

## استفاده از روش مدل سازی انفیس برای بررسی پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ مته در حفاری چاه های نفت و گاز

حسن غنیطوس<sup>1</sup>، مسعود گوهری منش<sup>2</sup>، علی اکبر اکبری<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ghanitoos@mail.um.ac.ir

<sup>2</sup>استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، m.goharimanesh@torbath.ac.ir

<sup>3</sup>دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، akbari@um.ac.ir

### چکیده

پایداری عملیات حفاری چاه های نفت و گاز از منظر اقتصادی و ایمنی موضوع حیاتی و مهمی است. یکی از روش های کاربردی به منظور پیش بینی تداوم اجرای عملیات حفاری، تحلیل نرخ نفوذ مته است. مطالعات آماری و تجربی نشان داده است، عمق حفاری، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار پارامترهایی هستند که تأثیر مستقیم بر نرخ نفوذ مته دارند. ولی بدلیل تأثیر متقابل آن ها بر یکدیگر و بروز پدیده چسبش-لغزش (چزش)، کنترل نرخ نفوذ در محدوده مناسب، مسئله ای پیچیده و چالش برانگیز است. در این مقاله با استفاده از داده های میدانی یک حلقه چاه نفت و گاز واقع در جنوب غربی ایران، تأثیر این پارامترها بر یکدیگر در چارچوب مدلسازی سیستم های فازی عصبی مورد مطالعه قرار گرفت. با استفاده از روش انفیس (سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار)، مدل موفق چهاربعده نرخ نفوذ مته برحسب تغییرات عمق حفاری، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار ارائه شد. با تحلیل این مدل مشخص شد که نرخ نفوذ مته با افزایش عمق حفاری، کاهش می یابد و برای نگهداشت آن در محدوده قابل قبول، باید تغییرات سرعت دورانی و وزن روی مته بر اساس سیاست ارائه شده انجام پذیرد.

### واژه های کلیدی

مدل سازی انفیس، سیستم استنتاج عصبی- فازی سازگار، پارامترهای مؤثر در حفاری، نرخ نفوذ مته، پدیده چسبش-لغزش

### مقدمه

نوسانات و ارتعاشات مکانیکی در زمان حفر چاه و با افزایش طول رشته حفاری، باعث ناپایداری در اجرای عملیات شده و احتمال آسیب به سیستم رشته حفاری را افزایش می دهند. پرش مته، کماتش و پدیده چسبش-لغزش (چزش) به ترتیب حاصل ارتعاشات محوری،

جانبی و پیچشی وارده به سیستم رشته حفاری هستند [1,2]. کاهش نرخ نفوذ مته، عدم پایداری مجموعه تحتانی، ایجاد آسیب به مته و پیچ خوردگی رشته حفاری، از نتایج زیان بار ارتعاشات رشته حفاری هستند که علاوه بر خرابی دکل و سیستم رشته حفاری، باعث بالا رفتن هزینه های عملیاتی نیز می گردند [3,4,5]. بدلیل شرایط هندسی پیچیده رشته حفاری، مقاومت پیچشی آن کم است و از طرفی بدلیل اعمال همزمان گشتاور به قسمت های فوقانی و تحتانی آن، رشته حفاری دچار ارتعاشات پیچشی قابل توجه می گردد [6]. مطالعه پژوهش های پیشین نشان می دهد که یکی از مهمترین عوامل کاهش نرخ نفوذ مته و افزایش هزینه های عملیات حفاری، ارتعاشات چسبش-لغزش است که بدلیل اصطکاک بین مته حفاری و سنگ بوجود می آید. این پدیده که حاصل ارتعاشات پیچشی است، بیشترین آسیب را به رشته حفاری وارد می کند [7,8]. یکی دیگر از عوامل مؤثر در ارتعاشات سازه حفاری، اثر متقابل مته و سنگ است که در مقالات و پژوهش های متعدد بررسی شده است [9,10].

یک سیستم رشته حفاری شامل محرک، رابط، تثبیت کننده و برنده سنگ است که در صنعت حفاری به ترتیب با عناوین میز دوار، لوله های حفاری، مجموعه تحتانی و مته حفاری شناخته می شوند (شکل 1). عملکرد این سازه به این صورت است که در سطح زمین و به کمک دکل حفاری، انرژی بصورت گشتاور به میز دوار منتقل شده و چرخش میز باعث دوران لوله های حفاری و مته می گردد و به طور همزمان نیروی محوری از سطح به عمق اعمال می شود. نتیجه این فرایند، نفوذ مته حفاری در لایه های تحتانی زمین است [11].

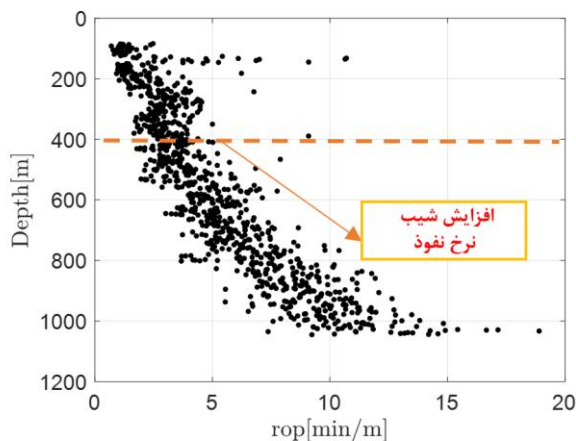
شرایط اجرای حفاری و تغییرات مکرر در عمق های مختلف زمین، باعث شده که کنترل مسیر چاه دشوارتر گردد. لذا در زمان حفاری، باید بهبود نحوه برش، نرخ نفوذ، کیفیت حفره چاه و کنترل مسیر چاه مدنظر قرار گیرد. تحلیل دقیق دینامیک ناپایدار رشته حفاری و نیروی کنترل مته بدلیل تأثیر فاکتورهای متعدد، دشوار

سرعت دورانی میز دوار و وزن روی مته دو پارامتر مهم و قابل کنترل هستند که گروه حفاری به منظور تنظیم نرخ نفوذ مته بر اساس تجربیات و دانش قبلی، اقدام به کنترل و تنظیم آن ها در اعماق مختلف می کند. این امر بعضاً با آزمون و خطا همراه است که علاوه بر زمانبر شدن عملیات، هزینه اجرای کار را نیز افزایش می دهد.

پارامترهای فیزیکی رشته حفاری مانند مدول الاستیسیته و برشی به عنوان ابزار طراحی حائز اهمیت هستند و در زمان عملیات نیاز به کنترل ندارند. ولی پارامتر هندسی قطر مته، در عملیات حفاری بسیار مهم بوده و باید توسط گروه کارشناسان و در عمق های متفاوت تغییر کند. از طرفی بدلیل پیچیدگی عملیات حفاری، پارامترهای غیر قابل کنترل اعمالی از محیط اطراف نیز بر اجرای کار اثر گذارند. پارامترهایی مانند انرژی طبیعی سنگ، ضریب و نیروی اصطکاک و عکس العمل ناشناخته مته-سنگ را طبیعت بر عملیات حفاری دیکته کرده و در اختیار طراح و گروه عملیات نیستند.

داده های استفاده شده در این تحقیق مربوط به حفر یک حلقه چاه واقع در جنوب غربی ایران است که تا عمق 3976 متری حفاری شده است. با هدف عدم تأثیر تغییر لایه های زمین شناسی، بررسی انجام شده بر روی داده ها از عمق 100 تا 1000 متری و عمدتاً در مته الماسه پلی کریستال با قطر 17 1/2 اینچ بوده و لذا شرایط سازند مته در محدوده مورد مطالعه بدون تغییر بوده است.

مطابق شکل 2 با افزایش عمق، زمان مورد نیاز برای یک متر حفاری افزایش یافته است. یعنی افزایش عمق، باعث کاهش نرخ نفوذ مته در لایه های زمین شده است. فشردگی بیشتر لایه های زمین در اعماق بیشتر که با افزایش نوسانات همراه است، از جمله دلایل این موضوع است و پس از عمق 400 متری می توان شیب قابل توجه افزایش زمان نرخ نفوذ مته را در نمودار مشاهده نمود.

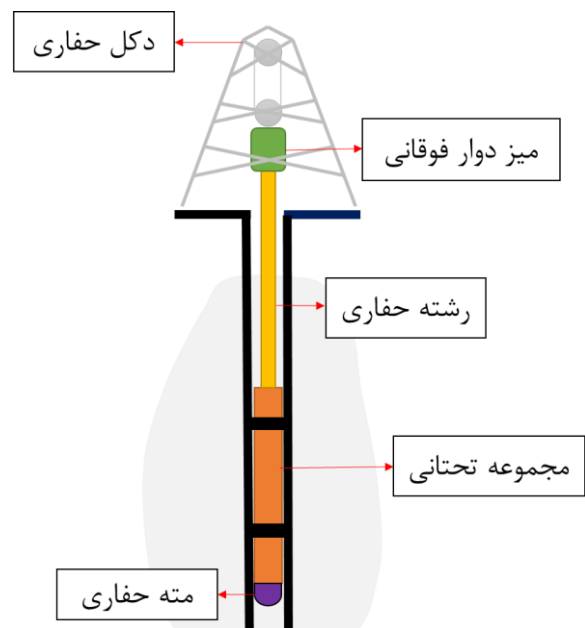


شکل 2: میزان نرخ نفوذ در عمق های مختلف بر حسب دقیقه بر متر

### مدل سازی انقیس

نظریه مجموعه های فازی توسط دانشمند فقید، پرفسور زاده معرفی و دسته بندی شد [15,16]. هنگام برخورد با مسائل پیچیده، منطق فازی ابزار ارزشمند و قدرتمندی برای در نظر گرفتن عدم

است. ولی عموماً کنترل مسیر چاه بر مبنای پارامترهای حفاری و مجموعه تحتانی انجام می گیرد [12]. سرعت میز دوار، وزن روی مته و دبی سیال ورودی، پارامترهایی با قابلیت اندازه گیری هستند و با تحلیل آن ها می توان نرخ نفوذ مته را در عمق های مختلف پیش بینی کرد [13]. مدل سازی پارامترهای حفاری بر مبنای روش های هوش محاسباتی، در سال های اخیر گسترش یافته و بویژه مدل سازی مبتنی بر یادگیری ماشین با ایجاد تغییر ساختاری، سرعت و دقت بیشتری در تقریب فراهم آورده است [14].



شکل 1: شمایی ساده از سیستم رشته حفاری شامل دکل حفاری، میز دوار فوقانی، رشته حفاری، مجموعه تحتانی و مته حفاری

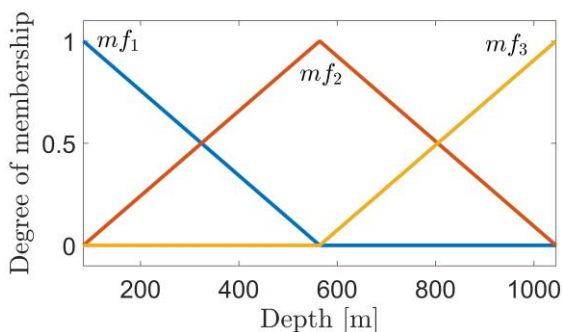
هدف این مقاله، پیش بینی نرخ نفوذ مته بر پایه پارامترهای متغیر شامل عمق حفاری، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار است. با استفاده از داده های عملیاتی حفاری یک چاه نفت و گاز و بر پایه مدل سازی انقیس مدلی موفق و نوآورانه به منظور تثبیت نرخ نفوذ مته در محدوده قابل قبول با ضریب همبستگی بالای 90 درصد، ارائه شده است.

### پارامترهای قابل اندازه گیری در حفاری

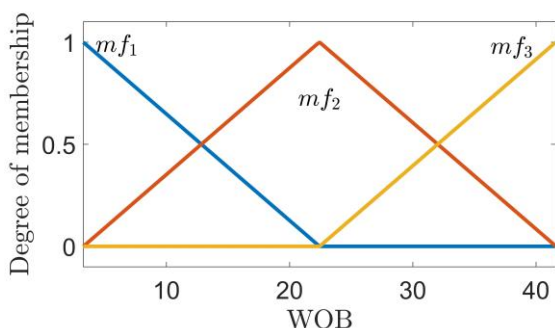
عمق مته حفاری، نرخ نفوذ مته، وزن روی مته، بار روی قلاب، سرعت دورانی میز دوار، گشتاور اعمالی محرک فوقانی، افت فشار و دبی سیال ورودی از پارامترهای قابل اندازه گیری در عملیات حفاری هستند. تمام داده های حاصل از اندازه گیری این پارامترها در زمان اجرای عملیات حفاری، توسط یک تیم کارشناس مجرب تحلیل و بررسی شده و با رصد لحظه ای داده ها و باتوجه به نوسانات وارده به رشته حفاری، کمیت های قابل کنترل تنظیم می گردند.

کمیت بسیار مهم نرخ نفوذ مته بیانگر زمان صرف شده برای هر متر حفاری بر حسب دقیقه است. هدف گروه حفاری نگهداشت این پارامتر در محدوده قابل پذیرش در اعماق مختلف حفره چاه است.

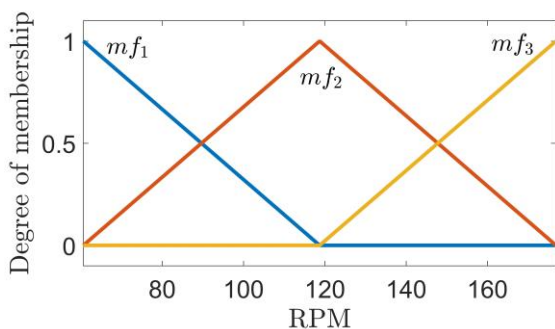
نتایج به دست آمده پس از یادگیری شبکه عصبی سیستم انفیس، ضریب همبستگی بیش از 90 در صد را نشان می‌دهد که در ادامه می‌توان، سیاست به دست آمده از این نتایج را مشاهده نمود.



شکل 4: تابع تعلق ورودی اول (عمق حفاری)



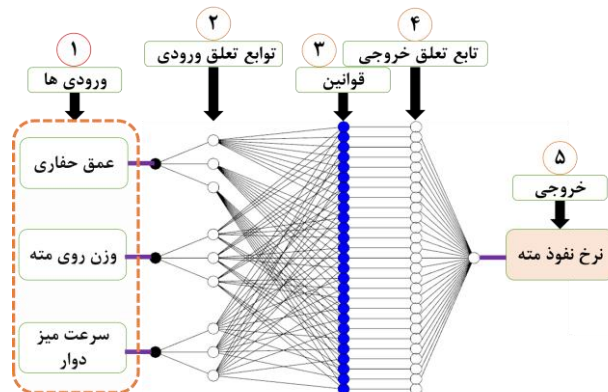
شکل 5: تابع تعلق ورودی دوم (وزن روی مته)



شکل 6: تابع تعلق ورودی سوم (سرعت میز دوار)

شکل 7، تصویری چهار بعدی از نرخ نفوذ مته بر حسب تغییرات عمق مته حفاری، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است با افزایش عمق، نرخ نفوذ کاهش یافته و به بیان دیگر، زمان لازم برای اجرای هر متر حفاری افزایش یافته است. همانطور که نشان داده شده است، تا 300 متر اول، با وزن روی مته به میزان 20 کیلو پوند و سرعت دورانی حدود 120 دور در دقیقه، می‌توان با نرخ نفوذ بسیار مناسب هر متر را در 5 دقیقه حفاری نمود. با افزایش عمق، نرخ نفوذ مته تغییر می‌یابد. در عمق‌های بیشتر می‌توان با افزایش وزن روی مته، نرخ نفوذ را تعدیل کرد. در عمق‌های 600 متر برای اجرای حفاری هر متر در 10 دقیقه، باید

قطعیّت‌ها است که ممکن است در بسیاری از موضوعات مورد توجه قرار بگیرد. در یک سیستم فازی، از زبان انسانی و تجربیات افراد استفاده می‌شود. از سوی دیگر، سیستم های فازی نمی‌توانند به تنهایی یاد بگیرند. با این وجود، روش های یادگیری تقویتی، به ویژه در سیستم های کنترلی، برای پیشرفت یادگیری بسیار توصیه شده است [17,18]. از سویی دیگر، شبکه های مصنوعی قادر به یادگیری هستند. این ابزار مصنوعی در دهه 1940 معرفی شدند [19]. اتصالات نورون های مغز انسان با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی، مدل سازی شد تا این امر امکان پذیر شود. یک مدل دینامیکی غیر خطی ممکن است با استفاده از این شبکه ها برای کشف روابط پیچیده بین داده های ورودی و خروجی در یک سیستم پیچیده پیدا شود. با این وجود، مدل های مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، نمی‌توانند یک روش سیستماتیک بین ورودی ها و خروجی ها را نشان دهند [20]. ادغام منطق فازی با شبکه های عصبی مصنوعی راهی برای رفع این نقص در اختیار دانشمندان قرار داد. در سال 1993، پرفسور جانگ اولین کسی بود که قابلیت های خودآموز شبکه های عصبی را با سیستم های فازی در یک سیستم پویا ترکیب کرد [21,22]. این رویکرد جدید به عنوان یک سیستم استنتاج عصبی-فازی سازگار (ANFIS) شناخته شد. همانطور که شکل 3 نشان می‌دهد، در یک چارچوب انفیس، پنج لایه وجود دارد. در لایه اول، ورودی‌ها که در این مسئله سه فاکتور عمق حفاری، وزن روی مته و سرعت میز دوار هستند به سیستم معرفی می‌شوند. سپس با استفاده از توابع تعلق موجود این ورودی‌ها در لایه دوم قرار می‌گیرند و به اصطلاح فازی سازی می‌شوند. شکل‌های 4 تا 6، توابع تعلق سه گانه مثلثی را برای هر سه ورودی، نشان می‌دهند. در لایه سوم، قوانین فیما بین ورودی‌ها و خروجی با استفاده از یادگیری شبکه عصبی با پیدا کردن وزن‌های مورد نظر هر کدام به دست می‌آیند که در این مقاله از یک شبکه عصبی هیبریدی استفاده شده است. سپس در لایه چهارم، با در نظر گرفتن تابع تعلق خروجی، خروجی مورد نظر شکل گرفته و در نهایت در لایه پنجم با استفاده از نوافاسازی ساز، به صورت فاکتور خروجی ( نرخ نفوذ) نشان داده می‌شود.



شکل 3: لایه های مدل انفیس برای مسئله حاضر

## نتیجه گیری

حین اجرای عملیات حفاری، به دلایل متعدد و در اعماق مختلف زمین، سیستم رشته حفاری دچار ارتعاشات مکانیکی شده و بویژه سیستم با پدیده چسبش-لغزش مواجه می‌گردد. این موضوع باعث کاهش قابل ملاحظه نرخ نفوذ مته می‌شود. در شرایط عملیاتی، تیم حفار، پارامترهای قابل کنترل را تغییر می‌دهد تا حفاری در بهترین محدوده نرخ نفوذ انجام پذیرد. این کار مستلزم داشتن تجربه کافی توسط یک تیم خبره و اجرای عملیات زمان‌بر و پرهزینه است. در این مقاله با ایجاد ارتباط میان نرخ نفوذ مته و سایر فاکتورهای تأثیرگذار، از روش مدل سازی انفیس برای بررسی پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ مته استفاده شد. اثر سه پارامتر عمق مته حفاری، سرعت دورانی و وزن روی مته بر نرخ نفوذ مته بررسی و مدل موفق و مناسبی از نرخ نفوذ مته در عمق‌های مختلف ارائه شد. با مدل ارائه شده و به منظور اجرای پایدار عملیات حفاری، می‌توان ضمن پیش بینی نرخ نفوذ مته، بهترین مقادیر را در مواجهه با عوامل ناشناخته و همچنین پدیده چسبش-لغزش در عمق‌های مختلف انتخاب نمود.

## فهرست علائم

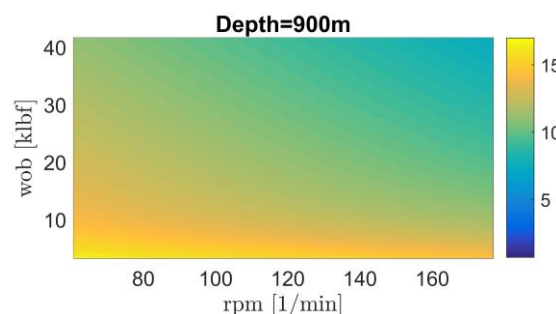
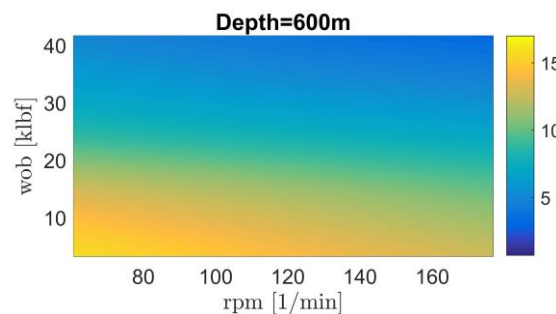
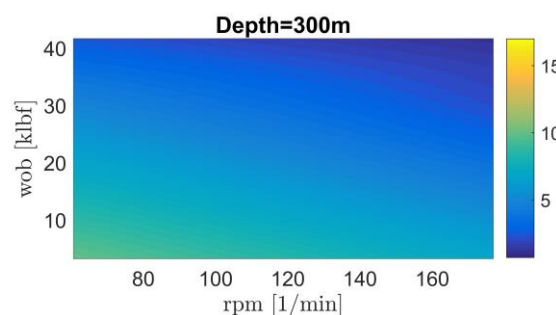
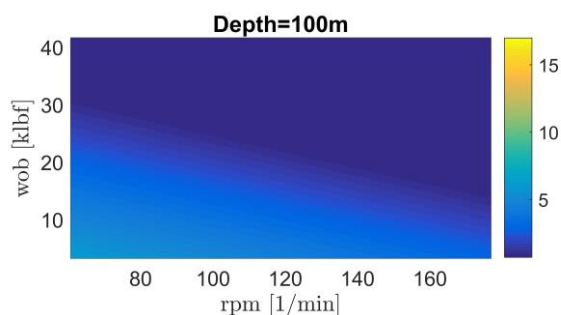
### علائم انگلیسی

Depth	عمق مته حفاری، m
ROP	نرخ نفوذ مته، min/m
WOB	وزن روی مته، KlbF (تقریباً معادل 4.45 KN)
RPM	سرعت دورانی میز دوار، 1/min
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

## مراجع و منابع

- [1] J. Cheng, M. Wu and L. Chen, "Observer-Based Tracking Control for Suppressing Stick-Slip Vibration of Drillstring System", 37th Chinese Control Conference, July 2018
- [2] C. Hegde, H. Millwater and K. Gray "Classification of drilling stick slip severity using machine learning", Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 179, August 2019, Pages 1023-1036
- [3] B. Besselink, T. Vromen, N. Kremers and 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, September 2016, Pages: 1582 – 1593
- [4] T. Vromen, C. H. Dai, N. van de Wouw, T. Oomen, P. Astrid, A. Doris and H. Nijmeijer, "Mitigation of torsional vibrations in drilling systems: A robust control approach", IEEE Transactions on Control Systems Technology(99), 2017, Pages: 1-17.
- [5] M. Fu, P. Zhang, J. Li and Y. Wu "Observer and reference governor based control strategy to suppress stick-slip vibrations in oil well drill-

وزن روی مته به میزان 30 کیلوپوند و سرعت دورانی 120 دور در دقیقه باشد. البته نرخ نفوذ با این شرایط در عمق 900 متر کاهش خواهد داشت و برای رسیدن به همان زمان 10 دقیقه در هر متر حفاری در این عمق، باید وزن روی مته 40 کیلوپوند و سرعت دورانی میز دوار بالاتر از 140 دور در دقیقه باشد. پدیده چسبش-لغزش به عنوان یکی از مشکلات عمده عملیات حفاری نیز مانند عامل عمق حفاری، باعث کاهش نرخ نفوذ مته می‌شود و از همین مدل می‌توان برای غلبه بر این پدیده استفاده کرد.



شکل 7: سیاست به دست آمده از مدل شبکه عصبی جهت تخمین مقدار نرخ نفوذ مته بر حسب تغییرات عمق مته (100، 300، 600 و 900 متر)، وزن روی مته و سرعت دورانی میز دوار. نرخ نفوذ در طیف رنگی آبی (صفر) تا زرد (17 دقیقه برای هر متر) نشان داده شده است.

- International Joint Conference on Neural Networks (IEEE Cat. No.04CH37541), 2004, vol. 2, pp. 985–990.
- [15] L. A. Zadeh, "Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 90, no. 2, pp. 111-127, 1997
- [16] L. A. Zadeh, "The information principle," *Information Sciences*, vol. ,294pp. 540-549, 2015.
- [17] M. Goharimanesh, A. Akbari, and S. M. Naghibi, "Combining the Principles of Fuzzy Logic and Reinforcement Learning for Control Of Dynamic Systems," *Journal of Applied and Computational Sciences in Mechanics (Journal of School of Engineering)*, vol. 27, no. 1 (13), pp. 103-116, 2016 2016.
- [18] R. S. Sutton and A. G. Barto, *Reinforcement learning: An introduction* (no. 1). Cambridge Univ Press, 1998.
- [19] L. Zhang and B. Zhang, "A geometrical representation of McCulloch-Pitts neural model and its applications," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 10, no. 4, pp. 925-929, 1999.
- [20] J. V. Tu, "Advantages and disadvantages of using artificial neural networks versus logistic regression for predicting medical outcomes," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 49, no. 11, pp. 1225-1231, doi: 10.1016/S0895-4356(96)00002-9.
- [21] J. S. R. Jang, "Input selection for ANFIS learning," in *Fuzzy Systems, 1996., Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on*, 1996, vol. 2: IEEE, pp. .1499–1493
- [22] J. S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993
- string", *Journal of Sound and Vibration* Volume 457, 29 September 2019, Pages: 37-50
- [6] Hugo L.S. Monteiro and 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, 23 June 2017, Pages 28-38.
- [7] A. Terrand-Jeanne, V. Andrieu, M. Tayakout-Fayolle and V. Dos Santos Martins, "Regulation of inhomogeneous drilling model with a P-I controller", *Transactions on Automatic Control*, 2018
- [8] R. Mlayeh, S. Toumi and L. Beji, "Backstepping boundary observer based-control for hyperbolic PDE in rotary drilling system", *Applied Mathematics and Computation* 322, 2018, Pages: 66–78
- [9] X. Zhu, L. Tang, and 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
- [10] Kaixiao Tian and 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, 109005
- [11] C. Lu, M. Wu, X. Chen, W. Cao, C. Gan and J. She, "Torsional vibration control of drill-string systems with time-varying measurement delays", *Information Sciences* 467, 2018, Pages: 528-548.
- [12] G. Dong, and 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), 2018, Pages: 12189-12199.
- [13] 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. 2017, pages: 295–306
- [14] Guang-Bin Huang, Qin-Yu Zhu, and Chee-Kheong Siew, "Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks",