# Πρόβλεψη Διατρησιμότητας Πετρωμάτων στις Γεωτρήσεις Έρευνας Ορυκτών και Υδρογονανθράκων πόσο κοντά είμαστε;

**Β. Χ. Κελεσίδης** Αναπληρωτής Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

#### Περίληψη

Στο παρόν άρθρο γίνεται ανάλυση των προταθέντων εξισώσεων πρόβλεψης διατρησιμότητας των πετρωμάτων σε εξορυκτικές γεωτρήσεις και γεωτρήσεις υδρογονανθράκων. Αναδεικνύονται η μη επιτυχής αντιμετώπιση του προβλήματος έως σήμερα λόγω αδυναμίας περιγραφής του πολυσύνθετου φαινομένου της αλληλεπίδρασης κοπτικού – πετρωμάτων και η ανάγκη για την αξιοποίηση τόσο πειραματικών δεδομένων όσο και διατρητικών δεδομένων πεδίου. Η χρησιμοποίηση της αναλώμενης από το γεωτρύπανο ενέργειας ανά μονάδα όγκου, ήτοι της ειδικής ενέργειας, επιτρέπει σ' ένα βαθμό την προσέγγιση πρόβλεψης της διατρησιμότητας των πετρωμάτων ιδιαίτερα όταν υπάρχουν συγκριτικά δεδομένω. Προτείνεται ένας νέος τρόπος παρουσίασης των διατρητικών δεδομένων πεδίου και εργαστηρίου, που βοηθά στην καλύτερη κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων παραμέτρων στη διατρησιμότητα των πετρωμάτων και στην πρόβλεψη της διατρησιμότητας.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεώτρηση μπορεί να είναι ίσως η πλέον δαπανηρή εργασία σε μια καμπάνια εξεύρεσης αλλά και παραγωγής ορυκτών πόρων, μεταλλευμάτων, γεωθερμικών ρευστών, νερού και υδρογονανθράκων.

Πέραν αυτού είναι και η μοναδική διεργασία που δίδει τη δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού πιθανών ορυκτών και των αποθεμάτων στο υπέδαφος, γιατί, κατά παράφραση της ρήσης του Πυθαγόρα με την ορολογία των γεωτρήσεων, 'όποιος σκάβει, βρίσκει, όποιος δεν σκάβει, δεν βρίσκει ποτέ' (Κελεσίδης και Μαυροματίδης, 2005). Η πρόβλεψη συνεπώς της ταχύτητας διάτρησης κάτω από διαφορετικές συνθήκες υπεδάφους αλλά και με διαφορετικού τύπου διατρητικό εξοπλισμό είναι απαραίτητη τόσο για την εκτίμηση του κόστους των γεωτρήσεων όσο και για τον ασφαλή σχεδιασμό τους.

Η έρευνα και η ανάπτυξη τόσο στις τεχνικές διάτρησης όσο και στην κατασκευή κατάλληλων εργαλείων ιδιαίτερα κοπτικών άκρων, αλλά και πολλών άλλων τεχνικών υποβοηθητικών στη διάτρηση σχηματισμών έχει Υποβλήθηκε: 12.2.2009 Έγινε δεκτή: 11.12.2009 αποδώσει σημαντικά τα τελευταία 30 χρόνια, δίδοντας έτσι τη δυνατότητα για την εκτέλεση διατρήσεων σε πολύ δύσκολες καταστάσεις, που οι παλαιότεροι γεωτρυπανιστές ούτε θα το είχαν διανοηθεί τόσο σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, όσο και σε αβαθείς γεωτρήσεις για εκμετάλλευση ορυκτών. Όμως, δεν υπήρξε αντίστοιχη πρόοδος στην ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της διατρησιμότητας των πετρωμάτων ούτε για κρουστικές ούτε για περιστροφικές διατρήσεις. Η διαπίστωση αυτή όχι μόνο έγινε πριν είκοσι περίπου χρόνια (Rabia, 1985) αλλά, όπως θα παρουσιαστεί κατωτέρω, εξακολουθεί να ισχύει ακόμη και σήμερα και η αναζήτηση μοντέλων είναι διαρκής (Standifird et al., 2004). Διαθεσιμότητα τέτοιων μοντέλων επιτρέπει την επιλογή του κατάλληλου γεωτρυπάνου και των γεωτρητικών παραμέτρων και την πιθανή εκτίμηση του κόστους γεωτρήσεων που είναι σημαντική παράμετρος για τις πολύ βαθιές γεωτρήσεις, όπως είναι σήμερα οι γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, αλλά και για τις αβαθείς γεωτρήσεις στις σημερινές συνθήκες στενότητας χρημάτων (Schlumberger Data and Consulting Services, 2005).

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθούν οι τρόποι πρόβλεψης διατρησιμότητας για τη μία εκ των δύο κυριοτέρων τεχνικών διάτρησης, την περιστροφική διάτρηση που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σχεδόν σε γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, αλλά, επίσης και σε υδρογεωτρήσεις, ενώ είναι η εφαρμοζόμενη συνήθης τεχνική και στις πυρηνοληψίες για αποκομιδή των υπερκειμένων.

Στο Σχήμα 1. παριστάται η διαδικασία διάτρησης με την περιστροφική-κρουστική τεχνική και χρήση κωνικού κοπτικού με δόντια, όπου η κοπή γίνεται με σμίλευση και διάτμηση για μαλακά πετρώματα (μεγάλα δόντια) και με θρυμματισμό και σπάσιμο για σκληρού τύπου κοπτικά, όπως τα ένθετα καρβιδίου για κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους. Στο Σχήμα 2. παριστάται η διαδικασία περιστροφικής διάτρησης με χρήση κοπτικών τριβής, όπου φαίνεται καθαρά η διεργασία σμιλεύματος και διάτμησης και απόξεσης με τον τύπο της διεργασίας να εξαρτάται από το είδος του κοπτικού, όπως αναφέρεται στο Σχήμα 2.



1 σκόνη τριμμάτων 2 ακτινικές ρωγματώσεις 3 απομακρυθέντα κομμάτια

- Σχήμα 1. Παράσταση διαδικασίας διάτρησης κοπτικό με περιστρεφόμενους κώνους, με δόντια με την περιστροφική τεχνική. Λόγω κρούσης δημιουργείται κρατήρας με ψιλά τρίμματα (1) και μικρορωγμές (2), ενώ με την περιστροφή απομακρύνονται τα τρίμματα (3). (από Thuro και Spaun, 1996a).
- Figure 1. Depiction of rotary drilling process with roller cones. Because of impact, a crater is formed with small size cuttings (1), micro-fissures (2) while with the rotation, cuttings are removed (3) [44].

Οπωσδήποτε, στα σχήματα δεν παρουσιάζεται καθόλου η σημαντική υποβοήθηση που παρέχεται από το ρευστό κατά τη συνήθη διάτρηση τέτοιων στρωμάτων, είτε είναι αέρας είτε είναι υγρό για τη μεταφορά των τριμμάτων, αλλά και με την υδραυλική ισχύ που παρέχεται σε περίπτωση υγρού πολφού που συνεισφέρει σημαντικά στη ρωγμάτωση του πετρώματος και έχει τεκμηριωθεί πολλάκις, ιδιαίτερα σε μελέτες διατρησιμότητας σχετιζόμενες με γεωτρήσεις πετρελαίου (Cheatham & Nahm 1985, Akin et al., 1997, Taylor et al., 1999, Wells et al. 2008, Black et al. 2008).



- Σχήμα 2. Παράσταση διαδικασίας διάτρησης με κοπτικά τριβής κατά την περιστροφική διάτρηση. Από αριστερά προς τα δεξίά κοπτικά διαμαντιών, κοπτικά κόνεως, κοπτικά με πολυκρυσταλλικά διαμάντια (PDC). (από Besson et al., 2000).
- Figure 2. Depiction of drilling process with fixed-cutter bits, from left to right, natural diamond bit (plowing), diamondimpregnated bit (grinding), PDC bit (shearing) [6].

### 2. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΤΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η διερεύνηση των σημαντικών παραμέτρων που επιδρούν στην ταχύτητα διάτρησης ξεκίνησε σχεδόν παράλληλα με την έναρξη των γεωτρήσεων. Εμπειρικές παρατη-

ρήσεις έδειξαν ότι η ταχύτητα διάτρησης εξαρτάται από δύο ομάδες παραγόντων, τις ιδιότητες των πετρωμάτων, τις ιδιότητες του περιβάλλοντος διάτρησης και παραμέτρους της γεωτρητικής διεργασίας. Στην πρώτη ομάδα συμπεριλαμβάνονται οι τοπικές τάσεις (in-situ stresses), η συμπύκνωση των πετρωμάτων (compaction), η ορυκτολογική σύσταση, η πίεση των ρευστών των πόρων. Από τις παραμέτρους της διάτρησης ξεγωρίζουν το επιδρούν βάρος στο κοπτικό και η εφαρμοζόμενη ροπή, η ταχύτητα περιστροφής και οι υδραυλικές παράμετροι (ταχύτητα και παροχή ρευστού, πυκνότητα πολφού, ιξώδες και ρεολογία πολφού). Οπωσδήποτε, η κατάσταση του κοπτικού παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο, αφού με τον χρόνο υπάρχει η αντίστοιχη φθορά που εξαρτάται τόσο από το είδος του κοπτικού, όσο και από το είδος των πετρωμάτων που διατρώνται. Ο μηχανικός γεώτρησης μπορεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό να επιλέξει βέλτιστες πρακτικές και βέλτιστες τιμές των παραμέτρων διάτρησης. Όμως, δεν μπορεί να ρυθμίσει καμία εκ των παραμέτρων των σχηματισμών. Το βέβαιο είναι ότι πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει με σχετική ακρίβεια τις τιμές των σχετικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων για να μπορέσει να εκτιμήσει σωστά τις απαιτούμενες τιμές των διατρητικών παραμέτρων για να επιτύχει τη βέλτιστη ταχύτητα διάτρησης σε συγκεκριμένο περιβάλλον, που ορίζεται ως η μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα, που θα οδηγήσει στην οικονομικότερη διάτρηση με ασφάλεια.

Στην αναζήτηση κατάλληλων μοντέλων πρόβλεψης της διατρησιμότητας των πετρωμάτων χρησιμοποιήθηκαν αρχικά παράμετροι των πετρωμάτων και ιδιαίτερα οι τιμές αντοχής σε θλίψη. Αλλά η παρατήρηση και η περαιτέρω έρευνα έδωσε αποτελέσματα, που έδειχναν ότι πετρώματα διαφορετικού τύπου αλλά με ίδιες περίπου τιμές αντοχής σε θλίψη, όπως για παράδειγμα ένα εκρηξιγενές πέτρωμα και ασβεστόλιθος, έδιδαν τελείως διαφορετική συμπεριφορά στη διάτρηση, που μετράται φυσικά ως ρυθμός διάτρησης (Rabia, 1985). Κατά συνέπεια, υπεισέρχονταν και άλλες παράμετροι του πετρώματος στην εξίσωση, όπως για παράδειγμα αντοχή σε εφελκυσμό, αντοχή σε διάτμηση, αντοχή σε πρόσπτωση. Φυσικά, πέραν των ιδιοτήτων των πετρωμάτων, σημαντικό παράγοντα αποτελούν τόσο το γεωτρύπανο, όσο και το κοπτικό που χρησιμοποιούνται, που έχουν να κάνουν με τη μηγανική ενέργεια που παράγεται από το γεωτρύπανο και μεταφέρεται στο πέτρωμα μέσω του κοπτικού και του συστήματος διάτρησης. Τα προταθέντα μοντέλα, τόσο για τα κωνικά, όσο και για τα κοπτικά τριβής, είναι πολυπαραμετρικά και συνεπώς πολυσύνθετα, αλλά δεν λαμβάνουν υπόψη τη συνέργεια των υδραυλικών παραμέτρων, καθώς είναι γνωστό ότι ένας επιπρόσθετος παράγοντας είναι, φυσικά, και το ρευστό που χρησιμοποιείται και μεταφέρει στο πέτρωμα υδραυλική ισχύ (Walker et al., 1986).

Έχουν γίνει προσπάθειες ορισμού της αντοχής των πετρωμάτων σε διάτρηση (drilling strength of rock) κατά το σύνηθες του ορισμού της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε εφελκυσμό. Ο τρόπος, όμως, υπολογισμού της αντοχής σε διάτρηση δεν έχει ακόμη βρεθεί, διότι δεν έχει αποδειχθεί έως σήμερα ότι υπάρχει μοναδιαία παράμετρος ή ιδιότητα του πετρώματος, που μπορεί να περιγράψει την αντοχή των πετρωμάτων σε διάτρηση (Rabia, 1985) παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι εκτίμησης μίας 'αποτελεσματικής' αντοχής του πετρώματος σε διάτρηση (Warren, 1986, Warren, 1987, Duklet and Bates 1981, Falconer et al., 1988, Fear 1996). O Rabia (1985) πρότεινε ότι μία εξίσωση του τύπου (1) θα μπορούσε να περιγράψει όλες τις διεργασίες διάτρησης (κρουστική και περιστροφική)

 Ρυθμός διάτρησης ~ (παροχή ενέργειας)<sup>α</sup> /
 (γινόμενο ιδιοτήτων αντοχής)<sup>β</sup>
 (1),

όπου ο παρονομαστής μπορεί να είναι μία των ιδιοτήτων αντοχής των πετρωμάτων, ενώ οι εκθέτες (α, β) προσδιορίζονται πειραματικά.

Είναι αναμενόμενο ότι στις πολύ διαφορετικές συνθήκες υπεδάφους δεν είναι δυνατόν ένα μοναδικό μοντέλο να μπορεί να λειτουργήσει ικανοποιητικά σε όλες τις περιπτώσεις. Πολλά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη συγκεκριμένα στοιχεία από ομάδα γεωτρήσεων έτσι ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία τέτοιων μοντέλων για τον σχεδιασμό νέων γεωτρήσεων στην ίδια περιοχή, όπως για παράδειγμα η τεχνική που προτάθηκε από τον Fear (1996), που προσδιορίζει ποιοι είναι οι παράγοντες, που επηρεάζουν την ταχύτητα διάτρησης σε συγκεκριμένο πεδίο και για ένα σύνολο χρήσης κοπτικών. Η μέθοδος χρησιμοποιεί δεδομένα από τη διαγραφία λάσπης (mud log), πληροφορίες για τους γεωλογικούς σχηματισμούς και χαρακτηριστικά των κοπτικών για να δώσει αριθμητικές συσχετίσεις μεταξύ της ταχύτητας διάτρησης και των παραμέτρων της γεώτρησης. Χρήση των συσχετίσεων επιτρέπει τον σχεδιασμό νέων γεωτρήσεων με προτάσεις για χρήση συγκεκριμένων κοπτικών, αλλά και εφαρμογής συγκεκριμένων τιμών παραμέτρων διάτρησης, όπως για παράδειγμα βάρος στο κοπτικό (W), ταχύτητα περιστροφής (N) και εφαρμοζόμενη ροπή (T). Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η χρήση δεδομένων πεδίου και όχι εργαστηριακών δεδομένων για τη δημιουργία συσχετίσεων. Ο τρόπος υπολογισμού του ρυθμού διάτρησης βασίζεται στον υπολογισμό της ειδικής ενέργειας, που θα αναλυθεί παρακάτω, και στη χρήση εμπειρικών συντελεστών που προκύπτουν, όμως, από πραγματικά δεδομένα πεδίου. Έτσι, για παράδειγμα, οι Caicedo et al. (2005) έχουν παρουσιάσει πρόσφατα το μοντέλο με την ως άνω προσέγγιση και αναφέρουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε γεωτρήσεις σε συγκεκριμένα πεδία ανά τον κόσμο, ενώ οι Liu and Karen Lin (2001) αναφέρουν τη χρήση γεωφυσικών δεδομένων πεδίου σε όρυξη διατρημάτων που θα μπορούσαν μέσα από την ανωτέρω προσέγγιση να δώσουν ακόμη περισσότερες πληροφορίες για επόμενες διατρήσεις.

Η βασική ανάλυση διατρητικών δεδομένων γίνεται κυρίως με διαγράμματα της μορφής του Σχήματος 3, ήτοι ρυθμού διάτρησης – βάρους εφαρμογής (R-W), με την κλασική περιγραφή των τριών περιοχών (Dupriest & Koeritz, 2005; Dupriest, 2006) ήτοι, περιοχή Ι-ανεπαρκές βάθος κοπής, περιοχή ΙΙ-αποδοτικό κοπτικό και περιοχή ΙΙΙ-μη επιτυχής διάτρηση με συνταγές για επανασχεδιασμό και επέκταση του σημείου αποτυχίας να δίδονται στη βιβλιογραφία.

Είναι ενδιαφέρον να τονιστεί ότι η γραμμική εξάρτηση στην περιοχή ΙΙ δίδει αρνητικές τιμές του R για μηδενικό φορτίο, γεγονός που θα απαντηθεί στα πραγματικά δεδομένα που αναλύονται παρακάτω και προκύπτει κύρια από το γεγονός ότι τα χαμηλά φορτία δεν επαρκούν για να αρχίσει η διάτρηση, δίδοντας έτσι συνολικά μία εκθετικής μορφής καμπύλη.



Σχήμα 3. Η σχέση ρυθμού διάτρησης με το εφαρμοζόμενο βάρος για διαφορετικές συνθήκες διάτρησης (από Dupriest, 2006).

Figure 3. The relationship between rate of penetration (R) and applied weight on bit (W) for different drilling conditions [from 16].

Στην παρούσα εργασία γίνεται κριτική ανάλυση των μεθόδων που έχουν προταθεί για την πρόβλεψη της ταχύτητας διατρησιμότητας των πετρωμάτων κατά την περιστροφική διάτρηση, παρουσιάζεται η βασική εξίσωση πρόβλεψης, αλλά στη σωστή και διαστατική της μορφή για τη διάτρηση υπερκειμένων. Αναπτύσσεται δε η αντίστοιχη εξίσωση για την πυρηνοληψία πετρωμάτων και προτείνεται ένας νέος τρόπος παρουσίασης των διατρητικών δεδομένων, που δίδει τη δυνατότητα καλύτερης αξιοποίησής τους, καθώς, όπως αναφέρθηκε, το εφαρμοζόμενο βάρος στο κοπτικό δεν είναι η μοναδική παράμετρος που επηρεάζει την ταχύτητα διάτρησης.

#### 3. ΕΙΔΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ειδική ενέργεια (ή μηχανική ειδική ενέργεια) είναι μία παράμετρος που προτάθηκε αρχικά από τον Teale (1965) και αποτέλεσε τη βασική παράμετρο για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης διατρησιμότητας πετρωμάτων, τόσο για μεταλλευτικές γεωτρήσεις (Rowsell and Walker 1980, Bilgin 1982, Rao et al. 2002, Bilgin and Kahraman 2003, Akun et al. 2005, Exadaktylos et al. 2008), όσο και για γεωτρήσεις υδρογονανθράκων (Rowley and Appl 1969, Rabia 1986, Waughmann et al. 2002, Detournay and Tan 2002, Koederitz et al. 2005, Curry et al. 2005, Akgun, 2007, Detournay et al. 2008) για να αναφέρουμε μερικούς εξ αυτών.

Ως ειδική ενέργεια ορίζεται το υπολογισμένο έργο που δαπανάται για να θρυμματιστεί και να καταστραφεί συγκεκριμένος όγκος πετρώματος κατά τη διεργασία της διάτρησης, είτε στο πεδίο είτε στο εργαστήριο. Πολλοί ερευνητές έχουν προσπαθήσει να ορίσουν την ειδική ενέργεια ως ιδιότητα των πετρωμάτων, αλλά τούτο δεν είναι σωστό, διότι η ειδική ενέργεια, όπως ορίζεται, είναι μία γεωτρητική παράμετρος που χρησιμοποιείται στο πεδίο για προσαρμογή των γεωτρητικών δεδομένων με στόχο να διατηρηθεί στην ελάχιστη τιμή για βελτιστοποίηση της διατρητικής διεργασίας. Οι πιθανές προσαρμογές της γεωτρητικής διαδικασίας αφορούν σε αλλαγές στο εφαρμοζόμενο βάρος και συνεπώς στην εφαρμοζόμενη ροπή στο κοπτικό, σε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής ή και σε χρήση διαφορετικού κοπτικού (Kaiser, 2007).

Ο προσδιορισμός της ειδικής ενέργειας για τις περιστροφικές διατρήσεις γίνεται, εάν θεωρήσουμε το έργο, που παράγει το εφαρμοζόμενο βάρος W και η εφαρμοζόμενη ροπή T, από το γεωτρύπανο στο κοπτικό και το ανάξουμε στη μονάδα όγκου παραγόμενων τριμμάτων. Σημειώνεται ότι μέρος της δαπανώμενης ενέργειας αναλίσκεται στην υπερνίκηση των τριβών, συνεπώς δεν μεταφέρεται στο σύνολό της στο πέτρωμα.

Το βάρος W κατά την προώθηση κατά Δh παράγει έργο

$$E_w = W * \Delta h \tag{2}$$

συνεπώς η ενέργεια ανά μονάδα όγκου,  $SE_w$ , που μεταφέρεται λόγω του βάρους στο πέτρωμα δίδεται από

$$SE_{w} = \frac{W * \Delta h}{A * \Delta h} = \frac{W}{A}$$
(3)

#### όπου Α είναι η επιφάνεια διάτρησης.

Με τη βοήθεια του περιστροφικού συστήματος, λόγω του εφαρμοζόμενου βάρους W, αναπτύσσεται ροπή T, που είναι και το κυρίως έργο που δαπανάται παράγοντας έτσι έργο στη μονάδα του χρόνου,

$$E v \varepsilon \rho \gamma \varepsilon \iota \alpha / \chi \rho \phi v \phi = \omega T$$
(4)

όπου ω η ταχύτητα περιστροφής, σε rad/s. Ο όγκος στερεών που παράγεται στη μονάδα του χρόνου δίδεται από

$$\delta\gamma\kappa o\zeta / \chi\rho\delta vo = R * A \tag{5}$$

όπου R ο ρυθμός διάτρησης. Συνεπώς, η ειδική ενέργεια λόγω περιστροφής SE<sub>1</sub>, δίδεται από

$$SE_{T} = \frac{\varepsilon v \dot{\varepsilon} \rho \gamma \varepsilon i \alpha / \chi \rho \dot{o} v o}{\dot{o} \gamma \kappa o / \chi \rho \dot{o} v o} = \frac{\omega^{*} T}{R^{*} A}$$
(6)

και με την T σε N\*m, A σε m², R σε m/s, η $S\!E_{_T}$ είναι σε N/m² δηλαδή Pa.

Αρα η συνολική ειδική ενέργεια, SE, ορίζεται ως

$$SE_t = SE_W + SE_T = \frac{W}{A} + \frac{\omega * T}{R * A}$$
(7)

Δίδοντας τυπικές τιμές στις ανωτέρω παραμέτρους μπορεί να αποδειχθεί ότι ο πρώτος όρος, ήτοι η ειδική ενέργεια, λόγω αξονικής κίνησης είναι 2-3% της συνολικής ειδικής ενέργειας (Teale 1965, Black et al. 2008) με συνέπεια πολλοί ερευνητές να αγνοούν τον πρώτο όρο και να χρησιμοποιούν μόνο τον δεύτερο όρο. Η αγνόηση του πρώτου όρου τότε δημιουργεί το ερώτημα, ποιος ο ρόλος του βάρους στο κοπτικό για τη συμβολή στην ειδική ενέργεια; Φυσικά ο ρόλος είναι στο ότι δημιουργεί τη ροπή δια της οποίας ουσιαστικά επιτυγχάνεται η διάτρηση (Dupriest 2006).

Σημειώνεται ότι η εξίσωση (7) έχει χρησιμοποιηθεί κατ' επανάληψη από πάρα πολλούς ερευνητές σε διάφορες μορφές που εξαρτώνται, όμως, από το σύστημα μονάδων αλλά και από τη διατήρηση ή αγνόηση του πρώτου όρου, τόσο για γεωτρήσεις υδρογοναθράκων (Pessier and Fear 1992, Fear 1996, Ziaja, 2005), όσο και για γεωτρήσεις μεταλλευτικής βιομηχανίας (Bilgin and Kahraman, 2003, Akun et al., 2005) τις περισσότερες φορές, όμως, χωρίς συγκεκριμένες αναφορές στις μονάδες που πρέπει να χρησιμοποιούνται, αλλά παρουσιάζοντας διάφορους συντελεστές μετατροπής, δημιουργώντας έτσι μία σύγχυση στους αναγνώστες. Στην ως άνω μορφή η εξίσωση (7) είναι διαστατικά σωστή και ανεξάρτητη από το σύστημα μονάδων. Πολλές παραλλαγές της εξίσωσης (7) έχουν επίσης προταθεί με τη χρήση αδιάστατων όρων, όπως 'φαινόμενη αντοχή σχηματισμού' και 'αδιάστατη ροπή' (Falconer et al., 1988), 'λόγος δυνάμεων' από Smith (1998, 2000) και οι ίδιες παράμετροι από Solano (2004). Είναι δε φανερό ότι όλες οι προτεινόμενες παράμετροι είναι παραλλαγές των δύο βασικών όρων της εξίσωσης της ειδικής ενέργειας που παρουσιάζεται στη σωστή της μορφή ως εξίσωση (7). Η ειδική ενέργεια που δαπανάται από το γεωτρύπανο μπορεί να εκτιμηθεί αλλά δεν είναι γνωστό όμως το ποσοστό από την ενέργεια που μεταφέρεται στο πέτρωμα και εν τέλει συνεισφέρει πραγματικά στη

διάτρηση, ήτοι αγνοείται η αποδοτικότητα μεταφοράς της ενέργειας.

Άρα από την εξίσωση της ειδικής ενέργειας (εξ. 7) προκύπτει ότι για συγκεκριμένο γεωτρύπανο με σταθερή περιστροφική ταχύτητα σε συγκεκριμένο πέτρωμα η ειδική ενέργεια θα έχει πολύ υψηλές τιμές για μικρές τιμές του εφαρμοζόμενου βάρους, ενώ για τιμές κάτω από συγκεκριμένο επίπεδο, το κοπτικό δεν θα εισγωρεί στο πέτρωμα και η παρεχομένη ενέργεια αναλώνεται κύρια σε τριβές παρά σε διάτρηση. Με αύξηση του βάρους αρχίζει η διάτρηση (βλέπε Σχ. 1) και αυξάνει το ποσοστό ενέργειας αναλώμενο στη διάτρηση και μειώνεται συνεπώς το ποσοστό που αναλώνεται σε τριβές, με συνέπεια τη μείωση της ειδικής ενέργειας, καθώς παράγεται μεγαλύτερος όγκος απορριμμάτων. Η μείωση της ειδικής ενέργειας συνεχίζεται με την αύξηση του φορτίου, έως ότου το κοπτικό υπερσυμπιέζεται στο πέτρωμα και μπουκώνει με αντίστοιχη αύξηση της ειδικής ενέργειας (Teale, 1965). Ανάλυση συνεπώς των χαρακτηριστικών συγκεκριμένων γεωτρυπάνων και κοπτικών δίδει τη δυνατότητα για προσδιορισμό της διατρητικής διεργασίας ανάλογα με τις ιδιότητες των πετρωμάτων (Liu and Karen Yin, 2001).

Πολλές φορές δεν είναι γνωστή η ροπή που ασκείται στο κοπτικό, ενώ είναι γνωστή η ροπή στην επιφάνεια, αλλά δεν μπορούμε να προβλέψουμε εύκολα το ποσοστό που χάνεται σε τριβές και το ποσοστό που ασκείται στο κοπτικό από τις τιμές που καταγράφονται στην επιφάνεια. Φυσικά, σε γεωτρήσεις πετρελαίου όπου επενδύονται μεγάλα χρηματικά ποσά, η χρήση των εργαλείων μέτρησης κατά τη διάτρηση (MWD tools) επιτρέπει τη μέτρηση όχι μόνο της ροπής αλλά και του βάρους στο κοπτικό, πριν το κοπτικό, ενώ παρόμοιες προσπάθειες έχουν αναφερθεί και για ρηχότερες γεωτρήσεις χωρίς, όμως, μεγάλη συχνότητα. Για τη χρήση τιμών μόνο βάρους οι Pessier and Fear (1992) όρισαν τον συντελεστή τριβής μ, που μπορεί να εκτιμηθεί με αναφορά στο Σχήμα 4,



- Σχήμα 4. Συσχέτιση βάρους και ροπής στο κοπτικό και ορισμός του συντελεστή τριβής.
- Figure 4. *Relationship between weight and torque and definition of friction coefficient.*

βάσει του οποίου θεωρώντας τη μέση δύναμη W / A να επιμερίζεται σε διαφορική επιφάνεια dA η εφαπτομενική δύναμη που δημιουργεί τη ροπή dF είναι

$$dF = \mu dN = \mu \left(\frac{W}{A}\right) dA \tag{8}$$

όπου dN είναι η διαφορική κάθετη δύναμη και

$$dA = r dr d\theta \tag{9}$$

Ενώ μ είναι ο συντελεστής τριβής. Η συνολική ροπή είναι τότε,

$$T = \int_{A} r dF = \int_{A} r \frac{4\mu W}{\pi D^2} dA$$
(10)

όπου D είναι η διάμετρος του κοπτικού και ολοκληρώνοντας έχουμε

$$T = \int_{0}^{D/2} \int_{0}^{2\pi} r^2 \frac{4\mu W}{\pi D^2} dr d\theta = \int_{0}^{D/2} \frac{8\mu W}{D^2} r^2 dr = \frac{\mu W D}{3} \quad (11)$$

Η εξίσωση (11) είναι σε συνεπές σύστημα μονάδων. Δίδοντας τη διάμετρο D σε ίντσες και τη ροπή σε ft- $lb_p$  η ως άνω εξίσωση γίνεται

$$T = \frac{\mu WD}{36} \tag{12}$$

και έτσι ορίζεται η 'παράξενη' σχέση σύνδεσης ροπής και βάρους με τον συντελεστή 36, που παρουσιάζεται σε πάρα πολλές εργασίες χωρίς, όμως, καμία αναφορά στην προέλευση της.

Μπορούμε να προσδιορίσουμε αντίστοιχη εξίσωση για την περίπτωση γεωτρήσεων πυρηνοληψίας και η εξίσωση (11) διαφοροποιείται λόγω του γεγονότος ότι η κοπή γίνεται μεταξύ των δύο ακτινών,  $R_2 = D_2/2$  και  $R_1 = D_1/2$  και γίνεται σύμφωνα με την ανωτέρω προσέγγιση,

$$T = \int_{R_{1}}^{R_{2}2\pi} \int_{0}^{\pi} r^{2} \frac{\mu W}{\pi \left(R_{2}^{2} - R_{1}^{2}\right)} dr d\theta = \int_{R_{1}}^{R_{2}} \frac{2\mu W}{R_{2}^{2} - R_{1}^{2}} r^{2} dr = \left(\frac{\mu W}{3}\right) \left(\frac{R_{2}^{2} + R_{1}R_{2} + R_{1}^{2}}{R_{1} + R_{2}}\right) = \left(\frac{\mu W}{3}\right) \left(D_{eq}\right)$$
(13)

όπου στην πραγματικότητα αντικαθιστούμε στην εξίσωση (11) για την πλήρη διάτρηση, τη διάμετρο κοπής D με μία ισοδύναμη διάμετρο D<sub>ea</sub>, που δίδεται από τη σχέση

$$D_{eq} = \frac{D_2^2 + D_1 D_2 + D_1^2}{D_1 + D_2} \tag{14}$$

Αγνοώντας τη συνεισφορά του βάρους στον ρυθμό διάτρησης και εισάγοντας ουσιαστικά τον συντελεστή τριβής μ που οι Black et al. (2008) ονόμασαν 'επιθετικότητα - aggressiveness' του κοπτικού, μέσω του οποίου το αξονικό φορτίο δίδει ροπή, οι Black et al. (2008) θεώρησαν ότι κατά την περιστροφική διάτρηση ουσιαστικά λαμβάνουν χώρα δύο διεργασίες: α) βάρος εφαρμόζεται στο κοπτικό και ανάλογα με την επιθετικότητα του κοπτικού, το μ δηλαδή, το βάρος αυτό θα δημιουργήσει μία συγκεκριμένη ροπή και β) ανάλογα με την αποδοτικότητα της διεργασίας το έργο που παράγεται λόγω της συγκεκριμένης ροπής θα προκαλέσει μία συγκεκριμένη διείσδυση ανά περιστροφή. Παρουσιάζοντας δε σε διάγραμμα τη ροπή σε σχέση με το εφαρμοζόμενο βάρος εκτιμούν ότι πρέπει να ληφθεί ευθεία γραμμή με κλίση ανάλογη του συντελεστή τριβής ή της επιθετικότητας και έτσι μπορούμε να βρούμε για τις συγκεκριμένες συνθήκες την 'επιθετικότητα' του συγκεκριμένου κοπτικού. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στο Σχήμα 5, όπου για διαφορετικά κοπτικά παρατηρούνται διαφορετικές 'επιθετικότητες'.



- Σχήμα 5. Διάγραμμα ροπής βάρους για διάφορα κοπτικά, για διάτρηση σε μάρμαρο Carthage με υδατικό πολφό πυκνότητας 1.32 g/ cm<sup>3</sup>. Η κλίση είναι ανάλογη της 'επιθετικότητας' του κοπτικού και διαφορετική για κάθε κοπτικό (από Black et al. 2008).
- Figure 5. Diagram of torque weight for different bits, drilling in Carthage marble with water based fluid of 1.32 g/cm<sup>3</sup> density. The slope is proportional to the bit aggressiveness [from 9].

# 4. ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΔΙΑΤΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η εξίσωση για την ειδική ενέργεια αφορά μόνο σε γεωτρητικές παραμέτρους και δεν έχει ακόμη συσχετιστεί με ιδιότητες των πετρωμάτων που διατρώνται. Οπωσδήποτε,

η ειδική ενέργεια έχει να κάνει με την ενέργεια καταστροφής του πετρώματος, αλλά αυτό ακόμη δεν έχει προσδιοριστεί. Οι μονάδες της ειδικής ενέργειας είναι βέβαια, βάσει του ορισμού, ενέργεια/μονάδα όγκου που είναι ουσιαστικά μονάδες πίεσης (M/LT<sup>2</sup>). Πολλοί ερευνητές στο παρελθόν προσπάθησαν χωρίς, όμως, μεγάλη επιτυχία να τη συσχετίσουν ή να την αντικαταστήσουν με την αντοχή των πετρωμάτων σε μονοαξονική, UCS ή και τριαξονική θλίψη, CCS, όπου UCS η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και CCS η αντοχή σε τριαξονική θλίψη. Ο Teale (1965) επεσήμανε την ομοιότητα αυτή των μονάδων μεταξύ ειδικής ενέργειας και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη και ανέλυσε δεδομένα από άλλους ερευνητές για να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τελικά η ειδική ενέργεια είναι σε καλή συσχέτιση με την αντοχή και πολλές φορές η ελάχιστη ειδική ενέργεια που απαιτείται για την διάτρηση πετρωμάτων είναι ίση κατά προσέγγιση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Αυτό βέβαια έχει αναλυθεί και ανατραπεί πολλές φορές από μεταγενέστερους ερευνητές. Για παράδειγμα οι Black et al. (2008) βρήκαν ότι η ειδική ενέργεια που δαπανάται είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της τριαξονικής αντοχής σε θλίψη των πετρωμάτων, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες μελέτες για την επίδραση και άλλων παραμέτρων στην ειδική ενέργεια. Ο Ersoy (2003) έδειξε ότι ο λόγος ειδικής ενέργειας προς αντοχή σε μονοαξονική θλίψη για περιστροφικές γεωτρήσεις, με χρήση κοπτικού τριβής (PDC) και τρικωνικού κοπτικού (WC) για μία σειρά πετρωμάτων (σχιστόλιθο, μαλακό και σκληρό ψαμμίτη, ασβεστόλιθο, ιλυόλιθο), δεν παρέμεινε σταθερός αλλά κυμάνθηκε μεταξύ 0.75 με 2.90, καταδεικνύοντας με τον καλύτερο τρόπο ότι δεν επαρκεί η παράμετρος 'αντοχή σε μονοαξονική θλίψη'. Πολύ ενδιαφέροντα είναι τα δεδομένα του Ersoy (2003) για ιλυόλιθο και ασβεστόλιθο με αντοχή σε θλίψη 42 ΜΡα και 59 ΜΡα αντίστοιχα, τα οποία έδωσαν ίδιες τιμές ειδικής ενέργειας για τα δύο τύπου κοπτικά (PDC και WC), ενώ για υλικά όπως ψαμμίτης, σκληρός ψαμμίτης και σχιστόλιθος, η ειδική ενέργεια για το κοπτικό WC ήταν διπλάσια από την ειδική ενέργεια του PDC, δίδοντας το συμπέρασμα ότι υπάρχουν και άλλοι παράμετροι πέραν της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη που επηρεάζουν την ταχύτητα διάτρησης.

Η ειδική ενέργεια, όπως έχει ορισθεί ανωτέρω, θα εξαρτάται πάντα και από το μέγεθος των δημιουργούμενων τριμμάτων. Αναμένεται να είναι εξαιρετικά υψηλή για πολύ μικρά μεγέθη, καθώς απαιτείται επιπρόσθετη ενέργεια για τη λειοτρίβηση των μεγαλύτερων τριμμάτων που δεν δαπανάται στη διάτρηση, αλλά δημιουργεί ουσιαστικά τον ίδιο όγκο τριμμάτων. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος των τριμμάτων, η ειδική ενέργεια θα ελαττώνεται και θα πρέπει να ισορροπήσει σε μία σταθερή τιμή, καθώς το μέγεθος των τριμμάτων αυξάνεται συνεχώς. Αυτή η σταθερή τιμή της ειδικής ενέργειας προσδιορίζει το όριο της μέγιστης μηχανικής απόδοσης (Teale 1965). Είναι, επίσης, πολύ σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό το γεγονός ότι οι τιμές της μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη προσδιορίζονται με την αστοχία του δοκιμίου σε λίγα κομμάτια, ενώ κατά τη διάτρηση οι διαστάσεις των τριμμάτων όχι μόνον δεν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους των κόκκων, αλλά μπορεί να είναι έως και 30 φορές μικρότερες, τόσο σε συμβατικές γεωτρήσεις όσο και σε μικρογεωτρήσεις (Stavropoulou, 2006), άρα είναι φανερό ότι τις περισσότερες φορές γίνεται επανάλεση των τριμμάτων με συνέπεια να δαπανάται ενέργεια, η οποία δεν αναλώνεται στην κοπή του πετρώματος.

Ο Teale (1965), φυσικά, αναφέρει ότι η 'αντοχή σε θρυμματισμό-crushing strength' δεν είναι με κανένα τρόπο η απόλυτη μέτρηση της αντοχής του πετρώματος και θα εξαρτάται πάντα από τις πειραματικές συνθήκες, τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται, το μέγεθος και το σχήμα του δοκιμίου. Σωστότερο συνεπώς είναι να αναφέρουμε την πρόταση του Teale ότι τελικά 'η ειδική ενέργεια σχετίζεται με την αντοχή σε θρυμματισμό των πετρωμάτων, η αντοχή σε μονοαζονική θλίψη σχετίζεται με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη πρέπει κάπως να συσχετίζονται'. Το ζητούμενο φυσικά από τους μεταγενέστερους ερευνητές ήταν και εξακολουθεί να είναι ο προσδιορισμός αυτής της συσχέτισης.

Μετρήσεις επίδρασης παραμέτρων στη διατρησιμότητα των πετρωμάτων για την όρυξη διατρημάτων έχουν γίνει στο παρελθόν (Scoble et al., 1989) με την παρακολούθηση του ρυθμού διάτρησης και με τη συσχέτιση με παραμέτρους όπως την εφαρμοζόμενη δύναμη, την πίεση του νερού καθαρισμού, την ταχύτητα περιστροφής (παράμετροι που επηρεάζονται από τον χειριστή και το γεωτρύπανο) και το είδος κοπτικού και την κατάσταση του. Οι μελέτες πεδίου των ανωτέρω ερευνητών σε γεωτρήσεις άνθρακα έδειξαν ότι η ειδική ενέργεια είναι χαμηλή σε μαλακούς σχηματισμούς (π.χ. άνθρακα) και υψηλή σε σκληρούς σχηματισμούς, όπως ψαμμίτες, ενώ προτείνουν συσχέτιση της ταχύτητας διάτρησης με την αντοχή σε θλίψη.

Αξίζει να αναφερθεί η πολύ σημαντική παρατήρηση του Rabia (1986) ότι σε δοκιμές πεδίου κατά τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, η ειδική ενέργεια υπολογισμένη κατά τον ως άνω τρόπο (εξ. 7) εκτιμάται σε τιμές 1200-1300 MPa, που είναι μία με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από υπολογισμένες τιμές ειδικής ενέργειας κατά τη διάτρηση σε εργαστήρια που μπορεί να είναι ίση με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολύ αυξημένες τριβές στις γεωτρήσεις με συνέπεια μόνο ένα μέγιστο 20% της παρεχόμενης ενέργειας να μεταφέρεται στο πέτρωμα, δίδοντας έτσι πάρα πολύ υψηλές τιμές στην ειδική ενέργεια διάτρησης. Ένας επιπρόσθετος λόγος είναι ίσως και η 'επαναδιάτρηση' των τριμμάτων, που πιθανόν να γίνεται λόγω μη ικανοποιητικής αποκομιδής τους από το μέτωπο κοπής, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Αυτή η επισήμανση περαιτέρω ενισχύει το συμπέρασμα ότι η ειδική ενέργεια δεν είναι τίποτε άλλο παρά μία γεωτρητική παράμετρος και όχι μία εγγενής ιδιότητα του πετρώματος.

# 5. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Τι μας δίδει τελικά η ειδική ενέργεια και πως πρέπει να τη χρησιμοποιήσουμε; Ορισμένη ως 'η ενέργεια για την καταστροφή ορισμένου όγκου πετρώματος κατά τη διάτρηση σε συγκεκριμένο σχηματισμό με όλα τ' άλλα σταθερά', η ειδική ενέργεια πρέπει να αυξάνεται βαθμιαία με την αύξηση του βάθους λόγω φθοράς του κοπτικού, είναι δε φυσικό οι καλύτερες συνθήκες διάτρησης να επιτυγχάνονται με την ελάχιστη ειδική ενέργεια. Αποδοτική διάτρηση είναι συνεπώς η διάτρηση με τη μικρότερη δυνατή ειδική ενέργεια, άρα κοπτικά που δίδουν μικρή ειδική ενέργεια σε συγκεκριμένο σχηματισμό είναι πολύ καλή επιλογή για επόμενη διάτρηση σε ίδιο σχηματισμό, προσέγγιση που ακολουθείται συχνά σε πραγματικές γεωτρήσεις.

Η εξίσωση (7) σε συνδυασμό με την εξ. (11) δίδει

$$SE_{\iota} = \frac{W}{A} + \frac{\omega^* \mu^* W^* D/3}{R^* A} = \left(\frac{W}{A}\right) \left(1 + \frac{\omega}{3} \frac{\mu^* D}{R}\right) (15)$$

και λύνοντας ως προς R έχουμε

$$\frac{\omega}{3}\frac{\mu^*D}{R} = \frac{SE_t}{W/A} - 1 \tag{16}$$

Αγνοώντας τον δεύτερο όρο στο δεξιό μέρος της εξίσωσης, δηλ.  $S_{et} / (W/A) >> 1$ , που ισοδυναμεί ουσιαστικά με την αγνόηση του πρώτου όρου στην αρχική εξίσωση (7) και τη σχέση  $SE_t \approx SE_T$ , πράγμα αληθές αφού έχει αποδειχθεί ότι τούτο αποτελεί μόνο 2-3% του συνολικού, η εξ. (16) μπορεί τελικά να γραφεί ως,

$$\frac{\omega^* D}{3} \frac{1}{R} = \frac{SE_T / \mu}{W / A} \tag{17}$$

Αντικαθιστώντας την επιφάνεια κοπής και εκφράζοντας τη γωνιακή ταχύτητα ως ταχύτητα περιστροφής N,

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \tag{18}$$

και λύνοντας ως προς εφαρμοζόμενο βάρος έχουμε τελικά,

$$W = \left(\frac{SE_T}{\mu}\right) \left(\frac{45}{2} \frac{D^* R}{N}\right) = \left(\frac{SE_T}{\mu}\right) (X)$$
(19)

όπου η παράμετρος ταχύτητας διάτρησης Χ δίδεται από

$$X = \frac{45}{2} \frac{D^* R}{N} \tag{20}$$

με διαστάσεις [L<sup>2</sup>].

Η εξίσωση (19) είναι διαστατικά σωστή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε σύστημα μονάδων. Σε μετρικό σύστημα με χρήση για D σε m, W σε N, R σε m/s, A σε m<sup>2</sup>, δίδει τη SE<sub>T</sub> σε J/m<sup>3</sup> ή N/m<sup>2</sup> δηλαδή Pa. Στο σύστημα μονάδων γεωτρήσεων με D σε in., A σε in<sup>2</sup>, W σε lb<sub>p</sub>, R σε in/s, δίδει SE<sub>T</sub> σε lb<sub>p</sub>/in<sup>2</sup> δηλαδή psi, ήτοι τις αντίστοιχες μονάδες πίεσης.

Απεικόνιση της εξίσωσης (19) σε διάγραμμα X-W θα δώσει ευθεία γραμμή με κλίση SE<sub>T</sub>/μ, δηλαδή η κλίση της καμπύλης εμπεριέχει ιδιότητες του πετρώματος, ικανότητες του διατρητικού εξοπλισμού και μεταφερσιμότητα της ενέργειας από το γεωτρύπανο στο πέτρωμα. Ατυχώς, δεν υπάρχουν διαθέσιμα περαιτέρω μοντέλα που να δίδουν επιπρόσθετες εξισώσεις, η επίλυση των οποίων μπορεί να δώσει περισσότερα στοιχεία για τις παραμέτρους αυτές και για τον λόγο αυτό η έρευνα στον τομέα αυτό συνεχίζεται, όπως φαίνεται και από πρόσφατες δημοσιεύεις (Stavropoulou 2006; Detournay et al. 2008).

Έχουν φυσικά προταθεί διάφορα μοντέλα που επιδιώκουν να δώσουν τις απαιτούμενες πρόσθετες εξισώσεις, αλλά δεν είναι επαρκή, κυρίως, διότι αποτελούν μία πολύ γενική προσέγγιση του πολύπλοκου αυτού φαινομένου, όπως για παράδειγμα τα μοντέλα των Lubinski and Woods (1953), Rollins (1959), McLemore (1971) και Hareland and Rampersand (1994) για γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, ενώ για μεταλλευτικές γεωτρήσεις μπορούμε να αναφέρουμε το μοντέλο Sinkala (1991).

Οι ερευνητές αυτοί παρουσιάζουν μοντέλα στηριγμένα κυρίως σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού και σε ισοζύγια μάζας για την αφαίρεση του όγκου των πετρωμάτων μη εστιάζοντας στην αλληλεπίδραση κοπτικού-πετρώματος παρά μόνο εξισώνοντας την εφαρμοζόμενη δύναμη με την αντοχή του πετρώματος.

Πρόσφατα η Stavropoulou (2006) έδωσε μία καλύτερη συσχέτιση αλληλεπίδρασης κοπτικού – πετρώματος (μάρμαρο) αλλά για συνθήκες μικροδιάτρησης, η οποία αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω για κλιμάκωση σε κανονικές συνθήκες διάτρησης.

Μοντέλο προσεγγιστικής εκτίμησης της διατρησιμότητας των πετρωμάτων με χρήση πειραματικών δεδομένων για κοπτικά τριβής έχει παρουσιαστεί, επίσης, και από Detournay and Defournay (1992) και Detournay et al. (2008) που χρησιμοποιεί, όμως, γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κοπτικού και απαιτεί την ύπαρξη γεωτρητικών δεδομένων ενώ χρησιμοποιεί εξίσωση της μορφής της εξίσωσης (11) για τη σχέση δύναμης – ροπής για να καταλήξει σε μοντέλο του τύπου της εξίσωσης (19). Αξιοσημείωτο ότι παρουσιάζεται μοντέλο τριών περιοχών, σύμφωνα με τα παρατηρούμενα στο Σχήμα 1.

Συνεπώς, ακόμη και το πλέον πρόσφατο προταθέν μοντέλο αδυνατεί να συσχετίσει τον μικρόκοσμο (αλληλεπίδραση κοπτικού – πετρώματος) με τον μακρόκοσμο, τον ρυθμό διάτρησης.

Η ως άνω προσέγγιση συσχέτισης παραμέτρου X - Βάρους εφαρμόστηκε σε διάφορα πειραματικά δεδομένα από περιστροφικές γεωτρήσεις που πάρθηκαν από τη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στα επόμενα διαγράμματα ως μία προσπάθεια αναζήτησης και ανάλυσης της πληροφορίας που εμπεριέχεται στην κλίση της καμπύλης της εξίσωσης (19), όπως περιγράφτηκε ανωτέρω.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 6α παρουσιάζονται δεδομένα από Black et al. (2008). Στο σχήμα αυτό έχουμε δεδομένα για διαφοροποίηση της ταχύτητας διάτρησης σε ψαμμίτη με τη χρήση διαφορετικών πολφών συναρτήσει του βάρους στο κοπτικό, διατηρώντας όλες τις υπόλοιπες διατρητικές παραμέτρους σταθερές.

Έχοντας το ίδιο πέτρωμα και το ίδιο κοπτικό, ο συντελεστής τριβής μ είναι ίδιος, άρα η όποια διαφοροποίηση ως προς την κλίση θα μας δώσει διαφοροποίηση ως προς την ειδική ενέργεια, που θα οφείλεται στη χρήση διαφορετικού πολφού.







Συνεπώς, με τα δεδομένα για το ορυκτέλαιο και νερό ουσιαστικά να δίδουν παρόμοια κλίση ίση με ~ 42.000 – 45.000 psi (280 με 310 MPa) με το συγκεκριμένο κοπτικό και στο ίδιο πέτρωμα η παράμετρος (ειδική ενέργεια/συντελεστή τριβής) είναι η ίδια.

Αντίθετα, για τον πολφό πυκνότητας 1.32 g/cm<sup>3</sup> η κλίση είναι τριπλάσια από την αντίστοιχη με το νερό πυκνότητας 1.0 g/cm<sup>3</sup>.

Οπωσδήποτε, η συμβατική γραφική παράσταση R-W, όπως στο Σχήμα 6-β, δίδει αντίστοιχη με την επισημανθείσα διαφοροποίηση ως προς την επίπτωση χρήσης διαφορετικού πολφού, αλλά με την παράσταση των δεδομένων σύμφωνα με τον προτεινόμενο τρόπο (Σχήμα 6α), δίδεται και η φυσική σημασία της όποιας διαφοροποίησης στα δεδομένα.





Αντίστοιχη μελέτη μπορεί να γίνει και στα δεδομένα από Hoover and Middleton (1981) που παριστάνονται στο Σχήμα 7 με δεδομένα για Nugget ψαμμίτη, αντοχής σε μονοαζονική θλίψη ίση με 124 MPa (18000 psi) με το ίδιο κοπτικό (Smith) και τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες με διαφοροποίηση μόνο στην περιστροφική ταχύτητα. Τα δεδομένα δείχνουν ότι η κλίση δεν είναι ίδια για τη συγκεκριμένη δοκιμή για τις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής παρά το γεγονός ότι λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση (19), άρα η περιστροφική ταχύτητα επηρεάζει πολύ περισσότερο απ' ότι φαίνεται στην εξίσωση (19), καθώς η κλίση στα 500 rpm είναι 3.4 φορές μεγαλύτερη από την κλίση στα 100 rpm. Παρατηρείται, όμως, η ίδια συμπεριφορά και σε περίπτωση άλλου κοπτικού;



- Σχήμα 7. Σχέση παραμέτρου ρυθμού διάτρησης βάρους για ψαμμίτη Nugget με κοπτικό τριβής PDC από εταιρεία Smith με χαρακτηριστικά: σώμα χαλύβδινο, 26 δόντια, γωνία -20<sup>0</sup> (από Hoover & Middleton 1981).
- Figure 7. Relation between X-parameter and Weight for Nugget sandstone, using PDC bit, steel body, 26 teeth, angle -20° [from 23].

Τα δεδομένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, δίδουν την ίδια τάση, αλλά με κλίση περίπου 2.4 φορές μεγαλύτερη με τα χαρακτηριστικά του κοπτικού να αναφέρονται στη λεζάντα του σχήματος.



- Σχήμα 8. Σχέση παραμέτρου ρυθμού διάτρησης βάρους για ψαμμίτη και με κοπτικό τριβής PDC από εταιρεία American Coldset με χαρακτηριστικά: σώμα μήτρας (Matrix body), 35 δόντια, γωνία -20<sup>0</sup> (από Hoover & Middleton 1981).
- Figure 8. Relation between X-parameter and Weight for sandstone with PDC bit [from 23].

Συγκρίνοντας τώρα την απόδοση του ίδιου κοπτικού κάτω από τις ίδιες συνθήκες υδραυλικής και ταχύτητας περιστροφής, αλλά σε διαφορετικά πετρώματα π.χ Crab Orchard ψαμμίτη με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ίση με 143 MPa (20800 psi) και ψαμμίτη Nugget με αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ίση με 124 MPa, βλέπουμε (Σχήμα 9) ότι η διατρητική διεργασία είναι κατά 1.5 φορές αποδοτικότερη στο πέτρωμα με αντοχή 15% φορές μικρότερη.



- Σχήμα 9. Σχέση παραμέτρου ρυθμού διάτρησης-βάρους για διαφορετικό πέτρωμα, ίδιο κοπτικό (Smith) στα 500 rpm (από Hoover & Middleton 1981).
- Figure 9. Relation between X-parameter and Weight for different rock, same bit (Smith) at 500 RPM [from 23].

Εργαστηριακά δεδομένα από μεταλλευτική βιομηχανία για διάφορα πετρώματα (Ersoy, 2003) και για κοπτικά τριβής (PDC) δίδουν αντίστοιχα μια όχι ολοκληρωμένη εικόνα για την πρόβλεψη της διατρησιμότητας, καθώς υπάρχουν διαφορές ως προς την κλίση αλλά δεν είναι προφανές το πως συσχετίζονται οι διαφορές με τις ιδιότητες των πετρωμάτων (Σχήμα 10α).



Σχήμα 10α. Δεδομένα για κοπτικά τριβής από εξορυκτική βιομηχανία (Ersoy 2003).

Figure 10a. Drilling data for PDC bits from mining [from 18].

Παρατηρούμε ότι οι κλίσεις για ιλυόλιθο και ασβεστόλιθο 43 και 61 MPa είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, που δίδονται από τον συγγραφέα ως 42.6 MPa και 59.7 MPa αντίστοιχα, ενώ για τον ψαμμίτη η κλίση είναι 45 MPa, ενώ η αντοχή δίδεται ως 85.2 MPa. Επίσης, για τον σκληρό ψαμμίτη δίδεται μεγαλύτερη κλίση ίση με περίπου 202 MPa 15% περισσότερη από την αντοχή του πετρώματος (175.1 MPa).



Σχήμα 10β. Δεδομένα για κοπτικά τριβής από εξορυκτική βιομηχανία για σκληρό ψαμμίτη (Ersoy 2003).

Figure 10b. Data for PDC bits from mining for strong sandstone [from 18] Αναλύοντας τα δεδομένα για τον σκληρό ψαμμίτη (Σχ. 10β) και επισημαίνοντας το γεγονός ότι υπάρχουν δύο σημεία εκτός κανονικής γραμμικής σχέσης, που, αν τα αφαιρέσουμε, λαμβάνεται κλίση ίση με 425 MPa (είναι η γραμμή y\_4), που είναι σχεδόν τετραπλάσια από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.

Άρα η ειδική ενέργεια είναι κατά πολύ υψηλότερη σε σκληρό ψαμμίτη απ' ότι στα άλλα πετρώματα, ενώ η συμπεριφορά του συγκεκριμένου κοπτικού είναι διαφορετική μεταξύ ψαμμιτών και μη ψαμμιτών.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εφαρμογή της προτεινόμενης ανάλυσης σε δεδομένα μικροδιάτρησης με το εργαλείο micro-drilling που χρησιμοποιείται για ημι-μηκαταστροφικές μεθόδους ανάλυσης πετρωμάτων μνημείων (Stavropoulou, 2006).

Δεδομένα ήταν διαθέσιμα για ροπή, βάρος στο κοπτικό και ταχύτητα διάτρησης (Tsouvala, 2007) με κοπτικό τριβής PDC διαμέτρου 5 mm. Έχοντας δεδομένα ροπής το συγκεκριμένο διάγραμμα παριστά την παράμετρο ταχύτητας ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης κάθετης δύναμης (Σχήμα 11) για δύο πετρώματα, ασβεστόλιθο και μάρμαρο Carrara (τύπος Cervaiole) με το πρώτο να έχει αντοχή ίση με 15.4 MPa και το δεύτερο να έχει αντοχή ίση με 113.9 MPa (περισσότερα δεδομένα για τα πετρώματα δίδονται στην αρχική πηγή).



Σχήμα 11. Παρουσίαση δεδομένων μικρογεωτρήσεων. Κοπτικό τριβής 5 mm, ταχύτητες περιστροφής μεταξύ 200 και 900 rpm (από Tsouvala, 2007).

Παρατηρούμε ότι για τον μαλακό ασβεστόλιθο η κλίση είναι της τάξης των 25 MPa, διπλάσια της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, ενώ για το πολύ σκληρότερο μάρμαρο υπάρχει κλίση της τάξης 900 MPa, ήτοι 7.5 φορές μεγαλύτερη από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Επισημαίνεται ότι παρά την απεικόνιση σημείων με διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής που κυμάνθηκαν μεταξύ 200 και 900 rpm και για τα δύο πετρώματα, όλα τα σημεία μπορούν να περιγραφούν με τη γραμμική σχέση υποδηλώνοντας ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η εξάρτηση της ταχύτητας

Figure 11. Microdrilling data, with a fixed-cutter bit 5 mm, rpm between 200 and 900 [from48].

διάτρησης από την ταχύτητα περιστροφής λαμβάνεται σωστά υπόψη.

Με εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου αναλύονται δεδομένα από Tsoutrelis (1969) για πέντε τύπους πετρωμάτων σε εργαστηριακή διάτρηση με αδαμαντοκορώνα διαμέτρου 36.4 mm, που παρουσίασαν πλήρη γραμμική σχέση μεταξύ φορτίου και ταχύτητας διάτρησης, Σχ. 12.



Σχήμα 12. Πρωτογενή δεδομένα βάρους – ρυθμού διάτρησης (Tsoutrelis 1969).



Η ως άνω παρουσίαση δεν δίδει κάτι ουσιαστικό για την κλίση και ο Tsoutrelis (1969) προχώρησε στη διατύπωση γραμμικής εξίσωσης συσχέτισης των παραμέτρων (βάρους – ρυθμού διάτρησης) για τα διαφορετικά πετρώματα. Θεώρηση, όμως, των ίδιων δεδομένων σύμφωνα με την προτεινόμενη προσέγγιση δίδει το Σχήμα 13 με τις γραμμικές εξισώσεις να φαίνονται στο διάγραμμα μαζί με τις αντίστοιχες κλίσεις.

Παρατηρείται ότι οι κλίσεις κυμαίνονται από 109 MPa για τον γρανίτη έως 18.5 MPa για τον δακίτη, ενώ οι αναφερόμενες τιμές μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη κυμαίνονται μεταξύ 130 MPa και 50 MPa και είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

Ενδιαφέρουσα είναι η απεικόνιση και η συσχέτιση μεταξύ της κλίσης των προτεινόμενων διαγραμμάτων και της αντοχής των πετρωμάτων, που παριστάται στο Σχήμα 14. Παρατηρείται μία εκθετική συσχέτιση και μη γραμμική που σημαίνει ότι για τα σκληρότερα πετρώματα η κλίση της καμπύλης, ειδική ενέργεια διαιρούμενη με τον συντελεστή τριβής, πλησιάζει αρκετά την τιμή της αντοχής των πετρωμάτων σε μονοαξονική θλίψη όσο, όμως, τα πετρώματα γίνονται λιγότερο σκληρά, τότε υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες στη διάτρηση και η ειδική ενέργεια είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.



Σχήμα 13. Δεδομένα από Tsoutrelis (1969) που παρουσιάζονται σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο.



Figure 13. Data from [47] according to the proposed methodology.

- Σχήμα 14. Συσχέτιση κλίσης των διαγραμμάτων του Σχήματος 13 με την αντοχή σε θλίψη των συγκεκριμένων πετρωμάτων για δεδομένα από Tsoutrelis (1969).
- Figure 14. Relationship between slopes from Figure 13 and UCS [from 47].

Ανάλυση πρόσφατων δεδομένων για σχιστόλιθους (Detournay et al. 2008) με την προτεινόμενη μέθοδο δίδει ενδιαφέροντα αποτελέσματα (Σχήμα 15).



Σχήμα 15. Παρουσίαση αποτελεσμάτων διάτρησης σχιστόλιθου με κοπτικό τριβής 76,2 mm, ταχύτητα περιστροφής 60 rpm (Detournay et al. 2008).

Figure 15. Shale drilling data with fixed-cutter bit, 76.2 mm, 60 rpm [from 14].

Τα δεδομένα δίδουν μία κλίση 457 MPa και οι ερευνητές δίδουν τιμές ειδικής ενέργειας ίσης με 162 MPa (τυπική απόκλιση 22 MPa). Βάσει των τιμών αυτών μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής τριβής ως 162/457=0.327 πολύ κοντά σε αναφερόμενες τιμές της τάξης του 0.32.

### 6. ΑΛΛΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ

Υπάρχει πληθώρα μελετών τόσο για γεωτρήσεις μεταλλευτικής βιομηχανίας, όσο και για γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, που προσπαθούν να συσχετίσουν τον ρυθμό διάτρησης με επιμέρους παραμέτρους και όχι μέσω της παραμέτρου της ειδικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην πρώτη περίπτωση. Για γεωτρήσεις μεταλλευτικής βιομηχανίας ο Thuro (1997) ορίζει ως διατρησιμότητα πετρωμάτων την ταχύτητα διάτρησης και την επίπτωση της διάτρησης στη λειτουργία του κοπτικού, ήτοι στη φθορά του. Για παράδειγμα, ορίζει ως καλή διατρησιμότητα τις περιπτώσεις με ταχύτητες διάτρησης 3-4 m/min και διάρκεια ζωής του κοπτικού 1500 – 2000 m.

Με μια σειρά μελετών ο Thuro (1997) βρήκε εξαιρετική αντίστροφη γραμμική συσχέτιση μεταξύ του πορώδους ψαμμιτών και παραμέτρων διάτρησης (Σχήμα 16), ενώ με εργαστηριακές μετρήσεις πιστοποιήθηκε πάλι η ανάστροφη αλλά μη γραμμική σχέση αντοχής μεταξύ πορώδους και αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.



 Σχήμα 16. Αντίστροφη γραμμική συσχέτιση ταχύτητας διάτρησης – πορώδους για ψαμμίτες (από Thuro, 1997).
 Figure 16. Reverse linear relationship between rate of penetration and void fraction for sandstones [from 46].

Εξετάζοντας τον μηχανισμό διάτρησης είναι φανερό ότι πέραν της αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό (για την κρουστική διάτρηση) και σε διάτμηση (περιστροφική διάτρηση), τα ελαστικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων πρέπει να είναι εξίσου σημαντικά, με συνέπεια τη διαφορετική συμπεριφορά ψαθυρών και ανθεκτικών (tough) πετρωμάτων. Οι Thuro και Spaun (1996b) όρισαν μία νέα παράμετρο, το ειδικό έργο καταστροφής  $W_{z}$ , ως τη μέτρηση για την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την καταστροφή δοκιμίου πετρώματος, ή με άλλα λόγια, το έργο που απαιτείται για να δημιουργηθούν νέες επιφάνειες (ή ρωγμές) στο πέτρωμα κατά την εργαστηριακή δοκιμή συμπεριλαμβάνοντας και το τμήμα μετά την αστοχία του πετρώματος. Τούτο φαίνεται στο Σχήμα 17 να είναι η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, που είναι διαφορετική για ψαθυρά και ανθεκτικά πετρώματα.

Οι Thuro και Spaun (1996b), έκαναν χρήση της νέας παραμέτρου σε δεδομένα περιστροφικής-κρουστικής διάτρησης με διατρητικό Atlas Copco 1440 ισχύος 20 kW και βρήκαν καλή συσχέτιση μεταξύ ρυθμού διάτρησης και έργου καταστροφής (Σχήμα 18) για τα πετρώματα που αναφέρονται στο σχήμα.

Αναφέρουν, επίσης, ότι δεν βρήκαν αντίστοιχα τόσο καλή συσχέτιση με την αντοχή σε μονοαζονική θλίψη (Σχήμα 19), αν και τα στοιχεία των διαγραμμάτων δεν παρουσιάζουν πραγματικά μεγάλη διαφορά και ίσως για τον λόγο αυτό η προταθείσα νέα παράμετρος δεν χρησιμοποιείται ευρέως στην ερευνητική κοινότητα, καθώς βρέθηκαν μόνο επτά αναφορές από το 1996.



- Σχήμα 17. Ορισμός έργου καταστροφής για ψαθυρά και ανθεκτικά (tough) πετρώματα σε διάγραμμα τάσης - διάτμησης (από Thuro και Spaun, 1996b).
- Figure 17. Definition of 'destruction work' for brittle and tough rocks, in a stress-strain diagram [from 45].

Μία ουσιαστική παρατήρηση είναι αναγκαία ως προς τον ορισμό του ειδικού έργου καταστροφής, που σύμφωνα με τους Thuro και Spaun (1996b) δίδεται από

$$W_{z} = \int \sigma d\varepsilon \tag{21}$$

όπου οι αναφερόμενες τιμές στα διαγράμματα είναι της τάξης των 100 kJ/m<sup>3</sup>. που ισοδυναμούν με 0.1 MPa πολύ χαμηλότερες από τις τιμές είτε της ειδικής ενέργειας που αναφέρθηκαν ανωτέρω είτε της αντοχής σε θλίψη.



Σχήμα 18. Συσχέτιση ρυθμού διάτρησης και έργου καταστροφής (Thuro & Spaun, 1996a).

Figure 18. Relationship between rate of penetration and destruction work [from 44].



Σχήμα 19. Συσχέτιση ρυθμού διάτρησης και αντοχής πετρωμάτων (Thuro, 1997)

Figure 19. Relationship between rate of penetration and rock strength [from 46].

Στις διαφορετικές προσεγγίσεις αναζητείται μια νέα ιδιότητα των πετρωμάτων, που θα υποδηλώνει και θα περιγράφει την ψαθυρότητα, τη σκληρότητα των πετρωμάτων αλλά και την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για δημιουργία νέων ρωγμών στο πέτρωμα (Thuro και Spaun, 1996b), ενώ θα μπορούσε να συμπεριλάβει και τις ασυνέχειες του πετρώματος. Τέτοιες προσπάθειες έχουν γίνει από αρκετούς ερευνητές χωρίς, όμως, μεγάλη επιτυχία. Για παράδειγμα, ο Altindag (2004) προσπάθησε να βρει συσχέτιση με το μέγεθος των δημιουργούμενων τριμμάτων χωρίς σημαντική επιτυχία. Οι όροι ψαθυρότητας που προσδιορίζονται βάσει των παραμέτρων αντοχής σε θλίψη σ<sub>c</sub> και αντοχής σε εφελκυσμό σ<sub>T</sub> (Brazilian δοκιμή) έχουν, επίσης, χρησιμοποιηθεί από Altindag (2003), που όρισε τις παραμέτρους

$$B_1 = \frac{\sigma_c}{\sigma_T}, \ B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_T}{\sigma_c + \sigma_T}, \ B_3 = \frac{\sigma_c * \sigma_T}{2}$$
(22).

Ανάλυση δεδομένων διατρησιμότητας πετρωμάτων δεν έδωσε ικανοποιητικές συσχετίσεις μεταξύ του ρυθμού διάτρησης R ή της ειδικής ενέργειας και των παραμέτρων  $B_j$  ή  $B_2$ , ενώ μία σχετικά καλή συσχέτιση του R με  $B_3$  φαίνεται να υπάρχει για τις συγκεκριμένες φυσικά συνθήκες, αλλά με χαμηλό συντελεστή συσχέτισης.

#### 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχει δυνατότητα αξιοποίησης των διατρητικών δεδομένων από γεωτρήσεις υδρογονανθράκων για ανάλυση μοντέλων πρόβλεψης διατρησιμότητας των πετρωμάτων για εξορυκτικές γεωτρήσεις και αντίστροφα.

Πολλές από τις προταθείσες προσεγγίσεις δεν παρουσιάζουν μοντέλα ικανοποιητικής περιγραφής της αλληλεπίδρασης κοπτικού – πετρώματος που να εμπεριέχουν κατάλληλα μοντέλα αστοχίας των πετρωμάτων λόγω της ιδιαίτερης πολυπλοκότητας του φαινομένου.

Η χρήση της ειδικής ενέργειας παρέχει τη δυνατότητα για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση στην ανάλυση των διατρητικών δεδομένων. Αναδεικνύεται δε σε γεωτρητική παράμετρο και όχι σε εγγενή ιδιότητα των πετρωμάτων.

Προτείνεται ένας νέος τρόπος ανάλυσης και παρουσίασης των διατρητικών δεδομένων στον χώρο (παράμετρος ταχύτητας Χ – Βάρος) με την παράμετρο Χ να δίδεται από την εξίσωση (20) που εμπεριέχει την ταχύτητα διάτρησης, τη διάμετρο του κοπτικού και την ταχύτητα περιστροφής. Η κλίση της γραμμής είναι ανάλογη της ειδικής ενέργειας και αντιστρόφως ανάλογη του συντελεστή τριβής, αντιπροσωπεύει δε ουσιαστικά το μοντέλο αλληλεπίδρασης κοπτικού – πετρώματος.

Αναλύονται αρκετά διαφορετικά βιβλιογραφικά δεδομένα και προκύπτει η φυσική σημασία της επίδρασης των διαφορετικών παραμέτρων αλλά δεν επιτυγχάνεται η πλήρης ανάλυση. Απαιτείται ένα μοντέλο που να περιγράφει επαρκώς την αλληλεπίδραση κοπτικού – πετρώματος σε διαφορετικές συνθήκες διάτρησης έτσι ώστε να συνδεθεί ο μικρόκοσμος (αλληλεπίδραση κοπτικού και πετρώματος) με τον μακρόκοσμο, την ταχύτητα διάτρησης και την παρεχόμενη από το γεωτρύπανο ενέργεια.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Akgun F., 2007. Drilling rate at the technical limit, Int. J. Petroelum Sci. and Technol., 1, 99-118.
- Akin J.E., N.R. Dove, S.K. Smith, V.P. Perrin, 1997. New nozzle hydraulics increase ROP for PDC and rock bits, paper SPE/IADC 37578 presented at the Drilling Conference,

Amsterdam, 4-6 March.

- Akun M.E., C. Karpuz, 2005. Drillability studies of surface-set diamond drilling in Zonguldak region sandstones from Turkey, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sci., 42, 473-479
- Altindag R., 2003, Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting, J. S. African Inst. Mining and Mettallurgy, April, 163-172.
- Altindag R., 2004. Evaluation of drill cuttings in prediction of penetration rate by using coarseness index and mean particle size in percussive drilling, Geotechnical and Geological Engineering 22, 417–425.
- Besson A., B. Burr, S. Dillard, E. Drake, E. Ivie, C. Ivie, R. Smith, G. Watson, 2000. On the cutting edge, Oilfield Review, Autumn, 36-57.
- Bilgin N., 1982. The cuttability of evaporates, Bull. IAEG, 25, 85-90.
- Bilgin N., S. Kahraman, 2003. Drillability prediction in rotary blast hole drilling, paper presented at the 1<sup>st</sup> Intern. Mining Congress and Exhibition, Turkey-IMCET
- Black A.D., R.G. Bland, D.A. Curry, L.W. Ledgerwood, H.A. Robertson, A. Judzis, U. Prasad, T. Grant, 2008. Optimization of deep drilling performance with improvements in drill bit and drilling fluid design, paper IADC/SPE 112731 presented at the Drill. Conference and Exhibition, Orlando Fl, 4-6 Mar.
- Caicedo HU, WM Calhoun, RT Ewy, 2005. Unique ROP predictor using bit specific coefficient of sliding friction and mechanical efficiency as a function of confined compressive strength impacts drilling, paper SPE/IADC 92576 presented at the Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 23-25 Feb.
- Cheatham, C.A., J.J. Nahm, 1985. Effects of Selected Mud Properties on Rate of Penetration in Full-Scale Shale Drilling Simulations, paper SPE 13465 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, 5-8 March 1985, New Orleans, Louisiana
- Curry D., H. Christensen, M. Fear, A. Govzitch, B. Huges, L. Aghazada, 2005. Technical limit specific energy; an index to facilitate drilling performance evaluation, paper SPE/IADC 92318, Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25.
- Detournay E., P. Defournay, 1992. A phenomenological model of the drilling action of drag bits, Int. J. Rock Mech Min Sci, 29, 13-23.
- Detournay E., C.P. Tan, 2002. Dependence of drilling specific energy on bottom hole pressure in shales, paper SPE/ISRM 78221 presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving TX 2-23 Oct.
- Detournay E., T. Richard, M. Shephard, 2008. Drilling response of drag bits: Theory and experiment, Int. J Rock Mech Min Sci, 45, 1347-1360.
- Duklet C.P., T.R. Bates, 1981. Predicting diamond bit drilling rates, World Oil April, 117-125.
- Dupriest F.E., W.L. Koederitz, 2005. Maximizing drill rates with real time surveillance of mechanical specific energy, paepr SPE 92194, presented ath the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Feb. 23-25.
- Dupriest F.E., 2006. Comprehensive drill management process to maximize rate of penetration, paper SPE 102210, presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, Sept. 24-27.
- Ersoy A., 2003. Automatic drilling control based on minimum drilling specific energy using PDC and WC bits, Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A), 112, A86-A96.

- Exadaktylos G., M. Stavropoulou, G. Xiroudakis, M. de Broissia and H. Schwarz, 2008. A spatial estimation model for continuous rock mass characterization from the specific energy of a TBM, Journal Rock Mechanics and Rock Engineering, 41, 797-834.
- Falkoner I.G., T.M. Burgess, M.C. Sheppard, 1988. Separating bit and lithology effects from drilling mechanics data, paper IADC/SPE 17191, Drilling Conference, TX, Feb.
- Fear M.J., 1996. How to improve rate of penetration in field operations, paper IADC/SPE 35107, Drilling Conference, New Orleans, LA, March 12-15.
- Hareland G. and P.R. Rampersad, 1994. Drag bit model including wear, SPE paper 26957, presented at 1994 Latin American/Carribean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, Argentina, 27 – 29 April.
- Hoover E.R., J.N. Middleton, 1981. Laboratory evaluation of PDC drill-bits under high-speed and high-wear conditions, J. Petroleum Tech., paper SPE 10326, 33 (12) 2316-2321.
- 25. Kaiser M.J., 2007. A survey of drilling cost and complexity estimation models, Int. J. Petrol. Sci. Technol. 1, 1-22.
- 26. Kelessidis V.C. and A. Mavromatidis, 2005. Το πετρέλαιο βρίσκεται μόνο με γεωτρήσεις, Ομιλία στην Ημερίδα του IENE – Έρευνα και Ανάπτυξη Υδρογονανθράκων, Αθήνα, 23 Ιουνίου.
- Koederitz W.L., J. Weis, 2005. A real time implementation of MSE, paper AADE-05-NTCE-66 presented at AADE National technical Conference and Exhibition, Houston, TX, April 5-7.
- Liu, H. and K. Karen Yin (2001). Analysis and Interpretation of Monitored Rotary Blasthole Drill Data, International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 15:3,177 — 203
- Lubinski A., A. B. Woods, 1953. Factors affecting the angle of inclination and dog-legging in rotary bore holes, API Drilling and Production Practices, pg. 222-250.
- 30. McLamore R.T., 1971. The role of rock strength anisotropy in natural hole deviation, paper SPE 3229, JPT, Nov. 1313-1321.
- Pessier R.C., M.J. Fear, 1992. Quantify common drilling problems with mechanical specific energy and bit-specific coefficient of sliding friction, paper SPE 24584, presented at the 67th Annual Technical Conference and Exhibition, Washington DS, Oct. 4-7
- 32. Rabia H., 1985. A unified prediction model for percussive and rotary drilling, Mining Sci and Technology, 2, 207-216.
- Rabia H, 1986. Specific energy as a criterion for bit selection, JPT, July, paper SPE 12355, 1225-1229.
- Rao K.U.M., A. Bhatnagar, B. Misra, 2002. Laboratory investigations on rotary diamond drilling, Geotech. Geol. Engr. 20, 1-16.
- Rollins, H.M., 1956. Studies of straight hole drilling practices, 1952-1956, API Drilling and Production Practice, 37-95, Presented at the Spring meeting of the Southwestern District, Fort Worth. Texas, March
- Rowley D.S., F.C. Appl, 1969. Analysis of surface set diamond bit performance, JPT, Sept. 301-310
- Rowsell P.J., M.D. Walker, 1980. Automatic Optimization of rotary drilling parameters, Trans. Inst. Min. Metall. Section A: Min. Industry, 99, A65-72.
- Schlumberger Data and Consulting services, 2005. Benchmarking deep drilling final report, Task FT50201H, Dept. Energy.
- 39. Scoble M.J., J. Peck, C. Hendricks, 1989. Correlation between rotary drill performance parameters and borehole geophysical

logging, Mining Sci Tech, 8, 301-312.

- Sinkala T., 1991. Relating drilling parameters at the bitrock interface: theoretical and field studies, Min. Sci. and Technology 12, 67-77.
- Smith J.R., 1998. Addressing the problem of PDC bit performance in deep shales, paper IADC/SPE 47814, Asia Pacific Drilling Conference, Jakarta, Indonesia, Sept. 7-9.
- Smith J.R., 2000. Performance Analysis of Deep PDC Bits Runs in Water-Base Muds, ETCE 2000, ASME - Drilling Technology Symposium, Houston, TX, February 14-17.
- 43. Solano J. 2004, Evaluation of new methods for processing drilling data to determine the cause of changes in bit performance, M.Sc. Thesis, Louisiana State Univ., May.
- Standifird W.B., K. Paine, M.D. Matthews, 2004. Improving drilling success requires better technology and models, World Oil, 225, 51-56.
- Stavropoulou M., 2006. Modeling of small diameter rotary drilling tests on marbles, Int. J. Rock Mechanics & Mining Sci. 43, 1034-1051.
- 46. Taylor M.R., A.D. Murdock, S.M. Evans, 1999. High penetration rates and extended bit life through revolutionary hydraulic and mechanical design in PDC drill bit development, SPE Drill. & Completion 14 (1) 34-41.
- Teale R., 1965. The concept of specific energy in rock drilling, Int. J. Rock Mechanics and Mining, 2, 57-73
- Thuro K., G. Spaun, 1996a. Drillability in hard rock and blast tunneling. Felsbau 14: 103-109.
- Thuro K., G. Spaun, 1996b. Introducing 'destruction work' as a new rock property of toughness reffering to drillability in conventional drill- and blast tunneling. In. Barla G (ed) Eurock '96. Prediction and performance in rock mechanics and rock engineering, Vol. 2, Balkema, Rotterdam, pp. 707-713.

- Thuro K., 1997. Drillability prediction geological influences in hard rock drill and blast tunneling, Geol. Rundsh, 86, 426-438.
- Tsoutrelis C.E., 1969. Determination of the compressive strength of rock in situ or in test blocks using a diamond drill, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 6, 311-321.
- 52. Tsouvala S., 2005. Πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς πετρωμάτων κατά την περιστροφική διάτρηση, Διπλ. Διατριβή, Πολ. Κρήτης, σελ. 83.
- 53. Walker B.H., A.D. Black, W.P. Klauber, T. Little, M. Khodaverdian, 1986. Roller bit penetration rate response as a function of rock properties and well depth, paper SPE 15620 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, Oct. 5-8.
- Warren TM, WK Armagost, 1986. Laboratory drilling performance of PDC bits, paper SPE 15617 presented at the 61st Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, Oct. 5-8.
- Warren T.M., 1987. Penetration rate performance of roller-cone bits, paper SPE 13259, SPE Drill. Engr. March, 9-18.
- 56. Waughman R.J., J.V. Kenner, R.A. Moore, 2002. Real time specific energy monitoring reveals drilling inefficiency and enhances the understanding of when to pull worn PDC bits, paper IADC/SPE 74520 presented at the APE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, Feb. 26-28.
- Wells M., T. Marvel, C. Beurshausen, 2008. Bit balling mitigatin in PDC bit design, paper IADC/SPE 114673 presented at the Asia/Pasific Drilling Conf, and Exhibition, Jakarta Indonesia, 25-27 Aug.
- Ziaja M., 2005. Model of the impregnated diamond bits, Paper AADE-05-NTCE-55 presented at the 2005 AADE National Technical Conference, Houston, TX, April 5-7.

Extended summary

# **Prediction of Rock Drillability for Exploration Drilling for Minerals and Hydrocarbons – how close are we ?**

#### Vassilios C. Kelessidis

Associate Professor, Technical University of Crete

Abstract

In this article an analysis is presented of the suggested equations that predict rock drillability in exploration drilling for minerals and hydrocarbons. What then becomes evident is the unsuccessful attempts to date, because the phenomenon is very complex and involves the interaction of the rock bit and the rock. At the same time it becomes essential that drilling data from the lab and the field should be fully exploited. Use of specific energy, the energy spent by the drilling rig per unit volume of rock, allows us to some extent to predict rock drillability, especially when comparable data for calibration exist. In this paper a new way of analyzing and presenting drilling field and laboratory data is proposed, which allows better understanding of the effect the different parameters have on rock drillability and its prediction.

### **1 INTRODUCTION**

Drilling is the most expensive process during exploration for minerals, hydrocarbons, geothermal fluids, and water wells. Extensive research has provided a multitude of tools and drill bits, but no significant process has been made in rock drillability prediction. Available drillability models allow for choosing the right drill rig, the proper drilling parameters for optimized drilling, and ultimately cost prediction [30,35,40]. In Figure 1 the drilling process is depicted with a tricone-bit, while in Figure 2 the process is depicted with fixed-cutter bits.

# 2 PARAMETERS AFFECTING ROCK DRILLABILITY

Field observations have shown that the parameters affecting rock drillability can be classified in two major groups: formation parameters and drilling rig parameters. Attempts to define the drilling strength of rock, similar to the compression strength, have been made, but no single parameter has been found to describe the rock strength *Submitted: Feb. 12, 2009 Accepted: Dec. 11, 2009* 

[15,20,21,30,50,51]. Rabia [30] proposed an equation of the type depicted in equation (1)

Rate of penetration ~ (energy input)<sup>a</sup> / (product of strength properties)<sup> $\beta$ </sup> (1)

The basic analysis of drilling data is performed with diagrams of the type depicted in Figure 3 [16,17], rate of penetration (R) versus weight (W), with region I, small depth of cut, region II efficient bit, and region III, unsuccessful drilling.

In this study, a critical analysis of the methods suggested for rock drillability prediction was performed; the right prediction equation is presented but in the correct dimensional form, a new equation valid for coring is presented, and a new way of data analysis and presentation is suggested that allows for optimum exploitation of drilling data.

#### **3 SPECIFIC ENERGY**

Specific energy (or mechanical specific energy) is a parameter suggested by Teale [43] and was the basic parameter used in rock drillability models that followed for mining drilling [1,7,8,19,31,33] and hydrocarbon drilling [2,11,13,14,26,30,32,52]. Specific energy is the calculated work that is needed to crush a specific rock volume, either in the field or in the lab. Some researchers have attempted to define specific energy as a rock property, but this is not correct because it is only a drilling parameter used in the field. The driller needs to adjust the drilling process so that specific energy is kept to a minimum [24].

Specific energy is finally given in equation (7) and has units of stress. The use of typical drilling values can show that the first term is only 2-3% of the total specific energy [9, 43], so many researchers ignore the first term. Equation (7) has been used by many researchers in different forms in hydrocarbon drilling [21,28,55] and in mining [1,8] with various coefficients that depend on the units used, but without really clarifying this issue. In the given form, equation (7) is dimensionally correct and independent of the system of units used. Often, the torque is not available, hence Pessier and Fear [28] defined a friction coefficient according to Figure 4.

Thus, in the end, equation (10) is given, which upon integration for normal drilling gives equation (11). Equation (10) can be integrated for coring, between two radii  $R_1$ ,  $R_2$ , to give equation (13), where the equivalent diameter,  $D_{eq}$ , is given by (14).

Black et al. [9] named the coefficient of friction as the aggressiveness of the bit and in Figure 5, the relationship between torque and weight for different bit aggressiveness is shown.

### 4 SEARCHING FOR PARAMETERS TO PREDICT ROCK DRILLABILITY

The specific energy equation is only about drilling parameters and does not relate, yet, to the formation parameters. Many researchers have related it to unconfined compressive strength, UCS, or the confined compressive strength, CCS, of rocks, but several found that it was not correct [9, 18]. It also very important to note that UCS is determined when rock fails, giving few pieces, while cuttings in the drilling process are much smaller; indeed, cuttings can be up to 30 times smaller in conventional but also micro-drilling [41], thus re-drilling probably happens, thus a lot of energy is not spent on drilling.

## 5 OPTIMAL EXPLOITATION OF DRILLING PARAMETERS

Specific energy should increase with depth and with bit wear and the optimal condition is when it is a minimum. Rearranging equations (7) and (11) and ignoring the axial work term, one derives equations (19) and (20). In a diagram X-W, equation (19) will give a straight line with slope, SE/ $\mu$ , which involves properties of rock, rig capacity and effectiveness of energy transfer from the rig to the rock. Unfortunately, no models exist which could give additional data for these parameters, except for models using only geometric parameters and not drilling parameters [22,36]. Recently, Stavropoulou [41] gave a better model for micro-drilling in marble, which deserves to be extended to conventional drilling geometry. Detournay and Defournay [12,14] use geometric characteristics, drilling data, equation (11) and proposed a model of the type of equation (19).

The proposed equation (19) has been used to assess different reported data, such as those in Figure 6a, where the slope gives the real meaning, while depiction in the conventional way (Figure 6b) gives similar trends, but the explanation will not be the same. Similar results were obtained from the data of Hoover and Middleton [23], depicted in Figures 7 and 8 for two different bits, at different RPM, which affects drilling rate, as shown also in the slope, despite the fact that RPM is taken into account in equation (19). Figure 9 shows that the drilling process is 1.5 more effective in rock with 15% less strength.

Laboratory data [18] from mining industry and fixedcutter bits also show the same difficulty for predicting the drilling process (Figure 10a), with the slopes having the same order of magnitude as the UCS for shale and carbonates, while for sandstone the slope is only half of the UCS. If we further analyze the data for sandstone (Figure 10b) and removing the two outliers, a slope equal to 425 MPa (line y\_4) is derived, almost four times the UCS of strong sandstone.

Micro-drilling data has also been analyzed [48] with a 5 mm fixed cutter bit (Figure 11) for marble and carbonate, giving a slope for carbonate double the UCS, while for marble the slope is 7.5 times the UCS. It is worth noting that all data points at different rpm fall along the same straight line. Data from [47] with a diamond bit, depicted in original form in Figure 12, have also been analyzed with the proposed method (Figure 13).

The conventional presentation does not give specific information. If the data are analyzed as per proposed procedure, Figure 13, the slopes for all rock types are can be related to the UCS values, and Figure 14 is obtained, giving an exponential curve. This means that the ratio of the specific energy to the coefficient of friction (the slope) is similar to UCS when the rock is very strong, whereas when the rock becomes weaker, because of other factors, specific energy becomes much smaller than UCS.

Recent shale data from [14] analyzed with the proposed methodology also give very interesting results, depicted in Figure 15. The data show a slope of 457 MPa. Taking into account the reported value for the specific energy of 162 MPa, a coefficient of friction of 0.327 is determined, very close to the normal values of 0.32.

#### **6 OTHER APPROACHES**

Several different approaches other than specific energy have been proposed [4,44,45,46] and Figures 16, 17, 18, 19.

#### 7 CONCLUSIONS

It is possible to use drilling data from oil-well drilling to analyze rock drillability models for mining and vice versa.

Many of the suggested approaches do not give good models which describe the interaction between the drilling

bit and the rock while containing appropriate rock failure models, because the phenomenon is fairly complex.

The use of specific energy enables one to analyze drilling data much better. The analysis presented shows that it is really a drilling parameter rather than a rock property.

A new way of drilling data analysis and presentation is suggested in a diagram of X (a rate of penetration parameter with units of  $L^2$ ) and weight W, with X involving the rate of penetration, the bit diameter and the rate of rotation. The slope of the line is proportional to specific energy and inversely proportional to the coefficient of friction, and in reality represents the model of interaction between bit and rock.

Many data from literature are analysed, giving the physical significance of the importance of the different parameters, but a full analysis cannot be performed. A model is needed to describe the interaction of bit-rock under different drilling conditions, so that the microcosmos (rock-bit interaction) is related to the macrocosmos, the rate of penetration and the energy supplied by the drilling rig.

Vassilios C. Kelessidis Associate Professor, Technical University of Crete Department of Mineral Resources Engineering Polytechnic City, 73100 Chania, GREECE tel: +30-2821037621, e-mail: kelesidi@mred.tuc.gr