم به طور اتوماتیک با به کار بردن ضابطه‌های مناسب مرحله دست چین کردن اطلاعات را انجام می‌دهد. برای مثال کلیه نشانه‌هایی که توسط دو عدد حس‌گر مشخص نشده است غیر مربوط تشخیص داده شده و مردود است. سایر نشانه‌ها با توجه به شکل لوله، مطالعه و ترسیم سطوحی که دو یا چند بار به دلیل هم پوشانی تحت پوشش گرفته‌اند مشخص می‌گردد. برای این سطوح نشانه‌هایی از قبیل طول، عرض، فاکتور هم‌پوشانی و نسبت سیگنال به نویز^۲ که به حداکثر دامنه و تعداد حس‌گرهایی که در جمع‌آوری اطلاعات شرکت داشته‌اند مربوط هستند را جمع‌آوری و در مرکز جمع‌آوری اطلاعات نگهداری می‌شود.

در مرحله دوم اطلاعات جمع‌آوری شده در مرحله اول طبقه‌بندی می‌شود. بر حسب مشخصات خواسته شده از وضعیت لوله، بررسی اطلاعات در هر ناحیه از لوله آغاز می‌شود. بر حسب تجربه‌های موجود طبقه‌بندی سطوح پوشش داده شده توسط این دستگاه به شرح ذیل است :

- غیر مربوط (هیچگونه انعکاس عادی دریافت نشده است).

- مربوط به شکل هندسی لوله (علائم دریافتی به دلیل شکل جوش، نوع نصب و غیره

است).

- مربوط به شکاف (علائم دریافتی به دلیل وجود غری و شیار و غیره است).

- غیر مشخص (علائم دریافتی شناخته شده نیستند).

خوشبختانه هر یک از این علائم، مشخصه وضعیتی هستند و با در نظر گرفتن مجموعه این علائم به همراه B-Scan توسط حس‌گرهای کناری و همچنین اطلاعات دریافتی از چپ و راست امکان این طبقه‌بندی به خوبی مقدور است.

دستگاه برای تشخیص ترکهای طولی جهت یافته یا هر گونه ترکی که در بدنه لوله ایجاد می‌شود کاربرد دارد. نکته مهم مربوط به تشخیص ناحیه جوش طولی روی خط لوله توسط دو حس‌گر است که کلیه اطلاعات به دست آمده از آن ذخیره می‌شود. دستگاه وضوح محوری^۳ را به طور کامل انجام می‌دهد.

در مرحله سوم کلیه علائم مربوط به هرگونه ترک شناخته شده و ضمناً از لحاظ شدت و ضعف و همچنین موقعیت (جنس فلز، مناطق گرما دیده در موقع جوشکاری، روی خود جوشکاری، داخلی یا خارجی) طبقه‌بندی می‌شود.

1.

² SIGNAL TO NOISE RATIO

³ AXIAL-RESOLUTION

شدت و ضعف هر گونه ترک کاملاً بستگی به عمق و طول آن دارد. طول آن مستقیماً از روی علائم ماوراء صوت با دقت کافی استخراج می‌شود حال آنکه عمق آن معمولاً توسط علائم ماوراء صوت عملی نیست و تحت بعضی شرایط یک تخمین کلی نیاز است. به هر حال وضعیت ترک معمولاً نسبت به جداره لوله و محل جوشکاری توسط ماوراء صوت B-Scan قابل محاسبه است.

بعد از پایان هر بازرسی، اطلاعات جمع‌آوری شده توسط افراد متخصص بررسی شده تا از توجه به اطلاعات زائدی که در تجزیه و تحلیل مؤثر نیست جلوگیری به عمل آید. سپس تجزیه و تحلیل اطلاعات به دست آمده توسط رایانه‌های پیشرفته انجام می‌گیرد. بعد از پایان تجزیه و تحلیل، داده‌هایی که حاوی کلیه شاخصهای مربوطه هستند به صورت فشرده گردآوری می‌شوند. برخی از اطلاعات به دست آمده به صورت مدارک مستدل تهیه و به همراه تصاویر رنگی نتایج B,C-Scan با اطلاعات دقیق از محل‌های عیوب گزارش می‌شود. گزارش نهایی شامل یک فهرست از نقص‌ها با مدارک مستدل و اطلاعات جامع طول خط به همراه گزارش کاملی از اتصالات خط لوله است (ساخت- ضخامت دیواره- طول لوله- محل جوش طولی و...).

مرحله دوم و سوم در حال حاضر توسط افراد خبره با بهره‌گیری از اطلاعات و همچنین نرم‌افزارهای موجود انجام می‌شود. هدف آن است که در آینده این روند تا حد ممکن به صورت اتوماتیک صورت گیرد.

۱-۳ جمع بندی

در این فصل به معرفی روش‌های مختلف تشخیص نقص پرداختیم. با گذر از روش‌هایی مثل تحلیل فشار یا وتوپک صوتی فیبر نوری و ... که هر کدام در جای خود معایب و مزیت‌هایشان بیان شد به روش‌های اصلی به کار رفته در خطوط لوله نفت (که همان روش‌های ILI هستند) رسیدیم. با توجه به اینکه پرداختن به روش‌های MFL و ET مجال بیشتری می‌طلبید به فصل بعد موکول شد. از آنجا که UT یکی از بهترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌های بازرسی داخل خط است کمی بر روی آن تأمل نمودیم و به بررسی تئوریک و سپس معرفی فناوری آن پرداختیم. در ضمیمه جدولی آورده شده که به مقایسه تعدادی از روش‌ها پرداخته است. (ضمیمه ۱۱)

فصل چهارم

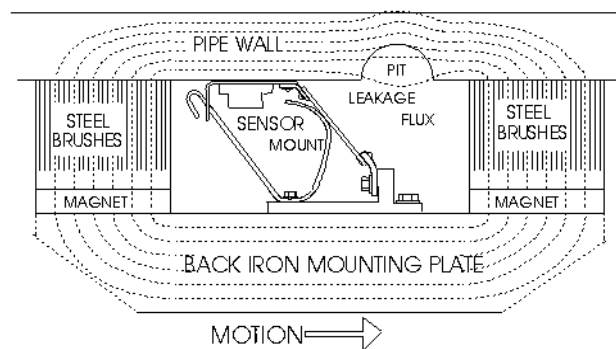
استفاده از نشتی شارمغناطیسی در تشخیص عیوب

خطوط لوله نفت و گاز

۱-۴ مقدمه [27]

شار نشتی مغناطیسی^۱ قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش ارزیابی جهت پیدا کردن نواحی خوردگی فلز در خطوط لوله گاز می‌باشد. MFL با اطمینان می‌تواند خوردگی فلز را آشکار سازی کند و گاهگاهی برای تعیین وضعیت هندسی و متالورژیکی نیز به کار می‌رود. ضایعات ناشی از خوردگی در خطوط لوله گاز و نفت زیرزمینی معمولاً توسط اندازه‌گیری سیگنال‌های MFL تولید شده شناسایی می‌شوند. اندازه سیگنال‌های MFL به عمق ضایعات خطوط لوله و به فشارهای خارجی که در نتیجه عبور سیال تولید می‌شوند حساس هستند. بنابراین برای اندازه‌گیری و بررسی دقیق این سیگنال‌ها باید طوری عمل کرد که این خطاها و تاثیرات نیز در نظر گرفته شود.

در این فصل ابتدا به معرفی و بررسی اصول و علمی که این تکنولوژی بر آن اساس شکل گرفته است می‌پردازیم و سپس چگونگی مطالعه و نتیجه‌گیری از اطلاعات را بررسی می‌کنیم.



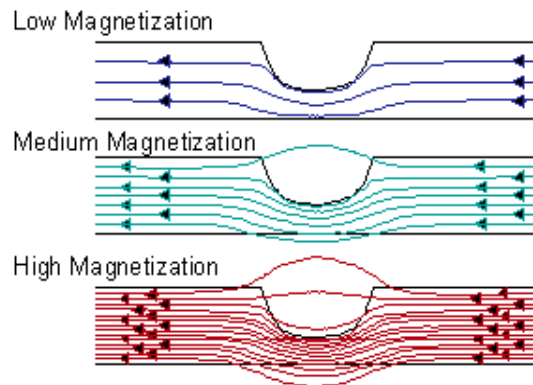
Schematic of magnetic flux leakage inspection detector

شکل ۱-۴. نمایی از شناساگر با استفاده از تکنیک نشتی شار مغناطیسی

^۱ Magnetic Flux Leakage (MFL)

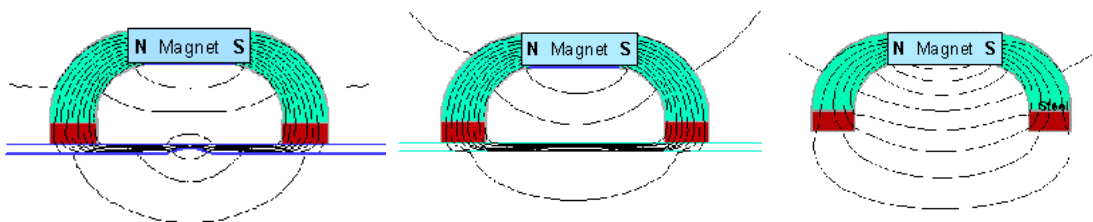
۲-۴ تکنولوژی MFL

[27], [28] شار نشتی مغناطیسی یک راه تشخیص وجود ماده فرومغناطیس بدون عیبی مانند استیل است. به این ترتیب که یک میدان مغناطیسی استیل یا هر ماده فرومغناطیس دیگر را به اندازه‌ای اشباع کند که توانایی تحمل میدان مغناطیسی اضافی را نداشته باشد. در صورت وجود یک ترک یا هر عیب دیگری مقداری شار مغناطیسی خارج و یا در اصطلاح به اطراف نشتی^۱ می‌کند. در آنجا است که حسگرهایی مانند پروبهای هال می‌توانند آن را تشخیص دهند و به عنوان سیگنال نشتی آن را اعلام کنند. یک نمونه از شار نشتی را در محیط‌های اطراف در نتیجه وجود یک عیب در یک استیل می‌توان در شکل ۲-۴ مشاهده کرد.



۲-۴. تصویری از نشتی شار مغناطیسی

MFL با یک آهنربا شروع به کار می‌کند. قطب‌های آهنربا بر قطعات فلزی و سایر قطبها نیرو وارد می‌کنند. این نیروی جدید توسط میدان مغناطیسی اعمال می‌گردد. خطوط فلو برای نشان دادن توان و جهت نیروی یک میدان مغناطیسی به کار می‌روند. آنها کمیت‌های تنسوری^۲ (مقادیری که هم دامنه و هم جهت دارند) می‌باشند و به موازات جهت نیروی مغناطیسی رسم می‌شوند. فاصله بین خطوط فلو بیانگر چگالی فلو است. در حقیقت تعداد بیشتر خطوط فلو بیانگر وجود میدان مغناطیسی قوی است.

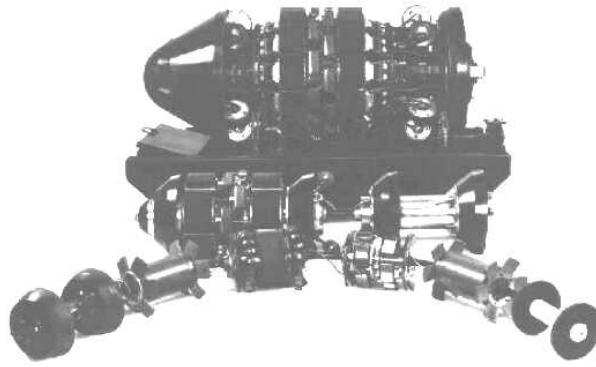


۳-۴. تصویری از خطوط فلو

۱-۲-۴ اجزاء و مؤلفه‌های ارزیابی MFL [27], [29]

دلیل استفاده از تکنولوژی MFL برای توپکرانی کاهش انرژی و توان لازم با استفاده از مواد مغناطیس دائم است. به همین دلیل توپک می‌تواند خود را برای عملیات دیگر ذخیره کند. روش ماوراء صوت و موارد دیگر نیاز به قدرت و توان بیشتری دارند. از سوی دیگر توپک‌های بزرگتر قطعا باتری‌های بزرگتری دارند.

¹ Leakage
² Tensor

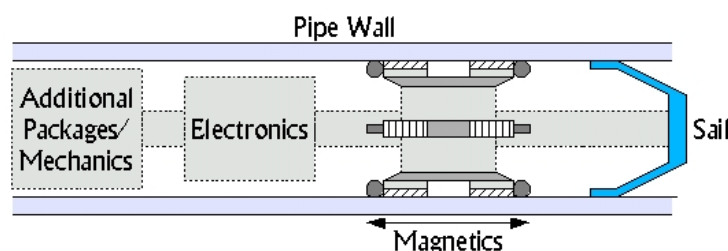


۴-۴. انواع ادوات MFL

ادوات MFL برای ارزیابی خطوط شامل چندین واحد مجزا هستند که همه در یک واحد جای می‌گیرند و واحدهای مجزاء خود یک سیستم¹ هستند. این سیستم‌ها یا واحدهای مجزائی هستند که توسط اتصالات محکمی به هم وصل شده‌اند و یا همگی داخل یک مجموعه واحد قرار دارند.

شکل ۴ سه نوع از ادوات MFL را نشان داده است. دستگاه واقع در پیش زمینه یک سیستم قطعه قطعه است که در آن شش سیستم جداگانه توسط کانکتورهای قابل انعطاف به هم وصل شده‌اند که امکان مبادله انرژی و داده بین سیستم‌های مختلف را فراهم می‌کند. سیستم نشان داده شده در پس زمینه یک سیستم یکپارچه که در آن تمامی سیستم‌ها در داخل یک سیستم واحد قرار دارند را نشان می‌دهد و سیستم سوم نیز یک سیستم دو تکه است. ادوات تک سیستم معمولاً بلندتر و دارازتر از ادوات چند سیستم هستند. معمولاً طول ادوات سیستم بین ۷ تا ۱۰ فوت و ادوات چند سیستم بین ۷ تا ۱۶ فوت تغییر می‌کند. حتی طول بعضی از سیستم‌های ویژه و مخصوص تا حدود ۳۰ فوت می‌رسد.

خم‌های خط لوله معمولاً ماکزیمم طول یک توپک را و یا طول قطعات آن را محدود می‌کنند. زیرا سیستم‌های بلندتر نمی‌توانند از داخل خم‌ها و گوشه‌های تیز عبور کنند. توپک‌های چند تکه معمولاً در خطوط با قطر کمتر استفاده می‌شوند که در این لوله‌ها نیازهای فاصله و خمها استفاده از توپک‌های یک تکه بلند را منتفی می‌کند و همچنین این توپک‌های چند تکه در لوله‌ها با گوشه‌های تیز را به کار می‌روند. (لوله‌ها با قطر بزرگتر). هر دو سیستم توپک شامل زیر سیستم‌هایی هستند:



۴-۵. تصویری از توپک بازرسی

¹Rigid package

۴-۲-۱-۱ سیستم درایو یا جلو برنده

فشار گاز وارده بر کلاهک توپک باعث به جلو راندن کلاهک توپک می‌گردد که آن هم خودبه خود باعث کشیده شدن بقیه اجزاء سیستم می‌گردد. مقدار فشار لازم بر حرکت توپک در طول لوله بستگی به عمر کلاهک و شرایط آن و نیز به وزن و توان مغناطیس کننده توپک و خصوصیات فیزیکی لوله از قبیل خمها - گوشه‌ها - تورفتگی‌ها - و شرایط داخلی لوله و خشکی لوله دارد.

۴-۲-۱-۲ سیستم مغناطیس کننده

در این قسمت از مگنت‌های دائمی و یا مگنت‌های الکتریکی استفاده می‌شود. در دو انتهای مگنت جاروبک‌های فلزی و یا صفحات فلزی قرار دارند که با اصطکاک به دیواره مالیده می‌شوند و میدان مغناطیسی را به داخل دیواره لوله منتقل می‌کنند.

۴-۲-۱-۳ سیستم حس‌گر

یک سیستم حس‌گر میدان نشتی حاصله را ثبت می‌کند. تغییر در میدان نشتی بیانگر وجود یک خرابی است.

۴-۲-۱-۴ سیستم ثبت و ضبط داده‌ها و تحلیل آنها

این سیستم عمل ضبط و پردازش داده‌های اندازه‌گیری شده از حسگرها را برای عملیات بعدی بعهده دارد. این سیستم یا آنالوگ است و یا دیجیتال.

۴-۲-۱-۵ سیستم تغذیه

اغلب توپک‌های MFL از باتری‌های قابل شارژ فراهم نمودن تغذیه‌های حسگرها - جمع‌آوری داده‌ها و سیستم ثبت اطلاعات استفاده می‌کنند.

۴-۲-۱-۶ راه اندازی سیستم ارزیابی

قرار دادن یک توپک در داخل لوله و درآوردن آن نیاز به تجهیزات ویژه‌ای دارد که اغلب پرتاب کننده^۱ و دریافت کننده^۲ گفته می‌شود و معمولاً در ایستگاه‌های فشار و یا سایر جاهایی که به راحتی حمل و نقل شده و لوله گذاری آن آسان باشد قرار داده می‌شوند. در طول ارزیابی کنترل سرعت توپک برای به دست آوردن نتایج بهتر مهم است و همچنین با استفاده از حس‌گرهای خارجی می‌توان موقعیت توپک را در داخل لوله تعیین کرد. (این عمل زمانی که توپک در داخل لوله کم شود بسیار تعیین کننده است. قبل از خارج کردن توپک از لوله ابتداء اجزاء آن از نظر سالم بودن کنترل می‌شوند و سپس چند نمونه از داده‌ها جمع‌آوری شده امتحان می‌گردند که آیا عملیات به خوبی انجام شده است یا نه و سپس در صورت صحیح بودن عملیات داده‌ها جهت کارهای تکمیلی و آنالیز خرابی از سیستم خارج می‌شوند.

فاکتورهای متعددی در دقت آشکار سازی و تعیین مشخصه دخیل هستند این فاکتورها می‌توانند در ۵ بخش گروه بندی شوند:

^۱ Launcher

^۲ Receiver

مغناطیسی کنندگی: رابطه بین مغناطیس کننده- جنس لوله و میدان مغناطیسی بکار رفته.

نشت: روابط بین میدان مغناطیسی بکار رفته و خرابی و میدان نشتی

اندازه‌گیری: رابطه بین میدان مغناطیسی نشتی و حس‌گرها و سیگنال اندازه‌گیری شده

ثبت و نمایش: رابطه بین دقت ثبت داده‌ها و متدولوژی نمایش

تحلیل: فرآیند بکار گرفته شده برای رده بندی انواع خرابی‌ها و تعیین مشخصه هندسی خوردگی فلز از روی

سیگنال اندازه‌گیری شده.

خروجی و نتایج هر دو قسمت بر ورودی و نتایج مرحله بعدی تاثیر می‌گذارد. به علاوه تمام این ۵ مرحله

فوق محدودیت‌های تئوریک دارند. در طراحی سیستم‌های ارزیابی MFL تجارتي طراحان سعی می‌کنند با در

نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی به همان حدود تعریف شده برسند.

۲-۲-۴ اهمیت مغناطیس کنندگی [27]

سیستم مغناطیس کنندگی در یک توپک MFL، یک میدان مغناطیسی را به جداره لوله اعمال می‌کند و

این میدان در اثر برخورد با خرابی‌های جداره لوله میدان نشتی می‌کند، اهداف طراحی یک سیستم مغناطیس

کنندگی عبارتند از:

- باید به حد کافی قوی باشد تا بتواند مقدار فلوی نشتی ناشی از خرابی لوله را اندازه‌گیری کند.
- باید از سطح داخل تا سطح خارج لوله یکنواخت باشد تا سیگنال اندازه‌گیری شده یک رابطه خطی با مشخصات خرابی داشته باشد.
- باید در طول لوله دارای دامنه پایداری باشد تا اندازه‌گیری‌های فلوی نشتی قابل مقایسه با اندازه‌گیری‌های محل‌های متفاوت در طول یک ارزیابی باشند. بطور کلی آشکارسازی قوی یا تحت تاثیر قدرت میدان قرار دارند و زمانی که یک تعیین مشخصه خوب لازم داریم یک میدان قوی - یکنواخت و پایدار لازم خواهد بود. میدان اعمالی با رابطه بین سیستم مغناطیس کنندگی و جنس لوله تعریف می‌شود و تغییرات به عنوان پارامترهای هنگام کار از قبیل سرعت و کنش معرفی می‌شوند.

۳-۲-۴ خصوصیات میدان مغناطیسی و عوامل موثر در اندازه آن [27]

رابطه بین میدان مغناطیسی اعمالی و چگالی فلو در یک خط لوله غیر خطی است. در سطوح پایین میدان

اعمالی، یک تغییر کوچک در میدان اعمالی تغییرات شدیدی در فلو ایجاد می‌کند. در سطوح میانی، رابطه

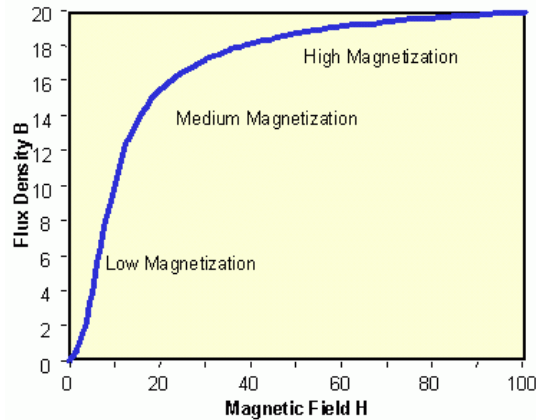
شدیداً غیر خطی است و در سطوح بالاتر مغناطیس کنندگی تغییرات بزرگ در میدان اعمالی تغییرات جزئی در

فلو ایجاد می‌کند. سیستم MFL برای شناسایی احتیاج به این دارد که در محل خرابی لوله، فلوی مغناطیسی

به سمت بیرون نشت کند. در حالیکه در وجود یک خرابی تضمین داشتن فلوی نشتی نیست برای مثال

خوردگی سبب کاهش مقدار فلوی عبوری از لوله می‌شود. اما کاهش ماده به تنهایی نمی‌تواند سبب فلوی نشتی

شود زیرا آنچه از لوله باقی مانده ممکن است هنوز قادر به عبور کل فلوی مغناطیسی باشد.



۴-۶. منحنی مغناطیس کنندگی

یک فاکتور ضروری و لازم برای داشتن فلوی نشتی، تغییر در قابلیت نفوذ پذیری است. قابلیت نفوذ پذیری، اندازه‌ای از توانایی فلوی مغناطیسی در خارج شدن یا داخل شدن به یک ماده مغناطیسی گفته می‌شود و به شیب منحنی مغناطیسی کنندگی بستگی دارد. (به ضمیمه ۱ رجوع شود). کاهش ضخامت جداره که با کاهش نفوذ پذیری تلفیق شده است سبب می‌شود تا فلوی مغناطیسی از مسیرهای دیگری جریان پیدا کند که یک مسیر خارج از ماده لوله است یعنی فلوی نشتی در کنترل فلوی نشتی، قسمت و عبارت اشباع اغلب برای رساندن این موضوع که نفوذ پذیری در حال کاهش و نشت فلوی در حال اتفاق افتادن است، بکار می‌رود. منظور از اشباع، سطحی از مغناطیس کنندگی است که افزایش قدرت میدان تغییرات قابل ملاحظه‌ای در چگالی فلوی ایجاد نمی‌کند و این زمانی است که یک قله در نفوذ پذیری داریم و آن طرف خم منحنی مغناطیس کنندگی، اتفاق می‌افتد.

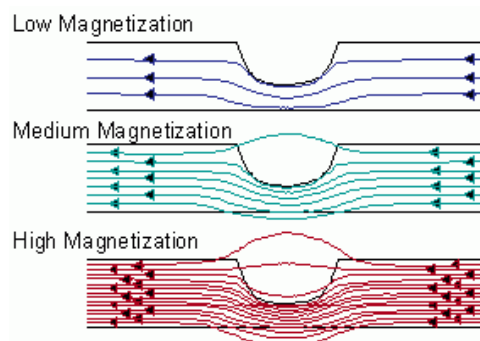
با استفاده از این تعریف منحنی اشباع کنندگی به ۳ قسمت تقسیم می‌شود.

سطح مغناطیس کنندگی کم: زیر زانوی منحنی مغناطیس کنندگی و اشباع است.

سطح مغناطیس کنندگی میانی: در زانوی منحنی مغناطیس کنندگی و نزدیک اشباع است.

سطح بالای مغناطیس کنندگی: بالای زانوی منحنی و قسمت اشباع است.

همان طوری که انتظار می‌رود قدرت آهن‌ربا قوی‌ترین اثر را در میدان اعمال می‌کند. سیستم‌های مغناطیس کنندگی موجود، ابزار آلات کنترل خوردگی معمولاً طوری طراحی می‌شوند تا اشباع مغناطیس در لوله ایجاد شود. به طوریکه هرگونه کاهش جرم و تغییر در ضخامت لوله باعث خواهد شد تا فلوی نشتی ایجاد کنند.



۴-۷. نمایش چگالی شار مغناطیسی در هر سه قسمت از منحنی مغناطیس کنندگی

عوامل موثر بر اندازه میدان مغناطیسی اندازه گیری شده عبارت است از:

- کوپلاژ (تزویدج)¹: جاروبک‌ها برای تزویدج انرژی مغناطیسی بداخل لوله بکار می‌رود. چگالی فلوی به کار برده شده به راندمان کوپلاژ ما بین مجموعه مغناطیس کننده و لوله و ضخامت دیواره بستگی دارد. جاروبک‌ها به نسبت فولاد جامد برای کوپلاژ انرژی مغناطیسی در دیواره لوله دارای بازده کمتری هستند و جاروبک‌های کوتاهتر میدان‌های مغناطیسی شدیدتری ایجاد می‌کنند. جاروبک‌های بلندتر انعطاف‌پذیری بهتری در بحث در مورد موانع خطوط لوله از خود نشان می‌دهند. خم‌ها سبب کاهش بازده کوپلاژ می‌گردند که باعث چگالی فلوی اعمال شده خواهد شد. اگر این چگالی فلوی اندکی بیشتر از حد اشباع باشد، کاهش اندکی کوپلاژ باعث کاهش سطح به کار رفته به زیر حد اشباع خواهد شد.

- فاصله اندازه‌گیری بین قطب‌ها²: فاصله کم بین قطب‌ها سطوح مغناطیس کنندگی بالاتری تولید خواهند کرد و امکان بررسی خمهای تندتر را فراهم می‌کند، اما سبب می‌شوند که کار آنالیز و تحلیل سیگنالها، مشکلتر و سخت‌تر شود. فاصله گذاری زیاد بین قطبها باعث می‌شود که میدان مغناطیسی یکنواخت‌تر شده و نواحی بیشتری را برای قراردادن حس‌گرها در دسترس بگذارد و نیز برای فاصله گذاری بیشتر قطب‌ها مگنت‌های قویتری لازم خواهد بود.

- سرعت³: تمام سیستمهای الکتریکی، از ماشینها گرفته تا ایستگاه‌های تولید انرژی همگی براساس این اصل که یک میدان مغناطیسی متغیر در یک هادی الکتریکی جریانی در هادی القاء خواهد کرد کار می‌کنند. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که با حرکت توپک در لوله، جریان‌هایی در لوله القاء خواهد شد. زمانی که سرعت افزایش می‌یابد سطوح مغناطیس کنندگی اعمال شده کاهش خواهد یافت. ما حداکثر تغییرات در فلوی نشتی را در سرعت‌های 4-6m/h شاهد خواهیم بود. (به ضمیمه ۲ رجوع کنید)

پس ماند مغناطیس کنندگی⁴: این مغناطیس کنندگی، نتیجه میدان مغناطیسی است که در یک لوله از ارزیابی قبلی مانده است. این مغناطیس می‌تواند بر سطح مغناطیس کنندگی ارزیابی جریان تاثیرگذار باشد. مخصوصاً زمانی که سطوح مغناطیس کنندگی کم تا متوسط استفاده می‌شود. (به ضمیمه ۳ مراجعه کنید). بنابراین برای کاهش اثرات میدانهای باقیمانده و همچنین اثرات تنش، تغییرات خواص مواد و سرعت و ... از سطوح بالای مغناطیس کنندگی برای ارزیابی خوردگی استفاده می‌کنند.

۳-۴ تاثیر نشتی بر میدان مغناطیسی [27]

زمانی که یک میدان مغناطیسی در یک لوله با یک خرابی از قبیل خرابی کاهش فلز⁵، فلو منحرف شده و یا به اصطلاح نشت می‌کند حس‌گرها، قسمتی از این فلو نشتی را اندازه‌گیری می‌کنند. (قسمتی از فلوی نشتی داخل لوله) فلوی نشتی اطراف یک خرابی می‌تواند مشابه شکل نشتی باشد اما معمولاً همان شکل را دارا نمی‌باشد. بنابراین شکل میدان نشتی لزوماً نشانگر خوبی از شکل خرابی نیست. همچنین محل خرابی برای مثال خرابی در درون لوله یا بیرون از لوله بر فلوی نشتی اثر می‌گذارد. در شکل ۸ مثالی از فلوی نشتی برای یکی از شکلهای خرابی آورده شده است. شکل زیر شکل شار نشتی را برای یک حفره به شکل نیم کره نشان می‌دهد.

¹ Coupling

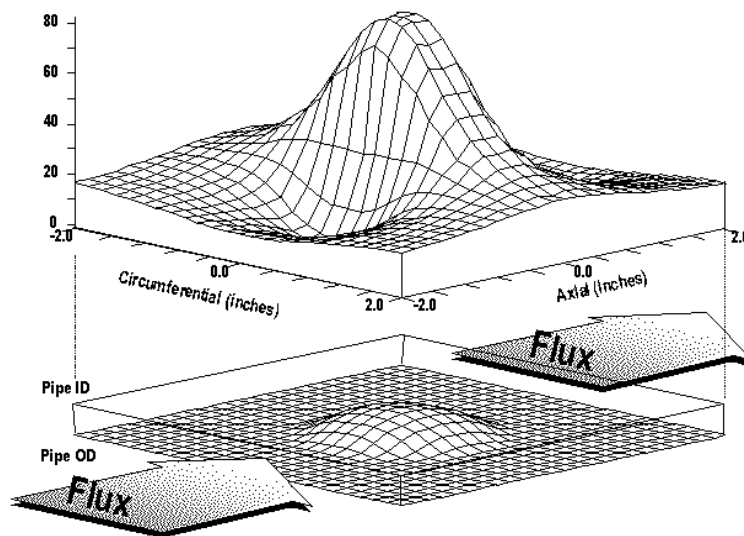
² Pole Spacing

³ Velocity

⁴ Remanent Magnetization

⁵ Metal Loss

نیمه بالای شکل مولفه محوری میدان مغناطیسی و نیمه پایین سایز و شکل حفره را نشان می‌دهد. فلش نشان داده شده جهت خطوط شار مغناطیسی را نمایش می‌دهد



۴-۸. نمایش شار ناشی برای یک حفره

۴-۴ موضوعات ارزیابی [27]

ارزیابی‌های MFL معمولاً برای آشکارسازی و تعیین محل، تعیین مشخصات کاهش ضخامت و سایر خرابی‌ها در خطوط انتقال گاز به کار می‌روند. خرابی‌های متفاوتی در خطوط لوله وجود دارند و تمامی این عیوب توسط MFL نمی‌توانند آشکار و یا تعیین مشخصه گردند.

MFL اغلب اوقات برای آشکارسازی و تعیین اندازه کاهش ضخامت بکار می‌رود. شدت یک ناحیه نازک شده تابعی از موقعیت و مشخصات هندسی^۱ آن و وضعیت لوله و خواص مکانیکی آن است. معیارهای استاندارد مثل ASMEB31G و RSTRENG برای تخمین افت فشار فلو در نواحی نازک شده ایجاد و توسعه داده شده‌اند. معیارهای دیگری نیز برای انواع خرابی‌های توسعه داده شده و یا در حال ایجاد هستند. درک و فهم معیار خط^۲ در دقت آشکار سازی و تعیین مشخصه در ابزارهای MFL مهم است.

نیازهای آشکارسازی و تعیین مشخصه بایستی براساس طرح شرایط خط لوله و نگهداری اپراتور و استراتژی تعمیر تعیین گردند. بعضی از اپراتورها علاقه‌مند به تشخیص محل‌هایی هستند که خرابی در آنجا شکل می‌گیرد و آنها تاکید و افری در آشکار سازی خرابی‌های جزئی دارند که احتمالاً با گذشت زمان به خرابی‌های اساسی تبدیل خواهند شد. برخی دیگر بیشتر علاقه‌مند به تشخیص خرابی‌های بزرگ که ممکن است در سلامت جریان عبوری تاثیر گذار باشند دارند و تاثیر بیشتر روی دقت تعیین مشخصه و اندازه دارند. معمولاً در چنین سیستم‌هایی قابلیت آشکار سازی بالایی لازم است. مخصوصاً برای خرابی‌هایی که سلامتی خط لوله را تهدید می‌کنند. دقت تعیین مشخصه خوب نیز اغلب زمانی لازم است که نتایج ارزیابی برای اولویت بندی مناطق برای جهت انجام بازرسی و یافتن راه چاره و جبران سازی دارند.

تعیین محل دقیق خرابی برای تعمیرات و تشخیص محل لازم است. شناسایی خصوصیات خط لوله از قبیل حلقه‌های جوش، تغییرات ضخامت دیواره، خمها و گوشه‌ها می‌توانند کمک قابل توجهی در تعیین محل

¹ Geometry
² Lailuse Criteria

خرابی‌ها و تعیین دقت مربوطه بکنند. معمولاً نیازهای دقت تعیین محل بستگی به مشکلات چنین بررسی‌هایی را دارد.

False calls همان علامتی هستند که به عنوان خرابی به نادرستی تشخیص داده می‌شوند. چنین اشتباهاتی می‌توانند با شناسائی صحیح خصوصیات خط لوله حداقل شوند. Missed calls دقیقاً برعکس False calls می‌باشند و حتی مهمتر و جدی‌تر هستند و می‌توانند از نقاط کور ناشی از سرعت بالا، ایرادات مکانیکی و خرابی حس‌گرها و یا سیستم جمع‌آوری اطلاعات باشند. معمولاً یک Trade off یا رابطه‌ای بین Missed calls و False calls وجود دارد. (Trade off) به رابطه‌ای گفته می‌شود که طرفین در ازاء چیزی که بدست می‌آورند بایستی چیزی را از دست بدهند مثلاً در یک آمپلی‌فایر اگر بهره افزایش یابد پهنای باند سیستم کاهش می‌یابد و برعکس).

۴-۵ خرابی‌های کاهش فلز (Metal loss) [27]

مقدار فلویی که به خارج از لوله نشت می‌کند بستگی به هندسه (شکل فیزیکی) خرابی دارد. متغیرهای اولیه‌ای که بر نشت فلو تاثیر گذار هستند همان‌هایی هستند که حجم کاهش فلز را بیان می‌کنند. عمق: ماکزیمم ضخامتی از لوله را که برداشته شده است. (طی فرآیند خوردگی و ...)
طول: گسترش محوری خرابی
عرض: گسترش محیطی خرابی
سایر متغیرهایی که بطور قابل ملاحظه‌ای بر نشت فلو اثر می‌گذارد عبارتند از:
تیزی: ^۱ شکل گذار از شکل طبیعی ضخامت دیواره به ماکزیمم عمق
گردی: ^۲ شکل مسطح (همانطوریکه در یک صفحه محوری - قطری دیده می‌شود)
جهت: ^۳ ترکها و شکافهای هم جهت با میدان اعمال شده قابل آشکارسازی نیستند و ترکهایی که میدان را قطع می‌کند گاهی قابل آشکارسازی هستند که آن هم بستگی به سایر پارامترهای هندسی خرابی دارد. محل خرابی‌های مجاور: ^۴ محل خرابی‌های مجاور بطور کلی در نوع فلوی نشتی تاثیر می‌گذارد.
تنش و کرنش: ^۵ تنش و کرنش باعث می‌شوند که یک ماده راحت‌تر و یا مشکل‌تر مغناطیسی شوند که سبب تغییر توزیع فلو در اطراف خرابی می‌شوند.

۴-۵-۱ عمق [27]

دامنه یک سیگنال MFL قوی به عمق خرابی بستگی دارد. عمق خرابی یا بعبارت دیگر مقدار ماکزیمم دیواره برداشته شده، معمولاً به صورت درصدی از ضخامت اسمی دیواره بیان می‌گردد شکل ۹ سیگنال‌های MFL اندازه‌گیری شده در جهت محوری را به عنوان تابعی از عمق بهمراه طول و عرض و سایر ثابت متغیرهای خرابی را نشان می‌دهد.

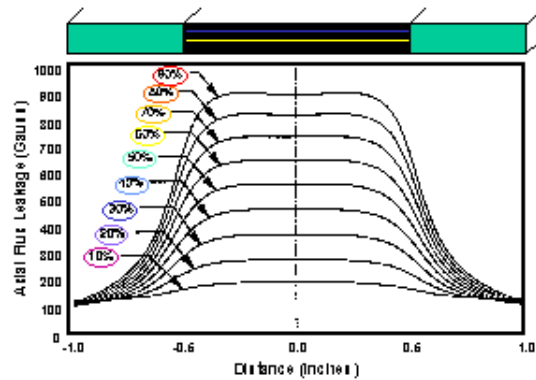
¹ Sharpness

² Roundness

³ Orientation

⁴ Locations of adjacent defects

⁵ Stress and strains



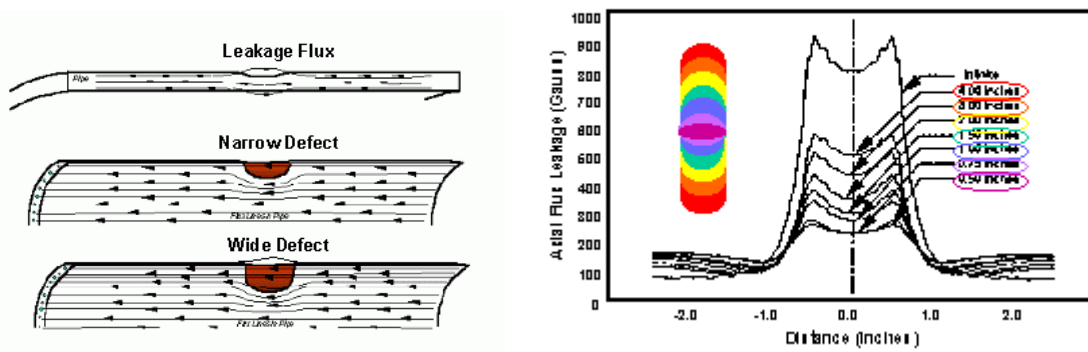
۴-۹. نمودار سیگنالهای MFL تابعی از عمق خرابی

خروجی یک حس گر تنها در طول مرکز یک سری از خرابی‌های ناشی از کاهش فلز نشان می‌دهد که نشت فلو متناسب با عمق است. البته با ثابت نگه داشتن سایر متغیرها زمانی که رابطه بین عمق و دامنه تقریباً خطی می‌شود اثر قابل ملاحظه سایر متغیرها روی دامنه سیگنال، این فرض و ایده را ملغی می‌کند. پیش‌گوئی‌های دقیق عمق احتیاج به فهم و درک رابطه بین دامنه سیگنال و عمق خرابی دارند. همچنین فهم چگونگی تاثیر سایر پارامترهای روی دامنه نیز لازم است. بنابراین تاثیرات آنها می‌تواند در این تحلیل به حساب آورده شود. (به ضمیمه ۴ رجوع شود).

۴-۵-۲ عرض

فلوی مغناطیسی همیشه تمایل به ماندن در لوله را دارد. بنابراین فلو در جهت محیطی گسترده و پخش می‌شود که باعث می‌گردد میدان فلوی نشتی کمی بیشتر از خود خرابی بصورت بیضوی شود. این اثر بنام Blooming معروف است. زمانیکه مسیر اطراف یک خرابی بزرگ می‌شود، مثلاً برای خرابی‌های که عریض‌اند (چندین برابر ضخامت اسمی دیواره)، اثرات پیشرفت کننده^۱ کمتر قابل توجه قرار می‌گیرد و بیشتر فلو از مرکز خرابی نشت پیدا می‌کند. خرابی‌های باریکتر سبب می‌شوند که مقدار فلوی نشتی کمتری در مقایسه با نوع عریض‌تر با همان عمق و سایر پارامترهای هندسی، از خرابی جریان یابد. شکل سمت راست خروجی یک حس گر تنها در طول مرکز یک سری از خرابی‌های کاهش فلز که از رنج ۰,۲۵ اینچ تا کل قطر (گسترش نظری) را نشان می‌دهد. همانطور که خرابی باریکتر می‌شود فلوی نشتی شدیداً افت پیدا می‌کند. (به ضمیمه ۵ رجوع شود).

^۱ Blooming

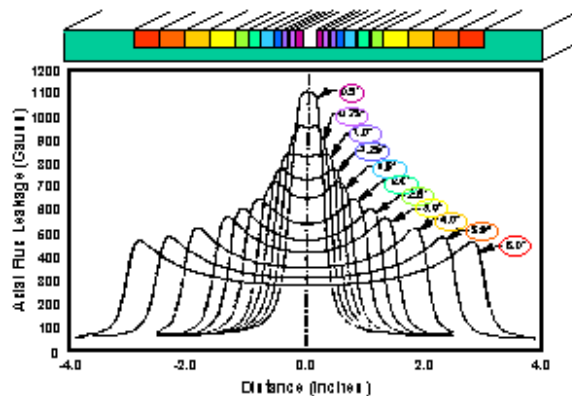


شکل ۴-۱۰. نمودار نمودار سیگنالهای MFL به عنوان تابعی از عرض شکل ۴-۱۱. شار ناشی در حضور نقص

اثرات عرض همچنین به عمق خرابی نیز بستگی دارد. اثر پیشرفت کننده یا blooming برای خرابی‌های با عمق کمتر، کمتر از خرابی‌های با همان عرض ولی با عمق بیشتر می‌باشد.

۴-۵-۳ طول

طول میدان فلوی ناشی با طول خرابی در ارتباط است. شکل زیر خروجی یک تک حسگر را در طول مرکز یک سری از خرابی‌های ناشی از کاهش فلز از رنج ۰/۲۵ تا ۶ اینچ را نشان می‌دهد.



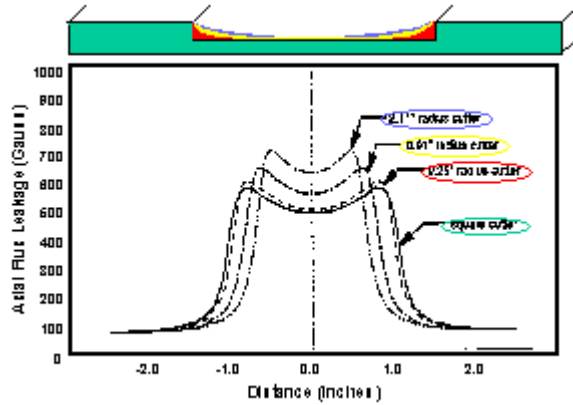
شکل ۴-۱۲. نمودار سیگنالهای MFL بر حسب طول خرابی

این شکل نشان می‌دهد که طول خرابی بر دامنه سیگنال فلوی ناشی تاثیر می‌گذارد و خرابی‌های بلندتر مقادیر کمتر فلوی ناشی را دارا هستند. این یک خاصیت مهم و قابل توجه نیست فلو است زیرا که خرابی‌های بلندتر اثرات تهدید کننده بزرگتری بر سلامت خط لوله نسبت به خرابی‌هایی با طول کمتر دارند. یک رویه تحلیل سیگنال ساده که بزرگترین دامنه فلوی ناشی را مشخص می‌کند ممکن است خرابی‌های با شدت بیشتر را کمتر از حد لازم نشان دهد.

متغیرهایی که اثرات قابل توجهی بر دقت طول می‌گذارند عبارتند از تیزی و شکل مسطح که در دو قسمت بعدی بحث خواهد شد. عمق و عرض تاثیر زیادی در تخمین طول خرابی ندارند. (به ضمیمه ۶ رجوع شود).

۴-۵-۴ تیزی

تیزی بعنوان زاویه گذر از ضخامت دیواره معمولی به ماکزیمم عمق تعریف می‌شود. شکل زیر یک سری از سیگنال‌های MFL محوری را نشان می‌دهد که در طول چهار خرابی با تیزی‌های متفاوت اعمال شده‌اند.



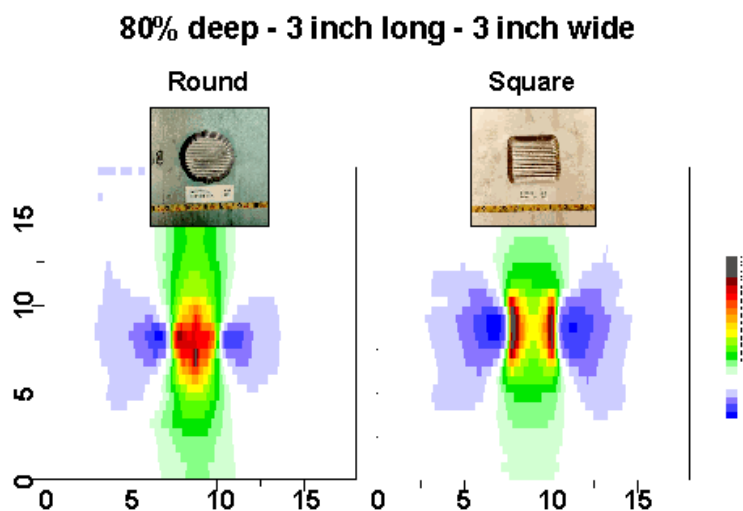
۴-۱۳. نمودار سیگنال‌های MFL محوری بر حسب تیزی

دامنه سیگنال برای خرابی‌های ریز و تدریجی با حجم خرابی یکسان بیشتر از دامنه خیلی از خرابی‌های تیز می‌باشد. بطور کلی طول سیگنال فلوی نشتی رابطه بهتری با طول متوسط خرابی نسبت به طول سطح یک خرابی کاهش فلز دارد. طول متوسط با عبارت زیر بیان می‌شود.

عمق / (مساحت سطح مقطع) = طول متوسط

بنابراین تفاوت بین متوسط و طول واقعی سطح می‌تواند هنگام تلاش برای همساز کردن اندازه‌گیری‌های میدان با نتایج ارزیابی شده مشکل ساز شود. (به ضمیمه ۷ رجوع شود).

۴-۵-۵ کاهش فلز بصورت مدور



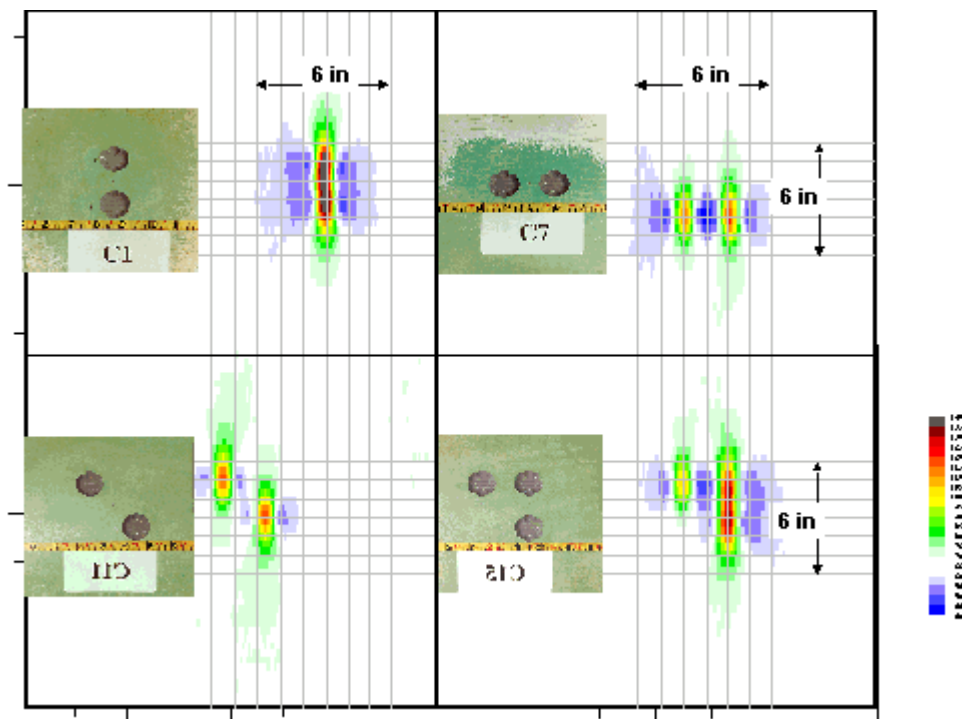
۴-۱۴. نمودار سیگنال‌های نشتی در حضور انواع خوردگی‌های محوری

خرابی‌های مربعی شکل مانند خرابی‌هایی که گاهاً نزدیک فاصله هوایی در پوشش‌های پیچیده شده دیده می‌شوند می‌توانند الگوهای فلوی نشستی را تولید کنند که دارای سیگنال‌های قوی در سطوح لبه‌ها و پایین (در مرکز) را دارا هستند. اینها می‌توانند اشتباهاً به عنوان دو خرابی مجزاء که باعث تشخیص خرابی نادرستی در رابطه با ارزیابی گردند.

۴-۵-۶ تعیین نوع خوردگی

محل نقص و خرابی در واقع در جداره داخلی یا خارجی بر میدان فلوی نشستی اثر می‌گذارد. خوردگی از داخل در عمق یکسان نسبت به خوردگی خارجی، سیگنال‌های قویتری ایجاد می‌کنند. اغلب سازندگان ابزار ارزیابی برای تعیین اینکه خرابی در جداره داخلی یا بیرونی است، سیستم‌های حس‌گر جداگانه را در قسمت حس‌گر تعبیه می‌کنند.

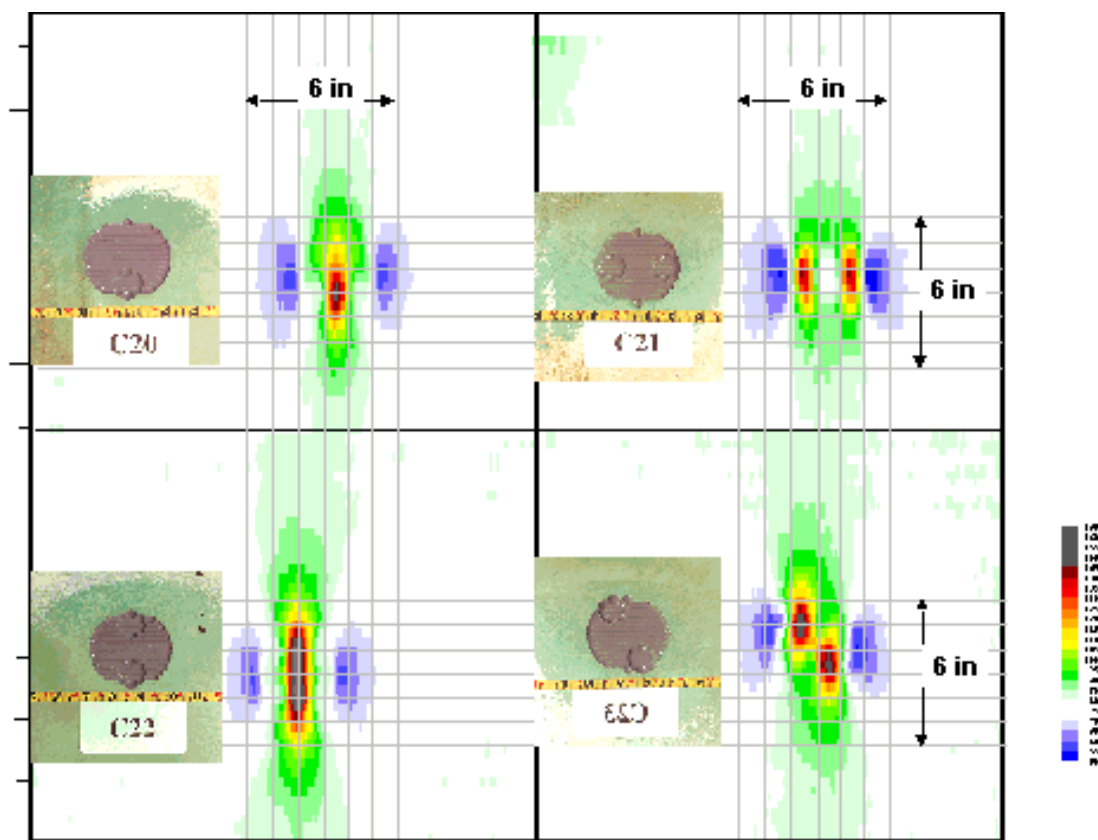
همجواری و نزدیکی خرابی‌ها و فرورفتگی‌ها در جایگاه خوردگی‌های بزرگتر در نشت فلو تاثیر می‌گذارد که می‌تواند باعث شود که محاسبات تعیین شکل هندسی از دقت لازم برخوردار نشود. دو شکل اثرات این کنش متقابل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵. ترکیب‌های متفاوتی از قرارگرفتن خرابی‌ها

در شکل ۴-۱۵ چند فرورفتگی به طول ۱ اینچ و عرض ۱ اینچ و عمق ۵۰٪ در ترکیبات متفاوتی مرتب و کنار هم قرار داده شده‌اند. فرورفتگی‌های واقع در جهت حلقوی (گوشه بالاسمت چپ) بالاترین اثر متقابل را دارند. این جفت فرورفتگی‌ها که به نظر یک فرورفتگی واحد عریض به نظر می‌رسند. برعکس فرورفتگی‌های واقع در جهت محوری (بالا سمت راست) به سادگی قابل تشخیص‌اند. حفره‌های واقع در جهت قطری (پائین سمت چپ) کمترین اثر را دارند. حفره‌های نشان داده شده در شکل پائین سمت راست ترکیبی از دو اثر بالا نشان می‌دهند.

در شکل ۴-۱۶ چند فرورفتگی به طول ۱ اینچ و عرض ۱ اینچ و ۵۰٪ عمق در داخل لوله‌ای بطول ۳ اینچ و عرض ۳ اینچ و یک وصله ۲۰٪^۱ نشان داده شده‌اند. این ترکیب و ساختار شبیه آنچه که در اغلب شرایط عملی ارزیابی پیش می‌آید است.



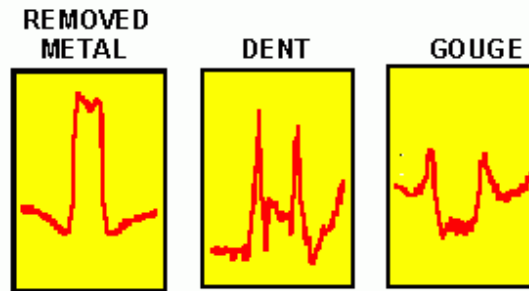
۴-۱۶. سیگنالهای ناشی از ترکیبات مختلف قرارگیری فرورفتگی و خوردگی

شناسایی فرورفتگی‌های تکی واقع در داخل یک خوردگی بزرگ مشکل است. (این شکل را با شکل قبلی مقایسه کنید.) تا زمانی که این حفره‌ها و فرورفتگی‌ها تغییراتی را در سیگنال دریافتی از خوردگی اعمال می‌کنند. تحلیل روی هم سیگنال‌ها پیچیده‌تر خواهد بود. تشخیص و طبقه‌بندی پارامترهای خرابی‌های متفاوت در این نوع تصاویر بسیار مشکل است.

۴-۵-۷ سایر انواع خرابی‌ها

MFL قادر به آشکارسازی انواع مختلف از خرابی‌ها است که شامل نازک شدن جداره و تورفتگی‌ها و صدمات مکانیکی است. لیکن سیگنال MFL بطور مطمئن نمی‌تواند تمام خرابی را آشکار کند. آشکارسازی به نحوه طراحی توپک، پیچیدگی فرآیندهای آنالیز و تحلیل که در زیر بحث شده است دارد. سیگنالهای MFL حاصله از نازک شدن جداره - فرورفتگی‌ها - صدمات مکانیکی بطور اساسی متفاوت از یکدیگرند. این تفاوت‌ها در سیگنال MFL آزمایشگاهی تجربی در شکل زیر قابل مشاهده است. این سیگنال‌ها متناظر با مؤلفه محوری میدان MFL هستند.

¹ Patch



۴-۱۷. منابع دیگر نشت فلو

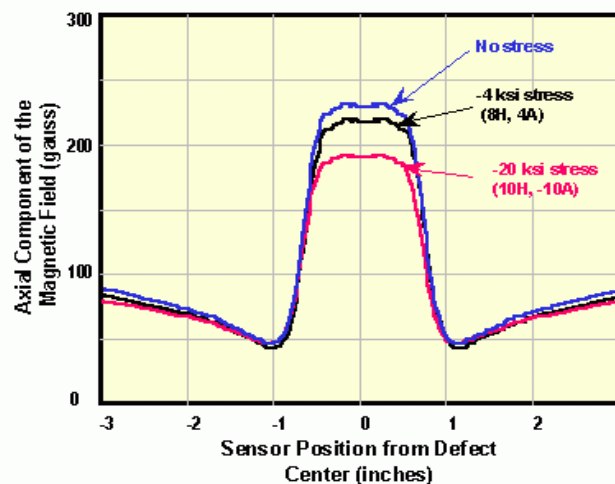
۴-۵-۸ منابع دیگر نشت فلو

حلقه‌های جوش، شیرها، تغییرات ضخامت دیواره لوله، مهره‌ها و سایر خصوصیات خط لوله با استفاده از MFL قابل آشکار سازی هستند.

تعدادی از فاکتورها بر نشت فلو تاثیر گذار هستند اغلب این پارامترها همچنین بر میدان اعمال شده نیز تاثیر می‌گذارند. اثرات این نشت علاوه بر اثرات میدان اعمال شده است. این پارامترها شامل سرعت، تنش و مغناطیس‌های باقیمانده هستند.

سرعت: جریانهای القائی بوجود آمده در لوله در اثر حرکت توپک بر میدان نشتی تاثیر دارند که معمولاً باعث کاهش آن می‌شوند. این اثرات در سطوح مغناطیس کنندگی پائین و متوسط در بزرگترین مقدار خود می‌باشند و همچنین برای خرابی‌های کم عمق نیز همینطور است.

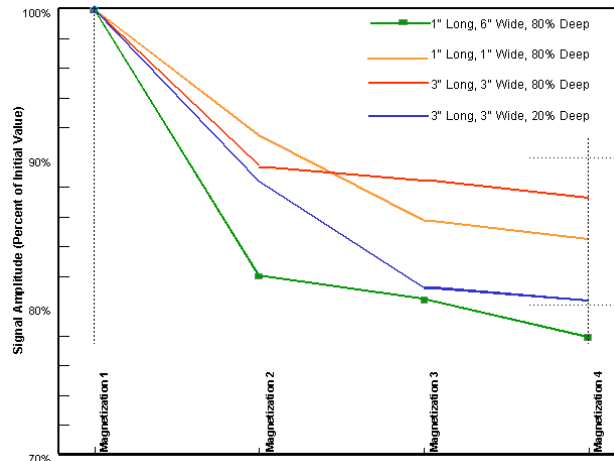
تنش^۱: تنش‌های اعمال شده و نیز باقیمانده بر منحنی مغناطیس کنندگی، هنگام تغییر آنها اثر می‌گذارند. همچنین کرنش‌های متاثر نیز بر نشت اثر می‌گذارند. همان‌طور که انتظار می‌رفت این اثرات در خطوط فشار بالا و نیز در جاهائی که بارگذاری ثانویه قابل توجهی داریم، بیشتر خواهند شد. همچنین هنگام تعیین اندازه خرابی‌ها در نزدیکی فرورفتگی‌ها و اتصالات قابل توجه خواهند شد. (به ضمیمه ۸ رجوع شود).



۴-۱۸. نمودار اندازه محوری میدان مغناطیسی بر اساس موقعیت حس‌گر از مرکز عیب

¹ Stress

مغناطیس‌کنندگی باقیمانده: این مغناطیس‌کنندگی باقیمانده نیز بر میدان نشتی اثر می‌گذارد مخصوصاً زمانی که سطوح مغناطیس‌کنندگی پائین و متوسط به کار برده می‌شوند. همانطوری که در زیر نشان داده شده است دامنه‌های سیگنال می‌توانند حدود ۱ تا ۲۰ درصد با مقادیر بدست آمده از خطوط بدون مغناطیس باقیمانده تغییر داشته باشند. این اثرات بعد از چند مورد انجام ارزیابی به حالت ثابتی خواهند رسید. البته در این حالت دامنه‌ها نسبتاً ثابت و یکنواخت خواهند ماند.



۴-۱۹. نمایش تاثیر مغناطیس باقیمانده بر دامنه سیگنال

۴-۵-۹ متغیرهای اندازه‌گیری

سیستم حس‌گر در یک سیستم ارزیابی MFL نشت فلو را اندازه می‌گیرد. این سیستم اندازه‌گیری میدان نشتی را به یک سیگنال اندازه‌گیری که می‌تواند ذخیره و آنالیز شود تبدیل می‌کنند. تمامی سیستم‌های حس‌گر از میدان واقعی و عملی متوسط‌گیری و فیلتر انجام می‌دهند و تمامی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده نویز نیز دارند. بنابراین میدان اندازه‌گیری شده و میدان واقعی یکسان نخواهند بود.

۴-۶ حس‌گرها [27]

سیستم حس‌گر در یک سیستم ارزیابی MFL نشت فلو را اندازه می‌گیرد. این سیستم اندازه‌گیری میدان نشتی را به یک سیگنال اندازه‌گیری که می‌تواند ذخیره و آنالیز شود تبدیل می‌کنند. تمامی سیستم‌های حس‌گر از میدان واقعی و عملی متوسط‌گیری و اطلاعات را فیلتر از یک فیلتر عبور می‌دهند زیرا تمامی سیگنال‌های اندازه‌گیری شده نویز نیز دارند. بنابراین میدان اندازه‌گیری شده و میدان واقعی یکسان نخواهند بود.

دو نوع حس‌گری که معمولاً در سیستم ارزیابی MFL بکار می‌روند عبارتند از حلقه‌های القایی^۱ و عناصر هال. حلقه‌های القایی نرخ تغییرات میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند در حالیکه عناصر هال قدرت واقعی میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند. از قدیم حلقه‌های القایی بیشتر بعنوان حس‌گر MFL در سیستم‌های ارزیابی بکار رفته‌اند چرا که منبع تغذیه‌ای لازم ندارند و برعکس ولتاژی در حلقه پسیو (غیر فعال) سیم یا مدار چاپی هنگامی که از میدان مغناطیسی متغیر عبور می‌کنند ایجاد می‌شود. یک سیستم ثبت و ضبط این ولتاژ را اندازه می‌گیرند که متناسب با تغییرات چگالی فلو است. به این دلیل است که یک حلقه به تغییرات چگالی فلو عکس‌العمل نشان می‌دهد.

¹ Induction Coil

خروجی حلقه تابعی از سرعت جسمی است که در آن قرار دارد حرکت می‌کند. تکنیکهای مجتمع سازی برای تبدیل اندازه‌گیری حلقه به اندازه‌گیری چگالی فلو می‌تواند استفاده شود. در این حال مؤلفه ثابت حذف خواهد شد. این مؤلفه ثابت برای تعیین و اندازه‌گیری قدرت و توان میدان مغناطیسی اعمال شده لازم خواهد بود. [27]

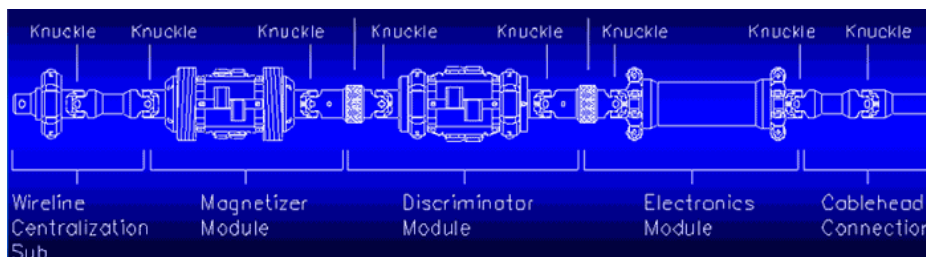
سیستم‌های جدیدتر ارزیابی MFL از عناصر هال استفاده می‌کنند. عناصر هال، حس‌گرهای حلقه میدان مغناطیسی را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند. معمولاً عناصر سیستم‌های جدیدتر ارزیابی MFL، از عناصر هال استفاده می‌کنند. عناصر هال، میدان مغناطیسی را مستقیماً اندازه‌گیری می‌کنند. معمولیترین عناصر هال مستقیماً میدان مغناطیسی را تبدیل به ولتاژ خروجی می‌کنند. چگالی میدان و فلو با نسبت ثابتی به هم مربوطند و ولتاژ خروجی یک عنصر هال مستقیماً متناسب با چگالی فلو می‌باشد.

در واقع ابزار تولید MFL سه بخش عمده دارد: [29], [30]

(۱) بخش الکترونیکی (۲) بخش فرق دار^۱ و یا حس‌گرهای DIS (۳) حس‌گرهای FL^۲

معمولاً در سیستم ارزیابی MFL دو نوع حس‌گر به کار می‌رود، عناصر هال یا حس‌گرهای FL و حلقه‌های القایی. عناصر هال در واقع قدرت میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند و میدان مغناطیسی را به طور مستقیم به ولتاژ خروجی تبدیل می‌کند. چگالی میدان و فلو با نسبتی به هم مربوط هستند و ولتاژ خروجی یک عنصر هال مستقیماً با چگالی فلو متناسب است.

حس‌گرهای FL به تنهایی نمی‌تواند تفاوت نقوص داخلی و خارجی را تشخیص دهند بنابراین از جریان‌های گردابی استفاده می‌کنیم. EC^۳ میدان مغناطیسی ضعیفی را تولید می‌کند که این میدان مغناطیسی ضعیف بین سطح داخلی پوشش لوله بسته می‌شود و در نتیجه عیوب خارجی تحت تاثیر این مسیر شار قرار نمی‌گیرند و EC ها جوابی به این عیوب نمی‌دهد. عیوب داخلی موجب ایجاد دگرگونی در مسیر شار می‌شوند و این نتیجه یک پاسخ از طرف حس‌گر EC جهت اطلاع کاربر خواهد شد. (رجوع به بخش ۳)



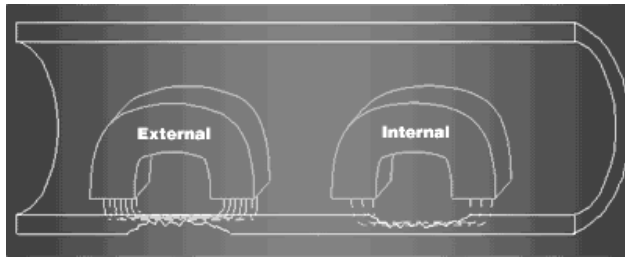
۴-۲۰. نمایشی از واحد MFL

زمانی که توپک در طول خط لوله حرکت می‌کند، واگر آهن ربا به عنوان مغناطیس‌کننده با دیواره خط لوله یک مدار مغناطیسی بوجود می‌آورد و تولید یک چگالی شار مغناطیسی فوق‌العاده قوی می‌کند. تغییر در جرم لوله مانند خوردگی، سوراخ تولید یک شار ناشی مخلی در دیواره داخلی یا خارجی خط لوله می‌کند.

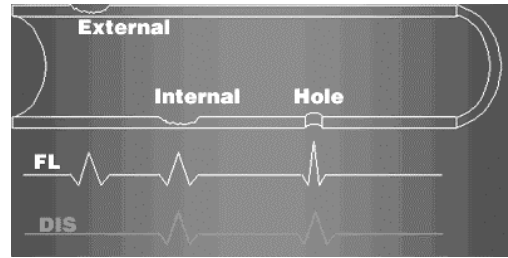
¹ Discriminator

² Flux Leakage

³ Eddy Current

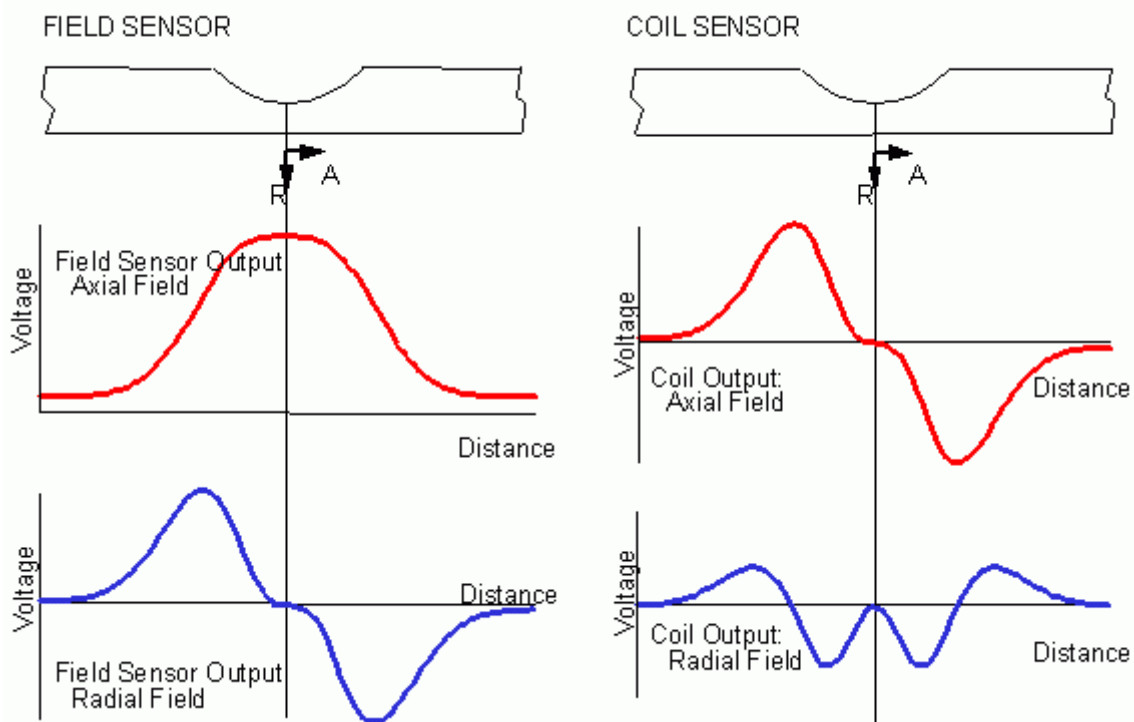


۲۲-۴. مقایسه چگالی شار در دو نوع حس گر



۲۱-۴. چگونگی تشخیص نوع نقص

حس گرهای FL این انحرافات را در میدان مغناطیسی تشخیص می دهند. برای تشخیص نوع نقص (داخلی یا خارجی بودن) نیاز به یک ممیز و یا حس گرهای DIS داریم که به طور کمی عمق سطح درونی دیواره خط لوله را تشخیص می دهد ولی همان طور که از روی عملکرد آن معلوم است، DIS یا همان حس گرهای EC نمی تواند عیوب خارجی را تشخیص دهد. بنابراین تکنولوژی MFL با بهره گیری از (۱) اثر هال و (۲) پدیده جریان های گردابی توانایی شناسایی عیوب خطوط لوله اعم از عیوب درونی دیواره و عیوب خارجی را دارا است. [29]



۲۳-۴. مولفه های محوری و شعاعی از سیگنال خروجی دو نوع حس گر

(برای توضیحات بیشتر به ضمیمه ۹ رجوع شود.)

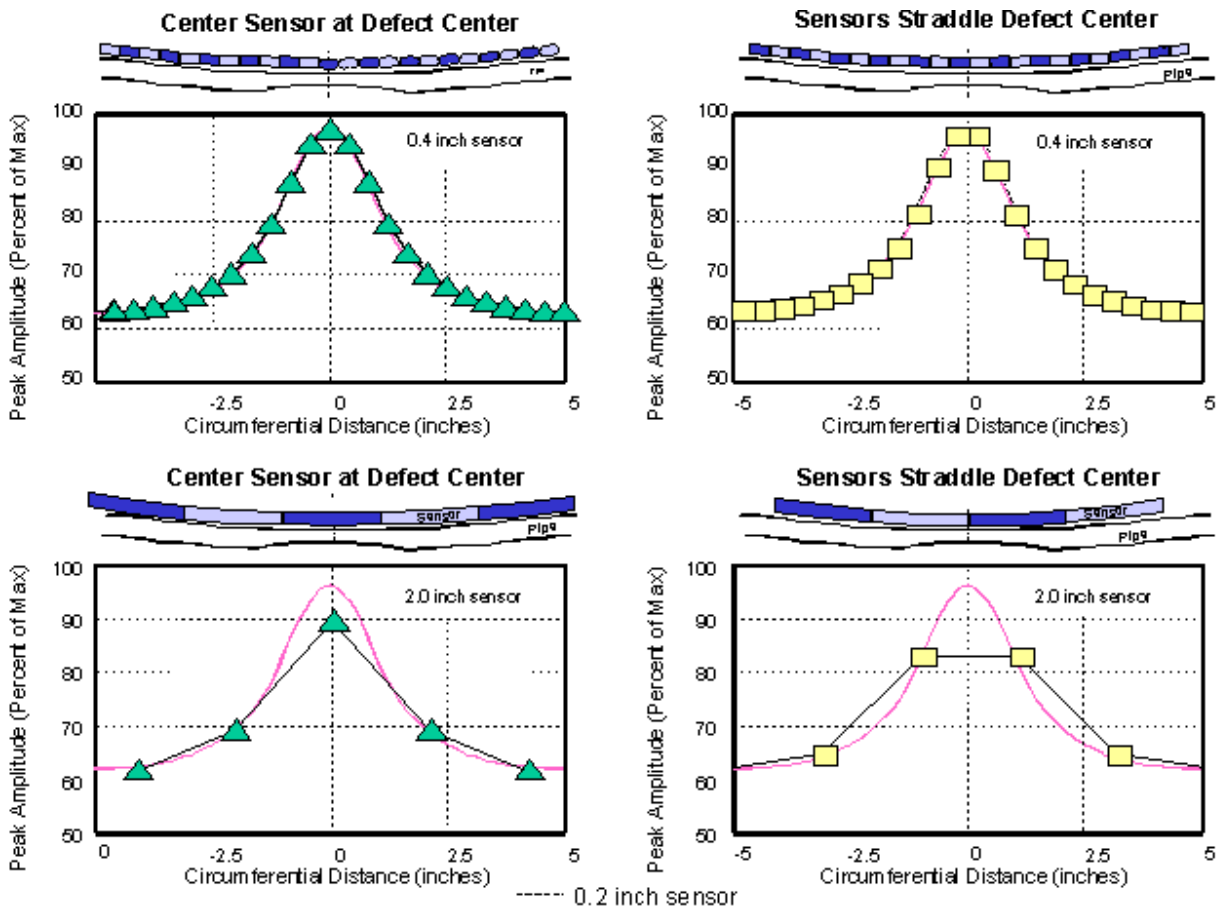
۱-۶-۴ تعیین جهت حس گرها [27]

نشت فلو یک میدان برداری است بنا براین سه مولفه منحصر بفرد قابل اندازه گیری دارد. به خاطر اینکه سیستم ارزیابی MFL خطوط لوله را ارزیابی می کنند یک سیستم مختصات استوانه ای بکار می رود. که همان شعاع و زاویه دیگر (r, θ, ϕ) . در سیستم ارزیابی MFL مولفه های محوری شعاعی معمولاً اینها اندازه گیری

می‌شوند. مولفه سوم محیطی به ندرت استفاده می‌شود و دارای دامنه کوچکی بوده و به راحتی قابل تشخیص و ارزیابی نیست.

۲-۶-۴ اندازه‌گیری محیطی

اندازه‌حس‌گرها مستقیماً با قدرت سیستم اندازه‌گیری ارتباط دارد. تمامی حس‌گرهای یک طول محوری، عرض شعاعی دارند و آنها یک متوسط اندازه‌گیری از فلوئی عبوری از داخل حس‌گر را ارائه می‌کند. دقت یک سیستم با عرض محیطی حس‌گر تعریف می‌شود. بکارگیری حس‌گرهای باریک تر دقت سیستم را افزایش می‌دهد که سبب می‌شود سیگنال‌های بیشتری از یک ناحیه خورده شده مشخص برای تحلیل و آنالیز داشته باشیم.

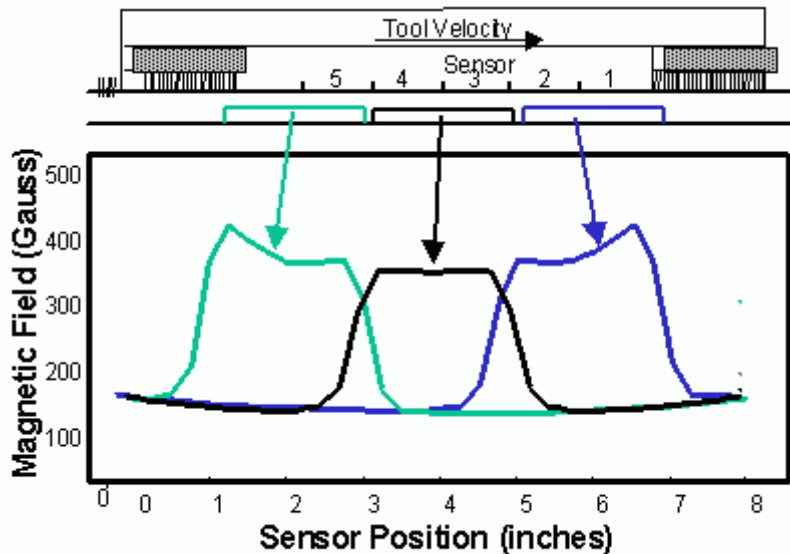


۴-۲۴. رابطه تعداد و فاصله حس‌گرها و دقت شبیه‌سازی سیگنال

زمانی که عرض حس‌گر بزرگتر از عرض خرابی باشد اندازه‌گیری مقدار نشتی ممکن است به درستی انجام نشود. به طور کلی برای تعیین دقیق مشخصه نازکی و ضخامت دیواره با لوله و خرابی‌ها زمانی ممکن است که از حس‌گرهای عریض که در طول محیط داخل لوله گسترده شدند استفاده شود. فرآیندهای خرابی که عیوب کوتاهتری یا فرورفتگی‌های باریکی و یا خرابی‌های بسیار ریز را شامل می‌شوند احتیاج به حس‌گرهای ظریفی که با دقت اندازه و نوع خرابی را تعیین کنند دارند.

۴-۶-۳ موقعیت محوری

موقعیت و وضعیت حس گر نسبت به مگنت‌ها نیز می‌تواند بر سیگنال اندازه‌گیری شده تاثیر داشته باشد و نیز بر حساسیت نتایج ارزیابی نسبت به سرعت وسیله اثر می‌گذارد. محلی که در آن اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شود بر شکل میدان نشتی اندازه‌گیری شده تاثیر می‌گذارد. زمانی که از مجموعه‌های چند تایی از حس‌گرها استفاده می‌شود. این مجموعه‌ها طوری حرکت کرده تا ۱۰۰ درصد سطح را پوشش دهند. به خاطر اینکه موقعیت محوری بر اندازه‌گیری‌های میدان نشتی اثر می‌گذارد. زمانی که از سیستم‌هایی که حس‌گرها حرکت می‌کنند استفاده می‌گردد آنالیز و تحلیل آنها نیز بسیار مشکل خواهد بود.



۴-۲۷. نمایش اندازه میدان مغناطیسی بر اساس موقعیت حس‌گر

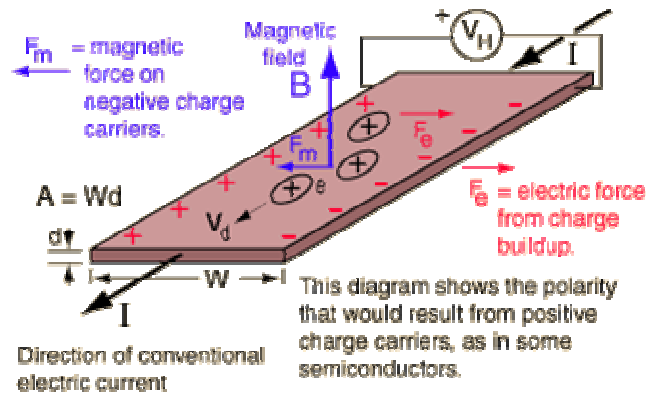
برای یک سیستم ساکن یا در حال حرکت با سرعت کم، حس‌گری که وسط دو قطب قرار گرفته است سیگنال مقارنی را اندازه‌گیری می‌کند البته برای یک ناحیه خوردگی مقارن ولی هر جایی غیر از وسط دو قطب سیگنال ایستائی اندازه‌گیری شده نا مقارن خواهد بود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با حرکت حس‌گر به جلو یا عقب متناظر با آن در حداکثر سیگنال^۱ نیز عدم تقارن رو به جلو و عقب مشاهده می‌شود. اثرات موقعیت محوری حس‌گر تابعی از سرعت ارزیابی است که باعث می‌شود منابع دیگری از عدم تقارن تقویت شده و به سیگنال اضافه گردند. عدم تقارن مهم می‌باشد زیرا که تجزیه و تحلیل داده‌های ارزیابی را بسیار مشکل می‌کند. فاصله بین سیستم مغناطیس‌کنندگی MFL و حس‌گر و همچنین حس‌گرها و سطح در ارزیابی نتایج تاثیر می‌گذارد. فاصله افتاد ممکن است در نتیجه رسوبات داخلی باشد که ممکن است به بیش از ۱ اینچ ضخامت برسند. تغییر محل^۲ هم بر سطح مغناطیس‌کنندگی و هم بر شکل سیگنال اثر می‌گذارد. در ادامه به بررسی اثر هال و پدیده جریان‌های گردابی که حس‌گرها و پروب‌های اندازه‌گیری بر آن اساس کار می‌کنند، می‌پردازیم.

^۱ Peak
^۲ Lift off

۷-۴ اثر هال^۱ [31], [32], [33]

زمانی که بار q با سرعت u در میدان مغناطیسی با چگالی شار B حرکت می‌کند نیروی مغناطیسی F_m ای طبق معادله $F_m = qu \times B$ ، تحمل می‌کند.

ماده‌ای هادی با سطح مقطع مستطیل $d \times B$ در میدان مغناطیسی یکنواخت $B = B_0 a_z$ را در نظر بگیرید.



۲۸-۴. نمایش پلاریزاسیون یک قطعه نیمه هادی در نتیجه حامل‌های بار مثبت

$$J = a_y J_0 = Nqu$$

جریان مستقیم یکنواختی در جهت y عبور می‌کند:

که در آن N تعداد حامل‌های بار در واحد حجم با سرعت U حرکت می‌کنند و بار q هر بار حامل است. به موجب معادله $F_m = q u \times B$ حامل‌های بار تحت نیرویی که بر B و هم بر u عمود است قرار می‌گیرند. اگر ماده هادی یا نیمه هادی نوع n باشد حامل‌های بار الکترون‌ها هستند و q منفی است. نیروی الکترومغناطیسی مایل است الکترون‌ها را در جهت مثبت x حرکت دهد و یک میدان الکتریکی عرضی را بوجود آورد. این عمل ادامه پیدا می‌کند تا این که میدان عرضی برای متوقف کردن رانش حامل‌های بار کافی باشد. در حالت دائمی نیروی خالص وارده بر حامل‌های بار صفر است:

$$E_h + u \times B = 0 \rightarrow E_h = -u \times B$$

این پدیده را اثر هال گویند و E_h میدان هال خوانده می‌شود. در مورد هادیها و نیمه هادیها ی نوع n و p

$$E_h = -(-a_y u_0) \times a_z, B_0 = a_x u_0 B_0, u = -a_y u_0$$

یک پتانسیل عرضی بین دو وجه جانبی ماده ظاهر می‌شود ازین رو در مورد حامل‌های الکتریکی داریم:

$$V_h = - \int E_h dx = u_0 B_0 d$$

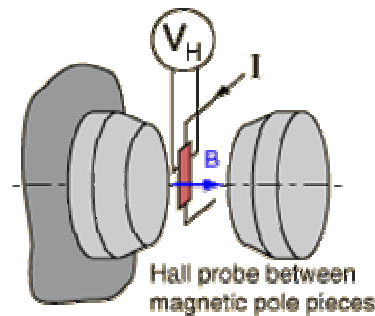
که V_h ولتاژ هال نامیده می‌شود. نسبت $E_x/J_y = B_z/1/Nq$ یک مشخصه ماده است و ضریب هال نامیده می‌شود. اگر حامل‌های بار حفره‌ها باشند مثل حامل‌های بار در نیمه هادی نوع p میدان هال معکوس خواهد شد و ولتاژ هال در رابطه $V_h = - \int E_h dx = u_0 B_0 d$ نسبت به قطب‌های مرجع شکل منفی خواهد شد.

اثر هال می‌توان برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی و تعیین علامت حامل‌های بار غالب و تشخیص نیمه هادی نوع n از نوع p استفاده کرد.

در این مباحث شکل ساده و کاربردی از اثر هال گفته شد و در عمل اثر هال مطلب پیچیده‌ای است و شامل

مباحث نظریه کوانتوم است.

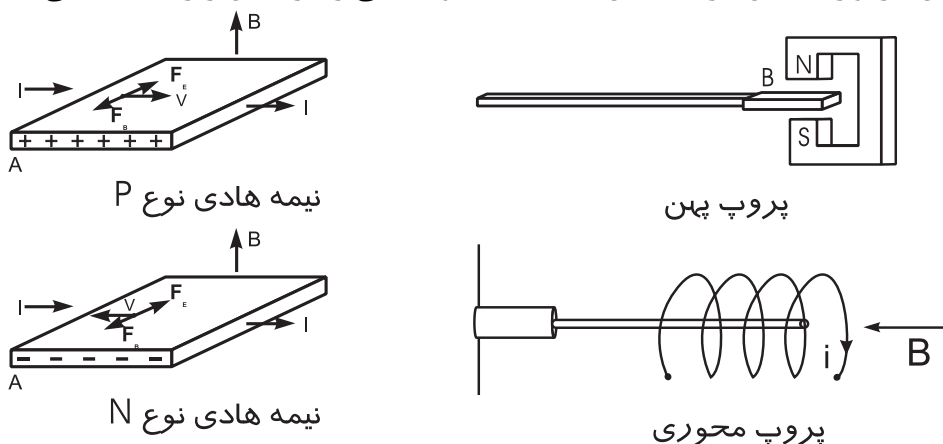
¹ Hall Effect



The polarity of the Hall voltage for a copper probe shows that electrons are the charge carriers.

۴-۲۹. پروب هال بین دو قطب مغناطیسی

اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در مقیاس تسلا معمولاً توسط علم اثر هال انجام می‌گردد. یک نوارباریک به عنوان پروب هال در میدان مغناطیسی و ولتاژ عرضی بمنظور اندازه‌گیری ولتاژهای کوچک قرار می‌گیرد. بعضی وقت‌ها یک نوار نازک مسی با ضخامت d در مقیاس $100\mu\text{m}$ بعنوان پروب استفاده می‌شود. در واقع پروب هال تکه کوچکی از یک نیمه هادی با یک جریان ثابت در انتهای آن می‌باشد. اختلاف پتانسیل عرضی اندازه‌گیری مقدار القای مغناطیسی را مشخص می‌کند و به این ترتیب که اگر چگالی بارهای حامل 8.74×10^{28} الکترون بر متر مکعب باشد، برای جریان های I و میدان مغناطیسی B و ضخامت d ولتاژ رابطه $V_H = IB / ned$ بدست می‌آید. پلاریزاسیون ولتاژ هال در شکل نشان می‌دهد که الکترون‌ها بارهای حامل را تشکیل می‌دهند. در عمل نیمه هادیهایی که در این نوع پروب‌ها بکار می‌روند می‌تواند ژرمانیوم، ایندیوم و آنتیمونید را نام برد. پروب هال می‌تواند از یک قطعه بسیار کوچک و نازک از یک نیمه هادی که در سر پروب تعبیه شده است و باسانی می‌توان آنرا وارد میدان کرد تشکیل شده است نمونه‌هایی را در شکل زیر مشاهده می‌کنید.



۴-۳۰. انواع پروب هال

^۱ Hall Probe

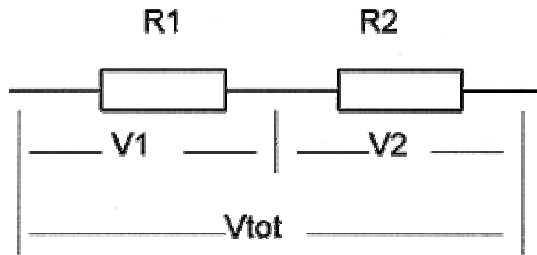
۴-۸ جریان های گردابی [33], [34]

۴-۸-۱ فلوی جریان در مدارهای DC

وقتی ولتاژی در مداری مقاومتی برقرار می‌شود، فلوی جریان از قانون اهم پیروی می‌کند:

$$I = V/R \text{ یا } V = I.R$$

وقتی مدار بیشتر از یک المان مقاومت یا خازن داشته باشد روابط جبری آسانی خواهیم داشت به عنوان مثال اگر دو مقاومت سری داشتیم:



۴-۳۱. تقسیم مقاومت در یک مدار

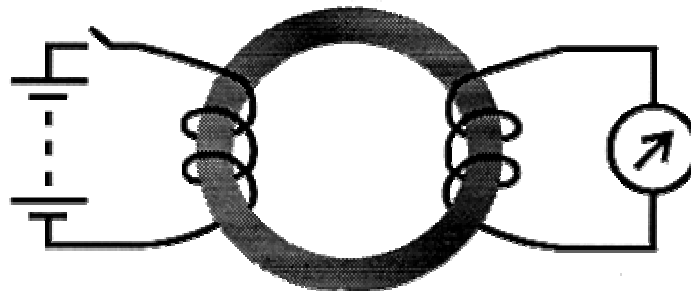
جریان I باید برای هر مقاومت یکسان باشد پس:

$$V_1 = I.R_1, V_2 = I.R_2$$

$$V_{tot} = V_1 + V_2 = I.R_1 + I.R_2 = I.(R_1 + R_2) = I.R_{tot} \longrightarrow R_{tot} = R_1 + R_2$$

۴-۸-۲ القاء الکترو مغناطیسی

در سال ۱۸۲۴ اورستد کشف کرد که جریان عبوری از هسته، میدان مغناطیسی تولید می‌کند که توانائی حرکت دادن عقربه تنظیم کننده (صفحه مدرج) را دارد. هفت سال بعد فارادی و هنری عکس این مسئله را کشف کردند و آن اینکه میدان مغناطیسی متحرک باعث القاء ولتاژ در هادی الکتریکی می‌شود. دو اثر در شکل مقابل که یک ترانسفورماتور ساده که به منبع DC وصل شده است نمایان است:



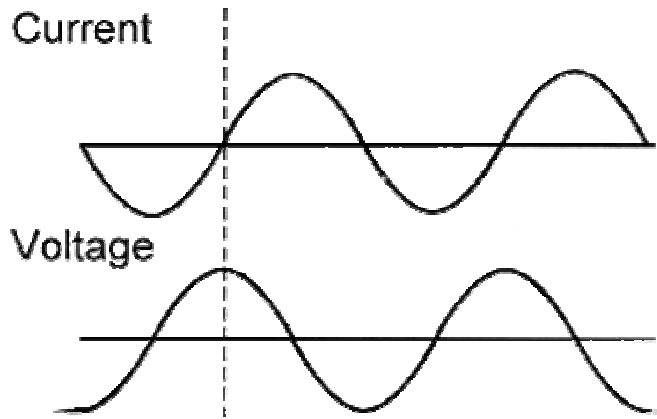
۴-۳۲. نمایشی از یک ترانسفورماتور ساده

عقربه به یک سمت منحرف می‌شود وقتی جریان برقرار می‌شود و سپس در جهت عکس می‌چرخد وقتی جریان تغییر جهت می‌دهد. ولتاژ تنها زمانی ایجاد می‌شود که میدان مغناطیسی تغییر می‌کند. یک همچنین ولتاژ در سیم پیچ اول برقرار می‌شود و تمایل به مقاومت در برابر تغییر ولتاژ ایجاد شده را دارد. ولتاژ ایجاد شده با نرخ تغییرات جریان متناسب است. یک خصوصیت هسته که اندوکتانس نامیده شده بدین

$$L \cdot \frac{di}{dt} =$$

صورت تعریف می‌شود:

هنگامی که یک جریان AC از یک سلف عبور می‌کند ولتاژ ایجاد شده زمانی ماکزیمم است که نرخ تغییرات جریان بیشترین حالت را داشته باشد. برای یک موج سینوسی در زمانی صورت می‌گیرد که جریان واقعی صفر باشد.



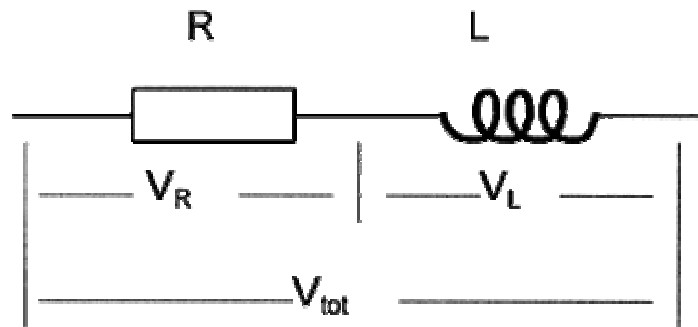
۳۳-۴. نمودار جریان و ولتاژ برای یک سلف

بنابراین ولتاژ داخل سلف یک چهارم سیکل قبل از جریان ماکزیمم می‌شود - گفته می‌شود ولتاژ ۹۰ درجه پیش فاز دارد.

$$V = I \cdot X_L$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

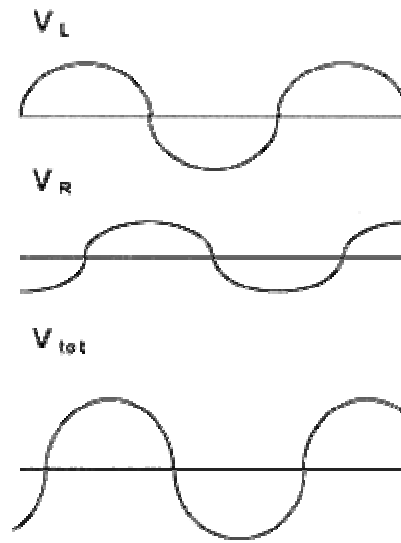
مقدار ولتاژ و جریان از این رابطه محاسبه می‌شود:
که X_L راکتانس سلف و بصورت قابل تعریف می‌شود:
 f فرکانس در مقیاس هرتز است.



۳۴-۴. یک مدار RL

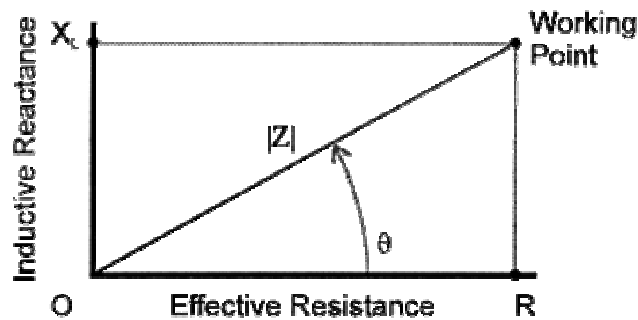
همان‌طور که در بالا مشاهده می‌کنید برای یک مدار DC محاسبه مقاومت کل به آسانی با جمع کردن مقدار هر یک از مقاومت‌ها میسر است.

برای یک مدار AC به این آسانی نمی‌باشد، اما اساس کار بر همین روش استوار است: جریان عبور از هر دو المان باید یکسان باشد و در هر لحظه ولتاژ برآیند عبوری از مدار برابر مجموع ولتاژهای عبوری از مدار است. همچنین بیشترین ولتاژ دو سر مقاومت مطابق ولتاژ صفر دو سر سلف است.



۳۵-۴. نمودار ولتاژ برای هر کدام از المان‌های مقاومت و سلف

ما می‌توانیم یک شمای محوری به آنها اختصاص دهیم:



۳۶-۴. امپدانس مدار

امپدانس مدار با این فرمول مشخص می‌شود:

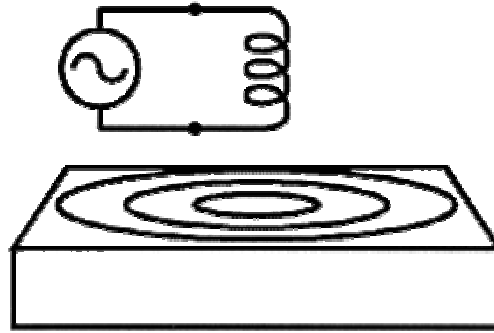
$$Z = \sqrt{(X_L^2 + R^2)}$$

و زاویه فاز بین ولتاژ و مدار بدین صورت است:

$$\Theta = \sin^{-1}\left(\frac{X_L}{Z}\right)$$

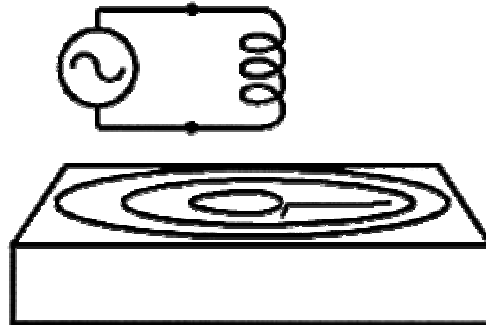
۳-۸-۴ سیم پیچ ساده در بالای سطح فلزی

هنگامی که یک جریان AC در یک سیم پیچ که در نزدیکی سطح هادی است جریان می‌یابد میدان مغناطیسی سیم پیچ جریانهای گردابی را در آن سطح هادی القاء می‌کند. دامنه و فاز جریانهای گردابی برابر روی سیم پیچ و همچنین امپدانس آن تأثیر می‌گذارد.



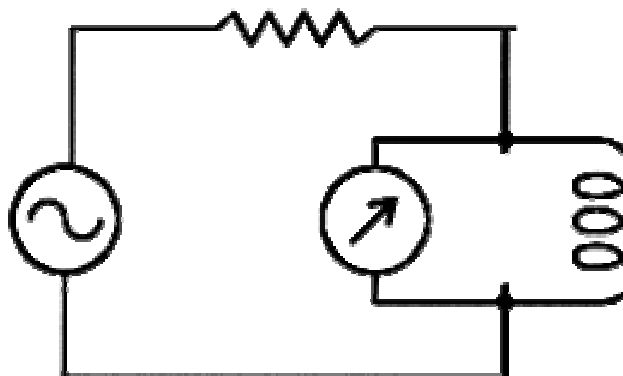
۳۷-۴. جریان‌های گردابی القا شده در سطح فلز

به عنوان مثال، فرض کنید که یک ترک عمیق در سطح فلز دقیقاً زیر سیم پیچ وجود دارد این ترک به علت کاهش بار سیم پیچ یا افزایش مقاومت مؤثر فلوی جریان گردابی را کم یا در هر حال مختل می‌کند.



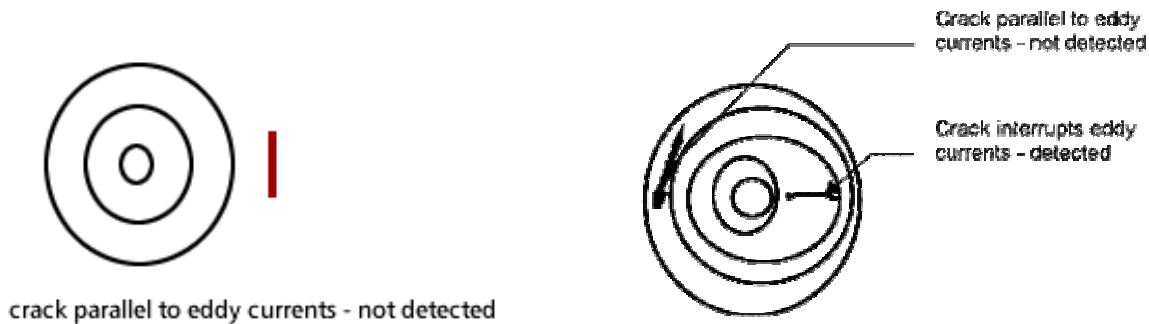
۳۸-۴. جریان‌های گردابی القا شده در سطح فلز در حضور ترک

این اساس تست بوسیله جریان گردابی است، با نشان دادن ولتاژ عبوری از سیم پیچ می‌توانیم تغییرات را در فلز مورد نظرمان ملاحظه کنیم.



۳۹-۴. مدار اندازه‌گیری ولتاژ پروب جریان‌های گردابی

توجه داشته باشید که ترکها باید در فلوی سطح جریان گردابی اختلال ایجاد کنند تا تشخیص داده شوند. ترک‌هایی که بصورت موازی در مسیرهای جریان قراردارند اختلال مشهودی ایجاد نمی‌کنند و مشخص نمی‌شوند.



۴-۴۱. ترک‌های موازی شناسایی نمی‌شوند

۴-۴۰. موقعیت ترک‌ها در مسیر جریان

۴-۸-۴- عوامل مؤثر در پاسخ جریان گردابی

عواملی به غیر از عیوب می‌تواند در پاسخ پروب جریان گردابی مؤثر باشد. یافتن موفق عیوب منوط به این است که یا این عوامل را ثابت نگه داریم یا تأثیر آنرا بر نتیجه از بین ببریم. حذف پاسخ‌های ناخواسته اساس تکنولوژی بازرسی با جریانهای گردابی را ایجاد می‌کند. مهمترین عوامل اینها هستند:

۴-۸-۴-۱ ویژگی هدایت فلز

هدایت فلز تأثیر مستقیم بر جریان گردابی دارد: هرچه هدایت بیشتر باشد فلوی جریان گردابی در سطح فلز بیشتر می‌شود. هدایت عموماً بوسیله جریان گردابی محاسبه می‌شود و نتایج آن عوامل مختلف مؤثر بر هدایت را مانند ترکیب فلز، شرایط حرارتی و ... را مشخص می‌کند.

۴-۸-۴-۲ نفوذپذیری

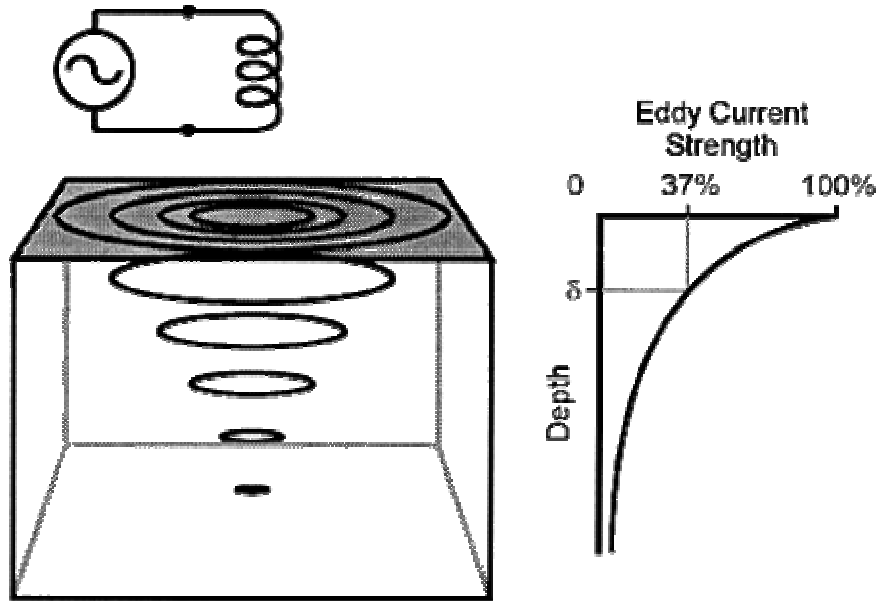
برای فلزات غیر آهن مانند مس، برنج، آلومینیوم و غیره و استیل‌های زنگ نزدنی نفوذ پذیری با نفوذ پذیری فضای آزاد یکسان است و متناسب با (m_r) است. برای فلزات آهنی اگرچه مقدار m_r برابر چند صد می‌باشد و این مسئله تأثیر مستقیم در پاسخ جریان گردابی می‌گذارد، به علاوه برای نفوذپذیری غیر معمول نیست که با قسمت‌های مختلف فلز یا تنش‌های محلی یا تأثیرات حرارتی بطور مشهود تغییر کند.

۴-۸-۴-۳ فرکانس

همان‌طور که بحث خواهیم کرد، پاسخ جریان گردابی کاملاً تأثیرپذیر از فرکانس آزمایش می‌باشد. خوشبختانه این عامل، عاملی است که تحت کنترل ما می‌باشد.

۴-۸-۴-۴ هندسه

در یک قطعه واقعی که مثلاً کاملاً مسطح نیست یا اندازه‌اش دقیق نیست خصوصیات هندسی مانند خمیدگی، لبه‌ها، شیار بر پاسخ جریان گردابی تأثیر می‌گذارند. روشهای تست باید بتوانند این مسئله را تشخیص دهند، به عنوان مثال در تست پیدا کردن ترک یک لبه پروب بصورت عادی موازی با لبه حرکت می‌کند تا کوچکترین تغییرات را بتواند به راحتی مشاهده کند. جایی که ضخامت کمتر از عمق مؤثر نفوذ است (شکل ۴-۴۲ را ببینید) این مسئله بر پاسخ جریان گردابی تأثیر می‌گذارد.



۴-۴۲. نمودار رابطه قوت جریان های گردابی بر حسب عمق

۴-۸-۵ مجاورت / lift off

هرچه سیم پیچ پروب به سطح نزدیکتر باشد آن سیم پیچ بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این مسئله دو تأثیر مهم دارد:

- سیگنال « lift-off » وقتی که پروب بالا و پائین سطح حرکت می‌کند.
- کاهش حساسیت مانند اینکه سیم پیچ افزایشی در فضای آزاد ایجاد کرده است.

۴-۸-۶ عمق نفوذ

جگالی جریان گردابی، و همچنین قدرت پاسخ دریافت شده از عیب، بیشترین مقدار را در سطح فلز مورد آزمایش دارند و با افزایش عمق کاهش می‌یابند از نظر محاسباتی مطلوب است که « استاندارد عمق نفوذ » را جایی که جریان گردابی در فاصله $1/e$ (۳۷٪) سطح است تعریف کنیم. استاندارد عمق نفوذ با این فرمول در مقیاس mm محاسبه می‌شود:

$$\delta = 50 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu r}}$$

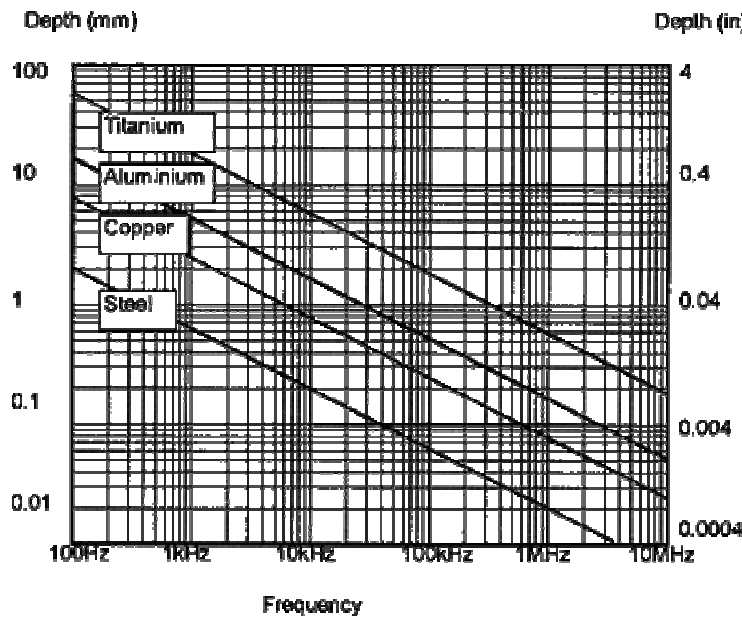
(مقیاس مقاومت mW.cm و فرکانس Hz است)

با توجه به این فرمول مشاهده می‌شود که عمق نفوذ:

- کاهش می‌یابد و وقتی فرکانس زیاد می‌شود.
- کاهش می‌یابد وقتی هدایت افزایش می‌یابد.
- کاهش می‌یابد وقتی نفوذپذیری افزایش می‌یابد - این بسیار واضح است - نفوذ در فلزات آهنی در یک فرکانس خاص بسیار کم است.

شکل ۴-۴۳ تأثیر فرکانس را بر استاندارد عمق نفوذ مشخص می‌کند. مرسوم است که گاهی از « عمق مؤثر نفوذ » به جای « عمق استاندارد نفوذ » استفاده کنند که سه برابر عمق استاندارد تعریف می‌شود، جایی که

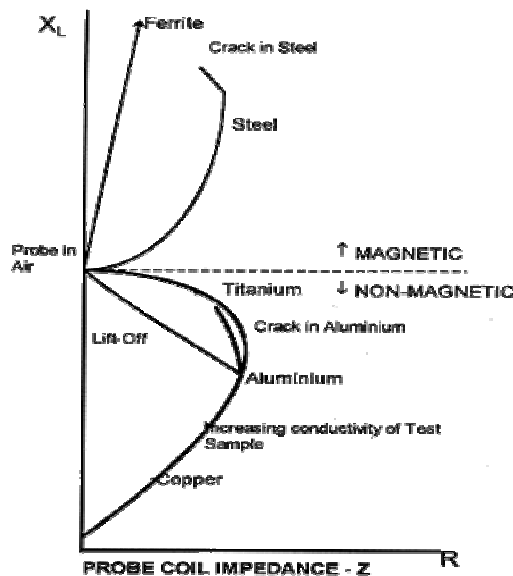
چگالی جریان گردابی به حدود ۳٪ مقدارش تا سطح سقوط کرده است. این عمقی است که هیچ تأثیری بر میدان جریان گردابی ندارد.



۴-۴۳. تاثیر امپدانس در عمق نفوذپذیری

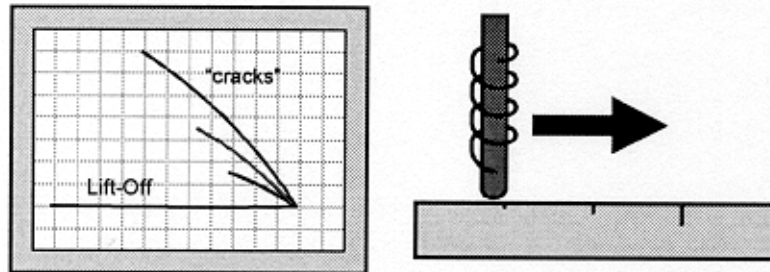
۴-۸-۷ سطح امپدانس

پاسخ جریان گردابی یک سیم پیچ را بطور مطلوبی می توان به سطح امپدانس ارجاع داد. این نمای گرافیکی پروب پیچیده امپدانس است به طوریکه محور X نمایانگر مقاومت و محور Y نمایانگر راکتانس القایی است. توجه کنید که وقتی شکل کلی سطح امپدانس ثابت ماند جزئیات برای یک پروب خاص با فرکانس خاص ثابت است. نمایشگر یک CRT خاص ابزار جریان گردابی یک پنجره است که نمایانگر سطح امپدانس است که می تواند بچرخد و تنظیم شود روی نیازمندیهای مطلوب ما از دستگاه.



۴-۴۴. سطح امپدانس یک پروب جریان گردابی

به عنوان مثال در شکل ۴-۴۵، دیاگرام سطح امیدانسی جزئیات «پروب روی آلومینیوم» به شکل زیر نشان داده شده است.



۴-۴۵. دیاگرام سطح امیدانسی پروب روی آلومینیوم

توجه کنید که در مثال دامنه و فاز ترک‌های با اندازه‌های مختلف نشان داده شده است.

۴-۸-۵ شکل سیم پیچ

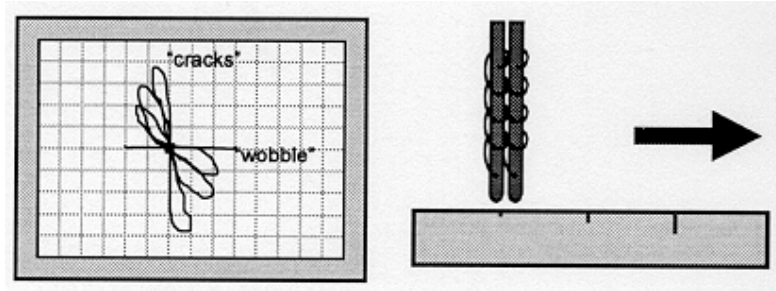
انتخاب سیم پیچ مناسب مهمترین قسمت برای داشتن یک ابزار جریان گردابی مطلوب است. طراحی سیم پیچ به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود:

پروب‌های سطحی عموماً محوری عمود بر سطح دارند، به علاوه برای سیم‌پیچ‌های ابتدایی به شکل "Pancake" پروب‌های مدادی و پروب‌های خاص سطحی استفاده می‌شود، مانند آنهایی که در سوراخ fastener است.

سیم‌پیچ‌های حلقوی عموماً برای بازرسی‌های داخل خط تولیدات دایروی استفاده می‌شود. پروب‌های ID عموماً در بازرسی‌هایی که تبدلات حرارتی داریم استفاده می‌شود. پروب داخل یک لوله قرار می‌گیرد. پروب‌های ID معمولی با پیچاندن سیم‌پیچ در طول محور مرکزی لوله ساخته می‌شوند. پروب‌هایی که دارای یک سیم‌پیچ باشند به پروب‌های مطلق یا absolute مشهور هستند. این پروبها مقدار مطلق شرایط تست را به ما می‌دهند. پروب‌های مطلق برای تشخیص انواع فلز و تشخیص ترکها در بسیاری از موقعیت‌ها بسیار خوب است، همچنین این پروب به تغییرات حرارتی و تغییرات نوع فلز و ... حساس است. پروب مرسوم دیگری که استفاده می‌شود پروب دیفرانسیلی است که دو المان حس‌گر دارد که دو ناحیه مختلف را تست می‌کند. پاسخ این ابزار تفاوت بین جریانهای گردابی و موقعیت‌های دو نقطه مختلف است. پروب‌های دیفرانسیلی برای تشخیص عیوب کوچک مفید است همچنین تحت تأثیر lift-off (اگرچه حساسیت در همین زمینه کاهش می‌یابد)، تغییرات حرارتی و (با فرض اینکه مدارهای ابزارمان در شرایط تعادل عمل کند) و عیوب خارجی نیست.

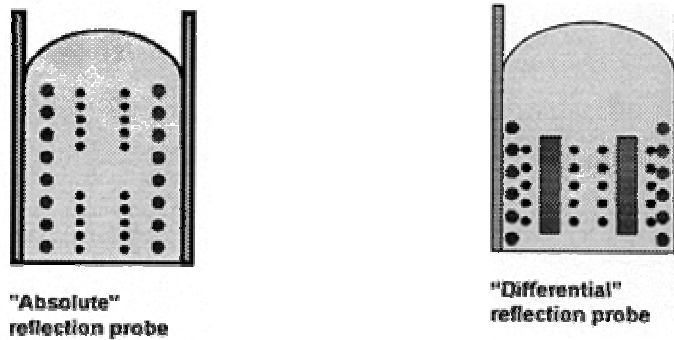
شکل ۴-۴۵ نمایانگر پاسخ خاصی از یک پروب دیفرانسیلی است.

Lift-off باید حذف شود با فرض اینکه پروب کاملاً تنظیم شده باشد، البته همچنان پاسخ مقداری لرزش دارد مثل اینکه پروب تکان می‌خورد و نوسان می‌کند.



۴-۴۵. پروب دیفرانسیلی

پروبهای انعکاسی یا پروبهای محرک بالابرنده، یک سیم‌پیچ اولیه دارند که بوسیله نوسان‌ساز تحریک می‌شود و یک یا بیشتر سیم‌پیچ حس‌گرددارد که به مدار اندازه‌گیری متصل است. با توجه به شکل سیم‌پیچ‌های حس‌گر ممکن است پروبهای انعکاسی پاسخ‌هایی شبیه پروبهای دیفرانسیلی و یا مطلق بدهند.



۴-۴۶- مقایسه پروب انعکاسی و پروب دیفرانسیلی

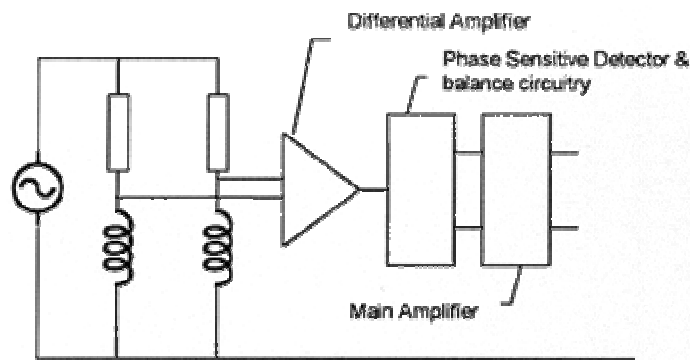
مهمترین مزایای پروبهای انعکاسی موارد زیر است:

- سیم‌پیچ‌های محرک و بالابرنده جداگانه برای اهداف مورد نظر ما بهینه می‌شوند.
- نسبت به پروبهای مشابه که به صورت پل نصب می‌شوند پهنای فرکانسی بیشتری دارند.
- سیم‌پیچ محرک بزرگتر میدان بزرگتری را موجب می‌شود در نتیجه در نفوذ و خصوصیات lift-off اثر مطلوبی دارد.

۴-۸-۶ مدارهای الکتریکی مهم جهت اندازه‌گیری ولتاژ پروب جریان‌های گردابی

۴-۸-۶-۱ پل

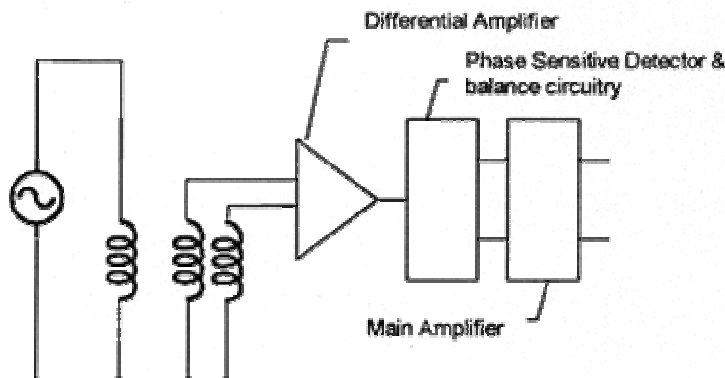
دو سیم‌پیچ (دیفرانسیلی یا مطلق همراه سیم‌پیچ تنظیم‌کننده) پایه‌های پل را می‌سازند. وقتی پل تنظیم می‌شود ولتاژ اندازه‌گیری شده صفر می‌شود. هر تغییری در موقعیت هر کدام از سیم‌پیچ‌ها باعث به هم خوردن تنظیم پل می‌شود. درجه دور شدن از حالت تنظیم شده به تغییر امپدانس سیم‌پیچ وابسته است.



۴-۴۷. پل اندازه‌گیری

۴-۸-۶-۲ محرک بالابرنده

همان‌طور که ملاحظه می‌کنید المانهای اساسی این مدار هم مشابه مدار پل است، تغییرات لازم برای دست یافتن به سوئیچینگ ساده تر و تغییرات اتصالات پروب است.



۴-۴۸-محرک بالابرنده

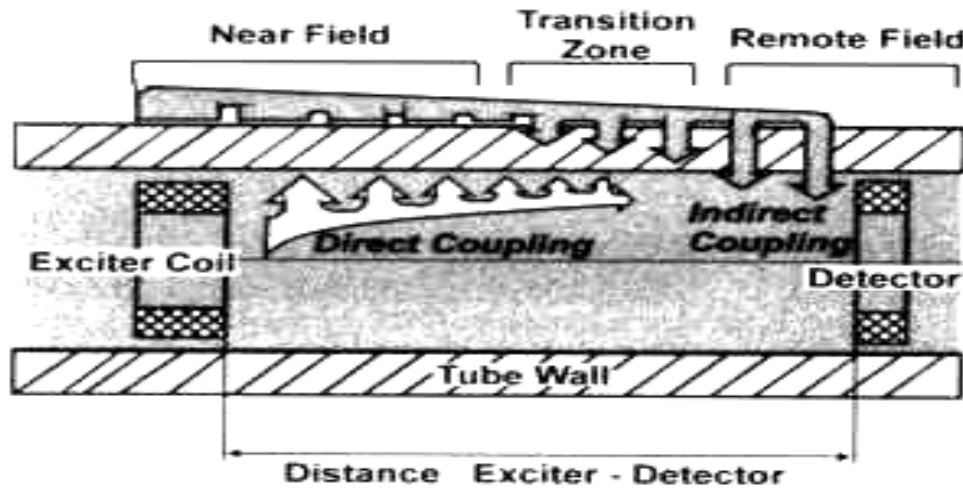
۴-۸-۷ اصول روش میدان دور جریان گردابی^۱ [35], [36]

تست جریان گردابی یک روش الکترومغناطیسی است که تنها در مواد هادی کاربرد دارد. کاربردهای آن از تشخیص ترک تا چیدن اجزاء کوچک با هرشاری، انواع اندازه‌ها یا انواع مواد می‌باشد. این روش در واقع خود برای شناسایی خوردگی و ترک‌ها روش کاملی است که توانایی شناسایی هر نوع نقص چه محوری و چه محیطی را دارد.

وقتی یک هسته انرژی‌دار (مغناطیس شده) به سطح یک فلز نزدیک شود، جریان گردابی به ماده القاء می‌شود. این جریانها که میدان مغناطیسی را تنظیم می‌کنند تمایل دارند که در برابر میدان مغناطیسی معمولی مقاومت کنند. امپدانس سیم پیچ نزدیکی ماده بوسیله حضور جریان گردابی تحریک شده در ماده، تأثیر می‌پذیرد. هنگامی که جریان گردابی داخل ماده بوسیله حضور عیوب یا تنوع مواد تغییر یابد امپدانس سیم پیچ تغییر می‌کند. این تغییرات به شکلی اندازه‌گیری و نشان داده می‌شود که نوع عیب و شرایط ماده را مشخص می‌کند.

^۱ Remote Filed Eddy Current

یک پروب RFEC شامل سیم پیچ تحریک و سیم پیچ آشکارساز با فاصله مشخصی بین این دو می‌شود. پروب از لوله ای که می‌خواهیم بازرسی کنیم عبور می‌کند. سیم پیچ تحریک با فرکانس پایین و جریان متناوب (عموماً سینوسی) تغذیه می‌شود. جریان تحریک یک میدان الکترومغناطیسی در اطراف سیم پیچ تحریک ایجاد می‌کند. انرژی میدان در جهت محور داخل لوله و همچنین در دیواره لوله گسترش می‌یابد. جریان گردابی که در دیواره لوله القاء می‌شود میدان دومی را ایجاد می‌کند که از خارج لوله می‌تواند اندازه گیری شود. این میدان ثانویه بسیار ضعیف تر از میدان اولیه ای است که از سیم پیچ تحریک داخل لوله ایجاد شده است و اختلاف فاز واضحی نیز با میدان اولیه دارد و تنها جهت شارش انرژی از داخل لوله به سمت خارج آن است. این ناحیه میدان نزدیک¹ نام دارد.



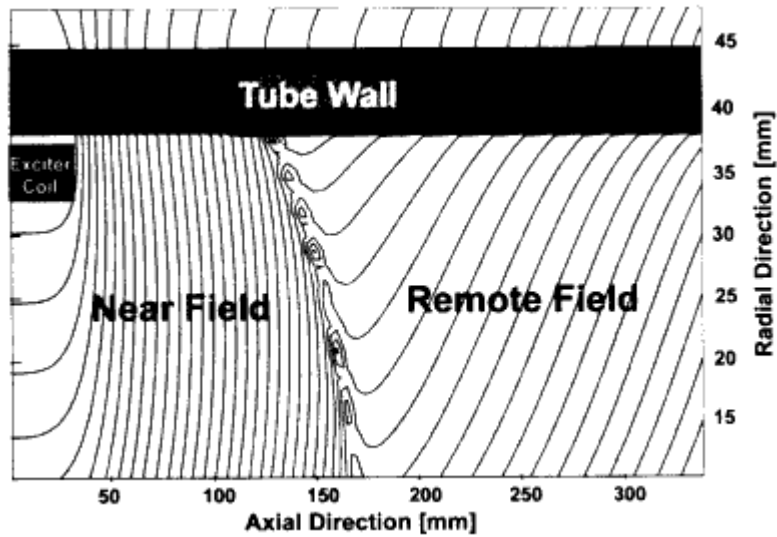
۴-۴۹. تصویری از سیستم RFED

شتاب در ناحیه میدان نزدیک در جهت محور زیاد است زیرا باید بتواند انرژی برای القاء جریان گردابی به دیواره لوله فراهم کند. شتاب میدان ثانویه در خارج از لوله بسیار کمتر است. البته در فاصله محوری از سیم پیچ تحریک ناحیه ای وجود دارد که در آن میدان ثانویه قوی تر از میدان اولیه است. این ناحیه را میدان دور² می‌نامند. ناحیه ای که بین میدان دور و میدان نزدیک وجود دارد ناحیه ناپایدار³ نام دارد. در این قسمت جهت شارش انرژی برعکس می‌شود. اگر سیم پیچ آشکارسازی در این ناحیه قرار گیرد میدان الکترومغناطیسی که اندازه گیری می‌شود میدانی است که با القاء انرژی که دو بار طول لوله را پیموده است ایجاد شده است. یعنی اینجا صحبت از دو مسیر متفاوت انرژی است. در مسیر مستقیم تزویج انرژی بطور مستقیم از سیم پیچ تحریک ایجاد می‌شود، در مسیر غیرمستقیم تزویج انرژی به خارج لوله می‌رود و دوباره به سمت داخل انتقال می‌یابد. اگر عیبی در دیواره لوله در مسیر تزویج غیرمستقیم باشد، با تغییر میدان الکترومغناطیسی میدان دور مشخص می‌شود.

¹Near Field

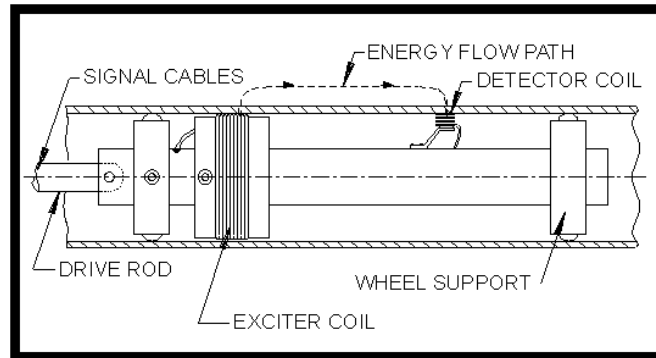
² Remote Field

³ Transition Zone



۴-۵۰. مقایسه میدان الکترومغناطیسی

۴-۸-۷-۱ کاربرد میدان جریان های گردابی از راه دور [36]



۴-۵۱. نمایی از سیستم RFEC

با استفاده از پروپ های داخلی از روش RFEC و یا میدان جریان های گردابی از راه دور، برای بازرسی لوله ها می توان استفاده کرد. با استفاده از سیم پیچ محوری به عنوان محرک که انرژی آن توسط جریان AC فرکانس پایین تامین می شود و سیم پیچ های تشخیص دهنده نزدیک دیواره داخلی که برای دستیابی به انتقال مناسب و داشتن حساسیت یکسان برای تشخیص عیوب داخلی و خارجی، به اندازه دو برابر قطر لوله از هم دور می باشند.

محاسبات انجام شده مختصر و مختصات قطبی که برای نمایش رابطه ولتاژ و عیوب می باشد دو بعدی است. در لوله های فرومغناطیسی و غیر آن هرگونه شکاف و درزی قابل شناسایی و بحث می باشد. میدان های القا شده ای که در نتیجه وجود نقص بوجود می آید موجب تفسیر و روشن شدن عیوب می شود. بین محرک و حس گرهای دسته بندی شده^۱ دو مسیر مشخص وجود دارد یک مسیر مستقیم که در داخل لوله بسته می شود و به سرعت تاثیر آن کم می شود و مسیر دیگر مسیر اتصال غیر مستقیم که به طرف بیرون از دیواره منتشر می شود. در دیواره خارجی میدان به سرعت با تضعیف کمتری پخش می شود این مسیر میدان به سمت داخل

^۱ Array Sensor

لوله منتشر شده و یک مسیر بسته ای را بوجود می‌آورد. خلاف قاعده هر جا در مسیر غیر مستقیم تغییری در دامنه و فاز سیگنال دریافتی پیش آمد می‌توان نتیجه گرفت که در آنجا یک عیب وجود دارد.

در تکنیک RFEC اثر پوسته یک سری محدودیت در نزدیکی سطح پروب ایجاد می‌کند ولی این شیوه قابلیت شناسایی نقص در تمام ضخامت خط لوله بدون استفاده از جریان با فرکانس خیلی پایین را دارد و تاثیر اثر پوسته را تا حد امکان کاهش می‌دهد.

علت قابلیت زیاد این روش به خاطر حساسیت زیاد میدان های دور جریان های گردابی به کوچکترین نقص می‌باشد و توانایی بالای آن در تعیین عیوب داخلی و خارجی است.

در ادامه مبحث به چگونگی پردازش اطلاعات و روش‌های محاسباتی و استفاده از نتایج بدست آمده و می‌پردازیم.

۴-۹ چگونگی بهره‌گیری از اطلاعات [27]

توپک‌های MFL نشت فلو را در فواصل زمانی مشخص هم در جهت محوری و هم در جهت محیطی در لوله ثبت می‌کند. فواصل زمانی داده‌ها در جهت محیطی با تعداد حس‌گرها مشخص می‌شود. بعضی سیستم‌های MFL قدیمی فاصله بین حس‌گرها در حد چند اینچ بود، اما آخرین نسل توپک‌های ارزیابی حس‌گرهای بیشتری دارند. یک "pig" 24" دقت بالا، چیزی حدود 150 تا 300 حس‌گر خواهد داشت بنابراین فواصل داده‌های محیطی بین "0.25 تا 0.5" و یا 0.635cm تا 1.27cm خواهد بود.

فاصله زمانی ثبت داده‌های محوری توسط سیستم ثبت داده‌ها تعریف می‌شود و معمولاً بین 2.5mm تا 5mm خواهد بود. مثلاً برای یک ارزیابی ۱۰۰ مایلی با استفاده از یک توپک 200 حس‌گری و فواصل ثبت داده 0.1" و یا 0.254cm به بیش از یک میلیارد اندازه‌گیری فلوی نشتی احتیاج خواهد بود. داده‌های ثبت شده^۱ بایستی برای آشکارسازی وجود احتمالی خرابی تست شوند. بعد از اینکه یک خرابی پیدا شد (جدول داده‌ها) داده‌های ثبت شده بایستی برای تعیین شکل هندسی و محل آن بیشتر آنالیز شود. فرآیندهای آشکارسازی و تعیین اندازه معمولاً بطور دستی انجام می‌گیرد. البته روش‌های اتوماتیک کامپیوتری هم کم‌کم شروع به وارد شدن در این زمینه کرده‌اند.

روشهای نمایش زیادی برای کمک به فرآیند تحلیل جدول داده‌ها یا داده‌های ثبت شده، توسعه و رشد یافته‌اند. آشکارسازی با نمایش اطلاعات منطقه وسیعی از داده‌های نشت در صفحه نمایش آغاز می‌شود. زمانی که خرابی‌ها شناسائی شدند روش‌های نمایش اطلاعات اضافی و دیگر از قبیل ثبت نمودارهای نواری و صفحات نمایشی تولید شده با کامپیوتر و سه بعدی با لبه‌ها و رنگهای مختلف که در بخش ۴-۳ توضیح داده شده است، به تحلیل اضافه می‌شوند.

۴-۹-۱ کتابخانه‌هایی از سیگنال‌های خرابی

مثال‌های انتخابی در سراسر این گزارش برای نشان دادن نتیجه یک پارامتر و یا متغیر ارزیابی بکار گرفته شده‌اند. یک بینش و دید اضافی در مورد طبیعت نشت فلو می‌تواند از مقایسه این سیگنالها با پارامترها و متغیرهای ارزیابی خرابی بسیاری بدست آید.

¹ Data Logging

سیستم شبیه سازی خط لوله GRI تجهیزات و مجموعه داده‌های خرابی‌های مختلف مورد نیاز جهت نشان دادن اینکه پارامترهای مختلف چگونه بر سیگنالهای MFL تاثیر می‌گذارند را داراست. ابزار MFL test bed vehicle برای جمع‌آوری داده‌های جمع‌آوری شده در طی ارزیابی صدها خوردگی فلز بطور آزمایشی استفاده شده است.



۴-۵۲. سیستم شبیه سازی جهت مدل‌سازی هرگونه خرابی

داده‌های حاصله از آزمایش‌های انتخاب شده تفسیر شده و در کتابخانه‌های سیگنال‌های خرابی ذخیره می‌شوند. این نتایج نشان دهنده نشت فلوی شرایط ارزیابی و شکل هندسی خرابی‌ها می‌باشد. نقشه‌های نشتی فلوی موجود در این کتابخانه‌ها همانطوری که بعداً در این قسمت آورده شده است و امکان دستیابی آنها وجود دارد. هر رابطه جدولی از خرابی‌ها را برای یک کتابخانه فراخوانی می‌کند. با کلیک روی شماره خرابی سیگنال MFL مربوط به آن خرابی در یک صفحه نمایش فوتوگرافی ظاهر خواهد شد. مقیاس رنگ نمایش برای هر کتابخانه ثابت بوده و بستگی به محدوده دینامیکی سیگنال‌ها در داخل آن کتابخانه دارد. برای مثال کتابخانه مجموعه آشکارسازی خوردگی فلز 4 گوس (واحد شدت میدان مغناطیسی) در هر مقیاس تغییر رنگ دارد. زمانیکه کتابخانه مجموعه مشخصه سازی (تعیین مشخصه) خرابی‌های بزرگتر دارد چیزی حدود 10 گوس در هر مقیاس تغییر رنگ دارد. نقشه‌های نمایش شبکه‌هایی در بالای آن جهت کمک در اندازه گیری عرض و طول خرابی دارند که هر کدام نشان دهنده عکسی از ناحیه خورده شده و شرحی از وضعیت هندسی خرابی می‌باشد. یک مقیاس رنگ به همراه ماکزیمم و مینیمم دامنه‌های سیگنال نیز نشان داده شده است. کتابخانه سیگنال‌های خرابی شامل موارد زیر می‌شود:

❖ کتابخانه تعیین مشخصه خوردگی فلز

این کتابخانه خرابی‌های خوردگی بزرگتر و خرابی‌هایی که دامنه‌های نشت فلوی بزرگی را تولید می‌کنند شامل می‌شود. اکثر خرابی‌ها به اندازه کافی بزرگ هستند که احتیاج به یک کاهش فشار و یا تعمیر لوله‌های در حال کار دارند. بعضی از خرابی‌ها طوری است که بایستی حتماً لوله را سرویس کرد ولی شکل هندسی مخصوص دارند که فلوی نشتی زیاد را تولید می‌کنند. خرابی‌های دیگری نیز پارامترهای هندسی‌شان طوری است که شبیه آنهایی هستند که سیگنال‌های بزرگ تولید می‌کنند و یا خرابی شدید دارند. محدوده عمق خرابی‌ها از ۲۰ تا ۸۰ درصد و عرض و طول آنها از ۱ تا ۶ اینچ است. این خرابی‌ها در توسعه روشهای تعیین اندازه خوردگی بسیار مفید هستند.

❖ کتابخانه آشکار سازی کاهش فلز

این کتابخانه شامل خرابی‌های کوچکتر خوردگی است و نیز خرابی‌هایی که دامنه‌های فلوی نشتی کوچکتری را تولید می‌کنند. اغلب این خرابی‌ها عمق کمتر از ۲۰٪ و یا طولی کمتر از ۱ اینچ را دارند و بعضی از اینها از

نظر محوری دراز و از نظر محیطی باریک هستند که سیگنال‌های فلوی نشتی کوچکی تولید می‌کنند. این خرابی‌ها در تعیین معیارهای آستانه آشکارسازی مفیدند.

❖ کتابخانه تاثیرات متقابل و فعل و انفعالات خوردگی فلز

این کتابخانه شامل یک مجموعه اکتشافی از خرابی‌هاست که برای نشان دادن اثرات شکل هندسی خرابی‌های مرکب استفاده می‌شود. این خرابی‌ها زمانی که برای توسعه توابع تعیین مشخصه استفاده نمی‌شوند برای توسعه و رشد یک درک و فهم عمومی و کلی در مورد اثرات خرابی‌های مجاور مفید خواهند بود. بعضی از خرابی‌های موجود در هر سه کتابخانه طوری هستند که مقایسه‌های کیفی بین آنها می‌تواند انجام شود. لیکن از مقایسه‌های کمی بایستی اجتناب شود چونکه پیکربندی مغناطیس کننده یا حس‌گرها برای هر سه کتابخانه متفاوت است.

۴-۹-۲ آنالیز داده‌های فلوی نشتی

آخرین مرحله در یک ارزیابی MFL تحلیل و آنالیز آنهاست. تحلیل، فرآیند تخمین شکل هندسی یا شدت یک خرابی از روی میدان فلوی نشتی اندازه‌گیری شده است. تکنیک‌ها و موفقیت تحلیل داده‌ها MFL بستگی به امکانات و محدودیت‌های توپک با استفاده از پدیده MFL هستند که از روی طراحی‌ها و شرایط عملیاتی بدست می‌آیند و ساخته می‌شوند. یک طراحی معمولی شامل انتخاب یک فاصله کمتر قطب‌های مگنت به دیواره جهت ایجاد قابلیت بهتر برای عبور از خم‌های شدیدتر یا امکان شناسایی بهتر پوسیدگی صفحات است. تفسیر سیگنال‌های MFL مشکل است. زیرا که رابطه ساده‌ای بین شکل سیگنال و شکل هندسی خرابی وجود ندارد. تعیین مشخصه، از ترکیب متغیرهای ارزیابی با سرعت سیال، مغناطیس باقیمانده، تغییرات در خواص فولاد و فشار در حال کار گاز، حاصل می‌شود. هدف از این قسمت نشان دادن قابلیت تعیین مشخصه روش‌های تحلیل است که نوعاً برای تحلیل داده‌های MFL که از ارزیابی خط بدست آمده است، بکار می‌روند. انتظارات اجراء از قبیل نیازهای ارزیابی، محل پوشش، آشکارسازی دقت و تعیین مشخصه را در بر می‌گیرد.

۴-۹-۲-۱ دقت تعیین محل

اغلب سازندگان MFL گزارش می‌دهند که ابزار آنها در تعیین محل دقتی برای ۹۰ تا ۲۱۰ سانتی‌متر یا 0.1 تا 0.3 درصد فاصله از نزدیکترین نقطه مرجع می‌باشند. ابزار ارزیابی محل یک نشان را با اندازه‌گیری‌های ادمتری از نقاط مرجع مشخص تعیین می‌کنند. بنابراین دقت تعیین محل یک توپک به دقت ادمتر و محل نقاط مرجع بستگی دارد. یک اپراتور خط لوله اخیراً با استفاده از نشانگرهای مغناطیسی مرجع^۱ در هر 1.5 مایل در طول مسیر خط لوله با 0.1 درصد عدم دقت، به دقت تعیین محل مورد نظر در حدود 1.2m بین دو نشانگر دست یافته است. گزارشات اندکی از دقت واقعی ابزار آلات MFL در تعیین محل ارائه شده است یک سازنده ابزارآلات پیشرفته گزارش کرده است که ۹۷ درصد از نشانه خرابی در حدود 150cm از محل واقعی فاصله داشته است.

رسم دقیق محل جزئیات شیر آلات، اتصالات شاخه‌ها و سایر خصوصیات خط لوله به دقت تعیین محل نقص کمک شایانی می‌کند. با تنظیم خطوط مرجع (برای مثال نشانگرهای مغناطیسی) در هر مایل یا کمتر، سازنده می‌تواند دقت تعیین محل ابزار خود را به یک مقدار مورد نظر برساند. در خطوط لوله‌ای با نقاط مرجع تعریف

¹ Bench marker

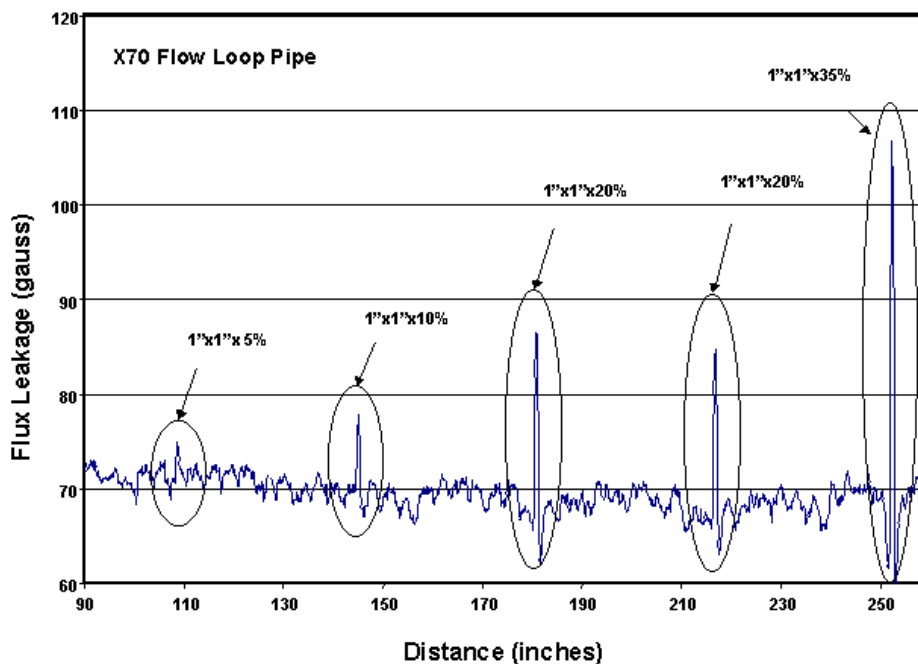
شده مشخص و مناسب دقت تا حدود چند اینچ می‌رسد. با وجود این تا زمانی که ادومتر درست عمل نکند ضریب خطا وجود خواهد داشت. عدم دقت ادومتر می‌تواند ناشی از پوسیدگی و لغزش دندانها باشد.

۴-۹-۲-۲ آستانه‌های آشکار سازی

به طور کلی و عمومی دامنه و اندازه میدان فلوی نشتی بستگی به مقدار خوردگی فلز دارد. بنابراین آستانه آشکار سازی یا مینیمم ناحیه خوردگی فلز قابل آشکار سازی برای ابزارهای MFL به طول، عرض و عمق ناحیه بستگی دارد. گزارشات متعددی که آستانه آشکار سازی را برای ابزارهای MFL ارائه می‌کند، برای ابزارهای متداول سازندگان بیان می‌کنند که کوچکترین لکه‌های خوردگی عمقی بین ۵ تا ۲۰ درصد ضخامت دیواره را شامل می‌شوند. بطور متشابهی کوچکترین لکه قابل آشکار سازی طول و عرضی در حدود ۸۰ درصد ضخامت دیواره را دارا هستند که البته برای ابزارآلات پیشرفته تر کوچکترین لکه‌های قابل شناسایی حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد عمق برای یک سازنده و برای سازنده دیگر در حدود ۲۰ تا ۷۰ درصد عمق می‌باشد. ۲۰ درصد خوردگی از نظر عمق اشاره به لکه‌ای با طول و عرض مساوی با سه برابر ضخامت لوله دارد. ۴۰ تا ۷۰ درصد عمق اشاره به لکه‌ای دارد که حدود ۱/۳ کوچکتر است.

از نظر تئوریک آستانه آشکار سازی بایستی تابعی از دامنه فلوی نشتی که با مقدار نویز و تراز سیگنال پیش زمینه مقایسه می‌شود باشد. خطوط فولادی معمولی سطح نویز پیش زمینه‌ای در حدود ۳ گوس را دارا هستند. اما دامنه نویز از ۱۵ تا حدود ۲۰ گوس می‌رسد.

آستانه آشکار سازی بستگی به نسبت سیگنال به نویز دارد. یک عمق خرابی حدود ۱۰ درصد سیگنالی تولید می‌کند که بزرگتر از اندازه‌های نویز معمولی است. اما یک خرابی ۵ درصد سیگنال کوچکی تولید می‌کند که در نویز گم می‌شود. بنابراین آستانه آشکار سازی ۱۰ درصد قابل دستیابی است. برای اغلب خط لوله فولادی آستانه‌های پائین تر فقط در فولاد خالص امکان پذیر هستند و آستانه‌های بالاتر در فولادهای نویزدار قابلیت شناسایی را دارد.



۴-۹-۲-۳ احتمال آشکار سازی

اغلب سازندگان ابزارهای متعارف، اطلاعات مربوط به اندازه‌های مورد انتظار آشکارسازی را بطور عمومی منتشر نمی‌کنند. این داده‌ها بصورت اختصاصی برای هر شرکت در نظر گرفته می‌شود و داده‌های ارائه شده، معمولاً به صورت احتمال است.

به طور مثال یک سازنده ابزار پیشرفته گزارش می‌کند که در بازرسی یک خط لوله، حدود ۸۰ درصد خرابیهای خوردگی فلز با طول و عرض بزرگتر ضخامت لوله را آشکارسازی کرده‌اند. این اندازه مطمئن شامل False calls و همچنین عیوب شناسایی نشده نیز می‌شود. بنابراین اندازه مطمئن واقعی در آشکار سازی ممکن است بالاتر باشد.

در یک گزارش منتشره برای یک ابزار پیشرفته یک اپراتور خط در مورد نتایج آزمایشی که در خطی با ۷۹ درصد خوردگی انجام شده بود گزارش داد که این نواحی خورده شده از سوراخ‌های خوردگی که از نظر عمق از ۱۴ تا ۶۱ درصد و لکه‌های خوردگی که از ۱۱ تا ۵۲ درصد تغییر می‌کردند تشکیل شده بود. تمامی نواحی خورده شده آشکار شدند و هیچ نوع false calls گزارش نشد. یک سازنده ابزار پیشرفته همچنین گزارش داد که در یک برنامه ۳۳ نشانه تعبیه شدند و تمامی این نشانه‌ها توسط توپک تشخیص داده شدند و هیچ نشانه‌های اشتباهی گزارش نشد. از نظر تئوری احتمال آشکارسازی بایستی توسط دامنه و طیف سیگنالهای ناشی مقایسه شده با سیگنالهای پس زمینه تنظیم شوند. اگر میدان ناشی خیلی بالاتر از سطوح پس زمینه و نویز باشد احتمال آشکارسازی حدود حوالی ۱۰۰ درصد می‌باشد. در سطوح نویز یا نزدیک آن و هم چنین نزدیک سطوح پس زمینه احتمال آشکار سازی بطور قابل ملاحظه‌ای افت می‌کند.

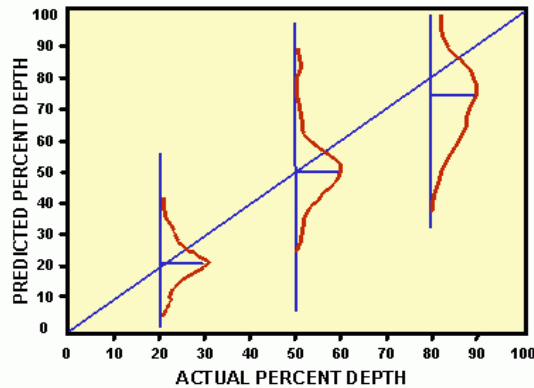
یک ملاحظه مهم و قابل توجه در تعیین احتمال آشکارسازی در طول یک ارزیابی علمی وجود نقاط کور^۱ می‌باشد و یا نواحی که لوله در آن نواحی ارزیابی نشده است. نواحی و نقاط کور می‌توانند ناشی از سرعت بیش از حد جدا شدن حس‌گرها از دیواره لوله و یا ضربه خوردن ناگهانی آن، رسوبات داخل لوله، خراب شدن حس‌گرها، خراب شدن قسمت‌های الکترونیکی و امکانات ابزار ارزیابی تحلیلگر و یا اشکالات برنامه آنالیز و تحلیل باشد. بسته به امکانات یک ابزار حضور نقاط کور می‌تواند شدیداً بر احتمال آشکارسازی اثر بگذارد.

۴-۹-۲-۴ تعیین مشخصه خرابی‌های خوردگی فلز

زمانی که یک خرابی آشکار شد سیگنال مربوط به آن بایستی برای تعیین پتانسیل تاثیر خرابی بر عملکرد عملیات خط لوله آنالیز شود. بدلیل اینکه هیچ رابطه‌ای مستقیماً بین نشت فلو و شکل خرابی وجود ندارد. روش‌های زیادی برای تفسیر سیگنالهای MFL و تعیین شکل خرابی توسعه داده شده‌اند. این روشها شامل تطبیق الگوهای روشهای آماری و شبکه‌های عصبی می‌باشند. هر روش درجه متغیری از موفقیت را دارد و هر کدام قوت و ضعف خود را داراست. توسعه روش تعیین مشخصه با استفاده از روشهای آماری بسیاری از موضوعات مرتبط با توابع تعیین مشخصه را نشان می‌دهد. متداولترین روش به کار رفته برای آنالیز سیگنالهای MFL انجام محاسبات براساس خصوصیات سیگنالها می‌باشد.

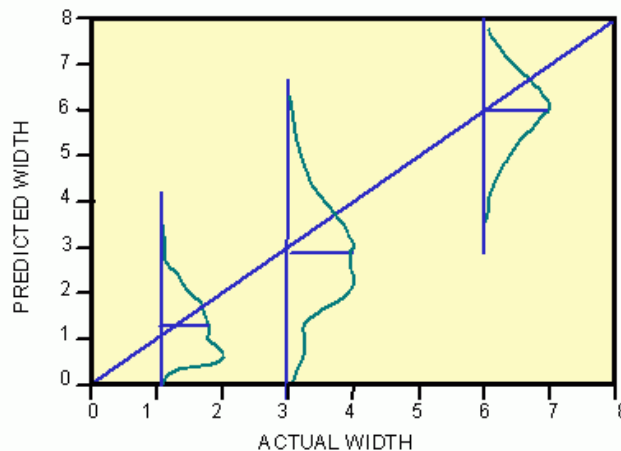
¹ Blindspot

برای تعیین تخمین‌های واقعی با استفاده از امکانات هر متد و روش، از مدل سازی ریاضی کلاسیک برای توسعه الگوریتم تعیین مشخصه استفاده شد. نخست خصوصیات سیگنال از قبیل پیک دامنه، مدت استمرار¹ سیگنال (نسبت H به L) و پاسخ حس‌گرها که در واقع از پاسخ فلوی نشتی استخراج شده، استفاده می‌شود. سپس روش آماری برای تعیین مشخصه و الگوریتم‌های جبران سازی را مورد استفاده واقع شده است. برای برخی ابزارهای شناسایی پیشرفته‌تر از نرم افزارهای خاصی برای برگرداندن سیگنالهای اندازه‌گیری شده به یک سری نقشه‌های محیط مرئی² از دامنه سیگنال استفاده می‌کنند. این منحنی‌های خطوط مرئی ممکن است متناسب با عمق خرابی کالیبره شوند. این فرآیند تبدیل به صورت روابط دامنه - عمق بکار رفته و برای آنالیز توپک‌های متداول استفاده می‌شود.



۴-۵۴. محاسبه دقت تعیین عمق

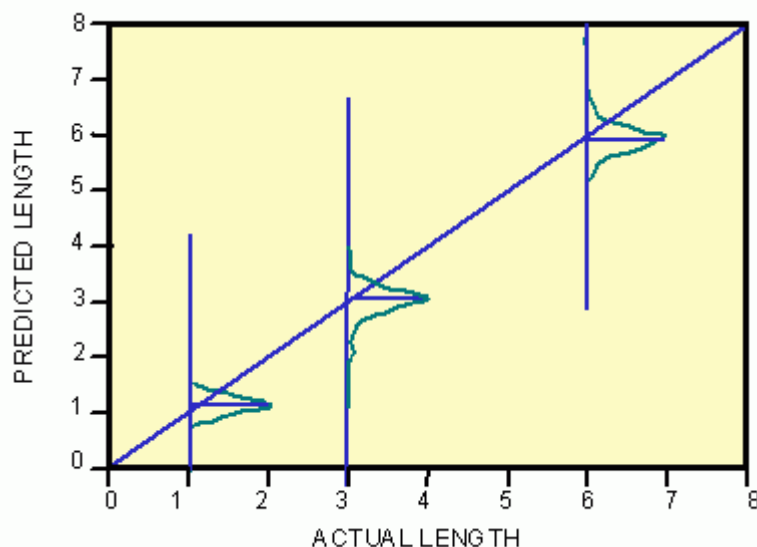
آنالیز آماری نشان می‌دهد که پارامترهای خرابی از قبیل نسبت عرض به طول در زمان تخمین عمق بسیار مهم می‌باشد. اگر پیش‌گوئی عمق به تنهایی از روی دامنه انجام شود یعنی سایر پارامترها در نظر گرفته نشوند دقت پائین می‌آید. دامنه خطای تخمین با افزایش عمق خرابی افزایش می‌یابد. عرض معمولاً توسط سازندگان ارزیابی‌ها گزارش نمی‌شود و زمانی که هم اینکار را می‌کنند اغلب براساس عرض سیگنال MFL می‌باشد. اغلب و یا تمام سازندگان گزارشی در مورد دقت عرضی (تخمین‌های عرض) ارائه نمی‌کنند. به خاطر اینکه نسبت عرضی به طول بطور قابل ملاحظه‌ای بر قابلیت پیش‌گوئی عمق تاثیر می‌گذارد.



۴-۵۵. محاسبه دقت عرضی

¹ Duration
² Contour map

طول خرابیهای تکی معمولاً توسط سازندگان ارائه می‌شود. دقت‌های گزارش شده معمولاً از ۰/۶۳۵ تا ۱/۲۷ سانتی‌متر با توجه به سطح اطمینان است.



۴-۵۶. محاسبه دقت عرضی

خطاهای تخمین طول اصولاً ناشی از خرابی شکل هندسی (و یا شرایط دائم محل نصب خطوط لوله) می‌باشند و یا در نتیجه خطاهای تصادفی است که این دو فاکتور اهمیت‌شان با افزایش طول خرابی زیاد می‌شود. اثرات شکل هندسی خرابی مخصوصاً زمانی مهم هستند که چند خرابی نزدیک همدیگر قرار بگیرند. در واقع دقت تعیین طول در جاهایی که خرابی‌ها نزدیک هم باشند کمتر خواهد بود. (در بخش مقایسه آنالیز خطی و غیرخطی تاثیر پارامترها دقیقتر مورد بررسی قرار می‌گیرد.)

۴-۹-۲-۵ دقت شدت خرابی

معیارهای دقت خرابی معمولاً از تخمین‌های اندازه طول و عمق یا تخمین‌های نمایش^۱ خرابی استفاده می‌کنند. برای تعیین اینکه آیا تعمیر لازم است یا نه در صنعت روشها و کدهایی از قبیل ASME B31G و RSTRENG که در واقع ارتباط بین شکل خرابی و شدت خرابی را تعیین می‌کنند استفاده می‌شود. (به ضمیمه ۱۰ مراجعه شود.)

برای یک لکه خرابی که کناره‌های آنها خوب مشخص و تعریف شده‌اند تخمین‌های طول عمق براساس ارزیابی MFL دارای دقت قابل قبولی می‌باشند و بنابراین تخمین‌های شدت نیز قاعده‌تاً بایستی دقیق باشند. برای نواحی که تعداد خوردگی بیش از یکی دارد، تخمین‌های طول و عرض مشکلتر می‌باشد. بطور کلی خطاهای مهم و قابل توجهی در پیش‌بینی عرض در مقایسه با پیش‌بینی عمق وجود دارند.

خطاهای تخمین شکل هندسی خرابی در محاسبات شدت خرابی نیز وارد می‌شوند. دقت تعیین مشخصه معمولاً برای خرابی‌های تکی و یا عمیق‌ترین خرابی در یک اتصال لوله گزارش می‌شوند. خرابی‌های تکی می‌توانند به عنوان یک خرابی مرکب یا خرابی تنها گزارش شوند. اثرات چنین گزارشی می‌توانند قابل توجه باشد. مخصوصاً زمانی که چند خرابی کوچک نزدیک هم بعنوان یک خرابی بزرگ گزارش می‌شوند. تاکنون هیچ کمپانی سازنده ارزیابیها بهترین تخمینها را برای محاسبات شدت خرابی انجام نداده‌اند. باید درک کرد که دقت

چنین محاسباتی برای استفاده از نتایج ارزیابی MFL لازم و ضروری می‌باشد تا بتوان عملیات حفاری و تعمیر خرابی‌ها را اولویت‌بندی کرد.

۴-۹-۲-۶ قابلیت‌های آشکارسازی MFL

MFL می‌تواند خرابی‌های خوردگی فلز را با اطمینان خوبی در خطوط لوله آشکار کند ولی مشکلات عملیاتی در عمل استفاده از آن را در برخی خطوط لوله محدود می‌کند. این محدودیتها ناشی از سیستم MFL نیستند بلکه ناشی از محدودیت‌های فیزیکی است که در یک سیستم مهندسی بوجود می‌آید از قبیل شیرهای کاهش دهنده در ورودی‌ها و یا تغییرات معمولی در شرایط عملیات مانند سرعت سیال می‌باشد. اغلب خرابی‌های خوردگی، یک فلوی نشتی قابل اندازه‌گیری را تولید می‌کنند که با سیستم MFL قابل آشکارسازی می‌باشد، هر چند که به قدری کوچک باشد تا تهدیدی برای سلامتی لوله نباشد.

نواحی خوردگی خیلی کم عمق، طولانی یا باریک، آشکارسازی سیگنال MFL مشکلتر می‌شود. خرابی‌های فوق‌العاده باریکی مثل لکه‌های جوشکاری و یا ترکهای ناشی از تنش^۱، سیگنالهای قابل اندازه‌گیری تولید نمی‌کنند. همچنین سطوح نويز زمينه و تغییرات سرعت توپک و مغناطیس باقیمانده بر آستانه آشکارسازی اثر می‌گذارد. این تغییرات عملیاتی در عمل اتفاق می‌افتند برای مثال بعد از اینکه توپک از یک خم خارج می‌شود و یا پس از عبور از یک گلوگاه که در آن زمان سرعت توپک می‌تواند با تغییر جریان کاملاً تغییر کند.

۴-۹-۲-۷ قابلیت‌های تعیین خصوصیات سیگنال دریافتی

همانطور که قبلاً گفته شد، اغلب خرابی‌های خوردگی فلز معمولاً با MFL می‌توانند آشکار شود، اما دقت تعیین مشخصه خود بسیار مهم است. آنالیزهای تعیین حداکثر فشار مطمئن یک خط لوله نیازمند اطلاعاتی در مورد عمق، طول و شکل نواحی خورده شده دارد در نتیجه دقت تعیین مشخصه، نقش مهمی در توانایی ابزار MFL برای فراهم آوردن نتایج قابل قبول و دقیقی که بتواند در تخمین حداکثر فشار مطمئن در حال کار به کار برده شوند، دارد. قابلیت یک سیستم MFL در تعیین مشخصات عمق، شکل و طول یک ناحیه خورده شده بستگی به سائز حس‌گرها و مهارت سیستم آنالیز داده‌ها دارد. سیستم‌های MFL متداول دارای قابلیت کمی برای تعیین دقیق مشخصه‌ها دارند، زیرا مجموعه آنها از حس‌گرهای بزرگ و سیستم تحلیل دستی (و نه کامپیوتری) استفاده می‌کنند. سیستم‌های MFL پیشرفته با حس‌گرهای کوچکتر و سیستم آنالیز کامپیوتری، پتانسیل بیشتری برای تعیین دقیق مشخصه‌ها دارند.

دقت تعیین مشخصه اغلب سیستم‌های MFL کاملاً متغیر است. اغلب سازندگان دقت‌های خیلی بالایی در مورد پیش‌بینی عمق و طول خرابی‌ها تکی برای محاسبات دقیق و سرویس دهی ارائه می‌کنند. لیکن سطح اطمینان اندازه‌گیری می‌تواند به این معنی باشد که خیلی از خرابیها بدرستی تعیین مشخصه نخواهد شد. برای مثال خیلی از سازندگان دقت عمقی در حدود ۱۰ درصد ضخامت دیواره و دقت طولی در حدود ± 0.5 اینچ با سطوح اطمینان ۸۰ درصد را بیان می‌کنند و این به این معنی نیست که از هر ۵ خط و خرابی، یک عدد بطور غلط تعیین مشخصه می‌شود. فقدان این سطح اطمینان ناشی از مشکلات ذاتی در رابطه با پیش‌بینی شکل هندسی خرابی می‌باشد. شکلهای پیچیده خرابی و شیارهای باریک و بلند، لکه‌های چندگانه، متغیرهای ارزیابی، مشکلات تحلیل و آنالیز را نمایان می‌سازد در نتیجه برای اپراتورهای خطوط لوله تخمین ماکزیمم فشار عملیاتی مطمئن براساس گزارشات ارزیابی MFL کنونی مشکل می‌باشد. برای گروهی از خرابی‌ها و یا خرابی‌هایی درون

¹ Stress Corrosion Cracks

خرابی دیگر با استفاده از تکنولوژی امروز MFL تعیین شدت خرابی دقیق نخواهد بود. دقت تعیین مشخصه بهبود یافته ابزار MFL به اپراتور اجازه می‌دهد تا درک بهتری از شدت خرابی گزارش شده داشته باشد. لیکن یک حد نهائی برای دقت تعیین مشخصه خواهد بود.

دقت تعیین مشخصه بالا همیشه لازم نخواهد بود. دقت لازم بستگی به هدف ارزیابی و تعداد نشانه‌های یافته شده دارد. در خطوطی با نشان‌های کم دقت تعیین مشخصه بالایی لازم نخواهد بود. اگر تمام نشانه‌ها مستقلاً ارزیابی شوند، برعکس جایی که دسترسی به خط لوله مشکل است و یا خطوطی با نشانه‌های زیادی دقت تعیین مشخصه خیلی مهم می‌شود. مخصوصاً در ناحیه بحرانی، همچنین دقت تعیین مشخصه خرابی خود بستگی به عمق نواحی خورده شده دارد. بی‌دقتی‌های اعمال شده در تخمین دیواره سالم (باقیمانده) مستقیماً بر شدت تخمین زده شده خرابی، تاثیر می‌گذارد. برای نواحی خرابی عمیق خطاهای عمق تاثیر بسیار زیادی بر محاسبات شدت گذاشته که میتواند خطرآفرین باشد. برای نواحی کم عمق خطاهای عمق زیاد مهم نیستند و کمتر تاثیر می‌گذارند.

۴-۱۰ آنالیز سه بعدی داده‌ها [37]

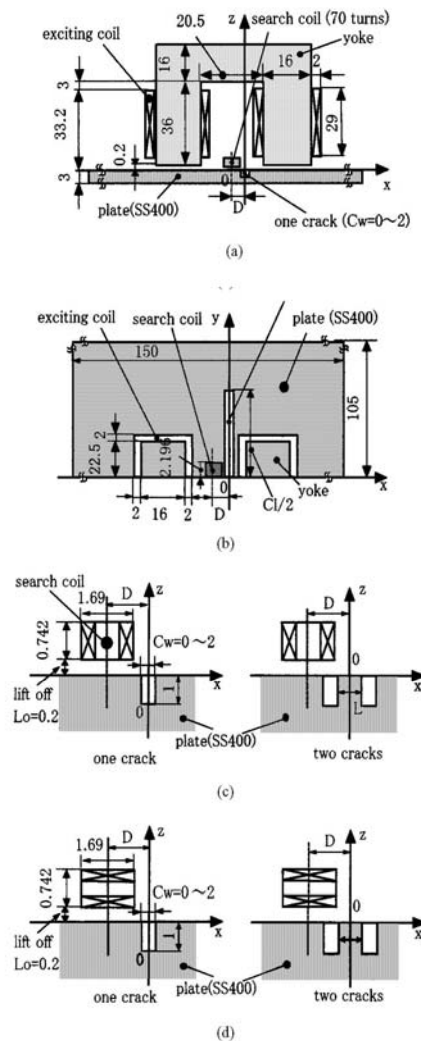


Fig. 1. Model of testing apparatus. (a) x-z plane. (b) x-y plane. (c) Search coil for measuring $|B_z|$ (x-z plane). (d) Search coil for measuring $|B_z|$ (x-z plane).

$|B_x|$

(c) x-y

(b) x-z

(a)

 $|B_z|$

(d)

در این بخش ما می‌خواهیم آنالیزهای عددی را که به صورت شیوه سه بعدی بر پایه اصول لبه ای با المان های محدود¹ استفاده می‌شود، توضیح دهیم. ضرورت استفاده آنالیز غیرخطی زمانی مشخص شد که با روش خطی (روش $j\omega$) مقایسه شد. ضرورت استفاده آنالیز غیرخطی به علت غیر خطی بودن منحنی B-H می‌باشد. تاثیرات عرض و طول برای شار نشتی توسط سیم پیچ جستجوگر² شناسایی می‌شود. رفتار میدان عمودی (Bz) و میدان موازی (Bx) چگالی شار نشتی مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین توانایی شناسایی این که یک یا دو ترک وجود دارد با تحلیل Bx و Bz امکان پذیر است. شکل های ۴-۵۷ مدلی از روش تست تناوبی شار نشتی مغناطیسی را نشان می‌دهد.

سیم پیچ جستجوگر همانطور که در شکل (c) -1 نشان داده شده، استفاده شده است و سیم پیچ بردار Z میدان ناشی از شار نشتی یعنی Bz را در نزدیکی ترک ها اندازه می‌گیرد. فاصله³ میان سیم پیچ جستجوگر و سطح استیل، 0.2mm است. عمق ترک 1mm است و اندازه rms جریان 1A و فرکانس موجود 1kHz است. فاصله زمانی Δt در روش مرحله به مرحله 6.25×10^{-5} انتخاب شده است. به منظور دست یافتن به یک جواب متناوب در حالت دائمی⁴، محاسبات در طول 2.5 دوره برابر 40 پله انجام گرفت. یوک، خطی در نظر گرفته شده است (relative permeability: $\mu_s=60000$) و جریانهای گردابی بوجود آمده در آن در آن صرف نظر می‌شود.

برای مقایسه روش تحلیل خطی (j ω method) نیز برای مقایسه در شرایط یکسان انجام می‌شود. ورقه ورقه شدن یوک در محاسبات ما آورده نمی‌شود. موقعیت های تحلیل و آزمایش در جدول ۱ آورده شده است همچنین منحنی B-H در صفحه (SS400) Steel که در این آزمایش استفاده شده است در جدول ۲ و شکل ۴-۵۸ آورده شده است.

¹ 3D edge-based hexahedral finite element method

² search coil

³ Lift off

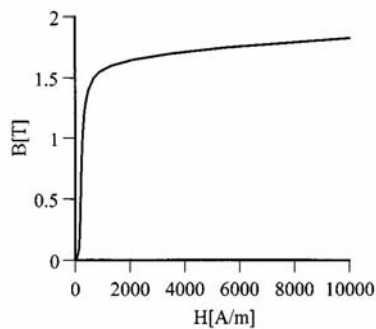
⁴ Steady-State

TABLE I
CONDITIONS OF ANALYSIS AND EXPERIMENT

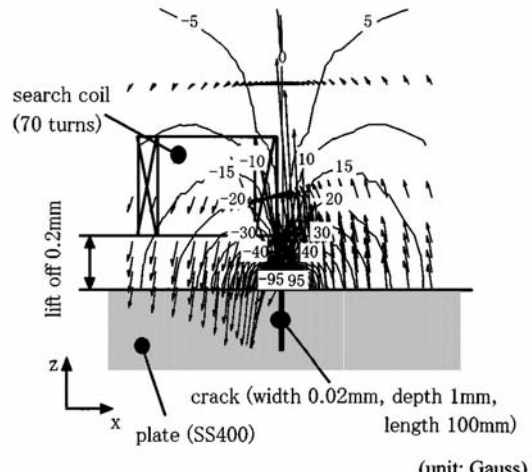
Exciting coil	1kHz, 1A(rms), 30turns × 2
Steel	SS400, $\sigma = 7.51 \times 10^6$ S/m
Nodes and elements	88095, 83232
Convergence criterion	N-R method 0.01T ICCG method 1.0×10^{-3}
CPU time	6.85 hours/1step, ($j\omega$ method: 3.54 hours) VT-Alpha5U-600MHz

TABLE II
NUMERICAL DATA OF B-H CURVE (SS400)

B (T)	H(A/m)	μ_s	B (T)	H(A/m)	μ_s	B (T)	H(A/m)	μ_s
0	0	0	0.80	230	2768	1.60	1310	972
0.05	101	394	0.90	249	2876	1.65	2120	619
0.10	138	577	1.00	267	2980	1.70	3490	388
0.20	162	982	1.10	295	2967	1.75	5490	254
0.30	177	1349	1.20	324	2947	1.80	8470	169
0.40	190	1675	1.30	384	2694	1.88	13200	113
0.50	199	1999	1.40	476	2341	1.94	18000	86
0.60	208	2296	1.50	676	1766			
0.70	218	2555	1.55	884	1395			



B-H



F)

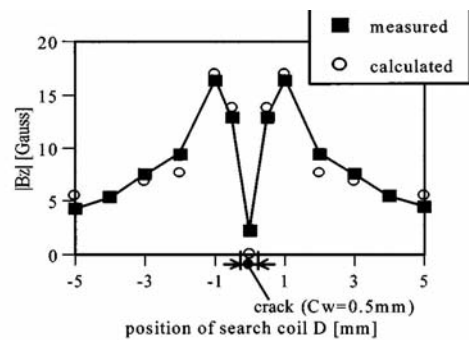


Fig. 4. Change of B_z by search coil position D ($C_w = 0.5$ mm, $C_l = 100$ mm).

شکل ۴-۶۰. تغییرات B_x بر اساس موقعیت سیم‌پیچ

۲-۱۰-۴ مقایسه آنالیز خطی و غیرخطی

مقایسه روش آنالیز خطی و غیرخطی در توزیع شار داخل steel در شکل ۵ نشان داده شده است. در آنالیز خطی ضریب نفوذپذیری، ماکزیمم مقدار یعنی $\mu_s = 3000$ برای یک صفحه استیل (SS400) انتخاب شده است.

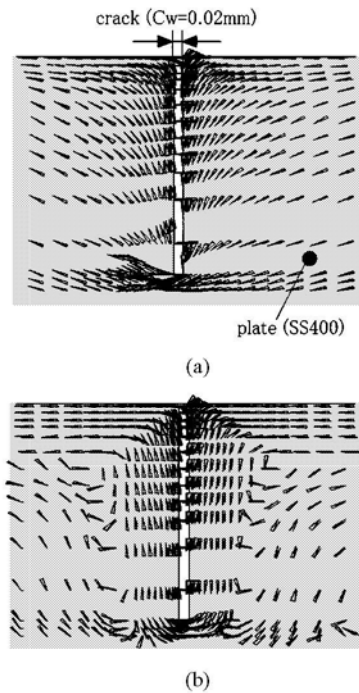


Fig. 5. Comparison of flux distributions at linear and nonlinear analyses ($Cw = 0.02 \text{ mm}$, $I = 1 \text{ A(rms)}$). (a) Linear analysis ($\mu_s = 3000$, $|B|_{\text{max}} = 21.2\text{T}$). (b) Nonlinear analysis [(2.25ms(36 steps), $|B|_{\text{max}} = 1.69\text{T}$].

شکل ۴-۶۱. مقایسه توزیع شار ناشی در آنالیز خطی و غیرخطی

در آنالیز خطی در $\omega t=0$ زمانی که جریان القایی ماکزیمم مقدار خود را دارا هست و در آنالیز غیرخطی نتیجه در ۳۵ پله از ۲،۲۵ دوره ماشین (2.25 cycles) نشان داده شده است. در آنالیز خطی چگالی شار 21.2T است که این مقدار غیرحقیقی می‌باشد. از طرف دیگر، در آنالیز غیرخطی شار در اطراف سطح استیل متمرکز شده است و ماکزیمم چگالی شار 1.96T می‌باشد.

در شکل ۴-۶۲ چگالی شار $|Bz|$ رادر داخل سیم پیچ اندازه گیرنده توسط دو روش بدست آورده است.

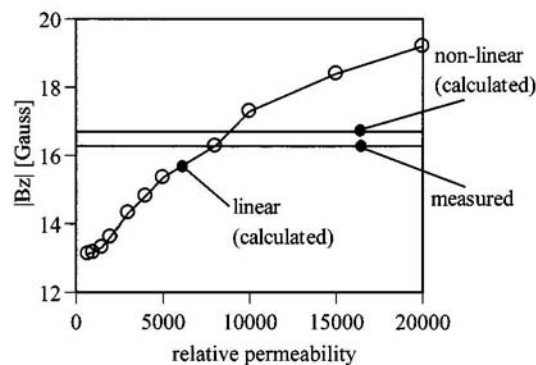


Fig. 6. Comparison of linear and nonlinear analyses ($Cw = 0.5 \text{ mm}$, $Cl = 100 \text{ mm}$, $D = 1 \text{ mm}$).

۴-۶۲. مقایسه مولفه میدان مغناطیسی در آنالیزهای خطی و غیرخطی

ماکزیمم مقدار ضریب نفوذپذیری با توجه به نمودار B-H که در شکل ۴-۵۹ آورده شده بود، ۳۰۰۰ می‌باشد. به منظور یافتن یک نتیجه مشابه نفوذپذیر را تا حدود ۸۰۰۰ که یک مقدار غیر واقعی است، برای روش

آنالیز خطی بالا می‌بریم. این دلایل نشان می‌دهد: در آنالیز خطی ضریب نفوذپذیری همیشه یکسان در نظر گرفته می‌شود. این باعث می‌شود همانطور که در شکل ۴-۶۱ نشان داده شده است چگالی شار در عمق Steel نفوذ کند، بنابراین نفوذپذیری باید به اندازه ای بزرگ باشد تا شار نشتی را افزایش دهد. در آنالیز خطی با تغییر نفوذپذیری تغییر چشم گیری در شار نشتی بوجود می‌آید. این مساله ما را به این نتیجه می‌رساند که آنالیز غیرخطی لازم الاجراء برای حل این پدیده در این تست می‌باشد.

۳-۱۰-۴ تاثیرات طول و عرض ترک

شکل ۴-۶۳ تاثیر طول CI را روی ماکزیمم چگالی شار B_{zmax} را که توسط سیم پیچ جستجوگر (search coil) اندازه گیری شده است، نشان می‌دهد.

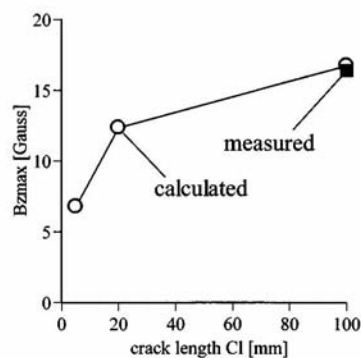


Fig. 7. Effect of crack length CI on B_z ($C_w = 0.02$ mm, $D = 1$ mm).

۴-۶۳. تاثیر طول ترک بر میدان مغناطیسی

این B_{zmax} یکی از مقادیر از دو قله را که توسط سیم پیچ جستجوگر (search coil) اندازه گیری شده است با تغییر موقعیت D نشان می‌دهد. B_z با افزایش CI زیاد می‌شود.

شکل ۴-۶۴ تاثیر C_w (عرض ترک) را روی B_{zmax} نشان می‌دهد. مقادیر اندازه گیری شده نیز مشخص است.

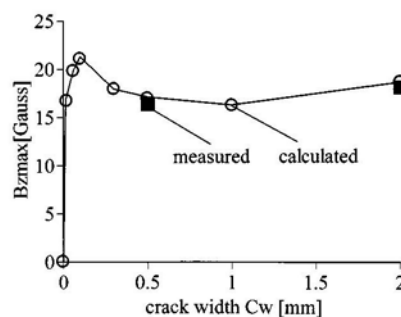


Fig. 8. Effect of crack width C_w on B_z ($CI = 100$ mm, $D = 1$ mm).

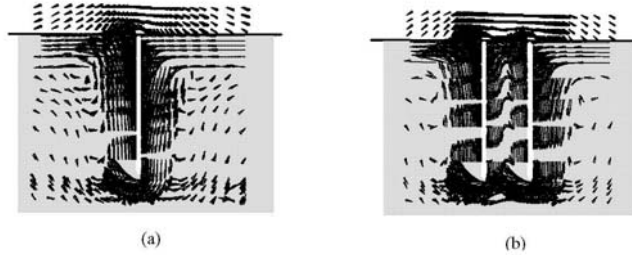
شکل ۴-۶۴. تاثیر عرض ترک بر مولفه Z از میدان مغناطیسی

تفاوت بین اندازه گیری شده (در دو نقطه) و محاسبه شده در حدود ۳,۵ درصد می‌باشد. B_z ناگهان با افزایش C_w افزایش می‌یابد و این اندازه قله در حدود $C_w = 0.1$ mm می‌باشد سپس B_z با افزایش بیشتر C_w کاهش می‌یابد. این طرز ظاهر شدن که مانند قله است به خاطر دلایل زیر است:

زمانی که Cw اندکی افزایش می‌یابد Bz نیز افزایش می‌یابد و این به علت شار نشستی است که از طرف ترک توسط سیم پیچ جستجوگر اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که Cw زیاد افزایش می‌بیند مقاومت مغناطیسی بیشتر شده و در نتیجه Bz در رنجی از Cw کاهش می‌یابد.

۴-۱۰-۴ رفتار شار نشستی در نزدیکی دو ترک

رفتار و توزیع شار نشستی در نزدیکی دو یا یک ترک توسط شکل ۴-۶۵ نشان داده شده است. فاصله (L) دو ترک 0.2mm است.



شکل ۴-۶۵. چگونگی رفتار شار نشستی در اطراف یک ترک (a) و دو ترک (b)

زمانی که $L=0.2\text{mm}$ باشد دو ترک با توزیع Bz تشخیص داده نمی‌شوند. شکل ۴-۶۵ (a) چگالی شار متوسط را نشان می‌دهد. Bz در موقعیت دو ترک، از Bz در نزدیکی یک ترک بزرگتر است. شکل ۴-۶۵ (b) مشخص می‌کند که شار در داخل استیل، انحرافی را در حضور دو ترک در مقایسه با یک ترک ایجاد می‌کند زیرا مقاومت معادل در استیل با دو ترک بزرگتر می‌شود. اگر قطر بیرونی سیم پیچ شناسایی بزرگتر از فاصله L باشد در این صورت دو ترک زمانی که $L=0.2\text{mm}$ تا 1mm باشد شناسایی نمی‌شود.

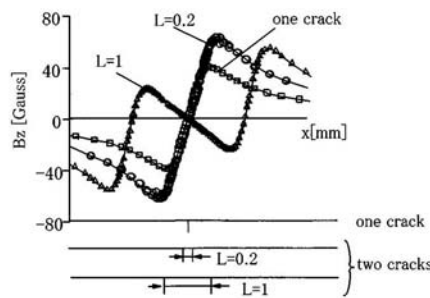


Fig. 10. Distribution of Bz ($Cw = 0.02\text{ mm}$).

شکل ۴-۶۶. برای انواع مختلف L مابین دو ترک در طول محور x ($y=0\text{mm}$ $z=0.175\text{mm}$)

به منظور ایجاد امکان برای تشخیص دو ترک ما مولفه x از چگالی شار (B_x) را که توسط سیم پیچ شناسایی در شکل ۵-۵۸ (d) نشان داده شده بود را دقیقتر بررسی می‌کنیم. در شکل ۴-۶۷ (b) توزیع $|B_x|$ نشان داده شده است.

$|B_x|$ حتی زمانی که ترکی هم وجود ندارد شناسایی شده است. این شکل نشان می‌دهد که به مطالعه B_x می‌توانیم دو ترک را شناسایی کنیم. البته در این نحوه شناسایی یک سری محدودیت‌ها در زمینه ابعاد وجود دارد.

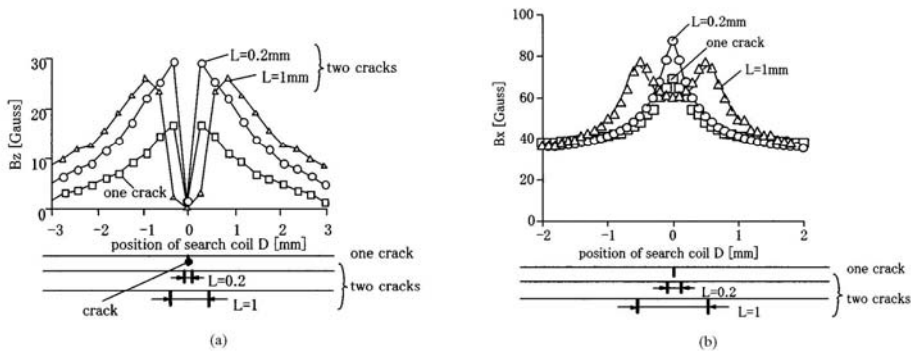


Fig. 11. Changes of (a) $|B_z|$ and (b) $|B_x|$ by search coil position ($Cw = 0.02$ mm, $Cl = 100$ mm).

($Cw = 0.02$ mm, $Cl = 100$ mm) ۶۷-۴ تغییرات (a) $|B_x|$ و (b) $|B_z|$ با تغییر موقعیت سیم پیچ جستجوگر

بنابراین می توانیم به طور خلاصه به این نتایج برسیم:

- (۱) در آنالیز خطی شار نشتی در صفحه استیل با تغییر ضریب نفوذپذیری تغییرات موثری دارد بنابراین آنالیز غیرخطی برای تستهای MFL لازم الاجرا می باشد.
- (۲) شار نشتی یک مقدار ماکزیمم دارد زمانی که عرض ترک زیاد شود.
- (۳) به منظور شناسایی دو ترک ارزیابی مولفه موازی شار نشتی با صفحه استیل بسیار موثر می باشد.

۴-۱۱ استفاده از مدل المان محدود [38]

۴-۱۱-۲ مدل المان محدود^۱

مدل المان محدود یکی از روش های نسبتاً دقیقی برای ابزار تشخیص مشخصات هندسی و یا یک توپک متحرک به منظور مدل سازی و تحلیل ترکها و عیوب محیطی می باشد. مدل مذکور برای فهم اثر متقابل بین میدان های محوری و عیوب محیطی و بهینه کردن ساختمان توپک، مفید است. مدل کردن اثر متقابل بین ترکها و فشارها و خوردگی های محوری و جریان های محیطی از جهت استفاده مفید از هم حافظه مورد نیاز و زمان محاسبه شده، مطلب تازه و قابل بحثی است. مشکلات و مباحث این طرح با غیرخطی بودن مشخصات فلز، اندازه ترکها که تاثیراتی روی مغناطیس کننده ایجاد می کند، زیاد خواهد شود و همچنین پله های زمانی که تاثیراتی روی مدل کردن سرعت دارد.

کل تئوری در سه مرحله خلاصه می شود:

قدم اول: اندازه یک جریان با چگالی J_0 که در دیواره یک خط لوله دارای نقص در نتیجه حرکت محوری یک مغناطیس کننده بوجود آمده محاسبه شود. J_0 در واقع همان توزیع جریان است که در قدم اول بدست می آید.
 قدم دوم: جواب معادله لاپلاس $\nabla^2 V = 0$ به صورت تقریب، جریان های انحراف یافته J_p را در خط لوله در نتیجه SCC محوری به ما می دهد.

قدم سوم: محاسبه جریان میدان های انحرافی^۱

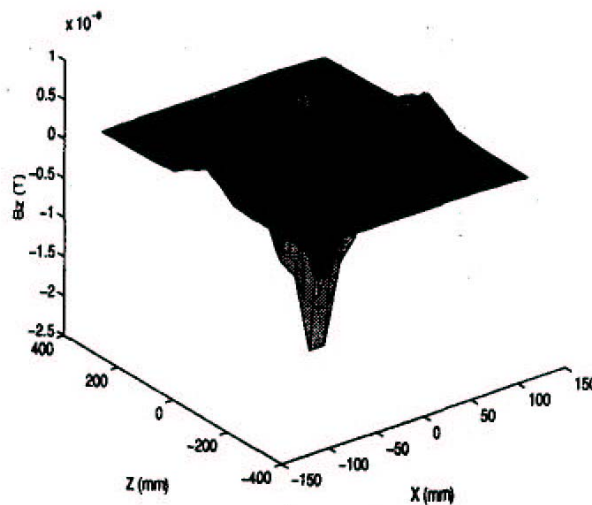
برای این مرحله ابتدا باید از روی معادله زیر بردار پتانسیل مغناطیسی A رادر سه بعد بدست آوریم.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_p \quad (9)$$

¹ Finite Element

در مرحله دوم J_p اندازه گیری شده است. معادله بالا مقدار تقریبی A را به ما می‌دهد. با استفاده از $\delta A/\delta t$ می‌توانیم توزیع جریان آزاد را بدست آوریم و مراحل ۲ و ۳ تکرار می‌شوند تا زمانی که همگرایی در نتیجه دیده شود.

برای راه حل نهایی A جهت محاسبه چگالی شار از رابطه $B = \nabla \times A$ بدست می‌آید. مولفه محوری میدان در شکل ۴-۶۹ کشیده شده است. میدان‌ها با اندازه گیری ولتاژ القا شده در سیم پیچ‌هایی که بطور محیطی در نزدیکی مولفه B_z قرار گرفته است اندازه گیری می‌شود. حرکت و حالت دستگاه اندازه گیرنده با انجام دادن مراحل دوم و سوم برای موقعیت‌های مختلف عیوب متناسب با توپک و حس گر سیم پیچی که ثابت هستند مدل می‌شود.



نتیجه کلی به عنوان یک اندازه شار Φ_i که در واقع با هر سیم پیچی در هر موقعیت i رابطه دارد محاسبه شود. ولتاژ القا شده در سیم پیچ حس گر باعث ایجاد فرمول زیر می‌شود که در آن V_i یک سیگنال وابسته به میدان‌های جریان توزیع شده و N تعداد دورهای سیم پیچ می‌باشد.

$$V_i = -N \frac{d\phi_i}{dt}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

مدل آزمایشی یک Inspection Geometry با مدل المان محدود در شکل ۴-۷۱ نشان داده شده است.

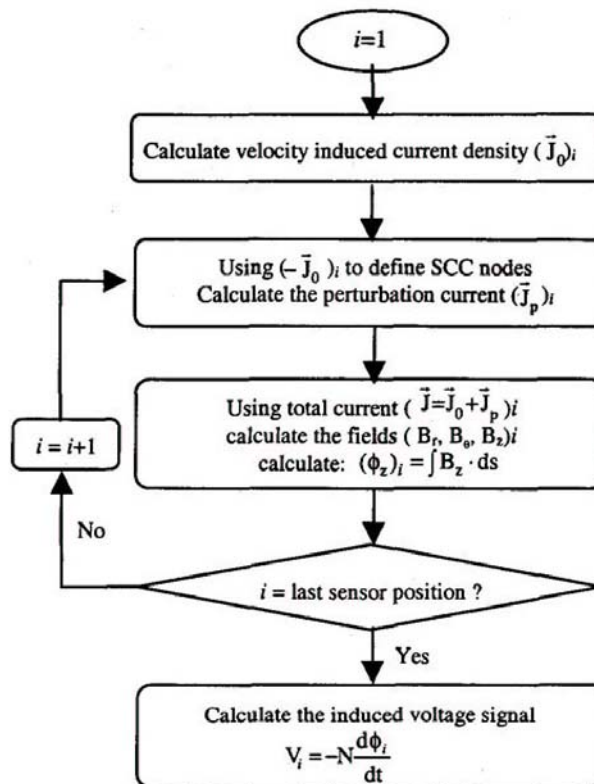


Fig. 4. The three step procedure

۴-۷۰. بلوک دیاگرام سه مرحله محاسبه جریان

ضخامت دیواره لوله 9mm است. مغناطیس کننده و حس گر اندازه گیرنده هر دو با سرعت ثابت 5m/s اندازه گیری میکنند مشخصات هندسی نقص محوری میباشد و با استفاده از مدل دو بعدی در قدم اول اندازه جریان های القایی در هر بازه زمانی محاسبه می شود. در قدم های ۲ و ۳ قسمت مشخص شده در اطراف SCC محوری با توجه به جریانهای منبعی (source currents) که در مرحله اول اندازه گیری شده به صورت سه بعدی مدل می شود. حس گر، از یک سیم پیچ با یک دور در ابعاد 2.45cm x 6.25mm انتخاب شده است و در منطقه

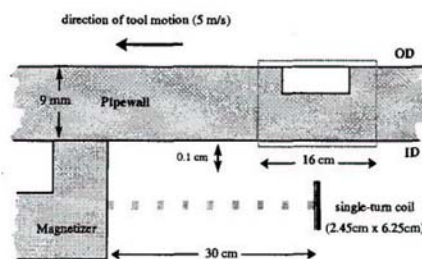


Fig. 5. Geometry used for three-step procedure

۴-۷۱. ابعادی که برای آزمایش این سه مرحله استفاده شده است.

دوری از میدان در فاصله 30cm مغناطیس کننده و در فاصله 0.1cm زیر دیواره خط لوله قرار دارد. صفحه سیم پیچ عمود بر راستای خط لوله است. سیگنال های ناشی از نقص بصورت ولتاژ القایی در سیم پیچ تک دور اندازه گیری می شود.

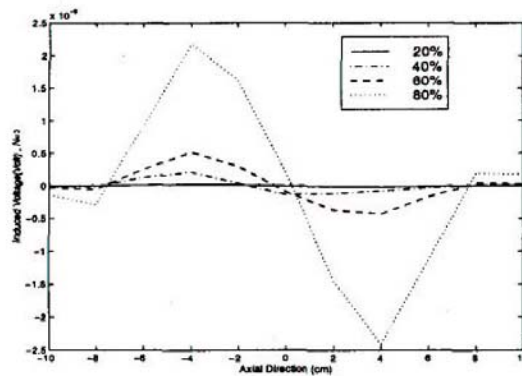


Fig. 6. Induced voltage measured for defects of different depths

شکل ۴-۷۲. ولتاژ القا شده اندازه گیری شده برای عمق های مختلفی از عیب

سیگنال ولتاژ در واقع تابعی از عمق SCC که طول آن 8cm است، می باشد. در شکل ۴-۷۲ مشاهده می کنید که بیشترین مقدار ولتاژ القایی در لبه های SCC اتفاق می افتد.

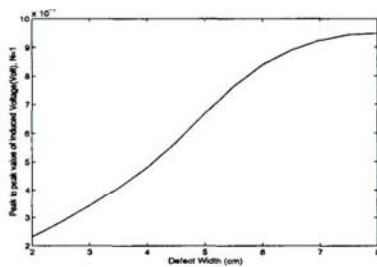


Fig. 8. Peak to peak induced voltage as a function of defect widths (60% depth)

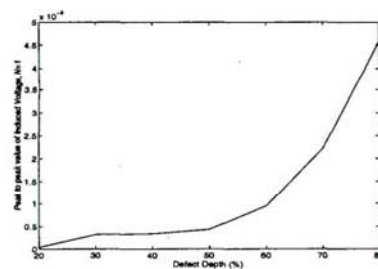


Fig. 7. Peak to peak value of induced voltage as a function of defect depths

۴-۷۳. اندازه Peak to peak ولتاژ به عنوان تابعی از عمق ۴-۷۴. اندازه Peak to peak ولتاژ به عنوان تابعی از عرض

نمودار پیک تا پیک به صورت یک تابعی از عمق نشستی در شکل ۴-۷۳ با متغیرهای نمایی نشان داده شده است.

در شکل ۴-۷۴ نمودار بر اساس مقادیر مختلف طول SCC کشیده شده است. مشاهده می کنید که افزایش تا حدودی یکنواخت است. سیگنال های نشان داده شده زمانی مشخص شده اند که سیم پیچ زیر ترک قرار داشته باشد. در زوایا و موقعیت های دیگر تاثیر در اندازه سیگنال خواهیم داشت. در شکل ۴-۷۵ سیگنال ولتاژ برای زوایای 0,7.9,15.8,23.7 درجه رسم شده است.

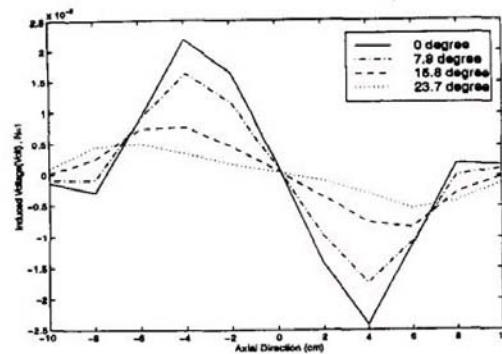


Fig. 9. Induced voltage measured at different circumferential coil positions

۷۵-۴. ولتاژ اندازه‌گیری شده بر حسب موقعیت‌های محیطی مختلف سیم‌پیچ

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که امکان استفاده از میدان‌های القایی برای تعیین SCC ها در خط لوله باز هم نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد، ولی استفاده از روش مدل سازی المان محدود روش خوبی جهت شبیه سازی، شناسایی و اندازه‌گیری SCC ها است. مراحل حل این مساله بر پایه اندازه‌گیری چهار پارامتر می‌باشد:

- (۱) سرعت جریان‌های القایی
- (۲) جریان‌های انحرافی که در حضور SCC ایجاد می‌شود.
- (۳) شار منتهی
- (۴) ولتاژ القایی منتهی از جریان‌های انحرافی

حال به بررسی یک توپک MFL نمونه می‌پردازیم.

۱۲-۴ معرفی یک توپک نمونه [39]



۷۶-۴. نمایی از توپک ۱۶ اینچی از محصولات شرکت ROSEN

در این قسمت به بررسی یکی از انواع توپک‌های ساخته‌شده توسط شرکت ROSEN می‌پردازیم.^۱ کل سرویس‌هایی که شرکت ROSEN در اختیار مشتری قرار می‌دهد که همان مراحل توپک‌رانی هوشمند است و در فصل پنجم به تفصیل به آن می‌پردازیم، عبارتست از:

♦ تمیز کردن خط لوله

- ◆ تعیین مشخصه هندسی خط لوله
- ◆ تعیین فرسایش
- ◆ محک زنی و ردیابی ابزار بازرسی

۴-۱۲-۱ عیب یاب محوری دقت بالا

یکی از ابزارهای بازرسی خطوط لوله عیب یاب محوری دقت بالا و یا HiRes Axial Flaw Detection Tool می باشد.

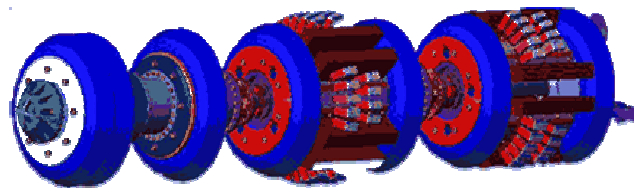
وسیله AFD شامل قسمت های زیر می شود:

- باتری و قسمت الکترونیکی و حافظه
- قسمت حس گرها و مغناطیس کننده ها
- قسمت کیلومتر شمار

قسمت حس گر برای یک AFD ۱۶ اینچی، شامل ۷۲ حس گر حامل و ۵۷۶ کانال اندازه گیری می باشد.

۴-۱۲-۲ قابلیت ها و مشخصات

مشخصه کلیدی یک ترک یاب محوری ۱۶ اینچی تولید شرکت ROSEN این است که همه پارامتر های طراحی که در مدل تئوری تاسیس شده بود (با وجود محدودیت های محاسباتی در میدان مغناطیسی) انعکاس می دهد. مشخصات آن عبارتست از:



۴-۷۷. نمایی از ترک یاب محوری ۱۶ اینچی

۱. پوشش کامل ۳۶۰ درجه ای با حس گرهایی که فاصله بین آنها ۳ میلیمتر می باشد. (برای یک سیستم ۱۶ اینچی ۵۷۶ حس گر نیاز است.)
 ۲. قابلیت تشخیص قطر دیواره لوله تا ۱۳ میلیمتر در بیشتر از 10KA/m
 ۳. رنج سرعت از 0.5-3m/s
 ۴. مینیمم قطر خمیدگی تا 1.5D
- سیستم کامل (که شامل سه قسمت و طول سرتاسری 2.77m باشد.) می تواند قسمت هایی از خط لوله شامل گاز یا نفت را تا ۲۸۰ کیلومتر ارزیابی کند.

۴-۱۲-۳ روش تست کارآیی

راندن اولیه در بخش آزمایش نشان می دهد که یک شناسایی خیلی خوب در نتیجه خصایص دقیق بوجود می آید. هر 0.2mm پهنا با مشخصات خارجی آن تا عمق حتی 0.2t از ضخامت دیواره به وضوح شناسایی

می‌شود. خصیصه طول (mm) و عرض (mm) و عمق (%) به صورت نمودارهای تست نمایش داده می‌شود. شرکت ROSEN موفق به شناسایی ترک‌هایی با طول 0.1mm شده است.

این نتایج باعث می‌شود که نهایتاً این طور قضاوت کنیم که ابزار AFD به سمتی پیش می‌رود که یک وسیله قابل اطمینان برای تعیین نشتی شود.

این وسیله هنوز قابلیت اسم گذاری ترک یاب به آن معنای دقیق را ندارد کما آنکه شرکت مدرک دقیقی برای تعیین و شناسایی حداقل ترک، موجود ندارد.

اطلاعات زیر در نتیجه یک تست به وجود آمده است:

Depth	Width	Length
40%	5mm	50mm
40%	5mm	10mm
20%	5mm	25mm
20%	1mm	25mm
60%	1mm	25mm
40%	0.2mm	50mm

۴-۱۲-۴ چگونگی پردازش اطلاعات

نتایج تحقیقاتی شرکت ROSEN خود به دو صورت تقسیم می‌شود:

۱) گزارش به صورت یا Hard Copy با همه توضیحات، لیست‌ها، آمارها و نمودارها و یا ۲) به صورت نرم افزار بسته ای ROSOFT در اختیار مشتری قرار می‌گیرد که برای کاربری بسیار آسان می‌باشد و شامل ردیف‌هایی از اطلاعات و یک سیستم Database می‌باشد.

ROSOFT برای سیستم‌های مدیریت خط لوله یک نیاز پایه ای می‌باشد و که دارای قسمت‌هایی برای کنترل کیفیت و پیش بینی عمر خط لوله است. اطلاعات دیجیتالی در رابطه با اطلاعات ذخیره شده در طول مدت بازدید با امکان دستیابی سریع و کامل را برای کاربر ایجاد می‌کند. اطلاعات جامع در رابطه با هر تشخیص، مشاهده و با جزئیات ارزیابی و برای استفاده به سادگی قابل پرینت گرفتن است.

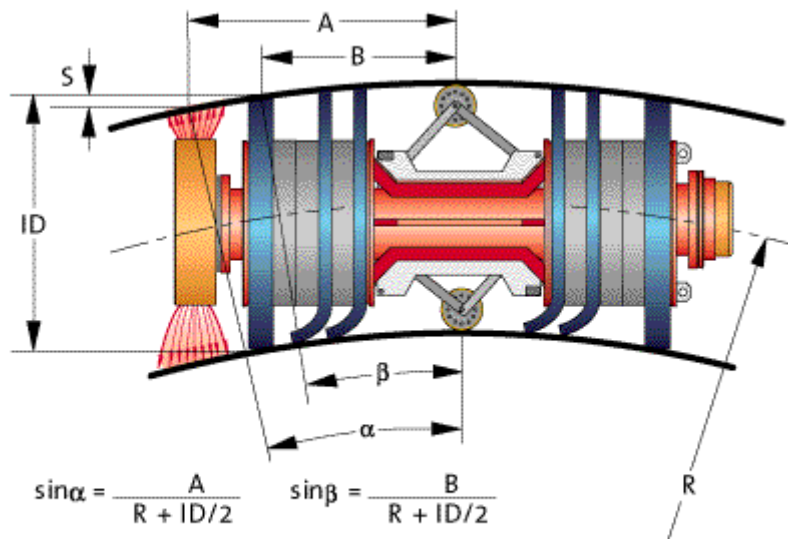
۴-۱۲-۵ تعیین محل فرسایش (نقشه برداری)

توپک هوشمند توانایی مکان یابی نقاط فرسایش برای مشخصات خط لوله زیر را دارد:

۱. خمیدگی تا 1.5D
۲. طول‌های بسیار زیاد تا 1000Km
۳. زمان راه اندازی طولانی تا حتی ۲ هفته
۴. کاهش قطر داخلی تا ۱۰٪
۵. جریان زیاد

۴-۱۲-۶ تعیین مشخصه هندسی خط لوله:

شرکت ROSEN رنج کاملی از ابزار تعیین مختصات هندسی خطوط لوله را عرضه کرده است. در واقع این وسیله پارامتری که برایش مهم است و اندازه می‌گیرد همان ID و یا قطر داخلی لوله می‌باشد. این وسیله بر پایه تکنولوژی جریانهای گردابی چندکاناله طرح ریزی شده و امکان اجرای دو مسیره (BI-DIRECTIONAL) در رنج وسیعی از سرعتها رامی‌دهد.



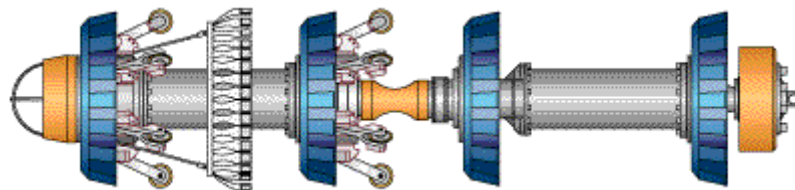
$$\sin \alpha = \frac{A}{R + ID/2} \quad \sin \beta = \frac{B}{R + ID/2}$$

$$S = \frac{B}{\tan \beta} - \frac{A}{\tan \alpha} \Rightarrow R = F(S)$$

۴-۷۸. چگونگی تعیین مشخصات هندسی خط لوله

۴-۱۲-۸ تعیین مشخصات XYZ خط لوله

این سیستم بر پایه سیستم هدایت داخلی^۱ و جریان‌های گردابی و سیستم مکانیکی تعیین قطر داخلی (ID) که از نظر کیفیت مانند سیستم تشخیص نقاط جوشکاری کار می‌کند طرح ریزی شده است.



۴-۷۹. توپک تعیین کننده مشخصات هندسی خط لوله

۴-۱۳ زمینه‌های توسعه و رشد در آینده

اگرچه MFL قدیمی‌ترین تکنولوژی ارزیابی خطوط لوله می‌باشد. پیشرفت‌های جدیدتر استفاده از آن را جهت ارزیابی خوردگی ممکن می‌سازد.

خطوط محدود شده^۲: یکی از زمینه‌های که پیشرفتهای قابل توجهی خواهد داشت عبارتست از پیشرفت متداوم خود ابزار ارزیابی که توانایی بازرسی خطوط لوله ای را که قبلاً قابل ارزیابی نبودند، را بدست آورد. این ابزار در آینده شاید قابلیت آن را پیدا کنند که از دریچه‌های عبوری^۳، خمهای تنگ و باریک^۴، خمهای تاجدار^۵ یا سایر ویژگی‌هایی از خطوط لوله که قبلاً محدود کننده استفاده از توپکها بودند، به راحتی عبور کنند. یکی از عوامل محدودکننده جاری ابزار ارزیابی، استفاده از حس‌گرهای بزرگ می‌باشد که قابلیت آنالیز داده‌ها را محدود

^۱ Strap-Down Internal Navigation

^۲ Restricted Lines

^۳ Port Valves

^۴ Tight bends

^۵ Miter bends

می‌کند. توپک‌های نسل بعدی از این نظر باید تطابق داشته باشند و قابلیت ضبط داده‌ها با یک دقت بالا در ابزارآلات MFL باید وجود داشته باشد.

با وجود این به خاطر متغیرهای اضافی مرتبط با خطوط محدود شده دقت تعیین اندازه خرابی این توپک‌های جدید شاید نزدیک به دقت توپک‌های MFL امروزی باشد. جهت ارزیابی بعضی خطوط محدود شده، طراحی مکانیکی بهبود یافته‌تری مورد نیاز می‌باشد برای مثال توپک‌های MFL امروزی تنگ‌ترین خمی که می‌تواند از آن عبور کنند به فاصله گذاری بین قطب‌های آن سیستم بستگی دارند. بنابراین اپراتورهای خطوط لوله یا بایستی خم‌های تنگ فعلی را جایگزین کنند و یا منتظر پیشرفت در سیستم توپک باشند که فاصله کمتر قطب‌ها را امکانپذیر سازند. در این حال نیز در سیستم فاصله کمتر قطب‌ها تحلیل و آنالیز سیگنال‌ها در خم‌های تنگتر بسیار پیچیده‌تر و مشکل‌تر می‌گردد که دقت را پائین می‌آورد. به خاطر اینکه ابزارآلات ارزیابی در آینده دقت سیستم فعلی را حفظ کنند لازم خواهد بود که سیستم‌های آنالیز و تحلیل داده‌ها و در مورد اثرات سرعت و میدان مغناطیسی اعمال شده پیشرفت خوبی داشته باشد.

کنترل سرعت: پیشرفت‌های تکنولوژی توپک اجازه ارزیابی لوله‌ها را با سرعت خیلی بالاتری که نمی‌توانند کاهش یابد و یا تغییر قابل ملاحظه‌ای کنند خواهد داد. سیستم‌های فعال کنترل سرعت¹ همچنین اجازه خواهند داد که دقت آشکارسازی و تعیین مشخصه خرابی‌های خطوط لوله در طول ارزیابی از شیوه فعلی، بالاتر برود. کنترل سرعت چیزی فراتر از تغییر و سازگار کردن نیروی محرکه سیستم، جهت بای پاس کردن سیال می‌باشد.

سیستم مغناطیس کننده نیاز دارد که از نو طراحی شود تا توانایی بای پاس کردن کافی را داشته باشد. یک گزینه کنترل سرعت استفاده از جاروبک‌های کوتاه‌تر است بنابراین سیال بیشتری از مرکز سیستم مغناطیس‌کنندگی عبور خواهد کرد. ولی جاروبک‌های کوتاه‌تر قابلیت توپک را در عبور از محدودیت‌های قطر محدود می‌کند و سایر ملاحظات طراحی نیز محدودیت‌های عملیاتی را اعمال می‌کنند و طراح بین دقت بیشتر و هزینه و قابلیت انعطاف باید تصمیم بگیرد. بنابراین اپراتورهای خطوط لوله بایستی دقت واقعی حاصله از چنین سیستم‌هایی را با سیستم‌های قبلی آن مقایسه کنند و در نظر بگیرند.

آشکار سازی و خرابی‌های کوچک: آشکارسازی و تعیین مشخصه نواحی کوچک خورده شده فلزی با استفاده از حس‌گرهای کوچک می‌تواند بهبود داده شود. همانطوری که در سیستم‌های با دقت بالای MFL علاوه بر این پارامتر از سطح بالای مغناطیس‌کنندگی نیز استفاده می‌شود. نواحی خوردگی کوچک معمولاً به عنوان عیبی که سلامت کلی خطوط لوله را تهدید می‌کنند در نظر گرفته نمی‌شوند. آشکارسازی خوردگی کوچک به اپراتورهای خطوط لوله‌ای که می‌خواهند بطور دقیق صدمات خوردگی را تعیین کنند کمک می‌کند.

استفاده از سطح پایین میدان مغناطیسی: بسیاری از توپک‌های MFL فعلی از میدان‌های مغناطیسی با شدت بالا جهت برطرف کردن تغییرات اثرات ذاتی ماده فلزی لوله²، تنش‌های باقیمانده¹ و نیز بسیاری متغیرهای ارزیابی دیگر استفاده می‌کنند.

¹ Active speed control

² Inherent material property variations

در سطوح پائین مغناطیس‌کنندگی این تغییرات در آشکارسازی خوردگی‌های کوچک و تعیین مشخصه اندازه خرابی اشکال بوجود می‌آورند. این تغییرات می‌توانند به عنوان نویز اضافه شده به سیگنال در نظر گرفته شوند زیرا باعث تغییر پاسخ خوردگی فلز به فلوی نشتی می‌گردد. پیشرفتهای تکنولوژیهای جدید قابلیت و پتانسیل اندازه‌گیری با مقدار کم میدان را جهت تعیین مشخصه مکانیکی نواحی آسیب دیده نشان می‌دهد. پیشرفتهای از این قبیل ادامه خواهند یافت و در آینده نزدیک در توپک‌های جدید ارائه خواهد شد. از قابلیت این سیستم‌ها می‌توان به آشکارسازی مطمئن خرابی‌های مکانیکی و فرق قائل شدن بین خرابی مضر و خرابی خوش خیم که بایستی نشان داده شود، اشاره کرد.

سیستم‌های ارزیابی درون لوله² فعلی شکل هندسی خرابی خوردگی را پیش‌گویی می‌کنند که به منظور محاسبه تنشهای خرابی استفاده می‌شوند. قابلیت سیستم‌های فعلی در تعیین دقیق شکل خرابی‌های پیچیده محدود است. یک طرح جایگزین ارزیابی لوله طرحی است که بتوان از دو سطح بالا و پایین مغناطیس‌کنندگی استفاده کرد. یک اختلاف فاحش و قابل ملاحظه در سطوح سیگنال بایستی محل اغلب خرابی‌های شدید را نمایش دهند. این راه حل هنوز به مرحله اجرا نرسیده است و نیازمند پیشرفتهای بیشتری برای ثابت کردن قابلیت‌های آن می‌باشد.

MFL محیطی:³ خرابی‌های خیلی باریک محوری از قبیل ترکها و خوردگی‌های مشابه بندرت توسط تکنولوژی MFL فعلی قابل آشکارسازی می‌باشند. زیرا یک محدودیت اجرایی در تعیین جهت سیستم مغناطیس‌کنندگی روی سیستم‌های MFL فعلی وجود دارد. به جای سیستم‌های فعلی مغناطیس‌کنندگی که بصورت محوری قرار می‌گیرند یک جهت محیطی نیز بایستی اجرا گردد که همراه با حس‌گرها جهت جستجوی خرابی‌های محوری بکار می‌رود. البته سیستم‌های ارزیابی با چنین سیستم مغناطیس‌کنندگی فقط برای مصارف ویژه در حال حاضر موجودند و این سیستم این پتانسیل را دارد که یک تکنولوژی جهانی در سیستم‌های ارزیابی باشد. این تکنولوژی بایستی برای اغلب خرابی‌های خط لوله از قبیل خوردگی، ترک، صدمات مکانیکی و خرابی‌های حلقه‌های جوش مشابه استفاده گردد. چیزی که بایستی بهبود یابد عبارت است از دقت تعیین مشخصه و اندازه. یک محدودیت این تکنولوژی عبارت خواهد بود از تشخیص نوع خرابی و تعیین اندازه خرابی معین. این محدودیتها بایستی با استفاده از ترکیب داده‌های MFL محیطی و محوری حل گردد.

هم زمان با پیشرفت یک ابزار ارزیابی MFL تجارتي، سطوح راندمان نیز به همان خوبی سایر نیازها، محدودیت‌ها و گزینه‌ها برای یک ابزار ارزیابی و تکنولوژی آن توسط افراد درگیر در این کار باید فراهم آید.

¹ Residual stresses

² in-line

³ Circumferential

فصل پنجم

جمع بندی و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه

همانطور که خواندید در فصل های پیشین مختصراً به معرفی توپک، تاریخچه و روند رشد آن، انواع توپکها و معرفی تعدادی از آنها و عیوب خطوط لوله و اهمیت کاربرد توپک هوشمند و با توجه به هدف پایان نامه به بررسی کاربرد دو تکنولوژی مختلف آلتراسونیک و نشتی شار مغناطیسی در عیب یاب های توپکهای هوشمند به تفصیل پرداختیم.

ساختار این بخش به دو زیرمجموعه تقسیم شده است. در قسمت اول می خواهیم آنچه را که در فصل های گذشته بیان شده است به طور عملی با بررسی مراحل توپکرانی و چگونگی انتخاب توپک مناسب در مراحل مختلف با مرور دو نمونه عملیات توپکرانی در خطوط لوله های نفتی ایران که در خطوط لوله اهواز/تنگ فنی و ساری/ورسک انجام شده است، می پردازیم. در قسمت دوم پیشنهادات و نظرات خود را ارائه می کنیم که شامل پیشنهاد طرح اولیه ای جهت ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از عیب یاب با تکنولوژی نشتی شار مغناطیسی است که با توجه به مطالب فصل پیشین تهیه شده است. امید است که انگیزه های باشد برای گروه های دانشجویی دیگر که جهت ساخت نمونه آزمایشگاهی عیب یاب به منظور نزدیک شدن به نمونه صنعتی و عملی یک توپک هوشمند، به تحقیق و تکوین بپردازند.

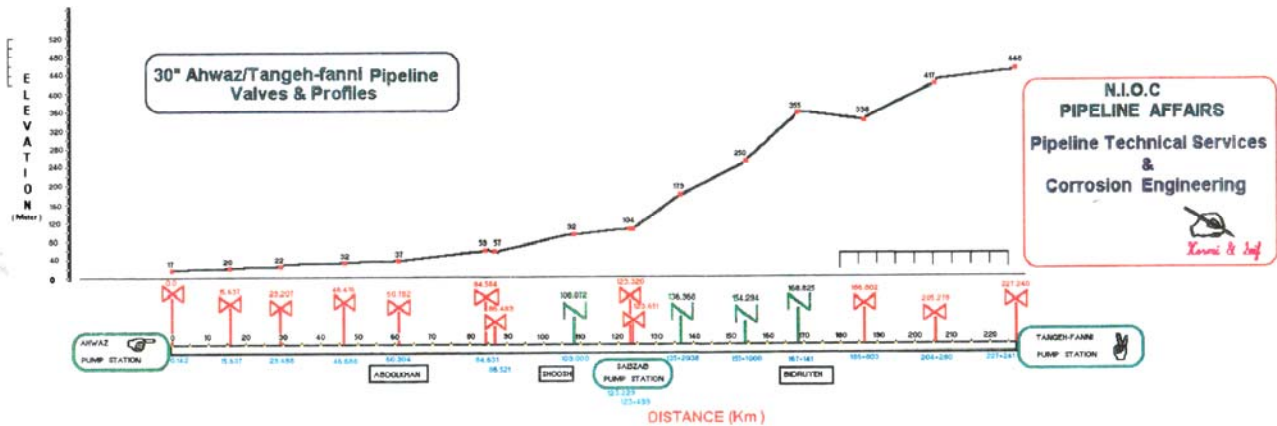
۵-۲ مروری بر دو عملیات توپکرانی در خطوط لوله های نفتی ایران [40]

اولین لازمه خطوط انتقال نفت و گاز، ایمنی و بازده بالای آن است. با توجه به اینکه ۵۰٪ شبکه جهانی لوله ده هاست که مورد استفاده قرار می گیرد. هر لحظه در اثر خوردگی، سائیدگی یا خرابی های غیر قابل پیش بینی ممکن است نشتی در خطوط لوله ایجاد شود که باعث خطر بشود. علاوه براینکه خطوط انتقال عموماً یا در زیرزمین یا در سطح اقیانوسها دفن شده اند که عملیات عیب یابی را با مشکل بیشتری روبرو می کند. در نتیجه، بسیاری از کشورها توجه بیشتری برای تشخیص عیب در خطوط لوله به عمل می آورند. بازده بالا و ایمنی خطوط لوله بلند مسئله مهمی در اقتصاد ملی و سلامتی مردم است. اپراتورهای خطوط لوله از روش های بسیار گوناگونی برای بررسی، ارزیابی و مونیتورینگ صدها هزار کیلومتر از خطوط انتقال در سراسر جهان استفاده می کنند. چنین فعالیتهایی شامل بررسی حفاظت کاتدی - برنامه های آشکار سازی نشت، بررسی خوردگی و ... تستهای هیدرواستاتیک - بکار گیری ابزار بررسی و ارزیابی در خطوط لوله و غیره می باشند. ترکیب چنین فرآیندهایی با همدیگر برنامه تضمینی سلامتی خطوط لوله را باعث می گردد. بنابراین مساله توپکرانی و بخصوص توپک هوشمند از اهمیت زیادی برخوردار است.

در ایران نیز با راه اندازی مجتمع عظیم پالایشگاه اراک و نیاز به افزایش ظرفیت انتقال نفت خام و با توجه به ضعف پوشش خط ۶۶،۴ / ۷۶،۲ سانتی متر (30inch/26inch) اهواز / تنگ فنی از ابتدای احداث این خط، شرکت ملی نفت ایران پروژه ارسال توپک هوشمند^۱ به منظور تعیین میزان پراکندگی خوردگی در قطعات حد فاصل PU2/ اهواز و اهواز/ تنگ فنی را در سال ۱۳۷۲ با موفقیت به انجام رساند. در نتیجه این عملیات، خطوط لوله ای که به طور متوسط هفته ای یک بار با نشتی مواجه می شدند به شکل بسیار خوبی تعمیر شدند به طوری که پس از عملیات توپکرانی دیگر گزارش نشتی از این خطوط دریافت نشده است.

¹ Intelligent PIG

لازم بذکر است که اپراتورها با اندازه‌گیری و کنترل فشار خط از وجود نشتی با خبر می شدند.



شکل ۵-۱. نمای شماتیکی خط لوله اهواز/تنگ فنی

این پروژه با تلاش شبانه روزی متخصصین و کارکنان امور خطوط لوله و با همکاری شرکت پلاتیپوس در سه مرحله^۱ به شرح زیر انجام شد:

۱. نقشه برداری صحرائی از خطوط لوله مورد نظر (۶۶/۰۴ سانتی متر PU2 / اهواز و ۷۶/۲ سانتی متر اهواز/ تنگ فنی)

۲. ارسال Geometry PIG یا توپک تعیین مشخصات هندسی که در فصل دوم به آن اشاره کردیم. این توپک جهت مشخص نمودن نقشه کامل خط شامل خم‌ها و سایر مشخصات مورد نیاز تعمیراتی و نگهداری خط و پیش‌بینی وضعیت داخلی لوله ارسال می شود.

۳. ارسال توپک هوشمند الکترونیک جهت تعیین وضعیت لوله از لحاظ خوردگی

در شکل های زیر نمونه هایی از خوردگی های مشخص شده توسط توپک هوشمند را که توسط شرکت پلاتیپوس در خط لوله اهواز/ تنگ فنی فرستاده شده است، مشاهده می کنید.



شکل ۵-۲. نمایی از دو خوردگی مشخص شده توسط توپک هوشمند الکترونیک شرکت پلاتیپوس در خط لوله اهواز/تنگ فنی

با توجه به این که در سال ۱۳۷۲ پروژه توپکرانی در زمینه توپکرانی پیشرفت نکرده بود نقاط خرابی با بررسی چشمی سیگنال‌های دریافتی و توسط اپراتورها انجام شده است. با وجود این با بررسی دوباره تنها ۲٪ خطا وجود داشت و می‌توان گفت عملیات توپکرانی با موفقیت انجام شد.

با توجه به نیاز مبرم ازدیاد ظرفیت حمل خط لوله ۷۶/۲ اهواز/ تنگ فنی و به دنبال انجام موفقیت‌آمیز پروژه توپک و ارسال گزارش نهایی آن توسط کارشناسان واحد مهندسی خطوط لوله و خوردگی فلزات و لزوم تسریع در عملیات بازسازی قرار بر این شد که عملیات بازسازی خط در دو مرحله انجام گیرد :

الف) در مرحله اول قرار بر این شد که ۲۱ نقطه با خوردگی بیش از ۵۰ درصد (S-Grade) را که از لحاظ وضعیت لوله وضعیت مناسبی داشتند و قابل بازسازی بودند، توسط کارشناسان تعیین تا نسبت به بازسازی آن اقدام شود. در شکل ۳-۵ نمونه‌ای از این بازسازی را که در آن بطور کامل آن قسمت از لوله آسیب دیده برداشته شده است، مشاهده می‌کنید. برای انجام این عملیات، دو توپک که مابین آنها آب است در فاصله دو درز جوش لوله آسیب دیده می‌فرستند به طوری که آن قسمت از لوله آسیب دیده حاوی آب باشد. پس از این مرحله به راحتی عملیات تعمیراتی را به دور از هرگونه آسیب زیست محیطی انجام می‌دهند. حوضچه ای در اطراف لوله تعبیه شده تا آب خارج شده بداخل آن منتقل شود.

ب) سپس در مرحله دوم نقاط با خوردگی ۳۰ تا ۵۰ درصد (M-Grade) تعیین گردید تا پس از اتمام مرحله اول نسبت به ادامه بازسازی آن اقدام شود. بیشتر این خوردگی‌ها را با روش Coating بازسازی می‌کنند. انجام تعمیرات و بازسازی خطوط لوله ۷۶/۲ سانتی‌متر اهواز- تنگ فنی تا سال ۱۳۷۷ به طول انجامید.



شکل ۳-۵. نمایی از یکی از مراحل تعمیراتی خط لوله اهواز/تنگ فنی

در سال ۱۳۸۰ بار دیگر عملیات توپکرانی این بار توسط شرکت PII در خط لوله ۳۰/۴۸ سانتی‌متر (12inch) ورسک- ساری انجام پذیرفت. پس از انجام موفقیت‌آمیز توپکرانی هوشمند اواخر سال ۱۳۸۰ و ارسال نتایج از طرف شرکت PII, با استفاده از تجربیات موفق عملیات توپکرانی در اهواز/ سبزاب/ تنگ فنی و تعمیرات نقاط خورده شده, واحد مهندسی خوردگی خدمات فنی خطوط لوله برنامه‌ریزی شناسایی و بررسی و تعمیرات نقاط خورده شده در خط لوله ۳۰/۴۸ سانتی‌متر ورسک- لاجیم- ساری را آغاز کرد.

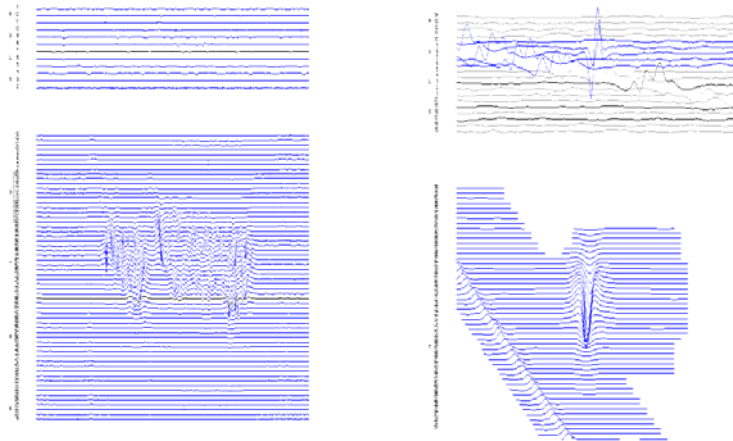
استنتاج از نتایج آزمایش جهت تعیین فشارپذیری خط لوله ۳۰/۴۸ سانتی‌متر در نقاط خورده شده بر اساس اصول زیر انجام پذیرفته است :

۱. نتایج آماری آزمایش انجام شده بر روی خط لوله ۳۰,۴۸ سانتی‌متر
۲. تجربه موثر در اثر شناسایی و بررسی گرافهای خوردگی خط لوله ۷۶,۲ سانتی‌متر اهواز/ تنگ فنی
۳. محاسبات و تطبیق فشار پذیری خط لوله با درصدهای مختلف عمق و طول خوردگی با استانداردهای مربوطه
۴. شرایط و موقعیت مکانی خط لوله و حداکثر فشار کاری بر اساس فشارهای موجود
۵. در نظر گرفتن ضرایب ایمنی با توجه به قدمت خط لوله (۹۲ درصد برای لوله‌های S-Grage و ۸۵ درصد برای لوله‌های B-Grade)

این عملیات توپکرانی تفاوت‌هایی با عملیات توپکرانی خط لوله ۷۶/۲ سانتی‌متر اهواز- تنگ فنی داشت. اولین وجه تمایز آن دقت بالای آن بود. در حقیقت در این عملیات از توپک MFL با دقت بالا استفاده شده بود که قادر به تشخیص خوردگی‌های داخلی و خارجی بود. در حالی که توپک شرکت پلاتیپوس فقط خوردگی‌های خارجی را تشخیص می‌داد. توپک MFL شرکت PII در این عملیات به طور کلی ۵۰۰۹ خوردگی تشخیص داد که از این تعداد ۱۵۲۶ خوردگی داخلی بود و ۳۴۸۳ خوردگی خارجی. این توپک عمق خوردگی‌ها را به محدوده‌های صفر تا ۲۰ درصد, ۲۱ تا ۴۰ درصد, ۴۱ تا ۶۰ درصد, ۶۱ تا ۸۰ درصد و ۸۱ تا ۱۰۰ درصد تقسیم بندی کرده بود. کمترین عمق خوردگی داخلی تشخیص داده شده در این عملیات ۳ درصد و خوردگی خارجی ۵ درصد بود. به همین صورت بیشترین عمق خوردگی داخلی ۷۴ درصد و خوردگی خارجی ۵۱ درصد بود.

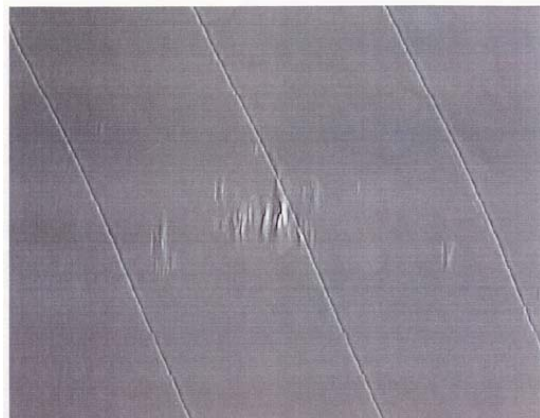
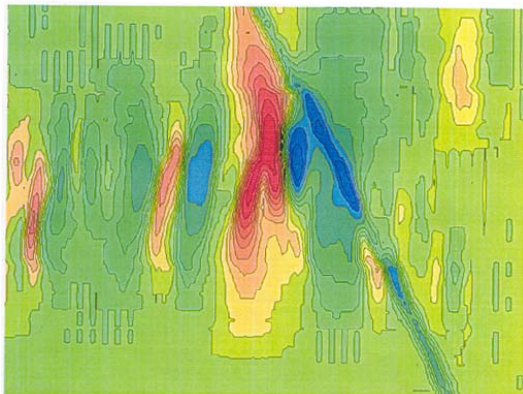
همانطور که در بخش چهارم خواندید برای تعیین موقعیت خوردگی از لحاظ داخلی یا خارجی بودن آن نیاز به دو نوع حسگر داریم. در شکل زیر نمونه ای از سیگنالهای دریافتی حسگرها از یک خوردگی داخلی نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۴-۵ در سمت راست مشاهده می‌کنید هم حسگرهای هال و هم حسگرهای DIS که همان حسگرهای جریانهای گردابی هستند هر دو در این نوع خرابی تغییرات سیگنال دارند و این یعنی آن که خوردگی از نوع خوردگی داخلی است. اما در شکل سمت چپی تغییرات سیگنال تنها در حسگرهای هال اتفاق افتاده است که این نشان از خارجی بودن خوردگی می‌دهد.

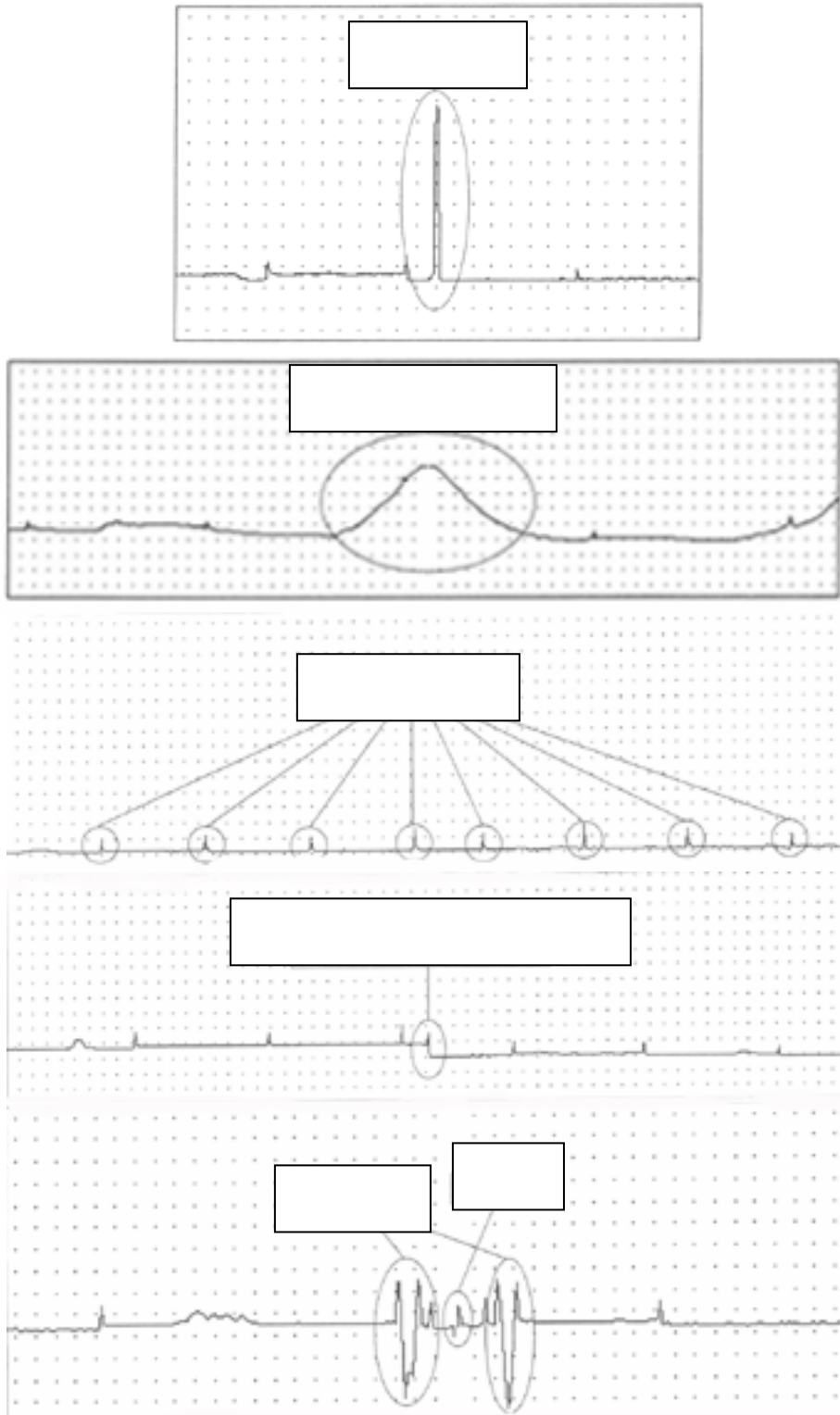


شکل ۵-۴. نمایش خوردگی‌های داخلی و خارجی توپک MFL شرکت PII

یکی دیگر از وجوه بارز تمایز این عملیات با عملیات توپکرانی قبلی بخش پردازش اطلاعات آن است. این توپک بخش پردازش اطلاعات بسیار قوی دارد و مکان نقص‌ها اندازه‌های آن را به طور دقیق توسط نرم‌افزار تشخیص می‌دهد و هم به صورت جدول و هم به صورت نمودارهای مختلف نتایج را ارائه می‌دهد. در شکل ۵-۵ نمودار contour یا نمودار محیط مرئی کشیده شده بر اساس سیگنال‌های دریافتی را مشاهده می‌کنید. در شکل‌های ۵-۶ سیگنال‌های MFL دریافتی که هرکدام معرف وجود مساله‌ای در خط لوله می‌باشد، جمع‌آوری شده است. لازم بذکر است که در عملیات توپکرانی اهواز- تنگ فنی نتایج توسط اپراتورهای متخصص از روی نمودارهای ارائه شده برداشت می‌شد.



۵-۵- نمودار Contour که با پردازش اطلاعات خوردگی را مدل کرده است.



شکل ۵-۶. نمونه سیگنال نقص‌های مختلف پردازش شده توسط رایانه

یکی از مشکلات این عملیات توپیک‌رانی، صعب‌العبوری مسیر خط لوله بود که به هیچ‌عنوان امکان ردیابی توپیک توسط Bench markerها و برداشت همزمان اطلاعات از signalerها را نمی‌داد. در نتیجه شرکت PII مگنت‌هایی را روی خطوط لوله در فواصل معینی جایگذاری کرد. توپیک هنگام عبور از زیر این مگنت‌ها سیگنال

مشخصی دریافت و ذخیره می‌کرد در نتیجه پس از پردازش اطلاعات مسیر حرکت توپک و مکان دقیق نقص‌ها مشخص می‌شد.

۵-۳ توپکرانی در یک خط لوله نمونه [1]

اکنون با توجه به نمونه‌های عملی گفته شده به بررسی مرحله به مرحله توپکرانی می‌پردازیم.

۵-۳-۱ مرحله انتخاب

اولین لازمه هر انتخاب منطقی دانستن هدف است. بهترین روش‌های مدیریت بر این اساس که نخست هدف قابل دستیابی باشد استوارند. اهداف باید به گونه‌ای تعریف شوند که پروژه قابل اندازه‌گیری و آخرین دست‌یافته‌ها قابل ارائه باشد. متأسفانه توپکرانی هنوز به صورت یک علم کامل در نیامده است در نتیجه در زمینه انتخاب اهداف با مشکلاتی روبرو است. به عنوان مثال کافی نیست که برای معرفی توپک‌های تمیزکننده^۱، جاروب‌کننده^۲ و یا آب‌زدا^۳ در حالی که تفاوت‌های آنها مشخص نباشد به تعریف ساده‌ای بسنده کنیم. برای تشخیص هدف و در نتیجه انتخاب ابزار خوب است با پاسخ دادن به سوالات زیر به جمع‌بندی در این زمینه دست یابیم:

۵-۳-۱-۱ تعیین هدف

الف) ماده‌ای که باید حرکت کند (یا جایگزین شود) چیست؟ اگر مایع است به توپک جاروب‌کننده نیاز است. اگر جامد است از توپک تمیزکننده باید استفاده کرد. اگر جامد سخت است، احتمالاً به برس^۴ نیاز پیدا می‌کنیم و یا اگر نرم است می‌توان از تیغه‌ها^۵ استفاده کرد. در خط لوله ورسک-ساری نفت تصفیه شده در خط لوله جریان داشت. بنابراین در اثر گذشت زمان رسوباتی به صورت واکس دیواره خط لوله را پوشانده بود. از بین بردن مواد زائد باید بگونه‌ای باشد که به دیواره لطمه‌ای وارد نکند. در خطوط لوله ورسک-ساری از توپک‌های اسفنجی به همراه تیغه‌آ استفاده شد.

ب) ماده از نظر شعاعی- طولی کجا قرار می‌گیرد؟ جواب این سوال بیشتر هنگام مسیر یابی توپک مفید است تا بدانیم فعالیت‌های مسیر یابی خود را بیشتر کجا متمرکز کنیم. در ضمن این پرسش بیشتر در مورد خطوطی که حاوی مواد جامد هستند مطرح می‌شود. علاوه بر این باید فشار و جهت توپک به گونه‌ای کنترل شود که به دیواره‌ها یا شیرها برخورد نکرده و آسیب نبیند. بطور مفال در اثر همین بی‌احتیاطی یکی از توپک‌های شرم‌ت PII در عملیات توپکرانی ورسک/ساری آسیب دیده است.

ج) حجم تخمینی ماده در حال حرکت چقدر است؟ باید حجم ماده‌ای که در حال حرکت است با نوع توپک انتخابی و قدرت آن هماهنگی داشته باشد.

د) آیا ماده‌ای که در خطوط جریان دارد خطرناک است؟ بعضی مواد نه تنها در اثر تماس مشکل ایجاد می‌کنند بلکه در اثر مجاورت با آب یا هوا وارد واکنش می‌شوند. در نتیجه انجام یک بررسی حرفه‌ای، عاقلانه به نظر می‌رسد تا اگر خطر بالقوه‌ای وجود داشته باشد پیش‌بینی‌های ایمنی از قبل در نظر گرفته شود. با تعریف اهداف، لازم به نظر می‌رسد که شرایط عملیاتی و سپس انتخاب توپک‌ها بررسی شوند:

¹ Cleaning pig

² Swabbing pig

³ dewatering pig

⁴ brush

⁵ blade

یکی از مواردی که در عملیات توپکرانی مهم است دانستن شرایط عملیاتی است. این اطلاعات توسط توپک مخصوصی که قبل از توپک هوشمند ارسال می شود بدست می آید. این نوع توپکها که بیشتر همان Geometry PIG می باشند، مکان شیرها و سه راهی ها و سایر مشخصات خط لوله را مشخص می کنند. تنها تفاوت این نوع توپکها با توپکهای هوشمند در این است که قدرت شناسایی خوردگی و خرابی های خط را ندارند. در عملیات توپکرانی ورسک/ساری این اطلاعات توسط توپکی به نام Calscan که در بخش های بعد به معرفی آن خواهیم پرداخت، جمع آوری شده است. این اطلاعات شامل موارد زیر است:

الف) محتویات خط حین توپکرانی چیست؟ به عنوان مثال نفت تصفیه شده با نفت تصفیه نشده متفاوت است. همچنین تفاوت خط لوله گاز و مایع بسیار بارز است. همان طور که قبلا هم ذکر شد محصول جا به جا شده در حالت رفت، در خط ورسک- ساری، نفت تصفیه شده است. لازم بذکر است که در حالت برگشت نفت غیر تصفیه شده از این خطوط عبور می کند و بیشتر رسوبات نیز نتیجه این جابجایی می باشد.

ب) فشار قابل قبول برای راه اندازی توپک چقدر است؟ مشخص است که وجود فشار کافی برای راندن توپک بسیار مهم است. فشار خط ورسک- ساری حداقل ۷ bar و حداکثر ۱۵۰ bar بوده است. به علت کوهستانی بودن این منطقه در دامنه کوه توسط تلمبه خانه مرگاب این فشار افزایش می یافت و زمانی که توپک از کوه پایین می آمد توسط یک ایستگاه فشار شکن فشار را کاهش می دادند تا توپک آسیب نبیند.

ج) سرعت هنگام توپکرانی چه اندازه است؟ پاسخ این سؤال هم برای توپکهای ILI بسیار مهم است چون بر روی اندازه گیریها تأثیر می گذارد و هم برای توپکهای عملیاتی حائز اهمیت است. سرعت نفت تصفیه شده در خط ورسک- ساری حداقل ۱ m/s و حداکثر ۴ m/s است.

د) دمای داخل لوله چه اندازه است؟ دمای داخل لوله ورسک- ساری بین ۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد بود. تعدادی از سؤالات راجع به خصوصیات خطوط لوله است:

الف) جنس لوله از چیست؟ خط لوله ورسک- ساری از استیل X52 و GRB است. پاسخ به این سؤال برای ابزار ILI بسیار مهم است. سطح داخلی لوله، نوع ماده تمیزکننده را تعیین می کند. بعضی از مواد در اثر فشار ابزار فرستاده شده به داخل لوله ترک برمی دارند.

ب) حداقل و حداکثر قطر داخلی چقدر است؟ حداقل قطر داخلی خط ورسک- ساری ۲۷.۹cm است. با توجه به اینکه قطر این لوله ۳۰/۴۸ سانتی متر است برای آن حداکثر قطر داخلی تعریف نمی شود. این پارامتر مربوط به خطوط با قطر بیش از ۴۰/۶۴ سانتی متر است.

ج) نقشه ارتفاع خط لوله به چه صورت است؟ در مورد خط لوله ورسک- ساری ارتفاع خط لوله مسئله ای حساس بود چون خط ناگزیر فراز و فرودهای داشت و باید بررسی می شد که آیا فشار مواد درون خط در ارتفاعات بالا برای حرکت توپک کافی است یا خیر. البته این فشارها در تلمبه خانه های مسیر تنظیم می شد تا توپک بتواند با سرعت تقریباً یکنواخت به حرکت خود ادامه دهد. شکل ۵-۷ نمودار تغییرات سرعت توپک در

مسیر ورسک/لاجیم را نشان می‌دهد. لازم بذکر است که این عملیات در دو مرحله ورسک/لاجیم و لاجیم/ساری انجام شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است سرعت تقریباً یکنواخت است به جز ناحیه‌ای که در نمودار مشخص است و در واقع تلمبه‌خانه‌ای در مسیر لوله نفتی ورسک- لاجیم است که به تلمبه‌خانه مرگاب معروف است. در این ناحیه به علت شایط مکانی که تلمبه‌خانه در آن قرار دارد فشار به حداقل ممکن خود می‌رسد و توپک با باز و بسته شدن شیرهای کمکی که باعث افزایش فشار می‌شود به حرکت خود با سرعت ثابت ادامه می‌دهد.

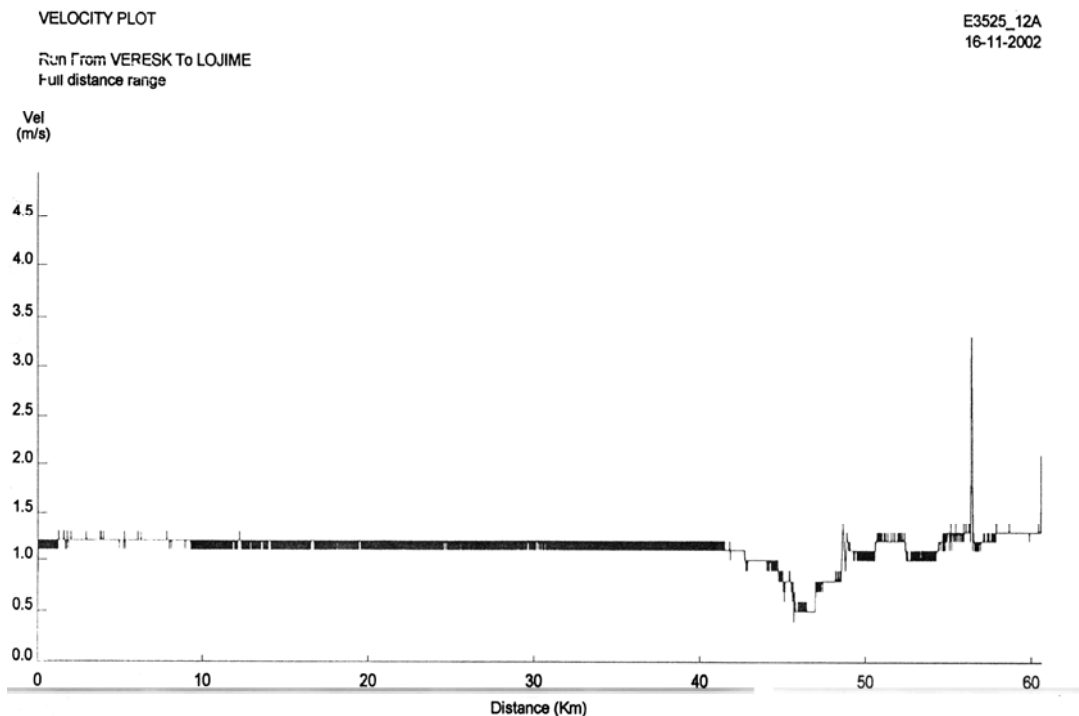
د) بیشترین فاصله‌ای که توپک باید در یک مرحله طی کند چه اندازه است؟ طول خط لوله ورسک- ساری ۱۰۵ کیلومتر است. این عملیات توپکرانی در دو مرحله انجام شد، ابتدا از ورسک تا لاجیم به طول ۶۰ کیلومتر و سپس از لاجیم تا ساری که ۴۵ کیلومتر است.

ط) حداقل شعاع خمش چقدر است؟ حداقل شعاع خمش در خط ورسک- ساری ۳D است. ناگفته نماند که تمام خطوط لوله ایران از نظر استاندارد قابل توپکرانی هستند.

ظ) زاویه خمش‌ها چقدر است؟ بیشتر آنها بین ۴۵ و ۹۰ درجه هستند، البته خمش‌هایی هستند که زاویه‌شان بیشتر از ۹۰ درجه نیز هست.

ه) شعاع داخلی زانویی چقدر است؟

ی) نوع شیرهایی که در خط استفاده شده‌اند چیست؟



شکل ۵-۷. نمودار سرعت توپک در طول مسیر ورسک/لاجیم

۵-۳-۱-۳ انتخاب توپک [40]

طی صد سال گذشته و با وجود پیشرفت‌هایی که در خطوط لوله و روش‌های نگهداری آن حاصل شده بالغ بر ۳۰۰ نوع توپک مختلف به بازار ارائه شده است. به طوری که در بسیاری موارد مرز چندان مشخصی بین

توپک‌های انواع مختلف وجود ندارد و می‌توان از یک توپک در دسته‌بندی‌های مختلف یاد کرد. در مرحله انتخاب توپک، با توجه به مراحل گذشته که در آن اهداف و خصوصیات خط لوله مشخص شد توپکی برگزیده می‌شود که بتواند بدون خطر خط لوله را طی کند و بهترین بازده را داشته باشد. همانطور که گفته شد مراحل توپکرانی برای انجام بازرسی داخلی خط لوله به چهار قسمت تقسیم می‌شود:

(۱) تمیز کردن، که توسط توپک‌های تمیزکننده با ابزارهای مختلفی که موارد گفته شده در تعیین آنها نقش عمده دارند، انجام می‌گیرد. امروزه در ایران این مرحله از عملیات توسط یک شرکت ایرانی به نام ساوی انجام می‌شود.

(۲) فرستادن توپک قابل انعطاف، این توپک‌ها که به Dummy PIG مشهورند، بیشتر برای اطمینان اپراتور از عدم انسداد خط لوله و بررسی توانایی عبور توپک هوشمند از خط لوله ارسال می‌شود. این نوع توپک دارای صفحات فلزی در جلوی خود می‌باشد که هر گونه گرفتگی در خط لوله و یا خرابی روی آن تاثیر می‌گذارد.

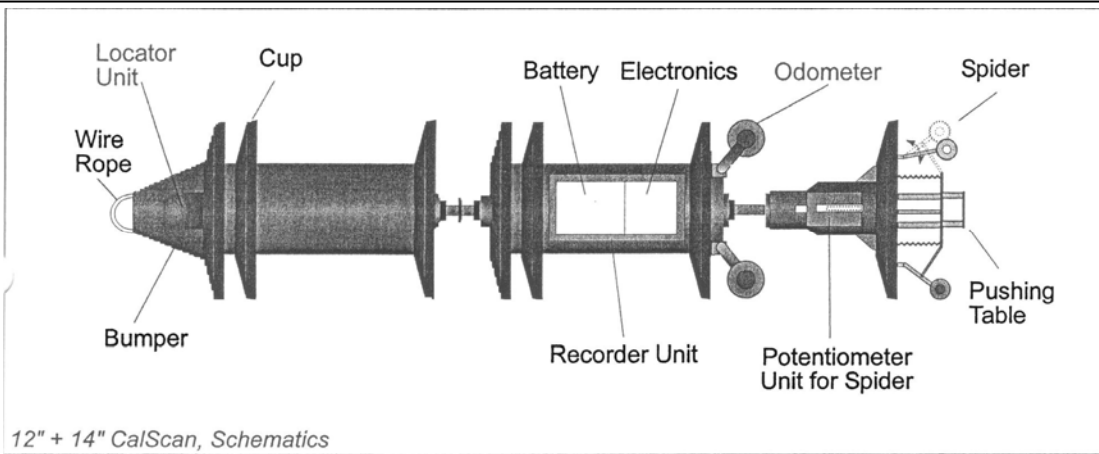
(۳) فرستادن Geometry Pig که همانطور که گفته شد برای تعیین مشخصات و شرایط توپکرانی ارسال می‌شوند. (عموماً این دو مرحله با یک توپک انجام می‌شود مثل توپک CalScan که این دو مسئولیت را در خط لوله ورسک/ لاجیم/ ساری بر عهده داشت و در شکل ۵-۸ قسمت‌های مختلف آن مشخص شده است.)

(۴) و نهایتاً فرستادن توپک هوشمند، راحت‌ترین انتخاب در مرحله انتخاب توپک هوشمند ILLI صورت می‌گیرد. از حدود ۳۰۰ نوع توپکی که در بالا راجع به آن بحث شد تنها حدود ۳۵ توپک از ابزار ILLI هستند.

این توپک‌ها که برای بازرسی داخل لوله به کار می‌روند و خوردگی و از بین رفتگی فلز را تشخیص می‌دهند به سه نوع نشتی شار مغناطیسی، آلتراسونیک و جریان گردابی تقسیم می‌شوند. البته هر نوع گفته شده مزایا و معایب خاص خود را دارند که در فشل اول ذکر شد. ولی در کل خود به دو زیر دسته دقت بالا و دقت پایین تقسیم می‌شوند که بر اساس بودجه اختصاص داده شده به پروژه و همچنین میزان دقت لازم در پروژه نسبت به انتخاب هر کدام تصمیم‌گیری می‌شود.

با توجه به نوع و تعداد موارد مورد بازرسی توپک انتخاب می‌شود. در نتیجه در اولین مرحله اطلاعات مورد نیاز شناخته و طبقه‌بندی می‌شود. مثلاً اگر دنبال تورفتگی هستیم می‌توانیم از Geometry PIG یا توپک تعیین‌کننده مشخصات هندسی^۱ استفاده کنیم. اطلاعات بدست آمده در نتیجه ارسال توپک در خط لوله ورسک/ لاجیم در ضمیمه آمده است.

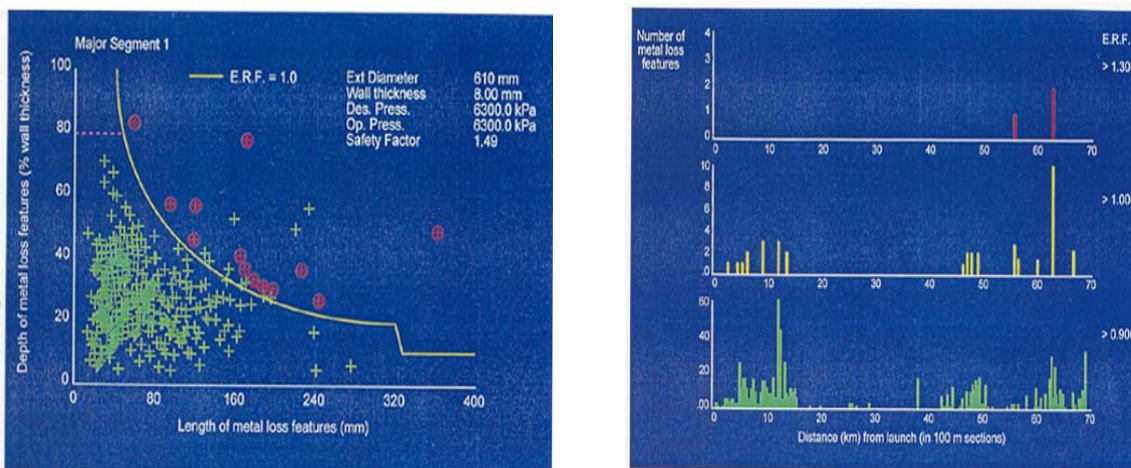
¹ In-Line Inspection Tool
² geometry pig



شکل ۵-۸. توپک CalScan به کار گرفته شده در خط لوله ورسک/الاجیم/اساری

و اگر به دنبال یافتن خوردگی هستیم از توپک مخصوص از بین رفتگی فلز^۱ استفاده می‌شود. برای عملیات تشخیص خوردگی، یک اجرای اولیه مناسب با درصد استاندارد بالا انجام می‌شود تا اولاً از صحت عبور توپک بازرس خط لوله و ثانیاً از اجرای صحیح عملیات، اطمینان حاصل شود. Dummy PIG ها عموماً حین عملیات در اثر برخورد با دیواره یا پس‌ماندها تغییر شکل می‌یابد تا پس از خروج بتوانیم پیش‌بینی‌های لازم برای فرستادن توپک هوشمند مغناطیسی را انجام دهیم. توپک‌های التراسونیک در محیط‌های مایع همگن کار می‌کنند در نتیجه اگر بخواهیم در خطوط گاز از آنها استفاده کنیم باید در محفظه‌ای که حاوی مایع همگن است حرکت کند. یک عملیات کامل تمیزکاری لازمه استفاده از این توپک است. چون ناخالصی‌های روی دیواره ممکن است روی سیگنال‌های دریافتی التراسونیک و در نتیجه روی نتایج تأثیر بگذارند.

۵-۳-۴ به دست آوردن نتایج



۹-۵- نمونه‌ای از پردازش نرم‌افزاری که به طبقه‌بندی خوردگی‌ها براساس درجه اطمینان آنها و همچنین تعیین مکان نسبی آنها پرداخته است.

^۱metal-loss pig

اپراتور نباید به استفاده از نتایج حین عملیات بسنده کند. به دست آوردن نتایج از توپک‌های تشخیص خوردگی و تشخیص کاهش فلز بسیار زمان‌برتر هستند ولی از طرفی دقیق‌تر و قابل استنادتر هستند. به طور مثال در شکل ۵-۹ در سمت چپ نمودار عمق خوردگی و درصد کاهش ضخامت دیواره بر اساس طول خوردگی را مشاهده می‌کنید که بر اساس درجه اهمیت آنها که مرز ERF آن را مشخص میکند و فاصله آنها تا پرتاب کننده نمودارهای سمت چپی منتج می‌شود.

طبق استاندارد ASME B13. که در ضمیمه نیز آورده شده است و یک استاندارد آمریکایی برای تعیین نرخ فشار و در نتیجه تعیین اهمیت درجه خوردگی‌ها می‌باشد، ERF در واقع ضریب تعمیرات احتمالی است که از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

نسبت محاسبه فشار، یک عدد بدون واحد می‌باشد که بیان کننده وخامت دسته خوردگی می‌باشد. دسته‌هایی که وضعیت حادثه‌تری دارند دارای نرخ فشار بالاتری هستند.

$$ERF = MAOP / P$$

ERF = ضریب تعمیرات احتمالی

P = فشار محاسبه شده (ASME B31)

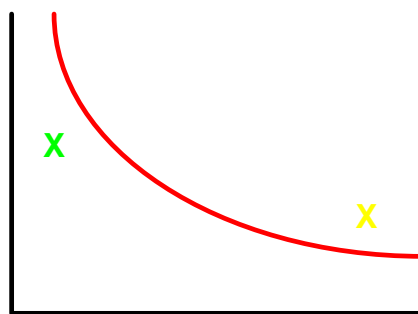
MAOP = حداکثر فشار کاری مجاز که واحد آن با واحد P یکسان می‌باشد.

معادله فشار ASME B31 بر اساس طراحی خطوط لوله با بهره برداری تا فشار ۷۲٪ SMYS می‌باشد (SMYS

حداقل تنش تسلیم ویژه)

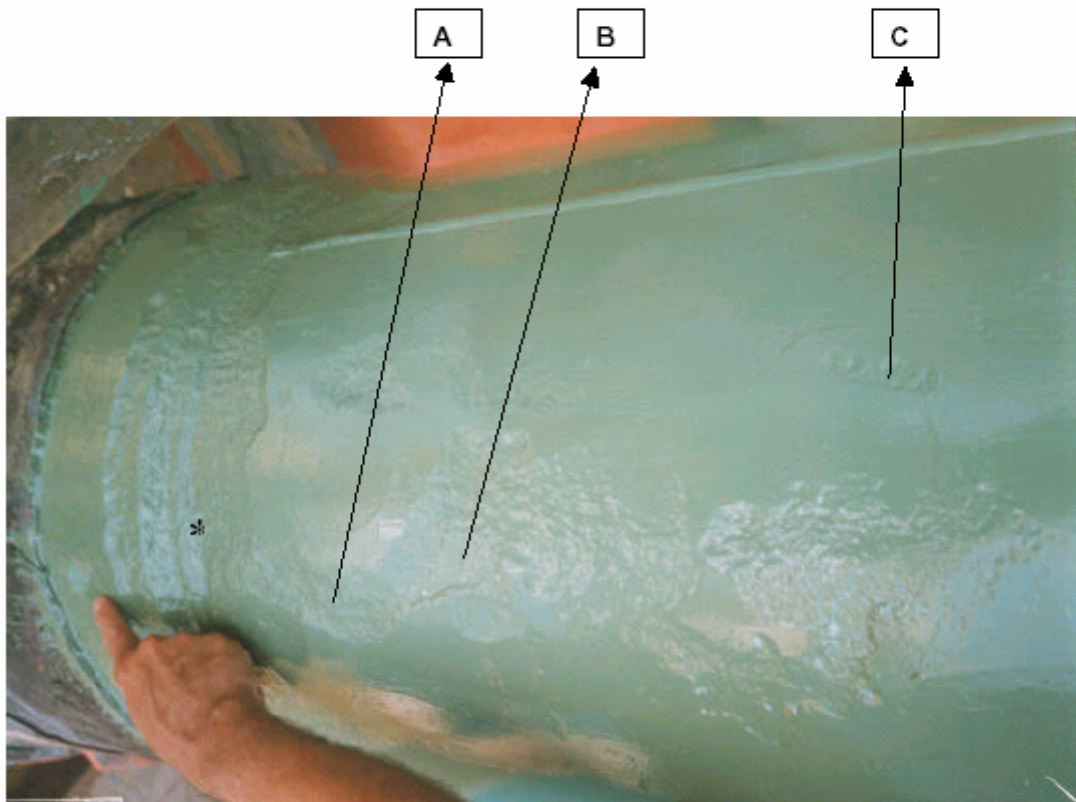
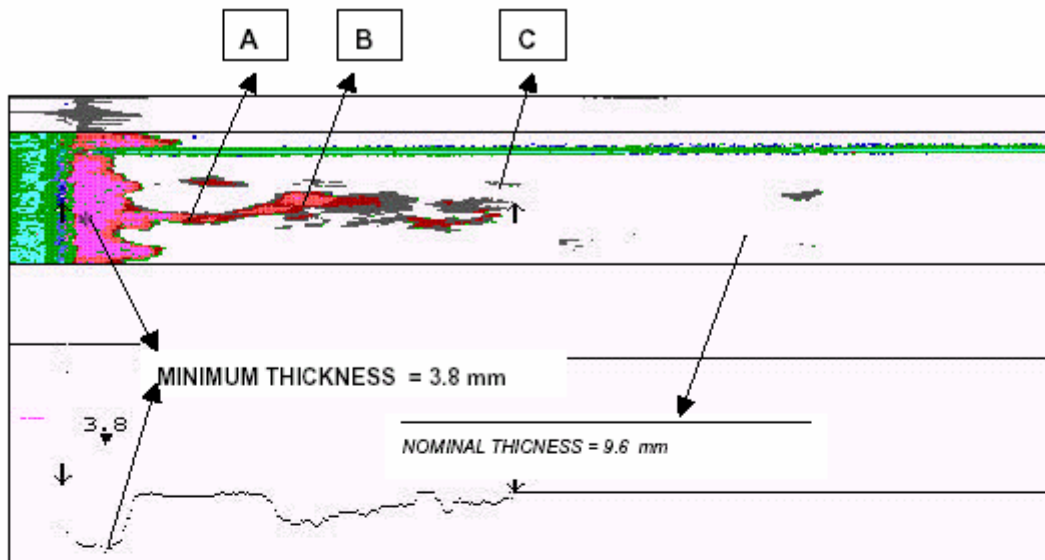
تحت این شرایط، نقاط بالا (و پائین) منحنی ERF در مورد ابعاد شکل خوردگی که در مقابل آزمایش

هیدرولیک در برابر فشار $1.39 \times MAOP$ مقاومت کرده است، مشخص می‌گردد. (۳۹/۱ ضریب ایمنی می‌باشد).



۵-۱۰-منحنی ERF

بنابراین نوع گزارش با نوع سرویس به کار گرفته شده و همچنین نوع توپک تغییر می‌کند. بیشتر گزارش‌های مربوط به توپک مشخص کننده ویژگی‌های هندسی، شماتیکی با توضیحات و توصیه‌ها است، که در ضمیمه آمده است. گزارش‌های مربوط به خوردگی وقتی از روش MFL استفاده شده باشد شکل‌های شماتیکی رایانه‌ای است (شکل ۵-۱۱). همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید، وقتی که از روش ماوراصوت استفاده شده باشد نمودارهایی با استفاده از روش‌های C-Scan و B-Scan است، بوجود می‌آید.



شکل ۵-۱۱. نمایان شدن خوردگی‌ها به وسیله A-B-C Scan در روش ماوراصوت

۴-۵ نظرات و پیشنهادات

در این بخش با توجه به بررسی‌های انجام شده در زمینه فناوری توپک هوشمند به ارائه پیشنهادات خود در جهت ادامه بهینه این پروژه و سرآغازی برای پژوهش‌های آتی می‌پردازیم. نخست نظریات خود که حاصل تجربه‌های ما در طول پروژه بوده است بیان می‌کنیم. سپس طرح پیشنهادی خود را در زمینه ساخت یک نمونه آزمایشگاهی از عیب‌یاب به روش شار نشتی مغناطیسی ارائه خواهیم کرد.

مانند تمامی فعالیت های صنعتی ، برای انتقال مواد خطرزا بوسیله خطوط لوله فشار قوی بسیاری از موارد خطرات احتمالی باید بررسی شود . این خطرات را بطورکلی نمی توان نادیده گرفت و خرابی ها و نقص ها بدلائل متفاوتی در خطوط انتقال مواد نفتی در سراسر دنیا روی می دهد. امروزه دانش ما از چگونگی مواد، به اضافه پردازش سریع داده ها ما را قادر می سازد که دقیق تر پیش بینی کنیم که کی و چگونه ایرادات پیش خواهد آمد ؟

در سال های اخیر نمونه های زیادی از بروز مشکلات بر روی خطوط لوله بوده است که در آنها کدها و استانداردها کاملاً رعایت گردیده است . افزایش کمی داده ها و درک بهتر از فرآیند اشکالات می تواند ما را در حذف آنها یاری دهد . اکنون زمان آن فرا رسیده است که واقعیات را پذیرفته و فعال تر عمل نمائیم.

چه مشکلاتی می تواند پیش بیاید ؟

احتمال خسارات جانی و مالی

هدر رفتن مواد نفتی و سود حاصل از حمل آن

آلودگی محیط زیست.

وقوع آن تا چه حد محتمل است ؟

تبعات آن چه خواهد بود ؟

چه کار/ کارهائی می توان برای جلوگیری از آنها کرد ؟

حرکت جهانی به چشم می خورد که در حال جایگزینی قوانین تنظیم شده جدید به جای چارچوب های تجویز شده قدیم برای خطوط میباشد. بنظر می رسد مدیریت بحران (خطر) ایمن ترین و موثرترین راه برای نگهداری و بالابردن ضریب امنیت خطوط لوله می باشد.

روشی برای ارزیابی خطرات احتمالی خطوط

شیوه مستدل برای اولویت بندی شبکه خطوط مطابق با خطر احتمالی ،

-وسیله ای برای انتخاب متد یا روش جهت کاهش احتمال خطر،

- مشخص کردن و الویت بندی روش های مناسب نگهداری ،

-طراحی نگهداری فعالتر.

سیستم درجه بندی خطوط

برای افزایش فواصل بازرسی بکار گرفته می شود،

-تعداد تعمیرات / اشکالات را در زمان معین پیش بینی می کند.

سیستم برنامه ریزی برای نگهداری اطلاعات خط شامل محل ، تاریخچه ، بازرسی های قبلی ،

برنامه ریزی نگهداری فعالتر.

با توجه به قدمت اکثر خطوط لوله و اهمیت تداوم بهره برداری بهمراه حفظ ایمنی کامل ، استفاده از توپک هوشمند به منظور شناسائی نقاط ضعف و رفع عیوب ، یکی از بهترین روشهای بازرسی لوله ها می باشد .

معضلات مسائل زیست محیطی و توسعه روزافزون شهرها و مناطق مسکونی در مجاورت خطوط لوله و در کنار آن اهمیت حفظ مواد نفتی بعنوان مهمترین منبع انرژی در کشور و جهان ، هزینه اولیه اجرای توپکرانی هوشمند را از لحاظ اقتصادی کاملا توجیه پذیر می سازد .

آیا ساخت توپک هوشمند به صرفه است؟

قیمت یک توپک هوشمند در حدود میلیون ها دلار می باشد . با توجه به این که برای ساخت یک توپک نیاز به خرید یک نمونه خارجی است و این خود نیازمند بودجه زیادی است و با توجه به موقعیت استراتژی ایران که توانایی توپکرانی به غیر از ایران در جای دیگری را در حال حاضر ندارد و از طرفی یک توپک هوشمند تنها برای یک قطرمحدودی از خط لوله کار می کند ، خرید آن به صرفه نخواهد بود. بنابراین برای شروع این صنعت در ایران توصیه می شود که مسئولیت بهره برداری از اطلاعات بدست آمده در یک عملیات توپک رانی را متخصصین داخلی بر عهده گیرند و پس از مهارت در زمینه پردازش نرم افزاری به خودکفایی برسند.

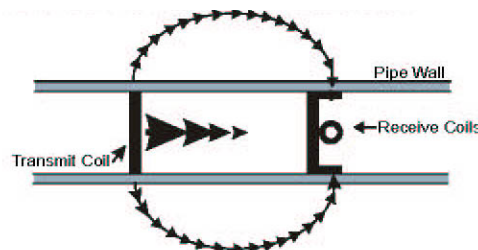
۵-۴-۱ ساخت یک نمونه عیب یاب آزمایشگاهی [41], [42], [43]

۵-۴-۱-۱ مقدمه

همانطور که خواندید فناوری‌هایی که در یک توپک هوشمند بکار می رود دور از ذهن و غیر قابل پیاده‌سازی نیست. تنها نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و ساخت مرحله به مرحله این فناوری که امروزه تنها ۷ شرکت بزرگ در جهان ساخت آن را بر عهده گرفته اند می‌باشد. در این قسمت می‌خواهیم به بررسی طرح اولیه پیشنهادی که از علوم ذکر شده منتج شده است بپردازیم که به علت کمبود امکانات و زمان این پروژه مرحله پیاده سازی را به گروه‌های دانشجویی دیگر واگذار می نماییم. امید است در آینده تسهیلاتی جهت ساخت این طرح صنعتی فراهم آید. با توجه به موارد استفاده تکنولوژی نشتی شار مغناطیسی مبنای کار خود را بر پایه ساخت عیب یاب مغناطیسی قرار می‌دهیم. تکنیک شار مغناطیسی با القا کردن یک میدان مغناطیسی در دیواره خط لوله و شناسایی اغتشاشی در میدان که نمایانگر تغییری در ضخامت خط لوله است می‌باشد.. ابتدا به بررسی بلوک دیاگرام آن می‌پردازیم.

۵-۴-۱-۲ بلوک دیاگرام

شکل ۵-۱۲ شماتیکی از عملکرد سیستم MFL را نشان میدهد. سیگنال بدست آمده با استفاده از شیوه المان محدود، نشان دهنده رفتار شار مغناطیسی بین سیم پیچ و حس گر است.



شکل ۵-۱۲. شماتیکی از شار مغناطیسی

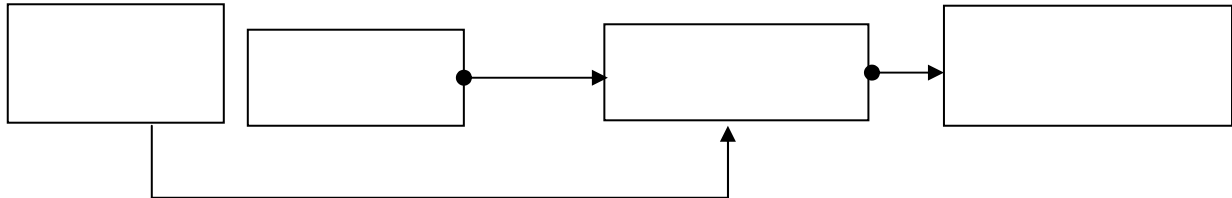
سیستم MFL از چند قسمت اساسی تشکیل شده است:

مغناطیس کننده

بخش الکترونیکی

منبع تغذیه

بنابراین بلوک دیاگرام سیستم MFL در ساده‌ترین حالت به صورت زیر است:



شکل ۵-۱۳. بلوک دیاگرام سیستم MFL

۵-۴-۱-۳ بخش مغناطیس کننده

این بخش مهمترین قسمت این سیستم را تشکیل می‌دهد. هم‌طور که گفتیم باید بخش مغناطیس کننده به گونه‌ای باشد که خط لوله را به حالت اشباع برساند زیرا بنا به آنچه گفته شد نرخ سیگنال به نوبت زمانی بهترین است که خط لوله در نزدیکی ناحیه اشباع مغناطیس شود. بنابراین باید منحنی مغناطیس شوندگی فلز را بدست آوریم و بر اساس آن تعیین کنیم که چه مغناطیسی و با چه مشخصاتی نیاز است. ب یک راه حل دیگر این است که با قرار دادن سیم پیچ و افزایش جریان آن شدت مغناطیس کنندگی را افزایش دهیم و در نقطه‌ای که فلز به اشباع رسید جای سیم پیچ را با مغناطیس دائم با همان مشخصات مغناطیس کنندگی تعویض کنیم. اصرار ما برای استفاده از مغناطیس دائم به این جهت است که تا حد ممکن به نمونه عملی آن نزدیکتر شویم. برای صرفه جویی در انرژی از مغناطیس دائم جهت مغناطیس کردن خط لوله استفاده می‌کنند.

۵-۴-۱-۴ بخش حسگر

یکی از مسائلی که در این طراحی حائز اهمیت می‌باشد قسمت حسگرها است. این که چه حسگری انتخاب شود خود جای بررسی زیادی دارد. اما یکسری از خصوصیات آن را می‌توان هم‌اکنون بازگو کرد.

- ۱) میدان عملکرد آن به گونه‌ای باشد که عرض فلز مورد بررسی را بپوشاند.
- ۲) نسبت به محیط تا چه حد تویزپذیر است؟. یعنی اگر یک فلز دیگری در کنار آن قرار داشته باشد آیا روی سیگنال‌های آن تاثیر می‌گذارد؟
- ۳) فاصله آن از سطح فلز چه اندازه باید باشد؟
- ۴) سیگنال خروجی آن در چه محدوده‌ای است؟
- ۵) و مهمتر از همه تا چه اندازه قابلیت شناسایی تغییر ضخامت را دارد و از چه درصدی خوردگی یا هر گونه خرابی را شناسایی می‌کند.

برای این منظور می‌توانیم مانند یک شرکت سازنده توپک عمل کنیم، یعنی یک فلز که عرض آن همان دامنه عملکرد حسگر است را انتخاب می‌کنیم و سپس روی آن خرابی‌هایی با درصدهای تعیین شده مختلف ایجاد می‌نماییم با بررسی سیگنالهای بدست آمده از حسگر میتوان به حساسیت حسگر و همچنین تعیین فاصله حسگر از سطح فلز پی برد.

پیشنهاد می‌شود با توجه به این که این طرح یک طرح اولیه است و حسگرهای حال عملکرد کلی نسبت به سنسورهای جریان گردابی دارند در این طرح تنها از حسگرهای حال استفاده شود.

۵-۴-۱-۵ بخش الکترونیکی

بخش الکترونیکی از تقویت کننده ولتاژ خروجی حسگر حال، فیلتر، مبدل آنالوگ به دیجیتال و پروسور تشکیل شده است. لازم بذکر است در صورت کوچک بودن دامنه عملیاتی حسگر میتوان برای طول یک نوار فلزی از تعداد بیشتری حسگر استفاده کرد ولی تعداد اطلاعات کسب شده زیاد و پردازش آنها پیچیده تر خواهد شد. نمونه‌ای از یک حسگر حال در ضمیمه آمده است.

خروجی حسگر حال دارای دامنه ضعیفی است بنابراین توسط یک تقویت کننده باید تا حدی که مبدل آنالوگ به دیجیتال بتواند آنرا نمونه برداری کند تقویت گردد. این تقویت کننده می‌تواند تنها از یک ترانس و یا یک Op-Amp تشکیل شده باشد. سیگنال بدست آمده، به علت آلوده نشدن به نویز باید به یک بازه فرکانسی خاص محدود شود. این کار توسط یک فیلتر میان گذر باید صورت گیرد. سیگنال فیلتر شده دوباره باید تقویت شود تا اندازه آن به حد مطلوب برسد. حال این سیگنال آماده نمونه برداری است.

برای رسیدن به حساسیت و دقت بالا نیاز داریم که از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده کنیم. با توجه به این که سرعت حرکت دادن حسگر در روی نوار فلزی را در شرایط آزمایشگاهی می‌توانیم کنترل کنیم برای رسیدن به دقت مناسب زمان نمونه برداری می‌تواند متغیر باشد. زمان نمونه برداری را می‌توانیم توسط یکی از تایمرهای میکروکنترلر تنظیم کنیم.

سیگنال دیجیتال شده، باید سیگنال ورودی میکروکنترلر باشد. با توجه به اطلاعات بدست آمده به صورت نرم افزاری می‌توانیم دامنه و فاز سیگنال خروجی حسگر حال را تحلیل کنیم. برای رسیدن به دقت بالاتر می‌توانیم از فیلتر دیجیتالی نیز استفاده کنیم. یعنی از چند تا سیگنال ورودی مانند هم نمونه برداری کرده و از سیگنال دیجیتال شده آنها میانگین بگیریم.

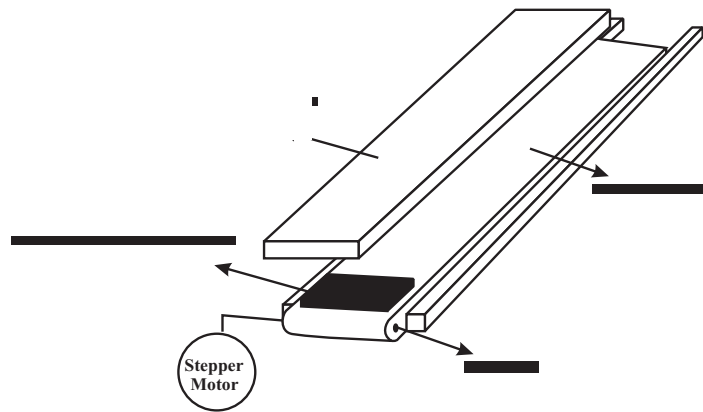
همانطور که مشاهده می‌کنید نقش اساسی را پردازشگر و در واقع برنامه نرم افزاری آن بر عهده دارد که کل سیستم را کنترل و اطلاعات بدست آمده را ضبط می‌کند. خروجی میکروکنترلر باید جهت مانیتور کردن به کامپیوتر برود. برای این منظور از IC , ADM485 برای کسب خروجی ۴۸۵ و یا از 232MAX برای اتصال به PC استفاده می‌کنیم. بنابراین باید از دو پورت RXD, TXD برای ارسال و در صورت نیاز دریافت سری اطلاعات استفاده کنیم..

این قسمت در واقع تامین کننده انرژی لازم جهت تغذیه IC ها و تغذیه کامپیوتر را بر عهده دارد. قطعا برای تغذیه IC ها باید یک ولتاژ ثابت 5V تولید کنیم. بنابراین قسمتی از مدار منبع تغذیه همان مدار یکسوساز به همراه رگولاتور 7805 می باشد.

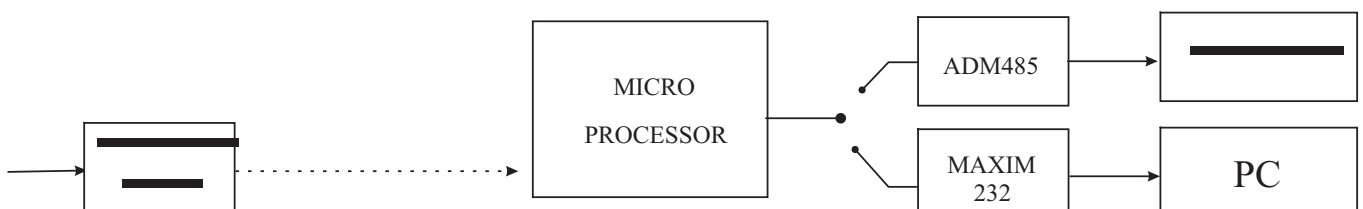
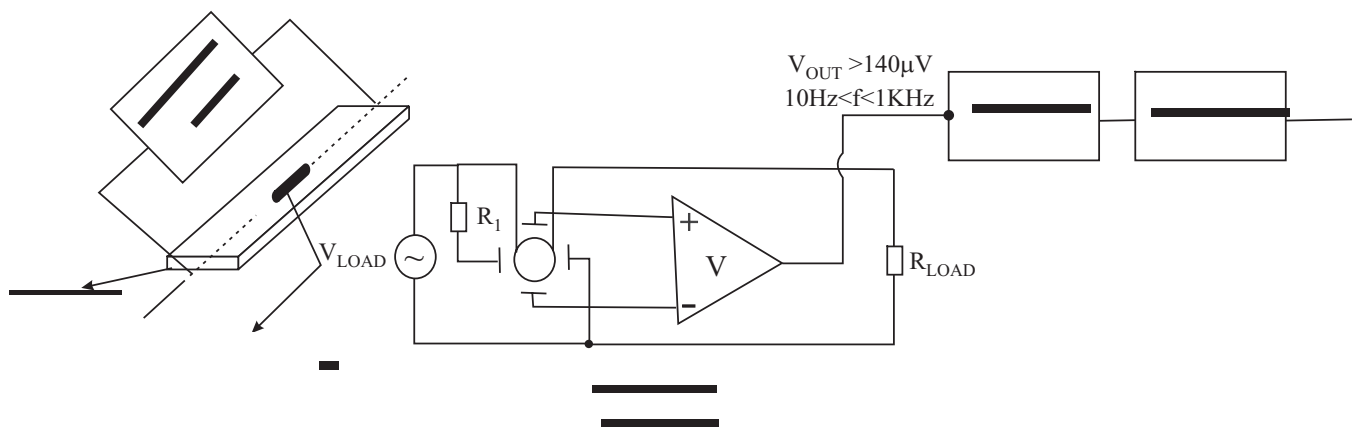
۵-۴-۱-۷ بخش راهبر

همان طور که گفته شد باید حسگرها سرعت کنترل شده ای در روی سطح فلز حرکت کند تا تمام سطح فلز را بررسی نماید. برای این منظور باید حسگرها توسط یک stepper motor و چرخ دنده و تسمه نقاله حرکتشان کنترل شود. با استفاده از یک Encoder می توانیم تعداد دورهای stepper motor را بشماریم و به این ترتیب موقعیت خرابی را مشخص نماییم. مشاهده می شود که این سیستم به مانند یک Odometer عمل میکند. سرعت و تعداد دورهای Stepper motor باید توسط یک میکروکنترلر دیگر کنترل شود.

شکل ۵-۱۴ شماتیک بخش راهبر این سیستم می باشد. شکل ۵-۱۵ مدار پیشنهاد شده برای این سیستم را نمایش می دهد:



شکل ۵-۱۴. بخش راهبر



شکل ۵-۱۵- شماتیکی از عیب یاب با تکنیک نشتی شار مغناطیسی

References

[1]-J. N. Tiratsoo, BSC, CE Eng, MICE, MIWES, MICOWST, “ Pipeline Pigging Technology “, Gulf Publishing Company MIHT Bood Division, Houston, London, Paris, Zurich, Tokyo, Second Edition: May 1989.

[2]- Jim Cordell, Hershel Vanzant, and “An Introduction to Pipeline Pigging”, The Pigging Products & Services Association, 4th Edition: 2001

[3]- P.J. Brown, “ 10 Years’ of Intelligent Pigging: An Operator’s View”, Pipeline Pigging Inspection Technology Conference, Westin Galleria Hotel Houston, Texas, 19-22 February 1990

[4]- In-Line Inspection of Natural Gas Pipelines, Gas Research Institute Topical Report No. GRI 91/0365

[5]- Magnetic Flux Leakage Technology for Natural Gas Pipeline Inspection, Gas Research Institute Topical Report No. GRI 91/0367

[6]- Design and Application Manual, “PIPELINE PIGS & PIGGING “ Section 1, Pipeline Engineering & Supply Co. Ltd, Copyright 1999

[7]- Namvaram Co., Pigging Documents, ISO Procedure, Edited: 1998

[8]- Design and Application Manual, “PIPELINE PIGS & PIGGING “ Section 4: PIG Signaler, Pipeline Engineering & Supply Co. Ltd, CopyRight1999

[9]- P Hopkins, Andrew Palmer and Associates, Newcastle upon Tyne, UK, “PIPELINE INTERNAL INSPECTION - WHAT A PIPELINE OPERATOR NEEDS TO KNOW.”, API, Penspen Integrity Virtual Library

[10]- GE Power System Oil & Gas, PII Pipeline Solutions. Catalogue, Copyright 2000, www.gepower.com/PII, 2002 general electronic company

[11]- Design and Application Manual, “PIPELINE PIGS & PIGGING “ Section 5: PIG Traps, Pipeline Engineering & Supply Co. Ltd, CopyRight1999

[12]- “ Introduction to CD47”,

[13]-ROSEN Inspection Technology, www.RosenInspection.net

[14]- Detection Technologies, Volume I Technical Review of Leak, Crude Oil Transmission Pipelines

[15]- Underground Pipeline Leak Detection And Location Technology Application Guide, J.P.Lefave, Lessli Karr, April1998

[16]- Optical Leak Detection And Location System, Technical Description

[17]- www.x20.org/library/infrared pipe leak Detection

- [18]- Acoustic Leak Detector, www.colmar.com
- [19]- A Piggy Primer, Star Trak Pigging Technologie
- [20]- chap4.us
- [21]- Ultrasonic Testing Of Aerospace Material
- [22]- Non destructive Testing with Ultrasonic
- [23]- Ultrasonic Probes for Special Task-The optimum probe for each Application, G.Splitt, Krautkramer,GmbH.,Hurth,Germany
- [24]- Review Of Sensor Technologies for in-Line inspection of Natural Gas Pipeline, Robert Staff, Gerald Stoker, Mark Vaughen, Michael Hassard, Mark Garrett, Sandia National Laboratories
- [25]- LIFE ASSESSMENT OF PIPELINE BY ADVANCED IN-SERVICE INSPECTION,P.Magneschi,R.Crudeli,L.Bison,A.Bologna
- [26]- جزوه توپک ماوراصوت، شرکت پایپ ترونیक्स متعلق به شرکت نفت
- [27]- J. B. Nestleroth and T. A. Bubenik, Battelle, “Magnetic Flux Leakage (MFL) Technology For Natural Gas Pipeline Inspection”, The Gas Research Institute, February 1999
- [28]- Chris R. Coughlin, “Magnetic Flux Leakage”, www.chriscoughlin.com, Copyright 2003
- [29]- Baker Hughes Co., “Magnetic Flux Leakage”, <http://www.bakerhughes.com/bakerhughes.htm>, January 1997
- [30]- Scott Wruck Halliburton Energy Services, “Electric Line Technologies In Casing Inspections”, West Coast PTTC Workshop, Feb 2001
- [31]- Hall Effect, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/hall.html#c1>
- [32]- David K. Cheng, “Field and Wave Electromagnetics”, Tehran University Publication, chapter. 6-13-1, pp 339-341
- [33]- اندازه‌گیری الکترونیکی، دکتر امیرحسین رضایی، مهندس محمدرضا ذهابی، مرکز نشر پروفیسور حسابی، سال ۱۳۶۹
- [34]- Joseph M. Buckley, Formerly of HOCKING NDT, “An Introduction to Eddy Current Testing Theory and Technology”, www.hocking.com, 1985
- [35]- T.R. Schmidt, D. L. Atherton, “Introduction to Remote Field Log Interpretation”,

[36]- David L. Atherton, Department of Physics, Queen's University, Kingston, Ont., K7L 3N6, Canada, "Remote Field Eddy Current Inspection", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 6, November 1995

[37]- Yuji Gotoh and Norio Takahashi, Fellow, IEEE, "3-D Nonlinear Eddy-Current Analysis of Alternating Magnetic Flux Leakage Testing- Analysis of One Crack and Two Cracks", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No.2, March 2002

[38]- S. Yang, Y. Sun, L. Udpa, S.S. Udpa, and W. Lord, Department of Electrical and Computer Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011, USA, "#D Simulation of Velocity Included Fields for Nondestructive Evaluation Application", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, May 1999

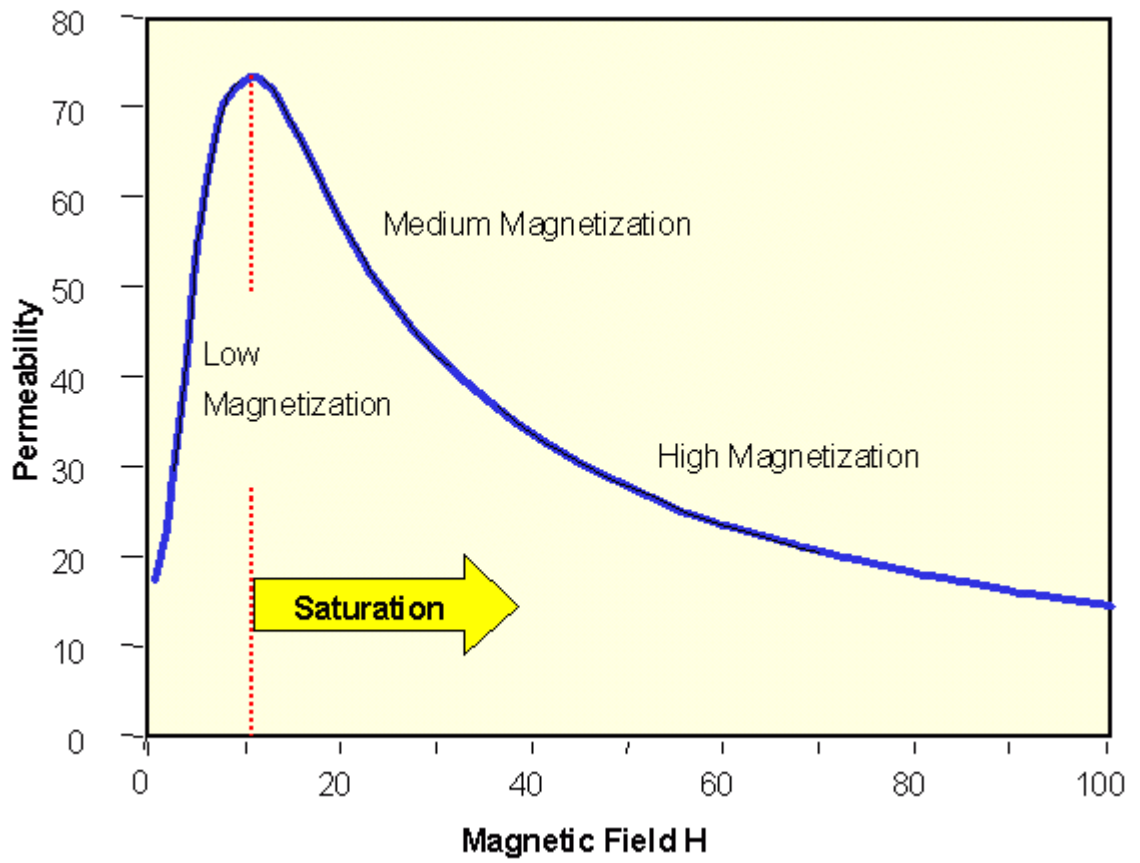
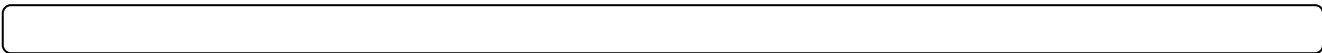
[39]- Rosen Inspection, "HIRES Axial Flaw Detection Tool(AFD)", AFD info brochure rev 1.1, March 14, 2002

[40]- مدارک و گزارش های توپک رانی لوله های نفتی ورسک / ساری و اهواز/تنگ فنی

[41]- J.M. Makar and R. Desnoyers, "Three dimensional mapping of corrosion pits in cast iron pipe using the remote field effect", Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, 1500 Montreal Road, Ottawa, Copyright 2000

[42]- BG Technology, Gas Research & Technology Centre, "A Miniature Pipeline Inspection Tool MCM Technology Size Reduction Opens Up New Exploitation Potential" , Application Experiment Number 25744, May 1998

[43]- Current Sensing Handbook, "amploc current sensors", Engineers' Reference Handbook , Copyright 2003



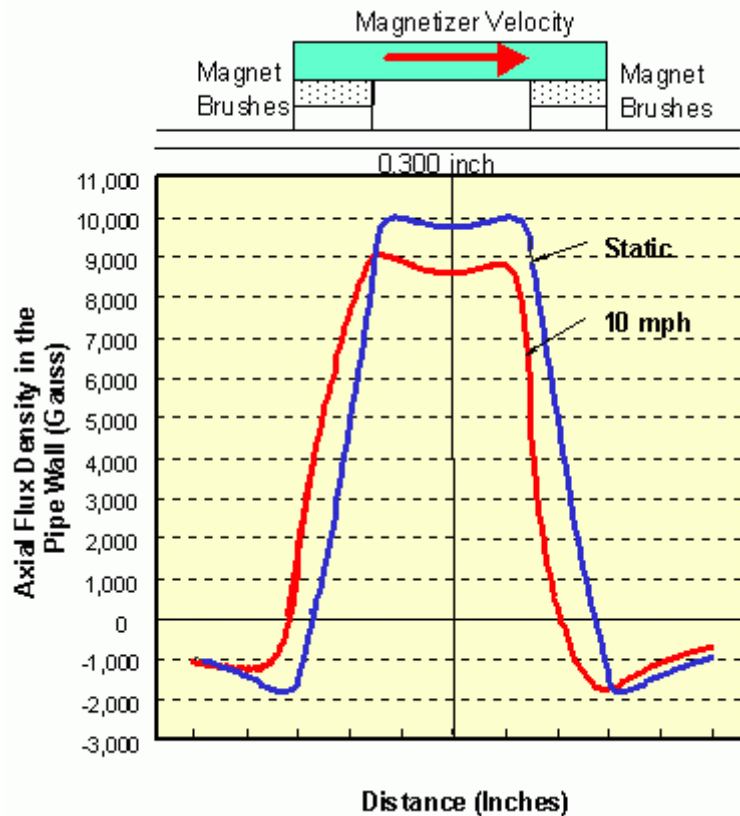
..

Effect of Velocity on Applied Fields

Increasing the velocity of a tool reduces the applied field strength by inducing eddy currents near the pole pieces. The effects of eddy currents can be significant if they reduce a high or medium applied field strength to a low field strength. The calculated finite-element effects of velocity on the tangential component of the applied field level in a pipe wall with no metal loss are shown at right.

For the static case, the tangential component of the magnetic field is fairly uniform between the pole pieces. For the 10-mph case, the magnetic field in the pipe drops 10 percent. So, the applied field is reduced, which affects detection and characterization.

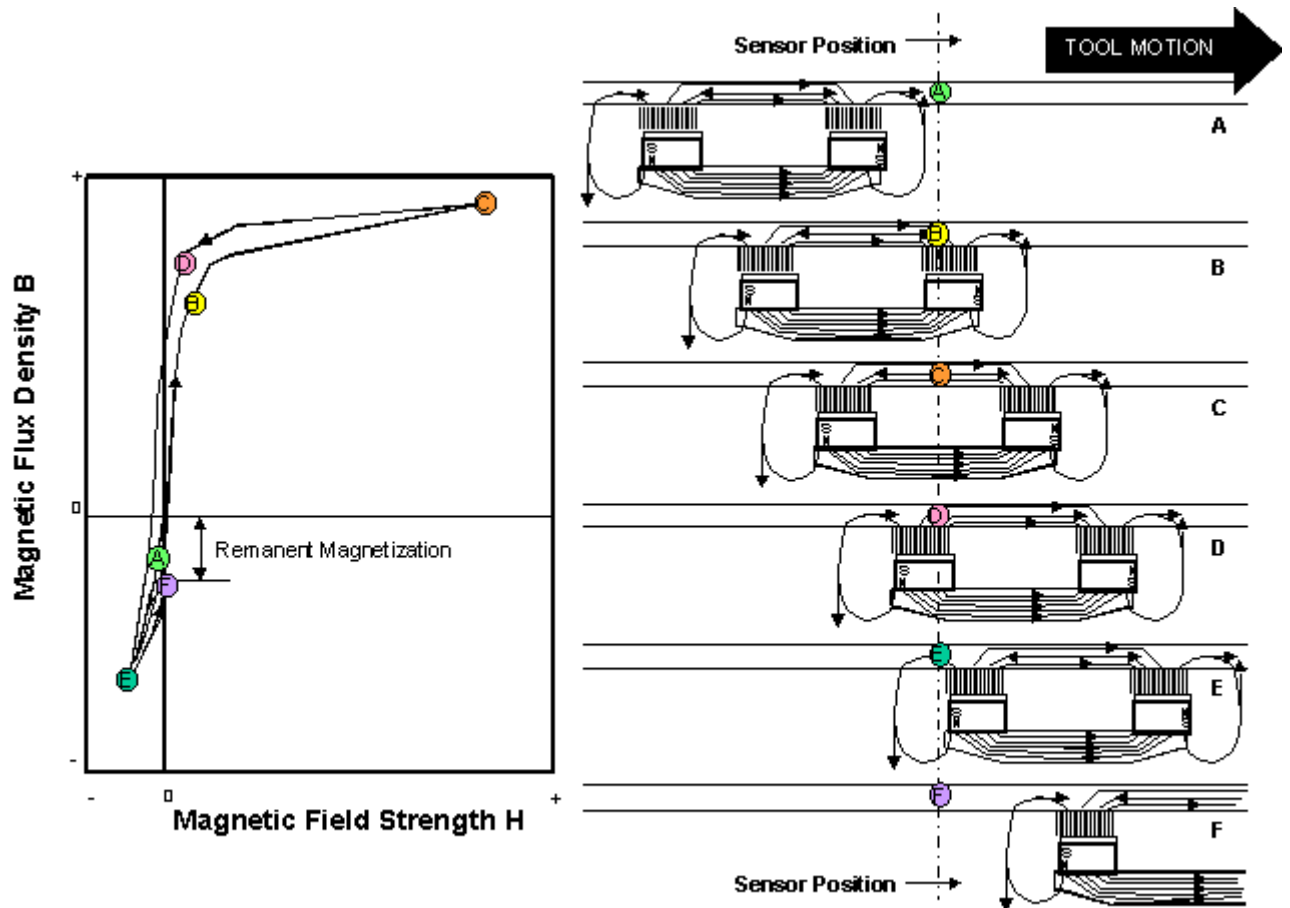
Since the applied field in the pipe is reduced by velocity, the air-coupled field typically increases. The air-coupled field affects the base signal measured in regions of no metal loss. As a result, the ratio of the leakage signal to the base signal should decrease, which can make detection of imperfections and small defects more difficult.



Basic Effects of Remanent Magnetization

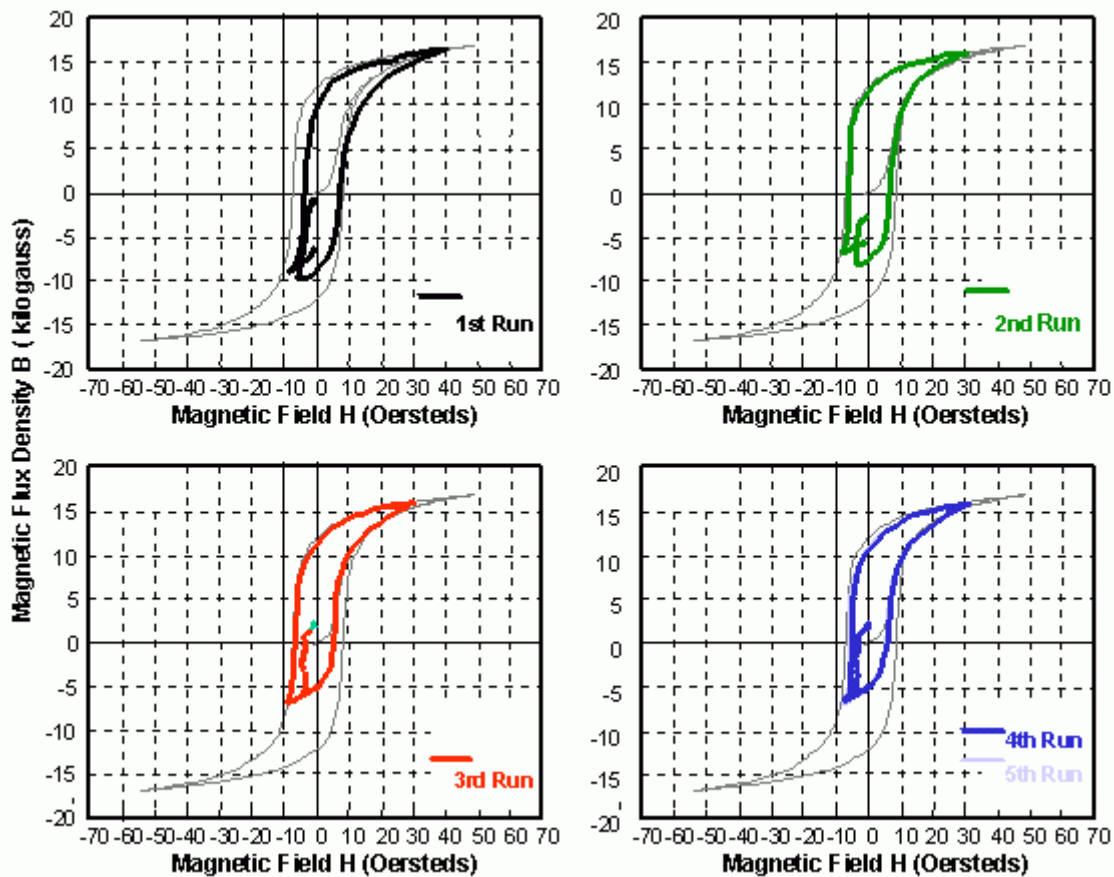
Remanent magnetization is the magnetization level left after a tool passes. Remanent magnetization can either increase or decrease the applied field, and so, it influences the detection and characterization of metal-loss regions.

Pipeline steels exhibit a hysteresis effect when magnetized; specifically, when the applied field is removed, a flux density is left in the pipe. When the magnetic field is reapplied, the magnetization curve starts at an applied magnetic field equal to zero and a flux density equal to the remanent flux density. Hence, a new magnetization curve is generated. In other words, magnetization curves are not only nonlinear, they are also different for repeated magnetizations.



Remanent magnetization and the resultant magnetization curves are complex. The figure schematically shows the magnetic field and flux density for a magnetizer passing a point in the pipe. The magnetization curve starts at the origin, which means the pipe has no previous magnetic inspections or that it has been demagnetized. The curve moves through the following points:

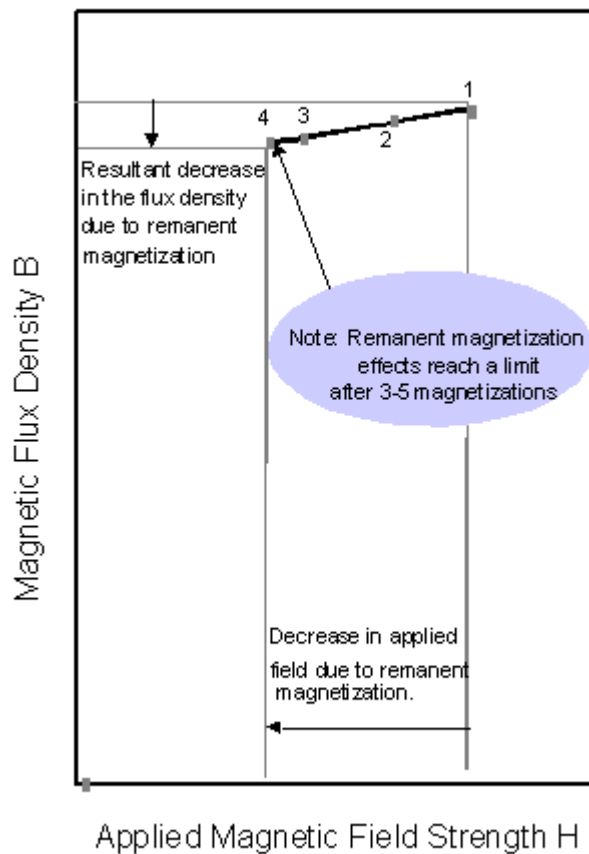
- Position A: As the magnetizing assembly approaches, a negative magnetic field and flux density are produced due to air-coupled fields.
- Position B: As the forward leg of the magnet passes the sensor location, the applied field changes orientation and increases significantly.
- Position C: The maximum field intensity is achieved when the sensor is between the pole pieces, although not necessarily at the halfway point.
- Position D: As the trailing leg of the magnet passes the sensor location, the field decreases significantly and changes orientation.
- Position E: The applied field reaches a maximum negative value before the magnetizing assembly leaves the sensor region.
- Position F: The applied field now is zero but some flux density remains in the pipe. This remaining flux density is the remanent magnetization.



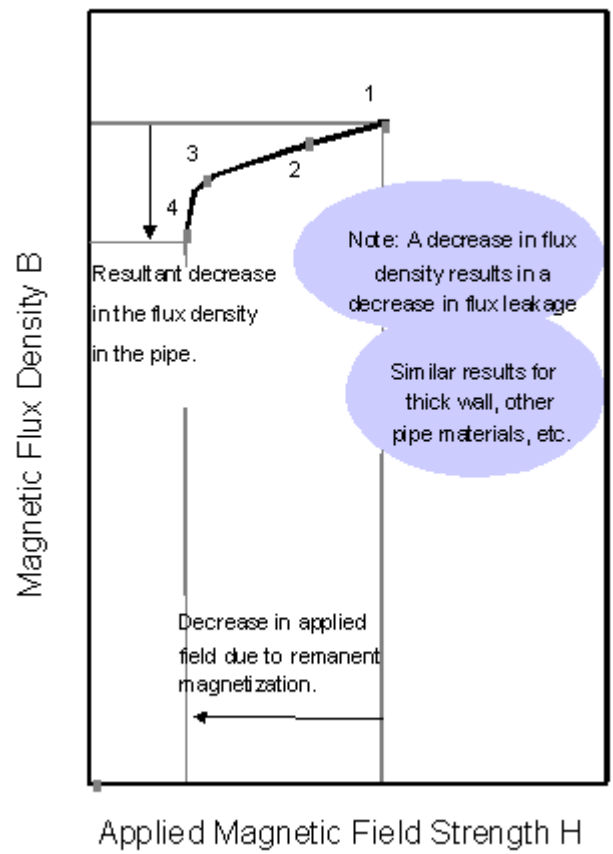
The effects of multiple passes on the applied field can be seen in the above figure. These data are from a measurement program using an instrumented pipe without metal-loss regions. Subsequent passages of a magnetizing assembly created different magnetization curves.

Two important changes can be observed. First, the maximum field and flux density are less for each passage. Second, the remanent magnetization changes between each passage. These effects become less significant after the first few passages. For this case, even though the magnetization levels varied widely, the applied flux density levels in pipe did not vary significantly because the pipe wall was saturated.

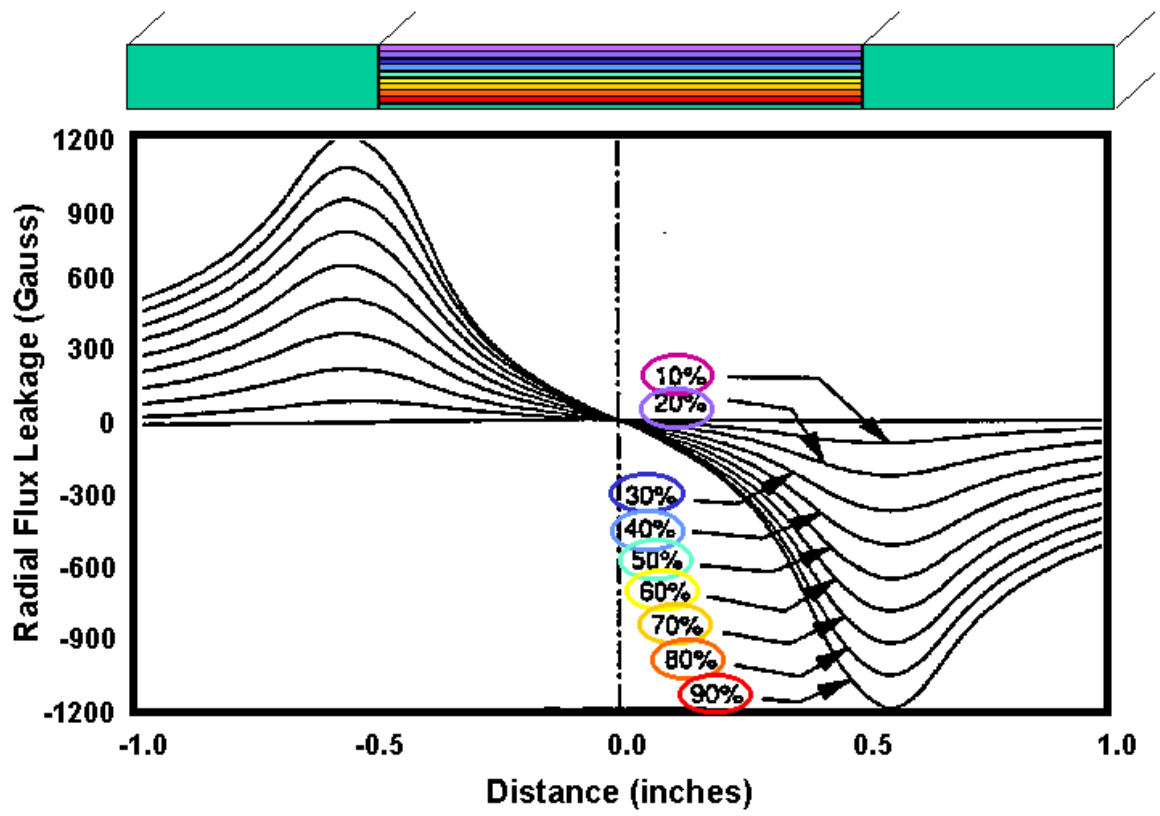
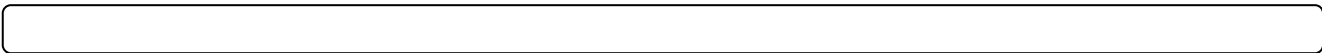
For Strong Applied Fields

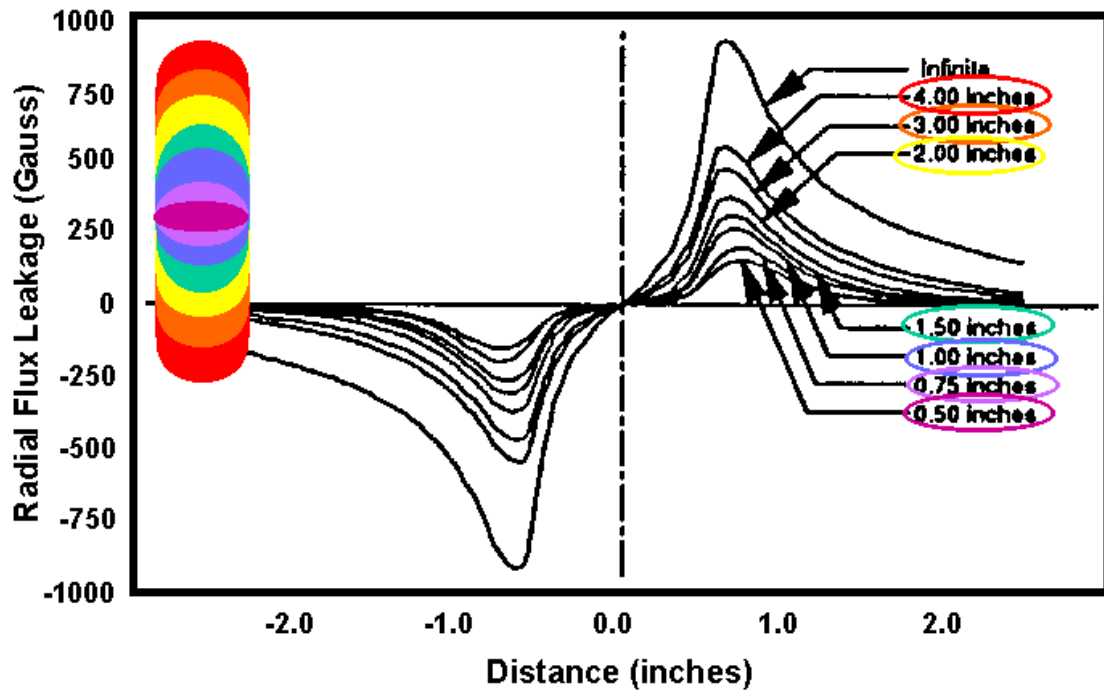


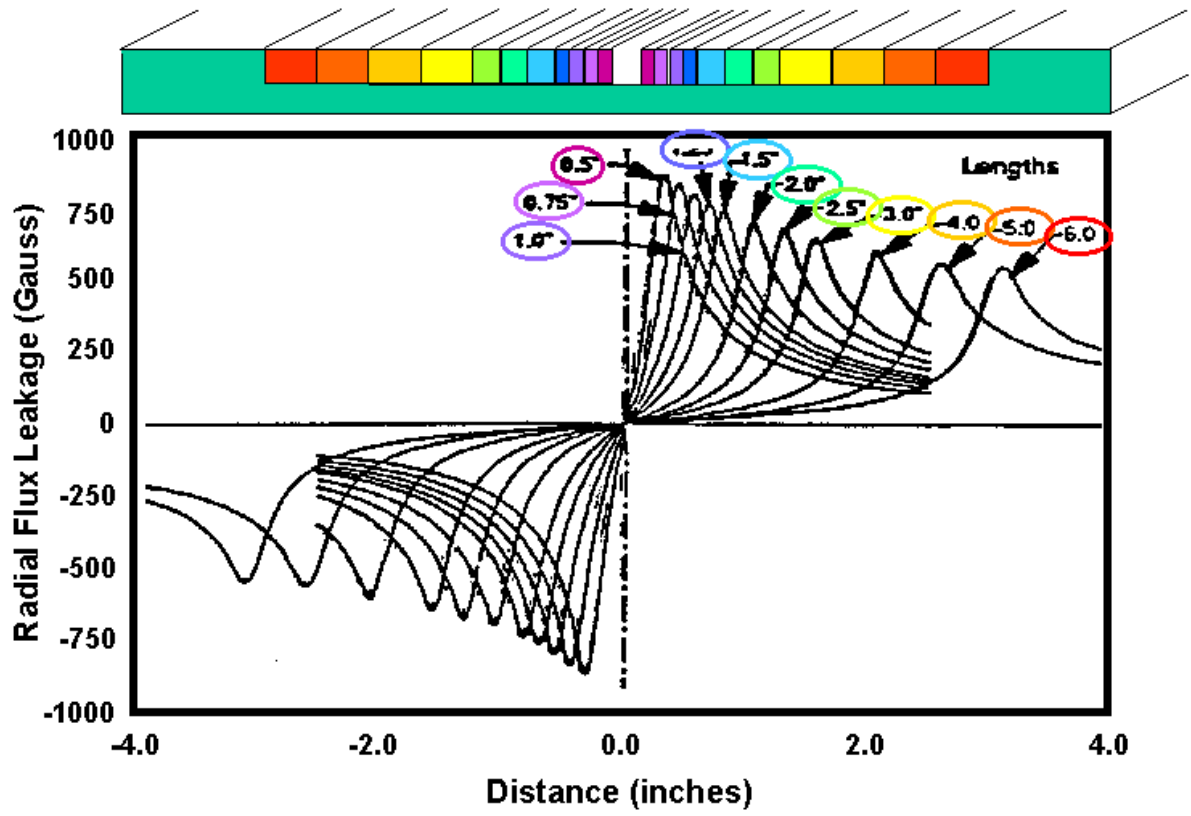
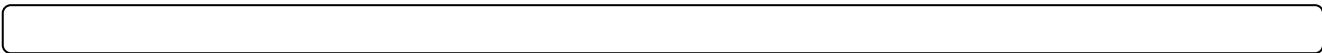
For Weak Applied Fields

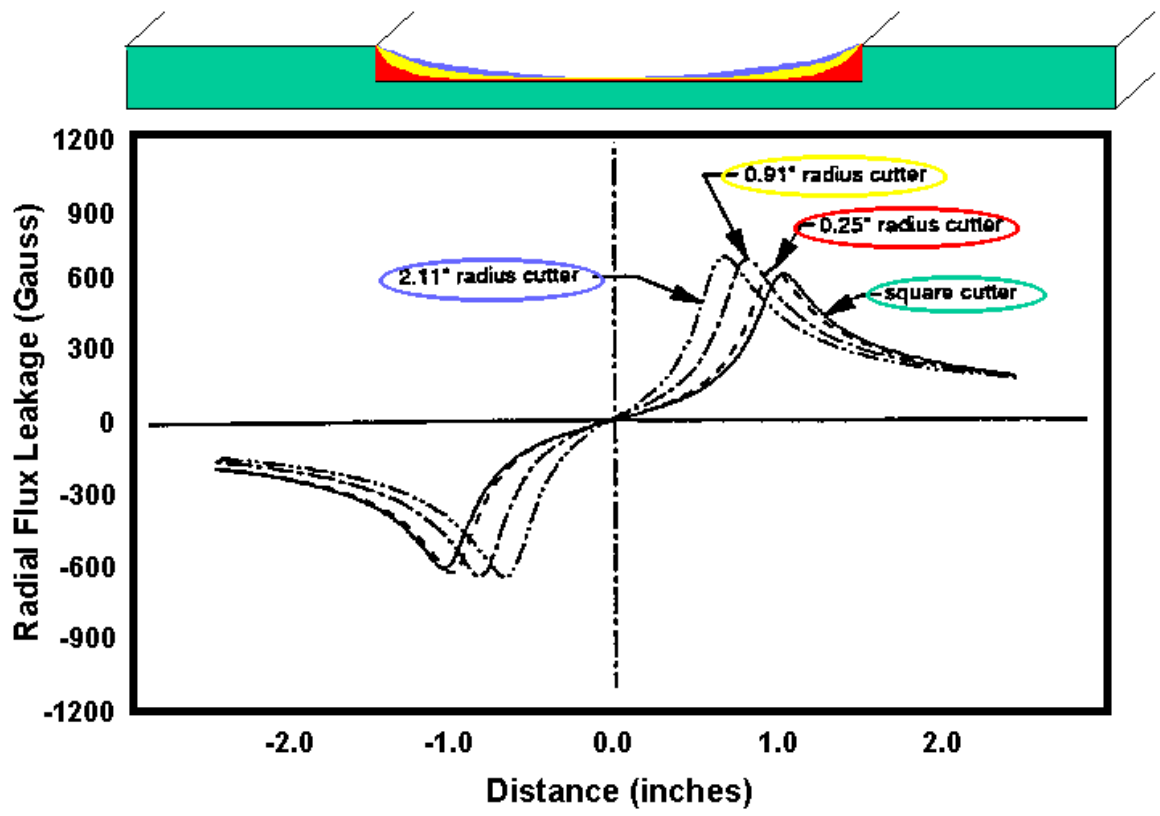
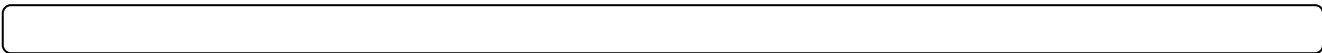


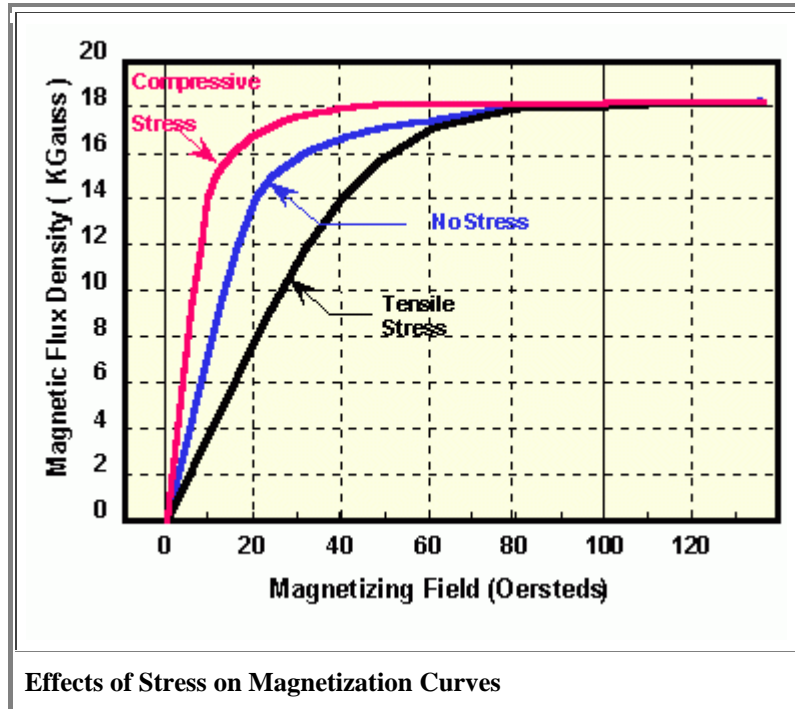
For lower applied field levels, the effect on flux density is greater. The above figure schematically illustrates these effects. For tools that operate at low or medium magnetization levels, remanent magnetization effects can be significant.





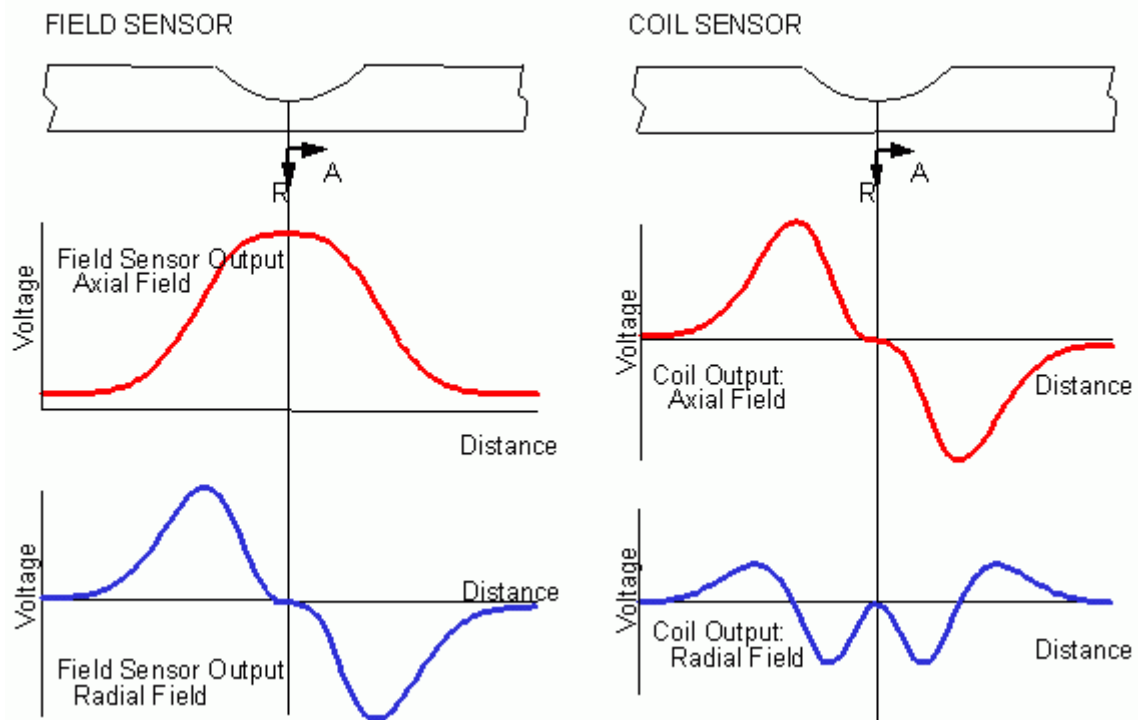






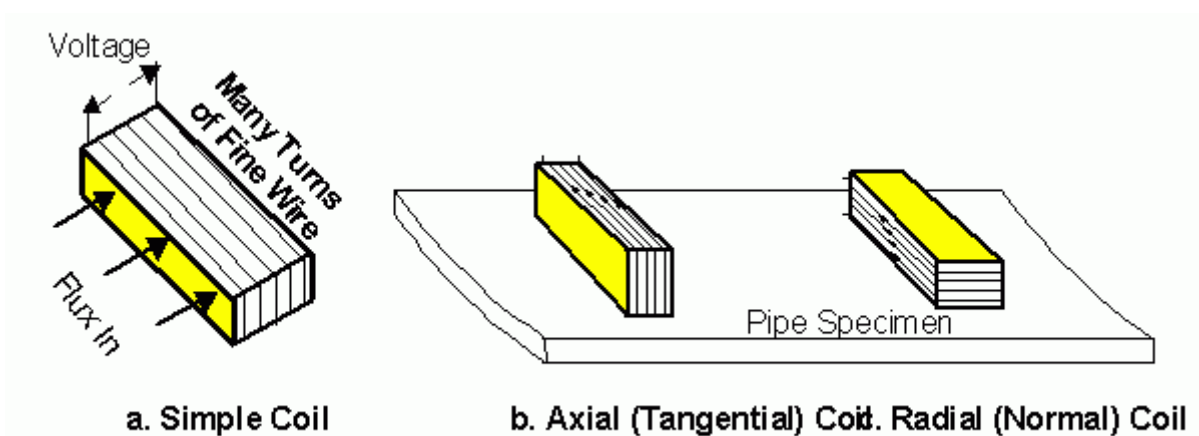
Sensor Type

Two sensor types, induction coils and magnetic field sensors, are commonly used to measure the magnetic field or flux density.



Induction Coils.

The most commonly used type of sensor on MFL tools is an induction coil. Induction coils incorporate several turns of fine wire



A changing magnetic field induces a voltage across the wire. Coils can have different orientations, as shown on the right of the above figure; each

orientation measures only one component of the magnetic field. Coils can take on many shapes and sizes and have many subtleties and strategies that enhance the performance in one way or another.

The output voltage V across the ends of the coil moving through a magnetic field is time rate of change of magnetic flux density \mathbf{B} across the coil. Coils have an aperture or area equal to \mathbf{A} . (Note the direction of \mathbf{A} is defined by its normal vector.) So, the output voltage of a coil can be written as:

$$V = d(\mathbf{B} \bullet \mathbf{A}) / dt$$

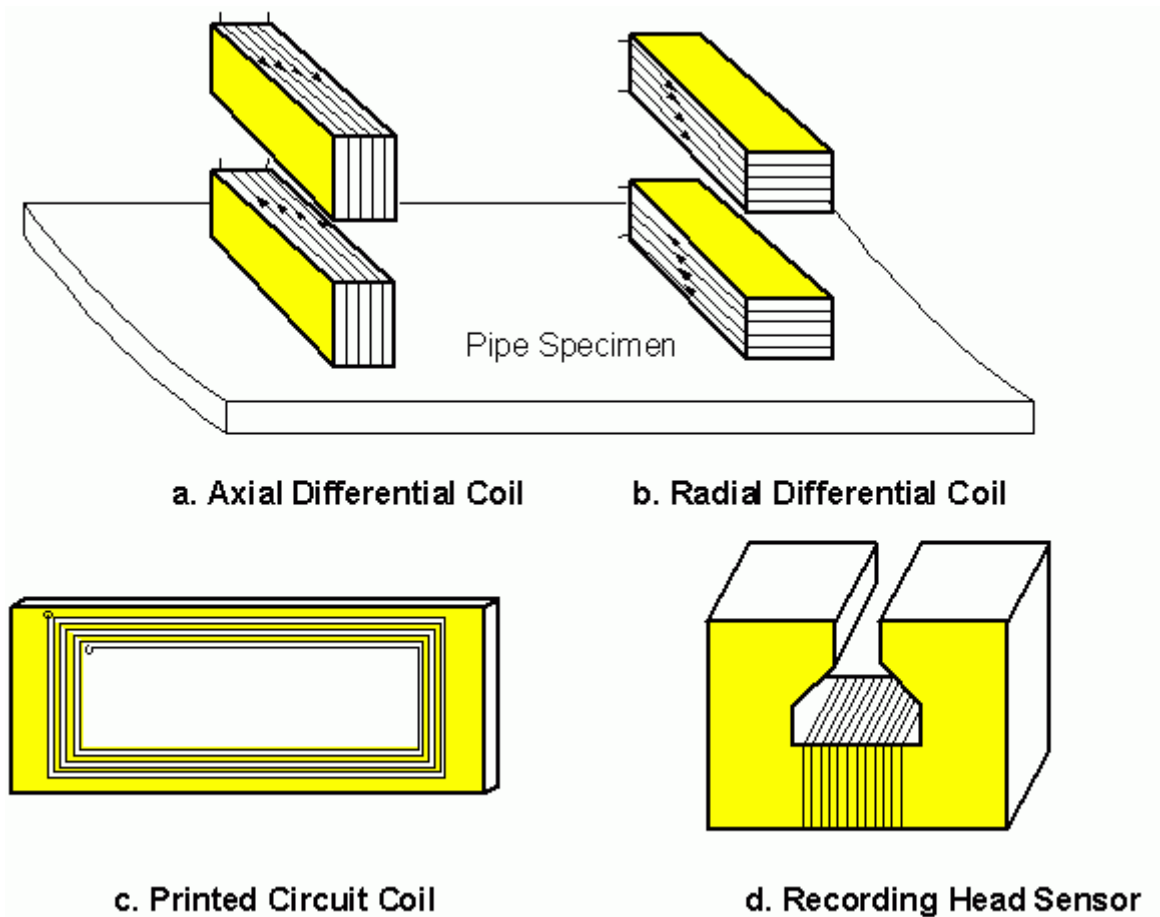
Coils are sensitive only to the flux that is perpendicular to their apertures. (To obtain the perpendicular component, the dot product (\bullet) is used between \mathbf{B} and \mathbf{A}). The flux density is constant in a region with no imperfections. Therefore, no voltage will be induced when no defect is present. When an imperfection causes flux to leak into the air, a voltage is induced because the flux density is changing.

The output voltage of an induction coil is directly proportional to tools speed, S , in the axial direction (dz/dt). So, the output voltage can be written as

$$V \propto d(\mathbf{B} \bullet \mathbf{A}) / dz$$

where dz is a change on distance along the pipe axis during the measurement. Therefore, the output voltage of an induction coil is directly proportional to tool speed, and the tool speed must be known to calculate the actual leakage field level.. So, accounting for velocity effects with coil sensors is difficult.

Other Coil Configurations. Coil sensors come in many shapes and sizes and have many subtleties and strategies that enhance performance in one way or another.



One of the most common strategies in coil design is the use of differential coils to reduce noise. One coil is placed near the pipe surface where a flux signal can be detected; this signal includes a certain amount of noise. A second coil is placed away from the pipe surface, where only noise is detected. By subtracting the output of the second coil (noise) from the output of the first coil (signal plus noise), only the flux leakage signal should remain. This subtraction can be easily performed by winding one coil clockwise and the other coil counterclockwise and wiring the coils in series. The noise signals never cancel out completely, but significant noise reductions can be made.

In coil construction, it is difficult to make two coils have the same output characteristics. But MFL inspection systems have many sensors (10 to 30 in conventional tools, and nearly 100 in some advanced tools). One method to fabricate duplicate coils is using printed circuit card technology as shown in (Item c above). Then each coil will have the same geometry and number of turns. The design of MFL sensors can benefit from other technologies. For example, variations of magnetic tape recording heads, (Item d above), can be used to measure the magnetic fields.

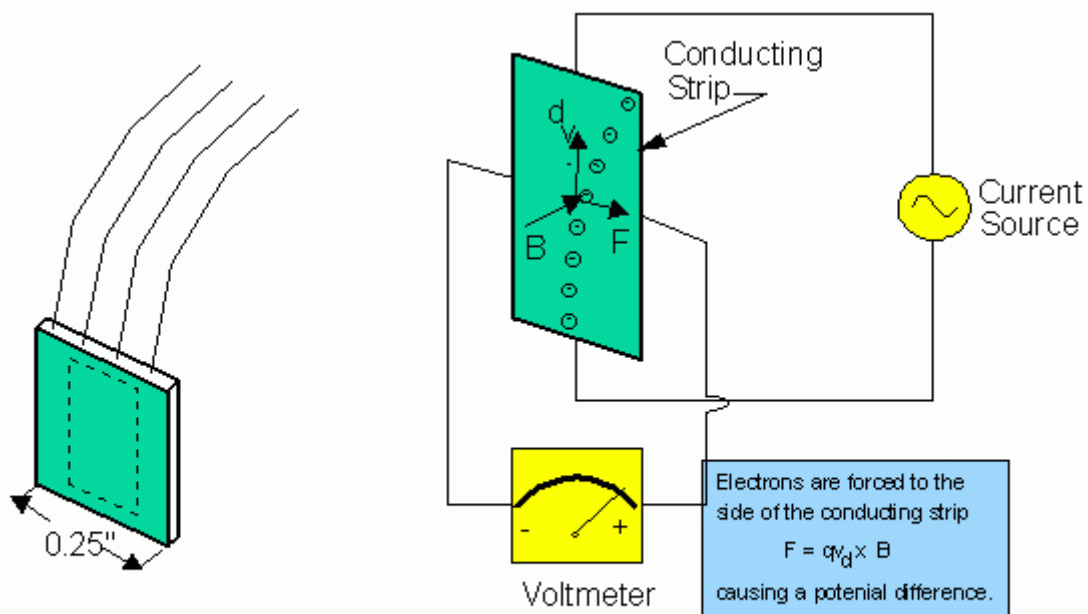
Other Coil Design Considerations. One other design consideration related to coils is the choice of a core material. The core of a sensor is the region inside of the wire coils. In some MFL sensors, a solid core is used to change the sensitivity of the sensor to flux leakage fields. Solid cores are generally more

sensitive to small leakage fields, but as a result, they are also more sensitive to noise variations.

Hall-Effect Sensors.

Many new MFL inspection systems use a magnetic field sensor. Unlike a coil sensor, a magnetic field sensor measures directly the magnetic field. The most common type is a Hall-effect sensor, which directly converts the magnetic field level to an output voltage. Since field and flux density are related by a constant in air, the output voltage of a Hall-element is directly proportional to the flux density.

The figure below shows a Hall-effect sensor. Typical Hall-effect sensors are relatively small, thin devices that are nominally 0.25 inches square and 0.03 inches thick, although devices exist that are twice as big and five times smaller. Hall-effect sensors, like coils, measure only one component of a magnetic field.



a. physical shape of a Hall effect sensor b. operation of a Hall element

Developments in other industries have helped the implementation of hall effect sensors. The most significant improvements are in the area of magnetic field sensors, with antilock braking system development improving Hall-effect sensor technology and reducing the price. In the past, Hall-effect sensors were fragile, needed additional circuitry for the supply current and amplification, were temperature sensitive, and had large variation in offset and gain. The Table below shows the development of Hall effect sensor to overcome these problems.

Problem	Solution	Company/ Model	Year	Cost, \$
Fragile leads	Kapton film leads	FW Bell	1991	15.00
Additional circuitry for current supply and amplification	Integrated into circuits and hall plate on a chip. These 3-pin devices need power and ground and provide an output proportional to flux.	Allegro 3501, 3503	1993	10.00
Temperature Drift	Integrated temperature compensation into circuit	Microswitch SS495, and Allegro 3507	1996	6.00
Offset and gain variation	Programmable Hall sensors to adjust sensitivity, offset, gain and temperature compensation. One additional pin (4th) for programming.	Melexis	1998	6.00 (est)

Hall-effect sensors require power to operate, on the order of tenth of a watt per sensor. This power drain is important for long distance inspection requirements. Hall-effect sensors are also temperature sensitive, with a drift in output voltage on the order of a tenth of a percent per degree Celsius (-0.06 percent/degree F). Operational temperatures for commercial sensors range from -76 F to 185 F. During a typical MFL inspection, though, the change in temperature is likely to be too small to significantly impact measurements. The bandwidth of these sensors exceeds 10 KHz. Therefore, the output is not a function of velocity for normal inspection speeds.

Like differential coils, differential field sensors can be used to reduce the effects of noise. In addition, other types of field sensors can directly measure the magnetic field. These devices are usually referred to as magnetometers and operate on a variety of principles. At least one in-line inspection system uses a proprietary magnetometer to measure magnetic field levels.

Sensors between the magnet pole pieces measure the flux leakage field. The purpose of sensor systems is to convert the flux leakage field into a signal that can be stored and analyzed. The sensor system consists of the sensors themselves, the mounting system used to support the sensors, wear plates between the sensors and the pipe, and cabling between the sensors.

The GRI MFL test bed vehicle has 48 sensor heads, 6 on each magnet bar. In each sensor head has four axial hall element sensors. This spacing is similar to commercial high resolution systems. To minimize noise, some amplification of the signal takes place very near the sensor. An example of an integrated Hall element is the SS495 Series, solid-state, ratiometric, linear sensors manufactured by Honeywell Micro Switch. These sensors operate on supply voltages ranging from 4.5 volts to 10.5 volts. Outputs are ratiometric, and are set by the supply voltage. The sensors measure a minimum of +/- 600 Gauss, and they include an amplifier integrated into the circuit

