

تشخیص وقوع گیر رشته حفاری با تحلیل سیگنال گشتاور

فاطمه سادات روحانی^{۱*} و حمید حسن پور^۲

۱- گروه حفاری، پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۱/۹

چکیده

وقوع گیر در رشته حفاری در صنعت نفت یکی از مشکلات پرهزینه و وقت‌گیر عملیات حفاری بوده که پارامترهای حین حفاری، نظیر گشتاور رشته حفاری و ساختار زمین در وقوع گیر رشته حفاری تاثیر مستقیمی در این مشکل دارند. تجارب نشان داده است در زمان گیر رشته حفاری، گشتاور به‌طور لحظه‌ای افزایش و سرعت چرخش متعادل می‌یابد. از آنجائی که در تشخیص این تغییرات امکان بروز خطای انسان و عدم دقت کافی وجود دارد لذا با شناسایی تغییرات سوزنی شکل مشترک سیگنال گشتاور و سرعت چرخش متعادل، لحظه وقوع گیر را می‌توان تشخیص داد. در این تحقیق تغییرات مثبت و منفی سیگنال تشخیص داده شده و از معیارهای دقت و خطای دسته‌بندی برای ارائه نتایج استفاده گردیده و نتایج شبیه‌سازی بیانگر کارایی بالای روش پیشنهادی، نسبت به روش‌های موجود می‌باشد. نتایج، نشان‌دهنده پیدا نمودن ۹۵٪ از گیرهای رشته در نمونه حفاری‌های در دسترس بود. به‌علاوه، نشان داده شده است که روش پیشنهادی به زمان کوتاهی برای آنالیز یک سیگنال نیاز دارد، بنابراین می‌توان از آن در سیستم‌های بلادرنگ استفاده کرد.

کلمات کلیدی: گیر رشته حفاری، پردازش سیگنال، گشتاور، چرخش متعادل، هوش مصنوعی.

مقدمه

خسارت مالی زیادی به‌همراه دارد. به‌طور کلی، محدودیت در گردش رشته و عدم وجود حرکت بالا و پایین در رشته حفاری را گیر رشته حفاری می‌گویند. در عملیات حفاری در زیر سطح دریا، گیر رشته‌ها به تنهایی می‌تواند هزینه توسعه یک چاه را به اندازه ۳۰٪ افزایش دهد [۲]. بیشتر آمارها نشان می‌دهد که اگر گیر رشته در ساعات اولیه وقوع شناسایی شود مشکل راحت‌تر حل می‌گردد [۳]. نیروهای درون چاهی که مانع چرخش یا خروج رشته‌ها از چاه می‌شوند را می‌توان گیر رشته حفاری تعریف نمود [۲].

عملیات حفاری نفت و گاز بسیار گران می‌باشد و از این رو تعجب‌آور نیست که اشتباهات و حوادث در طول حفاری سبب ایجاد هزینه‌های زیادی شود. حوادث ممکن است منجر به از دست دادن تجهیزات گران قیمت و متعاقب آن، تاخیر عملیات برای روزها و یا هفته‌ها گردد [۱]. یکی از مشکلات پرهزینه و وقت‌گیر عملیات حفاری وقوع گیر رشته حفاری است که اگر سریع اقدام و گیر رشته‌ها آزاد نشود،

*مسئول مکاتبات

rohanif@ripi.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2017.2504.2161)

را دریافت کرده است پاسخ مطلوب را می‌دهد [۲]. در نتیجه یافتن روشی که بدون توجه به سازند یا مخزن، برای حفاری‌های خشکی و دریا بهینه باشد، بسیار کارآمد خواهد بود.

گشتاور^۱ نیرویی است که در اثر دوران رشته حفاری ایجاد می‌شود. تغییرات ناگهانی در گشتاور معمولاً نشانه‌ای از عملکرد غیر طبیعی حفاری است [۸]. گشتاور یکی از فاکتورهای مهم در پارامترهای حفاری است و معمولاً با توجه به نوع سازند و سابقه حفاری چاه‌های مجاور، یک محدوده مجاز برای گشتاور تعریف می‌شود که در تمام طول عملیات باید گشتاور در این محدوده نگه داشته شود. حال اگر رشته حفاری گیر کند، از آنجا که نیروی چرخش همچنان به رشته حفاری اعمال می‌شود در نتیجه گشتاور به‌طور لحظه‌ای بالا می‌رود [۹]. نیروی گشتاور در وقوع گیر رشته حفاری موثر است، و در بسیاری از علل مختلف گیر رشته حفاری عامل شناسایی گیر است. همچنین می‌توان با استفاده از اعمال نیروهایی برای بالا بردن گشتاور، در برخی موارد گیر پیش آمده را برطرف کرد [۱۰]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سرعت چرخش دورانی^۲ مته حفاری در لحظه وقوع گیر رشته به‌صورت ناگهانی کاهش می‌یابد. اهمیت RPM از آن جهت است که هر گاه رشته حفاری گیر کند، قابلیت چرخش مته کاهش یافته و اصطکاک به‌وجود آمده از چرخش آن جلوگیری می‌کند. در حال حاضر حین عملیات حفاری، اپراتور نمودارگیری^۳ با کنترل حفار با تحت نظر گرفتن این پارامترها و بررسی لحظه‌ای آنها و نیز استفاده از محدودکننده‌های مقدار پارامتر که بر روی گشتاور و یا دیگر پارامترها تعریف می‌شوند، از بروز گیر رشته جلوگیری می‌کند از آنجا که این روش وابستگی کامل به اپراتور دارد، دقیق و قابل اتکا نیست.

پس از گیرکردن یک رشته در عملیات حفاری، تلاش‌های زیادی برای بیرون آوردن آن صورت می‌گیرد. از جمله روش‌های مرسوم و شناخته شده آزادسازی رشته‌های حفاری، روش افزایش کشش رو به بالا و افزایش وزن رو به پایین می‌باشند که تا حدودی وقت‌گیر و هزینه‌بر هستند؛ ولی در بیشتر مواقع منجر به آزادسازی رشته حفاری از چاه می‌شوند [۴]. مشکل گیر رشته حفاری زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که به دلایلی نتوان رشته حفاری را از چاه بیرون آورد. در این صورت تنها راه حل، بریدن رشته حفاری در چاه و انجام عملیات مانده‌یابی و در بدترین حالت، مسدودکردن قسمت گیر و حفاری چاه انحرافی برای انجام ادامه عملیات حفاری می‌باشد [۵]. این امر باعث تغییر برنامه حفاری، افزایش زمان و هزینه بسیاری خواهد شد. عوامل زیادی در گیر رشته موثر هستند که به دو گروه گیر مکانیکی و گیر نیروهای تفاضل فشاری تقسیم‌بندی می‌شوند. امروزه بیشتر حفاری‌ها به‌صورت جهت‌دار و افقی انجام می‌شود و پیچیدگی حفاری جهت‌دار باعث بالارفتن ریسک گیر رشته حفاری می‌شود. گرچه گیر رشته حفاری، حتی زمانی که بیشتر حفاری‌ها به‌صورت عمودی انجام نمی‌شود، نیز وجود دارد [۶]. در هنگام گیر نمودن رشته حفاری در چاه، احتمال آزادسازی رشته‌ها با گذشت زمان کم می‌شود. لذا واکنش نادرست به‌راحتی می‌تواند شرایط را بدتر کرده و هزینه‌های سنگین به بار آورد. پس در قدم اول باید گیر پیش آمده به سرعت شناسایی شود و سپس نسبت به آزادسازی آن اقدام گردد [۷].

تاکنون روش‌های بسیاری برای پیش‌بینی و تشخیص گیر رشته حفاری معرفی شده است. در تمامی روش‌های یاد شده اطلاعات یک مخزن یا سازند خاص مورد پردازش قرار می‌گیرد، چرا که تنظیمات پارامترهای حفاری و نوع گل استفاده شده در هر منطقه یا سازند متفاوت است [۷]. بنابراین هر روش فقط برای همان منطقه‌ای که اطلاعات

1. Torque

2. Rotation Per Minute (RPM)

3. Mud Logging

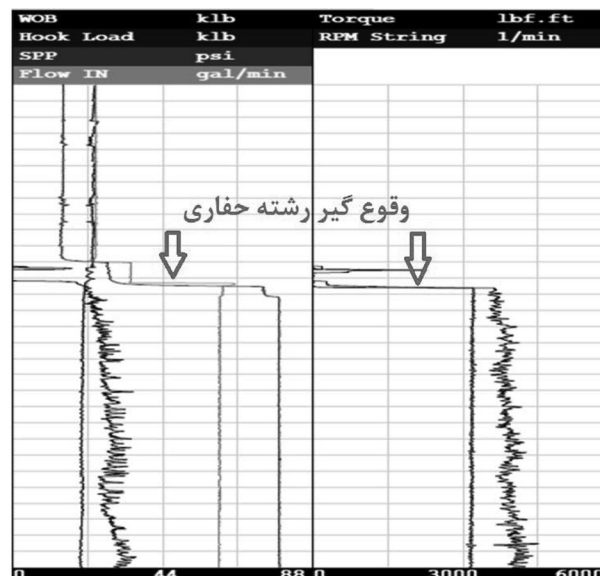
منفی سیگنال چرخش مته، که در یک زمان اتفاق افتاده باشد، لحظه گیر کردن رشته حفاری را با دقت بسیار خوبی شناسایی کند.

مروری بر کارهای انجام شده در تشخیص وقوع گیر رشته حفاری

وارن در سال ۱۹۴۰ یک مقاله پایه در مورد علل وقوع، جلوگیری و رفع گیر رشته نوشت و در آن علل اصلی گیر کردن رشته حفاری را سیال حفاری و مشکلات آن، چسبیدن رشته حفاری به جداره و عوامل زمین‌شناسی معرفی کرد [۱۳]. کینگزبروک و همکارانش به بررسی عوامل اصلی گیر رشته حفاری در چاه‌های خلیج مکزیک پرداختند. آنها ۱۳۱ چاه دارای مشکل گیر حفاری، را بررسی آماری نمودند و با استفاده از آن توانستند به پیش‌بینی امکان گیر کردن رشته براساس تحلیل آماری پارامترهای حفاری در چاه‌های اطراف پردازند. تحقیقات آنها نشان داد که با استفاده از الگوهای حاکم بر چاه‌های سالم - که دچار مشکل گیر رشته نشده باشند - می‌توان برنامه‌های قابل اتکایی برای چاه‌های آینده داشت که امکان مشکل گیر رشته را کمتر کند [۱۴].

همچنین تغییرات این دو پارامتر با توجه به سیاست حفاری، زیاد است و هر تغییر در آنها نشان‌دهنده گیر رشته حفاری نیست. با در نظر گرفتن نکات یاد شده در مورد گشتاور و RPM، می‌خواهیم با استفاده از تکنیک‌های جدید پردازش سیگنال، وقوع گیر رشته حفاری را درست در لحظه وقوع شناسایی کنیم. این کار کمک شایانی به تیم عملیات حفاری برای رفع مشکل و کاهش زمان و هزینه حفاری می‌کند [۱۲ و ۱۱]. همچنین این کار قدم مهمی برای رسیدن به حفاری هوشمند و حذف انسان از روند حفاری است.

گرچه امروزه استفاده از مادلاگینگ باعث شده تا اطلاعات ارزشمند حفاری در اختیار تیم عملیاتی قرار گیرد اما مادلاگینگ فقط اطلاعات سطح و ته چاه را مانیتور می‌کند و نتیجه‌گیری از اطلاعات بر عهده تیم حفاری است. شکل ۱ گزارش مادلاگینگ در لحظه وقوع گیر رشته حفاری را نشان می‌دهد. هدف آینده برای حفاری چاه‌های هیدروکربوری در تمام دنیا رسیدن به روند حفاری بلادرنگ و حفاری هوشمند بدون نیاز به دخالت انسانی در حین عملیات است. بنابراین روش ارائه شده این مقاله می‌تواند با شناسایی تغییرات سوزنی با شیب مثبت سیگنال گشتاور و تغییرات سوزنی با شیب



شکل ۱ نمودار پارامترهای گشتاور، RPM، وزن روی مته، هوک لود، فشار پمپ و نرخ گل ورودی به چاه هنگام وقوع گیر رشته

طراحی کرد. وی اعلام کرد مقبولیت این روش تنها برای مواقعی بالا است که توزیع نمونه‌ها نرمال باشد [۱۸]. سیروری و همکارانش برای پیش‌بینی و جلوگیری از گیر رشته حفاری از شبکه‌های عصبی استفاده کردند. روش آن‌ها فقط به گیر رشته به دلیل نیروهای تفاضل فشاری پرداخت. این مقاله از دو پایگاه داده مجزا بر اساس گل حفاری استفاده شده، گل پایه آب و گل پایه روغنی، استفاده کرد و توانست نتایج قابل قبولی با درصد خطای پایین ارائه دهد [۱۹]. پورداد و همکارانش از روش ماشین‌بردار پشتیبان برای دسته‌بندی پارامترهای حفاری در سه گروه گیر مکانیکی، گیر دیفرانسیل و بدون گیر استفاده کردند. پارامترهای مورد استفاده آن‌ها گل حفاری و مشخصات آن بود. آن‌ها مدلی ارائه دادند که بتواند انواع گیر رشته حفاری را شناسایی و به انواع آن دسته‌بندی کند تا بتواند بهترین روش حل مشکل را براساس داده‌های پیشین ثبت شده، پیشنهاد دهد. آن‌ها داده‌های مورد استفاده را از میادین نفتی ایران انتخاب و دقت روش را ۹۵٪ عنوان کردند [۲۰]. حصیمی و همکارانش به پیش‌بینی امکان گیر رشته حفاری با شبکه‌های عصبی پرداختند. در این مطالعه دلایل گیر رشته حفاری، اختلاف فشاری، تنگی چاه، هیدرولیک ضعیف گل حفاری، آرایش نامناسب رشته حفاری، کیک گل حفاری و تاثیرات عوامل زمین‌شناسی معرفی شد [۵]. نراقی و همکارانش به پیش‌بینی امکان گیر رشته حفاری با روش یادگیری فعال پرداختند. تمرکز گروه بر گیر ناشی از نیروهای تفاضل فشاری بود. با بررسی ۱۵۰ مورد گزارش روزانه حفاری آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین عامل در گیر رشته، دور بر دقیقه رشته و مقاومت ژله‌ای^۳ حفاری است [۲۱]. هدج و همکارانش به پیش‌بینی کشش و گشتاور بی‌درنگ عملیات حفاری با استفاده از روش‌های یادگیری آماری پرداختند.

بردلی و همکارانش مقاله‌ای در مورد بررسی مشکل گیر رشته در چاه‌های نفت شمال و خلیج مکزیک منتشر کردند که در آن از اطلاعات ۹۸ چاه برای بررسی این مشکل پرداختند. آن‌ها علت ۷۰٪ از گیر رشته را علل مکانیکی تشخیص دادند و نشان دادند که ۵۰٪ از گیر رشته هنگامی رخ می‌دهد که رشته حفاری ثابت و بدون چرخش است و فقط متهم می‌چرخد [۱۵]. جاردین و همکارانش به بررسی عوامل دخیل در گیر رشته پرداختند و زنگ خطری برای جلوگیری از گیر رشته طراحی کردند که بر اساس دو پارامتر نیروی کششی پایین متهم و گشتاور طراحی شده بود [۸]. بیگلر و کوهن یک بانک اطلاعاتی از چاه‌های خلیج مکزیک ایجاد کردند که شامل ۷۳ چاه بدون مشکل گیر و ۵۴ چاه دارای مشکل گیر رشته حفاری بود. مبنای مطالعه آن‌ها تحلیل‌های اولیه مقایسه‌ای برای ۲۲ پارامتر حفاری بود. این تحلیل‌ها با تلفیق متغیرهای حفاری انجام گردید. آن‌ها نه تنها احتمال گیر رشته‌ها را پیش‌بینی کردند، بلکه توانستند مکانیسم آن را نیز شناسایی کنند [۱۶]. یاریم و همکارانش ابتکار یک شرکت^۱ را برای حل مشکل گیر رشته شرح دادند و نشان دادند که ۵۴٪ از حوادث گیر رشته در زمان چرخش برای بیرون کشیدن رشته حفاری از چاه رخ می‌دهد. آن‌ها با استفاده از روش آماری نشان دادند که برای اجتناب از گیر رشته تمرکز گروه باید بر هندسه چاه، فشار دیفرانسیل و شرایط سازند و گل حفاری باشد. با تمرکز بر این نکات در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ نسبت به مدت زمان مشابه سال‌های قبل، ۲۵٪ کمتر مشکل گیر رشته پیش آمد و هزینه حدود ۲۰۰ هزار دلار کاهش یافت [۱۷].

ویزنی از روش رگرسیون منطقی^۲ برای شناسایی و پیش‌بینی گیر رشته حفاری استفاده کرد. وی دو مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی گیر رشته، یکی برای چاه‌های حفر شده با گل پایه روغنی و دیگری برای چاه‌های حفر شده با گل پایه آبی

1. Schlumberger Drilling Company

2. Logistic Regression

3. Gel Strength

تنظیمات پارامترهای حفاری و نوع گل استفاده شده در هر منطقه یا سازند متفاوت است [۷]. بنابراین هر روش فقط برای همان منطقه‌ای که اطلاعات را دریافت کرده است پاسخ مطلوب را می‌دهد [۸]. در نتیجه یافتن روشی که بدون توجه به سازند یا مخزن، برای حفاری‌های خشکی و دریا بهینه باشد، بسیار کارآمد خواهد بود. در روش ارائه شده در این مقاله وقوع گیر رشته حفاری مستقل از چاه، منطقه و سازند محل حفاری است و به راحتی می‌تواند برای بهینه‌سازی حفاری چاه‌های نفت و گاز در هر منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

روش پیشنهادی برای تشخیص وقوع گیر رشته حفاری

در موضوع حفاری چاه، کمیت‌هایی چون گشتاور، سرعت چرخش مته حفاری و فشار پمپ در واحد زمان متغیر بوده و قابل اندازه‌گیری می‌باشند. هر کمیت متغیر با زمان یا مکان که قابل اندازه‌گیری باشد به صورت سری زمانی قابل نمایش است و با علم پردازش سیگنال، قابل پردازش می‌باشد. براساس نکته کلیدی به دست آمده از کارشناسان حفاری، گیر در لحظه‌ای رخ می‌دهد که گشتاور ناگهان بالا رود و سرعت گردش مته ناگهان پایین آید، به این نتیجه خواهیم رسید که روشی را ابداع کرده تا این دو تغییر مهم را در سیگنال گشتاور و RPM را شناسایی کند و اگر هر دو باهم اتفاق افتادند، به عنوان لحظه گیر رشته ثبت شود (شکل ۲). البته توجه به دو نکته ضروری است که اولاً تغییرات باید ناگهانی باشند و ثانیاً در لحظه وقوع فرکانس بالا و زمان کوتاه را به خود اختصاص دهند. از آنجا که این ویژگی همان تعریف تغییرات سوزنی شکل در سیگنال هاست، بنابراین به نظر می‌رسد شناسایی تغییرات سوزنی در دو سیگنال گشتاور و RPM منجر به تشخیص لحظه وقوع گیر رشته حفاری شود.

وی برای پیش‌بینی از پارامترهای سطح چاه استفاده می‌کرد و از سه روش رگرسیون خود راه‌انداز، جنگل‌های تصادفی و ماشین بردار پشتیبان استفاده کرد. این پیش‌بینی از مقادیر ناخواسته گشتاور، که ممکن است مشکلات حفاری از جمله گیر رشته حفاری را ایجاد کند، جلوگیری می‌کرد. در مقاله عنوان شده که روش برای عملکرد درست وابسته به اطلاعات سازند است. یعنی هر بار فقط برای یک سازند تنظیم شده و جواب درست می‌دهد [۲۲].

اپیمی و همکارانش یک مقاله بازبینی در مورد کاربرد روش‌های هوش مصنوعی در حفاری چاه‌های نفت منتشر کردند. آنها به بررسی مزایا و معیبات روش‌های استدلال مبتنی بر مورد، الگوریتم ژنتیک، شبکه‌های عصبی، منطق فازی، ماشین بردار پشتیبان، سیستم‌های هوشمند و ساخت پایگاه دانش پرداختند و نمونه‌های متعدد از استفاده از این ابزار را مورد بررسی قرار دادند. سود استفاده از روش‌های هوش مصنوعی صرفه‌جویی در زمان و هزینه، به حداقل رساندن ریسک عملیات، بهبود بهره‌وری و بهینه‌سازی بخش‌های مختلف عنوان شد [۲۳].

سالمین و همکارانش روش جدیدی برای پیش‌بینی گیر رشته حفاری با مدل خودکار بلادرنگ و تجزیه تحلیل داده‌ها ارائه دادند. این روش از تمام داده‌های ثبت شده در حفاری‌های پیشین استفاده می‌کرد و با ترکیب دو روش انحراف از اطلاعات بلادرنگ در مدل‌های پیش‌بینی شده با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی کشش و گشتاور^۱ و تجزیه و تحلیل نرخ تغییرات با استفاده از داده‌های بلافاصله توانست وقوع خطر را پیش‌بینی کند. پارامترهای مورد استفاده در این روش فشار پمپ، سرعت جریان، گشتاور، سرعت چرخشی، بار روی قلاب و وزن روی مته است. در کنار این مجموعه داده ورودی‌های ثابتی چون پیکربندی رشته حفاری و بررسی‌های جهت حفاری هم مورد استفاده قرار می‌گرفت [۶]. در تمامی روش‌های یاد شده اطلاعات یک مخزن یا سازند خاص مورد پردازش قرار می‌گیرد، چرا که



شکل ۲ مراحل شناسایی گیر رشته حفاری از طریق تحلیل سیگنال گشتاور

در نظر گرفتن فرکانس تشخیص تغییرات سوزنی شکل را می‌دهد [۲۸]. حد آستانه در این روش یک بزرگ‌نمایی از میانگین اپراتور غیرخطی انرژی است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Thr} = C \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N N \psi[x(n)] \quad (3)$$

که در آن N تعداد طول سیگنال است و C یک عدد ثابت برای بزرگ‌نمایی است. اما این روش به نوبت بسیار حساس است [۲۹] و نویزها را نیز به عنوان تغییرات سوزنی شکل شناسایی می‌کند. مطالعات بعدی روشی را برای رفع ضعف روش اپراتور غیرخطی انرژی معرفی کردند. این روش با استفاده از یک پنجره هموارکننده خروجی اپراتور غیر خطی انرژی را بهبود می‌بخشد و اپراتور هموار شده غیر خطی انرژی^۳ نام دارد [۲۵]. هموارشدگی اپراتور غیرخطی انرژی به وسیله پیچش^۴ اپراتور غیرخطی انرژی با یک پنجره در حوزه زمان به دست می‌آید و به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\psi_s[x(n)] = \psi[x(n)] \otimes w(n) \quad (4)$$

که در آن \otimes عملگر پیچش و $w(n)$ پنجره است. پنجره بارلت به طول پنج به صورت $[2, 4, 6, 4, 2]$ تعریف می‌شود. سپس آستانه‌گذاری توسط رابطه^۳ انجام می‌شود. برای انتخاب عدد ثابت بزرگ‌نمایی در رابطه^۳ روش‌های مختلفی معرفی شده است [۲۴]. در این مقاله عدد بزرگ‌نمایی در تمام طول پردازش عدد ۲ انتخاب شده است. نمونه‌ای از سیگنال مصنوعی و شناسایی تغییرات سوزنی شکل‌های آن به روش یاد شده در شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد.

در تکنیک‌های پردازش سیگنال، تغییرات سوزنی شکل رویدادهای کوتاه مدت غیرثابت با انرژی لحظه‌ای زیاد می‌باشند [۲۴]. اصطلاح تغییرات سوزنی شکل به معنی رویدادی در سیگنال است که فرکانس بالای موضعی و انرژی زیاد لحظه‌ای دارد. الگوریتم‌های تشخیص تغییرات سوزنی شکل شامل دو مرحله اصلی هستند: الف) مشخص کردن نقاط کاندید و یا تاکید بر تغییرات بالقوه سوزنی شکل و ب) اعمال آستانه‌گذاری برای تشخیص تغییرات سوزنی شکل [۲۵]

در این مقاله از روش اپراتور غیرخطی انرژی هموار شده استفاده می‌شود چرا که در شناسایی تغییرات سوزنی شکل پردازش راحت‌تر، سرعت پردازش بیشتر و دقت زیادتر نسبت به سایر روش‌ها دارد [۲۶]. استفاده از اپراتور انرژی غیرخطی^۱ (که به اختصار آن را NEO می‌نامند) برای اولین بار توسط Kaiser برای شناسایی تغییرات سوزنی شکل مطرح شد و آن را به عنوان اپراتور غیرخطی انرژی^۲ (TEO) نام‌گذاری نمود [۲۷]. در سیگنال‌های پیوسته اپراتور غیرخطی انرژی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\psi[x(t)] = [x(t)]^2 - x(t)x''(t) \quad (1)$$

که در آن $x''(t)$ مشتق مرتبه دوم $x(t)$ است [۲۶]. برای محاسبه اپراتور غیرخطی انرژی در سیگنال‌های گسسته به روش زیر عمل می‌کنیم:

$$\psi[x(n)] = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (2)$$

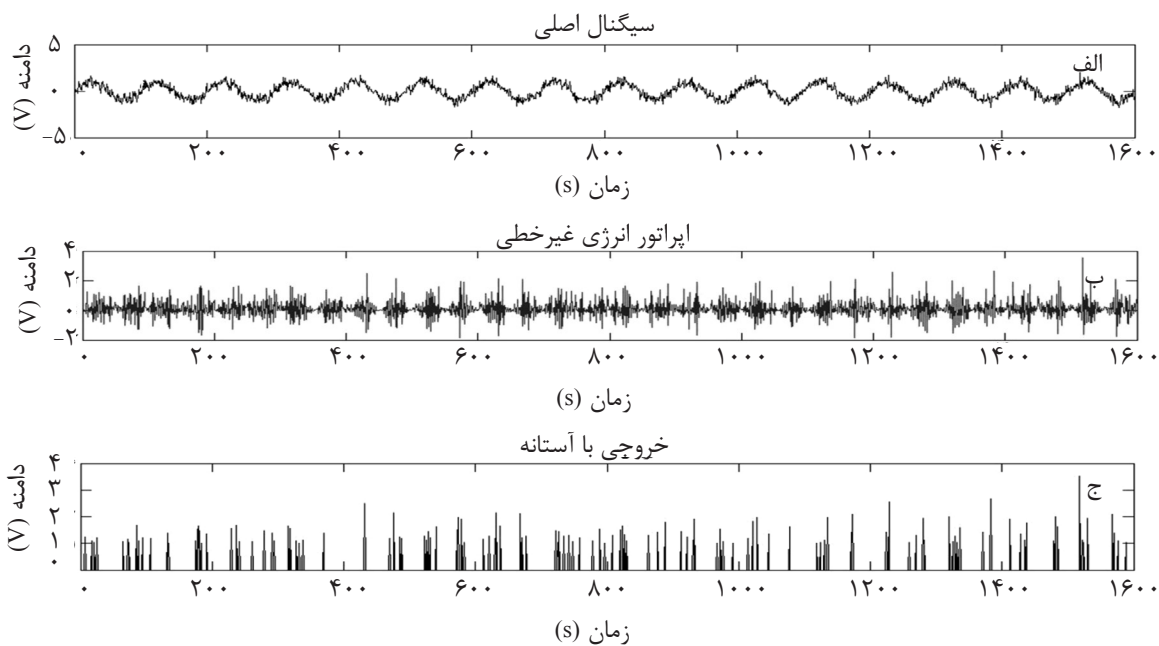
اپراتور غیرخطی انرژی در یافتن تغییرات سوزنی شکل بسیار کارآمد عمل می‌کند و بر خلاف روش‌های قبلی که هر دو پارامتر انرژی زیاد و فرکانس بالای لحظه‌ای را در نظر می‌گیرند، حتی وقتی انرژی لحظه‌ای نمونه‌ای زیاد است بدون

1. Nonlinear Energy Operator

2. Teager Energy Operator

3. Smoothed Nonlinear Energy Operator

4. Convolution



شکل ۳ الف) سیگنال مصنوعی تولید شده، ب) نقاط کاندید تغییرات سوزنی شکل به روش اپراتور انرژی غیرخطی، ج) آستانه‌گذاری با عدد ۲

شکل ۳-الف) شکل سیگنال مصنوعی تولید شده به همراه تغییرات سوزنی شکل مشاهده می‌شود. در شکل ۳-ب) نقاط کاندید شده به عنوان تغییرات سوزنی شکل که توسط رابطه شماره ۴ محاسبه می‌شود، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۳-ج) نتیجه پردازش شناسایی تغییرات سوزنی شکل پس از آستانه‌گذاری که در رابطه ۳ معرفی شد، مشاهده می‌شود. روش تشخیص تغییرات سوزنی شکل هم تغییرات مثبت و هم تغییرات منفی را شناسایی می‌کند [۲۵]؛ اما از آنجا که فقط تغییرات مثبت گشتاور و تغییرات منفی RPM لازم می‌باشد ابتدا از سیگنال میانگین گرفته شده و سپس کف‌یابی نقاطی را به عنوان تغییرات سوزنی مثبت در نظر گرفته که از میانگین سیگنال بیشتر بوده و نقاطی را به عنوان تغییرات سوزنی منفی که از میانگین سیگنال کمتر بوده مشخص می‌شود.

داده‌شناسی

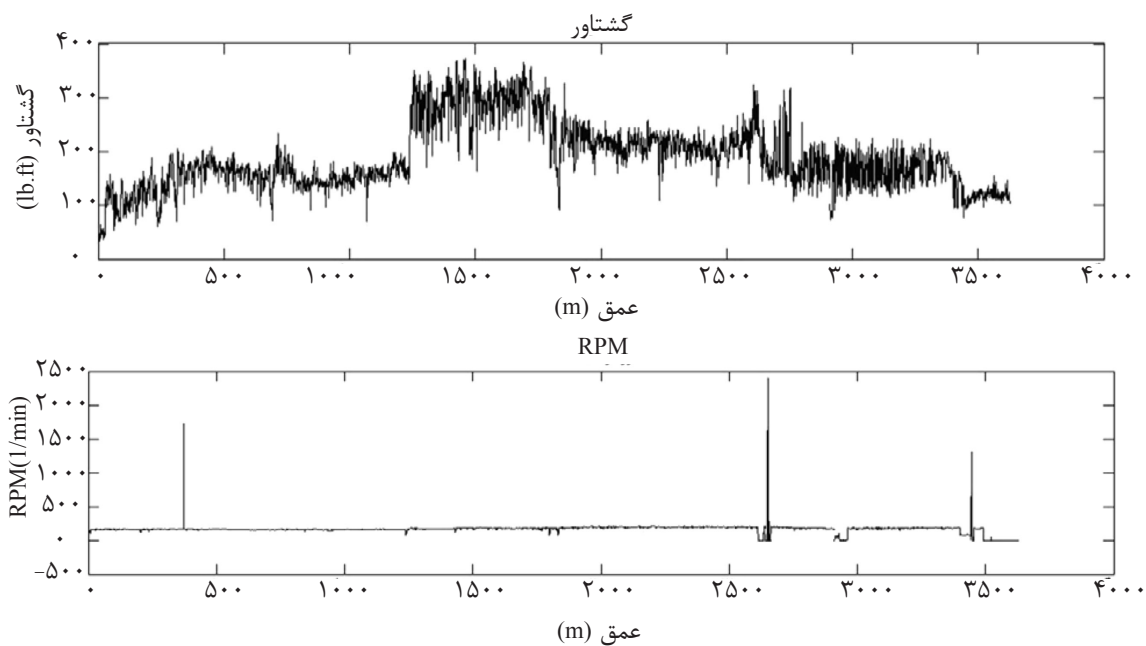
برای انجام این پژوهش از گزارشات روزانه یکی از شرکت‌های زیرمجموعه شرکت ملی نفت ایران استفاده شده است. پارامترهای به دست آمده در حین حفاری از جمله گشتاور و RPM، ۲۰ چاه از شرکت حفاری گرفته شده است. از آنجا که اطلاعات

مربوط به انرژی بالاخص حفاری نفت و گاز محرمانه است، در تحقیقات این حوزه هیچ نامی از شرکت همکار، مخزن مورد بررسی و شماره چاه برده نمی‌شود. این چاه‌ها از حوزه‌های نفتی جنوب ایران در حوزه نفتی اهواز تهیه شده‌اند. برای سهولت در روند پردازش، چاه‌ها از شماره ۱ تا ۲۰ نام‌گذاری شده‌اند. تعداد ۱۶ مورد از این چاه‌های حفاری سالم برچسب گذاری شده‌اند و ۴ مورد از چاه‌ها دارای مشکل گیر رشته حفاری هستند و چاه دچار مشکل برچسب خورده‌اند.

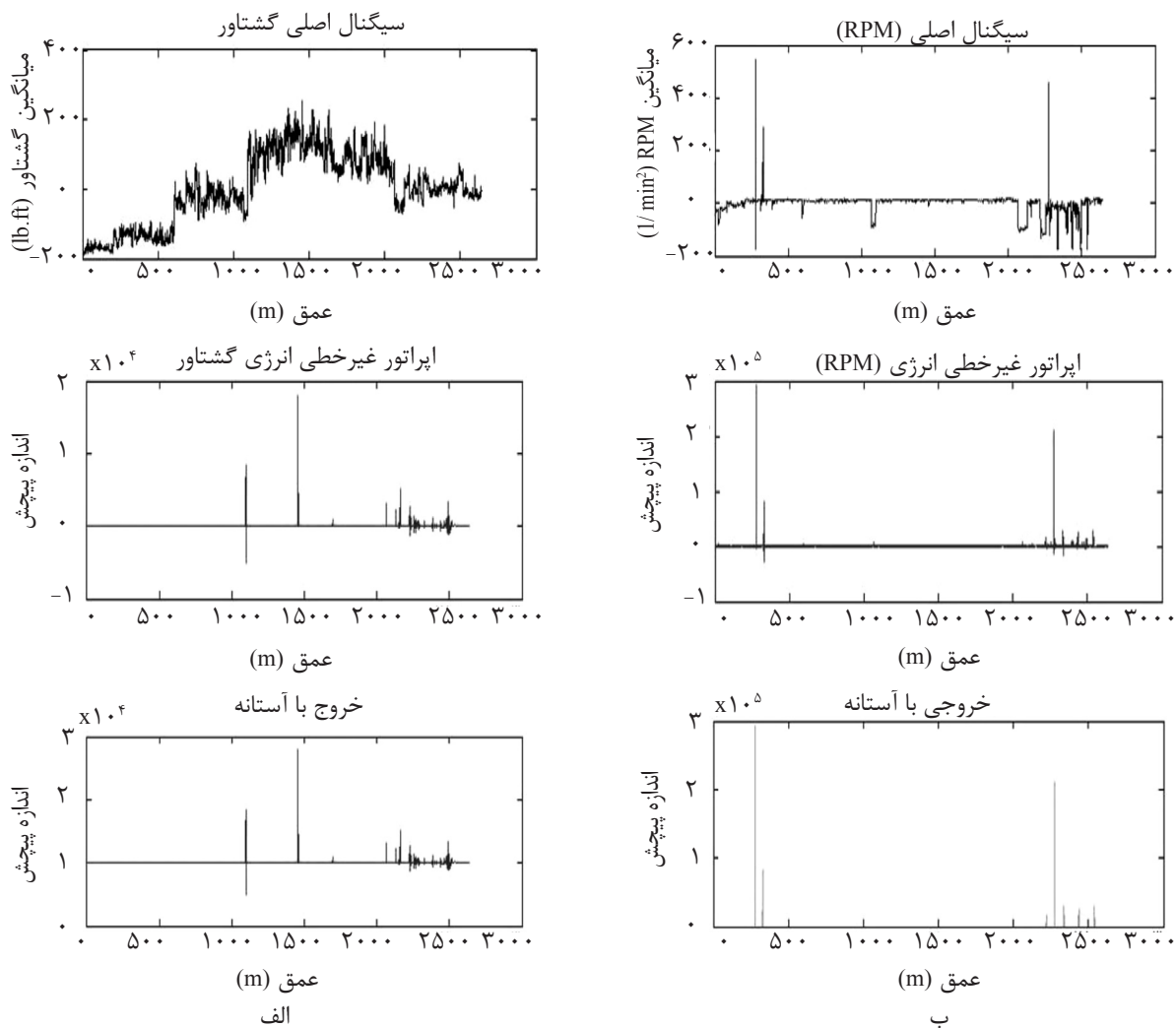
سیگنال‌ها با نرخ یک متر بر مبنای عمق نمونه‌گیری شده‌اند. در شکل ۴ نمونه‌ای از سیگنال ثبت شده برای اطلاعات یک چاه سالم برای الف) پارامتر گشتاور و ب) RPM مشاهده می‌شود.

ارزیابی روش

همان‌طور که عنوان شد هدف یافتن نقاطی از حفاری است که تغییرات سوزنی شکل مثبت در گشتاور و تغییرات سوزنی شکل منفی در چرخش مته برهم منطبق باشند. خروجی روش را بر داده‌های حفاری یک چاه سالم در شکل ۵ می‌بینیم.



شکل ۴ الف) سیگنال گشتاور و ب) سیگنال RPM حفاری چاه سالم x

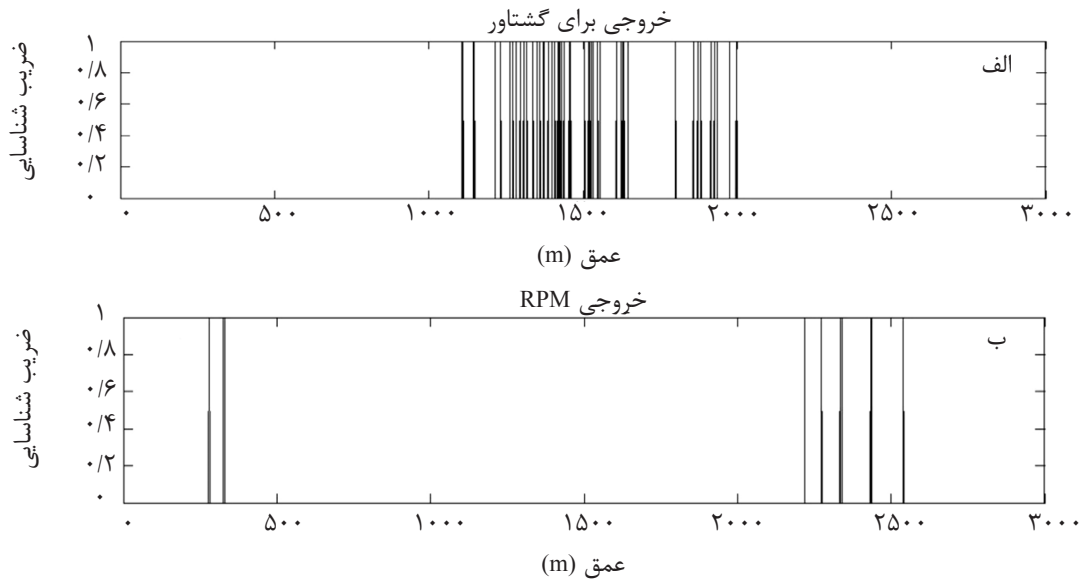


شکل ۵ نتیجه شناسایی تغییرات سوزنی شکل، الف) تغییرات گشتاور و ب) تغییرات RPM برای چاه سالم y

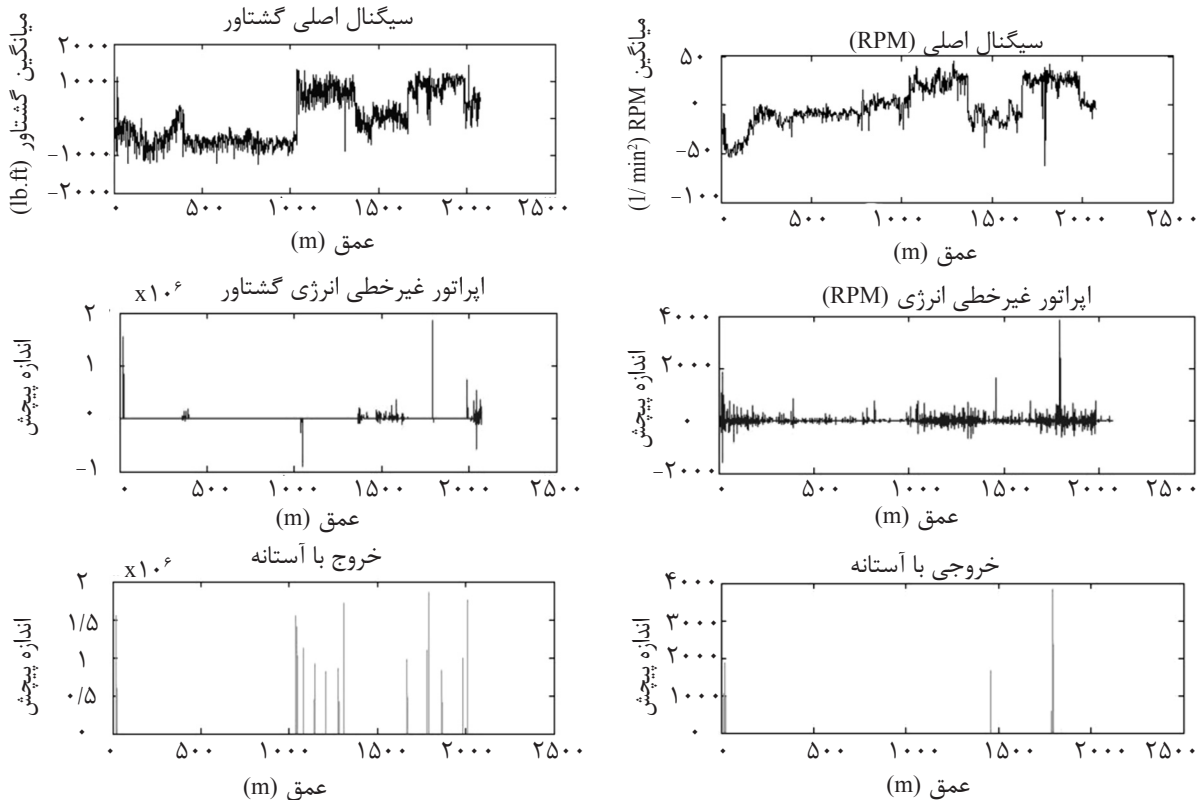
*. آز آنجایی که اپراتور غیرخطی انرژی ترکیب مشتق مرتبه دوم $x(t)$ و کانولوشن آن است، برای نمایش اندازه آن در نمودار از دو واحد سیگنال مربوطه استفاده می‌کنیم.

است. این چاه در دو عمق دچار گیر لحظه‌ای شده که با اعمال ضربه مشکل برطرف شده است. این مشکلات در گزارشات روزانه منعکس می‌شوند. می‌بینیم که همین اعماق در برنامه پردازشی ما نیز صحیح شناسایی شده‌اند و با علامت فلش مشخص شده‌اند. نتایج در شکل ۸ مشاهده می‌شوند.

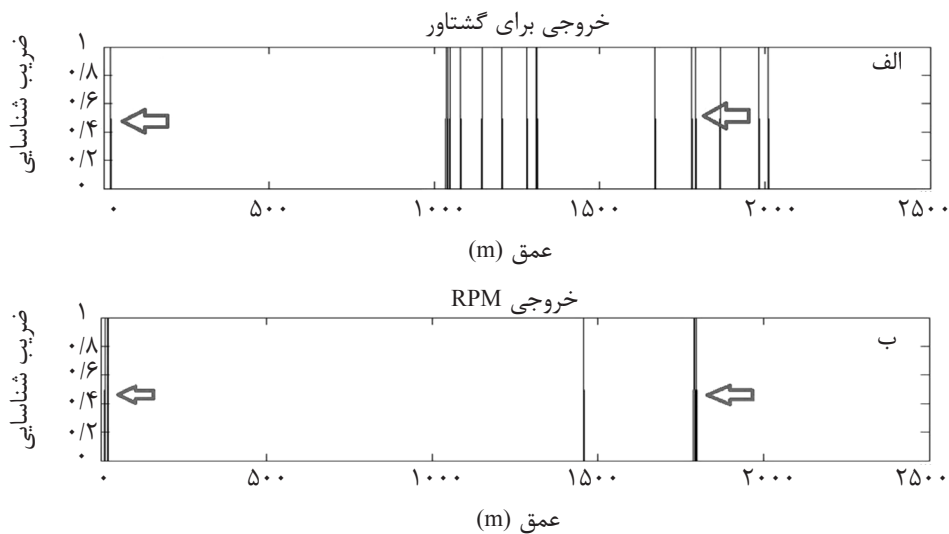
در شکل ۶ نتیجه پردازش مورد نظر دو سیگنال گشتاور و RPM با وضوح بیشتر در کنار هم قابل مشاهده است. برای بررسی روش پیشنهادی در جهت تشخیص گیر رشته حفاری، برنامه را با داده‌های چاهی که طبق برچسب‌گذاری کارشناسان، دارای مشکل گیر لحظه‌ای معرفی شده است، اجرا می‌کنیم. خروجی برنامه در شکل ۷ مشخص شده



شکل ۶ نتیجه شناسایی تغییرات سوزنی شکل الف) گشتاور و ب) RPM برای چاه سالم شماره ۷



شکل ۷ نتیجه شناسایی تغییرات سوزنی شکل الف) تغییرات گشتاور و ب) تغییرات RPM برای چاه z دارای گیر رشته حفاری



شکل ۸ نتیجه شناسایی تغییرات سوزنی شکل الف) گشتاور و ب) RPM برای چاه z دارای گیر رشته حفاری

اطلاعات مربوط به پردازش در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱ ماتریس در هم‌ریختگی شناسایی وقوع گیر رشته حفاری

حفاری سالم	حفاری مشکل	
۱۵	۱	تشخیص حفاری سالم
.	۴	تشخیص حفاری دارای مشکل

معیارهای دسته‌بندی برای الگوریتم پیشنهادی از فرمول‌های زیر محاسبه شده و در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$CA = TN + TP / TN + FN + TP + FP$$

$$CA = FN + FP / TN + FN + TP + FP = 1 - CA$$

$$DR = TP / FN + TP$$

$$FAR = FP / TN + FP$$

که CA دقت دسته‌بندی و ER خطای دسته‌بندی را نمایش می‌دهد.

جدول ۲ معیارهای کارایی روش تشخیص وقوع گیر رشته حفاری

CA	۰/۹۵
ER	۰/۰۵
DR	۰/۹۳
FAR	.

برای سادگی معیارهای ارزیابی الگوریتم‌های دسته‌بندی، آنها را با مفهوم ماتریس درهم‌ریختگی^۱ ارزیابی می‌کنیم. این ماتریس چگونگی عملکرد الگوریتم دسته‌بندی را با توجه به مجموعه داده ورودی به تفکیک انواع دسته‌های مساله دسته‌بندی، نمایش می‌دهد.

TN: بیانگر تعداد رکوردهایی که دسته واقعی آنها منفی بوده و الگوریتم دسته‌بندی نیز دسته آنها را منفی تشخیص داده است.

TP: بیانگر تعداد رکوردهایی که دسته واقعی آنها مثبت بوده و الگوریتم دسته‌بندی نیز دسته آنها را مثبت تشخیص داده است.

FP: بیانگر تعداد رکوردهایی که دسته واقعی آنها منفی بوده و الگوریتم دسته‌بندی دسته آنها را اشتباه مثبت تشخیص داده است.

FN: بیانگر تعداد رکوردهایی که دسته واقعی آنها مثبت بوده و الگوریتم دسته‌بندی دسته آنها را اشتباه منفی تشخیص داده است.

پس از اعمال روش بر روی سیگنال‌های مربوط به تمام اطلاعات موجود حفاری نتایج زیر به دست می‌آید. از مجموع ۱۶ چاه سالم و بدون مشکل، ۱۵ چاه به درستی سالم تشخیص داده شدند و از مجموع ۴ چاه دارای گیر رشته حفری، هر ۴ چاه به درستی داری مشکل تشخیص داده شدند.

نتیجه گیری

و نقاط مشترک به عنوان لحظه گیر رشته حفاری معرفی شد. روش پیشنهادی با استفاده از سیگنال مصنوعی و سیگنال حفاری دریافت شده از شرکت ملی نفت ایران، مورد ارزیابی قرار گرفت. ارزیابی نتایج حاصله نشان داد روش پیشنهادی برای تشخیص لحظه وقوع گیر رشته حفاری، بسیار کارآمد است. معیار دقت دسته بندی ۰/۹۵ بود.

از آنجا که این پردازشها مستقل از پارامترهای مقاردهی شده بر اساس سازند حفاری بودند، و با توجه به اینکه روشهای پیشین ارائه شده برای پیش بینی و تشخیص گیر رشته حفاری به اطلاعات چاه مورد بررسی وابسته هستند، نوآوری روش معرفی شده عدم وابستگی روشهای مطرح شده به سازند حفاری بود. این روش برای استفاده در نرم افزارهای پایش آنلاین حفاری بسیار موثر خواهد بود چرا که سرعت پردازش آن بسیار زیاد است و در سیستمهای بلادرنگ کاربرد دارد. خطای تشخیص در این روش بسیار کم است که در میان روشهای هم رده خود با توجه به سرعت پردازش و نیاز به دادههای اندک برای پردازش، عملکرد خوبی دارد.

روش شناسایی گیر رشته حفاری به صورت بلادرنگ با استفاده از شناسایی تغییرات سوزنی شکل سیگنال گشتاور و سیگنال چرخش دورانی رشته حفاری، در تشخیص گیر رشته کارآمد است. با بررسی در مورد گیر رشته حفاری مشخص شد که در زمان وقوع گیر، گشتاور رشته حفاری به طور ناگهانی بالا می رود و سرعت چرخش متعادل حول محور خود کاهش می یابد. بنابراین تغییرات ناگهانی همزمان سیگنال گشتاور و RPM به عنوان ویژگی لحظه گیر رشته حفاری معرفی شد. از آنجا که تغییرات سوزنی شکل رویدادهایی با انرژی زیاد و فرکانس موضعی لحظه ای هستند، روش تشخیص بر مبنای شناسایی این تغییرات در دو سیگنال یاد شده طراحی شد. از روش اپراتور غیرخطی انرژی هموار شده برای شناسایی تغییرات استفاده شد. از آنجا که تغییرات در جهت افزایش یا کاهش ناگهانی سیگنالها مد نظر بود، یک روش نوین برای شناسایی تغییرات مثبت و منفی به صورت مجزا معرفی شد. نقاط به دست آمده برای دو سیگنال هم مقایسه گردید

مراجع

- [1]. Nybo R., "Efficient drilling problem detection," PhD Thesis, NTNU, Trondheim, Norway, 2009.
- [۲]- منظمی م، هاشمی ع، "پیش بینی گیررشته حفاری چاههای جهت دار یکی از میداین نفتی جنوب غرب ایران با استفاده از شبکه های عصبی"، اولین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی، تهران، ۱۳۹۱.
- [3]. Arnaout A., "Diagnosing drilling problems using visual analytics of sensors measurements," Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International, 2012.
- [۴]- ساسان نژاد الف. و شهبازی خ، "رویکرد جدید برای تعیین نقطه آزادسازی در هنگام گیر رشته حفاری جهت مانده یابی با استفاده از شبکه های عصبی"، همایش ملی مهندسی کامپیوتر و توسعه پایدار با محوریت شبکه های کامپیوتری، مدل سازی و امنیت سیستمها، مشهد، ۱۳۹۲.
- [۵]- حصیمی الف، ردایی ع، "کاربرد شبکه های عصبی در پیش بینی گیر لوله های حفاری در میدان کیش، نخستین همایش ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری، علوم و صنایع وابسته، تهران، ۱۳۹۱.
- [6]. Salminen, K. "Stuck pipe prediction using automated real-time modeling and data analysis," IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2016.

- [7]. Jia Q., Schmitt D. R., "Effects of formation anisotropy on borehole stress concentrations: implications to drilling induced tensile fractures," 48th US Rock Mechanics & Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2014.
- [8]. Jardine S. I., McCann D. P., Barber S. S., "An advanced system for the early detection of sticking pipe," SPE/IADC Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers, 1992.
- [9]. Iversen F., Cayeux E., "Drilling control method and system," U.S. Patent No. 9, pp. 175,557. November 3, 2015.
- [10]. <http://www.drillingformulas.com/stuck-pipe-prevention-book>.
- [11]. Nybo R. B., Bjarkevoll K. S., Rommetveit R., "Spotting a false alarm. Integrating experience and real-time analysis with artificial intelligence," Intelligent Energy Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [۱۲] - قضاوی م. و محمدزاده م.، "تحلیل رفتار دینامیکی مدل المان محدود تماس رشته حفاری - دیواره چاه با استفاده از مدل ارتقاء یافته تماس"، مجله مهندسی مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس، ماهنامه ۱۱، صفحات ۱۸۵۵-۱۹۴۴، سال ۲۰۱۴.
- [13]. Warren, J. E., "Causes, preventions, and recovery of stuck drill pipe," Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute, 1940.
- [14]. Hemphins W. B., "Multivariate statistical analysis of stuck drill pipe situations," SPE Drilling Engineering, pp. 237-244, 1987.
- [15]. Bradley W. B., "A task force approach to reducing stuck pipe costs," SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, 1991.
- [16]. Biegler M. W., Kuhn G. R., "Advances in prediction of stuck pipe using multivariate statistical analysis," Presented at the SPE/IADC Conference in Dallas. Texas. pp. 15-18, February, 1994.
- [17]. Gokhan Y., "Stuck pipe prevention-a proactive solution to an old problem," SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [18]. Wisnie A. P. and Zhiwei Zh., "Quantifying stuck pipe risk in gulf of mexico oil and gas drilling," SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [19]. Siruvuri C, Nagarakanti S. and Samuel R., "Stuck pipe prediction and avoidance: a convolutional neural network approach," IADC/SPE Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers, 2006.
- [20]. Poordad S., Chamkalani. A, Shahri M. P., "Support vector machine model: a new methodology for stuck pipe prediction," SPE Unconventional Gas Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [21]. Naraghi M., Ezzatyar P. and Jamshidi S., "Prediction of drilling pipe sticking by active learning method (alm)," Journal of Petroleum and Gas Engineering, Vol 7, pp. 173-183, 2013.
- [22]. Hegde Ch., Wallace S. and Gray K., "Real time prediction and classification of torque and drag during drilling using statistical learning methods," SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers, 2015.
- [23]. Bello O., "Application of artificial intelligence methods in drilling system design and operations: a review of the state of the art," Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research, Vol 5, pp. 121-139, 2015.

- [24]. Malarvili, M. B., Hassanpour, H., Mesbah, M., Boashash, B, "A histogram-based electroencephalogram spike detection," In ISSPA, pp. 207-210, 2005.
- [25]. Mukhopadhyay, S, Ray, G. C. "A new interpretation of nonlinear energy operator and its efficacy in spike detection," IEEE Transactions on Biomedical Engineering ,pp: 180-187, 1998.
- [26]. Hassanpour, H, Mesbah, M, Boashash, B. "Eeg spike detection using time-frequency signal analysis," Acoustics, Speech, and Signal Processing, Proceedings. (ICASSP'04). IEEE International Conference on. Vol. 5. IEEE, 2004.
- [27]. Kaiser, J. F. "On a simple algorithm to calculate the energy of a signal," Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-90., International Conference on. IEEE, 1990.
- [28]. Gibson, S, Jack W. J, Markovic, D. "Comparison of spike-sorting algorithms for future hardware implementation," 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, 2008.
- [29]. Calvagno, G, "A multiresolution approach to spike detection in eeg," Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP'00. Proceedings, IEEE International Conference on. Vol. 6. IEEE, 2000