نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۹، شماره ۵، زمستان ۱۴۰۱، ص: ۱۹- ۳۶

J. Energy Conversion
Volume: 9, Issue: 5, 2023: 19–36

DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3

# مطالعه تجربی فاکتورهای موثر بر عملکرد پیگ در خطوط لوله انتقال مواد نفتی

**سامان شیخ مقدس[۱]، شهرام اعتمادی حقیقی[۲*]، مرتضی خیاط[۳]**

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*۲- استادیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- استادیار، دانشکده مکانیک، برق و کامپیوتر، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
setemadi@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

## چکیده

با توجه به اهمیت خطوط لوله به عنوان شاهرگ‌های حیاتی تامین سوخت و انرژی در جهان، حفظ و پایداری و تداوم انتقال و تامین خوراک پالایشگاه‌ها و تامین سوخت صنایع مختلف بسیار مهم و ضروری می‌باشد. تحقیق حاضر به منظور تحلیل عملکرد پیگ و بررسی فاکتور های موثر بر عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله انتقال مواد نفتی صورت گرفته است. در این تحقیق با انجام آزمایشات در شرایط واقعی و عملیاتی، نتایج حاصل از پیگ‌رانی درخطوط لوله انتقال فرآورده در قطرها و طول‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است، به طوری که تاثیر رسوب گرفتگی دیواره داخلی خط لوله بر میزان دبی جریان، قدرت مورد نیاز پمپ در تلمبه خانه و افت فشار در فرآورده های مختلف با شرایط فیزیکی متفاوت و همچنین محاسبه و بررسی سرعت پیگ‌رانی در هر عملیات و تاثیر وزن پیگ بر سرعت پیگ‌رانی و قدرت مورد نیاز در تلمبه خانه‌ها ارائه گردیده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهند انجام عملیات پیگ‌رانی در یک خط لوله ۱۴ اینچی انتقال نفت به طول ۱۰۹ کیلومتر با دبی ۳۶۰ مترمکعب بر ساعت معادل ۵۴۳۳۰ بشکه در شبانه روز که دارای ۰/۴ سانتی متر رسوب گرفتگی است، سبب جلوگیری از کاهش دبی جریان به میزان ۲۳ مترمکعب بر ساعت معادل ۳۴۶۰ بشکه در شبانه روز، افزایش قدرت مورد نیاز پمپ در تلمبه‌خانه به میزان ۳۵/۷۹ کیلووات و افزایش افت فشار تا ۸/۹ درصد، خواهد شد. همچنین با بررسی تاثیر شیب خط لوله بر فشار پشت پیگ با علم به عدم تغییر قدرت پمپ در تلمبه خانه و سرعت یکسان پیگ در طول مسیر، مشخص می گردد افزایش ارتفاع خط لوله باعث تبدیل هد فشار استاتیکی به هد ارتفاع شده و در صورت ورود پیگ به مناطق دارای سراشیبی، سبب تبدیل هد ارتفاع به فشار پشت پیگ خواهد شد.

* **عهده‌دار مکاتبات: setemadi@srbiau.ac.ir**

**کلمات کلیدی:** پیگ، افت فشار، خطوط لوله، دبی جریان، رسوب گرفتگی

## ۱- مقدمه

انتقال نفت و فرآورده‌های آن از طریق خط لوله به صرفه‌ترین، امن ترین و پایدارترین راه انتقال است. با گذشت زمان ذرات معلق در سیالات عبوری از داخل لوله به صورت رسوب به دیواره لوله می‌چسبند و باعث بالا رفتن ضریب اصطکاک بین سطح لوله و سیال و کاهش قطر داخلی لوله و درنتیجه افزایش افت فشار جریان عبوری از آن و در نهایت اتلاف انرژی می‌شوند. همچنین دیواره‌های خطوط لوله، پس از چند سال

**نحوه استناد به این مقاله**: سامان شیخ مقدس، شهرام اعتمادی حقیقی، مرتضی خیاط. مطالعه تجربی فاکتورهای موثر بر عملکرد پیگ در خطوط لوله انتقال مواد نفتی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱; ۹ (۵) :۱۹-۳۶.
**DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3**



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

کارکـــرد، دچـــار آســـیبهای فیزیکـــی نظیـــر تورفتگـــی و خوردگیهـــای داخلـــی می‌شـــوند که ایـــن خوردگی هـــا می-توانـــند باعـــث تخریـــب خـــط لولـــه و کاهـــش عمـــر و راندمـــان هیدرولیکـــی شـــوند و در نتیجـــه هزینه‌هـــای عملیاتـــی و انتقـــال ســـیال را افزایش می‌دهند. برای مقابله با این مشکلات از وسیله ای به نام پیگ[1] که درون خط لوله قرار داده می‌شود و به وسیله جریان فرآورده در طول آن حرکت می‌کند، استفاده می‌گردد. پیگرانـــی منجـــر بـــه تخلیـــه خطـــوط لولـــه از عوامل مذکور و کاهـش افـت فشـار کلـی و افزایـــش بـــازده جریـــان خواهد شد.

بسیاری از محققان به بررسی عملکرد پیگ و تاثیر پیگ‌رانی بر افزایش راندمان، کاهش هزینه، جلوگیری از کاهش سطح مقطع و کاهش ظرفیت خط لوله در کارهای تحقیقاتی خود پرداخته اند. ژو و همکاران [۱] شبیه‌سازی عددی نیروی تماسی روی پیگ دو جهته در خط لوله گاز، در مرحله اولیه پیگ‌رانی را انجام داده‌اند. آنها نشان دادند پیش‌بینی حرکت یک پیگ، برای تخمین سرعت، دستیابی به موقعیت و فشار لازم برای پیشروی پیگ‌رانی ضروری است. همچنین یک مدل المان محدود غیر خطی متقارن محوری برای پیش‌بینی نیروی تماسی توسط پیگ دو جهته با استفاده از نرم افزار انسیس[2] پیشنهاد دادند. نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که ضخامت دیسک آب‌بندی بیش‌ترین تاثیر را بر نیروی تماسی پیگ دو جهته دارد. ژانگ و همکاران [۲] با استفاده نرم افزار آنالیز پویای آدامز[3]، نیروی اصطکاک و نیروی دینامیکی دیسک آبندی در پیگ تمیز کننده دو طرفه را محاسبه و تجزیه و تحلیل نمودند. نتایج آنها نشان داد که فرآیند عبور از سرجوش در لوله، سه مرحله بالارونده، صعود و شیب را دارا می‌باشد و فرایند ایجاد شتاب باعث ایجاد ارتعاش محوری در پیگ می‌شود.

دانگ و همکاران [۳] ساختار نوینی از دیسک آب بندی پیگ دو طرفه با الهام گرفتن از الگوی زیستی و ترکیبی از ساختار پای پره‌دار حیوانات ارائه دادند و یک روش جدید به روش پیگ‌رانی مکانیکی اضافه نمودند. نتایج این روش نشان داد، ضخامت پای پره‌دار، بیش‌ترین تاثیر را بر نیروی تماسی وارد بر دیسک آب بندی دارای الهام زیستی دارد و همچنین تعداد پا نیز کمترین تاثیر را دارا می‌باشد.

گوبین و همکاران [۴] با توجه مساله افزایش تقاضای گاز طبیعی در چین، انتقال با لوله‌های با قطر بزرگ از غرب به شرق و تاثیر اقتصادی بالای سیستم خط لوله که باعث کاهش سرعت جریان بالای گاز نمی‌شود، مدلی دینامیکی ارائه دادندکه با کنترل جریان، کمک شایانی به مساله انتقال گاز نمود. ژو و همکاران [۵] مشکلات و جزئیات فرآیند عبور پیگ از یک خم در خط لوله را مورد بررسی قرار دادند. آنها روش مناسبی برای تعیین اندازه هندسی بدنه پیگ پیشنهاد داده و جابجایی پیگ دو طرفه در هنگام عبور از خم با در نظر داشتن نیروی وارد بر دیسک‌های آب‌بندی را مورد بحث قرار دادند. اسماعیل زاده و همکاران [۶] در مطالعه ای به مدل‌سازی ریاضی و شبیه‌سازی عملیات پیگ در خطوط لوله گاز و مایع و حرکت گذرای یک پیگ از طریق خطوط لوله پرداختند. مدل پیشنهادی آنها توانست برای پیش‌بینی سرعت پیگ، محدوده بهینه سرعت جریان سوخت و زمان رسیدن پیگ به انتهای خط لوله به کار رود. در مطالعه دیگری ژو و همکاران [۷] به مقایسه شبیه‌سازی‌های خطی و غیرخطی نیروهای تماسی پیگ دو جهته در خطوط لوله گاز پرداختند. این مطالعه به وضوح، تفاوت‌های بین شبیه‌سازی‌های خطی و غیرخطی براساس رفتار پیچیده حرکت پیگ در خطوط لوله نفت و گاز را نشان داد.

در یک مطالعه آزمایشگاهی هندریکس و همکاران [۸] به بررسی نیروهای برشی برای پیگ‌رانی با پیگ دوطرفه تمیزکننده همراه دیسک آب بندی در خط لوله پرداختند و اثر روانکاری ممکن بر نیروی اصطکاکی با اعمال آب به سطح تماس لغزشی و مقایسه نتایج با تست‌های کشش خشک برای سرعت‌های مختلف لغزشی را مورد مطالعه قراردادند. دنگ و همکاران [۹] در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی عددی اثرات تبخیر بر حرکت پیگ در طول فرآیند پیگ‌رانی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی برای فرآیند پیگ‌رانی خط لوله مایع و گاز در تطابق خوبی با داده‌های میدانی برای تایید مدل توسعه‌یافته آنها بود. لیو و همکاران [۱۰] به بررسی قابلیت انتقال پیگ در زانویی خط لوله تحت ضرایب اصطکاک مختلف توسط مدل المان محدود سه‌بعدی

[1] Pig (Pipeline Inspection Gauge)
[2] Ansys
[3] Adams



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

پرداختند. نتایج آنها نشان داد که قابلیت حرکت پیگ به وضوح، تحت شرایط با ضرایب اصطکاک بالاتر تضعیف خواهد شد. در یک مطالعه تجربی، ژیاوو و همکاران [۱۱] به بررسی رفتار دینامیکی خط لوله گاز طبیعی در طول فرآیند پیگ‌رانی پرداختند. نتایج نشان داد که گاز طبیعی در طول فرآیند پیگ‌رانی نوسان می‌کند، اما جابجایی در مقابل زمان به جای یک منحنی سینوسی، یک منحنی U شکل است. مقدار جابجایی رابطه مستقیمی با سرعت پیگ‌رانی و حجم رسوب مایع دارد.

در مطالعه‌ای میرشمسی و رفیعیان [۱۲] به بررسی کنترل سرعت پیگ بازرسی در خطوط لوله گاز با استفاده از کنترل مد لغزشی پرداختند. نتایج نشان داد که این نوع کنترل‌کننده می‌تواند سرعت پیگ را در مقدار مورد نظر در طول حرکت پیگ در خطوط لوله گاز کاملا ثابت نگه دارد. بوقی و همکاران [۱۳] به طراحی یک مدل دو فازی انتقال موم در یک خط لوله در طول عملیات پیگ‌رانی پرداختند. نتایج با کاهش هزینه محاسباتی رو به رو بوده است. اثر دما و اندازه ذرات موم نیز بررسی شدند. لی و همکاران [۱۴] در رابطه با پیگ‌رانی خط لوله، یک روش اصلی ترمیم موم برای انتقال نفت خام مومی ارائه دادند. نتایج نشان داد که این مدل می‌تواند به طور بالقوه کاربردهای طراحی پیگ را فعال کند. در مطالعه‌ای دیگر میرشمسی و رفیعیان [۱۵] به تحلیل دینامیکی و شبیه‌سازی پیگ بلند در خط لوله گاز پرداختند. نتایج نشان داد که مدل ذره نمی‌تواند برای پیگ های بلند استفاده شود. صادقی و همکاران [۱۶] تاثیر پارامترهای فیزیکی پیگ بر رفتار دینامیکی خط لوله بالای زمین در عملیات پیگ‌رانی مورد بررسی قرار دادند. هم نتایج عددی و هم نتایج تجربی تاثیرات اساسی پارامترهای فیزیکی پیگ، به ویژه تعداد دیسک و مواد را بر رفتار دینامیکی سیستم لوله نشان داد.

میشرا و همکاران [۱۷] پیگ را به عنوان یک تمیر کننده خطوط لوله بین کشوری مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و همکاران [۱۸] تاثیر ارتعاشات ناشی از برخورد پیگ و محل های جوشکاری بر ساختار مکانیکی پیگ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جوش محیطی، که می‌تواند به عنوان یک مانع در نظر گرفته شود، تا حد زیادی بر رفتاردینامیکی یک پیگ در حال اجرا تاثیر می‌گذارد. مازریاه و همکاران [۱۹] طراحی جدیدی برای پیگ به منظور حذف اثر هیدرولیکی در لوله‌های نفت و گاز ارائه دادند. برای نشان دادن کاربردی بودن و اهمیت این مطالعه، چندین آزمایش شبیه‌سازی مختلف مانند جریان آرام، توزیع فشار، تغییرات سرعت و تحلیل تنش بر روی طرح جدید با بازوهای قابل تنظیم و همچنین طراحی قبلی با استفاده از دیسک‌های آب‌بندی انجام گردید.

در تحقیق حاضر، با انجام آزمایشات در شرایط واقعی و عملیاتی، نتایج حاصل از پیگ‌رانی درخطوط لوله انتقال فرآورده در قطرها و طول‌های مختلف در سه عملیات پیگ‌رانی با پیگ عملیاتی تمیزکننده و یک عملیات بازرسی خط لوله با پیگ هوشمند مغناطیسی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این راستا تاثیر رسوب گرفتگی دیواره داخلی خط لوله بر میزان دبی جریان، قدرت مورد نیاز پمپ در تلمبه خانه، افت فشار در فرآورده‌های مختلف با شرایط فیزیکی متفاوت، سرعت پیگ‌رانی در هر عملیات، تاثیر وزن پیگ بر سرعت پیگ‌رانی و تاثیر شیب مسیر خط لوله بر فشار پشت پیگ بر اساس نقشه گرادیان هیدرولیک مسیر خط لوله ارائه گردیده است. بهره‌مندی از نتایج میدانی و دقیق به دست آمده از این تحقیق و مقایسه آنها که در راستای کمک به حل مشکلات و ناهنجاری‌های معمول در انتقال مواد نفتی با خطوط لوله می‌باشد و همچنین آگاهی از عملکرد پیگ در شرایط مختلف، می‌تواند قدمی در راه بهبود بازرسی خطوط لوله مواد نفتی باشد.

## ۲- آزمایشات

در این تحقیق آزمایش‌های تجربی در شرایط واقعی عملیات انتقال مواد نفتی صورت گرفته است. تداوم انتقال و حفظ شرایط ایمن انتقال نفت خام و فرآورده‌های نفتی با توجه به قدمت خطوط لوله، وضعیت الکتروپمپ‌ها و توربوپمپ‌ها بسیار مهم و ضروری بوده و شرایط آزمایشات به نحوی کنترل گردیده است تا تهدیدی برای عملیات گسترده انتقال و تامین سوخت کشور ایجاد نگردد.

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

## ۲-۱- تجهیزات مورد نیاز و مواد آزمایش

### ۲-۱-۱- پیگ

این ابزار درون خط لوله قرار داده می‌شود و به وسیله جریان فرآورده در طول آن حرکت می‌کند. در این تحقیق، پیگ مورد استفاده در سه عملیات پیگ‌رانی از نوع تمیزکننده بوده و پیگ عملیات بازرسی خط لوله از نوع هوشمند مغناطیسی می‌باشد که تصویر آنها در شکل ۱ نشان داده شده است.



ب): پیگ تمیز کننده



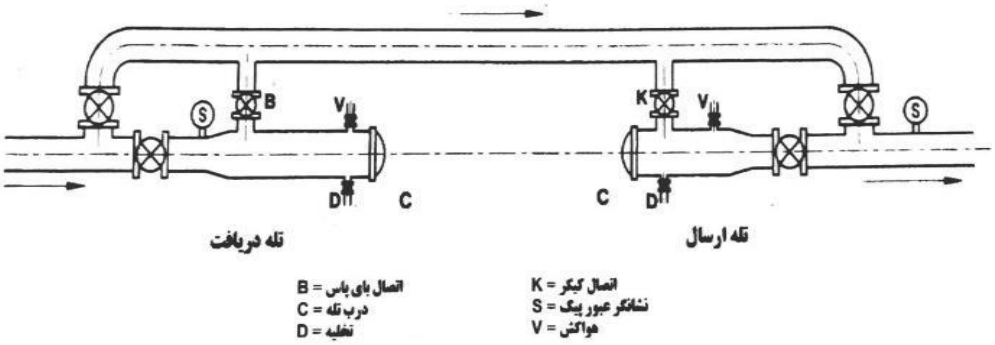
الف): پیگ هوشمند مغناطیسی دو ماژوله

**شکل ۱: پیگ‌های استفاده شده در تحقیق حاضر**

### ۲-۱-۲- تله‌های پیگ

تله‌های پیگ به منظور قرار دادن آن درون خط لوله و سپس ارسال، دریافت و خارج کردن آن استفاده می‌شوند. نمایی از این تجهیزات در شکل ۲ نشان داده شده است.

برای انجام عملیات پیگ‌رانی، در ابتدا باید دو شیر هواکش و تخلیه در بالا و پایین تله باز شود (طبق شکل ۲) و مایعات و هوایی که از قبل درون تله موجود است، خارج شود. سپس پیگ را درون تله قرار داده و تا بعد از ورودی اتصال کیکر به تله به جلو رانده می‌شود تا در صورت ورود سیال، به پهلوی پیگ برخورد نکرده و از بروز مشکلات مربوطه جلوگیری شود. نهایتا شیر بای‌پس موجود در کنار شیر K باز می شود تا دو طرف شیر هم فشار گردد، سپس با باز شدن همزمان شیر K و شیر خروجی تله ارسال کننده و بسته شدن شیر بای پس خط اصلی، سیال وارد تله شده و با همان میزان فشار خط اصلی، پیگ را وارد خط کرده و به سمت ایستگاه بعد هدایت می‌کند. هنگام رسیدن پیگ به ایستگاه بعد مشابه این روند در تله دریافت کننده صورت گرفته و در نهایت پیگ و رسوبات و محتویات همراه آن را از تله خارج می‌گردند.




**شکل۲: شماتیک ایستگاه دریافت کننده و ارسال کننده پیگ [۲۰]**

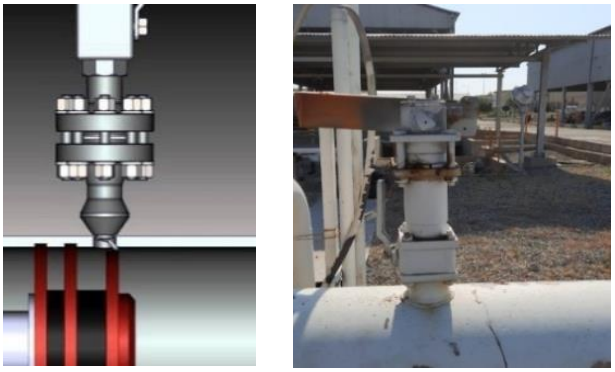
### ۲-۱-۳- حسگر عبور پیگ

بلافاصله بعد از تله ارسال کننده، حسگر عبور پیگ با مکانیزم مکانیکی جهت اطلاع اپراتور از عبور پیگ و ورود آن به خط لوله، نصب می گردد. شکل ۳ نمایی واقعی و شماتیک از حسگر عبور پیگ را نشان می دهد.



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]



الف) نمای واقعی ب) نمای شماتیک

**شکل۳: حسگر عبور پیگ**

### ۲-۱-۴- خطوط لوله

این تحقیق در سه منطقه از خطوط لوله انتقال مواد نفتی در کشور انجام گردید. آزمایشات در سه خط لوله که قطر یکی از آنها ۱۰ اینچ و طول آن ۶۸/۱۶ کیلومتر و قطر دو لوله دیگر ۱۴ اینچ با طول‌های متفاوت ۴۹/۳۳۱ و ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر بودند، انجام شد. این خطوط لوله تنها بخشی از ۱۴۰۰۰ کیلومتر خط لوله در کل سطح کشور ایران است.

### ۲-۱-۵- فرآورده های اصلی

با توجه به نیاز صنایع مختلف و مصرف فرآورده‌های اصلی، بیشترین حجم انتقال مواد نفتی در خطوط لوله انتقال کشور به عنوان شاهرگ‌های حیاتی، شامل بنزین، نفت گاز (گازوئیل) و نفت سفید می‌باشد. نفت خام نیز به عنوان خوراک پالایشگاه‌ها در شبکه خطوط لوله انتقال جداگانه‌ای منتقل می‌شود و مشخصات فیزیکی آن متفاوت است. در این تحقیق، پیگ‌رانی در خطوط لوله با سیال نفت‌گاز، نفت سفید و بنزین انجام گردیده است. مشخصات ترموفیزیکی این سیالات در جداول ۱ تا ۳ ارائه شده است.

**جدول۱: مشخصات ترموفیزیکی نفت گاز (گازوئیل)**

| | |
|---|---|
| نمودار تقطیر به روش TBP/ASDM T 86 (°C) | ۱۴۸/۲۰۰/۳۰۰/۳۵۷/۳۸۵ |
| دانسیته $(kg/m^3)$ | ۸۳۶ |
| محدوده ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۳۷/۸°C (c. st) | ۲-۵ |
| دانسیته در شرایط استاندارد$(kg/m^3)$ | ۸۳۵ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۳۷/۸°C (c. st) | ۲/۵ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۵۰°C (c. st) | ۱/۱ |
| درجه API | ۳۷-۳۸-۳۹ |
| ظرفیت حرارتی ویژه $(kJ/kg.K)$ | ۲/۰۵ |

**جدول۲: مشخصات ترموفیزیکی نفت سفید**

| | |
|---|---|
| نمودار تقطیر به روش TBP/ASDM T 86 (°C) | ۱۴۸/۱۷۵/۲۱۰/۲۳۰/۲۷۵ |
| دانسیته $(kg/m^3)$ | ۸۰۵ |
| محدوده ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۳۷/۸°C (c. st) | ۱/۲ − ۱/۸ |
| دانسیته در شرایط استاندارد$(kg/m^3)$ | ۸۰۵ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۱۰°C (c. st) | ۲ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۱۰۰°F (c. st) | ۰/۸ |
| درجه API | ۴۴ |
| ظرفیت حرارتی ویژه $(kJ/kg.K)$ | ۲/۰۱ |



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

**جدول۳: مشخصات ترموفیزیکی بنزین**

| | |
|---|---|
| نمودار تقطیر به روش TBP/ASDM T 86(°C) | ۳۴/۵۸/۹۸/۱۶۵/۱۹۰ |
| دانسیته $(^{kg}/_{m^3})$ | ۷۳۴ |
| محدوده ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۲۰°C (c. st) | ۰/۵ – ۰/۸ |
| دانسیته در شرایط استاندارد$(^{kg}/_{m^3})$ | ۷۳۴-۷۴۶ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۱۰۰°F (c. st) | ۰/۴۱ |
| ویسکوزیته سینماتیکی در دمای ۱۲۲°F (c. st) | ۰/۲۳ |
| درجه API | ۶۱-۶۳ |
| ظرفیت حرارتی ویژه $(^{kJ}/_{kg.K})$ | ۲/۲۲ |

### ۲-۲- روش انجام آزمایشات

در این تحقیق، چهار عملیات پیگ رانی شامل سه عملیات با پیگ تمیز کننده و یک عملیات بازرسی با پیگ هوشمند مغناطیسی در سه خط لوله متفاوت انجام پذیرفت.

### ۲-۲-۱- پیگ‌رانی شماره ۱

در این عملیات پیگ‌رانی، یک پیگ تمیزکننده درون خط لوله قرار داده شد و توسط جریان سیال نفت گاز در طول مسیر به حرکت درآمد. این عملیات پیگ‌رانی در شرایط عملیاتی در خط لوله ۱۴ اینچ با دبی ۳۳۰ متر مکعب بر ساعت و فشار خروجی ۸۰۰ psi آغاز گردید. فشار ورودی در ایستگاه مقصد ۱۹ psi بوده است. محاسبه زمان عملیات و سرعت پیگ‌رانی مورد نظر، با توجه به فشار خط و ظرفیت مورد انتقال در زمان عملیات بر اساس روابط تئوری و مقایسه با واقعیت میدانی انجام شده است. طول این خط لوله برابر ۴۹/۳۳۱ کیلومتر و ضخامت متوسط لوله در کل مسیر برابر ۰/۲۸۱ اینچ می‌باشد. شکل ۴ نمایی از ارسال کننده پیگ در ایستگاه ارسال خط ۱۴ اینچ فرآورده، برای پیگ‌رانی شماره ۱ را نشان می‌دهد.



**شکل ۴: نمایی از ارسال کننده پیگ در ایستگاه ارسال خط ۱۴ اینچ فرآورده (پیگ‌رانی شماره ۱)**



**شکل ۵: نمایی از دریافت کننده پیگ در ایستگاه خط ۱۰ اینچ فرآورده (پیگ‌رانی شماره ۲)**

### ۲-۲-۲- پیگ‌رانی شماره ۲

در این عملیات پیگ‌رانی نیز یک پیگ تمیزکننده توسط جریان سیال نفت گاز در طول مسیر به حرکت درآمد. این عملیات



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

پیگ‌رانی در شرایط عملیاتی در خط لوله ۱۰ اینچ با دبی ۲۰۰ متر مکعب بر ساعت و فشار خروجی ۵۷۰ psi آغاز گردید. فشار ورودی در ایستگاه مقصد ۱۶ psi بوده است. محاسبه زمان عملیات و سرعت پیگ‌رانی مورد نظر با توجه به فشار خط و ظرفیت مورد انتقال در زمان عملیات بر اساس روابط تئوری و مقایسه با واقعیت میدانی انجام شده است. طول این خط لوله برابر ۶۸/۱۶ کیلومتر و ضخامت متوسط لوله در کل مسیر برابر ۰/۳۵۷ اینچ می‌باشد. شکل ۵ نمایی از ایستگاه دریافت کننده پیگ برای خط ۱۰ اینچ فرآورده، برای پیگ‌رانی شماره ۲ را نشان می‌دهد.

### ۲-۲-۳- پیگ‌رانی شماره ۳

در این عملیات پیگ‌رانی نیز یک پیگ تمیزکننده توسط جریان سیال نفت گاز در طول مسیر به حرکت درآمد. این عملیات پیگ‌رانی در شرایط عملیاتی در خط لوله ۱۴ اینچ با دبی ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت و فشار خروجی ۸۲۱ psi آغاز گردید. فشار ورودی در ایستگاه مقصد ۸۷ psi بوده است. محاسبه زمان عملیات و سرعت پیگ رانی مورد نظر با توجه به فشار خط و ظرفیت مورد انتقال در زمان عملیات بر اساس روابط تئوری و مقایسه با واقعیت میدانی انجام شده است. طول این خط لوله برابر ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر و ضخامت متوسط لوله در کل مسیر برابر ۰/۳۶۹ اینچ می‌باشد. شکل ۶ نمایی از ایستگاه دریافت کننده پیگ برای خط ۱۴ اینچ فرآورده، برای پیگ رانی شماره ۳ را نشان می‌دهد.



**شکل ۶: نمایی از دریافت کننده پیگ در ایستگاه خط ۱۴ اینچ فرآورده (پیگ‌رانی شماره ۳)**

### ۲-۲-۴- پیگ‌رانی شماره ۴

این عملیات پیگ‌رانی به منظور بازرسی صورت پذیرفت و در آن یک پیگ هوشمند مغناطیسی دو ماژوله توسط جریان سیال نفت گاز، نفت سفید و بنزین در طول مسیر به حرکت درآمد. این عملیات پیگ‌رانی در همان خط لوله پیگ‌رانی شماره ۳ صورت پذیرفت و بدین ترتیب شرایط عملیاتی در خط لوله ۱۴ اینچ با دبی ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت و فشار خروجی ۸۹۹ psi آغاز گردید. فشار ورودی در ایستگاه مقصد ۱۵۹ psi بوده است. محاسبه زمان عملیات و سرعت پیگ رانی مورد نظر با توجه به فشار خط و ظرفیت مورد انتقال در زمان عملیات بر اساس روابط تئوری و مقایسه با واقعیت میدانی انجام شده است.

### ۲-۳- دقت اندازه گیری و آنالیز خطای آزمایشات

خطاهای ایجاد شده در آزمایشات معمولا شامل خطای اندازه‌گیری ناشی از کالیبره نبودن دستگاه‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری و خطاهای انسانی می‌باشند. در مطالعه حاضر با توجه به مدارک کالیبراسیون دستگاههای موجود، فشار خروجی ایستگاه ارسال کننده با اختلاف ۳ بار فشار نسبت به رنج تغییرات استاندارد پیش بینی شده دارای عدم قطعیت ±۱/۸ درصد می‌باشد و فشار ورودی ایستگاه دریافت کننده دارای عدم قطعیت ±۰/۷ درصد می‌باشد. از آن جا که ضخامت لوله در پیگ رانی‌های شماره ۳ و ۴ در مسیر ۱۰۹ کیلومتر، یکسان نیست و متغیر می‌باشد، اختلاف بیشترین ضخامت و کمترین ضخامت در طول مسیر یکی از مواردی است که می‌تواند میزانی از خطا در محاسبات ایجاد کند. در مسیر فوق الذکر، کمترین ضخامت لوله ۰/۲۵۰ اینچ و



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

بیشترین ضخامت لوله ۰/۴۰۶ اینچ می‌باشد. در رابطه با خطای سرعت پیگ نیز اختلاف سرعت پیگ در حین عملیات، با سرعت محاسبه شده و پیش بینی شده در پیگ‌رانی دارای ۰/۰۰۲ متر بر ثانیه اختلاف بوده و عدم قطعیت آن ۰/۱± درصد می‌باشد. همچنین ویسکوزیته سینماتیکی برای سیال نفت گاز طبق جدول ۱ عددی بین ۲ تا ۵ سانتی استوک می‌باشد. مقادیر عدم قطعیت داده ها در جدول ۴ ذکر شده است.

**جدول ۴: عدم قطعیت داده‌های آزمایش**

| پارامتر | عدم قطعیت |
|---|---|
| فشار خروجی ایستگاه ارسال کننده (psi) | ٪ ۱/۸ ± |
| فشار ورودی ایستگاه دریافت کننده (psi) | ٪ ۰/۷ ± |
| سرعت پیگ $(\frac{m}{s})$ | ٪ ۰/۱ ± |
| ضخامت لوله (in) | ۰/۲۵۰-۰/۴۰۶ |
| ویسکوزیته سینماتیکی (c. st) | ۲-۵ |

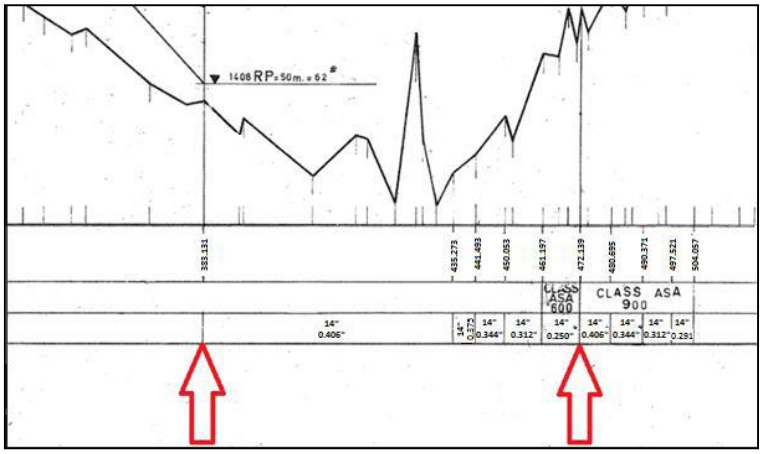
## ۳- نتایج و ارزیابی

### ۳-۱- محاسبه سرعت پیگ

سرعت پیگ‌رانی در هر چهار عملیات این تحقیق، از دو روش روابط تئوری و اطلاعات بدست آمده از واقعیت میدانی محاسبه شده‌اند. با فرض اینکه پیگ توسط جریان سیال درون خط لوله با سرعت نسبی صفر حرکت خواهد کرد، سرعت آن طبق تئوری از رابطه (۱) بدست می آید.

$$V = {}^{Q}/_{A} \qquad (۱)$$

به منظور محاسبه سطح مقطع ابتدا باید به ضخامت متوسط لوله دست یافت که این ضخامت طبق نقشه گرادیان هیدرولیک خط لوله‌ای که در آن عملیات پیگ‌رانی انجام شده است، محاسبه می‌گردد. سپس این ضخامت متوسط از قطر خارجی لوله کسر شده و قطر داخلی جهت محاسبه سطح مقطع بدست می‌آید. در اینجا به عنوان نمونه، سرعت پیگ در عملیات پیگ رانی شماره ۳ با نقشه گرادیان هیدرولیک خط لوله ۱۴ اینچ بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر انجام شده است. شکل ۷ برشی از نمودار گرادیان هیدرولیک خط مذکور را نشان می‌دهد.




**شکل ۷: برشی از نمودار گرادیان هیدرولیک خط لوله ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتری به قطر ۱۴ اینچ [21]**

بر اساس این نمودار، ضخامت متوسط لوله طبق رابطه (۲) و قطر داخلی لوله طبق رابطه (۳) محاسبه می شوند.

$$thk_{av} = \frac{(0.406)72.142 + (0.375)6.22 + (0.344)8.56}{109.008} \qquad (۲)$$



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

$$+\frac{(0.312)18.144+(0.256)3.942}{109.008}=0.369\ in$$

$$D_i=14-2(0.369)=13.262\ in=0.337\ m \quad (۳)$$

با توجه به اینکه دبی در این خط لوله ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت می‌باشد، سرعت پیگ ۱/۱۲۳ متر بر ثانیه خواهد شد.
از طرف دیگر طبق اطلاعات بدست آمده از واقعیت میدانی و ثبت زمان حرکت پیگ از ارسال کننده تا دریافت کننده، بار دیگر سرعت پیگ از رابطه (۴) محاسبه می گردد.

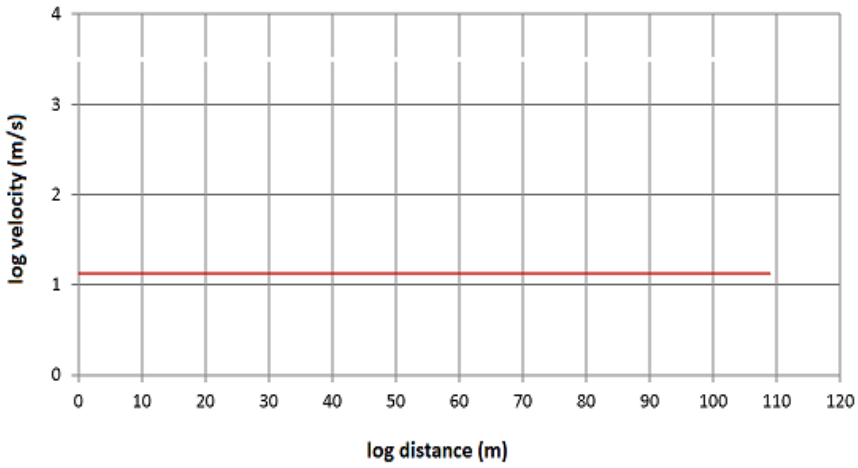
$$V={}^{x}/_{t} \quad (۴)$$

که این سرعت برای عملیات پیگ رانی شماره ۳، ۱/۱۴۳ متر بر ثانیه خواهد شد. همانطور که مشاهده می شود سرعت پیگ حاصل از رابطه تئوری و حاصل از اطلاعات جمع آوری شده میدانی، بسیار نزدیک می‌باشند. جدول ۵ سرعت پیگ تئوری و واقعی را برای هر چهار عملیات پیگ‌رانی نشان می‌دهد.

**جدول ۵: سرعت پیگ بر اساس رابطه تئوری و اطلاعات واقعی میدانی در ۴ عملیات پیگ‌رانی مختلف**

| عملیات پیگ‌رانی ↓ | قطر داخلی لوله (m) | زمان پیگ رانی (hr) | سرعت تئوری $(\frac{m}{s})$ | سرعت واقعی میدانی $(\frac{m}{s})$ |
|---|---|---|---|---|
| شماره ۱ | ۰/۳۴۱ | ۱۴ | ۱/۰۰۲ | ۰/۹۷۹ |
| شماره ۲ | ۰/۲۵۴ | ۱۸/۱۶ | ۱/۱۰۰ | ۱/۰۴۳ |
| شماره ۳ | ۰/۳۳۷ | ۲۶/۵ | ۱/۱۲۳ | ۱/۱۴۳ |
| شماره ۴ | ۰/۳۳۷ | --- | ۱/۱۲۳ | ۱/۱۲۵ |

پیگ هوشمند مغناطیسی استفاده شده در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴، نمودار سرعت زمان را بصورت مستقیم ارائه می‌دهد و بنابراین سرعت واقعی میدانی را بر اساس رابطه (۴) محاسبه نمی‌نماید . طبق این نمودار که قسمتی از آن در شکل ۸ نشان داده شده است، سرعت واقعی پیگ در مسیر ۱۰۹ کیلومتری عملیات پیگ‌رانی شماره ۴، دارای مقدار ثابت ۱/۱۲۵ متر بر ثانیه بوده است.




**شکل ۸: بخشی از نمودار سرعت پیگ بر حسب زمان در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴ [22]**

### ۳-۲- تاثیر وزن بر سرعت پیگ‌رانی

برای بررسی تاثیر وزن پیگ بر سرعت پیگ‌رانی، باید مشخصات هندسی خطوط لوله و دبی جریان در دو عملیات پیگ‌رانی



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

مختلف، دقیقا یکسان باشد. بنابراین پیگ‌رانی شماره ۳ و ۴ با هم قابل مقایسه خواهند بود. وزن پیگ تمیز کننده شماره ۳ حدود ۲۰ کیلوگرم و وزن پیگ هوشمند مغناطیسی شماره ۴ حدود ۲۰۰ کیلوگرم می‌باشد و اختلاف این دو پیگ از لحاظ وزنی قابل صرف نظر کردن نیست. طبق جدول ۵ اختلاف بسیار اندک سرعت واقعی میدانی پیگ در پیگ‌رانی های شماره ۳ و ۴، این نتیجه را در بر دارد که سرعت پیگ در طول لوله وابسته به وزن آن نمی‌باشد و تقریبا سرعت آن برابر سرعت جریان سیال است. همچنین قدرت مورد نیاز برای پمپاژ سیال در دو پیگ رانی شماره ۳ و۴ بستگی به وزن پیگ ندارد و ثابت است و فشار مورد نیاز در دریافت کننده ایجاد می‌گردد.

### ۳-۳- تاثیر میزان رسوب گرفتگی خط لوله بر افت فشار و دبی

با گذشت زمان و رسوب گرفتگی خط لوله، کاهش قطر داخلی لوله و به تبع آن کاهش سطح مقطع عبوری منجر به افزایش افت فشار خواهد شد. این افت فشار در واحد طول از رابطه (۵) که طبق رابطه سرویس پایپ لاین (IPS-E-PI-140) می‌باشد، بدست می‌آید.

$$\Delta P_L = \frac{0.00396\, Q^{1.748}\, \nu^{0.252}\, s}{D_i{}^{4.748}} \qquad (۵)$$

نتایج تاثیر میزان رسوب گرفتگی لوله برای سیالات نفت گاز، نفت سفید و بنزین بر افت فشار که بر اساس رابطه (۵) محاسبه شده است، برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر با دبی ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴، به ترتیب در جداول ۶، ۷ و ۸ ارائه گردیده است.

**جدول ۶: نتایج تاثیر رسوب بر افت فشار نفت گاز برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر در پیگ‌رانی شماره ۴**

| میزان رسوب (cm) | قطر داخلی لوله (in) | ضخامت متوسط لوله (in) | افت فشار لوله تمیز (psi) | افت فشار لوله رسوب گرفته (psi) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۱۳/۲۶۲ | ۰/۳۶۹ | ۴۲۹/۷۱ | ۴۲۹/۷۱ |
| ۰/۲ | ۱۳/۱۰۵ | ۰/۴۴۸ | ۴۲۹/۷۱ | ۴۵۴/۷۹ |
| ۰/۴ | ۱۲/۹۴۷ | ۰/۵۲۶ | ۴۲۹/۷۱ | ۴۸۱/۶۶ |
| ۰/۶ | ۱۲/۷۹۰ | ۰/۶۰۵ | ۴۲۹/۷۱ | ۵۱۰/۴۷ |
| ۰/۸ | ۱۲/۶۳۲ | ۰/۶۸۴ | ۴۲۹/۷۱ | ۵۴۱/۴۰ |
| ۱ | ۱۲/۴۷۵ | ۰/۷۶۳ | ۴۲۹/۷۱ | ۵۷۴/۶۳ |

**جدول ۷: نتایج تاثیر رسوب بر افت فشار نفت سفید برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر در پیگ‌رانی شماره ۴**

| میزان رسوب (cm) | قطر داخلی لوله (in) | ضخامت متوسط لوله (in) | افت فشار لوله تمیز (psi) | افت فشار لوله رسوب گرفته (psi) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۱۳/۲۶۲ | ۰/۳۶۹ | ۳۵۶/۶۱ | ۳۵۶/۶۱ |
| ۰/۲ | ۱۳/۱۰۵ | ۰/۴۴۸ | ۳۵۶/۶۱ | ۳۷۷/۴۲ |
| ۰/۴ | ۱۲/۹۴۷ | ۰/۵۲۶ | ۳۵۶/۶۱ | ۳۹۹/۷۲ |
| ۰/۶ | ۱۲/۷۹۰ | ۰/۶۰۵ | ۳۵۶/۶۱ | ۴۲۳/۶۴ |
| ۰/۸ | ۱۲/۶۳۲ | ۰/۶۸۴ | ۳۵۶/۶۱ | ۴۴۹/۳۱ |
| ۱ | ۱۲/۴۷۵ | ۰/۷۶۳ | ۳۵۶/۶۱ | ۴۷۶/۸۸ |

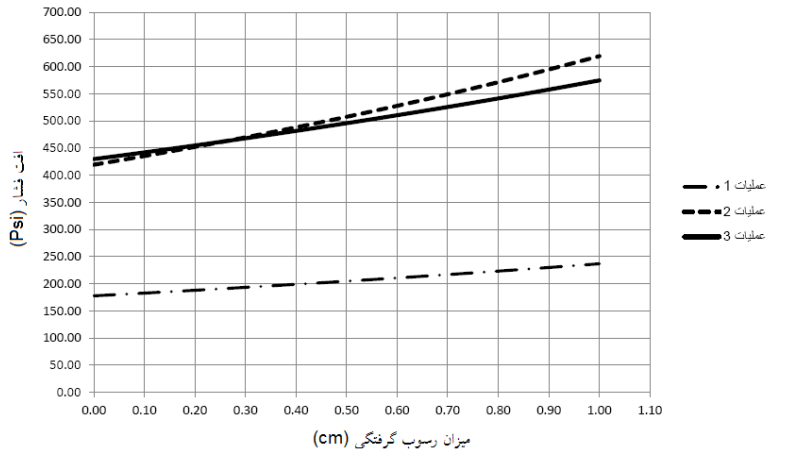
**جدول ۸: نتایج تاثیر رسوب بر افت فشار بنزین برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر در پیگ‌رانی شماره ۴**



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

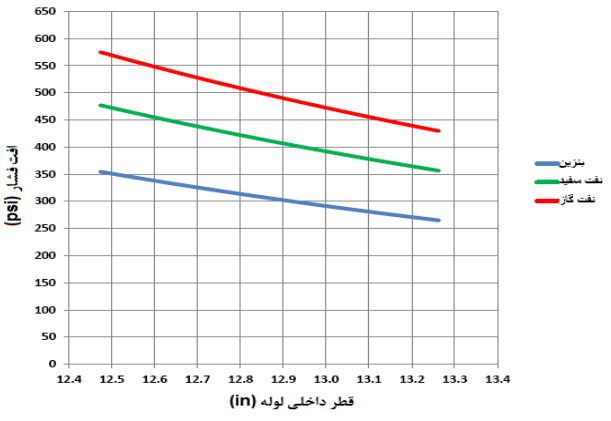
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

| میزان رسوب (cm) | قطر داخلی لوله (in) | ضخامت متوسط لوله (in) | افت فشار لوله تمیز (psi) | افت فشار لوله رسوب گرفته (psi) |
|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۱۳/۲۶۲ | ۰/۳۶۹ | ۲۶۵/۰۶ | ۲۶۵/۰۶ |
| ۰/۲ | ۱۳/۱۰۵ | ۰/۴۴۸ | ۲۶۵/۰۶ | ۲۸۰/۵۳ |
| ۰/۴ | ۱۲/۹۴۷ | ۰/۵۲۶ | ۲۶۵/۰۶ | ۲۹۷/۱۱ |
| ۰/۶ | ۱۲/۷۹۰ | ۰/۶۰۵ | ۲۶۵/۰۶ | ۳۱۴/۸۸ |
| ۰/۸ | ۱۲/۶۳۲ | ۰/۶۸۴ | ۲۶۵/۰۶ | ۳۳۳/۹۶ |
| ۱ | ۱۲/۴۷۵ | ۰/۷۶۳ | ۲۶۵/۰۶ | ۳۵۴/۴۶ |

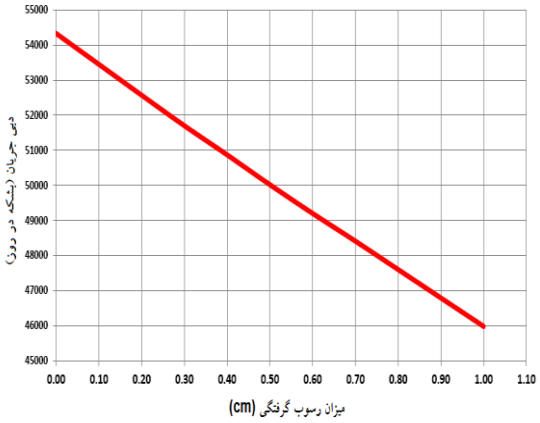



**شکل ۹ نمودار افت فشار بر حسب میزان رسوب برای سه عملیات پیگ‌رانی ۱، ۲ و ۳ برای نفت گاز**

قطر داخلی لوله بسته به میزان رسوب تغییر می‌کند و بر افت فشار و دبی جریان اثر می‌گذارد. شکل ۱۰ تغییرات افت فشار بر حسب قطر داخلی لوله را برای سه سیال نفت گاز، نفت سفید و بنزین در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، نفت گاز دچار شیب تغییرات بیشتری بر اثر تغییرات قطر داخلی لوله بوده و تاثیر پذیری بیشتری نسبت به نفت سفید و بنزین دارد.




**شکل ۱۰ نمودار افت فشار بر حسب قطر داخلی خط لوله در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴**




**شکل ۱۱ نمودار دبی جریان بر حسب میزان رسوب گرفتگی**

شکل ۱۱ تاثیر میزان رسوب گرفتگی بر دبی جریان با فرض افت فشار ثابت برای سیال نفت گاز در خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر را نشان می‌دهد.



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

### ۳-۴- تاثیر میزان رسوب گرفتگی خط لوله بر قدرت پمپ

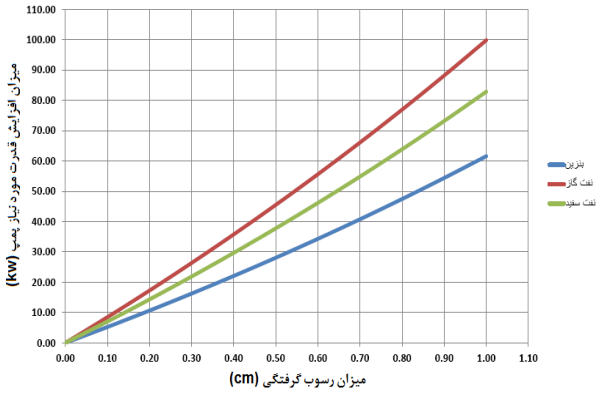
با توجه به تاثیر رسوب گرفتگی بر افت فشار، برای آن که بتوان از لوله رسوب گرفته، انتقال فرآورده را با همان دبی صورت داد، باید در ایستگاه اول، فشار خروجی را معادل افزایش افت فشارهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در خطوط لوله مختلف افزایش داد، که این امر خود موجب صرف انرژی بیشتر می‌گردد. قدرت پمپاژ تلمبه خانه در طول زمان پیگ رانی ثابت می‌باشد و دچار تغییر نمی‌شود.

نتایج تاثیر میزان رسوب گرفتگی لوله برای سیال نفت گاز بر قدرت مورد نیاز پمپ، برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر با دبی ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت در جدول ۹ ارائه گردیده است.

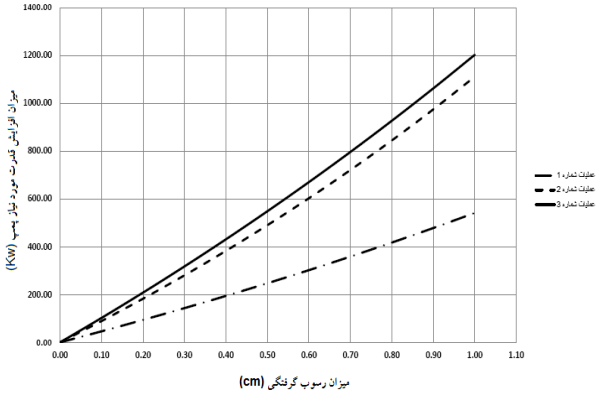
**جدول ۹: نتایج تاثیر رسوب بر قدرت مورد نیاز پمپ برای خط لوله ۱۴ اینچی بطول ۱۰۹/۰۰۸ کیلومتر نفت گاز**

| درصد افزایش قدرت پمپ | قدرت مورد نیاز پمپ در لوله رسوب گرفته (kW) | قدرت مورد نیاز پمپ در لوله تمیز (kW) | میزان رسوب (cm) |
|---|---|---|---|
| ۰ | ۲۹۶/۰۷ | ۲۹۶/۰۷ | ۰ |
| ٪۵/۸ | ۳۱۳/۳۵ | ۲۹۶/۰۷ | ۰/۲ |
| ٪۱۲ | ۳۳۱/۸۶ | ۲۹۶/۰۷ | ۰/۴ |
| ٪۱۸/۷ | ۳۵۱/۷۲ | ۲۹۶/۰۷ | ۰/۶ |
| ٪۲۶ | ۳۷۳/۰۳ | ۲۹۶/۰۷ | ۰/۸ |
| ٪۳۳/۷ | ۳۹۵/۹۲ | ۲۹۶/۰۷ | ۱ |

شکل ۱۲ تغییرات قدرت مورد نیاز پمپ بر حسب میزان رسوب گرفتگی را برای سه سیال نفت گاز، نفت سفید و بنزین در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴ نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است، میزان تاثیر پذیری قدرت پمپ در نفت گاز به رسوب گرفتگی بیشترین مقدار و در بنزنین کمترین مقدار را دارد. شکل ۱۳ نمودار قدرت پمپ بر حسب میزان رسوب را برای سه عملیات پیگ‌رانی ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد.




**شکل ۱۲: تاثیر رسوب گرفتگی بر قدرت مورد نیاز پمپ در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴**




**شکل۱۳: قدرت پمپ بر حسب میزان رسوب را برای سه عملیات پیگ‌رانی ۱، ۲ و ۳**

### ۳-۵- تاثیر شیب خط لوله بر فشار پشت پیگ در حرکت

یکی دیگر از فاکتورهای موثر بر عملکرد پیگ، شیب خط لوله و تغییرات آن می‌باشد و سبب می‌شود به طور مستمر بر پیگی که در جریان سیال حرکت می‌کند، مقادیر متفاوت فشار تحمیل شود ولی به علت توان یکسان و غیرمتغیر تلمبه‌خانه و ایجاد

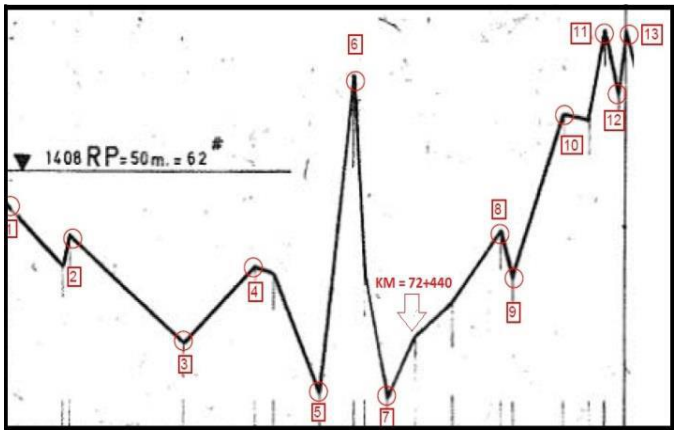


[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

قدرت پمپاژ برابر در طول مسیر، سرعت پیگ رانی و دبی جریان تغییر نمی‌کنند. بنابراین با تغییر ارتفاع سیال از سطح زمین تنها هد فشار استاتیکی به هد ارتفاع و بالعکس تبدیل می‌شوند.

شکل ۱۴ برشی از نقشه گرادیان هیدرولیک خط لوله مورد بررسی در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴ را نشان می‌دهد و نمایان کننده نقاطی از مسیر حرکت پیگ می‌باشد که به طور مشهود، شیب خط در آن نقاط دچار تغییر شده است. فشار معادل هر یک از این نقاط که از بررسی فشار لحظه‌ای پشت پیگ طبق نمودار فشار- مسافت پیگ‌رانی هوشمند شماره ۴ به دست آمده‌اند، در جدول ۱۰ نشان داده شده است.




**شکل ۱۴: برشی از نمودار گرادیان هیدرولیک خط لوله ۱۰۹/۰۰۸کیلومتری به قطر ۱۴ اینچ**

شکل ۱۵ نمودار تغییرات فشار پشت پیگ در طول مسیر را نشان می دهد. طبق این شکل مشخص است، با تغییر ارتفاع خط لوله و مسیر حرکت پیگ، هد ارتفاع و هد فشار استاتیکی به یکدیگر تبدیل می‌شوند. با کاهش ارتفاع مسیر (مانند مسیر بین نقطه ۶ و نقطه ۷ در شکل ۱۴)، از مقدار هد ارتفاع کاسته می‌شود و به همان نسبت، به مقدار هد فشار استاتیکی افزوده می‌شود، بر همین اساس فشار پشت پیگ طبق جدول ۱۰ از ۴۷۸/۵ psi در نقطه ۶ به ۱۰۰۰/۵ psi در نقطه ۷ افزایش می‌یابد. این در حالی است که هنگام ورود پیگ به قسمتی از مسیر که شیب خط نمودار هیدرولیک مثبت و مسیر در حالت سربالایی دارد (مانند مسیر بین نقطه ۹ و نقطه ۱۰ در شکل ۱۴)، به همین ترتیب فشار پشت پیگ طبق جدول ۱۰ از ۳۹۱/۵ psi در نقطه ۹ به ۲۹۰ psi در نقطه ۱۰ کاهش می‌یابد.

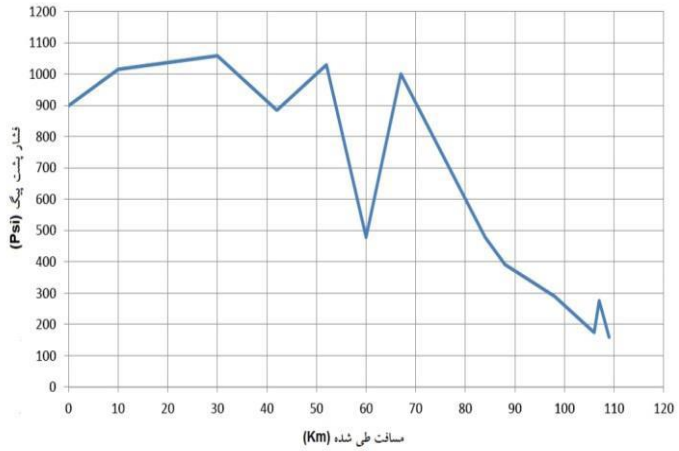
**جدول ۱۰: تغییرات شیب بر فشار پشت پیگ در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴**

| فشار پشت پیگ (psi) | مسافت طی شده از ایستگاه ارسال (km) | شماره نقاط طبق شکل ۱۴ |
|---|---|---|
| ۸۹۹ | ۰ | ۱ |
| ۱۰۱۵ | ۱۰ | ۲ |
| ۱۰۵۸/۵ | ۳۰ | ۳ |
| ۸۴۴/۵ | ۴۲ | ۴ |
| ۱۰۲۹/۵ | ۵۲ | ۵ |
| ۴۷۸/۵ | ۶۰ | ۶ |
| ۱۰۰۰/۵ | ۶۷ | ۷ |
| ۴۷۸/۵ | ۸۴ | ۸ |
| ۳۹۱/۵ | ۸۸ | ۹ |
| ۲۹۰ | ۹۸ | ۱۰ |
| ۱۷۴ | ۱۰۶ | ۱۱ |
| ۲۷۵/۵ | ۱۰۷ | ۱۲ |
| ۱۵۹/۵ | ۱۰۹ | ۱۳ |



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]




**شکل ۱۵: تغییرات شیب خط لوله در طول مسیر بر فشار پشت پیگ در عملیان پیگ‌رانی شماره ۴**

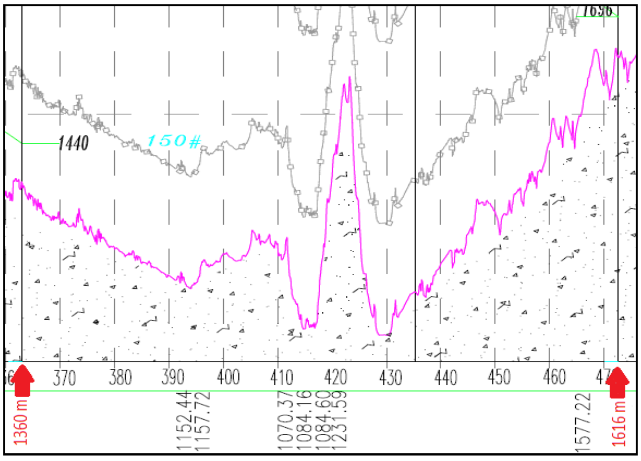
### ۳-۶- صحت سنجی نتایج

همواره قبل از انجام عملیات بازرسی خط لوله توسط یک پیگ هوشمند، خط لوله مورد نظر با یک پیگ تمیز کننده، رسوب زدایی می‌شود تا بازرسی خط دقیق باشد و ناهنجاری موجود در طول مسیر توسط سنسورهای پیگ هوشمند با دقت بالاتری مشخص شوند. جهت صحت سنجی نتایج، میزان فشار در مبدا ارسال کننده پیگ در عملیات پیگرانی شماره ۴ که از نوع بازرسی است، بصورت تئوریک طبق معادله کلی انرژی با استفاده از افت هد حالت بدون رسوب جدول ۶ محاسبه شده و با فشار واقعی در مبدا مقایسه می گردد.

طبق اندازه‌گیریهای انجام شده از پیگ‌رانی با پیگ هوشمند در عملیات شماره ۴، فشار خروجی پمپ ایستگاه مبدا برابر psi ۸۹۹ و در انتهای مسیر و در هنگام دریافت پیگ، برابر psi ۱۵۹ است. با استفاده از معادله انرژی در حالت کلی که طبق رابطه (۶) بیان می شود، می توان فشار را در ایستگاه ارسال کننده پیگ بدست آورد.

$$H_P + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + Z_1 = H_T + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + Z_2 + h_L \qquad (۶)$$

در طول مسیر پمپ و توربین وجود ندارد و سرعت ثابت است، از طرفی $h_L$ طبق حالت بدون رسوب جدول ۶ بدست می‌آید. ارتفاع ایستگاه مبدا و مقصد که همان $Z_1$ و $Z_2$ می‌باشند، طبق نقشه گرادیان هیدرولیک که برشی از آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است، محاسبه می‌شوند.




**شکل ۱۶: برشی از نقشه گرادیان هیدرولیک مسیر خط لوله در عملیات پیگ رانی شماره ۴**



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

با جایگذاری مقادیر مربوطه در رابطه (۶)، فشار تئوریک در مبدا ارسال کننده پیگ psi ۸۹۸/۱ بدست می‌آید که بسیار نزدیک به فشار واقعی اندازه‌گیری شده psi ۸۹۹ می‌باشد.

## ۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر به منظور تحلیل عملکرد پیگ و بررسی فاکتورهای موثر بر عملیات پیگ‌رانی در خطوط لوله انتقال مواد نفتی صورت گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از عملیات‌های پیگ‌رانی شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ با هدف محاسبه سرعت واقعی پیگ و مقایسه آن با رابطه تئوریک، مشخص گردید که سرعت پیگ در هنگام عدم استفاده از بای پس تقریبا با سرعت جریان سیال برابر می‌باشد. در عملیات‌های پیگ‌رانی شماره ۳ و ۴ که در یک خط لوله مشترک با سیال مشابه (نفت گاز) و دبی ۳۶۰ متر مکعب بر ساعت در یک مسیر حدود ۱۰۹ کیلومتری انجام شده است، علیرغم اینکه وزن پیگ‌های شماره ۳ و ۴ متفاوت است، به این صورت که پیگ شماره ۳ که یک پیگ تمیزکننده بوده و وزن آن حدود ۲۰ تا ۳۰ کیلوگرم است و پیگ شماره ۴ که یک پیگ هوشمند مغناطیسی بوده و وزن آن حدود ۲۰۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم می‌باشد، سرعت های واقعی به دست آمده برای عملیات‌های پیگ‌رانی شماره ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۱/۱۴۳ متر بر ثانیه و ۱/۱۲۵ متر بر ثانیه می‌باشد. از آن جا که سرعت‌های به دست آمده اختلاف بسیار کمی دارند، می توان تاثیر نیروی وزن بر سرعت پیگ در حال حرکت در جریان سیال داخل لوله را ناچیز دانست. وزن پیگ در حالت‌های مختلف، بر مقدار قدرت مورد نیاز برای پمپاژ سیال در طول پیگ‌رانی تاثیری نداشته و قدرت پمپ در طول زمان عملیات ثابت است. همچنین در دو پیگ‌رانی با شرایط عملیاتی یکسان ولی وزن های متفاوت مانند عملیات‌های شماره ۳ و۴ که در طول یک مسیر ۱۰۹ کیلومتری صورت می‌گیرند، قدرت پمپ یکسان خواهد بود و تفاوت‌های اندک مربوط به شرایط عملیاتی پمپ در زمان‌های مختلف می‌باشد. تاثیر رسوب گرفتگی جدار داخلی لوله بر افت فشار جریان سیال عبوری، برای سیال نفت گاز بیشتر از نفت سفید و بنزین و تاثیر آن بر بنزین کمتر از دوسیال دیگر می‌باشد. میزان رسوب گرفتگی در فشار ثابت، دبی جریان را کاهش می‌دهد به طوری که به عنوان مثال در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴، با فرض اینکه سطح داخلی لوله ۰/۴ سانتی متر رسوب گرفته باشد، دبی جریان نسبت به حالت بدون رسوب، ۳۴۶۰ بشکه در شبانه روز معادل ۶,۳ درصد کاهش یافته است. رسوب گرفتگی جدار داخلی لوله، قدرت مورد نیاز پمپ را افزایش می‌دهد به طوریکه میزان رسوب ۰/۷ سانتی متر در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴ با سیال بنزین، قدرت مورد نیاز پمپ را ۴۰/۷۸ کیلووات معادل ۲۲/۳ درصد افزایش داده است. شیب خط لوله بر مقدار فشاری که پیگ متحمل می‌شود، تاثیر می گذارد. در برخورد پیگ با شیب منفی و سراشیبی فشار پشت پیگ افزایش خواهد یافت و در حقیقت طبق حالتی از معادله انرژی، هد ارتفاع به هد فشار تبدیل خواهد شد و این اتفاق در مواجه پیگ با شیب مثبت در طول مسیر منجر به کاهش فشار پشت پیگ خواهد شد. به عنوان مثال در عملیات پیگ‌رانی شماره ۴، در حرکت پیگ از نقطه ۵ به سمت نقطه ۶، فشار پشت پیگ از مقدار psi ۱۰۲۹/۵ به psi ۴۷۸/۵ کاهش یافته است.

## فهرست علایم

| | |
|---|---|
| $V$ | سرعت سیال یا سرعت پیگ‌رانی $(m/s)$ |
| $Q$ | دبی حجمی $(m^3/hr)$ |
| $t$ | زمان $(s)$ |
| $P$ | فشار استاتیکی $(psi)$ |
| $A$ | سطح مقطع لوله $(in^2)$ |
| $x$ | مسافت $(m)$ |
| $thk$ | ضخامت لوله $(in)$ |
| $D$ | قطر لوله $(in)$ |
| $\Delta P$ | افت فشار داخل لوله $(psi)$ |
| $H$ | هد پمپ یا توربین $(m)$ |



[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

| | |
|---|---|
| $h$ | افت هد داخل لوله (m) |
| $Z$ | ارتفاع (m) |
| $s$ | وزن مخصوص سیال ($N/m^3$) |
| | **علایم یونانی** |
| ν | ویسکوزیته سینماتیکی (c. st) |
| | **زیرنویس‌ها** |
| av | میانگین |
| i | داخلی |
| L | افت در طول |
| P | پمپ |
| T | توربین |

## مراجع


[1] X .Zhu, S. Zhang, X. Li, D. Wang and D. Yu, 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*, 23 (2015)127-138.

[2] H. Zhang, S. Zhang, S. Liu, Y. Wang and L. Lin. Measurement and analysis of friction and dynamic characteristics of PIG's sealing disc passing through girth weld in oil and gas pipeline, *Measurement*, 64 (2015) 112-122.

[3] J. Dong, H. Zhang and S. Liu, 3D Printed Bio-Inspired Sealing Disc of pipeline inspection gauges (PIGs) in Small Diameter Pipeline, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 61 (2019) 344-356.

[4] T. Guibin, Z. Shimin, Z. Xiaoxiao, S. Liyun and Z. Qingbao, Research on Bypass-valve and its Resistance Characteristic of Speed Regulating PIG in Gas Pipeline, Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Shanghai, China (2011).

[5] X. Zhu, S. Zhang, D. Wang, W. Wang and S. Liu, The Impact of Pipeline Bend on Bi-directional Pig and the Theories for the Optimal Pig Design, 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan 2013.

[6] F. Esmaeilzadeh, D. Mowla and M. Asemani, Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 69 (2009) 100–106.

[7] X. Zhu, D. Wang, H. Yeung, S. Zhang and S. Liu, Comparison of linear and nonlinear simulations of bidirectional pig contact forces in gas pipelines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 27(1) (2015) 151-157.

[8] M.H.W. Hendrixa, C.M. Graaflandb and R.A.J. Van Ostayenc, Frictional forces for disc-type pigging of pipelines, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171 (2018) 905–918.

[9] T. Deng, J. Gong, J. Zhou, Y. Zhang and H. Li, Numerical simulation of the effects of vaporization on the motion of PIG during pigging process, *Asia-Pacific Journal Of Chemical Engineering*, 9 (2014) 854–865.

[10] C. Liua, Y. Weia, Y. Caoa, S. Zhangb and Y. Sunb, Traveling ability of pipeline inspection gaug (PIG) in elbow under different friction coefficients by 3D FEM, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 75 (2020) 103134.

[11] X. Wu, S. Niu, C. Li and Y. He, Experimental research of the dynamic behavior of the natural gas suspension pipeline aerial crossing during pigging process, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 68 (2020) 104239.

[12] M. Mirshamsi and M. Rafeeyan, Speed control of inspection pig in gas pipelines using slidi modecontrol, *Journal of Process Control*, 77 (2019) 134–140.

[13] A. Boghi, L. Brown, R. Sawko and P. Christopher, An inertial two-phase model of wax transport in a pipeline during pigging operations, *International Journal of Multiphase Flow*, 94 (2017) 17-30.

[14] W. Li, Q. Huang, X. Dong, X. Gao, L. Hou and W. Wang, A theoretical model for predicting the wax breaking force during pipeline pigging, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 169 (2018) 654-662.


[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

[15] M. Mirshamsi and M. Rafeeyan, Dynamic analysis and simulation of long pig in gas pipeline, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 23 (2015) 294-303.

[16] M.H. Sadeghi, S. Chitsaz and M.M. Ettefagh, Effect of PIG's physical parameters on dynamic behavior of above ground pipeline in pigging operation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132 (2019) 692–720.

[17] D. Mishra, K.K. Agrawal, A. Abbas, R.S. Dr and R.S.Y. Dr, PIG [Pipe Inspection Gauge]: An Artificial Dustman for Cross Country Pipelines, *Procedia Computer Science*, 152 (2019) 333–340.

[18] H. Zhang, S. Zhang, S. Liu and Y. Wang, Collisional vibration of PIGs (pipeline inspection gauges) passing through girth welds in pipelines, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 37 (2017) 15-28.

[19] A.A. Mazreah, F.B.I. Alnaimi and K.S.M. Sahari, Novel design for PIG to eliminate the effect of hydraulic transients in oil and gas pipelines, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156 (2017) 250-257.

[۲۰] دانش مسلک، اشکان (۱۳۹۶) مقدمه ای بر پیگ رانی خط لوله، ترجمه اشکان، تهران: نشریه بین المللی صنعت نفت و گاز

[۲۱] مدرک گرادیان هیدرولیک تهیه شده در واحد مهندسی شرکت بهره بردار

[۲۲ ]خروجی پیگ هوشمند MFL ، واحد کنترل عملیات منطقه۴

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]

**چکیده انگلیسی:**

# Experimental study of the effective factors on pig performance in oil pipelines

**Saman Sheikh Moghaddas, Shahram Etemadi Haghighi*, Morteza Khayat**

Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

Received: July 2022, Accepted: September 2022

## Abstract

Due to the importance of pipelines as vital arteries for fuel and energy supply in the world, maintenance, stability, continuity of transmission, supply of refinery feeds and fuel supply to various industries is very important and necessary. The present study was conducted to analyze the performance of pigs and to investigate the effect of factors affecting pigging operation in oil pipelines. In this research, by performing experiments in real and operational conditions, the results of pigging operation in product pipelines in different diameters and lengths have been investigated, so that the effect of fouling of the inner wall of the pipeline on the flow rate, pump required power in pump house and pressure drop in different products with different physical conditions as well as calculation and evaluation of pigging speed in each operation and the effect of pig weight on pigging speed and power required in pump houses are presented. The results of this study show that pigging in a 14-inch oil pipeline with a length of 109 km and a flow rate of 360 cubic meters per hour, equivalent to 54,330 barrels per day, which has 0.4 cm of fouling, prevents a reduction in volumetric flow rate of 23 cubic meters per hour, equivalent to 3460 barrels per day, increases the required power of the pump in the pump house by 35.79 kW and increases the pressure drop by 8.9%. Also, by examining the effect of pipeline slope on the pressure behind the pig, knowing that the pump power in the pump house does not change and the pig speed is the same along the route, it is determined that increasing the height of the pipeline causes the static pressure head converted to a height head, and if the pig enters downhill areas, it will cause the height head converted to pressure behind the pig.

**Key words:** Pig, Pressure drop, Pipelines, Volumetric flow rate, Fouling.

*corresponding author: **setemadi@srbiau.ac.ir**

**Cite this article as:** Saman Sheikh Moghaddas, Shahram Etemadi Haghighi, Morteza Khayat, Experimental study of the effective factors on pig performance in oil pipelines. Journal of Energy Conversion, 2023, 9(5), 19-36. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3**

[ Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.20089813.1401.9.5.4.3 ]