



مدلی برای بررسی حراز کار مته‌های Drag Bits

حمید رضا شمشیری نوقابی^۱ | شرکت نفت مناطق مرکزی

چکیده

امروزه از مته‌های PDC برای انجام عملیات حفاری در بسیاری از سازندهای نرم و سخت استفاده می‌شود. با توجه به حساس بودن این مته‌ها به ضربه، باید به پارامترهای حفاری توجه خاصی داشت. هنگام حفاری، دو مکانیزم برش و اصطکاک فعال هستند. با توجه به این دو مکانیزم، گشتاور^۲ و وزن روی مته^۳ به مؤلفه‌های برشی و اصطکاک تجزیه می‌شوند. با در نظر گرفتن این مطلب که مؤلفه‌های برشی این دو نیرو با عمق برش در هر دور و مؤلفه‌های اصطکاک نیز با هم متناسب هستند، یک رابطه خطی بین انرژی داخلی (E) و شدت حفاری (S) به دست می‌آید. این دو پارامتر به ترتیب با Torque و WOB رابطه مستقیم داشته و با عمق برش در هر دور، رابطه عکس دارند. نموداری که با استفاده از این پارامترها رسم می‌شود در تفسیر وضعیت حفاری بسیار مفید بوده و به تصمیم‌گیری‌های درست در هنگام حفاری کمک می‌کند. در پایان با استفاده از داده‌های میدانی، یک نمونه از کاربرد این مدل بررسی می‌شود.

واژه‌های کلیدی | PDC Bit، Drag Bit، دیاگرام E-S، انرژی ویژه درونی، اصطکاک داخلی، انرژی ویژه، شدت حفاری، نقطه برش^۴، خط اصطکاک^۵

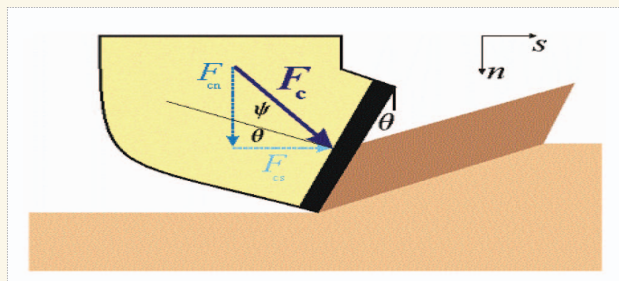
مقدمه

است، اولین بار توسط Fairhurst و Lacabanne مطرح گردید [۱]. بر طبق این تئوری، در زمان حفاری، دو مکانیزم ذیل به‌طور هم‌زمان توسط یک تیغه در حال انجام می‌باشند:

۱. عمل بریدن سنگ^۶
۲. اصطکاک تماسی در زیر مته

۱-مدلی برای تیغه تیز

یک تیغه تیز را فرض کنید که شیبی با سطح مقطع ثابت A روی سطح یک سنگ ایجاد می‌کند. در این حالت تنها نقطه تماس سنگ و تیغه، در محل نوک برنده آن می‌باشد. زاویه Back rake تیغه را θ در نظر گرفته و فرض می‌شود که تیغه با سرعت افقی معین و ثابت، بدون حرکت عمودی (عمق برش ثابت) در حال حرکت است.



۱ | نیروهای وارده بر یک تیغه تیز

در صنعت حفاری، اصطلاح Drag Bit به مته‌هایی با تیغه‌های ثابت یا تیغه‌هایی نصب شده روی سطح مته اطلاق می‌شود. قدیمی‌ترین Drag Bit ها به‌طور ساده از یک تیغه فولادی تشکیل می‌شدند و عمدتاً در سازندهای نرم کاربرد داشتند. بعدها برای بهبود مقاومت تیغه‌ها در برابر ساییدگی از مواد سخت‌تری نظیر کربید تنگستن، ترکیبات الماس و ... استفاده شد. اما افزایش چشمگیر استفاده از این مته‌ها، بعد از معرفی تیغه‌های PDC در دهه ۱۹۷۰ بود. تیغه PDC از یک لایه نازک Polly Crystalline Diamond که توسط یک لایه زیرین از جنس کربید تنگستن حمایت می‌شود، تشکیل شده است. با تغییراتی که تکنولوژی PDC در طراحی مته‌ها به‌وجود آورد، مدل‌های متنوعی از Drag Bit ها معرفی شدند. این تغییرات در شکل و چگونگی آرایش تیغه‌ها اعمال می‌شود.

در این مقاله سعی بر این است که مدل واکنش مته - سنگ برای مته PDC فرمول‌سازی شود؛ به این معنی که بین گشتاور و نرخ نفوذ مته^۷ با وزن روی مته و سرعت دورانی^۷ رابطه‌ای برقرار گردد. برای این منظور در ابتدا برای یک تیغه تنها، مدلی بررسی خواهد شد و سپس این مدل تعمیم داده می‌شود. تئوری آنالیز عمل یک تیغه که مبنای بررسی

- 1 hmdonlive@yahoo.com
- 2 Torque
- 3 Weight on Bit (WOB)
- 4 Cutting Point
- 5 Friction Line
- 6 Rate of Penetration (ROP)
- 7 Rotation Per Minute (RPM)

8 Cutting the Rock



۳- رابطه E-S

دو کمیت جدید انرژی ویژه (E) و شدت حفاری (S) به شکل ذیل تعریف می‌شوند:

$$E = \frac{F_s}{A} \quad (8)$$

$$S = \frac{F_n}{A} \quad (9)$$

هر دو کمیت E و ε یک معنی کلی دارند، اما ذکر این نکته ضروری است که صرف نظر از کند یا تند بودن تیغه، E بیانگر انرژی صرف شده برای برش حجم واحد سنگ است؛ در حالی که ε فقط هنگام برش صحیح می‌باشد. رابطه ذیل برای یک تیغه کاملاً تیز برقرار است:

$$E = \varepsilon, \quad S = \zeta \varepsilon$$

با استفاده از رابطه ۷، برای یک تیغه کند رابطه ذیل برقرار خواهد شد:

$$E = E_0 + \mu S \quad (10)$$

که

$$E_0 = (1 - \mu \zeta) \varepsilon$$

از معادله (۱۰) نتیجه می‌شود که E و S مستقل از هم نیستند.

۴- بررسی Drag Bit

با بسط دادن مدل تیغه، مدلی برای بررسی Drag Bit حاصل می‌شود. همان‌طور که گفته شد، دو فرآیند هم‌زمان برش و اصطکاک تماسی، واکنش متقابل سنگ و مته هستند. بنابراین Torque و WOB می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$T = T_c + T_f \quad (11)$$

$$W = W_c + W_f \quad (12)$$

که T_c و W_c مؤلفه‌های برشی و T_f و W_f مؤلفه‌های در ارتباط با اصطکاک هستند.

با فرض این‌که بزرگی نیروی وارده بر تیغه با سطح مقطع برش متناسب است داریم:

$$T_c = \frac{1}{2} \varepsilon \delta a^2 \quad (13)$$

$$W_c = \zeta \varepsilon \delta a \quad (14)$$

δ عمق برش^۱ در هر دور کامل است و از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$\delta = \frac{2\pi v}{\omega} \quad (15)$$

(چنانچه RPM تعداد دور در دقیقه را نشان دهد و بر حسب rad/s باشد، معادله به این صورت خواهد بود: $\delta = \frac{ROP}{RPM}$)

در این حالت نیروی F_c به سنگ اعمال می‌شود. F_{cs} و F_{cn} مؤلفه‌های افقی و عمودی این نیرو بر سطح سنگ هستند.

میانگین نیروهای عمودی و افقی وارد بر تیغه در یک مسافت نسبتاً طولانی با سطح مقطع برش متناسب است:

$$F_{cs} = \varepsilon A \quad (1)$$

$$F_{cn} = \zeta \varepsilon A \quad (2)$$

در این دو رابطه، ثابت ε انرژی ویژه درونی و نسبت نیروی عمودی به افقی وارده بر تیغه می‌باشند.

مقدار ε به عواملی از قبیل نوع سنگ، زاویه Rake تیغه، جنس تیغه، فشار در سطح سنگ و ... بستگی داشته و با تنش هم‌بعد است. نسبت ثابت بین نیروهای عمودی و افقی (ζ)، بر وجود اصطکاک در محل تماس تیغه با سنگ دلالت دارد. در شرایط ایده‌آل فرض شده است مقدار ماکزیمم این نسبت برابر است با:

$$\zeta = \tan(\theta + \psi) \quad (3)$$

که ψ زاویه اصطکاک داخلی است.

۲- مدل تیغه کند

حال تیغه‌ای را با تیغه ساییده شده در نظر بگیرید (شکل ۲).

نیروی تیغه در این حالت به دو مؤلفه برداری تقسیم می‌شود. F_c به وسیله نوک برنده تیغه اعمال شده و F_f بر سطح ساییده شده آن عمل می‌کند. مؤلفه‌های نیروی برنده F_n^c و F_s^c از روابط (۱) و (۲) پیروی می‌کنند.

مؤلفه‌های نیروی اصطکاک (F_f) که در سطح تماس سنگ و محل ساییده شده مته روی می‌دهد نیز به صورت ذیل خواهند بود:

$$F_s^f = \mu F_n^f \quad (4)$$

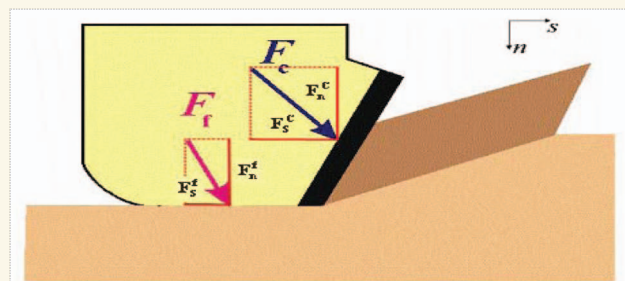
که μ ضریب اصطکاک است.

از روابط (۱)، (۲) و (۴) نتیجه می‌شود که:

$$F_n = F_n^c + F_n^f \quad (5)$$

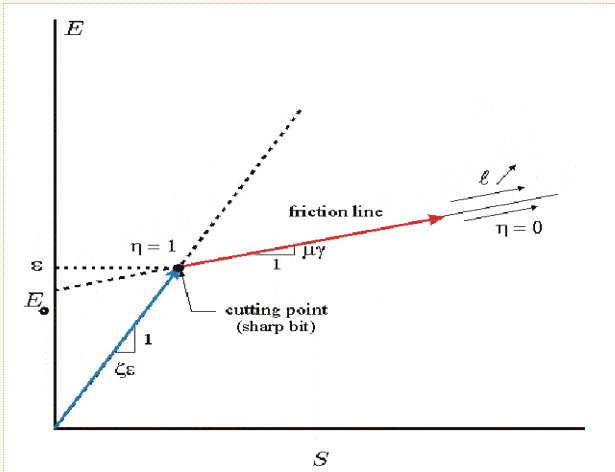
$$F_s = F_s^c + F_s^f \quad (6)$$

$$F_s = (1 - \mu \zeta) \varepsilon A + \mu F_n \quad (7)$$



شکل ۲ | نیروهای وارده بر یک تیغه کند

1 Depth of cut



۳ | دیاگرام E-S

مشاهده می‌شود که معادله واکنش مته شبیه معادله یک تیغه است به غیر از حضور ثابت مته (γ).

این مدل در شکل ۳ به صورت گرافیکی نمایش داده شده است. این شکل به عنوان دیاگرام E-S شناخته می‌شود. در این نمودار معادله ۲۱ به وسیله خطی با شیب $\mu\gamma$ مشخص شده است که محور E را در E_0 قطع می‌کند. این خط به عنوان خط اصطکاک^۱ شناخته می‌شود.

نقاطی که با مختصات (ζ_ϵ, E) در سمت راست و بالای نقطه برش قرار می‌گیرند، می‌توانند معرفی برای وضعیت حفاری مته باشند.

حرکت این نقاط در راستای خط اصطکاک و به سمت بالا، نشان‌دهنده دور شدن وضعیت حفاری از حالت بهینه به دلایلی از قبیل ساییدگی مته، تمیزسازی نامناسب، WOB کم یا زیاد و غیره می‌باشد.

نمودار E-S، با استفاده از داده‌های حفاری و فرمول‌های E و S رسم می‌شود. پارامترهای اولیه باید در سیستم SI تعریف شده باشند (WOB:N, ROP:mm/s, RPM:rad/s, Torque:N.mm, a:mm) در این صورت E و S بر حسب MPa خواهند بود.

این نمودار به همراه نمودارهای نرخ نفوذ مته بر حسب عمق^۲، وزن روی مته بر حسب عمق^۳، گشتاور بر حسب عمق^۴ و سرعت دورانی بر حسب عمق^۵، می‌توانند برای بهینه کردن شرایط حفاری مفید باشند. در ادامه یک نمونه از آنالیز داده‌های سطحی آورده شده است.

- 1 Friction Line
- 2 ROP vs. Depth
- 3 WOB vs. Depth
- 4 Torque vs. Depth
- 5 RPM vs. Depth

دو معادله ۱۴ و ۱۵ می‌توانند به این معنی باشند که یک مته PDC از لحاظ عمل برش شبیه یک تیغه عمل می‌کند. نقطه برش با استفاده از ϵ و ζ تعریف می‌شود. نتایج آزمایش‌های حفاری انجام شده به وسیله Warren و Armagost [۲] نشان می‌دهد که اندازه و تعداد تیغه‌ها و چگونگی آزمایش آن‌ها بر سطح مته، تأثیر چندانی در نتیجه کار یک مته تیز ندارد (با فرض این که تمیزسازی اطراف مته مناسب است). یعنی نقطه برش مته به طراحی آن بستگی زیادی نداشته و با نقطه برش تیغه تفاوت چندانی ندارد.

حال اگر اصطکاک در نظر گرفته شود، مؤلفه‌های عمودی و برشی نیروهای تماسی از زیر هر تیغه در T_f و W_f سهم دارند.

پارامتر γ که در ادامه معرفی می‌شود، برای به حساب آوردن جهت و توزیع نیروهای وارده به وسیله هر یک از سطوح ساییده شده به کار می‌رود:

$$\gamma = \frac{2T_f}{\mu a W_f} \quad (16)$$

ثابت γ برای وارد کردن تأثیر طراحی مته روی واکنش مکانیکی آن بوده و عمدتاً بیش‌تر از یک است.

۵- مدل واکنش مته [۳،۴]

با استفاده از معادله‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۶ داریم:

$$T_f = \frac{1}{2} a \mu \gamma W - \frac{1}{2} a^2 \mu \gamma \zeta_\epsilon \delta \quad (17)$$

با توجه به این که $T_f = T - T_c$ داریم:

$$\frac{2T}{a} = (1 - \mu \gamma \zeta_\epsilon) \epsilon \delta a + \mu \gamma W \quad (18)$$

مدل واکنش حفاری می‌تواند با استفاده از دو پارامتر E (انرژی ویژه) و S (شدت حفاری) نمایش داده شود:

$$E = \frac{2T}{a^2 \delta} \quad (19)$$

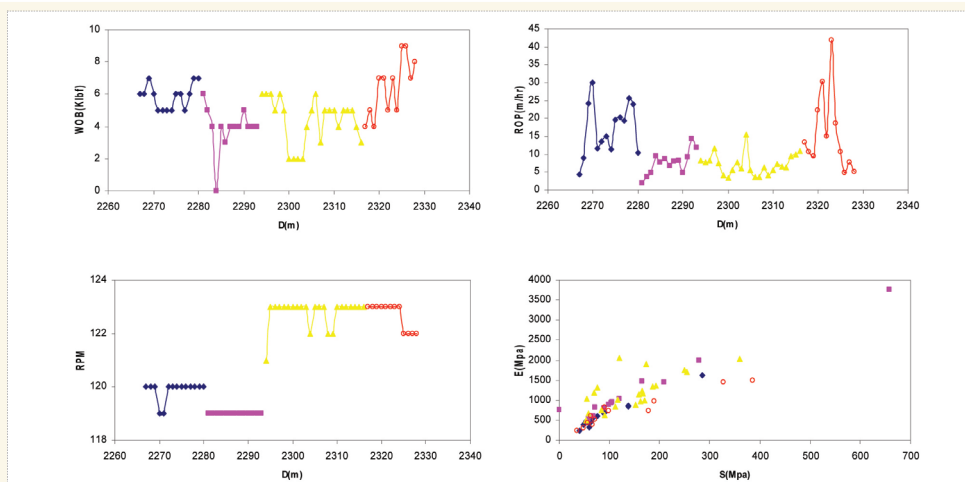
$$S = \frac{W}{a \delta} \quad (20)$$

با تقسیم معادله (۱۸) بر $a\delta$ ، یک رابطه خطی بین E و S نتیجه می‌شود:

$$E = E_0 + \mu \gamma \delta \quad (21)$$

$$E_0 = (1 - \mu \gamma \delta)$$

که



۴ | نمودارهای WOB، ROP، RPM و دیگرام E-S چاه NR-16

۶- بررسی داده‌های حفاری

داده‌های مورد بررسی، مربوط به چاه NR-16 میدان نوروز است. این چاه از عمق ۲۲۶۰ تا ۲۳۴۰ m توسط مته PDC حفاری شده است. شکل ۴، نمودارهای تغییرات WOB، ROP، RPM و دیگرام E-S را برای این چاه نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ثبت داده‌ها، نوسانات زیادی وجود دارد (به‌ویژه WOB و ROP). این امر باعث کاهش کیفیت دیگرام E-S و پراکندگی نقاط شده است. در این جا لزوم استفاده از داده‌های با کیفیت بالا به‌خوبی احساس می‌شود. با توجه به نمودارها می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- بیش‌ترین راندمان حفاری در ابتدا و انتها رخ می‌دهد.
۲- کاهش WOB (از نقاط آبی به صورتی) باعث کاهش راندمان حفاری شده است (نقاط صورتی رنگ که در نمودار E-S به سمت بالا روی خط اصطکاک حرکت کرده‌اند).

۳- افزایش WOB در انتها (نقاط قرمز)، افزایش بهره‌دهی حفاری را به همراه داشته است. جایی که این افزایش با کم شده RPM مقارن شده است، راندمان دوباره کاهش یافته است. چهار نقطه پراکنده قرمز رنگ نشان‌دهنده این کاهش هستند.

۴- افزایش RPM به تنهایی در افزایش راندمان تأثیری ندارد (نقاط زرد)، حتی باعث پراکنده‌تر شدن نقاط روی E-S می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده Vibration باشد.

با توجه به مدل می‌توان حدس زد که:

۱. مته در انتها وارد سازند جدیدی شده است.
۲. تمیز سازی چاه به درستی انجام نمی‌شود.
۳. مته دچار ساییدگی شده است.

گزارش زمین‌شناسی موجود در گزارش حفاری چاه، حدس اول را منتفی می‌کند. از آن‌جا که مته در انتها تقریباً سالم بیرون آورده شده است، بنابراین حدس آخر هم منتفی است. پس می‌توان نتیجه گرفت که تمیز سازی، کامل نبوده و تجمع ذرات حفاری مانع کار مته با کارایی بالا شده است. در حقیقت این تجمع ذرات، ثابت فرمول را تغییر می‌دهد.

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب گفته شده، دیگرام E-S کمک زیادی به تفسیر وضعیت حفاری می‌کند. مدل ارائه شده در این مقاله به این مطلب اشاره دارد که افزایش یا کاهش راندمان، مستقیماً با کاهش یا افزایش WOB یا RPM در ارتباط نیست بلکه گاهی اوقات می‌تواند عکس این مطلب باشد. عمق برش نسبت به ROP، تصویر بهتری از سرعت حفاری ارائه می‌کند. در نهایت این که، عواملی چون تمیز سازی چاه می‌توانند بر اندازه سایر پارامترها از قبیل WOB و RPM مؤثر باشند.

با استفاده از این مدل، در هنگام حفاری می‌توان از شرایط نامطلوب دوری کرده و از تمام‌کارایی مته استفاده نمود.

پیشنهادات

همان‌طور که اشاره شد، داده‌های سطحی از کیفیت پایینی برخوردار هستند. چنانچه این داده‌ها قبل از استفاده در این مدل تصحیح شده و به شرایط درون چاهی نزدیک‌تر شوند، نتایج به مراتب قابل اعتمادتری ارائه خواهند داد. این موضوع خود نیازمند تحقیقات و آزمایش‌های فراوان است.

منابع

- [1] Fairhurst C. and Lacabanne W. D. Hard rock drilling techniques. Min Quarry Engng 157-161, 194-197 (1957).
- [2] Warren T. and Armagost W. Laboratory drilling performance of PDC bits. SPE Drilling Engng Jtm, 125-135 (1988).
- [3] Richard T. and Reboul S. Application of a bit-rock interaction model to the analysis of surface data. DIAMANT Drilling services.
- [4] E. Detournay and P. Defourny, A Phenomenological Model for the Drilling Action of Drag Bits. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29. No. 1, pp. 13-23, 1992