

Κεφάλαιο 12

ΦΥΣΙΚΟ ΕΝΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Ο προσδιορισμός του φυσικού εντατικού πεδίου έχει σα σκοπό να δώσει αφενός μεν τη βασική γνώση για το πεδίο των τάσεων, αφετέρου δε τη συγκεκριμένη γνώση των συνοριακών συνθηκών που δύνανται να χρησιμοποιηθούν σε τασικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται στη φάση σχεδιασμού γεωτεχνικών έργων. Παραδείγματα της πρώτης περίπτωσης αποτελούν ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης που δρουν και το μέγεθος των κυρίων τάσεων, η εκτίμηση των κινδύνων (λόγω των τάσεων) από τους οποίους πρέπει να προστατεύσουμε τις κατασκευές μας, η πιθανή κατεύθυνση αστοχίας του πετρώματος, και η κατεύθυνση ροής των υπόγειων νερών.

Το φυσικό εντατικό πεδίο σε ένα δεδομένο χώρο της βραχομάζας χαρακτηρίζεται συνήθως με το μέγεθος και τον προσανατολισμό των κυρίων τάσεων. Οι προσανατολισμοί παρουσιάζονται συχνά μέσω μιας στερεογραφικής προβολής.

1 Μέθοδοι προσδιορισμού της τάσης

1.1 Άμεσες και έμμεσες μέθοδοι

Οποιοδήποτε σύστημα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της επί τόπου τάσης, πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον έξι ανεξάρτητες μετρήσεις. Υπάρχουν μέθοδοι άμεσης μέτρησης της τάσης και μέθοδοι εκτίμησης της τάσης μέσω διάφορων μεθόδων έμμεσων ή με δείκτες. Παρακάτω, δίνονται πέντε τύποι μεθόδων, εκ των οποίων οι τρεις πρώτοι συνιστώνται (Kim και Franklin, 1987) από τη Διεθνή Εταιρία Βραχομηχανικής (ISRM):

(α) Η δοκιμή επίπεδου γρύλου

(β) Η δοκιμή υδραυλικής θραύσης

(γ) Μέθοδοι υπερδιάτρησης. (γ1) Υπερδιάτρηση της γεώτρησης και μέτρηση της παραμόρφωσης με την τορπίλη USBM, (γ2) Υπερδιάτρηση της γεώτρησης και μέτρηση της παραμόρφωσης με την κυψέλη CSIRO

(δ) Μέτρηση της παραμόρφωσης στον πυθμένα γεώτρησης

(ε) Μέτρηση της τάσης από εγκλεισμένους αισθητήρες

Μια πλήρης περιγραφή των έμμεσων μεθόδων, δίνεται από τον Dyke (1988). Μερικές από τις μεθόδους δεικτών είναι:

(α) Θραύσεις εντός γεωτρήσεων που υποδεικνύουν τους κύριους προσανατολισμούς της τάσης (Σχήμα 1).

(β) Επιλύσεις επιπέδων ρηγμάτων, δηλ. ανάδρομες αναλύσεις για την εκτίμηση των κυρίων τάσεων που προκαλούν τα ρήγματα.

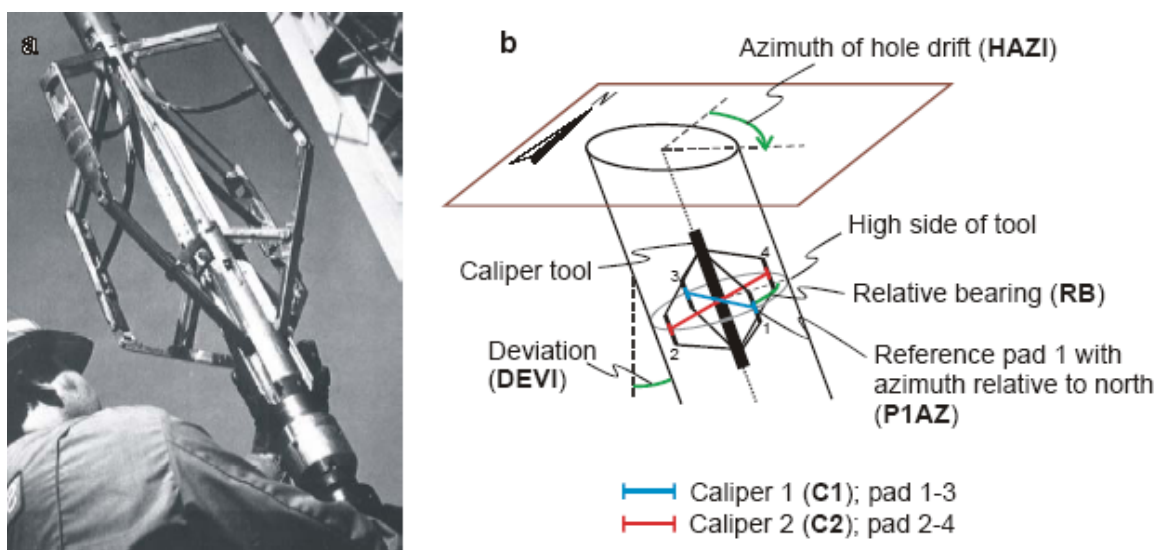
(γ) Ακουστική εκπομπή. Το πέτρωμα εκπέμπει χαμηλής έντασης θόρυβο όταν φορτίζεται.

(δ) Ανελαστική παραμόρφωση χαλάρωσης. Ο πυρήνας παρουσιάζει διαστολή / συστολή με την απομάκρυνση του από τη γεώτρηση.

(ε) Ανάλυση διαφορικής παραμόρφωσης. Η θλίψη δοκιμίου πετρώματος φανερώνει την προηγούμενη εντατική κατάσταση με βάση τα αποτελέσματα διαφορικής παραμόρφωσης.

(ς) Δημιουργία δίσκων στον πυρήνα. Η μορφή των δημιουργούμενων θραύσεων, λόγω τάσης, υποδεικνύει τις συνιστώσες της τάσης.

(ζ) Παρατηρήσεις της κατάστασης των ασυνεχειών. π.χ. ανοικτές ασυνέχειες δεν διαβιβάζουν την τάση δια μέσου του ανοίγματος.



Σχήμα 1. Μετρητής διαμέτρου γεώτρησης, με τέσσερις βραχίονες

1.2 Δυνατότητες μέτρησης των α , β , γ , άμεσων μεθόδων

Στο Σχήμα 2, δίνονται οι τανυστές των τάσεων και οι συνιστώσες που δύνανται να προσδιοριστούν από μία μοναδική εφαρμογή μιας επιλεγμένης μεθόδου. Για τον επίπεδο γρύλο και με τον x άξονα κάθετο στο επίπεδο του γρύλου, μία μόνο συνιστώσα της τάσης, η σ_{xx} , μπορεί να καθοριστεί. Επομένως για τον προσδιορισμό των έξι συνιστωσών του τανυστή των τάσεων απαιτούνται έξι

τέτοιες μετρήσεις επίπεδου γρύλου σε έξι διαφορετικούς προσανατολισμούς. Σημειώστε, ότι γενικά, οι άξονες αναφοράς δεν ταυτίζονται συνήθως με τον προσανατολισμό των επίπεδων γρύλων, και ότι κάθε μέτρηση δίνει την ορθή τάση στο επίπεδο του γρύλου και όχι μία συγκεκριμένη συνιστώσα της τάσης. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ενώ μια ορθή τάση μπορεί να καθοριστεί άμεσα, δεν υπάρχει τέτοια μέθοδος προσδιορισμού της διατμητικής τάσης. Επομένως οι διατμητικές και ορθές συνιστώσες της τάσης υπολογίζονται, με μετασχηματισμό αξόνων, από τις μετρήσεις των ορθών τάσεων σε διάφορες κατευθύνσεις. Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι αυτή η τεχνική καθορίζει τον τανυστή της τάσης στο τοίχωμα εκσκαφής και επομένως προσδιορίζει την προκαλούμενη, λόγω της εκσκαφής, δευτερογενή τάση παρά το φυσικό εντατικό πεδίο.

<p>Επίπεδος γρύλος</p> $\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \text{symmetry} & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$	<p>Υδραυλική θραύση</p> $\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \text{symmetry} & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$
<p>Τορπίλη υπερδιάτρησης USBM</p> $\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \text{symmetry} & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$	<p>Κυψέλη υπερδιάτρησης CSIRO</p> $\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \text{symmetry} & & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$

Σχήμα 2. Οι τέσσερις προτεινόμενες από την ISRM μέθοδοι για τον προσδιορισμό της τάσης σε βράχο και η δυνατότητά τους να καθορίσουν τις συνιστώσες του τανυστή των τάσεων με μια εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου (Hudson and Harrison, 1997). Με μεγάλους χαρακτήρες υποδηλώνονται οι άμεσα υπολογιζόμενες συνιστώσες.

Η μέθοδος υδραυλικής θραύσης, σύμφωνα με το Σχήμα 2, παρέχει πληροφορίες για δύο μόνο στοιχεία, την πίεση θραύσης και την πίεση κλεισίματος. Κατά συνέπεια, μόνο δύο συνιστώσες του τανυστή της τάσης μπορούν να προσδιοριστούν από αυτήν την τεχνική. Η πίεση κλεισίματος υποτίθεται ότι δίνει την ελάχιστη κύρια τάση, σ_3 , ενώ η μέγιστη κύρια τάση, σ_1 , δίνεται μέσω της πίεσης θραύσης, της τιμής της σ_3 και της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος. Στην περίπτωση του επίπεδου γρύλου, οι έξι συνιστώσες μπορούν να καθοριστούν με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου σε έξι διαφορετικούς προσανατολισμούς. Γενικά, αυτό δεν είναι

δυνατό με την υδραυλική θραύση, επειδή οι δοκιμές πραγματοποιούνται βαθιά σε γεώτρηση. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα υδραυλικής θραύσης βρίσκεται στο ότι είναι η μόνη μέθοδος που δύναται να προσδιορίσει μερικώς το εντατικό πεδίο σε βάθος μεγαλύτερο από μερικές εκατοντάδες μέτρα από τη θέση ανθρώπινης πρόσβασης, και γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι 5 ή και 6 km βάθος. Εντούτοις, το σημαντικότερο μειονέκτημά της είναι ότι πρέπει να γίνουν υποθέσεις προκειμένου να συμπληρωθεί ο τανυστής της τάσης. Οι υποθέσεις αυτές είναι ότι οι κύριες τάσεις είναι παράλληλες και κάθετες στον άξονα γεώτρησης, και ότι η κατακόρυφη κύρια τάση μπορεί να υπολογιστεί από το βάθος των υπερκειμένων. Κατά συνέπεια, στον τανυστή της τάσης στο Σχήμα 2, οι δύο συνιστώσες της τάσης καθορίζονται, αλλά οι τρεις μηδενικές τιμές για τις διατμητικές τάσεις αποτελούν υπόθεση, όπως αποτελεί και η τιμή της σ_2 .

Στην περίπτωση της τορπίλης USBM, καθορίζεται μια διδιάστατη κατάσταση της πίεσης, δηλ. οι τρεις συνιστώσες της τάσης ενός τριδιάστατου τανυστή της τάσης. Κατά συνέπεια, δύο, και κατά προτίμηση τρεις, μη παράλληλες γεωτρήσεις πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να καθορισθεί πλήρως το εντατικό πεδίο. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις του επίπεδου γρύλου και της υδραυλικής θραύσης, οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος δεν χρησιμοποιούνται εκτός από την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος που απαιτείται στη μέθοδο υδραυλικής θραύσης. Για τον επίπεδο γρύλο, απαιτούνται μόνο οι εξισώσεις μετασχηματισμού αξόνων, ενώ για την υδραυλική θραύση μόνο οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσης στην περιφέρεια κυκλικής οπής, που είναι ανεξάρτητοι από τις μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος αν υποθεθεί ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Αντίθετα, για τη μέθοδο τορπίλης USBM, προκειμένου να μετατραπούν οι μετρημένες μετατοπίσεις σε τάσεις, απαιτούνται οι ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος. Τούτο εισάγει μια νέα σειρά υποθέσεων.

Τέλος, στην περίπτωση της κυψέλης CSIRO, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, το πλήρες εντατικό πεδίο μπορεί να καθορισθεί από τις μετρήσεις της πίεσης σε έξι ή περισσότερες διαφορετικές κατευθύνσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια μιας εφαρμογής της μεθόδου. Οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος απαιτούνται επίσης για τη μέθοδο αυτή. Μια συσκευή που είναι εξοπλισμένη με 9 ή 12 μετρητές πίεσης μπορεί να καθορίσει την κατάσταση της τάσης σε ένα εγκάρσιως ισότροπο πέτρωμα με πέντε ελαστικές σταθερές.

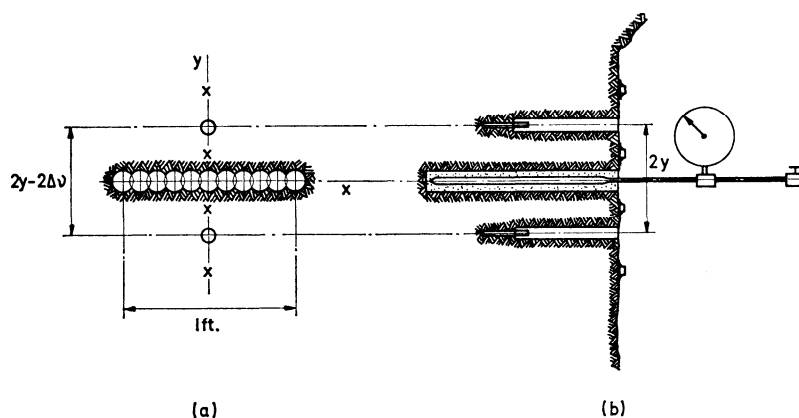
2 Επιτόπου μέτρηση της τάσης

2.1 Μέθοδος επίπεδου γρύλου

Σε γενικές γραμμές, η μέθοδος επίπεδου γρύλου για την μέτρηση της τάσης, Mayer *et al* (1951) και Tincelin (1951), είναι απλή. Μία εγκοπή διανοίγεται σε μια επιφάνεια πετρώματος, όπως το

τοίχωμα μίας σήραγγας, με τη διάτρηση μιας σειράς επικαλυπτόμενων οπών ή με πριόνι, όπως δείχνεται στο Σχήμα 3 (α). Με τον τρόπο αυτό χαλαρώνεται τελείως η εντατική κατάσταση κάθετα στο επίπεδο της εγκοπής και ελευθερώνεται το πέτρωμα εκατέρωθεν της εγκοπής από τις τάσεις που ασκούνταν παράλληλα στο τοίχωμα πριν από την διάνοιξη της εγκοπής. Αυτή η ανακούφιση επιφέρει μια διαστολή του πετρώματος στην εγκοπή, η οποία μπορεί να μετρηθεί από τη σύγκλιση εγκάρσιως της εγκοπής ή τη σύγκλιση μεταξύ δύο σταθερών σημείων εκατέρωθεν της εγκοπής. Ένας επίπεδος υδραυλικός γρύλος, ή ένας γρύλος τύπου Freysinnet, τοποθετείται μέσα στην εγκοπή (και στερεώνεται με τη βοήθεια ρευστοκονιάματος στην περίπτωση παχιάς εγκοπής).

Με τη βοήθεια αντλίας εφαρμόζεται πίεση στο γρύλο η οποία αυξάνεται μέχρις ότου ακυρωθεί η μετατόπιση που επήλθε από τη διάνοιξη της εγκοπής, όπως δείχνεται στο Σχήμα 3(β). Η απαιτούμενη πίεση για να επανέλθουν τα τοιχώματα της εγκοπής στην αρχική τους θέση, θεωρητικά είναι ίση με την αρχική πίεση κάθετα στο επίπεδο της εγκοπής που ασκούνταν πριν τη διάνοιξη της εγκοπής. Κατά συνέπεια, η μέθοδος επίπεδου γρύλου είναι μία, από μηδενικής τιμής, τεχνική από την οποία οι τάσεις στο πέτρωμα μπορούν να μετρηθούν άμεσα. Εντούτοις, η μέθοδος πάσχει από διάφορα μειονεκτήματα. Κατ' αρχάς, όπως εφαρμόζεται συνήθως, περιορίζεται στη μέτρηση των τάσεων κοντά στην επιφάνεια του πετρώματος. Δεύτερον, περιπλέκεται από την επίδραση του ερπυσμού του πετρώματος κατά τη διαδικασία διάνοιξης της εγκοπής, ενεμάτωσης και επαναφοράς του πετρώματος στην αρχική του θέση.



Σχήμα 3. (α) Εγκοπή, για τοποθέτηση επίπεδου γρύλου, διανοίγεται σε μια επιφάνεια του πετρώματος με επικαλυπτόμενα διατρήματα, παράγοντας σύγκλιση $2\Delta u$ μεταξύ των ακίδων μέτρησης (measuring pins), (β) Εγκάρσια τομή της ίδιας εγκοπής μετά την τοποθέτηση του επίπεδου γρύλου και την εφαρμογή πίεσης στο γρύλο για την επαναφορά των ακίδων μέτρησης στην αρχική τους θέση.

Οι επίπεδοι γρύλοι κατασκευάζονται συνήθως από λεπτές μεταλλικές πλάκες ενός τετραγωνικού πόδα (1 ft^2) συγκολλημένες μεταξύ τους γύρω από την περίμετρό τους και εφοδιασμένες με ένα σωλήνα επικοινωνίας που επιτρέπει στο έλαιο να εισέρχεται στο μεταξύ τους κενό (Σχήμα 4, αριστερά). Οι ακίδες μέτρησης των μετατοπίσεων εγκάρσια στην εγκοπή

τοποθετούνται εκατέρωθεν της εγκοπής, κατά προτίμηση επί της μεσοκαθέτου της εγκοπής. Τοποθετούνται πριν από τη διάνοιξη της εγκοπής, και είτε συγκολλούνται στην επιφάνεια του πετρώματος με τσιμεντοκονίαμα είτε στερεώνονται σε διατρήματα με τσιμεντένεμα. Τοποθετούνται συνήθως σε απόσταση από μια ίντσα έως ένα πόδι από την εγκοπή. Οι μετατοπίσεις μεταξύ των ακίδων μετρούνται με μετρητή παραμόρφωσης τύπου Huggenberger (Σχήμα 4, δεξιά), ή μηκυσιόμετρο με ωρολογιακό αναλογικό μικρόμετρο ακριβείας (dial gauge), ή με άλλες κατάλληλες συσκευές μέτρησης.



Επίπεδος γρύλος

Μετρητής μετατόπισης τύπου Huggenberger

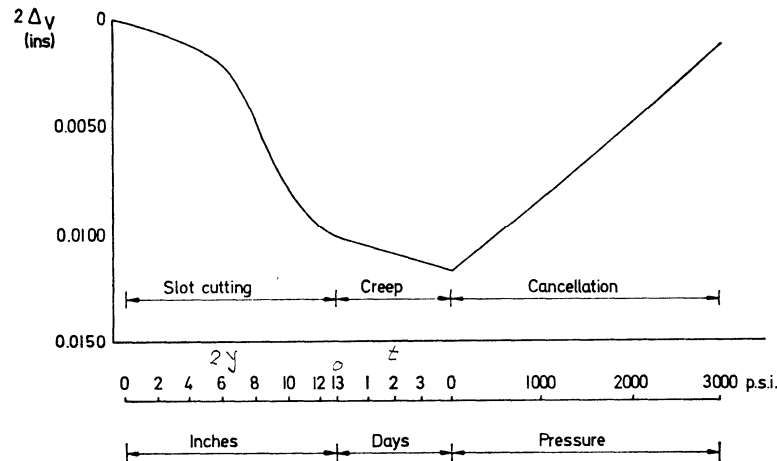
Σχήμα 4. Επίπεδος γρύλος και μετρητής μετατόπισης

Εάν η εγκοπή θεωρηθεί ως πεπλατυσμένη έλλειψη σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, η ορθή μετατόπιση μεταξύ των ακίδων μέτρησης εγκάρσια στην εγκοπή οφείλεται μόνο στη μεταβολή της ορθής τάσης εγκάρσια στην εγκοπή και δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της διαμητικής τάσης παράλληλα σε αυτή. Σε αυτή την περίπτωση η πίεση που απαιτείται σε ολόκληρη την επιφάνεια της εγκοπής για να ακυρώσει τις μετατοπίσεις που επέρχονται από την διάνοιξη της εγκοπής πρέπει να είναι ίδια με την αρχική ορθή τάση εγκάρσια στην εγκοπή. Στην πράξη, μια περιοχή, d , κοντά στην άκρη ενός επίπεδου γρύλου είναι ανενεργή και το πλάτος του γρύλου, $2c_j$, είναι μικρότερο από αυτό της εγκοπής, $2c$. Με ένα τέτοιο σύστημα η σχέση μεταξύ της αρχικής ορθής τάσης, σ_n , εγκάρσια στην εγκοπή, και της πίεση ακύρωσης του γρύλλου, p_c μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$\sigma_n = p_c(c_j - d)/c \quad (1)$$

Η σύγκλιση, που προκαλείται από τη διάνοιξη της εγκοπής, $2\Delta u$, μεταξύ των ακίδων μέτρησης σε απόσταση y από το επίπεδο της εγκοπής κατά μήκος της μεσοκαθέτου του, είναι:

$$2\Delta u = 2c\sigma_n / E\{(1-\nu)[(1+y^2/c^2)^{1/2} - y/c] + (1+\nu)(1+y^2/c^2)^{-1/2}\} \quad (2)$$



Σχήμα 5. Μετατοπίσεις μεταξύ των ακίδων μέτρησης κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της εγκοπής, στερέωσης με τσιμεντένεμα, και της εφαρμογής της πίεσης στον επίπεδο γρύλο (Alexander, 1960).

Από τις μετρήσεις σε δύο ή περισσότερες διαφορετικές αποστάσεις y , τόσο το μέτρο Young όσο και ο λόγος Poisson μπορούν να υπολογιστούν. Οι μετρήσεις των μετατοπίσεων παράλληλα στην εγκοπή που προκαλούνται από τη διάνοιξη της εγκοπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράσχουν μια εκτίμηση της διατμητικής τάσης στο επίπεδο της εγκοπής.

Ο Alexander (1960) μελέτησε την επίδραση του ερπυσμού και των ασυνεχειών στις μετρήσεις επίπεδου γρύλου επί τόπου, και ο Hoskins (1966) πραγματοποίησε παρόμοιες έρευνες σε εργαστηριακά πειράματα. Χαρακτηριστικές μετατοπίσεις μεταξύ των ακίδων μέτρησης κατά τη διάρκεια της διάνοιξης της εγκοπής, ενεμάτωσης, και αποκατάστασης πίεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5. Οι Panek και Stock (1964) πρότειναν διαδικασίες για να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ερπυσμού στις δοκιμές επίπεδου γρύλου, εκ των οποίων μία περιλαμβάνει τη διατήρηση της πίεσης του επίπεδου γρύλου κοντά στην πίεση ακύρωσης για χρόνο συγκρίσιμο με αυτόν για τον οποίο η εγκοπή παρέμεινε ανακουφισμένη από τις τάσεις, για να επιτρέψει να πραγματοποιηθεί ο αντίστροφος ερπυσμός προτού καθοριστεί η πίεση ακύρωσης.

Είναι σύνηθες να γίνονται οι μετρήσεις επίπεδου γρύλου σε διάφορες αμοιβαία κάθετες εγκοπές, Alexander (1960) και Merrill (1964). Σε μια σήραγγα, παραδείγματος χάριν, οι οριζόντιες και κατακόρυφες εγκοπές μπορούν να διανοιχτούν στα τοιχώματα της σήραγγας για τη μέτρηση της κατακόρυφης και αξονικής εφαπτομενικής τάσης στην επιφάνεια, και μια κατακόρυφη

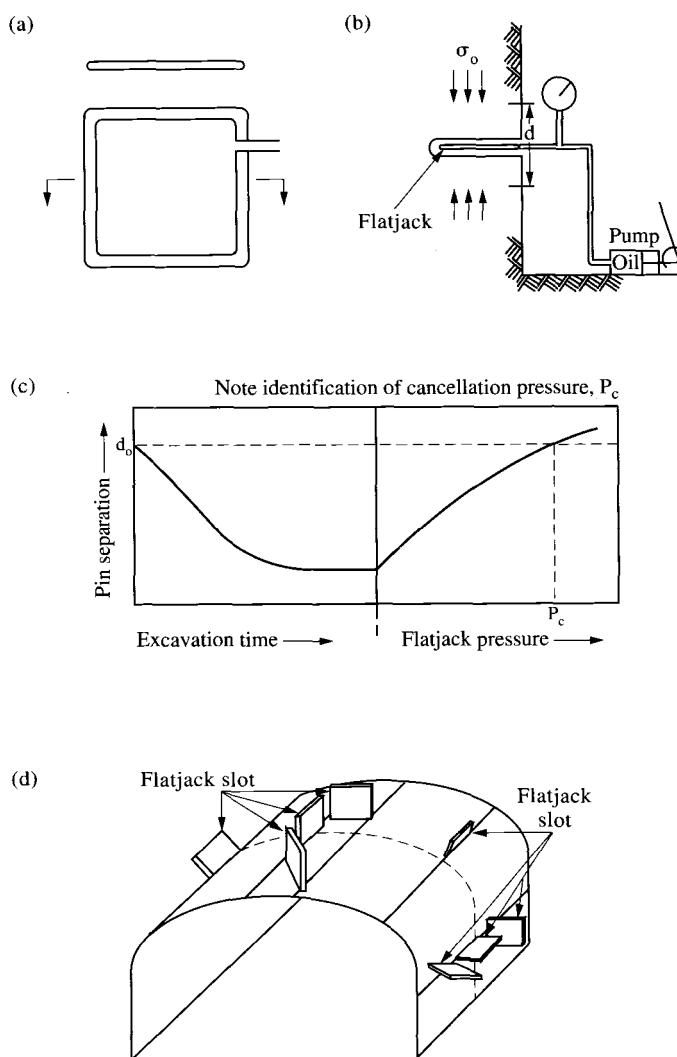
διαμήκης εγκοπή να διανοιχθεί στην οροφή για τη μέτρηση της οριζόντιας εφαπτομενικής τάσης στην επιφάνεια του πετρώματος της οροφής. Οι μετρήσεις μπορούν επίσης να γίνουν στο μέτωπο μιας σήραγγας. Εάν αυτές οι μετρήσεις σκοπεύουν στο να παράσχουν στοιχεία σχετικά με τις τάσεις πεδίου μακριά από τη ζώνη επιρροής της εκσκαφής, τα αποτελέσματα πρέπει να διορθωθούν για να ληφθούν υπόψη οι συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από την εκσκαφή. Για απλά σχήματα εκσκαφής, όπως μια κυκλική σήραγγα, οι συγκεντρώσεις τάσεων μπορούν να υπολογιστούν από τις αναλυτικές λύσεις. Πιο περίπλοκες καταστάσεις, όπως οι μετρήσεις στο μέτωπο μίας σήραγγας, μπορούν να ερμηνευθούν λαμβάνοντας υπόψη αποτελέσματα από τεχνικές, φωτοελαστικής ανάλυσης ή αριθμητικές επιλύσεις σε πρότυπα.

Οι μετρήσεις επίπεδου γρύλου πρέπει να γίνονται σε επιφάνεια όπου το πέτρωμα δεν είναι φθαρμένο λόγω διάβρωσης, χαλάρωσης τάσεων, ή διαδικασιών εκσκαφής. Η διόρθωση των μετρήσεων για να ληφθούν υπόψη οι συγκεντρώσεις τάσεων γύρω από την εκσκαφή είναι μια δύσκολη και αβέβαιη διαδικασία. Οι Jaeger και Cook (1964) πρότειναν να προσαρμοστεί η τεχνική επίπεδου γρύλου για χρήση σε διατρήματα βάθους μέχρι 6m, ώστε οι μετρήσεις να γίνονται στο υγιές πέτρωμα μακρύτερα από την ζώνη επιρροής της εκσκαφής. Για αυτόν το λόγο ανέπτυξαν λεπτούς επιμήκεις καμπυλωμένους γρύλους που να ταιριάζουν στον κενό χώρο της εγκοπής. Όπως στη μέθοδο επίπεδου γρύλου, καμπύλοι γρύλοι, συνήθως τέσσερις που καθένας από αυτούς καλύπτει ένα τεταρτημόριο, χρησιμοποιούνται για να αποκαταστήσουν τις πιέσεις στον πυρήνα που ανακουφίζεται με τη διάτρηση. Οι πιέσεις στον πυρήνα μπορούν να μετρηθούν με ένα άλλο σύνολο γρύλων ή οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη διάταξη. Η πλήρης θεωρία των ελαστικών μετατοπίσεων και των τάσεων που παράγονται από ομόκεντρους γρύλους δίνεται από τους Jaeger και Cook (1976).

Στο Σχήμα 6, παρουσιάζεται ως παράδειγμα η εφαρμογή της δοκιμής επίπεδου γρύλου στα τοιχώματα σήραγγας, προκειμένου να μετρηθεί το υφιστάμενο δευτερογενές εντατικό πεδίο. Δύο ακίδες πακτώνονται σε οπές που διανοίγονται στην περιφέρεια της εκσκαφής. Η απόσταση, d , μεταξύ τους μετριέται έπειτα με ακρίβεια. Μια ημικυκλική εγκοπή κόβεται στη συνέχεια στο πέτρωμα μεταξύ των ακίδων, όπως φαίνεται στο σχήμα. Εάν η ορθή τάση είναι θλιπτική, οι ακίδες θα συγκλίνουν καθώς κόβεται η εγκοπή. Ένας επίπεδος δίσκος, που αποτελείται από δύο μεταλλικά φύλλα συγκολλημένα παράλληλα μεταξύ τους καθώς και με ένα σωλήνα τροφοδοσίας, πακτώνεται με ένεμα στην εγκοπή. Εισπιέζοντας έλαιο ή νερό, οι ακίδες απομακρύνονται. Υποτίθεται ότι, όταν η απόσταση των ακίδων φθάσει αυτήν που ήταν προτού κοπεί η εγκοπή, η πίεση που ασκείται από τον επίπεδο γρύλο στα τοιχώματα της εγκοπής είναι η ίδια με αυτήν που ασκούσαν πριν από την κοπή της εγκοπής. Θα υπάρξει κάποιο σφάλμα σε αυτήν την υπόθεση, που οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη των άκρων των γρύλων, που όμως μπορούν να ληφθούν υπόψη εάν

ο γρύλος είναι κατάλληλα βαθμονομημένος. Η δοκιμή παρέχει μια καλή εκτίμηση της ορθής τάσης κάθετα στο επίπεδο του γρύλου.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα του συστήματος είναι οι απαραίτητα απαιτούμενες έξι τουλάχιστον δοκιμές, σε διαφορετικούς προσανατολισμούς, που πρέπει να εκτελεστούν σε έξι διαφορετικές θέσεις και που επομένως θα διανεμηθούν στην περιφέρεια της εκσκαφής. Επομένως, οι δοκιμές αυτές θα εκτελεστούν σε θέσεις που η πραγματική κατάσταση της τάσης είναι διαφορετική. Ως εκ τούτου, για να ερμηνευθούν κατάλληλα τα αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η κατανομή της τάσης γύρω από την εκσκαφή της δοκιμής.

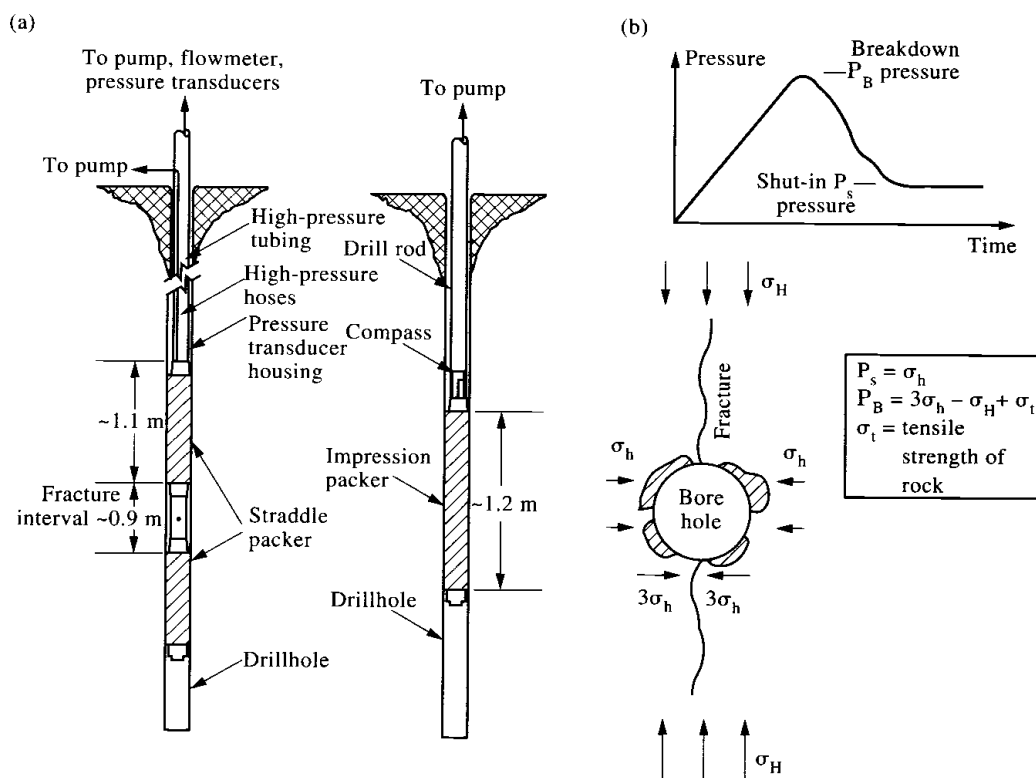


Σχήμα 6. Δοκιμή επίπεδου γρύλου (Kim and Franklin, 1987). (α) Επίπεδος γρύλος. (β) Διάταξη δοκιμής. (γ) Απομάκρυνση ακίδων σε σχέση με το χρόνο διάνοιξης της εγκοπής και σε σχέση με την πίεση του γρύλου. (δ) Η διαδικασία της δοκιμής γρύλου σε εξέλιξη.

2.2 Υδραυλική θραύση

Η μέθοδος υδραυλικής θραύσης, για τη μέτρηση της τάσης, παρέχει βασικά δύο πληροφορίες μέσω της πίεσης θραύσης και της πίεσης κλεισίματος. Ένα μήκος γεώτρησης, με τυπικό μήκος 1m, επιλέγεται για τις μετρήσεις πίεσης, και απομονώνεται με σύστημα παρεμβυσμάτων (Σχήμα 7). Στο απομονωμένο τμήμα εισπνέζεται νερό έως ότου ρωγματωθεί το πέτρωμα. Οι δύο μετρήσεις που λαμβάνονται είναι η πίεση P_B ύδατος για την επίτευξη της θραύσης και η πίεση P_s που απαιτείται για να κρατηθεί η θραύση ανοικτή, γνωστές, αντίστοιχα, ως πιέσεις θραύσης και κλεισίματος.

Σημαντικό είναι το απομονωμένο τμήμα της δοκιμής να εξασφαλίζεται από προϋπάρχουσες ρωγμές του πετρώματος, έτσι ώστε η θραύση που δημιουργείται να είναι πραγματική. Η εξασφάλιση αυτή επιβεβαιώνεται με τη χρησιμοποίηση τηλεοπτικής συσκευής γεωτρήσεων. Είναι επίσης απαραίτητη η χρησιμοποίηση ενός παρεμβύσματος εντύπωσης ή ισοδύναμο σύστημα για τον καθορισμό του προσανατολισμού και της θέσης έναρξης της θραύσης. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι, χρησιμοποιώντας τη βασική τεχνική, γίνεται η υπόθεση ότι η γεώτρηση είναι παράλληλη σε μια κύρια κατεύθυνση τάσης. Η επίτευξη των παραπάνω δεν είναι πάντα δυνατή. Εντούτοις, είναι γεγονός ότι η μέθοδος υδραυλικής θραύσης είναι η μόνη άμεση μέθοδος διαθέσιμη για τη μέτρηση της τάσης σε οποιαδήποτε σημαντική απόσταση από τον παρατηρητή (δηλ. αποστάσεις μεγαλύτερες από 100m), και έχει χρησιμοποιηθεί σε βάθη ακόμη και μερικών χιλιομέτρων.



Σχήμα 7. (α) Σύστημα υδραυλικής θραύσης και (β) Σχετικοί υπολογισμοί (Kim and Franklin, 1987).

Στη μέθοδο υπολογισμού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7(β), γίνεται η υπόθεση ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης μιας κύριας τάσης γύρω από τη γεώτρηση σε οριζόντιο επίπεδο λαμβάνει τις ακραίες τιμές -1 και 3 (Kirsch, 1898). Προκειμένου οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσης να είναι -1 και 3 γύρω από την κυκλική γεώτρηση, το πέτρωμα του τοιχώματος της γεώτρησης πρέπει να είναι συνεχές, ομοιογενές, ισότροπο και γραμμικά ελαστικό. Επιπλέον, έχει υποθεθεί ότι το πέτρωμα είναι αδιαπέρατο, έτσι ώστε το νερό της γεώτρησης να μην εισχωρεί στο πέτρωμα και επηρεάζει την κατανομή της τάσης. Η πίεση κλεισίματος, P_s , υποτίθεται, στο θραυσμένο πλέον πέτρωμα, ότι είναι ίση με την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση, σ_h . Η μέγιστη οριζόντια κύρια τάση, σ_H , βρίσκεται έπειτα από την πίεση θραύσης P_B . Στον τύπο στο Σχήμα 7, η πίεση διακοπής, P_B , πρέπει να υπερνικήσει την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση, σ_h , (που τριπλασιάζεται από την παρουσία της γεώτρησης) και να υπερνικήσει την εφελκυστική αντοχή, σ_t , του πετρώματος. Βοηθείται όμως από την εφελκυστική τάση που προκαλεί η μέγιστη οριζόντια κύρια τάση, σ_H . Σημειώστε ότι όταν εισπίζεται νερό σε μια γεώτρηση η πίεση του νερού, P , προκαλεί ίση εφελκυστική τάση στην περιφέρεια της γεώτρησης. Γενικά, θεωρείται ότι η ρωγμή διαδίδεται κάθετα στην κατεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης (Scheidegger, 1962), και ότι η πίεση που απαιτείται για να διαδοθεί η ρωγμή είναι λίγο μεγαλύτερη από το μέγεθος της τάσης αυτής.

Οι τάσεις που προκαλούνται στα τοιχώματα μιας γεώτρησης σε έναν αδιαπέρατο πέτρωμα από τη πίεση ρευστού στην περιοχή μεταξύ δύο παρεμβυσμάτων έχουν υπολογιστεί από τον Kehle (1964). Στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μεταξύ των παρεμβυσμάτων η πίεση ρευστού, p , προκαλεί μια εφαπτομενική εφελκυστική τάση, $\sigma_\theta = -p$, και μια ακτινική θλιπτική τάση, $\sigma_r = p$ και μηδενική αξονική τάση. Κοντά στα παρεμβύσματα η εφαπτομενική τάση μειώνεται στο μηδέν και η αξονική τάση γίνεται εφελκυστική με μέγεθος πολύ κοντά στο $-p$. Υποθέστε ότι μία ρωγμή αρχίζει από την επιφάνεια της οπής όταν η πίεση, p , προκαλεί μια καθαρή εφελκυστική ένταση, T , ικανή για να προκαλέσει την αστοχία. Η έναρξη ρωγματώσεως φαίνεται δυνατή είτε κατά μήκος ενός αξονικού επιπέδου στην κεντρική περιοχή μεταξύ των παρεμβυσμάτων είτε κατά μήκος ενός επιπέδου κάθετου στον άξονα της οπής στις περιοχές κοντά στα παρεμβύσματα. Εάν ο άξονας της γεώτρησης είναι παράλληλος στον ένα από τους άξονες των κυρίων τάσεων, σ_z , και οι κύριες τάσεις κάθετα στον άξονα της οπής είναι $\sigma_x > \sigma_y$, οι ρωγμές εμφανίζονται όταν:

$$p \geq T + (3\sigma_y - \sigma_x) \quad (3)$$

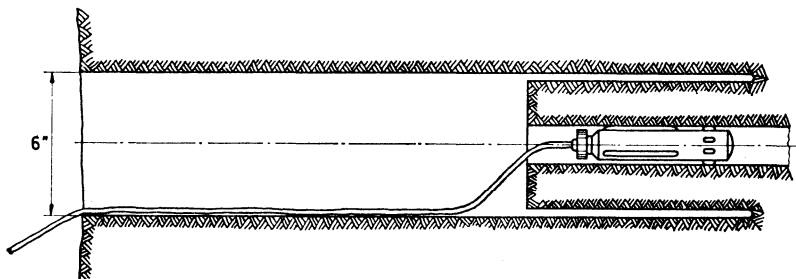
$$p \geq T + \sigma_z + \nu(3\sigma_y - \sigma_x) \quad (4)$$

Όταν $\sigma_z + \nu(3\sigma_y - \sigma_x) > (3\sigma_y - \sigma_x)$ η ρωγμάτωση ξεκινάει στο αξονικό επίπεδο παράλληλο στην κατεύθυνση της σ_x και διαδίδεται στο ίδιο επίπεδο υπό τον όρο ότι $\sigma_z > \sigma_y$. Η ρωγμάτωση ξεκινάει κάθετα στον άξονα της οπής όταν $\sigma_z + \nu(3\sigma_y - \sigma_x) < (3\sigma_y - \sigma_x)$ και διαδίδεται στο ίδιο επίπεδο υπό τον όρο ότι $\sigma_z < \sigma_y$. Ενώ αυτή η συζήτηση έχει σχέση με την έναρξη της ρωγμάτωσης γύρω από μια οπή σε ελαστικό πέτρωμα, πρέπει να σημειωθεί ότι η συνθήκη για τη διάδοση ρωγμής είναι μόνο ότι η πίεση p είναι ίση με ή ελαφρώς μεγαλύτερη από τη ελάχιστη κύρια τάση, είτε το πέτρωμα είναι ελαστικό ή όχι. Η πίεση ρευστού που απαιτείται για τη διάδοση μίας ρωγμής παρέχει μία άμεση μέτρηση της τιμής της ελάχιστης κύριας τάσης στο πέτρωμα, οποιεσδήποτε αν είναι οι ιδιότητές αυτού.

Εφόσον ισχύουν οι παραπάνω υποθέσεις της ελαστικότητας, διαπιστώνουμε ότι οι συντελεστές συγκέντρωσης τάσης δεν εξαρτώνται από τις ελαστικές σταθερές του πετρώματος ούτε από τη διάμετρο της γεώτρησης. Εντούτοις, πρέπει να γνωρίζουμε την εφελκυστική αντοχή, σ_t , του πετρώματος. Ο καλύτερος τρόπος για να μετρηθεί η εφελκυστική αντοχή είναι από τη δοκιμή σε κοίλο κύλινδρο. Τούτο, επειδή η εφελκυστική αντοχή δεν είναι μια απόλυτη ιδιότητα του υλικού, αλλά εξαρτάται από τη μορφή και τις συνθήκες φόρτισης της δοκιμής..

2.3 Μέθοδοι υπερδιάτρησης γεωτρήσεων

Οι τάσεις στο πέτρωμα γύρω από γεώτρηση μπορούν να αποτονωθούν με υπερδιάτρηση, και οι επακόλουθες παραμορφώσεις της οπής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογισθεί η απόλυτη τάση στο πέτρωμα, υπό τον όρο ότι οι ιδιότητες του πετρώματος είναι γνωστές.



Σχήμα 8. Τομή δια μέσω μιας γεώτρησης με μετρητή παραμόρφωσης που μόλις έχει υπερδιατρηθεί.

Διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει μετρητές παραμόρφωσης γεωτρήσεων που μετρούν την παραμόρφωση σε μια ή περισσότερες διαμέτρους μιας οπής διαμέτρου 1½ ίντσας. Οι μετρητές παραμόρφωσης γεωτρήσεων είναι εύκαμπτοι, ή μαλακοί, και ασκούν μόνο ένα αμελητέο φορτίο στο εσωτερικό της γεώτρησης. Είναι ουσιαστικά παχύμετρα γεωτρήσεων με δυνατότητα από απόσταση ανάγνωσης των μετρήσεων, με ακρίβεια μέτρησης της παραμόρφωσης 0.002 cm και εύρος μετρήσεων 0-2cm. Με υπερδιάτρηση διαμέτρου 15cm είναι δυνατό να ληφθούν μετρήσεις σε βάθος μεγαλύτερο των 6 μέτρων μέσα στο πέτρωμα (Σχήμα 8).

Υποθέτοντας ότι ο άξονας της οπής είναι στην κατεύθυνση μιας κύριας τάσης, της σ_z , αύξηση του μήκους μιας διαμέτρου με κλίση θ ως προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης, $\sigma_x > \sigma_y$, λόγω της αποτόνωσης των κυρίων τάσεων με την υπερδιάτρηση, είναι:

$$\delta = (2R/E)[(\sigma_x + \sigma_y) + 2(\sigma_x - \sigma_y)(1 - \nu^2) \cos 2\theta - \nu\sigma_z] \quad (5)$$

Εάν μετρηθεί η αλλαγή του μήκους τριών διαμέτρων με διαφορετικούς προσανατολισμούς προκύπτουν από την (1) τρεις εξισώσεις που μπορούν να λυθούν για να προσδιοριστούν οι σ_x και σ_y συναρτήσει της σ_z και της γωνίας θ . Το μέτρο του Young του πετρώματος πρέπει να είναι γνωστό με την ίδια επιθυμητή ακρίβεια εκτίμησης των κυρίων τάσεων. Η ακρίβεια με την οποία απαιτείται να είναι γνωστός ο λόγος Poisson, είναι μικρότερη. Ο Fairhurst (1965) εξετάζοντας την περίπτωση όπου η γεώτρηση δεν είναι παράλληλη σε μία από τις κύριες τάσεις έδειξε ότι, η συνιστώσα της διατμητικής τάσης παράλληλα στον άξονα της οπής δεν έχει καμία επίδραση στο μήκος της διαμέτρου και ότι οι ορθές συνιστώσες της τάσης κάθετα σε μία τέτοια οπή μπορούν να βρεθούν συναρτήσει της συνιστώσας παράλληλα με την οπή, από μετρήσεις της παραμόρφωσης τριών διαμέτρων με διαφορετικούς προσανατολισμούς, όπως στην περίπτωση που ο άξονας της

οπής είναι παράλληλος σε μια κύρια τάση. Η συνολική εντατική κατάσταση μπορεί να βρεθεί από μετρήσεις σε τρεις αμοιβαία κεκλιμένες οπές. Τα τοιχώματα των οπών που έχουν κλίση ως προς την κατεύθυνση μίας κύριας τάσης παραμορφώνονται εφαπτομενικά και κατά μήκος. Οι μετρητές παραμόρφωσης γεωτρήσεων πρέπει επομένως να μην είναι ευαίσθητοι στην παραμόρφωση των τοιχωμάτων της οπής κάθετα στη διάμετρό της.

Οι μετρητές παραμόρφωσης γεωτρήσεων είναι ακατάλληλοι για τη μέτρηση τάσεων κοντά στην αντοχή του πετρώματος επειδή τα τοιχώματα της γεώτρησης αστοχούν, προκαλώντας ανελαστικές παραμορφώσεις, και η υπερδιάτρηση γίνεται αδύνατη λόγω της αστοχίας του εσωτερικού πυρήνα σε μορφή δίσκων (core diskings) πετρώματος.

Το θέμα της επιρροής της ανισοτροπίας και της χρονικά εξαρτημένης παραμόρφωσης στην παραμόρφωση γεωτρήσεων έχει συζητηθεί από τους Berry και Fairhurst (1965), οι οποίοι κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μπορεί να προκύψουν σημαντικά λάθη στον προσδιορισμό της τάσης όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η τυχόν έντονη ανισοτροπία στο πέτρωμα.

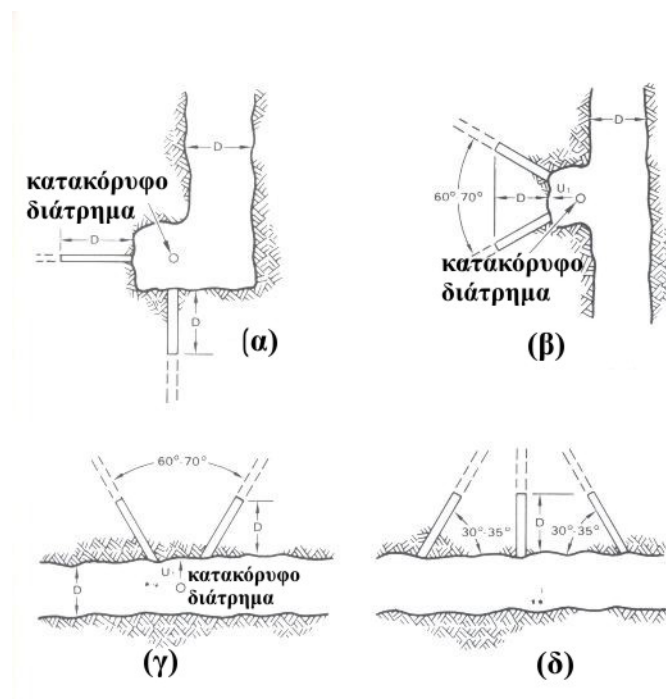
2.3.1 Μέτρηση της παραμόρφωσης με την τορπίλη USBM

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, η τεχνική USBM επιτρέπει τον πλήρη καθορισμό του εντατικού πεδίου σε ένα επίπεδο από τρεις μετρήσεις της μεταβολής της διαμέτρου μιας γεώτρησης, όταν απελευθερώνονται οι τάσεις με υπερδιάτρηση. Αφού εισέλθει η τορπίλη σε μια γεώτρηση, έξι ακίδες ωθούνται στα τοιχώματά της. Όταν η γεώτρηση υπερδιατρηθεί από μεγαλύτερης διαμέτρου γεώτρηση, η τάση στον προκύπτοντα κοίλο κύλινδρο μηδενίζεται, η διάμετρος των τοιχωμάτων μεταβάλλεται, οι ακίδες μετατοπίζονται, και οι παραμορφώσεις μετρώνται από του συνδεμένους μετρητές. Από προηγούμενες δοκιμές βαθμονόμησης συνάγονται οι πραγματικές μεταβολές της διαμέτρου. Από αυτές τις μεταβολές, και με τη χρήση της θεωρίας ελαστικότητας, προκύπτει η διαξονική κατάσταση της τάσης στο επίπεδο το κάθετο στον άξονα γεώτρησης.

Σε αυτήν την δοκιμή, όπως στην υδραυλική θραύση, καθορίζουμε τις τάσεις του απώτερου εντατικού πεδίου που έχουν συγκεντρωθεί γύρω από τη γεώτρηση μέτρησης. Μια χρήσιμη πτυχή της τεχνικής USBM είναι ότι παρέχει έναν κυλινδρικό πυρήνα που μπορεί να δοκιμασθεί στο εργαστήριο για να καθορισθούν οι ελαστικές ιδιότητες του ίδιου του πετρώματος. Θεωρώντας ότι ισχύουν οι υποθέσεις που έγιναν, ο μετρητής USBM είναι αποτελεσματικός επειδή είναι επαναχρησιμοποιήσιμος, επιτρέπει πολλαπλές μετρήσεις σε μία γεώτρηση και είναι σχετικά φτηνός και ανθεκτικός.

Κάθε μέτρηση μεταβολής μιας διαμέτρου επιτρέπει τον υπολογισμό μιας ορθής παραμόρφωσης. Συνήθως πραγματοποιούνται περισσότερα από ένα διατρήματα (Σχήμα 9) με αντίστοιχες μετρήσεις. Μέσω της χρήσης των εξισώσεων μετασχηματισμού της τάσης, είναι

δυνατός ο υπολογισμός των κύριων συνιστωσών της διαξονικής κατάστασης της τάσης και του προσανατολισμού τους. Υπάρχει, εντούτοις, η προστιθέμενη παρουσία της γεώτρησης, η οποία διαταράσσει την κατάσταση της τάσης από την επί τόπου φυσική κατάσταση.



Σχήμα 9. Διάταξη διατρημάτων (Kim & Franklin, 1987)

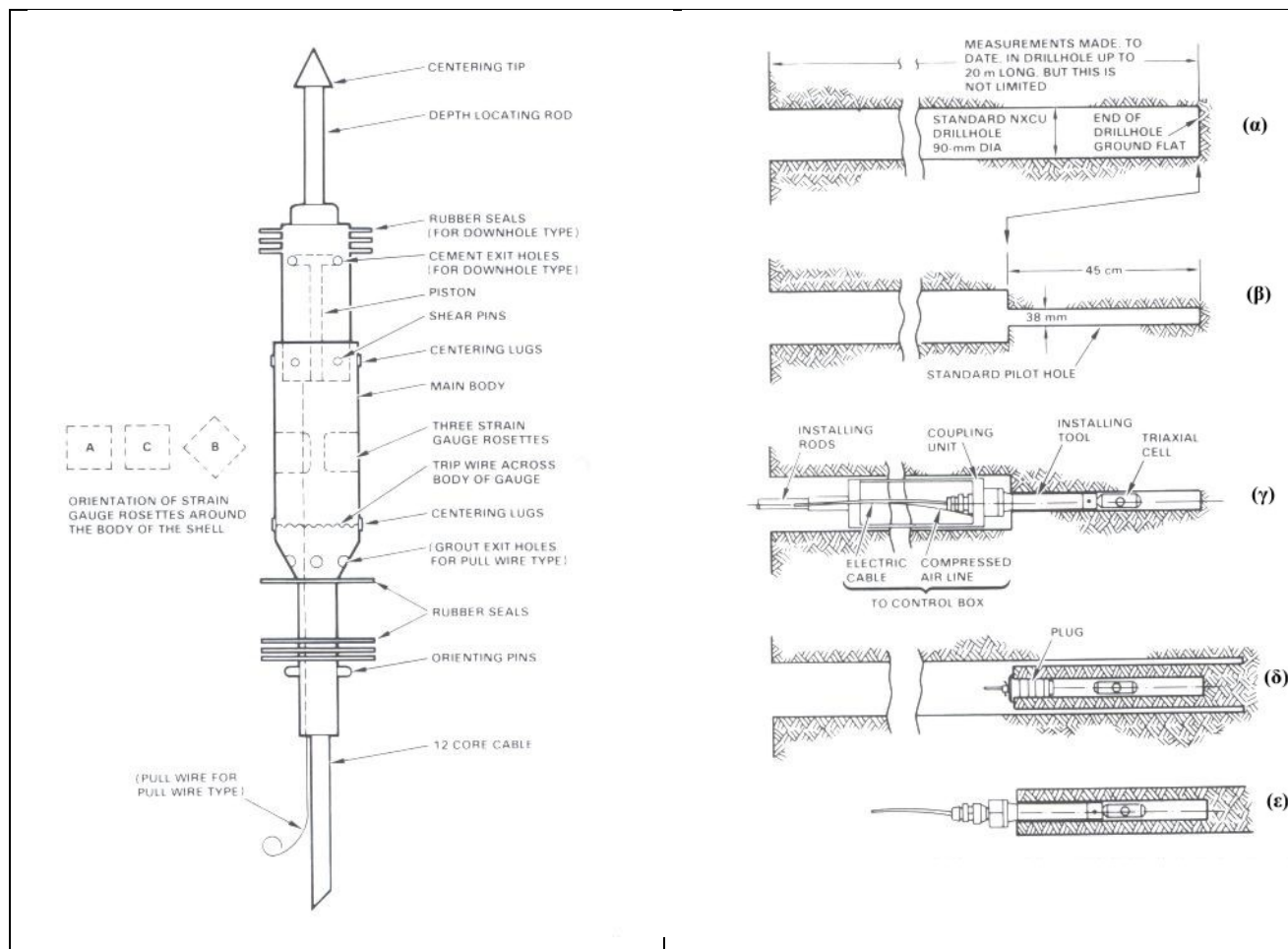
2.3.2 Μέτρηση της παραμόρφωσης με την κυψέλη CSIRO

Αυτή η συσκευή λειτουργεί (Σχήμα 10, αριστερά) παρόμοια με την αρχή της τορπίλης USBM, εκτός του ότι ο μετρητής είναι κολλημένος στη γεώτρηση και μπορεί να μετρήσει τις κανονικές πιέσεις σε ποικίλους προσανατολισμούς και θέσεις γύρω από το τοίχωμα της γεώτρησης. Ο μετρητής συγκολλείται στη θέση του μέσα στην γεώτρηση, οι αρχικές αναγνώσεις της τάσης λαμβάνονται και ο μετρητής υπερδιατρείται (Σχήμα 10, δεξιά). Τούτο αποτονώνει τον προκύπτοντα κούλο κύλινδρο και λαμβάνονται οι τελικές αναγνώσεις των μετρητών πίεσης. Ο μετρητής έχει 9 ή 12 χωριστούς μετρητές παραμόρφωσης, σε ροζέτες των τριών. Κατ' αυτόν τον τρόπο υπάρχει περίσσεια στις μετρήσεις, επιτρέποντας στατιστική ανάλυση των στοιχείων. Εναλλακτικά, εάν το πέτρωμα θεωρηθεί ότι είναι εγκάρσια ισότροπο, οι πρόσθετες αναγνώσεις επιτρέπουν τον υπολογισμό της κατάστασης της τάσης λαμβάνοντας υπόψη την ανισοτροπία.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτού και των παρόμοιων μετρητών είναι ότι ο προκύπτων κούλος κύλινδρος ανακτάται από τη γεώτρηση και μπορεί να υποβληθεί σε εργαστηριακή δοκιμή υπό ελεγχόμενες συνθήκες προκειμένου να καθοριστούν, η λειτουργικότητα του συστήματος (π.χ. εάν οποιοδήποτε μετρητές πίεσης έχουν αποκολληθεί, εάν ο κύλινδρος αποτελείται από άρρηκτο

πέτρωμα, κλπ), και οι απαραίτητες ελαστικές σταθερές.

Ένα σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου είναι το περιβάλλον της γεώτρησης. Πριν από την κόλληση του μετρητή, η επιφάνεια του τοιχώματος μπορεί εύκολα να λερωθεί με υλικό που εμποδίζει την προσκόλληση. Επίσης εάν το νερό της διάτρησης είναι σε διαφορετική θερμοκρασία από το πέτρωμα, η θερμική διαστολή ή συστολή του κοίλου κυλίνδρου μπορεί να εισάγει παραπλανητικές τάσεις. Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα της κόλλας μπορεί επίσης να μην είναι συμβατή με το χρόνο ζωής του μετρητή. Υπέρ του συστήματος είναι παράγοντες όπως ότι, ο μετρητής είναι σχετικά φτηνός, περιέχει ενσωματωμένη περίσσεια (ηλεκτρική και μαθηματική) και, είναι η μοναδική από τις τέσσερις μεθόδους που περιγράφηκαν, που προσδιορίζει την πλήρη κατάσταση της τάσης με μια εγκατάσταση.



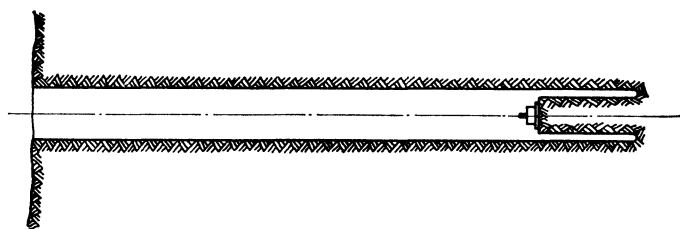
Σχήμα 10. Μέτρηση με τη τορπίλη CSIRO (Kim & Franklin, 1987). Αριστερά: Ο μετρητής. Δεξιά: Η διαδικασία τοποθέτησης.

2.4 Μετρήσεις στον πυθμένα γεώτρησης

Διάφοροι ερευνητές έχουν επιδιώξει να καθορίσουν τις τάσεις στο πέτρωμα με τη σταθερή συγκόλληση ηλεκτρικών μηχανομετρητών (strain gauges), π.χ. το κελί doorstopper του CSIR, στο

πυθμένα μιας γεώτρησης, που έχει πρώτα εξομαλυνθεί (Σχήμα 11), και τη μέτρηση της αποτόνωσης που επέρχεται με την επανέναρξη της διάτρησης του πυθμένα με κοπτικό πυρηνοληψίας σε δακτύλιο ίδιας εξωτερικής διαμέτρου με την γεώτρηση. Αυτή η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα της αποφυγής προβλημάτων που σχετίζονται με την υπερδιάτρηση γεώτρησης με ένα μεγάλης διαμέτρου κοπτικό δακτύλιο, ενώ έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις σε βάθος γεώτρησης μεγαλύτερο από 30 m. Η μεγαλύτερη δυσκολία με αυτή τη μέθοδο είναι η απαίτηση συσχετισμού της αποτόνωσης των παραμορφώσεων στον πυθμένα της γεώτρησης με τις τάσεις του πετρώματος.

Καθόσον η συγκεκριμένη μορφή της δοκιμής δεν επιτρέπει κλειστή λύση, η συσχέτιση της τάσης με την παραμόρφωση βασίζεται σε απλές σχέσεις προσαρμοσμένες στα αποτελέσματα αριθμητικών επιλύσεων ή πειραμάτων φωτοελαστικότητας.



Σχήμα 11. Τομή μέσω μιας γεώτρησης με επίπεδο πυθμένα και συγκολλημένο σε αυτόν μηχανοσύριγμο, με ακόλουθη υπερδιάτρηση.

Εάν x, y, z είναι οι διευθύνσεις των κυρίων τάσεων στο πέτρωμα και ο άξονας της γεώτρησης είναι παράλληλος με τη διεύθυνση z , η παραμόρφωση κατά την διεύθυνση x στον πυθμένα της γεώτρησης, που βρίσκεται σε κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης, είναι

$$\varepsilon_x = [a(\sigma_x - \sigma_y) - b(1 - \nu)\sigma_z] / E \quad (6)$$

Οι πειραματικές τιμές για το a είναι από 1.1 έως 1.6 και για το b από 0.07 έως 1.04 για γεώτρηση με επίπεδο πυθμένα, ενώ το a είναι 2.0 και το b είναι 0.5 για γεώτρηση με ημισφαιρικό πυθμένα. Δεδομένου ότι ο συντελεστής σε μια κατεύθυνση κάθετα στην τάση πεδίου είναι μηδέν για γεώτρηση με επίπεδο πυθμένα το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί χρησιμοποιώντας ένα αξισυμμετρικό προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, στο οποίο λαμβάνεται $a = 1.13$ και $b = 0.29$ για $\nu = 0.25$. Η επίδραση των διατμητικών τάσεων παράλληλα στη γεώτρηση θεωρείται αμελητέα.

Οι παραμορφώσεις στον πυθμένα μιας γεώτρησης μπορούν να μετρηθούν σε τρεις διευθύνσεις, OP, OQ, OR , με γνωστή μεταξύ τους κλίση χρησιμοποιώντας μια ροζέτα μέτρησης παραμορφώσεων. Θεωρούμε ότι η OP τοποθετείται σε άγνωστη γωνία θ ως προς την κατεύθυνση της κύριας τάσης σ_x και ότι οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από την υπερδιάτρηση της ροζέτας είναι $\varepsilon'_P, \varepsilon'_Q, \varepsilon'_R$. Οι συνήθεις σχέσεις για την εύρεση των κύριων παραμορφώσεων και

του προσανατολισμού τους σε δύο διαστάσεις από τρεις μετρήσεις παραμορφώσεων μπορούν να εφαρμοστούν για την εύρεση του προσανατολισμού των ε_x , ε_y και του μεγέθους των ε'_x , ε'_y , όπου $\varepsilon'_x = \varepsilon_x + b(1-\nu)\sigma_z/E$ και $\varepsilon'_y = \varepsilon_y + b(1-\nu)\sigma_z/E$. Στην πρακτική περίπτωση που $\alpha = \beta = \pi/4$, έχουμε

$$\begin{cases} \varepsilon'_x + \varepsilon'_y = \varepsilon'_P + \varepsilon'_R \\ \varepsilon'_x - \varepsilon'_y = [(\varepsilon'_P - 2\varepsilon'_Q + \varepsilon'_R)^2 - (\varepsilon'_P - \varepsilon'_R)^2]^{1/2} \\ 2\theta = \tan^{-1}(\varepsilon'_P - 2\varepsilon'_Q + \varepsilon'_R)/(\varepsilon'_P - \varepsilon'_R) \end{cases} \quad (7)$$

Η πλήρης εντατική κατάσταση μπορεί να βρεθεί είτε με την εκτέλεση μετρήσεων στον πυθμένα δύο κάθετων μεταξύ τους οπών (υποθέτοντας ότι ορύσσονται στην κατεύθυνση μιας κύριας τάσεως η κάθε μία) είτε με δύο σετ μετρήσεων στην ίδια γεώτρηση διαμορφώνοντας επίπεδο πυθμένα για την πρώτη και ημισφαιρικό πυθμένα για τη δεύτερη. Οι διαφορετικές σταθερές στην (6) για επίπεδο και ημισφαιρικό πυθμένα επιτρέπουν την εύρεση των σ_x , σ_y , σ_z από τις μετρήσεις στην ίδια οπή. Εάν οι διευθύνσεις των κύριων τάσεων δεν είναι γνωστές, πρέπει να γίνουν μετρήσεις σε μια πρόσθετη γεώτρηση που δεν είναι ούτε κάθετη ούτε παράλληλη στις οπές που χρησιμοποιήθηκαν στις προηγούμενες περιπτώσεις.

2.5 Εγκλεισμένοι μετρητές τάσης

Οι εγκλεισμένοι μετρητές τάσης σε γεωτρήσεις διαφέρουν από τους μετρητές παραμόρφωσης σε γεωτρήσεις δεδομένου ότι είναι δύσκαμπτες συσκευές που έχουν μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από αυτό του πετρώματος. Χρησιμοποιούνται για την άμεση μέτρηση των τάσεων χωρίς να απαιτείται η μέτρηση των παραμορφώσεων και ο υπολογισμός των τάσεων από τις παραμορφώσεις. Εάν ένας εγκλεισμένος κυλινδρικός μετρητής τάσεων στερεωθεί με τσιμέντο σε γεώτρηση έτσι ώστε οι τάσεις και οι μετατοπίσεις να είναι πάντα συνεχείς στο όριο μεταξύ του μετρητή και του περιβάλλοντος πετρώματος, οποιαδήποτε αλλαγή στις τάσεις πεδίου στο πέτρωμα παράγει μια αλλαγή των τάσεων στο μετρητή. Η σχέση μεταξύ των τάσεων στο μετρητή και εκείνων στο πέτρωμα εξαρτάται κυρίως από την αναλογία μεταξύ του μέτρου διάτμησης του υλικού του μετρητή, G_0 , και του πετρώματος, G , και είναι απαλά εξαρτώμενη από τις σχετικές τιμές του λόγου Poisson. Υποθέστε ότι οι λόγοι Poisson για το πέτρωμα και το υλικό του μετρητή είναι και οι δύο 0.25. Για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης η μεταβολή στην τιμή οποιασδήποτε τάσης κάθετα στον άξονα της γεώτρησης, σ , προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή της τάσης, σ_0 , στην ίδια διεύθυνση στο έγκλεισμα. Αυτές οι μεταβολές διέπονται από τη σχέση

$$\sigma_0 / \sigma = 3k / (2k + 1) \quad (8)$$

όπου $k = G_0/G$. Ο λόγος σ_0/σ τείνει σε μια σταθερή τιμή $3/2$ όταν το k τείνει στο άπειρο (Jaeger & Cook, 1976). Υπό τον όρο ότι το μέτρο διάτμησης του μετρητή είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του πετρώματος, οι μεταβολές της τάσης στο πέτρωμα απεικονίζονται ως μεταβολές της πίεσης στο μετρητή, οι οποίες είναι λίγο πολύ ανεξάρτητες από το συντελεστή διάτμησης του πετρώματος.

Πρώτος ο Coutinho (1949) πρότεινε έναν άκαμπτο εγκλεισμένο μετρητή για τον καθορισμό των τάσεων στο σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, εγκλεισμένοι μετρητές τάσεων έχουν κατασκευαστεί για τη μέτρηση τάσεων στο πέτρωμα από τους Potts (1954), Hiramatsu *et al* (1957), Hast (1958), May (1959), Wilson (1961), και άλλους. Οι τάσεις στο μετρητή μετρούνται με υδραυλικές κάψουλες, πώματα από διπλοθλαστικό γυαλί, μαγνητοσυσταλτικά, και μηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης. Η θεωρία στην οποία είναι βασισμένη η λειτουργία των εγκλεισμένων μετρητών τάσης υποθέτει τη συνέχεια των τάσεων και μετατοπίσεων σε ολόκληρο το σύνορο μεταξύ του μετρητή και της γεώτρησης. Ο Leeman (1964) επισήμανε ότι, όταν ένας μετρητής προσαρμόζεται ακριβώς σε μίας κυκλική οπή, μία μεταβολή της μονοαξονικής τάσης έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια επαφής μεταξύ του μετρητή σε μέρος του συνόρου. Για αυτόν τον λόγο οι μετρητές τάσης εγκαθίστανται γενικά με μία υψηλή προένταση και τσιμεντάρονται στις γεωτρήσεις.

Οι εγκλεισμένοι μετρητές τάσης σε γεωτρήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί γενικά για την καταγραφή των μεταβολών τάσης. Οι Berry και Fairhurst (1966) έχουν αναλύσει το πρόβλημα των μετρητών τάσης σε ένα βισκοελαστικό υλικό και δείχνουν ότι οι τάσεις στο μετρητή αλλάζουν αρκετά με το χρόνο λόγω ερπυσμού, ακόμα κι αν οι τάσεις πεδίου στο πέτρωμα παραμένουν σταθερές. Στο πέτρωμα που επιδεικνύει αξιόλογο ερπυσμό αυτό θα μπορούσε να παρέχει ένα μέσο για τον καθορισμό των επί τόπου φυσικών τάσεων στο πέτρωμα.

2.6 Στατιστική επεξεργασία των στοιχείων κατάστασης της τάσης

Τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις μιας μεταβλητής, ακολουθεί στατιστική επεξεργασία με σκοπό τον προσδιορισμό της ακρίβειας του συστήματος μέτρησης. Όταν μετριέται ένα βαθμωτό μέγεθος, η μέση τιμή και η σταθερή απόκλιση χρησιμοποιούνται συμβατικά ως μέτρα της τιμής και της μεταβλητότητάς της. Στην περίπτωση του τανυστή της τάσης υπάρχουν έξι ανεξάρτητες τιμές. Η κατάσταση της τάσης προσδιορίζεται από το μέγεθος και τον προσανατολισμό των κυρίων τάσεων. Έτσι, εάν ένας αριθμός μετρήσεων τάσης έχει πραγματοποιηθεί σε μια περιοχή, η σωστή διαδικασία είναι να βρεθούν οι συνιστώσες της τάσης σε ένα κοινό σύστημα αναφοράς, να υπολογιστεί ο μέσος όρος των συνιστωσών, και να υπολογιστούν έπειτα οι κύριες τάσεις από τις έξι τιμές των μέσων συνιστωσών. Σημειώστε επίσης ότι κάθε μία από τις έξι ανεξάρτητες συνιστώσες του τανυστή έχει τη δική της μέση τιμή και σταθερή απόκλιση, που θα είναι γενικά

διαφορετικές για κάθε μία. Κατά συνέπεια, η μεταβλητότητα (που εκφράζεται μέσω των έξι τυπικών αποκλίσεων των συνιστωσών) είναι επίσης τανυστής με κύριες τιμές και διευθύνσεις που δεν συμπίπτουν με τις κατευθύνσεις των κυρίων τάσεων. Η μορφή της μεταβλητότητας διάφορων μετρήσεων που γίνονται σε μια θέση μπορεί από μόνη της να είναι διαγνωστική. Η διαδικασία εύρεσης του μέσου όρου δύο τανυστών έχει ως ακολούθως:

Έστω τα αποτελέσματα δύο προγραμμάτων μέτρησης της τάσης που προσδιορίζονται από τους δείκτες α και β :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1^\alpha & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^\alpha \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_1^\beta & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2^\beta & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3^\beta \end{bmatrix}$$

Οι κύριες συνιστώσες της τάσης σε αυτούς τους τανυστές θα έχουν γενικά διαφορετικούς προσανατολισμούς. Πριν υπολογισθεί ο μέσος όρος, θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε ένα κοινό σύστημα αξόνων αναφοράς, κατά συνέπεια:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx}^a & \sigma_{xy}^a & \sigma_{xz}^a \\ & \sigma_{yy}^a & \sigma_{yz}^a \\ \text{symmetric} & & \sigma_{zz}^a \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^\beta & \sigma_{xy}^\beta & \sigma_{xz}^\beta \\ & \sigma_{yy}^\beta & \sigma_{yz}^\beta \\ \text{symmetric} & & \sigma_{zz}^\beta \end{bmatrix}$$

Ο μέσος όρος των δύο τανυστών είναι:

$$\begin{bmatrix} (\sigma_{xx}^\alpha + \sigma_{xx}^\beta)/2 & (\sigma_{xy}^\alpha + \sigma_{xy}^\beta)/2 & (\sigma_{xz}^\alpha + \sigma_{xz}^\beta)/2 \\ & (\sigma_{yy}^\alpha + \sigma_{yy}^\beta)/2 & (\sigma_{yz}^\alpha + \sigma_{yz}^\beta)/2 \\ \text{symmetric} & & (\sigma_{zz}^\alpha + \sigma_{zz}^\beta)/2 \end{bmatrix}$$

από τον οποίο μπορεί να υπολογισθούν οι κύριες συνιστώσες του τανυστή με τις κύριες διευθύνσεις τους.

Οι τανυστές αποτελούνται από μία βαθμωτή συνιστώσα και μία διανυσματική. Κατά συνέπεια, κατά την προσθήκη δύο τανυστών (Hudson and Harrison, 1997) προστίθεται η υδροστατική συνιστώσα ως βαθμωτό μέγεθος κατά μήκος του άξονα ορθής τάσης και η αποκλίνουσα συνιστώσα ως διάνυσμα στο χώρο τ - σ . Αυτή η μέθοδος μπορεί επίσης να προεκταθεί σε οποιοδήποτε αριθμό τανυστών.

3 Φυσική κατάσταση της τάσης

3.1 Πρόβλεψη του φυσικού εντατικού πεδίου με βάση τη θεωρία ελαστικότητας

Σαν πρώτη προσέγγιση της πρόβλεψης, γίνεται συνήθως η υπόθεση ότι η μία από τις τρεις κύριες τάσεις του φυσικού εντατικού πεδίου δρα κατακόρυφα και οι άλλες δύο οριζόντια. Η κατακόρυφη συνιστώσα σ_v αναμένεται ότι αυξάνει σε μέγεθος με το βάθος z από την επιφάνεια του εδάφους, λόγω του φαινομένου βάρους γ των υπερκειμένων. Η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης αναμένεται σύμφωνα με τα παραπάνω να δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_v = \gamma \cdot z \quad (9)$$

Στα πετρώματα συνήθεις τιμές του φαινομένου βάρους κυμαίνονται από $\gamma = 0.023 \text{ MN/m}^3$ για αργιλικούς σχιστόλιθους έως $\gamma = 0.030 \text{ MN/m}^3$ για το γάββρο. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης, εκτός αν το πρόγραμμα προσδιορισμού τάσης περιλαμβάνει την άμεση μέτρησή της. Για παράδειγμα, κατά τη χρησιμοποίηση της μεθόδου υδραυλικής θραύσης, η κατακόρυφη συνιστώσα υπολογίζεται με αυτήν την τεχνική. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας το μετρητή CSIRO, μετρείται ο πλήρης τανυστής της τάσης και έτσι δεν είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί η κατακόρυφη συνιστώσα της τάσης με βάση την παραπάνω σχέση.

Δεδομένης της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης σε ένα σημείο της βραχομάζας, αναμένεται ότι μία οριζόντια συνιστώσα θα προκαλούνταν ως αποτέλεσμα της κατακόρυφης συμπίεσης του πετρώματος. Προκειμένου να υπολογισθεί η οριζόντια συνιστώσα, θεωρείται χάριν απλοποίησης ότι το πέτρωμα είναι συνεχές, ομογενές, ισότροπο, γραμμικά ελαστικό υλικό. Επομένως, μία οριζόντια κύρια συνιστώσα της παραμόρφωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{H1} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \nu \cdot \sigma_{H2} - \nu \cdot \sigma_v) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{H2} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H2} - \nu \cdot \sigma_{H1} - \nu \cdot \sigma_v)$$

Θεωρώντας ότι οι οριζόντιες παραμορφώσεις παρεμποδίζονται λόγω της ύπαρξης των γειτονικών πετρωμάτων που και αυτά υφίστανται το ίδιο κατακόρυφο βαρυτικό φορτίο, προκύπτει:

$$\varepsilon_{H1} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H1} - \nu \cdot \sigma_{H2} - \nu \cdot \sigma_v) = \varepsilon_{H2} = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_{H2} - \nu \cdot \sigma_{H1} - \nu \cdot \sigma_v) = 0 \Rightarrow$$

$$\sigma_{H1} = \sigma_{H2} = \sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_v \quad (11)$$

Αυτή η σχέση σύμφωνα με τους Turchaninon et al. (1979), παρήχθη αρχικά από τον ακαδημαϊκό Dinnik το 1925. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι το μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος θεωρείται σταθερό σε όλη τη βραχομάζα. Από αυτήν την ανάλυση, διαπιστώνουμε ότι λόγος μεταξύ της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης είναι συνάρτηση μόνον του λόγου του Poisson. Ως εκ τούτου, γνωρίζοντας τις ακραίες τιμές του λόγου του Poisson για τα πετρώματα, μπορούμε να βρούμε τα θεωρητικά ανώτερα και κατώτερα όρια για την προκαλούμενη οριζόντια συνιστώσα της τάσης. Έτσι,

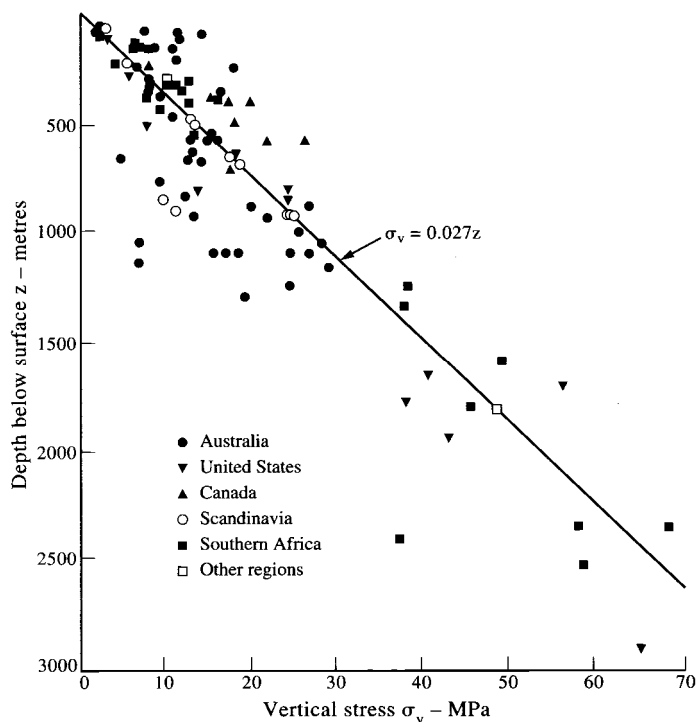
- για $\nu = 0$, $\sigma_H = 0$
- για $\nu = 0.25$, $\sigma_H = 0.33\sigma_v$
- για $\nu = 0.5$, $\sigma_H = \sigma_v$

Επομένως, για τη χαμηλότερη τιμή του $\nu=0$ αντιστοιχεί η χαμηλότερη τιμή του λόγου των συνιστωσών της τάσης. Για τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή του λόγου του Poisson $\nu=0.5$ αντιστοιχεί οριζόντια συνιστώσα της τάσης ίση με την κατακόρυφη. Για τη συνήθη τιμή του λόγου του Poisson $\nu=0.25$, η προκαλούμενη οριζόντια συνιστώσα της τάσης είναι ίση με το ένα τρίτο της εφαρμοζόμενης κατακόρυφης τάσης. Αυτοί οι υπολογισμοί υποδεικνύουν τις πιθανές τιμές των κατακόρυφων και οριζόντιων συνιστωσών του φυσικού εντατικού πεδίου σύμφωνα με τη θεωρία της ισότροπης ελαστικότητας.

3.2 Μετρημένες τιμές του φυσικού εντατικού πεδίου

Τις παραπάνω θεωρητικές προβλέψεις δυνάμεθα να τις συγκρίνουμε με μετρήσεις των συνιστωσών της τάσης που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Σε μερικές περιπτώσεις, οι μετρήσεις ήταν μάλλον βιαστικές και δεν καθόρισαν όλα τις συνιστώσες του τανυστή των τάσεων. Σε άλλες περιπτώσεις, έγινε προσπάθεια υπολογισμού και των έξι ανεξάρτητων συνιστωσών του τανυστή της τάσης. Μερικά από αυτά τα στοιχεία συλλέχθηκαν από τους Hoek and Brown (1980) και παρουσιάζονται στις δύο γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 12 και στο Σχήμα 13. Στο Σχήμα 12, σχεδιάζεται η ευθεία $\sigma_v = 0.027 \cdot z$, που συμφωνεί με τη σχέση $\sigma_v = \gamma \cdot z$, για $\gamma = 0.027 \text{ MN/m}^3$. Διαπιστώνεται, ότι η εκτίμηση της κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης είναι βασικά σωστή, με την έννοια της γραμμής βέλτιστης προσαρμογής. Σε πολλές περιπτώσεις η μετρημένη συνιστώσα της τάσης είναι σχεδόν ακριβώς όπως προβλέπεται. Εν τούτοις, σε άλλες περιπτώσεις και ειδικά σε βάθη μικρότερα από 1500m, η μετρημένη συνιστώσα

μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετική, ως και πενταπλάσια ή υποπενταπλάσια, από την προβλεφθείσα. Επομένως, εφόσον είναι δυνατόν ή το μέγεθος του έργου το επιβάλλει, είναι προτιμότερη η μέτρηση της τάσης παρά η εκτίμησή της.

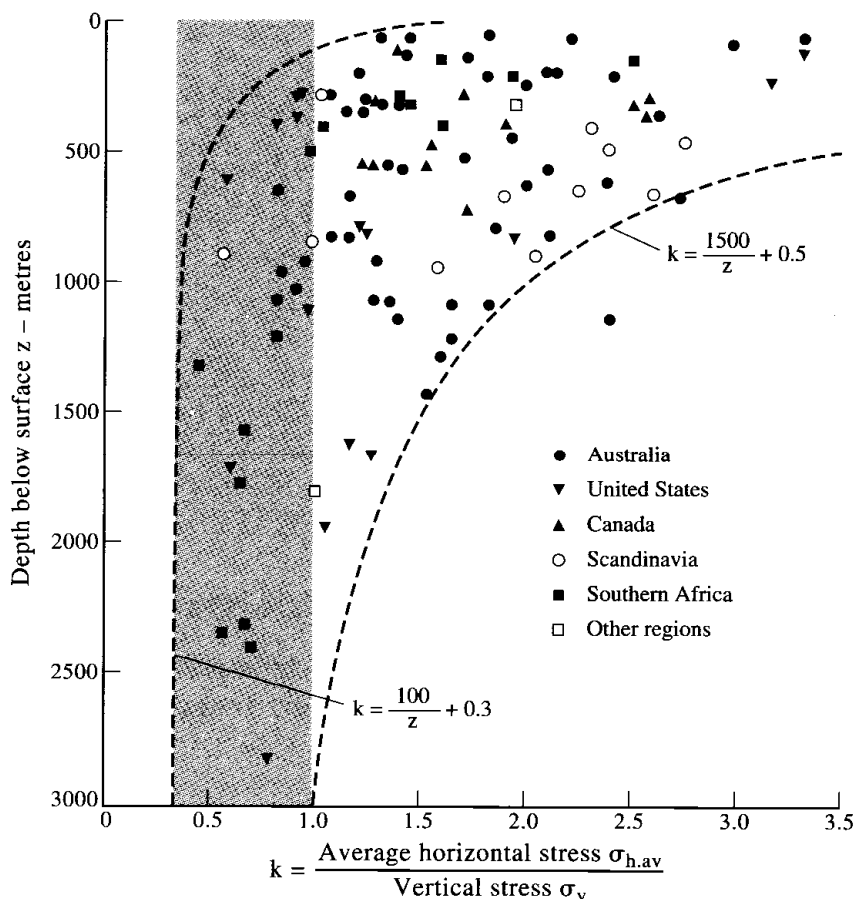


Σχήμα 12. Παγκόσμια στοιχεία κατακόρυφης συνιστώσας της τάσης (Hoek and Brown, 1980).

Στο Σχήμα 13 συσχετίζεται ο συντελεστής πλευρικής ώθησης του πετρώματος k , δηλ. ο λόγος της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης προς την κατακόρυφη, με το βάθος. Προκειμένου να υπολογισθεί ο συντελεστής αυτός, ως οριζόντια συνιστώσα της τάσης ορίζεται η μέση τιμή των δύο οριζόντιων συνιστωσών. Τούτο ομαλοποιεί τυχόν ακρότητες στις μετρήσεις του k . Θεωρητικά δείξαμε προηγουμένως, με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας, ότι $k=v/(1-v)$. Με βάση τις μετρήσεις, βρέθηκε ότι οι τιμές του k κυμαίνονται μεταξύ δύο περιβαλλουσών ως κάτωθι:

$$\frac{100}{z} + 0.3 < k < \frac{1500}{z} + 0.5 \quad (12)$$

Σημειώστε ότι η σκιασμένη κατακόρυφη ζώνη στο Σχήμα 13 δίνει το εύρος των τιμών του k από 0.33 έως 1.00 που προβλέφθηκε από τη θεωρία ισότροπης ελαστικότητας. Για μεγαλύτερα βάθη σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις οι τιμές του k τείνουν στη ζώνη $0.3 < k < 0.5$. Κατά συνέπεια, για τα σημαντικά βάθη, δύναται να υποστηριχθεί ότι το πρότυπο της ελαστικότητας παρέχει αποδεκτές τιμές για την τιμή του k .

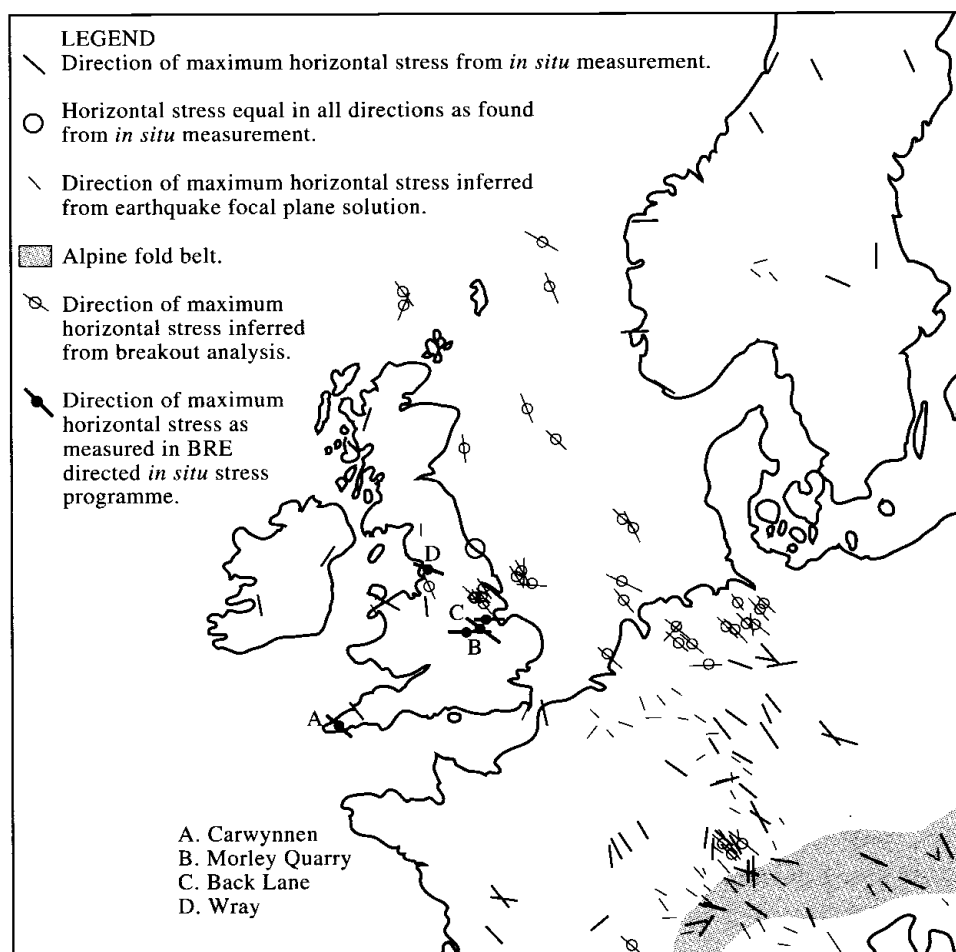


Σχήμα 13. Παγκόσμια στοιχεία του συντελεστή πλευρικής ώθησης του πετρώματος (Hoek and Brown, 1980).

Εν τούτοις, από τα στοιχεία που φαίνονται στο σχήμα γίνεται σαφές, ότι είναι ο μάλλον ο κανόνας παρά την εξαίρεση, η οριζόντια συνιστώσα της τάσης να είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη. Παραδείγματος χάριν, στα βάθη που κατασκευάζονται τα τεχνικά έργα, δηλ. έως 500m, σε 92% των μετρημένων περιπτώσεων (100% των περιπτώσεων έξω από τον Καναδά), το μέγεθος της μέσης οριζόντιας συνιστώσας της τάσης υπερβαίνει την κατακόρυφη. Επίσης, στα χαρακτηριστικά βάθη των μεταλλείων, δηλ. έως και 1000m, ισχύουν παρόμοια.

3.3 Αιτίες απόκλισης του φυσικού εντατικού πεδίου από το προβλεπόμενο

Οι υψηλές οριζόντιες συνιστώσες της τάσης προκαλούνται από παράγοντες όπως η διάβρωση, οι τεκτονικές πιέσεις, η ανισοτροπία του πετρώματος, η τοπική επίδραση των ασυνεχειών με τα επακόλουθα αποτελέσματα κλίμακας, και η καμπυλότητα της γης.



Σχήμα 14. Προσανατολισμός της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης στη βορειοδυτική Ευρώπη (Hudson and Cooling, 1988).

3.3.1 Διάβρωση

Το ότι η διάβρωση της επίγεια επιφάνειας προκαλεί αύξηση στην τιμή του k συζητήθηκε αρχικά από τον Goodman (1989). Η βασική ιδέα είναι ότι ο τύπος $k=v/(1-v)$ ισχύει για την αρχική μάζα του πετρώματος. Κατά τη διάβρωση της επίγεια επιφάνειας, η εξάλειψη του υπερκείμενου φορτίου και η επακόλουθη επίδραση στις κατακόρυφες και οριζόντιες συνιστώσες της τάσης, θα προκαλέσει μια αύξηση της τιμής του k , που μπορεί να ξεπεράσει και τη μονάδα. Τούτο οφείλεται στο μερικό κλείδωμα της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης.

3.3.2 Τεκτονική δραστηριότητα

Στο Σχήμα 14 φαίνονται οι διευθύνσεις των οριζόντιων κυρίων τάσεων στη βορειοδυτική Ευρώπη. Η συνέπεια στις κατευθύνσεις των τάσεων αυτών, σε μια τέτοια μεγάλη περιοχή, υποδεικνύει ότι αυτή οφείλεται σε κάποια μορφή τεκτονική δραστηριότητα. Από τους σεισμούς του 1906 και του 1989 κατά μήκος του ρήγματος του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ, ξέρουμε ότι οι υψηλές διαμητικές τάσεις μπορούν να προκύψουν από την τεκτονική δραστηριότητα. Η γένεση των

Άνδρων οφείλεται στις υψηλές οριζόντιες ωθήσεις λόγω της ζώνης υποβύθισης έξω από τις ακτές της Χιλής. Τα επιφανειακά και υπόγεια μεταλλεία της χώρας αυτής, που είναι από τα μεγαλύτερα στον κόσμο, παρουσιάζουν ισχυρά σημάδια φαινομένων που σχετίζονται με τις ισχυρές οριζόντιες πιέσεις, όπως αστάθεια των πρανών και εκρήξεις του πετρώματος, αντίστοιχα.

3.3.3 Ανισοτροπία πετρώματος

Η έκφραση $k=v/(1-v)$ παρήχθη για πέτρωμα που θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό και ισότροπο. Είναι δυνατό εν τούτοις να υπολογιστεί η τιμή του k για ένα υλικό που είναι εγκάρσιως ισότροπο (που έχει δηλαδή διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες στην κατακόρυφη διεύθυνση από ότι στις οριζόντιες διευθύνσεις), και που είναι ορθότροπο (που έχει δηλαδή διαφορετικές ελαστικές ιδιότητες σε τρεις κάθετες διευθύνσεις). Ένα εγκάρσια ισότροπο υλικό αντιπροσωπεύει τη συμπεριφορά ενός μη ρωγματομένου ιζηματογενούς πετρώματος, ενώ ένα ορθότροπο υλικό (Gerrard, 1982) αντιπροσωπεύει πετρώματα τεμνόμενα από τρία μεταξύ τους κάθετα σύνολα ασυνεχειών. Είναι φανερό, ότι οι οριζόντιες συνιστώσες της τάσης μπορούν να είναι διαφορετικές στην περίπτωση του ορθότροπου υλικού. Για εγκάρσια ισότροπο υλικό (Wittke, 1984; Sofianos, 1984) με τον άξονα 2, κάθετο στο επίπεδο ισοτροπίας, και κύριο σύστημα αξόνων 1, 2, 3:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_2/E_2 & -\nu_1/E_1 \\ -\nu_2/E_2 & 1/E_2 & -\nu_2/E_2 \\ -\nu_1/E_1 & -\nu_2/E_2 & 1/E_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Για μηδενισμό των παραμορφώσεων στο επίπεδο 1,2:

$$k = \frac{\nu_2}{1-\nu_1} \cdot \frac{E_1}{E_2} \quad (14)$$

Επίσης, από την παραπάνω σχέση παρατηρούμε ότι εφόσον ο κατακόρυφος άξονας είναι ο 2, και οι τιμές του λόγου E_1/E_2 είναι μεγαλύτερες της μονάδας, που γενικά ισχύει πλησίον της επίγειας επιφάνειας, η τιμή του k δύναται να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Η μειούμενη τιμή του λόγου των μέτρων ελαστικότητας με το βάθος, προς μία ισότροπη κατάσταση $E_1/E_2=1$, εξηγεί (Amadei and Stephanson, 1997) τις περιβάλλουσες k που δίνονται στο Σχήμα 13.

Για παράδειγμα, εφόσον το πέτρωμα είναι οριζόντια διαστρωμένο με απόσταση στρωμάτων S , δυστροπία στρωμάτων k_n , και μέτρο ελαστικότητας πετρώματος E , τότε (βλέπε εξίσωση 3, κεφάλαιο «Ανισότροπο πέτρωμα»):

$$E_1=E,$$

$$\frac{E_1}{E_2} = 1 + \frac{E}{k_n \cdot S} \quad (15)$$

Εφόσον χρησιμοποιήσουμε για τη δυστροπία των ενδιαστρώσεων (βλέπε εξίσωση 17, κεφάλαιο «Ασυνέχειες»):

$$k_n = k_{ni} \cdot \left(\frac{\sigma_n + k_{ni} \cdot V_m}{k_{ni} \cdot V_m} \right)^2 \quad (16)$$

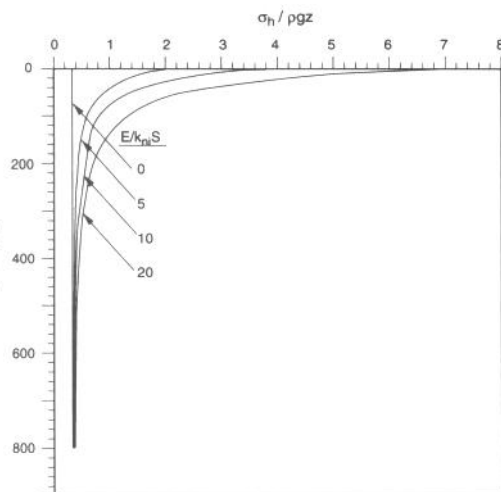
η οποία λαμβάνει υπόψη της εκτός από την ποιότητα της ενδιάστρωσης, με τις σταθερές παραμέτρους $k_{ni} V_m$, και τη θλίψη της σ_n . Αντικαθιστώντας στην προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$\frac{E_1}{E_2} = 1 + \frac{E}{k_{ni} \cdot S} \cdot \left(\frac{k_{ni} \cdot V_m}{\sigma_n + k_{ni} \cdot V_m} \right)^2 \quad (17)$$

Αντικαθιστώντας και πάλι στη σχέση που δίνει το συντελεστή πλευρικής ώθησης:

$$k = \frac{v_2}{1 - v_1} \cdot \left[1 + \frac{E}{k_{ni} \cdot S} \cdot \left(\frac{k_{ni} \cdot V_m}{\rho \cdot g \cdot z + k_{ni} \cdot V_m} \right)^2 \right] \quad (18)$$

Αν για παράδειγμα δώσουμε $k_n \cdot V_{mi} = 1.71 \text{MPa}$, $v_1 = v_2 = 0.25$, και $E/k_{ni}S$ μεταβλητό από 0 έως 20, προκύπτει το διάγραμμα στο Σχήμα 15. Η περίπτωση ισότροπου πετρώματος αντιστοιχεί σε λόγο $E/k_{ni}S = 0$.

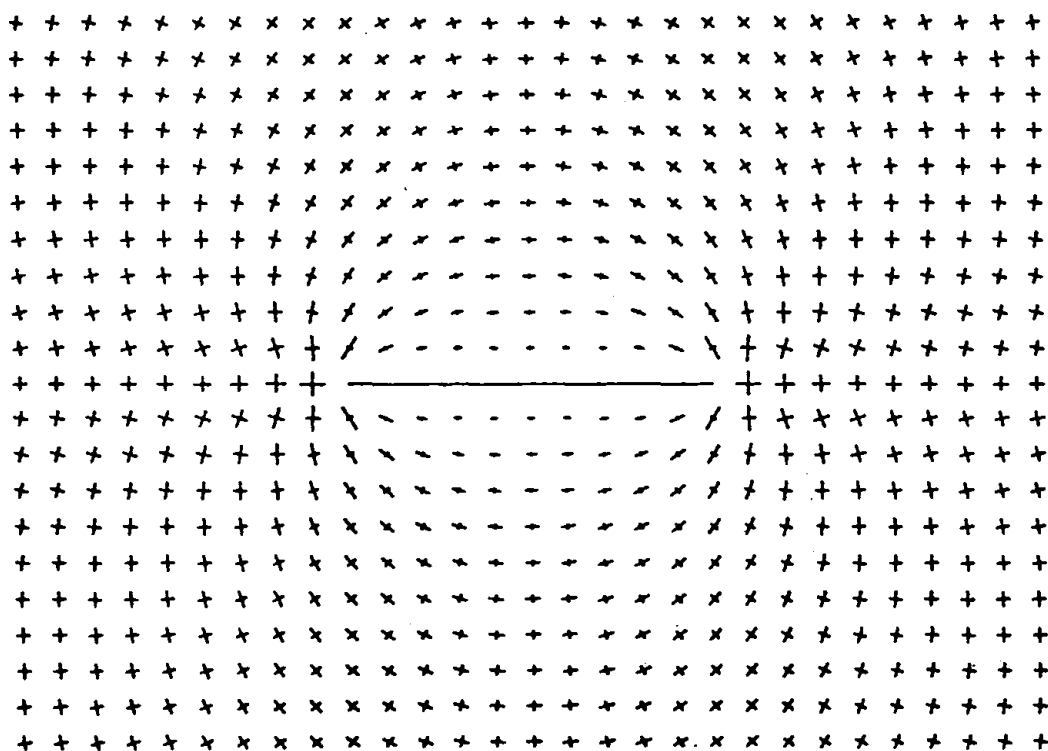


Σχήμα 15. Μεταβολή του k με το βάθος για διαστρωμένο πέτρωμα (Amadei & Stephanson, 1997)

3.3.4 Ασυνέχειες

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που προκαλούν τη διασπορά των αποτελεσμάτων μέτρησης των τάσεων είναι το γεγονός ότι το πέτρωμα δεν είναι συνεχές υλικό αλλά θραυσμένο σε

διάφορες κλίμακες, ώστε να είναι ασυνεχές, και η εσωτερική κατανομή της τάσης απεικονίζει αυτήν την γεωμετρία. Στο Σχήμα 16 φαίνεται σε ένα παράδειγμα η επιρροή μιας θραύσης στο πεδίο των τάσεων για συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης και υδροστατικό απώτερο εντατικό πεδίο. Είναι σαφές ότι τα μεγέθη των κύριων τάσεων και οι προσανατολισμοί τους διαταράσσονται σημαντικά από την παρουσία της θραύσης. Για μια ασυνέχεια μήκους της τάξης των 10km, οι μετρήσεις της τάσης σε μια παρακείμενη περιοχή θα επηρεάζονταν από την παρουσία της, αλλά αυτή η τάση θα ήταν αντιπροσωπευτική της περιοχής. Αντιθέτως, μια θραύση πετρώματος μήκους μερικών μέτρων θα προκαλούσε μια τοπική διαταραχή στην περιοχή μέτρησης της τάσης που δεν θα ήταν αντιπροσωπευτική της ευρύτερης περιοχής. Υποστηρίζεται ότι η μεγάλη διασπορά των καταγραφών του εντατικού πεδίου οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη διαφορετικών συστημάτων θραύσης που υπάρχουν σε όλα τα πετρώματα. Σα συμπέρασμα επομένως ακολουθεί ότι μια ευρεία διασπορά στις μετρημένες τιμές δεν οφείλεται απαραίτητως σε κακές πειραματικές τεχνικές. Αντίθετα, η ίδια η διασπορά μπορεί να δείξει πολλά για το φυσικό εντατικό πεδίο.



Σχήμα 16. Παράδειγμα επίδρασης μιας ασυνέχειας στην κατάσταση του εγγύς πεδίου των τάσεων, για υδροστατικό διδιάστατο εντατικό πεδίο και μία ασυνέχεια που έχει μέτρο παραμόρφωσης 10% του περιβάλλοντος πετρώματος (Hyett, 1990).

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας της ασυνέχειας έχει επίσης σημασία στην κατανομή των τάσεων γύρω από αυτήν. Εφόσον η ασυνέχεια είναι ανοικτή, $E_D=0$, η μέγιστη κύρια τάση θα κατευθύνεται παράλληλα προς την ασυνέχεια και η ελάχιστη κάθετα σε αυτήν. Αντίθετα, εφόσον η ασυνέχεια

είναι πληρωμένη με υλικό πολύ δύστροπο, η μέγιστη κύρια τάση θα κατευθύνεται κάθετα στην ασυνέχεια και η ελάχιστη παράλληλα με την ασυνέχεια. Στην περίπτωση που η ασυνέχεια είναι πληρωμένη με υλικό παρόμοιας παραμορφωσιμότητας με το περιβάλλον πέτρωμα, τότε δεν θα παρατηρηθεί μεταβολή της κατεύθυνσης του εντατικού πεδίου.

3.3.5 Καμπυλότητα της γης

Ο McCutchen (1982) έλαβε υπόψη του την καμπυλότητα της γης, θεωρώντας το φλοιό της ως σφαιρικό κέλυφος εξωτερικής ακτίνας R και εσωτερικής R_1 , με ίδιο βάρος γ , γεμισμένο εσωτερικά του από ασυμπίεστο υγρό. Η εξίσωση ισορροπίας σε σφαιρικές συντεταγμένες είναι επομένως:

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} - \frac{2(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr})}{r} + \gamma = 0 \quad (19)$$

Οι τάσεις αυτές συσχετίζονται με τις ακτινικές μετατοπίσεις u :

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu) \frac{du}{dr} + 2\nu \frac{u}{r} \right] \quad (20)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right] \quad (21)$$

$$\varepsilon_{rr} = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{u}{r} \quad (22)$$

Με αντικατάσταση των τάσεων (20, 21) στην εξίσωση ισορροπίας (19), προκύπτει:

$$r^2 \frac{d^2u}{dr^2} + 2r \frac{du}{dr} - 2u = \frac{\gamma r^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} \quad (23)$$

Η επίλυση της εξίσωσης δίνει την ακτινική μετατόπιση:

$$u = \frac{\gamma r^2 (1+\nu)(1-2\nu)}{4E(1-\nu)} + C_1 r + \frac{C_2}{r^2} \quad (24)$$

Που μετά την αντικατάστασή της στις τάσεις (20, 21), δίνει:

$$\sigma_{rr} = \frac{\gamma r}{2(1-\nu)} + \frac{E}{(1-2\nu)} C_1 - \frac{2E}{(1+\nu)r^3} C_2 \quad (25)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{(1+2\nu)\gamma r}{4(1-\nu)} + \frac{E}{(1-2\nu)} C_1 + \frac{E}{(1+\nu)r^3} C_2 \quad (26)$$

Οι σταθερές ολοκλήρωσης C_1 , C_2 δύνανται να προσδιοριστούν από τις οριακές συνθήκες μηδενισμού των ακτινικών (κατακόρυφων) τάσεων στην επιφάνεια και των ακτινικών μετατοπίσεων στη διεπιφάνεια φλοιού-μανδύα, σε ακτίνα R_1 :

$$\sigma_{rr}(r = R) = 0; \quad u(r = R_1) = 0 \quad (27)$$

Μετά την αντικατάσταση των σταθερών προκύπτουν οι δύο σχέσεις που δίνουν τις ακτινικές και εφαπτομενικές τάσεις στο φλοιό. Οι σχέσεις αυτές απλοποιούνται αν ληφθεί υπόψη το μικρό

πάχος t του φλοιού ($\sim 40\text{km}$) σε σχέση με την ακτίνα R της γης ($\sim 6400\text{km}$), οπότε προκύπτουν απλοποιημένες σχέσεις για την ακτινική (κατακόρυφη) και εφαπτομενική (οριζόντια) τάση:

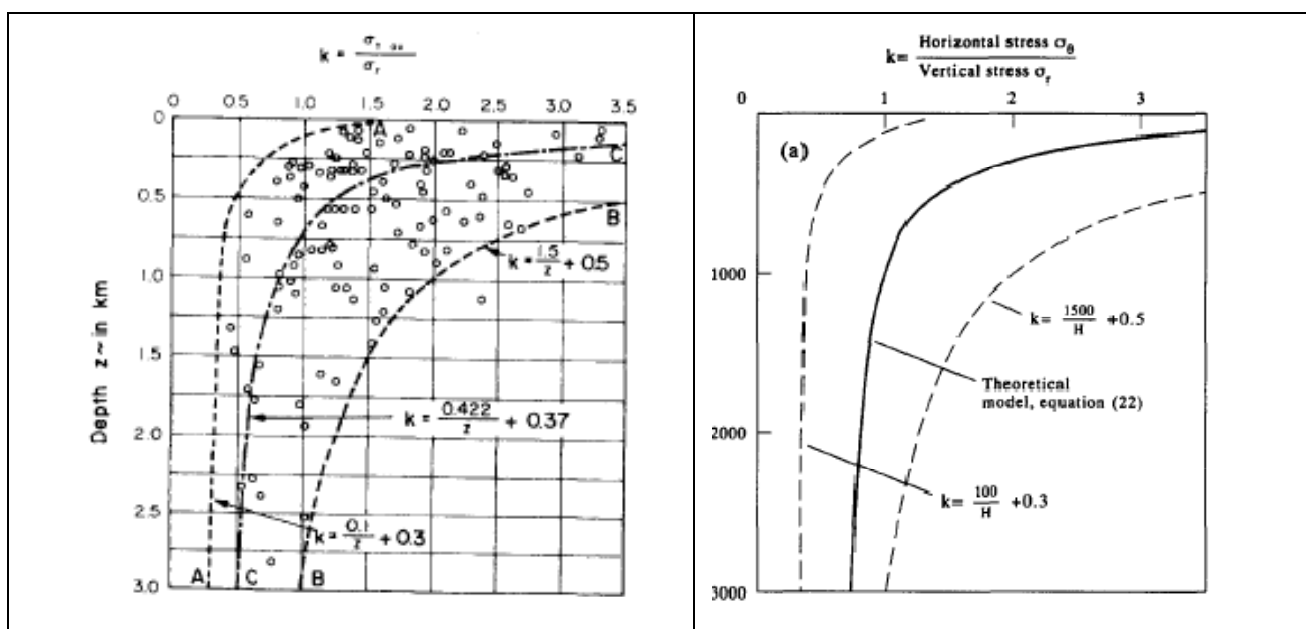
$$\sigma_{rr} = \sigma_{\text{κατακόρυφη}} = \rho g(R - r) = \rho g z \quad (28)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\text{οριζόντια}} = \frac{t}{4R} \rho g t + \frac{\nu}{1-\nu} \rho g z \quad (29)$$

Παρατηρούμε ότι οι σχέσεις αυτές είναι αύξουσες γραμμικές συναρτήσεις του βάθους. Ο συντελεστής πλευρικής ώθησης δίνεται από το λόγο $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_{rr}$ και είναι:

$$k = \frac{\sigma_{\theta\theta}}{\sigma_{rr}} = \frac{\nu}{1-\nu} + \frac{t^2}{4Rz} \quad (30)$$

Η μεταβολή του συντελεστή πλευρικής ώθησης με το βάθος, που προβλέπεται από αυτό το μοντέλο, για πάχος φλοιού $t=40\text{km}$, μέση πυκνότητα πετρωμάτων $\rho=2700\text{kg/m}^3$, λόγο Poisson $\nu=0.25$, και ακτίνα γης 6400km , φαίνεται στο Σχήμα 17 αριστερά, μαζί με τις καμπύλες οριοθέτησης, των μετρήσεων, που συλλέξανε οι Brown and Hoek (1978). Παρατηρούμε ότι η θεωρητική καμπύλη βρίσκεται μέσα στα όρια των μετρήσεων, και είναι αντίστροφη συνάρτηση του βάθους, όπως και οι καμπύλες οριοθέτησης.



Σχήμα 17. Μεταβολή της πλευρικής ώθησης του πετρώματος με το βάθος. Αριστερά: Θεώρηση ομοιογενούς ισότροπου φλοιού επί ασυμπίεστον μανδύα (McCutchen, 1982). Δεξιά: Θεώρηση ανομοιογενούς ελαστικού φλοιού επί ελαστικού μανδύα, και μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος (Sheorey, 1994).

Ο Sheorey (1994), επέκτεινε το πρότυπο αυτό, θεωρώντας ότι ο φλοιός και ο υποκείμενος μανδύας αποτελούνται από ανομοιογενή επάλληλα στρώματα, στα οποία η θερμοκρασία αυξάνει με το βάθος και διαστέλλει το πέτρωμα. Στο Σχήμα 17 δεξιά, σχεδιάζεται η μεταβολή του k με το βάθος, όπως προκύπτει από τη θεώρηση αυτή. Η προσέγγιση αυτή πλησιάζει καλύτερα τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν από τους Brown & Hoek (1978), και προβλέπει ότι οι οριζόντιες τάσεις στην επιφάνεια θα είναι περίπου 11MPa. Τέτοιες τάσεις έχουν κάποιες φορές μετρηθεί σε βάθος λίγων δεκάδων μέτρων (Herget, 1987) από την επιφάνεια.

3.3.6 Τοπογραφικό ανάγλυφο

Το τοπογραφικό ανάγλυφο επηρεάζει τόσο τις τιμές των συνιστωσών της τάσης, όσο και τη διεύθυνσή τους. Η επίδραση εν τούτοις του ανάγλυφου έχει επίδραση σε μικρό βάθος μόνο. Η διασπορά της τιμής της κατακόρυφης τάσης στα μικρά βάθη (Σχήμα 12) εκτιμάται ότι επηρεάζεται σημαντικά από την αιτία αυτή.

3.3.7 Άλλοι παράγοντες

Εκτός των ανωτέρω αιτίων που προκαλούν την απόκλιση του εντατικού πεδίου από το προβλεπόμενο, αιτίες επίσης αποτελούν οι γήινες και πλανητικές δυνάμεις, η έλξη της σελήνης, καθώς και τάσεις που οφείλονται σε ανθρώπινη δραστηριότητα.

4 Αναφορές

- Amadei B. and Stephanson O. (1997). “Rock stress and its measurement”, Chapman and Hall, pp.490.
- Bandis SC, Lumsden AC, Barton N (1983). “Fundamentals of rock joint deformation”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 20, 249-68.
- Barros A., Nuno S. and Rottmann J. (1983). “Chile: La tierra en que Vivimos”, S.A., San Francisco 116, Santiago, Chile, 506pp.
- Brown ET and Hoek E (1978). “Trends in relationships between in situ stresses and depth”, Int. J. Rock Mech., 15, 211-25.
- Cuisiat FD & Haimson BC (1992). “Scale effects in rock mass strength measurements”, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech Abstr. 20, 3, 135-148.
- Dyke CG (1988). “In situ stress indicators for rock at great depth”, PhD thesis, Imperial College, London, 361 pp.
- Gerrard CM (1982). “Equivalent elastic moduli of a rock mass consisting of orthorhombic layers”, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci. & Geomech. Abstr., 19, 1, 9-14.
- Goodman RE (1989). “Introduction to Rock Mechanics”, 2nd edition, J. Wiley, Chichester, 562 pp.

- Herget G. (1987). “Stress assumptions for underground excavations in the Canadian Shield”, *Int. J. Rock Mech.*, 24, 95-97.
- Hoek E and Brown ET (1980). “Underground excavations in rock”, IMM, London, 527pp.
- Hudson JA & Cooling CM (1988). “In situ rock stresses and their measurement in the UK. Part 1: The current state of knowledge”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 25, 363-370.
- Hudson JA & Harrison JP. (1997). “Engineering Rock Mechanics. An introduction to the principles”, Pergamon, 444pp.
- Hyett AJ (1990). “The potential state of stress in a naturally fractured rock mass”, PhD thesis, Imperial College, University of London, 365 pp.
- Hyett AJ, Dyke CG and Hudson JA (1986). “A critical examination of basic concepts associated with the existence and measurement of in situ stress”, in *Proc. of the Int. Symp. on Rock stress and Rock stress measurements*, Stockholm (O. Stephanson, ed.) pp. 387-396.
- Jaeger JC and Cook NGW (1976). “Fundamentals of Rock Mechanics”, Science Paperbacks.
- Kim K & Franklin JA (1987). “Suggested methods for rock stress determination”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24, 1, 53-74.
- Kirsch G (1898). “Die Theorie der Elastizitat und die Bedurfnisse der Festigkeitslehre”, *V.D.J.*, 42, 29, p.799.
- McCutchen WR (1982). “Some elements of a theory for in situ stress”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 19, 201-203.
- Sheorey PR (1994). “A theory for in situ stresses in isotropic and transversely isotropic rock”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 1, 23-34.
- Sofianos AI (1984). “Numerical simulation of excavations within jointed rock of infinite extent”, PhD thesis, Imperial College, University of London.
- Turchaninov IA, Iofis MA and Kasparyan EV (1979). “Principles of Rock Mechanics”, Terraspace, Rockville, 493pp.
- Wittke W (1984). “Felsmechanik”, Springer Verlag.