

## تحلیل پارامترهای مؤثر بر نرخ نفوذ مته در حفاری چاه‌های نفت و گاز با مدل‌سازی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی

حسن غنیطوس<sup>۱</sup>، مسعود گوهری منش<sup>۲</sup>، علی اکبر اکبری<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد ghanitoos@mail.um.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربیت حیدریه m.goharimanesh@torbath.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد akbari@um.ac.ir

\* نویسنده مسئول: علی اکبر اکبری

### چکیده

نرخ نفوذ مته و نگهداشت آن در محدوده مناسب در عملیات حفر چاه‌های نفت و گاز، بستگی به پارامترهای متعدد دارد و مسئله‌ای پیچیده و چالش‌برانگیز است. در این مقاله پارامترهای مختلف مؤثر در عملیات حفاری با استفاده از داده‌های میدانی یک حلقه چاه نفت و گاز واقع در جنوب غربی ایران، مورد ارزیابی قرار گرفته است. تاثیر این پارامترها بر یکدیگر با رسم نمودار بررسی شد. باتوجه به اثرگذاری آنها بر یکدیگر، سه پارامتر قابل کنترل شامل وزن روی مته، سرعت دورانی میز دوار و عمق مته حفاری انتخاب شدند و تأثیر هر یک بر نرخ نفوذ مته مورد تحلیل قرار گرفت. با مدل‌سازی مبتنی بر شبکه عصبی، ارتباط بین نرخ نفوذ و سایر پارامترهای تأثیرگذار مورد بحث قرار گرفتند و ضریب همبستگی مدل ( $R^2$ ) حدوداً 90 درصد مورد توجه قرار گرفت. در این تحقیق مشخص شد که با افزایش عمق حفاری، نرخ نفوذ مته کاهش یافته و برای نگهداشت آن در محدوده قابل قبول، باید سرعت دورانی و وزن روی مته به نحو مناسب تغییر کنند که به این منظور مدل قابل قبولی در این مقاله ارائه شده است.

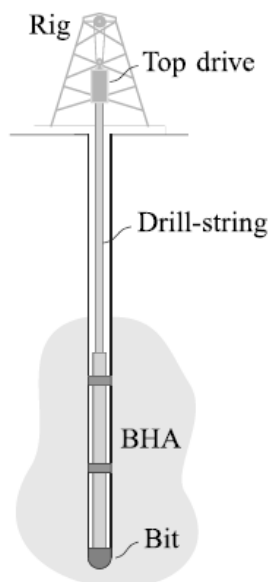
### کلمات کلیدی

پارامترهای مؤثر در حفاری، نرخ نفوذ مته، ارتعاشات رشته حفاری، پدیده چسبش- لغزش، شبکه عصبی

### 1- مقدمه

استخراج نفت و گاز از اعماق زمین، نیازمند اجرای عملیات حفاری عمیق با قطرهای متغیر بوده که توسط رشته حفاری در محیط‌های متفاوت انجام می‌پذیرد [1,2]. ساختار بلند و باریک رشته حفاری در معرض نوسانات و آسیب‌های مختلف قرار دارد [3,4]. در زمان حفر چاه و با افزایش طول رشته حفاری، اجرای عملیات تحت تأثیر پدیده‌های مختلف حاصل از نوسانات مکانیکی قرار می‌گیرد که باعث آسیب به سیستم رشته حفاری می‌شود. انواع مختلف نوسانات وارده به سیستم رشته حفاری شامل ارتعاشات محوری، جانبی و پیچشی به ترتیب عاملی برای پرش مته، کماتش و پدیده چسبش-لغزش (چسبش) هستند [5,6]. باتوجه به مقاومت پیچشی کم رشته حفاری و اعمال هم‌زمان گشتاور به قسمت‌های فوقانی و تحتانی، رشته حفاری دچار ارتعاشات پیچشی قابل توجه می‌شود [1]. ارتعاشات چسبش-لغزش بدلیل اصطکاک بین مته حفاری و سنگ بوجود می‌آید و از عوامل کاهش نرخ نفوذ مته و افزایش هزینه‌های عملیات حفاری است و پژوهش‌های قبلی نیز نشان می‌دهد این پدیده که حاصل ارتعاشات پیچشی است، بیشترین آسیب را به رشته حفاری وارد می‌کند [7,8]. نتایج زیان‌بار ارتعاشات رشته حفاری شامل کاهش نرخ نفوذ، عدم پایداری مجموعه تحتانی، ایجاد آسیب به مته و پیچ‌خوردگی رشته حفاری است که علاوه بر بالا بردن هزینه‌های عملیاتی، می‌تواند به دکل و سیستم رشته حفاری آسیب جدی وارد کند [9,10,11]. با توسعه صنایع نفت و گاز، تقاضای حفر چاه‌های عمیق‌تر افزایش یافته است. احتمال بروز ارتعاشات حاصل از عوامل ناشناخته نیز در چاه‌های با عمق زیاد، بیشتر است. لذا دانستن دلایل بروز، پیش‌بینی شکل‌گیری و نحوه حذف این عوامل، اهمیت ویژه‌ای در صنعت حفاری دارند. اثر متقابل مته و سنگ نیز از عوامل مؤثر در ارتعاشات سازه حفاری است [12,13]. یک سیستم رشته حفاری شامل میز دوار، لوله‌های حفاری، مجموعه تحتانی و یک مته حفاری است (شکل 1). این اجزاء از سطح زمین تا

عمق چاه، به ترتیب به‌عنوان محرک، رابط، تثبیت‌کننده و برنده سنگ هستند. به کمک یک دکل حفاری، انرژی بصورت گشتاور به میز دوار منتقل شده و چرخش میز باعث دوران لوله‌های حفاری و مته می‌گردد. نتیجه این کار نفوذ مته حفاری در لایه‌های زمین است [14].



شکل 1: شمایی از سیستم رشته حفاری

در عملیات حفاری باید شرایط بهبود نحوه برش، نرخ نفوذ، کیفیت حفره چاه و کنترل مسیر چاه را بیش‌ازپیش مدنظر قرار داد. از آنجاکه عمل حفاری تحت تأثیر فاکتورهای متعددی قرار دارد، تحلیل دقیق دینامیک ناپایدار رشته حفاری و نیروی کنترل مته دشوار است. تغییرات مکرر در شرایط اجرای حفاری، باعث شده که کنترل مسیر چاه دشوارتر گردد. کنترل مسیر چاه اصولاً بر مبنای پارامترهای حفاری و مجموعه تحتانی است [15]. از تجربیات عملی مورد استفاده در عملیات حفاری می‌توان به‌منظور کاهش رفتار نامطلوب سیستم رشته حفاری در مواجهه با اثرات ناشناخته و همچنین پدیده چسبش-لغزش بهره گرفت. استراتژی‌های تجربی به‌صورت تخصصی با تغییر در پارامترهای مختلف حفاری، راهنمای خوبی برای رسیدن به پایداری سیستم رشته حفاری خواهند بود. پارامترهای قابل اندازه‌گیری شامل سرعت میز دوار، وزن روی مته و دبی سیال ورودی، می‌توان نرخ نفوذ مته را پیش‌بینی کرد [16]. در سال‌های اخیر مدل‌سازی پارامترهای حفاری بر مبنای روش‌های هوش محاسباتی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته است. مدل‌سازی مبتنی بر شبکه‌های عصبی پرسپترون با ایجاد تغییر ساختاری، سرعت و دقت بیشتری در تقریب فراهم می‌آورد [17].

## 2- پارامترهای مؤثر در حفاری

در عملیات حفاری، پارامترهای قابل اندازه‌گیری در محل 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. منظور از پارامترهای قابل کنترل، کمیت‌های قابل اندازه‌گیری در محل چاه هستند که امکان تنظیم توسط اپراتور و مهندس حفار را دارند. در زمان اجرای عملیات حفاری، یک تیم کارشناس مجرب تمام داده‌های حفاری را تحلیل و بررسی می‌نماید. با رصد لحظه‌ای داده‌ها و باتوجه به نوسانات وارده به رشته حفاری، کمیت‌های قابل کنترل تنظیم می‌گردند. پارامترهای مؤثر در عملیات حفاری در جدول 1 فهرست شده‌اند.

عمق مته حفاری بیانگر مکان آن در عمق حفره چاه در زمان ثبت داده‌ها است. منظور از نرخ نفوذ مته، زمان صرف شده برای هر متر حفاری بر حسب دقیقه است. این کمیت بسیار مهم بوده و هدف گروه حفاری نگهداشت آن در محدوده قابل پذیرش در اعماق مختلف حفاری است. وزن روی مته از پارامترهای مهم و قابل کنترل است. برای تغییر آن، کابل حفاری را با ترمز نگه داشته و با آزاد کردن آن، وزن روی مته افزایش می‌یابد. وزن رشته حفاری در هر عمق، برابر حاصل جمع بار روی قلاب و وزن روی مته است. با افزایش عمق حفره چاه، وزن رشته حفاری نیز بیشتر شده

و بار روی قلاب متناسب با وزن رشته حفاری و وزن روی مته تغییر می‌کند. سرعت دورانی میز دوار فوقانی نیز از پارامترهای قابل کنترل برای گروه حفاری است. باتوجه به مشخصات مکانیکی لوله‌های حفاری و بر اساس شرایط ایمن کارکرد آن‌ها، میزان گشتاوری که توسط موتور جریان مستقیم بر رشته حفاری اعمال می‌شود دارای محدودیت است و بر همین مبنا در محدوده ثابتی تنظیم می‌گردد. گرچه در مواقع خاص با پایین آوردن ضریب ایمنی، گروه حفاری مجبور به افزایش سرعت دورانی است. فشار پمپ متاثر از آیتم‌های مختلف است. سیال در عمق‌های مختلف افت فشار دارد که به متغیرهای زیادی از قبیل وزن و ویسکوزیته سیال، قطر لوله‌ها و نازل‌های مته بستگی دارد. یکی دیگر از پارامترهای قابل کنترل، دبی سیال ورودی یا گل حفاری است. زمان تأخیر، زمان مورد نیازی است که نمونه خاک از ته حفره چاه به سطح برسد.

جدول 1: کمیت‌های قابل اندازه‌گیری

واحد	سمبل	پارامتر
(m)	Depth	عمق مته حفاری
(min/m)	ROP	نرخ نفوذ مته
(Klbf)	WOB	وزن روی مته
(Klbf)	Hook Load	بار روی قلاب
(1/min)	RPM _ Bit	سرعت دورانی میز دوار
(lbf.ft)	Torque	گشتاور
(Psi)	Pump _ Pressure	افت فشار
(Gpm) (gal/min)	Flow _ in	دبی سیال ورودی
(min)	Lag Time	زمان تأخیر

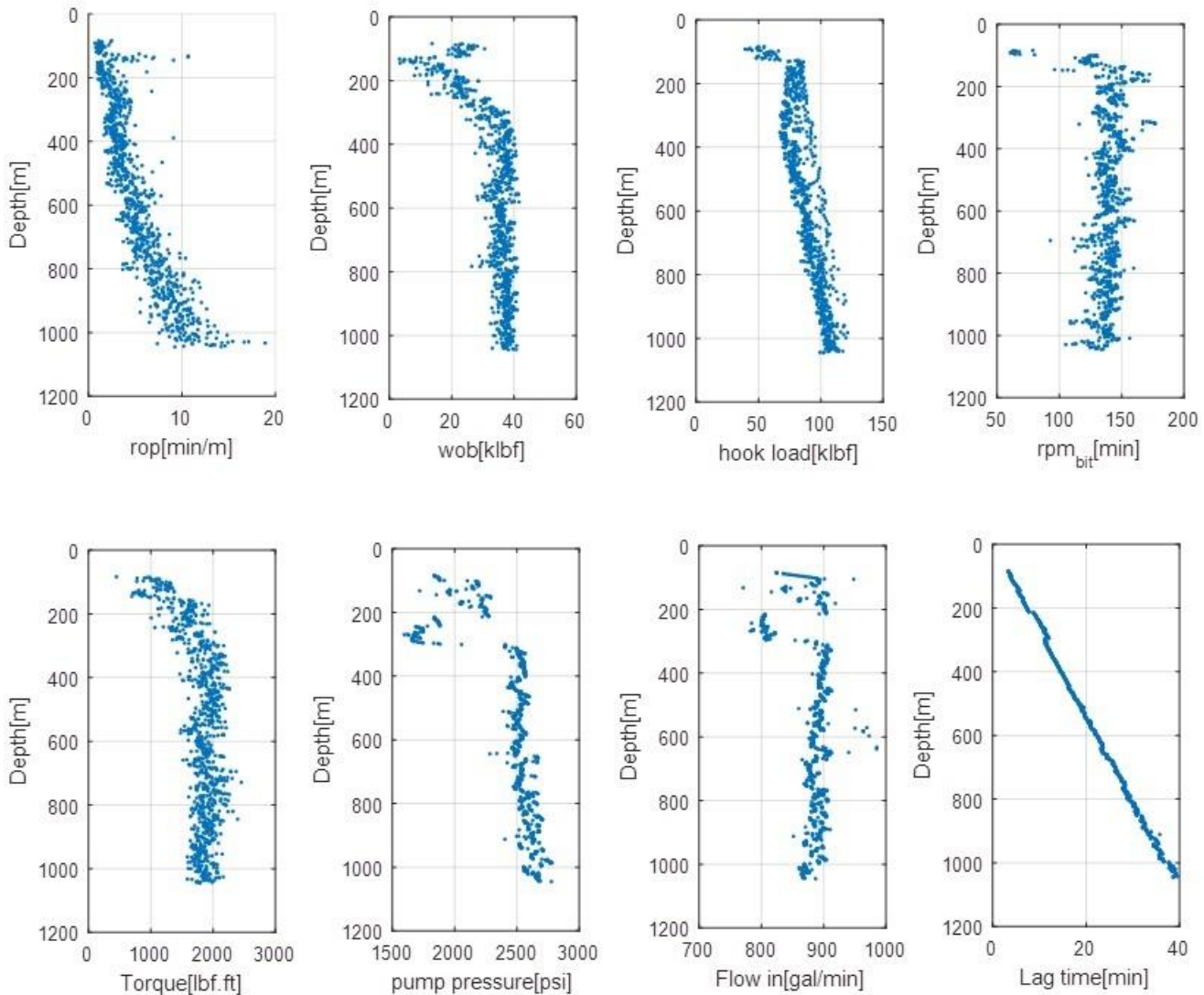
علاوه بر موارد میدانی فوق‌الذکر، پارامترهای فیزیکی و هندسی رشته حفاری نیز به عنوان ابزار طراحی حائز اهمیت هستند. مهمترین پارامترهای فیزیکی شامل مدول الاستیسیته و مدول برشی، ضرایب میرایی محوری و پیچشی، ضریب اصطکاک ویسکوز ضریب سختی تیغه و رشته حفاری می‌باشند. پارامترهای هندسی شامل قطر مته، ممان اینرسی، ممان اینرسی قطبی، سطح مقطع رشته حفاری، موقعیت زاویه ای و طول رشته حفاری هستند. از پارامترهای طراحی پیش گفته، قطر مته در عملیات حفاری بسیار حائز اهمیت بوده و باید توسط گروه کارشناسان و در عمق‌های متفاوت تغییر کند. قابل ذکر است بدلیل پیچیدگی عملیات حفاری، پارامترهای غیر قابل کنترل نیز بر روند اجرای کار اثر می‌گذارند. این پارامترها را طبیعت بر عملیات حفاری دیکته کرده و در اختیار طراح و گروه عملیات نیستند. انرژی طبیعی سنگ، عکس العمل ناشناخته مته - سنگ و ضریب و نیروی اصطکاک بین آنها از موارد مهم پارامترهای غیر قابل کنترل هستند.

### 3- تحلیل نمودارهای حاصل از داده‌های حفاری

در اینجا به بررسی و تحلیل داده‌های عملیات حفاری می‌پردازیم. داده‌ها مربوط به عملیات حفر یک حلقه چاه واقع در جنوب غربی ایران است که تا عمق 3976 متری حفاری شده است. بررسی انجام شده بر روی داده‌ها از عمق 100 متر 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 1/2 اینچ بوده است. لذا شرایط سازند و مته در بازه عمقی مذکور، یکسان بوده و بر تحلیل انجام شده اثر نداشته‌اند. واحد هر پارامتر مشابه مندرجات جدول 2 و منطبق بر شرایط عملیات میدانی تعریف شده است.

طبق شکل 2 با افزایش عمق، زمان موردنیاز برای حفاری واحد طول (یک متر) نیز افزایش یافته، یعنی نرخ نفوذ مته در لایه‌های زمین کاهش یافته 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. یعنی تا عمق 400 متری، بدلیل نرمی لایه‌های زمین، سیستم با وزن روی مته کمتر به نرخ نفوذ مدنظر رسیده و پس از آن، با فشردگی 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. میزان بار روی قلاب با افزایش طول رشته حفاری نسبت مستقیم دارد. لذا انتظار آن است در اعماق کمتر و تا عمق 400 متری مقدار کمتری

برای آن ثبت گردد. از طرفی مقداری از بار روی قلاب صرف افزایش وزن روی مته شده است. بنابراین پس از عمق 400 متر افزایش میزان بار روی قلاب با شیب ملایم همراه بوده است. به دلیل عدم تغییر در شرایط زمین‌شناسی و همچنین اجرای کار با یک نوع مته، عملیات حفاری تقریباً در یک محدوده سرعت دورانی و گشتاور ثابت انجام شده است. با افزایش عمق، نیروی هیدروستاتیک نیز افزایش می‌یابد، یعنی افت فشار سیستم در چاه بیشتر شده و نیاز است فشار پمپ بر آن غلبه کند. از طرفی چون سیال ورودی تقریباً مقدار ثابتی دارد، زمان لازم برای به سطح رسیدن نمونه فقط به عمق مته حفاری بستگی داشته و به همین دلیل نمودار آن خطی شده است.



شکل 2: نمودارهای حاصل از داده‌های میدانی

در اینجا هدف این است که به منظور تنظیم نرخ نفوذ مته در محدوده مناسب به متغیرهای قابل کنترل دست یابیم. با بررسی اثرگذاری پارامترها بر یکدیگر، مشخص است که بار روی قلاب با وزن روی مته ارتباط مستقیم دارد و گشتاور، متناسب با سرعت دورانی میز دوار تغییر می‌کند. از طرفی مقادیر سیال ورودی و افت فشار پمپ متناظر بوده و در عمق‌های مختلف ثابتند. لذا دو پارامتر وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار بصورت مستقل در میزان نرخ نفوذ مته در عمق‌های مختلف، اثرگذار هستند.

#### 4- آنالیز واریانس و مدل‌سازی

##### 4.1- آنالیز واریانس

همانطور که جدول 2 نشان می‌دهد، آنالیز واریانس برای فاکتورهای عمق مته حفاری، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار، انجام شده است. آماره  $p$  با عدد کمتر از 0.05، تاثیر پذیری هر سه فاکتور را از منظر آمار نشان می‌دهد. این بدان معناست که عمق و سازند زمین، تاثیر بسزایی بر روی نرخ نفوذ داشته است. دومین فاکتور موثر، وزن روی مته است که اهمیت خواهد داشت و در نهایت، سرعت دورانی مته رشته حفاری که در درجه سوم اهمیت واقع است.

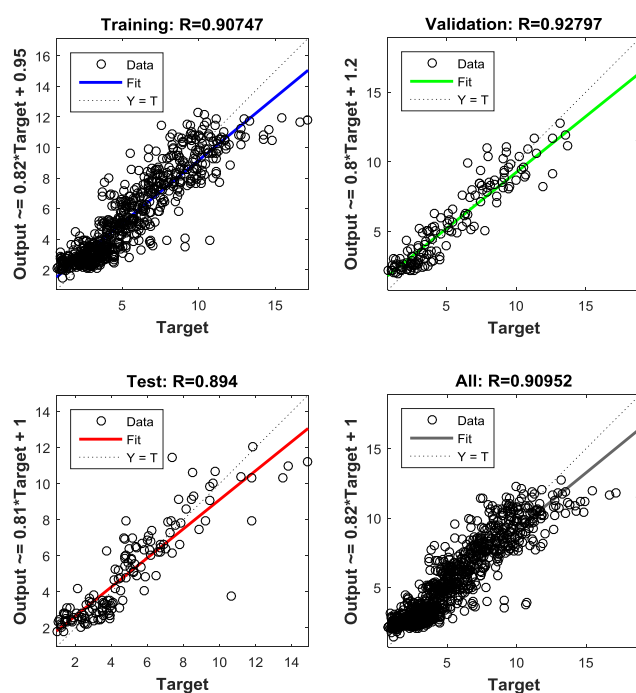
جدول 2: نتایج آنالیز واریانس

Source	DF	Seq SS	Adj SS	MS	F	P
Depth	1	6901.1	5898.2	5898.2	3194.72	0.000
WOB	1	581.4	574.6	574.6	311.20	0.000
RPM	1	42.2	42.2	42.2	22.84	0.000
Error	958	1768.7	1768.7	1.8		
Total	961	9293.3				

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

##### 4.2- مدل‌سازی شبکه عصبی

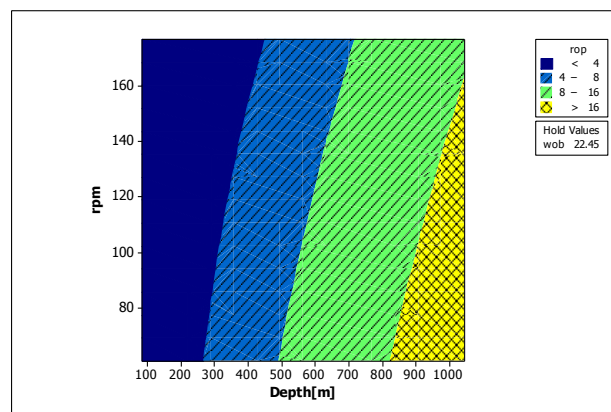
برای بهبود مدل‌سازی موجود، با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر پرسپترون و در نظر گرفتن 70 درصد داده‌ها برای انجام یادگیری، نتیجه همبستگی 89.4٪ برای داده‌های آزمایش به دست آمد.



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

## 5- بحث بر روی نتایج

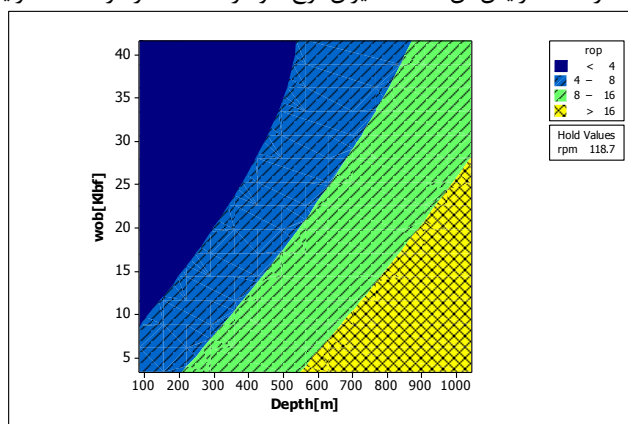
شکل 5 مربوط به محدوده نرخ نفوذ بر پایه تغییرات سرعت میز دوار در عمق‌های متفاوت است. وزن روی مته بصورت ثابت و به میزان 22.45 klbF با معدل‌گیری از مقادیر تجربی تعریف شده است. طبق این نمودار با افزایش عمق و برای رسیدن به نرخ نفوذ قابل قبول، میزان سرعت دورانی میز دوار افزایش پیدا کرده است. برای نمونه در عمق 400 متری، با حدود 100 RPM می‌توان به نرخ نفوذ قابل قبول رسید. ولی با افزایش عمق و برای داشتن نرخ نفوذ قابل قبول، باید محدوده سرعت دورانی را از 100 تا 180 دور در دقیقه افزایش داد. این موضوع در عمق‌های بالاتر از 800 متر قابل مطالعه است.



شکل 5: نرخ نفوذ مته حفاری بر اساس تغییرات سرعت میز دوار و عمق چاه

دقت شود که در حفاری انجام شده، مته از نوع الماسه پلی کریستال با قطر  $17 \frac{1}{2}$  بوده که برای بازدهی بیشتر امکان کار در سرعت‌های دورانی بالا مثلاً تا حدود 180 RPM وجود دارد. علی‌هذا سرعت دورانی خیلی زیاد مثلاً بالاتر از 200 می‌تواند به مته آسیب برساند. گرچه شرایط لیتولوژی و سازند نیز در تعیین این پارامترها دخیل هستند. البته همانگونه که اعلام شد در محدوده عمق مورد مطالعه، مته در سازند آجاجری و با لیتولوژی یکسان قرار داشته است.

شکل 6 مربوط به محدوده وزن روی مته در عمق‌های متفاوت است. سرعت میز دوار بصورت ثابت و به مقدار حدود 120 دور در دقیقه از میانگین مقادیر تجربی محاسبه و تعریف شده است. طبق این نمودار در عمق‌های کم (مثلاً کمتر از 500 متر)، باید وزن روی مته نیز محدود و حداکثر تا 20 klbF باشد. با افزایش عمق و رسیدن مته به عمق بیش از 550 متر، برای داشتن نرخ نفوذ مته مناسب و در محدوده 10 تا 12 متر در ساعت، می‌توان میزان وزن روی مته را به 30 رساند. افزایش آن تا 40، میزان نرخ نفوذ را تا 14 متر در ساعت افزایش می‌دهد.



شکل 6: نرخ نفوذ مته حفاری بر اساس تغییرات وزن روی مته و عمق چاه

در اعماق بیشتر مثلاً 1000 متر برای رسیدن به نرخ نفوذ مناسب و در محدوده 4 تا 12 متر در ساعت، باید حداقل مقدار وزن روی مته به میزان 30 کیلو پوند در نظر گرفته شود و عملیات حفاری با مقادیر بالاتر از آن انجام پذیرد. در کل بهتر است وزن روی مته بالای 15 باشد، لذا

مقادیر کم آن که طبق نمودار می‌توانند نرخ نفوذ خوبی هم بدهند، قابل قبول نیستند. البته این به معنای ایراد نمودار نیست و شرایط عملیاتی می‌تواند به این ترتیب هم باشد. ولی محدوده‌های وزن روی مته کمتر از 15 کیلو پوند برای تیم مجرب حفار قابل قبول نیست. ولی زمانیکه مته خوب درگیر می‌شود، ترجیح می‌دهیم با وزن کم یعنی در محدوده 15 تا 20 کار کنیم.

## 6- نتیجه و جمع‌بندی

در عمق‌های مختلف حفاری، نرخ نفوذ مته کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. در شرایط عملیاتی بر اساس تجربه و مهارت تیم حفار، با ایجاد تغییر در پارامترهای قابل کنترل حفاری، بهترین محدوده نرخ نفوذ بدست می‌آید. این کار مستلزم داشتن تجربه کافی توسط یک تیم خبیره و باتجربه و اجرای عملیات زمان‌بر است. در این مقاله به دلیل اهمیت مدل‌سازی و برقراری ارتباط میان نرخ نفوذ مته و سایر فاکتورهای تاثیرگذار، مدل مبتنی بر شبکه عصبی مورد بررسی قرار گرفت. اثر سه پارامتر عمق مته حفاری، سرعت دورانی و وزن روی مته بر نرخ نفوذ مته بررسی شد و با ثابت نگه‌داشتن یکی از پارامترهای سرعت دورانی یا وزن روی مته و تغییر پارامتر دوم مدل قابل قبولی از نرخ نفوذ مته در عمق‌های مختلف ارائه شد. با مدل ارائه شده می‌توان بهترین مقادیر را در مواجهه با عوامل ناشناخته در عمق‌های مختلف انتخاب نمود و نرخ نفوذ مته را پیش‌بینی کرد.

## 7- مراجع

- [1] Hugo L.S. Monteiro; A. Marcelo Trindade; "Performance analysis of proportional-integral feedback control for the reduction of stick-slip-induced torsional vibrations in oil well drillstrings", Journal of Sound and Vibration, Volume 398, Pages 28-38, 23 June 2017.
- [2] U. J. F. Aarsnes; F. Di Meglio; J. Roman Shor; "Avoiding stick slip vibrations in drilling through startup trajectory design", Journal of Process Control 70, Pages: 24–35, 2018.
- [3] S. Jardine, D. Malone; M. Sheppard; "Putting a damper on drilling's bad vibrations", Oilfield Review 1, Pages: 15-20, Jan 1994.
- [4] A. Terrand-Jeanne; V. Dos Santos Martins; V. Andrieu; "Regulation of the downside angular velocity of a drilling string with a PI controller", European Control Conference (ECC). IEEE Xplore: 29 November 2018.
- [5] J. Cheng, M. Wu; L. Chen; "Observer-Based Tracking Control for Suppressing Stick-Slip Vibration of Drillstring System", 37th Chinese Control Conference, July 2018.
- [6] C. Hegde, H. Millwater; K. Gray; "Classification of drilling stick slip severity using machine learning", Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 179, Pages 1023-1036, August 2019.
- [7] A. Terrand-Jeanne; V. Andrieu; M. Tayakout-Fayolle; V. Dos Santos Martins; "Regulation of inhomogeneous drilling model with a P-I controller", Transactions on Automatic Control, 2018.
- [8] R. Mlayeh, S. Toumi; L. Beji; "Backstepping boundary observer based-control for hyperbolic PDE in rotary drilling system", Applied Mathematics and Computation 322, Pages: 66–78, 2018.
- [9] B. Besselink; T. Vromen; N. Kremers; N. van de Wouw; "Analysis and control of stick-slip oscillations in drilling systems", Published in: IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume: 24, Issue:5, Pages: 1582 – 1593, September 2016.
- [10] T. Vromen; C. H. Dai; N. van de Wouw; T. Oomen; P. Astrid; A. Doris; H. Nijmeijer; "Mitigation of torsional vibrations in drilling systems: A robust control approach", IEEE Transactions on Control Systems Technology(99), Pages: 1-17, 2017.
- [11] M. Fu; P. Zhang; J. Li; Y. Wu; "Observer and reference governor based control strategy to suppress stick-slip vibrations in oil well drill-string", Journal of Sound and Vibration Volume 457, 29, Pages: 37-50 September 2019.
- [12] X. Zhu; L. Tang; Qiming Yang; "A literature review of approaches for stick-slip vibration suppression in oilwell drillstring", Advances in Mechanical Engineering Volume 2014, Article ID 967952, 17 pages, 2014.
- [13] Kaixiao Tian; Emmanuel Detournay; "Influence of PDC bit cutter layout on stick-slip vibrations of deep drilling Systems", Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 206, November 2021.
- [14] C. Lu; M. Wu; X. Chen; W. Cao; C. Gan; J. She; "Torsional vibration control of drill-string systems with time-varying measurement delays", Information Sciences 467, Pages: 528-548, 2018.
- [15] G. Dong; P. Chen; "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 43(27), Pages: 12189-12199, 2018.
- [16] Chiranth Hegde; Hugh Daigle; Harry Millwater and Ken Gray; "Analysis of rate of penetration (ROP) prediction in drilling using physics-based and data-driven models", Journal of Petroleum Science and Engineering 159, pages: 295–306, 2017.
- [17] Guang-Bin Huang; Qin-Yu Zhu; Chee-Kheong Siew; "Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks", International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541), vol. 2, pp. 985–990, 2004.