Κεφάλαιο 3 Σεισμικά σήματα

1 Διάδοση κυμάτων

Ένας ήχος με συχνότητα μεγαλύτερη από τη μέγιστη συχνότητα που μπορεί να συλλάβει ο άνθρωπος (περίπου 20 kHz) καλείται υπέρηχος. Ο υπέρηχος διαδίδεται στο μέσο διάδοσης με τη μορφή ενός κύματος με μικρό μήκος και την ιδιότητά να ανακλάται σε πολύ μικρές επιφάνειες. Τα χαρακτηριστικά αυτά τον καθιστούν χρήσιμο για το μη καταστροφικό έλεγχο των πετρωμάτων. Η ταχύτητα διάδοσης c του υπερηχητικού κύματος υπό σταθερή θερμοκρασία και πίεση είναι σταθερή και σχετίζεται με το μήκος κύματος λ , τη συχνότητα f και την περίοδο T με τις σχέσεις:

$$\lambda = c/f, \qquad \lambda = cT \tag{1}$$

Για τον έλεγχο των πετρωμάτων με υπέρηχους χρησιμοποιούνται δύο είδη κυμάτων: τα διαμήκη και τα διατμητικά (ή αλλιώς εγκάρσια). Στο Σχήμα 1 δίνεται μία εικόνα της κίνησης των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος για τα δύο αυτά είδη κυμάτων.



Σχήμα 1. Κίνηση των σωματιδίων σε συνάρτηση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών εξαρτάται από την πυκνότητα ρ και τις ελαστικές ιδιότητες του πετρώματος και μπορεί να υπολογισθεί από τις σχέσεις:

$$V_{p} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}}$$

$$V_{s} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$
(2)

Όπου V_p και V_s οι ταχύτητες διάδοσης του διαμήκους και διατμητικού (εγκάρσιου) κύματος αντίστοιχα, E το μέτρο ελαστικότητας, v ο λόγος Poisson, K το μέτρο ελαστικής συστολής και G το μέτρο διάτμησης . Η ταχύτητα διάδοσης είναι χαρακτηριστική για κάθε πέτρωμα και αποτελεί ένα έμμεσο μέτρο εκτίμησης των ιδιοτήτων του πετρώματος. Για παράδειγμα ο Πίνακας 1 και το Σχήμα 2, δίνουν τις ταχύτητες αυτών των κυμάτων σε διάφορα πετρώματα και εδάφη.

Πέτρωμα	Πυκνότητα [kg/m ³]	V _P [m/s]	V _s [m/s]
Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή	1.5 -1.7	300-1000	50-400
Ξηρή άμμος	1.6 -1.7	1000-1700	400-900
Υγρή άμμος, χαλαρή δομή	1.8 -2.2	1500-2000	50-400
Υγιής ψαμμίτης	2.0 - 2.65	1800-4500	1000-3000
Ψαμμίτης Berea	2.2	3800-4000	2300-2400
Ασθενής ψαμμίτης	1.7-2.0	1000-2000	600-1200
Ψαμμίτης Wildmoor (λεπτόκοκκος, πορώδης)	2	1700-2000	1100-1300
Άργιλος	1.9 -2.1	1500-1600	100-300
Άργιλος του Λονδίνου	2	1700-1800	800-1100
Αργιλικός σχιστόλιθος	2.3 - 2.8	1600-4500	700-3000
Weak Shale, North Sea	2.35	2400-2600	1200-1300
Τάλκης, υψηλό πορώδες	1.4-1.7	1800-2600	1000-1500
Τάλκης, χαμηλό πορώδες	1.7-2.4	2600-5000	1500-3500
Ασβεστόλιθος	2.4 -2.7	3500-6000	2000-3500
Ασβεστόλιθος		6000-6500	
Δολομίτης		6500-7000	
Βασάλτης	2.5 - 2.9	3500-5500	1700-3400
Βασάλτης		6500-7000	
Γάββρος		7000	
Γρανίτης		5500-6000	
Γρανίτης	2.6 - 2.7	5500-6500	3000-3500

Πίνακας 1. Ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων σε διάφορα πετρώματα και εδάφη.



Σχήμα 2. Ταχύτητες διαδόσεως του διαμήκους θλιπτικού κύματος και του εγκάρσιου κύματος εντός διαφόρων πετρωμάτων και εδαφών.

Οι ασυνέχειες του πετρώματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα διαδόσεως των κυμάτων. Όπως δείχνει ο Πίνακας 2, η ταχύτητα του διαμήκους θλιπτικού κύματος είναι πολύ μεγαλύτερη στο άθικτο πέτρωμα, απ' ότι στο ρωγματωμένο. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η διαφορά αυτή στην ταχύτητα, είναι μεγαλύτερη για τον ίδιο τύπο πετρώματος με διαφορετική πυκνότητα ασυνεχειών, απ΄ ότι μεταξύ διαφορετικών τύπων πετρωμάτων.

ασυνεγείων και γωρίς ασυνεγείες.
ασυνεγείων και γωρίς ασυνεγείες.

Τύπος πετρώματος	Θλιπτικό κί	Θλιπτικό κύμα (P) Εγκάρσιο κύμα (S)		
	Έντονα	Άρρηκτο	Έντονα	Άρρηκτο
	ρωγματωμένο		ρωγματωμένο	
Ασβεστόλιθος	2000	5900	1000	3100
Μεταμορφωμένα πετρώματα	2100	3500	1000	1700
Βασάλτης	2300	4500	1100	2200
Γρανίτης	2400	5000	1200	2500
Άμμος	500	2000	250	850
Άργιλος	400	1700	200	800

2 Δοκιμή υπερήχων

2.1 Προτεινόμενη από την ISRM μέθοδος για την μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων (περιγράφεται μία από τις τρεις μεθόδους)

2.1.1 Σκοπός

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ταχύτητας διάδοσης των ελαστικών κυμάτων σε εργαστηριακές δοκιμές μηχανικής πετρωμάτων. Δίνονται τρεις διαφορετικές παραλλαγές της μεθόδου. Αυτές είναι: η τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας, η τεχνική υπερηχητικών παλμών χαμηλής συχνότητας και η μέθοδος συντονισμού.

2.1.2 Συσκευή

Αν και υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι, ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός πρέπει να επιλέγεται, όσο αυτό είναι δυνατόν, ώστε να είναι εφαρμόσιμος και από τις τρεις μεθόδους. Το ίδιο πέτρωμα ή ακόμη και το ίδιο δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τις τρεις μεθόδους. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στις συχνότητες που χρησιμοποιούνται για τις διαφορετικές μεθόδους. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία πρέπει να έχουν αντίστοιχες σύνθετες ηλεκτρικές αντιστάσεις και να έχουν προστατευμένα (μονωμένα) καλώδια για να εξασφαλίζεται αποδοτική μεταφορά ενέργειας. Για να αποτραπεί η ζημία στο σύστημα δεν πρέπει να υπερβαίνονται οι επιτρεπόμενες ηλεκτρικές τάσεις.

Πρώτη μέθοδος: τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας

(α) Μονάδα δημιουργίας υπερηχητικού παλμού:

- μορφή παλμού: ημιτονοειδής, τετραγωνική, βαθμιδωτή;
- πλάτος παλμού: 1-10s;
- φάσμα συχνότητας: 100kHz-2 MHz;
- συχνότητα επανάληψης: 10-10³ επαναλήψεις ανά δευτερόλεπτο;

- ηλεκτρική τάση παλμού: συμβατή με το χρησιμοποιούμενο μορφοτροπέα, τόσο υψηλή όσο επιτρέπουν οι μορφοτροπείς.

- η γεννήτρια παλμών πρέπει να έχει ένα παλμό σκανδάλης για να προκαλέσει διέγερση σε έναν παλμογράφο (σήμα-σκανδάλης).

(β) Μορφοτροπείς:

- πομπός: μετατρέπει τους ηλεκτρικούς παλμούς σε μηχανικούς

- δέκτης: μετατρέπει τους μηχανικούς παλμούς σε ηλεκτρικούς

- απόκριση σε διαφορετικές συχνότητες: επίπεδη απόκριση στο εύρος συχνοτήτων 100 kHz έως 2 MHz, εάν είναι δυνατόν.

- οι συνθήκες περιβάλλοντος, όπως θερμοκρασία, υγρασία, κλπ. πρέπει να εξετάζονται κατά την επιλογή του στοιχείου του μορφοτροπέα.

- για τη δημιουργία παλμών συχνότητας 100 kHz-2 MHz συστήνεται η χρήση κεραμικών πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (π.χ. οξείδιο βαρίου-τιτανίου, PZT κλπ.) σε μορφή λεπτής πλάκας, δίσκου, ράβδου, δακτυλίου ή σφαίρας.

(γ) Ζωνικό ή υψιπερατό φίλτρο κατάλληλο για τις προαναφερθείσες συχνότητες.

(δ) Προενισχυτής μεγάλου εύρους συχνοτήτων και χαμηλού θορύβου.

(ε) Γεννήτρια σήματος χρόνου για τον έλεγχο της επανάληψης του παλμού και για τον καθορισμό των χρόνων στον παλμογράφο.

(στ) Παλμογράφος καθοδικού σωλήνα (CRO).

(ζ) Ηλεκτρονικός απαριθμητής.

Δύο πιθανές διατάξεις του ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την πρώτη μέθοδο παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Πιθανές διατάζεις του ηλεκτρονικού εξοπλισμού για την πρώτη μέθοδο.

2.1.3 Διαδικασία

Ιδιαίτερη προσοχή συστήνεται κατά την προετοιμασία των δοκιμίων (απόληψη των πυρήνων, διαχείριση, λείανση κλπ.) ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές διαταραχές σε αυτό. Η επιφάνεια κάτω από κάθε μορφοτροπέα θα πρέπει να είναι αρκούντως επίπεδη ώστε να είναι δυνατή η καλή επαφή του με το πέτρωμα.

Ξήρανση των δοκιμίων πρέπει να γίνεται με κατάλληλες εργαστηριακές συσκευές. Κορεσμένα δείγματα πρέπει να παραμένουν στο νερό μέχρι τη στιγμή της δοκιμής. Για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των υπερήχων σε αντίστοιχες με τις επί τόπου συνθήκες πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη φροντίδα κατά τη διαδικασία προετοιμασίας. Συστήνεται επίσης τόσο το δείγμα όσο και τα δοκίμια από αυτό να φυλάσσονται με προστασία της υγρασίας τους. Η προετοιμασία των δοκιμίων μπορεί να γίνεται με ξηρές μεθόδους (π.χ. ξηρή διάτρηση, κοπή και λείανση).

Πρώτη μέθοδος: τεχνική υπερηχητικών παλμών υψηλής συχνότητας

Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας των θλιπτικών (διαμήκων, P) και διατμητικών (εγκάρσιων, S) κυμάτων σε δοκίμια πετρώματος με θεωρητικά άπειρη έκταση σε σύγκριση με το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου παλμού. Η συνθήκη άπειρης έκτασης εξασφαλίζεται πρακτικά εάν το μέσο μέγεθος του κόκκου του πετρώματος είναι μικρότερο από το μήκος κύματος του παλμού, που με τη σειρά του να είναι μικρότερο από τη μικρότερη διάσταση του δοκιμίου.

(α) Κυβικά, κυλινδρικά η ακόμη και σφαιρικά δοκίμια συστήνονται ως κατάλληλα για τη δοκιμή αυτή. Η ελάχιστη πλευρική διάσταση των δοκιμίων (κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του υπερηχητικού παλμού) πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του παλμού^{*}. Η απόσταση που διανύει ο παλμός μέσα στο πέτρωμα πρέπει να είναι τουλάχιστο 10 φορές μεγαλύτερη από το μέσο μέγεθος των κόκκων του πετρώματος.

(β) Ο πομπός πιέζεται στην επιφάνεια ενός επιπέδου κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του παλμού με τάση 10 N/cm² περίπου. Η μετάδοση της ενέργειας από τον πομπό στο δοκίμιο μπορεί να βελτιωθεί με:

(i) Λείανση των επιφανειών του δοκιμίου ώστε να είναι ομαλές και επίπεδες

(ii) Παρεμβολή ενός λεπτού στρώματος γράσου, βαζελίνης, γλυκερίνης κλπ. μεταξύ μορφοτροπέων και δοκιμίου.

(iii) Σύζευξη δοκιμίου-μορφοτροπέα με εποξεικό υλικό;

(γ) Υπάρχουν δύο δυνατότητες για την τοποθέτηση του δέκτη:

(i) τεχνική μετάδοσης παλμού: ο δέκτης τοποθετείται σε επίπεδο απέναντι από το επίπεδο του πομπού. (Σχήμα 4α). Οι ταχύτητες των διαμήκων P και διατμητικών S κυμάτων (V_p, V_s) υπολογίζονται από το χρόνο διάδοσης του παλμού και τη γνωστή απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη.

(ii) τεχνική «σεισμικής» τομογραφίας: Ο δέκτης τοποθετείται στην πλευρά του δοκιμίου (Σχήμα 4β). Μεταβάλλοντας την απόσταση d μεταξύ δέκτη και πομπού είναι δυνατόν να ληφθούν καμπύλες του χρόνου διάδοσης με την απόσταση τόσο για τα διαμήκη όσο και για τα διατμητικά κύματα. Οι ταχύτητες υπολογίζονται από αυτές τις καμπύλες. Η μέθοδος αυτή προτείνεται εάν οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι κατάλληλες



Σχήμα 4. Θέσεις τοποθέτησης του πομπού και του δέκτη.

(δ) Η αύξηση του τάσης εξόδου της γεννήτριας παλμών, της ενίσχυσης του σήματος από τον προενισχυτή, και της ευαισθησίας του παλμογράφου μέχρι ένα βέλτιστο επίπεδο, δίνουν ένα απότομο μέτωπο παλμού που επιτρέπει την ακριβέστερη μέτρηση των χρόνων. Το βέλτιστο επίπεδο εντοπίζεται στο σημείο που αρχίζει να δημιουργείται μη

6

^{*} Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 2845 πρέπει να είναι 5 φορές μεγαλύτερη από τη διάσταση των κόκκων

αποδεκτός θόρυβος από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ή ο εν λόγω θόρυβος ενεργοποιεί τον απαριθμητή. Ο θόρυβος δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το 1/10 του πλάτους του σήματος που φθάνει στον δέκτη. Η ακρίβεια μέτρησης του χρόνου διάδοσης του παλμού πρέπει να είναι τουλάχιστο 1/100 για τα διαμήκη κύματα και 1/50 για τα διατμητικά, με χρήση κυκλωμάτων καθυστέρησης σε συνδυασμό με τον παλμογράφο ή με τη ρύθμιση του απαριθμητή στην μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

(ε) Ο παλμογράφος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κύκλωμα καθυστέρησης για την προβολή του παλμού και της πρώτης άφιξης του και για τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης. Χαρακτηριστικά, το πρώτο σήμα στον παλμογράφο αποτελείται από ένα καμπύλο μεταβατικό τμήμα από τη μηδενική τάση ακολουθούμενο από ένα απότομο και περίπου γραμμικό ίχνος. Η επιλογή του σημείου άφιξης του παλμού γίνεται είτε στην αρχή του καμπύλου μεταβατικού τμήματος είτε στην τομή του γραμμικού τμήματος με το ίχνος της μηδενικής τάσης.

(στ) Ο απαριθμητής διεγείρεται από τον παλμό που εφαρμόζεται στον πομπό και σταματάει από την πρώτη άφιξη του παλμού στον δέκτη. Επειδή για τη διέγερση του απαριθμητή απαιτείται μία μεταβολή της διαφοράς δυναμικού, αυτός δεν είναι δυνατόν να συλλάβει το πρώτο σήμα του παλμού. Για να είναι λοιπόν ακριβέστερη η μέτρηση του χρονικού διαστήματος, πρέπει να αυξάνεται η ευαισθησία διέγερσης του απαριθμητή σε ένα βέλτιστο επίπεδο χωρίς να προκαλείται διέγερσή του από τον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο.

(ζ) Ο προσδιορισμός του μηδενικού χρόνου του κυκλώματος συμπεριλαμβανομένων των μορφοτροπέων πρέπει να προσδιορίζεται και με βάση αυτόν να διορθώνονται οι μετρήσεις. Ο χρόνος αυτός μπορεί να υπολογισθεί με δύο τρόπους, ως εξής:

(1) Τοποθετώντας τους μορφοτροπείς σε επαφή τον ένα με τον άλλο και μετρώντας απευθείας την καθυστέρηση. Η μέθοδος αυτή δεν συστήνεται για τους μορφοτροπείς των διατμητικών κυμάτων όπου ακόμη και μικρό σφάλμα στην ευθυγράμμισή τους μπορεί να δόση μεγάλα σφάλματα μέτρησης.

(2) Με τη μέτρηση του χρόνου διάδοσης σε ένα ομοιογενές υλικό με γνωστή την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων με ακρίβεια. Η μέτρηση του χρόνου γίνεται συναρτήσει του μήκους διάδοσης κατασκευάζοντας μία αντίστοιχη καμπύλη. Το αποτεμνόμενο τμήμα στον άξονα του χρόνου δίνει τη διόρθωση που πρέπει να γίνει στους μετρούμενος χρόνους της δοκιμής. (η μέθοδος αυτή συνίσταται για τα διατμητικά κύματα).

(η) Ο παλμός που φθάνει πρώτος είναι ο διαμήκης και συνεπώς ο εντοπισμός του είναι σχετικά εύκολος. Εν τούτοις, η άφιξη του διατμητικού παλμού μπορεί να επισκιάζεται από την αντήχηση των μορφοτροπέων και από ανακλάσεις του διαμήκους κύματος. Το πλάτος του διατμητικού κύματος σε σχέση με το πλάτος του διαμήκους μπορεί να αυξάνεται και ο χρόνος άφιξης να υπολογίζεται με ακρίβεια χρησιμοποιώντας κατάλληλα στοιχεία, που μπορούν να συλλαμβάνουν και τους δύο παλμούς.

(θ) Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη η άφιξη των διατμητικών κυμάτων είναι συνήθως ευδιάκριτη. Εντούτοις, ο ακριβής προσδιορισμός της πρώτης άφιξης των διατμητικών κυμάτων μπορεί να δυσχεραίνεται από μετατροπές της μορφής του κύματος στις διεπιφάνειες πλάκας φόρτισης- δοκιμίου και στην ελεύθερη επιφάνεια.

(ι) Ευκολότερη διάκριση του χρόνου άφιξης των διατμητικών κυμάτων μπορεί να γίνει με βελτιστοποίηση του μήκους των δοκιμίων, π.χ., μια αναλογία μήκους προς διάμετρο
 2:1 είναι συχνά προτιμότερη από αναλογία 1:1.

2.1.4 Υπολογισμοί

(a) Οι ταχύτητες υπολογίζονται από τους χρόνους διάδοσης και την απόσταση, *d*, μεταξύ του πομπού και του δέκτη, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

 $V_p = d \cdot t_P^{-1}, \quad V_s = d \cdot t_s^{-1}$

Όπου V_p η ταχύτητα του διαμήκους κύματος, V_s η ταχύτητα του διατμηρικού κύματος, t_p και t_s οι χρόνοι διάδοσης των κυμάτων P και S αντίστοιχα, και d η απόσταση μεταξύ των μορφοτροπέων

(β) Αν χρησιμοποιείται η μέθοδος «σεισμικής» τομογραφίας οι ταχύτητες δίνονται από την κλίση της καμπύλης του διαγράμματος χρόνου διάδοσης-απόστασης.

2.1.5 Υποβολή έκθεσης των αποτελεσμάτων

Η έκθεση πρέπει να περιλάβει τις ακόλουθες πληροφορίες:

(α) Τύπος πετρώματος και προέλευση

(β) Γεωμετρία και διαστάσεις δοκιμίου

(γ) Τρόπος λήψης του δείγματος (π.χ. ανατίναξη σε λατομείο, διάτρηση σε υγιή ή αποσαθρωμένη επιφάνεια)

(δ) Ορυκτολογική δομή και πετρογραφική περιγραφή, κατανομή μικρογωγματώσεων στο πέτρωμα.

(ε) Προετοιμασία δείγματος (ποιότητα των πυρήνων και των άκρων τους, αριθμός πυρήνων που ελήφθησαν από ένα μεγαλύτερο δείγμα, προσανατολισμός των πυρήνων σε σχέση με σημαντικά γεωλογικά στοιχεία όπως επίπεδα διάστρωσης ή σχιστότητας, κλπ.).

(στ) Περιγραφή της πειραματικής μεθόδου δοκιμής: δεδομένα της γεννήτριας παλμών, δεδομένα των μορφοτροπέων, σύζευξη των μορφοτροπέων με το δοκίμιο.

(ζ) Εντατική κατάσταση στην οποία υποβλήθηκε το δοκίμιο.

(η) Όλες οι διαθέσιμες φυσικές ιδιότητες του πετρώματος (ιδιαίτερα η πυκνότητα, η υγρασία, το πορώδες, η διαπερατότητα)

(ι) τα δεδομένα των ταχυτήτων σε φυσιολογικές συνθήκες (θερμοκρασία δωματίου, ατμοσφαιρική πίεση)

(ια) η επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

(ιβ) Διαφοροποιήσεις της ταχύτητας στα δείγματα για σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος και δοκιμής. Μέσες ταχύτητες, μέσο σφάλμα, μέγιστη απόκλιση.

(17) Στην περίπτωση σεισμικής τομογραφίας: τις καμπύλες του χρόνου διάδοσης με την απόσταση.

(ιδ) Μία αντιπροσωπευτική εικόνα από την έξοδο του παλμογράφου.

(ιε) Τεχνική λήψης των χρόνων (π.χ. πρώτη απόκλιση του παλμού εκπομπής με πρώτη απόκλιση του παλμού λήψης στον παλμογράφο, πρώτο μέγιστο του παλμού στον δέκτη, κλπ.).

(ιστ) Δεδομένα μεταβολής της ταχύτητας με τη φόρτισης (εάν ελήφθησαν τέτοια δεδομένα)

(ιζ) ταχύτητα διαμήκους και διατμητικού κύματος σε m/s.

(ιη) πυκνότητα σε kg/m³, τάση σε Pa, γεωμετρικές διαστάσεις σε mm.

2.2 Εργαστηριακή εξάσκηση

2.2.1 Σκοπός

Είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας του διαμήκους (P-wave) και εγκαρσίου (S-wave) κύματος εντός των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων πετρωμάτων, ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, E_d και του συντελεστή Poisson v των υπό δοκιμή πετρωμάτων, και ο προσδιορισμός τυχούσας ανισοτροπίας, όσον αφορά το ίδιο πέτρωμα, ανάλογα με τον προσανατολισμό του δοκιμίου. Στο Σχήμα 5 δίνεται η διάταξη των οργάνων για τη δοκιμή υπερήχων.



Σχήμα 5. Διάταξη οργάνων για τη δοκιμή υπερήχων.

Η ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου (δηλαδή το μήκος εκείνο που διασχίζει ο κυματοπαλμός) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μήκος κύματος του κυματικού παλμού.

Για παράδειγμα, αν f=1 MHz τότε: λ =c/f, για c=5000 m/s λ =5000/1000000 = 0.005 m

Η δοκιμή βασίζεται στην διάδοση μέσω κατάλληλα διαμορφωμένου δοκιμίου του πετρώματος υπερηχητικού παλμού και στην μέτρηση του χρόνου, που κάνει ο παλμός αυτός να διανύσει το μήκος του δοκιμίου.

Η ταχύτητα διαδόσεως του κύματος υπολογίζεται από τη σχέση: $V = \frac{\ell}{t}$

όπου V= ταχύτητα, ℓ = το μήκος που διανύει το κύμα και t= ο χρόνος που χρειάζεται ο παλμός για να διανύσει το μήκος ℓ .

2.2.2 Εργαστηριακές Συσκευές

Για την μέτρηση των ταχυτήτων V_p και V_s του διαμήκους και του εγκαρσίου κύματος αντίστοιχα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συσκευές:

- Μία συσκευή PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) του οίκου CNS Electronics Ltd. (1985) και ένα ζεύγος πιεζοηλεκτρικών ακροδεκτών με δυνατότητα παραγωγής υπέρηχου συχνότητας 1 MHz το οποίο προσαρμόζεται στη συσκευή. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται σε μια ιδιότητα ορισμένων φυσικών (κρύσταλλοι χαλαζία) ή συνθετικών κρυστάλλων, οι οποίοι όταν παραμορφώνονται, παράγουν ηλεκτρικό φορτίο. Το φαινόμενο αυτό λειτουργεί και αντιστρόφως: δηλαδή, όταν εφαρμόζεται στους κρυστάλλους αυτούς ένα ηλεκτρικό δυναμικό ο κρύσταλλος παραμορφώνεται. Οι δύο ακροδέκτες τοποθετούνται στις δύο βάσεις του δοκιμίου (Σχήμα 6). Ιδιαίτερης σημασίας είναι η καλή επαφή μεταξύ δοκιμίου και ακροδέκτη. Για το λόγο αυτό, εκτός από την λείανση των βάσεων του δοκιμίου, τοποθετείται λεπτή επίστρωση γράσου στις δύο βάσεις, όπως συνιστά ο κατασκευαστής του οργάνου. Με τη συσκευή PUNDIT μετράται ο χρόνος που κάνει ο παραγόμενος υπέρηχος να φτάσει από τον ένα ακροδέκτη, που εκπέμπει τον υπέρηχο (transmitter) στον άλλο ακροδέκτη ο οποίος αποτελεί τον δέκτη (receiver). Η ένδειξη δίνεται σε μs, από το όργανο.
- Διακόπτης (Switch-box), στον οποίο συνδέονται οι δέκτες και μέσω αυτού γίνεται η σύνδεση με το PUNDIT.
- Προαιρετικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας παλμογράφος, ο οποίος θα πρέπει να έχει βαθμονομηθεί κατάλληλα. Ο παλμογράφος συνδέεται με το PUNDIT όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Με τον παλμογράφο μπορεί να ληφθεί η μορφή του κύματος που διέρχεται από το δοκίμιο του πετρώματος.
- Μηχανή δοκιμών θλίψεως TONIPACT 3000, γερμανικής προέλευσης, με τα εξής χαρακτηριστικά: Δυναμικότητα φόρτισης 3000 kN (300 tn), Δυνατότητα ελέγχου του ρυθμού φόρτισης, Εκτύπωση της μέγιστης τιμής φορτίου της δοκιμής, Ψηφιακή ένδειξη του φορτίου σε kN, Δυνατότητα περιστροφής της άνω πλάκας φόρτισης, ώστε να εφάπτεται αυτή με τη βάση του δοκιμίου.

2.2.3 Προετοιμασία δοκιμίων

Τα δοκίμια είναι κυλινδρικά με διάμετρο 54.7 mm και ύψος 100 mm. Οι βάσεις τους πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και επίπεδες. Το μέγιστο μέγεθος κόκκου του δοκιμίου δεν πρέπει να ξεπερνά το 0.5 mm. Χρησιμοποιούνται δοκίμια μαρμάρου

Διονύσου, προκειμένου να υπολογιστεί ο βαθμός ανισοτροπίας ανάλογα με τον προσανατολισμό των δοκιμίων (Πίνακας 3).

2.2.4 Διαδικασία - Υπολογισμοί

Τα κυλινδρικά δοκίμια, που έχουν κατάλληλα διαμορφωθεί, αφού μετρηθεί το μήκος τους, τοποθετούνται στην θλιπτική μηχανή (Σχήμα 6). Προηγουμένως οι βάσεις τους επαλείφονται με λεπτό στρώμα γράσου προκειμένου να υπάρχει η μέγιστη δυνατή επαφή μεταξύ των ακροδεκτών και των βάσεων του δοκιμίου. Στις βάσεις του δοκιμίου τοποθετούνται οι δύο πιεζοηλεκτρικοί ακροδέκτες. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της θλιπτικής μηχανής ασκείται θλιπτική τάση 7 MPa. Κατόπιν γίνεται η μέτρηση. Η ένδειξη του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο συμβαίνει η διέλευση του υπερηχητικού παλμού διαμέσου του δοκιμίου εμφανίζεται στην οθόνη της συσκευής PUNDIT σε μs.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα δοκίμια και σημειώνεται κάθε φορά ο χρόνος διέλευσης του υπερηχητικού παλμού.



Σχήμα 6. Πειραματική διάταζη μέτρησης της ταχύτητας του διαμήκους και του εγκάρσιου κύματος σε δοκίμια πετρωμάτων.

2.2.5 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Μετά το πέρας των μετρήσεων συμπληρώνεται ο Πίνακας 3. Μετά την συμπλήρωση του, να σχολιαστούν τα αποτελέσματα, α) όσον αφορά το μάρμαρο Διονύσου και β) όσον αφορά τα διάφορα πετρώματα μεταξύ τους.



Σχήμα 7. Δειγματοληψία δοκιμίων για το μάρμαρο Διονύσου.

Πίνακας 3. Καταγραφή δεδομένων

Αρ. δοκιμίο υ	Προέ- λευση - Προσ/ μος	Μήκος δοκιμίο υ (mm)	Πυκνό -τητα (kg/m ³)	Επιβαλ - λόμενη τάση (MPa)	Χρόνος διέλευση ς διαμήκου ς κύματος, t _n (μs)	Χρόνος διέλευση ς εγκαρσίο υ κύματος, t. (us)	Ταχύτητ α διαμήκου ς κύματος, V _p (m/s)	Ταχύτητ α εγκαρσίο υ κύματος, V _s (m/s)	Συντε- λεστής Poisso n, v	Δυναμικ ό μέτρο Ελαστι- κότητας Ε _d (Pa)	Δείκτη ς ανισο- τροπία ς, Α (%)
					τρ (μ5)	ts (µ5)					

Όπου η πυκνότητα για κάθε πέτρωμα θα δίνεται απ' ευθείας. Οι σχέσεις που δίνουν το E_d και ν είναι:

$$E_{d} = \frac{\rho V_{s}^{2} (3V_{p}^{2} - 4V_{s}^{2})}{V_{p}^{2} - V_{s}^{2}}$$
(2)
$$v = \frac{V_{p}^{2} - 2V_{s}^{2}}{2(V^{2} - V^{2})}$$
(3)

$$A = \frac{Vp_{//}}{Vp_{\perp}}$$
(4)

3 Η μέθοδος ακουστικής εκπομπής

3.1 Ορισμός και προέλευση της Ακουστικής Εκπομπής

Σύμφωνα με ορισμό της ISRM (2002), ως Ακουστική Εκπομπή (Acoustic Emission, AE) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού. Η προέλευση της AE στα πετρώματα σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του πετρώματος ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το πέτρωμα ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ακουστική εκπομπή. Τα κύματα της AE διαδίδονται μέσα στο πέτρωμα και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες AE (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό, οι οποίοι μετατρέπουν τα ελαστικά τασικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, που με τη σειρά τους ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET). Σε αντίθεση με αυτό που δηλώνει το όνομα της, τα σήματα της ακουστικής εκπομπής ελέγχονται σε εύρος συχνοτήτων από 15 kHz έως μερικά MHz, δηλ. σε συχνότητες υπερήχων.

Ιστορικά, οι μελέτες των Obert και Duvall (1942) για την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930, μπορούν να θεωρηθούν ως η αρχή της εφαρμογής της ΑΕΤ στη μηχανική πετρωμάτων. Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε από την έρευνα και σε άλλα υλικά πλην του πετρώματος. Από τις πιο σημαντικές μελέτες, θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950), ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν "μνήμη" των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων, φαινόμενο γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Lavrov, 2003).

Στη μηχανική πετρωμάτων η ΑΕΤ έχει εφαρμοσθεί σε δύο κυρίως πεδία: α) στη μελέτη του μηχανισμού θραύσης των ψαθυρών πετρωμάτων, με την ανάλυση των παραμέτρων ΑΕ και τον εντοπισμό της θέσης της πηγής της ΑΕ, και β) στη μελέτη της εντατικής κατάστασης του επί τόπου πετρώματος με χρήση του φαινομένου Kaiser.

3.2 Σήματα ΑΕ

Στο Σχήμα 8 εικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο πέτρωμα ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.



Σχήμα 8. Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ.

Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μερικά MHz. Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή.

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων ΑΕ είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Στο Σχήμα 9 δείχνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων ΑΕ.



Σχήμα 9. (α) Τυπική μορφή κρουστικού σήματος ΑΕ, (β) Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ.

Οι κύριες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα ΑΕ κρουστικού τύπου (Σχήμα 3), είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration). Η παράμετρος "απαριθμήσεις" (counts) προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι, ενώ το πλάτος είναι η μέγιστη τάση της κυματομορφής ΑΕ και αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος. Το διάστημα μεταξύ της χρονικής στιγμής που το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μέγιστου πλάτους ονομάζεται χρόνος ανύψωσης (rise time)



Σχήμα 10. Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεζεργασίας.

3.3 Συστήματα παρακολούθησης ΑΕ

3.3.1 Αισθητήρες και προενισχυτές

Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά PZT (lead-zirconate-titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπείς (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας-μορφοτροπέας δίνεται στο Σχήμα 11.

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία.

3.3.2 Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργάζεται από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος. Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στο Σχήμα 12. Τα κανάλια ΑΕ είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude - dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



Σχήμα 11. (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της PAC διαθέσιμος στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιζης Σηράγγων, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Hardy, 2003).



Σχήμα 12. Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ.

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται μία κάρτα οχτώ (8) καναλιών PCI - 8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια ΑΕ είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 MegaBytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια AE το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές είσοδοι) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές είσοδοι, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων AE, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων AE με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωσή του.



Σχήμα 13. Ψηφιακό σύστημα καταγραφής δεδομένων ΑΕ διαθέσιμο στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιζης Σηράγγων.

3.4 Εφαρμογές της ΑΕ

Στη μηχανική των πετρωμάτων το φαινόμενο της ΑΕ παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της αστοχίας και της παραμόρφωσης των ψαθυρών πετρωμάτων υπό μηχανική καταπόνηση, συνδέοντας τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος με παραμέτρους της ΑΕ όπως το πλήθος, το πλάτος, η ενέργεια των γεγονότων πρόκλησης ΑΕ, η θέση της πηγής τους κλπ. Παράλληλα, η μέθοδος ολοένα και περισσότερο αποδεικνύεται χρήσιμη για επιτόπιες έρευνες, όπως π.χ. για τον εντοπισμό ιδιαίτερα φορτισμένων περιοχών και στη μελέτη των εκτινάξεων βράχων (rockbursts) σε βαθιά μεταλλεία και σήραγγες.

3.4.1 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα διαπιστώθηκε ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



Σχήμα 14. Μεταβολή του ρυθμού ΑΕ συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p (ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας p_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη. (Obert και Duvall 1945).

Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το Mogi (1962), ο οποίος δίνει σε διάγραμμα (Σχήμα 15) τη γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της ΑΕ και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η ΑΕ με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης (Σοφιανός, 2005).



Σχήμα 15. Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής ΑΕ και (β) συσχέτισή της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαζονικής θλίψης. (Boyce et al, 1981).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων ΑΕ με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο Σχήμα 16, έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαζονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους ΑΕ-συχνότητας εμφάνισης. Γεγονότα ΑΕ ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή. Επιπλέον, για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά β, που εκφράζει την κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα ΑΕ έχουν μεγαλύτερο πλάτος.



Σχήμα 16. Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαζονική θλίψη. ((πηγή: Hardy, 2003).

3.4.2 Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ

Με τη χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων προσαρμοσμένων σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων ΑΕ. Επειδή η ΑΕ συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα παρέχει μία ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους.

Ο ρυθμός της ΑΕ στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων ΑΕ. Για την παρακολούθηση της αστοχίας στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση (Lockner, 1993). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner έδωσαν τα αποτελέσματα που δείχνονται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17. Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76.2 mm υπό τριαζονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3=50$ MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ. (Lockner, 1993).

ΕΜΠ, ΔΠΜΣ/ΣΚΥΕ ΑΙ Σοφιανός & ΠΠ Νομικός

3.4.3 Φαινόμενο Kaiser

Στο Σχήμα 18α ένα δοκίμιο πετρώματος υποβάλλεται σε δύο κύκλους φόρτισης. Στον πρώτο κύκλο φόρτισης η τάση εφαρμόζεται με σταθερό ρυθμό μέχρι μια τιμή σ_{max} και στη συνέχεια μηδενίζεται. Στον δεύτερο κύκλο, η τάση αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό μέχρι μία τιμή σ'max σ_{max}. Κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου, παρακολουθείται η δραστηριότητα ΑΕ και καταγράφονται οι υπερβάσεις (ή τα γεγονότα) συναρτήσει της εφαρμοσμένης τάσης. Στο Σχήμα 18β παρουσιάζονται οι συνολικές υπερβάσεις κατά τη διάρκεια των δύο κύκλων φόρτισης. Είναι εμφανές, ότι καταγράφεται δραστηριότητα ΑΕ καθόλη τη διάρκεια του πρώτου κύκλου φόρτισης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης δεν παρατηρείται καμία δραστηριότητα έως ότου το επιβαλλόμενο φορτίο ξεπεράσει τη μέγιστη τάση (σ_{max}) του πρώτου κύκλου φόρτισης. Κατά συνέπεια, το φαινόμενο Kaiser μπορεί να οριστεί ως η απουσία ανιχνεύσιμης ΑΕ μέχρι την υπέρβαση του μέγιστου εντατικού επιπέδου της προηγούμενης διαδρομής φόρτισης του υλικού.



Σχήμα 18. Απλοποιημένη εργαστηριακή διάταξη (α) και χαρακτηριστικά αποτελέσματα του φαινομένου Kaiser (β). (Hardy, 2003).

3.4.4 Εφαρμογές ΑΕ επί τόπου

Σημαντικό πεδίο εφαρμογής της ΑΕ επί τόπου αποτελούν τα υπόγεια μεταλλεία μεγάλου βάθους, όπου υφίσταται ο κίνδυνος της βίαιης εκτίναξης των περιβαλλόντων πετρωμάτων. Σε αυτό το πρόβλημα εστιάσθηκαν και οι πρώτες έρευνες των Obert και Duvall, όπως προαναφέρθηκε.

Επιπλέον στα υπόγεια μεταλλεία υπάρχει η διαρκής ανάγκη της πρόβλεψης ενδεχόμενων αστοχιών της οροφής έτσι ώστε η έκθεση των εργαζομένων και του εξοπλισμού στον κίνδυνο να ελαχιστοποιείται. Για το σκοπό αυτό έχουν υιοθετηθεί διάφορες μέθοδοι παρακολούθησης της συμπεριφοράς του πετρώματος, με πιο συνήθη μέθοδο αυτή της μέτρησης της κάμψης της οροφής. Η εφαρμογή της ΑΕ ως μέσου πρόβλεψης καταπτώσεων της οροφής των υπογείων μεταλλευτικών εκσκαφών ερευνάται σήμερα με

ολοένα και μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι Iannacchione et al. (2000, 2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ακουστική δραστηριότητα αυξήθηκε πριν από την επικείμενη αστοχία. Καθοριστικός παράγοντας στην επιτυχή πρόβλεψη είναι η μορφή της αστοχίας (προοδευτική ή επεισοδιακή) και τον εάν δίνει πρόβρομα φαινόμενα ή όχι. Οι Choudhury et al (2004) αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο Mukhopadhay (2001) συσχέτισε την ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας από λληλα και την επίδραση της κοχλίωσης. Άλλες αναφορές επί του θέματος δίνονται από το Hardy (2003).

Άλλες εφαρμογές της AE in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρανή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser.

Συνιστώμενη βιβλιογραφία

- ASTM (2000b), Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock, ASTM Designation: D 2845–00.
- Boyce GM, McCabe GM, Koerner RM (1981). Acoustic emission signatures of various rock types in unconfined compression. Proc Acoustic Emissions in Geotechnical Engineering Practice, ASTM STP 750, pp 142-154.
- Brown E.T. (1981) "Rock Characterization Testing and Monitoring", Pergamon Press.
- C.N.S. Electronics Ltd. (1985). «PUNDIT manual for use with Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester, London.
- Choudhury PB, Raina AK, Ramulu M, Chakraborty AK, Bandopadhyay C. (2004), Crown pillar stability assessment in an underground copper mine using acoustic emission. Paper 1B 07 - SINOROCK2004, Int J Rock Mech Min Sci, 41 (3).
- Eberhardt E, Stead D., Stimpson B. (1999), Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. Int Jnl Rock Mech Min Sci 36, 361-380.
- Eberhardt E. (1998), Brittle Rock Fracture and Progressive Damage in Uniaxial Compression, PhD Thesis, University of Saskatechewan.
- Hardy RH (2003), Acoustic Emission/Microseismic Activity: Principles, Techniques and Geotechnical Applications, A.A. Balkema, The Netherlands.
- Iannacchione AT, Bajpayee TS, Edwards JL (2005), Forecasting Roof Falls with Monitoring Technologies - A Look at the Moonee Colliery Experience. Proc 24th Inτ Conf Ground Control in Mining. Morgantown, West Virginia University, 44-51.
- Iannacchione, A.T., Prosser, L.J., Grau III, R.H., Oyler, D.C., Dolinar, D.R., Marshall, T.E. and Compton, C.S. (2000), Roof Monitoring Helps Prevent Injuries in Stone Mines. Mining Engineering, November, 32-37.

- ISRM (1978b), Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests, «Suggested Methods for Determining Sound Velocity», Committee on Laboratory Tests, Document No 4, (1977). Published in Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 2, pp. 53-58.
- ISRM (2002), Commission on Application of Geophysics to Rock Engineering. Suggested method for in-situ stress measurement from a rock core using the Acoustic Emission technique. 5th Int Workshop on the Application of Geophysics in Rock Engineering, pp.61-66.
- Kaiser J. (1950), Untersuchungen uber das auftreten Gerauschen beim Zugversuch, Ph.D. thesis, Technische Hochschule, Munich.
- Κατσικογιάννη Π., Νομικός Π.Π., Σοφιανός Α.Ι. (2008), Η ακουστική εκπομπή στη μηχανική των πετρωμάτων, Ορυκτός Πλούτος.
- Lavrov A. (2008), The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. Int J Rock Mech Min Sci, 40, 151-171, 2003.
- Lockner D. (1993), The Role of Acoustic Emission in the Study of Rock Fracture. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 30(7), 883-899.
- Mukhopadhay C. (2001), Investigation of Acoustic Wave Attenuation as an Indication of Rock Mass Quality in Advancing Headings. MSc Thesis, Dalhousie University, Canada.
- Obert L, Duvall W. (1942) Use of Subaudible noise for Prediction of Rock Bursts-Part II. U.S. Bureau of Mines. RI 3654.
- Obert L, Duvall W. (1945), Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Mining Part II: Laboratory Experiments. U.S. Bureau of Mines. RI 3803.
- Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. (2000), Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure. Int Jnl Rock Mech Min Sci, 37 699-704.
- Τσουτρέλης Χ., Γκίκας Ν., Νομικός Π. (2000). Εργαστηριακές ασκήσεις Μηχανικής Πετρωμάτων, ΕΜΠ.