یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

مروری عملیات توپک رانی در خطوط لوله انتقال نفت و گاز

Review of Pigging Operation in Oil and Gas Transportation Pipe lines

دکتر مهدی بهاری مقدم(نویسنده مسئول)[۱]، حسین یعقوبی[۲]

[۱] عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت نفت اهواز Bahari@put.ac.ir

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت نفت اهواز yaghoubi.hosseinnn@gmail.com

چکیده

با توجه به هزینه های کلان در صنعت نفت در تمام جنبه ی توسعه از اکتشاف تا بهره برداری امروزه نگاه ویژه ای به بالا بردن بهره وری در تمام مراحل به وجود آمده است. بخش انتقال نفت و گاز و مشتقات نفتی از مبحث بهره وری مستثنی نبوده و بالا بردن بازدهی در آن همواره مورد توجه بوه است. توپک رانی که در ابتدا برای پاکسازی رسوبات آلی در لوله های نفتی و میعانات در لوله های انتقال گاز شناخته می شد امروزه پس از گذراندن یک روال تکاملی وظایف متنوعی را بر عهده دارد تا جایی که امروزه آن را توپکرانی هوشمند می نامند. استفاده از توپکهای هوشمند در بالا بردن بهره وری در صنعت نفت و گاز و پایین آوردن هزینه نگهداری ضروری و اجتناب ناپذیر است. این نوع از توپک رانی از تکنیک های متنوع مهندسی بهره می برد و وظایف مختلفی را انجام می دهد. در این مقاله به بررسی عملیات توپک رانی و توپک های هوشمند پرداخته شده است تا جوانب مختلف مورد واکاوی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی

توپکرانی، توپکرانی هوشمند، بهره وری در صنعت نفت و گاز، خطوط لوله انتقال نفت و گاز

مقدمه

صنعت نفت به سه بخش عمده تقسیم می شود.

بخش بالا دستی

بخش میان دستی

بخش پایین دستی

بخش میان دستی صنعت نفت شامل انتقال (خط لوله، راه آهن و ماشین های تانکر)، بارگیری و بازار فروش محصولات نفت می شود. خطوط لوله می تواند از نقطه آغازین تولید نفت خام تا پالایشگاه تا توزیع محصولات نفتی تا توزیع کننده های پایین دستی صنعت نفت باشد [1] .

ضمن اینکه خطوط لوله انتقال، مبالغ قابل توجهی را از طرف شرکت ها به خود صرف می کنند، نقش راهبردی برای دولت ها و ملت ها به همراه دارند و همچنین به عنوان روشی مفید و مقبول برای انتقال سیالات شناخته می شوند. برای مراقبت از این سرمایه گذاری قابل توجه از توپکرانی به عنوان یک روش مورد توجه استفاده می شود. امروزه لوله ها به دلایل مختلفی مرود توپکرانی قرار می گیرند و تجهیزات توپکرانی توسط مهندسین برای اهداف متنوعی به کار گرفته می شوند [2].

سیستم لوله های انتقال یک راهکار ارزان و ایمن برای انتقال هیدروکربن های مایع و گاز و دیگر سیالات برای مسیرهای طولانی است. بعد از ساخت لوله ها نگه داری صحیح آنها ضروری و مهم است تا ضمن بالا بردن طول عمر لوله و تجهیزات نصب شده راندمان لوله نیز در حد مطلوب باقی بماند چرا که لوله ها تمایل دارند رسوباتی مانند گرد و غبار و پارافین را نگهداری کنند [3].

توپک رانی راندن یک وسیله توپی شکل و یا استوانه ای در داخل لوله است که با فشار اعمالی یا فشار جریان سیال و یا به صورت مکانیکی به حرکت در می آید و برای اهداف خاصی مانند پاکسازی، بررسی و بازرسی و یا توزیع ممانعت کننده ها در داخل لوله به کار گرفته می شود[2].

تعریف معمول از توپکرانی عبارت است از نیرویی که در داخل لوله به یک توپک اعمال می شود تا فعالیت های خاصی را انجام دهد. در این عملیات محتویات به وسیله توپک به سمت جلو حرکت داده می شود تا مواد باقیمانده در لوله پاکسازی شود. توپک رانی به پاک کردن مایعات کمک می کند. که این موضوع باعث بهبود عملکرد لوله و پایین آوردن افت فشار می شود. قطر توپک از قطر لوله بزرگ تر است و همین موضوع باعث آب بندی لوله می شود و نیروی محرکه گاز یا مایع می تواند به صورت یک پیشران باشد [4]. برای بهبود عملیات از گاز نیتروژن نیز استفاده می شود [11].

عملیات توپک رانی عملیاتی گران قیمت است. برآوردها نشان می دهد نظارت و بازرسی لوله ها به وسیله توپک می تواند به ازای هر کیلومتر پنجاه و شش هزار دلار هزینه داشته باشد. با توجه به این موضوع که حدود یک چهارم لوله ها قابل توپک رانی نیستند می شود به این نتیجه رسید که شرکت ها سالانه ۱۰۵ میلیارد دلار برای عملیات توپک رانی هزینه صرف می کنند. این هزینه با توجه به اینکه از در آمد خالص سالانه بسیاری از کشور ها بالاتر است کاملاً قابل توجه است. این عملیات فرآیندی پیچیده است و ضروری است که به نحوی طراحی شود که ایمنی، سلامت و محیط مورد توجه قرار گیرند. گروه اجرایی ساعت ها برای انجام این عملیات آموزش می بینند[7]. در واقع به همین دلیل است که توپک رانی در زمان هایی توصیه می شود که راهکاری به جز این عمیات وجود نداشته باشد [10].

توپک با گاز متراکم که معمولاً هوای فشرده است و یا آب و یا دیگر سیالاتی که خاصیت تمیز کنندگی داشته باشند حرکت داده می شود. توپک زمانی بیشترین بازدهی را دارد که با سرعت ثابت حرکت داده شود و در حالت هایی که سرعت بالایی داشته باشد تاثیر آن کمتر خواهد بود.

برآورد زمان توپکرانی بسیار حائز اهمیت است چرا که به کاربر زمان رسیدن توپک به انتهای لوله را می دهد. دانستن زمان رسیدن توپک این اختیار را به شخص طراح می دهد که سرعت توپک را قبل از رسیدن تنظیم کند [4].

معمولاً مقالات بسیار کمی در مورد بررسی علمی توپک انجام شده است و نتایج غالباً از روش داده های میدانی به دست آمده است. در جدول شماره ۱ به برخی از این تحقیقات اشاره شده است[4].

جدول شماره ۱	
اولین بررسی ها را در مورد توپک رانی انجام دادند که استفاده از حالت پایدار برای محاسبه Hold-up و افت فشار را مورد بررسی قرار دادند.	McDonald and Baker
از منظر دینامیک عملیات توپک رانی را مطالعه کردند.	Minami and Shoham
با فرض تراکم ناپذیر بودن سیال و پایدار بودن رژیم جریان مسئله توپک سازی را ساده سازی کردند.	Azevdo et al - 2001
توپکرانی در جریان گاز طبیعی را مورد مطالعه قرار دادند و یک روش پیشنهادی برای حل آن ارائه کردند.	Nguyen et al-2001a
یک مدل دینامیکی را مورد مطالعه قرار داند و یک آنالیز از حرکت توپک در انحراف ۹۰ در سیال تراکم پذیر و جریان ناپایدار پیشنهاد کردند.	Nguyen et al-2001b

تاریخچه توپک رانی

اولین استفاده از توپک به حدود سال ۱۸۷۰ باز می گردد زمانی که نفت را با ابتدایی ترین حالت و با استفاده از حیوانات بارکش انتقال می دادند. سرما و شرایط جوی نا مساعد فرآیند انتقال را سخت و گاهی غیر ممکن می کرد. بنابراین تصمیم بر آن شد که با استفاده از لوله این انتقال صورت بپذیرد. در انتقال با لوله به مرور مشکلی جدی به و وجود آمد و آن کم شدن ظرفیت انتقال لوله ها بود که برای جبران این پدیده فشار پمپ رو به افزایش داشت. این پدیده تازه کشف شده به علت تجمع رسوبات در داخل دیواره لوله حادث شده بود. برای برطرف نمودن این مشکل بعد از امتحان کردن روش های مختلف در نهایت با فرستادن پارچه مچاله شده به درون خط لوله نتایج مثبت و دلگرم کننده بود، بعد از مدتی به جای پارچه از چرم استفاده شد که هنگام حرکت خاصیت آب بندی را نیز دارا بود و به پاکسازی بهتر کمک می کرد.. این موضوع به تدریج مورد توجه قرار گرفت و به شکل امروزی و کاربردهای متنوع تر و بیشتری رسید [2].

تاریخچه مختصر توپک رانی هوشمند در جدول شماره ۲ آورده شده است [2]:

اولین توپک تجاری با تکنیک MFLتوسط شرکت Tuboscope	۱۹۶۴
توپک تکامل یافته MFL توسط شرکت Tuboscope	1966
توپک MFL با وضوح پایین توسط سایر شرکت ها	1971
اولین MFL با وضوح بالا توسط شرکت British Gas	1978
معرفی توپک MFL با وضوح بالا توسط سایر شرکت ها	1986-1996

اولین توپک فراصوت با استفاده از تکنیک فراصوت برای خوردگی در خطوط مایع	۱۹۸۶
ساخت اولین نمونه توپک با استفاده از تکنیک فراصوت برای ترک خوردگی	۱۹۹۲
بهبود در توپک های معرفی شده در سال ۱۹۹۲ به صورت چرخ دار	۱۹۹۳ تا به امروز
توپک های با خروجی کاهش یافته	۱۹۹۷
توپک های مختص آسیب های مکانیکی	۱۹۹۷ تا به امروز
اولین توپک محیطی با استفاده از MFL	۱۹۹۸ تا به امروز

چه وقت توپک رانی انجام می دهیم؟

توپک رانی دارای چندین کاربرد مختلف است:

- پاکسازی، جداسازی محصولات داخل لوله و یا پاکسازی از آب.

این امور معمولاً با توپک انجام می شود که شامل تمیزسازی، اندازه گیری که برای بهره برداری از خط لوله استفاده می گردد [2]. این مواد رسوب کرده به چند دلیل باید پاک شوند:

اول آنکه از آلودگی سیالات انتقالی جلوگیری به عمل آید چرا که از نظر اقتصادی نتایج سوء دارد.

دوم برای استفاده بهتر از ممانعت کننده ها در لوله که در صورتیکه سطح لوله پوشیده شده باشد یا دچار خوردگی شود از عملکرد ممانعت کننده ها کاسته می شود.

سوم بهبود بخشیدن به جریان انتقالی که در صورت تمیز بودن لوله جریان انتقال بهتر صورت می پذیرد، خصوصاً اگر طول لوله زیاد باشد. و در نهایت خشک کردن لوله بهتر انجام می شود چرا که این کار از تشکیل هیدرات و خوردگی جلوگیر ی می کند.

برای پاکسازی داخلی چندین روش وجود دارد که می تواند به تنهایی یا ترکیبی مورد استفاده قرار بگیرد از جمله تزریق حلال ها مانند جریان سندبلاست که در آن یک ماده خورنده استفاده می شود تا سطح داخلی لوله را بخراشد و آلودگی ها را پاک کند. پاکسازی با هوا یا گاز که از خوردگی راخلی لوله جلوگیری به عمل آورد [3].

قبل از راه انداختن خط لوله زمانی که تازه خط لوله قرار است مورد استفاده قرار بگیرد لوله باید از قطعات به جا مانده از عملیات ساخت پاکسازی شود و آماده شود برای تست هیدرواستاتیک. با توجه به سیال مورد انتقال در لوله توپک های دیگری نیز ممکن است استفاده بشود.

- بازرسی

که برای جمع اوری اطلاعات از شرایط لوله و موقعیت مشکلات لوله مانند خوردگی را تعیین می کند [2].

- وظایف خاصی مانند ایزوله کردن لوله.

زمانی که سیالات در داخل لوله جاری می شوند از توپک خاصی برای جداسازی سیالات و یا محصولات سیالات استفاده می شود [2]. به عنوان مثال راندن و انتقال یک سیال ترش به وسیله سیالی مانند گاز که روشی امن برای جداسازی سیال تا تحویل به پالایشگاه مورد نظر است [9].

حرکت توپک در داخل لوله و تغییرات فشار و سرعت

حرکت توپک در داخل لوله دارای سرعت ثابتی نیست و در مراحل مختلف با توجه به شرایط تغییر می کند. در ابتدا که توپک درون لوله به حرکت در می آید با سرعت ثابتی پیش می رود.این شرایط تا زمانی که توپک به یک فلنج می رسد حفظ می شود. بعد از اینکه توپک به یک فلنج برخورد می کند فشار لوله در قسمت عقب توپک به صورت پیوسته افزایش می یابد چرا که مسیر عبور سیال سد شده است.فشار بالا می رود تا زمانی که فشار نیرویی را به توپک اعمال می کند که می تواند از فلنج عبور کند پس از رها شدگی توپک از فلنج، به ناگاه سرعت توپک افزایش می یابد و فشار پشت آن به صورت معنا داری کاهش پیدا می کند این موضوع باعث انبساط گاز در آن منطقه می گردد. با ادامه دار شدن این حرکت تماس بین لوله و توپک سرعت را کاهش می دهد و سرعت پر شتابی که بعد از عبور از فلنج به وجود آمده بود تا زمانی که به یک نرخ متناسب با دبی جرمی داخل لوله برسد کاهش پیدا می کند. [9].

معیار انتخاب توپک ها

هدف توپکرانی
نوع، موقعیت و حجم موادی که باید پاک شود و یا جابه جا شود
موانع و اهداف توپکرانی
محتویات لوله موردتوپکرانی و فشار مورد نیاز
نوع اطلاعات مورد نیازی که باید حین توپکرانی از لوله جمع اوری شود
سرعت توپکرانی
مشخصات لوله
اندازه مینیمم و ماکسیزمم قطر لوله
مسافت مورد جابه جایی توپک
شعاع زانوهای سر راه لوله و زاویه آنها
اطلاعات دیگری از جمله نوع شیر، اتصالات و فراز و فرود های سر راه لوله [2].

توپک رانی هوشمند چیست؟

عملیات توپک رانی هوشمند عملیاتی است که در آن پاکسازی و نگهداری لوله با استفاده از تکنیک های مختلفی از جمله با استفاده از فراصوت، شار مغناطیسی، لیزر، جریان ادی، حرارتی فروسرخ، رزونانس صوتی و غیره انجام می گیرد.
توپکرانی هوشمند در حین انجام انتقال سیال صورت می گیرد بدون اینکه در فرآیند تولید وقفه ای ایجاد شود [1].
چهار کاربرد مهم توپکرانی هوشمند عبارتند از:
جداسازی محصولات نفتی متفاوت از یک خط لوله
پاکسازی سطح درونی لوله
بازرسی و بررسی شرایط لوله
ثبت و ضبط اطلاعات لوله مانند ترک خوردگی ها، ضخامت لوله، فرو رفتگی ها، رسوب وکس و ... .

توپک هوشمند در قسمت ارسال کننده توپک به داخل لوله وارد می شود که با فشار سیال موجود در داخل لوله به حرکت آورده در می آید. توپک تمام اطلاعات لازم را ثبت می کند و به قسمت گیرنده می فرستد. فرستنده توپک و دریافت کننده ان بر اساس قطر لوله تنظیم و ثابت می شوند. در صنعت نفت با توجه به تمام پیشرفت هایی که اتفاق افتاده است اما همچنان راهکاری به غیر از توپک رانی

برای ثبت و آنالیز ترک های لوله و یا رسوب داخل لوله جایگزین نشده است. تعیین مکان و زمان توپک رانی بسیار مهم است. چرا که هم زمان بر و هزینه بر است [1].

توپک های امروزی با وصل شدن به GPS این امکان را فراهم ساخته اند که با تعیین دقیق موقعیت آنان در سرعت و دقت نقطه یابی بهبود حاصل شود [2]. همچنین در یک بررسی استفاده از مدل های هوش مصنوعی نیز به کار گرفته شده است که به عنوان عاملی برای بالا بردن کیفیت عملیات به کار گرفته شده است [8] .

در جدول شماره ۳ تکنیک های به کار گرفته شده در توپک رانی هوشمند و محدودیت های آن آورده شده است[5].

جدول شماره ۲

نوع حسگر	فن آوری	روش انجام کار	مزایا	معایب
حسگر های صوتی	فراصوت	سیگنال فراصوت پس از تولید و بازتاب از دیواره ها توسط حسگرهای صوتی جمع آوری می شود. زمان ارسال و بازگشت صوت و زمان عبور صوت از دیواره ها در محاسبات به کار گرفته شده تاثیر گذار است.	جمع آوری و تعیین هر نوع تغییرات وترک خوردگی	عدم کارآیی در نقاط Flooded شده و نقاط خشک لوله
حسگر های الکترومغناطیسی	MFL	اندازه گیری آشفتگی جریان مغناطیسی با استفاده از ابزار اندازه گیری تاثیر هال. هر گونه آشفتگی در امواج الکترومغناطیسی به خاطر نواقص موجود در دیواره لوله ها خواهد بود. همچنین ضخامت لوله نیز با اندازه گیری جریان مغناطیسی به دست می آید.	تشخیص شکاف، نشتی، خوردگی و همچنین تعیین ضخامت لوله	مصرف انرژی بالا
	Remote Field Transformer Coupling (RFEC.)	با استفاده از یک سیم پیچ برای تولید میدان مغناطیسی و تولید جریان ادی و شار مغناطیسی در داخل لوله	تعیین ضخامت دیواره و محل سوراخ شدگی	مصرف انرژی بالاست

		استفاده می شود. حسگر ها میتوانند کوچکترین تغییرات در میدان را تشخیص دهند.	فرسودگی ها و شکاف های محوری	
	Remote Field Transformer Coupling. (RFTC)	تشخیص و تعیین پارگی های سیم ها در لوله های پیش تنیده بتنی.	تعیین موقعیت پاره شدگی سیم ها و نقاط اتصال	مصرف انرژی بالاست
	Broadband Electromagnetic (BEM)	بر اساس انتقال سیگنالی که طیف وسیعی از فرکانس ها را پوشش می دهد.	محل ترک خوردگی ها، شکاف ها را تعیین می کند و گزارش می دهد. همچنین تعیین ضخامت دیواره لوله.	مصرف انرژی بالاست
	Microwave Backscattering Sensor (MBS)	با تولید امواج میکرو و نفوذ در لوله های غیر فلزی و مواد باعث توزیع امواج می شود. با ارزیابی کشیدگی فاز و دامنه بین امواج ارسال دریافت شده.	تعیین نا همگنی مواد	امکان نفوذ در آب و یا لوله های بتنی تقویت شده.
	Ground Penetrating Radar (GPR)	بر اساس امواج میکرو که به صورت تک موج انتشار پیدا می کند با فرکانس های مختلف که باعث نفوذ به اعماق مختلف می گردد و رزلوشن را برآورد می کند. تصاویر سه بعدی را می توان از داده های میدانی خام. پردازشهای بعدی به دست آورد.	با استفاده پردازش اطلاعات وجود نا همگنی در بستری که لوله در آن قرار گرفته است مشخصمی شود.	عمق نفوذ کم
حسگر های چشمی	لیزر	تخمین دقیق موقعیت هندسی لوله	بیضی شدگی لوله، تغییرات شکل و هندسه لوله با دقت بالا	مصرف انرژی بالاست.
	Closed Circuit Television (CCTV)	با الهام گرفتن از چشم ماهی و با استفاده از چندین دوربین شرایط لوله ثبت و ضبط می شود.	تغییرات در شرایط فیزیکی لوله مانند خمیدگی مشخص می شود.	در محیط های نوری کم عمق غیر ممکن است.

انواع توپک

- توپک سنجش ضخامت دیواره

نازک شدگی دیواره لوله در اثر افزایش غیرمجاز تنش به وجود می آید که باعث ایجاد حفره که در نهایت کم شدن عمر سرویس دهی لوله می گردد.

انواع نازک شدگی ها:

در فرآیند ساخت، زمانی که فلز داغ است.

نقص سطحی که زمانی که فلز سرد شده است به وجود می آید.

کاری های مکانیکی حین تولید

خوردگی/فرسایش

لایه لایه شدگی[6].

- توپک با تکنیک فراصوت

در سنجش ضخامت لوله فرآیند کار به این صورت است که با ارسال امواج به سمت لوله بخشی از آن توسط دیواره داخلی و بخشی از آن از دیواره خارجی بازتاب می شود و به سمت گیرنده ها باز می گردد.این اختلاف زمانی ثبت می شود و با در نظر گرفتن زمان انتقال، سرعت صوت در سیال بین فرستنده و لوله و در دیواره لوله، ضخامت لوله محاسبه می شود. این ابزار برای لوله هایی کاربرد دارد که لوله حاوی سیال مایع باشد [6].

- توپک با شار مغناطیسی

در این نوع از توپک ها یک میدان مغناطیسی به سمت فولاد داخل لوله انتقال داده می شود.سپس به علت نواقص موجود در دیواره لوله میدان مغناطیسی خارج شده از لوله که توسط حسگرها به وجود می آید یک ناهماهنگی مشاهده می شود. میزان به هم خوردگی شار مغناطیسی بر اثر میزان نقص موجود در دیواره به وجود می آید.

با استفاده از این نوع توپک ها موارد زیر قابل شناسایی است:

نبود فلز

لایه لایه شدن لوله

سوراخ های بزرگ

برآمدگی ها و فرورفتگی های زاویه دار[6].

- توپک تعیین ترک خوردگی

ترک به عنوان جدایی مواد که معمولاً یا عمودی هستند و یا مورب که بر روی دیواره لوله به وجود می آیند. این مشکل به علت نبود پیوند و یا نقص در جوشکاری به وجود می آید.

ترک های خستگی

ترک های ناشی از تنش خوردگی

ترک های القا شده با هیدروژن

لایه لایه شدن بر روی سطح دیواره[6].

نتیجه گیری

- این عملیات هزینه بر، زمان بر و پیچیده است و برای انجام آن نیاز به یک گروه آموزش دیده است.
- توپک های هوشمند دارای ابتکارات نوآورانه ای با فن آوری بالایی است از جمله ترنسمیتر ها، حسگرها، GPS، جریان ادی، میدان مغناطیسی، امواج فراصوت و ... است.
- توپک رانی در ابتدا برای استفاده های ساده بود و به مرور زمان بر ابعاد استفاده از آن افزوده شد تا چایی که امروزه نقش مهم را بر عهده دارد.
- با توجه به هزینه بالای نگهداری لوله ها توپک رانی هوشمند از بسیار ی از جهات توانسته است نظارت مناسبی را فراهم کند که از آسیب های زیست محیطی و هزینه های مالی جلوگیری نماید.
- استفاده از توپک های هوشمند به بالا بردن بهره وری در صنعت نفت کاملاً ضروری است.

مراجع:

[1] Review analysis on cloud computing based smart grid technology in the oil pipeline sensor network system, E.B. Priyanka, S. Thangavel b, Xiao-Zhi Gao, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.10.001
[2] Introduction to Pigging & a Case Study on Pigging of an Onshore Crude Oil Trunk line, Anand Gupta, Anirbid Sircar, IJLTEAMS Journal, 2016
[3] Predicting pigging operations in oil pipelines, Riccardo Angelo Giro1, Giancarlo Bernasconi, Giuseppe Giunta, Simone Cesari. Pipeline Technology Conference 2021.
[4] Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines, F. Esmaeilzadeh, D. Mowla, M. Asemani, Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009. http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2009.08.006
[5] A Comprehensive Review of Micro-Inertial Measurement Unit Based Intelligent PIG Multi-Sensor Fusion Technologies for Small-Diameter Pipeline Surveying, Lianwu Guan, Xiaodan Cong, Qing Zhang, Fanming Liu, Yanbin Gao, Wendou An, Aboelmagd Noureldin. MDPI Journal, 2020.
[6] Demonstration of Pipe and Pipeline Integrity by Means of Intelligent Pigging Systems, Hans-Joachim de la Camp T‹V S‹D Industrie Service GmbH, Pipeline Technology 2006 Conference.
[7] Petroleum pipeline monitoring using an internet of things (IoT) platform, E. N. Aba, O. A. Olugboji, A. Nasir, M. A. Olutoye, O. Adedipe. Springer Nature Journal, 2021.
[8] AI Based Intelligent Pigging Solution, Varun Nidhi, Rakesh Rao, Aakash Mittal, Alethe Labs India Private Limited. Society of Petroleum Engineers Journal, 2019. https://doi.org/10.2118/197723-MS
[9] Dynamic Multiphase Flow Simulation of Pigging One of Two Parallel Pipelines, Karlygash Dosmukhamedova, TengizChevrOil LLP, Society of Petroleum Engineering Journal, 2014.
[10]. The Approach to Modeling and Optimization of Technological Regimes of Complex Systems: Gas Condensate Field-LNG Plant. Alexey Pashinsky, Yamal LNG JSC; Alexy Sullagaev, Anton Epryntsev, Andrey Yamov, Rinat Valiev. Society of Petroleum Engineers, 2018.

[11] Experimental analysis of the effect of nitrogen gas on the H2S stripping process during the pigging operation of a long crude oil pipeline. Dengfeng Zheng, Zhongan Jiang, Jihao Shi, Yapeng Wang, Zhenyi Liu. Science and Technology Journal, 2020.
https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100741