

## پیگ و پیگرانی در خطوط لوله: چالش‌ها و پیشرفت‌ها

ایمان نبی‌پور\*، دانشجوی دکتری مهندسی نفت دانشگاه شیراز ■ محمدرضا ملایری، استاد تمام مهندسی شیمی دانشکده‌ی مهندسی شیمی و نفت و گاز دانشگاه شیراز

### چکیده

اصطلاح پیگرانی به منظور توصیف یک روش مکانیکی برای بازرسی خطوط لوله و حذف آلاینده‌ها و رسوبات درون لوله و یا زدودن مایعات تجمع‌یافته در قسمت‌های پایینی خطوط لوله‌ی انتقال در پستی و بلندی‌های زمین با استفاده از پیگ‌ها به کار می‌رود. همچنین به دلیل توانایی پیگ‌ها در حذف محصولات خوردگی از خط لوله، به عنوان یک عامل مثبت در کنترل خوردگی، عمل می‌کند. پیگ‌های به کار رفته در خط لوله با قطر داخلی لوله منطبق شده و دیواره‌ی لوله را همچنان که توسط سیالات جریانی به جلو رانده می‌شود، سایش داده و پاک می‌کند. این مقاله به مرور کلیات پیگ و عملیات پیگرانی خطوط لوله و جنبه‌های جدید فناوری‌های اخیر در این زمینه پرداخته است، از جمله: ضرورت، ظرفیت‌ها، چالش‌ها و تازه‌های فناوری پیگرانی در نگهداری و عملیات خطوط لوله‌ی انتقال نفت و گاز و سایر فرآورده‌های هیدروکربنی کشور، معرفی انواع پیگ‌های مورد استفاده، فاکتورهای انتخاب پیگ مناسب از لحاظ کاربرد، تمیزکاری، بازرسی و پایش خطوط لوله، مقایسه و کاربردهای پیگ‌های هوشمند و چگونگی کارکرد و ثبت مشکلات موجود در خطوط لوله، لخته‌زدایی و مطالعات شبیه‌سازی.

با جستجو در پیشینه‌ی انجام این فرآیند، ایده‌های جدید و بهینه‌سازی‌ها به همراه فهم کامل‌تر چگونگی کنترل، طراحی و اجرای فرآیند پیگرانی مورد بحث قرار گرفت. یک مطالعه‌ی موردی از تجربه‌ی میدانی در خطوط لوله‌ی یکی از میداين گازی جنوب کشور، مرور و مورد ارزیابی قرار گرفته و پیشرفت‌های حاصل شده به خواننده معرفی شده است. بدیهی است ظرفیت‌ها در این زمینه هنوز جذاب بوده و موردنیاز و علاقه‌ی پژوهشگران و صنعتگران در سال‌های پیش‌رو می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۹/۰۷/۰۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۹/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش داور: ۹۹/۱۱/۱۲

### واژگان کلیدی:

پیگ و پیگرانی، رسوب‌زدایی، بازرسی خطوط لوله، لخته‌زدایی، شبیه‌سازی عددی.

### مقدمه

لوله‌ی نفت و گاز در کشور، نیاز به نظارت دقیق به منظور تضمین تداوم انتقال جریان، بدیهی شمرده می‌شود.

از سوی دیگر، با توجه به اتمام عمر طراحی خطوط لوله‌ی قدیمی و بروز پدیده‌ی خوردگی و نشستی، نیاز به استفاده از روش‌های سریع و کارآمد همچون پیگرانی هوشمند در کنار سایر روش‌ها برای نظارت بر انتقال فرآورده‌های هیدروکربنی توسط خطوط لوله ضروری است. [۲] از طرفی، حرکت پیچیده‌ی پیگ‌ها به همراه شرایط مبهم درونی خط لوله، پیگرانی را یک فرآیند حساس ساخته و مشکلاتی نظیر گیر کردن پیگ و یا معیوب شدن آن در اثر لوازم و متعلقات خط لوله از جمله ریسک‌های همراه با این فرآیند هستند.

چگونگی بهره‌برداری از خطوط لوله و محافظت از آن بستگی بسیاری به عملیات پیگرانی و کارآیی پیگ‌های مورد استفاده دارد. در گذشته، پیگ‌ها تنها برای پاک‌سازی لوله از موم یا ضایعات و در نتیجه تسریع جریان سیال انتقالی در خط لوله مورد استفاده قرار می‌گرفت.

امروزه، سیستم پیگرانی در چرخه‌ی کامل حفظ خطوط لوله به کار گرفته می‌شود، بدین معنا که در مراحل ساخت، بهره‌برداری، بازرسی، حفظ و نگهداری، تعمیر، مرمت و نوسازی و در مدت تعطیلی خط لوله، پیگرانی یک ضرورت است. [۱]

ایران دارای ۱۴ هزار کیلومتر خط لوله‌ی نفت و بیش از ۴۰ هزار کیلومتر خط لوله‌ی گاز است. با توجه به سابقه‌ی وجود خطوط

\* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (i.Nabipour@shirazu.ac.ir)

از جمله راه‌حل‌های پیشگیری و مواجهه شدن با این مشکلات، طراحی پایه‌ای سیستم خط لوله است به گونه‌ای که قابل پیگرانی باشد و تمهیدات لازم برای پیگرانی ایمن در طراحی چنین سیستمی لحاظ شده باشد، از قبیل: دهانه‌ی کاملاً باز و هموار لوله‌ها و شیرآلات بین راه برای عبور پیگ، اتصالات برای ابزارهایی مانند فشارسنج‌ها، اتصال دهنده‌های هوا، سنسورهای پیگ و روش‌های مکان‌یابی، شیرهای اطمینان فشار، ایستگاه‌های پرتاب و دریافت پیگ و میزان خم مناسب لوله جهت عبور پیگ. (حداقل ۱,۵ برابر قطر لوله) [۳]

با توجه به اهمیت خوردگی و خوردگی در خطوط لوله و نقش مهم پیگرانی هوشمند در تشخیص آن، منظور از خوردگی این‌گونه بیان می‌شود که: پدیده‌ی خوردگی در خطوط لوله‌ی انتقال جریان، یک فرآیند الکتروشیمیایی بوده که منجر به کاهش راندمان انتقال جریان (به علت رسوب و تجمع مواد ناشی از خوردگی بدنه‌ی لوله) و طراحی خطوط لوله‌ی انتقال جریان در شرایط ناپایدار (به علت بروز پدیده‌ی نشتی) خواهد شد.

شایان ذکر است در شرایطی که سرعت حرکت جریان سیال درون خط لوله زیاد باشد، بدنه‌ی فلز خط لوله به علت وجود ذرات جامد و یا حباب‌های گاز معلق در محیط ساییده می‌شود که به اصطلاح این پدیده را ساییدگی می‌نامند.

در حالتی که اثر خوردگی محیط تشدید شود، اصطلاح خوردگی-ساییدگی به آن اطلاق می‌شود. این صدمات که همواره با ساییدگی مکانیکی قطعات خط لوله همراه هستند، معمولاً شدید و سریع انجام می‌شوند. در این حالت ذرات فلز یا به صورت یون‌های محلول در آمده و یا با ایجاد محصولات خوردگی جامد از سطح بدنه‌ی فلز خط لوله، جدا می‌شوند.

خوردگی به طور کلی با فشار و دما افزایش می‌یابد و سرعت بالاتر و نیز مخلوط شدن بهتر، نیز خوردگی را افزایش می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که سایش می‌تواند هم‌زمان با خوردگی و توام با یکدیگر برای تولید یک اثر، در مقایسه با عملکرد هر یک به طور مجزا بدتر عمل کند.

این امر به این دلیل است که رسوب کربناته‌ی آهن<sup>۱</sup> و یا لایه‌ی پوششی مواد بازدارنده‌ی خوردگی<sup>۲</sup> که به طور معمول فرآیند خوردگی را کند می‌کنند، نسبت به خود فلز لوله، مقاومت پوششی کمتری داشته و تمایل به از بین رفتن آسان‌تری توسط ساییدگی دارند و باعث شتاب یافتن فرآیند خوردگی می‌شوند. [۴] در نتیجه، مطالعه و سنجیدن جوانب مختلف فرآیند پیگرانی و پیش‌بینی

حرکت پیگ به منظور تخمین سرعت آن، موقعیت و فشار محرکه‌ی مورد لزوم، قبل از پیگرانی، از اهمیت خاصی برخوردار است. [۵] در خطوط لوله‌ی انتقال گاز و مایعات و فرآورده‌های نفتی علاوه بر نفت‌خام که رسوب و ته‌نشینی واکس‌ها و موم در جداره‌ی داخلی لوله معضل بزرگی در افت راندمان و بهره‌برداری ایجاد می‌کند، سایر فرآورده‌های نفتی و گاز نیز علی‌رغم تصفیه و پالایش به علت وجود و باقی ماندن عوامل آلوده به گازهای دی‌اکسیدکربن، هیدروژن سولفور، رطوبت و ایجاد اسیدهای خوردنده به ویژه در خطوط لوله‌ی انتقال گاز و ته‌نشینی شن و ماسه و رسوبات ناخواسته‌ی ناشی از مواد زائد در جداره‌ی درونی لوله‌ها گاهی مجرای درونی لوله را به حدی تنگ می‌کند که موجب افت راندمان شده و برای انتقال حجم معینی از فرآورده، صرف انرژی فوق‌العاده برای تقویت فشار گازها و سیالات و فرآورده‌های نفتی را طلب می‌کند.

لذا یکی از روش‌های تعمیرات و نگهداری که معضلات و مشکلات گفته شده را کاهش داده و علاوه بر دوام و افزایش طول عمر لوله، موجب افزایش بهره‌دهی و راندمان خطوط لوله و تضمین‌کننده‌ی ایمنی جوامع و صنایع همجوار و همچنین حفظ محیط‌زیست می‌شود، کاربرد پیگرانی در شبکه‌های خطوط لوله‌ی جریانی، متناسب با نوع سیال و فرآورده‌ی انتقالی به طور دوره‌ای و زمان‌بندی شده، است. [۶]

در انتقال این سیالات دو یا چندفازی با پدیده‌ی لغزش سیالات مواجه هستیم. لغزش در اصلاح جریان دوفازی به عقب‌ماندگی و یا کندی سرعت حرکت فاز مایع نسبت به فاز گاز اطلاق می‌شود. مفهوم جریان دوفازی بدون لغزش هنگامی به کار می‌رود که در تمام نقاط سطح مقطع لوله، فازهای مایع و گاز با سرعت یکسان حرکت کرده و هیچ کندی و عقب‌ماندگی بین آنها وجود نداشته باشد.

عوامل پیش‌رو در ایجاد لغزش بین فازهای موجود درون خطوط لوله‌ی انتقال جریان‌های دوفازی موثر هستند:

**الف) مقاومت حاصل از اصطکاک در مقابل جریان یافتن و یا افت انرژی برگشت‌ناپذیر در جهت جریان برای فاز گاز نسبت به فاز مایع به مراتب کمتر بوده و باعث می‌شود در جریان دوفازی، فاز گاز انتقال‌پذیری بیشتری نسبت به فاز مایع، حتی در غیاب اثرات نیروی شناوری قوی داشته باشد.**

**ب) اختلاف زیاد بین تراکم‌پذیری‌های فاز گاز و مایع باعث می‌شود که فاز گاز، منبسط شده و در سرعت‌های بالاتری حرکت کرده و بر روی فاز مایع بلغزد. این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که فشار سیال**

## ۲- پیگ

منشا کلمه‌ی پیگ (که ترجمه‌ی فارسی آن خوک است) در ابتدا از ایالات متحده آغاز شده است. اما دلیل انتخاب این کلمه به نحو رضایت‌بخشی توضیح داده نشده است.

تئوری‌های متعددی وجود دارد اما مورد قبول‌ترین توضیح این است که صدای خزیدنی که پیگ‌های اولیه حین عبور از خط لوله ایجاد می‌کردند، به همراه برس‌ها و ظاهر آنها هنگامی که پوشیده شده از نفت خام از لوله بیرون آورده می‌شدند، در بسیاری از جهات شبیه خوک‌های مزارع بودند. [۳]

از نظر برخی نویسندگان پیشنهاد اینکه پیگ (PIG) اختصار سرنامی برای ابزار سنجش بازرسی خط لوله<sup>۴</sup> باشد، غیرمحمول به نظر می‌رسد چراکه معتقدند این کلمه بسیار قبل‌تر از اینکه بازرسی، یک عامل قابل توجه باشد، مورد استفاده قرار می‌گرفته است، اما از طرف دیگر با توجه به منشا این نامگذاری، بعدها این سرنام حروف نیز جهت ملموس‌تر شدن معنا به آن نسبت داده شد. بنابراین در برخی متون علمی، پیگ را چنین تعریف کرده‌اند: از کلمه‌ی انگلیسی PIG که سرنام Pipeline Inspection Gauge و یا در برخی متون Pipeline Intervention Gadget است وسیله‌ای است مورد استفاده در لوله‌های انتقال سیالات از جمله لوله‌های آب، فاضلاب، انتقال نفت و گاز. به استفاده از پیگ در داخل لوله‌ها، «پیگرانی» گفته می‌شود. پیگ‌های معمولی دارای دیسک‌ها و برس‌هایی هستند که دیواره‌ی داخلی لوله را تمیز می‌کنند.

پیگ‌های عملیاتی<sup>۵</sup>، دارای اندازه‌های مختلف و تعداد سرها<sup>۶</sup> و تعداد برس‌های مختلف هستند که انتخاب آنها برای کاربردهای مختلف، متفاوت است.

## ۳- توپک‌ها<sup>۷</sup>

توپک‌ها یکی از انواع پیگ‌ها هستند که گاهی به غلط، به تمام انواع پیگ، توپک گفته می‌شود. توپکرانی<sup>۸</sup> نیز راندن توپک در خط لوله است که یکی از انواع پیگرانی است. [۷]

## ۴- انواع پیگ‌ها از لحاظ کاربرد

به عنوان یک قانون، اکثر پیگ‌ها از هر نوعی، یک طول طراحی شده‌ی استاندارد به نسبت ۱٫۵ برابر قطر خارجی لوله دارند. به عنوان مثال، پیگی با قطر ۲۴ اینچ، طولی معادل ۳۶ اینچ دارد. به این دلیل است که خم‌های زانویی با قطر کمتر از ۱٫۵ برابر

در جهت جریان کاهش یابد.

لغزش بین فازهای مایع و گاز به وسیله‌ی اختلاف در نیروهای شناوری عمل‌کننده‌ی روی آن فازها، ترویج داده می‌شود، به طوری که در یک مایع واسطه‌ی ساکن، فاز سبک‌تر تمایل به بالا آمدن با سرعتی متناسب با اختلاف جرم‌های ویژه‌ی دوفاز دارد. بعضی کمیت‌ها در جریان دوفازی، می‌توانند در اثر اختلاف سرعت بین دوفاز، پسماند<sup>۹</sup> یا عقب‌ماندگی داشته باشند که در حالت کلی تابعی نقطه‌ای هستند، به عنوان مثال، پسماند مایع به صورت نسبت حجمی قسمتی از لوله که توسط مایع اشغال شده است به حجم همان قسمت از لوله (شامل حجم مایع و گاز) تعریف می‌شود. به

$$H_l = \frac{\text{حجم قسمتی از لوله که توسط مایع اشغال شده است}}{\text{حجم کل همان قسمت از لوله}} \quad \text{عبارت دیگر: رابطه‌ی (۱)}$$

و به طور مشابه پسماند گاز به این صورت تعریف می‌شود:

$$H_g = \frac{\text{حجم قسمتی از لوله که توسط گاز اشغال شده است}}{\text{حجم کل همان قسمت از لوله}} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

در خطوط لوله‌ی جریان دوفازی، مقدار پسماند مایع، عددی بین صفر، هنگامی که تمام سطح مقطع خط لوله را گاز اشغال کرده باشد (بیشترین پسماند گاز) و یک، هنگامی که تمام سطح مقطع لوله را مایع اشغال کند (بیشترین پسماند مایع)، است.

مطابق تعریف گفته شده، با ظهور فاز گاز در مایع در جریان دوفازی، بسته به نوع رژیم جریان، هر چه از جریان حبابی به سمت جریان حلقوی نزدیک‌تر می‌شویم، میزان پسماند گاز افزایش می‌یابد. (در جریان افقی که فاز مایع بیشتر در قسمت پایین و فاز گاز در قسمت بالای لوله در حرکت است و در جریان عمودی که تجمع گازهای آزاد شده بیشتر در وسط لوله و فاز مایع در دیواره‌های لوله می‌باشد). در این مقاله، پس از معرفی اولیه‌ی پیگ و عملیات پیگرانی، به شناخت و تقسیم‌بندی انواع پیگ‌ها از لحاظ کاربرد و فاکتورهای انتخاب پیگ مناسب پرداخته شده است.

همچنین مطالعات انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی رفتار اصطکاکی پیگ و سرعت آن، پیگرانی در خطوط لوله با قطر متغیر و همچنین تجربیات میدانی، به طور خلاصه در چندین بخش مجزا مرور شد.

سپس چالش‌ها و تازه‌های فناوری پیگرانی هوشمند در نگهداری و عملیات خطوط لوله‌ی انتقال نفت و گاز و سایر محصولات صنایع و همچنین مقایسه و کاربردهای پیگ‌های هوشمند و چگونگی کارکرد و ثبت مشکلات موجود در خطوط لوله بیان می‌شود. در پایان، یک تجربه‌ی میدانی بالادستی پیگرانی هوشمند در یکی از میدانی گازی کشور، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

### ۳-۴- پیگ محور فولادی

پیگ‌های بدنه فولادی، سخت‌ترین نوع ساخته شده توسط هر سازنده‌ای. پیکربندی بدنه فولادی قابلیت طراحی‌های چندگانه برای کاربردهای چندگانه را دارا می‌باشد. [۸]

### ۵- انتخاب پیگ

انتخاب پیگ به فاکتورهای متعددی بستگی دارد، از قبیل: نوع خط لوله، جنس، طول و نوع سیال (خلوص مواد در حال انتقال)، محیط رانش و عملکردی که به منظور آن طراحی شده است، به علاوه مشخصه‌ی خط لوله که شامل: ۱- کمترین و بیشترین قطر داخلی خط، ۲- بیشترین مسافتی که پیگ بایستی طی کند و ۳- کمترین شعاع خم و زوایای خم. سایر ویژگی‌ها نظیر: انواع شیرآلات، اتصالات انشعاب از خط اصلی و پروفایل ارتفاع خط هستند. عملکرد پیگ متضمن نوع پیگ انتخابی است. عملکردهای متفاوتی از پیگ‌ها وجود دارند از قبیل جداسازی سیال، جابجایی و تمیزسازی و بازرسی و پایش داخلی. [۹]

### ۱-۵- جدایش سیالات

پیگ‌ها می‌توانند به عنوان یک مانع جامد بین سیالات مختلف به کار روند. برای جداسازی سیالات غیرمشابه مانند رتبه‌های مختلف بنزین، انواع سوخت‌ها، گازهای مایع و موارد مشابه در خطوط لوله‌ی چندمنظوره از این نوع پیگ‌ها استفاده می‌شود. همچنین این پیگ‌ها جهت جابجا کردن مایعات و جامدات نرم مانند واکس‌ها و پارافین‌ها از خطوط لوله‌ی نفت و گاز یا حذف گاز مایع و آب مازاد از خطوط لوله‌ی گاز نیز کاربرد دارند. به وسیله‌ی این ویژگی، پیگ می‌تواند در یک مسیر پستی و بلندی برای انتقال لخته‌ی سیالات مختلف و یا مواد شیمیایی استفاده شود. این ویژگی در شکل ۱ نمایش داده شده است. در این شکل پیگ‌های جداکننده‌ی سیال، لخته‌ی آب شیرین، لخته‌ی گلایکل و گاز نیتروژن را جدا کرده و مانع از مخلوط شدن آنها با یکدیگر می‌شوند. [۹]

توزیع مواد ضد خوردگی و رنگ‌آمیزی داخلی خطوط لوله از دیگر قابلیت‌های پیگ‌های جداکننده است. ساختمان این پیگ‌ها از یک بدنه‌ی فلزی و تعداد ۲ تا ۴ کلاهک و یا صفحات لاستیکی ساخته می‌شود. اگر پیگ‌ها کلاهک ساییده داشته باشند، از نقطه‌نظر رانش در خط لوله، یک جهته و چنانچه فقط به صفحات لاستیکی مجهز باشند، دو جهته هستند. [۱۰]

قطر لوله مهم است. اگر خط لوله دارای خم زانویی با قطری کمتر از ۱,۵ برابر قطر لوله باشد و هدف، تلاش برای قابل پیگردانی کردن خط جهت عبور ابزارهای بازرسی به درون خط باشد، آنگاه ملاحظات جهت جایگزین کردن آن با زانویی با قطر بزرگ‌تر موردنیاز است.

البته اگر فقط نیاز برای جاروب خط باشد، آنگاه پیگ‌های چندگانه و برخی پیگ‌های تک‌بدنه می‌تواند در زانوهای با قطر کمتر از ۱,۵ برابر قطر لوله حرکت کند.

انواع پیگ‌ها دارای ۳ نوع طراحی اساسی کلی هستند: پلی‌فوم<sup>۱</sup>، یورتان تک‌بدنه و محور فولادی<sup>۱۰</sup>.

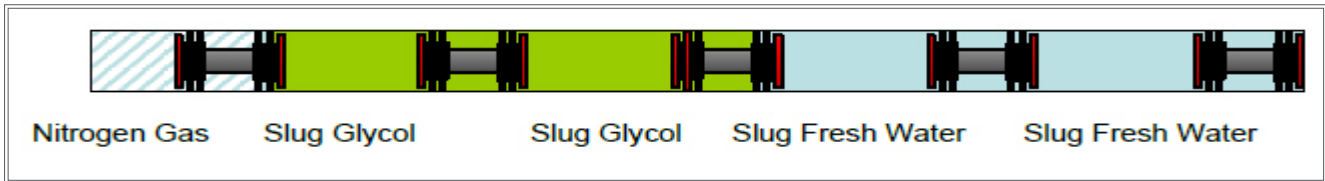
### ۱-۴- نوع پلی‌فوم

پیگ‌های پلی‌فوم کمترین سختی را در خانواده‌ی طراحی پیگ دارند. آنها برای آب‌بندی عالی و برای خراش، سایندگی و رسوب‌زدایی سبک هستند و می‌توانند در قطرهایی تا تقریباً ۳۵ درصد قطر لوله کاهش یابند. طول آنها می‌تواند برای قابلیت مانورپذیری در عبور از سه راهی‌های بزرگ، برخی شیرآلات دورانی با طراحی قدیمی‌تر و دیگر انواع شیر دروازه‌ای افزایش یابد.

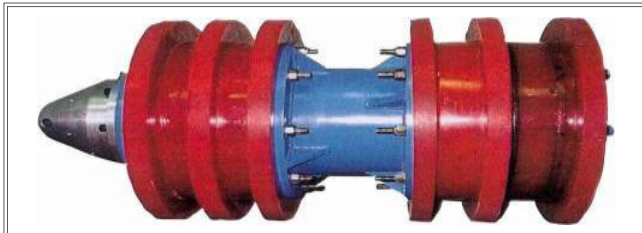
برس‌های سیمی، طناب کشیدن دماغه، محل فرستنده و مجراهای جت شدن می‌تواند در هر دانسیته و نوع پیگ‌های پلی‌فوم تعبیه شود.

### ۲-۴- پیگ تک‌بدنه

پیگ‌های معروف تک‌بدنه‌ی ریخته‌گری شده‌ی پلی‌یورتان که سخت‌تر از پیگ‌های پلی‌فوم و نرم‌تر از نوع بدنه‌ی فولادی طراحی شده‌اند. این پیگ‌ها برای حذف لخته‌ی مایعات از سیستم‌های گاز مرطوب و خطوط لوله‌ی مایع موثر بوده و کمک به کنترل تجمع پارافین در خطوط نفت‌خام، جداسازی محصولات پالایش شده، راه‌اندازی خطوط لوله و تخلیه‌ی محصول می‌کنند. طراحی تک‌بدنه همچنین می‌تواند در خم‌ها و زانویی‌هایی با قطر کمتر از ۱,۵ برابر قطر لوله مانور دهد و محدود به یک پیکربندی با دیسک‌های چندگانه و کاپ نیست. دیسک چندگانه در یک نوع دماغه‌ی مقعر گلوله‌شکل و یا نوع دو جهته می‌تواند با برس‌های سیمی ضمیمه شده به آن در طول دیگر پیکربندی‌های مورد اشاره، طراحی و اضافه شود.



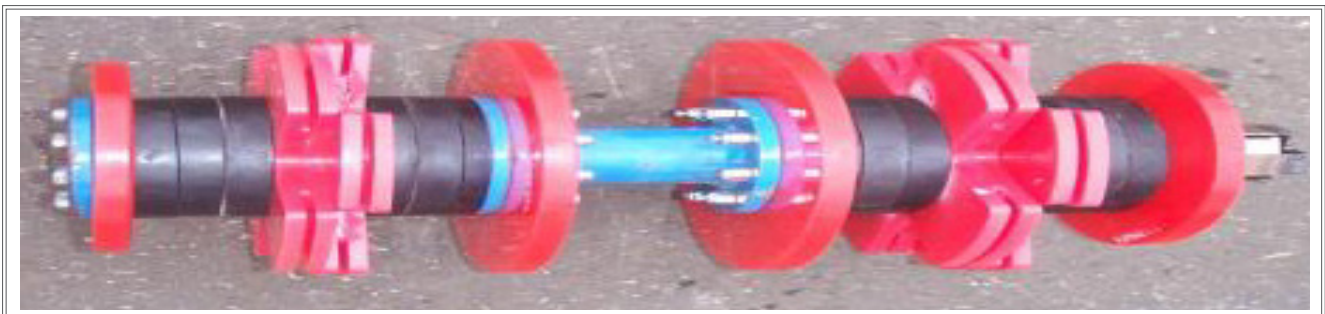
شکل ۱ | پیگ جداکننده سیال



شکل ۳ | پیگ با جریان جتی



شکل ۲ | نمونه‌ای از پیگ تمیزکننده



شکل ۴ | پیگ اندازه‌ی دوگانه با قطر ۸ در ۱۰ اینچ

بزرگ‌تری از خورده‌ها و باقی‌مانده‌ها را در عین حال با رانش‌های کمتر پیگ، حذف می‌کند. تمیزسازی مایع طبق تعریف به معنای استفاده از پاک‌کننده‌های مایع مخلوط شده با یک رقیق‌ساز (آب، گازوئیل، متانول و غیره) جهت شکل‌گیری یک محلول پاک‌کننده است که توسط پیگ‌های مکانیکی به درون خط لوله فرستاده می‌شود. بیشتر شرکت‌های تمیزکننده از یک حجم محاسبه شده از مایع برای پوشش دیواره‌های داخلی لوله با یک قطر و طول معین با استفاده از ۱۰ تا ۲۰ درصد از حجم به عنوان تمیزکننده‌ی خط لوله استفاده می‌کنند. انتخاب دقیق تمیزکننده‌های طراحی شده بایستی بر اساس این شاخص‌ها باشد:

- ۱- pH خنثی
- ۲- قابلیت‌های پخش شدن و نفوذ کردن
- ۳- پارامترهای طراحی اصلی تمیزکننده
- ۴- تاریخچه‌ی استفاده‌های قبلی [۸]

## ۲-۵- تمیزکاری و رسوب‌زدایی

خطوط لوله می‌بایست به منظور بهبود و افزایش نرخ جریان و کنترل خوردگی در فواصل مختلف زمانی تمیز شوند. رسوب‌زدایی و تمیزکاری از طریق المان آب‌بندی پیگ و نیز جهت جریان سیال میسر می‌شود. این عمل با استفاده از برس‌ها، خراشنده‌ها و یا دیگر ابزارهایی از این قبیل، بر روی پیگ افزایش می‌یابد. (مانند شکل ۲) در برخی موارد جهت جمع‌آوری خورده‌های آهن از خط لوله، آهنربا اضافه می‌شود. این قابلیت مختص پیگ‌های معمولی با هدف پاک‌سازی خط از زائدات و خرده‌های آهن است. پیگ‌های هوشمند با هدفی غیر از تمیزکاری و به منظور بازرسی و عیب‌یابی خطوط رانده می‌شوند و در صورت نصب آهنربا بر روی آنها کاربرد دیگری دارند که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. [۹]

۱-۲-۵- تمیزسازی مایع با تمیزکننده‌های پایه‌ی سورفکتانت  
تمیزسازی مایع به دنبال استفاده از پیگ‌های مکانیکی، حجم

۲-۲-۵- پیگ با جریان جتی<sup>۱۱</sup>

از پیشرفت‌های جدید فناوری پیگرانی، سیستم پیگ جریان جتی است که در حذف واکس رسوب کرده بر دیواره‌ی داخلی خطوط لوله کاربرد دارد.

زدودن واکس به وسیله‌ی استفاده از یک توالی از اسید هیدروکلریک در جلوی پیگ و آمونیاک بدون آب در پشت پیگ و یک لخته‌ی دیگر از زایلین به دنبال آن جهت خنثی کردن اثرات خوردگی و جلوگیری از تشکیل کریستال انجام می‌شود.

به جز پیگ جریان جتی که جداکننده‌ی اسید کلریک و آمونیاک است، مابقی سلسله مواد گفته شده توسط پیگ‌های جداکننده حمل می‌شوند. زمانی که حرکت پیگ در اثر واکس تجمع‌یافته در جلوی آن با مانع مواجه شد، فشار در جلوی پیگ افزایش یافته و باز شدن شیری در درون پیگ، اجازه می‌دهد که آمونیاک از طریق سوراخ‌های تعبیه شده بر دماغه‌ی مخروطی پیگ، به صورت جت به درون اسید موجود در دیواره‌ی لوله پرتاب شود.

محصولات واکنش حرارتی ناشی از مخلوط شدن دو ماده‌ی شیمیایی، واکس را ذوب کرده و جریان حاصل، ذرات واکس را به صورت معلق نگه می‌دارد. بقایای مواد شیمیایی در پایان عملیات، نیتروژن و آب نمک خواهد بود که به راحتی قابل دفع شدن هستند. (شکل ۳) [۱۱]

## ۳-۵- پیگ‌هایی با قطر متغیر

در بعضی از خطوط لوله به دلیل افزایش و یا کاهش حجم مواد جاری در لوله و یا به دلایل فنی دیگری طراحان خط مجبور به تغییر قطر لوله می‌شوند، چنانچه این تغییر قطر به اندازه‌ی یک سایز باشد (۲ اینچ) به این خطوط اصطلاحاً اندازه دوگانه<sup>۱۲</sup> می‌گویند و اگر این تغییر بیش از یک سایز باشد به آن پیگ‌های با اندازه‌ی قطر چندگانه<sup>۱۳</sup> گفته می‌شود.

این پیگ‌ها که با ترکیبی از دیسک‌ها یا کاپ‌های پروانه‌ای برش‌دار به صورت همپوشان جهت تامین آب‌بندی مناسب در سایز بزرگ‌تر و نیز دیسک‌ها و کاپ‌های استاندارد برای سایز کوچک‌تر خط طراحی می‌شود. (شکل ۴) [۱۲]

## ۴-۵- پیگ هوشمند

خدمات بازرسی درون خطی<sup>۱۴</sup> (به اختصار IILI) از پیگ‌های هوشمند<sup>۱۵</sup> یا ابزار IILI برای فراهم کردن اطلاعات در مورد خط

لوله یا محتویات آن استفاده می‌کند. اکثر این ابزارها هر دوی میزان و محل موارد غیرعادی یا ویژگی‌هایی که این پیگ‌ها برای آشکار کردن آنها طراحی شده‌اند را اندازه‌گیری می‌کنند. پیگ‌های هوشمند برای جمع‌آوری داده‌هایی که معمولاً بعداً به وسیله‌ی مهندسان فراهم‌کننده و تکنسین‌ها تحلیل می‌شود، برای تشخیص و گزارش شرایط خط لوله استفاده می‌شود.

این ابزار امروزه بیشتر اطلاعات موردنیاز برای اکثر نیازهای بازرسی و عیب‌یابی را فراهم می‌کنند. دو مورد از رایج‌ترین موارد عبارتند از: از دست دادن فلز (که شامل خوردگی است) و اندازه‌گیری هندسه. (که شامل آسیب فیزیکی می‌باشد)

خدمات دیگری که در دسترس است شامل موارد زیر می‌باشد:

- تشخیص ترک خوردگی
- نقشه‌برداری یا پایش پروفایل
- تشخیص نشتی
- اندازه‌گیری خمش
- بازرسی ویدئویی
- نمونه‌گیری از محصول
- اندازه‌گیری رسوب واکس

در برخی موارد این ابزارها را می‌توان ترکیب کرد و اطلاعاتی در ارتباط با دو یا چندین ناحیه‌ی موردنظر در یک رانش پیگ فراهم کرد. [۳]

از سال‌های ۸۰-۱۹۷۹ فناوری پیگ‌های بازرسی مورد بررسی قرار گرفته است و آزمایش‌های مختلف و بررسی نتایج آن باعث شهرت روزافزون این پیگ‌ها شده است. در سال ۱۹۸۱، اولین بازرسی توسط پیگی به نام لینالاگ<sup>۱۶</sup> در خط لوله‌ی گاز در بندر فریگ<sup>۱۷</sup> انجام شد. این عملیات در شش مرحله انجام شد که در چهار مرحله کل خط لوله و در دو مرحله نیز بازرسی دوباره‌ی خط لوله انجام شد. در طول بازرسی اولیه‌ی خط، مشکلات موجود نشان می‌داد که نیاز به تحقیقات بیشتری برای رسیدن به نتیجه‌ی مطلوب وجود دارد. اگرچه موارد بسیاری از خرابی نیز گزارش شد که در مرحله‌ی دوم همگی بازرنگری و تایید شدند.

به طور کلی نتایج زیر از این بازرسی حاصل شد:

۱- بعضی موارد نقص‌هایی که در مرحله‌ی اولیه نشان داده شده بود، در مرحله‌ی بعدی گزارش نشد.

۲- دقت شناسایی به اندازه‌ای خوب نبود که بتوان به آن اعتماد کرد و پیگ لینالاگ تنها قابلیت شناسایی عیوب تا ۵۰ درصد را داشت.

هوشمند نقش مهمی ایفا می‌کنند. [۳]  
پیگ هوشمند<sup>۲۱</sup>، به عنوان تنها وسیله برای حمل ابزارهای آزمون غیرمخرب، پیگی است که وظیفه‌ی جمع‌آوری اطلاعات مختلفی را جمع به مسیر حرکت خود را بر عهده دارد. این دستگاه با دارا بودن بشقاب‌هایی از جنس پلیمر در داخل لوله قرار می‌گیرد و سطح مقطع لوله را مسدود کرده و فشار گاز یا سیال پشت پیگ، آن را به جلو می‌راند.

بدین ترتیب پیگ مسافت خط لوله را طی می‌کند. در طول مسیر، پیگ به جمع‌آوری و ذخیره‌سازی اطلاعات از وضعیت درونی لوله می‌پردازد. پس از اتمام عملیات، اطلاعات از حافظه‌ی پیگ به رایانه منتقل و تحلیل می‌شود.

با تفسیر این اطلاعات می‌توان دریافت که خط لوله در چه نقاطی دارای چه نوع معیبه‌ی است تا جهت بر طرف کردن آنها برنامه‌ریزی‌های لازم انجام شود.

پیگ‌های هوشمند دستگاه‌های بسیار پیچیده، دقیق و گران‌قیمتی هستند، از این‌رو جهت جلوگیری از آسیب‌دیدگی آنها و نیز ضبط و ثبت اطلاعات صحیح و دقیق حتماً ابتدا خط لوله به وسیله‌ی پیگ‌های معمولی تمیزکاری شده، سپس اقدام به راندن پیگ هوشمند می‌شود. [۷]

نشستی شار مغناطیسی (MFL) و مافوق صوت<sup>۲۱</sup> دو روش نظارت بر بدنه‌ی لوله هستند. همچنین پیگ‌های کالیپر<sup>۲۲</sup>، قابلیت اندازه‌گیری کروی بودن لوله برای پیدا کردن شکست‌ها و تغییر شکل‌ها و به طور کلی ضبط اطلاعات هندسی لوله را دارند. [۱۳]

به وسیله‌ی روش‌های بالا می‌توان مکان عیوب، نوع و اندازه‌ی آنها را تعیین کرد و با حفاری محل عیوب ایجاد شده به رفع آنها پرداخت. همچنین به وسیله‌ی ایجاد نقشه‌ی عیوب می‌توان ایجاد نشستی‌ها و عیوب را پیش‌بینی کرد.

در سال ۱۹۸۷، شرکت Total Oil Marine plc نسل جدیدی از پیگ‌های هوشمند به نام‌های British Gas نسل دوم از نوع پیگ مغناطیسی و Pipetronix از نوع ماوراءصوت را به بازار عرضه کرد.

هر دو نوع پیگ دارای دقت اندازه‌گیری بالایی بودند و قابلیت عبور و شناسایی درز جوش را نیز داشتند ولی زمانی که پیگ ماوراءصوتی را در داخل خط لوله‌ی گاز فریگ فرستادند، با مسئله‌ی جدیدی روبرو شدند. پیگ ماوراءصوتی برای عملکرد خود نیازمند یک محیط مایع به عنوان محیط واسط است.

هرگونه حباب گاز در این مایع می‌تواند اتصال پیگ ماوراءصوتی را از دیواره‌ی خط لوله قطع کرده و در نتیجه صحت نتایج را مورد تهدید قرار دهد، بنابراین برای خط لوله‌ی فریگ همان پیگ British Gas ارسال شد.

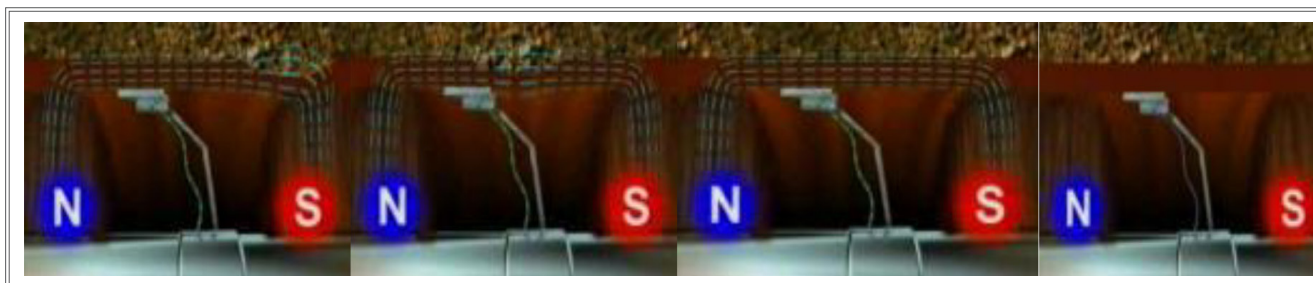
امروزه شرکت‌هایی چون Rosen، Total Pipeline Integrity (PII) و Platypus که از تولیدکننده‌های بزرگ پیگ‌های هوشمند با دقت بالا هستند، عموماً از فناوری نشستی شار مغناطیسی استفاده می‌کنند. انجمن پژوهش گاز (GRI<sup>۱۸</sup>) که در ایالات متحده‌ی آمریکا قرار دارد، دو استاندارد برای پیگرانی تصویب کرده است که عبارتند از: GRI۹۱/۰۳۶۵ برای بازرسی داخلی خطوط لوله‌ی گاز طبیعی و GRI۹۱/۰۳۶۷ که در واقع برای کاربرد نشستی شار مغناطیسی (MFL<sup>۱۹</sup>) در خطوط لوله‌ی گاز طبیعی.

به طور کلی پذیرفته شده است که یک خط لوله بایستی مورد پیگرانی قرار گیرد، اما هدف و دلایل این عملیات باید تعیین شود و اینکه در چه مواقعی به جای پیگ معمولی از پیگ هوشمند استفاده شود.

اگر هدف مواردی از قبیل بازرسی دوره‌ای و عیب‌یابی، فراهم کردن اطلاعات در دوره‌های زمانی از مشکلات در حال توسعه، جهت آگاه کردن بهره‌برداران برای اخذ تصمیمات مقتضی باشد، پیگ‌های



شکل ۵ | تصویری از تجهیزات تشکیل‌دهنده‌ی پیگ MFL



شکل ۶ مکانیسم عملکرد روش MFL

#### ۱-۴-۵- پیگ MFL

پیگ‌های هوشمند MFL با سابقه‌ترین و رایج‌ترین روش ارزیابی خط لوله جهت تشخیص نواحی خوردگی فلز در خطوط لوله‌ی نفت و گاز است. این روش قادر است خوردگی فلز و بسیاری از خرابی‌های خط لوله را با اطمینان بالایی آشکار سازد.

گرچه MFL برای تعیین وضعیت هندسی و متالژیکی خط لوله طراحی نشده است ولی در پاره‌ای از موارد برای نیل به این منظور نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. ارزیابی خط لوله به روش MFL معمولاً به منظور آشکارسازی، تعیین محل و تعیین مشخصات کاهش ضخامت<sup>۲۳</sup> و سایر خرابی‌ها<sup>۲۴</sup> در خطوط انتقال نفت و گاز انجام می‌شود.

خرابی‌های خط لوله بسیار متنوع هستند و همه‌ی انواع خرابی‌های خط لوله توسط<sup>۲۵</sup> HR MFL قابل شناسایی نیستند، ولی این پیگ قادر است بسیاری از خرابی‌های مهم و متداول خط لوله را با درصد اطمینان بالایی تشخیص دهد. شکل ۵ نمونه‌ای از یک پیگ MFL را نشان می‌دهد. پیگ‌های MFL جاروهایی دارند که لوله را مغناطیس می‌کنند. حسگرهای مغناطیس تغییرات شار مغناطیسی را که به واسطه‌ی تغییر ضخامت لوله ایجاد می‌شوند، حس و به صورت ۱۶ بیتی در یک حافظه ذخیره می‌کنند. ذخیره‌ی این اطلاعات نیازمند دستگاهی با حجم بالا برای ضبط داده‌های حسگرها است. فناوری جدیدتر از MFL نیز وجود دارد که TFI<sup>۲۶</sup> نام دارد. این فناوری در زمینه‌ی شناسایی عیوبی که در راستای عمود بر میدان ایجاد شده توسط دستگاه قرار دارند (همچون درز طولی جوش‌ها)، قابلیت بالایی دارد.

پیشرفت‌ها در زمینه‌ی افزایش قدرت آهنرباها، ارتقای حسگرها، سیستم‌های تحلیل کامپیوتری و گزارش‌دهی و بازرسی خطوطی که سابقاً غیرقابل پیگ‌رانی تلقی می‌شدند، منجر به تولید ابزاری با دقت بالا شده به طوری که دقت کار این دستگاه‌ها نسبت به یک دهه پیش از این به طرز چشمگیری افزایش یافته است. نحوه‌ی عملکرد روش MFL در شکل ۶ نمایش داده شده است.

#### ۲-۴-۵- پیگ ماوراءصوتی

امواج مافوق صوت فقط می‌توانند در محیط مایع جریان پیدا کنند، بنابراین برای بازرسی خط لوله‌ی گاز طبیعی لازم است که این دستگاه در یک محیط مایع گذاشته شود، بدین صورت که یک پیگ در جلو و یکی در عقب دستگاه و مایع همگن نیز در وسط قرار می‌گیرد. بنابراین استفاده از پیگ‌های مافوق صوت برای بازرسی لوله‌های گاز طبیعی در مقایسه با روش MFL پیچیده‌تر است.<sup>[۱]</sup> دستگاه پیگ ماوراءصوت در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴ توسط شرکت پایپ ترونیکس<sup>۲۷</sup> طراحی شد.

دستگاه مزبور جهت تشخیص عیوبی که به عنوان ترک‌های محوری در خط لوله ایجاد می‌شود، مخصوصاً ترک‌های ناشی از خستگی فلز و ترک‌های ناشی از خوردگی تحت تنش<sup>۲۸</sup> یا ترک‌های عیوب جوش به کار می‌رود.

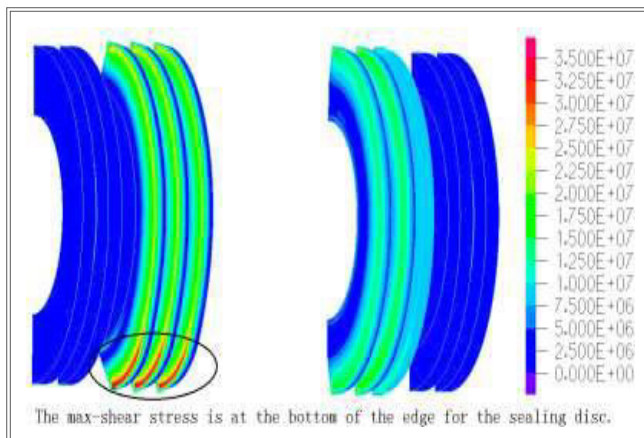
این دستگاه از پاییز ۱۹۹۴ به طور عملی به کار گرفته شده است. این پیگ هوشمند قابلیت جمع‌بندی اطلاعات انتخاب شده به صورت دوبعدی، نمودارهای هیستوگرام و نمایش جدول را دارد.<sup>[۷]</sup>

#### ۶- مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی

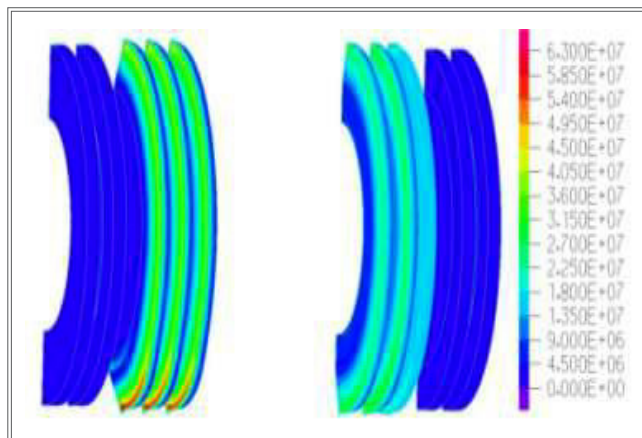
عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله‌ی چندفازی، یک عملیات با حالت گذرا<sup>۲۹</sup> می‌باشد، چراکه حرکت پیگ با پروفایل ارتفاع خط لوله و اصطکاک‌کی که در لوله با آن مواجه می‌شود، تغییر می‌کند. به علاوه مدت زمان رانش پیگ و یا زمان مورد انتظار دریافت پیگ، با رویدادهای گذرا همراه است از قبیل میزان بازشدگی شیرآلات، تغییرات در نرخ‌های جریان‌ی و دیگر رویدادهای گذرا که در مدل‌سازی‌ها مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

همچنین مدل‌سازی حرکت پیگ، یک مدل گذرا است به این دلیل که شرایط مرزی در هر مرحله متناظر با تغییر در حرکت پیگ می‌تواند تغییر کند. تحلیل‌های مختلف، رانش پیگ‌ها را در





شکل ۸ | بیشینه تنش برشی وارد بر دیسک در حرکت رو به جلو پیگ



شکل ۹ | تنش موثر بر دیسک وقتی که پیگ رو به جلو حرکت می‌کند.

لیما<sup>۳۵</sup> (۲۰۰۲) توسعه داده شد که برای تخمین هیدرولیک پیگرانی جریان دوفازی مناسب می‌باشد، به خصوص در سیستم‌های خط لوله- بالابرنده. [۱۵]

نان لی<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد تماسی کاپ پیگ محور میله‌ای<sup>۳۷</sup> را مورد مطالعه قرار داده و یک تحلیل المان محدود بر روی خواص مکانیکی دیسک آب‌بند پیگ انجام دادند.

در کار ایشان با استفاده از پیگ صفحه مستقیم، تنش و تغییر شکل<sup>۳۸</sup> دیسک آب‌بند پیگ در خط لوله‌ی گاز طبیعی توسط یک نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی و اثرات ضخامت دیسک آب‌بند، فشردگی و قطر داخلی آن مورد مطالعه قرار گرفت.

نتایج نشان داد با افزایش ۲٫۵ برابری تنش موثر، تغییر شکل خمشی دیسک نیز افزایش یافت و یک تمرکز تنش پس از رانش پیگ نسبت به وقتی که آنها تنها در تماس با سطح تماس لوله بودند، در خط لوله وجود داشت.

بیشینه تنش موثر، بیشینه تنش برشی و تغییر شکل خمشی دیسک، همگی بر انتهای لبه برای سه دیسک آب‌بند اول و اتصال دیسک آب‌بند و دیسک فاصله‌گذار مطابق اشکال ۷ و ۸ متمرکز است. وقتی دیسک آب‌بندی نازک‌تر از ۴۲ میلی‌متر بود، تنش موثر کاهش یافت. با افزایش فشردگی، تنش موثر بر پیگ بزرگ‌تر شده و ارتباط بین آنها خطی بود. [۱۶]

#### ۷- چالش‌های فراروی عملیات پیگرانی

در حین عملیات‌های پیگرانی، اغلب مشکلات فنی ناشی از فقدان ابزارهای قابل اعتماد برای پیش‌بینی متغیرهای متعدد مرتبط با

هر قسمت از خط لوله با شرایط گذرا یا متغیر نظیر افزایش یا کاهش دبی جریانی و یا تغییرات فشار، مورد آزمون قرار می‌دهد. رویدادهای گذرای متفاوتی را می‌توان برنامه‌ریزی و اثراتی مانند زمان دریافت پیگ را تعیین کرد. [۱۴]

جریان گذرا نه تنها در حین زمان پرتاب پیگ مشاهده می‌شود، بلکه برای یک دوره‌ی طولانی بعد از اینکه پیگ خارج شد، وجود دارد. این موقعیت حتی اگر دبی جریانی گاز و مایع و فشارهای خروجی ثابت نگه داشته شود، رخ می‌دهد.

تحلیل چنین رفتار جریان گذرای در یک خط لوله ضروری است، نه تنها برای طراحی تسهیلات فرآیندی پایین‌دستی، بلکه برای تثبیت دستورالعمل‌های عملیاتی ایمن. بنابراین یک نیاز تعریف شده برای توسعه‌ی مدل‌های پیگرانی قابل اعتماد و جامع به منظور فهم بهتر رفتار گذرای سیالات در حین این عملیات‌ها وجود دارد.

یک مدل ساده برای شبیه‌سازی رفتار جریان گذرا در یک خط لوله‌ی دوفازی تحت یک عملیات پیگرانی توسط مینامی<sup>۳۰</sup> (۱۹۹۱) ارائه شده است.

در این مدل مینامی فرض کرد که فاز گاز می‌تواند در یک شرایط شبیه پایا<sup>۳۱</sup> جریانی باشد و سپس آن را با مدل ساده‌سازی شده‌ی گذرای دو سیالی<sup>۳۲</sup> تایتل و همکاران<sup>۳۳</sup> کوپل کرد. این مدل با این وجود نیازمند اصلاحات قابل توجه به منظور قابل استفاده بودن برای شبیه‌سازی جریان گذرا در یک سیستم خط لوله- بالابرنده<sup>۳۴</sup> است، در جایی که روش شبیه پایا برای چنین سیستم‌هایی به دلیل تجمع بالای گاز در بالادست پیگ مناسب نیست.

در این راستا یک مدل گذرای دو سیالی جدید توسط یونگ و

دیداری نمایش داده شده و نیز به صورت صوتی توسط تقویت کننده یک سیگنال قابل شنیدن ساطع می کند.

■ **پینگرها<sup>۴۳</sup>**: پینگرها سالها در صنعت دریایی به عنوان نشانه گذارهای زیر دریا مورد استفاده قرار گرفته و بعدها برای استفاده در خط لوله مطابقت داده شدند. به دلیل اینکه پینگر اساسا برای زیر دریا به کار می رفت، در خطوط لوله‌ی مایع بهترین عملکرد را دارد.

مایع به عنوان یک حامل برای سیگنال از پینگر تا دیواره‌ی لوله و سپس به درون آب خارج از لوله عمل می کند. پینگر هر چند ثانیه یک "پینگ"<sup>۴۴</sup> ساطع می کند که توسط گیرنده‌های نصب شده در یک قایق کاری بالای خط لوله دریافت می شود.

■ **آهنرباها**: با استفاده از مغناطیس نه تنها می توان به پیگها سیگنال فرستاد بلکه می توان آنها را با این روش ردیابی کرد. در هر دو حالت آهنرباها در پیگ نصب می شوند و سنسورها در سیستم، تغییر در میدان مغناطیسی را همچنان که پیگ عبور می کند، آشکار می کنند.

هنگام استفاده از سیستم آهنربایی، یک مغناطیس سنج بر روی یا نزدیک خط لوله تعبیه شده و همچنان که پیگ عبور می کند، تغییرات در میدان مغناطیسی به وسیله‌ی مغناطیس سنج ثبت می شود. کارایی این سیستم می تواند اغلب به وسیله‌ی حفر حفره‌هایی در زمین پوشش خط لوله و تعبیه‌ی مغناطیس سنج بر روی یا نزدیک آن، بهبود یابد. [۳]

#### ۷-۲- سرعت پیگ

چالش دیگر، کنترل سرعت حرکت پیگ است. بر اساس یک قانون سرانگشتی<sup>۴۵</sup> کلی، سرعت پیگ برای هر اندازه‌ای از قطر لوله (بزرگ تر از ۴ فوت بر ثانیه) و (کمتر از ۱۵ فوت بر ثانیه) است. قوانین سرانگشتی که در سالهای اخیر در مطالعات علمی پژوهشگران و اسناد فنی شرکت‌های سازنده و بهره‌برداران منتشر شده است.

این گونه نیست که در سرعت‌های بزرگ تر از ۱۵ فوت بر ثانیه نتوان پیگرانی کرد اما تجربه و مطالعات سازندگان پیگ نشان داده و تعیین کرده است که در سرعت‌های افزایش یافته و در حضور مایعات، حرکت پیگها بر روی مایع اتفاق خواهد افتاد که منجر به پرتاب شدیدتر و باقی ماندن حجم‌های بیشتری از مایع و جامدات وارد شده در خط لوله می شود.

حرکت پیگ درون خط لوله وجود دارد، بنابراین عملیات پیگرانی نیازمند کنترل دقیق و مکان‌یابی است که در ادامه انواع روش‌های مکان‌یابی پیگها شرح داده می شود.

برای مثال پیگرانی با فرکانس پرتاب زیاد منجر به کاهش زمان تولید و یا هزینه‌های عملیاتی بالاتر می شود و از طرف دیگر تعداد کمتر فرکانس پرتاب، باعث کاهش کمتر تولید اما افزایش خطر مسدود شدن خط لوله از جمله گیر کردن پیگ می شود.

بنابراین بهره‌بردار خط لوله می‌بایست ملاحظات جدی جهت اینکه آیا خط لوله واقعا نیازمند پیگرانی است و نیز اقتصادی بودن آن را مدنظر قرار دهد. به دلیل اینکه ابزار تجاری در دسترسی به منظور تعیین فرکانس پرتاب بهینه‌ی پیگ در اختیار نیست، بهره‌برداران بایستی فرکانس پرتاب پیگها را با استفاده از قوانین سرانگشتی بر اساس تجربه‌ی میدانی خود انتخاب کنند که اغلب شامل درجه‌ی زیادی از عدم قطعیت است. [۱۵]

#### ۷-۱- مکان‌یابی پیگها

هنگام راندن پیگها در خط لوله برای اولین بار و یا وقتی که شرایط در خط لوله نامطمئن است، مطلوب است که قادر به یافتن مکان پیگ موردنیاز باشیم. مهم‌ترین این روشها عبارتند از:

■ **ایجادکننده‌های نويز<sup>۳۹</sup>**: علاوه بر نويزهای ایجاد شده ناشی از کاپ‌های (نشت‌بندها) پیگ که حین عبور از لوله و جوشها در محل اتصال لوله‌ها شنیده می‌شوند، جهت افزایش نويز و تسهیل پیمایش، ایجادکننده‌های نويزی در پیگ تعبیه می‌شوند، مانند قسمت‌هایی از زنجیرهای ساده که به پیگ ضمیمه می‌شوند و درون لوله کشیده شده و ایجاد نويز می‌کنند.

■ **ایزوتوپ‌ها<sup>۴۰</sup>**: با استفاده از ایزوتوپها، پیگها به وسیله‌ی گیرنده‌های تابشی تعیین مکان می‌شوند. سودمندی این سیستم نه تنها بستگی به قدرت ایزوتوپ و حساسیت گیرنده دارد، بلکه به عمق خط لوله و نوع و شرایط ماده‌ی احاطه‌کننده‌ی خط لوله بستگی دارد، به عنوان مثال خاک‌های مرطوب در مقابل تابش مذکور سپر ایجاد می‌کنند.

■ **فرستنده‌ها<sup>۴۱</sup>**: سیستم‌های الکترومغناطیسی رایج‌ترین ابزارهای تعیین مکان پیگها هستند. یک سیم‌پیچ بر روی پیگ قرار گرفته و یک میدان مغناطیسی متغیر ساطع می‌شود. این میدان متغیر از دیواره‌ی لوله و خاک روی آن عبور می‌کند. سیگنال ارسالی از فرستنده توسط گیرنده جستجو<sup>۴۲</sup> دریافت می‌شود و به صورت

قابل توجهی برخوردار است.

به این منظور، علاوه بر بازرسی‌های متداول، بازرسی خطوط لوله به وسیله‌ی پیگ‌های هوشمند به عنوان فناوری به‌روز بازرسی و پایش عیوب همواره در دستور کار شرکت‌های بهره‌بردار قرار داشته و در همین راستا جهت نمونه، اطلاعاتی در مورد عملیات پیگرانی هوشمند انجام شده در یکی از میادین گازی جنوب کشور که در سال ۱۳۹۴ اجرا شد، ارائه شده است.

عملیات پیگرانی هوشمند در دو قطعه از خطوط لوله‌ی اصلی انتقال گاز کشور به قطر ۳۰ اینچ و طول ۳۰ کیلومتر از محل بهره‌برداری چاه‌های میدان تا پالایشگاه و همچنین تعدادی از چاه‌های آن میدان توسط شرکت پیمانکار به منظور تعیین میزان پراکندگی خوردگی با موفقیت به انجام رسید.

در هر اجرا از عملیات پیگرانی هوشمند بر روی هر خط لوله روی هم‌رفته ۵ پیگ پرتاب شد که در اشکال ۹ تا ۱۱ نمایش داده شده‌اند:

**پیگ اول، پیگ اندازه‌گیری<sup>۴۶</sup>:** به منظور تمیزکاری و اندازه‌گیری پرتاب شده که علاوه بر وظیفه‌ی تمیز کردن، وجود مشکل در ابعاد داخلی لوله از جهت عبور پیگ‌های بعدی را مشخص می‌کند.

**پیگ دوم، پیگ مگنت<sup>۴۷</sup>:** به طور خلاصه همان‌طور که از نامش مشخص است، جهت ایجاد آهنربای موقت به منظور حفظ دقت عملکرد دو پیگ آخر پرتاب شد.

**پیگ سوم، EGP<sup>۴۸</sup>:** که وظیفه‌ی ترسیم دقیق پروفایل خطوط و مشخص کردن محل خم‌ها و سایر مشخصات موردنیاز تعمیراتی و نگهداری خط را بر عهده دارد.

**پیگ چهارم، MFL و پیگ پنجم، TFI:** جهت بازرسی و تعیین وضعیت لوله از نظر خوردگی و آسیب‌دیدگی که توضیح در مورد عملکرد آنها در قسمت‌های قبلی ارائه شد.

لازم به ذکر است که پیگ‌های مورد اشاره با فشار ۵۰ تا ۵۷ bar و در زیر دمای ۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد پرتاب شدند. (محاسبه‌ی این مقادیر بر اساس سوابق پیگرانی‌های هوشمند قبلی و قوانین سرانگشتی اشاره شده، انجام شده است) اختلاف فشار دو سر پیگ ۳ تا ۴ bar تنظیم شد تا داده‌برداری حسگرها در حالت بهینه‌ای باشد و همچنین سرعت پرتاب پیگ‌ها تقریباً ۲ متر بر ثانیه تنظیم شد. دلیل انتخاب هر خط لوله‌ی جریانی چاه به منظور پیگرانی هوشمند، سابقه‌ی خوردگی و بررسی نتایج حاصل از عملیات‌های ایمن‌سازی قبلی، سوابق نشتی خطوط و نیز درجه‌ی اهمیت خط جریانی چاه و یا خط انتقال به پالایشگاه بوده است.

البته که هدف، حذف جامدات و کمینه کردن مایعات آزاد در خط لوله می‌باشد. یک قانون سرانگشتی برای محاسبه‌ی سرعت تقریبی پیگ در خط لوله‌ی جریان گاز چنین است:

$$S = \frac{(41 \times MMSCFD)(Gas Temp F^{\circ} + 460^{\circ})}{PSIA (Pipe Diameter ID)^2} \quad (۳)$$

که S مایل در ساعت و قطر داخلی لوله (pipe ID) به اینچ می‌باشد. [۸] برای خط لوله‌ی جریان مایع:

$$S = \frac{0.008 Q}{d^2} \quad (۴)$$

Q جریان بر حسب بشکه در روز و d قطر داخلی لوله بر حسب اینچ است. [۱۸]

### مشکلات در سرعت پایین

- کنارگذر محصولات عبوری از اطراف پیگ
- جمع شدن مواد زائد جلوی پیگ که باعث خرابی پیگ، باعث توقف و سریع شتاب گرفتن پیگ می‌شود که یک پدیده‌ی شناخته شده در مورد انحراف سرعت است به ویژه زمانی که پیگ در یک شیب به سمت بالا یا پایین در حال حرکت می‌باشد.

### مشکلات سرعت بالاتر از حد پیگ

- بازده کم تمیزکاری و زدودن میعانات
- کم شدن آب‌بندی موثر
- برگشت جریان محصولات در خطوط لوله
- سایش بیش از حد کاپ‌ها و قسمت‌های لاستیکی که در تماس با دیواره‌ی لوله است. [۱۷]

علاوه بر موارد گفته شده، امروزه از جمله چالش‌های قابل توجه پیگرانی هوشمند در کشور، عدم توسعه‌ی بومی‌سازی کامل طراحی، ساخت و ترویج بیشتر استفاده از این ابزار بازرسی ارزشمند جهت خدمات‌رسانی و صیانت از خطوط لوله‌ی انتقال می‌باشد. لازم به ذکر است اگرچه یکی از شرکت‌های داخلی اخیراً موفق به ساخت نمونه‌هایی از برخی انواع پیگ‌های هوشمند شده است، هنوز نیاز به پژوهش و توسعه‌ی بیشتر این فناوری با توجه به حجم گسترده‌ی خطوط لوله‌ی انتقال کشور ضروری می‌نماید.

### ۸- مطالعه‌ی میدانی نمونه‌ای از کاربردهای عملیات پیگرانی در صنایع بالادستی ایران

اطلاع از وضعیت خطوط لوله به منظور استمرار تولید و رفع نگرانی از مخاطرات ایمنی و جلوگیری از رخداد‌های ناگهانی از اهمیت

پیگ بعدی پرتاب شد. (در برخی خطوط به دلیل عدم ثبت داده‌ی مناسب و یا بروز اشکال در یکی از انواع پیگ‌ها جهت حصول داده‌ی مورد تایید، آن پیگ بیش از یک بار پرتاب شد و پیگ‌های بعدی نیز به همین ترتیب) در نتیجه‌ی این عملیات، نقشه‌ی میزان خوردگی‌های داخلی و خارجی خطوط مشخص شده و مقاطعی از لوله با میزان عیوب بیش از حد مجاز با تشخیص اداره‌ی بازرسی فنی و حفاظت خوردگی تعویض شدند.

یکی از مشکلات این عملیات پیگرانی، صعب‌العبوری مسیر خط لوله بود و شرکت پیمانکار جهت ردیابی پیگ، مگنت‌هایی را بر روی خطوط لوله در فواصل معینی جای‌گذاری کرد. پیگ هنگام عبور از زیر این مگنت‌ها سیگنال مشخصی دریافت و ذخیره می‌کرد. در نتیجه پس از پردازش اطلاعات، مسیر حرکت پیگ و مکان دقیق نقص‌ها مشخص می‌شد. بعد از راندن هر پیگ، داده‌های جمع‌آوری شده توسط شرکت پیمانکار تجزیه و تحلیل شد و پس از تایید صحت داده‌های حاصله،



شکل ۹ | پیگ EGP در حال راندن به تله‌ی ارسال پیگ خط جریان‌ی چاه



شکل ۱۰ | پیگ MFL در حال راندن به تله‌ی ارسال پیگ خط جریان‌ی چاه



شکل ۱۱ | مجموعه‌ی کامل پیگ‌های هوشمند رانده شده توسط شرکت پیمانکار

### جمع‌بندی و خلاصه

پیگ در خط لوله و نتایج حاصل بحث شد، از قبیل: اثر جریان گذرا، اثر نیروی اصطکاکی و تغییر شکل و تنش‌های وارد بر دیسک‌های آب‌بند.

۵- چالش‌های فراروی عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله از جمله فرکانس پرتاب، مکان‌یابی پیگ، سرعت پیگ و راهکارها و پیشرفت‌های حاصل جهت مقابله با این چالش‌ها مورد تحلیل قرار گرفت.

۶- در پایان با ذکر نمونه‌ای از اجرای یک عملیات پیگ‌رانی هوشمند در یکی از میدین‌گازی کشور پس از بیان موارد بالا در این اثر، چنین استنتاج می‌شود که با توجه به گستردگی قابل توجه خطوط انتقال سیالات در کشور، گذشت عمر و فرسودگی و نیاز به توسعه، استمرار تولید و صیانت از آنها با فهم کامل‌تر چگونگی کنترل، طراحی و اجرای فرآیند پیگ‌رانی جهت توسعه بومی‌سازی ساخت انواع پیگ‌ها و پرورش ایده‌های جدید و بهینه‌سازی آنها به عنوان زمینه‌ای جذاب برای پژوهشگران و صنعتگران در افق پیش‌رو می‌باشد. ■

۱- پس از شناخت پیگ و عملیات پیگ‌رانی و درک اهمیت آن در نگهداری، تعمیرات و استمرار بهره‌برداری از خطوط لوله‌ی انتقال سیالات، در ابتدا تقسیم‌بندی انواع پیگ‌ها از نظر کاربرد به همراه عملکرد هر یک تشریح شد که شامل سه دسته‌ی کلی پیگ‌های پلی‌فوم، تک بدنه و محور فولادی هستند.

۲- فاکتورهای موثر جهت انتخاب پیگ مناسب برای انواع شرایط خط لوله شامل جداسازی سیالات، تمیزکاری و رسوب‌زدایی، لخته‌زدایی خطوط لوله با قطرهای چندگانه و بازرسی و عیب‌یابی خطوط لوله بیان شد.

۳- پیگ هوشمند به عنوان یکی از ابزارهای کارآمد بازرسی خطوط لوله تعریف شد. انواع پیگ‌های هوشمند، پیشرفت‌های اخیر این فناوری و نحوه‌ی عملکرد هر یک جهت بازرسی و یافتن عیوب خط لوله نظیر انواع خوردگی، ترک‌خوردگی و نشستی، فرورفتگی، تورق و خمش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

۴- در مورد برخی مطالعات مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی حرکت

### پانویس‌ها

1. Iron carbonate scale	13. Multi diameter	25. High Resolution MFL	37. Mandrel
2. Inhibitor	14. In-line inspection (ILI)	26. Transverse Field Inspection	38. Deformation
3. Holdup	15. Intelligent pig	27. Pipe Tronix	39. Noisemakers
4. Pipeline inspection gauge	16. Linalog	28. STRESS CORROSION CRACKS	40. Isotopes
5. Utility PIGs	17. Frigg	29. Transient	41. Transmitter
6. Cups	18. Gas Research Inspection	30. Minami	42. Search coil
7. Spheres	19. Magnetic flux leakage	31. Quasi steady state	43. Pingers
8. Sphering	20. Intelligent or smart PIG	32. Transient two fluid model	44. Ping
9. Poly Foam	21. Ultrasonic	33. Taitel et al.	45. Rule of thumb
10. Steel mandrel	22. Caliper PIGs	34. Riser	46. Gauging
11. Jet stream pig	23. Metal Loss	35. Yeung and Lima	47. Magnet pig
12. Dual size	24. Anomaly	36. Nan li et al.	48. Electronic Geometric Pig

### منابع

- [۱]. فاضل‌نیا م (مترجم)، تازه‌های پیگ‌رانی خطوط انتقال گاز طبیعی، بخش اول، نشریه‌ی ۲۰۰۷، IGU و پایگاه الکترونیکی شرکت سگال پردازش.
- [۲]. پایگاه الکترونیکی اندیشکده‌ی انرژی‌مالی‌نینتا، <https://naptacenter.ir>
- [3]. Cordell J, Vanzant H, THE PIPELINE PIGGING HANDBOOK, THIRD EDITION, 3401 Louisiana Street, Houston, Texas 77002, USA, Clarion Technical Publishers and Scientific Surveys Ltd, 2003, P 1-1.
- [۴]. وطنی‌ع، مخاطب‌س، اصول طراحی هیدرولیکی خطوط لوله‌ی انتقال جریان‌های دوفازی، انتشارات جهاد دانشگاهی شعبه‌ی واحد تهران، ۱۳۸۴-۷۲-۸۱۷۱-۹۶۴-ISBN.
- [5]. Zhu X, Zhang Sh, Li X, Wang D, Yu D, Numerical simulation of contact force on bi-directional pig in gas pipeline: At the early stage of pigging, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 127-138.
- [6]. Mushiri T, Design of a mechanical cleaning device P.I.G (pipeline intervention gadget) connecting two transfer lines in Zimbabwe, International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2016, Detroit, Michigan, USA, September 23-25.
- [۷]. خیام‌س، سماواتیان‌س، بررسی روش‌های تشخیص خوردگی در خطوط لوله‌ی نفت و گاز توسط توپک هوشمند، پایان‌نامه‌ی کارشناسی، دانشکده‌ی برق گروه کنترل، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۲، صفحات ۴ تا ۵ و ترجمه‌ی صفحه‌ی ۱۲.

■ ادامه منابع در (دبیرخانه) موجود است.