



Research Paper

Petroleum Research

Petroleum Research, 2026 (February-March), Vol. 35, No. 145, 39-43

DOI: 10.22078/pr.2025.5551.3464

A Review of Mechanical Specific Energy (MSE) for Drilling Optimization: Challenges and Solutions

Homayoun Ghasemi, Seyed Reza Shadizadeh, Shahin Kord*

Ahwaz Faculty of Petroleum, Petroleum University of Technology, Ahwaz, Iran

Sh.kord@put.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5551.3464

Received: October 08, 2024

Modify Date: October 20, 2025

Accepted: December 06, 2025

Introduction

Drilling efficiency is the cornerstone of economic feasibility in modern oil and gas exploration [1]. As wells reach greater depths and encounter increasingly complex geological formations, the necessity for precise, real-time optimization becomes paramount. Mechanical Specific Energy (MSE), originally defined by Teale (1965) as the mechanical work performed per unit volume of rock removed, has remained the focal point of drilling performance research for decades [2]. The primary objective of this review is to synthesize the current state of MSE applications, critically evaluate the persistent challenges in its implementation, and outline the necessary technical pathways for the industry to move beyond superficial optimization. Although MSE is widely used as a monitoring tool, significant discrepancies persist between theoretical models and operational outcomes.

Fundamental Principles and Comparative Analysis

The evolution of MSE has been defined by a transition from basic mechanical models to integrated hydro-mechanical frameworks.

Historical Development

Teale established the premise that the energy required to remove a unit volume of rock remains relatively constant, regardless of drilling parameters. Later, Pessier and Fear (1992) extended this by incorporating torque as a function of weight-on-bit (WOB) and bit geometry [3].

Synthesis of Research Trends: Identifying the Critical Gaps

A critical review of the existing literature, summarized in Table 1, reveals a concerning disconnect in current drilling optimization research. While the table captures the broad scope of MSE-related studies, it serves a more vital purpose: highlighting the persistent "blind spots" in the field. The Hydraulic Neglect: Despite the proven influence of drilling fluids on the mechanical energy balance, a significant majority of the studies listed in Table 1 fail to account for the hydraulic component (HHPB). Even in recent publications (2020-2024), the integration of hydraulic data remains the exception rather than the rule. This omission creates a skewed understanding of energy efficiency, as it attributes energy losses solely to the rock-bit interface, ignoring the critical role of fluid-driven cuttings removal. The Experimental Deficit: Furthermore, the column corresponding to "Lab Apparatus" remains conspicuously sparse. While the industry has progressed in adopting data-driven and AI-based models, these algorithms are often trained on noisy field data without the necessary foundation of controlled experimental validation. This review identifies this as a fundamental research bottleneck. The data presented in Table 1 argues for a paradigm shift: for MSE to become a reliable metric, future research must move beyond purely algorithmic approaches.

Table 1 Recent studies on mechanical specific energy, its components, and the methods.

Authors	Year	Hydraulics	Lab apparatus	Field data	Problem detection	Efficiency calculation	Sonic log / UCS / CCS	Intelligence / ML
Belayneh et.al. [1]	2019			x		x	x	
Choudhry et.al. [4]	2019			x		x		x
Hegde [5]	2019			x	x			x
Al-Rubaii et.al. [6]	2020	x		x				
Trivedi et.al. [7]	2020	x		x	x	x	x	
Ma et.al. [8]	2020			x		x	x	
Hassan et.al. [9]	2020			x				x
Løken et.al. [10]	2020		x					x
Asgharzadeh [11]	2020			x				
Abbas et.al. [12]	2020			x		x		
Nystad [13]	2021			x				
Abkenari [14]	2021							x
Tawfiq et.al. [15]	2021			x		x		x
Ramba et.al. [16]	2021	x		x			x	
Kumar [17]	2021		x					
Kolapo [18]	2021		x				x	
Yu et.al. [19]	2021		x					
Bimastianto et.al. [20]	2021			x				
Blikra [21]	2021			x	x	x	x	
Losoya [22]	2021			x				x
Roohi et.al. [23]	2022			x				
Chen et.al. [24]	2022			x		x		x
Liang et.al. [25]	2022			x				x
Deng et.al. [26]	2022	x		x		x		
Cayeux et.al. [27]	2022			x		x		
Günel et.al. [28]	2024	x		x				x

There is an urgent, industry-wide need to standardize and expand laboratory drilling experiments to calibrate the mathematical models that are currently being applied to field data. Only through such fundamental, apparatus-based validations can the influence of rock properties and hydraulic efficiency be decoupled and accurately modelled.

Critical Analysis: The Conceptual Inadequacy of Strength-Based MSE Benchmarks

A fundamental issue in current drilling optimization is the reliance on compressive strength as a proxy for the energy required to drill a formation. This review posits that neither Unconfined Compressive Strength (UCS) nor Confined Compressive Strength (CCS) provides a representative benchmark for Mechanical Specific

Energy (MSE).

The Failure of UCS and CCS as Proxies

The use of UCS is physically flawed because it neglects the triaxial stress state (confinement and pore pressure) inherent in the subsurface. While CCS attempts to correct this using the Mohr-Coulomb failure criterion, it remains an impractical metric for real-time operations. Estimating CCS requires complex petrophysical modeling and continuous sonic data, which are neither cost-effective nor available in all depth intervals. Thus, both UCS and CCS fail as reliable, real-time indicators of the actual energy expenditure required for rock destruction.

The Energy Fallacy: Mechanistic vs. Operational MSE

The core of the problem lies in the misconception that MSE is purely a measure of the energy required to break

the rock matrix. Theoretically, if Rate of Penetration (ROP) were to approach infinity, rotational energy would vanish, and MSE would equate to the vertical stress (essentially the UCS). However, operational reality contradicts this model.

Practical drilling data indicates that the vertical energy component accounts for less than 2% of the total energy expenditure, with the vast majority of energy consumed by rotational forces and friction [29]. A static compressive strength test measures the force required for failure over a full cross-section, whereas the bit interacts with the rock through a limited surface area while simultaneously attempting to convey cuttings. As highlighted by the recent work of Samuel et al. [30], the assumption that MSE can be derived from, or equated to, rock strength measurements is fundamentally scientifically unsupported.

The Energy of Cuttings Transport and Regrinding

In a continuous drilling environment, a significant portion of energy is consumed by the transport of cuttings and the secondary process of regrinding those cuttings before they are evacuated from the borehole. The classical MSE equation does not account for the energy dissipation required for borehole cleaning, which is why actual field-measured MSE is significantly higher than the “intrinsic energy”

Table 2 Laboratory studies measuring the rate of penetration.

Author	Setup	Capabilities	Input Parameters	Output Parameters	Goal
Reddish and Yasar [31]	a hand-held drill fitted with a masonry bit	Hand Drilling and Stand-Mounted Drilling	WOB, RPM, Electrical Voltage	ROP, Electrical Current	Obtaining maximum drilling speed
Hamrick [32]	Northco Drill Bench	Drilling with constant vertical and rotational speed	ROP/RPM, Bit Diameter, Air Flow	WOB, Torque	Simplification and reduction of component interdependencies
Løken et.al. [10]	Laboratory Drilling Rig	Hoisting Systems, Top Drive, Fluid, Bottom-hole Sensors	RPM, WOB, Torque, Fluid Flow, Fluid Pressure	ROP	Formation detection by ML Methods
Losoya et. al. [22]	Laboratory Scale Drilling Rig	Hoisting Systems, Top Drive, Fluid, Bottom-hole Sensors	RPM, WOB	ROP	Realtime formation detection
Nystad [13]	Laboratory Rig by SPE	Hoisting Systems, Top Drive, Fluid, Bottom-hole Sensors	RPM, WOB	ROP	WOB and RPM Optimization for ROP Maximum Seeking

These studies confirm that for every rock type, there exists an optimal drilling energy that can only be extracted through controlled experimental setups, providing the necessary calibration for field-based predictive models.

Challenges and Strategic Solutions: A Roadmap for Future Research

The implementation of MSE in modern drilling operations is not without significant hurdles. This section details the six primary challenges identified in our review and proposes technical, data-driven solutions for each.

Data Reliability and Signal Processing

The primary challenge in field-based MSE calculations

required to merely overcome the compressive strength of the rock. Consequently, utilizing MSE as a tool for “formation strength detection” without considering hydraulic efficiency and cuttings transport is a methodological error that masks the true state of drilling dysfunctions.

The Hydraulic Component: A Missing Link

A significant methodological gap in classical MSE models is the omission of hydraulic energy. Drilling fluid serves two fundamental roles: altering the effective stress and removing cuttings.

Hydro-Mechanical Specific Energy (HMSE)

The introduction of the drilling fluid’s power (HHPB) into the MSE equation, known as HMSE, provides a more comprehensive view of the energy balance.

Our analysis indicates that excluding hydraulics creates a bias where inefficient hydraulic cleaning is misinterpreted as rock-bit inefficiency. Therefore, adopting HMSE is a scientific necessity to avoid this bias.

Laboratory Insights and Experimental Validation

The experimental data synthesized in our review emphasizes the necessity of controlled environments. As shown in Table 2, laboratory rigs provide the only reliable platform to isolate variables and understand the intrinsic behavior of rock destruction.

is the high noise-to-signal ratio present in surface-measured data (WOB, torque, and RPM). Surface measurements often fail to account for frictional losses in the drill string, leading to erroneous efficiency indices.

- Proposed Solution: The industry must shift towards advanced signal processing. By employing techniques such as adaptive filtering and blind-source separation, surface data can be corrected to approximate “downhole-equivalent” metrics.

Interpretation Ambiguity

A persistent challenge is distinguishing between drilling dysfunctions, such as bit balling, vibration, and formation changes. A drop in ROP can be attributed to several factors, and MSE alone is often insufficient to

pinpoint the cause.

- Proposed Solution: Adopting diagnostic frameworks such as the Gerbaud Method allows for a multi-parametric approach. By cross-referencing MSE with vibration data and torque-on-bit (TOB) fluctuations, operators can move from a simple monitoring state to a diagnostic state, identifying if a performance drop is due to dull cutters, mechanical vibration, or formation hardness changes [33].

The "Descriptive to Predictive" Transition

Current MSE implementations are largely descriptive, informing engineers of past performance rather than guiding future operations.

- Proposed Solution: The integration of Closed-Loop Drilling Systems is the natural evolution of MSE. By feeding real-time MSE data into Reinforcement Learning (RL) agents, the system can dynamically adjust WOB and RPM to find the theoretical "sweet spot" for ROP without manual intervention.

Experimental Deficit

As highlighted in our comparative analysis (Table 2), there is a critical scarcity of controlled laboratory data. Relying solely on field data limits our ability to calibrate models for extreme conditions.

- Proposed Solution: We advocate for a global initiative to standardize Direct Shear and Crushing Tests. Experimental rigs, such as those used by Nystad [13] and Losoya et al. [22], should become the industry standard for determining the "Intrinsic MSE" of different rock types under triaxial stress conditions.

6.5. Moving Beyond Strength-Based Benchmarks

The industry's persistent effort to use MSE as a proxy for rock strength (UCS or CCS) is a conceptual error that limits the utility of the metric. As established, MSE is an operational measure of energy expenditure, not a geomechanical property of the formation.

- Proposed Solution: The industry should abandon the attempt to correlate MSE directly with static strength values. Instead, the focus must shift toward Operational Energy Profiling. By establishing "Baseline Energy Envelopes" for specific drilling assemblies (BHA) and operational parameters, engineers can detect deviations in efficiency without the need for inaccurate strength-based benchmarks. The goal should be to monitor energy fluctuations caused by the drilling system's performance (e.g., bit dulling, cuttings transport inefficiency, and mechanical vibration) rather than attempting to derive inaccurate geological parameters from an energy equation.

Addressing Hydraulic Neglect

Classical models often treat hydraulic energy as a secondary factor, despite its profound impact on ROP through chip removal and effective stress modification.

- Proposed Solution: The adoption of Hydro-Mechanical Specific Energy (HMSE) models. Incorporating Computational Fluid Dynamics (CFD) into daily drilling reports allows engineers to quantify

the "cleaning efficiency" of the fluid, preventing the misinterpretation of poor hydraulics as poor rock-bit interaction.

Conclusion

Mechanical Specific Energy is a foundational theory that has reached a critical crossroad. Its future lies in integration. By adopting multiphysics models, leveraging intelligent diagnostics, and validating findings through standardized laboratory testing, MSE can transition from a simple indicator to the core framework of the automated, closed-loop drilling systems of the future. This roadmap provides the industry with the necessary steps to achieve higher drilling efficiency in increasingly complex reservoirs.

References

1. Belayneh, M., New alternative MSE based ROP Modelling and Analysis with North Sea field Data. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2019. 12(10): p. 1696-1700.
2. Teale, R. The concept of specific energy in rock drilling. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1965. Elsevier.
3. Pessier, R. and M. Fear. Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. in *SPE annual technical conference and exhibition*. 1992. OnePetro.
4. Iftikhar Choudhry, B., et al. Use of Advanced Drilling Engineering to Define the Correlation Between ROP, MSE and Formation Properties in the Crest of a Giant Offshore Field in Abu Dhabi. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2019. OnePetro.
5. Hegde, C., et al., Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020. 186: p. 106681.
6. Al-Rubaii, M.M., et al. An engineering approach to optimise rate of penetration through drilling specific energy. in *Offshore Technology Conference Asia*. 2020. OnePetro.
7. Trivedi, A.S., C.R. Clarkson, and R.J. Shor. Accounting for hydraulics and vibration in MSE calculations to estimate formation properties. in *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*. 2020. OnePetro.
8. Ma, G., et al. Real-time drilling rate prediction method of reaming while drilling based on mechanical specific energy. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
9. Hassan, A., S. Elkatatny, and A. Al-Majed, Coupling rate of penetration and mechanical

- specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020. 83: p. 103558.
10. Løken, E.A., J. Løkkevik, and D. Sui, Data-driven approaches tests on a laboratory drilling system. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2020. 10(7): p. 3043-3055.
 11. Asgharzadeh Shishavan, R., D. Adam, and R. Banirazi. Data-Driven Optimization of Drilling Parameters. in *IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition*. 2020. OnePetro.
 12. Abbas, N., et al. Using MSE and Downhole Drilling Dynamics in Achieving a New World-Class Record in an Extended-Reach Drilling Well, Offshore Abu Dhabi. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2020. OnePetro.
 13. Nystad, M., B.S. Aadnøy, and A. Pavlov, Real-Time Minimization of Mechanical Specific Energy with Multivariable Extremum Seeking. *Energies*, 2021. 14(5): p. 1298.
 14. Abkenari, M., Lajamorak, S., Drilling rate of penetration and mechanical specific energy for improving the drilling efficiency of gas wells. *Seventh International Conference on Chemical and Petroleum Engineering*. 2021.
 15. Hamlawi, A., et al. MSE Based Drilling Optimizer Project for Large National Drilling Contractor. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2021. OnePetro.
 16. Ramba, V., et al., Optimization of drilling parameters using improved play-back methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021. 206: p. 108991.
 17. Kumar, C.V., New approach for prediction of specific energy using sound levels produced during core drilling operations. *Geomechanics and Geoengineering*, 2021: p. 1-16.
 18. Kolapo, P., Investigating the effects of mechanical properties of rocks on specific energy and penetration rate of borehole drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021. 39(2): p. 1715-1726.
 19. Yu, B., K. Zhang, and G. Niu, Rock strength determination based on rock drillability index and drilling specific energy: Numerical simulation using discrete element method. *IEEE Access*, 2021. 9: p. 43923-43937.
 20. Bimastianto, P., et al. Drilling Efficiency Benchmarking Tool: Developing A Drilling Performance Measure Combining Data Science and Statistical Approach. in *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. 2021. OnePetro.
 21. Blikra, H., Detection of NPT and Drilling Events on the NCS from Depth-based Drilling Mechanics. 2021, uis.
 22. Z Losoya, E., et al. Automatic identification of rock formation type while drilling using machine learning based data-driven models. in *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference*. 2021. OnePetro.
 23. Roohi, A., et al., An Experimental Investigation of Drilling Performance Improvement Using Reaming While Drilling. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022. 144.(1)
 24. Qin, J., et al., A new mechanical specific energy model for composite impact drilling. *Applied Sciences*, 2022. 12(20): p. 10356.
 25. Liang, H., et al., Research on lithology identification method based on mechanical specific energy principle and machine learning theory. *Expert Systems with Applications*, 2022. 189: p. 116142.
 26. Deng, S., et al., Bit optimization method for rotary impact drilling based on specific energy model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022. 218: p. 110977.
 27. Cayeux, E., et al. Interoperability of Real-Time Drilling Signals at the Rig Site: An Example Based on Mechanical Specific Energy. in *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. 2023.
 28. Günel, B.T., Data Driven Web Based Simulation for Geothermal Heat Pump Drilling Around Saxony, Germany.
 29. Samuel, R. and G. Mensa-Wilmot. Facts, Fallacies and Pitfalls of Using Mechanical Specific Energy (MSE)–Part 1. in *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. 2023. SPE.
 30. Mensa-Wilmot, G. and R. Samuel. Mechanical Specific Energy (MSE): Claims and Implications–Facts, Fallacies, and Pitfalls (Part-2). in *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. 2024. SPE.
 31. Reddish, D. and E. Yasar. A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling. in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. 1996. Elsevier.
 32. Hamrick, T.R., Optimization of operating parameters for minimum mechanical specific energy in drilling. 2011: West Virginia University.
 33. Gerbaud, L., S. Menand, and H. Sellami. PDC bits: All comes from the cutter/rock interaction. in *IADC/SPE Drilling Conference*. 2006. OnePetro.

مروری بر بهینه‌سازی عملیات حفاری به کمک انرژی ویژه مکانیکی، چالش‌ها و راهکارها

همایون قاسمی، سیدرضا شادی‌زاده و شاهین کرد*
دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ تاریخ تغییر: ۱۴۰۴/۰۷/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵

چکیده

عملیات حفاری فعالیتی پر هزینه است که بخش عمده‌ای از بودجه اکتشاف و تولید نفت را به خود اختصاص می‌دهد. کاهش زمان حفاری، ضمن حفظ ایمنی، نقش مهمی در صرفه‌جویی اقتصادی دارد. انرژی ویژه مکانیکی از دو روش بهینه‌سازی پارامترهای حفاری جهت افزایش نرخ نفوذ و نیز پایش عملکرد، کارایی حفاری را بهبود بخشیده و با پیشگیری از بروز مشکلات حین عملیات، منجر به کاهش زمان و هزینه‌های حفاری می‌گردد. در این مقاله مروری، پس از ارزیابی تعاریف، مبانی و مولفه‌های تاثیرگذار، تاثیر سازند، نقش سیالات، دامنه کاربرد، سیستم‌های اندازه‌گیری و مدل‌سازی انرژی ویژه مکانیکی به گسترده‌تری بیان شده است. در ادامه، چالش‌های اصلی استفاده از این روش، شامل قابلیت اطمینان داده‌های درون چاهی، دقت تفسیر و یکپارچه‌سازی داده‌ها، عدم کشف سرعت بیشینه، تخمین غیردقیق انرژی ویژه مکانیکی از مقاومت تک محوره سنگ، و نادیده گرفتن اثر سیالات، با تکیه بر مبانی نظری و پیشینه پژوهش استنباط شده و به همراه راهکارهای پیشنهادی برای هر یک، مورد بحث قرار گرفته است. این راهکارها شامل کاهش وابستگی مولفه‌ها، استفاده از حسگرهای دقیق‌تر، الگوریتم‌های پیشرفته‌تر، روش‌های بصری سازی، سکوها نرم‌افزاری یکپارچه، سیستم‌های کنترل حلقه بسته، روش‌های طراحی آزمایش، بهینه‌سازی الگوریتمی، فناوری‌های هوشمند مبتنی بر داده‌های بی‌درنگ، توسعه شبیه‌سازهای آزمایشگاهی و توسعه حسگرهای هیدرولیکی هستند.

کلمات کلیدی: انرژی ویژه مکانیکی، انرژی ویژه حفاری، بهینه‌سازی حفاری، نرخ نفوذ، تشخیص مشکلات حفاری.

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی Sh.kord@put.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5551.3464)

مقدمه

بالقوه کاملاً بهینه را شناسایی کند، چالشی که با وابستگی متقابل پارامترهای فرمول MSE تشدید می‌شود. نقش هیدرولیک در فرآیند شکست سنگ و پاک‌سازی چاه نیز اغلب در مطالعات اخیر نادیده گرفته می‌شود، که مانع از درک جامع تراز انرژی می‌شود.

هدف این مقاله مروری، ارائه یک دیدگاه جامع در مورد کاربرد MSE در بهینه‌سازی حفاری، تجزیه و تحلیل انتقادی چالش‌های ذاتی آن و بررسی راه‌حل‌های فعلی و بالقوه برای بهبود عملکرد حفاری است. در این بررسی، مبانی نظری MSE، تأثیر پارامترهای مختلف حفاری، محدودیت‌های مدل‌های فعلی MSE و روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی مانند روش‌های تحلیلی برای به حداقل رساندن MSE و رویکردهای هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی/یادگیری ماشین مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مبانی و تعاریف

انرژی ویژه مکانیکی نخستین بار توسط تیل به عنوان کار مکانیکی انجام شده به ازای حفر حجم واحد سنگ تعریف شد. معادله انرژی ویژه با محاسبه جمع کار محوری و پیچشی انجام شده توسط مته و تقسیم آن بر حجم سنگ حفر شده به دست می‌آید [۱۵].

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi \cdot RPM \cdot Torque}{A_B \cdot ROP} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، WOB وزن روی مته (lb) مساحت مته (in²)، RPM (in²)، سرعت دورانی (min⁻¹) Torque گشتاور (lb.ft) سرعت نفوذ (ft/h) است. در این رابطه MSE بر حسب lb.in⁻² است.

حفاری چاه نفت یا گاز فرآیندی پیچیده با عوامل متعدد مؤثر بر راندمان است [۱]. بهینه‌سازی حفاری، به ویژه پیش‌بینی نرخ نفوذ (ROP)، برای کاهش هزینه‌ها حیاتی است [۲]. با پیش مولفه‌های عملیاتی قابل کنترل مانند وزن روی مته^۲ و سرعت دورانی^۳ می‌توان نرخ نفوذ را بهینه و هزینه‌ها را کمینه کرد. در این راستا، انرژی ویژه مکانیکی (MSE) با کمی‌سازی انرژی مورد نیاز برای حذف واحد حجم سنگ، به عنوان معیاری کارآمد برای بهینه‌سازی حفاری مطرح شده است [۳] که توانایی بهینه‌سازی آنی^۵ نیز دارد [۴]. هزینه‌های عملیاتی اندکی دارد [۵] و مدلی ساده است که تنها به چند مولفه ورودی نیاز دارد و در اندازه‌گیری‌های برون‌چاهی هم یافت می‌شود [۴ و ۶]. استفاده از آن، عملیات حفاری را مختل نمی‌کند و پس از نصب تجهیزات ابزار دقیق و تفسیر، هزینه‌های عملیاتی دیگری را تحمیل نمی‌کند [۵] و با روابط معروف هزینه وابسته به عمق^۶ قابل مقایسه است [۷ و ۸].

پیش انرژی ویژه مکانیکی در عملیات میدانی، نرخ نفوذ را از ۳۰ تا ۳۸۰٪ می‌تواند افزایش دهد [۹-۱۱]. بهینه‌سازی با MSE نسبت به سایر شاخص‌های عملکردی برای فرآیندهای تشخیص سنگ سازند^۷ برتر و شهودی‌تر است [۱۲-۱۴].

با این حال، کاربرد MSE در عمل با چالش‌های مهمی روبرو است که مستلزم بررسی دقیق‌تر است. یکی از این چالش‌ها، فرض اغلب نادرست مبنی بر مقایسه مستقیم MSE با مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) است، در حالی که حالی که سنگ در اعماق چاه تحت تنش‌های سه‌محوره قرار دارد و هیدرولیک نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. این عدم تطابق می‌تواند منجر به نتیجه‌گیری‌های گمراه‌کننده در مورد کارایی حفاری شود. علاوه بر این، در حالی که MSE برای مقایسه شرایط مختلف حفاری مفید است، ممکن است نتواند به طور تحلیلی شرایط

1. Rate of Penetration (ROP)
2. Weight on Bit (WOB)
3. Revolutions Per Minute (RPM)
4. Mechanical Specific Energy
5. Realtime Optimization
6. Cost per Footage
7. Formation Detection

و مهم‌ترین عامل، مولفه وزن روی مته است. منحنی ال-شکل انرژی ویژه و سایر یافته‌ها در این پژوهش بسیار شبیه رابطه تیل بود [۱۷]، که اصالت مفهوم MSE را در ساز و کارهای مختلف برش تأیید کرد، اما بر اهمیت وزن روی مته به عنوان عامل اصلی تأکید نمود.

نیاز به اصلاح: معرفی ضریب بازده مکانیکی

هنگام حفاری، درصد قابل توجهی از انرژی ورودی در سیستم حفاری از سطح تا عمق هدر می‌شود و به طور متوسط، تنها ۳۰-۴۰٪ انرژی حفاری به مته می‌رسد. این نسبت با معرفی ضریب بازده مکانیکی نشان داده می‌شود که به نوعی با راندمان حفاری مرتبط است و برابر با حاصل تقسیم انرژی ویژه مکانیکی حداقل به مقدار واقعی آن است. منبع اصلی اتلاف انرژی، نیروهای اصطکاکی است زیرا رشته حفاری تمایل دارد به سمت پایین چاه‌های کج، منحرف گردد [۱۵-۱۶ و ۱۸].

$$Eff_m = \frac{MSE_{min}}{MSE_{act}} * 100 \quad (2)$$

$$MSE = Eff_m \left(\frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi.RPM.Torque}{A_B.ROP} \right) \quad (3)$$

ضریب بازده مکانیکی در طول سال‌ها برای غلبه بر نقطه ضعف آن، یعنی اختلاف بین داده‌های سطحی اندازه‌گیری شده و شرایط چاه اصلاح شده است. اگر داده‌های چاه پیمایی در دسترس باشد، می‌توان مدل انرژی ویژه مکانیکی را مستقیماً اعمال کرد [۶]. در غیر این صورت، مدل پسیر و فیر به تقریب شرایط چاه کمک می‌کند و انواع مته را نیز در نظر می‌گیرد. در مدل‌های دیگری همچون چن و همکاران عاملی برای اعمال نقش بازده مکانیکی برای برآوردن شرایط میدانی اضافه می‌شود. تلاش‌های متعددی برای تعیین یک عدد ثابت به ضریب بازدهی صورت گرفته است. با این

تیل به کمک آزمایش‌هایی نشان داد انرژی به ازای حجم سنگ تخریب‌شده، صرف‌نظر از تغییرات نرخ نفوذ، وزن روی مته، یا سرعت دورانی نسبتاً ثابت است و مقدار عددی انرژی ویژه مکانیکی تقریباً ثابت و برابر با مقاومت فشاری سنگ است. این یافته، MSE را به یک معیار انقلابی برای ارزیابی کارایی مته تبدیل کرد؛ چرا که اگر انرژی ویژه صرف شده هنگام حفاری نزدیک به مقاومت تراکمی محدود نشده^۱ سنگ باشد، مته از نظر عملیاتی کارآمد تلقی می‌شود (به دلیل حداقل هدررفت انرژی). با این حال، به دلیل ناهمگونی گسترده سنگ‌ها، این مقدار، یک عدد منفرد و دقیق نیست و نوسانات گسترده‌ای دارد. بیشترین نرخ نفوذ حفاری در کمترین انرژی ویژه مکانیکی ممکن می‌شود و با شکستن سنگ به قطعاتی کوچکتر از نیاز، انرژی بیشتری مصرف می‌شود [۱۵].

مقایسه پژوهش‌ها و نظرات علمی

پسیر و فیر یک معادله برای نرخ نفوذ بر اساس معادله انرژی ویژه تیل استخراج کردند. این مدل یک پیشرفت مهم نسبت به کار تیل بود، زیرا گشتاور را به عنوان تابعی از وزن روی مته، قطر مته و ضریب اصطکاک لغزشی آن بیان کردند. آن‌ها دریافته‌اند که در حفاری تحت شرایط اتمسفری، MSE تقریباً برابر با مقاومت فشاری محدود نشده سازند حفاری شده است (که یافته‌های تیل را تأیید می‌کند). با این حال، این محققان نشان دادند که در حفاری تحت فشار هیدرواستاتیک، ضریب بازده مکانیکی (معکوس انرژی ویژه) به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۱۶]. این تفاوت، اولین گواه مهم بر محدودیت استفاده از MSE سطحی در شرایط واقعی عمق بود. در مطالعه‌ای مشابه و مجزا، هوانگ با طراحی آزمایش بازده حفاری، مفهوم انرژی ویژه برش^۲ را معرفی کرد که در عمل بسیار شبیه انرژی ویژه مکانیکی تیل بود. در این پژوهش مشخص شد وزن روی مته با گشتاور رابطه‌ای خطی و با مولفه نفوذ بر دور رابطه‌ای غیرخطی دارد،

1. Unconfined Compressive Stress (UCS)

2. Kerfing Specific Energy

مقاومت فشاری محصور را می‌توان به عنوان تابعی از مقاومت فشاری محدود نشده، فشار تفاضلی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ تخمین زد:

$$CCS = UCS + P_m + 2P_m \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) CSS و UCS به ترتیب مقاومت فشاری محصور شده و محصور نشده و P_m فشار تفاضلی و همگی برحسب lb.in^{-2} هستند و φ عدد بدون بعد زاویه اصطکاک داخلی سنگ است.

نقد و مقایسه مدل‌ها

علاوه بر تیل، پسیر و فیر، دانشمندان دیگری نیز به تخمین انرژی ویژه مکانیکی از مقاومت فشاری محدود نشده اشاره کردند. ردیش و یاسار در کار آزمایشگاهی خود با رسم نمودار شیب MSE/RPM بر حسب UCS متوجه برآزش یک خط راست روی داده‌ها شدند [۲۵]. برخی از نویسندگان، بر اساس شبیه‌سازی آزمایش خراش^۳، شبیه‌سازی‌های عددی [۲۶] و تجربی [۲۷ و ۲۸] انجام دادند و نتیجه گرفتند که انرژی ویژه مکانیکی در شرایط سطحی تقریباً برابر با مقاومت محدود نشده سنگ است. این مطالعات به طور مکرر، اعتبار مفهوم اولیه تیل را در شرایط آزمایشگاهی و سطحی تأیید کردند. با این حال، برای انطباق MSE با شرایط واقعی چاه (تنش سه‌محوره)، محققین بر اساس معیار شکست موهر-کولمب رابطه انرژی ویژه مکانیکی در شرایط فشار حدی را پیشنهاد دادند [۲۴]. این رویکرد، نشان دهنده یک گام ضروری در تکامل مدل MSE از یک معیار سطحی به یک ابزار تشخیصی برای عمق است، زیرا مقاومت واقعی سنگ در عمق (CCS) به طور قابل توجهی بالاتر از UCS است.

$$MSE_i = MSE_0 + m * P_m \quad (۵)$$

$$m = \frac{2 \sin(\varphi) \cos(\varphi + \psi)}{1 - \sin(\varphi + \theta + \varphi + \psi)} \quad (۶)$$

در رابطه (۶) m به زاویه اصطکاک سنگ φ ، زاویه چنگک کاتر θ و زاویه اصطکاک سطح برش خورده

حال، همانطور که جدول ۱ نشان می‌دهد، گستره وسیع ضرایب پیشنهادی (از ۱۲/۵٪ تا ۶۴٪) در مطالعات مختلف، خود نشان‌دهنده چالش اساسی در عمومی‌سازی این ضریب است و بیانگر این واقعیت است که ضریب بازدهی تابعی پیچیده از شرایط چاه و نوع مته است و نمی‌تواند به سادگی ثابت در نظر گرفته شود. [۴].

در کنار تلاش‌ها برای پیدا کردن ضریب بازدهی، افرادی همچون چن، فرمولی برای محاسبه وزن روی مته در عمق از مقدار سطحی آن ارائه کردند تا بتوان وزن روی مته و گشتاور آن را با دقت بالاتری محاسبه کرد [۲۱]. یاور و همکاران [۲۲] مقاومت تک و سه محوره سنگ را مدل‌سازی کردند و از روی زمان سیر موج فشاری و برشی، خواص سنگ و درصد شیل به دست آوردند و بازده مکانیکی برای مقادیر مختلف وزن روی مته محاسبه کردند. دوپریست و همکاران نیز پژوهشی جامع برای استاندارد سازی و ارتباط مولفه‌های سطحی و عمقی ارائه کرده‌اند که در آن معادله انرژی ویژه درون چاهی از انرژی ویژه کل تفکیک شده است [۲۳].

جدول ۱ ضرایب بازدهی انرژی ویژه مکانیکی از دید محققین.
Table 1 Mechanical specific energy efficiency coefficients from the researchers' perspective.

Author	Efficiency factor, Ef
Dupriest et al. 2005 [9]	0.35
Guerrero et.al. 2007 [19]	0.35
Hammoutene, 2012 [20]	0.64 - 0.26
Amadi & Iyalla, 2012 [10]	0.125

ارتباط انرژی ویژه مکانیکی با مقاومت فشاری سنگ: تحلیل انتقادی

مقاومت فشاری محصور نشده (UCS)، آزمایشی است که در آن، نمونه به صورت تک محوری فشرده می‌شود تا گسیخته شود. مقاومت فشاری محصور^۱، (CCS)، شامل اثر فشار حدی^۲ نیز هست که بر استحکام سنگ تأثیر می‌گذارد. این آزمایش شرایط سنگ در عمق را شبیه سازی می‌کند [۲۴].

1. Confined Compressive Strength
2. Confined Pressure
3. Scratch Test

۱۷ بستگی دارد.

این تغییر پارادایم، بر لزوم درک این نکته تأکید می‌کند که MSE باید نه با UCS، بلکه با مقاومت محصور شده واقعی سنگ CCS مقایسه شود. نیاز به انرژی مضاعف یا ضریب تصحیح در مدل‌های پیشرفته MSE، ریشه در این واقعیت دارد که نه تنها انرژی لازم برای گسیختگی سنگ تحت تنش محصور CCS، بلکه انرژی مصرفی برای حذف براده‌ها نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این تقسیم‌بندی انرژی، کارایی مدل‌های اولیه MSE را در تخمین دقیق مقاومت واقعی سنگ در حفاری عمیق زیر سؤال می‌برد.

تأثیر هیدرولیک بر انرژی ویژه مکانیکی: نادیده گرفتن یک مولفه حیاتی

دو پرست و همکاران به اهمیت ویژه هیدرولیک و فقدان آن در رابطه انرژی ویژه مکانیکی پی بردند [۹]. سه سال بعد آرمنتا با کم کردن یک عبارت از معادله تیل معادله انرژی ویژه حفاری را معرفی کرد که شامل اثر هیدرولیک می‌شد [۲۹]:

$$DSE = MSE - \frac{1980000\lambda * HHP_B}{A_B * ROP} = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi * RPM * Torque}{A_B * ROP} - \frac{1980000\lambda * HHP_B}{A_B * ROP} \quad (7)$$

که در این رابطه HHP_B توان هیدرولیکی مته (hp) و λ ضریب هیدرولیکی مته است.

مقایسه مدل‌ها

موهان و همکاران مدل اصلاح شده را به صورت انرژی ویژه هیدرومکانیکی با افزودن یک عبارت هیدرولیکی و تطبیق معادله با حالت‌های مختلف حفره باز ارائه کردند [۳۰].

$$HMSE = \frac{WOB_B * ROP + 120\pi * RPM * Torque + \eta \Delta P_B Q}{A_B * ROP} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، η فاکتور ساختگی برای کاهش انرژی، ΔP_B افت فشار در مته (psi) و Q دبی ($ft.in^2.h^{-1}$) است.

این رویکرد با در نظر گرفتن انرژی صرف شده برای حفر سنگ (انرژی مکانیکی) و انرژی تامین شده توسط سیال حفاری (انرژی هیدرولیک) درک جامع تری از فرآیند حفاری ارائه می‌دهد. اخیراً ژو و همکاران مدلی برای بهینه‌سازی انرژی ویژه هیدرومکانیکی (HMSE) در فشار ته‌چاهی ثابت استفاده کردند و هم‌افزایی بین انرژی هیدرولیک و مکانیکی را نشان دادند [۳۱]. با توجه به اهمیت هیدرولیک در انرژی ویژه حفاری، امروزه در بعضی از مطالعات جدید اثر آن را در نظر می‌گیرند [۳۲-۳۴].

نقد روش شناختی

گنجاندن مؤلفه هیدرولیکی در تحلیل (استفاده از DSE یا HMSE) یک ضرورت علمی است تا بتوان کارایی واقعی را ارزیابی کرد. چرا که سیال حفاری دارای دو وظیفه حیاتی است: اول، اثرگذاری بر تنش مؤثر در سنگ و کمک به ساز و کار شکست، و دوم، پاک‌سازی فیزیکی براده‌ها از کف چاه. بنابراین، حذف انرژی هیدرولیک از تحلیل، به‌طور بنیادی قانون بقای انرژی را در تحلیل تراز کلی انرژی نقض می‌کند. با این وجود، مطالعات جدیدی که هنوز اثر هیدرولیک را نادیده می‌گیرند تداوم دارد [۳۹-۳۵].

بهینه‌سازی عملیات حفاری به کمک انرژی ویژه مکانیکی

به صورت کلی بهینه‌سازی حفره از دو جنبه قابل بررسی است. نخست تنظیم کردن مولفه‌های حفاری به گونه‌ای که بیشترین سرعت حفاری ایمن به دست آید و دوم، پرهیز از وقوع مشکلات حفاری یا تشخیص زود هنگام مشکلات حفره است. انرژی ویژه مکانیکی در هر دو بخش در فرایند بهینه‌سازی کاربرد دارد زیرا حد پایین آن نشان‌دهنده حفاری کارآمد و افزایش ناگهانی آن نشان‌دهنده احتمال وقوع مشکلی در حفاری است.

کاربرد انرژی ویژه مکانیکی در بهینه‌سازی نرخ نفوذ

عمده مولفه‌های تاثیرگذار در نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته و سرعت چرخشی است. متناسب با افزایش هر مولفه، نرخ نفوذ باید افزایش یابد. افزایش متناسب به معنی حفاری کارآمد است که اگر در یک نمودار رسم شود خطی مستقیم به نام خط مته کارآمد را تشکیل می‌دهد. نقطه بنیانگذار^۱ نقطه‌ای تلقی می‌شود که در آن نمودار از خط مستقیم یاد شده خارج می‌گردد و دیگر حفاری کارآمد نیست. تهاجم مته^۲ یکی دیگر از عوامل موثر بر میزان نفوذ است. یک قطعه تهاجمی تر زاویه کمتری روی تیغه‌ها دارد، بنابراین به عمق برش بیشتر در هر دور دست می‌یابد و در نتیجه نرخ نفوذ را افزایش می‌دهد. شکل ۱ اثرات تهاجم مته، سختی سازند و سرعت چرخش در یک مته کارآمد را نشان می‌دهد [۴۰].

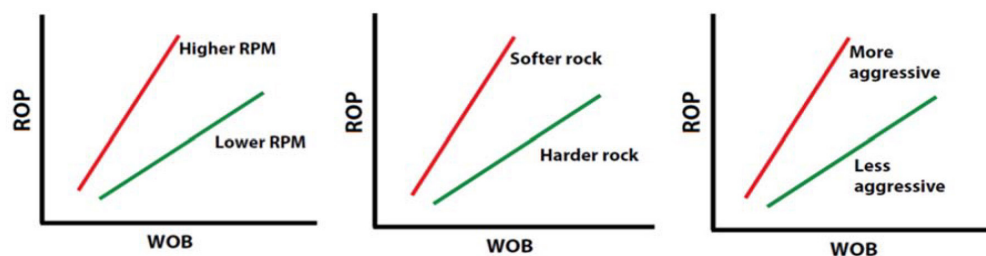
در سال ۲۰۰۲ نخستین بار کاربرد انرژی ویژه مکانیکی در بهینه‌سازی حفاری در تلفیق با داده‌های MWD^۳ و نمودار صوتی عملیاتی شد. در آن زمان هدف تنها تصمیم‌گیری به موقع خارج کردن رشته حفاری از چاه بود. اما حدود سه سال بعد انرژی ویژه مکانیکی در دکل‌های حفاری کاربرد گسترده پیدا کرد و منجر به بهینه‌سازی بی‌درنگ عملیات حفاری شد [۹ و ۴۱]. استفاده از انرژی ویژه مکانیکی در تمام سالیان نه تنها به عنوان یک ابزار مناسب

بهینه‌سازی حین حفاری ادامه داشته است بلکه در بهینه‌سازی عملیاتی چون دیوارتراشی^۴ [۴۲]، جداره رانی همراه با حفاری^۵ [۴۳]، حفاری چاه‌های افقی طولانی^۶ [۴۴] نقش موثر ایفا کرده است. اخیراً نیز به فراخور تکنولوژی‌های جدید، روش‌هایی همچون شبکه عصبی مصنوعی [۴۵]، یادگیری ماشین [۴۶]، داده محور [۴۷-۵۰]، هوش مصنوعی [۵۱] و تحلیل داده [۵۲] با بحث انرژی ویژه مکانیکی تلفیق شده است و فرایند بهینه‌سازی را به کامل‌ترین سطح خود رسانده است.

جدول ۲ خلاصه‌ای از پژوهش‌های انجام شده اخیر و مولفه‌ها و روش‌های در نظر گرفته شده در هر یک را نشان می‌دهد.

تشخیص مشکلات حفاری با پایش انرژی ویژه مکانیکی

انرژی ویژه مکانیکی اغلب برای تعیین کمیت راندمان حفاری استفاده شده است، و به طور کلی پذیرفته شده است که حفاری کارآمد زمانی است که انرژی ویژه مکانیکی سه برابر مقاومت فشاری محدود (CCS) سنگ و ضریب بازدهی $0/35-0/3$ باشد. همواره CCS بر UCS ارجح است. با این وجود، تعیین دقیق CCS دشوار است زیرا فشار منفذی و نفوذپذیری سنگ اغلب به خوبی شناخته شده نیستند و آزمایش آن نیز به ندرت انجام می‌شود [۱، ۹ و ۵۹].



شکل ۱ اثرات تهاجم مته، سختی سازند و سرعت چرخش برای یک مته کارآمد [۴۰].

Fig. 1 Effects of bit aggressiveness, formation hardness, and rotational speed for an efficient bit.

1. Founder Point
2. Bit Aggressiveness
3. Measure While Drilling
4. Reaming
5. Casing While Drilling
6. Extended Rich Drilling

جدول ۲ پژوهش‌های انجام شده اخیر در انرژی ویژه مکانیکی و مولفه‌ها و روش‌های در نظر گرفته شده.
Table 2 Recent studies on mechanical specific energy, its components, and the methods.

Authors	Year	Hydraulics	Lab apparatus	Field data	Problem detection	Efficiency calculation	Sonic log / UCS / CCS	Intelligence / ML
Belayneh et.al. [2]	2019			x		x	x	
Choudhry et.al. [53]	2019			x		x		x
Hegde [46]	2019			x	x			x
Al-Rubaii et.al. [32]	2020	x		x				
Trivedi et.al. [33]	2020	x		x	x	x	x	
Ma et.al. [42]	2020			x		x	x	
Hassan et.al. [35]	2020			x				x
Løken et.al. [47]	2020		x					x
Asgharzadeh [48]	2020			x				
Abbas et.al. [44]	2020			x		x		
Nystad [54]	2021			x				
Abkenari [45]	2021							x
Tawfiq et.al. [51]	2021			x		x		x
Ramba et.al. [34]	2021	x		x			x	
Kumar [36]	2021		x					
Kolapo [37]	2021		x				x	
Yu et.al. [38]	2021		x					
Bimastianto et.al. [39]	2021			x				
Blikra [52]	2021			x	x	x	x	
Losoya [49]	2021			x				x
Roohi et.al. [43]	2022			x				
Chen et.al. [55]	2022			x		x		x
Liang et.al. [56]	2022			x				x
Deng et.al. [57]	2022	x		x		x		
Cayeux et.al. [58]	2022			x		x		
Günel et.al. [50]	2024	x		x				x

می‌کند. بدین منظور کیفیت داده وزن روی مته نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در حفاری عمودی در صورت کالیبره صحیح وزن خوانده شده در سطح قابل استفاده است، اما در حفاری‌های جهت‌دار لغزشی^۴، تجزیه و تحلیل گشتاور و نیروی پسا^۵ برای محاسبه افت وزن روی مته در طول رشته لازم است [۶۳].

گره‌بند و همکاران بر اساس دو شاخص انرژی ویژه مکانیکی و نسبت آن با قدرت حفاری، روشی را برای تشخیص اختلال عملکرد حفاری در حین عملیات به ثبت رساندند به گونه‌ای که با مقایسه سطح و روند این دو شاخص در طول فرآیند حفاری (افزایش، پایدار، کاهش) می‌توان اختلالات حفاری را تشخیص داد. به این ترتیب، تشخیص اینکه چه نوع اختلال عملکرد حفاری باعث تغییر انرژی ویژه مکانیکی شده است، آسان‌تر می‌شود. امروزه بسیاری از عملیات حفاری شامل ابزار نگار گاما حین حفاری می‌شود، بنابراین می‌توان تغییرات سازند را به سادگی تعیین یا رد کرد. بنابراین سه دلیل عمده دیگر افزایش انرژی ویژه را می‌توان در توپیی شدگی مته، ارتعاش رشته حفاری و سایش مته دانست. تعیین اینکه کدام یک از این علل مسئول است، نیاز به تجزیه و تحلیل کیفی سازند، هیدرولیک مته، دانش میدانی نرخ سایش مته و غیره دارد. شکل ۳ روش ثبت شده گره‌بند را به طور خلاصه نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری در این خصوص را ساده می‌کند [۶۴].

MSE	DS	MSE/DS	Dysfunction
↗	↗	↘	UCS
→	→	→	
↘	↘	↗	Bit Balling
↗	↗	↗	Vibration
↗	↗	↘	Wear

شکل ۳ روش ارایه شده توسط گره‌بند برای تشخیص دلایل افزایش انرژی ویژه مکانیکی [۶۴].

Fig. 3 The method proposed by Gerbuaud for identifying the causes of increased mechanical specific energy.

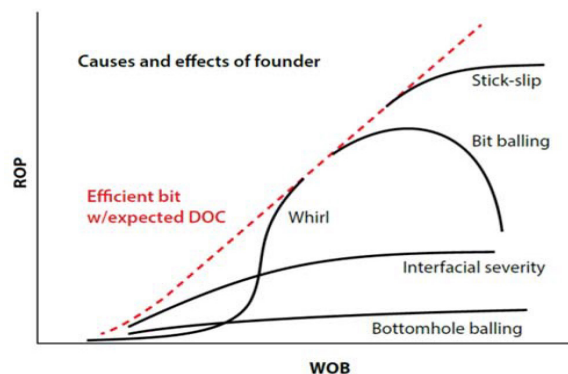
1. Drill Strength
2. Torque on Bit (TOB)
3. Cutting Force
4. Sliding Drilling
5. Drag Force

اگر مولفه‌های حفاری ثابت باشند و انرژی ویژه حفاری تغییر کند، چهار احتمال متمایز اصلی وجود دارد: تغییر سازند، وجود ارتعاش در لوله، توپیی شدن مته یا سایش مته [۶۰ و ۶۱]. بنابراین به ساز و کاری جهت تفکیک این احتمالات نیاز است. در یک راه‌کار از مفهوم قدرت حفاری^۱ استفاده می‌شود [۶۲]:

$$DS = \frac{WOB}{R_B \cdot DOC} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، DS قدرت حفاری ($\text{lb.in}^{-1} \cdot \text{ft}^{-1}$)، RB شعاع مته (in) و DOC عمق برش (ft) است.

هرگاه مته به صورت کارآمد نباشد حتماً دلیلی در آن نهفته شده است. شکل ۲ علل و اثرات بالقوه آن‌ها را نشان می‌دهد. توپیی شدن مته، ارتعاشات چرخشی، ارتعاشات محوری و ارتعاشات لغزشی شایع‌ترین اشکال اختلال هستند.



شکل ۲ مقایسه اختلالات مته ناکار با یک مته کارا [۶۲].
Fig. 2 Comparison of disturbances in an inefficient bit with those in an efficient bit.

انرژی ویژه مکانیکی اصطلاحی است که مستقیماً گشتاور روی مته^۲ را بررسی می‌کند، که همان سهم نیروی برش^۳ اعمال شده بر روی هر تیغه مته الماسه است. استفاده از قدرت حفاری در کنار MSE موضوع مطالعه جدیدی پدید می‌آورد که وزن روی مته و اثرات آن را دخیل می‌کند. در واقع، برخی مطالعات [۳۳] نشان داده‌اند که نسبت بین نیروی برش و نیروی نرمال در تیغه الماسه بینش‌های متعددی را در مورد سنگ و راندمان برش مشخص

ساخته شده اند نیز کاربردی است و می‌تواند الهام بخش مطالعات جدیدی در ارزیابی آزمایشگاهی و شبیه سازی انرژی ویژه مکانیکی باشد. ردیش و یاسار یکی از پیشگامان در این زمینه بودند. آن‌ها از یک دریل چکشی صنعتی برای سوراخ کاری با سرعتی بین ۰ تا ۱۲۰۰ RPM و از یک دستگاه آمپر متر دیجیتال و باتری‌های ولتاژ ثابت برای اندازه گیری توان الکتریکی و در نتیجه انرژی ورودی به سیستم استفاده کردند. مهم ترین نقطه ضعف این دستگاه عدم کنترل سرعت/گشتاور بود. بر اساس مشاهدات، بیشترین نرخ نفوذ در حالت واماندگی موتور^۲ رخ می‌داد، آنها کنترل وزن روی مته را غیر ضروری تلقی کردند. به همین دلیل پراکنندگی گسترده‌ای از مقادیر انرژی ویژه برای هر نوع سنگ به دست آمد. با رسم منحنی انرژی ویژه در برابر نرخ نفوذ مشخص شد که نرخ نفوذ حداکثری (در حالت واماندگی موتور) با استحکام سنگ رابطه عکس دارد [۲۵]. همریک از یک دریل ستونی برای سوراخ کاری در سرعت‌های عمودی و دروانی مشخص استفاده کرد، به طوری که نرخ نفوذ و گشتاور دور^۳ در دستگاه تنظیم شده و پس از درگیر شدن کلاچ، در هر چرخه کاری وزن روی مته و گشتاور اندازه گیری می‌شد. دستگاه شامل سنسورهای وزنی عمودی و افقی برای محاسبه وزن روی مته و گشتاور اعمال شده می‌شد. همریک با محاسبه انرژی ویژه مکانیکی و مولفه قدرت حفاری توانست روشی را برای تشخیص اختلال عملکرد حفاری در حین عملیات به ثبت برساند. نتایج آزمایشات نشان داد برای هر مولفه، یک مقدار بهینه وجود دارد که حداقل مقدار انرژی ویژه را تولید می‌کند [۶۷].

لوکن و همکاران یک سکو دکل آزمایشگاهی^۴ شامل سامانه‌های بالابری، چرخش رشته و گردش سیال را توسعه دادند تا با کمک روش‌های یادگیری ماشین،

به طور خلاصه نسبت انرژی ویژه مکانیکی به قدرت حفاری برای حفاری کارآمد در شرایط عادی بین ۱ تا ۱/۵ است و در صورت ناکارآمدی شدید در حفاری می‌تواند به بالای ۵ نیز برسد. افزایش مقدار یاد شده می‌تواند وجود ارتعاشات را نشان دهد، در حالی که کاهش آن بسته به رفتار استحکام سنگ می‌تواند نشان‌دهنده توپی شدن مته یا سایش مته باشد.

با توجه به پرهیزناپذیر بودن برخی مشکلات حفاری همچون ارتعاش لوله حفاری، برخی محققین کوشش کردند اثر آن را همچون هیدرولیک در رابطه کلی انرژی ویژه مکانیکی در نظر بگیرند. گوش و همکاران با کم کردن یک عبارت از انرژی ویژه مکانیکی، انرژی هدر رفته ناشی از ارتعاش را در این معیار بهینه سازی لحاظ کردند [۳]. بدین ترتیب برخی بهینه‌سازی‌های بعدی شامل در نظر گرفتن اثر ارتعاش لوله حفاری نیز شد [۳۳]. به شیوه مشابه، شورو رابطه جدید معرفی کرد که اثر اتساع پذیری^۱ برشی و تغییرات ساز و کار شکست را نیز در نظر گرفت [۶۵]. تیموری و همکاران [۶۶] نشان دادند در شرایط حفاری کارآمد، مقاومت تک محوره سنگ، نسبت پواسون و عمق با انرژی ویژه سنگ همبستگی دارند.

سیستم‌های اندازه‌گیری مبتنی بر انرژی ویژه مکانیکی

تاکنون ارزیابی‌های آزمایشگاهی روی رابطه تحلیلی انرژی ویژه مکانیکی بسیار محدود بوده است. بیشتر محققین داده‌های واقعی حفاری را برای ارزیابی انرژی ویژه مکانیکی استفاده کرده‌اند. حال آن‌که این داده‌ها از نظر عددی در گستره کوچک و مشخصی قرار می‌گیرند. برای مثال، افزایش یا کاهش مولفه‌های حفاری همچون وزن روی مته و سرعت دورانی از دامنه عملیاتی دکل حفاری ممکن نیست، اما می‌تواند به فهم بهتر و ارزیابی دقیق تر رابطه انرژی ویژه مکانیکی کمک کند. در این زمینه، دستگاه‌هایی که برای بررسی آزمایشگاهی نرخ نفوذ

1. Dilatancy
2. Motor Stall
3. Penetration per Revolution
4. Laboratory Rig Platform

کوچک بر وزن روی مته و سرعت چرخش، و سپس جمع‌آوری داده متکی است [۵۴].

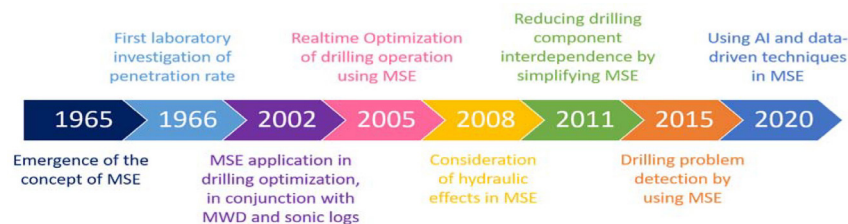
جدول ۳ خلاصه‌ای از پژوهش‌های آزمایشگاهی همراه مولفه‌های در نظر گرفته شده و هدف طراحی آن‌ها را نشان می‌دهد.

شکل ۴ خلاصه‌ای از خط زمانی پیشرفت مطالعات انرژی ویژه مکانیکی را نشان می‌دهد. به جز مطالعاتی که کاربرد و مطالعه موردی بهینه‌سازی MSE بوده است، مابقی مطالعات که منجر به پیشرفت در مفاهیم و مبانی انرژی ویژه مکانیکی بوده است در این نمودار به تصویر کشیده شده است.

سازند ساختگی را تشخیص دهند [۴۷]. در کاری مشابه لوسویا و همکاران از یک دستگاه آزمایشگاهی مجهز به حسگرهای درون و بیرون حفره برای تشخیص آنی سازند استفاده کردند [۴۹]. نیستاد از یک الگوریتم تطبیقی بدون مدل^۱ به نام بیشینه یاب^۲ برای بهینه‌سازی آنی وزن روی مته و سرعت چرخش در دستگاه دکل آزمایشگاهی استفاده کرد. دستگاهی با یک چارچوب فولادی با موتورهای یکپارچه، حسگرها، سیستم گردش هیدرولیک و سایر عملکردهای مورد نیاز حفاری مورد استفاده قرار گرفت. نیستاد روشی مبتنی بر داده^۳ را انتخاب کرد که روش کار در آن انجام مداوم آزمایش‌های

جدول ۳ پژوهش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری نرخ نفوذ.
Table 3 Laboratory studies measuring the rate of penetration.

Author	Setup	Capabilities	Input Parameters	Output Parameters	Goal
Reddish and Yasar [25]	a hand-held drill fitted with a masonry bit	Hand Drilling and Stand-Mounted Drilling	WOB, RPM •Electrical Voltage	ROP, Electrical Current	Obtaining maximum drilling speed
Hamrick[67]	Northco Drill Bench	Drilling with constant vertical and rotational speed	ROP/RPM •RPM• Bit Diameter •Air Flow	Torque •WOB	Simplification and reduction of component interdependencies
Løken et.al. [47]	Laboratory Drilling Rig	Hoisting Systems, Top Drive, Drilling Fluid, Bottomhole Sensors	RPM •WOB• Torque, Drilling Fluid Flow, Drilling Fluid Pressure	ROP	Formation detection by ML Methods
Losoya et. al. [49]	Laboratory Scale Drilling Rig	Hoisting Systems, Top Drive, Drilling Fluid, Bottomhole Sensors	WOB •RPM	ROP	Realtime formation detection
Nystad [54]	Laboratory Rig by SPE	Hoisting Systems, Top Drive, Drilling Fluid, Bottomhole Sensors	WOB •RPM	ROP	WOB and RPM Optimization for ROP Maximum Seeking



شکل ۴ خط زمانی پیشرفت مطالعات انرژی ویژه مکانیکی.

Fig. 4 Timeline of the development of mechanical specific energy studies.

1. Adaptive Model-Free Algorithm
2. Extremum Seeking (ES)
3. Data-Driven

چالش‌ها و دشواری‌های استفاده از انرژی ویژه حفاری و راه‌کارهای آن

در این بخش، چالش‌های اصلی در کاربرد انرژی ویژه مکانیکی (MSE) برای بهینه‌سازی حفاری استنباط و راهکارهای پیشنهادی برای غلبه بر آن‌ها مورد بحث قرار می‌گیرند:

دقت و قابلیت اطمینان داده‌های اندازه‌گیری شده

داده‌های مورد نیاز برای محاسبه MSE از سنسورهای مختلف در سطح و عمق چاه جمع‌آوری می‌شوند و مستعد خطا هستند. این داده‌ها می‌توانند تحت تأثیر نویز، خطاهای کالیبراسیون و شرایط سخت محیطی قرار بگیرند که منجر به محاسبات نادرست MSE می‌شود. به ویژه، استفاده از داده‌های سطحی برای محاسبه MSE، به دلیل نیاز به ضریب بازدهی نامشخص [۹، ۱۰، ۱۹ و ۲۰] دقت را کاهش می‌دهد. تاخیر در انتقال داده‌های عمقی نیز سبب می‌شود تصمیمات بر اساس داده‌های قدیمی گرفته شوند. **راه‌کار:** برای تبدیل مولفه‌های سطحی به عمقی، لازم است رابطه انرژی ویژه مکانیکی به گونه‌ای بازنویسی گردد که کمترین وابستگی به مولفه‌های درون چاهی را داشته باشد. در این بین پرچالش‌ترین مولفه گشتاور مته است. یکی از راه‌کارهای خوب بدین منظور استفاده از بازنویسی پیشنهادی بلاینه و

$$Torque = \frac{\mu \cdot \cos(\arctan(\frac{ROP}{R_b \cdot RPM})) \cdot R_b \cdot WOB}{18} \quad (10)$$

$$MSE = \frac{WOB}{A_b} + \frac{RPM \cdot \mu \cdot \cos(\arctan(\frac{ROP}{R_b \cdot RPM})) \cdot WOB}{9ROP \cdot R_b} \quad (11)$$

بدین ترتیب با لحاظه کردن ضریب اصطکاک مته و سنگ (μ) می‌توان پارامتر درون چاهی گشتاور را حذف کرد. همچنین با تجهیز سیستم حفاری به سنسورهای دقیق درون چاهی با طول عمر بالا، پیاده‌سازی سیستم‌های کالیبراسیون منظم و خودکار سنسورها، الگوریتم‌های پیشرفته حذف نویز و پردازش سیگنال و بهبود زیرساخت‌های ارتباطی برای انتقال سریع داده‌ها، این مولفه‌ها را می‌توان

با روش‌های ریاضی از داده‌های بی‌درنگ حین حفاری به‌دست آورد.

تفسیر داده‌های MSE در شرایط پیچیده حفاری

تغییرات ناگهانی لیتولوژی، وجود شکستگی‌ها، ناپایداری‌های چاه و مشکلات مکانیکی، الگوهای MSE را پیچیده کرده و تفسیر آن‌ها را دشوار می‌سازند. تشخیص اینکه آیا تغییر در MSE ناشی از تغییر خواص سنگ است یا یک مشکل عملیاتی، چالش‌برانگیز است. علاوه بر این، مدل‌های ساده MSE ممکن است قادر به در نظر گرفتن تمام عوامل پیچیده در حین حفاری نباشند.

راه‌کار: استفاده از روش‌های بصری‌سازی داده‌ها برای کمک به مهندسان در تفسیر آسان‌تر داده‌های MSE، یکپارچه‌سازی مولفه‌های قبلی با داده‌های خواص سنگ، زمین‌شناسی و ژئوفیزیک و نهایتاً استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای شناسایی الگوهای پیچیده در داده‌های MSE و تشخیص شرایط مختلف حفاری پیشنهاد می‌شود.

یکپارچه‌سازی MSE با سایر پارامترها و سیستم‌ها

بهینه‌سازی حفاری تنها به MSE محدود نمی‌شود و عوامل دیگری مانند پایداری چاه، پاکسازی ته چاه، جلوگیری از فوران چاه و عمر مته نیز اهمیت دارند. یکپارچه‌سازی داده‌های MSE با سایر اطلاعات حفاری و سیستم‌های کنترلی می‌تواند پیچیده باشد و عدم وجود یک پلتفرم یکپارچه برای جمع‌آوری، تحلیل و استفاده از داده‌های مختلف حفاری، از جمله MSE، می‌تواند مانع از بهینه‌سازی موثر شود.

راه‌کار: توسعه سکوها^۱ نرم‌افزاری یکپارچه که تمام داده‌های حفاری، از جمله MSE، را جمع‌آوری، تحلیل و در یک رابط کاربری بصری و کاربرپسند نمایش می‌دهند. به علاوه، ایجاد سیستم‌های کنترل حلقه بسته که به‌طور خودکار پارامترهای حفاری را بر اساس داده‌های MSE و سایر محدودیت‌ها تنظیم می‌کنند.

عدم کشف فضای مولفه‌های بهینه

MSE معیاری برای بهینه‌سازی نسبی نرخ نفوذ است و نمی‌تواند به تنهایی بهترین نرخ نفوذ بالقوه را ارائه دهد. این محدودیت ناشی از آن است که MSE یک معیار تجربی است و به فضای پارامترهای حفاری محدود می‌شود که داده‌ها در آن جمع‌آوری شده‌اند. اگر بهترین شرایط حفاری در خارج از این فضای پارامترها قرار داشته باشد (به عنوان مثال، ترکیبی از وزن روی مته و سرعت دورانی که قبلاً آزمایش نشده است)، روش MSE به تنهایی قادر به شناسایی آن نخواهد بود.

راه‌کار: راه اول ساده‌سازی رابطه و تحلیل نقاط بحرانی انرژی ویژه مکانیکی برای کاهش ابعاد مساله است. هم‌ریک این کار را با کاهش وابستگی مولفه‌های وابسته به یکدیگر و مستقل سازی آن‌ها انجام داد. او با آزمایشاتی مولفه‌های گشتاور و نفوذ بر چرخش را به توابعی خطی و غیر خطی از وزن روی مته تبدیل کرد و بدین ترتیب برای هر انرژی ویژه مکانیکی لازم، وزن مورد نیاز روی مته و سپس سایر مولفه‌ها را پیدا کرد. روش‌های دیگر می‌تواند شامل رویکرد آماری طراحی آزمایش^۱ DOE، بهینه سازی الگوریتمی (نظیر الگوریتم‌های ژنتیک، الگوریتم‌های تبرید شبیه‌سازی شده^۲، و روش‌های مبتنی بر گرادیان^۳) باشد. این الگوریتم‌ها می‌توانند شرایط جدیدی را پیشنهاد دهند که قبلاً آزمایش نشده‌اند. یادگیری تقویتی^۴ نیز یک شاخه از یادگیری ماشین است که در آن یک عامل (پارامتر) با تعامل با محیط (فرآیند حفاری) یاد می‌گیرد که چگونه تصمیماتی بگیرد که پاداش (در اینجا، کاهش MSE یا افزایش ROP) را به حداکثر برساند. این روش می‌تواند به طور مداوم از داده‌های حفاری بلادرنگ یاد بگیرد و شرایط حفاری بهینه را به صورت پویا تنظیم کند و حتی شرایط جدید و بالقوه بهینه را کشف کند. شبیه‌سازی فرآیند حفاری^۵ روش دیگری است که می‌تواند برای پیش‌بینی عملکرد حفاری (از جمله MSE) تحت شرایط مختلف پارامترهای حفاری

استفاده شود. این مدل‌ها می‌توانند به جستجوی مجازی فضای پارامترها تشخیص شرایط بالقوه بهینه کمک کند.

تقریب ساده انگارانه و تصویر نادقیق انرژی ویژه حفاری

دشواری دیگر نحوه تخمین انرژی ویژه مکانیکی از مقاومت تراکمی است. این نکته از دو دیدگاه قابل بررسی است. اول، مقاومت تراکمی محدود نشده که معمولاً در دسترس است، نمی‌تواند بیانگر مقاومت سنگ در شرایط تحت تنش و فشار منفذی در عمق باشد. وجود تنش‌های جانبی می‌تواند مقاومت سنگ را به طور قابل توجهی افزایش دهد (مطابق با معیار شکست مور-کولمب و سایر معیارهای شکست سه‌محوره). بنابراین، MSE مورد نیاز برای حفاری سنگ در شرایط تنش سه‌محوره با MSE تخمین زده شده از UCS تفاوت زیادی خواهد داشت. از طرفی مقاومت تراکمی محدود شده از اعمال روابط تجربی بر نمودارهای پتروفیزیکی پیچیده و پرهزینه به دست می‌آید و برای همه عمق‌ها در دسترس نیست. دوم، به دلایلی که در ادامه ارائه می‌شود به نظر می‌رسد به طور کلی مقاومت تراکمی تخمین دقیقی از انرژی ویژه مکانیکی ذاتی سنگ نیست. رابطه انرژی ویژه مکانیکی شامل یک بخش انرژی عمودی (اول) و یک بخش انرژی پیچشی (دوم) است. با توجه به نظریات یاد شده، بهترین نرخ نفوذ در کمینه انرژی ویژه حفاری رخ می‌دهد. چنانچه در حالت ایده آل، نرخ نفوذ بی‌نهایت فرض شود انرژی چرخشی (بخش دوم) صفر خواهد شد و انرژی ویژه مکانیکی برابر بخش اول رابطه می‌گردد که از نظر تئوری برابر تنش عمودی است و برابر مقاومت تراکمی محدود نشده است:

$$MSE = \frac{WOB}{A_B} + \frac{120\pi.RPM.Torque}{A_B.ROP} = \frac{WOB}{A_B} = UCS \quad (12)$$

شایان ذکر است بر اساس مشاهدات عملی حفاری،

1. Design of Experiments
2. Simulated Annealing
3. Gradient Descent
4. Reinforcement Learning
5. Drilling Process Simulation

یک دستگاه آزمایشگاهی باشد. به گونه‌ای که نمونه سنگ در دستگاه حفاری تحت مولفه‌های مختلف حفاری قرار بگیرد و MSE مدل‌سازی شود. ساز و کار پیشنهادی این اندازه‌گیری می‌تواند محاسبه توان الکتریکی یا مکانیکی مصرف شده در حفر هر نمونه باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود با انجام چندین آزمایش و سپس برازش داده‌های به‌دست آمده، ضریب اصطکاک بین هر نمونه سنگ و مته تعیین شود تا انرژی ویژه مکانیکی ذاتی هر سنگ به‌دست آید.

تاثیر عملی هیدرولیک در انرژی ویژه مکانیکی

سال‌هاست محققینی همچون آرمنتا و موهان به نقش مهم سیال حفاری در انرژی ویژه مکانیکی اشاره داشته‌اند، و علی‌رغم آن که در صنعت پذیرفته شده است که سیال حفاری با توانایی حمل‌کننده‌ها و نیروی پسا ناشی از نازل‌ها سهم قابل توجهی در اعمال انرژی ایفا می‌کند، آخرین چالش را می‌توان عدم استفاده فراگیر از نقش سیالات و انرژی ناشی از آن دانست. اندازه‌گیری دقیق مولفه‌های حفاری، تنوع شرایط مختلف هیدرولیکی و پیچیدگی مدل‌سازی سبب نادیده گرفته شدن مولفه‌های هیدرولیکی شده است. از دیگر دلایل عدم فراگیری کاربرد انرژی ویژه حفاری به جای انرژی ویژه مکانیکی را می‌توان به محدودیت کنترل مولفه‌های سیالاتی دانست. به بیان دیگر بسیاری از پارامترهای هیدرولیکی توسط عوامل محیطی به سیستم اجبار می‌شود. دلیل دیگر را نیز می‌توان به مغالطه بیان شده توسط برخی پژوهشگران در رابطه با انرژی هیدرومکانیکی مرتبط دانست. بر اساس این نظر، اگر فرض کنیم مته از کف چاه بلند شود و حفاری متوقف شود و تنها سیال از نازل‌های مته خارج شود، انرژی ویژه حفاری عددی منفی می‌شود که غیر منطقی است. راه‌کار: بهبود روش‌ها و تجهیزات اندازه‌گیری

عمدتاً سهم انرژی عمودی کمتر از ۲٪ از کل انرژی است و بیشترین سهم را جمله دوم ایفا می‌کند [۶۸]. در آزمایش مقاومت تراکمی محدود نشده یک نیرو به تمام سطح نمونه آزمایش وارد می‌شود که منجر به شکستن آن می‌شود. اما پرسش آن است که در عمل وارد کردن همین مقدار نیرو توسط یک سطح محدود (مثل سطح مقطع مته) به توده سنگ دست نخورده - صرف نظر از فشار حادی - منجر به گسیختگی سنگ می‌شود؟ افزون بر این، در شرایط واقعی یعنی یک حفاری پیوسته، برای حمل قطعات شکسته شده سنگ به بیرون از حفره و تمیزسازی چاه باید کنده‌ها به اندازه کافی خرد شده باشند که خود منجر به مصرف انرژی بیشتری می‌گردد و ادعای قبلی را تقویت می‌کند. ساموئل و همکاران نیز در آخرین پژوهش خود با منطقی مشابه بر این مشکل صحنه گذاشتند که تعیین مقاومت سنگ از روی انرژی ویژه مکانیکی فاقد پشتوانه علمی مناسب است [۶۹].

راه‌کار: آزمایش‌های برش مستقیم^۱ و خردایش^۲ می‌توانند ساز و کار خردایش سنگ توسط مته را بهتر شبیه‌سازی کنند. آزمایش برش مستقیم می‌تواند مقاومت برشی سنگ را اندازه‌گیری کند که در فرآیند برش توسط مته نقش مهمی دارد. آزمایش‌های خردایش، انرژی مورد نیاز برای شکستن سنگ به قطعات ریز را ارزیابی می‌کنند. روش دیگر تخمین MSE از داده‌های بی‌درنگ حفاری و همچنین نگاره‌های مختلف چاه است. این روش شرایط واقعی حفاری را در نظر می‌گیرد و می‌تواند تغییرات MSE را در طول زمان نشان دهد. البته لازمه آن به کیفیت و کالیبراسیون سنسورها و همچنین مدل‌های مورد استفاده برای محاسبه MSE بستگی دارد. همچنین، این روش یک تخمین پس از وقوع است و نمی‌تواند به طور مستقیم برای پیش‌بینی MSE قبل از حفاری استفاده شود. روش کامل‌تر می‌تواند مدلسازی انرژی ویژه حفاری در

1. Direct Shear Test
2. Crushability Test

تنهایی کافی نیست و عدم وجود بستر یکپارچه برای تلفیق آن با سیستم‌های پایداری چاه، هیدرولیک و کنترل فوران، مانع بهینه‌سازی جامع می‌شود.

۴- محدودیت در کشف فضای بهینه: ماهیت تجربی MSE باعث می‌شود که این معیار نتواند به طور تحلیلی، شرایط بالقوه کاملاً بهینه (خارج از فضای داده‌های جمع‌آوری شده) را شناسایی کند.

۵- تخمین ساده‌انگارانه و نادرست: مقایسه MSE با مقاومت تراکمی تک‌محوره (UCS) یا حتی محصور شده (CCS)، در شرایط واقعی حفاری فاقد دقت لازم است و سهم انرژی چرخشی را نادیده می‌گیرد.

۶- نادیده گرفتن نقش سیالات: علی‌رغم توسعه مدل‌هایی مانند HMSE بخش عمده‌ای از مطالعات و کاربردهای میدانی همچنان اثر هیدرولیک را در تحلیل انرژی ویژه نادیده می‌گیرند.

برای برون‌رفت از این چالش‌ها، راه‌کارهای ساختاری و روش‌شناختی زیر پیشنهاد می‌گردد:

- بهبود دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها: استفاده از روابط توسعه یافته مبتنی بر مولفه‌های مستقل (مانند حذف گشتاور با استفاده از ضریب اصطکاک سنگ-مته) برای کاهش وابستگی به داده‌های درون چاهی نامطمئن، و تجهیز دکل‌ها به حسگرهای دقیق، الگوریتم‌های حذف نویز و بهبود زیرساخت‌های انتقال داده.

- تفسیرپذیری پیشرفته: به کارگیری روش‌های بصری‌سازی پیشرفته، یکپارچه‌سازی MSE با داده‌های ژئومکانیکی (شامل CCS) و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی الگوهای پیچیده و تفکیک علل تغییرات

- توسعه بستر یکپارچه: توسعه سکوها نرم‌افزاری جامع و سیستم‌های کنترل حلقه‌بسته برای تنظیم خودکار پارامترهای حفاری بر اساس داده‌های همزمان MSE و سایر محدودیت‌های عملیاتی.

۴- کشف فضای بهینه: کاهش ابعاد مسئله از طریق ساده‌سازی تحلیلی روابط MSE، و به‌کارگیری

مولفه‌های هیدرولیکی، توسعه مدل‌های جامع‌تر تعامل سیال-سنگ-مته و روش‌های محاسباتی دقیق‌تر همچون دینامیک سیالات محاسباتی از جمله پیشنهادات برون‌رفت از این مشکلات است. همچنین در کنار بهینه‌سازی حفاری که در اینجا با معیار MSE صورت می‌پذیرد، انجام شبیه‌سازی پویا و اعمال محدودیت‌های مختلف در قالب پنجره^۱ نیز می‌تواند در بهینه‌سازی تاثیر گذار باشد. در مورد مغالطات علمی در حوزه هیدرومکانیک نیز اخیراً ساموئل و همکاران اینگونه به این مغالطه پاسخ داده‌اند که وجود وزن روی مته ضروری‌ترین عنصر برای عملیات حفاری است. در حفاری زمانی که شروع به وزن افزایشی می‌شود سهم جمله اول حدود ۱٪ و سهم جمله سوم (عبارت منفی) حدود ۷٪ است [۶۸].

نتیجه‌گیری

انرژی ویژه مکانیکی (MSE) به عنوان یک معیار نظری با پشتوانه علمی قوی، ابزاری اساسی برای بهینه‌سازی و تشخیص ناکارآمدی عملیات حفاری است. با وجود برتری‌های متعدد نسبت به روش‌های سنتی، کاربرد MSE در شرایط میدانی با چالش‌های اساسی مواجه است که ناشی از پیچیدگی محیط چاه و محدودیت‌های ذاتی مدل‌های اولیه است. این مقاله مروری تلاش کرد تا مروری جامع بر پیشینه تحقیقات و چالش‌های کلیدی کاربرد MSE ارائه دهد:

۱- دقت و قابلیت اطمینان پایین داده‌ها: اتکای به داده‌های سطحی یا سنسورهای درون چاهی مستعد خطا، منجر به عدم قطعیت در محاسبه MSE و ضریب بازدهی می‌شود.

۲- تفسیر دشوار داده‌ها در شرایط پیچیده: تداخل بین تغییر خواص سنگ و مشکلات عملیاتی (مانند سایش یا تویی شدن مته)، تفکیک علل افزایش MSE را مشکل می‌سازد.

۳- مشکلات یکپارچه‌سازی سیستمی: MSE به

• گنجانیدن مؤلفه‌های هیدرولیکی: وارد کردن مؤلفه‌های هیدرولیکی در تحلیل (استفاده از HMSE یا DSE و توسعه مدل‌های جامع‌تر تعامل سیال-سنگ-مته و روش‌های محاسباتی دقیق‌تر همچون دینامیک سیالات محاسباتی).
این بررسی جامع با نقد پیشینه پژوهش، ضمن تأیید کارایی MSE، بر لزوم پذیرش مدل‌های تکامل‌یافته آن تأکید می‌کند تا به عنوان یک ابزار تشخیصی و کنترلی، به طور مؤثر در بهینه‌سازی حفاری عمیق و پیچیده به کار رود.

روش‌های هوشمند مانند طراحی آزمایش (DOE)، بهینه‌سازی الگوریتمی و یادگیری تقویتی برای جستجوی فضای پارامترهای ناشناخته و دستیابی به بهینه مطلق.
• مدل‌سازی دقیق‌تر: استفاده از روش‌های آزمایشگاهی مشابه عملیات حفاری (مانند آزمایش برش مستقیم و خردایش) و شبیه‌سازی‌های فیزیکی برای تعیین MSE ذاتی سنگ به‌جای تخمین غیردقیق از UCS

علائم و نشانه‌ها

مفهوم	اختصار	علامت اختصاری
سطح مقطع متنه	Bit Area	A_B
مقاومت تراکمی محدود شده	Confined Compressive Strength	CCS
جداره رانی حین حفاری	Casing While Drilling	CWD
افت فشار در متنه	Bit Pressure Difference	ΔP_B
عمق برش	Depth of Cut	DOC
قدرت حفاری	Drill Strength	DS
انرژی ویژه حفاری	Drilling Specific Energy	DSE
بازدهی مکانیکی	Mechanical Efficiency	Eff_m
حفاری افقی طولانی	Extended Rich Drilling	ERD
پیشینه یاب	Extremum Seeking	ES
فاکتور ساختگی برای کاهش انرژی	dummy factor for energy reduction	η
زاویه اصطکاک سازند (درجه)	Friction angle of the formation($^{\circ}$)	ϕ
نقطه بینانگذار	Founder Point	FP
توان هیدرولیکی متنه به اسب بخار	Bit Hydraulic Horsepower	HHP_B
انرژی ویژه هیدرومکانیکی	Hydro-Mechanical Specific Energy	HMSE
ضریب هیدرولیکی متنه	Bit Hydraulic Factor	λ
ضریب زاویه اصطکاک سنگ	The coefficient of friction angle of the rock,	m
ضریب اصطکاک	Friction Coefficient	μ
انرژی ویژه مکانیکی	Mechanical Specific Energy	MSE
انرژی ویژه مکانیکی واقعی	Actual Mechanical Specific Energy	MSE_{act}
انرژی ویژه مکانیکی ذاتی	Intrinsic Mechanical Specific Energy	MSE_i
انرژی ویژه مکانیکی حداقل	Minimum Mechanical Specific Energy	MSE_m
انرژی ویژه مکانیکی حداقل اندازه‌گیری شده تحت فشار اتمسفری	Minimum Mechanical Specific Energy under atmospheric condition	MSE_0

MWD	Measure While Drilling	اندازه گیری حین حفاری
NPT	Non-Productive Time	زمان غیر تولیدی
P_m	Confined Pressure (psi)	فشار حدی (پوند بر اینچ مربع)
ψ	Friction angle of cutting face/failed rock interface	زاویه اصطکاک سطح سنگ برش خورده/ شکسته
Q	Bit Nozzles Flow Rate, Gallon per Minute	دبی نازل‌های مته، گالن بر دقیقه
R_b	Bit Radius	شعاع مته
ROP	Rate of Penetration	نرخ نفوذ
RPM	Revolution per Minute	سرعت چرخش
TOB	Torque on Bit	گشتاور روی مته
θ	rake angle	زاویه چنگک تیغه مته
UCS	Unconfined Compressive Strength	مقاومت تراکمی محدود نشده
WOB	Weight on Bot	وزن روی مته

مراجع

- [1]. Koederitz, W. L., & Johnson, W. E. (2011, March). Real-time optimization of drilling parameters by autonomous empirical methods. In SPE/IADC drilling conference and exhibition. SPE-139849. doi.org/10.2118/139849-MS.
- [2]. Belayneh, M. (2019). New alternative MSE based ROP Modelling and Analysis with North Sea field Data. International Journal of Engineering Research and Technology, . 12(10): 1696-1700.
- [3]. Ghosh, R., Schunnesson, H., & Kumar, U. (2015). The use of specific energy in rotary drilling: the effect of operational parameters. In 37th International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 2015) Fairbanks, Alaska, USA, May 23-27, 2015 (pp. 713-723). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- [4]. Chen, X., Fan, H., Guo, B., Gao, D., Wei, H., & Ye, Z. (2014). Real-time prediction and optimization of drilling performance based on a new mechanical specific energy model. Arabian Journal for Science and Engineering, 39(11), 8221-8231.
- [5]. Schunnesson, H. (1998). Rock characterisation using percussive drilling. International journal of rock mechanics and mining sciences, 35(6), 711-725. doi.org/10.1016/S0148-9062(97)00332-X.
- [6]. Abbott, A. (2015, September). The MSE ratio: the new diagnostic tool to optimize drilling performance in real-time for under-reaming operations. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (p. D023S099R001). SPE. doi.org/10.2118/178724-STU.
- [7]. Rabia, H. (1985). Specific energy as a criterion for bit selection. Journal of petroleum technology, 37(07), 1225-1229. doi.org/10.2118/12355-PA.
- [8]. Ersoy, A. (2003). Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits. Mining Technology, 112(2), 86-96. doi.org/10.1179/0371784032250016.
- [9]. Dupriest, F. E., & Koederitz, W. L. (2005, February). Maximizing drill rates with real-time surveillance of mechanical specific energy. In SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition (pp. SPE-92194). SPE. doi.org/10.2118/92194-MS.
- [10]. Amadi, K., & Iyalla, I. (2012, June). Application of mechanical specific energy techniques in reducing drilling cost in deepwater development. In SPE deepwater drilling and completions conference (pp. SPE-156370). SPE. doi.org/10.2118/156370-MS.
- [11]. Dupriest, F. E., Witt, J. W., & Remmert, S. M. (2005, November). Maximizing ROP with real-time analysis of digital data and MSE. In International petroleum technology conference (pp. IPTC-10607). IPTC. doi.org/10.2523/IPTC-10607-MS.
- [12]. Onderková, I., & Cholevová, I. (2014). Excavation process control with using modern methods in the case of giant machines. Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie.
- [13]. Kaiser, M. J. (2007). A survey of drilling cost and complexity estimation models. International Journal of

Petroleum Science and Technology, 1(1), 1-22.

[14]. El-Biblawi, M. M., Sayed, M. A., Mohamed, M. T., & El-Rawy, W. R. (2007). Some drilling parameters as a tool to predict different categories of rocks. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 35(4), 995-1008.

[15]. Teale, R. (1965, March). The concept of specific energy in rock drilling. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 2, No. 1, pp. 57-73). Pergamon. doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7.

[16]. Pessier, R. C., & Fear, M. J. (1992, October). Quantifying common drilling problems with mechanical specific energy and a bit-specific coefficient of sliding friction. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (pp. SPE-24584). Spe. doi.org/10.2118/24584-MS.

[17]. Huang, H., & Detournay, E. (2008). Intrinsic length scales in tool-rock interaction. *International Journal of Geomechanics*, 8(1), 39-44. doi.org/10.1061/(ASCE)1532-3641(2008)8:1(39).

[18]. Alsubaih, A., Albadran, F., & Alkanaani, N. (2018, January). Mechanical specific energy and statistical techniques to maximizing the drilling rates for production section of mishrif wells in southern Iraq fields. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition* (p. D031S002R003). SPE. doi.org/10.2118/189354-MS.

[19]. Guerrero, C., *Drilling Optimization with Mechanical Specific Energy*. 2007.

[20]. Hammoutene, C., & Bits, S. (2012, February). FEA modelled MSE/UCS values optimise PDC design for entire hole section. In *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition* (pp. SPE-149372). SPE. doi.org/10.2118/149372-MS.

[21]. Chen, X., Yang, J., & Gao, D. (2018). Drilling performance optimization based on mechanical specific energy technologies. *Drilling*, 1(1), 133-162.

[22]. Yavari, H., Fazaelizadeh, M., Khosravian, R., Hasani, V. (2016). Using neural networks and mechanical specific energy to correct the existing error in the Drill-off Test. *Second National Conference on Petroleum Geomechanics*.

[23]. Dupriest, F., Lai, S., Behounek, M., Pastusek, P., Cutts, C., Best, B., Cook, B., Bassarath, W., Collins, J., Kamyab, M. and Moore, D., (2023). Standardization of mechanical specific energy equations and nomenclature. *SPE Drilling & Completion*, 38(01), pp.73-89. doi.org/10.2118/208777-PA.

[24]. Zoback, M. D. (2010). *Reservoir geomechanics*. Cambridge university press.

[25]. Reddish, D. J., & Yasar, E. (1996, July). A new portable rock strength index test based on specific energy of drilling. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 33, No. 5, pp. 543-548). Pergamon. doi.org/10.1016/0148-9062(95)00083-6.

[26]. Pinto, C. N., & Lima, A. L. (2016, August). Mechanical specific energy for drilling optimization in deepwater Brazilian salt environments. In *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition?* (p. D011S005R003). SPE. doi.org/10.2118/180646-MS.

[27]. Detournay, E., & Tan, C. P. (2002, October). Dependence of drilling specific energy on bottom-hole pressure in shales. In *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference* (pp. SPE-78221). SPE. doi.org/10.2118/78221-MS.

[28]. Martinez, I., et al. *Numerical Simulation of Drill Bit Rock Interaction*. in Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. 2011.

[29]. Armenta, M. (2008, September). Identifying inefficient drilling conditions using drilling-specific energy. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (pp. SPE-116667). SPE. doi.org/10.2118/116667-MS.

[30]. Yi, P., Kumar, A., & Samuel, R. (2015). Realtime rate of penetration optimization using the shuffled frog leaping algorithm. *Journal of Energy Resources Technology*, 137(3), 032902. doi.org/10.1115/1.4028696.

[31]. Xu, B., Meng, Z., Liu, W., Luo, X., & Chen, Y. (2023). Improving drilling efficiency and safety based on hydraulic mechanical specific energy in the framework of economic model predictive control. *SPE Journal*, 28(04), 1594-1610. doi.org/10.2118/214292-PA.

[32]. Al-Rubaii, M. M., Gajbhiye, R. N., Al-Yami, A., Haq, B., Glatz, G., & Al-Awami, M. (2020, October). An engineering approach to optimise rate of penetration through drilling specific energy. In *Offshore Technology Conference Asia* (p. D012S001R048). OTC. doi.org/10.4043/30159-MS.

[33]. Trivedi, A. S., Clarkson, C. R., & Shor, R. J. (2020, February). Accounting for hydraulics and vibration in MSE calculations to estimate formation properties. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D102S000R001). SPE. doi.org/10.2118/199672-MS.

[34]. Ramba, V., Selvaraju, S., Subbiah, S., Palanisamy, M., & Srivastava, A. (2021). Optimization of drilling parameters using improved play-back methodology. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 206, 108991. doi: 10.1016/j.petrol.2021.108991.

[35]. Hassan, A., Elkhatny, S., & Al-Majed, A. (2020). Coupling rate of penetration and mechanical specific energy to Improve the efficiency of drilling gas wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83, 103558. doi:10.1016/j.jngse.2020.103558.

- [36]. Kumar, V. (2022). New approach for prediction of specific energy using sound levels produced during core drilling operations. *Geomechanics and Geoengineering*, 17(5), 1353-1368. doi.org/10.1080/17486025.2021.1940312.
- [37]. Kolapo, P. (2021). Investigating the effects of mechanical properties of rocks on specific energy and penetration rate of borehole drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(2), 1715-1726.
- [38]. Yu, B., Zhang, K., & Niu, G. (2021). Rock strength determination based on rock drillability index and drilling specific energy: numerical simulation using discrete element method. *IEEE Access*, 9, 43923-43937.
- [39]. Bimastianto, P., AlSaadi, H., Khambete, S., Cotten, M., Couzigou, E., Al-Marzouqi, A., Chevallier, B., Qadir, A. and Pausin, W., 2021, May. Drilling efficiency benchmarking tool: developing a drilling performance measure combining data science and statistical approach. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition* (p. D032S043R001). SPE. doi.org/10.2118/202121-MS.
- [40]. IADC, IADC Drilling Manual. 2015.
- [41]. Caicedo, H. U., Calhoun, W. M., & Ewy, R. T. (2005, February). Unique ROP predictor using bit-specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling performance. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (pp. SPE-92576). SPE. doi.org/10.2118/92576-MS.
- [42]. Ma, G., Du, X., Chen, X., Hong, Y., Wang, A., & Zhang, F. (2020, October). Real-time drilling rate prediction method of reaming while drilling based on mechanical specific energy. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 570, (2): 022013. IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/570/2/022013.
- [43]. Roohi, A., Ashena, R., Thonhauser, G., Finkbeiner, T., Gerbaud, L., & Rasouli, V. (2022). An experimental investigation of drilling performance improvement using reaming while drilling. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(1), 013202. doi.org/10.1115/1.4052611.
- [44]. Abbas, N., Al Nokhatha, J., Salgado, L., Zakaria, R., Fares, W., & Aki, A. (2020, November). Using MSE and Downhole Drilling Dynamics in Achieving a New World-Class Record in an Extended-Reach Drilling Well, Offshore Abu Dhabi. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D041S115R003). SPE. doi.org/10.2118/203335-MS.
- [45]. Abkenari, M., Lajamorak, S., (2021). Drilling rate of penetration and mechanical specific energy for improving the drilling efficiency of gas wells. *Seventh International Conference on Chemical and Petroleum Engineering*.
- [46]. Hegde, C., Pyrcz, M., Millwater, H., Daigle, H., & Gray, K. (2020). Fully coupled end-to-end drilling optimization model using machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106681. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106681.
- [47]. Løken, E. A., Løkkevik, J., & Sui, D. (2020). Data-driven approaches tests on a laboratory drilling system. *Journal of petroleum exploration and production technology*, 10(7), 3043-3055.
- [48]. Asgharzadeh Shishavan, R., Adam, D., & Banirazi, R. (2020, February). Data-driven optimization of drilling parameters. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D091S011R002). SPE. doi.org/10.2118/199568-MS.
- [49]. Z. Losoya, E., Vishnumolakala, N., Noynaert, S. F., Medina-Cetina, Z., Bukkapatnam, S., & Gildin, E. (2021, June). Automatic identification of rock formation type while drilling using machine learning based data-driven models. In *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition?* (p. D011S005R001). SPE. doi.org/10.2118/201020-MS.
- [50]. Günel, B. T. Data Driven Web Based Simulation for Geothermal Heat Pump Drilling Around Saxony, Germany.
- [51]. Al Hamlawi, I. T., Creegan, A., Baptista, L. R., & Azizuddin, K. M. (2021, December). MSE Based Drilling Optimizer Project for Large National Drilling Contractor. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D032S234R001). SPE. Al Hamlawi, I. T., Creegan, A., Baptista, L. R., & Azizuddin, K. M. (2021, December). MSE Based Drilling Optimizer Project for Large National Drilling Contractor. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D032S234R001). SPE. doi.org/10.2118/207736-MS.
- [52]. Blikra, H. (2021). Detection of NPT and Drilling Events on the NCS from Depth-based Drilling Mechanics. *uis*.
- [53]. Iftikhar Choudhry, B., Cantarelli, E., Abdulrahman Alzaabi, M., Toki, T., Al-Ali, S., Khaled AbdelKarim, I., R. Oviedo Vargas, M., Ahmed Osman, M., Torres, J., Kadoura, O. and Alfonso Mendez, F., (2019), November. Use of Advanced Drilling Engineering to Define the Correlation Between ROP, MSE and Formation Properties in the Crest of a Giant Offshore Field in Abu Dhabi. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference* (p. D032S206R002). SPE. doi.org/10.2118/197373-MS.
- [54]. Nystad, M., Aadnøy, B. S., & Pavlov, A. (2021). Real-time minimization of mechanical specific energy with multivariable extremum seeking. *Energies*, 14(5), 1298. doi.org/10.3390/en14051298.
- [55]. Qin, J., Yin, S., Yang, N., Chen, X., Tian, B., Xue, L., & Ma, Y. (2022). A new mechanical specific energy

- model for composite impact drilling. *Applied Sciences*, 12(20), 10356. doi.org/10.3390/app122010356.
- [56]. Liang, H., Chen, H., Guo, J., Bai, J., & Jiang, Y. (2022). Research on lithology identification method based on mechanical specific energy principle and machine learning theory. *Expert Systems with Applications*, 189, 116142. doi:10.1016/j.eswa.2021.116142.
- [57]. Deng, S., Yang, S., Chi, Y., Lei, Y., Peng, H., Zhang, Y., Ling, D. and Wang, L., (2022). Bit optimization method for rotary impact drilling based on specific energy model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 218, p.110977. doi: 10.1016/j.petrol.2022.110977.
- [58]. Cayeux, E., Daireaux, B., Macpherson, J., Florence, F., & Solbu, E. (2023, March). Interoperability of Real-Time Drilling Signals at the Rig Site: An Example Based on Mechanical Specific Energy. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D021S014R002). SPE. doi.org/10.2118/212472-MS.
- [59]. Payette, G. S., Pais, D., Spivey, B., Wang, L., Bailey, J. R., Pastusek, P., & Owens, M. (2015, December). Mitigating drilling dysfunction using a drilling advisory system: results from recent field applications. In *International Petroleum Technology Conference* (p. D041S051R001). IPTC. doi.org/10.2523/IPTC-18333-MS.
- [60]. Logan, W. D. (2015, September). Engineered shale completions based on common drilling data. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (p. D031S041R001). SPE. doi.org/10.2118/174839-MS.
- [61]. Majidi, R., Albertin, M., & Last, N. (2017). Pore-pressure estimation by use of mechanical specific energy and drilling efficiency. *SPE Drilling & Completion*, 32(02), 097-104. doi.org/10.2118/178842-PA.
- [62]. Detournay, E. (1993). Method of determining the drilling conditions associated with the drilling of a formation with a drag bit. Google Patents.
- [63]. Menand, S., & Mills, K. (2017, April). Use of mechanical specific energy calculation in real-time to better detect vibrations and bit wear while drilling. In *AADE national technical conference and exhibition*. American Association of Drilling Engineers, Houston (Vol. 12).
- [64]. Gerbaud, L., Menand, S., & Sellami, H. (2006, February). PDC bits: All comes from the cutter/rock interaction. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (pp. SPE-98988). SPE. doi.org/10.2118/98988-MS.
- [65]. Chevreau, M. A. (2017). New formulation of mechanical specific energy (MSE) taking into account the hydraulic effects for PDC bits (Doctoral dissertation). doi.org/10.26153/tsw/2769.
- [66]. Teymouri, M., Ramezanzadeh, A., Tokhmchi, B. (2018). Estimation of rock mechanical specific energy in two drilling modes, efficient drilling and coring, in one of Iran's oil fields. *Third National Conference on Petroleum Geomechanics*.
- [67]. Hamrick, T. R. (2011). Optimization of operating parameters for minimum mechanical specific energy in drilling. West Virginia University.
- [68]. Samuel, R., & Mensa-Wilmot, G. (2023, March). Facts, Fallacies and Pitfalls of Using Mechanical Specific Energy (MSE)–Part 1. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D021S010R002). SPE. doi.org/10.2118/212508-MS.
- [69]. Mensa-Wilmot, G., & Samuel, R. (2024, February). Mechanical Specific Energy (MSE): Claims and Implications–Facts, Fallacies, and Pitfalls (Part-2). In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (p. D021S013R004). SPE. doi.org/10.2118/217727-MS.