

# ارزیابی فنی و اقتصادی دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای جهت بازرسی لوله

## مغزی سیار در صنعت حفاری

فاطمه مهربانی	نوید سید کاظم ویلیانی*	حامد عامری
استادیار گروه اقتصاد، واحد اهواز، دانشگاه آزاد	استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد ابهر،	سرپرست امور فناوری اداره پژوهش و فناوری
اسلامی، اهواز، ایران	دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران	شرکت ملی حفاری ایران، اهواز، ایران
Fatemeh.mehrabani@hotmail.com	n.viliani@abhariau.ac.ir	Ameri1365@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲

### چکیده

در این مقاله به بررسی فنی و اقتصادی دستگاه‌های پایش وضعیت لحظه‌ای برای آشکارسازی انواع عیوب موجود در دستگاه لوله مغزی سیار می‌پردازیم. عیب‌های مکانیکی ایجاد شده در لوله مغزی سیار می‌تواند موجب ایجاد ترک و در نهایت شکست تیوب در دستگاه لوله مغزی سیار شود و این موضوع به شکل مؤثری بر فرایند تولید اثرگذار است. از این‌رو، دستگاه‌های پایش وضعیت لحظه‌ای در جلوگیری از شکست ناگهانی لوله مغزی سیار کمک فراوانی کرده‌اند. جهت طراحی و ساخت دستگاه‌های پایش وضعیت، ابتدا با بررسی مکانیزم‌های شکست بر روی لوله مغزی سیار فهم تازه‌ای از رفتار و عیب‌های لوله مغزی سیار به دست آمده که این امر منجر به تولید دستگاه‌ها و برنامه‌های مدیریت جهت پایش وضعیت تیوب‌ها در لوله مغزی سیار شده است. تحقیقات نشان می‌دهد مهم‌ترین عامل در شکست لوله مغزی سیار خستگی مکانیکی است. با اعمال بارهای سیکلی بر تیوب ترک‌های خستگی به وجود آمده و رشد می‌کند و موجب شکست در لوله مغزی سیار می‌شود. بدین منظور در این مقاله به بررسی مکانیزم‌های شکست در تیوب‌های لوله مغزی سیار پرداخته و فناوری‌های مورد استفاده در دستگاه‌های پایش وضعیت لحظه‌ای در حین عملیات ارائه شده است. همچنین با بررسی هزینه‌های عملیاتی و قیمت تمام شده دستگاه، بررسی‌های اقتصادی انجام شده و نتایج ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از این دستگاه‌ها موجب بالا رفتن مدت زمان استفاده جهت عملیات بوده و از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است.

**واژگان کلیدی:** لوله مغزی سیار، امکان‌سنجی اقتصادی، دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای، صنعت حفاری، شکست

### ۱. مقدمه

با معرفی دستگاه‌ها و فناوری‌های جدید این مهم را محقق سازند. دستگاه لوله مغزی یکی از این موارد بوده که در دهه ۶۰ میلادی معرفی شد و با توجه به صرفه اقتصادی و

محققان و شرکت‌های بزرگ نفتی همواره در جهت کاهش هزینه‌ها و به صرفه شدن تولید نفت در تلاش هستند، که

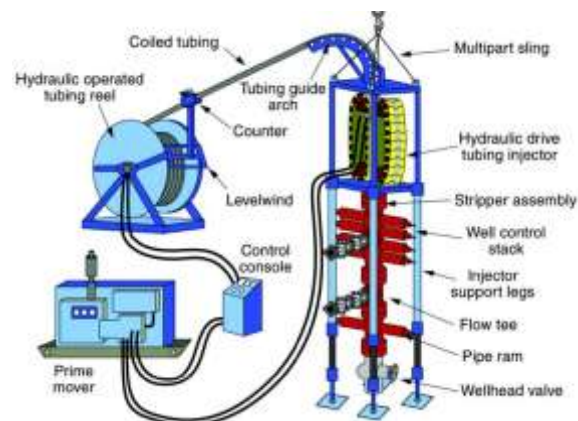
با توجه به گستره زیاد استفاده از این دستگاه‌ها و شرایط محیطی چاه‌های نفت، محققان توانسته‌اند دو عامل مهم در شکست و از هم‌گسیختگی لوله مغزی سیار را در تحقیقات خود ارائه دهند که عبارتند از: خوردگی و خستگی مکانیکی. وجود رطوبت، دمای بالا و فشار زیاد در چاه‌های نفت باعث ایجاد محیط مناسبی برای شکل‌های مختلف خوردگی لوله مغزی سیار می‌شود. همچنین اعمال نیرو و تنش‌های مکانیکی بر تیوب در قسمت‌های قرقره و گردن غازی و نیز درون چاه موجب خستگی مکانیکی شده و عمر لوله مغزی را کاهش می‌دهد [۲].



شکل ۱. بخش‌های مختلف دستگاه لوله مغزی سیار [۳]

با توجه به اهمیت تخمین عمر تیوب لوله مغزی سیار محققان زیادی در حال بررسی و پژوهش هستند. لارنس [۲] یکی از اولین پژوهشگرانی است که در این زمینه تحقیقات فراوانی کرده است. پژوهشگران زیادی در خصوص ارائه مدل جهت تخمین عمر لوله‌های مغزی سیار مقالات زیادی را ارائه کرده‌اند که می‌توان به تحقیقات تپیتون [۴] جهت ارائه یک مدل تحلیلی-آزمایشی برای تخمین عمر لوله اشاره کرد. نتایج مدل تپیتون نسبت به تحقیقات گذشته در محدوده ایمن‌تری قرار داشت. جلیلی و مرادی [۲] یک روش جدید برای ارزیابی آسیب وارده به لوله مغزی سیار و در نهایت تخمین عمر آن ارائه داده‌اند. در این روش مکانیزم‌های آسیب‌زننده به لوله مغزی به دو

سهولت در استفاده از آن در مقایسه با دکل حفاری در طی سال‌های اخیر پیشرفت فراوانی داشته است. شرکت‌های حفار و بهره‌بردار می‌توانند از این دستگاه استفاده فراوانی در چاه‌های خشکی و دریایی داشته باشند که تعدادی از کاربردهای فراوان این نوع دستگاه‌ها از جمله تزریق گاز نیتروژن جهت زنده نمودن چاه (فرازآوری با گاز نیتروژن)، نصب پلاک سیمانی، مانده‌یابی، اسیدکاری، نمودارگیری و حفاری را می‌توان اشاره نمود [۱]. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک دستگاه لوله مغزی سیار نمایش داده شده است.



قسمت مجزای خستگی کم چرخه و رچتینگ<sup>۱</sup> تفکیک شده و میزان آسیب ناشی از هر یک، به‌طور جداگانه محاسبه می‌شود. با توجه به گستردگی کاربردهای لوله مغزی سیار، صحت و درستی این سیستم در طول زمان سرویس‌دهی خود می‌تواند با تعداد زیادی از مکانیزم‌های شکست کاهش یابد. به‌طور کلی بازرسی دستگاه لوله مغزی سیار به دو شکل انجام می‌گیرد که شامل بازرسی در کارگاه و قبل انتقال جهت استفاده درون چاه و روش دیگر روش پیوسته و آنلاین که در حین انجام عملیات و با نصب بر روی دستگاه لوله مغزی سیار مانیتورینگ و بررسی و آنالیز شکست را انجام می‌دهد که در شکل ۱ نمایش داده شده است. شاو هو و همکاران [۵] به بررسی شکل‌های مختلف

بارهای اعمالی به تیوب دستگاه لوله مغزی سیار و با استفاده از روابط ریاضی و مدل‌سازی کامپیوتری صحت نتایج را بررسی کرده‌اند.

از آنجایی‌که بازرسی پیشگیرانه بر روی تیوب در حین عملیات موجب بالا رفتن بازده دستگاه لوله مغزی سیار پرداخته شده و از شکست ناگهانی تیوب جلوگیری می‌کند،

در این مقاله به بررسی روش‌های مختلف جهت پایش وضعیت پیوسته و آنلاین لوله مغزی سیار در حین عملیات پرداخته شده و بررسی‌های اقتصادی جهت اجرای این طرح در کشورمان ارائه شده است. در شکل ۲ دو روش بازرسی لوله مغزی سیار در کارگاه و در حین عملیات ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲. روش‌های مختلف بازرسی لوله مغزی سیار (الف) در کارگاه (ب) در حین عملیات و آنلاین

## ۲. تاریخچه دستگاه بازرسی لوله مغزی سیار

با توجه به اهمیت پایش لحظه‌ای تیوب لوله مغزی سیار، اولین تلاش‌ها برای پایش وضعیت لوله مغزی سیار در سال ۱۹۹۵ و توسط شرکت رد دیر<sup>۲</sup> انجام شد.

این دستگاه قادر بود با اسکن کردن لوله، مواردی همچون ضخامت لوله، قطر خارجی لوله و میزان بیضوی شدن لوله مغزی سیار را به شکل پیوسته مانیتور کند که نمونه‌ای از آن در شکل ۳ آورده شده است [۶].



On-Shore, Red Deer, Alberta (Circa 1995)



1995 used 1<sup>st</sup> generation CT inspection system to measure OD, WT and ovality

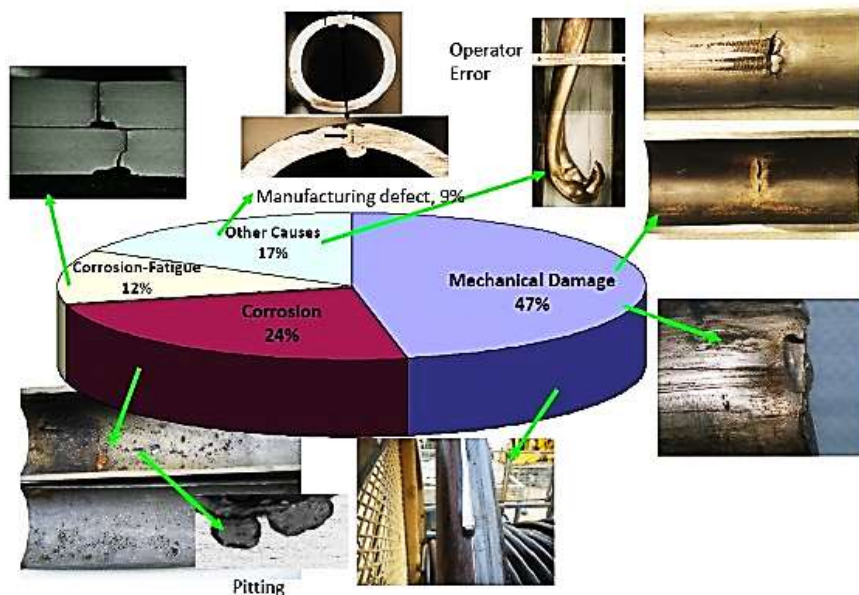


شکل ۳. نمونه اولیه دستگاه بازرسی لوله مغزی سیار آنلاین [۶]

### ۳. مکانیزم‌های شکست در لوله مغزی سیار

شکست و خرابی در حین عملیات چاه باعث متوقف شدن تولید چاه برای مدت زمان طولانی می‌شود، بنابراین تشخیص، مانیتورینگ و ارزیابی عوامل خرابی مهم‌ترین دلیل برای بازرسی لوله مغزی سیار است. کاهش مدت

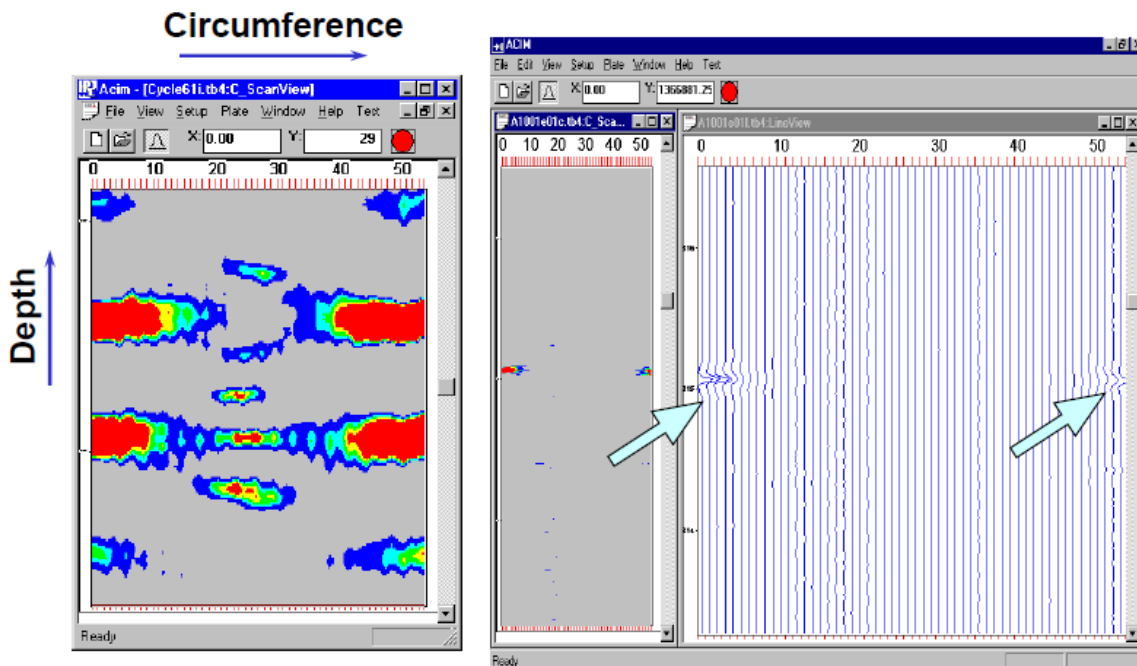
زمان کارکرد لوله مغزی سیار نه تنها به سایش و خوردگی وابسته است، بلکه به عوامل بسیاری همچون خستگی مکانیکی در اثر بارهای سیکلی نیز بستگی دارد. در شکل ۴ برخی از عوامل که در خرابی لوله مغزی سیار دخیل هستند نشان داده شده است.



شکل ۴. مواردی که باعث از کار افتادن لوله مغزی سیار می‌شوند [۶]

پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای در لوله مغزی سیال؛ در شکل ۵ مورد بررسی قرار می‌گیرند نقاط قرمز در شکل سمت راست نشان دهنده

خوردگی حفره با عمق زیاد در تیوب‌ها می‌باشد، همچنین در شکل سمت چپ منطقه قرمز رنگ نشان‌دهنده لاغر یا نازک شدن دیواره تیوب در لوله مغزی سیار است.



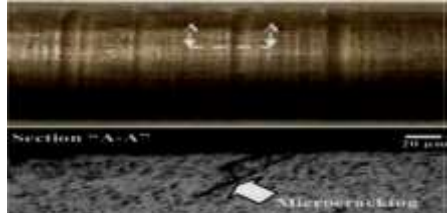







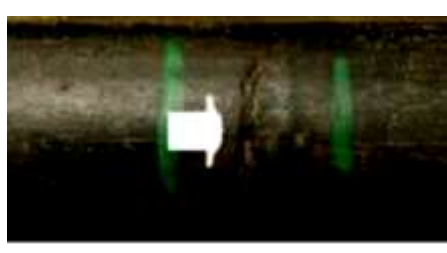



شکل ۵. پارامترهای اندازه‌گیری شده با دستگاه پایش وضعیت در لوله مغزی سیال که در شکل سمت راست نقاط قرمز، خوردگی بحرانی و

در شکل سمت چپ ناحیه قرمز لاغر شدن بحرانی دیواره تیوب می‌باشد [۶]

همان‌طور که در قبل گفته شد؛ خوردگی و سایش داخلی و خارجی باعث عیب در تیوب شده و باعث شکست در اثر پارگی، لهیدگی، دندان‌شدن و گلوبی شدن می‌شود که در شکل ۶ نمایش داده شده است.



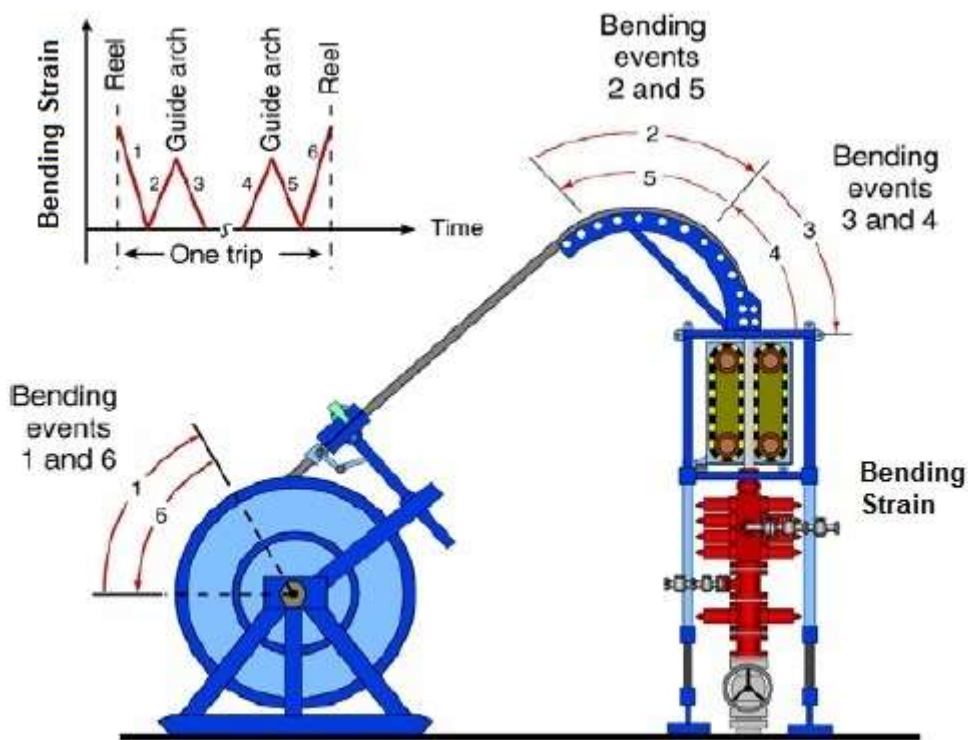
<p>Fatigue Crack</p>		
<p>Micro crack</p>		
<p>Dent</p>		
<p>Erosion Pit</p>		
<p>Nick</p>		
<p>Local wall-thinning</p>		

شکل ۶. مورفولوژی شکست تیوب لوله مغزی سیار [۵]

در هر بار استفاده از تیوب‌ها به درون چاه، حداقل ۶ مرتبه تیوب در اثر خم و راست شدن در معرض سیکل تغییر شکل خمشی و کششی قرار می‌گیرد که در شکل ۷

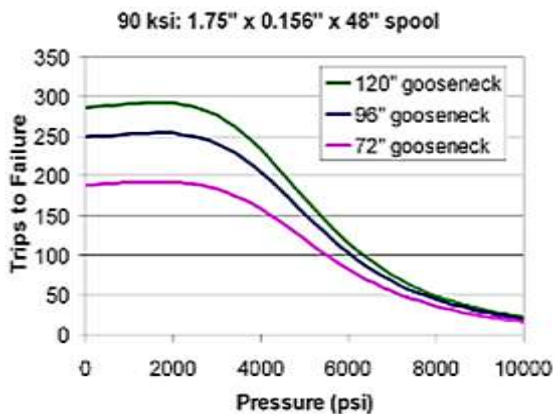
محل‌های بحرانی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است بارهای سیکلی و دینامیکی باعث خستگی مکانیکی در محل قرقره و گردن غازی می‌شود [۳]. در اثر پیچیدن تیوب به دور قرقره و در محل گردن غازی، لوله مغزی سیار دچار تغییر شکل پلاستیک شده و قطر لوله افزایش می‌یابد. در این حالت شکل تیوب از دایره به بیضی تغییر شکل می‌یابد. با افزایش قطر لوله در اثر تغییر شکل پلاستیک، ضخامت آن کم شده و مقاومت آن در برابر نیروهای مکانیکی کاهش یافته و در نهایت باعث پارگی تیوب در حین کار می‌شود [۷].

مهمی در خصوص عمر لوله مغزی سیار رسیده‌اند که در شکل ۸ نشان داده شده است [۸].

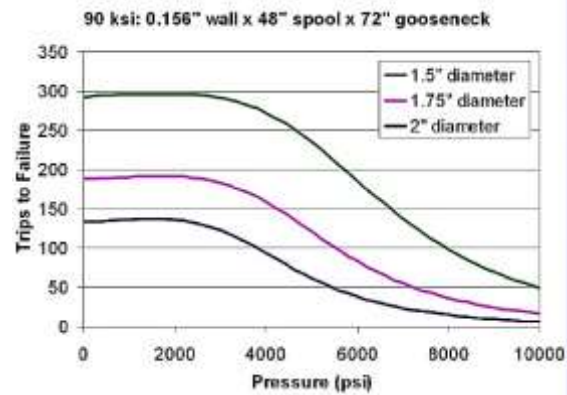


شکل ۷. تغییر شکل تیوب در محل قرقره و گردن غازی [۳]

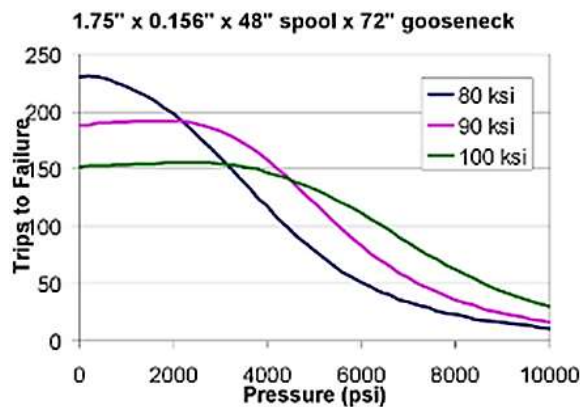
پژوهشگران با انجام آزمایشات فراوان بر روی قطر تیوب و قرقره و گردن غازی و همچنین تغییر ماده تیوب‌ها به نتایج



ب) اثرات تغییر قطر گردن غازی بر شکست تیوب



الف) اثرات تغییر قطر لوله مغزی سیار بر شکست تیوب

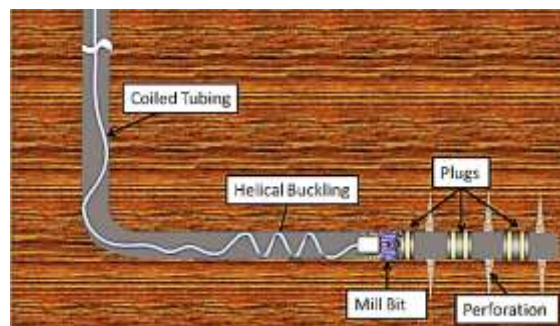


پ) اثرات تغییر ماده لوله مغزی سیار بر شکست تیوب

شکل ۸. اثرات تغییر قطر تیوب و گردن غازی و جنس تیوب بر شکست لوله مغزی سیار [۸]

نقص در ماده، مشکلات در فرایند ساخت و عدم کنترل کیفیت، تنش خوردگی، سایش، خستگی مکانیکی. از آنجایی که لوله مغزی سیار در معرض شرایط محیطی، بار و فشار مختلفی قرار دارد مکانیزم‌های شکست مختلفی می‌تواند رخ دهد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد به جز خستگی مکانیکی عامل مهم دیگر، خوردگی است. یکی از مهم‌ترین عوامل خوردگی در تیوب دستگاه لوله مغزی سیار خوردگی اسیدی است. این خوردگی در حین عملیات اسیدکاری چاه‌های نفت رخ می‌دهد. خوردگی در اثر آب شور و  $H_2S$  از مهم‌ترین عوامل در شکست و خرابی لوله مغزی سیار هستند. تحقیقات نشان می‌دهد چنانچه لوله در معرض گاز  $H_2S$  قرار گیرد عمر خستگی مکانیکی آن به شدت کاهش یافته و مکانیزم شکست آن از انعطاف‌پذیر به

همچنین در درون چاه، تیوب تحت کمانش قرار می‌گیرد که می‌تواند موجب گسیختگی و یا تغییر شکل تیوب شود که در شکل ۹ نشان داده شده است.



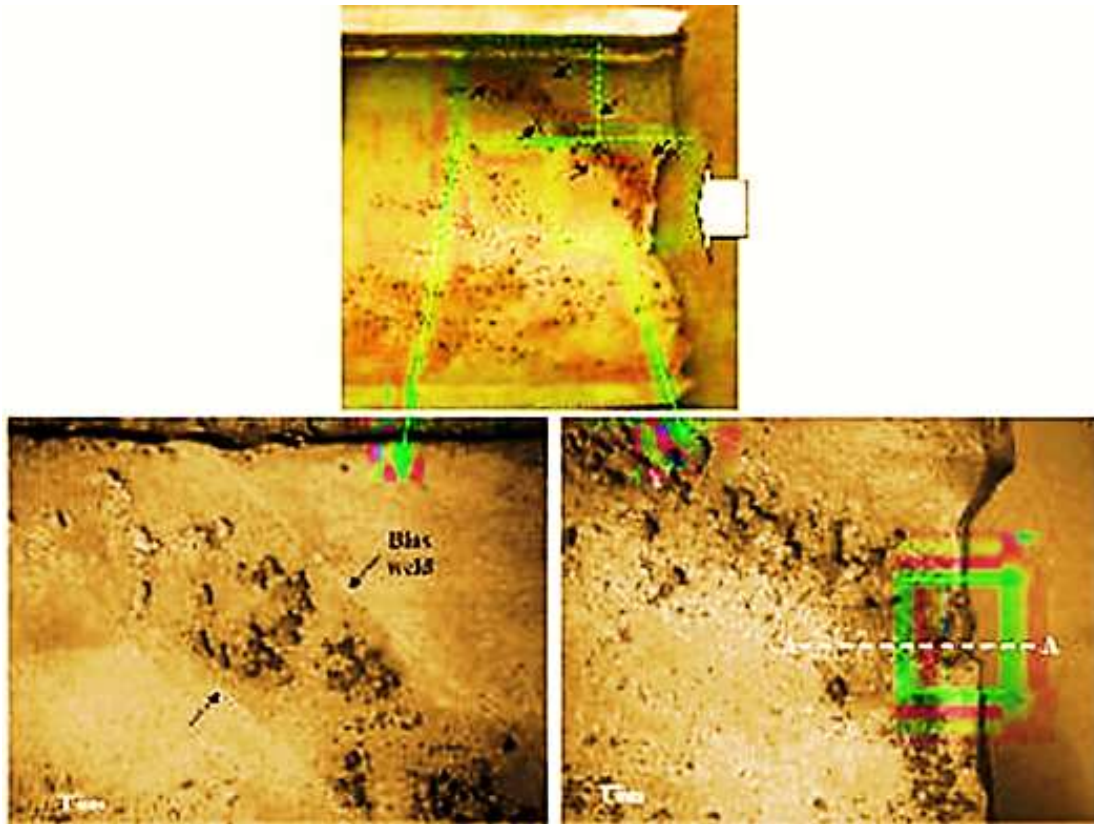
شکل ۹. کمانش لوله مغزی سیار [۹]

به‌طور کلی از مهم‌ترین دلایل شکست مکانیکی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:



ترد و شکننده تبدیل می‌شود. همچنین سرعت خوردگی لوله مغزی سیار در فرایند اسیدکاری چاه‌های حاوی گاز ترش ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از چاه‌های گاز شیرین است. خوردگی حفره‌ای یکی از دیگر مکانیزم‌های خوردگی در لوله مغزی سیار است. این خوردگی موجب ایجاد حفره‌های ریزی در سطح تیوب شده و موجب کاهش ضخامت آن می‌شود. این نوع خوردگی شدیداً موضعی است [۷]. یکی دیگر از مکانیزم‌های خوردگی مؤثر در لوله مغزی سیار

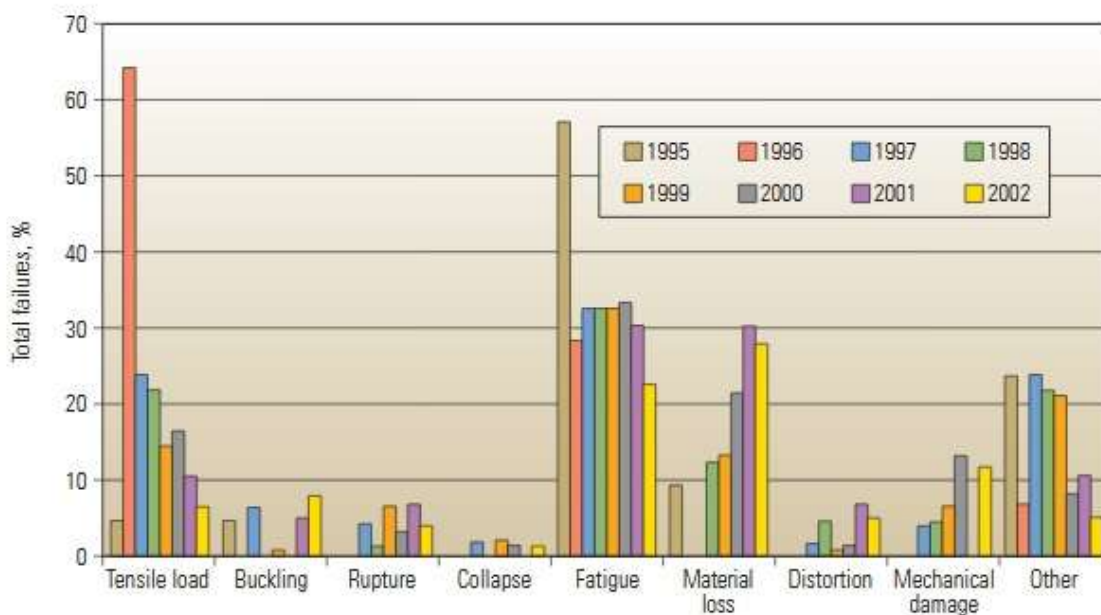
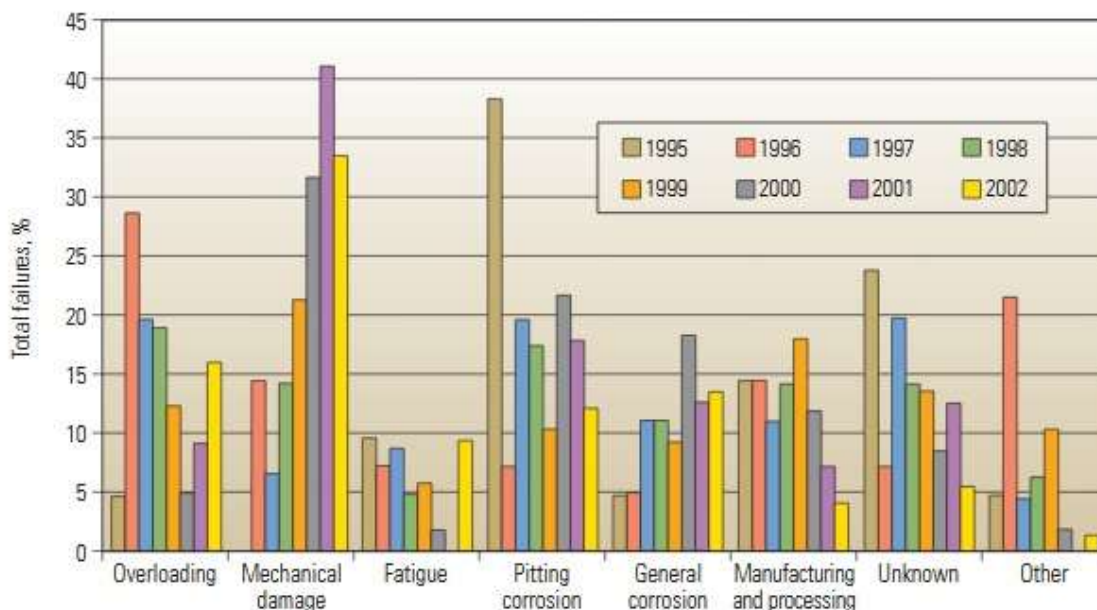
خوردگی تحت تنش است. هر کدام از انواع خوردگی موضعی را که تحت تنش مکانیکی قرار گیرند را خوردگی تنش گویند، به عبارت دیگر از ترکیب بین دو اثر مکانیکی و شیمیایی این خوردگی به وجود می‌آید. به‌طور کلی تشکیل حفره‌های خوردگی و رشد ترک‌های خستگی ناشی از خم و راست شدن تیوب در قرقره و گردن‌های بافت کاهش ضخامت لوله شده و در نتیجه قادر به تحمل نیروهای وارده نخواهد بود و دچار شکست می‌شود [۷].



شکل ۱۰. خوردگی حفره‌ای ایجاد شده بر سطح لوله مغزی سیار

نتیجه هشت سال تحقیق و آنالیز مکانیزم‌های شکست بر روی لوله مغزی سیار فهم تازه‌ای از رفتار و عیب‌های لوله مغزی سیار ایجاد کرده است که این امر منجر به تولید دستگاه‌ها و برنامه‌های مدیریت و پایش لوله مغزی سیار شده است. در یکی از تحقیقات که توسط شرکت شلمبرجر

انجام شد، از لوله مغزی‌های بین ۲ تا ۳/۶ اینچ بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲ نتایجی به‌دست آمد که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. با پایش وضعیت لحظه‌ای لوله مغزی سیار می‌توان از اتفاقات ناخوشایند در حین عملیات جلوگیری کرد و ایمنی دستگاه لوله مغزی سیار را بالا برد.



شکل ۱۱. علت و دلایل خرابی و مکانیزم‌های شکست در لوله مغزی سیار [۱]

#### ۴. روش‌های مختلف بازرسی و پایش وضعیت

##### دستگاه لوله مغزی سیار

یکی از پارامترهای مهم جهت انجام عملیات موفق دستگاه لوله مغزی سیار پایش وضعیت لحظه‌ای آن است که با این تکنولوژی می‌توان به‌طور لحظه‌ای مشخصات تیوب از جمله بیضوی شدن، ضخامت تیوب و ترک‌های احتمالی را بررسی کرده و اقدامات پیشگیرانه برای آن در نظر گرفت.

با پیشرفت روش‌های بازرسی به ویژه بازرسی و تست غیرمخرب امروزه می‌توان تجهیزات را به صورت آنلاین و بدون تماس و خرابی تجهیز بازرسی کرد. دستگاه‌های لوله مغزی سیار با پیشرفته‌ترین روش‌های تست غیرمخرب NDT مورد بازرسی لحظه به لحظه قرار می‌گیرند و نتایج بررسی‌ها مورد تفسیر قرار می‌گیرد. سه روش مورد استفاده در تست و پایش وضعیت لوله مغزی سیار عبارتند از:

## ۱-۴. روش فراصوتی (UT)

در این روش امواج فراصوت با بسامد بالا و با دامنه کم به داخل قطعه فرستاده می‌شوند. این امواج پس از برخورد به هر گسستگی بازتابیده می‌شوند و قسمتی از این امواج به سمت حسگر رفته و حسگر آن را دریافت می‌کند. از روی دامنه و زمان بازگشت این امواج می‌توان به مشخصه‌های این گسستگی پی برد. از کاربردهای این روش می‌توان به اندازه‌گیری ضخامت و تشخیص عیوب موجود در قطعات نام برد [۱۰]. در شکل ۱۲ تصویر دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای با روش مافوق صوت (آلتراسونیک<sup>۴</sup>) نمایش داده شده است.



شکل ۱۲. دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای لوله مغزی سیار با روش آلتراسونیک (ARGUS)

## ۲-۴. روش نشت شار مغناطیسی (MFL)

تصویربرداری مغناطیسی از سطوح فلزی توسط حسگرهای میدان مغناطیسی یک تکنیک پرکاربرد در تست غیرمخرب سطح برای تشخیص وجود نقص در نمونه‌های فلزی است. در میان تکنیک‌های تصویربرداری مغناطیسی، روش تست نشت شار مغناطیسی یک روش پرکاربرد در تست غیرمخرب سطوح فلزی فرومغناطیسی همانند لوله‌های انتقال و مخازن ذخیره نفت و گاز است. در این روش نمونه فرومغناطیس توسط آهن‌ربای دائمی و یا یک سیم‌پیچ تا نزدیکی ناحیه اشباع مغناطیده می‌شود. وجود هرگونه

نایبوستگی در ماده مانند ترک، موجب تغییر موضعی شار نشتی در محل ترک می‌شود. توزیع و شدت شار نشتی اطلاعات مفیدی درباره موقعیت و ابعاد ترک با خود به همراه دارد. این شار نشتی توسط یک حسگر مغناطیسی قابل اندازه‌گیری است. خواص حسگر مغناطیسی بر توانایی سیستم تست در تشخیص ترک‌ها و خوردگی‌ها با ابعاد مختلف بسیار مؤثر است [۱۱]. در شکل ۱۳ تصویر دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای با روش نشت شار مغناطیسی نمایش داده شده است.



شکل ۱۳. دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای لوله مغزی سیار با روش نشت شار مغناطیسی (ACIM)

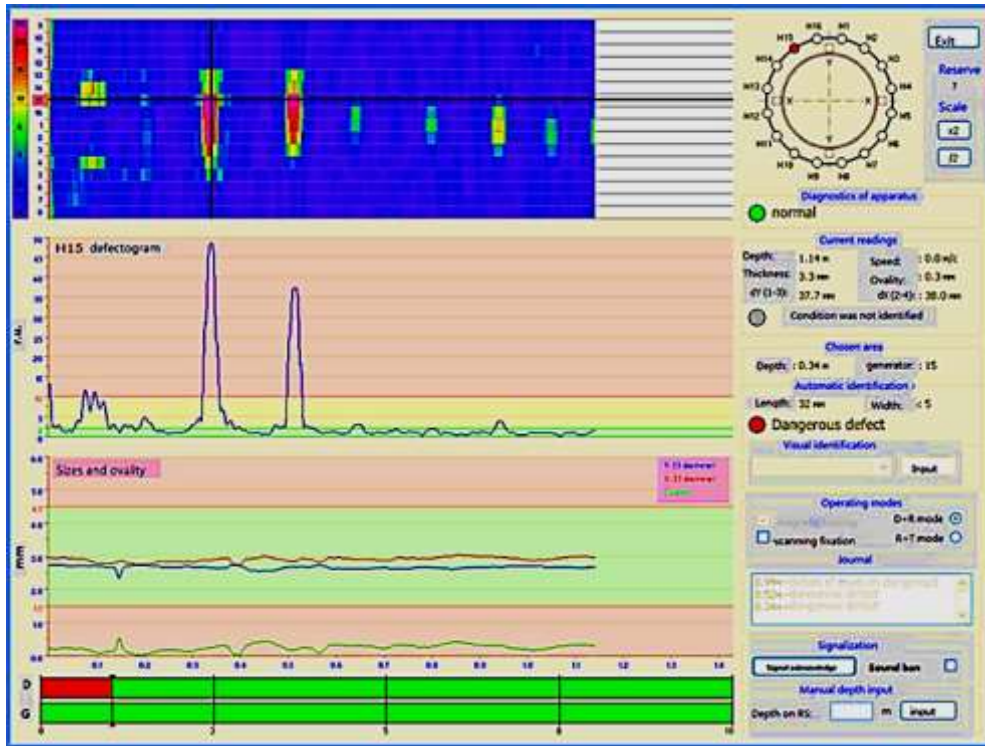
## ۳-۴. روش ادی کارنت<sup>۵</sup> (ECT)

در این روش با استفاده از یک میدان مغناطیسی متغیر در یک ماده رسانا جریان الکتریکی گردابی القا شده و جریان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. وجود گسستگی‌هایی مانند ترک در ماده باعث ایجاد وقفه در این جریان می‌شود و به این روش می‌توان به وجود چنین عیبی پی برد. در ضمن مواد مختلف دارای رسانایی الکتریکی نفوذپذیری متفاوتی هستند. بنابراین می‌توان بعضی از مواد را با این روش رده‌بندی نمود.

در شکل ۱۶ تصویر دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای با روش ادی کارنت نمایش داده شده است. یکی از مهم‌ترین و باکیفیت‌ترین دستگاه‌های پایش وضعیت لحظه‌ای لوله مغزی سیار که با استفاده از روش

مغزی سیار در یکی از حوزه‌های نفتی کشور روسیه در  
 شکل  
 ۱۴ نشان داده شده است.

ECT کار می‌کند دستگاه DCT است که نتایج حاصل از  
 پایش لوله



(الف)



(ب)



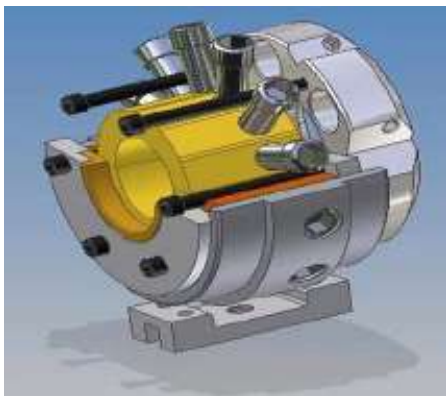
شکل ۱۴. نتایج حاصل از اندازه‌گیری دستگاه DCT در کشور روسیه. الف) مود عیوب و بیضی شکل شدن ب) مود ضخامت و بیضی شکل شدن

مشخص است تشخیص ترک‌ها و عیوب مکانیکی ناشی از خوردگی در حالتی که سنسورها دارای اثر بایاس مغناطیسی هستند، نسبت به زمانی که اثر بایاس مغناطیسی وجود ندارد، بسیار دقیق‌تر و دارای حساسیت بهتری است.

شکل ۱۵ نتایج خروجی از دستگاه DCT برای یک نمونه فولاد که بر روی آن عیوبی به‌وجود آمده است را در دو حالت با در نظر گرفتن بایاس مغناطیسی و بدون تأثیر بایاس مغناطیسی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل



شکل ۱۶. دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای لوله مغزی سیار با روش ادی کارنت (DCT)

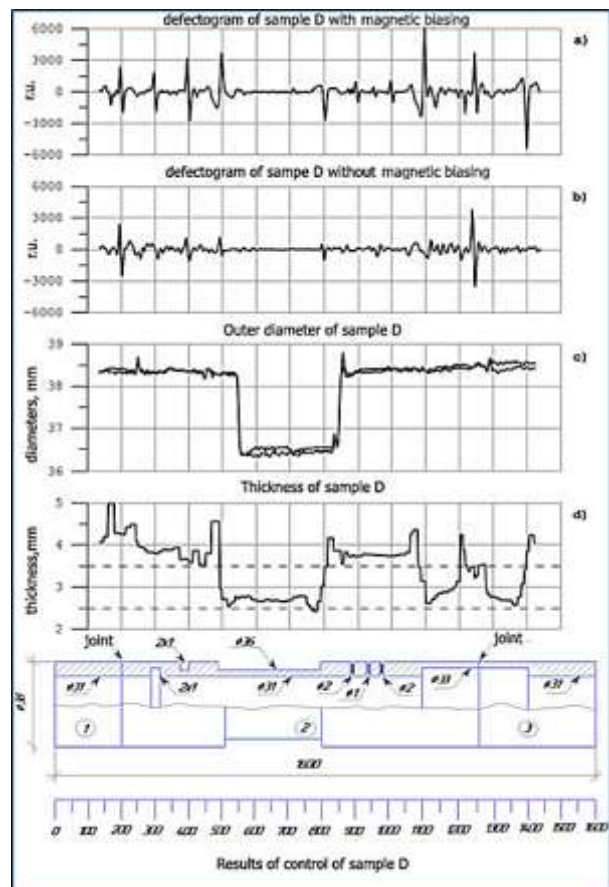


شکل ۱۷. مدل‌سازی دستگاه پایش وضعیت لوله مغزی سیار با ۱۲

سنسور آلتراسونیک [۱]

لوله مغزی سیار را اندازه‌گیری می‌کند. در شکل ۱۷ مدل‌سازی دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای نشان داده شده است.

محل قرارگیری دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای بعد از قرقه قرار دارد که در شکل ۱۸ نمایش داده شده است.



شکل ۱۵. نتایج خروجی دستگاه DCT برای تشخیص عیوب و

ضخامت و قطر خارجی یک تیوب نمونه

با پیشرفت تکنولوژی این دستگاه‌ها توسعه یافته‌اند و می‌توانند با تکنولوژی آلتراسونیک و ادی کارنت و نشت شار مغناطیسی پارامترهای کلیدی جهت تخمین عمر لوله را به‌دست آورند. این سیستم به شکل آنالین و در حین عملیات پارامترهایی از جمله ضخامت و بیضی شکل شدن



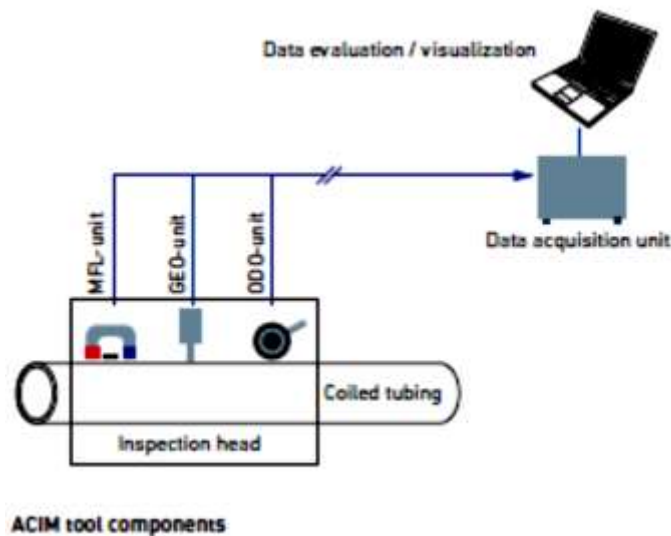


شکل ۱۸. محل قرار گرفتن دستگاه جهت اندازه‌گیری به صورت آنلاین در خروجی قرقره

بخش‌های مختلف این دستگاه‌ها شبیه به یکدیگر هستند و شامل بخش‌های زیر است که در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.

- ۱- GEO unit
- ۲- ODO unit
- ۳- GEO-ODO sensor cable
- ۴- DAC

این سیستم می‌تواند در بالا بردن مدت زمان استفاده از لوله‌ها بیشتر از زمان مشخص شده در استانداردهای رایج لوله مغزی سیار (که حدود ۱۰۰ کیلومتر است) و همچنین استفاده بهینه از لوله‌ها نقش به‌سزایی داشته باشد. با بهره‌گیری از این سیستم و تکنولوژی شار مغناطیسی (MFL) و یا سیستم آلتراسونیک برشی<sup>۶</sup> و روش ادی کارنت، می‌توان محل ترک‌ها و محل خوردگی را با دقت بالا و به شکل سه بعدی مشخص کرد. اساس کار و



شکل ۱۹. بخش‌های مختلف دستگاه پایش وضعیت [۱۱]

- مشخصات پروژه: پایش وضعیت دستگاه‌های لوله مغزی سیار به ظرفیت ۲۰۲۰۰۰۰۰ متر (معادل ۵۰٪ ظرفیت بازار)
- دوره خرید، نصب و راه‌اندازی: ۶ ماه
- دوره بهره‌برداری: ۵ سال
- نرخ تنزیل ارزش پول (مورد انتظار): ۲۸٪ (نرخ تنزیل برای پروژه براساس نرخ‌های بازگشت سرمایه مربوط به صنایع نفت و گاز و پتروشیمی در نظر گرفته شده است و نرخ تنزیل برای سرمایه‌گذاران با توجه به نرخ بهره بانکی و اوراق مشارکت به فروش رفته معمول در کشور در نظر گرفته شده است).
- نرخ تورم متناسب با پیش‌بینی سال ۱۳۹۶: ۹/۶٪
- استهلاک: ۱۰٪، عمر تجهیزات ۲۵ سال
- قیمت تمام شده خدمات به‌طور میانگین برای ۵ سال بهره‌برداری (ریال): ۱۸۵.۴۰۶ برای هر متر
- قیمت فروش خدمات به‌طور میانگین برای ۵ سال بهره‌برداری (ریال): ۴۰۶.۲۳۴ برای هر متر
- نرخ برابری ارز در سال ۱۳۹۶: ۳۵.۵۰۰ ریال
- هزینه‌های ثابت سرمایه‌گذاری

دستگاه‌های پایش و مانیتورینگ وضعیت لوله مغزی سیار با نام‌های زیر به شکل تجاری ارائه شده است که دارای معایب و مزایای متفاوتی هستند:

تعداد ACIM, ARGUS, Coil Scan, DCT سنسورهای مورد استفاده به قطر لوله و میزان دقت مورد نظر بستگی دارد.

## ۵. بررسی و تحلیل اقتصادی استفاده از دستگاه

### پایش وضعیت لوله مغزی سیار

در این بخش از مقاله، فرایند مالی طرح پایش وضعیت لوله مغزی سیار با ظرفیت اسمی ۲۰۲۰۰۰۰۰ متر مدل‌سازی شده است.

در واقع هدف، درک این موضوع است که آیا انجام پایش وضعیت دستگاه‌های لوله مغزی در ایران برای شرکت‌های ارائه دهنده خدمات چاه بازدهی اقتصادی مناسب دارد یا خیر؟

### ۱-۵. پیش فرض‌ها

استفاده نمود. همچنین باید دقت کرد که قیمت فروش خدمت پایش وضعیت سال اول، ۳۳۰۰۱۰ دلار و برای چهار سال پایانی، ۱۵۴۰۰۲۶ دلار مطابق قیمت فعلی بازار است. جدول ۱ درآمد ناشی از ارائه خدمات پایش وضعیت را نشان می‌دهد.

جدول ۱. محاسبه خدمات ارائه شده به دلار (مأخذ: محاسبات تحقیق)

مقدار به دلار		توان تولید	سال بهره‌برداری
درآمد سالیانه	درآمد سالیانه		
درآمد سالیانه	درآمد سالیانه		
بانرخ تنزیل ۲۸٪	$R_{Ai}$		
۲۵۶۱۳۲۸۰۰	۳۵۵۷۴۰۰۰۰	۳۳۰۰	۱
۵۴۷۲۷۹۹۲۰	۷۶۰۱۱۱۰۰۰	۵۵۰۰	۲
۹۳۴۸۱۱۹۴۸	۱۲۹۸۴۴۷۱۵۰	۷۷۰۰	۳
۱۳۲۰۵۵۶۵۴۵	۱۸۳۴۱۰۶۳۱۳	۹۷۰۰	۴
۱۶۵۹۷۶۶۹۲۸	۲۳۰۵۲۳۱۸۴۴	۱۱۰۰۰	۵
۴۷۱۸۶۱۸۱۴۱	۶۵۵۳۶۳۶۳۰۶	۳۷۲۰۰	جمع

**۲-۵. تخمین حجم تولید، درآمد و برنامه فروش**  
در محاسبات اقتصادی طول دوره بهره‌برداری از این دستگاه حدود ۵ سال است. نظر به عمر تجهیز (۲۴ سال) می‌توان پس از بهره‌برداری ۵ ساله، در محل دیگری از آن

برای تحلیل اقتصادی در سال پایه، از رابطه ۲ استفاده می‌کنیم [۱۲]:

$$R_{P,total} = -C_{c,Real} + \sum (R_{A,i} - C_{repair})_i \quad (2)$$

که در رابطه بالا  $R_{A,i}$  بیانگر سال می باشد درآمد سالیانه با در نظر گرفتن نرخ تنزیل و لازم به ذکر است در این جا در هر سال، درآمد با سال دیگر به دلیل استهلاک متفاوت خواهد بود؛ پس در رابطه‌ی بالا برای هر سال باید درآمد همان سال را قرار داد. از طرفی باید هزینه‌های تعمیر و نگهداری سالیانه  $C_{repair}$  را با در نظر گرفتن نرخ تورم سالیانه، بررسی نماییم. در جدول ۲، درآمد هر سال با در نظر گرفتن مقدار تنزیل پول و نرخ تورم آورده شده است (البته فرض شده است که قیمت ارائه خدمات با تورم افزایش نیابد و تأثیر تورم تنها بر هزینه‌های جاری باشد؛ همچنین فرض شده است تورم با نرخ ۹/۶٪ همچنان ثابت بماند).

### ۳-۵. هزینه‌های جاری

هزینه‌های بهره‌برداری سالیانه شامل هزینه‌های بازرسی، نظارت و تعمیرات و نگهداری، برابر با ۳٪ کل هزینه تجهیز در نظر گرفته شده است. در این صورت هزینه‌ی جاری بازرسی، نظارت و تعمیرات و نگهداری (بدون در نظر گیری تورم) برابر است با: ۸۵۵۲۸.۴۷ دلار که در هر سال با توجه به نرخ تورم، این مقدار تغییر می‌کند.

### ۴-۵. محاسبه‌ی سود

$C_c$  هزینه‌ی اول (خرید) در سال پایه است. اگر هزینه‌ی خواب سرمایه را برای آن ۶ ماهی که نصب و راه‌اندازی طرح طول می‌کشد حساب نماییم، باید نرخ سود بانکی که عدد ۲۰٪ در سال است را به سرمایه‌ی اولیه اضافه نماییم. در واقع مانند آن است که ۱/۲۰ مقدار سرمایه اولیه، سرمایه‌گذاری کرده باشیم. پس همانند رابطه ۱ داریم:

$$C_{c,Real} = 1.20 \times 171685 = 206022\$ \quad (1)$$

جدول ۲. درآمد و هزینه‌ی هر سال با در نظر گرفتن مقدار تنزیل پول و تورم به دلار (مأخذ: محاسبات تحقیق)

سال بهره‌وری	$R_{A,i}$	$C_{repair}$	سود سالیانه ( $R_{A,i} - C_{repair}$ )
۱	۲۵۶۱۳۲۸۰۰	۱۵۰۰۰	۲۵۶۱۱۷۸۰۰
۲	۵۴۷۲۷۹۹۲۰	۱۳۵۰۰	۵۴۷۲۶۶۴۲۰
۳	۹۳۴۸۸۱۹۴۸	۱۳۶۵۰	۹۳۴۸۶۸۲۹۸
۴	۱۳۲۰۵۵۶۵۴۵	۱۳۶۳۵	۱۳۲۰۵۴۲۹۱۰
۵	۱۶۵۹۷۶۶۹۲۸	۱۳۶۳/۵	۱۶۵۹۷۵۳۲۹۲
جمع	۴۷۱۸۶۱۸۱۴۱	۲۱۹۴۲۱/۵	۴۷۱۸۳۹۸۷۲۰

$$ROR = \frac{\sum_{i=1}^5 (R_{A,i} - C_{m,i})}{m \times C_{c,Real}} \quad (۵)$$

که در رابطه ۵ مقدار  $C_{m,i}$  بیانگر هزینه نگهداری می‌باشد.

$$ROR = \frac{۱۰۳۳۱۴۲۲۰}{۹۳۴۸۶۸۲۹۸} = ۰.۱۴$$

این عدد به این معنا است که در دو سال نخست ۸۴٪ از سرمایه‌ی اولیه باز می‌گردد. بنابراین برای محاسبه‌ی دوره بازگشت سرمایه داریم:

$$\text{payback per iod} = \frac{100}{84} = 1.19 \text{ year} \quad (۶)$$

این بدین معناست که مقدار هزینه‌ای که سرمایه‌گذار جهت خرید، نصب و راه‌اندازی ابتدایی دستگاه پایش وضعیت داشته است، در مدت یک سال و یک ماه و نه روز به وی باز می‌گردد.

## ۵-۶. محاسبه‌ی نقطه سر به سر

هدف اصلی از تحلیل نقطه سر به سر، تعیین حداقل خروجی ممکن برای رسیدن به سوددهی است. همچنین این کار بر بازاریابی هم تأثیر می‌گذارد. هر شرکتی باید بتواند بهترین میزان خروجی (ایده‌آل خود) را محاسبه کند تا بتواند میزان فروش و درآمدی که برای رسیدن و عبور کردن از نقطه سر به سر نیاز دارد را برای اطمینان از بقای

قیمت فروش مستهلک شده‌ی دستگاه پایش وضعیت، ۳۰٪ قیمت اولیه آن معادل ۴۵۰۰۰ دلار ۳۶۰۰۰۰۰۰۰ ریال است. که می‌تواند طبق رابطه ۳ به سال پایه بازگردد.  $P_p$  و در رابطه به ترتیب بیانگر قیمت فعلی دستگاه پایش وضعیت (بازگردانده شده از آینده) و آینده است [۱۳].

$$P_p = \frac{P_f}{(1+i)^n} \quad (۳)$$

که در آن  $i$  بیانگر نرخ بهره و  $n$  بیانگر سال می‌باشد. پس ارزش پول دستگاه پایش وضعیت در سال فعلی عبارت است از:

در نتیجه؛ مقدار کل سود تبدیل یافته به سال پایه، مجموع ۴۷۱۸۳۹۸۷۲۰ و ۱۰۴۷۷۳۷۸۹۶ دلار است که باید هزینه سرمایه‌گذاری ۵۴۶۰۹۴۴.۵ از آن کسر گردد. یعنی مطابق تحلیل‌های سال پایه ۱۰۴۲۲۷۶۹۵۲ سود نصیب سرمایه‌گذار خواهد شد.

## ۵-۵. محاسبه‌ی نرخ و زمان بازگشت سرمایه

برای محاسبه‌ی نرخ بازگشت سرمایه (ROR) از رابطه ۵ استفاده می‌کنیم. باید دقت شود با توجه به اعداد، بازگشت سرمایه در سال دوم از آغاز بهره‌برداری صورت می‌گیرد [۱۳].

کسب و کار خود به دست آورد. اگر شرکتی نتواند به این سطح برسد، معمولاً نمی‌تواند به کارش ادامه دهد. نقطه سر به سر، مورد خاصی در فروش و درآمد هدف، زمانی است که درآمد هدف صفر است. این نکته برای تحلیل‌های مالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا، هر فروشی که بعد از نقطه سر به سر اتفاق می‌افتد منجر به سوددهی می‌شود. برای محاسبه نقطه سر به سر از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۲]:

$$\text{Break-even point} = \frac{\text{fixed cost}}{\text{sale} - \text{variable cost}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Break-even point} = 5$$

با توجه به پایین بودن مقدار محاسبه برای نقطه سر به سر مشخص می‌گردد که ریسک سرمایه‌گذاری در این پروژه بسیار پایین می‌باشد. با توجه به دوره‌ی خوب بازگشت سرمایه و نقطه سر به سر پایین باید گفت این طرح از بازدهی بالا و ریسک پایین برخوردار است.

## ۶. نتیجه‌گیری

## ۷. مأخذ

از آنجایی که تیوب‌های دستگاه لوله مغزی سیار به‌طور هم‌زمان در معرض خوردگی و بارهای مکانیکی قرار دارند؛ ابتدا دچار خوردگی موضعی نظیر خوردگی حفره‌ای شده و سپس با توجه به تمرکز تنش حاصل شده توسط خوردگی به واسطه یکی از مکانیزم‌های خوردگی-خستگی یا خوردگی تنشی دچار ترک‌خوردگی شده و دچار شکست می‌شوند. در نتیجه با تحلیل فنی و اقتصادی می‌توان موارد زیر را ارائه داد:

۱- در مطالعه اقتصادی مشاهده شد که بازگشت سرمایه در حدود یک سال و یک ماه و نه روز و در دو سال نخست، به‌طور میانگین، هر سال ۸۴٪ از سرمایه‌ی اولیه باز می‌گردد.

۲- با استفاده از پایش وضعیت لوله مغزی سیار می‌توان از شکست ناگهانی تیوب‌ها جلوگیری کرد. با توجه به مشخص شدن زمان شروع ترک خستگی با دستگاه پایش وضعیت لحظه‌ای، می‌توان در بالا بردن مدت زمان استفاده از لوله‌ها بیشتر از زمان مشخص شده در استانداردهای رایج لوله مغزی سیار و همچنین استفاده بهینه از لوله‌ها از این دستگاه استفاده کرد.

[1] Afghoul, A., Sridhar Amaravadi, Abderrahmane Boumali, J. Calmeto, Joe Lima, John Lovell, Scott Tinkham, Kean Zemlak, and Timo Staal. "Coiled tubing: the next generation", *Oilfield Review* 6, no.4, 1994, pp. 9-23.

[۲] جلیلی، م.، ش. مرادی، "بررسی رچتینگ دو محوری در لوله مغزی سیار"، هفدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، ۱۳۸۸، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

[3] Li, Y. Q., X-L. Gao, L. D. Ni, Q. F. Hu, and Y. A. Xin. "Fatigue of Coiled Tubing and its Influencing Factors: A Comparative Study," *ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2016, pp. V009T12A081-V009T12A081.

[4] Tipton, Steven M. "Multiaxial plasticity and fatigue life prediction in coiled tubing", *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques: 3rd Volume*. ASTM International, 1996.

[5] Shaohu, Liu, Xiao Hui, Guan Feng, Jiang Qifeng, Wu Jiwei, and Yang Ting. "Coiled tubing failure analysis and ultimate bearing capacity under multi-group load", *Engineering Failure Analysis*, no.79, 2017, pp.803-811.



[6] Luft, H.B., "Coiled Tubing Inspection: Value, Limitations, Industry Requirements," *Presentation at ICoTA Canada Lunch and Learn*, April 13, 2011.

[۷] عادل‌زاده، م.، "خوردگی در صنایع نفت گاز و پتروشیمی و روش مقابله"، کتاب آوا، ۱۳۹۲.

[8] Tipton, S.M., "Why Coiled Tubing Works and How to Make Sure it Works on Your Job," *Society of Petroleum Engineers Distinguished Lecturer Program*, 2010.

[9] Qin, Xing, Deli Gao, and Yongsheng Liu. "Dynamic Analysis on Unbuckling Process of Helically Buckled Coiled Tubing While Milling Plugs", *Journal of Energy Resources Technology*, vol.140, no.9, 2018, pp.092902.

[10] ZhaoMing, Zhou, Shi TaiHe, Yu Runqiao, and Wan Fu. "A New Approach to In-Service Coiled Tubing Improved Inspection Based Micro-Magnetic Technology," *SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition*, 2015.

[11] ROSEN-Group, "Coiled Tubing Inspection Service (ACIM) Real-time monitoring for safe operation", 2014.

[۱۲] اسکونژاد، م.م.، "اقتصاد مهندسی ارزیابی اقتصادی پروژه‌های صنعتی"، دانشگاه امیرکبیر ۱۳۸۹.

[۱۳] احمدی صدیق، ح. ر.، حقیقی خوشخو، "کاربرد توربو اکسپندر در خطوط لوله ی گاز؛ بررسی فنی-اقتصادی استفاده از توربو اکسپندر به منظور بازیافت انرژی مصرف شده در خطوط لوله ی گاز"، بیست و نهمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۹۳.

پی‌نوشت:

1. Ratcheting
2. RED DEER
3. Morphology
4. Ultrasonic
5. Eddy Current Testing
6. Ultrasonic Shear