

تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پارامترهای حفاری به منظور کاهش نوسانات رشته حفاری و بهینه‌سازی نرخ نفوذ مته در حفر چاه‌های نفت و گاز

حسن غنیتوس^۱، مسعود گوهری منش^۲، علی اکبر اکبری (نویسنده مسئول)^۳

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ghanitoos@mail.um.ac.ir
^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، m.goharimanesh@torbath.ac.ir
^۳ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، akbari@um.ac.ir

چکیده

عملیات حفر چاه‌های عمیق نفت و گاز، بدلیل وجود متغیرهای متعدد امری چالش برانگیز است. ساختار باریک و بلند رشته حفاری، ارتعاشات وارده به سیستم، عبور لوله‌های حفاری از لایه‌های مختلف زمین و وجود پارامترهای مختلف مستقل و وابسته، عواملی هستند که عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز را پیچیده و دشوار کرده‌اند. نرخ نفوذ مته به عنوان یک پارامتر وابسته، شاخص مناسبی برای ارزیابی روند عملیات حفاری است. این شاخص تحت تاثیر سایر پارامترها بوده، لذا مدل‌سازی مسئله با روش‌های مرسوم امکان پذیر نیست. در این مقاله با استفاده از داده‌های میدانی یک حلقه چاه نفت و گاز واقع در جنوب غربی ایران، سه پارامتر تاثیرگذار بر نرخ نفوذ مته معرفی شده‌اند. سپس با ایجاد سه نوع مدل‌سازی شامل مدل جبری خطی، جبری درجه دوم و مدل مبتنی بر شبکه عصبی، ارتباط بین سه متغیر مستقل و نرخ نفوذ مته مورد تحلیل قرار گرفت و ضرایب همبستگی هر سه مدل باهم مقایسه شدند. در این تحقیق به منظور نگهداشت نرخ نفوذ مته در محدوده مناسب، مدل موفقی از مقادیر سرعت دورانی و وزن روی مته در عمق‌های متفاوت ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

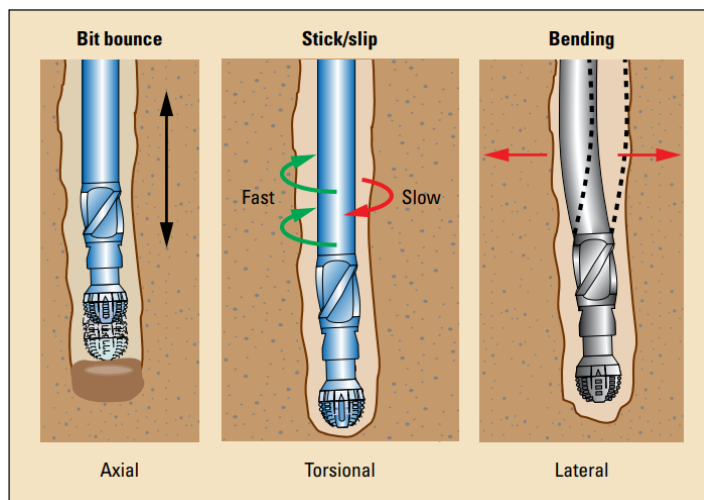
پارامترهای مستقل و وابسته در حفاری، نرخ نفوذ مته، مته الماسه پلی کریستال، پدیده چسبش-لغزش، داده‌های حفاری

۱. مقدمه

اکتشاف و استخراج نفت و گاز از اعماق زمین، نیازمند حفاری با مته‌های با جنس مقاوم و قطر متغیر است. اندازه‌گیری‌های سطحی و درون چاهی مشخص می‌کند که سیستم‌های حفاری انواع مختلف نوسانات را تجربه می‌کنند و این موضوع به شکل معناداری نرخ نفوذ حفاری را کاهش داده و به مته حفاری (سایش دندان‌های مته)، لوله‌های حفاری (انحراف لوله‌ها) و مجموعه ادوات درون چاهی آسیب می‌رساند [1].

۱.۱. ارتعاشات رشته حفاری

در شکل ۱ سه نوع اصلی ارتعاشات رشته حفاری شامل ارتعاشات عرضی، محوری و پیچشی معرفی شده‌اند که به ترتیب عاملی برای ناپایداری چرخشی، پرش مته و پدیده چسبش-لغزش (چلش) هستند [2]. در بسیاری از تحقیقات، پدیده چسبش-لغزش به عنوان یکی از عوامل اصلی آسیب به سیستم رشته حفاری، معرفی شده است [3,4]. این پدیده که حاصل ارتعاشات پیچشی است، زمانی رخ می‌دهد که باوجود چرخش میز دوار، بنا به دلایلی حرکت مته متوقف می‌گردد [5,6]. از طرفی با اعمال ارتعاشات محوری علاوه بر ارتعاشات پیچشی، اجرای عملیات حفاری پیچیده‌تر شده و زوج ارتعاشات محوری-پیچشی با اثر متقابل مته-سنگ تحلیل پایداری سیستم را دشوار می‌کند [7,8].



شکل 1. انواع ارتعاش در سیستم حفاری

2.1. کاهش اثر ارتعاشات

تجزیه و تحلیل دقیق دینامیک و ارتعاشات رشته حفاری، به دلیل تعدد عوامل تأثیرگذار در اجرای عملیات حفاری همچنان امری دشوار است. با شناخت پارامترهای حفاری، می‌توان کنترل مسیر چاه را انجام داد [9]. مدلسازی ارتعاشات و مانیتورینگ آن پروسه‌ای پیچیده است که معمولاً نیازمند فرضیات ساده‌سازی بوده و لذا پسندیده این است که ارتعاشات رشته حفاری و بویژه پدیده چسبش-لغزش با استفاده از مدل‌های داده‌ای بررسی شوند [10]. از طرفی نیاز است تا با تعریف شاخص مناسب، عملیات را مورد پایش قرار داد. نرخ نفوذ مته، معیار کلیدی در پایش موفقیت حفاری چاه است و مستقیماً تحت تأثیر ارتعاشات حفاری است [2]. هدف این مقاله، ارائه مدل مناسب به منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ مته و تثبیت آن در محدوده قابل قبول است که در این راه از داده‌های عملیاتی جهت تبیین پارامترهای قابل اندازه‌گیری در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز استفاده شده است.

2. پارامترهای حفاری

نرخ نفوذ مته به عنوان یک پارامتر وابسته، در عملیات حفاری تحت تأثیر پارامترهای متعددی قرار دارد که برخی از آن‌ها حین عملیات اندازه‌گیری می‌شوند و برخی دیگر در زمان طراحی تعریف شده‌اند. پارامترهای غیر قابل کنترل نیز بر میزان نرخ نفوذ مته اثرگذار هستند.

1.2. پارامترهای قابل اندازه‌گیری

پارامترهای مستقل در عملیات حفاری چاه شامل عمق مته، نرخ نفوذ مته، وزن روی مته، بار روی قلاب، سرعت دورانی میز دوار، گشتاور اعمالی محرک فوقانی، افت فشار و دبی سیال ورودی و زمان تأخیر هستند که کمیت‌های قابل اندازه‌گیری بوده و در محل چاه امکان تنظیم توسط اپراتور و مهندس حفار را دارند. در این بین، دو پارامتر وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار بصورت مستقل در میزان نرخ نفوذ مته در عمق‌های مختلف، اثرگذار هستند [10]. در زمان اجرای عملیات حفاری، داده‌های حفاری توسط یک تیم کارشناس مجرب، تحلیل و بررسی می‌شوند. در هر لحظه، داده‌ها مطالعه می‌گردند و باتوجه به نوسانات وارده به رشته حفاری، کمیت‌های قابل کنترل تنظیم می‌شوند.

2.2. پارامترهای فیزیکی و هندسی

اهمیت پارامترهای فیزیکی و هندسی رشته حفاری در طراحی سیستم است. پارامترهای فیزیکی شامل مدول الاستیسیته و مدول برشی، ضرایب میرایی محوری و پیچشی، ضریب اصطکاک ویسکوز، ضریب سختی تیغه و رشته حفاری می‌باشند. پارامترهای هندسی شامل قطر

مته، ممان اینرسی، ممان اینرسی قطبی، سطح مقطع رشته حفاری، موقعیت زاویه ای و طول رشته حفاری هستند. قطر مته در عملیات حفاری بسیار حائز اهمیت بوده و با توجه به شرایط لایه‌های زمین، در عمق‌های متفاوت متغیر است. در جدول 1 مقدار عمق قابل حفاری متناسب با قطرهای متفاوت مته از نوع الماسه پلی کریستال، درج شده است. در جدول منظور از مقدار عمق حفاری، میزان پیشرفت در حفره چاه از ابتدا تا انتهای عملیات حفاری توسط مته با قطر متناظر آن است. البته بنابه لیتولوژی و شرایط زمین‌شناسی لایه‌های زمین، قطر و عمق‌های مندرج در جدول متغیر بوده و این داده‌ها بصورت میانگین و بر اساس تجربه مهندسی حفاری جمع‌آوری شده است. اجرای حفاری با قطر بزرگ آغاز شده و پس از انجام مقدار حفاری ذکر شده در جدول، مته با قطر کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شرایط تا رسیدن به عمق حفاری مدنظر ادامه پیدا می‌کند.

جدول 1. مقادیر قطر مته و عمق حفاری آن

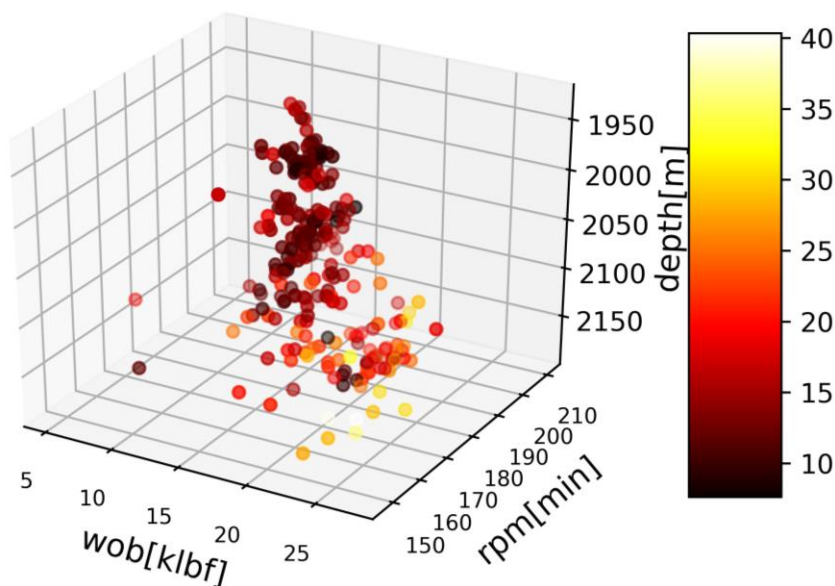
مقدار عمق حفاری توسط مته ای با قطر متناظر (متر)	قطر مته (اینچ)
60 تا 90 متر	26
1200 تا 3000 متر	17 ½
500 تا 800 متر	12 ¼
400 تا 800 متر	8 ½
200 تا 400 متر	6 1/8
150 تا 200 متر	4 1/8

3.2. پارامترهای غیر قابل کنترل

این پارامترها را طبیعت بر عملیات حفاری دیکته کرده و در اختیار طراح و گروه عملیات نبوده و مهمترین آن‌ها شامل انرژی طبیعی سنگ، عکس العمل ناشناخته مته-سنگ و ضریب و نیروی اصطکاک بین آن‌ها هستند.

3. تحلیل نمودارهای حاصل از داده‌های حفاری

در این بخش بر اساس به تحلیل داده‌های مربوط به عملیات حفر یک حلقه چاه واقع در جنوب غربی ایران که تا عمق 3976 متری حفاری شده، می‌پردازیم. کمیت‌های استفاده شده مشابه شرایط عملیات بوده و تغییر نکرده‌اند. بررسی انجام شده از عمق 100 تا 1000 متری و عمدتاً در سازند آجاجری انجام شده است تا تغییر لیتولوژی نداشته باشیم. مته استفاده شده در محدوده عمق مورد مطالعه، از نوع مته الماسه پلی کریستال با قطر 17 ½ اینچ بوده است. لذا شرایط سازند و مته در بازه عمقی مذکور، یکسان بوده و بر تحلیل انجام شده اثر نداشته‌اند. در ادامه، نرخ نفوذ مته، وزن روی مته و میزان سرعت دورانی میز متحرک را در عمق‌های مختلف بررسی می‌کنیم. در شکل 2، تغییرات نرخ نفوذ مته به صورت یک نمودار چهار بعدی بر اساس عمق حفاری، میزان وزن روی مته و سرعت دورانی میز متحرک ارائه شده است. طبق این شکل با افزایش عمق، زمان مورد نیاز برای حفاری واحد طول (یک متر) نیز افزایش یافته، که به معنای افزایش هزینه‌ها است. از دلایل مهم این موضوع فشردگی بیشتر لایه‌های زمین در اعماق بیشتر بوده و پس از عمق 400 متری می‌توان شیب افزایش زمان نرخ نفوذ مته را در نمودار مشاهده نمود. برای حل این مشکل و رسیدن به نرخ نفوذ مناسب، نیاز است وزن روی مته افزایش یابد. از شکل 2 مشخص است که تا عمق 400 متری، بدلیل نرمی لایه‌های زمین، سیستم با وزن روی مته کمتر به نرخ نفوذ مدنظر رسیده و پس از آن، با فشردتر شدن سازند، به وزن بیشتری برای حفظ نرخ نفوذ نیاز بوده است. در این عملیات حفاری، حداکثر وزن ممکن قابل تحمل سیستم، یعنی 40 کیلوپاسکال، اعمال شده است.



شکل 2. میزان نرخ نفوذ در عمق های مختلف (depth)، میزان وزن روی مته (wob) و سرعت دورانی میز متحرک (rpm)

بر اساس شکل 2، عملیات حفاری در یک محدوده سرعت دورانی ثابت انجام شده است. عدم تغییر در شرایط زمین شناسی و همچنین اجرای کار با یک نوع مته، دلیل این ترند یکسان است.

4. مدل سازی

به دلیل اهمیت مدل سازی و برقراری ارتباط میان نرخ نفوذ مته و سایر فاکتورهای تاثیرگذار که در بخش پیشین مطرح شدند، سه نوع مدل جبری خطی، جبری درجه دوم و مدل مبتنی بر شبکه عصبی در ادامه بحث و توضیح داده خواهد شد.

1.4. مدل سازی خطی

مدل سازی خطی به دست آمده، ارتباط میان نرخ نفوذ و سایر فاکتورها را مطابق جدول 2 نشان می دهد. ضریب همبستگی برای این مدل 80.77٪ به دست آمده است.

$$R-Sq = 80.97\% \quad R-Sq(pred) = 80.77\% \quad R-Sq(adj) = 80.91\%$$

جدول 2. نتایج مدل جبری خطی

Term	Coef	SE	Coef
Constant	5.2345	0.48810	10.72
Depth	0.012267	0.00022	56.52
Wob	-0.142891	0.00810	-17.64
Rpm	-0.015397	0.00322	-4.78

2.4. مدل سازی خطی درجه دوم

بر اساس روش سطح پاسخ یا RSM یک تکنیک آماری برای طراحی آزمایش و به دست آوردن مدل های درجه دوم است و توسط پژوهشگران مورد توجه و توسعه بوده است [11]. با این روش می توان ارتباط میان نرخ نفوذ مته و سه فاکتور دیگر را به خوبی مطابق جدول 3 نشان داد. در این حالت، ضریب همبستگی 2 درصد افزایش پیدا کرده و به عدد 83.19٪ رسیده است.

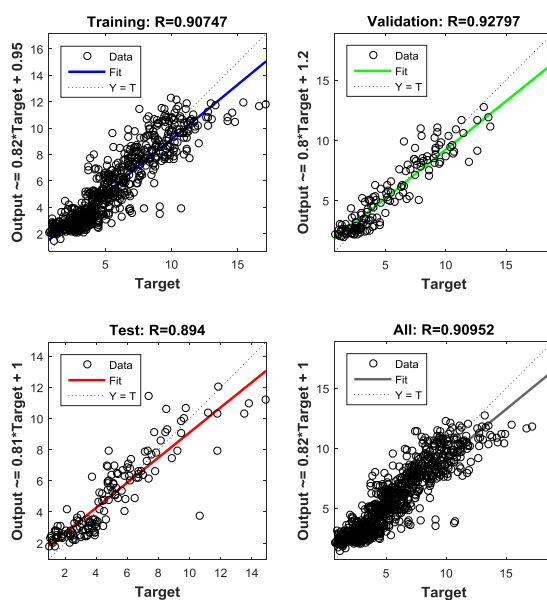
R-Sq = 83.65% R-Sq(pred) = 83.19% R-Sq(adj) = 83.52%

جدول 3. نتایج مدل جبری درجه دوم

Term	Coef	SE	Coef
Constant	10.2422	1.91288	5.354
Depth	0.0240	0.00268	8.942
WOB	-0.5989	0.09027	-6.635
RPM	-0.0388	0.01296	-2.991
Depth*Depth	0.0000	0.00000	10.642
WOB*WOB	0.0077	0.00101	7.606
Depth*WOB	-0.0005	0.00007	-7.001
Depth*RPM	-0.0001	0.00002	-4.202
wob*rpm	0.0018	0.00057	3.192

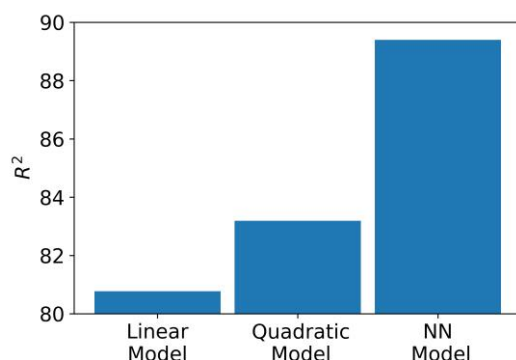
3.4. مدل سازی شبکه عصبی

مدل سازی پارامترهای حفاری بر مبنای روش های هوش محاسباتی مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در این بین، مدل سازی مبتنی بر شبکه های عصبی پرسپترون با ایجاد تغییر ساختاری، سرعت و دقت بیشتری در تقریب فراهم می آورد [12]. برای بهبود مدل سازی موجود، با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر پرسپترون و در نظر گرفتن 70 درصد داده ها برای انجام یادگیری، نتیجه همبستگی 89.4٪ برای داده های آزمایش به دست آمد که حدوداً افزایش 6 درصدی را نسبت به مدل جبری درجه دوم نشان می دهد (شکل 3).



شکل 3. نتایج به دست آمده و نمودارهای همبستگی مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی

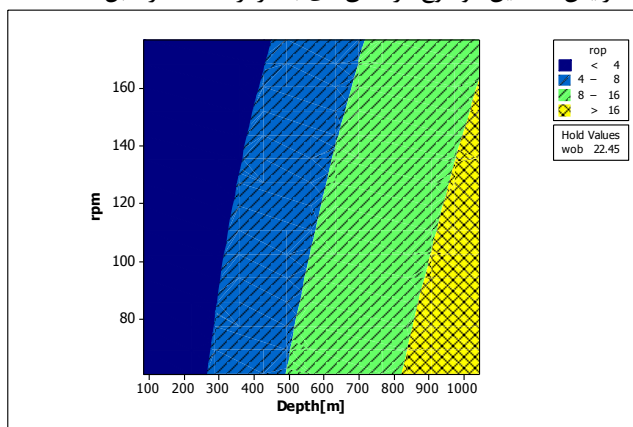
به جهت مقایسه میان ضرایب همبستگی مدل های به دست آمده در این پژوهش، شکل 4 نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود، ضریب همبستگی به دست آمده از مدل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی (NN) نسبت به سایر مدلها اختلاف بیشتری دارد فلذا می تواند در مطالعات پژوهشی آینده، مورد توجه بیشتر قرار بگیرد.



شکل 4. مقایسه ضریب همبستگی مدل های موجود

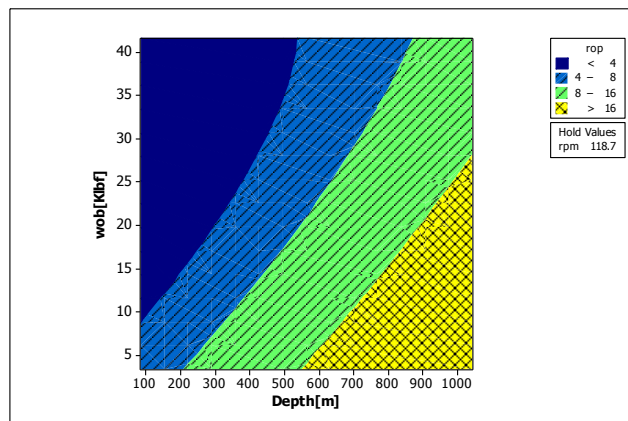
5. بحث بر روی نتایج

شکل 5 مبتنی بر مدل جبری درجه دوم مربوط به محدوده نرخ نفوذ بر پایه تغییرات سرعت میز دوار در عمق های متفاوت است. با معدل گیری از مقادیر تجربی، وزن روی مته بصورت ثابت و به میزان 22.45 klbf تعریف شده است. طبق این نمودار با افزایش عمق و برای رسیدن به نرخ نفوذ قابل قبول، میزان سرعت دورانی میز دوار افزایش پیدا کرده است. می توان نرخ نفوذ قابل قبول را در عمق 400 متری و با سرعت دورانی حدود 100 RPM مشاهده نمود. ولی با افزایش عمق و برای داشتن نرخ نفوذ قابل قبول، باید محدوده سرعت دورانی را تا 180 دور در دقیقه افزایش داد. این موضوع در عمق های بالاتر از 800 متر قابل مطالعه است.



شکل 5. سیاست به دست آمده از مدل درجه دوم نرخ نفوذ مته حفاری بر اساس تغییرات سرعت میز دوار و عمق چاه

بر اساس مدل جبری درجه دوم، محدوده وزن روی مته در عمق های متفاوت در شکل 6 ارائه شده است. از میانگین مقادیر تجربی، سرعت میز دوار بصورت ثابت و به مقدار حدود 120 دور در دقیقه محاسبه و تعریف شده است. طبق این نمودار در عمق های کمتر از 500 متر، باید وزن روی مته نیز محدود و حداکثر تا 20 klbf باشد. با افزایش عمق، برای داشتن نرخ نفوذ مته در محدوده 10 تا 12 متر در ساعت، می توان میزان وزن روی مته را به 30 رساند. افزایش آن تا 40، میزان نرخ نفوذ را تا 14 متر در ساعت افزایش می دهد.



شکل 6. سیاست به دست آمده از مدل درجه دوم نرخ نفوذ مته حفاری بر اساس تغییرات وزن روی مته و عمق چاه

دقت شود که محدوده های وزن روی مته کمتر از 15 کیلو پوند برای تیم مجرب حفار قابل قبول نیست. ولی زمانیکه مته خوب درگیر می شود، ترجیح می دهیم با وزن کم یعنی در محدوده 15 تا 20 کار کنیم.

6. نتیجه و جمع بندی

با رسیدن مته به عمق های بیشتر، نرخ نفوذ مته کاهش قابل ملاحظه ای دارد. در شرایط عملیاتی بر اساس تجربه و مهارت یک تیم خبره حفار، با ایجاد تغییر در پارامترهای قابل کنترل حفاری، بهترین محدوده نرخ نفوذ بدست می آید. ولی این کار پرهزینه و زمان بر است. در این مقاله با استفاده از داده های عملیاتی حفر چاه، به منظور برقراری ارتباط میان نرخ نفوذ مته و سایر فاکتورهای تاثیرگذار، سه نوع مدل جبری خطی، جبری درجه دوم و مدل مبتنی بر شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت. اثر دو پارامتر سرعت دورانی و وزن روی مته بر نرخ نفوذ مته در عمق های مختلف، بررسی و با ثابت نگه داشتن یکی از پارامترهای سرعت دورانی یا وزن روی مته و تغییر پارامتر دوم مدل قابل قبولی از نرخ نفوذ مته در عمق های مختلف ارائه شد. با مدل های ارائه شده می توان بهترین مقادیر را در مواجهه با انواع ارتعاشات و سایر عوامل ناشناخته در عمق های مختلف انتخاب نمود و نرخ نفوذ مته را پیش بینی کرد.

منابع

- [1] Jardine, S., Malone, D., Sheppard, M., 1994. Putting a damper on drilling's bad vibrations, *Oilfield Review*, 15-20.
- [2] Hegde, C., Millwater, H., Gray, K., 2019. Classification of drilling stick slip severity using machine learning, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1023-1036.
- [3] Liu, Y., Lin a, W., Páez Chávez, J., De Sa, R. 2019. Torsional stick-slip vibrations and multistability in drill-strings, *Applied Mathematical Modeling*, 545-557.
- [4] Tian, K., Detournay, E., 2021. Influence of PDC bit cutter layout on stick-slip vibrations of deep drilling Systems, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109005.
- [5] Terrand-Jeanne, A., Dos Santos Martins, V., 2016. Modeling's approaches for Stick-Slip phenomena in drilling, *IFAC-Papers OnLine* 49(8), 118-123.
- [6] Terrand-Jeanne, A., Dos Santos Martins, V., Andrieu, V., 2018. Regulation of the downside angular velocity of a drilling string with a PI controller *European Control Conference (ECC)*.
- [7] Aarsnes, U. J. F., Van de Wouw, N., 2019. Axial and torsional self-excited vibrations of a distributed drill-string *Journal of Sound and Vibration*, 127-151.

- [8] Besselink, B., Kremers, N., Van de Wouw, N., 2016. Analysis and control of stick-slip oscillations in drilling systems IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1582 – 1593.
- [9] Dong, G., Chen, P., 2018. The vibration characteristics of drillstring with positive displacement motor in compound drilling, Part 2: Transient dynamics and bit control force analysis International Journal of Hydrogen Energy, 12189-12199.
- [10] Hegde, C., Daigle, H., Millwater, H., Gray, K., 2017. Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models, Journal of Petroleum Science and Engineering, 295–306.
- [11] Khuri, A., Mukhopadhyay, S., 2010. Response surface methodology, Wiley & Sons, Inc, 128–149.
- [12] Guang-Bin, H., Qin-Yu, Z., Chee-Kheong, S., 2004. Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks, International Joint Conference on Neural Networks, 985–990.