ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Μεθοδολογία παρακολούθησης μικρομετακινήσεων με τη χρήση γεωτεχνικών οργάνων σε σήραγγες

Διατριβή Ειδίκευσης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Καθ. Ζ. Αγιουτάντης
ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ : Δ. Ρούσσου

ΧΑΝΙΑ 2007

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη 5
Πρόλογος 7
1. Εισαγωγή 9
2. Κατασκευή σήραγγας και χρήση γεωτεχνικών οργάνων 11
2.1 Γεωλογικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα κατά την κατασκευή μιας σήραγγας..... 11
2.2 Τρόποι αντιμετώπισης σε προβλήματα αντιστήριξης..... 12
2.3 Μελέτη κατασκευής σήραγγας 16
2.4 Κυριότερα στοιχεία έρευνας για την κατασκευή μιας σήραγγας 18
2.4.1 Προσδιορισμός βραχομάζας 18
2.4.2 Συμπαγή πετρώματα 21
2.4.3 Στρώματα μαλακά ή πλαστικά..... 25
2.4.3.1 Αργιλικοί σχηματισμοί 25
2.4.3.2 Μαλακά υλικά καταρρέοντα (χωρίς συνοχή) 27
2.4.4 Υπόγεια νερά 27
2.4.5 Υψηλές θερμοκρασίες 29
2.4.6 Φυσικά αέρια 29
2.5 Σύνοψη Γεωλογικών προβλημάτων..... 30
2.6 Οργανομέτρηση 30
3. Γεωτεχνικά Όργανα Παρακολούθησης 33
3.1 Γενικά στοιχεία 33
3.2 Καθοριστικοί παράγοντες στην επιλογή των οργάνων..... 33
3.3 Συμπεριφορά οργάνων μέτρησης 34
3.4 Εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων..... 36
3.4.1 Παράγοντες εγκατάστασης οργάνων 37
3.4.2 Διάνοιξη γεωτρήσεων 38
3.4.3 Ένεμα 39
3.4.4 Βαθμονόμηση 40
3.4.5 Συλλογή, επεξεργασία, αξιολόγηση και παρουσίαση δεδομένων οργανομετρήσεων 41
3.5 Όργανα μέτρησης ολικών τάσεων 43
3.5.1 Λειτουργία εντοιχισμένων μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης 43
3.5.2 Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης 45
3.5.3 Μονάδα Μέτρησης φορτίων 47
3.5.3.1 Δοκιμές αγκυρίων (Acceptance tests)..... 47
3.5.3.2 Κυψέλες φορτίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος- πλαισίων- μόνιμης επένδυσης..... 49
3.5.4 Μονάδες Μέτρησης Παραμορφώσεων σε Κατασκευές 50
3.6 Όργανα μέτρησης παραμόρφωσης 52
3.6.1 Εισαγωγή 52
3.6.2 Γεωδαιτικές μέθοδοι 53
3.6.2.1 Χωροσταθμήσεις εντός της σήραγγας – Μετρήσεις συγκλίσεων 54
3.6.3 Όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης..... 56
3.6.3.1 Κλισιόμετρα..... 57
3.6.3.2 Εγκατάσταση κλισιομετρικού σωλήνα- Ενεμάτωση 60

3.6.3.3 Μετρήσεις Βάσης ... 62
3.6.3.4 Συνήθεις μετρήσεις ρουτίνας ... 64
3.6.3.5 Σφάλματα μετρήσεων ... 64
3.6.3.6 Ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων ... 66
3.6.3.7 Ακρίβεια μετρήσεων της εταιρείας Slope Indicator ... 67
3.7 Όργανα μέτρησης κλίσης κατασκευής ... 68
3.7.1 Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων ... 68
3.7.2 Κλινόμετρα ... 69
3.8 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις ... 69
3.8.1 Μηκυνσιόμετρα ... 69
3.8.1.1 Μηκυνσιόμετρα απλού σημείου τύπου ράβδου ... 71
3.8.1.2 Μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων τύπου ράβδου ... 72
3.8.2 Επιφανειακά Μηκυνσιόμετρα ... 74
3.8.2.1 Μηκυνσιόμετρο τύπου ταινία ... 75
3.8.2.2 Επιμηκυνσιόμετρα ... 76
3.9 Μετρήσεις πιέσεων νερού ... 78
3.10 Συχνότητα λήψης μετρήσεων ... 80
3.11 Χρήση γεωτεχνικών οργάνων σε σήραγγες με μαλακά πετρώματα ... 81
4. Εκτίμηση ευστάθειας του μετώπου εξόρυξης της σήραγγας του Ανηλίου με χρήση οργάνων μέτρησης παραμόρφωσης ... 85
4.1 Εισαγωγή ... 85
4.2 Γενικά στοιχεία Σήραγγας Ανηλίου ... 85
4.3 Γεωλογική δομή ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος ... 86
4.4 Γεωλογία και υπόγεια νερά του ανατολικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου 89
4.4.1 Ταυτότητα αστοχίας ... 92
4.4.2 Μέτρα για την αντιμετώπιση της αστοχίας του ανατολικού πρανούς ... 94
4.4.3 Παρακολούθηση ευστάθειας κατασκευασμένου πρανούς στο ανατολικό μέτωπο ... 98
4.4.3.1 Χρήση Ακίδων ... 98
4.4.3.2 Χρήση κλισιομετρικών οργάνων ... 99
4.4.4 Συμπεράσματα μελέτης ευστάθειας ανατολικού πρανούς ... 104
4.5 Έλεγχος μικρομετακινήσεων της ευρύτερης περιοχής του δυτικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου ... 105
4.5.1 Γενικά στοιχεία ... 105
4.5.2 Γεωτεκτονικό πλαίσιο- Υπόγεια νερά ... 105
4.5.3 Έλεγχος πιθανών μικρομετακινήσεων ευρύτερης περιοχής του δυτικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου ... 107
4.5.3.1 Παρακολούθηση ευστάθειας με κλισιομετρικά όργανα ... 108
4.5.3.2 Παρακολούθηση ευστάθειας με γεωδαιτικούς υπολογισμούς δικτύου για τον ελέγχο επιφανειακών μικρομετακινήσεων ... 111
4.5.4 Συμπεράσματα – Προτάσεις ... 116
5. Εκτίμηση μέτρων υποστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου με μετρήσεις από συγκλίσεις ... 119
5.1 Εισαγωγή ... 119
5.2 Γενικά ... 119
5.3 Γεωτεχνικά- Γεωλογία περιοχής ... 120

5.4 Προβλήματα διάνοιξης και υποστήριξης σήραγγας- Χρήση ακίδων 124
5.5 Μεθοδολογία υποστήριξης σε μαλακά πετρώματα κατά το σχεδιασμό της σήραγγας 132
5.6 Συμπεράσματα- Προτάσεις 140
6. Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας Δρίσκου και με γεωτεχνικά όργανα 145
6.1 Εισαγωγή 145
6.2 Γενικά 145
6.3 Γεωμορφολογία- Γεωτεχνικά Στοιχεία 146
6.4 Επιλογή μέτρων υποστήριξης πριν τη διάνοιξη της σήραγγας του Δρίσκου 149
6.5 Εμφάνιση προβλημάτων στα μέτρα υποστήριξης 152
6.5.1 Μέτρα υποστήριξης σε περιοχές με προβλήματα έντονου κερματισμού της βραχομάζας 154
6.6 Έλεγχος μέτρων υποστήριξης με χρήση γεωτεχνικών οργάνων 155
6.6.1 Παρακολούθηση ευστάθειας εισόδου της σήραγγας του Δρίσκου με κλισιόμετρα 157
6.6.2 Εκτίμηση μέτρων υποστήριξης με τη χρήση οργάνων μέτρησης παραμορφώσεων 163
6.6.2.1 Μηκυνσιόμετρα τριών σημείων 3, 6 και 9m 163
6.6.2.2 Ακίδες σύγκλισης/ χωροστάθμισης 166
6.6.3 Γεωτεχνικά όργανα μέτρησης ολικών τάσεων 171
6.6.3.1 Παραμορφωσίμετρα σε μεταλλικό πλάισιο 171
6.6.3.2 Παραμορφωσίμετρα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 178
6.6.3.3 Κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρίων 181
6.6.3.4. Υδραυλικές κυψέλες πίεσης πετρωμάτων 184
7. Σύνοψη – Συμπεράσματα 187
Βιβλιογραφία 191
Παράρτημα Α – Ταξινόμηση της μάζας του πετρώματος 195
Α1. Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας 195
Α1.1 Μηχανική αντοχή του πετρώματος 195
Α1.2 Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD) 197
Α1.3 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους 197
Α1.4 Επιρροή του υπόγειου νερού 198
Α2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας 198
Α.2.1 Σύστημα RMR Bieniawski 199
Α2.2 Σύστημα GSI 202
Α2.3 Σύστημα Q (NGI) 204
Α2.3.1 Συντελεστής RQD 204
Α2.3.2 Συντελεστής Jn 204
Α2.3.3 Συντελεστής Jr 205
Α2.3.4 Συντελεστής Jα 205
Α2.3.5 Συντελεστής Jw 206
Α2.3.6 Συντελεστής SRF 207
Α2.3.7 Ταξινόμηση ποιότητας βραχομάζας κατα το Q σύστημα 208

Περίληψη

Στη μεταπτυχιακή εργασία παρουσιάζονται προβλήματα ευστάθειας μετώπου σε σήραγγες και προβλήματα στα μέτρα υποστήριξης των σηράγγων μέσα από τα παραδείγματα της Εγνατίας Οδού (σήραγγες Δρίσκου, Ανθοχωρίου και Ανηλίου). Επιπλέον, μέσα από τη διατριβή αναδεικνύεται η συμβολή των γεωτεχνικών οργάνων ως ένα αναγκαίο μέτρο παρακολούθησης της ευστάθειας του κατασκευασμένου πρανούς και της ευστάθειας μετώπου σήραγγας μέχρι τη διάνοιξη της σήραγγας.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή των γεωτεχνικών οργάνων για την παρακολούθηση και πρόληψη τυχόν προβλημάτων κατά την κατασκευή τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας.

Πρόλογος

Για την πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας, είχα την υποστήριξη ορισμένων προσώπων του τμήματος των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη, καθηγητή, επιβλέποντα της εργασίας αυτής, για την ανάθεση του θέματος και τη στήριξη του σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα μέχρι το πέρας της. Ακόμα για την αδιάκοπη βοήθεια και καθοδήγηση που μου πρόσφερε με τα εύστοχα σχόλια, προκειμένου να δοθεί η έμφαση της δικής μου συμβολής στο ερευνητικό κομάτι της εργασίας αυτής. Τέλος, να τον ευχαριστήσω για την κατανόηση που έδειξε, δεδομένου ότι η εργασία αυτή εκπονήθηκε κάτω από αντίξοες, για μένα, συνθήκες.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους κ.κ. Γ. Εξαδάκτυλο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και κ.κ. Σ. Μερτίκα, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συμμετοχή τους στη τριμελή συμβουλευτική και εξεταστική επιτροπή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον γεν. Διευθυντή της Εγνατίας Οδού, κ. Λαμπρόπουλο, τον διευθυντή της Διεύθυνσης Μελετών κ.Χρ. Γεωργακόπουλο και τον διευθυντή Σηράγγων κ.Ν.Καζίλη, για την άδεια δημοσιοποίησης των δεδομένων. Επίσης, τον Διευθυντή της περιφερειακής υπηρεσίας του Μετσόβου, κ. Κ. Παρδάλη και τη Διευθύντρια της περιφερειακής υπηρεσίας των Ιωαννίνων, κα. Αικ. Στεφοπούλου για την παροχή των δεδομένων και για την αξιοποίηση αυτών. Επίσης, τον Εμ. Χαραλαμπάκη, Πολ. Μηχανικό και Ιωάν. Παπαδάτο, Γεωλόγο, και πρώην συναφέλφους, για τις πολύτιμες παρατηρήσεις.

Κατά τη διάρκεια της διατριβής που εκπονήθηκε, η οικογένεια μου με πρόσφερε αγάπη και ηθική βοήθεια, ενώ μου έδωσε λύσεις σε κάθε είδους προβλήματα που παρουσιάστηκαν. Έτσι θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω το σύζυγό μου, τα τρία μου παιδιά και τους γονείς μου, για τη στήριξη τους.

1. Εισαγωγή

Στον Ελληνικό χώρο κατασκευάστηκε ένας μεγάλος αριθμός σηράγγων για το οδικό και το σιδηροδρομικό δίκτυο, όσο και για τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο στάδιο κατασκευής παρουσιάστηκαν πολλά προβλήματα, λόγω της πολυπλοκότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που επηρέασαν τόσο το σχεδιασμό της σήραγγας, όσο και το κόστος της, κυρίως σε περιοχές με μαλάκα εδάφη, όπως είναι η Δυτική Ελλάδα. Έπρεπε να αντιμετωπιστούν θέματα ευστάθειας μετώπου και πρανών -κατασκευασμένων ή και φυσικών- της σήραγγας, υπάρχουσες κατολισθήσεις και αστοχίες σε προσωρινή και μόνιμη επένδυση της σήραγγας. Σημαντική ήταν η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση όσο και για την πρόληψη αστοχίων. Η συστηματική παρακολούθηση των παραμορφώσεων της σήραγγας με τη χρήση των γεωτεχνικών οργάνων, είναι το θέμα που θα εξεταστεί στην μεταπτυχιακή εργασία. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των γεωτεχνικών οργάνων, από την έναρξη της κατασκευής της, αποδείχτηκε καταλυτική για την αποπεράτωση του τεχνικού έργου.

Ευρύτερος σκοπός της εργασίας είναι: α) η παρουσίαση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μικρομετακινήσεων και άλλων παραμέτρων σχετικών με την ευστάθεια διατομής σηράγγων ή μετώπων εκσκαφής σηράγγων και β) η διάχυση της γνώσης και της εμπειρίας που έχει αποκτηθεί από τη μέχρι τώρα εφαρμογή των γεωτεχνικών οργάνων. Πιο αναλυτικά θα παρουσιαστεί η χρήση γεωτεχνικών οργάνων: α) για την παρακολούθηση της παραμόρφωσης της κατασκεύης και β) για την παρακολούθηση ευστάθειας μετώπου και πρανών στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας, μέσα από την παρουσίαση παραδειγμάτων του Ελληνικού χώρου και πιο συγκεκριμένα από την κατασκευή της Εγνατίας Οδού, στο δυτικό τμήμα αυτής.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία πραγματεύεται κυρίως την επεξεργασία μετρήσεων των κλισιομέτρων για τους παραπάνω σκοπούς. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αποδείχτηκαν σημαντικά, πριν αλλά και σε όλη διάρκεια κατασκεύης μιας σήραγγας, κυρίως για τρεις λόγους:

- Εντοπισμό πιθανών ζωνών διάτμηση-εντοπισμός μορφής και βάθους αστοχίας, εύρεση ρυθμού και διεύευνση μετακίνησης-
- Έλεγχο των παραδοχών της κατασκευής
- Παρακολούθηση πιθανών καταστροφικών γεγονότων.

Οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν από την ομάδα παρακολούθησης των γεωτεχνικών οργάνων της Εγνατίας Οδού, η οποία είχε έδρα στην Περιφερειακή Διεύθυνση της Εγνατίας Οδού στα Ιωάννινα και αποτελούνταν από τον Εμμ. Χαραλαμπάκη, Πολ. Μηχανικό και τη Δέσποινα Ρούσσου, Γεωλόγο.

Η ανάγκη χρήσης όλων των κατηγοριών των γεωτεχνικών οργάνων ή ακόμα και συνδυασμό αυτών είχε σαν στόχο α) τη σύγκριση των μεταξύ τους αποτελεσμάτων (ίσως και επιβεβαίωση) και β) την ελαχιστοποίηση των μέτρων προστασίας, κατά την κατασκεύη και άρα και του κόστους, ενός πολύ σημαντικού παράγοντα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά του θέματος της μεταπτυχιακής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των στοιχείων που λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη και κατασκευή μιας σήραγγας, και η αναγκαιότητα της ενοργάνωσης για την παρακολούθηση των γεωτεχνικών προβλημάτων και των προβλημάτων των μέτρων αντιστήριξης σε μία σήραγγα, η οποία κατασκευάζεται σε μαλακά πετρώματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης τεχνικών έργων. Αρχικά γίνεται ανάλυση όλων των στοιχείων που μελετώνται πριν την επιλογή και εγκατάστασή τους ενώ στη συνέχεια κατηγοριοποιούνται σε όργανα μέτρησης ολικών τάσεων και παραμορφώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, πέμπτο κεφάλαιο και έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται προβλήματα ευστάθειας μετώπου σε σήραγγες και προβλήματα στα μέτρα υποστήριξης των σηράγγων (Δρίσκος, Ανθοχώρι, Ανήλιο) που κατασκευάστηκαν για την Εγνατία Οδό και τη συμβολή των γεωτεχνικών οργάνων ως ένα αναγκαίο μέτρο παρακολούθησης της ευστάθειας του κατασκευασμένου πρανούς μέχρι τη διάνοιξη της σήραγγας.

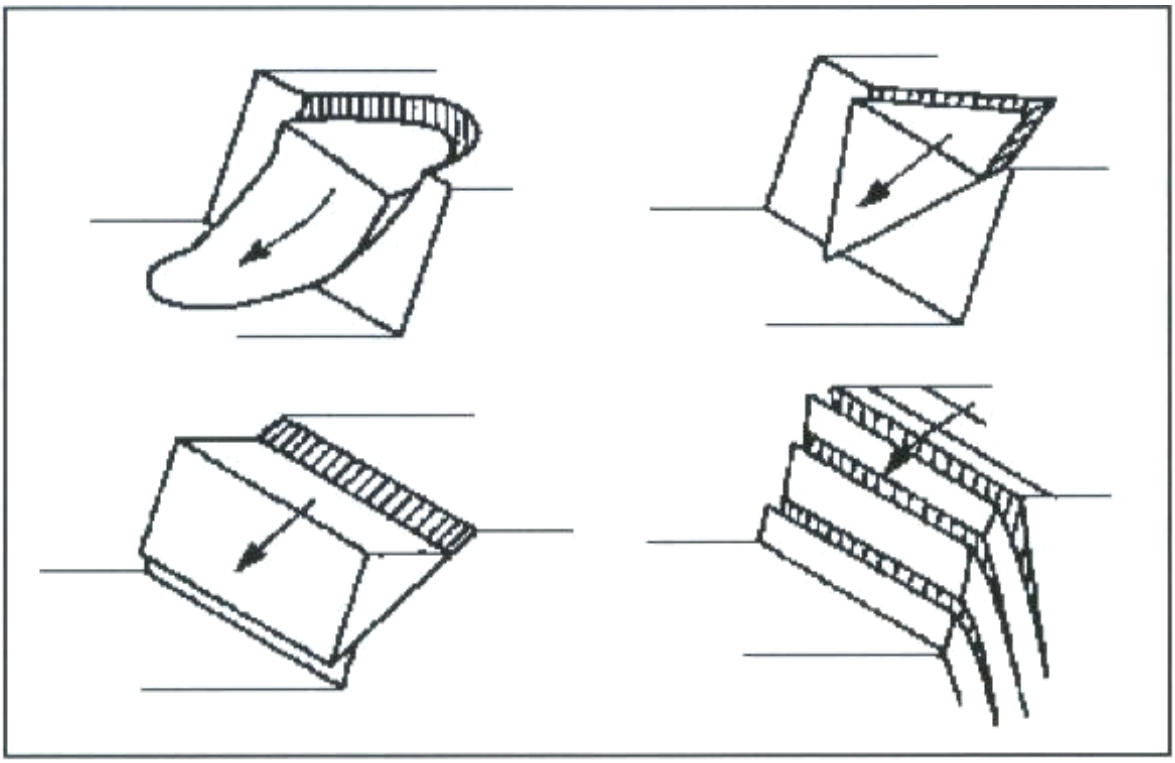
Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από την εφαρμογή των γεωτεχνικών οργάνων για την παρακολούθηση και πρόληψη τυχόν προβλημάτων κατά την κατασκευή τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας.

Μέσα από τη παρούσα διατριβή έγινε μια προσπάθεια να αναφερθούν συνοπτικά οι τρόποι αντιμετώπισης αστοχιών, τόσο για την είσοδο-έξοδο της σήραγγας, όσο και για την ασφάλεια της διάνοιξης της σήραγγας και της προσωρινής και τελικής επένδυσης αυτής. Επιπλέον, παρουσιάζονται και τα είδη των οργάνων που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση, τόσο με βάση τη θεωρία, όσο και την πραγματικότητα όπως αυτή παρουσιάστηκε στο εργοτάξιο.

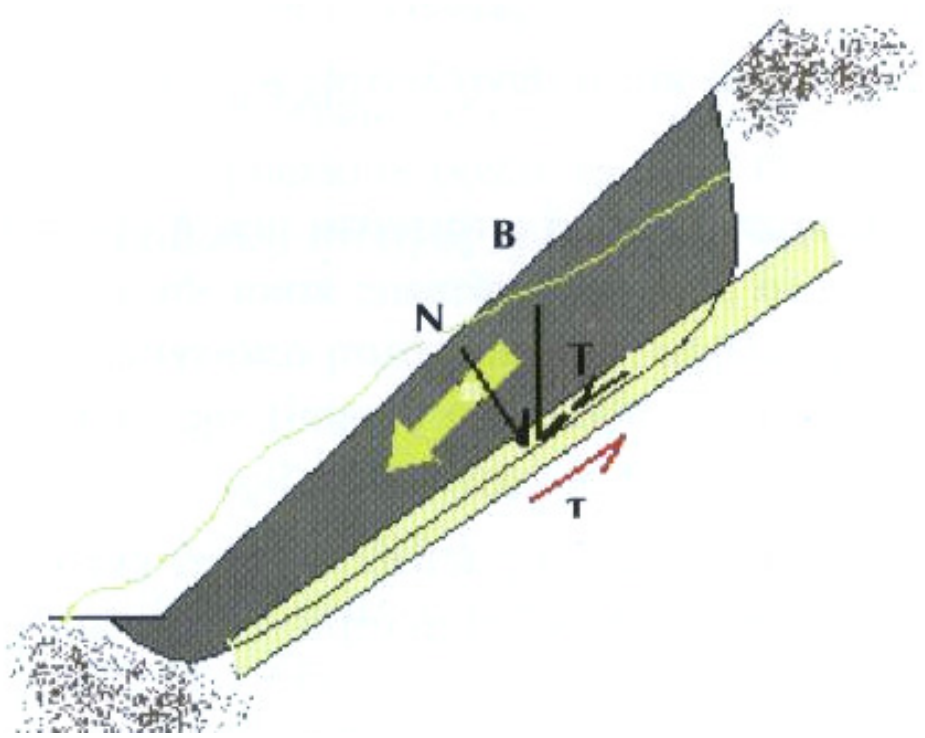
2. Κατασκευή σήραγγας και χρήση γεωτεχνικών οργάνων

2.1 Γεωλογικά και Γεωτεχνικά Προβλήματα κατά την κατασκευή μιας σήραγγας

Η γεωτεχνική έρευνα μέχρι στιγμής έχει αποδειχθεί το πιο σημαντικό κομμάτι για την επιτυχία της κατασκευής ενός τεχνικού έργου δεδομένου ότι από αυτήν εξάγονται πληροφορίες για τα τυχόν γεωτεχνικά προβλήματα, τα οποία μπορεί να παρουσιαστούν. Μέσα από την έρευνα αυτήν, εμφανίζεται η γεωλογική και η γεωτεχνική πολυπλοκότητα της περιοχής και αναδεικνύονται τα προβλήματα της στρωματογραφίας καθώς και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, δύο πολύ σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν και την εξέλιξη όλων των εργασιών που θα ακολουθηθούν. Τα προβλήματα αστοχίας συνήθως είναι συχνότερα σε περιοχές με μαλακά εδάφη, είτε λόγω σχηματισμών με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, είτε λόγω περιοχών με προβλήματα αστάθειας πρανών (σχήμα 2.1). Το επόμενο βήμα είναι ο εντοπισμός των πιθανών ζωνών διάτμησης -μορφή αστοχίας, βάθος αστοχίας, και εύρεση ρυθμού μετακίνησης (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1: Μορφές αστοχίας (Δημόπουλος 1986).



Σχήμα 2.2: Μηχανισμός αστοχίας (Γεωργιαννού 2000)

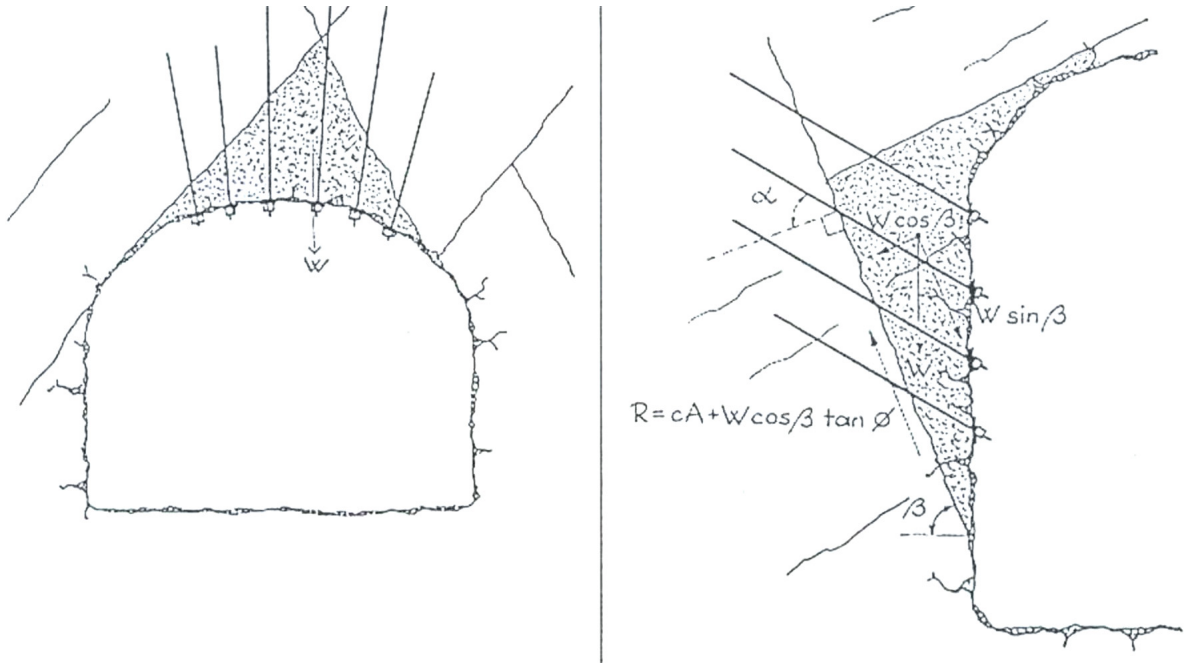
Στο στάδιο της γεωτεχνικής έρευνας θα πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση των γεωτρήσεων, των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, των μετρήσεων από γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης- κλισιόμετρα και πιεζόμετρα-, της γεωλογία της επιφάνειας (χαρτογράφηση), με σκοπό την περάτωση της γεωλογικής τομής. Όσο πιο πλήρης είναι η γεωτεχνική έρευνα τόσο ευκολότερα θα αποφευχθούν όλα εκείνα τα λάθη τα οποία οδηγούν σε μία πιθανή αστοχία που έχει ώς αποτέλεσμα την απώλεια ανθρώπινου ή υλικού δυναμικού, καθώς και την απώλεια χρόνου και αύξηση κόστους..

Επιπλέον, η γεωτεχνική έρευνα, ασχολείται με ειδικότερα θέματα που πραγματεύονται τοπικές ιδιαιτερότητες, όπως κατολισθητικά φαινόμενα και διερεύνηση του υδρογεωλογικού καθεστώτος μιας περιοχής έρευνας.

2.2 Τρόποι αντιμετώπισης σε προβλήματα αντιστήριξης

Στην κατασκευή των σηράγγων σε περιοχές με μαλακά πετρώματα παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα όπως σημαντικές καταπτώσεις λόγω διατμημένων επιφανειών (σχήμα 2.3) σε συνδυασμό με έντονη υγρασία, καθιζήσεις της στέψης σε περιπτώσεις με μικρό ύψος υπερκείμενων, αξονικές παραμορφώσεις του κελύφους (ρωγματώσεις, συγκλίσεις) και αστοχίες του σκυροδέματος (ρωγματώσεις, αποκάλυψη ράβδων των δικτυωτών πλαισίων). Γενικότερα

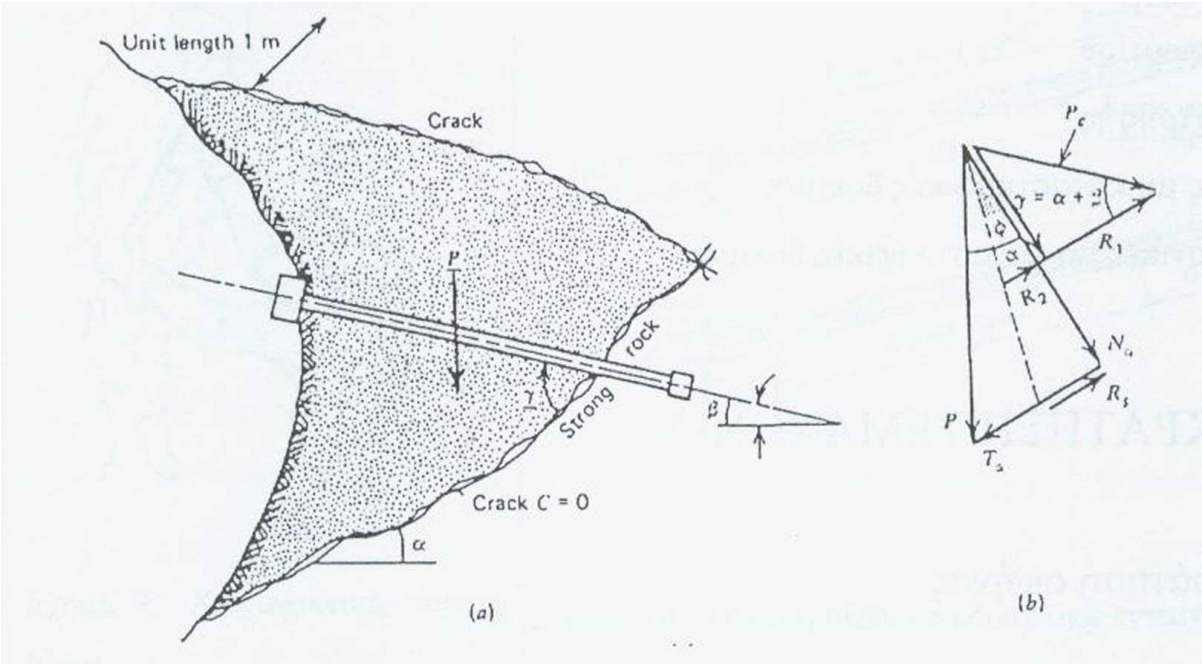
πρέπει να ελέγχονται τόσο τα φορτία που λαμβάνουν τα συστήματα υποστήριξης όσο και το μοτίβο παραμόρφωσης που οφείλεται σε αναπτυσσόμενες τοπικές τάσεις,.



Σχήμα 2.3. Πιθανή αποκόλληση σφήνας και συγκράτησης αυτής με τη χρήση ηλώσεων (σφήνα στην οροφή σήραγγας και σφήνα στα τοιχώματα σήραγγας) (Σοφιανός, 2002).

Σε όλα τα στάδια της εκσκαφής, σκοπός του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση της υπερφόρτισης των επιμέρους στοιχείων υποστήριξης και η απόκτηση μιας όσο το δυνατόν ομοιόμορφης κατανομής της παραμόρφωσης. Πρέπει να αναφέρουμε ότι οι αστοχίες σε ορισμένα στοιχεία υποστήριξης είναι αναπόφευκτες. Ο τύπος αντιστήριξης που θα ακολουθηθεί εξαρτάται από την ποιότητα της βραχομάζας και την επίδραση αυτής στη φάση εκσκαφής και επένδυσης της σήραγγας. Είναι σαφές ότι όσο πιο συμπαγές είναι το πέτρωμα στο οποίο γίνεται η διάνοιξη, τόσο πιο λιτή θα είναι η αντιστήριξη. Στην Ελλάδα όπου οι γεωτεκτονικές συνθήκες είναι πολύπλοκες, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον τύπο της αντιστήριξης. Για παράδειγμα, στην Εγνατία οδό και κυρίως στα τμήματα της Δυτικής Ελλάδας, όπου επικρατεί ο γεωλογικός σχηματισμός του φλύσχη (εναλλαγές μαλακών και βραχωδών πετρωμάτων), χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της ομπρέλας, ο οποίος απαιτεί τσιμεντενέσεις στην οροφή με ένα μέσο μήκος 12μ ανά 8μ και τη χρήση στα ενδιάμεσα τμήματα αγκυρίων (σχήμα 2.5, 2.6 και 2.7). Επίσης, απαιτείται η

σκυροδέτηση της οροφής, καθώς επίσης και του μετώπου, όπου χρησιμοποιούνται αγκύρια για τη συγκράτηση του μετώπου (σχήμα 2.4).



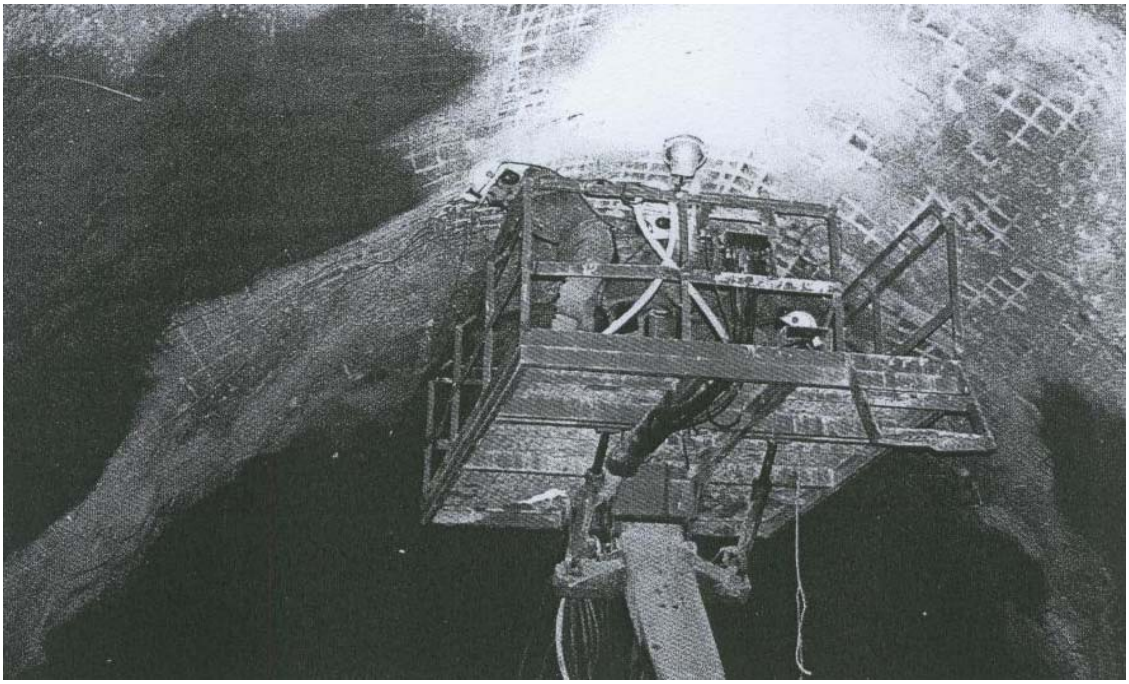
Σχήμα 2.4. Πιθανή αποκόλληση τέμαχους και συγκράτηση αυτού με αγκύριο (Σοφιανός, 2002).

Μπορεί, επίσης να γίνει χρήση μεταλλικών πλαισίων για τη στήριξη της οροφής, σε συνδυασμό ίσως και με χρήση σκυροδέματος στο μέτωπο της διάνοιξης. Στις περιπτώσεις όπου το υλικό είναι χαλαρό, χρησιμοποιείται και προσωρινή στήριξη στον πόδα της σήραγγας, όπου ελέγχει την παραμόρφωση του δαπέδου και βοηθάει στη στήριξη του πλαισίου, ή ακόμα να χρησιμοποιηθεί και στήριξη στη μέση της διατομής για την υποστήριξη του θόλου. Η χρήση της παραπάνω διαδικασίας ελαχιστοποιεί την παραμόρφωση του μετώπου και με τον τρόπο αυτόν σταθεροποιείται προσωρινά και δίνει όλες εκείνες τις ασφαλείς συνθήκες εργασίας για τη διάνοιξη της σήραγγας. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαδικασιών, γίνεται ταυτόχρονη ενόργανη παρακολούθηση για τις τυχόν παραμορφώσεις της διατομής (κυρίως συγκλίσεις) σε καθημερινή βάση, με σκοπό την έγκαιρη αντιμετώπιση πιθανών αστοχιών. Πέρα από τις συγκλίσεις, τοποθετούνται και άλλα είδη οργάνων τόσο για την αστοχία της επένδυσης της σήραγγας, όσο και για τον εντοπισμό ζωνών χαλάρωσης πίσω από το μέτωπο εργασίας. Στις περιπτώσεις, όπου τα γεωυλικά έχουν φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και παρουσιάζονται μεγάλα προβλήματα αστοχίας στην επένδυσης της σήραγγας, έχουν υιοθετηθεί λύσεις όπως μείωση του μήκους της πρώτης φάσης και οι εργασίες της Α και της Β φάσης θα εκτελούνται εναλλάξ με επιβράδυνση

του ρυθμού των εργασιών, εφαρμογή πρόσθετων αγκυρίων, κ.λ.π.(ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε, 2003).

Η επιλογή του τύπου αντιστήριξης γίνεται με μεγάλη προσοχή γιατί η όλη διαδικασία είναι χρονοβόρα, η εφαρμογή της δύσκολη και το κόστος μεγάλο, αλλά συνάμα είναι απαραίτητη για τη συνέχιση της ασφαλούς διάνοιξης.

Σχήμα 2.5. Υποστήριξη με χρήση προκατασκευασμένων μεταλλικών πλαισίων



Σχήμα 2.6. Υποστήριξη οροφής σήραγγας με χρήση πλέγματος και σκυροδέτηση

Σχήμα 2.7. Μεταλλικά πλαίσια.

2.3 Μελέτη κατασκευής σήραγγας

Κατά τη διάρκεια κατασκευής της σήραγγας η παρουσία του γεωλόγου και του μηχανικού είναι απαραίτητη για τη λεπτομερή γεωλογική αποτύπωση της σήραγγας, η οποία αποτελεί χρήσιμο στοιχείο για τους υπεύθυνους της συντήρησης του έργου ή ακόμα και για την κατασκευή μιας μελλοντικής γειτονικής σήραγγας. Επίσης μπορεί να απαιτούνται διορθώσεις στις προβλέψεις της μελέτης, καθώς και για την πρόβλεψη ατυχημάτων. Στο στάδιο αυτό μελετάμε πιο αναλυτικά τα παρακάτω στοιχεία γιατί επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας και την υποστήριξή της.

Γεωλογία. Η γνώση των σχηματισμών και ο διαχωρισμός αυτών σε βραχώδη και μαλακά ή εναλλαγών αυτών επηρεάζει τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας, το είδος της υποστήλωσης και την προστασία του διατρητικού συγκροτήματος, καθώς και την αποφυγή αστοχιών. Ο κάθε σχηματισμός έχει κάποιες ιδιαιτερότητες και δημιουργεί διαφορετικού τύπου προβλήματα.

Τεκτονική. Από τις αεροφωτογραφίες και τις επί τόπου παρατηρήσεις παίρνουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ρηγμάτων, τα συστήματα διακλάσεων (σχήμα 2.1), τις ρωγμές, τις ασυνέχειες και τις ασυμφωνίες. Οι πληροφορίες αυτές είναι χρήσιμες γιατί η παρουσία αυτών στη διάνοιξη της σήραγγας προκαλούν αστοχίες και κατά συνέπεια ατυχήματα. Τα ρήγματα, όπως αποδείχθηκε από πολλές υδρογεωλογικές έρευνες, επέδρασαν πολλές φορές στο υπόγειο υδρολογικό

καθεστώς, είτε διευκολύνοντας τη ροή του υπόγειου νερού κατά μήκος αυτών, είτε λειτουργώντας ως υπόγεια διαφράγματα διακόπτωντας τη ροή.

Στρωματογραφία Η γνώση των επιφανειών στρώσης, σχιστότητας, παλαιότερων διαρρήξεων είναι χρήσιμη γιατί αποτελούν τις περισσότερες φορές επιφάνειες αδυναμίας. Επίσης στις επιφάνειες σχιστότητας μπορεί να υπάρξει ευκολότερα αποσάθρωση, διάβρωση ακόμα και εξαλλοίωση και να αποτελέσουν αυτές, επιφάνειες ολίσθησης.

Γεωτεχνικά Από τις γεωτρήσεις, τα φρέατα, και το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών γίνεται η κατηγοριοποίηση των εδαφών και των βράχων, με βάση τις φυσικές και τις μηχανικές ιδιότητές του. Οι φυσικές ιδιότητες αναφέρονται στην κοκκομετρία, τη φυσική υγρασία-όρια Atterberg-, φαινόμενα βάρη, το πορώδες, υδροπερατότητα, κ.λ.π.. Οι μηχανικές ιδιότητες αναφέρονται στη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή του σχηματισμού.

Ανάγλυφο - Γεωμορφολογικά στοιχεία Από τις αεροφωτογραφίες και τη χρήση τοπογραφικών χαρτών, παίρνουμε πληροφορίες για το ανάγλυφο της περιοχής. Από το ανάγλυφο της περιοχής μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ρηγμάτων, επιφανειακή διάβρωση (ουβάλες, δολίνες), κ.λ.π.. Η γνώση του παλαιοαναγλύφου, είναι απαραίτητη για την ασφαλή κατασκευή της σήραγγας.

Τεχνικογεωλογικά στοιχεία. Από τις επί τόπου παρατηρήσεις, τις αεροφωτογραφίες, τις ενόργανες μετρήσεις και τα γεωφυσικά, παίρνουμε πληροφορίες για τις κατολισθήσεις, τις καταπτώσεις, τους ερπυσμούς (μανδύας αποσάθρωσης), τις αποκολλήσεις, τις καθιζήσεις και τα προβλήματα συνίζησης. Τα φαινόμενα αυτά επηρεάζουν κυρίως το μέτωπο της σήραγγας, όπου η αστοχία του μετώπου είναι συχνό φαινόμενο.

Σεισμικότητα περιοχής (καταγραφές από πυκνό δίκτυο σεισμογράφων- σεισμοτεκτονικό καθεστώς, σεισμική δράση, προσομοίωση σεισμικής κίνησης, σενάρια σεισμικότητας). Κατά την προμελέτη κάθε σημαντικού και μεγάλης κλίμακας τεχνικού έργου εκτελούνται σεισμοτεκτονικές μελέτες αναπτύσσοντας διάφορα σεισμικά σενάρια που σκοπό έχουν τον προσδιορισμό της αναμενόμενης τρωτότητας και του επιθυμητού βαθμού ασφαλείας.

Γεωφυσικά (2D, 3D ηλεκτρικές, σεισμικές, ηλεκτρομαγνητικές διασκοπήσεις – στρωματογραφία, τεκτονική, υδροφόρος ορίζοντας, παλαιομορφολογία, ελαστικές σταθερές). Η εφαρμοσμένη γεωφυσική παρέχει πληθώρα εργαλείων-μεθοδολογιών για τον προσδιορισμό παραμέτρων που σκοπό έχουν την επίλυση διαφόρων γεωτεχνικών προβλημάτων.

Υδρογεωλογία Από τις εργαστηριακές και τις επί τόπου μετρήσεις, τις γεωφυσικές διασκοπήσεις, τις γεωτρήσεις και τα φρέατα παίρνουμε πληροφορίες για την περατότητα, την παροχή, τη ροή, το πορώδες, την υδραυλική κλίση, την πηγή προέλευσης, τον προσδιορισμό στοιχείων υδροφόρου-ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά, και τα καρστικά συστήματα.

2.4 Κυριότερα στοιχεία έρευνας για την κατασκευή μιας σήραγγας

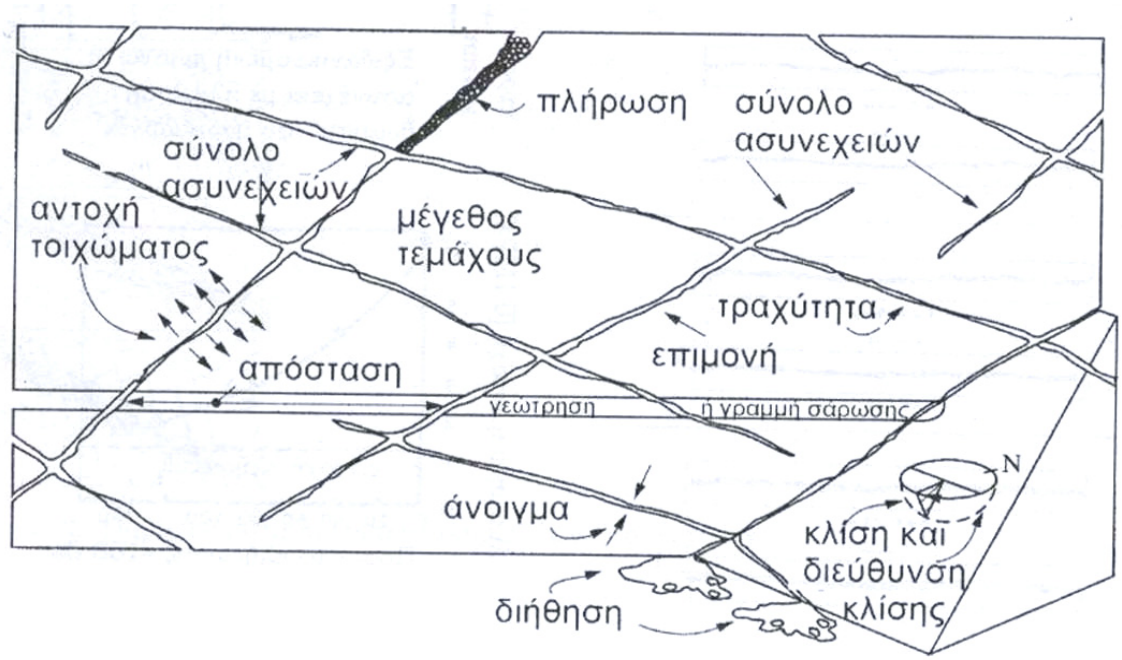
Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευή της σήραγγας είναι ο προσδιορισμός της βραχομάζας, η γνώση των υπόγειων νερών, η ύπαρξη ψηλών θερμοκρασιών και η εμφάνιση φυσικών αερίων, τα οποία αναλύονται παρακάτω.

2.4.1 Προσδιορισμός βραχομάζας

Οι επιστήμονες έχοντας την ανάγκη να επιλύσουν τα ποικίλα τεχνικά προβλήματα, τα οποία σχετίζονταν με την ποιότητα της βραχομάζας, επινόησαν διάφορα συστήματα ταξινόμησης αυτής. Τα περισσότερα συστήματα δημιουργήθηκαν για την κάλυψη των αναγκών ενός τεχνικού έργου. Οι γνωστότερες ποιοτικές και ποσοτικές ταξινομήσεις βραχομάζας αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν από τους, Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Deere et al. (1970), Bieniawaki (1973), Barton et al. (1974) και Hoek (1994) (Παράρτημα Α: Ταξινόμηση Βραχομάζας).

Το πέτρωμα στη φυσική του κατάσταση χαρακτηρίζεται τόσο από το υλικό όσο και από το σύνολο των ασυνεχειών. Οι ασυνέχειες αποτελούν ασθενείς επιφάνειες και πρόκειται για φυσικά επίπεδα διαχωρισμού, όπως στρώσεις, διακλάσεις, ρήγματα, σχιστότητα, κ.λ.π. Η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας εξαρτάται από τις ασυνέχειες. Το υλικό του πετρώματος περιγράφεται από τον τύπο του πετρώματος (χρώμα, μέγεθος κόκκων, ιστός, αποσάθρωση), την αντοχή του σε θλίψη- ανθεκτικότητα, πορώδες, ταχύτητα κυμάτων και το μέτρο της ελαστικότητας, το λόγο του Poisson, και την περατότητα.

Η ποσοτική περιγραφή αυτής γίνεται από χαρακτηριστικές παραμέτρους της βραχομάζας και συνδυασμό αυτών (σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8. Πρωτογενείς γεωμετρικές ιδιότητες ασυνεχειών (Hudson, 1989).

Προσανατολισμός. Από τη γνώση της διεύθυνσης και της κλίσης προκύπτουν οι επιφάνειες αστοχίας σε πρανή.

Αποστάσεις (παρουσίαση σε ιστογράμματα ή πίνακες). Το κατά πόσο είναι πυκνό το δίκτυο με τις ασυνέχειες και δημιουργούνται μεμονωμένα τεμάχη αποκόλλησης

Μήκος ίχνους ασυνέχειας (πίνακες). Το μήκος τους σε συνδυασμό με άλλες παραμέτρους μπορεί να είναι επικίνδυνο λόγω της επικείμενης διεύρυνσης τους.

Τραχύτητα (διαμόρφωση διατμητικής αντοχής, αύξηση γωνία τριβής). Όσο πιο λεία είναι η επιφάνεια της ασυνέχειας τόσο πιο μεγάλη είναι η διατμητική αντοχή.

Αντοχή τοιχώματος ασυνέχειας (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη). Έχει σχέση με τη διατμητική αντοχή και είναι πιο επιρρεπής στην αποσάθρωση από ότι το εσωτερικό της βραχομάζας, άρα μειώνει την αντοχή της βραχομάζας.

Άνοιγμα και πλήρωση. Εξαρτάται αν έχει ή όχι υλικό πλήρωσης. Σε συνδυασμό με την ύπαρξη υπόγειου νερού προκαλεί την αποστράγγιση της βραχομάζας.Η ύπαρξη υλικού δημιουργεί μία επιφάνεια αδυναμίας, ακόμα περισσότερο αν συνδυαστεί νε την ύπαρξη νερού.

Υπεδάφειο νερό (υγρασία στην επιφάνεια ασυνέχειας). Με τη μορφή υγρασίας αποδυναμώνει την αντοχή της βραχομάζας. Αν υπάρχει ροή θα υπάρξει και αστοχία σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες, π.χ. διεύρυνση της ασυνέχειας και αποκολλήσεις, ή αποσφηνώσεις ή δημιουργία ρέουσας μάζας.

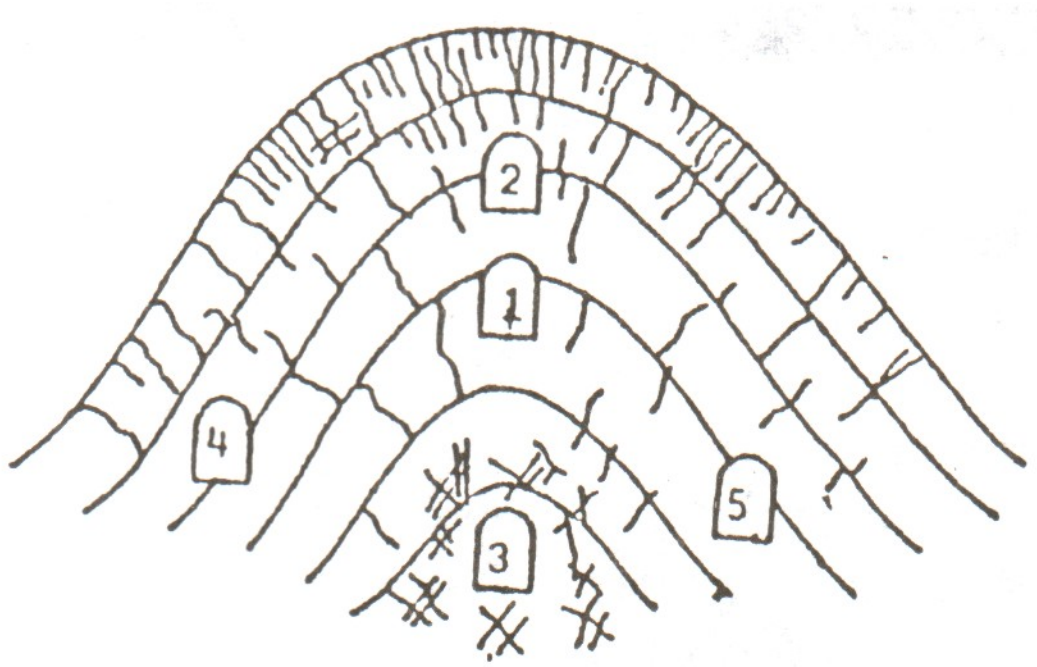
Ομάδες διακλάσεων. Οι ομάδες καθορίζουν την ποιότητα της βραχομάζας. Όσο πιο πολλές τόσο κακής ποιότητας είναι η βραχομάζα.

Μέγεθος τεμάχων πετρώματος. Το μέγεθος, επίσης, καθορίζει την ποιότητα της βραχομάζας. Όσο πιο μικρά τόσο κακής ποιότητας είναι η βραχομάζα.

Γενικά η παρουσία ενιαίου πετρώματος απλουστεύει, επιταχύνει και συμφέρει την προώθηση των εργασιών ολόκληρης της κατασκευής. Εάν η βραχομάζα είναι απαλλαγμένη από χαρακτηριστικές επιφάνειες στρώσης, τότε η δομή χαρακτηρίζεται ευνοική, σε αντίθεση με τη δομή που παρουσιάζει εναλλαγές στρώσης. Η παρουσία της στρώσης και της σχιστότητας είναι δύο δυσμενείς περιπτώσεις, κυρίως όταν είναι πυκνές. Στρωματώδεις σχηματισμοί και κρυσταλλικοί σχιστόλιθοι παρουσιάζουν τάσεις αποχωρισμού, και η οποία αυξάνεται όσο πιο οριζόντια είναι η απόθεση αυτών. Ως δυσμενής χαρακτηρίζεται η διάνοιξη σήραγγας παράλληλα προς την παράταξη του πετρώματος, ενώ η πλέον ευνοική χάραξη παρουσιάζεται όταν ο άξονας της σήραγγας κινείται κάθετα στην παράταξη των στρωμάτων .

Έτσι, για παράδειγμα μία στοά που ανοίγεται στη θέση 3 του σχήματος (2.9), θα πρέπει να συναντά περισσότερο ή λιγότερο διαταραγμένη βραχομάζα και ανάλογα με τις συνθήκες μυλωνιτίωσης θα πρέπει να δέχεται ισχυρή πίεση της βραχομάζας. Η θέση 2 συναντά εισροές νερού από το υπερκείμενο αποσαθρωμένο πέτρωμα και ίσως να έχει να αντιμετωπίσει και έναν μεταγενέστερο θραυσμό των εκτεινόμενων όγκων. Ευνοϊκότερη είναι η θέση 1, η οποία κατά τη διάρκεια της πτύχωσης δεν έχει δεκτεί επιδράσεις εφελκυσμού ή συμπίεσης. Το ίδιο ισχύει και για τις θέσεις 4 και 5. Παρόμοιοι συλλογισμοί γίνονται και στην περίπτωση κατασκεύης σήραγγας σε δομή συγκλίνου.

Πέρα από τις περιπτώσεις των πτυχωμένων σχηματισμών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η κατασκευή σήραγγας σε περιοχή ρηγματωμένων ζωνών και μεταπτώσεων. Η παραμόρφωση της βραχομάζας εξαιτίας ενός θραυσμού δυσκολεύει την ερμηνεία της δομής της, αλλά και την κατασκευή της σήραγγας σε μικρό ή και μεγάλο βαθμό.



Σχήμα 2.9. Διάφορες θέσεις των στοών (1-5) στην περιοχή ενός αντικλίνου (Δημόπουλος, 1986).

Η πιο απλή περίπτωση είναι η ρηγματωμένη βραχομάζα, όπου οι μεμονωμένες ρηγματωμένες επιφάνειες ολισθαίνουν η μία μετά την άλλη χωρίς να καταπονούν το περιβάλλον πέτρωμα. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται τοπικά συμπληρωματικά μέτρα προστασίας,. Σε μεγάλο βαθμό ρηγματώσεων, το υλικό των κατατμήσεων κατολισθαίνει, ενώ σε μερικές περιπτώσεις σχηματίζεται άνοιγμα που μπορεί να φέρει και νερό. Στις περιπτώσεις αυτές γίνεται προσπάθεια εντοπισμού του εύρους της διαταρραγμένης ζώνης, όπου ο βαθμός διατάραξης εξαρτάται από τη συμπεριφορά του πετρώματος και το μέγεθος και τη μορφή των δυνάμεων που δρουν (Δημόπουλος, 1986).

Το ακριβές γεωτεχνικό μοντέλο της βραχομάζας καθορίζεται από τον ορθό προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων, οπότε έπεται η επιλογή του τύπου διάνοιξης και του τύπου αντιστήριξης.

Παρακάτω αναφέρεται ο διαχωρισμός της βραχομάζας σε βραχώδη και μαλακά υλικά και ποια είναι εκείνα τα στοιχεία που επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας.

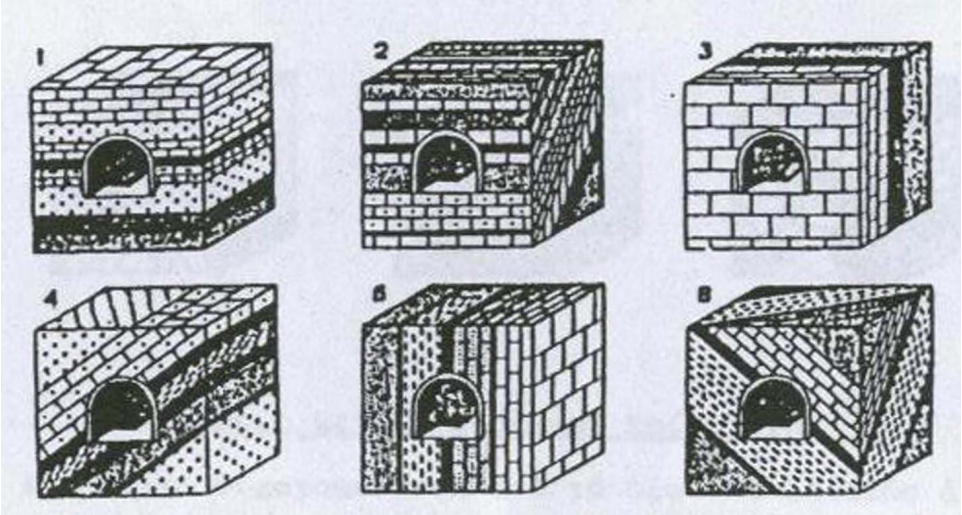
2.4.2 Συμπαγή πετρώματα

Η διαφοροποίηση των αντιδράσεών τους κατά τις εξορύξεις σήραγγας, εξαρτάται κυρίως από τις ιδιομορφίες της δομής τους (στρωσιγένεια, σχιστότητα, βαθμός διαρρήξεως, διεύθυνση και κλίση των επιφανειών ασυνέχειας, σύγκλινα, αντίκλινα, ρήγματα).

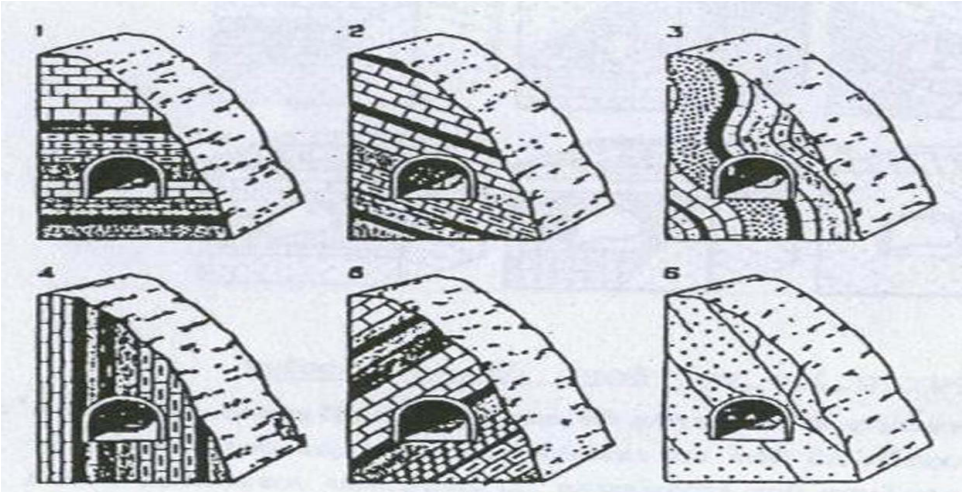
Στρώση. Στις περιπτώσεις που σημειώθηκαν παραπάνω η διάταξη των στρώσεων του πετρώματος έχει σαν αποτέλεσμα την ομαλή κατανομή των πιέσεων στις 2 πλευρές της σήραγγας.

Όταν όμως η σήραγγα έχει διεύθυνση λοξή ή παράλληλη προς τη διεύθυνση των στρωμάτων, άσχετα αν αυτά είναι με κλίση ή κατακόρυφα, η ανακατανομή των τάσεων δεν είναι κανονική (σχήματα 2.10 και 2.11).

Στα πτυχωμένα πετρώματα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το αποτέλεσμα θόλου της ίδιας της τεκτονικής δομής που έχει δημιουργηθεί από την πτύχωση. Έτσι με όλες τις άλλες συνθήκες ίδιες, στη ζώνη του άξονα του αντίκλινου η πίεση των πετρωμάτων θα είναι μικρότερη από ότι στις δύο πλευρές του. Το αντίθετο συμβαίνει για ένα σύγκλινο, το οποίο αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση ακόμη και από υδρογεωλογικής απόψεως (υπό πίεση υπόγεια νερά), ιδιαίτερα στη ζώνη του άξονά του.



Σχήμα 2.10. Σήραγγα – Επίπεδα στρώσεων (Δημόπουλος, 1986)



Σχήμα 2.11. Σήραγγα - διάταξης επιφανειών στρώσεων, σχιστότητας διαρρήξεων (Δημόπουλος, 1986)

Διαρρήξεις. Στις έντονα τεκτονισμένες περιοχές οι διαρρήξεις είναι πολυπληθείς και διαφόρων γενεών. Οι κύριες διευθύνσεις διαρρήξεων σε σχέση με τη διεύθυνση της ωθήσεως είναι

- κάθετες προς τη διεύθυνση της ωθήσεως (π.χ. εφιππεύσεις, ανάστροφα ρήγματα)
- παράλληλες προς τη διεύθυνση της ωθήσεως (οριζόντιες μεταπτώσεις)
- διαρρήξεις διευθύνσεων 45 μοίρες σε σχέση με τις προηγούμενες, αντιστοιχούσες σε ένα δίκτυο διατμήσεων.

Όλες αυτές οι δυνατές διαρρήξεις σε συνδυασμό με προυπάρχουσες επιφάνειες αδυναμίας (π.χ. στρώσεως, σχιστότητα, παλαιότερες διαρρήξεις) και με τη δράση της επακόλουθης κατακόρυφης τεκτονικής (τεκτονική βαρύτητα), δημιουργεί πυκνά και πολύπλοκα δίκτυα διαρρήξεως που κατακερματίζουν τις βραχώδες μάζες σε ακανόνιστα σώματα από πλευράς τόσο σχήματος όσο και μεγέθους.

Υπέρβαση εξόρυξης. Το ποσοστό της υπέρβασης εξορύξεως επηρεάζεται ελαφρά μόνο από τη φύση των πετρωμάτων ή τις διαστάσεις της σήραγγας. Οι κυριότεροι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι η πυκνότητα των επιφανειών ασυνέχειας και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας.

Μέθοδος εξορύξεως. Η απόσταση μεταξύ τελευταίας υποστηλώσεως και μετώπου εξορύξεως και ο χρόνος που παρέρχεται από την εξόρυξη ενός τμήματος μέχρι την υποστήλωσή του. Σε πετρώματα λίαν ανισότροπα (π.χ. εναλλαγές μαλακών και βραχωδών πετρωμάτων), με στρώση ή σχιστότητα, το μέγεθος της υπέρβασης εξορύξεως θα εξαρτηθεί από τη συνοχή μεταξύ των

στρωμάτων και από τη διεύθυνση της σήραγγας σε σχέση με τη διεύθυνση στρώσεως ή σχιστότητας.

Ρήγματα και ζώνες μυλωνιτίωσης. Πέρα από τα ενεργά ρήγματα, τα οποία πρέπει οπωσδήποτε να αποφεύγονται, η αναπόφευκτη συνάντηση ζωνών θρυμματισμού, που αντιστοιχούν σε παλιά ρήγματα, απαιτούν ορισμένες προφυλάξεις.

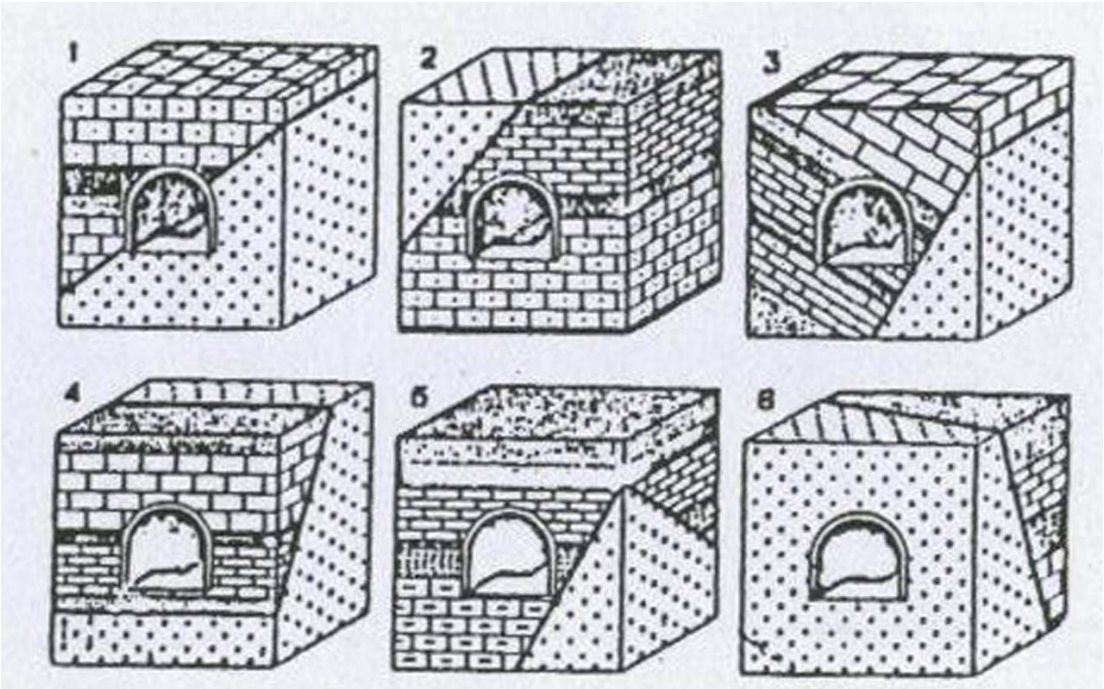
Οι δυσκολίες κατά το πέρασμα μιας σήραγγας μέσα από μια τέτοια ζώνη (σχήμα 2.12) είναι περισσότερο ή λιγότερο μεγάλες ανάλογα με το πάχος της θρυμματισμένης ζώνης και τη θέση της στο χώρο σε σχέση με τον προσανατολισμό της σήραγγας. Είναι χαρακτηριστική η ακραία δυσμενής περίπτωση κατακόρυφης μυλονιτιωμένης ζώνης, η οποία συναντήθηκε κατά τη διεύθυνσή της από τη σήραγγα του Cantal των γαλλικών σιδηροδρόμων επί μήκους εκατοντάδων μέτρων.

Τα υλικά που είναι δυνατόν να υπάρχουν σε μία ζώνη ρήγματος μπορεί να φθάσουν ως τη κατηγορία των ρεόντων ή των διογκωμένων υλικών. Στις περισσότερες περιπτώσεις το υλικό μυλωνιτιώσεως είναι αργιλικό. Τα ρήγματα και οι ζώνες μυλονιτιώσεως απαιτούν δυνατές και συνεχείς υποστυλώσεις και αν είναι δυνατόν να υποστυλωθούν αμέσως με μπετόν. Αν η ξήρανση και η συστολή μιας αργιλικής ζώνης μυλονιτιώσεως μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα, τότε πρέπει πριν τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση να γίνει μία επάλειψη με στεγανοποιητικό υλικό. Η διασταύρωση της σήραγγας με μία μυλωνιτιωμένη ζώνη μπορεί να έχει διάφορες δυσμενείς επιπτώσεις, όπως όταν οι μυλωνίτες είναι αργιλώδεις αποτελούν στεγανό διάφραγμα στη κίνηση του υπόγειου νερού, βρίσκονται σε κατάσταση κορεσμού και μπορεί με πλαστική ή ιξώδη ροή να κινηθούν μέσα στη σήραγγα και να την αποφράξουν. Άλλοτε πάλι η κακή συμπεριφορά των υλικών αυτών είναι δυνατόν να καθυστερήσει να εκδηλωθεί και να παρουσιαστεί βραδύτερα δια καταρρεύσεως, μετά την ξήρανση τους εξαιτίας της πτώσεως της στάθμης των υπόγειων νερών και του αερισμού.

Επίσης, οι μυλωνιτιωμένες ζώνες επειδή είναι λιγότερες σταθερές από τα πετρώματα που τις περιβάλλουν, αποτελούν μία αιτία υπερβάσεως εξορύξεως, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους ως προς τον άξονα της σήραγγας. Λίγο πριν συναντηθεί η ζώνη αυτή το υγιές πέτρωμα υποχωρεί. Τέτοια υποχώρηση μπορεί να συμβεί ακόμη και στην περίπτωση που η σήραγγα δεν συναντά τη μυλωνιτιωμένη ζώνη αλλά περνά δίπλα από αυτήν.

Η πρόβλεψη συναντήσεως ρήγματος ή μυλωνιτιωμένης ζώνης πρέπει να βασίζεται στην γεωμετρική ερμηνεία στοιχείων από παρατηρήσεις στην επιφάνεια εδάφους ή από προηγούμενη συνάντηση ρήγματος από άλλη σήραγγα διαφορετικού προσανατολισμού (αύξηση παροχών υπόγειων υδάτων, εξαλλοίωση πετρωμάτων, ωθήσεις στα πλευρά της σήραγγας, κ.λ.π.).

Η προσέγγιση μιας τέτοιας ύποπτης συμπεριφοράς ζώνης μπορεί να προβλεφθεί από πιθανή εμφάνιση ορισμένων ενδείξεων όπως η αύξηση των παροχών των υπόγειων νερών, η εξαλλοίωση των πετρωμάτων, ωθήσεις στα πλευρά της σήραγγας κ.λ.π.



Σχήμα 2.12. Σχέση ρηγμάτων και σηράγγων (Δημόπουλος, 1986)

2.4.3 Στρώματα μαλακά ή πλαστικά

2.4.3.1 Αργιλικοί σχηματισμοί

Οι άργιλοι, οι σχηματισμοί και τα πετρώματα με αργιλικά συνδετική ύλη, οι αργιλομιγείς και οι ιλυομιγείς σχηματισμοί, έχουν συχνά μια απατηλή συμπεριφορά, εξαιτίας των ειδικών ιδιοτήτων τους με το χρόνο που απαιτείται για να εκδηλωθούν τα αποτελέσματά τους. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αργιλικών σχηματισμών που επιδρούν στη διάνοιξη και τη σταθερότητα των σηράγγων είναι τα εξής:

Αντοχή σε διάτμηση. Η αντοχή σε διάτμηση ελαττώνεται προοδευτικά εξαιτίας μιας νέας ενυδάτωσης, η οποία πραγματοποιείται σε χρόνο που κυμαίνεται από μερικές εβδομάδες έως και μερικούς μήνες. Κατά συνέπεια ο θόλος και τα πλευρά μιας σήραγγας που έχει διανοιχτεί σε αργιλικούς σχηματισμούς, μας δίδουν επί αρκετό χρόνο μια απατηλή εικόνα σταθερότητας μέχρι την ημέρα που αιφνίδια υποχωρούν.

Διόγκωση. Η εικόνα της διογκώσεως είναι παρόμοια της πλευρικής διαφυγής και με την εξέλιξη των δύο αυτών φαινομένων η σήραγγα φαίνεται να ξανακλείνει. Η διαφορά της πλευρικής

διαφυγής από την διόγκωση βρίσκεται στο γεγονός ότι η πλευρική διαφυγή πραγματοποιείται χωρίς μεταβολή του όγκου. Για το λόγο αυτό κατά τη διάνοιξη υπογείων έργων διαπιστώνεται στην επιφάνεια του εδάφους μια καταβύθιση. Κάτι παρόμοιο δεν συνοδεύει τις διογκώσεις εξαιτίας της αυξήσεως του όγκου. Η διόγκωση πραγματοποιείται γενικά είτε εξαιτίας αποσυμπιέσεως είτε δια ενυδατώσεως.

Διόγκωση δια αποσυμπιέσεως. Η διόγκωση αυτή, κοινή σε όλα τα είδη αργίλων, μπορεί να πάρει διάφορες τιμές ανάλογα με την ένταση της συμπιέσεως, την οποία το πέτρωμα είχε παλαιότερα υποστεί. Θα μπορούσε κανείς να χαρακτηρίσει τη διόγκωση σαν το αντίστροφο φαινόμενο της συμπιέσεως, γιατί πραγματοποιείται με προσρόφηση ορισμένης ποσότητας νερού. Επί μακρό χρόνο πιστευόταν ότι οι άργιλοι προσροφούσαν το νερό για τη διόγκωση, από τον ατμοσφαιρικό αέρα του υπόγειου έργου. Διαπιστώθηκε όμως ότι στην πραγματικότητα το νερό αυτό προέρχεται από τις γειτονικές μάζες που με βραδύ ρυθμό κατευθυνόταν από τις πιο συμπιεσμένες ζώνες προς τις ασυμπίεστη ζώνη, στην οποία δημιουργείται η σήραγγα. Για το λόγο αυτό μια στεγανή επένδυση δεν είναι αποτελεσματική για την αποφυγή του φαινομένου της διόγκωσης.

Διόγκωση δια ενυδατώσεως. Αφορά όλες τις αργίλους της ομάδας του μοντμοριλονίτη (μπεντονίτες), οι οποίες όπως είναι γνωστό απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού και διογκώνονται αυξάνοντας τον όγκο τους μέχρι και 10πλάσια του αρχικού. Η πίεση ενυδατώσεως φθάνει μέχρι τα 10 bars. Ένα απλό μέσο διάγνωσης του φαινομένου αυτού προτάθηκε από τον Terzaghi και συνίσταται στην εμβάπτιση μέσα σε νερό ενός φρέσκου δείγματος που λαμβάνεται από το μέτωπο εξορύξεως ή από ξηρό πυρήνα γεωτρήσεως. Αν η διόγκωση του φθάσει το 2% πρέπει να θεωρήσουμε το πέτρωμα ύποπτο.

Τα υπόγεια έργα που γίνονται μέσα σε αργίλους απαιτούν άμεση υποστήλωση. Η υποστήλωση πρέπει να γίνεται χωρίς καμία καθυστέρηση όταν προβλέπονται διογκώσεις. Η πιο αποτελεσματική μορφή υποστηλώσεως είναι η κυλινδρική μεταλλική. Η πίεση που εξασκείται από τα αργιλικά υλικά στην αρχή αυξάνει πολύ γρήγορα και μετά πιο αργά. Θα μπορούσε λοιπόν να γίνει η σύσταση ότι για την ελάττωση της τελικής τιμής της πιέσεως πάνω στην επιφάνεια της επενδύσεως να αφήνεται από την αρχή ένα κενό γύρω από αυτήν (με αύξηση της διατομής και επομένως αύξηση των εκσκαφών) ή ακόμη καλύτερα με χρησιμοποίηση ενός τύπου υποστηλώσεων που να προσαρμόζονται εύκολα στις μεταβολές δίχως να θραύονται από τις επιδράσεις των πιέσεων.

2.4.3.2 Μαλακά υλικά καταρρέοντα (χωρίς συνοχή)

Στην κατηγορία αυτή των πετρωμάτων ανήκουν οι άμμοι, τα αμμοχάλικα, και τα μη αργιλικά κορήματα που αποτελούνται από μικρά τεμάχια (σάρες), υπάρχουν μεγάλες δυσκολίες για τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Μια τεχνική για να προχωρήσει μια σήραγγα μέσα σε αυτά τα υλικά είναι η προώθηση των επενδύσεων πιο μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής, το οποίο συγχρόνως πρέπει να συγκρατείται κατακόρυφα με επένδυση, τα οριζόντια στοιχεία της οποίας θα αφαιρούνται από το πάνω μέρος ένα- ένα και θα μετατίθενται προς τα μέσα αφού πραγματοποιείται προώθηση της εκσκαφής μόνο σε αυτό το τμήμα.

Άλλη τεχνική που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η στερεοποίηση των χωρίς συνοχή υλικών με τσιμεντενέσεις και η εν συνεχεία προώθηση της σήραγγας μέσα σε αυτά. Εξαιτίας των δυσκολιών διατρήσεων τέτοιων υλικών από μια σήραγγα, θα πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση σηράγγων σε θέσεις που η είσοδος και η έξοδός τους να βρίσκονται σε περιοχές κορημάτων χωρίς συνοχή.

Σε περιπτώσεις όπου η σήραγγα βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια της γης χρησιμοποιείται και η τεχνική του C&C (cut & cover), όπου αφαιρούνται τα υλικά μέχρι εκείνο το βάθος, στο οποίο θα φθάσει η σήραγγα κατασκευάζεται η σήραγγα και επαναεπιχώνεται με τα ίδια υλικά έχοντας διαμορφώσει το πρανές με τέτοια κλίση για να μην υπάρξει πιθανή αστοχία.

2.4.4 Υπόγεια νερά

Όπως έχει αποδειχθεί από τα εργοτάξια των σηράγγων η παρουσία των υπόγειων νερών δημιουργεί συχνά τις πιο σοβαρές δυσκολίες τόσο εξαιτίας των κινδύνων για απότομη και απρόβλεπτη εισροή μεγάλων ποσοτήτων νερού, όσο και από τη μείωση της ποιότητας των πετρωμάτων, αλλά και ακόμη και για τα προβλήματα αντλήσεων, τα οποία καμμιά φορά μπορεί να είναι ανυπέρβλητα (σχήμα 2.13), π.χ. σήραγγα Bin el Quidane, Μαρόκο. Για τους λόγους αυτούς επιβάλλεται:

- Να μην αρχίσει η εξόρυξη της σήραγγας πριν γίνει η συλλογή του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού πληροφοριών για τη κατά το δυνατόν καλύτερη γνώση των υπόγειων νερών (προέλευση, τροφοδοσία, παροχές, ταχύτητα ροής, διακυμάνσεις στάθμης, διεύθυνση ροής, ποιότητα).
- Αν το προφίλ της σήραγγας δεν επιτρέπει την απορροή των υπόγειων νερών δια της βαρύτητας (π.χ. πέρασμα σήραγγας κάτω από ποτάμι ή θάλασσα), θα πρέπει να προβλεφθούν οι κατάλληλες κλίσεις του δαπέδου της, ώστε τα νερά να συγκεντρώνονται στα σημεία εξόδων και από εκεί να αντλούνται.

Σε περιπτώσεις που η διερεύνηση δεν έχει επιτρέψει μια πλήρη και σαφή πρόβλεψη των πιθανών κινδύνων από υπόγεια νερά ή δεν έχει με βεβαιότητα εντοπίσει τις αμφίβολες ζώνες, θα πρέπει να γίνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής διερεύνηση του τμήματος που βρίσκεται πίσω από το μέτωπο εξορύξεως με γεωτρήσεις οδηγούς. Αυτή η πρακτική συνίσταται ιδιαίτερα στις βαθιές σήραγγες, γιατί σε αυτές τα υπόγεια νερά βρίσκονται υπό πιέσεις μεγάλες. Σημειώνεται επίσης, ότι σε τέτοιες σήραγγες η παρουσία των θερμών νερών δεν μπορεί γενικά να αποκαλυφθεί έγκαιρα παρά με αυτή την μέθοδο. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, πέρα από το κόστος της, είναι η ανάγκη της διακοπής των κύριων εργασιών εκσκαφής της σήραγγας για την εκτέλεση των γεωτρήσεων.

Πέρα από τα παραπάνω, για την ασφάλεια του έργου, πρέπει να γίνεται με μεγάλη επιμέλεια η απογραφή των σημείων ανάβλυσης υπόγειων νερών μέσα στη σήραγγα, κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η απογραφή αυτή θα περιλαμβάνει τη θέση, την παροχή, την πίεση, τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση, κ.λ.π. Μερικές από αυτές τις πληροφορίες μπορεί να επιτρέψουν τον προσδιορισμό της προελεύσεως των υπόγειων νερών, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην επινόηση του τρόπου παρεμπόδισης της εισροής μέσα στη σήραγγα.

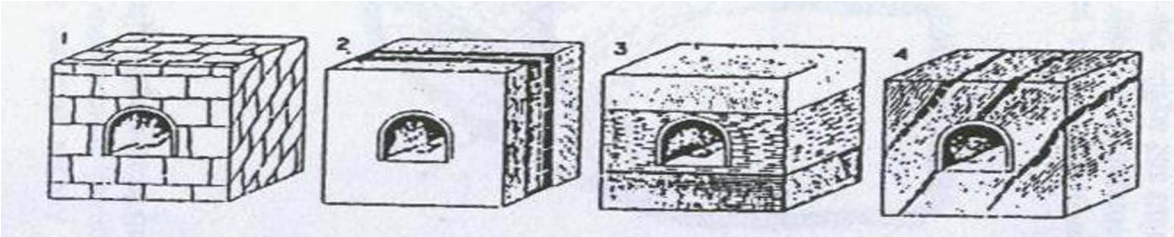
Η υδροχημική μελέτη, ακόμα και αν δεν βοηθήσει στον εντοπισμό των ζωνών αυτών, μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δραστικότητα τους και τις επιδράσεις που πιθανών να έχουν στη μόνιμη επένδυση.

Στις περιπτώσεις που οι παροχές είναι μικρές δε δημιουργούνται μεγάλες δυσκολίες παρά μόνο όταν η σήραγγα πρέπει να περάσει μέσα από πετρώματα είτε θρυμματισμένα ή έντονα διερρηγμένα, είτε πορώδη (μαλακά, ή μη), οπότε υπάρχει ο κίνδυνος τα υλικά αυτά, και βρισκόμενα κάτω από τη στάθμη των υπόγειων νερών, να μεταπέσουν σε ρέοντα.

Για τη βελτίωση τέτοιων συνθηκών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, η κάθε μία από τις οποίες εφαρμόζεται υπό ορισμένες συνθήκες. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί π.χ. η μέθοδος τσιμεντενέσεων σε πολύ λεπτόκοκκα υλικά και η μέθοδος του πεπιεσμένου αέρα για βάθος σήραγγας μεγαλύτερο από 30μ κάτω από την υδροστατική στάθμη.

Οι μέθοδοι βελτιώσεως των δυσμενών υπεδαφικών ζωνών είναι,

- Υποβιβασμός της υδροστατικής στάθμης με αποστράγγιση ή άντληση
- Στερεοποίηση και στεγανοποίηση με τσιμεντενέσεις
- Πεπιεσμένος αέρας σε ρέοντα υλικά
- Το πάγωμα των κεκορεσμένων χαλαρών υλικών.



Σχήμα 2.13. Σχέση σήραγγας και υδρογεωλογικών συνθηκών (Δημόπουλος, 1986)

2.4.5 Υψηλές θερμοκρασίες

Η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών μέσα στις σήραγγες ή άλλα υπόγεια έργα είναι ένα ενδιαφέρον φαινόμενο και πρέπει να εξετάζεται με προσοχή. Τα αίτια τα οποία προκαλούν την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, διακρίνονται σε τεχνητά και φυσικά. Σε τεχνητές ή φυσικές πηγές θερμότητας, οι οποίες εκδηλούμενες μέσα στη σήραγγα προκαλούν την αύξηση της θερμοκρασίας.

Φυσικά αίτια. Τα σπουδαιότερα είναι η θερμότητα από τις οξειδώσεις ορυκτολογικών συστατικών του πετρώματος, η γεωθερμική βαθμίδα, κ.λ.π. Το σπουδαιότερο φυσικό αίτιο κατά τη διάνοιξη της σήραγγας είναι η γεωθερμική βαθμίδα, η οποία δεν είναι σταθερή. Αυτή εξαρτάται και επηρεάζεται από διάφορους συντελεστές όπως η θερμική αγωγιμότητα, οι γεωλογικές συνθήκες και η μορφολογία του εδάφους. Στην πράξη έχει διαπιστωθεί ότι για σήραγγες με υπερκείμενο μικρό πάχος, όπως στην Ελλάδα, δεν υπάρχουν προβλήματα ψηλών θερμοκρασιών. Σε βαθιές όμως εκσκαφές είναι υπαρκτές.

Τεχνητά αίτια. Μερικά από τα τεχνητά αίτια είναι, θερμότητα από τα μηχανήματα, από σωλήνες μεταφοράς πεπιεσμένου αέρα, από την καύση των εκρηκτικών, η εκπεμπόμενη θερμότητα από τους εργαζόμενους

2.4.6 Φυσικά αέρια

Μία άλλη δυσκολία που αντιμετωπίζεται κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας είναι και η συνάντηση των φυσικών αερίων, όπως το μεθάνιο, CO_2, CO, H_2S. Η συνάντησή τους προκαλεί δυσκολίες και μεγάλους κινδύνους και θα πρέπει να κατά τη διάρκεια της μελέτης μιας σήραγγας να γίνεται διερεύνηση των υφιστάμενων γεωλογικών συνθηκών με σκοπό τη διατύπωση προβλέψεως συναντήσεων φυσικών αερίων.

Τέτοια αέρια αναμένονται κυρίως σε περιοχές με ηφαιστειακή δραστηριότητα, σε περιοχές εμφανίσεως θερμών πηγών, καθώς και σε περιοχές λιθανθρακοφόρες και λιγνιτοφόρες, όπου η εμφάνιση μεθανίου και H_2S είναι συνήθης. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση μιας

σήραγγας μεταξύ Φλωρεντίας και Μπολόνιας, όπου η ανάβλυση μεθανίου προκάλεσε πυρκαγιά, με αποτέλεσμα να προξενήσει μεγάλες ζημιές.

2.5 Σύνοψη Γεωλογικών προβλημάτων

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν, τα κυριότερα γεωλογικά προβλήματα που παρουσιάζονται κατά τη διάνοιξη σηράγγων είναι τα εξής:

- Σταθερά πετρώματα (συμπαγή βράχοι, loess πάνω από την υδροστατική επιφάνεια, ελαφρώς πλαστικά- μάργες)
- Πετρώματα με αποκολλήσεις πλακών (κάτω από υδροστατική επιφάνεια)
- Καταρρέοντες σχηματισμοί (χαλαροί σχηματισμοί πάνω από την υδροστατική επιφάνεια.)
- Ρέοντες σχηματισμοί
- Πλαστικοί σχηματισμοί (αργιλλικά χαμηλής διασταλτικής ικανότητας- Συνεχής επένδυση)
- Διογκούμενοι σχηματισμοί
- Συναντούμενα υπόγεια νερά (υπό πίεση, σε βαθιές σήραγγες)
- Ψηλές θερμοκρασίες (φυσικά ή τεχνητά αίτια)
- Φυσικά αέρια

2.6 Οργανομέτρηση

Με βάση τα αναφερόμενα προβλήματα οι γεωτεχνικοί προσπάθησαν να τοποθετήσουν γεωτεχνικά όργανα πριν την κατασκευή των σηράγγων κατά τη διάρκεια κατασκευής τους και μετά το πέρας της κατασκευής με σκοπό την αποφυγή, καθώς και την παρακολούθηση κάποιων αστοχιών. Έχει αποδειχθεί ότι τα όργανα αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά, δεδομένου ότι κατάφεραν να βοηθήσουν σημαντικά σε περιπτώσεις αστοχίας, είτε προειδοποιώντας για την υπεκείμενη αστοχία, είτε παρακολουθώντας την, είτε ακόμα μελετώντας την. Σαφώς υπήρχαν και περιπτώσεις, όπου η επιλογή των γεωτεχνικών αυτών οργάνων δεν ήταν και η καταλληλότερη, δεδομένου του τύπου του πετρώματος ή ακόμα των συνθηκών που επικρατούσαν στον περιβάλλοντα χώρο (π.χ. η υγρασία ήταν καταλυτικός παράγοντας για τη χρήση κάποιων συγκεκριμένων τύπων οργάνων). Η εμπειρία της χρήσης των οργάνων αυτών, βοήθησε στο να γνωστοποιηθεί η χρησιμότητα του κάθε οργάνου καθώς και η καταλληλότητά του. Η χρήση του κάθε οργάνου πρέπει να καλύπτει τις απαιτήσεις του έργου, να είναι συμβατό με τις συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς επίσης και να τοποθετείται σε εκείνα τα σημεία από όπου θα μπορούμε να πάρουμε τις κρίσιμες πληροφορίες για τις οποίες έγινε και η εγκατάσταση.

Πιο συγκεκριμένα άλλα όργανα τοποθετούνται σε σήραγγες όπου τα πετρώματα είναι μαλακά και άλλα όπου τα πετρώματα είναι σκληρά. Παρακάτω θα γίνει αναφόρα του συνόλου

των γεωτεχνικών οργάνων, των κατηγορίων -με βάση την αρχή λειτουργίας τους-, και των παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία τους.

3. Γεωτεχνικά Όργανα Παρακολούθησης

3.1 Γενικά στοιχεία

Ο στόχος της τοποθέτησης των γεωτεχνικών οργάνων είναι να ποσοτικοποιηθούν οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις αρχικές συνθηκές που επικρατούν στην περιοχή του έργου. Οι παράμετροι που συνήθως καταγράφονται επί τόπου είναι η πίεση του νερού των πόρων του εδάφους, η διαπερατότητα και η ευστάθεια πρανών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των παραδοχών που έγιναν στη φάση του σχεδιασμού του έργου και στη συνέχεια κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, για τη σύγκριση της συμπεριφοράς της προβλεπόμενης με την πραγματική παράμετρο. Έτσι, με την παρακολούθηση των οργανομετρήσεων, γίνεται έλεγχος των εδαφικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια κατασκευής του έργου, και κατά συνέπεια ελέγχεται και η ποιότητα στην εκτέλεση των εργασιών. Οι μετρήσεις χρησιμοποιούνται και σαν σύστημα προειδοποίησης επικείμενης αστοχίας επιτρέποντας τη λήψη εκτάκτων μέτρων.

3.2 Καθοριστικοί παράγοντες στην επιλογή των οργάνων

Για την επιλογή κάποιου γεωτεχνικού οργάνου λαμβάνονται υπόψην κάποιες σημαντικές παράμετροι, οι οποίες χαρακτηρίζουν το τεχνικό, το οποίο πρόκειται να κατασκευαστεί. Στο στάδιο του σχεδιασμού του έργου πρέπει να αναγνωρισθούν αυτές οι παράμετροι και να δωθεί το απαραίτητο βάρος στην επίλυση τυχόν γεωτεχνικών προβλημάτων.

Οι παράμετροι αυτοί, σε συνδυασμό με την σωστή επιλογή των οργάνω , το συστηματικό σχεδιασμό, τη μεθοδική συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων, οδηγούν στην επιτυχή χρήση των οργάνων στις γεωκατασκευές,. Ο Peck (Dunnicliff, 1993) είπε: “Κάθε όργανο που χρησιμοποιείται σε ένα έργο πρέπει να επιλέγεται και να τοποθετείται με σκοπό να δώσει απάντηση σε συγκεκριμένο ερώτημα/πρόβλημα.” Ακολουθώντας αυτόν τον κανόνα το πρόγραμμα οργανομετρήσεων θα στεφθεί με επιτυχία. Πέρα από την παράμετρο που μετράει το κάθε όργανο, η επιλογή του οργάνου επηρεάζεται και από κάποιους παράγοντες, οι οποίοι είναι:

Εδαφικές συνθήκες. Οι εδαφικές συνθήκες συχνά καθορίζουν τον τύπο του οργάνου. Είναι λογικό η επιτυχής μέτρηση του κάθε οργάνου να εξαρτάται από τη συμβατότητα της σύνδεσης του εδάφους με το γεωτεχνικό όργανο, όπου θα πρέπει θεωρητικά το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή των αναφερόμενων να είναι παραπλήσια. Έτσι, διαφορετικά όργανα απαιτούνται σε βραχώδη και χαλαρά εδάφη λόγω διαφοράς των ακαμψιών τους.

Κόστος. Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης ενός οργάνου (μικρό ή μεγάλο χρονικό διάστημα), συνυπολογίζεται το κόστος εγκατάστασης, το κόστος αγοράς και το κόστος για τη λήψη των μετρήσεων.

Χρόνος λειτουργίας. Ανάλογα με τον αναμενόμενο χρόνο λειτουργίας των οργάνων, τη φάση κατασκευής ή και τη διάρκεια ζωής του έργου γίνεται επιλογή κατάλληλων οργάνων, τρόποι προσσέγγισης αλλά και προστασίας αυτών.

Περιβαλλοντικές συνθήκες. Συνθήκες, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, αποδείχθηκε ότι επηρεάζουν τη λειτουργία των οργάνων. Για παράδειγμα αποφεύγονται όργανα, όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε ηλεκτρικού τύπου σε περιπτώσεις με έντονη υγρασία ή σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες , ή υδραυλικού τύπου σε συνθήκες παγετού,

Τα όργανα μέτρησης πρέπει να είναι κατάλληλα και να επιδέχονται τροποποίηση, ανάλογα με την περίσταση.

3.3 Συμπεριφορά οργάνων μέτρησης

Η απόδοση ενός οργάνου μέτρησης χαρακτηρίζεται από τη συμβατότητα, το εύρος λειτουργίας, την ακρίβεια, την διακριτική ικανότητα, την ευαισθησία, τη γραμμικότητα και την επαναληπτικότητα στις μετρήσεις. Στο στάδιο τεχνικής και οικονομικής αξιολόγησης προσδιορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις, αφού το κόστος του οργάνου αυξάνει με το βαθμό ακρίβειας, διακριτικότητας και επαναληπτικότητας των μετρήσεων (Γεωργιάννου, 2000).

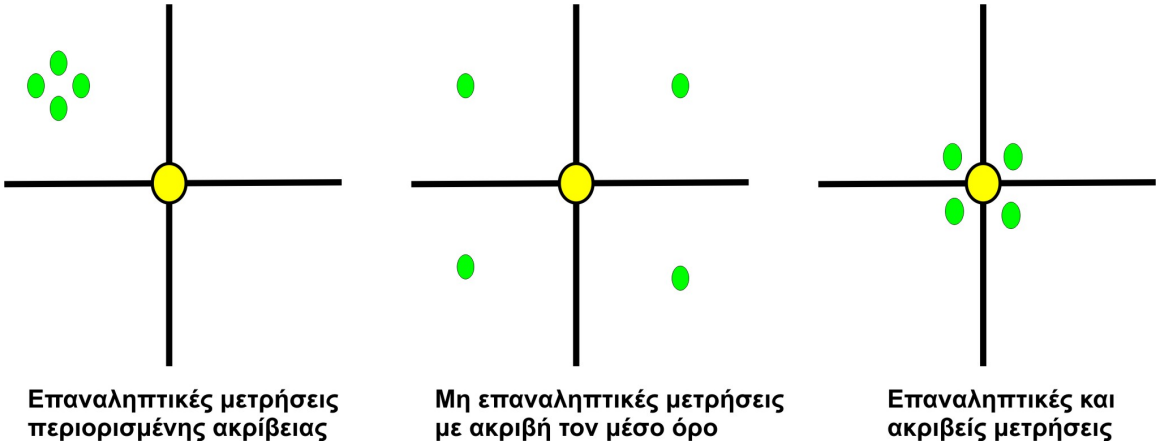
Συμβατότητα. Η εγκατάσταση ενός οργάνου για την καταγραφή της τιμής μιας παραμέτρου δεν θα πρέπει ουδέποτε να επηρεάζει την τιμή της εδαφικής παραμέτρου.

Εύρος. Καθορίζεται από τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή μέτρησης του οργάνου. Συνήθως τόσο κατά την επιλογή ενός οργάνου όσο και κατά τον προγραμματισμό ενός τεχνικού προσδιορίζεται η μέγιστη απαιτούμενη τιμή μέτρησης.

Ακρίβεια. Εκφράζει την απόκλιση της τιμής μέτρησης από την πραγματική τιμή της παραμέτρου. Η απόκλιση προσδιορίζεται με τη βαθμονόμηση του οργάνου. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιούνται ειδικά κατασκευασμένες συσκευές, η ακρίβεια των οποίων ακολουθεί αυστηρές διεθνείς προδιαγραφές. Η απόκλιση μπορεί να είναι θετική + ή αρνητική -, ή να δίνεται με τη μορφή του ποσοστού %. Επομένως το όργανο θα καταγράφει τιμές που αντιστοιχούν σε μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές από τις πραγματικές.

Επαναληπτικότητα. Αναφέρεται σε ένα αριθμό, μετρήσεων της πραγματικής τιμής μιας παραμέτρου και αφορά την απόκλιση κάθε μιας από τις μετρήσεις από τη μέση τιμή. Επομένως, η επαναληπτικότητα αντανακλά τη δυνατότητα προσδιορισμού μιας μέτρησης. Η επαναληπτικότητα προσδιορίζει τη μεταβολή της τιμής και εκφράζεται από ένα αριθμό με την

προσθήκη του προσθεταφαιρέτου συμβόλου. Η διαφορά μεταξύ των όρων ακριβεία και επαναληπτικότητα φαίνεται στο σχήμα (3.1). Το σημείο τομής των δύο αξόνων αντιστοιχεί στην πραγματική τιμή της παραμέτρου.



Σχήμα 3.1: Ακρίβεια και επαναληπτικότητα.

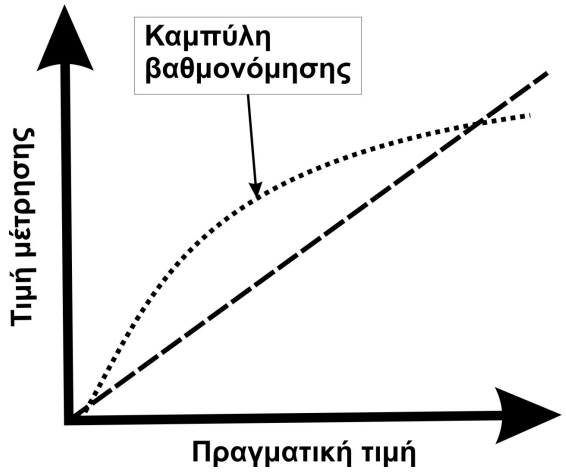
Στην πρώτη περίπτωση, οι μετρήσεις εμφανίζουν επαναληπτικότητα αλλά η απόκλισή τους από την πραγματική τιμή είναι σημαντική. Παρόμοιες μετρήσεις είναι πιθανώς αποτέλεσμα απόκλισης του οργάνου από τη μηδενική θέση ή απόρροια άλλου συστηματικού λάθους. Στη δεύτερη περίπτωση, οι μετρήσεις δεν εμφανίζουν επαναληπτικότητα, δεν είναι ακριβείς αλλά ο μέσος όρος τους είναι ακριβής. Οι μετρήσεις υποδεικνύουν τυχαίο λάθος. Τέλος, οι μετρήσεις στην τρίτη περίπτωση είναι ακριβείς και εμφανίζουν επαναληπτικότητα.

Διακριτικότητα. Είναι η μικρότερη υποδιαίρεση της κλίμακας του οργάνου. Στην περίπτωση ψηφιακής οθόνης η διακριτική ικανότητα είναι η μοναδιαία αλλαγή του τελευταίου ψηφίου. Η διακριτικότητα ενος οργάνου συνήθως μειώνεται όσο αυξάνει το εύρος των μετρήσεων.

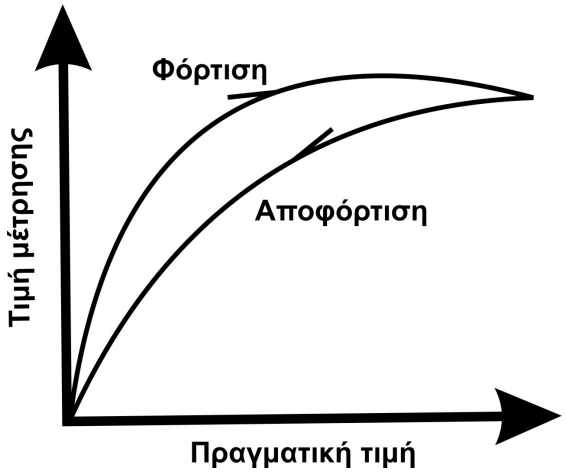
Ευαισθησία. Αναφέρεται στην έξοδο ενός οργάνου μέτρησης η οποία αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη είσοδο. Για την ίδια είσοδο το κάθε όργανο έχει διαφορετική έξοδο και το όργανο με τη μεγαλύτερη ευαισθησία εμφανίζει και τη μεγαλύτερη έξοδο. Μεγάλη ευασθησία δεν σημαίνει και μεγάλη ακρίβεια ή επαναληπτικότητα.

Γραμμικότητα. Ένα όργανο μέτρησης εμφανίζει γραμμικότητα όταν οι μετρούμενες τιμές είναι ευθέως ανάλογες του μεγέθους που μεταβάλλεται και επομένως η καμπύλη βαθμονόμησης είναι ευθεία γραμμή (σχήμα 3.2). Συνήθως η καμπύλη βαθμονόμησης αποκλίνει από την ευθεία λόγω κατασκευαστικών περιορισμών του οργάνου. Η μέγιστη απόσταση της καμπύλης βαθμονόμησης από την ευθεία γραμμή που χαράσσεται, ώστε το άθροισμα των

αποκλίσεων από αυτή να είναι το ελάχιστο δυνατό, είναι ο δείκτης γραμμικότητας. Δείκτης γραμμικότητας 1%, σημαίνει ότι το μέγιστο λάθος ότων χρησιμοποιείται γραμμικός συντελεστής βαθμονόμησης είναι το ποσοστό 1% της μέγιστης πιθανής τιμής μέτρησης.



Σχήμα 3.2: Γραμμικότητα.



Σχήμα 3.3 Υστέρηση.

<u>Υστέρηση</u>. Αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές τιμές μέτρησης μιας παραμέτρου όταν το μέγεθος που μεταβάλλεται αυξάνεται ή μειώνεται σε διαδοχικά βήματα (σχήμα 3.3)

<u>Θόρυβος</u>. Οι τιμές μέτρησης μιας παραμέτρου μεταβάλλονται λόγω εξωτερικών παραγόντων όπως γειτνίαση με πηγές τάσης υψηλής συχνότητας ή πηγές εκπομπής ήχου, τηλεοπτικού σήματος κ.λ.π., με αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας και διακριτικότητας του οργάνου.

<u>Σφάλμα</u>. Είναι η διαφορά της μετρούμενης και της πραγματικής τιμής και συνεπώς μαθηματικά ισοδυναμεί με την ακρίβεια. Το σφάλμα μπορεί να είναι τυχαίο και συνήθως οφείλεται σε απροσεξία, κούραση, έλλειψη εμπειρίας, ή συστηματικό όταν το αποτέλεσμα μη σωστής βαθμονόμησης του οργάνου ή μεταβολής των συντελεστών της καμπύλης βαθμονόμησης με το χρόνο. Η τελευταία αποφεύγεται με το συχνό έλεγχο της καμπύλης βαθμονόμησης.

3.4 Εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων

Η εγκατάσταση των οργάνων είναι σημαντικός παράγοντας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Ένα όργανο μπορεί να θεωρηθεί αναξιόπιστο όταν έχει παραληφθεί και η παραμικρή ουσιαστική λεπτομέρεια κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης. Η ορθολογική χρήση του οργάνου δεν αναφέρεται σε οποιεσδήποτε συνθήκες της υπό μελέτη περιοχής, δεδομένου ότι κάθε περιβάλλον επιδρά διαφορετικά στα αποτελέσματα. Αυτός που θα πραγματοποιήσει την

εγκατάσταση θα πρέπει να έχει βασικές γνώσεις στα γεωτεχνικά αλλά και γνώσεις στη διαδικασία εγκατάστασης του οργάνου.

Πριν από κάθε εγκατάσταση θα πρέπει να ληφθεί υπόψην:

- Το πρόγραμμα των οργανομετρήσεων
- Την παράμετρο που θα μετράει το όργανο
- Τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων
- Τις οδηγίες εγκατάστασης του οργάνου
- Την προετοιμασία για την εγκατάσταση
- Την ακριβής θέση των οργάνων

Η τοποθέτηση των οργάνων γίνεται είτε σε ζώνες με συγκεκριμένο ενδιαφέρον, είτε σε αντιπροσωπευτικές ζώνες, είτε σε ζώνη με χαρακτηριστικό δείκτη, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαφορετική συμπεριφορά αυτής. Ανεξάρτητα από τη θέση που ενδείκνυται στο τοπογραφικό σχέδιο, η ακριβής θέση του οργάνου θα ορίζεται τόσο από τη μορφολογία της υπό μελέτη περιοχής, όσο και απο τη γεωλογία και τις λεπτομέρειες της κατασκευής.

3.4.1 Παράγοντες εγκατάστασης οργάνων

Όλα τα όργανα θα πρέπει να είναι καλώς εγκατεστημένα, να διατηρούνται σε λειτουργία και να είναι προσβάσιμα προς λήψη μετρήσεων, για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εγκατάσταση των οργάνων στην επιφάνεια διαφέρουν αυτών σε γεώτρηση.

Επιφανειακά όργανα. Όταν τοποθετούνται όργανα στην επιφάνεια θα πρέπει να υπάρχει προστασία του οργάνου για την αποφυγή της καταστροφής αυτού, είτε από τη διέλευση των πεζών ή και των οχημάτων ή ακόμα και από τα ζώα. Ίσως να χρειαστεί να τοποθετηθούν μεταλλικά καλύμματα, ή κουτιά ή και κλειδαριές. Επίσης θα πρέπει να προστατευτούν και οι καλωδιώσεις και οι σωληνώσεις για τους ίδιους λόγους. Η προστασία από το νερό είναι ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας, δεδομένου ότι μπορεί να θεωρηθεί ακατάλληλο το όργανο, ακόμα και σε περίπτωση υγρασίας, όπως συμβαίνει με τα ηλεκτρικά όργανα.

Όργανα σε γεώτρηση. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη προσοχή. Ισχύουν τα παραπάνω αλλά θα πρέπει να δωθεί προσοχή στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης δεδομένου ότι πρέπει να προστατευτεί η εισαγωγή του οργάνου στη σωλήνωση καθώς και να μην αλλάζουν οι παράμετροι της γεώτρησης σε περιπτώσεις παραμόρφωσης.

Επίσης, πολύ σημαντικό είναι να τηρηθούν οι οδηγίες για:

- Τη διάτρηση της οπής.

- Την εγκατάσταση της σωλήνωσης.
- Το γέμισμα μεταξύ της γεώτρησης και της σωλήνωσης.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάποια όργανα θέτουν κάποιους περιορισμούς, προκειμένου να έχουν το βέλτιστο της λειτουργίας τους, ή ακόμα να πρέπει να παρθούν κάποια επιπρόσθετα μέτρα αναλογά με το περιβάλλοντα χώρο. Για παράδειγμα όταν οι κλισιομετρικοί σωλήνες τοποθετούνται σε μαλακά εδάφη καλό είναι να χρησιμοποιηθούν τηλεσκοπικοί σύνδεσμοι για την αποφυγή μεταβολής του μήκους του σωλήνα σε περιπτώσεις καθιζήσεων. Επίσης, κατά την εγκατάσταση της σωλήνωσης πρέπει να αποφευχθεί η περιστροφή της και για το λόγο αυτό πριν από τη χρήση τους αποφεύγεται η έκθεση τους στον ήλιο και πριν την εισαγωγή τους ελέγχονται η τάση περιστροφής των καναλιών και συνδέονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αναιρείται η περιστροφή αυτών.

Συνοψίζοντας, οι παράγοντες που επηρεάζουν την εγκατάσταση των γεωτεχνικών οργάνων, τόσο σε επιφάνεια όσο και σε γεώτρηση, αφορούν κυρίως τη διαδικασία εγκατάστασης από την προετοιμασία του χώρου τοποθέτησης μέχρι και την σωστή πάκτωση του οργάνου, αλλά και τη σωστή λειτουργία του γεωτεχνικού οργάνου, η οποία εντοπίζεται κυρίως από τη βαθμονόμησή του.

3.4.2 Διάνοιξη γεωτρήσεων

Η διάνοιξη γεωτρήσεων επηρεάζει την εγκατάσταση ενός γεωτεχνικού οργάνου. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι διάνοιξης οπών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος (βράχος ή μαλακό), τον τύπο του οργάνου που πρόκειται να εγκατασταθεί, τον τύπο του διατρητικού μηχανήματος και τις ικανότητες αυτού, την εκπαίδευση του προσωπικού, τις απαιτήσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της οπής, την πρόσβαση του διατρητικού εξοπλισμού, καθώς επίσης και την ανάγκη της δειγματοληψίας. Σύμφωνα με τα παραπάνω η επιλογή της μεθόδου γίνεται είτε:

- Με ξέπλυμα γεώτρησης –κατά τη διάρκεια κοπής γίνεται εισαγωγή νερού με πίεση και εξάγεται το εδαφικό υλικό και δεν εμποδίζει τη διάτρηση.
- Με αέρα.
- Με περιστροφή.
- Με πυρηνοληψία.

Ιδιαίτερη έμφαση θα δωθούν στα χαρακτηριστικά της γεώτρησης όπως: η διάμετρος γεώτρησης (κατάλληλη ακόμα και για τη μετέπειτα χρήση κάποιου γεωτεχνικού οργάνου), το μήκος γεώτρησης (πάντα μεγαλύτερο για την αποφυγή των κατατμήσεων εσωτερικά της

γεώτρησης), η κατακορυφότητα της γεώτρησης και κατά συνέπεια της σωλήνωσης, η τραχύτητα τοιχωμάτων γεώτρησης, η θερμοκρασία και ο χρόνος εισαγωγής οργάνου.

Η απαιτούμενη διάμετρος της γεώτρησης, προκειμένου να τοποθετηθεί ένα γεωτεχνικό όργανο είναι τουλάχιστον 75 έως 83mm. Η γεώτρηση θα πρέπει να επιτρέπει ελεύθερη αποστράγγιση. Οι οπές θα πρέπει να είναι καθαρές και χωρίς την παρουσία θραυσμάτων. Για την διάνοιξη του διατρήματος απαιτείται διαμαντοτρύπανο ή κρουστικό τρυπάνι, όπου άλλοτε θα γίνεται δειγματοληψία και άλλοτε όχι. Η δειγματοληψία, με τη σειρά της, θα χρησιμοποιηθεί για την περαιτέρω αξιολόγηση των μετρήσεων από τις μετρήσεις των γεωτεχνικών οργάνων.

3.4.3 Ένεμα

Η όλη διαδικασία του τρόπου ενεμάτωσης κατά τη διάρκεια εγκατάστασης του γεωτεχνικού οργάνου είναι πολύ σημαντική για τη σωστή λειτουργία του. Πρόκειται για μείγμα τσιμεντοκονίας με νερό σε αναλογία μικρότερη του 1:1. Η χρήση άλλων πρόσμικτων δεν είναι συνήθως απαραίτητη. Η πίεση τοποθέτησης του ενέματος πρέπει να είναι ελεγχόμενη ώστε να αποφεύγεται ζημιά στον προστατευτικό σωλήνα των γεωτεχνικών οργάνων. Στην περίπτωση τοποθέτησης ενέματος σε σωλήνες πολυαιθυλένιου μεγάλου μήκους απαιτείται ύγρανση των τοιχωμάτων του σωλήνα με μικρή ποσότητα νερού πριν την είσοδο του ενέματος για ελαχιστοποίηση των τριβών. Στην περίπτωση τοποθέτησης ενέματος σε κατακόρυφες γεωτρήσεις ή γεωτρήσεις από γωνία μικρότερη από την οριζόντιο απαιτείται σωλήνας μεταφοράς του ενέματος. Ο σωλήνας προσαρτάται στον προστατευτικό σωλήνα της ράβδου κοντά στην αγκύρωση και το όλο σύστημα τοποθετείται στη γεώτρηση. Όταν αρχίσει η πλήρωση της γεώτρησης με ένεμα ο σωλήνας μεταφοράς αποκολλάται και μετακινείται σταδιακά προς την κορυφή της γεώτρησης.

Στην περίπτωση τοποθέτησης ενέματος σε γεωτρήσεις υπό γωνία μεγαλύτερη από την οριζόντιο απαιτείται ένας σωλήνας προσαρτημένος στον προστατευτικό σωλήνα της ράβδου για μήκος μεγαλύτερο από το μήκος της βαθύτερης αγκύρωσης. Αυτός είναι ο σωλήνας αερισμού. Ένας δεύτερος σωλήνας τοποθετείται στο βάθος της αγκύρωσης, ενώ ένας τρίτος σωλήνας τοποθετείται σε βάθος 2 έως 3 μέτρων από το σύστημα αναφοράς στην κορυφή της γεώτρησης. Και οι δύο σωλήνες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ενέματος. Το όλο σύστημα εισάγεται στη γεώτρηση και στεγανώνεται στην κορυφή του με τσιμεντένεμα ταχείας πήξης. Ένεμα αντλείται μέσω του τρίτου σωλήνα. Τέλος ένεμα αντλείται μέσω του δεύτερου σωλήνα. Η διαδικασία άντλησης ολοκληρώνεται όταν το ένεμα εξέρχεται από το σωλήνα αερισμού.

3.4.4 Βαθμονόμηση

Οι μετρήσεις από ένα γεωτεχνικό όργανο είναι χρήσιμες μόνο όταν η βαθμονόμηση του οργάνου είναι σωστή και ακριβής. Τότε μόνο δεν θα υπάρχουν αποκλίσεις της μετρούμενης τιμής από την πραγματική. Έτσι, ο χρήστης του κάθε οργάνου θα πρέπει αρχικά να είναι γνώστης της σωστής λειτουργίας του οργανού και να μπορεί να αντιληφθεί πότε το όργανο δεν είναι σε θέση να δώσει σωστά αποτελέσματα. Για να είναι εφικτό αυτό θα πρέπει να ακολουθεί κατά γράμμα το εγχειρίδιο οδηγιών που δίνει ο κατασκευαστής και να πραγματοποιεί τις μετρήσεις με προσοχή και όχι μηχανικά, ώστε να παρατηρήσει τυχόν ανακρίβειες του οργάνου. Ανάλογα με την εμπειρία του χρήστη είναι δυνατόν αυτές οι ανακρίβειες να γίνονται αντιληπτές στο ύπαιθρο ή ακόμα και στην επεξεργασία των δεδομένων.

Ο πρώτος έλεγχος για τη βαθμονόμηση του οργάνου γίνεται από τον ίδιο τον κατασκευαστή στο εργαστήριο. Ενδείκνυται πριν την χρήση του οργάνου και εάν αυτό είναι εφικτό, ο ίδιος ο χρήστης να βρίσκεται παρών στη βαθμονόμηση του οργάνου στο εργαστήριο. Ο δεύτερος έλεγχος γίνεται αμέσως μετά την άφιξη του οργάνου στον χρήστη, δεδομένου ότι μπορεί να έχει υποστεί ζημιά κατά τη μεταφορά του. Ο ίδιος ο κατασκευαστής δίνει την ακρίβεια του οργάνου, η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψην κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

Ο τρίτος έλεγχος πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια χρήσης του οργάνου. Θα πρέπει ο ίδιος ο χρήστης να λειτουργεί το όργανο σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή για να έχει ακρίβεια στα αποτελέσματά του και να μη θέτει σε κίνδυνο το ίδιο το όργανο. Επισημάνσεις για τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, για τυχόν υγρασία, για αποφυγή παραμικρών χτυπημάτων, για ολικό ξετύλιγμα του καλωδίου και στη συνέχεια χρήση αυτού, για εφαρμογή του οργάνου σε καθαρή επιφάνεια, για τον τρόπο πάκτωσης κ.α. θα πρέπει να τηρούνται για την αποφυγή ανακριβιών στις μετρήσεις. Η υπευθυνότητα του χρήστη και η εφαρμογή των οδηγιών για τον καθαρισμό του οργάνου, για τη στεγανότητά του, για τυχόν λαδώσεις, για τον τρόπο φόρτισης των μπαταριών, για τη προστασία των τερματικών, των καλυμμάτων, κ.α. συντελλούν στη συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιείται η βαθμονόμησή του, ή ακόμα και την αντικατάσταση του οργάνου. Γίνεται αντιληπτό ότι η συντήρηση του οργάνου είναι βασική και θα πρέπει να παρατηρείται η παραμικρή δυσλειτουργία του ή καταστροφή του.

Η συχνότητα με την οποία θα πραγματοποιείται η βαθμονόμηση του οργάνου εξαρτάται από τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων και τον τρόπο χρήσης αυτού. Θα πρέπει να υπάρχει επικοινωνία του κατασκευαστή με τον χρήστη για τη βαθμονόμηση του οργανού και η οποία θα πραγματοποιείται στο εργαστήριο. Στην περίπτωση του κλισιομέτρου είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος και από τον ίδιο το χρήστη.

3.4.5 Συλλογή, επεξεργασία, αξιολόγηση και παρουσίαση δεδομένων οργανομετρήσεων

Πριν από την έναρξη των εργασιών οργανομετρήσεων, κατά τη φάση σχεδιασμού, απαιτείται η προετοιμασία λεπτομερών προδιαγραφών που συμπληρώνονται και οριστικοποιούνται μετά την εγκατάσταση των οργάνων, στις θέσεις καταγραφών. Οι προδιαγραφές οριστικοποιούνται, όταν το υπεύθυνο προσωπικό έχει εξοικειωθεί με τη λειτουργία των οργάνων και έχει ληφθεί υπόψην η επίδραση των ιδιαιτεροτήτων της θέσης του έργου. Με το πέρας του σχεδιασμού του προγράμματος των οργανομετρήσεων, γίνεται η λήψη των μετρήσεων και τελικά η παρουσίαση των δεδομένων που έχουν ληφθεί. Ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις αποδειχθήκε ότι είναι σημαντικός και πρέπει να είναι κατανοητός σε κάθε μηχανικό, ακόμα και στην περίπτωση που δεν έχει ασχοληθεί καθόλου με το αντικείμενο των οργανομετρήσεων.

Κατά τη φάση σχεδιασμού του προγράμματος οργανομετρήσεων για συγκεκριμένο έργο ή κατασκευή, ορίζεται μία ομάδα, η οποία είναι υπεύθυνη για τη συλλογή των δεδομένων, και η οποία είναι υπό την καθοδήση ενός πεπειραμένου γεωτεχνικού μηχανικού. Το προσωπικό που θα επιλεγεί πρέπει να είναι αξιόπιστο, ικανό στην καταγραφή στοιχείων με κάθε δυνατή ακρίβεια και λεπτομέρεια, εξεικοιωμένο με τους υπολογιστές, γνώστης της εδαφομηχανικής και των βασικών αρχών μηχανολιγικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Η επιλογή της κατάλληλης ομάδας είναι συνάρτηση τόσο των προσωπικών ικανοτήτων όσο και των απαιτήσεων του έργου.

Την ευθύνη των οργανομετρήσεων, συνήθως έχει ο κύριος του έργου ή εξειδικευμένο προσωπικό που έχει επιλεγεί από τον ανάδοχο του έργου. Ο κατασκευαστής του έργου είναι υπεύθυνος για τις παροχές που χρειάζονται για τις εργασίες της οργανομέτρησης, όπως η πρόσβαση του επιλεγμένου προσωπικού στις θέσεις των οργάνων στον χώρο του έργου. Τις περισσότερες φορές, ο κατασκευαστής είναι υπεύθυνος και για τις γεωδαιτικές εργασίες που σχετίζονται με τη συλλογή των δεδομένων.

Μέχρι πριν από μερικά χρόνια η πλειοψηφία των καταγραφών ήταν χειρόγραφη. Με την πρόοδο των συστημάτων αυτόματης καταγραφής, και όπου αυτό είναι εφικτό το σκηνικό άλλαξε. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής είναι κυρίως η μεγαλύτερη ευελιξία στη συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων και η ηλεκτρονική καταγραφή δεδομένων κατάλληλη για άμεση ανάλυση και παρουσίαση αποτελεσμάτων.

Πρέπει να έχουμε γνώση και των ακόλουθων μειονεκτημάτων κατά τη χρήση των αυτοματοποιημέων συστημάτων καταγραφής, όπως το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος και συχνά υψηλό κόστος συντήρησης και ότι το σύστημα είναι ευάλωτο σε βλάβες υπό αντίξοες εδαφικές συνθήκες και εργασίες κατασκευής στην περιοχή του οργάνου.

Με το πέρας της συλλογής των δεδομένων και αφού έχει ελεχθεί η ορθότητας τους – χρησιμοποιώντας οπτικές παρατηρήσεις στο έδαφος και στην κατασκευή, δίνοντας έμφαση στην ορθολογική χρήση των οργάνων αλλά και της συλλογής των δεδομένων, κ.λ.π.-, γίνονται οι ανάλογοι υπολογισμοί, οι οποίες είναι ανάλογες του έργου και του τύπου οργάνου. Πολλές φορές, πέρα από τους υπολογισμούς που κάνει το αντίστοιχο λογισμικό για κάθε όργανο, ο υπεύθυνος μηχανικός είναι υποχρεωμένος να υπολογίζει αριθμητικά ή ακόμα και με γραφικές παραστάσεις κάποιες παραμέτρους, βασικές ώστε να κατανοηθεί το επικείμενο πρόβλημα που πιθανόν θα προκύψει, όπως ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής της μετρούμενης παραμέτρου. Η χρήση των γραφικών απεικονήσεων υποβοηθά την ταχύτερη και ευκολότερη αξιολόγηση των δεδομένων στις ακόλουθες περιπτώσεις, όπως είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας δεδομένων και η παρουσίαση της μεταβολής των μεγεθών σε συνάρτηση με το χρόνο και τα στάδια κατασκευής του έργου. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η κατάλληλη παρουσίαση των καταγραφομένων μεγεθών αποτελεί θεμελειακό υποβοήθημα στην κατανόηση των αρχών της εδαφομηχανικής όσο και της βραχομηχανικής.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι όταν τα δεδομένα δεν αξιολογηθούν σωστά, το πρόγραμμα των οργανομετρήσεων μπορεί να αποτύχει. Ο βασικός στόχος της περαιτέρω επεξεργασίας και αξιολόγησης των δεδομένων είναι η συσχέτιση των καταγραφομένων μεγεθών με άλλες παραμέτρους και η μελέτη της απόκλισης των καταγραφών από την προβλεπόμενη συμπεριφορά. Η αξιολόγηση βασίζεται στα χαρακτηριστικά του οργάνου και την ιδιαιτερότητα του κάθε έργου. Με το πέρας της αξιολόγησης των δεδομένων, πρέπει να γίνεται η δημοσιοποίηση αυτών σε όλα τα μέλη της ομάδας, αρχικά με την σύνταξη προκαταρκτικών εκθέσεων και μετέπειτα με την παράδοση της τελικής έκθεσης, η οποία και δίδεται στον Κύριο του Έργου και στον Μελετήτη.

Η έκθεση πρέπει να περιλαμβάνει μία εκτίμηση του βαθμού επιτυχίας/αποτυχίας του προγράμματος οργανομετρήσεων. Όταν όργανα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς μεγεθών κατά τη φάση λειτουργίας του έργου, η τελική έκθεση πρέπει να αποτελεί τμήμα του Εγχειριδίου Λειτουργίας και Συντήρησης του Έργου. Αξιοσημείωτο είναι και η ενθάρρυνση των μηχανικών στη δημοσιοποίηση καλά σχεδιασμένων και επιτυχώς –ή/και ανεπιτυχώς- εκτελεσμένων προγραμμάτων οργανομετρήσεων ή και κάποιων καινοτόμων μεθόδων καταγραφής, συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων.

3.5 Όργανα μέτρησης ολικών τάσεων

Η ολική τάση στο έδαφος μετράται είτε αποκλειστικά μέσα στην εδαφική μάζα, είτε στην διεπιφάνεια εδάφους–κατασκευής, όπως μέτρηση της τάσης εδάφους σε επαφή με τοίχους αντιστήριξης, πασσαλότοιχους, διαφράγματα, στηρίξεις εκσκαφών και επιφανειακές θεμελιώσεις. Τα όργανα μέτρησης τάσης εδάφους είναι είτε εντοιχισμένες μονάδες (στοιχεία ή κύτταρα) μέτρηση εδαφικών τάσεων (περίπτωση αναχώματος ή φράγματος), είτε μονάδες επαφής για τη μέτρηση εδαφικών πιέσεων στη διεπιφάνεια εδάφους – δομικών στοιχείων κατασκευής.

Για να είναι αξιόπιστη η μέτρηση της ολικής τάσης σε σημείο μέσα στο έδαφος πρέπει να πληροί τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Η παρουσία του οργάνου μέτρησης να μην μεταβάλλει το τασικό πεδίο στο έδαφος. Το μέτρο ελαστικότητα στο έδαφος πρέπει να προσομοιώνει αυτό του εδάφους. Για παράδειγμα το ένεμα που θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση του οργάνου να προσομοιώνεται στο μέτρο ελαστικότητας του περιβάλλοντος χώρου, για να μην επηρεαστούν οι μετρήσεις.
2. Η εγκατάσταση του οργάνου να μην μεταβάλλει την εντατική κατάσταση του εδάφους. Για παράδειγμα εάν γίνει χρήση ενός πιεζομέτρου θα πρέπει αυτό με τη σειρά του να μην αποτελεί μέσο αποστράγγισης της περιοχής.
3. Απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός του οργάνου ώστε η μέτρηση να επηρεάζεται στο ελάχιστο δυνατό, από ανομοιομορφίες, κατά την εντοίχηση στο έδαφος. Για το λόγο αυτό οι μετρήσεις περιορίζονται σε επιχώματα και γενικά σε τεχνητά εδάφη.
4. Η επιφάνεια της μέτρησης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μετριάζονται οι οποιεσδήποτε τοπικές ανομοιομορφίες.

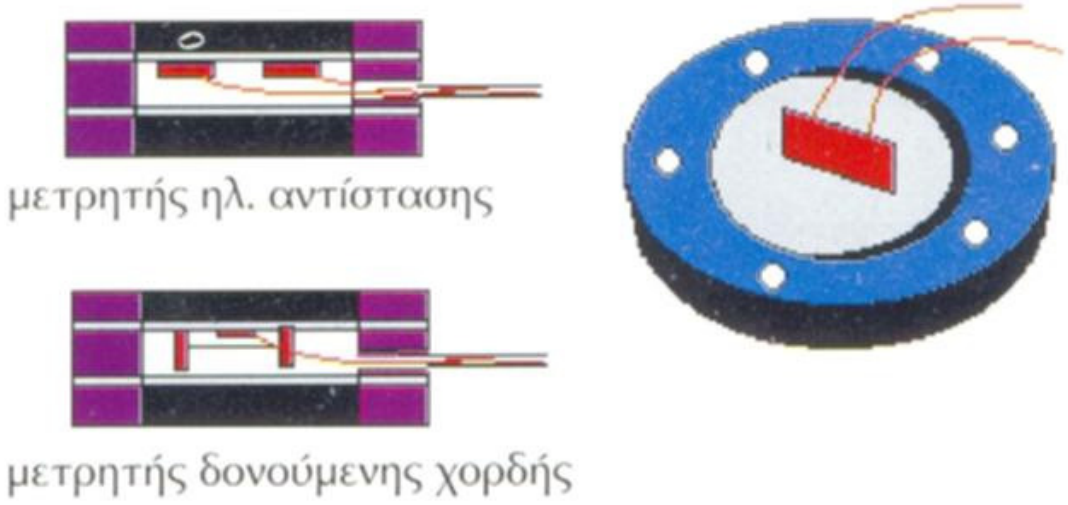
Γενικότερα, οι μονάδες μέτρησης τάσης προσδιορίζουν τις ολικές τάσεις και την κατανομή των τάσεων σε επιχώματα και φράγματα, τις τάσεις σε διεπιφάνειες εδάφους-κατασκευής όπως τοίχους αντιστήριξης, διαφράγματος, μεσόβαθρα και ακρόβαθρα, τις τάσεις θεμελίωσης, τις τάσεις στην επιφάνεια και το εσωτερικό της επικάλυψης υπογείων κατασκευών και τις τάσεις στα τοιχώματα βράχου σε ανεπένδυτες υπόγειες κοιλότητες και σήραγγες.

3.5.1 Λειτουργία εντοιχισμένων μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης. Οι μονάδες των οποίων η λειτουργία βασίζεται στην α) αρχή του διαφράγματος και οι β) υδραυλικές μονάδες.

Το διάφραγμα που συνήθως έχει τη μορφή άκαμπτης μεταλλικής μεμβράνης που στηρίζεται περιμετρικά σε ένα μεταλλικό δακτύλιο παραμορφώνεται καμπτικά υπό τη δράση

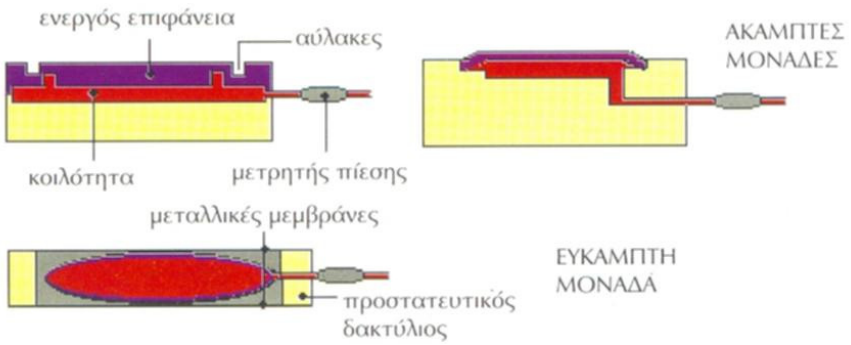
εξωτερικής τάσης. Η παραμόρφωση καταγράφεται από ένα μετρητή, η αρχή του οποίου βασίζεται στη χρήση είτε ηλεκτρικών αντιστάσεων, είτε δονούμενης χορδής. Ο μετρητής παραμόρφωσης τοποθετείται είτε στη μία πλευρική επιφάνεια του διαφράγματος (η οποία καθίσταται με αυτόν τον τρόπο ενεργός) είτε σε αμφότερες τις πλευρικές επιφάνειες (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4. Μονάδες διαφράγματος (Γεωργιαννού, 2000).

Οι μονάδες διαφράγματος χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μικρών και μεσαίων τιμών τάσης από 0-3.5 MPa με ακρίβεια ±2 kPa.

Οι υδραυλικές μονάδες αποτελούνται από δύο κυκλικές ή τετράγωνες χαλύβδινες πλάκες που ενώνονται περιμετρικά δημιουργώντας μια στεγανή κοιλότητα γεμάτη υγρό π.χ. μείγμα νερού-αλκοόλης. Η τάση του εδάφους είναι ίση με την πίεση του υγρού στο εσωτερικό της κοιλότητας. Το υγρό της κοιλότητας πρέπει να έχει παραμορφωσιμότητα ανάλογη με εκείνη του εδάφους, π.χ. λάδι για μετρήσεις στο έδαφος, υδράργυρος για μετρήσεις στο βράχο. Την πίεση του υγρού της κοιλότητας μετρά ο μετρητής. Οπως φαίνεται και στο σχήμα (3.5) η μία υδραυλική μονάδα αποτελείται από δύο επιφάνειες σημαντικού πάχους απο τις οποίες η ενεργός είναι η λεπτότερη (2.5 – 6.0mm).



Σχήμα 3.5. Υδραυλικές μονάδες (Γεωργιαννού, 2000).

Γενικά η επιλογή της κατάλληλης μονάδας πρέπει να βασίζεται στον έλεγχο των παραμέτρων όπως είναι: ο λόγος πάχους προς διάμετρο της μονάδας, ο λόγος της ακαμψίας του εδάφους προς την ακαμψία της μονάδας, οι διαστάσεις της μονάδας, οι ανομοιομορφίες κατά την τοποθέτηση της μονάδας στο έδαφος. Κάθε μονάδα πρέπει να ελέγχεται στο εργαστήριο συστηματικά. (Dunnicliff, 1993).

3.5.2 Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης εδαφικής τάσης

Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης τάσης σε επίχωμα

Η εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης της εδαφικής τάσης πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες του κατασκευαστή. Πρέπει να δοθεί έμφαση στο μέτρο ελαστικότητας του υλικού εγκατάστασης και αυτού του περιβάλλοντος χώρου. Η διάταξη των μονάδων να είναι τέτοια ώστε να γίνει σωστά η λήψη των μετρήσεων ακόμα και σε περιπτώσεις καθιζήσεων.

Οι μονάδες μέτρησης τάσης προσδιορίζουν την ολική τάση στο έδαφος.

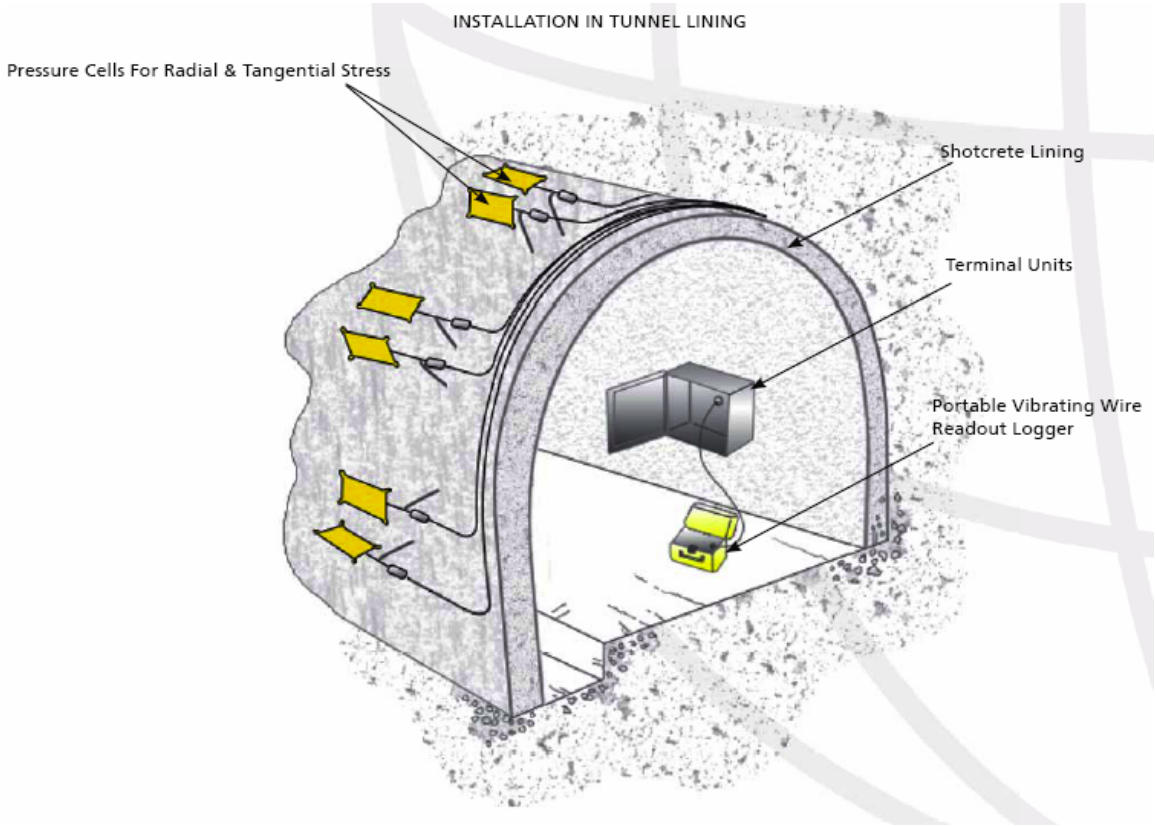
Εγκατάσταση μονάδων Μετρησης Τάσης σε Διεπιφάνειες

Βασική προυπόθεση κατά την εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης τάσης σε διεπιφάνεια εδάφους – σκυροδέματος, είναι η ενεργός επιφάνεια της μονάδας να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη μία επιφάνεια και σε απόλυτη επαφή με την άλλη πλευρά της διεπιφάνειας. Οι μονάδες μέτρησης της τάσης τοποθετούνται σε προκαθορισμένες υποδοχές, για μετρήσεις σε τοίχους αντιστήριξης, τάφρους, πασσάλους και επενδύσεις σήραγγας με προκατασκευασμένα τμήματα, Η βάση του οργάνου επικολλάται στην υποδοχή με ρητίνη.

Η σκυροδέτηση γίνεται επι τόπου, και πρέπει να επιτρέπει την στερέωση της μονάδας μέτρησης σε συγκεκριμένη θέση έχοντας πάντα σε επαφή το έδαφος και τη μονάδα.

Εγκατάσταση Μονάδων Μέτρησης Τάσης σε Σήραγγες

Η εγκατάσταση των μονάδων μέτρησης τάσης γίνεται είτε στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είτε ανάμεσα στα προκατασκευασμένα τμήματα της σήραγγας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Οι μονάδες εγκαθίστανται στις σήραγγες σε ομάδες τριών (σχήμα 3.6) για τη μέτρηση ακτινικής, περιμετρικής, και αξονικής τάσης. Για χρήση σε βράχο ή σκυρόδεμα μονάδες κυκλικής ή τετραγωνικής επιφάνειας πάχους 64mm και διαστάσεων διαμέτρου 120 εώς 170mm ή 70 *(140 εώς 200)*300mm, έχουν σαν υλικό επίστρωσης υδράργυρο και μετρητές πίεσης τύπου διαφράγματος με σώμα και διάφραγμα απο ανοξείδωτο χάλυβα. Η μέγιστη τάση λειτουργίας τους είναι 20MPa.



Σχήμα 3.6. Εγκατάσταση μονάδων Μέτησης Τάσης σε σήραγγα (Soil Instruments Ltd.).

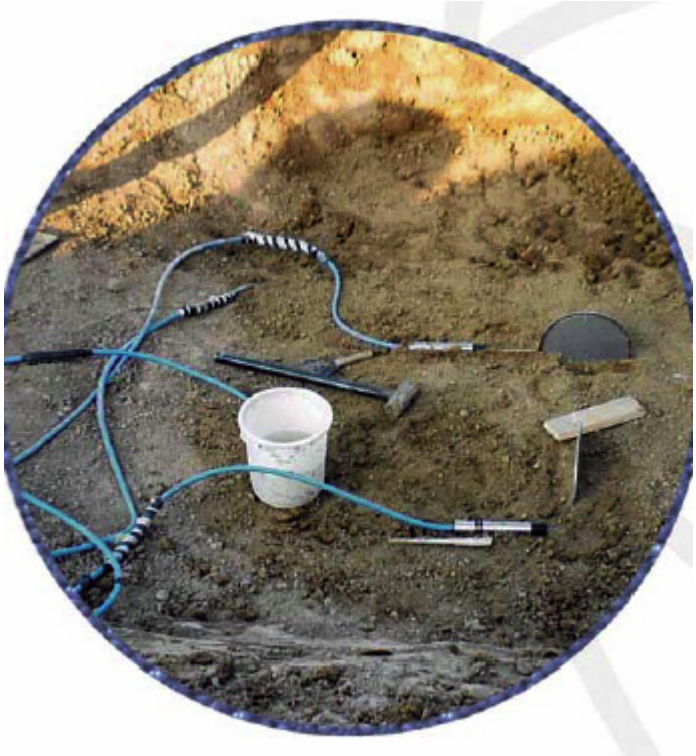
Εγκατάσταση μονάδων μέτρησης τάσης σε βράχο

Σύμφωνα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά, οι τάσεις μέσα στην βραχομάζα μπορούν να εμφανίζουν σημαντικές διαφορές από σημείο σε σημείο. Συνεπώς η μέτρηση της τάσης σημείου μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική της μάζας. Με την τοποθέτηση μίας μονάδας μέτρησης γίνεται ο έλεγχος της ευστάθειας του βράχου σε περιπτώσεις αστοχίας είτε λόγω αύξησης είτε λόγω μείωσης των τάσεων. Στη δεύτερη περίπτωση μείωσης της πλευρικής συμπίεσης επιτρέπει την ολίσθηση τεμάχων βράχου.

Για τον προσδιορισμό λοιπόν των τάσεων απαιτείται γνώση των ελαστικών ιδιοτήτων του βράχου.

3.5.3 Μονάδα Μέτρησης φορτίων

Στην κατηγορία αυτή το συχνώτερο απαντώμενο όργανο μέτρησης είναι οι μονάδες μέτρησης φορτίου (load cells), οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την καταγραφή του επιβαλλούμενου φορτίου σε ελκυστήρες, αγκύρια βράχου (σχήμα 3.7), αγκύρια εδάφους, αντηρίδες, πασσάλους και επενδύσεις σηράγγων και εξασφαλίζουν:



Σχήμα 3.7. Κυψέλες μέτρησης φορτίων (Soil Instruments Ltd.)

3.5.3.1 Δοκιμές αγκυρίων (Acceptance tests)

Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των αγκυρίων γίνεται χρήση μονάδων μέτρησης των φορτίων που λαμβάνει το αγκύριο. Η μονάδα μέτρησης τοποθετείται μαζί με το αγκύριο και μεταξύ του γρύλου και της κατασκευής (π.χ τοίχος αντιστήριξης,), όπου καταγράφει το φορτίο και την αντίστοιχη παραμόρφωση. Οι κανονισμοί ASTM προτείνουν προφόρτιση του αγκυρίου της τάξης του 10% πριν την εκτέλεση του πειράματος. Το φορτίο αυτό είναι ικανό να ενεργοποιήσει τη διατμηματική αντίσταση του αγκυρίου, να αποτρέψει την χαλάρωση του αγκυρίου και να εδράσει σωστά το γρύλο. Παράλληλα με την επιβολή των φορτίων,

καταγράφεται και το φορτίο. Επίσης, καταγράφεται η συμπεριφορά της αγκύρωσης στη φάση λειτουργίας. Η μείωση του φορτίου, μπορεί να οφείλεται σε αστοχία της αγκύρωσης ή σε αποφόρτιση του εδάφους πίσω απο το δομικό στοιχείο, π.χ τοίχο αντιστήριξης. Αύξηση του φορτίου πιθανώς οφείλεται σε αστοχία γειτονικών αγκυρώσεων ή φόρτιση του εδάφους.

Κατά τις δοκιμές αγκυρίων (acceptance tests) ασκείται με τη βοήθεια υδραυλικής πρέσσας δύναμη στην κεφαλή, η οπία δρα στην κατεύθυνση του άξονα. Αρχικά προφορτίζεται το αγκύριο σε δύναμη Fi (Fi = 0,1Fλειτ) και εν συνεχεία αυξάνεται η φόρτιση σε 0,6Fp (όπου Fp= 1,25 Fλειτ). Ακολουθεί αποφόρτιση 0,2Fp και φόρτιση σε σταθερή δύναμη Fp για 5 λεπτά. Αν η πίεση μεταβληθεί πάνω από 5% η δοκιμή θεωρείται πετυχημένη και δε λαμβάνεται καμία μέτρηση επιμήκυνσης. Αναλυτική περιγραφή του τρόπου εκτέλεσης της δοκιμής περιγράφεται στο DIN 21521. Δοκιμές αγκυρίων προτείνεται να γίνουν ανά 50 m σε όλο το μήκος της σήραγγας και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.

Τα είδη των μονάδων μέτρησης φορτίου είναι οι μετρητές φορτίου τύπου ηλεκτρικής αντίστασης, οι μετρητές φορτίου τύπου δονούμενης χορδής και οι μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας οι μετρητές τοποθετούνται μεταξύ χαλύβδινων πλακών που υποβοηθούν στην ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Οι πλάκες πρέπει να είναι επίπεδες, παράλληλες μεταξύ τους και ικανής αντοχής ώστε να μην παραμορφώνονται υπό την επίδραση φορτίου. Η σωστή τοποθέτηση και ευθυγράμμιση των μετρητών επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά τους.

Οι περισσότερες μονάδες μέτρησης τύπου ηλεκτρικής αντίστασης φορτίου στις γεωτεχνικές εφαρμογές αποτελούνται απο ένα κυλινδρικό δακτύλιο από χάλυβα ή αλουμίνιο. Οι ανωτέρω μετρητές είναι αξιόπιστοι και δεν επηρεάζονται απο θερμοκρασιακές μεταβολές αλλά είναι ακατάλληλοι για χρήση μέσα στο έδαφος λόγω προβλημάτων στεγάνωσης.

Οι μετρητές φορτίου τύπου δονούμενης χορδής είναι και οι πλέον διαδεδομένοι γιατί οι μετρήσεις δεν επηρεάζονται από συνθήκες έντονης εφύγρανσης, ούτε και από το μήκος της καλωδίωσης. Είναι απλοί στη χρήση και τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι ακριβή και αξιόπιστα. Η ακρίβεια είναι της τάξης του 1%.

Οι μετρητές φορτίου υδραυλικού τύπου είναι κυλινδρικοί δακτύλιοι που εμπεριέχουν μία κοιλότητα πλήρη με υγρό. Στη συμπαγή τους μορφή είναι κύλινδροι απο χάλυβα με επικάλυψη ρητίνης για να αντιστέκονται στην οξείδωση. Η επιβαλλόμενη εξωτερική φόρτιση μετατρέπεται σε πίεση υγρού της κοιλότητας. Η χρήση αυτής της μονάδας μέτρησης είναι απλή και τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι 1% και δεν επηρεάζονται από το μήκος των σωληνώσεων. Κατάλληλοι για τοποθέτηση κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 3.8).

Σχήμα 3.8 Εγκατάσταση μετρητού φορτίου σε αγκύριο βράχου (SISGEO Co.).

3.5.3.2 Κυψέλες φορτίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος- πλαισίων- μόνιμης επένδυσης

Στην κατηγορία των εντοιχιζόμενων μετρητών παραμόρφωσης, το πλέον διαδεδομένο όργανο είναι οι κυψέλες φορτίου. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της κατανομής, αλλά και των ολικών πιέσεων, που θα ασκούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καθώς και για τη μέτρηση των ολικών πιέσεων στην επαφή πετρώματος / χαλύβδινων πλασίων ή πετρώματος / σκυροδέματος.

Το κυρίως τμήμα μίας υδραυλικής κυψέλης αποτελείται από μία επίπεδη πλακοειδή κυψέλη πληρομένη με υγρό, η οποία μπορεί να δεχθεί πίεση 50 ή 200bar. Η πλάκα συνδέεται μέσω υδραυλικής αντλίας με έμβολο τύπου spring load, το οποίο εν συνεχεία με τη φορητή μονάδα καταγραφής. Ο καταγραφέας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των μετατοπίσεων του εμβόλου και κατά συνέπεια των ασκούμενων πιέσεων επί του σκυροδέματος. Για την εξασφάλιση της λήψης ορθών μετρήσεων η υδραυλική κυψέλη υπόκειται σε προένταση έτσι ώστε να διατηρείται συνεχής η επαφή μεταξύ της πλακοειδούς κυψέλης και του περιβάλλοντος εδάφους. Μία τυπική υδραυλική κυψέλη και τα υπό μέρους τμήματα της φαίνονται στο σχήμα (3.9).

Σχήμα 3.9. Υδραυλική κυψέλη φορτίου (Soil Instruments Ltd)

Οι καταγραφόμενες- μετρούμενες πιέσεις συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογισθείσες και ακολούθως ελέγχονται οι παραδοχές και οι παράμετροι σχεδιασμού. Προτείνεται η τοποθέτηση τουλάχιστον 2 κυψελών σε όλο το μήκος της σήραγγας και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού. Ιδιαίτερης προσοχής θα πρέπει να τύχουν οι θέσεις στις οποίες παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές του πεδίου των τάσεων λόγω διάνοιξης της σήραγγας.

Όσον αφορά τη συχνότητα λήψης των μετρήσεων, ισχύουν αυτά που αναφέρονται και για τις μετρήσεις συγκλίσεων.

3.5.4 Μονάδες Μέτρησης Παραμορφώσεων σε Κατασκευές

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετρητών παραμόρφωσης όπως επικολλώμενοι (bonded), συγκολλώμενοι (weld able), ηλεκτρικής αντίστασης, δονούμενης χορδής, ημιαγωγών, μεταλλικής επικάλυψης. Στην επιλογή του μετρητή υπεισέρχονται παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η ακρίβεια, το κόστος και το μέγεθος.

Για μέτρηση επιφανειακών παραμορφώσεων σε γεωτεχνικά έργα χρησιμοποιούνται τόσο οι επικολλώμενοι όσο και οι συγκολλόμενοι μετρητές. Συνήθως προτιμώνται οι συγκολλώμενοι γιατί η τοποθέτηση τους επι τόπου απαιτεί λιγότερο έμπειρο προσωπικό σε σχέση με τους επικολλώμενους. Οι εφαρμογές επικολλοιώμενων μετρητών παραμόρφωσης σε χάλυβα ελέγχουν τις τάσεις και τα φορτία στα δομικά στοιχεία της κάθε κατασκευής.

Οι τύποι των μονάδων μέτρησης παραμόρφωσης είναι οι παρακάτω:

Μετρητές Επιφανειακής παραμόρφωσης Τύπου Ηλεκτρικής Αντίστασης

Οι επιφανειακοί μετρητές παραμορφώσεων (surface mounted strain gauges) είναι όργανα που παρουσιάζουν μικρή τάση εξόδου, έχουν μήκος της τάξης των 0.25-150mm και μετρούν παραμόρφωση με ακρίβεια 1-100μs. Απαντώνται σε δύο τύπους επικολλώμενοι και συγκολλώμενοι. Η ακρίβεια των οργάνων στο εργαστήριο είναι ±1 μs. Τα συγκολλώμενα όργανα

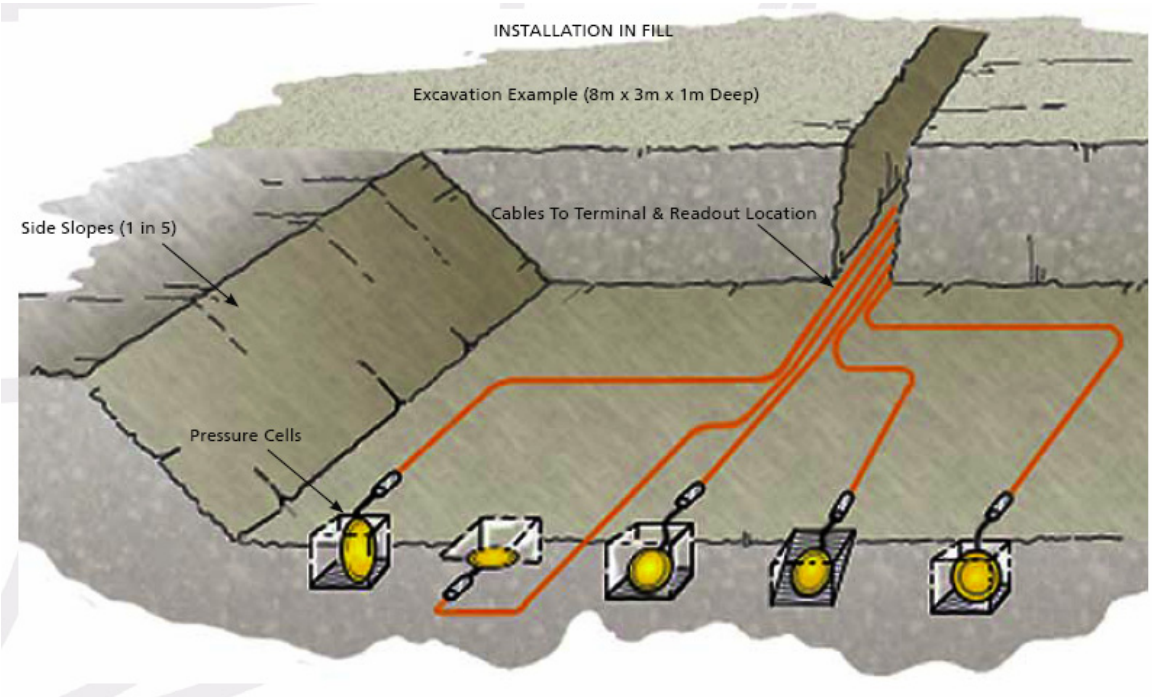
μέτρησης παραμορφώσεων συνήθως προτιμώνται των επικολλώμενων στις επι τόπου εφαρμογές διότι η εγκατάστασή των δεν απαιτεί εμπειρία. Το μήκος τους είναι περί τα 25mm και η ακρίβεια τους κυμαίνεται απο ± 5 εώς ±15μs.

Μετρητές Παραμόρφωσης Τύπου Δονούμενης Χορδής

Τα όργανα αυτά συνήθως συγκολλώνται σε μεταλλικές κατασκευές ή προσκολλώνται σε επιφάνειες από σκυρόδεμα. Το όργανο αποτελείται απο μεταλλική χορδή και ηλεκτρομαγνητικό πηνίο που περιβάλλονται από το σώμα χαλύβδινου σωλήνα.

Εντοιχιζόμενοι μετρητές παραμόρφωσης

Η βασική εφαρμογή των εντοιχιζόμενων μετρητών παραμορφώσεων (embedment strain gauges) είναι η μέτρηση παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα. Στις γεωτεχνικές εφαρμογές τα κατασκευαστικά στοιχεία είναι απλής διατομής και υποβάλλονται σε θλίψη ή και κάμψη όπως για παράδειγμα εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι (σχήμα 3.10) ή τοιχώματα φρεατίων. Οι εντοιχιζόμενοι μετρητές είναι όπως και οι επιφανειακοί, είτε τύπου ηλεκτρικής αντίστασης, είτε δονούμενης χορδής. Οι τελευταίοι είναι πλέον συνήθεις και ο μετρητής αποτελείται απο τη χορδή και το πηνίο.



Σχήμα 3.10. Μέτρηση παραμόρφωσης στο σκυρόδεμα (Soil Instruments Ltd.)

3.6 Όργανα μέτρησης παραμόρφωσης

3.6.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες οργάνων μέτρησης παραμορφώσεων, αυτές που αναφέρονται σε επιφανειακές ή υπόγειες μετρήσεις, σε οριζόντιες ή κατακόρυφες, αξονικές ή στρεπτικές παραμορφώσεις, στον τρόπο λειτουργίας των οργάνων (μηχανικό ή ηλεκτρικό, κ.λ.π.) και στην ακρίβεια των οργάνων. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα είδη των οργάνων μέτρησης παραμόρφωσης ανάλογα με το τι μετράει ή κάθε κατηγορία.

Πίνακας 3.1: Κατηγορίες γεωτεχνικών οργάνων

Γεωτεχνικό όργανο	**Τύπος οργάνου**	**Τι μετράει**
1. Γεωδαιτικές μέθοδοι	• Ταινία μέτρησης • Ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης απόστασης • Θεοδόλιχος • Σταθερά σημεία αναφοράς	Οριζόντια και κατακόρυφη μετατόπιση κατασκευών και επιφάνειας εδάφους
2. Όργανα μέτρησης Εγκάρσιας παραμόρφωσης	• Κλισιόμετρα • Δείκτες προσδιορισμού επιπέδου αστοχίας • Μηκυνσιόμετρα πρανών • Γωνιόμετρα	Παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα εγκατάστασης
3. Όργανα μέτρησης κλίσης κατασκευής	• Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων • Κλινόμετρα	Κλίση κατασκευής
4. Όργανα μέτρησης σε διάφορες κατευθύνσεις	• Μηκυνσιόμετρα ανίχνευσης (μαγνητικό, ηλεκτρικό και μηχανικό) • Μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου (απλού ή πολλαπλών σημείων)	Καθίζηση, ανύψωση, σύγκλιση, πλευρική μετακίνηση σε εδαφικές αποθέσεις και σε βράχο.

Τα συχνότερα απαντώμενα όργανα μέτρησης παραμόρφωσης είναι τα μηκυνσιόμετρα. Τα μηκυνσιόμετρα μετρούν επιφανειακές και υπόγειες παραμορφώσεις σε όλες τις κατευθύνσεις.

Διακρίνονται σε επιφανειακά, σε μηκυνσιόμετρα με ανιχνευτή και σε μηκυνσιόμετρα σταθερής βάσης.

Μια άλλη κατηγορία αποτελούν τα όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης. Αυτά καταγράφουν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα όπου τοποθετούνται. Το συχνότερο χρησιμοποιούμενο όργανο στην κατηγορία αυτή αποτελεί το κλισιόμετρο. Τα κλισιόμετρα με ανιχνευτή και τα μονίμως εγκατεστημένα κλισιόμετρα μετρούν την μεταβολή στην κλίση και κατά συνέπεια παραμορφώσεις.

Τα κλινόμετρα και οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μεταβολής της κλίσης μιας κατασκευής.

Τέλος, στην κατηγορία αυτή ανήκουν και τα όργανα μέτρησης επιφανειακών παραμορφόσεων με χρήση γεωδαιτικών μεθόδων. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν ο θεοδόλιχος, η ταινία μέτρησης, τα σταθερά σημεία αναφοράς, κ.λ.π.

3.6.2 Γεωδαιτικές μέθοδοι

Οι γεωδαιτικές μετρήσεις αφορούν τον προσδιορισμό οριζόντιας και κατακόρυφης μετατόπισης κατασκευών και της επιφάνειας του εδάφους. Η χρήση των γεωτεχνικών οργάνων απαιτείται κυρίως για τις υπόγειες μετρήσεις. Κατά την εφαρμογή των γεωδαιτικών μεθόδων, διαφορετικοί βαθμοί ακρίβειας δύναται να χρησιμοποιούνται. Δεύτερος βαθμός ακρίβειας (+/-6 έως +/-8mm* $\sqrt{km}$) επιτυγχάνεται μειώνοντας τις αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων και με σαφή προσδιορισμό σημείων μέτρησης και σταθερών σημείων. Ο κύκλος των μετρήσεων πρέπει να αρχίζει και να περατώνεται σε σταθερό σημείο και το λάθος να κατανέμεται σε όλα τα σημεία. Ακρίβεια πρώτου βαθμού (+/-3 έως +/-5mm* $\sqrt{km}$) απαιτεί μηχανήματα υψηλής πιστότητας, πιστή εφαρμογή των προδιαγραφών και ελάχιστη μεταβολή των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Για παράδειγμα, η χρήση του θεοδόλιχου γίνεται κυρίως τις βραδινές ώρες ή μέρες με συννεφιά όταν η επιρροή των δυσμενών ατμοσφαιρικών συνθηκών και θερμοκρασιακών μεταβολών είναι περιορισμένη.

Τα όργανα γεωδαιτικών μετρήσεων είναι τα εξής: Η ταινία μέτρησης, η οποία για αποστάσεις μεγαλύτερες των 60μ. αντικαθίσταται από ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης αποστάσεων. Το όργανο αυτό χρησιμοποιεί την ταχύτητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τη μέτρηση της απόστασης του οργάνου και πρίσματος αντανάκλασης, το οποίο τοποθετείται στο σημείο μέτρησης.

Ο θεοδόλιχος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση γωνιών σε σχέση με θέση αναφοράς. Ο προσδιορισμός της στάθμης γίνεται με χρήσης laser. Η χρήση συστήματος δορυφόρων είναι

επίσης, δυνατή. Οι δορυφόροι στέλνουν σήματα σε ένα δίκτυο σταθμών για επεξεργασία και προσδιορισμό των σχετικών μετακινήσεων. Για τη μέτρηση της απόλυτης μετακίνησης απαιτείται ο καθορισμός σταθερών σημείων αναφοράς.

Σταθερά σημεία αναφοράς (Benchmarks) για μέτρηση κατακόρυφης μετακίνησης. Αποτελούνται από σωλήνα ή ράβδο, περιβαλλόμενο από προστατευτικό κάλυμμα, αγκυρωμένο στο βάθος. Η αγκύρωση μπορεί να είναι είτε μηχανική, είτε με χρήση ενέματος. Τα ανώτερα 3μ της ράβδου πρέπει να είναι από ειδικό χαλύβδινο κράμα ανεπηρέαστο από θερμοκρασιακές μεταβολές για περιορισμό αλλαγών στη θέση μέτρησης λόγω θερμοκρασίας. Εάν το σημείο αναφοράς δεν είναι αρκετά βαθύ, η θέση του μπορεί να αλλοιωθεί λόγω παγετού, εποχιακών μεταβολών, υγρασίας, παρουσίας δένδρων ή αρνητικής επίδρασης γειτονικών κατασκευαστικών εργασιών.

3.6.2.1 Χωροσταθμήσεις εντός της σήραγγας – Μετρήσεις συγκλίσεων

Μία εξίσου σημαντική μέτρηση παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια κατασκευής μίας σήραγγας είναι οι συγκλίσεις. Μεταξύ των διαφόρων μεθόδων γεωμηχανικής παρακολούθησης, οι μετρήσεις μετακινήσεων – συγκλίσεων, έχουν εμπειρικά αποδειχτεί οι πιο χρήσιμες για τρεις κυρίως λόγους:

- Αποτελούν μια άμεσα και σχετικώς εύκολα μετρούμενη ποσότητα.
- Παρέχουν πληροφορίες για τη συνολική μετακίνηση του εδάφους εντός της μετρούμενης περιοχής. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ικανό αριθμό σημείων, καλύπτοντας έτσι μεγάλο τμήμα του περιβάλλοντος εδάφους.
- Ελέγχουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων αντιστήριξης. Αναφορικά με το είδος των οργάνων παρακολούθησης, τοίζεται ότι όργανα που λειτουργούν βασισμένα εξ'ολοκλήρου σε μηχανικά μέρη είναι γενικώς ανθεκτικότερα από αντίστοιχα ηλεκτρονικής φύσεως. Στοιχεία, όπως σκόνη, υγρασία, εκσκαφές, επιδρούν αρνητικά στη λειτουργία των ηλεκτρονικών μερών, μειώνοντας την ακρίβεια και την αξιοπιστία των ηλεκτρονικών οργάνων.

Οι μετρήσεις των συγκλίσεων θα γίνονται με γεωδαιτικές μεθόδους κατά τις τρεις διευθύνσεις x, y, z. Για το σκοπό αυτό τοποθετούνται στο εσωρράχιο της σήραγγας, ακίδες επί των οποίων είναι δυνατόν να εφαρμοστούν ανακλαστήρες (σχήμα 3.11). Στη συνέχεια με χρήση θεοδόλιχου μετρούνται οι απόλυτες συντεταγμένες των σημείων και υπολογίζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις και οι συγκλίσεις. Σημειώνεται ότι οι απόλυτες συντεταγμένες καταγράφονται αυτόματα δια μέσου καταγραφικού στον γεωδαιτικό σταθμό και έπειτα μεταφέρονται στον Η/Υ δια μέσου προγράμματος επικοινωνίας του γεωδαιτικού σταθμού.

Σχήμα 3.11. Ακίδες με ανακλαστήρες.

Με χρήση της μεθόδου αυτής μπορεί να επιτευχθεί ακρίβεια +/- 2 mm, η οποία είναι αρκετή για τη διερεύνηση της αντίδρασης του εδάφους και της επάρκειας των μέτρων αντιστήριξης.

Η χωροστάθμηση σημείων μέσα στη σήραγγα για την παρακολούθηση των μετακινήσεων, θα γίνει με εξάρτηση από σταθερά εξωτερικά σημεία που θα βρίσκονται σε τόση απόσταση από το έργο, ώστε να είναι βέβαιο ότι η θέση τους δεν επηρεάζεται από αυτό.

Η τοποθέτηση των ακίδων θα γίνεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη των 6m από το μέτωπο και με τέτοιο τρόπο ώστε να μην κινδυνεύουν από τις εργασίες που γίνονται μέσα στη σήραγγα. Αν η εκσκαφή γίνει σε δύο φάσεις τοποθετούνται τρία σημεία μέτρησης στην άνω ημιδιατομή (κλείδα, αριστερή παρειά, δεξιά παρειά) και δύο στην κάτω ημιδιατομή (αριστερή παρειά, δεξιά παρειά). Αν η εκσκαφή γίνει σε μια φάση τοποθετούνται και τα 5 σημεία μέτρησης ταυτόχρονα.

Οι μετρήσεις των μετακινήσεων (συγκλίσεις- χωροσταθμήσεις) θα λαμβάνονται τακτικά σε διατομές ανά 50m και αναλόγως των γεωλογικών σχηματισμών. Σε δυσμενείς συνθήκες θα γίνεται πύκνωση των σταθμών παρακολούθησης συγκλίσεων. Για παράδειγμα θα πρέπει να τοποθετείται σταθμός σε κάθε ομπρέλα προπορείας (ανά 12μ περίπου). Οι μετρήσεις θα λαμβάνονται καθημερινά για μία εβδομάδα και κατόπιν ανά 3-7 ημέρες για διάρκεια ενός μήνα. Στη συνέχεια οι μετρήσεις θα πραγματοποιούνται ανά 25-30 ημέρες μέχρι να σταθεροποιηθούν ασυμπτωτικά σε τέτοιο βαθμό, ωστέ να μην παρουσιάζουν μεταβολές μεγαλύτερες από 1mm από την προηγούμενη μέτρηση και στο τέλος θα γίνεται περιοδικός έλεγχος. Οι μετρήσεις θα

συνεχίζονται σε κάθε περίπτωση έως ότου το μέτωπο εκσκαφής απομακρυνθεί πέντε διαμέτρους σήραγγας τουλάχιστον.

Η πυκνότητα λήψης μετρήσεων θα αυξάνεται εάν η μετακίνηση μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων είναι μεγαλύτερη των 5mm ή τουλάχιστον υπάρχουν ενδείξεις αποσταθεροποίησης της βραχομάζας της περιοχής. Μετά την λήψη των μετρήσεων παράγονται διαγράμματα χρόνου-οριζόντιων μετακινήσεων, χρόνου- κατακόρυφων μετακινήσεων και απόστασης μετώπου σε σχέση με τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις. Τα διαγράμματα θα περιλαμβάνουν τις χρονικές στιγμές εφαρμογής των μέτρων αντιστήριξης καθώς και την ολοκλήρωση των μέτρων υποστήριξης. Επίσης θα υπολογίζεται ο ρυθμός ανάπτυξης του φαινομένου σύγκλισης (mm/12h) ανά σημείο μέτρησης. Οι μετακινήσεις που μετρήθηκαν, συγκρίνονται με τις θεωρητικά υπολογισθείσες τιμές για να ελεχθούν οι παραδοχές σχεδιασμού.

3.6.3 Όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης

Πρόκειται για όργανα που τοποθετούνται σε μία γεώτρηση ή σε ένα σωλήνα και μετρούν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του βάθους και της έκτασης μιας ζώνης αστοχίας σε πρανή ή επιχώματα και της οριζόντιας παραμόρφωσης σε φράγματα ή παρειές εκσκαφών. Τα πλέον συνήθη όργανα είναι τα κλισιόμετρα. Άλλα όργανα μέτρησης εγκάρσιας παραμόρφωσης είναι τα ακόλουθα:

- Δείκτες προσδιορισμού επιπέδου αστοχίας. Στην απλούστερη μορφή τους είναι ξύλινοι δείκτες οι οποίοι εμπηγνύονται στο έδαφος σε βάθος μεγαλύτερο του βάθους του αναμενόμενου επιπέδου αστοχίας. Οι δείκτες θραύονται όταν λαμβάνει χώρα μετακίνηση κατά μήκος του επιπέδου. Το μειωμένο μήκος τους αντιστοιχεί στο βάθος του επιπέδου αστοχίας.
- Ένα άλλο σύστημα αποτελείται από πλαστικό σωλήνα διαμέτρου 50mm, ο οποίος παραμορφώνεται λόγω μετακίνησης του εδάφους στο επίπεδο αστοχίας. Ένα σύστημα ραβδών μήκους 150 έως 1020mm χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καμπυλότητας στην περιοχή παραμόρφωσης. Το εύρος της μετρούμενης καμπυλότητας αντιστοιχεί σε ακτίνες 150mm έως 6m. Η καμπυλότητα του σωλήνα στην περιοχή του επιπέδου αστοχίας δίνεται από την έκφραση:

$$R = \frac{L_2}{8 \cdot (D_1 - D_2)}$$

όπου R=ακτίνα καμπυλότητας σωλήνα, D_1 = εσωτερική διάμετρος σωλήνα, D_2 = εξωτερική διάμετρος ράβδου, L = μήκος ράβδου

- Μηκυνσιόμετρο Πρανών. Πρόκειται για μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων και χρησιμοποιείται για προσδιορισμό μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Συγκρινόμενα με τα κλισιόμετρα πρόκειται για απλή και γρήγορη διαδικασία μέτρησης μεγάλων διατμητικών

παραμορφώσεων. Το όργανο δεν καταγράφει απόλυτη μέτρηση μετακίνησης παρά μόνο όταν τα δύο τμήματα της γεώτρησης αποχωρίζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα, λόγω πλευρικής μετακίνησης των τεταμένων ράβδων μέσα στη γεώτρηση.

- Επί τόπου κλισιόμετρα. Είναι κλισιόμετρα μονίμως εγκατεστημένα σε σειρά σε κατακόρυφη γεώτρηση. Χρησιμοποιούνται για την καταγραφή μετακινήσεων στις παρειές των εκσκαφών ή σε πρανή ιδίως όταν απαιτούνται γρήγορες αυτοματοποιημένες καταγραφές. Η ακρίβειά τους είναι της τάξης των 0.5 έως 1mm στα 3m.
- Όργανα μέτρησης γωνίας (Γωνιόμετρα). Είναι ένα σύστημα ανάλογο με τα εν σειρά κλισιόμετρα όπου η μέτρηση της στροφής γίνεται με όργανα μέτρησης γωνίας αντί για όργανα μέτρησης της κλίσης. Συγκρινόμενα με τα κλισιόμετρα, τα γωνιόμετρα εγκαθίστανται σε γεωτρήσεις οποιασδήποτε κλίσης καθώς τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούν δεν βασίζονται στη βαρύτητα. Λόγω ατέλειας στο σχεδιασμό τα όργανα αυτά δεν δύναται να συνυπολογίσουν τη στροφή του όλου συστήματος, εάν υπάρχει. Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα λάθη στα γωνιόμετρα αυξάνονται εκθετικά ενώ στα κλισιόμετρα η αύξηση των λαθών ακολουθεί αριθμητική πρόοδο. Στην κατηγορία αυτή το όργανο που χρησιμοποιείται εκτενέστερα είναι το κλισιόμετρο. Μέσα από τη χρήση του οργάνου αποκτήθηκε η εμπειρία και η ανάλογη γνώση για το πως ακριβώς λειτουργεί και το κατά πόσο μπορούν τα αποτελέσματά του να χρησιμοποιηθούν με αξιοπιστία.

3.6.3.1 Κλισιόμετρα

Τα κλισιόμετρα, ανήκουν στην κατηγορία των οργάνων μέτρησης της εγκάρσιας παραμόρφωσης. Ο όρος κλισιόμετρο είναι η ελληνική απόδοση της λέξης inclinometer. Στη βιβλιογραφία το όργανο αυτό μπορεί να το βρείτε και με τον όρο αποκλισιόμετρο ή αλλιώς και ως κλισίμετρο (Τριανταφυλλίδης 1976). Πιο συγκεκριμένα καταγράφουν παραμόρφωση κάθετη στον άξονα της γεώτρησης ή του σωλήνα όπου τοποθετούνται. Παρακάτω θα γίνει εκτενής αναφορά αυτού, μέσα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα χρήσης του, με στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν από την γεωτεχνική ομάδα της Εγνατίας Οδού.

Το κλισιόμετρο αποτελεί το συχνότερα χρησιμοποιούμενο όργανο στην κατηγορία του, κυρίως σε περιοχές με κατολισθητικά φαινόμενα. Αυτό αποτελείται από:

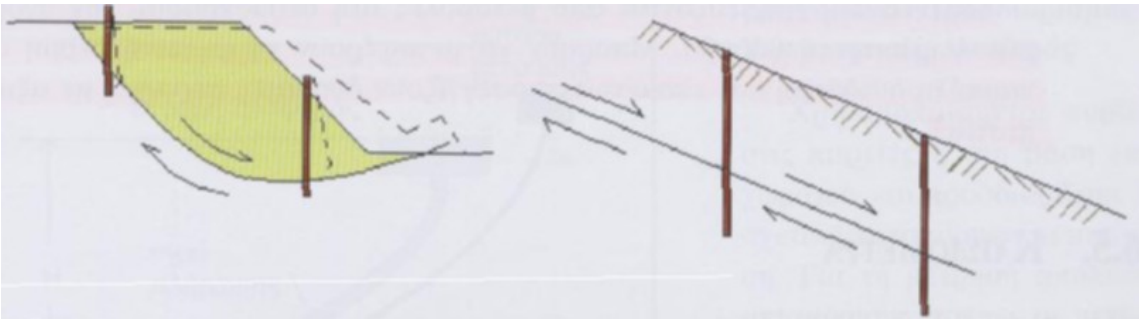
- Σύστημα σωλήνωσης από πλαστικό, αλουμίνιο, ινώδες γυαλί ή χάλυβα. Για τη μέτρηση οριζόντιας μετακίνησης η σωλήνωση τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση. Κατά μήκος της σωλήνωσης υπάρχουν ειδικά αυλάκια, στα οποία κινείται ο αισθητήρας.
- Από κινητό ανιχνευτή με αισθητήρα βαρύτητας ή άλλου τύπου αισθητήρα.
- Από Ηλεκτρικό κύκλωμα για ενεργοποίηση του οργάνου και μέτρηση της τάσης εξόδου.

- Από Καλώδιο με κωδικό αριθμό το οποίο συνδέει το ηλεκτρικό κύκλωμα με τον ανιχνευτή.
- Από τη Μονάδα μέτρησης (σχήμα 3.12) η οποία αποτελείται από μια απλή οθόνη ή σύστημα καταγραφής με μνήμη και επεξεργασία των μετρήσεων για συνεχή παρακολούθηση των μετακινήσεων.

Σχήμα 3.12. Κλισιόμετρο, (Ε.Ο.Α.Ε., 2000)

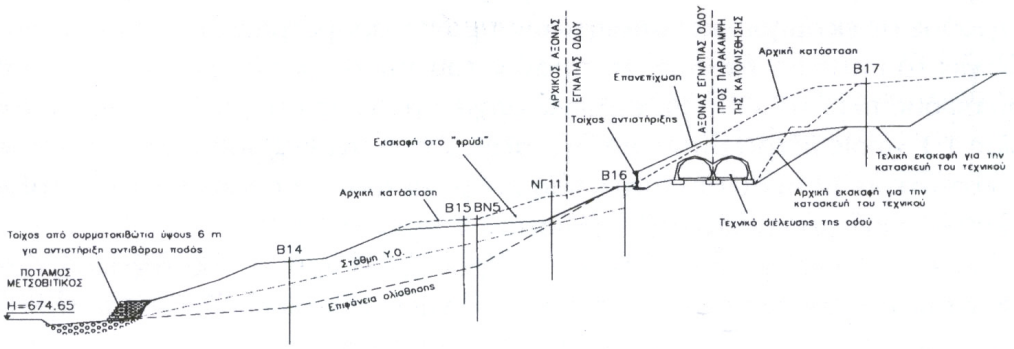
Οι κύριες εφαρμογές της ανάλυσης των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις του κλισιομετρικού οργάνου αναφέρονται παρακάτω:

Επί τόπου έρευνα: Εύρεση μετακίνησης, καθορισμός διατμητικών ζωνών, εξακρίβωση επιπέδου διάτμησης και έλεγχος ρυθμού μετακινήσεων πρανών (σχήμα 3.13). Για παράδειγμα στη θέση κατασκευής φράγματος, ελέγχεται η ύπαρξη πιθανών διατμητικών ζωνών, οι οποίες με την αύξηση της πίεσης των πόρων μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία. Είναι σημαντικό η τοποθέτηση των κλισιομετρικών οργάνων να είναι τέτοια, ώστε να εντοπιστεί το επίπεδο διάτμησης. Για παράδειγμα μπορεί ο σωλήνας να είναι μέσα στη διατμητική ζώνη χωρίς να την τέμνει και άρα να μην την εντοπίζει αφού τα αποτελέσματα θα δείχνουν ότι δεν υπάρχει κίνηση.



Σχήμα 3.13. Τοποθέτηση κλισιομέτρου σε πρανή και σε περιοχή κατολίσθησης (Γεωργιάννου, 2000).

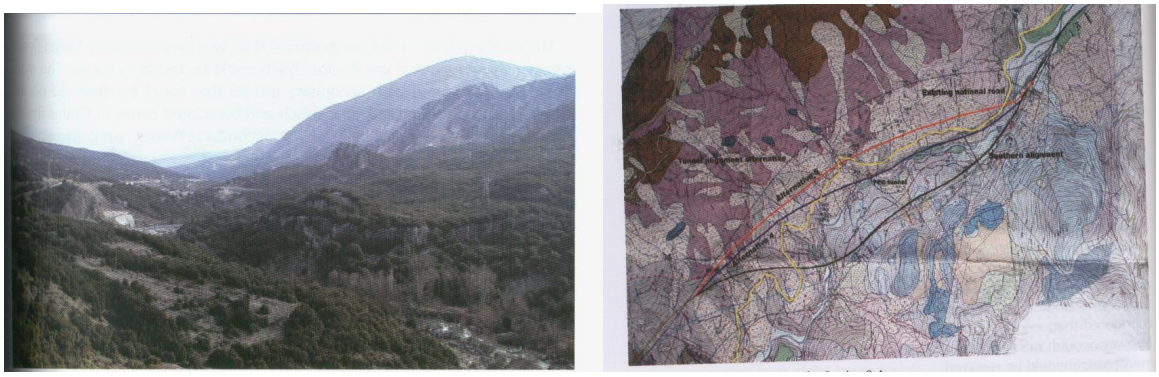
<u>Έλεγχος παραδοχών σχεδιασμού</u>: Επιτρέπει την καταγραφή πραγματικών μετακινήσεων και τη σύγκρισή τους με τις τιμές που υπολογίσθηκαν στη φάση σχεδιασμού. Πολλές φορές το ομαλό ανάγλυφο πάνω στις κλιτείς, το οποίο αποτελεί κάθισμα παλαιότερης μετακίνησης, παγιδεύει τον χαράκτη-οδοποιό. Επανεργοποίηση μιας τέτοιας κλιτύος γίνεται τόσο από ανθρώπινη παρέμβαση, όσο και από μία βροχόπτωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή Δ3 του τμήματος 3.1, της Εγνατίας οδού, στην περιοχή Μ.Περιστέρι-Ανθοχώρι, όπου έγινε επανασχεδιασμός τεχνικού δια εκσκαφής και επανεπίχωσης και μετατόπιση της οδού ανάντι των υλικών κατολίσθησης, όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.14). Επίσης εντοπίστηκε η επιφάνεια ολίσθησης από τις ενδείξεις των κλισιομέτρων και ελήφθησαν τα ελάχιστα απαιτούμενα μέτρα για τη βελτίωση της ευστάθειας της κατολίσθησης.



Σχήμα 3.14. Τοποθέτηση κλισιομέτρου στη φάση σχεδιασμού (Καβουνίδης και συν., 2003)

<u>Έλεγχος ασφαλείας</u>: Μόνιμα τοποθετημένα κλισιόμετρα χρησιμοποιούνται για την προειδοποίηση αστοχιών, π.χ. τοποθέτηση του οργάνου σε αυτοκινητόδρομους, σιδηροδρομικά

δίκτυα και αγωγούς κοντά σε περιοχές κατολισθήσεων ή σε κατασκευές των οποίων ο τελικός σχεδιασμός εξαρτάται από την παρακολούθηση των οργανομετρήσεων. Για παράδειγμα στο τμήμα 2.4 της Εγνατίας Οδού, στην περιοχή Μεγ. Περιστέρι, μεταξύ Μετσόβου και Ιωαννίνων, (σχήμα 3.15), τοποθετήθηκαν πάνω από 40 κλισιόμετρα στην περιοχή, οι μετρήσεις των οποίων έδειξαν μία μόνιμη κίνηση της τάξης των 1-2cm ανά χρόνο. Επομένως, θα υπήρχαν προβλήματα τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, όσο και μετά την κατασκευή της οδού.



Σχήμα 3.15. Περιοχή 2.4, Μ.Περιστέρι-Ανθοχώρι. Τοποθέτηση κλισιομέτρου για τον καθορισμό διατμητικών ζωνών και μετακινήσεων. Επιλέχθηκαν εναλλακτικές χαράξεις λαμβάνοντας υπόψην τα αποτελέσματα των κλισιομέτρων (Καβουνίδης και συν., 2003).

3.6.3.2 Εγκατάσταση κλισιομετρικού σωλήνα- Ενεμάτωση

Πριν την εγκατάσταση συντάσσεται μια κατάσταση συστατικών μερών και ένα φύλλο μητρώου εγκατάστασης, στο οποίο θα καταγραφούν όλες οι λεπτομέρειες εγκατάστασης.

Ανάλογα με το σκοπό της χρήσης των αποτεσμάτων των κλισιομετρικών οργάνων, καθώς και το βάθος εγκατάστασης του κλισιομετρικού σωλήνα, αλλά και το γεωπεριβάλλον, επιλέγεται η διάμετρος τόσο της γεώτρησης όσο και του σωλήνα εγκατάστασης. Η ελάχιστη διάμετρος γεώτρησης στην οποία πρόκειται να τοποθετηθεί ο κλισιομετρικός σωλήνας είναι 101 χιλιοστά. Ο σωλήνας κλισιόμετρου θα έχει εσωτερική διάμετρο τουλάχιστον 60 χιλιοστών.

Πίνακας 3.2: Η καταλληλότερη εφαρμογή της διαμέτρου του κλισιομετρικού σωλήνα

Μοντέλο	**Εφαρμογές**
60χιλ.	Κατάλληλο για μακροχρόνιες καταγραφές σε μαλακά εδάφη
70χιλ.	Διεθνώς τυποποιημένη διάσταση
85χιλ.	Για πετρώματα και τοιχώματα σκυροδέματος όπου αναμένεται μικρή μετατόπιση εδάφους

Η διακύμανση των μετρήσεων, λόγω περιστροφής, μειώνεται με την αύξηση της διαμέτρου του σωλήνα κλισιομέτρου, και έτσι το αζιμούθιο σφάλμα περιορίζεται, για δεδομένο πάχος τοιχωμάτων σωλήνωσης και διάσταση των εγκοπών κύλισης της τορπίλης (αισθητήρας). Επίσης, για τη σωστή κύλιση των τροχών της τορπίλης στις εγκοπές της σωλήνωσης είναι σημαντική ακόμα και ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστικαν οι εγκοπές, δηλαδή με μηχανικό τρόπο ή με καλούπι. Στον πίνακα (3.2) αναφέρονται ενδεικτικά η καταλληλότερη εφαρμογή των σωλήνων ανάλογα με τη διάμετρό τους. Σε περιπτώσεις αυξημένων μετατοπίσεων σε μικρά χρονικά διαστήματα όπως σε μαλακά, λασπώδη ή αργιλικά εδάφη, μπορούν να παρουσιαστούν προβλήματα όπως θραύση των συνδέσμων, εκτροχιασμός ή αγκύρωση των τροχών της τορπίλης κ.λ.π. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένας τηλεσκοπικός σύνδεσμος (π.χ. ΕΛΕΒΟΡ) προσφέρει ενίσχυση της σύζευξης και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο αστοχίας του συνδέσμου. Ο σύνδεσμος αυτού του τύπου έχει μήκος 400 χιλ., ενώ οι σύνδεσμοι που διαθέτουν οι περισσότεροι κατασκευαστές είναι των 150-200 χιλ.

Οπως αναφέρθηκε η τοποθέτηση του κλισιομετρικού σωλήνα (σχήμα 3.16) είναι σημαντική και πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή για να αποφευχθεί το παραμικρό λάθος καθώς και να μην ασκηθεί βία. Πριν να αρχίσει η τοποθέτηση ελέγχεται εάν το περίβλημα του γεωτρύπανου μπορεί να ανυψωθεί χωρίς να χρησιμοποιηθεί περιστροφή.

Σχήμα 3.16. Σύνδεση επάλληλων τμημάτων και Τοποθέτηση σωλήνων ενεμάτωσης

Οι σωλήνες ενεμάτωσης θα πρέπει να στερεώνονται στο εξωτερικό μέρος του σωλήνα του αποκλισιόμετρου, με τον τρόπο με τον οποίο φαίνεται στο σχήμα (3.16).

Ο σωλήνας του κλισιόμετρου θα πρέπει να χαμηλώνεται μέχρι να φθάσει στον πυθμένα της οπής και μετά να ανυψώνεται κατά 30 εκ., έτσι ώστε να μπορεί να γίνει σωστά η ρίψη του ενέματος και να πακτωθεί σωστά ο πάτος του σωλήνα. Σε αυτό το στάδιο, θα πρέπει να ελεγχθεί η διεύθυνση των αυλάκων και αν ο σωλήνας περιστρέφεται ελεύθερα. Η προσαρμογή γίνεται έτσι ώστε η μία αύλακα να είναι στραμμένη προς την κατεύθυνση της πιθανής κίνησης (δηλαδή, συνήθως κατάντι).

Μια ψευδοβολίδα θα χαμηλώνεται για να ελέγξει την συνέχεια των αυλάκων και ότι αυτή φθάνει στην κορυφή με όλους τους τροχούς στις σωστές αύλακες.

Το ένεμα θα σχεδιάζεται έτσι ώστε να έχει παρόμοια συνεκτικότητα με αυτή του εδάφους και να χρησιμοποιηθεί επιταχυντής για να μειωθεί ο χρόνος πήξης. Θα πρέπει να παρασκευάζονται δοκιμαστικά μίγματα πριν την ενεμάτωση ώστε να ελέγχεται η συνεκτικότητα του ενέματος. Ο μπετονίτης θα πρέπει να αναμιχθεί με νερό έξι ώρες πριν την προσθήκη του τσιμέντου. Τα μίγματα που αναφέρονται πιο κάτω είναι ενδεικτικά:

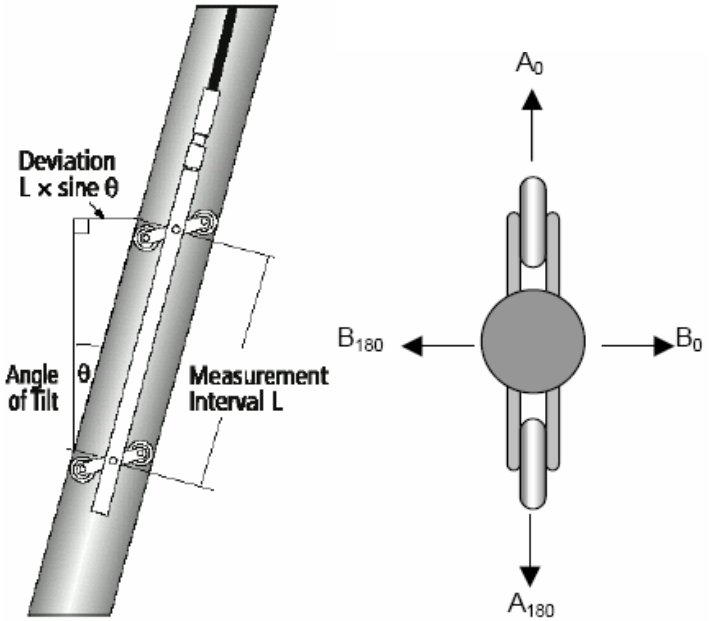
- Ισχυρό Πέτρωμα: αναλογία 0.87 : 0.13 : 1, τσιμέντο : μπετονίτης: νερό, ή 750kg τσιμέντου προς 100kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.
- Ασθενές πέτρωμα: αναλογία 0.23 : 0.17 : 1, τσιμέντο: μπετονίτης: νερό, ή 200kg τσιμέντου προς 150kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.
- Χαλαρός σχηματισμός: αναλογία 0.06 : 0.15 : 1, τσιμέντο : μπετονίτης : νερό, ή 50kg τσιμέντου προς 150kg μπετονίτη ανά κυβικό μέτρο.

Η ενεμάτωση θα πρέπει να γίνει διαμέσου του χαμηλότερου σωλήνα (δηλαδή η πλήρωση πραγματοποοιείται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια). Εάν χάνεται μέρος του ενέματος στο έδαφος, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πρόσθετες ουσίες όπως λεπτή άμμος και πριονίδι. Όταν το ένεμα πήξει, θα εγκατασταθεί το κομμάτι από σκυρόδεμα και το μεταλλικό κάλυμμα. Μέσα στο κομμάτι από σκυρόδεμα θα τοποθετηθεί υποδοχή για μάρτυρα χωροθέτησης, για να συγκρίνονται τα αποτελέσματα και να αποφεύχονται λάθη, όταν υπάρχει μετακίνηση.

3.6.3.3 Μετρήσεις Βάσης

Πριν την λήψη μετρήσεων βάσης, θα πρέπει να αποφασισθεί η κατεύθυνση Α, η οποία θα πρέπει να συμπίπτει με την πιθανή αναμενόμενη διεύθυνση μετακίνησης. Για την ασφαλέστερη διεξαγωγή των μετρήσεων και την εξάλειψη του λάθους ‘κατακορυφότητας’ (sensor offset error ή bias shift error) του οργάνου οι μετρήσεις λαμβάνονται δύο φορές με 180 μοίρες διαφορά, πρώτα προς τη διεύθυνση Α0 και προς τη διεύθυνση Α180 (σχήμα 3.17). Το

όργανο αυτόματα λαμβάνει τις τιμές των αποκλίσεων στις δύο κάθετες διευθύνσεις από δύο φορές με αντίθετο πρόσημο.



Σχήμα 3.17. Διεύθυνση λήψης μετρήσεων. Απόκλιση της τορπίλης από την κατακόρυφο (Ομάδα ΕΟΑΕ)

Οι τελικές τιμές σε κάθε διεύθυνση βρίσκονται από το μέσο όρο των αλγεβρικών διαφορών (Α0 και Α180). Οι τιμές που λαμβάνονται από το όργανο αναφέρονται στη γωνία που σχηματίζει η βολίδα από την κατακόρυφο (θ) πολλαπλασιασμένα με έναν συντελεστή, ο οποίος ποικίλει από κλισιόμετρο σε κλισιόμετρο. Στη συνέχεια αυτός ο αριθμός μετατρέπεται σε χιλιοστά απόκλισης και έτσι παράγεται το διάγραμμα της συνολικής απόκλισης του κλισιομετρικού σωλήνα. Οι μετρήσεις βάσης θα πρέπει να ληφθούν μια εβδομάδα μετά την εγκατάσταση. Θα λαμβάνονται δύο σειρές μετρήσεων στις αύλακες Α. Θα συγκρίνονται και αν δεν πληρούνται τα εξής κριτήρια, θα ληφθεί μια τρίτη σειρά μετρήσεων:

Η διαφορά μεταξύ των μέσων ποσών ελέγχου πρέπει να είναι μικρότερη από ±10 στον άξονα Α και από ±20 στον άξονα Β.

Η διαφορά μεταξύ της πρότυπης απόκλισης των ποσών ελέγχου πρέπει να είναι μικρότερη από 3 μονάδες στον κάθε άξονα.

Η φαινόμενη αθροιστική μετατόπιση να είναι μικρότερη από 2 χιλιοστά σε κάθε επίπεδο του διαγράμματος για εγκαταστάσεις βάθους μέχρι 60 μέτρων και λιγότερο από 4 χιλιοστά σε όλες τις στάθμες για εγκαταστάσεις με βάθος μεγαλύτερο από 60m.

Αν δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθούν τα κριτήρια μετά από τρεις μετρήσεις, θα πρέπει να εντοπιστούν οι στάθμες, στις οποίες δεν είναι αξιόπιστα τα δεδομένα. Αν ανακαλυφθεί ότι τα

σφάλματα είναι εγγενή στις αύλακες Α, οι μετρήσεις θα πρέπει να εκτελεστούν στις αύλακες Β. Η βασική σειρά για την σύγκριση με μελλοντικές μετρήσεις θα επιλεγεί ως η πιο αντιπροσωπευτική σειρά.

3.6.3.4 Συνήθεις μετρήσεις ρουτίνας

Οι συνήθεις μετρήσεις ρουτίνας θα λαμβάνονται κατά τη φορά ανύψωσης ανά 0,5 μ στις διευθύνσεις Α0 και Α180. Ο λόγος που γίνονται οι μετρήσεις από τον πυθμένα προς τα πάνω είναι γιατί κατά την εισαγωγή της τορπίλης αναγνωρίζεται έαν έχει στρεβλωθεί ή παραμορφωθεί ο σωλήνας και άρα προσέχεις ή ακόμα και δεν λαμβάνεις τη μέτρηση για να μην καταστρέψεις την τορπίλη και γιατί μπορεί να δημιουργήσεις ένα νέο αρχείο όταν γίνει η λήψη των μετρήσεων από διαφορετικό βάθος.

Θα πραγματοποιούνται 2 σύνολα μετρήσεων στην Α διεύθυνση. Οι δύο, αυτές μετρήσεις θα συγκρίνονται μεταξύ τους και θα πρέπει να τηρούν τα προαναφερθέντα κριτήρια, σε αντίθετη περίπτωση θα πραγματοποιηθεί και ένα τρίτο σετ μετρήσεων. Εάν τα λάθη εντοπίζονται μόνο στην Α διεύθυνση, τότε πρέπει να πραγματοποιηθούν μετρήσεις και στη Β διεύθυνση.

3.6.3.5 Σφάλματα μετρήσεων

Όσον αφορά την αξιολόγηση των μετρήσεων, αυτή πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή αλλά και εμπειρία. Πολλές φορές έχουν παρατηρηθεί διαγράμματα με φαινόμενες κινήσεις που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα ή επιδρούν στο μέγεθος και την μορφή πραγματικών κινήσεων, γεγονός που απαιτεί προσοχή, εμπειρία και συσχετισμό των αποτελεσμάτων με άλλα όργανα και στοιχεία παρατήρησης.

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται με τα κλισιόμετρα συνήθως παρέχουν καλής ποιότητας αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, στην εκτέλεση οποιονδήποτε μετρήσεων, πάντα υπεισέρχονται τα συστηματικά ή τυχαία σφάλματα. Ο εντοπισμός και η διόρθωσή τους πλέον τείνει να επιλυθεί και σχεδόν σε κάθε λογισμικό πακέτο που συνοδεύει το γεωτεχνικό όργανο υπάρχει και η αντίστοιχη επέμβαση διόρθωσης με άμεσο τρόπο.

Τα είδη των σφαλμάτων που εντοπίζονται χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα τυχαία και στα συστηματικά σφάλματα. Συνήθως τα τυχαία σφάλματα παραμένουν αμετάβλητα ενώ τα συστηματικά σφάλματα τείνουν να μεταβάλλονται από περιοχή σε περιοχή. Το τυχαίο σφάλμα ±1.24mm στα 30m μέτρησης παραμένει ενώ όλα τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να απομακρυνθούν. Είναι προφανές ότι σε αυτή τη περίπτωση το αποτέλεσμα μπορεί να βελτιωθεί εκτελώντας επαναλαμβανόμενες μετρήσεις και λαμβάνοντας το μέσο όρο αυτών. Παρόλα αυτά,

αν το πρόβλημα στην έρευνα εντοπίζεται σε μια μεμονωμένη ζώνη διάτμησης, τότε το σφάλμα μπορεί να μειωθεί και να φτάσει έως και ± 0.2mm.

Οι παράγοντες, οι οποίοι είτε μεμονωμένα, είτε συνδυασμός αυτών, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία συστηματικών σφαλμάτων είναι:

- Συστηματικό σφάλμα αισθητήρα
- Μετάθεση ευαισθησίας (sensitivity drift)
- Αλλαγή διεύθυνσης (περιστροφή) αισθητήρα
- Σφάλμα προσδιορισμού βάθους
- Κλίση και καμπυλότητα σωλήνωσης

Είναι αποδεκτό ότι η διόρθωση, στα προαναφερόμενα συστηματικά σφάλματα, μπορεί να πραγματοποιηθεί στην περίπτωση κατά την οποία ο χειριστής γνωρίζει τη φύση των σφαλμάτων, διαμέσου της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων. Σκοπός είναι να εντοπιστούν οι πηγές προέλευσης των σφαλμάτων και να γίνει η απαραίτητη διόρθωση για να επιτεχθεί υψηλή ακρίβεια. Φυσικά η ακρίβεια στους υπολογισμούς εξαρτάται από τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου και φυσικά από το συνολικό διαθέσιμο προϋπολογισμό του έργου. Οπως αναφέρεται και στον Mikkelsen (2003), η ακρίβεια στους υπολογισμούς μπορεί να κυμανθεί από ±1.24mm έως ±7.8mm για 30m μετρήσεων (60 δείγματα), λαμβάνοντας μέριμνα για την ελαχιστοποίηση και διόρθωση των συστηματικών σφαλμάτων. Πρώτο βήμα στην όλη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η σωστή εγκατάσταση των κλισιομετρικών σωλήνων, ο έλεγχος της κατακορυφότητας της γεώτρησης και της εγκατάστασης των σωλήνων, καθώς και ο αποκλεισμός από την εγκατάσταση των «στραβών» σωλήνων. Αν κάποια από τα παραπάνω δεν μπορεί να διασφαλιστεί, τότε πρέπει να ακολουθηθούν διαδικασίες διόρθωσης των μετρήσεων, όπως αναφέρει και ο Mikkelsen (2003).

Το πρόβλημα, τελικά όταν εντοπιστεί ένα σφάλμα, το οποίο μεταφράζεται σε μετατόπιση, έχει σημαντικό οικονομικό αντίκτυπο.

Στη συνέχεια παρατείθονται οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων στις μετρήσεις:

- <u>Βαθμονόμηση</u>: είναι η σχέση μεταξύ του μετρούμενου μεγέθους και της τάσης εξόδου του οργάνου. Προσδιορίζει την κλίση της εξίσωσης βαθμονόμησης.,
- <u>Μηδενική απόκλιση</u>: είναι η τιμή της τάσης εξόδου, όταν το όργανο βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση.
- <u>Περιστροφή του αζιμούθιου άξονα</u>: το λάθος που προέρχεται από τη διαφορά μεταξύ του επιπέδου του άξονα του οργάνου και του επιπέδου που προσδιορίζουν οι τροχοί που είναι προσαρτημένοι στον ανιχνευτή.

- Τοποθέτηση σωλήνωσης: Βίαιη εισαγωγή σωλήνωσης μέσα στη γεώτρηση μπορεί να προκαλέσει ακόμα και το σπάσιμο της σωλήνωσης ή και το τσαλάκωμα αυτής.
- Ενεμάτωση: Έχουν παρατηρηθεί ανακρίβειες στις μετρήσεις λόγω κακής πλήρωσης της οπής με ένεμα.
- Μη σωστός χειρισμός του οργάνου: Κακός χειρισμός της βολίδας–π.χ. πιθανό κτύπημα κατά την εισαγωγή.

Η μικρότερη τιμή λάθους που επιτυγχάνεται κατά την τοποθέτηση του οργάνου και των τροχών του ανιχνευτή είναι της τάξης των ±0.5 μοιρών. Τα λάθη αυξάνονται από τη φθορά του συστήματος των τροχών, γήρανση ηλεκτρονικών τμημάτων του οργάνου και αλλαγές της θερμοκρασίας.

Επίσης μία άλλη πηγή λάθους θεωρείται και η περιστροφή της σωλήνωσης. Οταν γίνεται η εγκατάσταση του κλισιομετρικού σωλήνα, ο προσανατολισμός των καναλιών της σωλήνωσης σε βάθος, δεν είναι απαραίτητο να είναι ο ίδιος με αυτόν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η προεξοχή της αλουμινένιας σωλήνωσης, μπορεί να προκαλέσει ελικοειδή εικόνα της τάξης του 1 βαθμού ανά 3m μήκος, ενώ έχουν παρατηρηθεί και παρόμοιες αποκλίσεις και σε πλαστικές σωληνώσεις. Η παρατεταμένη έκθεση της πλαστικής σωλήνωσης σε ηλιοφάνεια μπορεί να προκαλέσει περιστροφή αυτής, επομένως τα τεμάχη πρέπει πάντα να αποθηκεύονται σε σκιερό μέρος. Επίσης, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί περιστροφή και από ένα φτωχό μείγμα ενέματος κατά τη διάρκεια εγκατάστασης της σωλήνωσης.

Έτσι, όσο πιο προσεκτικά γίνονται τα βήματα για την εγκατάσταση καθώς και για τη λήψη των μετρήσεων τόσο ελαχιστοποιούνται οι πηγές των σφαλμάτων και πιο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα. Άρα μηδενίζονται οι αμφιβολίες για την εγκυρότητα των μετρήσεων.

3.6.3.6 Ανάλυση δεδομένων κλισιομέτρων

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις, είναι σε ψηφιακή μορφή και γίνεται χρήση λογισμικών πακέτων, τα οποία συνοδεύουν τον κλισιομετρικό εξοπλισμό. Αυτά τα πακέτα διαφέρουν από τορπίλη σε τορπίλη. Τα αποτελέσματα επεξεργάζονται με τη χρήση λογισμικών, όπως το DMM, για την εισαγωγή των δεδομένων από τη μονάδα καταγραφής και το DIGIPRO για τη δημιουργία των διαγραμμάτων. Τα δεδομένα παρουσιάζονται υπό μορφή διαγραμμάτων της αθροιστικής μετατόπισης (cumulative displacement) σε συνάρτηση με το βάθος. Πρέπει η κλίμακα της A και B διεύθυνσης να είναι ίδια. Όταν τα δεδομένα δεν είναι συμβατά ή δεν είναι εφικτή η κατανόηση αυτών, τότε θα πρέπει να δίνονται υπό μορφή διαγραμμάτων: α) τα ποσά ελέγχου (checksums), β) οι σταδιακές μεταβολές (incremental displacement), οι οποίες θα αναφέρονται στις τοπικές μετατοπίσεις σε συγκεκριμένο βάθος και γ) η αθροιστική απόκλιση

(cumulative deviation) της οπής από την κατακόρυφο. Εάν υπάρχει ξεκάθαρα μετατόπιση τότε θα δημιουργείται και διάγραμμα που να παρουσιάζει τη μετατόπιση σε συνάρτηση με το χρόνο, για την εύρεση του ρυθμού μεταβολής. Είναι πολύ πιο σημαντικό η εύρεση του ρυθμού μετατόπισης από την απλή πληροφορία ότι υπάρχει μετακίνηση.

Το διάγραμμα που παράγεται μετά την πρώτη επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων (raw data), είναι το διάγραμμα 'Σταδιακής Απόκλισης'. Αυτό αναπαριστά την υπολογιζόμενη απόκλιση από την κατακόρυφο (σε mm) κάθε σημείου μέτρησης. Αθροιζόμενες οι τιμές αυτών (από κάτω προς τα πάνω) μας δίνουν το διάγραμμα της 'αθροιστικής απόκλισης' το οποίο αναπαριστά το προφίλ της γεώτρησης.

Το διάγραμμα που παρουσιάζει αυτές τις μεταβολές των αποκλίσεων με αρχική θέση την κατακόρυφο, ονομάζεται διάγραμμα 'Σταδιακής μετακίνησης'. Με την άθροιση των τιμών αυτών προκύπτει το διάγραμμα 'Αθροιστικής μετακίνησης' το οποίο δείχνει μια υψηλής ευκρίνειας αναπαράσταση της μετακίνησης.

Τα ποσά ελέγχου είναι τα αθροίσματα των πρωτογενών τιμών που παράγονται κατά τις μετρήσεις στις δύο αντίθετες διευθύνσεις (A0 και A180 ή B0 και B180). Αυτές οι τιμές, ιδανικά θα έπρεπε να είναι αντίθετες και τα αθροίσματά τους μηδενικά. Λόγω όμως διάφορων λαθών που οφείλονται, είτε στο σύστημα μέτρησης (bias shift error, depth errors κτλ), είτε στην εγκατάσταση του οργάνου στο έδαφος (ακάθαρτα αυλάκια, έντονες αποκλίσεις από την κατακόρυφο κ.α.), τα checkSums δεν έχουν μηδενικές τιμές. Στην υποενότητα αυτή, δεν θα δοθούν λεπτομέρειες για το κάθε παραγόμενο διάγραμμα, αλλά το κάθε διάγραμμα θα αναλυθεί μέσα από το πραγματικό παράδειγμα εφαρμογής όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Στην ίδια σελίδα θα απεικονίζονται γραφήματα της ίδιας ομάδας μετρήσεων στις διευθύνσεις A και B. Κάθε γράφημα θα περιέχει το όνομα οργάνου, την κατεύθυνση A0 σε σχέση με το βορρά, την κατάσταση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων μετρήσεων, το τεχνικό της περιοχής και τον πίνακα των παρατηρήσεων

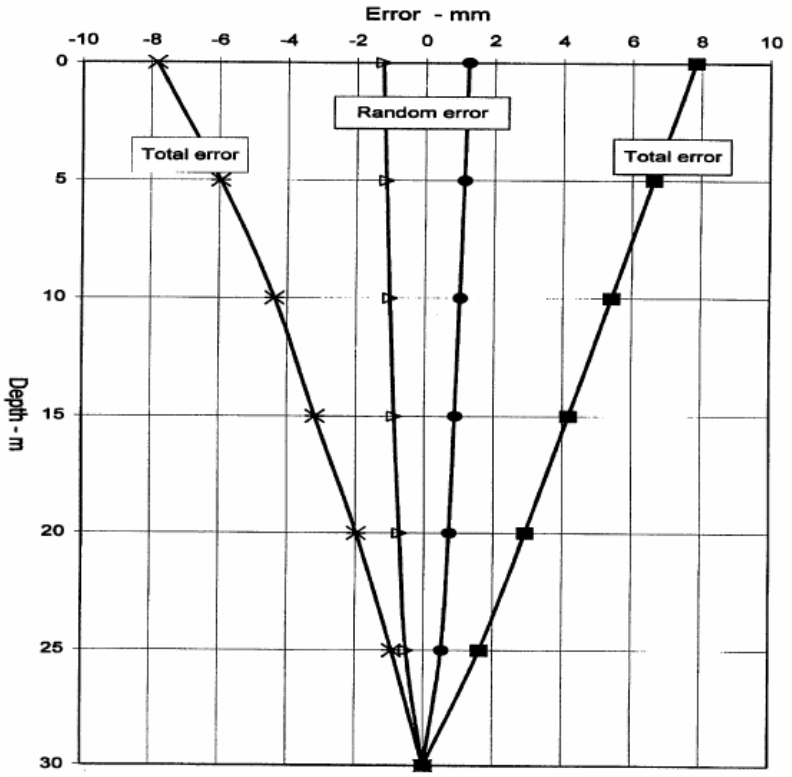
3.6.3.7 Ακρίβεια μετρήσεων της εταιρείας *Slope Indicator*

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η οποία παρέχεται από την αμερικάνικη γεωτεχνική εταιρία Slope Indicator, το μετρητικό σύστημα παρουσιάζει ακρίβεια στις μετρήσεις υπαίθρου της τάξης των, ±7.8mm για τα 30m. Εχει υπολογιστεί ότι το τυχαίο σφάλμα για μεμονωμένη μέτρηση, σπάνια ξεπερνά το ±0.16, ενώ το συστηματικό σφάλμα είναι της τάξης του 0.11mm. Το σφάλμα που προαναφέρθηκε είναι μια σχετικά συντηρητική εκτίμηση και είναι αποτέλεσμα της άθροισης του τυχαίου και συστηματικού σφάλματος όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.18). Στα

30m και με βήμα δειγματοληψίας 0.5m, λαμβάνονται 60 μετρήσεις. Το αθροιστικό συστηματικό σφάλμα υπολογίζεται όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση,

$$t.e. = r.e. + s.e. = \left(0.16 \cdot \sqrt{60}\right) + \left(0.11 \cdot 60\right) = 1.24 + 6.60 = 7.8mm$$

όπου, t.e. (total error) είναι το συνολικό σφάλμα, r.e. (random error) είναι το τυχαίο σφάλμα και s.e. (systematic error) είναι το συστηματικό σφάλμα.



Σχήμα 3.18. Τυχαίο και αθροιστικό σφάλμα. Τα προτεινόμενα τυχαία σφάλματα αφορούν την καλύτερη ακρίβεια των οργάνων (Mikkelsen, 2003).

3.7 Όργανα μέτρησης κλίσης κατασκευής

3.7.1 Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων

Οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων και τα κλινόμετρα μετρούν την κλίση μιας κατασκευής. Μεταβολές της κλίσης έχουμε όταν γειτονικές κατασκευαστικές εργασίες επηρεάζουν την συμπεριφορά του εδάφους της κατασκευής. Εργασίες, όπως εκσκαφές, κατασκευές υπόγειων έργων, μεταβολή στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μπορούν να προκαλέσουν διόγκωση του εδάφους. Επανεπιχώσεις και πλήρωση των κενών με ενέματα υπό πίεση έχουν σαν αποτέλεσμα την καθίζηση και την πλευρική παραμόρφωση του εδάφους.

Μεταβολές στην κλίση παρατηρούνται επίσης κατά την επιβολή φορτίου σε μία κατασκευή. Εκσκαφή πίσω από πασσαλότοιχο, ισχυροί άνεμοι ή κυκλοφοριακός φόρτος στο οδόστρωμα μιας γέφυρας μπορούν να οδηγήσουν σε ανάλογα αποτελέσματα.

Γενικά τα ανωτέρω όργανα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο σταθεροποιητικών μέτρων κατά τη φάση των εκσκαφών ή της κατασκευής σηράγγων ή υπόγειων έργων ή ακόμα και για τον έλεγχο της ευστάθειας κατασκευών σε περιοχές κατολισθήσεων.

Οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων ανιχνεύουν τη στροφή και τη σχετική μετακίνηση των κατασκευών. Οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων διαφέρουν από τα κλινόμετρα στα ακόλουθα σημεία:

- Οι ράβδοι έχουν ένα προκαθορισμένο μήκος της τάξης των 1 και 3 μέτρων και επομένως μεταβολές στην κλίση μετατρέπονται εύκολα και γρήγορα σε μετακίνηση (καθίζηση, ανύψωση, σύγκλιση ή πλευρική μετακίνηση.
- Οι ράβδοι συνδέονται σε σειρά, οπότε μετρούνται σχετικές μετατοπίσεις και μεταβολές στις καθιζήσεις.

3.7.2 Κλινόμετρα

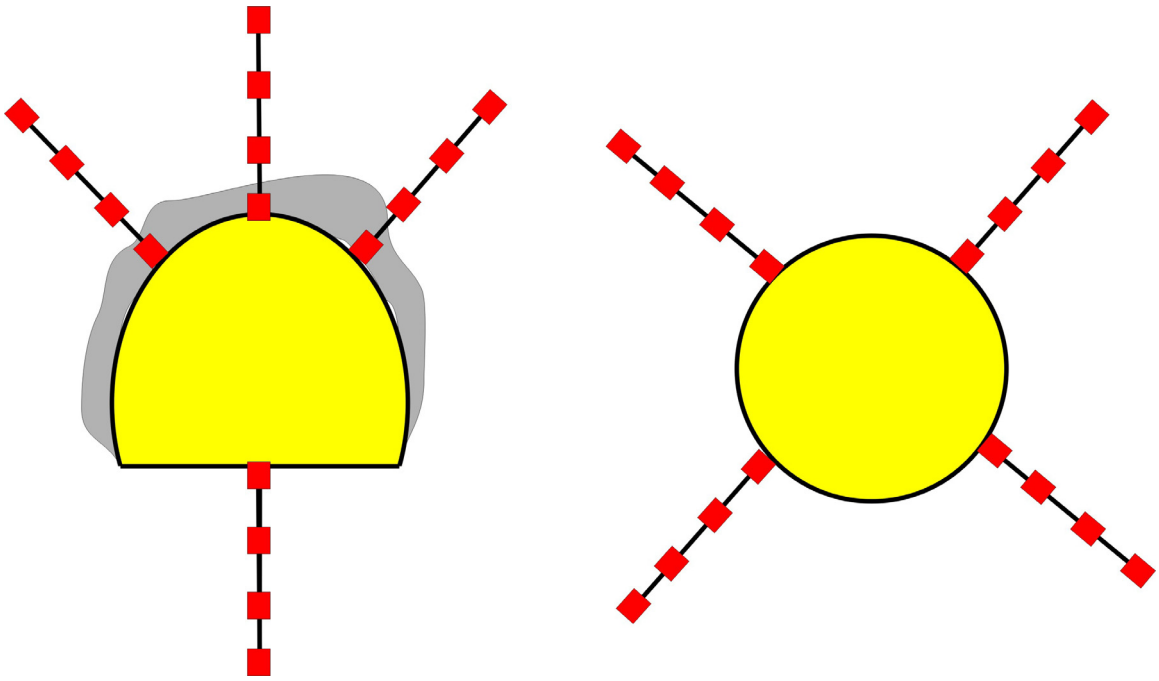
Τα κλινόμετρα έχουν περιορισμένη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό στροφών. Για τον προσδιορισμό σχετικής παραμόρφωσης σε μία κατασκευή είναι δυνατή η χρήση κλινομέτρων τοποθετημένων σε αριθμό πλακών. Δεν είναι δυνατός όμως ο προσδιορισμός της απόλυτης μετατόπισης. Πρόκειται για ένα όργανο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλο αριθμό πλακών και η εγκατάστασή τους είναι απλή. Το μειονέκτημά αυτού του οργάνου είναι ότι η κλίση υπολογίζεται σε συγκεκριμένα σημεία και δύσκολα μετατρέπεται σε μεταβολή κλίσης τμήματος της κατασκευής.

3.8 Όργανα μέτρησης παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις

Το συχνότερο απαντώμενο όργανο μέτρησης παραμόρφωσης είναι το **μηκυνσιόμετρο** και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση παραμορφώσεων σε διάφορες κατευθύνσεις.

3.8.1 Μηκυνσιόμετρα

Τα μηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση καθίζησης, ανύψωσης, σύγκλισης και πλευρικής μετακίνησης σε εδαφικές αποθέσεις, λόγω στερεοποίησης εδαφικού υλικού ή μετά από άντληση. Επίσης, χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση συγκλίσεων στα πλευρικά τοιχώματα των σηράγγων (σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19. Καταγραφή ευστάθειας και σύγκλισης σηράγγων.

Πολλές φορές τα όργανα αυτά καλούνται και μηκυνσιόμετρα γεώτρησης αφού η εγκατάστασή τους γίνεται μέσα σε γεώτρηση. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες οργάνων:

Τα μηκυνσιόμετρα ανίχνευσης χρησιμοποιούνται κυρίως σε εδάφη όπου αναμένονται μεγάλες καθιζήσεις. Η ακρίβεια του οργάνου είναι 1χιλ. ανά σημείο κατά μήκος του σωλήνα. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του ανιχνευτή τα μηκυνσιόμετρα διακρίνονται σε μαγνητικά, ηλεκτρικά και μηχανικά.

Τα μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου ονομάζονται και σταθερά μηκυνσιόμετρα γεώτρησης αφού μετρούν τη μετακίνηση των σταθερών σημείων αγκύρωσης σε γεώτρηση. Χρησιμοποιούνται τόσο σε βραχώδη όσο και σε μαλακά εδάφη. Παρέχουν περιορισμένο εύρος μετρήσεων (τυπικά της τάξης των 100 έως 150χιλ.) και έχουν ακρίβεια μέτρησης της τάξης του μm. Αποτελούνται από προεντεταμένες ή μη ράβδους. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη μέτρηση της απόστασης του σημείου αγκύρωσης στη βάση της ράβδου και του υψηλότερου σημείου της γεώτρησης. Ανάλογα με τον αριθμό των ράβδων που περιλαμβάνουν διακρίνονται σε μηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων. Η μέτρηση πραγματοποιείται με μηχανικό ή ηλεκτρικό ή μαγνητικό όργανο.

Μαγνητικό μηκυνσιόμετρο

Το μαγνητικό μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό μετατοπίσεων κατά μήκος κατακόρυφης γεώτρησης. Εκτός από τον προσδιορισμό σχετικών μετατοπίσεων στα διάφορα βάθη είναι δυνατός και ο προσδιορισμός της συνολικής μετατόπισης.

Η ακρίβεια του συστήματος είναι μεταξύ +/-0.03 και +/-0.3χιλ. Όταν η μέτρηση γίνεται με γεωδαιτική ταινία η ακρίβεια είναι μόνο +/-3 έως +/-5χιλ. Η ακρίβεια της μέτρησης δύναται να βελτιωθεί στα +/-0.5χιλ. εάν η ταινία συνδεθεί με ένα μετρητή μετακίνησης που τοποθετείται στην κορυφή της γεώτρησης. Η διάμετρος της γεώτρησης είναι 90χιλ.

Ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο

Το ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε διάφορα βάθη σε γεώτρηση ή επίχωμα. Η μέθοδος βασίζεται στη συμβατότητα της σύνδεσης εδάφους και σωλήνα διαμέσου του ενέματος. Επομένως η επιλογή ενέματος είναι πολύ σημαντική. Θεωρητικά θα πρέπει το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του ενέματος και του εδάφους να είναι παρόμοια. Η μέθοδος αποδείχτηκε αποτελεσματική σε ομοιόμορφα εδάφη και για συμπίεση της τάξης του 2% του πάχους του εδαφικού στρώματος.

Η ακρίβεια του οργάνου είναι +/-0.5χιλ. Όταν όμως χρησιμοποιείται ταινία η ακρίβεια είναι της τάξης των +/-3 έως +/-5χιλ. Η ακρίβεια για μετρήσεις στην οριζόντια κατεύθυνση είναι της τάξης των +/-3 έως +/-25χιλ. Η ακρίβεια αυτή είναι δυνατό να βελτιωθεί εάν τα πηνία εισόδου τοποθετηθούν σε μία ράβδο εγκατεστημένη μόνιμα στο σωλήνα η οποία δύναται να μετακινείται έτσι ώστε η θέση του πηνίου να συμπίπτει με τη θέση της αντίστοιχης πλάκας. Με τον τρόπο αυτόν η ράβδος κινείται σε μικρές αποστάσεις και είναι εφικτή ακρίβεια της τάξης του +/-0.5χιλ.

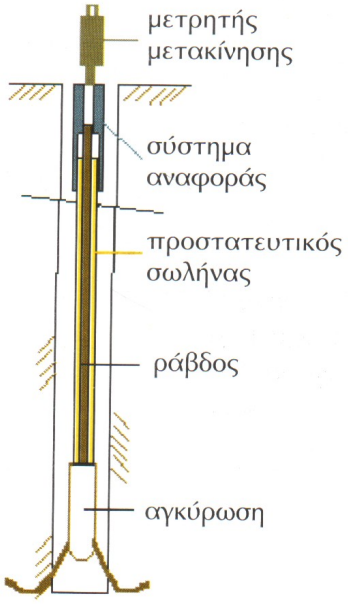
Μηχανικό μηκυνσιόμετρο

Χρησιμοποιείται για μέτρηση μετακινήσεων στην κατακόρυφη διεύθυνση. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση τηλεσκοπικού σωλήνα, ο οποίος έχει κατά διαστήματα ειδικά στοιχεία που επιτρέπουν την αυξομείωση του μήκους τους.

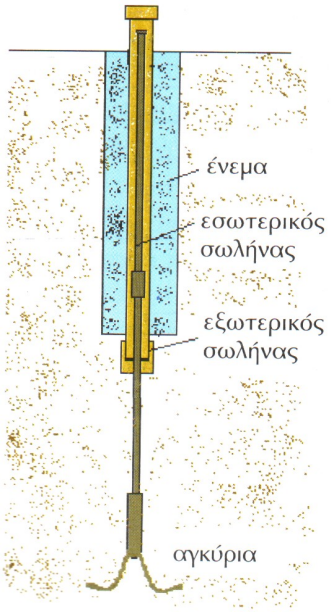
3.8.1.1 Μηκυνσιόμετρα απλού σημείου τύπου ράβδου

Το μηκυνσιόμετρο απλού σημείου ανήκει στην κατηγορία μηκυνσιομέτρων τύπου ράβδου. Ονομάζεται και σταθερό μηκυνσιόμετρο καθώς δεν απαιτείται η χρήση ανιχνευτή κατά μήκος του άξονα της γεώτρησης κατά τη λειτουργία του. Χρησιμοποιείται για την καταγραφή μικρών μετακινήσεων σε υπόγειες εκσκαφές ή πρανή σε έδαφος ή βράχο και είναι κατάλληλο για μήκη μέχρι και 90m.

Το πλέον συνήθες μηκυνσιόμετρο απλού σημείου είναι το Borros point (σχήμα 3.20 και 3.21). Αποτελείται από μία βάση που περιλαμβάνει τρία άγγιστρα και στηρίζει εσωτερικό σωλήνα διαμέτρου 6.25χιλ., ο οποίος περιβάλλεται από εξωτερικό σωλήνα διαμέτρου 25,4χιλ.



Σχήμα 3.20. Μηκυνσιόμετρο απλού σημείου (Γεωργιαννού, 2000).



Σχήμα 3.21. Μηκυνσιόμετρο σημείου (Borros point) (Γεωργιαννού, 2000).

Πρόκειται για ένα όργανο του οποίου η εγκατάσταση είναι απλή και οικονομική και η καταγραφή μπορεί να γίνει για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κυρίως χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη.

3.8.1.2 Μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων τύπου ράβδου

Ενώ το μηκυνσιόμετρο απλού σημείου προσδιορίζει τη μετατόπιση ενός σημείου μέσα στη γεώτρηση, το μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων αποτελείται από πολλές ράβδους (έως και 6) τοποθετημένες στην ίδια γεώτρηση και καταγράφει τη μετατόπιση πολλών σημείων και άρα μπορεί να δωθούν πληροφορίες για διάφορετικές ζώνες ενδιαφέροντος.

Το μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων αποτελείται από 6 ή λιγότερες αγκυρώσεις και ράβδους και ένα σύστημα αναφοράς. Οι αγκυρώσεις γίνονται συνήθως σε σημεία όπου αλλάζει η στρωματογραφία του εδάφους. Η μέτρηση της μετατόπισης γίνεται από τα όργανα καταγραφής παραμορφώσεων. Τα μηκυνσιόμετρα πολλαπλών σημείων προσδιορίζουν εκτός από τη συνολική μετακίνηση, τη σχετική μετακίνηση των αγκυρώσεων και την κατανομή των μετακινήσεων ως προς το βάθος.

Στα μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου, η ράβδος διατηρείται τεταμένη. Αυτό απαιτείται σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους όπου η τριβή μεταξύ της ράβδου και του προστατευτικού σωλήνα είναι σημαντική. Ένας ενσωματωμένος μηχανισμός στο σύστημα αναφοράς διατηρεί τη ράβδο τεταμένη μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τις δυνάμεις τριβής. Η παρουσία λιπαντικού μεταξύ ράβδου και προστατευτικού σωλήνα δύναται να μειώσει τις δυνάμεις τριβής και ταυτόχρονα να ελαττώσει τον κίνδυνο διάβρωσης ή βλάβης σε συνθήκες παγετού.

Όταν η ράβδος δεν είναι τεταμένη, το μήκος της δεν πρέπει να ξεπερνά τα 30m στην περίπτωση ράβδων από ινώδες γυαλί ή τα 50m στην περίπτωση των χαλύβδινων ράβδων. Για αυτά τα μήκη, η εγκατάσταση είναι απλή και το κόστος χαμηλό. Αντίθετα στην περίπτωση τεταμένης ράβδου απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος και κόστος εγκατάστασης. Όμως η τεταμένη ράβδος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε κατεύθυνση και εξασφαλίζει τη λειτουργία του οργάνου σε συνθήκες θλίψης και εφελκυσμού.

Οι ράβδοι είναι από ινώδες γυαλί ή αλουμίνιο. Ανεξαρτήτως του υλικού παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά και συνθήκες εγκατάστασης. Για τις ράβδους από αλουμίνιο υπάρχει ο κίνδυνος της διάβρωσης.

Ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα ή ινώδες γυαλί είναι διαθέσιμες στην αγορά. Οι ράβδοι από ανοξείδωτο χάλυβα παραδίδονται σε μήκη 3μ και πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους όταν απαιτούνται μεγαλύτερα μήκη. Οι ράβδοι από χάλυβα και αλουμίνιο διατίθενται σε μεγάλες ανέμες και χρειάζονται ευθειοποίηση στο εργοτάξιο. Ευθειοποίηση δεν είναι απαραίτητη για ράβδους από ινώδες γυαλί. Χαλύβδινες ράβδοι είναι κατάλληλες για μέτρηση καθιζήσεων αλλά παρουσιάζουν δυσκολία στην εγκατάσταση σε περιορισμένο χώρο όπως σε σήραγγες μικρής διαμέτρου. Αντίθετα οι ράβδοι από ινώδες γυαλί τοποθετούνται ευκολότερα. Η διάμετρος των ράβδων είναι 5 έως 13χιλ. Οι ράβδοι πρέπει να περιβάλλονται από προστατευτικό σωλήνα όπου τοποθετείται λιπαντικό στην περίπτωση οριζόντιων γεωτρήσεων.

Η ακρίβεια των μετρήσεων των μηκυνσιομέτρων τύπου ράβδου εξαρτάται από τη γεωδαιτική μέθοδο που υπεισέρχεται στις μετρήσεις και είναι της τάξης των +/-3χιλ.

Τα μηκυνσιόμετρα και οι απαραίτητες σωληνώσεις τοποθετούνται στη γεώτρηση για εμποτισμό με ένεμα. Η αντοχή του ενέματος πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή του εδάφους. Εάν το ένεμα είναι πολύ άκαμπτο, η αγκύρωση μπορεί να αστοχήσει στη διεπιφάνεια ενέματος/εδάφους. Επίσης, το ένεμα θα πρέπει να επιτρέπει τη μετακίνηση της αγκύρωσης με το περιβάλλον έδαφος. Οι αγκυρώσεις με χρήση ενέματος είναι κατάλληλες για εδάφη με πολλές ρωγμές και κενά.

Οι αγκυρώσεις τριών ή έξι αγκυρίων τα οποία εκτινάσσονται προς το περιβάλλον έδαφος της γεώτρησης είναι ο συχνότερος τύπος που χρησιμοποιείται σε μαλακά εδάφη. Τα αγκύρια εκτινάσσονται στη γεώτρηση με τη βοήθεια υδραυλικής πίεσης.

Σε βραχώδη εδάφη μια μεταλλική (χάλκινη) ζώνη με διπλά στεγανά τοιχώματα τοποθετείται γύρω από την αγκύρωση. Όταν υδραυλική πίεση εφαρμόζεται μέσω λαδιού στην κοιλότητα της ζώνης το μέταλλο των τοιχωμάτων διαστέλλεται και έτσι επιτυγχάνεται επαφή με το περιβάλλον έδαφος. Όταν η πίεση απομακρύνεται η κοιλότητα διατηρεί το παραμορφωμένο σχήμα της.

Οι αγκυρώσεις υδραυλικού τύπου έχουν μεγαλύτερο αρχικό κόστος, υπερτερούν όμως των αγκυρώσεων με χρήση ενέματος στο ότι δεν απαιτείται χρόνος αναμονής και επομένως η χρήση του οργάνου είναι άμεση. Η χρήση τους επίσης προτιμάται για διατρήσεις σε γωνία μεγαλύτερη από την οριζόντιο ή όταν δεν συνίσταται η χρήση ενέματος, όπως στην περίπτωση ρηγματωμένου βράχου. Ένεμα χρησιμοποιείται γύρω από τις αγκυρώσεις για την αποφυγή ροής νερού μέσα στη γεώτρηση.

3.8.2 Επιφανειακά Μηκυνσιόμετρα

Πρόκειται για όργανα μέτρησης της απόστασης μεταξύ δύο σημείων στην επιφάνεια του εδάφους ή μιας κατασκευής. Μια από τις κύριες εφαρμογές των εν λόγω οργάνων είναι η μέτρηση του πάχους των ρωγμών.

Μέτρηση πάχους ρωγμών

Υπάρχουν πολλοί μηχανικοί τρόποι προσδιορισμού του πάχους των ρωγμών όπως γυάλινες πλάκες διαστάσεων 76 mm*25mm και πάχους 2.5mm που προσκολλώνται στην επιφάνεια της ρωγμής με εποξειδωτική ρητίνη. Το όργανο καταγράφει το μέγεθος και την κατεύθυνση της μετακίνησης κατά μήκος της ρωγμής. Ψαθυρό γυψοκονίαμα δύναται να αντικαταστήσει το γυαλί.

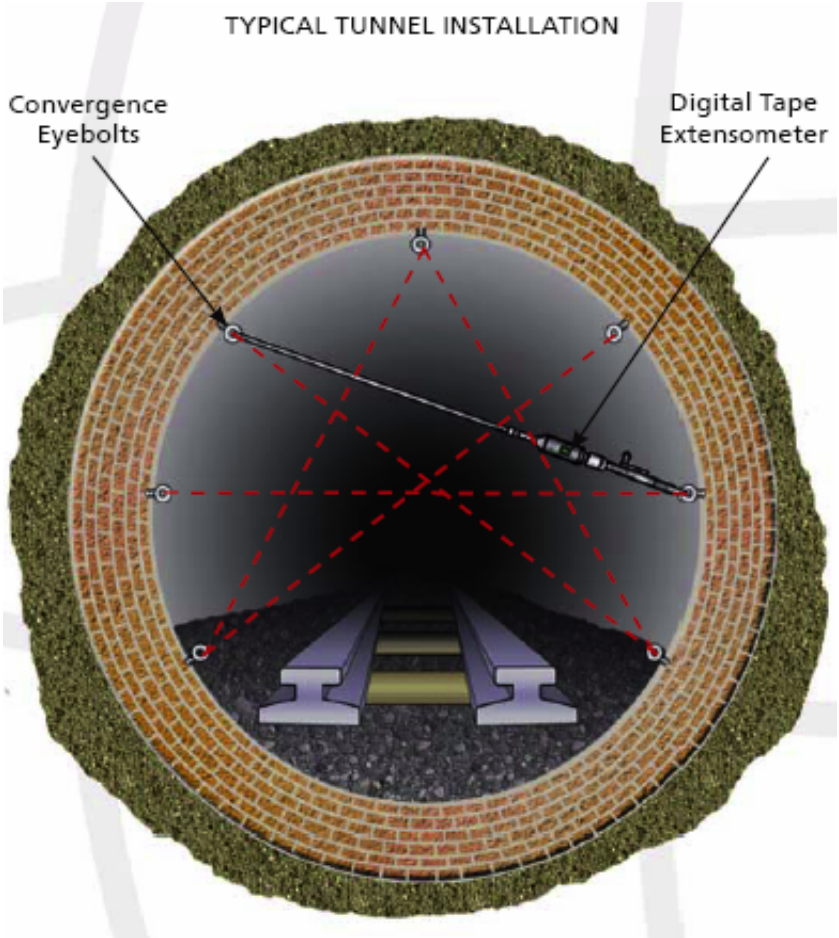
Μεταλλική ταινία ή μεταλλικός κανόνας προσδιορίζει την απόσταση δύο καρφιών, ένα σε κάθε πλευρά της ρωγμής, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.22). Η μέτρηση μπορεί να γίνει με ηλεκτρικό όργανο μέτρησης. Τα όργανα μέτρησης μπορεί να είναι διαφορικοί μετατροπείς γραμμικής μεταβολής (LVDT), διαφορικοί μετατροπείς συνεχούς ρεύματος (DCDT), μετρητές χορδής μεταβλητού μήκους ή μετρητές ηλεκτρικών αντιστάσεων.

Σχήμα 3.22. Μέτρηση πάχους ρωγμής (Soil Instruments Ltd.)

Ο τρισδιάστατος μετρητής ρωγμών αποτελείται από δύο τμήματα προσαρτημένα στις παρειές της ρωγμής. Το όργανο μέτρησης τοποθετείται σε όλες τις θέσεις που έχουν προβλεφθεί στη φάση σχεδιασμού. Η σχετική απόσταση μεταξύ των δύο τμημάτων του μετρητή προσδιορίζεται σε τρεις άξονες. Μεταβολή της απόστασης αντιστοιχεί σε ανάλογη μετακίνηση της ρωγμής.. Μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του οργάνου σε άλλη θέση. Μεγαλύτερο αρχικό κόστος από τα άλλα απλά όργανα

3.8.2.1 Μηκυνσιόμετρο τύπου ταινία

Ανήκει στην κατηγορία οργάνων που μετρούν τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ δύο σημείων αναφοράς αγκυρωμένων στις παρειές μιας εκσκαφής. Τυπικές εφαρμογές αφορούν τον υπολογισμό των μετακινήσεων των παρειών μιας σήραγγας και τον υπολογισμό σύγκλισης σε υπόγεια έργα. (σχήμα 3.23).



Σχήμα 3.23. Σύγκλιση σήραγγας (Soil Instruments Ltd).

Το μηκυνσιόμετρο τύπου ταινίας αποτελείται από μεταλλική ταινία με οπές κάθε 50mm. Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης των +/- 0.13mm για απόσταση 10 μέτρων. Η ακρίβεια μειώνεται με την αύξηση της απόστασης. Η μέγιστη τιμή της απόστασης είναι περίπου 60m. Η χρήση της είναι ευρεία διαδεδομένη διότι το όργανο είναι μεγάλης αντοχής, ιδιαίτερα εύχρηστο και τα αποτελέσματα άμεσα και αξιόπιστα.

3.8.2.2 Επιμηκυνσιόμετρα

Τα επιμηκυνσιόμετρα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των σχετικών μετακινήσεων συγκεκριμένων σημείων εντός του εδάφους. Μια τυπική συσκευή επιμηκυνσιόμετρου αποτελείται από τρία βασικά μέρη, την κεφαλή αγκύρωσης, το στοιχείο μετάδοσης των μικρομετακινήσεων και το άκρο του επιμηκυνσιομέτρου με το στοιχείο μέτρησης. Η ερμηνεία των μετρήσεων των επιμηκυνσιομέτρων και εφόσον αυτή συσχετισθεί με αποτελέσματα των συγκλίσεων, παρέχει στοιχεία σχετικά με τη ζώνη χαλάρωσης του εδάφους.

Μια τυπική διάταξη επιμηκυνσιομέτρου δίδεται στο παρακάτω σχήμα (3.24):

- Κεφαλή αγκύρωσης, στερεωμένη με ένεμα
- Κώνος αγκύρωσης
- Ράβδοι επιμήκυνσης εντός πλαστικού προστατευτικού σωλήνα, με καπάκι ασφαλείας στην άκρη του αγκυρίου.
- Κεφαλή επιμηκυνσιομέτρου με οδηγούς ράβδων και αγκύριο για την σταθεροποίηση στο στόμιο της διάτρησης
- Μπάρα αισθητήρα και μετρητή. Υποδοχή για τοποθέτηση μετρητή.
- Μετρητής.

Σχήμα 3.24. Παρουσίαση επιμηκυνσιομέτρου (Soil Instruments Ltd).

Θα χρησιμοποιηθούν επιμηκυνσιόμετρα τριών ράβδων (3m, 6m, 9m), τα οποία θα περιλαμβάνουν αγκύρωση με σιμεντένεμα σε κάθε θέση (3m, 6m, 9m) και ράβδους τοποθετημένες σε προστατευτικό σωλήνα συνδεδεμένες με την αγκύρωση.

Για να εξασφαλιστεί η ανεξαρτησία της πάκτωσης των ραβδών προτείνεται η τοποθέτησή τους σε διαφορετικές οπές (γεωτρήσεις) οι οποίες θα διατάσσονται τριγωνομετρικά και θα απέχουν περίπου 20cm μεταξύ τους. Οι κεφαλές των ράβδων πρέπει να βρίσκονται σε κατάλληλη προστατευμένη θέση (εσοχή), έτσι ώστε να μη κινδυνεύουν από άλλες δραστηριότητες του εργοταξίου.

Σε γενικές γραμμές αρκεί μικρός αριθμός οργάνων (2 σταθμοί τριών επιμηκυνσιομέτρων) για την αξιολόγηση της ζώνης χαλάρωσης, όμως είναι αναγκαία η

συσχέτιση με τα αποτελέσματα των συγκλίσεων στις ίδιες θέσεις. Κάθε σταθμός θα αποτελείται από τρία επιμηκυνσιόμετρα, ένα εκ των οποίων θα τοποθετηθεί στην κλείδα και ανά ένα στο άνω μέρος των παρειών της σήραγγας. Η τοποθέτηση θα πρέπει να γίνει σε υπερκείμενο> 10,00m και σε θέσεις αλλαγής των γεωλογικών σχηματισμών. Οσον αφορά τη συχνότητα λήψης μετρήσεων, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για τις μετρήσεις σύγκλισης.

Η επεξεργασία των μετρήσεων των επιμηκυνσιομέτρων θα πραγματοποιείται το συντομότερο δυνατό και σίγουρα εντός 24ώρου από τη λήψη της μετρήσεως.

Αρχικά κατασκευάζεται διάγραμμα συσχέτισης των μετακινήσεων με το χρόνο, το οποίο τηρείται ενημερωμένο με τη λήψη κάθε νέας μέτρησης. Η ερμηνεία των μετρήσεων δύναται να διευκολυνθεί θεωρώντας όχι μόνο την μετακίνηση σχετικά με το χρόνο, αλλά και το ρυθμό μεταβολής της μετακίνησης σχετικά με το χρόνο (επιτάχυνση). Η εγκατάσταση των οργάνων θα πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

3.9 Μετρήσεις πιέσεων νερού

Μία ειδική κατηγορία γεωτεχνικών οργάνων, αποτελούν αυτά που υπολογίζουν την πίεση του νερού στους πόρους των εδαφών. Πρόκειται για όργανα, των οποίων τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση, κυρίως, συνθηκών ευστάθειας μίας περιοχής, για τον υπολογισμό πιέσεων από άνωση ή διόγκωση του εδάφους και για την επίδραση των αυξομειώσεων πίεσης του νερού στα διάφορα στάδια κατασκευής. Έχει αποδειχθεί ότι εάν χρησιμοποιηθούν σωστά και εγκαίρως τα αποτελέσματα αυτά, είναι δυνατόν να αποφευχθούν αρκετά γεωτεχνικά προβλήματα, όπως στερεοποίηση εδαφών, ολισθήσεις, ερπυσμοί και καθιζήσεις.

Τα είδη των πιεζομέτρων είναι:

- πιεζόμετρα τύπου κατακόρυφου σωλήνα
- πιεζόμετρα τύπου διαφράγματος
- υδραυλικά πιεζόμετρα

Η επιλογή του τύπου του πιεζόμετρου γίνεται κυρίως με βάση την αξιοπιστία του, την ανθεκτικότητά του και το χρόνο λειτουργίας. Όταν αναμένονται μικρές μεταβολές της πίεσης νερού των πόρων σε μία ασυνέχεια της βραχομάζας γίνεται χρήση του κατακόρυφου σωλήνα. Σε περιπτώσεις όπου ο χρόνος απόκρισης είναι μικρός, γίνεται χρήση των δύο άλλων κατηγοριών.

Για τη διερεύνηση των πιέσεων του νερού στην περιοχή της σήραγγας τοποθετούνται συνήθως πιεζόμετρα μέτρησης πίεσης πόρων, τύπου παλλόμενης χορδής (οριζόντιας τοποθέτησης) μήκους 8-9m, ανά 100m και σε θέσεις αυξημένης υδροφορίας ή ακόμα και πιεζόμετρα τύπου κατακόρυφου σωλήνα που θα τοποθετηθούν μεταξύ των δύο κλάδων της

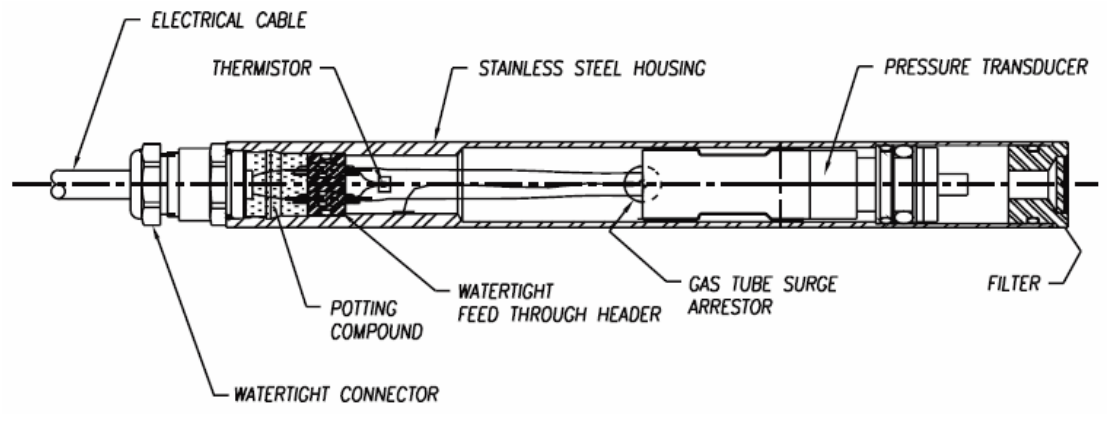
σήραγγας, για παρθούν πληροφορίες για την επιφανειακή υδροφορία. Οι μετρήσεις πίεσης νερού πίσω από την προσωρινή επένδυση θα λαμβάνεται υποχρεωτικά και πίσω από την τελική επένδυση, ακόμα και μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης.

Συνήθως τα πιεζόμετρα που χρησιμοποιούνται για τις πληροφορίες της επιφανειακής υδροφορίας, τοποθετούνται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την έναρξη των εργασιών εκσκαφής μιας σήραγγας. Σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν ορίζοντες με μεγάλη υδροφορία και η διάνοιξη της σήραγγας διασχίζει τους ορίζοντες αυτούς, τοποθετούνται πιεζόμετρα τύπου casagrande (σχήμα 3.25).

Σχήμα 3.25. Παρουσίαση και εγκατάσταση πιεζομέτρων τύπου Casagrande (SISGEO Co.)

Στο σχήμα που ακολουθεί (3.26A και B) παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού πιεζόμετρου τύπου παλλόμενης χορδής (Vibrating Wire Piezometer).

(A)



(B)

Σχήμα 3.26. Α) Παρουσίαση ενός πιεζομέτρου και Β) Σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρικού πιεζόμετρου τύπου παλλόμενης χορδής (Soil Instruments Ltd).

3.10 Συχνότητα λήψης μετρήσεων

Παρακάτω αναλύεται η συχνότητα λήψης των μετρήσεων που αντιστοιχεί σε τέσσερα (4) επίπεδα εγρήγορσης. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να ληφθεί κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ώστε να απομονωθούν τυχόν σφάλματα μετρήσεων και να αναγνωρισθεί το πραγματικό μέγεθος των μετακινήσεων. Επισημαίνεται ότι η ακρίβεια των μεθόδων μετρήσεως είναι περίπου ±2 mm.

Η συχνότητα λήψης μετρήσεων που περιγράφεται παρακάτω ισχύει τόσο για τις μετρήσεις συγκλίσεων όσο και για τις υπόλοιπες μετρήσεις παραμορφώσεων (επιμηκυνσιόμετρα, δείκτες αγκυρίων, κυψέλες φορτίου εκτοξ. σκυροδέματος – πλαισίων – μόνιμης επένδυσης) οι οποίες αποτελούν τα βασικά συστήματα παρακολούθησης της σήραγγας.

<u>Καθημερινή λήψη μετρήσεων</u>

- Συγκλίσεις > 2/3 των αναμενόμενων ή
- Ρυθμός μετακίνησης > 5mm / ημέρα ή

- Συνέχιση μετακινήσεων (> 1mm / ημέρα) σε απόσταση μεγαλύτερη από 1.5 διάμετρο σήραγγας.

Κανονική λήψη μετρήσεων 1-2 φορές την εβδομάδα.

- Συγκλίσεις < 2/3 των αναμενόμενων και
- Ρυθμός μετακίνησης 1 έως 5 mm/ημέρα σε απόσταση < 1.5 διάμετρο σήραγγας.

Μηνιαίος έλεγχος

- Σταθεροποίηση μετακινήσεων (<1 mm/ημέρα) και
- Απόσταση μετώπου μεταξύ 1.5-5 διαμέτρους σήραγγας.

Περιοδικός έλεγχος

- Σταθεροποίηση μετακινήσεων (<1 mm/ημέρα) και
- Απόσταση μετώπου >5 διαμέτρους σήραγγας.

Οι διορθωτικές ενέργειες που ενδεχομένως είναι αναγκαίες αν ξεπερασθούν τα όρια αυτά, θα πρέπει να ληφθούν συνεκτιμώντας και αξιολογώντας τις επιμέρους συνθήκες στη συγκεκριμένη θέση (γεωλογικές / γεωτεχνικές συνθήκες, συμπεριφορά αντιστήριξης). Για την ταχύτερη λήψη των διορθωτικών ενεργειών είναι αναγκαία η συμβολή όλων των εμπλεκομένων μερών (ανάδοχος, υπηρεσία, μελετητής).

Μέτρα αντιστήριξης πέραν αυτών που προβλέπονται στα σχετικά σχέδια θα πρέπει να εξετασθούν κατά περίπτωση με βάση τις πραγματικές επί τόπου συνθήκες.

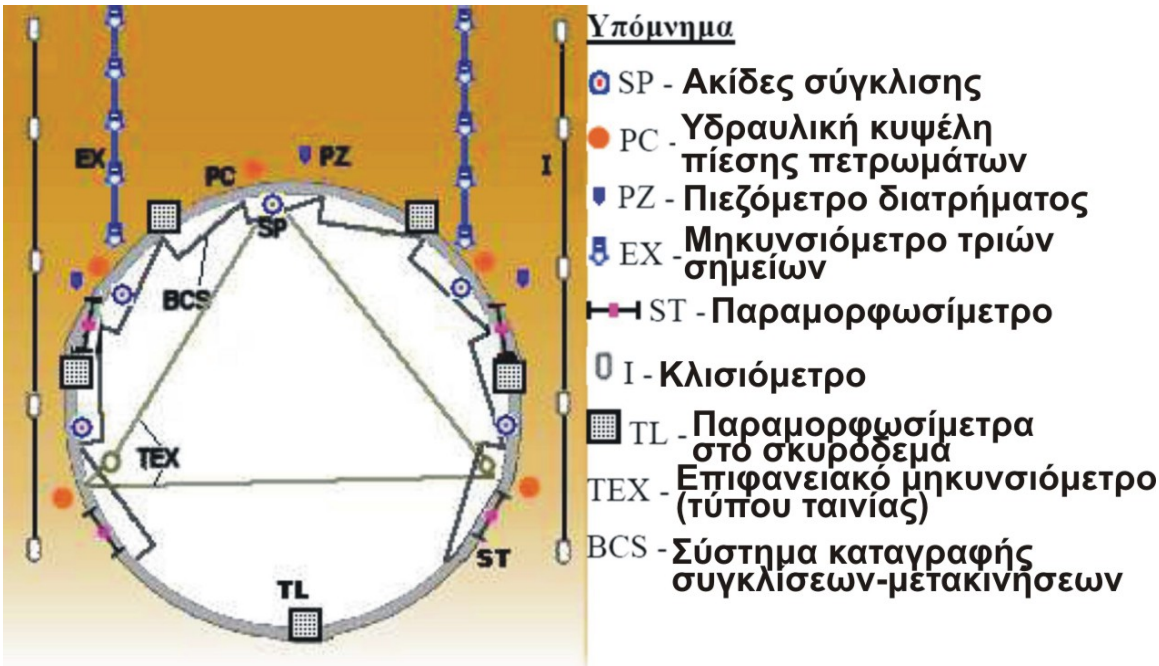
3.11 Χρήση γεωτεχνικών οργάνων σε σήραγγες με μαλακά πετρώματα

Γενικότερα η κατασκευή των σηράγγων χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: α) σε μαλακά πετρώματα και β) σε σκληρά πετρώματα. Γίνεται κατανοητή η διαφοροποίηση των δύο αυτών κατηγοριών, λόγω της διαφορετικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Το ίδιο διαφορετική είναι και η προσσέγγιση στην κατασκευή της σήραγγας, στο τρόπο διάνοιξης αυτής, στα μέτρα υποστήριξης που θα ληφθούν και κατά συνέπεια και στη μεθοδολογία για την ενοργάνωση. Στην εργασία αυτή θα γίνει αναφορά ολών των προβλημάτων που εντοπίζονται σε κατασκευή σηράγγων σε μαλακά πετρώματα. Από τα αναφερόμενα είδη οργάνων, τα ευρέως χρησιμοποιούμενα παρουσιάζονται στο σχήμα (3.27) και αυτά είναι τα εξής:

- Εντοιχισμένοι αισθητήρες τάσης (Embedment Strain Gauges - SG). Εγκαθίστανται απευθείας στα τοιχώματα της σήραγγας για μετρήσεις τάσεων σε σημεία ενδιαφέροντος.
- Πιεζόμετρα (Piezometers - PZ). Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της πίεσης των πόρων του περιβάλλοντος χώρου της εκσκαφής ή και συγκεκριμένης ζώνης ενδιαφέροντος.. Επίσης, χρησιμοποιούνται και στην ευρύτερη περιοχή εκτός της σήραγγας. Μπορεί να

επιλεγεί πνευματικού ή ηλεκτρικού τύπου ή διατρημένος σωλήνας, ανάλογα με τι θέλουμε να μετρήσουμε αλλά και ανάλογα με το πέτρωμα.

- Επιμηκυνσιόμετρα (Extensometers - EX). Χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό μετακινήσεων στο έδαφος. Οι ράβδοι είναι χρήσιμοι σε περιπτώσεις μεγάλων βαθών.
- Κλισιόμετρα (Inclinometers – I). Χρησιμοποιούνται τόσο κινητά όσο και μόνιμα εγκατεστημένα κλισιόμετρα, για τη μέτρηση πλευρικών μετακινήσεων του εδάφους. Κατακόρυφου και οριζόντιου τύπου, εντός και εκτός από τη σήραγγα για τον εντοπισμό ζωνών χαλάρωσης.
- Αισθητήρες πίεσης κελιού (VW Pressure Cells – PC). Χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της συνολικής πίεσης (πίεση εδάφους και νερού πόρων) στη βραχώδη μάζα.
- Αισθητήρες πίεσης κελιού επένδυσης σήραγγας (Tunnel Lining Pressure Cell – TL). Μετράει και παρακολουθεί την εφαπτομενική και ακτινική τάση που αναπτύσσεται στη τελική επένδυση της σήραγγας.
- Σύστημα καταγραφής συγκλίσεων-μετακινήσεων (Bassett Convergence System – BCS). Θεωρείται ο ιδεατός τρόπος για τη μέτρηση των μετακινήσεων εντός της σήραγγας. Μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και στην περίπτωση λειτουργείας της σήραγγας και ενδύκνειται για περιπτώσεις σιδηροδρομικών σηράγγων στις οποίες υπάρχει η μικρότερη επίβλεψη/παρακολούθηση.
- Μηκυνσιόμετρο τύπου ταινίας (Tape Extensometer – TEX). Θεωρείται η ιδεατή λύση για μέτρηση σχετικών μετακινήσεων μεταξύ σημείων παρατήρησης εντός μιας σήραγγας.



Σχήμα 3.27. Εγκατάσταση οργάνων σε σήραγγα σε μαλακά εδάφη (Soil Instruments Ltd).

Στα επόμενα κεφάλαια θα γίνει αναφορά της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε από τρεις σήραγγες της Εγνατίας Οδού – Δρίσκος, Ανθοχώρι και Ανήλιο-, για την παρακολούθηση ευστάθειας των μετώπων και των πρανών για τον έλεγχο μικρομετακινήσεων. Το σύνολο των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν και οι λόγοι εγκατάστασης αυτών αναφέρονται ενδεικτικά στον πίνακα 3.

Πίνακας 3.3. Σκόπός των γεωτεχνικών οργάνων και συχνότητα εφαρμογής από τις σήραγγες της Εγνατίας Οδού (Δρίσκος, Ανθοχώρι και Ανήλιο)

Α/Α	Γεωτεχνικά όργανα	Σκοπός Μέτρησης	Συχνότητα εφαρμογής
1	Συγκλίσεις (Χωροσταθμήσεις εντός της σήραγγας-5 σημείων μέτρησης)	-Προσδιορισμός παραμόρφωσης της σήραγγας -Έλεγχος επάρκειας μέτρων αντιστήριξης	-Τακτικά σε διατομές ανά 50μ και αναλόγως των γεωλογικών σχηματισμών. -Σε δυσμενείς συνθήκες θα γίνεται πύκνωση των σταθμών (π.χ. τοποθέτηση σταθμού σε κάθε ομπρέλα προπορείας ανά 12m περίπου)
2	Επιμηκυνσιόμετρα τριών	-Παραμόρφωση περιβάλλοντος	Δύο σταθμοί και σε κάθε αλλαγή

	ράβδων μήκους 3,6 και 9 m. (κάθε σταθμός θα αποτελείται από 5 επιμηκυνσιόμετρα)	εδάφους -Εκτίμηση πάχους ζώνης χαλάρωσης (πλαστικοποίηση)	γεωλογικού σχηματισμού. Η έναρξη τοποθέτησης θα γίνει σε υπερκείμενο μεγαλύτερο από 10m.
3	Δείκτες φορτίου αγκυρίων. (κάθε σταθμός θα αποτελείται από 5 σημεία μέτρησης)	-Αποτελεσματικότητα τοποθετούμενων αγκυρίων -Έλεγχος για την υπέρβαση του φορτίου λειτουργίας.	Δύο σταθμοί με 5 σημεία μέτρησης έκαστος και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.
4	Κυψέλες φορτίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	-Παραμορφώση προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης. -Πιέσεις βραχομάζας επί της προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης. -Αποτελεσματικότητα προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης.	Δύο κυψέλες και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.
5	Δοκιμές αγκυρίων	-Προσδιορισμός οριακής δύναμης αστοχίας. -Έλεγχος της ποιότητας κατασκευής -Επαλήθευση του συντελεστή ασφαλείας για το φορτίο λειτουργίας που έχει γίνει δεκτό στη μελέτη του έργου.	Δειγματοληπτικά σε όλο το μήκος της σήραγγας (ανά 50m) και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.
6	Μετρήσεις πίεσης πόρων στην επένδυση της σήραγγας	Μέτρηση πιέσεων πόρων πίσω από την προσωρινή και τη μόνιμη επένδυση	Τακτικά ανά 100m και σε τμήματα υδροφορίας.
7	Κλισιόμετρα	-προσδιορισμός αστοχίας (βάθος, ρυθμός και διεύθυνση μετακίνησης)	Στο μέτωπο εισόδου και εξόδου κάθε σήραγγας.
8	Πιεζόμετρα	Στοιχεία για τον υδροφόρο ορίζοντα- πίεση πόρων	Στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας Πίσω από το μέτωπο εκσκαφής

4. Εκτίμηση ευστάθειας του μετώπου εξόρυξης της σήραγγας του Ανηλίου με χρήση οργάνων μέτρησης παραμόρφωσης

4.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει το πρόβλημα ευστάθειας του ανατολικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου της Εγνατίας Οδού, και την συμβολή των γεωτεχνικών οργάνων, ως ένα αναγκαίο μέτρο παρακολούθησης της ευστάθειας του κατασκευασμένου πρανούς, μέχρι τη διάνοιξη της σήραγγας. Ένα φαινόμενο αρκετά συνηθισμένο σε περιοχές, όπου τα γεωυλικά έχουν φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, και η ύπαρξη του υδροφόρου ορίζοντα με αρτεσιανές πιέσεις αυξάνει το μέγεθος του προβλήματος της ευστάθειας του πρανούς. Με την έναρξη των εργασιών για τη διαμόρφωση του ανατολικού μετώπου εξόρυξης της σήραγγας, έγινε αποκόλληση του άνω τμήματος του πρανούς με ταυτόχρονη εμφάνιση υδροφορίας. Για την αποκατάσταση του προβλήματος έγιναν κάποιες διορθωτικές ενέργειες-λιθορριπή, βραχοεπίχωμα και αποστράγγιση περιοχής- και τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης παραμόρφωσης, κλισιόμετρα και γεωδαιτικοί στόχοι καθ'όλη τη διάρκεια κατασκεύης του νέου διαμορφώμενου πρανούς.

Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται και τα μέτρα παρακολούθησης ευστάθειας του δυτικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου , με χρήση οργάνων μέτρησης παραμόρφωσης, όπως κλισιόμετρα και δίκτυο γεωδαιτικών υπολογισμών, τα οποία εγκαταστάθηκαν για προληπτικούς λόγους, στην ευρύτερη περιοχή.

4.2 Γενικά στοιχεία Σήραγγας Ανηλίου

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτήν, προέρχονται από την αρχική μελέτη των Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος (1999) και από τη μετέπειτα τροποποιημένη μελέτη των Σωτηρόπουλος και Μουρτζάς (2001). Στην εργασία αυτή οι Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος θα αναφέρονται με τον όρο του Μελετητή και η εταιρεία κατασκευής της σήραγγας με τον όρο του μηχανικού του έργου.

Για την επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν στα πλαίσια της παρακολούθησης της σήραγγας του Ανηλίου, χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα DMM και DIGIPRO για την ανάλυση των δεδομένων, καθώς και όλα εκείνα τα τεχνικά τεύχη, τα οποία υποβλήθηκαν στην τεχνική εταιρεία Εγνατία Όδος Α.Ε., από την ομάδα παρακολούθησης και αφορούν την υπό μελέτη περιοχή. Πρέπει να αναφέρουμε ότι μέλη της ομάδας παρακολούθησης των γεωτεχνικών

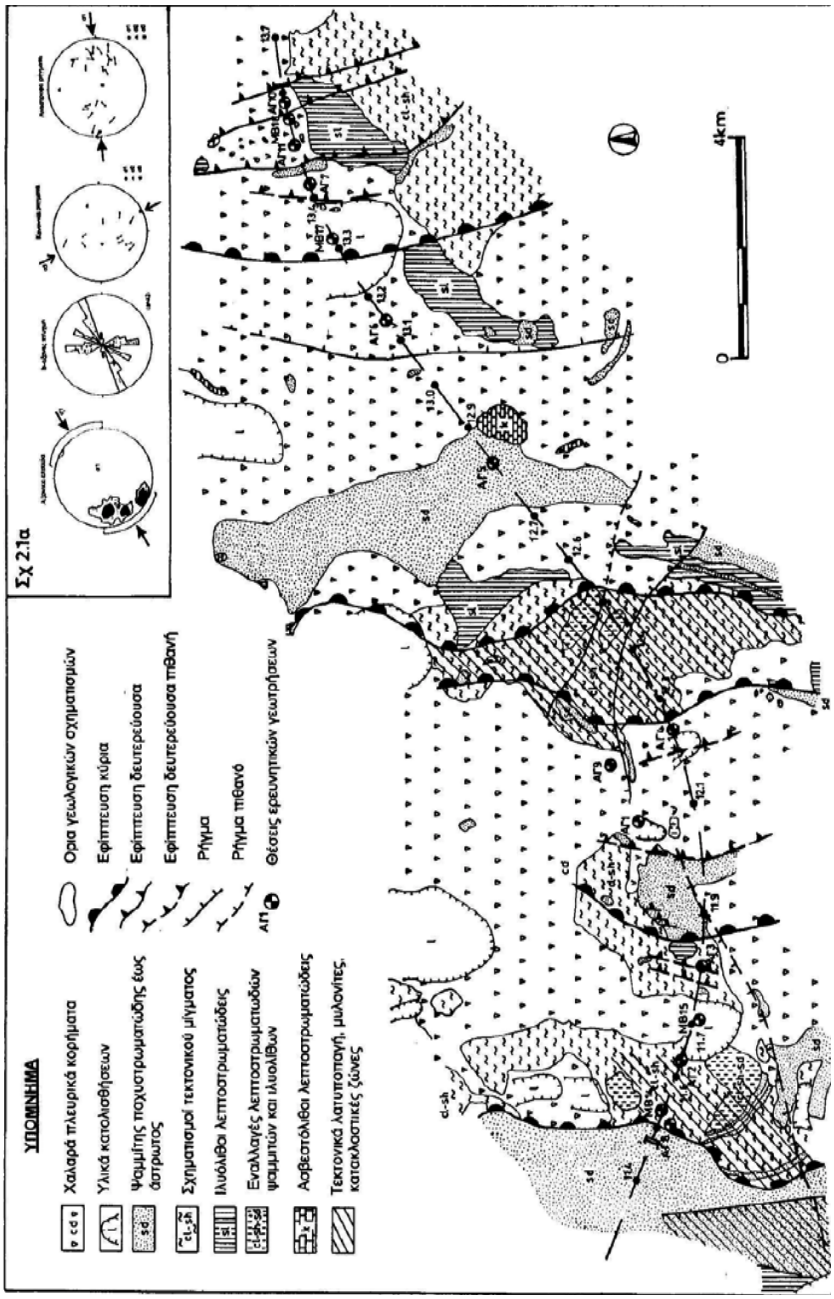
οργάνων (Ε.Ο.Α.Ε.) της Εγνατίας Οδού ήταν ο Εμμανουήλ Χαραλαμπάκης, Πολ. Μηχανικός, και η Δέσποινα Ρούσσου, Γεωλόγος-Γεωτεχνικός.

Η Σήραγγα Ανηλίου με μήκος 2.1χλμ., διέρχεται Νότια του χωριού Ανήλιον και ανήκει στο τμήμα 3.3 της Εγνατίας Οδού. Το δυτικό μέτωπο (είσοδος) βρίσκεται σε υψόμετρο +1034μ και το ανατολικό (έξοδος) σε υψόμετρο +1089μ. Στη παρούσα εργασία θα παρουσιασθούν στοιχεία του ανατολικού άκρου της σήραγγας. Το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων είναι +240μ. Προβλέπεται η κατασκευή δύο σηράγγων με κλίση 2,6% περίπου, δεδομένου ότι προηγείται η γέφυρα στην περιοχή του Μετσόβου με 4 λωρίδες κυκλοφορίας. Η τυπική διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδής, με διάμετρο 10.5μ., ελεύθερο ύψος 7.0μ. στον άξονα και λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3.75μ.

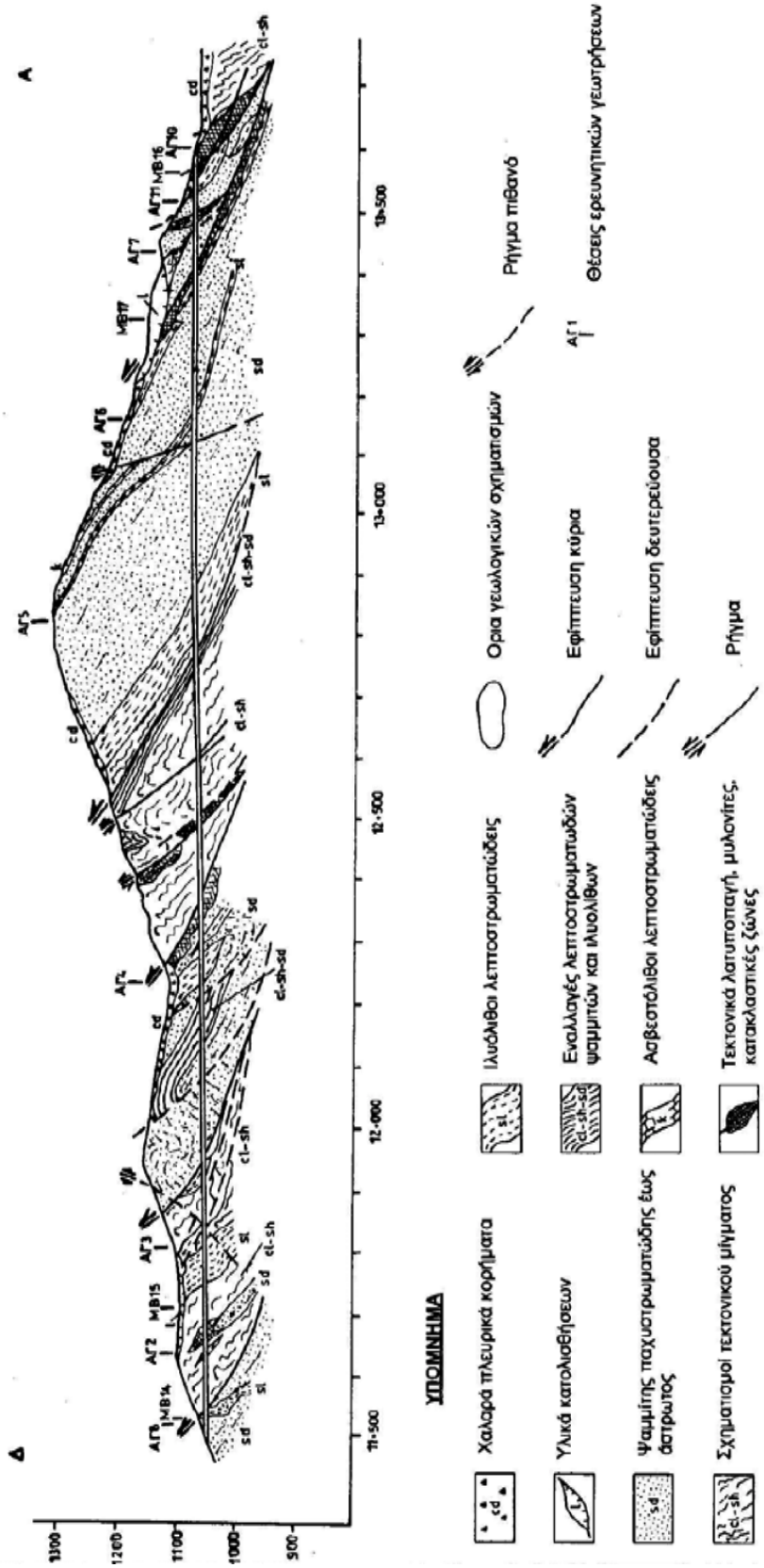
4.3 Γεωλογική δομή ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος

Γενικότερα, η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής συγκροτείται από σχηματισμούς του φλύσχη που διακρίνονται σε τρεις λιθολογικές ομάδες (Ζούρος και Μουντράκης, 1990, Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος,1999) (σχήμα 4.1 και 4.2). Η ομάδα Πολυτσών αποτελεί το λεπιωμένο κάλυμμα του Πινδικού φλύσχη που επώθείται από τα ανατολικά στην ομάδα του Ζαγορίου. Η τελευταία θεωρείται ότι ανήκει στο φλύσχη του συγκλίνου Ηπείρου- Ακαρνανίας. Κατά μήκος της επώθησης παρεμβάλλεται ορίζοντας με έντονη τεκτονική καταπόνηση, χαοτική δομή και ποικίλη λιθολογική σύσταση, στην οποία επικρατούν οι Κρητιδικοί ασβεστόλιθοι της Πίνδου. Σύμφωνα με τον Despairies (1978), η ομάδα των Πολυτσών εξελίσσεται κανονικά προς τα πάνω σε αυτή του Μετσόβου, ενώ οι Ζούρος και Μουντράκης (1990) υποστηρίζουν ότι η επαφή μεταξύ τους είναι τεκτονική και ο φλύσχης του Μετσόβου αποτελεί συνέχεια του Ιόνιου φλύσχη που αποκαλύπτεται με τη μορφή τεκτονικού παραθύρου.

Η γεωλογική δομή, κατά μήκος της χάραξης, χαρακτηρίζεται από πέντε κύριες εφιππεύσεις με διεύθυνση Β-Ν και ανατολικές διευθύνσεις κλίσης, που συνοδεύονται από άλλες μικρότερης κλίμακας και έχουν προκαλέσει τη συνολική στρέψη των σχηματισμών του φλύσχη προς τα ανατολικά με γωνίες 35-40 μοίρες (Σχήμα 4.1 και 4.2).



Σχήμα 4.1. Γεωλογικός χάρτης σήραγγας Ανηλίου. Γεωλογική δομή, Σχεδιασμός και Ανάλυση. Η κινηματική ανάλυση α) των αξόνων των επιπέδων, β) των αξόνων των πτυχών, γ) γραμμώσεις ολίσθησης των κανονικών ρηγμάτων και δ) γραμμώσεις ολίσθησης των ανάστροφων ρηγμάτων επίσης παρουσιάζεται στο σχήμα (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).



Σχήμα 4.2. Γεωλογική μηκοτομή όλης της σήραγγας (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

4.4 Γεωλογία και υπόγεια νερά του ανατολικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου

Από τα σχήματα (4.1) και (4.2), διακρίνεται η τελευταία πέμπτη εφίππευση, στην ανατολική κατάληξη και η οποία συνοδεύεται από τέσσερις τουλάχιστον, μικρότερης κλίμακας, παράλληλης διεύθυνσης εφιππεύσεις. Σε αυτές οφείλονται και η έντονη τεκτονική καταπόνηση των σχηματισμών. Στην υπό μελέτη περιοχή, επικρατούν ψαμμίτες, λεπτοστρωματώδεις ιλυολίθους με αραιές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών, αργιλοποιημένες ζώνες μυλωνιτών και τεκτονικών λατυποπαγών και πτυχωμένοι.

Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και σύμφωνα με τα στοιχεία της γεωτεχνικής μελέτης για τα τελευταία 1000μ περίπου, και με φορά από τα ανατολικά προς τα δυτικά, (βλέπε σχήμα 4.2 γεωλογική μηκοτομή), έχει ως ακολούθως:

Στα αρχικά 215μ περίπου αναπτύσσεται μία έντονα διαταραγμένη ζώνη, η οποία διαμορφώνει την πέμπτη κατά σειρά εφίππευση, από δυτικά προς ανατολικά, καθώς και μία σειρά από δευτερεύουσες εφιππεύσεις. Οι σχηματισμοί του τεκτονικού μείγματος, που αναμένεται να διατρηθούν αποτελούνται από αργιλοποιημένους ιλυόλιθους, υλικά μυλωνίτη και τεκτονικά λατυποπαγή.

Λεπτοστρωματώδεις ιλυόλιθους με αραιές ενδιαστρώσεις μεσοστρωματωδών ψαμμιτών και το μεγαλύτερο μέρος πάχους 530μ μέσο- έως παχυ-στρωματωδών συμπαγών ψαμμιτών. Επίσης, θα συναντηθεί ένα ρήγμα κάθετο στον άξονα της σήραγγας με διεύθυνση Β- Ν και απότομη κλίση.

Έντονα κερματισμένους αποσαθρωμένους και αργιλοποιημένους ιλυόλιθους, που περιέχουν ογκόλιθους και σώματα ψαμμιτών, εναλλαγές ψαμμιτών και ιλυολίθων, σε χαοτική διάταξη. Πρόκειται για σχηματισμούς του τεκτονικού μείγματος, που παρεμβάλλεται μεταξύ της τρίτης και τέταρτης κύριας εφίππευσης (περίπου 370μ).

Οι τενικογεωλογικές ενότητες που προέκυψαν, από τα ανατολικά, σύμφωνα με την πρόταση του ISRM (Brown, 1981), δίνονται στον Πίνακας 4.1:

Πίνακας 4.1. Τεχνικογεωλογική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών που εντοπίστηκαν κατά τη διάτρηση της σήραγγας (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

Τεχνικογεωλογικές ενότητες	**Περιγραφή**
ΤΕ1	Εδαφικά υλικά, πλευρικά κορήματα και υλικά αποσάθρωσης
ΤΕ2	Ζώνες ρηγμάτων, με επικράτηση μαλακού αργιλικού υλικού. Κατά

	θέσεις εμφανίζονται τεκτονικά λατυποπαγή και έντονα διαρρηγμένο βραχώδες υλικό. Το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή αντοχή.
ΤΕ3	Τεκτονικό μείγμα κυρίως ερυθρόχρωμων ιλυολίθων με εναλλαγές ψαμμίτη (κόκκινος φλύσχης). Τα πετρώματα εμφανίζονται έντονα διαρρηγμένα και πτυχωμένα. Συμπαγή τεμάχη ιλυολίθων ή ψαμμιτών σε διάφορες διαστάσεις εμφανίζονται εντός αργιλικής ή ιλυώδους μάζας. Χαρακτηριστική είναι η ανομοιογένεια, η χαοτική δομή και η πολύ μικρή αντοχή (σχήμα 6.4& 6.5). Οι ιδιότητες του μείγματος εμφανίζονται να είναι αυτές ενός εδαφικού υλικού. Οι αντοχές των τεμάχων εμφανίζουν διασπορά. Κατά θέσεις εμφανίζονται ζώνες λεπτόκοκκου μυλωνίτη με μεταβλητό πάχος.

Όσο πλησιάζουμε προς το δυτικό μέτωπο οι σχηματισμοί ναι μεν είναι οι ίδιοι ωστόσο υπάρχουν μεσο- έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες και η αντοχή των αδιατάρρακτου πετρώματος είναι από μέση εώς πολύ υψηλή (σχήματα 4.3 και 4.4). Υπάρχουν μεγάλες ασυνέχειες με μέσες αποστάσεις, με ελαφρά οξειδωμένες επιφάνειες και από τραχείς έως και επίπεδες επιφάνειες των ασυνεχειών.

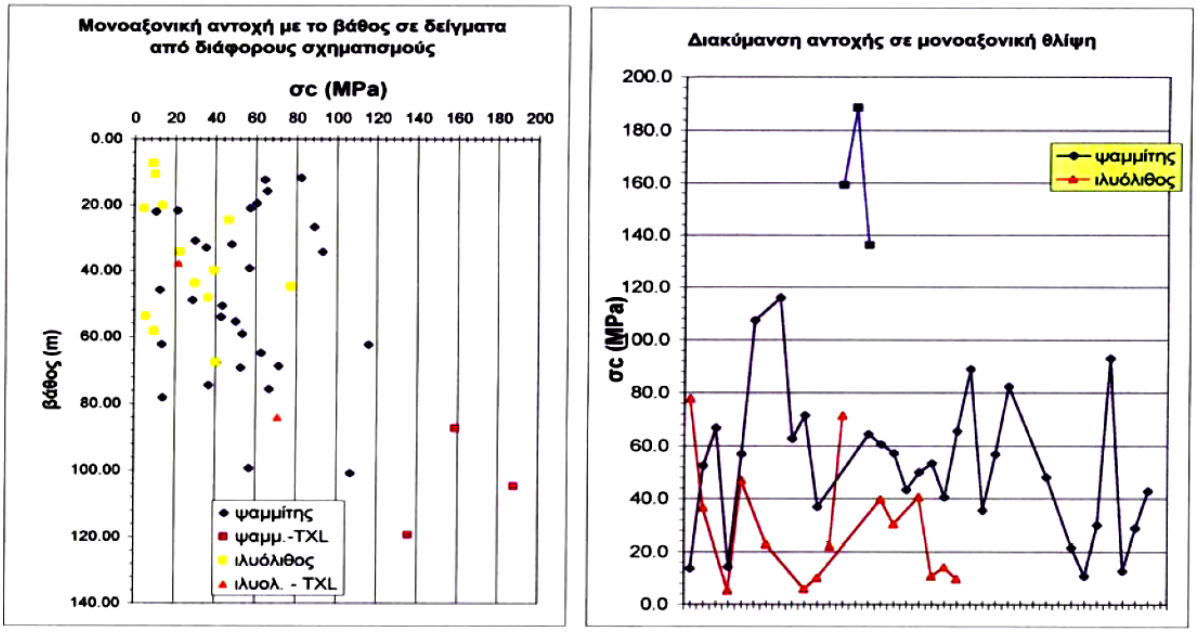
Οι ψαμμίτες λόγω της ανάπτυξης του δευτερογενούς πορώδους, ανήκουν στους περατούς σχηματισμούς της περιοχής και αναμένονται εποχιακές κατεισδύσεις νερών σε ζώνες έντονου κερματισμού του πετρώματος και κατά μήκος ρηγμάτων που διασχίζουν τη μάζα τους. Οι ιλυόλιθοι και οι σχηματισμοί του τεκτονικού μείγματος, λόγω της αργιλομιγούς και ετερογενούς σύστασής τους, χαρακτηρίζονται από εναλλαγές αδιαπέρατων και διαπερατών ζωνών, που διαμορφώνουν συνθήκες ανάπτυξης περιορισμένης δυναμικότητας επικρεμάμενης υδροφορίας.

Το καθεστώς των υπόγειων νερών από τα ανατολικά έχει ως εξής:

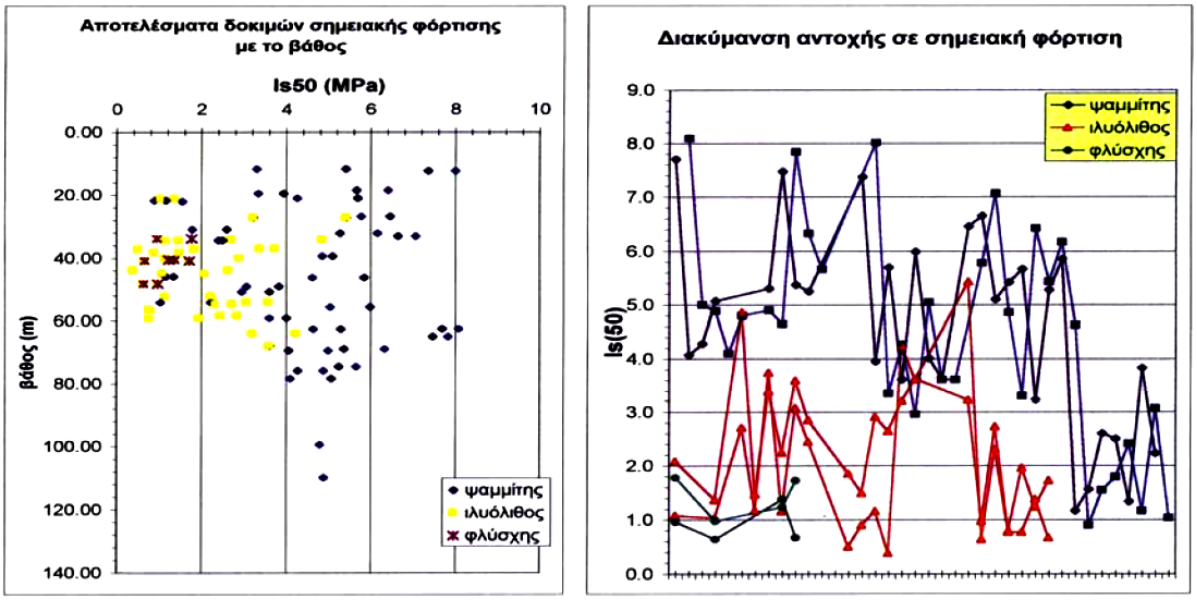
Στα πρώτα 60μ περίπου αναμένεται μόνιμη παρουσία νερού τόσο κατά τη διάτρηση όσο και κατά τη διαμόρφωση του ανατολικού μετώπου της σήραγγας.

Στα επόμενα 150μ περίπου, και λόγω της λιθολογικής ετερογένειας της βραχομάζας, θα εναλλάσσονται στεγνές συνθήκες με συνθήκες εποχιακών κατεισδύσεων. Επίσης υπάρχει ο κίνδυνος εισροών νερού κατά μήκος ρηγμάτων και κατακλαστικών ζωνών.

Όσο προχωράει η διάνοιξη προς τα δυτικά θα επικρατούν οι εναλλαγές των στεγνών συνθηκών (παρουσία συμπαγών σχηματισμών) και των συνθηκών με εποχιακές κατεισδύσεις (παρουσία χαλαρών σχηματισμών ή ακόμα και στις επιφάνειες ασυνέχειας) καθώς επίσης και πιθανές εισροές νερού λόγω της ύπαρξης των ρηγμάτων.



Σχήμα 4.3: α)Μονοαξονική αντοχή σε συνάρτηση με το βάθος β) Διακύμανση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).



Σχήμα 4.4. α) Σημειακή φόρτιση με το βάθος β) Διακύμανση αντοχής σε σημειακή φόρτιση (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

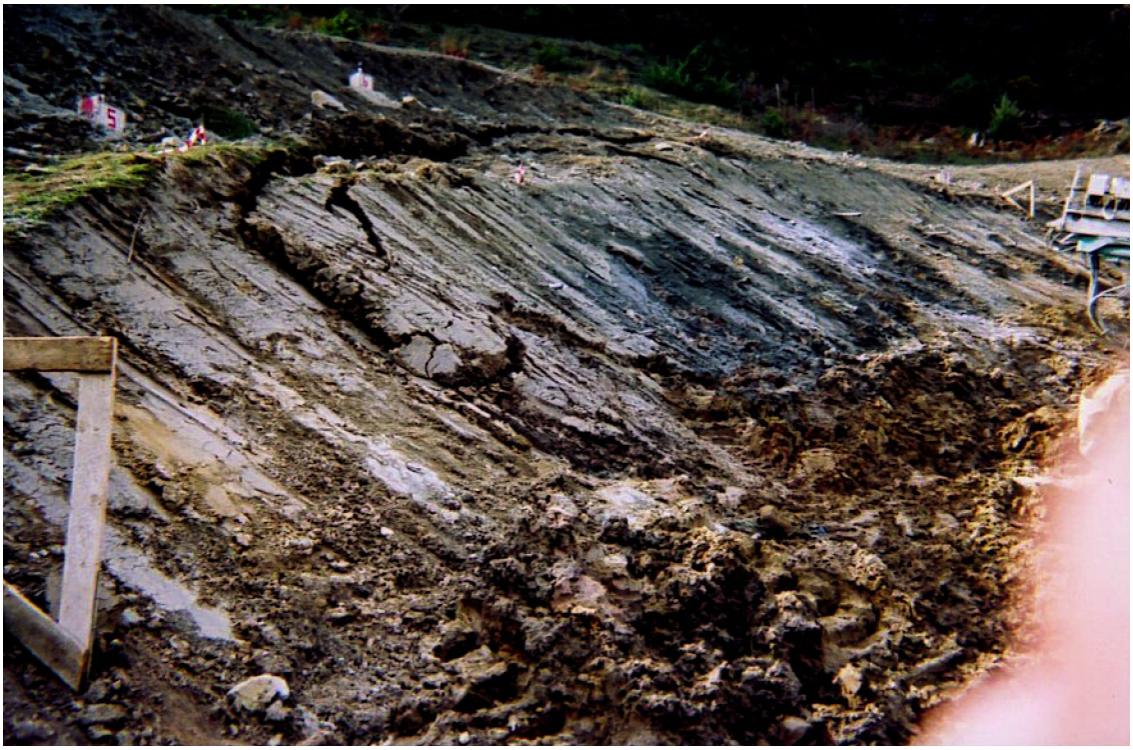
4.4.1 Ταυτότητα αστοχίας

Με την έναρξη των εργασίων για την κατασκευή των δύο σηράγγων στο ανατολικό μέτωπο, παρουσιάστηκαν και τα πρώτα προβλήματα. Πιο συγκεκριμένα, στο ανώτερο Νότιο τμήμα του προσωρινού πρανούς της εκσκαφής παρουσιάστηκε αποκόλληση (ρηγμάτωση) τμήματος του πρανούς, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.5), με σύγχρονη εμφάνιση μεγάλης υδροφορίας. Δεν υπήρξε ανατροπή του πρανούς διότι η ρηγμάτωση βοήθησε σε σύντομη εκτόνωση των υδροστατικών πιέσεων. Το πρανές είχε σχετικά ήπια κλίση 2:3.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στις παραπάνω παραγράφους για τη μελέτη της περιοχής πριν την έναρξη των εργασιών, ήταν γνωστό ότι στην περιοχή του ανατολικού μετώπου της σήραγγας, επικρατούν ερυθρόχρωμοι ιλυόλιθοι με εναλλαγές ψαμμιτικού υλικού, έντονα διαρρηγμένα και πτυχωμένα με κύριο χαρακτηριστικό την ανομοιογένεια, τη χαοτική δομή και την πολύ μικρή αντοχή. Επίσης, ήταν αναμενόμενη η μόνιμη εφύγρανση, καθώς επίσης και οι συχνές εναλλαγές στεγνών συνθηκών και συνθηκών εποχιακών κατεισδύσεων ή ακόμα και ο κίνδυνος εισροής νερών κατά μήκος ρηγμάτων και κατακλαστικών ζωνών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η γεωλογική πολυπλοκότητα και ο περιορισμένος αριθμός γεωτρήσεων δεν επέτρεψε τη σύνταξη γεωλογικών τομών, με αποδεκτή σαφήνεια, παρά μόνο εργαλείο την επιφανειακή γεωλογία. Επίσης, στην περιοχή είχαν εγκατασταθεί σε δύο γεωτρήσεις ΑΓ10 και ΑΓ11, ένα πιεζόμετρο ανοικτού τύπου και ένας κλισιομετρικος σωλήνας για την λήψη μετρήσεων. Οι μετρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν παρά μόνο οι μετρήσεις βάσεις, λόγω της έναρξης των εργασιών διαμόρφωσης του μετώπου.

Από την αξιολόγηση των δύο (2) προαναφερόμενων γεωτρήσεων, τα εργαστηριακά αποτελέσματα, τη μακροσκοπική εξέταση των μετώπων των εκσκαφών, τις μετρήσεις των πιεζομέτρων και των κλισιομέτρων και τη γεωλογία της επιφάνειας, καθορίστηκαν οι τεχνικογεωλογικές ενότητες που εμφανίζονται στη γεωλογική τομή, στο σχήμα (4.7).

Η εμφάνιση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα με αρτεσιανές πιέσεις ήταν ένα στοιχείο έκπληξης, δεδομένου ότι πριν την εκτέλεση των δύο γεωτρήσεων δεν υπήρχαν επαρκείς πληροφορίες. Στη μία από τις δύο γεωτρήσεις είχε τοποθετηθεί κλισιομετρικός σωλήνας και είχαν παρθεί δεδομένα μόνο από τρεις μετρήσεις. Από την αξιολόγηση των δεδομένων αυτών δεν είχε παρατηρηθεί τίποτα αξιόλογο ή κάποια ένδειξη για κίνηση δεδομένου ότι το χρονικό διάστημα στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις ήταν πολύ μικρό, μόνον 2 μήνες πριν την έναρξη των εργασιών και επίσης, στο διάστημα αυτό δεν σημειώθηκαν έντονες βροχοπτώσεις για να αναγνωρισθεί η συμπεριφορά της βραχομάζας. Το κλισιόμετρο ΑΓ10 καταστάφηκε με την έναρξη των εργασιών για την κατασκευή του πρανούς. Στις θέσεις μεγάλου εδαφικού καλύματος, πάχους 14- 20μ, η στάθμη του υδροφόρου εμφανίστηκε εντός του πάχους του καλύμματος.



Σχήμα 4.5. Φωτογραφία στην οποία φαίνεται η αποκόλληση (ρηγμάτωση) του άνω τμήματος του Νότιου πρανούς κάτω από του στόχους Σ5 και Σ6, με σύγχρονη εμφάνιση μεγάλης υδροφορίας (η οποία όμως εκτονώθηκε σύντομα) (Μουρτζας και Σωτηρόπουλος, 1999).

4.4.2 Μέτρα για την αντιμετώπιση της αστοχίας του ανατολικού πρανούς

Ο ανασχεδιασμός του πρανούς έγινε άμεσα για την αποφυγή περαιτέρω προβλημάτων. Ορίστηκαν κάποια μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος και τα οποία φαίνονται στα σχήματα 4.6 και 4.7. Καθοριστικός παράγοντας στην επιλογή του τρόπου αντιμετώπισης, ήταν το καθεστώς του υπό πίεση υπόγειου ορίζοντα και η διεύθυνση μετακίνησης κατά τη διεύθυνση Α-Β, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.10). Όταν αποφασίστηκε ο ανασχεδιασμός του τεχνικού του μετώπου οι επιλογές ήταν δύο:

Πρώτη επιλογή: Κατασκευή συνεχούς πασσαλοφράγματος, σε σχήμα τόξου και σε μήκος περίπου 50μ ανάντι του εκσκαφέντος πρανούς που εμφάνισε αστάθεια, όπου το βάθος του βραχώδους υποβάθρου ήταν μικρό. Στη συνέχεια αφαίρεση των χαλαρών υλικών κατάντι του τοίχου, που οδηγούσε σε αποφόρτιση της περιοχής του τεχνικού. Η λύση αυτή απλούστερη και οικονομική δεν υιοθετήθηκε, διότι υπήρχε το ενδεχόμενο, γεγονός της γεωλογικής αποσταθεροποίησης και η δημιουργία μεγάλης τάξεως προβλημάτων μέχρι την κατασκευή του πασσαλοφράγματος.

Δεύτερη επιλογή: Απομάκρυνση μέρους του υλικού αστοχίας και επανεπίχωση της περιοχής. Ειδικότερα, προτάθηκε κατασκευή βραχοεπιχώματος το οποίο θα βοηθήσει τόσο για την αποστράγγιση της περιοχής έτσι ώστε το επίχωμα να λειτουργήσει σταθεροποιητικά τόσο για τα επιφανειακά υλικά, όσο και για τα βαθύτερα για το καθεστώς τεκτονικής ισορροπίας, που ήταν αβέβαιο. Ο ανασχεδιασμός του τεχνικού (βλ. Σχήμα 4.7) έγινε με βάση τη δεύτερη επιλογή, σύμφωνα με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι εξής ενέργειες:

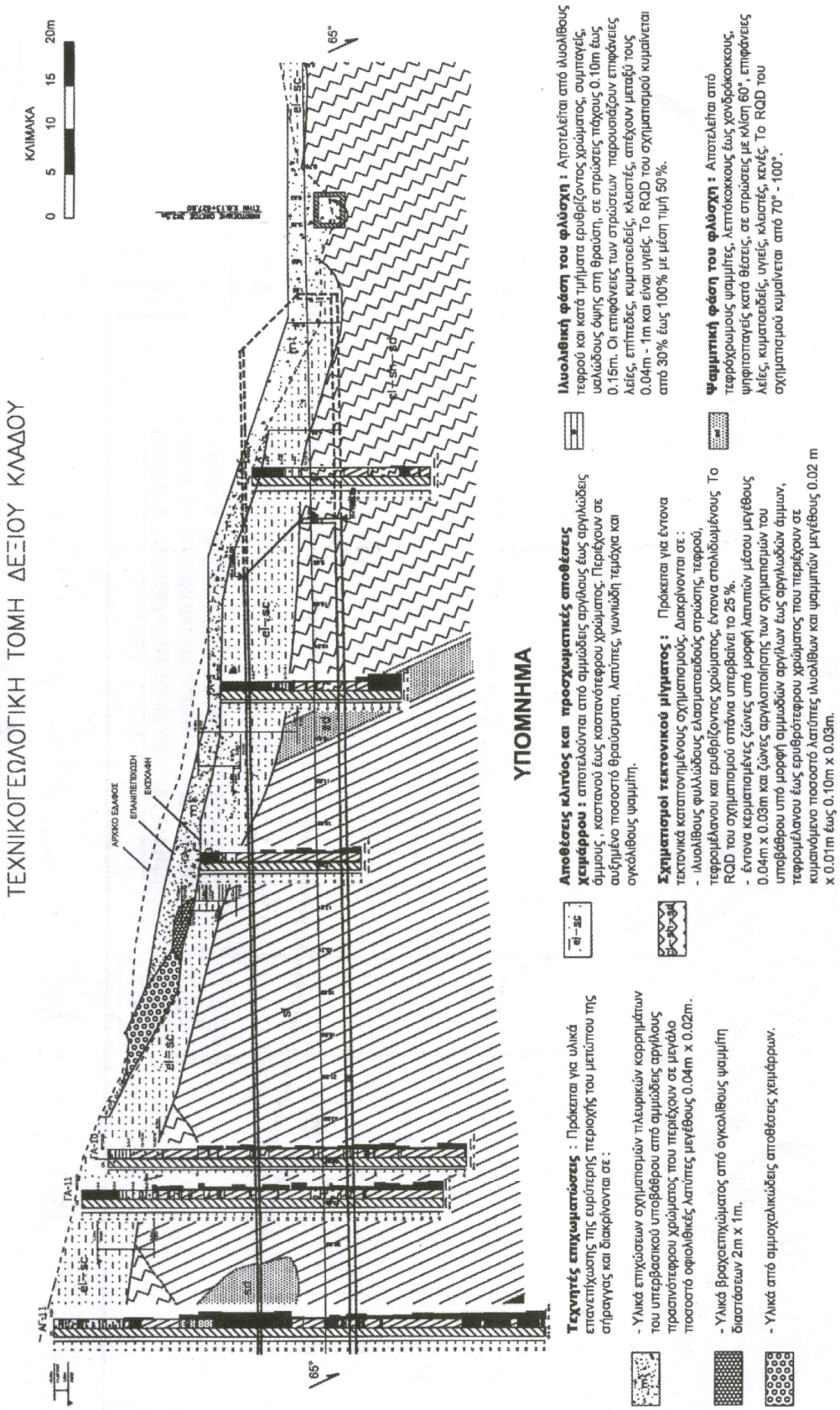
- Απομάκρυνση του υλικού αστοχίας ως το βάθος εκσκαφής (σχήμα 4.7).
- Κατασκευή επανεπίχωσης κατά στρώσεις μέχρι της τελικής επιφάνειας. Ως υλικό επανεπίχωσης χρησιμοποιήθηκε υλικό περιδοτίτη, από δανειοθάλαμο πλησίον του έργου.
- Αποστράγγιση των πρανών. Έγινε με τη διάνοιξη οριζόντιων στραγγιστικών γεωτρήσων που καλύπτουν τα πρανή εντός της περοχής του έργου καθώς και σε τμήμα του φυσικού πρανούς. Μεταξύ φυσικών και διαμορφωμένων πρανών δημιουργήθηκε αναβαθμός, στον οποίο τοποθετήθηκαν συλλέκτες υδάτων για την αποστράγγιση των πρανών. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην όλη ευστάθεια του πρανούς, η αποστράγγιση ήταν αυτή που έπαιξε τον κυρίαρχο ρόλο, δεδομένου ότι λειτούργησε σωστά και γινόταν η εκτόνωση των υδροστατικών πιέσεων ακόμα και σε περιόδους με έντονες βροχοπτώσεις
- Επιπρόσθετα, έγινε η επιλογή 4 σημείων στα οποία κατασκευάστηκαν φρέατα, τα οποία θα συλλέγουν τα νερά από τις οριζόντιες αποστραγγιστικές γεωτρήσεις. Τόσο η λιθορριπή (ύψους περίπου 7μ) όσο και το βραχοεπίχωμα (ύψους περίπου 2μ), βοηθάει την αποστράγγιση της περιοχής.

- Σύστημα εκσκαφής και επανεπίχωσης (cut&cover) (αριστερός κλάδος) για ύψη εκσκαφών μέχρι 10μ και μέθοδο επανεπίχωσης και εκσκαφής (cover&cut) (δεξιός κλάδος) για μεγαλύτερα ύψη εκσκαφής. Η εκσκαφή έγινε σε πρώτο στάδιο μέχρι το επίπεδο της ερυθράς και σε δεύτερο στάδιο έγινε εκσκαφή βαθύτερα για την κατασκευή ανάστροφου τόξου.

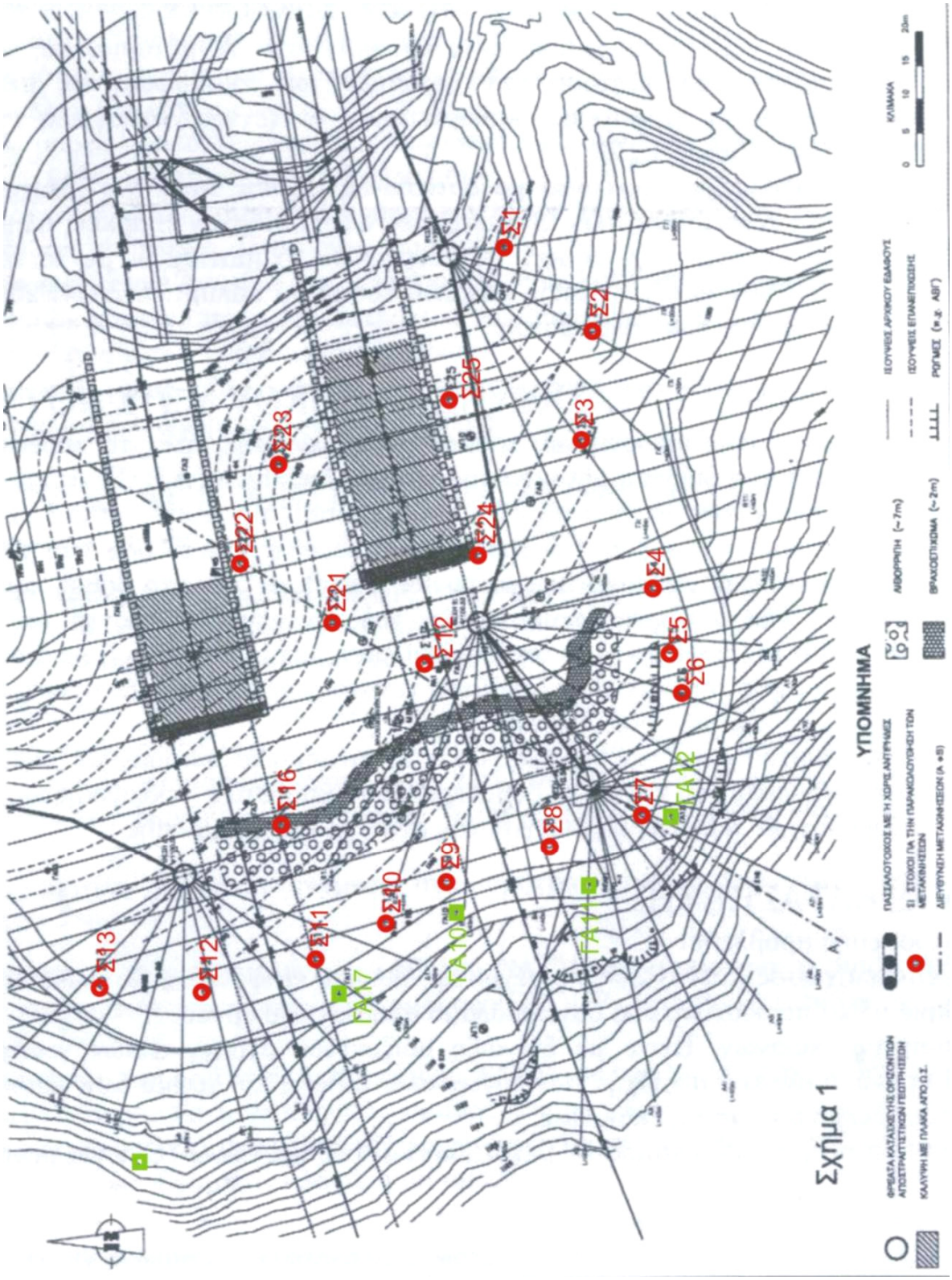
Η αλληλουχία των φάσεων εκσκαφής και τα μέλη κάθε συστήματος παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8, (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

Μετά το πέρας των εργασιών της λιθορριπής, αποφασίστηκε, για λόγους ασφάλειας και πρόληψης, η παρακολούθηση των εργασιών διαμόρφωσης του πρανούς. Χρησιμοποιήθηκαν όργανα μέτρησης παραμόρφωσης, για τον έλεγχο της ευστάθειας του κατασκευασμένου πρανούς. Έγινε η τοποθέτηση ακίδων – χρήση γεωδαιτικών υπολογισμών- σε όλο το εύρος της περιοχής παρακολούθησης, καθώς και κλισιόμετρα πάνω απτο διαμορφωμένο πρανές.

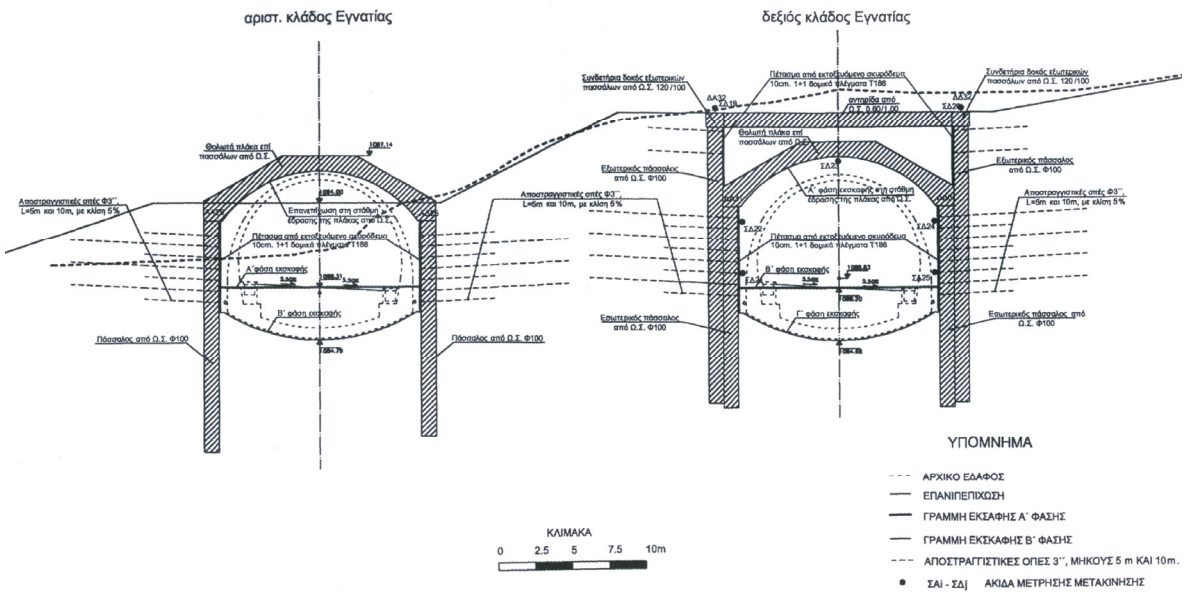
Μεταξύ φυσικών και διαμορφωμένων πρανών δημιουργήθηκε αναβαθμός, στον οποίο τοποθετήθηκαν 4 κλισιόμετρα καθώς.



Σχήμα 4.6: Τεχνικογεωλογική τομή μετά τη δημιουργία της αστοχίας και την αντιμετώπιση αυτής (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).



Σχήμα 4.7. Τοπογραφικός χάρτης περιοχής μετά την αστοχία και τον τρόπο επέμβασης. Απεικονίζονται οι θέσεις των ακίδων και των κλισιομέτρων (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).



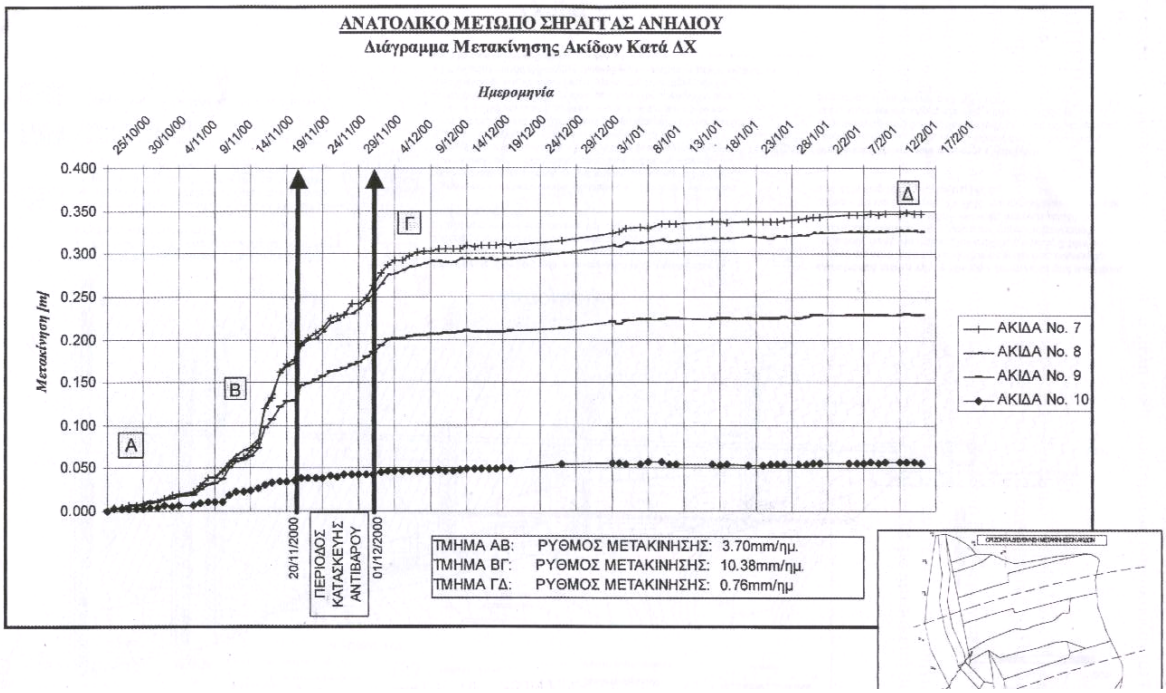
Σχήμα 4.8. Φάσεις εκσκαφής (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

4.4.3 Παρακολούθηση ευστάθειας κατασκευασμένου πρανούς στο ανατολικό μέτωπο

4.4.3.1 Χρήση Ακίδων

Όπως φαίνεται στο σχήμα (4.7) τοποθετήθηκαν 25 ακίδες και οι λήψεις των μετρήσεων γίνονταν από σταθερό σημείο (έξω από το χώρο εργασιών). Οι μετρήσεις των ακίδων πραγματοποιήθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα, περίπου ανά 5 ημέρες, και ανάλογα με τις εργασίες που λάμβαναν χώρα. Οι μετρήσεις έγιναν από τοπογράφο μηχανικό του έργου. Η αξιολόγηση αυτών έγιναν λαμβάνοντας υπόψην τα όρια ακρίβειας του οργάνου και το ημερολόγιο έργου, στο οποίο αναφέρονται όλες οι εργασίες που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις. Οι εργασίες που επηρέασαν τις μετρήσεις των ακίδων ήταν κυρίως οι εργασίες κατασκευής του αντίβαρου, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο χρονικό διάστημα από 20/11/00 έως 1/12/00. Στο παρακάτω διάγραμμα έχουν χαρτογραφηθεί τα δεδομένα μέτρησης των ακίδων (μετακίνηση σε mm) σε συνάρτηση με την ημερομηνία λήψης της μέτρησης. Από τις 25 ακίδες που τοποθετήθηκαν, οι ακίδες 7, 8, 9, 10, οι οποίες βρίσκονται ακριβώς πάνω από τα μέτωπα των δύο υπό κατασκευή σηράγγων , έδειξαν μετακινήσεις στο τμήμα ΑΒ, το οποίο φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος (4.9). Στο επόμενο τμήμα της καμπύλης ο μέσος ρυθμός ήταν της τάξης των 10,38χιλ./ημ., σχεδόν σταθερός, και η αύξηση αυτή ήταν αποτέλεσμα της κατασκευής του αντίβαρου. Στο επόμενο χρονικό διάστημα, στο τμήμα ΓΔ, ο μέσος ρυθμός ήταν 0,76χιλ./ημ, και πιο αναλυτικά φθείνει μέχρι που σταθεροποιείται.

Το συμπέρασμα από τις μετρήσεις αυτές, είναι ότι ο τρόπος αντιμετώπισης που υιοθετήθηκε απέδωσε το επιθυμητό αποτέλεσμα για την ευστάθεια του πρανούς. Μετά την περίοδο κατασκευής του αντίβαρου, δεν παρατηρούνται μετακινήσεις.



Σχήμα 4.9. Αποτελέσματα μετακινήσεων από τις ακίδες (Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος, 1999).

4.4.3.2 Χρήση κλισιομετρικών οργάνων

Οι μετρήσεις από τα κλισιόμετρα πραγματοποιήθηκαν αμέσως μετά την κατασκευή του αναβαθμού μεταξύ του φυσικού και του διαμορφωμένου πρανούς. Η αξιολόγηση έγινε από την ομάδα της Ε.Ο.Α.Ε. και με συνεργασία τόσο του μηχανικού του έργου, όσο και του μελετητή.

Οι διατρήσεις των οπών πραγματοποιήθηκαν με διατρητικό μηχάνημα χωρίς να γίνει πυρηνοληψία. Τοποθετήθηκαν κλισιομετρικοί σωλήνες βάθους έως 40μ, δηλαδή μέσα στο υπόβαθρο της περιοχής το οποίο ανήκει στην ιλυολιθική φάση του φλύσχη. Το βάθος του κλισιομετρικού σωλήνα επιλέγει έτσι ώστε να πακτώνεται μέσα στο υπόβαθρο. Με τον τρόπο αυτό παρακολουθείται η συμπεριφορά του τεχνητού πρανούς σε σχέση με το φυσικό.

Η αξιολόγηση των μετρήσεων έγινε από τα διαγράμματα της συνολικής αθροιστικής και της σημειακής μετατόπισης, των ποσών ελέγχου, που αφορά την ακρίβεια των μετρήσεων και το διάγραμμα της απόκλισης του κλισιομετρικού σωλήνα από την κατακόρυφο. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βάσεις, περίπου μια εβδομάδα μετά το πέρας της τοποθέτησης της κεφαλής του κάθε κλισιομετρικού σωλήνα. Η συχνότητα με την οποία πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις έγινε σύμφωνα με το πρόγραμμα των εργασιών που λάμβαναν χώρα στο εργοτάξιο, καθώς επίσης και με τα αποτελέσματα που προέκυπταν από τις προηγούμενες μετρήσεις.

Από τους 4 κλισιομετρικούς σωλήνες, διαπιστώθηκε ότι οι μετρήσεις του κλισιομέτρου ΓΑ17 δεν είναι αξιόπιστες και αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο έγινε η τοποθέτηση του κλισιομετρικού σωλήνα και τον τρόπο ενεμάτωσης, οι οποίοι προκάλεσαν μία παραμόρφωση του σωλήνα, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.10).

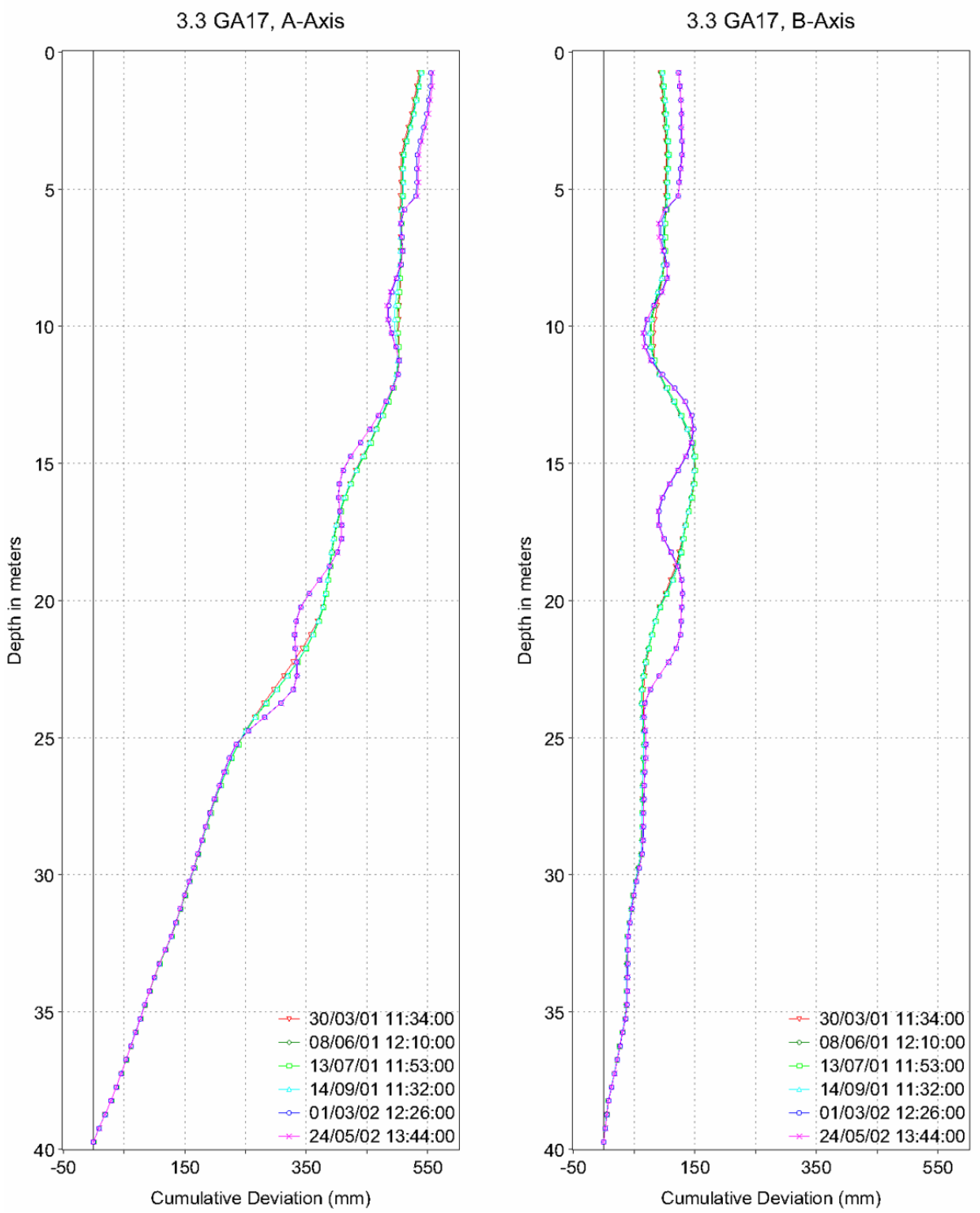
Στις μετρήσεις από το κλισιόμετρο ΓΑ12, παρουσιάζεται μία ένδειξη κίνησης στα πρώτα 5μ, η οποία οφείλεται στο λανθασμένο τρόπο ενεμάτωσης και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας αστάθειας του σωλήνα σε αυτά τα άνω 5μ, (σχήμα 4.11).

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων του κλισιόμετρου ΓΑ10, παρατηρείται μία ένδειξη κίνησης στα 3μ με φθίνοντα ρυθμό μετακίνησης, (σχήμα 4.12). Από το ημερολόγιο έργου διαπιστώθηκε ότι στο βάθος αυτό έγινε οριζόντια διάτρηση για την τοποθέτηση αποστραγγιστικού σωλήνα, πλησίον του κλισιομετρικού σωλήνα, λίγο πριν ληφθεί η μέτρηση που έδειξε την πιθανή κίνηση, δηλαδή πριν τις 08/06/01.

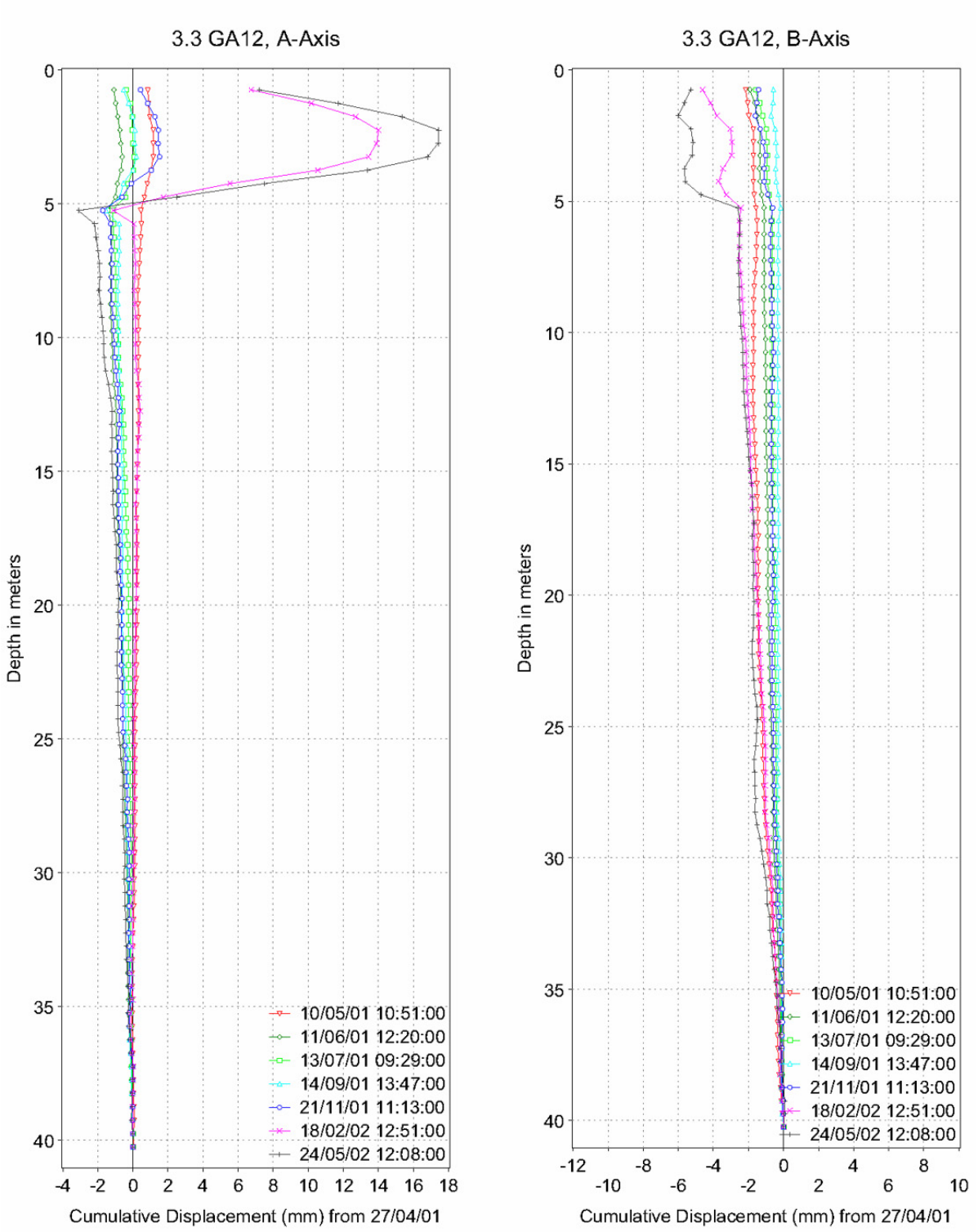
Από την αξιολόγηση των μετρήσεων του κλισιομέτρου ΓΑ11, παρατηρούνται ενδείξεις κινήσεων στα βάθη 8μ, 15μ και 26μ. Από το ημερολόγιο έργου διαπιστώθηκε ότι οι ενδείξεις αυτές, οφείλονται σε εργασίες που έλαβαν χώρα για τη διαμόρφωση του πρανούς και πιο συγκεκριμένα στα βάθη αυτά και πολύ κοντά στον κλισιομετρικό σωλήνα, έγιναν οριζόντιες διατρήσεις για την τοποθέτηση αποστραγγιστικών σωλήνων. Αυτό φαίνεται και από τις επόμενες μετρήσεις, όπου διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός των κινήσεων φθείνει και τελικά σταθεροποιείται αμέσως μετά το πέρας των εργασιών των διατρήσεων αυτών (σχήματα 4.11, 4.12 και 4.13).

Πρέπει να αναφερθεί ότι η τοποθέτηση των τεσσάρων κλισιομετρικών σωλήνων δεν έγιναν ταυτόχρονα και αυτό παρατηρείται και από τις αρχικές μετρήσεις αναφοράς. Επίσης, το υλικό γύρω από τον κλισιομετρικό σωλήνα είναι χαλαρό στα πρώτα 8m και από τα 8m και βαθύτερα ο σχηματισμός είναι κερματισμένος έως κατακερματισμένος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εναλλαγές των στεγνών (ανομβρία) περιόδων και των συνθήκων με εποχιακές κατεισδύσεις (έντονες βροχοπτώσεις), να επηρεάζουν τη συμπεριφορά της βραχομάζας και με συνέπεια και τις μετρήσεις. Αυτή η επίδραση εμφανίζεται ως κίνηση στα διαγράμματα των αθροιστικών μετακινήσεων με έναν αυξομειώμενο ρυθμό μετακίνησης, (σχήμα 4.13). Κατά συνέπεια μία καταγραφή των έντονων βροχοπτώσεων βοηθάει στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, και άρα στην αποφυγή περαιτέρω μέτρων προστασίας για την ευστάθεια και άρα αύξηση του κόστους κατασκευής.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων, παρατηρείται η ευχρηστία του οργάνου και η λήψη για άμεσα συμπεράσματα από τις μετρήσεις. Είναι σημαντική η ερμηνεία να γίνεται με προσοχή για να εντοπιστούν τυχόν λαθεμένες ενδείξεις μετακινήσεων όπως αναφέρεται παραπάνω. Ο εντοπισμός αυτών των λαθεμένων μετακινήσεων είναι εύκολος, και το σημαντικότερο είναι ότι δεν είναι επηρεάζουν την περαιτέρω ερμηνεία του διαγράμματος. Πρόκειται για τυχαία λάθη και μπορούν να αποφευχθούν με την ορθολογική χρήση των βημάτων εγκατάστασης του κλισιομετρικού σωλήνα μέσα στη γεώτρηση και τον σωστό τρόπο ενεμάτωσης. Η συνέχιση των μετρήσεων είναι εφικτή αρκεί να γίνεται πάντα αναφορά των προβλημάτων αυτών, για την αποφυγή λαθεμένων συμπερασμάτων από τρίτους που δεν έχουν την εμπειρία της αξιολόγησης των διαγραμμάτων. Επίσης, η ενημέρωση των εργασιών στο χώρο του εργοταξίου είναι σημαντική, για την ερμηνεία των μετρήσεων. Η απουσία ενδείξεων μικρομετακινήσεων – και ρηγματώσεων-, σημαίνει ότι το τεχνητό πρανές λειτουργεί σωστά.

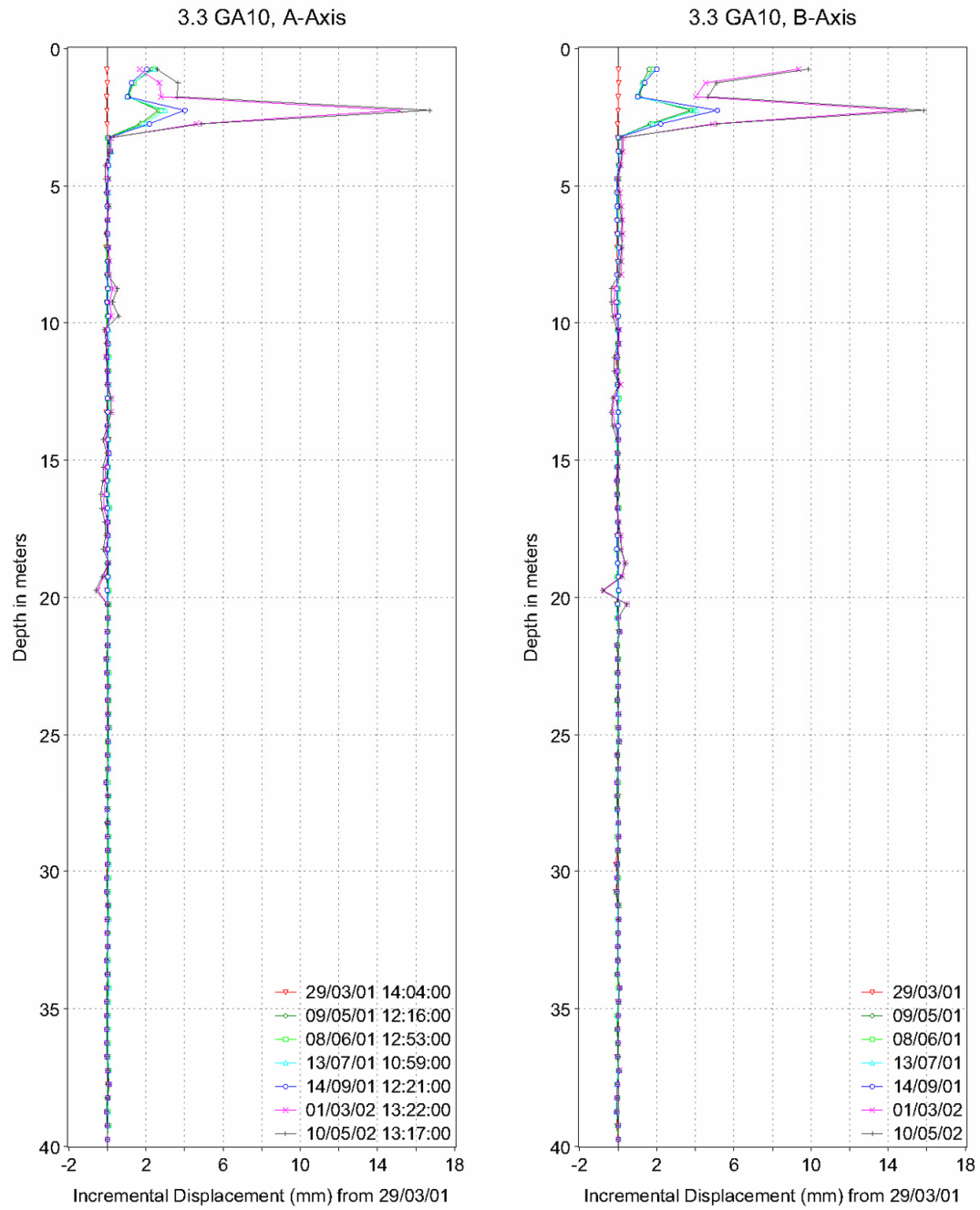


Σχήμα 4.10. Διάγραμμα αθροιστικής απόκλισης ΓΑ17. Παρατηρείται η μη σωστή τοποθέτηση του κλισιομετρικού σωλήνα και προβλήματα στην ενεμάτωση, αζιμούθιο: 12ο, Ομάδα Ε.Ο.Α.Ε.

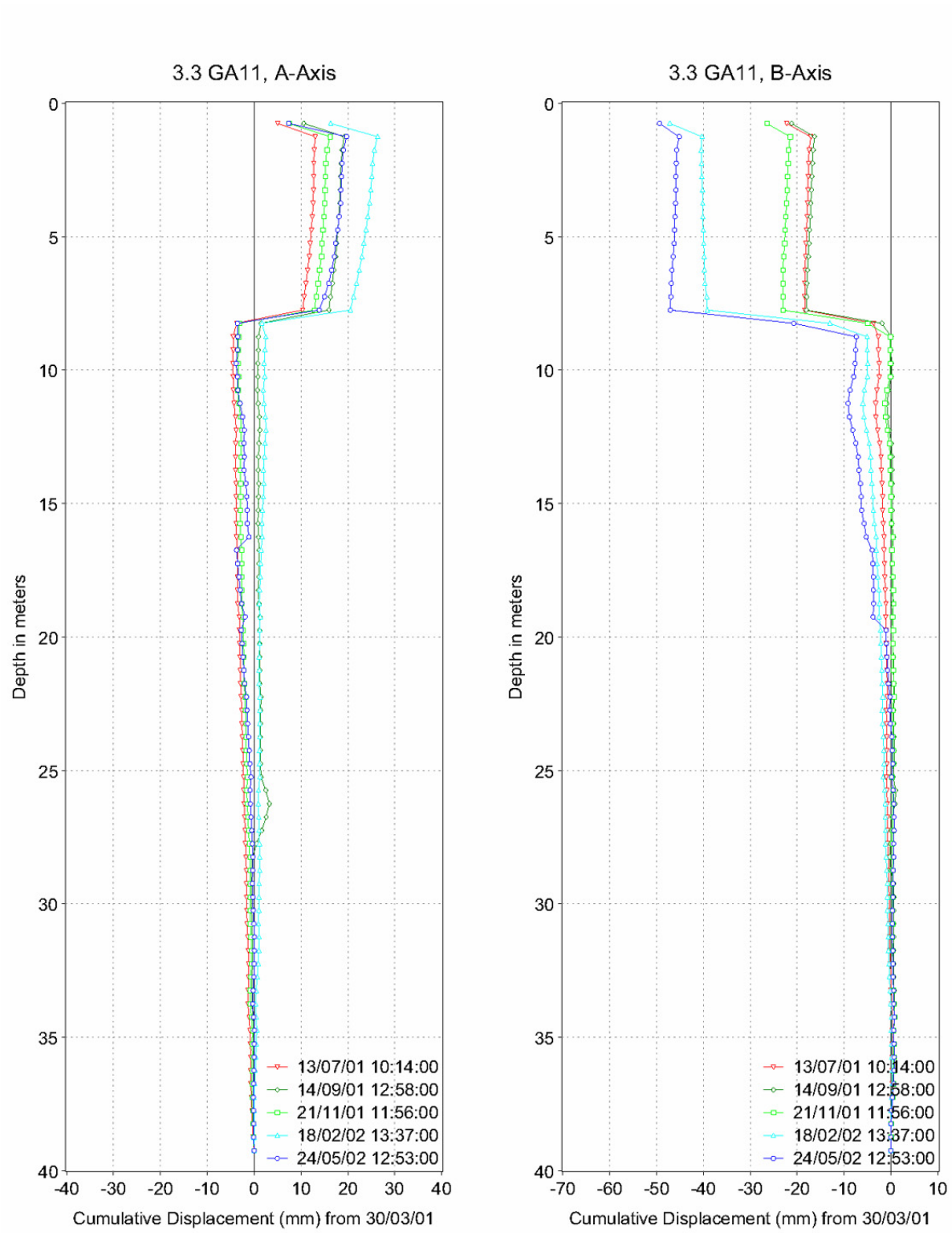


Σχήμα 4.11. Διάγραμμα αθροιστικής μετακίνησης, αζιμούθιο: 58 μοίρες, (Ομάδα Ε.Ο.Α.Ε.)

Επίσης, είναι σημαντικό να υπολογίζεται και ο ρυθμός μετακίνησης καθώς να λαμβάνεται υπόψην και οι βροχοπτώσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.



Σχήμα 4.12. Διάγραμμα σημειακής μετακίνησης. Από την άθροιση των διανυσμάτων σε συγκεκριμένο βάθος βάθος υπολογίζεται ο ρυθμός μετακίνησης και η διεύθυνση της κίνησης, αζιμούθιο: 10 μοίρες, Ομάδα Ε.Ο.Α.Ε.



Σχήμα 4.13. Διάγραμμα αθροιστικής μετατόπισης, αζιμούθιο: 124 μοίρες (Ομάδα Ε.Ο.Α.Ε.).

4.4.4 Συμπεράσματα μελέτης ευστάθειας ανατολικού πρανούς

Η παρακολούθηση της ευστάθειας του ανατολικού πρανούς με την τοποθέτηση 25 ακίδων επάνω στο διαμορφωμένο πλέον πρανές και την τοποθέτηση τεσσάρων κλισιομετρικών οργάνων στον αναβαθμό, πάνω ακριβώς από τη λιθορριπή, αποτέλεσε έναν καλό συνδυασμό για την

παρακολούθηση της ευστάθειας του κατασκευασμένου πρανούς. Με τον τρόπο αυτό υπήρχαν πληροφορίες τόσο για επιφανειακές μικρομετακινήσεις, όσο και για μετακινήσεις σε βάθος. Ταυτόχρονα με τα αποτελέσματα από τα γεωτεχνικά όργανα, θεωρείται απαραίτητη και η επί τόπου έρευνα από τον εκάστοτε μηχανικό για οπτικές παρατηρήσεις, όπως είναι οι μικρορηγματώσεις η και οι αποκολλήσεις, κυρίως στο άνω και το κάτω τμήμα της περιοχής. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διαγραμμάτων που προκύπτουν, δεν αποτελούν από μόνα τους μία πηγή αξιολόγησης για την ευστάθεια ή όχι του πρανούς, αλλά ένα σημαντικό κομμάτι της γεωτεχνικής έρευνας της σήραγγας, με σκοπό την πρόωρη αντιμετώπιση περαιτέρω προβλημάτων αστοχίας, ή ακόμα και την εξέλιξη κάποιων αστοχιών σε τεχνικά έργα.

4.5 Έλεγχος μικρομετακινήσεων της ευρύτερης περιοχής του δυτικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου

4.5.1 Γενικά στοιχεία

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτήν, προέρχονται από την αρχική μελέτη των Μουρτζάς και Σωτηρόπουλος (1999) και από τη μετέπειτα τροποποιημένη μελέτη των Σωτηρόπουλος και Μουρτζάς (2001). Οι μετρήσεις των κλισιομετρικών οργάνων έγιναν από την ομάδα παρακολούθησης των γεωτεχνικών οργάνων της Εγνατίας Οδού. Η ανάθεση για τους γεωδαιτικούς υπολογισμούς δικτύου μικρομετακινήσεων στην ευρύτερη περιοχή του δυτικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου έγινε από τον ανάδοχο κατασκευής του έργου Κ/ξια Μηχανική Α.Ε., ΑΒΑΞ Α.Ε, ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ, ΜΟΧΛΟΣ Α.Ε., και οι μετρήσεις και η αξιολόγηση αυτών έγιναν από το μελετητικό γραφείο RACE Α.Ε., και το οποίο απαρτίζεται από τους Θ. Ράδο, Α.Σιρόκα και Ε. Μπισκερτζή.

4.5.2 Γεωτεκτονικό πλαίσιο- Υπόγεια νερά

Σύμφωνα με το σχήμα (4.1), η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζεται από πέντε κύριες εφιππεύσεις με διεύθυνση Β-Ν και ανατολικές διευθύνσεις κλίσης, που συνοδεύονται από άλλες μικρότερης κλίμακας και έχουν προκαλέσει τη συνολική στρέψη των σχηματισμών του φλύσχη προς τα ανατολικά με γωνίες 35-40 μοίρες (Σχήμα 4.1 και 4.2). Στην παρούσα εργασία θα αναφέρουμε μόνο τις τρεις πρώτες κύριες εφιππεύσεις, από τα δυτικά και οι οποίες επηρεάζουν την περιοχή μελέτης.

Η πρώτη κύρια εφίππευση, δυτικά του Ανηλίου, διαχωρίζει τους παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, που κλίνουν με γωνίες 25–40 μοίρες προς τα ΒΑ και ΑΒΑ, από τους σχηματισμούς του τεκτονικού μείγματος, που αποτελούνται από έντονα παραμορφωμένους ιλυόλιθους, με αραιές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών, που περιέχουν φακούς και τεμάχη ψαμμιτών και ιλυολίθων σε χαοτική διάταξη.

Η δεύτερη κύρια εφίππευση, στις δυτικές παρυφές του Ανηλίου, συνοδεύεται από τέσσερις μικρότερης κλίμακας παράλληλης διεύθυνσης εφιππεύσεις, που τοποθετούν τους παχυστρωματώδεις

έως άστρωτους ψαμμίτες επί των έντονα παραμορφωμένων ιλυοαργιλοψαμμιτικών, έντονα παραμορφωμένων, σχηματισμών του τεκτονικού μείγματος, διαμορφώνοντας κατά μήκος τις ζώνες μυλωνιτιωμένων υλικών, τεκτονικών λατυποπαγών και κατακλασιτών.

Η τρίτη κύρια εφίππευση στις ανατολικές παρυφές του Ανηλίου, φέρει τους σχηματισμούς τεκτονικού μείγματος επί των ψαμμίτων, προκαλώντας την έντονη τεκτονική τους παραμόρφωση. Η εφίππευση συνοδεύεται στο τέμαχος της οροφής της από δύο ανάστροφα ρήγματα ΑΒΑ–ΔΝΔ διεύθυνσης, που κλίνουν προς Β με κατακόρυφες μετατοπίσεις της τάξεως των 40m.

Οι γεωλογικές συνθήκες που αναμένεται να συναντηθούν κατά μήκος του άξονα της σήραγγας έχουν ως ακολούθως, με φορά από τα δυτικά προς τα ανατολικά:

Στα πρώτα 35μ. περίπου, αναμένεται να διατρηθούν παχυστρωματώδεις ψαμμίτες, με αραιές ενδιαστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων, ενώ στο υπόλοιπα 15-52μ., μέχρι το μέτωπο της κύριας εφίππευσης θα διατρηθούν ιλυόλιθοι με αραιές λεπτές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών.

Μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κύριας εφίππευσης, αναμένεται να διατρηθούν σχηματισμοί του τεκτονικού μείγματος και αποτελούνται από έντονα τεκτονικά παραμορφωμένους ιλυόλιθους, ιλιόλιθους με αραιές ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και τεμάχη ψαμμιτών και ιλυολίθων. Στην κατάληξη του τμήματος αυτού (-422μ.) και σε μήκος 150μ περίπου, η σήραγγα προβλέπεται να διασχίσει ζώνες μυλονιτιωμένων υλικών, τεκτονικών λατυποπαγών και κατακλαστικών ζωνών της ευρείας ζώνης της κύριας εφίππευσης και των δευτερευουσών εφφιππεύσεων που αναπτύσσονται παράλληλα με αυτές.

Στα επόμενα 20-30μ, η σήραγγα αναμένεται να διασχίσει τεκτονικά λατυποπαγή και μυλονίτες της κύριας ζώνης εφίππευσης και αμέσως μετά την αντικλινική δομή, που διαμορφώνεται στη μάζα των ψαμμιτών και ιλυολίθων, καθώς και τις έντονα καταπονημένες τεκτονικά ζώνες, που αναπτύσσονται κατά μήκος δύο πιθανών, μικρότερης κλίμακας και παράλληλων με την κύρια, εφιππεύσεων. Στην κατάληξη του τμήματος (180μ), η σήραγγα θα διατρήσει γενικά συμπαγείς ψαμμίτες και ιλυόλιθους για να συναντήσει την έντονα διαταραγμένη ζώνη που διαμορφώνεται στην περιοχή της τρίτης κατά σειρά κύριας εφφίπευσης του χώρου.

Οι ψαμμίτες λόγω της ανάπτυξης του δευτερογενούς πορώδους, ανήκουν στους περατούς σχηματισμούς της περιοχής και αναμένονται εποχιακές κατεισδύσεις νερών σε ζώνες έντονου κερματισμού του πετρώματος και κατά μήκος ρηγμάτων που διασχίζουν τη μάζα τους. Οι ιλυόλιθοι και οι σχηματισμοί του τεκτονικού μείγματος, λόγω της αργιλομιγούς και ετερογενούς σύστασής τους, χαρακτηρίζονται από εναλλαγές αδιαπέρατων και διαπερατών ζωνών, που διαμορφώνουν συνθήκες ανάπτυξης περιορισμένης δυναμικότητας επικρεμάμενης υδροφορίας.

Στα πρώτα 50μ. περίπου αναμένονται εποχιακές κατεισδύσεις νερών (στάγδην, συνθήκες εφύγρανσης). Στο επόμενα 250μ περίπου, και λόγω της λιθολογικής ετερογένειας της βραχομάζας, οι στεγνές συνθήκες μπορεί να εναλλασσονται με συνθήκες εποχειακών κατεισδύσεων (στάγδην) και εφύγρανσης λόγω παρουσίας επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων. Υπάρχει κίνδυνος εισροών νερών κατά μήκος ρηγμάτων και κατακλαστικών ζωνών.

Κατά μήκος της σήραγγας απαντήθηκαν οι εξής τεχνικογεωλογικές ενότητες από τα δυτικά προς τα ανατολικά, σύμφωνα με την πρόταση του ISRM (Brown, 1981) (σχήμα 4.2):

ΤΕ1: Μεσοκοκκώδης έως λεπτοκοκκώδης, καστανότεφρος, κυρίως παχυστρωματώδης έως μεσοστρωματώδης ψαμμίτης, που περιέχει κατά θέσεις ενδιαστρώσεις ιλυολίθου. Η αντοχή του αδιατάρρακτου πετρώματος είναι μέση έως πολύ υψηλή. Οι ασυνέχειες είναι σε μεγάλες ή μέσες αποστάσεις (200-6000mm). Τα ίχνη των διακλάσεων μεταβάλλονται από πολύ μικρά έως μέσα (<1m έως 10m). Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι ελαφρά οξειδωμένες και είναι κυρίως τραχείες και επίπεδες (JRC 8-14). Τα επίπεδα διάστρωσης είναι μάλλον λεία έως τραχεία (JRC 4-8).

ΤΕ2 : Όπως και στην παραπάνω ενότητα αλλά με έντονο κερματισμό από ισχυρή διάβρωση. Η αντοχή του αδιατάρρακτου πετρώματος μειώνεται.

ΤΕ3 : Αλληλουχία τεφρών έως καστανότεφρων ή ερυθρών ιλυολίθων. Τα πάχη των στρώσεων κυμαίνονται από 60mm έως 200mm. Οι επιφάνειες των στρώσεων είναι κυρίως ομαλές και επίπεδες (JRC 2-6) κατά θέσεις με πλήρωση αργίλου. Οι αντοχές του αδιατάρακτου πετρώματος έχουν μεγάλη διακύμανση.

ΤΕ4 : Εναλλαγές καστανότεφρου ή ερυθρού ιλυόλιθου με ψαμμίτες. ΤΑ χαρακτηριστικά των ιλυολίθων είναι ίδια με την κατηγορία ΤΕ3. Οι ψαμμιτικές ενστρώσεις έχουν κατά κανόνα μικρό πάχος.

ΤΕ5 : Τεκτονικό μείγμα κυρίως ερυθρόχρωμων ιλυολίθων με εναλλαγές ψαμμίτη (κόκκινος φλύσχης). Τα πετρώματα εμφανίζονται έντονα διαρρηγμένα και πτυχωμένα. Συμπαγή τεμάχη ιλυολίθων ή ψαμμιτών σε διάφορες διαστάσεις εμφανίζονται εντός αργιλικής ή ιλυώδους μάζας. Χαρακτηριστική είναι η ανομοιογένεια, η χαοτική δομή και η πολύ μικρή αντοχή (σχήμα 4.3 και 4.4). Οι ιδιότητες του μείγματος εμφανίζονται να είναι αυτές ενός εδαφικού υλικού. Οι αντοχές των τεμάχων εμφανίζουν διασπορά. Κατά θέσεις εμφανίζονται ζώνες λεπτόκοκκου μυλωνίτη με μεταβλητό πάχος (Μούρτζας και Σωτηρόπουλος, 1999).

ΤΕ6 : Ζώνες ρηγμάτων, με επικράτηση μαλακού αργιλικού υλικού. Κατά θέσεις εμφανίζονται τεκτονικά λατυποπαγή και έντονα διαρρηγμένο βραχώδες υλικό. Το υλικό αυτό χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα χαμηλή αντοχή.

ΤΕ7 : Εδαφικά υλικά, πλευρικά κορήματα και υλικά αποσάθρωσης

4.5.3 Έλεγχος πιθανών μικρομετακινήσεων ευρύτερης περιοχής του δυτικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου

Δεδομένου ότι προηγήθηκε η κατασκευή της σήραγγας του Ανατολικού μετώπου με τα προβλήματα ευστάθειας που παρουσιάσθηκαν, κρίθηκε αναγκαία η παρακολούθηση μικρομετακινήσεων πριν την έναρξη των εργασιών διάνοιξης του δυτικού μετώπου της σήραγγας Ανηλίου. Από τα στοιχεία της γεωτεχνικής μελέτης, οι σχηματισμοί της περιοχής είναι περατοί, έντονα παραμορφωμένοι και κερματισμένοι (τεκτονικά μείγματα). Η παρακολούθηση πραγματοποιήθηκε από τις δύο γεωτρήσεις και στις οποίες τοποθετήθηκαν κλισιομετρικοί σωλήνες

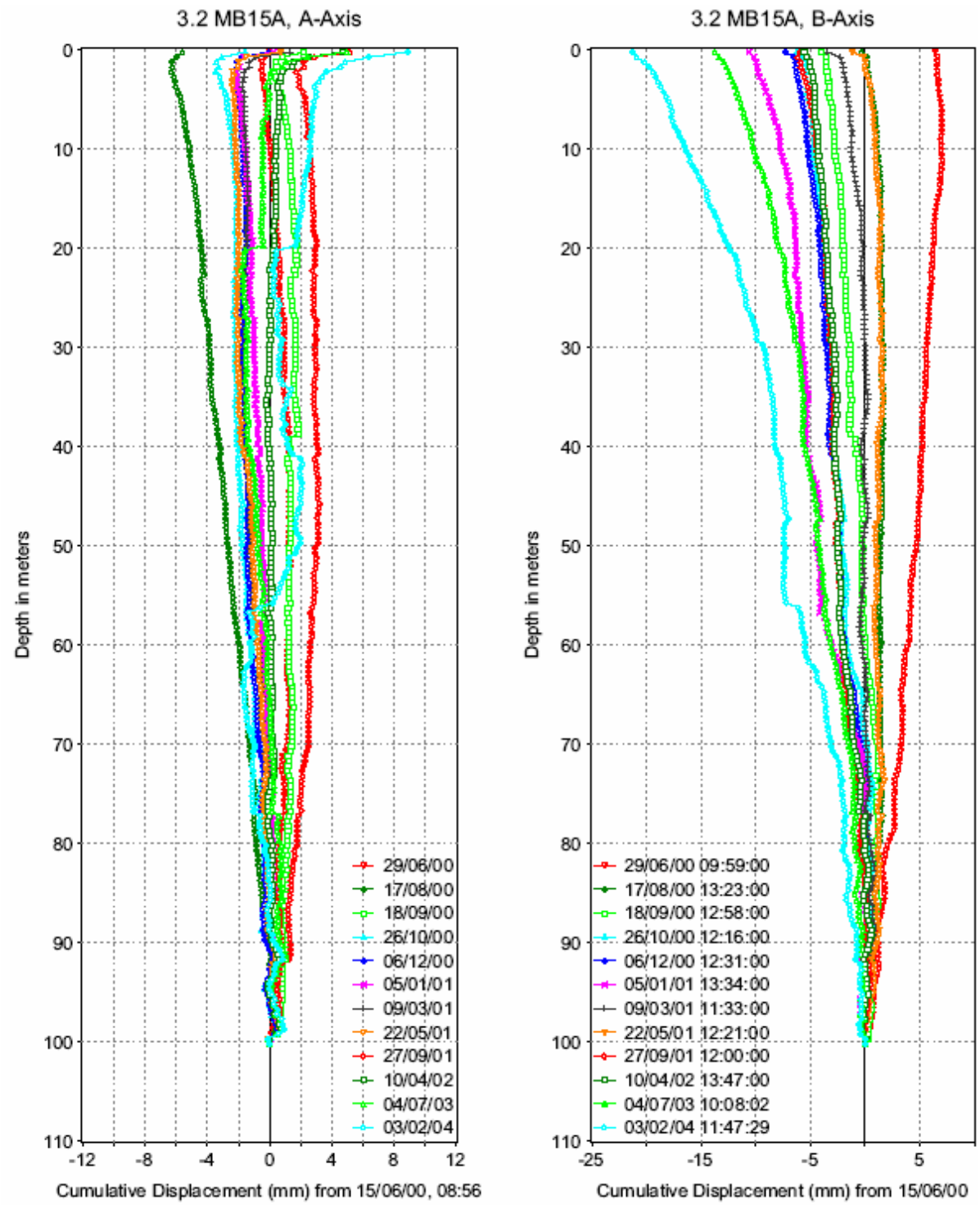
για την εύρεση πιθανών επιφανειών ασυνεχειών. Από την αξιολόγηση των δεδομένων, και για προληπτικούς λόγους, πραγματοποιήθηκαν και γεωδαιτικοί υπολογισμοί δικτύου για τον έλεγχο των μικρομετακινήσεων της ευρύτερης περιοχής. Παρακάτω θα αναλυθεί η ερμηνεία των δεδομένων από τις μετρήσεις που ελήφθησαν.

4.5.3.1 Παρακολούθηση ευστάθειας με κλισιομετρικά όργανα

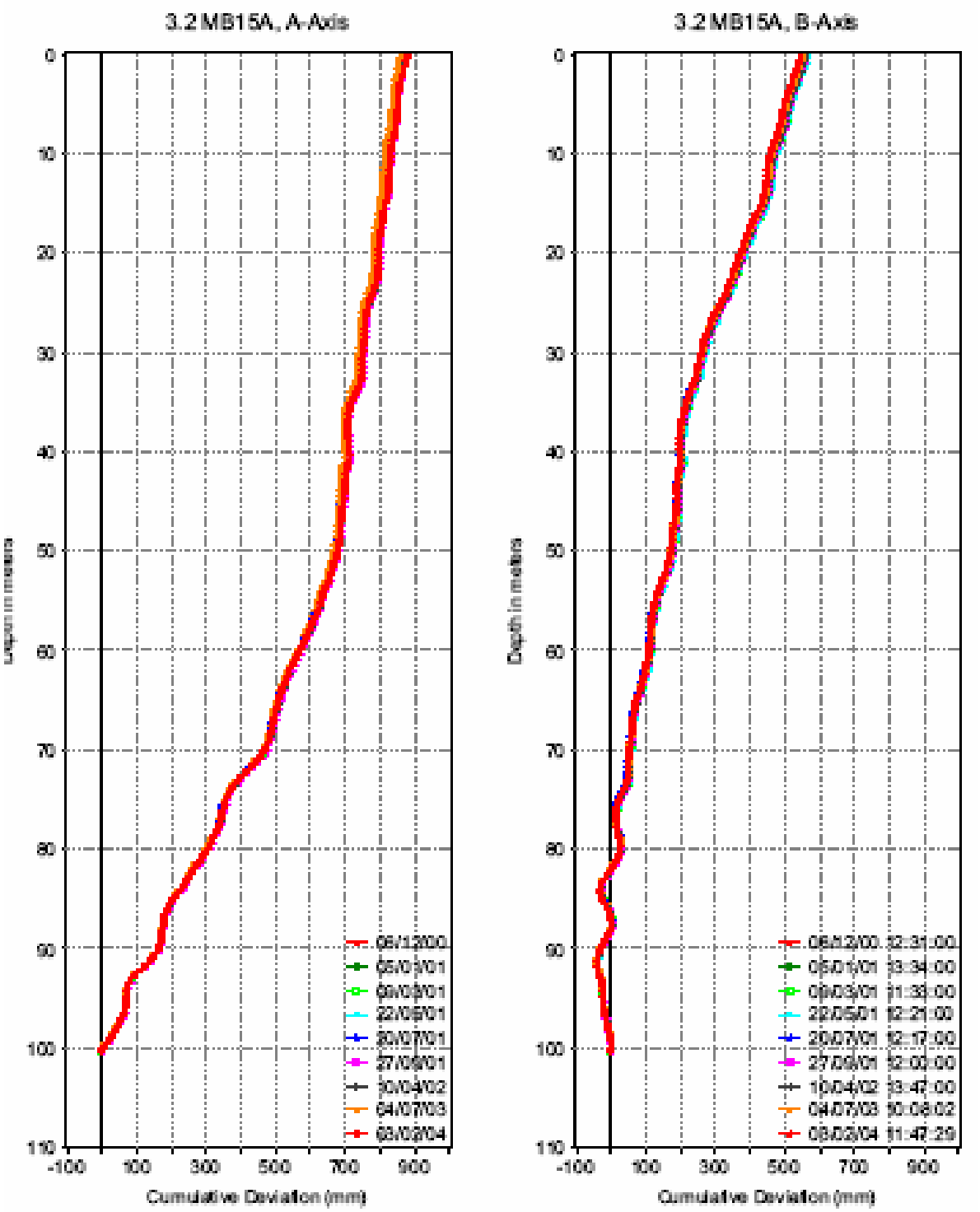
Στην ευρύτερη περιοχή του Μετσόβου- Ανηλίου τοποθετήθηκαν σε δύο γεωτρήσεις, βάθους 100 μέτρων η κάθε μία, κλισιόμετρα (MB15A και SE11). Η πρόσβαση για τα κλισιόμετρα είναι στην άκρη του δρόμου. Και τα δύο κλισιόμετρα δεν ήταν προστατευμένα και μπορούσε ο οποιοσδήποτε να τους προκαλέσει ζημιά. Από την αξιολόγηση των πρώτων συνόλων μετρήσεων των δύο κλισιόμετρων δεν παρατηρήθηκαν ενδείξεις μετακινήσεων. Στο κλισιόμετρο MB15 παρατηρούνται φαινόμενες μετακινήσεις, οι οποίες είναι μέσα στα όρια ακρίβειας του συστήματος.

Στη δεύτερη γεώτρηση, κατά τον Οκτώβριο του 2000, η μέτρηση δεν έγινε διότι ο σωλήνας είχε φραγεί στα 26,5μ. Το κλισιόμετρο MB15 τοποθετήθηκε στις αρχές Ιουνίου του 2000 και οι αρχικές μετρήσεις έλαβαν χώρα στις 15/06/00 με αζιμούθιο 340 μοίρες της A0 διεύθυνσης μετακίνησης. Από τα διαγράμματα της αθροιστικής απόκλισης και της σταδιακής μετακίνησης, δεν παρουσιάζονται ενδείξεις μετακινήσεων. Η υποτειθέμενη μετακίνηση που παρουσιάζεται στο σχήμα (4.14) οφείλεται σε σφάλμα του οργάνου, το bias-shift error-, η οποία και δεν εμφανίζεται στο διάγραμμα του σχήματος (4.16). Η γεώτρηση έχει μία απόκλιση από την κατακόρυφο 0.9cm στη διεύθυνση A0 και 0.6cm στην A180, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.15). Από το σχήμα (4.14) δεν παρουσιάζεται κάποια ένδειξη μετακίνησης.

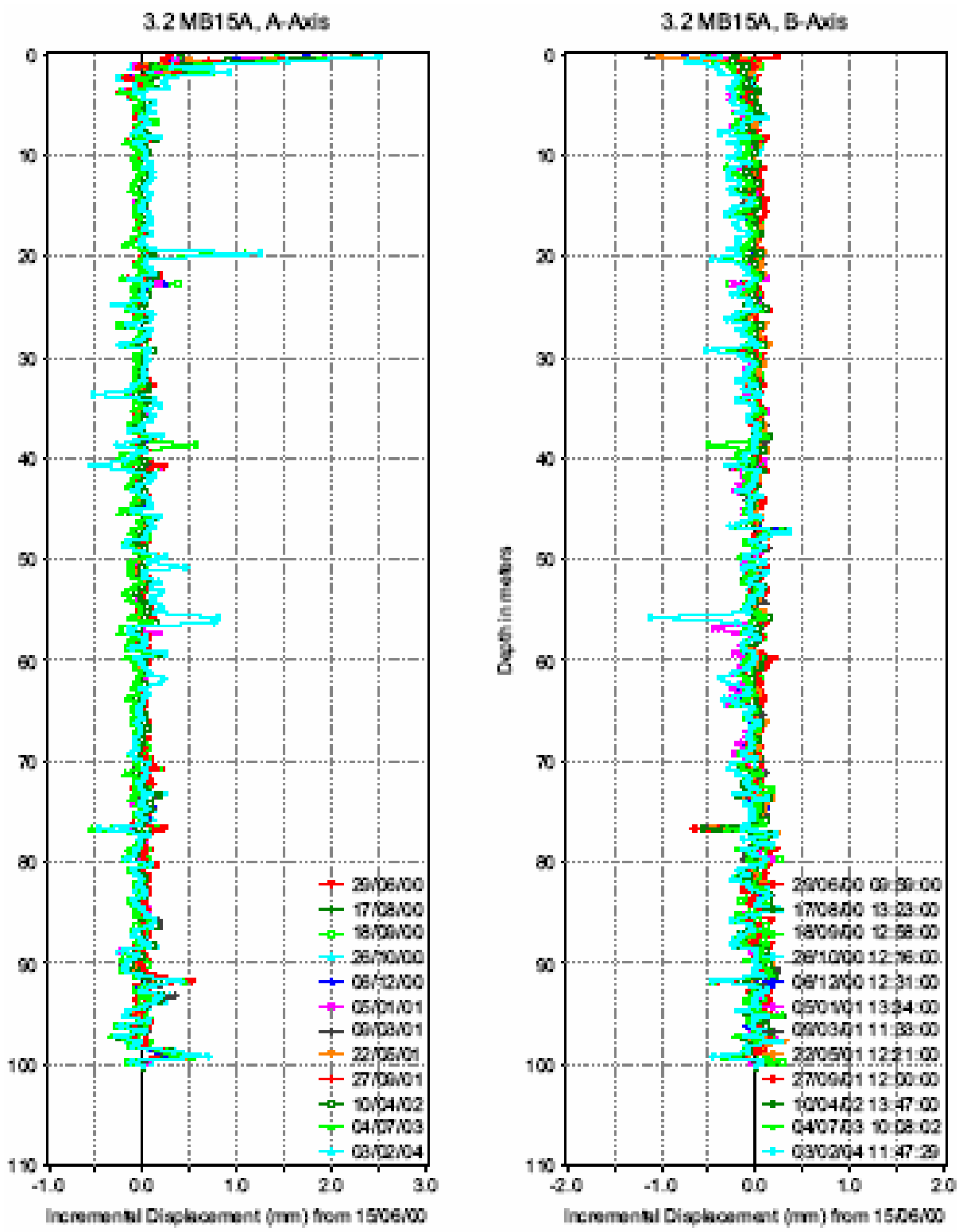
Η λήψη περαιτέρω μετρήσεων σταμάτησε λόγω φραγής της SE11A, απλά ελήφθησαν τρείς νέες μετρήσεις τις επόμενες χρονιές από τα 26.5μ και πάνω. Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση των μετρήσεων των νέων μετρήσεων έγινε συμπλήρωση των μετρήσεων για τα βάθη από τα 26.5-100m από τα δεδομένα τις 27/09/01 στα οποία δεν είχε γίνει η φραγή της γεώτρησης. Η διερεύνηση της φραγής έγινε χρησιμοποιώντας τα στοιχεία από το γεωλογικό προφίλ της γεώτρησης σύμφωνα με το οποίο στο βάθός των 25μ υπάρχει αλλαγή του σχηματισμού και πιο αναλυτικά πρόκειται για την εναλλαγή από μέτρια κερματισμένο και αρκετά αποσαθρωμένο ψαμμίτη σε ιλυόλιθο με ενδιαστρώσεις ψαμμιτικές, υγιή έως λίγο αποσαθρωμένο και ελαφριά κερματισμένος. Η ύπαρξη υποψίας για πιθανή μετακίνηση στο βάθος αυτό και για λόγους περαιτέρω διερεύνησης, έγινε εισαγωγή μίας κάμερας για να εξακριβωθεί ο λόγος φραγής του σωλήνα. Το Φεβρουάριο του 2001, δόθηκε η δυνατότητα να εισαχθεί στο εσωτερικό των κλισιομετρικών σωλήνων και των δύο γεωτρήσεων, μία κάμερα CCTV, και τελικά διαπιστώθηκε ότι η φραγή οφειλόταν στη ρήψη ενός τεμάχου βράχους.



Σχήμα 4.14. Διάγραμμα αθροιστικής μετατόπισης. Δεν παρουσιάζεται κάποια ένδειξη μετακίνησης για όλα το διάστημα καταγραφής μετρήσεων (Ε.Ο.Α.Ε, 2004).



Σχήμα 4.15. Διάγραμμα αθροιστικής απόκλισης. Ο κλισιομετρικός σωλήνας αποκλίνει από την κατακόρυφο (Ε.Ο.Α.Ε., 2004).



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα σταδιακής μετατόπισης (Ε.Ο.Α.Ε.,2004).

4.5.3.2 Παρακολούθηση ευστάθειας με γεωδαιτικούς υπολογισμούς δικτύου για τον ελέγχο επιφανειακών μικρομετακινήσεων

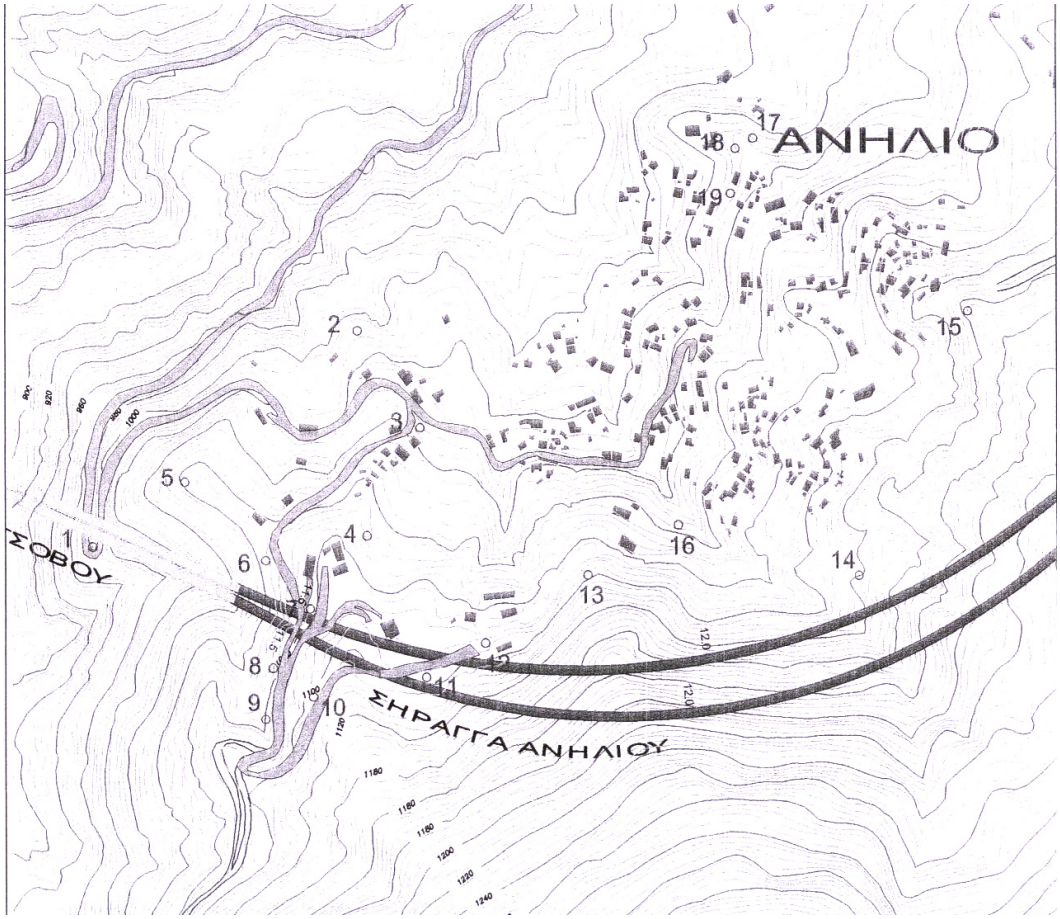
Ο σκοπός της παρακολούθησης ευστάθειας της ευρύτερης περιοχής του δυτικού μετώπου της σήραγγας του Ανηλίου ήταν ο έλεγχος πιθανών επιφανειακών μικρομετακινήσεων πριν και κατά

τη διάρκεια των εργασιών εκσκαφής και διάνοιξης της σήραγγας Ανηλίου, με τη χρήση ενός γεωδαιτικού δικτύου ελέγχου, δεδομένης της αστοχίας που έλαβε χώρα στο ανατολικό μέτωπο της σήραγγας του Ανηλίου Τα στοιχεία που παρατείθονται παρακάτω, ελήφθησαν από το αρχείο της Εγνατίας Οδού και πιο αναλυτικά πρόκειται για το μελετητικό γραφείο RACE Α.Ε. και το συνεργείο τριγωνισμού αποτελείτο από τους τοπογράφους Θ. Ράδο, Α. Σιρόκα και Ε.Μπισκερτζή.

Στο συνημένο τοπογραφικό διάγραμμα, φαίνεται η θέση των δύο κλάδων της σήραγγας σε σχέση με τη θέση της κοινότητας Ανηλίου. Η επιλογή των θέσεων έγινε σε συνεργασία του Αναδόχου (Κ/Ξ ΜΗΧΑΝΙΚΗ Α.Ε., ΑΒΑΞ Α.Ε., ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ, ΜΟΧΛΟΣ Α.Ε.) και της Ε.Ο.Α.Ε.

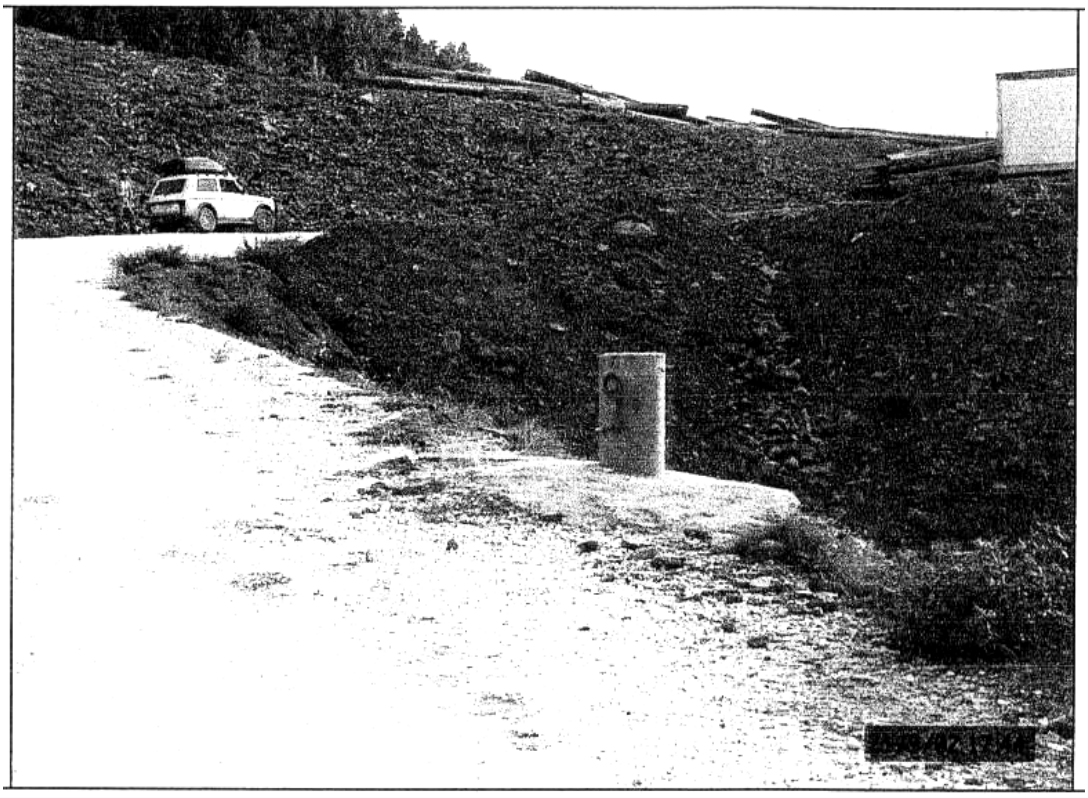
Για τις ανάγκες του τριγωνισμού χρησιμοποιήθηκαν (σχήμα 4.17):

- Τρία τριγωνομετρικά της ΓΥΣ (219-2, 219-3, 219-11) σαν σημεία εξωτερικού ελέγχου του δικτύου (για έλεγχο ολικής και όχι διαφορικής καθίζησης ή μετακίνησης).
- Δέκα εννιά νέα ιδρυθέντα τριγωνομετρικά σημεία εκ μέρους του αναδόχου (Τ1, Τ2, Τ3, Τ4, Τ5, Τ6, Τ7, Τ8,Τ9, Τ10, Τ11, Τ12, Τ13, Τ14, Τ15, Τ16, Τ17, Τ18, Τ19), σαν σημεία ελέγχου.



Σχήμα 4.17. Τοπογραφικό της περιοχής μελέτης και τοποθέτηση των νέων τριγωνομετρικών σημείων έλεγχου, (Ε.Ο.Α.Ε., 2004).

Ο συνολικός αριθμός των χρησιμοποιηθέντων τριγωνομετρικών σημειών ελέγχου είναι είκοσι δύο σημεία, ενώ ο αριθμός των βάσεων που μετρήθηκαν είναι πενήντα τέσσερις (54). Για τον τριγωνισμό χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός δορυφορικών παρατηρήσεων. Ο εξοπλισμός δορυφορικών παρατηρήσεων αποτελούνταν από δύο σταθμούς GPS τύπου Trimble 4700, διπλής συχνότητας με ραδιοζεύξη και δυνατότητα εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (real time). Οι ακρίβειες του συστήματος GPS για εργασίες τριγωνισμού με τη μέθοδο στατικού εντοπισμού (fast static) είναι +/- 5mm+1ppm, για το συγκεκριμένο τύπο δεκτών. Η ακρίβεια αυτή γίνεται πολύ καλύτερη εφαρμόζοντας τη μέθοδο στατικής ανάλυσης (static surveying) και μεγαλύτερους χρόνους παρατήρησης. Για τη σήμανση χρησιμοποιήθηκαν βάθρα της Αναδόχου ύψους 0,70 m, όπως αυτά φαίνεται στο σχήμα (4.18). Στη στέψη των βάθρων έχει τοποθετηθεί μόνιμη σήμανση για εξαναγκασμένη κέντρωση/ πάκτωση των οργάνων και κεραίων μέτρησης, ώστε να εξαλειφθούν τα πιθανά σφάλματα κέντρωσης των οργάνων παρατήρησης.

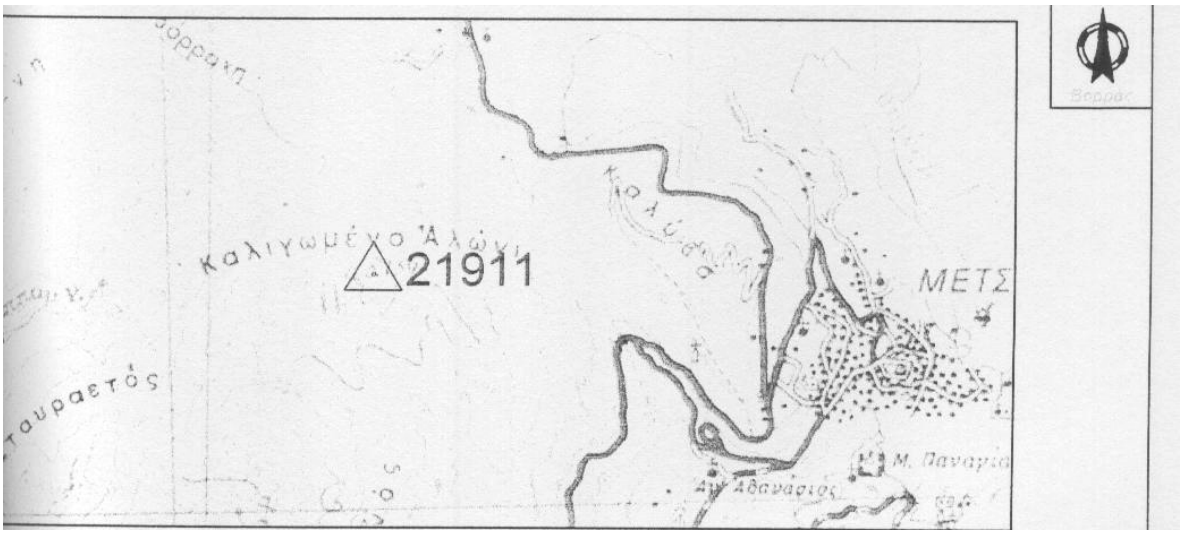


Σχήμα 4.19. Τριγωνομετρικό σημείο ελέγχου (Ε.Ο.Α.Ε, 2004).

Παρακάτω γίνεται η περιγραφή της μεθοδολογίας των εργασιών πεδίου και γραφείου που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση των εργασιών του τριγωνισμού με σκοπό τον έλεγχο πιθανών μικρομετακινήσεων. Οι θέσεις των τριγωνομετρικών σημείων, όπως προαναφέρθηκε εγκρίθηκαν από την Ε.Ο.Α.Ε. Δεδομένου ότι στην παρούσα μελέτη θα ελεγχούν οι πιθανές μικρομετακινήσεις σε μια συγκεκριμένη τοπική περιοχή έκτασης λίγων εκατοντάδων στρεμμάτων, θεωρήθηκε σκόπιμο να

ενταχθούν στο δίκτυο και τρία τριγωνομετρικά σημεία της Γ.Υ.Σ. από την ευρύτερη περιοχή μελέτης (σχήμα 4.19 και 4.20). Αυτό έγινε με σκοπό να είναι δυνατή και η παρατήρηση μιας πιθανής μικρομετακίνησης του εδάφους της περιοχής μελέτης συνολικά, κάτι που θα μπορούσε να εντοπισθεί, αλλά δεν θα ήταν δυνατό να ερμηνευτεί με αξιόπιστο τρόπο η συγκεκριμένη τοπική συμπεριφορά ως προς την ευρύτερη περιοχή. Κατά συνέπεια τονίζεται ιδιαίτερα το γεγονός ότι τα τρία τριγωνομετρικά σημεία της ΓΥΣ δεν χρησιμοποιήθηκαν για εξάρτηση του δικτύου σε κάποιο κρατικό σύστημα συντεταγμένων.

Σχήμα 4.19. Τριγωνομετρικά σημεία ελέγχου του ΓΥΣ, (Ε.Ο.Α.Ε., 2004)



Σχήμα 4.20. Τοπογραφικό της ευρύτερης περιοχής του τριγωνομετρικού σημείου ελέγχου 21911 (Ε.Ο.Α.Ε., 2004).

Οι μετρήσεις πεδίου προετοιμάστηκαν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, αφού προηγούμενα έγιναν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί της επάρκειας των δορυφορικών σχηματισμών για τις ημέρες των παρατηρήσεων. Ο σχεδιασμός του δικτύου (τοποθέτηση των βάσεων) έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε σημείο του δικτύου να υπάρχει επαρκής συσχετισμός αφενός με τα γειτονικά του σημεία, αφετέρου και με σημεία της περιφέρειας του μοντέλου. Παρότι μετρήθηκαν περισσότερες βάσεις από τις απαραίτητες (βλ. Βαθμοί ελευθερίας από το παράρτημα των επιλύσεων), αυτό έγινε ώστε να υπάρχει η δυνατότητα πιθανής αφαίρεσης αδύνατων- μη ισχυρών βάσεων, αφού η χωροθέτηση κάποιων σημείων του δικτύου είναι τέτοια που δεν ευνοεί απόλυτα τις δορυφορικές παρατηρήσεις, με την έννοια ότι δεν υπάρχει επαρκής ορίζοντας ελεύθερος εμποδίων. Σε ότι αφορά τη μεθοδολογία επίλυσης του δικτύου αυτή έγινε με επίπεδο εμπιστοσύνης (2,58σ-99%), αφού για τέτοιου είδους έργα (μικρομετακινήσεις), η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της επίλυσης πρέπει να είναι η μεγαλύτερη δυνατή. Κατά τη φάση της επίλυσης του δικτύου δόθηκε επίσης μεγάλη προσοχή στην επίδραση του τοπικού γεωειδούς στα αποτελέσματα. Για το σκοπό αυτό και για τον μηδενισμό της επίδρασης του γεωειδούς στα αποτελέσματα, δόθηκε εξαιρετικά μικρό βάρος στο γεωειδές ίσο με 0,01. Επισημαίνεται επίσης, το γεγονός ότι το δίκτυο επιλύθηκε θεωρώντας σταθερό μόνο ένα τριγωνικό σημείο (Τ3), το οποίο βρίσκεται σε δεσπόζουσα κεντροβαρική θέση ως προς τα υπόλοιπα. Αυτό έγινε για τον προφανή λόγο της μη εξαναγκασμένης μεταφοράς των σφαλμάτων του δικτύου της Γ.Υ.Σ. στο δίκτυο του έργου. Δηλαδή με άλλα λόγια το δίκτυο λύθηκε ελεύθερο από οποιαδήποτε άλλη εξωτερική δέσμευση. Οι αρχικές σταθερές συντεταγμένες (fixed coords) που δόθηκαν στο σημείο αναφοράς Τ3 προέκυψαν από κατάλληλη επεξεργασία και πρόδρομες επιλύσεις του δικτύου, ώστε να είναι πολύ κοντά στις αληθείς συντεταγμένες του σημείου στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ87 (απλώς και μόνο για λόγους αναφοράς με τα υφιστάμενα χαρτογραφικά υπόβαθρα. Ο λόγος που η επίλυση του δικτύου παρουσιάζεται στο

προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ87 και όχι σε κάποιο άλλο (π.χ. γεωκεντρικό σύστημα WGS84) είναι η ευκολία στην ερμηνεία που θα μπορεί να δοθεί στην πιθανότητα μικρομετακινήσεων. Δηλαδή θα μπορεί εύκολα να χαρακτηρισθεί κάποια πιθανή κίνηση με γεωγραφικούς όρους (π.χ. Βόρεια μετατόπιση, καθίζηση, κ.λ.π.).

Τέλος, δεν κρίνεται απαραίτητος ο μετασχηματισμός των συντεταγμένων των κορυφών του δικτύου στο σύστημα HATT που είναι το σύστημα εφαρμογής του συγκοινωνιακού έργου, αφού στόχος είναι ο εντοπισμός της πιθανής μετατόπισης των σημείων του δικτύου ελέγχου στο βέλος του χρόνου και μόνο. Από τα αποτελέσματα της επίλυσης του δικτύου διαπιστώθηκε ότι το σημείο Τ16 παρουσιάζει μεγάλη έλλειψη σφάλματος από τα υπόλοιπα (1 έως 3 cm), χωρίς να είναι δυνατό αυτό να ερμηνευτεί με τα διαθέσιμα στοιχεία και μετρήσεις. Η συμπεριφορά του συγκεκριμένου σημείου και των συγκεκριμένων βάσεων που το περιβάλλουν θα παρατηρηθούν ιδιαίτερα και στα επόμενα σετ παρατηρήσεων. Αξιοσημείωτο, είναι επίσης και η παρατήρηση της έλλειψης σφάλματος των τριγωνομετρικών σημείων της ΓΥΣ, κάτι που ήταν αναμενόμενο τόσο λόγω των μηκών των βάσεων, όσο και λόγω του μικρού αριθμού των βάσεων (2) που συνδέουν αυτά τα τριγωνομετρικά με το δίκτυο. Από το παράρτημα της μελέτης με τα αποτελέσματα επίλυσης, τονίζεται ότι τα υψόμετρα των σημείων ελέγχου είναι γεωμετρικά και όχι ορθομετρικά. Αυτό σημαίνει ότι τα υψόμετρα αυτά σε καμμία περίπτωση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άλλους σκοπούς, όπως για παράδειγμα σαν υψομετρικές αφετηρίες (repers) για το συγκοινωνιακό έργο.

Το παρόν έργο (έλεγχος μικρομετακινήσεων) αναφέρεται σε ένα τετραδιάστατο δίκτυο, δηλαδή εξετάζεται η συμπεριφορά των σημείων του δικτύου στο βέλος του χρόνου. Είναι επίσης, σαφές ότι η αιτία ενεργοποίησης του ελέγχου μικρομετακινήσεων είναι η κατασκευή της σήραγγας Ανηλίου κάτω από τον οικισμό του Ανηλίου. Με δεδομένο το παρόν πρώτο σετ μετρήσεων του δικτύου, το οποίο πραγματοποιήθηκε στα τέλη Σεπτεμβρίου του 2002, προτείνονται επαναλήψεις των μετρήσεων ανάλογα με την πρόοδο των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας, μετά από συνεννόηση κάθε φορά με τη Διευθύνουσα Υπηρεσία του έργου. Επίσης, προτείνεται ο έλεγχος αυτός να γίνεται σε πιο αραιά χρονικά διαστήματα και μετά το πέρας των εργασιών διάνοιξης μέχρι και το στάδιο της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

4.5.4 Συμπεράσματα – Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία, η χρήση των γεωτεχνικών οργάνων έγινε για προληπτικούς λόγους, πριν αρχίσουν οι εργασίες εκσκαφής και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε για την αρχική μελέτη της σήραγγας. Στις περιπτώσεις, όπου υπάρχουν υπόνοιες για μετακινήσεις, η επιλογή των δύο αυτών μεθόδων, αποδείχθηκε αποτελεσματική. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των κλισιομέτρων παρουσίασαν μια πιο πλήρη εικόνα όσον αφορά τη γεωλογία της περιοχής και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από τη χρήση της κάμερας, εξαλείφθηκε πλήρως και η παραμικρή υπόνοια για μετακίνηση σε βάθος. Οι μετακινήσεις από τις μετρήσεις των κλισιομέτρων αναφέρονται σε συγκεκριμένο βάθος και αφορούν συγκεκριμένη διεύθυνση. Στην

περίπτωση που υπάρχουν υπόνοιες για επιφανειακή μετακίνηση υιοθετήθηκε η άποψη της λήψης μέτρησεων με τη χρήση των γεωδαιτικών υπολογισμών. Από τα αποτελέσματα του ελέγχου μικρομετακινήσεων με τη χρήση γεωδαιτικών υπολογισμών, διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχουν επιφανειακές μετακινήσεις στην περιοχή. Προτείνεται για να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις αυτές το όργανο μέτρησης να είναι μόνιμα πακτωμένο στα βάθρα των τριγωνομετρικών σημείων που κατασκευάστηκαν για την επίλυση του δικτύου. Ο λόγος είναι για την μείωση των σφαλμάτων στις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις, οι οποίες επηρεάζονται από τον εξοπλισμό, από τη σταθερότητα του σημείου μέτρησης κάθε φορά που γίνεται η λήψη, και από τις προυποθέσεις που τείθονται κάθε φορά που υπολογίζεται ο ρυθμός μετακίνησης.

Κατά συνέπεια, πριν γίνει η μελέτη για την κατασκευή της σήραγγας η μεθοδολογία αυτής της εργασίας που χρησιμοποιήθηκε, αποδείχθηκε αποτελεσματική, αφού εκμηδενίζει:

- πιθανές αστοχίες που μπορεί να φέρουν οι εργασίες κατασκευής μιας σήραγγας
- το κόστος κατασκευής- δεν λαμβάνονται επιπλέον μέτρα υποστήριξης
- το χρόνο κατασκευής, αφού δεν εμφανίζονται αστοχίες στο έργο και
- την απώλεια ανθρώπινου δυναμικού και των μηχανημάτων.

5. Εκτίμηση μέτρων υποστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου με μετρήσεις από συγκλίσεις

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν τα προβλήματα διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου της Εγνατίας Οδού, και πως η αξιολόγηση των μετρήσεων από τις συγκλίσεις (οριζόντιες και κατακόρυφες) επηρέασαν τη μέθοδο διάνοιξης όσο και την επιλογή των μεθόδων υποστήριξης της σήραγγας. Οι δύσκολες γεωλογικές συνθηκές, σε συνδυασμό με την έντονη υγρασία και το μεγάλο ύψος των υπερκείμενων πετρωμάτων δημιούργησαν προβλήματα, όπως στερεοποίηση και ερπυσμό, τα οποία με τη σειρά τους προκάλεσαν έντονα φαινόμενα ρωγματώσεων και συγκλίσεων της προσωρινής επένδυνσης.

Στο συγκεκριμένο έργο λόγω των μεγάλων τιμών των συγκλίσεων δεν ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί η συνήθης διαδικασία σχεδιασμού μιας σήραγγας κατά την οποία προτείνεται μια σειρά έργων υποστήριξης του έργου. Σε παρόμοιες περιπτώσεις, είναι προτιμότερο να σχεδιάζεται μια ακολουθία εκσκαφών και υποστηρίξεων η οποία να παρέχει ασφάλεια κατά την κατασκευή ανεξαρτήτως των κακών γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στο χώρο έρευνας. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται και υλοποιείται από τον μελετητή και κατασκευαστή του έργου (Ανάδοχο) και σκοπό έχει τη μεγιστοποίηση της ασφάλειας κατασκευής του έργου. Φυσικά, επειδή σημαντική παράμετρος στην κατασκευή ενός έργου είναι το κόστος αυτού, η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών υποστήριξης όπως και το πλήθος αυτών εξαρτάται από τις συναντώμενες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του έργου.

Τα στοιχεία της σήραγγας του Ανθοχωρίου και οι μετρήσεις των συγκλίσεων πραγματοποιήθηκαν από τον Ανάδοχο κατασκευής του τεχνικού έργου, ο οποίος είναι η τεχνική κατασκευαστική εταιρεία ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε..

Όλα τα στοιχεία που θα αναφερθούν στο παρόν κεφάλαιο, έχουν ληφθεί από το αρχείο της Εγνατίας Οδού και πιο αναλυτικά πρόκειται για στοιχεία από τη μελέτη και από τις τεχνικές αναφορές των ειδικών επιστημόνων, Ε. Hoek, καθηγητή του πανεπιστημίου του Τορόντο στο Καναδά και Π. Μαρίνο, καθηγητή του Μετσόβιου Πολυτεχνείου και δεν αποτελούν σε καμμία περίπτωση μέρος της προσωπικής μου εργασίας. Ο λόγος που συμπεριελήφθηκε αυτό το κεφάλαιο είναι για να αναφερθεί η σπουδαιότητα των μετρήσεων των συγκλίσεων στην κατασκευή μίας σήραγγας και το πως επηρεάζει τον τρόπο διάνοιξης και τον τρόπο υποστήριξης.

5.2 Γενικά

Η σήραγγα του Ανθοχωρίου αποτελεί τμήμα της Εγνατίας Οδού (σχήμα 5.1), βρίσκεται μεταξύ των χωριών Βοτονοσίου και Ανθοχωρίου στην περιοχή της Ηπείρου και απέχει περίπου 10 km οδικώς από το Μέτσοβο προς τα δυτικά. Πρόκειται για μια σήραγγα διπλής κατευθύνσεως, συνισταμένη από δύο κλάδους, ένα ανά κατεύθυνση, οι οποίοι απέχουν κατάλληλη μεταξύ τους

απόσταση ώστε να παρεμβάλεται ενδιαμέσως ικανού πάχους στύλος βραχομάζας. Τα μήκη του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας ανέρχονται σε 671,60m και 686,30m αντίστοιχα, το δε μέγιστο ύψος υπερκείμενων εντοπίζεται περί το μέσο της διαδρομής και είναι της τάξεως των 88m περίπου. Οι άξονες των σηράγγων έχουν γενική διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και αναπτύσσονται οριζοντιογραφικά σε καμπύλα τμήματα. Η κατά μήκος κλίση της ερυθράς (ερυθρά είναι το απόλυτο υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται το τελευταίο υπόστρωμα της ασφάλτου) είναι της τάξεως του 5%. Η διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδής και το κατάστρωμα αυτών μονοκλινές με εγκάρσια κλίση κυμαινόμενη μεταξύ των 4.42% και 5% προς τα αριστερά στις εισόδους και στις εξόδους των σηράγγων. Στο μέσο περίπου των δύο κλάδων θα κατασκευαστεί εγκάρσιος συνδετήριος διάδρομος προσπέλασης προσωπικού, μήκους 16m.

Σχήμα 5.1. Στο σχήμα παρουσιάζεται η θέση στην οποία κατασκευάστηκε η σήραγγα του Ανθοχωρίου (www.egnatiaodos.gr).

5.3 Γεωτεχνικά- Γεωλογία περιοχής

Η περιοχή κατασκευής της σήραγγας Ανθοχωρίου, βρίσκεται ακριβώς μπροστά από την επιφάνεια εφίππευσης του Πινδικού φλύσχη πάνω στην Ιόνιο ζώνη (σχήμα 5.2). Αποτέλεσμα της εφίππευσης είναι η καταπόνηση της βραχομάζας λόγω των υψηλών συμπιεστικών δυνάμεων που

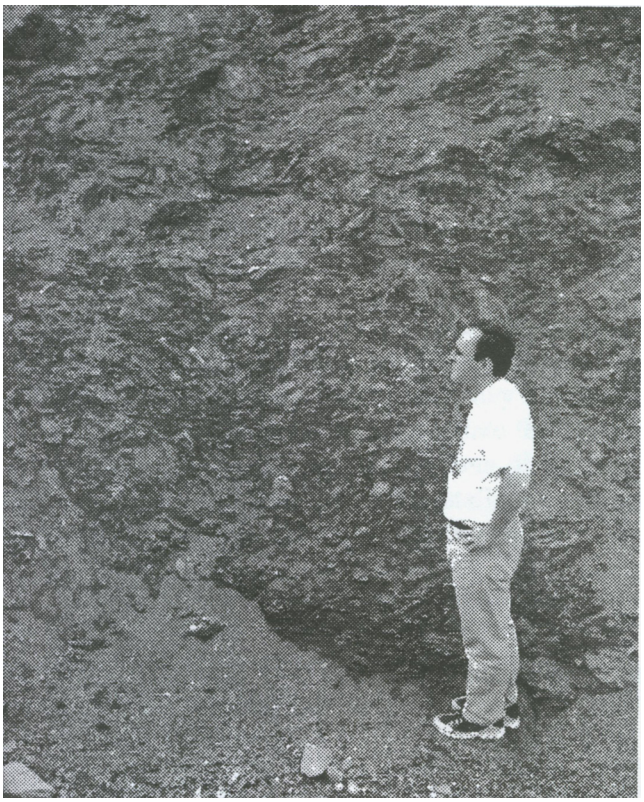
αναπτύσσονται στη ζώνη διάτμησης. Η ζώνη εφίππευσης (διάτμησης) έχει μεταβλητή κατεύθυνση και κλίση και πιθανόν να τέμνει το κεντρικό τμήμα της σήραγγας ανά συχνά διαστήματα.

Στο κεντρικό τμήμα της ενότητας, εύλογα αναμένεται λιγότερα παραμορφωμένος ο ψαμμιτικός φλύσχης ο οποίος εντοπίζεται σαφώς πιο συμπαγής. Πέραν τούτου, γενικά τα υλικά εκσκαφής της σήραγγας χαρακτηρίζονται από μικρό βαθμό συμπαγοποίησης με συχνές επιφάνειες διάτμησης.

Σχήμα 5.2. Ενδεικτικό σκαρίφημα γεωλογικής τομής στο ανατολικότερο τμήμα της ανατολικής περιοχής της σήραγγας του Ανθοχωρίου (Hoek & Marinos, 2001).

Μια τυπική εμφάνιση τέτοιου είδους πετρωμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα (5.3), ενώ η περιγραφή των πετρωμάτων όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χαρακτηρίζει τις γεωλογικές συνθήκες της σήραγγας παρουσιάζοντας μικρές κατά τόπους αποκλίσεις.

Πραγματοποιώντας μια γενική περιγραφή των πετρωμάτων που πρόκειται να διατρηθούν κατά τη διάνοιξη της σήραγγας θα πρέπει να αναφερθεί ότι, κατά μήκος της σήραγγας εντοπίζονται μαλακά πετρώματα (σχήμα 5.3) τα οποία παρουσιάζουν κατά τόπους ογκολίθους συμπαγών πετρωμάτων. Στην κλίμακα της σήραγγας, οι ογκόλιθοι αυτοί δεν μπορούν να προσδώσουν καμμιά επιπλέον αντοχή στην κατασκευή του έργου λόγω του μικρού τους μεγέθους.



Σχήμα 5.3. Ισχυρά κερματισμένος φλύσχης. Στη κλίμακα της σήραγγας όλα αυτά τα υλικά μπορεί να θεωρηθούν ομοιογενή μαλακά πετρώματα, (Hoek & Marinos, 2001).

Η ευρύτερη περιοχή των δίδυμων σηράγγων του Ανθοχωρίου δομείται γεωλογικά από τον Πινδικό φλύσχη. Ο φλύσχης αποτελείται, από κάτω προς τα πάνω από μια ερυθρή πηλητική ζώνη πάχους 60m περίπου. Ακολουθεί μια ζώνη εναλλαγών ψαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων πάχους 50m και στη συνέχεια η στρωματογραφική στήλη της περιοχής κλείνει με μια ζώνη παχυστρωματωδών ψαμμιτών με πάχος μεγαλύτερο των 200m. Λόγω της έντονης λεπίωσης του Πινδικού φλύσχη, η παραπάνω στρωματογραφική ακολουθία, επαναλαμβάνεται σε αλλεπάλληλα λέπια μεταβλητού πάχους και με γενική διεύθυνση μετώπων ΒΒΔ-ΝΝΑ δημιουργώντας μια πολύπλοκη στρωματογραφική δομή στην περιοχή έρευνας.

Συχνά παρατηρούνται εκτός από τις λεπιώσεις και εφιππευτικά ανάστροφα ρήγματα ακόμη και εντός του σχηματισμού των παχυστρωματωδών ψαμμιτών τα οποία δεν είναι πάντοτε σαφή. Ο φλύσχης της ενότητας της Πίνδου είναι επωθημένος πάνω στο φλύσχη της Ιόνιας ενότητας.

Η δίδυμη σήραγγα του Ανθοχωρίου έχει διανοιχθεί εν μέρει στα υλικά της βάσης της επώθησης του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο φλύσχη και εν μέρει στου σχηματισμούς των ερυθροπηλιτών (sl), των εναλλαγών (fl) και των παχυστρωματωδών ψαμμιτών (st) του Πινδικού φλύσχη (σχήμα 5.2). Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά των υπόψη σχηματισμών έχουν ως ακολούθως:

Οι ψαμμίτες (st) είναι γκρίζοι, λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι, παχυστρωματώδεις υγιείς έως ελαφρά αποσαρθρωμένοι στο επίπεδο διέλευσης της ερυθράς και μέτρια έως έντονα αποσαθρωμένοι κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Ο τεκτονισμός τους είναι μέτριος έως έντονος με τραχείες επιφάνειες διακλάσεων και χαρακτηριστικές ζώνες διάτμησης σε διάφορα βάθη που

συνήθως σχετίζονται με την παρουσία των ασθενέστερων μηχανικά, ιλυολιθικών ενδιαστρώσεων μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων. Οι διακλάσεις παρουσιάζονται σπανιότερα πληρωμένες με ασβεστιτικό υλικό. Τόσο στην περιοχή της εισόδου όσο και στην περιοχή της εξόδου η στρώση των παχυστρωματωδών ψαμμιτών παρουσιάζει διεύθυνση μέγιστης κλίσης σχετικών αντίρροπη προς τα φυσικά πρανή, με μέσες τιμές μέγιστης κλίσης ίσες προς 49° και 47° αντίστοιχα και παρουσιάζει μεγάλη εμμονή στο χώρο, με τρία συστήματα διακλάσεων με στοιχεία J1:40°/275°, J2:85°/248°, J3:23°/298° για την περιοχή της εισόδου και J1:72°/138°, J2:85°/202°, J3:73°/251° για την περιοχή της εξόδου. Τα εν λόγω συστήματα περιλαμβάνουν ασυνέχειες, μικρής γενικά εμμονής με επαναλαμβανόμενες επιφάνειες έως 1m, κλειστές, τραχειές και ελαφρά αποσαρθρωμένες, χωρίς υλικό πλήρωσης.

Αναφορικά με την αντοχή της βραχομάζας σε καθεστώς διάτμησης, τονίζεται ιδιαιτέρως η δυσμενής παρουσία ιλυολιθικών ενδιαστρώσεων πάχους λίγων χιλιοστών έως μερικών εκατοστών, μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων. Επίσης, στην περιοχή εξόδου του υπόγειου έργου η παράταξη των παχυστρωματωδών ψαμμιτών καθώς και των εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων του Πινδικού φλύσχη, τέμνει με μικρή γωνία τον άξονα της δίδυμης σήραγγας, γεγονός το οποίο ενδεχόμενα θα οδηγήσει σε ανεπιθύμητες υπερεσκαφές στην περίπτωση εφαρμογής των συμβατικών μεθόδων ανατινάξεων. Για το λόγο αυτό θα απαιτηθεί η εφαρμογή μεθόδου ελεγχόμενης ανατίναξης με σκοπό την αποφυγή διαταραχής και χαλάρωσης του περιβάλλοντος πετρώματος πέρα από τις προβλεπόμενες από τη μελέτη γραμμές εκσκαφής βάση μελέτης.

Οι εναλλαγές του φλύσχη (fl) συνίσταται από τεφρούς λεπτόκοκκους, λεπτό- έως μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες και τεφρούς ιλυολίθους. Επικρατεί η ιλυολιθική φάση. Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι μέτριος έως έντονος και ο βαθμός αποσάρθρωσης ασθενής.

Οι ερυθροπηλίτες (sl) συνίστανται από ερυθρούς και τεφρούς ιλυολίθους, έντονα τεκτονισμένους και με ασθενή αποσάρθρωση. Σποραδικά, εντός του σχηματισμού παρεμβάλλονται λεπτές ψαμμιτικές στρώσεις. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι λείες έως ελαφρά τραχείες, ενίοτε στιλπνές και τοπικά με ασβεστιτικό υλικό πλήρωσης. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζει χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Ενδεικτικά από μία δοκιμή μονοαξονικής φόρτισης η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βρέθηκε ίση με 9.82 MPa υποδεικνύοντας σχηματισμό μέτρια ασθενή. Η μέση τιμή του δείκτη σημειακής φόρτισης προσδιορίστηκε ίση προς 0.28 MPa. Η μέτρηση της αντοχής σε δοκιμή εφελκυσμού παρουσίασε μέση τιμή ίση προς 0.82 MPa.

Τα υλικά της επώθησης (ον) είναι χαοτικής δομής και συνίσταται από γκριζοπράσινους ή ερυθρούς κατακερματισμένους ιλυολίθους και τεμάχια ψαμμιτών, ασβεστολίθων, αργιλλικών σχιστολίθων διαφόρων διαστάσεων εντός ιλυολιθικής κύριας μάζας (matrix). Τα ψαμμιτικά και ασβεστολιθικά βραχώδη τεμάχια προέρχονται από μετακινήσεις μεγαλύτερων τεμαχών στη φάση της επώθησης του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο. Η έντονη τεκτονική καταπόνηση του υπόψη σχηματισμού είναι έκδηλη με τη συχνή παρουσία στιλπνών επιφανειών διάτμησης και

μυλωνιτίωσης. Κατά θέσεις και εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης τα ορυκτολογικά συστατικά του σχηματισμού εμφανίζουν σαφή τάση προσανατολισμού με ενδείξεις σχιστότητας κυρίως σε θέσεις επικράτησης φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτης και ιλλίτης). Γενικά δίνει την εικόνα ενός στερεοποιημένου χαλαρού σχηματισμού που κατά τη διάτρησή του παρουσιάζει υψηλές τιμές RQD.

Τα υλικά κατολισθήσεων (LS) που προσδιορίστηκαν στα πλαίσια των γεωλογικών αποτυπώσεων περιορίζονται στο μικρό βάθος και δεν θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη των δίδυμων σηράγγων.

Ο μανδύας αποσάρθρωσης (EL) συνίσταται από καστανοπράσινα αμμοιλυώδη υλικά με ψαμμιτικά και ιλυολθιθικά τεμάχη. Λόγω του μικρού πάχους του είναι άνευ σημασίας για το έργο.

Κορηματικά υλικά (Sc) συνιστάμενα από τεμάχη αποσαρθρωμένου ψαμμίτη και ιλυολίθου με αργιλοαμμώδες υλικό αποτυπώθηκαν στην περιοχή του μετώπου εισόδου. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 5m. Τοπικά εντός του σχηματισμού εμφανίζονται επιφανειακοί ερπυσμοί και εδαφικές θραύσεις μικρής έκτασης.

Αναφορικά με την παρουσία υπογείων υδάτων, στη φάση της κατασκευής θα πρέπει να αναμένονται κάποιες κατεισδύσεις μέχρι το επίπεδο διεύλευσης της σήραγγας μέσω του δευτερογενούς πορώδους – συστήματα ασυνεχειών – της βραχομάζας, ιδιαίτερα στις περιοχές όπου εποφανειακά παρατηρούνται χαλαρά υλικά (LS, EL, Sc) στα οποία αναπτύσσονται φρεάτιοι υδροφόροι ορίζοντες μικρής δυναμικότητας. Η διαπερατότητα του σχηματισμού οφείλεται λόγω της λιθολογικής του σύστασης κατά κύριο λόγο σε ασυνέχειες και είναι γενικά χαμηλή. Οι εισροές κατά τη μέχρι τώρα διάνοιξη ήταν ασήμαντες. Ωστόσο το πέτρωμα στο μέτωπο εκσκαφής εμφανίζονταν κατά κανόνα ύφυγρο, ενώ κατά θέσεις παρατηρήθηκε έντονη υγρασία έως στάγδην ροή (π.χ. στη Χ.Θ. 5+505 του δεξιού κλάδου και περί την Χ.Θ. 5+490 του αριστερού), πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο σχηματισμός είναι πιθανώς κορεσμένος.

5.4 Προβλήματα διάνοιξης και υποστήριξης σήραγγας- Χρήση ακίδων

Η δυσκολία που εισάγει στο σχεδιασμό του έργου η πολύπλοκη γεωλογία, φαίνεται καθαρά και στην ασυμφωνία των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού όπως προτάθηκαν από το μελετητή και το σύνολο των ειδικών επιστημόνων και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (5.5). Οπως φαίνεται και από τον πίνακα η ασυμφωνία μεταξύ των επιστημόνων πηγάζει από το γεγονός ότι ο μελετητής ορίζει μια περιοχή αποδεκτών τιμών, από τις οποίες οι χαμηλότερες τιμές μπορεί να οδηγήσουν σε αστοχία του έργου. Έτσι, οι ειδικοί επιστήμονες σύμβουλοι μηχανικοί), σχεδόν στην πλειοψηφία των παραμέτρων λαμβάνουν τη μέση τιμή των τιμών του μελετητή αποκλείοντας όμως τη μικρότερη των τιμών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5. Σύγκριση των προτεινόμενων τιμών σχεδιασμού του έργου και κατάστασης της βραχομάζας μεταξύ των ειδικών επιστημόνων και του μελετητή (Hoek & Marinos 2001).

Τιμές παραμέτρων	**Τεχνική έκθεση αξιολόγησης γεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών**	**Επιλογή τελικων τιμών σχεδιασμού**	**Πρόταση των ειδικών επιστημόνων**
Μοναξονική αντοχή (σci) MPa	8	9-12	10
Σταθερά (mi)	9	9	7
GSI	22	15-25	21
Αντοχή βραχομάζας (σcm) MPa	0.5	0.3-0.74	0.48
Συντελεστής παραμόρφωσης (Em) MPa	500	400-800	600
Γωνία τριβής (φ)	25	16.8-22.9	20.3
Συνοχή (c) kPa	150	110-250	167

Ο προσδιορισμός των συμβατικών διατομών εφαρμογής εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης για το σύνολο των γεωλογικών σχηματισμών που αναμενόταν να συναντηθεί κατά μήκος της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου πραγματοποιήθηκε βάσει των τεχνικογεωλογικών συνθηκών της βραχομάζας, των συνθηκών πίεσης και παραμόρφωσης, των αναγκών αντιστήριξης και του τρόπου εκσκαφής. Στο διάχωρισμό της βραχομάζας στην περιοχή της σήραγγας σε επιμέρους κατηγορίες, προσδιορίστηκαν πέντε βασικές κατηγορίες A, B, C, D και E. Τα κύρια χαρακτηριστικά των συναντώμενων γεωλογικών σχηματισμών και των μέτρων υποστήριξης, το βήμα προχώρησης, την αλληλουχία και τη μέθοδο εκσκαφής και το απαιτούμενο πάχος τελικής επένδυσης, προέκυψαν απο τις σχετικές αριθμητικές και αναλυτικές μεθόδους. Τα ποσοστά μηκών εφαρμογής των συμβατικών κατηγοριών εφαρμογής εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου για τον αριστερό κλάδο παρουσιάζονται στον Πίνακα (5.6).

Πίνακας 5.6. Ποσοστά μηκών εφαρμογής των συμβατικών κατηγοριών εφαρμογής εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης σήραγγας Ανθοχωρίου (Hoek & Marinos, 2001).

Αριστερός Κλάδος			**Δεξιός Κλάδος**		
Κατηγορία	**Μήκος (m)**	**Ποσοστό (%)**	**Κατηγορία**	**Μήκος (m)**	**Ποσοστό (%)**
B	40,0	6,1	B	40,0	5,9

C	213,5	32,2	C	222,4	33,0
D	126,0	19,0	D	129,0	19,2
E	257,0	38,8	E	252,0	37,4
Cp	6,0	3,9	Cp	30,0	4,5

Το κύριο πρόβλημα κατά την μέχρι τώρα διάνοιξη εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα της σήραγγας και είναι οι συγκλίσεις της διατομής. Το κατακόρυφο μέτωπο εκσκαφής (χωρίς πυρήνα στήριξης) ήταν γενικά ευσταθές, παρότι οι διατμημένες, στιλπνές επιφάνειες ιλυολίθου εμφανίζονταν συχνά ομόροπες με το μέτωπο. Σημειώνεται όμως ότι σε συνδυασμό με έντονη υγρασία, τέτοιες διατμημένες επιφάνειες προκάλεσαν ορισμένες μεμονωμένες αλλά σημαντικές καταπτώσεις (π.χ. 5 και 10m^3 στις Χ.Θ. 5+472 και Χ.Θ. 5+476 του δεξιού κλάδου, αντιστοίχως).

<u>Διάνοιξη στα πρώτα 180m από το στόμιο εξόδου</u>

Στα πρώτα 180m από το στόμιο εξόδου, το κέλυφος προσωρινής υποστήριξης υπέστη ρωγματώσεις, καθιζήσεις μέχρι 36cm και οριζόντιες συγκλίσεις μέχρι 15-20cm, με αποτέλεσμα να μην επαρκεί ο διαθέσιμος χώρος γαι τη σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης. Προς αποφυγή των επικίνδυνων εργασιών αποκατάστασης της διατομής αποφασίστηκε η μείωση της ακτίνας της διατομής χρήσεως σε 5.05m. Οπως αναλύεται στη τεχνική έκθεση των ΟΜΕΤΕ και συνεργάτες (2003), οι μεγάλες παραμορφώσεις στις περιοχές πολύ μικρού υπερκείμενου (<20-25m στα πρώτα 80m) δεν μπορούν να ερμηνευτούν παρά μόνο εάν θεωρηθεί ότι το κέλυφος φορτίστηκε από ολόκληρο το βάρος των υπερκείμενων γαιών μέχρι την επιφάνεια. Δεδομένου ότι στα μικρά υπερκείμενα (και μάλιστα στην κατάσταση οριακής ισορροπίας) αναπτύσσονται φορτία τα οποία είναι μάλλον μεγαλύτερα από τα αναμενόμενα, οι καθιζήσεις της στέψης δεν μπορούν να εξηγηθούν παρά μόνο σαν αποτέλεσμα συνολικής καθίζησης του κελύφους. Τα παραπάνω φαίνονται και από τις μετρηθείσες συγκλίσεις (π.χ. στη Χ.Θ. 5+600 του δεξιού κλάδου – υπερκείμενο περίπου 35 μέτρων), παρατηρείται ότι κατά την χρονική περίοδο 09/04/01 – 09/10/01 η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση αυξάνεται από 40 σε 100 mm, η δε κατακόρυφη από 100mm σε 260mm (σχήμα 5.6 και 5.7, ακίδα 2). Τα διάγραμματα στο κάτω μέρος των προαναφερόμενων σχημάτων, δείχνουν την εκτιμώμενη κατανομή των αξονικών παραμορφώσεων του κελύφους στις 09/04/01 και 09/10/01, αντιστοίχως. Οι διάφορες καμπύλες ατιστοιχούν σε διάφορες υποθέσεις αναφορικά με την ελαστική γραμμή του κελύφους. Διαπιστώνεται ότι οι αξονικές παραμορφώσεις δεν διαφοροποιούνται σημαντικά μεταξύ των 09/04/01 και 09/10/01. Παρά τον υπερδιαπλασιαμό των μετατοπίσεων η μέγιστη αξονική παραμόρφωση παραμένει ίση με 1.2%. κατά την εν λόγω χρονική περίοδος το κέλυφος μετατοπίσθηκε πρακτικά σαν στέρεο σώμα, δηλαδή, χωρίς να υποστεί πρόσθετες παραμορφώσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι παρά το μέγεθος των παραμορφώσεων και των ρωγματώσεων του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δεν υπήρξε κίνδυνος συνολικής αστοχίας της σήραγγας, πράγμα το οποίο υπογραμμίζει τη σημασία της πλαστιμότητας του κελύφους προσωρινής υποστήριξης – δηλαδή των πλαισίων από μορφοχάλυβα και της προσθήκης ινών στο εκτοξευόμενο

σκυρόδεμα. Δεδομένου ότι η προαναφερθείσα μέγιστη παραμόρφωση του 1.2% είναι τετραπλάσια της παραμόρφωσης κατά τη θραύση του σκυροδέματος (03-0.4%) πρέπει να θεωρηθεί ότι τουλάχιστον κατά θέσεις η αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει υποβιβαστεί στην πολύ χαμηλή παραμένουσα τιμή, την οποία προσδίδουν οι χαλύβδινες ίνες.

Περιοχές μεγαλύτερου υπερκείμενου

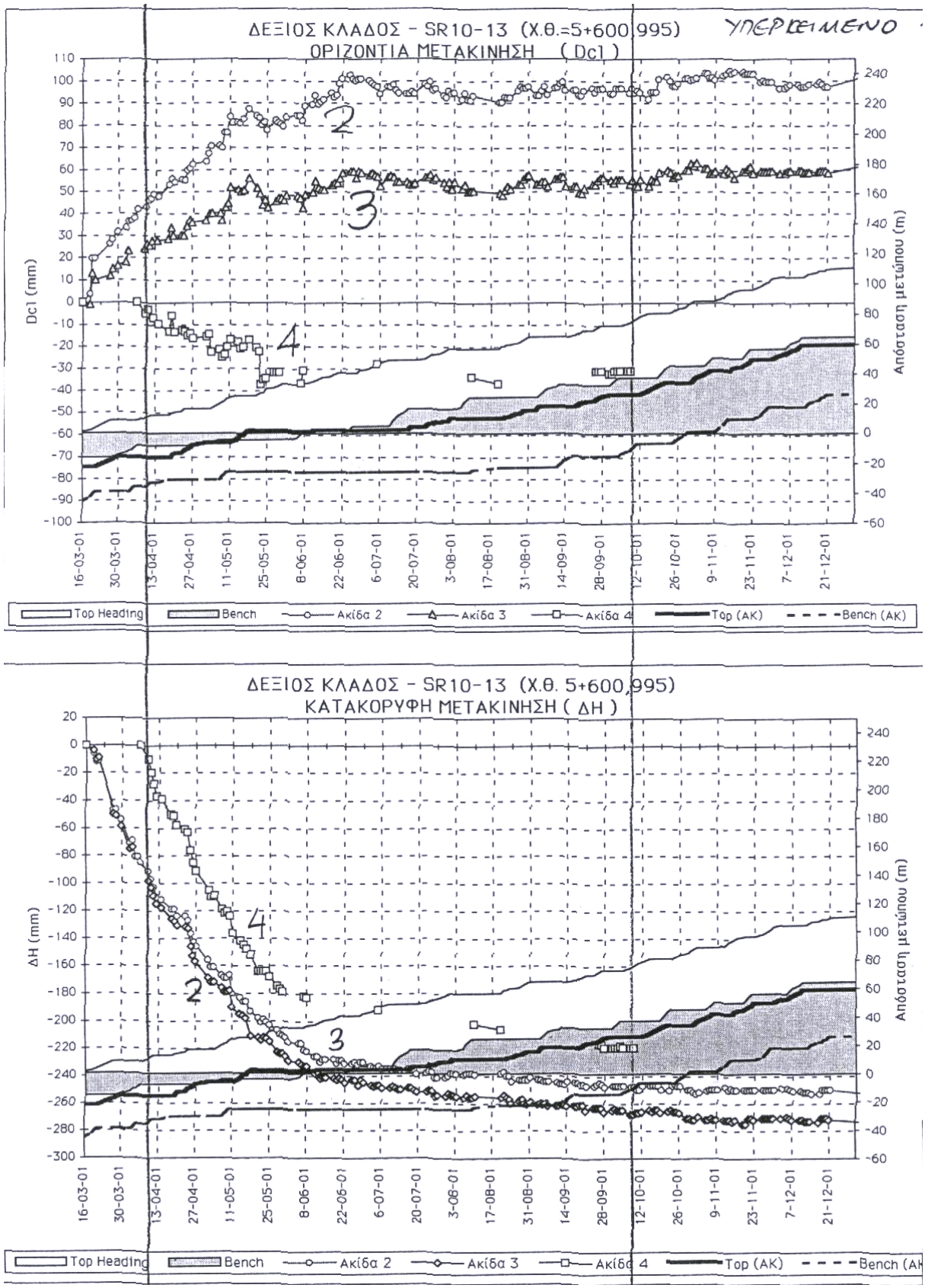
Στη συνεχεία, και για 30m περίπου, παρατηρήθηκε μια παροδική βελτίωση των συνθηκών η οποία οφειλότων στην επικράτηση ψαμμιτών (πιθανώς ογκόλιθοι με διαστάσεις αντίστοιχες της διατομής). Από εκεί και πέρα επικράτησε η ιλυολιθική φάση με χαοτική δομή. Κατά την Α φάση διάνοιξης παρουσιάσθηκαν έντονα φαινόμενα ρωγματώσεων και συγκλίσεων του κελύφους (Πίνακας 5.7).

Πίνακας 5.7. Μέγιστες ταχύτητες σύγκλισης πριν την επανεπίχωση, (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003).

Κλάδος	**Κατακόρυφη (mm/μήνα)**		**Οριζόντια (mm/μήνα)**	
	Α Φάση	**Β Φάση**	**Α Φάση**	**Β Φάση**
Δεξιός	52	69	37	71
Αριστερός	61	70	32	42

Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να σταματήσει προσωρινά η διάνοιξη της άνω ημιδιατομής ώστε να επιταχυνθεί η εκσκαφή της βαθμίδας και να μειωθεί η απόσταση των μετώπων της Α και της Β φάσης. Ομως με την εκσκαφή της βαθμίδας επιδεινώθηκε το πρόβλημα της σύγκλισης. Σαν λύση ανάγκης εκτελέσθηκε επανεπίχωση της κάτω ημιδιατομής. Ταυτόχρονα είχε σταματήσει η διάνοιξη στο ανατολικό τμήμα της σήραγγας.

Από τις μετρήσεις πεδίου προέκυψε ότι οι συγκλίσεις αμέσως μετά τη διάνοιξη και με την προχώρηση του μετώπου συνεχίσαν να αυξάνονται για μήνες (λόγω στερεοποίησης ή ερπυσμού του πετρώματος). Το σχήμα (5.8) αφορά το δεξιό κλάδο στην περιοχή μεγίστου υπερκείμενου κοντά στο σταματημένο μέτωπο της Α φάσης. Στην περιοχή αυτή έχει πραγματοποιηθεί μόνο η εκσκαφή της Α φάσης του δεξιού κλάδου. Το διάγραμμα έδειξε ότι έξι μήνες μετά τη διάνοιξη η καθίζηση της στέψης συνεχίζονταν με ρυθμό 10mm/μήνα ενώ τους τελευταίους μήνες παρατηρείται – προς το παρόν τουλάχιστον – μια σταθεροποίηση των ρυθμών καθίζησης σε χαμηλά επίπεδα.

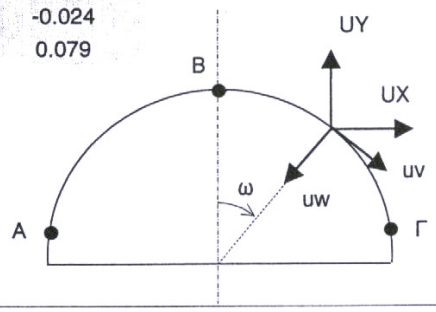


Σχήμα 5.6. Δεξιός κλάδος, Χ.Θ. 5+600: Χρονική εξέλιξη των συγκλίσεων και εκτίμηση των αξονικών παραμορφώσεων του κελύφους στις 09.04.01 και 09.10.01 (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003).

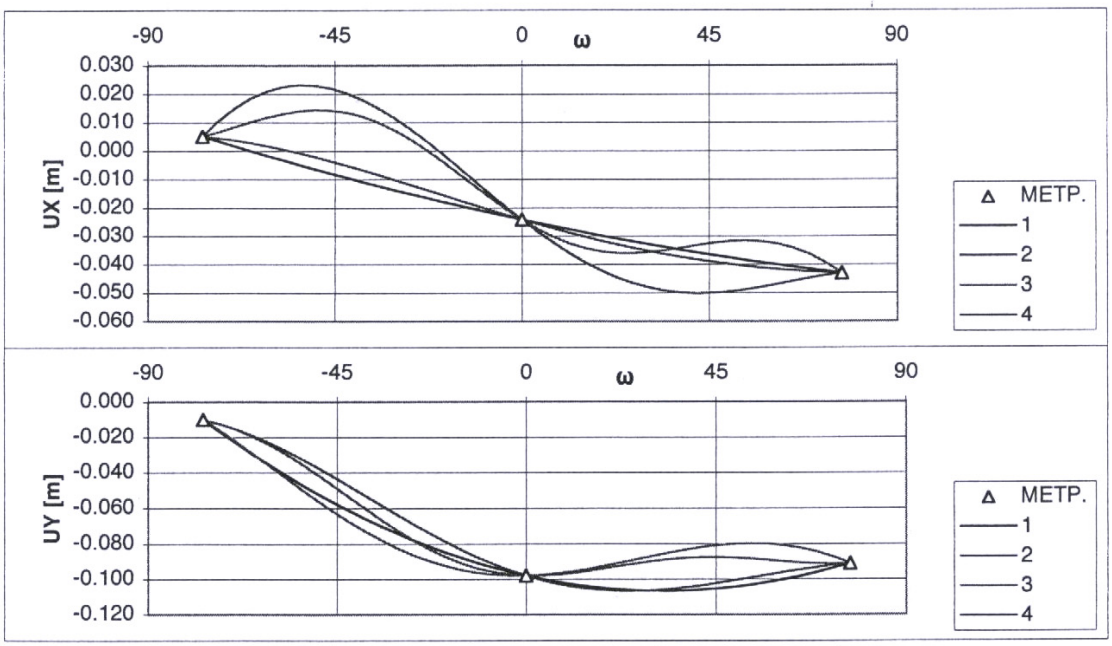
ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ 5+600 09.04.01

ΣΗΜΕΙΟ	UX [m]	UY [m]	UW [m]	UV [m]
A	0.005	-0.010	0.007	-0.009
B	-0.024	-0.098	0.098	-0.024
Γ	-0.043	-0.091	0.063	0.079

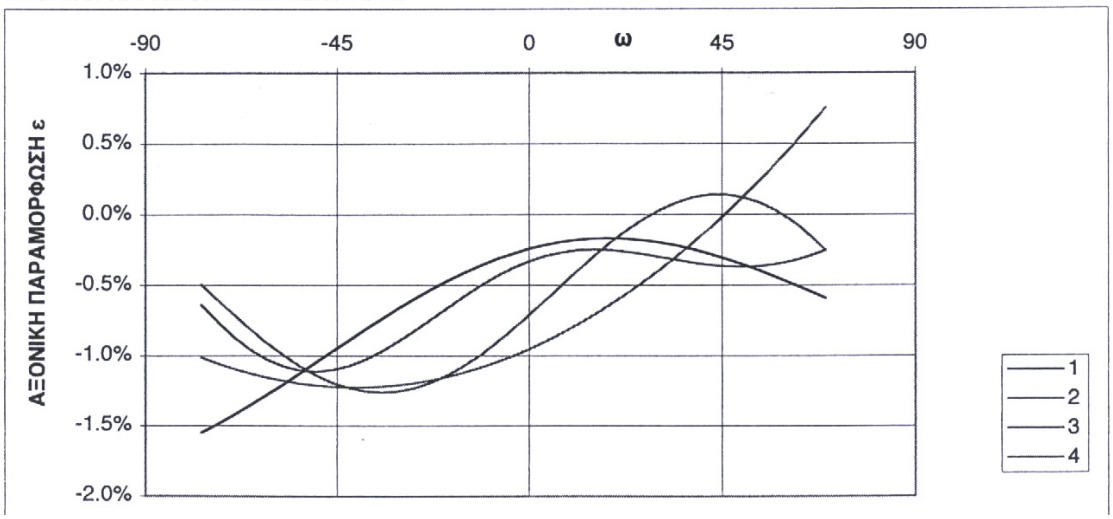
ΑΚΤΙΝΑ ΚΕΛΥΦΟΥΣ [m] 6.5



ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΓΡΑΜΜΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

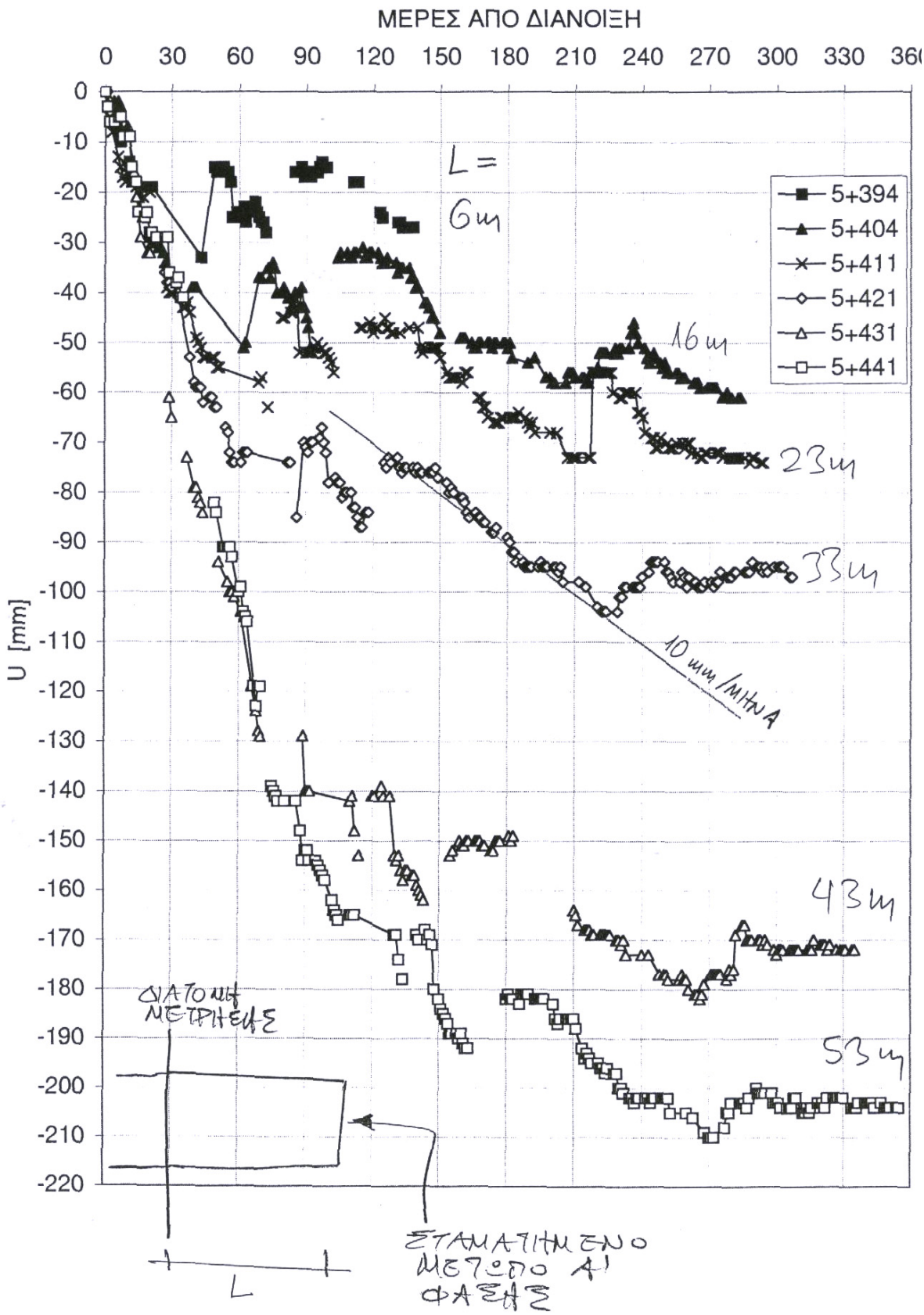


ΑΞΟΝΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΕΛΥΦΟΥΣ



Σχήμα 5.7. Δεξιός κλάδος, Χ.Θ. 5+600: Χρονική εξέλιξη των συγκλίσεων και εκτίμηση των αξονικών παραμορφώσεων του κελύφους στις 09.04.01 και 09.10.01 (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003).

Οι κατακόρυφες συγκλίσεις ήταν γενικά υπερδιπλάσιες των οριζοντίων, όμως υπήρξαν και θέσεις στα μεγαλύτερα υπερκείμενα όπου παρατηρήθηκαν οριζόντιες συγκλίσεις αντίστοιχες των κατακορύφων. Επίσης οι μετρήσεις έδειξαν ότι οι εσωτερικές παρειές υπέστησαν μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις από τις εξωτερικές (ιδιαίτερα ο δεξιός κλάδος), πράγμα το οποίο οφείλεται είτε στην ανομοιογένεια του σχηματισμού ή του τασικού πεδίου, είτε στο ότι η εκσκαφή του ενός κλάδου επηρεάζει τον άλλο. Ωστόσο σε ορισμένες θέσεις οι μεγάλες οριζόντιες συγκλίσεις πρέπει να οφείλονται κατά κύριο λόγο στη διάνοιξη του δεύτερου κλάδου ή ακόμα και στη διέλευση του μετώπου εκσκαφής του αριστερού κλάδου.



Σχήμα 5.8. Καθίζηση στέψης (ακίδα 3) στα τελευταία 50m του δεξιού κλάδου (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003).

Σημειώνεται επίσης ότι οι ρωγμές και οι παραμορφώσεις του κελύφους παρατηρήθηκαν κατά κύριο λόγο στη παρειά του ενδιάμεσου στύλου (και ιδιαίτερα στη σύνδεση της Α με τη Β φάση).

Η αύξηση των οριζοντίων μετατοπίσεων μεταξύ 08/05/02 και 09/07/02, η οποία όπως προαναφέρθηκε συμπίπτει με τη διέλευση του αριστερού κλάδου, προκάλεσε μια αύξηση της μέγιστης αξονικής παραμόρφωσης από 0.6% σε 2-3%. Το σκυρόδεμα δεν είναι δυνατόν να παραμορφωθεί σε τέτοιο βαθμό χωρίς θραύση. Κατά την επίσκεψη των μελετητών στο εργοτάξιο, διαπιστώθηκε ότι κατά θέσεις έχει αποκολληθεί το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αποκαλύπτοντας έτσι τις ράβδους των δικτυωτών πλαισίων. Οι ράβδοι έχουν αστοχήσει σε λυγισμό. Αυτό παρατηρείται και στη κλείδα της σήραγγας και παρέχει συνεπώς μια πρόσθετη σαφή ένδειξη υψηλών οριζοντίων φορτίων.

Στα μεγαλύτερα υπερκείμενα, το περιβάλον πέτρωμα της σήραγγας τείνει να «κλείσει» τη διατομή (οι αξονικές παραμορφώσεις είναι υπερδιπλάσιες από αυτές, με ύψος υπερκείμενων στο μισό) από όλες τις μεριές προκαλώντας έτσι μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις στο κέλυφος της προσωρινής αντιστήριξης.

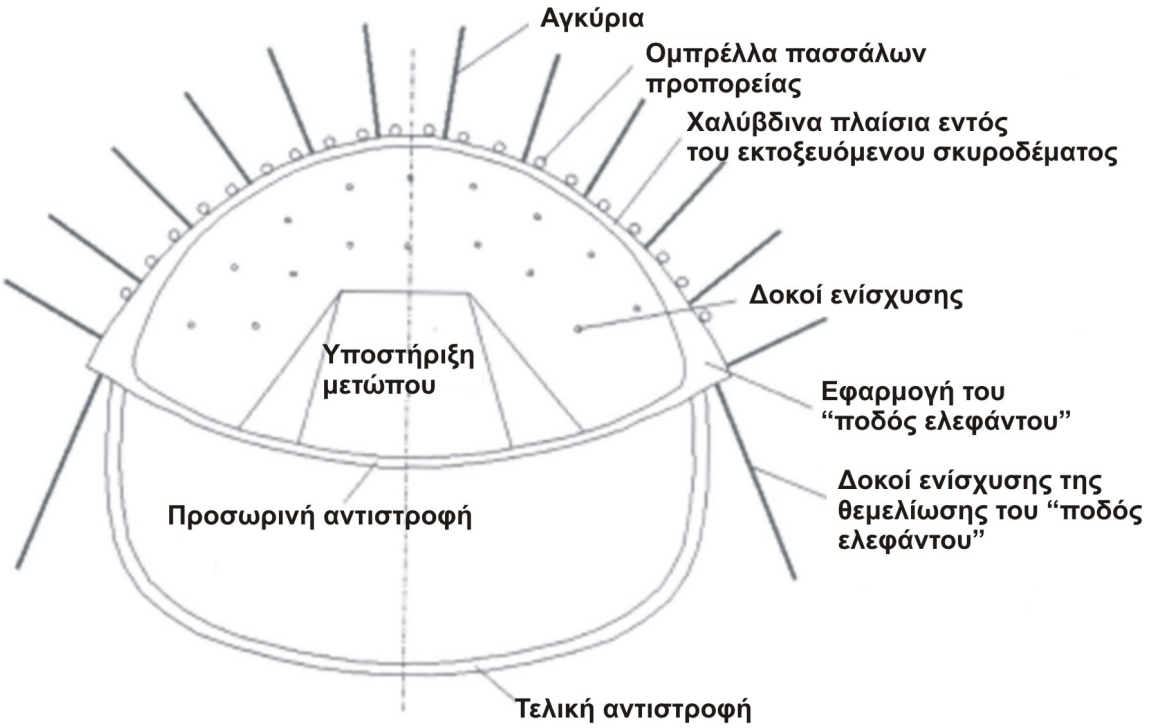
5.5 Μεθοδολογία υποστήριξης σε μαλακά πετρώματα κατά το σχεδιασμό της σήραγγας

Στο συγκεκριμένο έργο λόγω των δύσκολων γεωλογικών συνθηκών, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η συνήθης διαδικασία σχεδιασμού μιας σήραγγας κατά την οποία προτείνεται μια σειρά έργων υποστήριξης του έργου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι προτιμότερο να σχεδιάζεται μια ακολουθία εκσκαφών και υποστηρίξεων η οποία να παρέχει ασφάλεια κατά την κατασκευή ανεξαρτήτως των κακών γεωλογικών συνθηκών που επικρατούν στο χώρο έρευνας. Η διαδικασία αυτή επιλέγεται και υλοποιείται από τον μελετητή και κατασκευαστή του έργου και σκοπό έχει τη μεγιστοποίηση της ασφάλειας κατασκευής του έργου. Φυσικά, επειδή σημαντική παράμετρος στην κατασκευή ενός έργου είναι το κόστος αυτού, η επιλογή των κατάλληλων τεχνικών υποστήριξης όπως και το πλήθος αυτών εξαρτάται από τις συναντώμενες γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες του έργου.

Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας εφαρμόστηκαν μία σειρά από μέτρα υποστήριξης ενώ η διάνοιξη έγινε τμηματικά. Η προσωρινή υποστήριξη της άνω ημιδιατομής (Α φάση διάνοιξης) αποτελείτο από αγκύρια fiberglass στο μέτωπο, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, μεταλλικά πλαίσια από μορφοχάλυβα (τα οποία αντικαταστάθηκαν με δικτυωτά πλαίσια στα τελευταία 125m), αγκύρια στις παρειές, μικροπασσάλους στην έδραση του κελύφους της Α φάσης και προσωρινό ανάστροφο τόξο στον πυθμένα. Στο σύνολο των μέχρι τώρα διανοιγέντων τμημάτων εφαρμόστηκαν συστηματικώς μέτρα προυποστήριξης της στέψης (δοκίδες προπορείας στο μεγαλύτερο τμήμα, ράβδοι προπορείας στα τελευταία 55m). Η εκσκαφή της βαθμίδας (Β φάση διάνοιξης) και το κλείσιμο του δακτυλίου προσωρινής επένδυσης με οπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (και μεταλλικά πλαίσια από μορφοχάλυβα κατά θέσεις) ακολουθούσε το μέτωπο εκσκαφής της Α φάσης σε απόσταση 40

μέτρων, περίπου. Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των μεθόδων υποστήριξης που μπορούν να εφαρμοστούν θεωρώντας δεδομένη την εφαρμογή της ομπρέλλας πασσάλων προπορείας πάνω από το τόξο υποστήριξης. Η τεχνολογία αυτή έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε δύσκολα εδάφη, ενώ τόσο η οργανολογία όσο και οι εργολάβοι έχουν την απαραίτητη τεχνογνωσία να την εφαρμόσουν με απόλυτη επιτυχία.

Τα τυπικά στοιχεία υποστήριξης μιας σήραγγας σε μαλακά πετρώματα παρουσιάζονται στο σχήμα (5.4) και περιγράφονται με λεπτομέρεια παρακάτω.



Το σχήμα δεν είναι σε κλίμακα και η τελική επένδυση δεν εμφανίζεται

Σχήμα 5.4. Τυπική διατομή υποστήριξης για διάνοιξη σηράγγων σε μαλακά εδάφη (Hoek & Marinos, 2001).

Ομπρέλλα πασσάλων προπορείας – Με βάση τον καθορισμένο κανονισμό υποστήριξης από την Εγνατία Οδός Α.Ε., το σύστημα υποστήριξης αποτελείται από τσιμεντοενέσεις διαμέτρου 114mm, μήκους 12 μέτρων οι οποίες πραγματοποιούνται με τη μορφή ομπρέλλας ανά 8m και με επικάλυψη 4m από προηγούμενη αντίστοιχη επιτυχημένη ομπρέλλα υποστήριξης. Ο σχεδιασμός της παρουσιαζόμενης ομπρέλλας έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στα μαλακά εδάφη της Ελλάδος κατά την διάνοιξη διαφόρων σηράγγων. Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή ο σχεδιασμός είναι εμπειρικός, δεν υπάρχουν θεωρητικά μοντέλα βελτίωσης του σχεδιασμού τους. Η απόκριση του εδάφους στη θεμελίωση χρησιμοποιείται έτσι ώστε να επαναεξεταστεί ο σχεδιασμός της υποστήριξης σε ότι αφορά το πλήθος των πασσάλων προπορείας, την μεταξύ τους απόσταση όσο και

το πλήθος και τη διάταξη των τσιμεντενέσεων. Επίσης, σημαντικό είναι τα έργα που εκτελούνται να μην διαταρράσουν τη μάζα (ισορροπία) των πετρωμάτων σε τέτοια μαλακά εδάφη και για αυτό το λόγο κάθε επέμβαση παρακολουθείται με λεπτομέρεια από πληθώρα γεωτεχνικών οργάνων.

Ο πρωτεύων ρόλος της ομπρέλλας (που δρα ως δοκός προστασίας) είναι σημαντικός, δηλαδή η ελαχιστοποίηση της παραμόρφωσης του μετώπου εκσκαφής έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια συνέχισης των εργασιών διάνοιξης της σήραγγας. Οταν η διάνοιξη προχωρήσει και η ομπρέλλα βρεθεί όπισθεν του μετώπου χρήζει άμεση υποστήριξης. Η υποστήριξη αυτή δημιουργεί επιπλέον προβλήματα δεδομένου ότι η υποστήριξη πρέπει να σχεδιαστεί για να «κρατήσει» τόσο τα υπερκείμενα πετρώματα και την παραμόρφωση που υφίστανται αυτά κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, όσο και το βάρος του ατσάλινου σκελετού της αρχικής ομπρέλλας υποστήριξης. Η λύση στη δυσκολία που μόλις αναφέρθηκε δίνεται με τον ισομοιρασμό των τάσεων/βάρους του σκελετού στο πλαίσιο υποστήριξης. Αυτό γίνεται είτε με την πλήρωση με σκυρόδεμα του διάκενου μεταξύ της ομπρέλλας και της υποστήριξης, είτε με τη χρήση του διογκοτικού Bullflex στο διάκενο των δύο οπλισμών.

<u>Δοκοί ενίσχυσης (fibreglass face reinforcement dowels)</u> – Οπως και στην περίπτωση της ομπρέλλας υποστήριξης, έτσι και σε αυτή τη μέθοδο υποστήριξης, σκοπός είναι ο έλεγχος της παραμόρφωσης και της πιθανής αστοχίας του μετώπου εκσκαφής κατά τη διάνοιξη μιας σήραγγας. Η εφαρμογή των δοκών ενίσχυσης είναι εμπειρική και δεν υπάρχουν θεωρητικά / στοχαστικά μοντέλα που να ορίζουν το πλήθος, το μέγεθος ή και την απόσταση μεταξύ των δοκών. Γενικότερα, οι δοκοί έχουν 12m μήκος και εγκαθίστανται σε κάνναβο με αποστάσεις που κυμαίνονται από 1.0 έως 1.5m. Σε ιδεατές περιπτώσεις, οι δοκοί υποστήριξης τοποθετούνται στα ενδιάμεσα διαστήματα μεταξύ των ομπρελλών.

<u>Υποστήριξη μετώπου (face buttress)</u> – Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται για υποστήριξη κατά τη διάνοιξη των σηράγγων σε μαλακά εδάφη με κύριο σκοπό την υποστήριξη του μετώπου εκσκαφής. Οι διαστάσεις αυτής της υποστήριξης καθορίζεται από πρακτικές θεωρήσεις τόσο των χρησιμοποιούμενων οργάνων όπως και της προσβασιμότητας στο χώρο εκσκαφής.

Υποστήριξη του τόξου της κορυφής του μετώπου (support of top heading arch) – Οπως αναφέρθηκε παραπάνω, όποια παραμόρφωση δημιουργείται κατά την εκσκαφή του έργου, αθροιζόμενη με το βάρος των πασσάλων προπορείας μορφής ομπρέλλας, πρέπει να αντιμετωπιστούν με τη χρήση συστήματος υποστήριξης του τόξου της οροφής της εκσκαφής του μετώπου. Η μέθοδος που συνήθως εφαρμόζεται είναι η εγκατάσταση ενός συστήματος ατσαλένιων τόξων όσο πιο κοντά γίνεται η εκσκαφή του μετώπου ενώ τα πλαίσια εγκαθίστανται με τη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η τομή των ανεξάρτητων ατσάλινων πλαισίων καθώς και η μεταξύ τους απόσταση είναι οι κύριες παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται από τον σχεδιαστή της υποστήριξης του έργου. Γενικά, τόσο η τομή των τόξων πρέπει να είναι όσο πιο μικρή μπορεί να είναι ενώ η μεταξύ τους απόσταση πρέπει να είναι όσο μεγαλύτερη επιτρέπεται να είναι και φυσικά όλα τα παραπάνω εξαρτώνται άμεσα από τις απαιτήσεις της υποστήριξης του μετώπου εκσκαφής λόγω της φόρτισης

των πετρωμάτων όπως και λόγω της χρήσης των πασσάλων προπορείας μορφής ομπρέλλας. Σκοπός της εγκατάστασης των τοξωτών πλαισίων είναι να γίνει η βέλτιστη τοποθέτηση (minimum configuration) με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει ισοκαταμερισμός των φορτίων στον ατσάλινο σκελετό υποστήριξης. Για τη σωστή εγκατάσταση του συστήματος υποστήριξης, απαιτείται η επαφή των τοξωτών πλαισίων τόσο με το βραχώδες περιβάλλον πέτρωμα όσο και με τους πασσάλους προπορείας τύπου ομπρέλλας και αυτό επιτυγχάνεται με τη πλήρωση των όποιων κενών με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ενα επίσης σημαντικό στοιχείο που σχετίζεται άμεσα με τη χρήση των τοξωτών πλαισίων είναι η δυσκολία που παρουσιάζει η πλήρωση των κενών μεταξύ του οπίσθιου μέρους των πλαισίων και του βραχώδους υποβάθρου. Τέτοια προβλήματα προσπερνώνται σχετικά εύκολα με την αντικατάσταση (που δεν είναι και πολύ συνήθης) των κοιλοδοκών διατομής Η, από το σύστημα οπλισμού τεσσάρων δοκών το οποίο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το κοιλοδοκό διατομής Η.

Ενώ το σύστημα υποστήριξης που αναφέρθηκε παραπάνω παρουσιάζει το πλεονέκτημα της τσιμέντωσής του σε «σκιερές» περιοχές, δεν είναι πολύ εύκολο να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με όλα τα άλλα συστήματα υποστήριξης που εφαρμόζονται στα εργοτάξια.

<u>Υποστήριξη οροφής με εφαρμογή του "ποδός ελεφάντου" (elephant foot for the arch support)</u> – Ενα από τα κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου εκσκαφής από την οροφή είναι ότι απαιτείται η υποστήριξη της οροφής του μετώπου με τη χρήση των τοξωτών στελεχών. Τυχόν αστοχία της όποιας υποστήριξης έχει υιοθετηθεί από τον μελετητή, θα οδηγήσει σε πλήρης κατάρρευση τόσο του μετώπου όσο και πιθανή κατάρρευση όλων των άλλων συστημάτων υποστήριξης (ομπρέλλα πασσάλων προπορείας, χαλύβδινα τόξα υποστήριξης) καθώς και κατάρρευση των υπερκείμενων πετρωμάτων της οροφής της σήραγγας. Τέτοιου είδους προβλήματα οδηγούν σε αποφυγή χρήσης της συγκεκριμένης μεθοδολογίας (top heading and bench excavation method) εκσκαφής.

Η συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδος υποστήριξης της βάσης του τόξου είναι η χρήση μια διευρυμένης τομής ή όπως αναφέρεται βιβλιογραφικά «πόδι ελεφάντου – elephant foot» με τη χρήση της οποίας μεταφέρονται τα φορτία που λαμβάνει το τοξωτό πλαίσιο στη βραχώδης μάζα που βρίσκεται στις πλευρές της σήραγγας. Είναι αυτονόητο ότι ο σχεδιασμός αυτής της υποστήριξης (elephant foot) με σκοπό η βραχώδης μάζα να λάβει όλα τα φορτία της οροφής είναι πολύ μεγάλης σημασίας. Είναι σημαντικό, η πλάκα της βάσης υποστήριξης, να έχει αρκετά μεγάλη διάσταση και την απαιτούμενη σκληρότητα έτσι ώστε να παρέχεται ασφάλεια στην υποστήριξη. Πολλές φορές μάλιστα απαιτείται η ενίσχυση του υπεδάφους με τσιμεντενέσεις, μικροπασσάλους ή άλλες μεθοδολογίες, προτού εφαρμοστεί η συγκεκριμένη τεχνική υποστήριξης η οποία θα επιβαρύνει το υπέδαφος.

Αλλο σημαντικό στοιχείο σχεδιασμού της υποστήριξης με τη μέθοδο «πόδι ελεφάντου» είναι η μεταβολή του μεγέθους των τόξων υποστήριξης κατά μήκος της ομπρέλλα πασσάλων προπορείας. Το μέγεθος του τόξου αυξάνει από μια ελάχιστη τιμή στο σημείο εγκατάστασης της ομπρέλλας και

αποκτά τη μέγιστη τιμή του στο σημείο στο οποίο θα εγκατασταθεί η επόμενη ομπρέλλα. Κατά το σχεδιασμό της υποστήριξης με τη μορφή «πόδι ελεφάντου» βασική απόφαση η οποία λαμβάνεται είναι το κατά πόσο θα διατηρηθεί σταθερό το μέγεθος της στήριξης υιοθετώντας μια κλιμακωτή βάση σήραγγας ή θα επιλέξουμε ένα μεταβαλλόμενο μέγεθος πλαισίων (τόξων) έτσι ώστε το πάτωμα της σήραγγας να είναι ευθύ. Υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειοκτήματα κατά την επιλογή όποιας μεθόδου υποστήριξης. Η τελική επιλογή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τεχνικά, πρακτικά και οικονομικά κριτήρια.

Βελτίωση του υπεδάφους θεμελίωσης στο χώρο εγκατάστασης του «ποδός ελεφάντου» (foot elephant) – Οπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, για την εγκατάσταση του «πόδι ελεφάντου» απαιτείται η προσεκτική εκσκαφή και προετοιμασία του βραχώδους υποβάθρου. Για αυτό το λόγο απαιτείται η εφαρμογή μεθόδων για τη βελτίωση της αντοχής και μείωση της παραμόρφωσης της βραχομάζας. Υπάρχουν περιπτώσεις βραχομάζας στις οποίες οι τσιμεντενέσεις είναι κανοποιητικές μέθοδοι ενίσχυσης. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις εφαρμόζεται η εγκατάσταση μικροπασσάλων ως πιο δραστική μέθοδος ενίσχυσης. Κατά την εγκατάσταση όποιας μεθόδου ενίσχυσης, σκοπός είναι τα φορτία από το «πόδι ελεφάντου» να μεταφέρονται κατευθείαν στους μικροπασσάλους ή σε όποιο άλλο σύστημα ενίσχυσης έχει επιλεγεί.

Ενίσχυση των τόξων με τη χρήση αγκυρίων (rockbolt support of arch) – Οι αγκυρώσεις αυτοδιάτρησης είναι οι μόνες μέθοδοι αγκύρωσης που μπορούν να εφαρμοστούν σε γεωλογικές συνθήκες παρόμοιες με αυτές της σήραγγας Ανθοχωρίου. Εξαιτίας της κάκιστης ποιότητας βραχομάζας στην οποία οι αγκυρώσεις εγκαθίστανται, είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί υψηλή ενίσχυση του υπεδάφους άρα και ποτέ δεν χρησιμοποιούνται ως κύρια μέθοδο υποστήριξης. Παρόλα αυτά, οι αγκυρώσεις μπορούν να αποτελέσουν συμπληρωματικά μέτρα έτσι ώστε να λάβουν και αυτές μέρος των φορτίων που μεταφέρονται στο «πόδι του ελέφαντα». Πρέπει πάλι να αναφερθεί ότι όποια αντιστήριξη αποφασιστεί έχει κύριο γνώμονα το κόστος του σχεδιασμού.

Παροδική Αντιστροφή (temporary invert) – Η παροδική αντιστροφή έχει ένα βασικό ρόλο στη στήριξη σε εκσκαφές μαλακών εδαφών. Αρχικά ελέγχει τα φορτία που λαμβάνει το δάπεδο της εκσκαφής είτε από τις παραμορφώσεις των πετρωμάτων όσο και από τις ήδη εγκατεστημένες αντιστηρίξεις. Κατά δεύτερο λόγο, λαμβάνει και ισοκατανέμει τις τάσεις που συλλέγει το «πόδι του ελέφαντα» στη βραχώδη μάζα. Για να μπορέσει η αντιστήριξη να λειτουργήσει επαρκώς και να επιτελέσει τους δύο βασικούς ρόλους τους οποίους και αναφέραμε, πρέπει να σχεδιαστεί σωστά, με ακρίβεια και με ασφάλεια να προσαρμοστεί στα προεγκατεστημένα τοξωτά συστήματα υποστήριξης. Γενικά, το σύστημα παροδικής αντιστροφής συνίσταται από οπλισμένο σκυρόδεμα με μεταλλικό πλέγμα το οποίο αποτελεί μέρος της συνολικής υποστήριξης με σκυρόδεμα της οροφής. Σε κάποιες περιπτώσεις, ένα κατασκευαστικό κενό κατασκευάζεται μεταξύ της παροδικής αντιστροφής και του «ποδιού του ελέφαντα», αλλά προσέχοντας πάντα το σημείο αυτό να μην αποτελέσει σημείο αδυναμίας/αστοχίας στο κέλυφος που υλοποιείται κατά την υποστήριξη. Σημαντικό επίσης κατά το σχεδιασμό αυτού του τύπου της στήριξης είναι η επιλογή του πάχους, της καμπυλότητας και της

θέσης των μεταλλικών πλεγμάτων στη στήριξη παροδικής αντιστροφής έτσι ώστε να παρέχεται ικανοποιητική ασφάλεια στη κατασκευή. Τέτοιου είδους αποφάσεις σχεδιασμού, λαμβάνονται είτε με τη χρήση κατασκευαστικών υπολογισμών είτε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

Εκσκαφή έδρασης και τελική αντιστροφή (bench excavation and final invert) – Με το πέρας της εκσκαφής της οροφής και του μετώπου της σήραγγας υπό τη στήριξη όλων των χρησιμοποιούμενων συστημάτων που αναφέρθηκαν πρωτύτερα, το τελικό στάδιο της εκσκαφής περιλαμβάνει την καταστροφή της προσωρινής αντιστροφής, την εκσκαφή των υλικών της βάσης και τοποθέτηση των τοιχωμάτων και της τελικής αντιστροφής στο τμήμα της βάσης.

Στην πλειοψηφία των σηράγων, η περαίωση των εργασιών της βάσης είναι μια ανεξάρτητη διαδικασία η οποία απλά ολοκληρώνει τη τμηματική διάνοιξη και ακολουθεί την ολοκλήρωση των εργασιών στην οροφή. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας συνίσταται στο γεγονός ότι είναι απλούστερη η διαδικασία μετακίνησης των βαρέων οχημάτων σε ένα επίπεδο παρά η συνεχής κατασκευή και καταστροφή οδών (ραμπών) πρόσβασης σε διαφορετικά επίπεδα όταν η διαμόρφωση και κατασκευή του δαπέδου πραγματοποιείται παράλληλα με την οροφή. Σε σήραγγες με σκληρά πετρώματα, κύριο μέλημα του μελετητή είναι η κατασκευή της οροφής καθώς σε τέτοια εδάφη δεν παρουσιάζονται προβλήματα αστάθειας, ενώ η ταχύτητα διάτρησης είναι η σημαντικότερη παράμετρος του έργου. Σε περιπτώσεις σηράγγων που κατασκευάζονται σε εδάφη με φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά, πρώτιστη σημασία έχει η ασφάλεια και έλεγχος της παραμορφωσιμότητας της κατασκευής. Σε περιπτώσεις σηράγγων σε μαλακά εδάφη, με σκοπό την αύξηση των χρόνου κατασκευής/διάτρησης, γίνεται παράλληλη εγκατάσταση της ομπρέλλας πασσάλων προπορείας ενώ όσο τα όργανα για την εκσκαφή της οροφής είναι σε αργία, αυτά εργάζονται για την μορφοποίηση του δαπέδου της σήραγγας. Το μειονέκτημα της καθυστέρησης του έργου από την κατασκευή/καταστροφή των οδών προσπέλασης σε διαφορετικά επίπεδα αντισταθμίζεται από τη μείωση χρόνου που απαιτείται για την ολοκλήρωση της σήραγγας.

Πολλοί μελετητές σηράγγων υποστηρίζουν ότι καλύτερη είναι η παράλληλη κατασκευή της οροφής και του δαπέδου της σήραγγας έτσι ώστε να ολοκληρώνεται τμηματικά όλο το έργο κατασκευής το συντομότερο δυνατό. Πρακτικά, χρησιμοποιώντας ένα μηχάνημα εγκατάστασης πασσάλων προπορείας μορφής ομπρέλλας σε σήραγγα διαμέτρου 12 μέτρων, η μικρότερη απόσταση μεταξύ της εκσκαφής της οροφής του μετώπου και της εσκαφής της διαμόρφωσης του δαπέδου είναι περί τα 20m. Κατά τη γνώμη πολλών μελετητών, η προαναφερόμενη απόσταση είναι αρκετά μεγάλη καθώς η κατασκευή των δύο τμημάτων είναι ανεξάρτητη μεταξύ τους. Συμπερασματικά, συνίσταται η κατασκευή της οροφής του μετώπου και του δαπέδου να πραγματοποιείται ταυτόχρονα με απόσταση μεταξύ των δύο μετώπων τη μικρότερη δυνατή έτσι ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο τα διαθέσιμα μηχανήματα διάνοιξης και διαμόρφωσης.

Η καταστροφή της προσωρινής αντιστροφής κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, διαμόρφωσης και κατασκευής του δαπέδου, είναι μια τυπική διαδικασία η οποία εκτελείται με τη χρήση μηχανημάτων εκσκαφής βαρέως τύπου. Η χρήση τέτοιου είδους μηχανημάτων από χειριστές οι

οποίοι δεν εκτελούν το έργο με σοβαρότητα μπορεί να επιφέρει σοβαρές φθορές τόσο στη θεμελίωση του elephant foot όπως και στην ίδια τη στήριξη. Ο κατασκευαστικός αρμός που αναφέρθηκε νωρίτερα μπορεί να προστατέψει τη κατασκευή απομονώνοντας το σύστημα υποστήριξης elephant foot από τη θεμελίωση του.

Καθώς η προσωρινή αντιστροφή καταστρέφεται, ξεκινάει η εκσκαφή και κατασκευή του δαπέδου της σήραγγας. Κάθε επέμβαση πρέπει να εκτελείται με προσοχή έτσι ώστε να διασφαλίζεται τόσο η σωστή κατασκευή των κάθετων τοίχων της σήραγγας όσο και η προστασία της θεμελίωσης του elephant foot.

Το κάτω μέρος του elephant foot πρέπει να έχει έναν σύνδεσμο στον οποίο συνδέονται τα κάτω μέρη του ατσαλένιου σκελετού υποστήριξης. Η σύνδεση των προαναφερόμενων τεμαχών με τον σύνδεσμο πρέπει να γίνεται αμέσως μετά την εκσκαφή και σε καμμιά περίπτωση δεν πρέπει η εκσκαφή/διαμόρφωση και κατασκευή του δαπέδου να προχωρήσει περισσότερο από δύο έως τρία διαστήματα εάν δεν έχουν συνδεθεί και ασφαλιστεί τα ατσαλένια στελέχη υποστήριξης με το σύνδεσμο του elephant foot. Σε περιπτώσεις εκσκαφής σε πολύ χαλαρά εδάφη, στις οποίες προβλέπεται υψηλή συμπιεστότητα ή όταν υπάρχει σημαντική χρονοκαθυστέρηση μεταξύ της ολοκλήρωσης της κατασκευής και της εγκατάστασης του τελικής επένδυσης (lining), προτείνεται η χρήση της αντίστροφης αντιρίδας (invert strut) η οποία αποτελείται από μια κεκαμμένη κοιλοδοκό για να συνδεθεί με τα κάτω στελέχη του οπλισμού. Η αντίστροφη αντιρίδα μαζί με τα κάτω στελέχη του συστήματος υποστήριξης τσιμεντώνονται και δημιουργούν το τελικό και ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης. Οι συνδέσεις μεταξύ των ατσαλένιων στελεχών, του συστήματος elephant foot και της αντίστροφης αντιρίδας πρέπει να εκτελούνται με μεγάλη προσοχή και κάτω από αυστηρή επίβλεψη. Πρέπει να σημειωθεί η σημαντικότητα της σωστής δόμησης, σχεδιασμού και επίβλεψης των αρμών και συνδέσμων σχεδιασμού, δεδομένου ότι οποιαδήποτε κακοτεχνία θα οδηγήσει σε αστοχία του έργου.

<u>Σχετική θέση των μετώπων σε δύο σήραγγες</u> – Δεδομένου ότι δύο σήραγγες έχουν μικρή μεταξύ τους απόσταση, υπάρχει μεγάλη αλληλεπίδραση η οποία δημιουργεί πολλές φορές έντονα κατασκευαστικά προβλήματα (σχήμα 5.5). Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες δημιουργήθηκαν κατασκευαστικά προβλήματα σε έτοιμες σήραγγες λόγω των έργων κατασκευής στην παράλληλή της. Τέτοια προβλήματα εμφανίζονται κυρίως στις περιπτώσεις κατά τις οποίες στην έτοιμη σήραγγα υπήρχαν μόνο περιμετρικές υποστηρίξεις. Σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η διάνοιξη των σηράγγων εκτελείται παράλληλα, η συγκέντρωση των πιέσεων/τάσεων στο διάκενο μεταξύ των δύο σηράγγων μπορεί να δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα στη βραχομάζα.

Σχήμα 5.5. Πανοραμική εικόνα της ανατολικής εισόδου της σήραγγας του Ανθοχωρίου (προσωπικό αρχείο).

Ελεγχος του υπεδαφικού νερού – Στην ευρύτερη περιοχή του Ανθοχωρίου τόσο η ποσότητα του νερού όσο και η πίεση του ήταν σχετικά μικρή. Η πλειοψηφία του νερού εντός της σήραγγας σχετίζεται με τις κατασκευαστικές δραστηριότητες. Παρά ταύτα εξαιτίας της φύσης των υλικών, η παρουσία του νερού οδηγεί σε πολύ κακές συνθήκες του δαπέδου της σήραγγας ενώ η διαδοχική ύγρανση και ξήρανση των πετρωμάτων οδηγεί σε υποβάθμιση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Για την αποφυγή όλων των παραπάνω, προτείνεται η διοχέτευση ή η αποστράγγιση των επιφανειακών νερών με σκοπό τη βελτίωση των συνθηκών στο δάπεδο και στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας.

Μεθοδολογίες σχεδιασμού – Στα πλαίσια κατασκευής των περισσότερων σηράγγων της Εγνατίας Οδού εφαρμόστηκαν οι περισσότερες από τις μεθοδολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Η επιλογή των εφαρμοζόμενων μεθοδολογιών, από το Μελετητή της σήραγγας έγινε με τη χρήση μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης (FLAC, Phase2, Plaxis, Sofistik) στις οποίες χρησιμοποιείται η επιλογή «μεγάλη παραμόρφωση». Η προσομοίωση πραγματοποιείται για όλα τα στάδια εκσκαφής και κατασκευής της οροφής και του δαπέδου. Στις προσομοιώσεις πρέπει να χρησιμοποιείται η επιλογή «κάτω όριο – lower bound" σε ότι αφορά τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας ενώ πρέπει επίσης να παρέχονται λεπτομέρειες που αφορούν όλα τα χρησιμοποιούμενα συστήματα υποστήριξης και τη τελική υποστήριξη/επένδυση του έργου. Σε όλα τα στάδια της εκσκαφής, πρέπει να ελέγχονται τόσο τα φορτία που λαμβάνουν τα συστήματα υποστήριξης όσο και το μοτίβο παραμόρφωσης που οφείλεται σε αναπτυσσόμενες τοπικές τάσεις. Σκοπός του σχεδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση της υπερφόρτισης των επιμέρους στοιχείων υποστήριξης και η απόκτηση μιας όσο το δυνατόν ομοιόμορφης κατανομής της παραμόρφωσης. Πρέπει να αναφέρουμε ότι αστοχίες σε ορισμένα στοιχεία υποστήριξης είναι αναπόφευκτα. Για παράδειγμα, το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τη πλήρωση των κενών μεταξύ του συστήματος υποστήριξης της οροφής και

του συστήματος του δαπέδου της σήραγγας, συχνά παρουσιάζει ίχνη φόρτισης (ρωγμές, κ.α.) χωρίς να είναι κάτι ανησυχητικό. Σε άλλες περιπτώσεις, ίχνη φόρτισης στους συνδέσμους μεταξύ των κατωτέρων στελεχών οπλισμού και της τελικής αντιστροφής, μπορεί να προκαλέσουν μεγάλες μετατοπίσεις. Για αυτό το λόγο μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται για το σχεδιασμό των συνδέσμων.

Οργανολογία – Η μόνη μέθοδος επιβεβαίωσης του σχεδιασμού και των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς και η ανίχνευση τυχόν προβλημάτων που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής, είναι η συστηματική παρακολούθηση των παραμορφώσεων στη σήραγγα. Στο παραπάνω κεφάλαιο 5.4, αναφέρθηκαν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και οι ανάλογες μετρήσεις των συγκλίσεων που επιβεβαίωσαν τις αστοχίες που πρόεκυωαν κατά την επένδυση της σήραγγας. Επίσης, στο κεφάλαιο 6, θα αναφερθούν και άλλα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των προβληματικών ζωνών. Υπάρχουν πολλά εμπορικά όργανα παρακολούθησης τα οποία ήδη χρησιμοποιούνται στη σήραγγα του Ανθοχωρίου, και στις υπόλοιπες υπό κατασκευή σήραγγες της Εγνατίας οδού.. Γενικότερα προτείνεται η εφαρμογή και χρήση των γεωτεχνικών οργάνων παρακολούθησης από την έναρξη κατασκευής της σήραγγας.

Επίβλεψη κατασκευής – Η χρήση επιβλέποντα κατασκευής κρίνεται απαραίτητη. Στη περίπτωση της Εγνατίας Οδού και λόγω τόσο της δυσκολίας του έργου αλλά και της σημαντικότητας, προσλήφθησαν πολλοί γνωστοί μηχανικοί από Ελλάδα και Εξωτερικό με σκοπό την ορθή επίβλεψη του έργου.

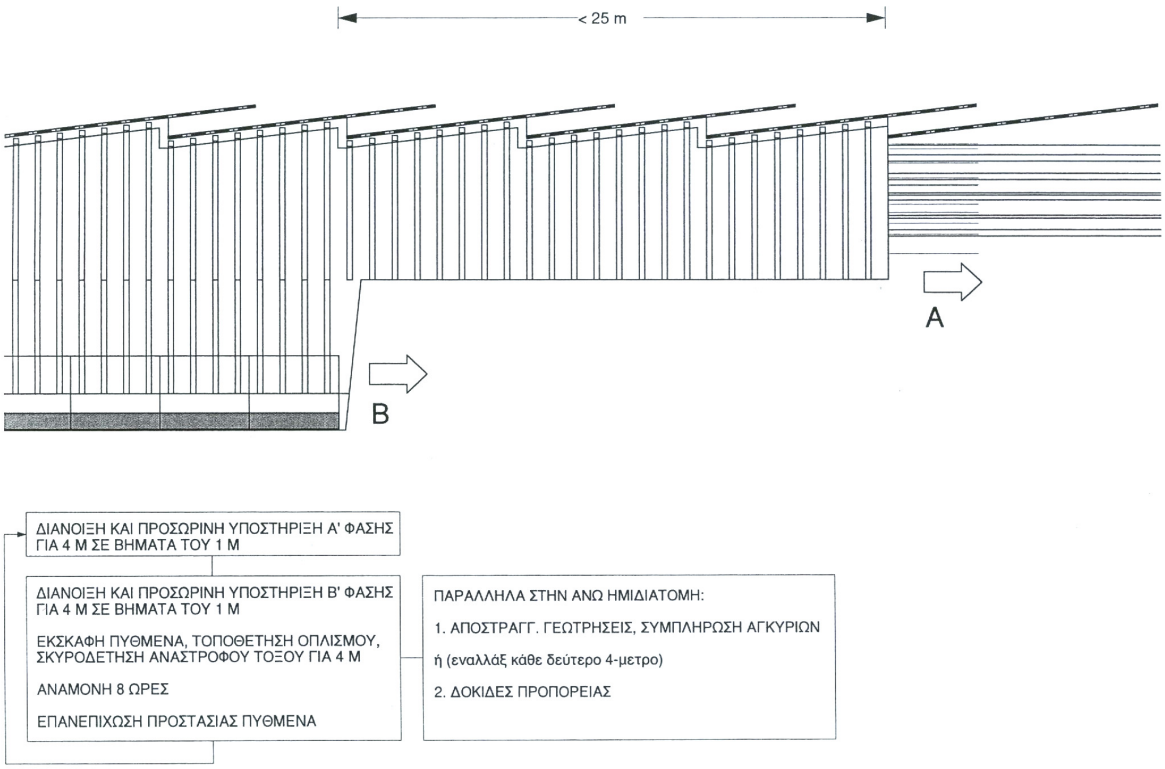
5.6 Συμπεράσματα- Προτάσεις

Οι βασικές αποφάσεις του σχεδιασμού για συνθήκες σύνθλιψης αφορούν αφενός το σύστημα υποστήριξης (ενδόσιμο ή δυσκαμπτο) αφετέρου τον τρόπο διάνοιξης (διαχωρισμός διατομής, αλληλουχία εργασιών μηκοτομικά). Οπως αναλύεται παρακάτω, προτείνεται τμηματική διάνοιξη (άνω ημιδιατομή – βαθμίδας) σε συνδυασμό με ένα δύσκαμπτο δακτύλιο αντιστήριξης.

Βασιζόμενοι στις δυνατότητες του διαθέσιμου μηχανολογικού εξοπλισμού ο οποίος αποκλείει την εφαρμογή ολομέτωπης διάνοιξης (με ή χωρίς διαβάθμιση του μετώπου) προβλέπεται διάνοιξη σε 2 φάσεις. Συνεπώς θα πρέπει να αντιμετωπιστούν τα γνωστά προβλήματα που παρουσιάζει η τμηματική διάνοιξη υπό συνθήκες σύνθλιψης. Τα φαινόμενα παραμορφώσεων της άνω ημιδιατομής καθώς και τα πιθανά προβλήματα κατά την υποστήλωση του κελύφους στη Β φάση, απαιτούν την ελαχιστοποίηση του μήκους της Α φάσης με ότι αυτό συνεπάγεται με την αλληλουχία των εργασιών και την εργοταξιακή οργάνωση. Για αυτό προβλέπεται εκσκαφή της βαθμίδας και διαμόρφωση κλειστού δακτυλίου κοντά στο μέτωπο της Α φάσης, κατά αρχήν σε μία απόσταση 20-25m, η οποία επιτρέπει οριακά την εκτέλεση ορισμένων εργασιών στην άνω ημιδιατομή (αποστραγγιστικές γεωτρήσεις, κ.α.) παράλληλα με τις εργασίες στην βαθμίδα. (σχήμα 5.17). Διερεύνηση της εκσκαψιμότητας των πετρωμάτων κατά Muir και Wood (1976) και κατά Franklin και συνεργάτες (1971) προσδιόρισε για τους παχυστρωματώδεις ψαμμίτες (st) ως πλέον ενδεδειγμένη τεχνική διάνοιξης της σήραγγας αυτή των διαδοχικών διατρήσεων και ανατινάξεων.

Για τους σχηματισμούς των ερυθροπηλιτών (sl) και των εναλλαγών λεπτοστρωματωδών ψαμμιτών και ιλυολίθων (ft), θα πραγματοποιηθούν εκσκαφές με συνδυαστική χρήση μηχανικών μέσων και εκρηκτικών. Για τα υλικά της επώθησης (ον) θα απαιτηθεί η χρήση μηχαικών μέσων και ενδεχόμενη χρήση εκρηκτικών κυρίως στα τμήματα εκείνα που θα συναντηθούν ψαμμιτικές ζώνες.

Στην τυπική διατομή έχει ενσωματωθεί ένα περιθώριο σύγκλισης 25 εκατοστών παρότι βάσει των διενεργηθέντων μετρήσεων δεν φαίνεται πιθανόν να συμβούν σημαντικά φαινόμενα παραμορφώσεων στο διάστημα των 20-25cm. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει κατά αρχήν να πυκνωθούν τα αγκύρια της στέψης (σε κάνναβο 1mx1m με εφαρμογή αγκυρίων ανάμεσα από τα συστηματικών προβλεπόμενα) και εν συνεχεία να μειωθεί περαιτέρω το μήκος της Α φάσης (μέχρι 10m), οπότε οι εργασίες στις δύο ημιδιατομές θα εκτελούνται εναλλάξ. Η εφαρμογή άλλων συμπληρωματικών μέτρων υποστήριξης στην Α φάση (μικροπάσσαλοι, ανάστροφο τόξο) δεν αποτελεί εναλλακτική λύση διότι παρά το πρόσθετο κόστος αντιμετωπίζει μόνο μερικώς το πρόβλημα (αυξημένο φορτίο στη φάση της υποστήλωσης). Η προσθήκη ανάστροφου τόξου στην Α φάση εκσκαφής σαν κατασκευαστικό μέτρο, αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας να απαιτηθεί συνολικό κλείσιμο της διατομής σε απόσταση μικρότερη των 25 μέτρων από το μέτωπο.



Σχήμα 5.17. Μηκοτομή με αλληλουχία εργασιών διάνοιξης – αντιστήριξης (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003).

Βάσει των εμπειριών από την προηγούμενη διάνοιξη και των προκαταρκτικών υπολογισμών, εκτιμήθηκε ότι τα πιθανά εδαφικά φορτία μπορούν να παραληφθούν από ένα κλειστό κέλυφος

οικονομικών διαστάσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση και με βάση τα δεδομένα από την διάνοιξη στην περιοχή των μεγίστων υπερκειμένων δεν επιβάλλεται να προβλεφθεί μια ενδόσιμη αντιστήριξη με ιδιαίτερη κατασκευαστική διαμόρφωση (όπως ολισθαίνουσες συνδέσεις, κτλ.). Προτείνεται η εφαρμογή ενός δύσκαμπτου κελύφους υψηλής φέρουσας ικανότητας. Η επιλογή (ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003) αυτή υλοποιείται ειδικότερα ως εξής:

- Τροποποίηση της γεωμετρίας της διατομής εκσκαφής στις παρειές. Η ακτίνα της διατομής είναι σταθερή. Ετσι αυξάνεται αφενός η αντίσταση του κελύφους έναντι οριζοντίων ωθήσεων αφετέρου ο διαθέσιμος χώρος στην περιοχή των παρειών.
- Εφαρμογή εκτοξευομένου σκυροδέματος καλύτερης ποιότητας και μεγαλύτερου πάχους (40cm). Οι μεγάλες αξονικές παραμορφώσεις του κελύφους, οι παρατηρηθείσες ρωγματώσεις και οι αποκολλήσεις του εκτοξευμένου σκυροδέματος οδηγούν στην απαίτηση ισχυρότερης διατομής εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Κλείσιμο του δακτυλίου στο πυθμένα με το μόνιμο ανάστροφο τόξο. Η φέρουσα ικανότητα ενός ανάστροφου τόξου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι για οικονομικούς και κατασκευαστικούς λόγους περιορισμένη, ενώ το μόνιμο ανάστροφο τόξο μπορεί να κατασκευαστεί οικονομικά με ικανό πάχος και οπλισμό.
- Τύπος πλαισίων από μορφοχάλυβα. Το θέμα δεν θα είχε ιδιαίτερη σημασία εάν μπορούσε να εξασφαλιστεί με απόλυτη βεβαιότητα ότι τα φορτία δεν θα προκαλέσουν θραύση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αφού τα πλαίσια ούτως η άλλως υπολειτουργούν για τις δεδομένες συνθήκες. Προτιμότερα θα ήταν πιθανώς τα δικτυωτά πλαίσια λόγω των γνωστών πλεονεκτημάτων τους. Στην περίπτωση όμως θραύσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η φέρουσα ικανότης των δικτυωτών πλαισίων μειώνεται δραστικά ενώ τα πλαίσια από μορφοχάλυβα συνεχίζουν να λειτουργούν και μετά από μεγάλες παραμορφώσεις.
- Οπλισμοί. Αποτελούνται από δομικό πλέγμα Τ188 και πρόσθετους ράβδους στο εσωράχιο των παρειών.
- Αγκύρια. Προβλέπεται η εφαρμογή αυτοδιατρούμενων αγκυρίων των 300kN σε πυκνό κάνναβο στις παρειές ($1/m^2$) και αραιότερα στη στέψη ($1/2\ m^2$). Δεδομένων των διαστάσεων της διατομής και των εμπειριών από την μέχρι τώρα διάνοιξη, κρίνεται ότι θα έπρεπε να εφαρμοστούν 12-μετρα αγκύρια αντί των αρχικώς προβλεπομένων 9-μετρων.

Σχετικά με τις μετρήσεις πεδίου προτείνεται η συνέχιση των μετρήσεων σύμφωνα με την εγκεκριμένη μελέτη.

<u>Μέτωπο</u>

Επισημαίνεται η αναγκαιότητα ελέγχου των αγκυρίων μετώπου ιδιαίτερα σε περιπτώσεις αστοχίας όπως περιγράφονται παρακάτω. Σε περίπτωση που παρατηρούνται συστηματικά αποκολλήσεις από το μέτωπο, που οδηγούν σε αύξηση του ανοίγματος των δοκίδων προπορείας και

ορατές παραμορφώσεις των δοκίδων προπορείας, πρέπει να διαμορφώνεται πυρήνας αντιστήριξης του μετώπου σε κάθε βήμα.

Διατομή Α' φάσης

Σε περίπτωση που παρατηρούνται καθιζήσεις στη στέψη ή στην έδραση του κελύφους Α φάσης έως 7 εκατοστών, εφαρμόζεται καταρχήν πρόσθετα αγκύρια (πύκνωση του καννάβου σε 1μ Χ 1μ στη στέψη ανάμεσα στα συστηματικά προβλεπόμενα) και στη συνέχεια μείωση του μήκους της Α φάσης έως 10m. Σε αυτή τη περίπτωση οι εργασίες Α και Β φάσης εκτελούνται εναλλάξ με την αντίστοιχη επιβράδυνση του ρυθμού των εργασιών (αδυναμία εφαρμογής δοκίδων προπορείας ταυτόχρονα με την κατασκευή του πυθμένα).

Περιοχή υποστύλωσης και κατασκευής πυθμένα

Σε περίπτωση που κατά τη φάση αυτή αναπτύσσονται πρόσθετες καθιζήσεις μεγαλύτερες των 3 εκατοστών εφαρμόζονται καταρχήν τα πλήρη μέτρα υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, γάμπες πλαισίων, εκτοξευμένο σκυρόδεμα, οπλισμοί, αγκύρια) σε βήματα των 2 μέτρων. Στη συνέχεια μειώνεται το μήκος της Α φάσης έως και 10m (ισχύουν τα ανωτέρω αναγραφόμενα περί επιβράδυνσης του ρυθμού εργασιών). Σε περίπτωση που οι πρόσθετες καθιζήσεις παραμένουν συστηματικά μεγαλύτερες των 3 εκατοστών το συνολικό βήμα κατασκευής μειώνεται στα 2m (κατασκευή πυθμένα μήκους 2m με επί τόπου τροποποίηση του μήκους και του πλήθους των οπλισμών).

Περιοχή ολοκληρωμένης διατομής προσωρινής υποστήριξης

Σε περίπτωση που μετά την ολοκλήρωση τω μέτρων υποστήριξης παρατηρηθούν, πρόσθετες οριζόντιες μετακινήσεις στις πλευρές πέραν των 2 εκατοστών, εφαρμόζονται πρόσθετα πλευρικά αγκύρια (διαμπερή στην εσωτερική παρειά εάν είναι εφικτό). Πρόσθετες κατακόρυφες μετακινήσεις στη στέψη πέραν των 2 εκατοστών, πυκνώνεται ο κάνναβος των αγκυρίων στέψης έως και 1m Χ 1m (εάν αυτό δεν έχει επιβληθεί σε προηγούμενη φάση). Πρόσθετες κατακόρυφες μετακινήσεις στις παρειές πέραν των 2 εκατοστών, εφαρμόζεται πρόσθετο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην έδραση του κελύφους, εντός της περιοχής διεύρυνσης λόγω δοκίδων προπορείας.

Όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, έχουν ληφθεί από το αρχείο της Εγνατίας Οδού, στοιχεία από την ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε και από τις τεχνικές αναφορές των ειδικών επιστημόνων, Ε. Hoek, καθηγητή του πανεπιστημίου Τορόντο του Καναδά και Π. Μαρίνο, καθηγητή του Μετσόβιου Πολυτεχνείου και δεν αποτελούν σε καμμία περίπτωση μέρος της προσωπικής μου εργασίας. Ο λόγος που συμπεριελήφθηκε αυτό το κεφάλαιο είναι για να αναφερθεί η σπουδαιότητα των μετρήσεων των συγκλίσεων στην κατασκευή μίας σήραγγας και το πως επηρεάζει τον τρόπο διάνοιξης και τον τρόπο υποστήριξης.

6. Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας Δρίσκου και με γεωτεχνικά όργανα

6.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή της εφαρμογής ενός εντατικού συστήματος παρακολούθησης της κατασκευής της σήραγγας του Δρίσκου, που αποτέλεσε την πρώτη εφαρμογή στον ελληνικό χώρο, με στόχο την αποτελεσματική προσαρμογή των υπαρχόντων μελετητικών δεδομένων (αρχικός σχεδιασμός), τα οποία είναι εν γένει προσανατολισμένα προς την ορθή κατεύθυνση σχεδιασμού, την αξιολόγηση των επί τόπου συνθηκών, και τη βελτιστοποίηση του εν γένει σχεδιασμού και την εύρυθμη και απρόσκοπτη αποπεράτωση της κατασκευής. Ο έλεγχος του σχεδιασμού του τεχνικού έργου, και της ποιότητας εκτέλεσης των εργασιών, έγινε με την τοποθέτηση γεωτεχνικών οργάνων. Πιο αναλυτικά, στο συγκεκριμένο έργο, τοποθετήθηκαν τα κλισιόμετρα, για να διαπιστωθούν θέματα ευστάθειας του πρανούς της σήραγγας, η μέτρηση και η αξιολόγηση των οποίων έγινε από την ομάδα παρακολούθησης γεωτεχνικών οργάνων της Εγνατίας Οδού, η οποία αποτελείται από τον Εμμ. Χαραλαμπάκη, Πολ. Μηχανικό και τη Δέσποινα Ρούσσου, Γεωλόγο. Επίσης, τοποθετήθηκαν γεωτεχνικά όργανα μέτρησης παραμόρφωσης και μέτρησης ολικών τάσεων εντός της σήραγγας για τη διαπίστωση μικρομετακινήσεων, οι μετρήσεις και η αξιολόγηση των οποίων έγινε από τον κατασκευαστή του έργου (Κ/Ξ ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ-ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ ΑΕ- ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ- ΕΥΚΛΕΙΔΗΣ, 2003). Συγκεκριμένα τοποθετήθηκαν όργανα μέτρησης παραμόρφωσης- μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου, ακίδες σύγκλισης-, και όργανα μέτρησης ολικών τάσεων- παραμορφωσίμετρα στο μεταλλικό πλαίσιο και στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα-, κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρίων, υδραυλικές κυψέλες πίεσης πετρωμάτων. Θα γίνει αναφορά για το τι μετράει το κάθε όργανο και θα παρουσιαστεί με γραφική απεικόνηση τα αποτελέσματα από κάποια μέτρηση με σκοπό την ερμηνεία αυτού του διαγράμματος. Η ερμηνεία των διαγραμμάτων των παραπάνω αναφερόμενων οργάνων πραγματοποιήθηκε από τη Δέσποινα Ρούσσου.

Η ομάδα που επιμελήθηκε τη μέλέτη για την κατασκευή της σήραγγας αυτής αποτελείτο από τους Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρη, οι οποίοι παρακάτω θα αναφέρονται με τον τίτλο του μελετητή.

6.2 Γενικά

Στην περιοχή του Δρίσκου έχει κατασκευαστεί μία δίδυμη οδική σήραγγα. Η είσοδος της σήραγγας (δυτικό μέτωπο) βρίσκεται αμέσως μετά το χωριό Δρίσκος, όπως φαίνεται στο γεωγραφικό χάρτη του σχήματος 6.1 και η έξοδος (ανατολικό μέτωπο) αυτής καταλήγει στην περιοχή λίγο πριν τη γέφυρα της Μπαλντούμας. Η δίδυμη οδική σήραγγα του Δρίσκου κατασκευάζεται στο τμήμα 2.3: Δροσοχώρι – ποταμός Αραχθος από Χ.Θ. 6+160.21 έως Χ.Θ. 10+637 της Εγνατίας Οδού. Οι δύο κλάδοι του αυτοκινητόδρομου διέρχονται από δύο ανεξάρτητες

σήραγγες στις θέσεις: αριστερός κλάδος από Χ.Θ. 6+166.06 έως Χ.Θ. 10+730 (μήκος 4563,94m) και Δεξιός κλάδος από Χ.Θ. 6+160.21 έως Χ.Θ. 10+637 (μήκος 4476,79m).

Σχήμα 6.1. Γεωγραφικός χάρτης της περιοχής κατασκευής της σήραγγας Δρίσκου, με την χάραξη της Εγνατίας Οδού (www.egnatiaodos.gr).

Η διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδής με ημικυκλικό θόλο ακτίνας εσωράχιου τελικής επένδυσης 5.50m και μέγιστο ελεύθερο πλάτος 11.00m, σύμφωνα με την τυπική διατομή της ΕΟΑΕ. Η σήραγγα διανοίγεται εντός σχηματισμών του Ιόνιου φλύσχη, με μέγιστα υπερκείμενα 220m.

Το δυτικό μέτωπο της Σήραγγας του Δρίσκου εκτείνεται μέσα σε πολύ καλής ποιότητας λεπτοστρωματώδη ψαμμίτη της σειράς του φλύσχη. Ο δεξιός κλάδος βρίσκεται στη χιλιομετρική θέση (Χ.Θ.) των 6+475. Στη χιλιομετρική θέση των 6+400 της Ε.Ο. παρατηρείται μία ζώνη ρηγμάτωσης και εμφανίζεται μία σημαντική, αλλά όχι και επικίνδυνη, ποσότητα νερού, υπό μορφής υγρασίας. Θα πρέπει να διευθετηθεί η συλλογή του νερού, με αποστράγγιση της περιοχής και κατασκευή φρέατος στην άκρη της σήραγγας. Από τις μετρήσεις σύγκλισης, αναμένεται μία τυπική σύγκλιση των 15-20mm, το οποίο εύρος τιμών είναι και το αναμενόμενο για τέτοιου είδους γεωυλικό και για τα ανάλογα βάθη. Για τη ζώνη με τη χαοτική δομή αναμένονται συγκλίσεις της τάξης των 40mm.

6.3 Γεωμορφολογία- Γεωτεχνικά Στοιχεία

Μετά από την επίσκεψη στην ύπαιθρο και εξετάζοντας την τοπογραφία της περιοχής, σχηματίστηκε η άποψη ότι μπορεί να προκύψουν διάφορα θέματα, τα οποία θα πρέπει να εξεταστούν

με ακρίβεια πριν ακόμα αρχίσει ο σχεδιασμός του. Έτσι θεωρήθηκε αναγκαίο η δημιουργία ενός νέου τοπογραφικού διαγράμματος με μεγαλύτερη ακρίβεια και στο οποίο θα προβάλλονται όλα τα κρίσιμα εκείνα θέματα τα οποία μπορεί να προκύψουν. Η επιλογή της θέσης των κλάδων έγινε με βάση την αντιμετώπιση όσο γίνεται λιγότερων προβλημάτων ευστάθειας.

Λόγω της μορφολογίας της περιοχής, αποφασίστηκε και οι δύο κλάδοι να ξεκινήσουν από την ίδια χιλιομετρική θέση. Για να μη μετακινηθεί ο δεξιός κλάδος πίσω από την λοφοπλαγιά και άρα να πρέπει να αντιμετωπισθούν θέματα ευστάθειας, αποφασίστηκε ο δεξιός κλάδος να βρίσκεται κάτω από ένα μικρό σε πάχος, -της τάξης των 5μ περίπου-, κάλυμμα επιφανειακού μανδύα για περίπου 30μ, όπου το ανατολικό μέτωπο πρέπει να διανοιγεί, σε μικρή απόσταση, σε μια γειτονική ρεματιά επί του άξονα της σήραγγας,

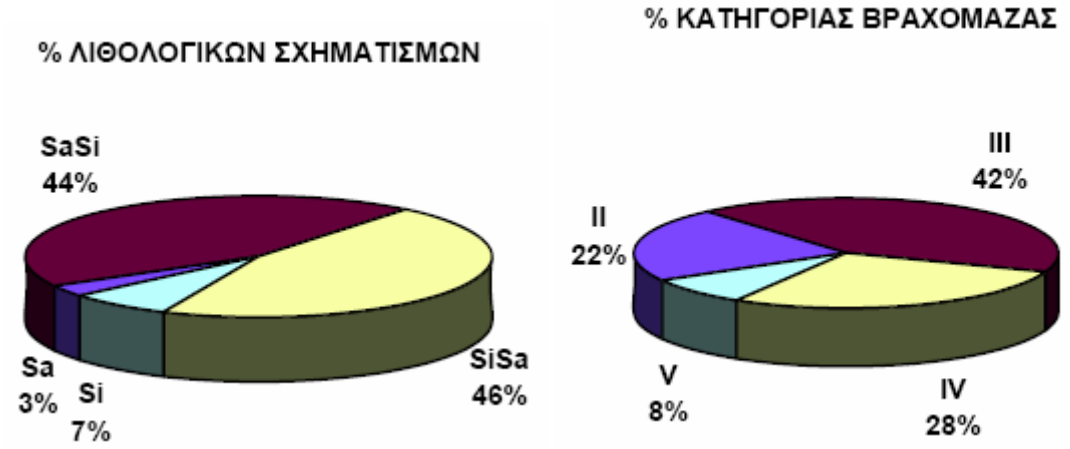
Από την κατασκευή γειτονικών σηράγγων είναι γνωστή η γεωλογία της περιοχής, στην οποία πρόκειται να διανοιγεί η σήραγγα του Δρίσκου. Πρόκειται για τον φλύσχη της Ιόνιας ενότητας και προβλέπεται να εξακολουθεί να αναπτύσσεται στη μέτρια ως πτωχή ποιότητά του. Οι σχηματισμοί που πρόκειται να συναντηθούν αποτελούνται κυρίως από στρώσεις μεσοστρωματώδων έως παχυστρωματώδων ψαμμιτών της τάξης των 30cm έως 70cm σε συνεχή εναλλαγή με λεπτοστρωματώδεις ιλυολίθους με κύριο χαρακτηριστικό τους:

- Την περίπου παραοριζόντια κλίση τους (σε σχέση με τη διεύθυνση της σήραγγας) για το 60% της μηκοτομικής διάνοιξης του έργου,δηλαδή, από το νότιο μέτωπο.
- Την περίπου παρακατακόρυφη κλίση τους (σε σχέση με τη διεύθυνση της σήραγγας) για το 40% της υπόλοιπης διάνοιξης αλλά σε πολλές θέσεις έντονα πτυχωμένο.

Διακλάσεις εμφανίζονται κυρίως στις ψαμμιτικές ενστρώσεις οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν στο σύνολό τους δευτερεύουσες επιφάνειες διαχωρισμού της βραχομάζας, σε σύγκριση με τις επιφάνειες στρώσεις, οι οποίες υπολείπονται σημαντικά σε σπουδαιότητα και επηρεάζουν τις τεχνικογεωλογικές συνθήκες της βραχομάζας. Διακλάσεις επεκτείνονται (όχι πάντα) στα ιλυολιθικά μέρη, που χαρακτηρίζονται από μικρό συνολικό πάχος -10 έως 40cm-, με εναλλαγές στρώσεων μεταξύ τους από 1 εως 5cm. Αρκετά συχνά έχει αναγνωριστεί ότι οι επιφάνειες στρώσεις αποτελούν διατμημένες επιφάνειες, ιδιαίτερα στα ιλυολιθικά μέρη των μεσο-παχυστρωματωδών ψαμμιτών / ιλυολίθων, συνήθως πλησίον περιοχών οι οποίες έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό την επαναλήψιμη εμφάνιση γεωλογικών ρηγμάτων. Όταν τα ρήγματα συντονίζονται και συνυπάρχουν δημιουργούν δυσμενείς συνθήκες ευστάθειας για την προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας. Είναι δε φανερό ότι οι επιφάνειες στρώσης όχι μόνο αποτελούν κύριο στοιχείο αλλά και ότι η γωνιακή σχέση μεταξύ της διεύθυνσης της παράταξης των σχηματισμών και της διεύθυνσης της σήραγγας σε συνάρτηση με την γωνία κλίσης των επιφανειών στρώσης, μπορούν να δώσουν αποσφηνώσεις στην περίμετρο της θεωρητικής εκσκαφής της σήραγγας (από το μέτωπο εισόδου), οι οποίες μπορεί να είναι αποκολλήσεις πλακών από την οροφή ή αποτεμαχισμός τεμαχών ψαμμίτη στις παρειές. Για τη διατήρηση της ικανότητας ανάληψης φορτίου από τη βραχομάζα θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα χαλάρωσης, κυρίως εγκάρσια στα επίπεδα της στρώσης του άστρωτου ιλυολίθου και

στρωσιγενούς ψαμμίτη. Πλησίον περιοχών ρηγμάτων έχουν παρατηρηθεί εξαιρετικά δυσμενή αποτελέσματα γεωλογικών υπερεκσκαφών – αποσφηνώσεων.

Στα πλαίσια της γεωλογίας, οι σχηματισμοί, οι οποίοι επικρατούν στην περιοχή ανήκουν στο φλύσχη της Ιόνιας ζώνης, με μεγάλο ποσοστό ιλυολίθου. Πιο αναλυτικά οι κυριότεροι λιθολογικοί σχηματισμοί είναι ιλυόλιθοι με λεπτές ενστρώσεις ψαμμιτών (Si), λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις εναλλαγές ιλυολίθων και ψαμμιτών (SiSa), μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με εναλλαγές λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων (SaSi) και παχυστρωματώδεις ψαμμίτες με ενστρώσεις λεπτοστρωματωδών ιλυολίθων (Sa).



Σχήμα 6.2: Ποσοστά λιθολογικών σχηματισμών και κατηγορίες ποιότητας αυτών (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999).

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε μέσης, χαμηλής ή πολύ- χαμηλής αντοχής, με πιθανά ποσοστά συμμετοχής τους κατά μήκος της σήραγγας, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Η ποσοστιαία εκτίμηση των αναμενόμενων κατηγοριών ποιότητας της βραχομάζας παρουσιάζεται στο σχήμα (6.2). Η περιοχή διέλευσης της σήραγγας είναι έντονα πτυχωμένη και χωρίζεται σε τμήματα με διαφορετικούς λιθολογικούς σχηματισμούς και χαρακτηριστικά ασυνεχειών (κυρίως στρώσεων). Το τοπογραφικό ανάγλυφο είναι έντονο με αποτέλεσμα το ύψος της βραχομάζας που υπέρκειται της σήραγγας να ξεπερνάει κατά τόπους τα 200m.

Στη συγκεκριμένη περιοχή-της προαναφερόμενης ρεματιάς-, υπάρχει μία σημαντική αύξηση των στρωμάτων του ψαμμίτη, τόσο σε συχνότητα όσο και στο πάχος αυτού. Επίσης, τα στρώματα αυτά βυθίζονται απότομα προς τα ανατολικά (σχεδόν κατακόρυφα), όπως φαίνεται και στο σχήμα σε μία φυσική τομή η οποία οριοθετείται στο υπάρχον οδικό δίκτυο Ιωαννίνων-Μετσόβου (βλ. Σχήμα 6.3). Οι λιθολογικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε μέσης, χαμηλής ή πολύ χαμηλής αντοχής, με πιθανά ποσοστά συμμετοχής τους κατά μήκος της σήραγγας, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα (6.2). Σε δείγματα πυρήνων από γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά, των ακέραιων τεμάχων, για την αντοχή αυτών σε μονοαξονική θλίψη και το μέτρο ελαστικότητας, Ε αυτών. Οι τιμές που

καταγράφηκαν από τους ελέγχους αυτούς ήταν εξαιρετικά χαμηλές. Εάν επαληθευτούν αυτές οι τιμές, τότε η βραχομάζα της περιοχής έχει εξαιρετικά χαμηλή αντοχή σε διάτμηση και μικρό μέτρο ελαστικότητας, Ε. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει η υπόνοια, ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι αντιπροσωπευτικά για το μέσο όρο των συνθηκών της βραχομάζας ή και ακόμα ότι στους ελέγχους αυτούς υπήρχε ένα συστηματικό λάθος. Σε αντίθετη περίπτωση οι παράμετροι για το γεωυλικό υπολογίζονται από εμπειρικούς τύπους, οι οποίοι προτείνονται από τον Μελετητή και ο οποίος υποθέτει ότι μπορεί να υπάρξουν και φαινόμενα έντονου τεμαχισμού της βραχομάζας.

Η ποσοστιαία εκτίμηση των αναμενόμενων κατηγοριών ποιότητας της βραχομάζας παρουσιάζεται στο σχήμα (6.2). Οι γεωλογικές συνθήκες θα πρέπει να εξεταστούν με προσοχή και να διευκρινισθούν θέματα ευστάθειας της κοιλάδας και τα οποία θα αποτελέσουν στοιχεία για την κατασκευή του σκυροδέματος. Για την εξασφάλιση της ευστάθειας του πρανούς, απαιτείται ένας προσεκτικός σχεδιασμός,.

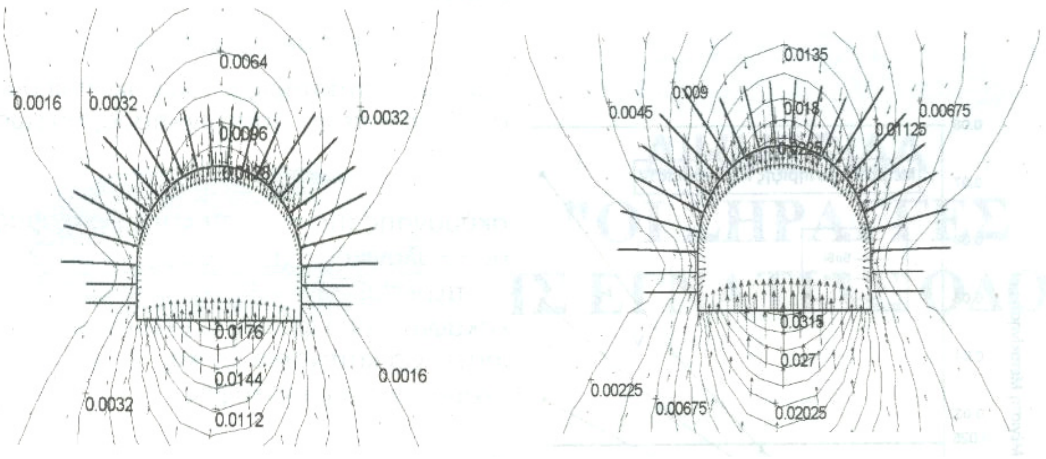
Σχήμα 6.3. Μέσο- έως παχυστρωματώδης ψαμμίτης, πτυχωμένος και ρηγματωμένος κατά μήκος του άξονα των πτυχών (Hoek & Marinos, 2001).

6.4 Επιλογή μέτρων υποστήριξης πριν τη διάνοιξη της σήραγγας του Δρίσκου

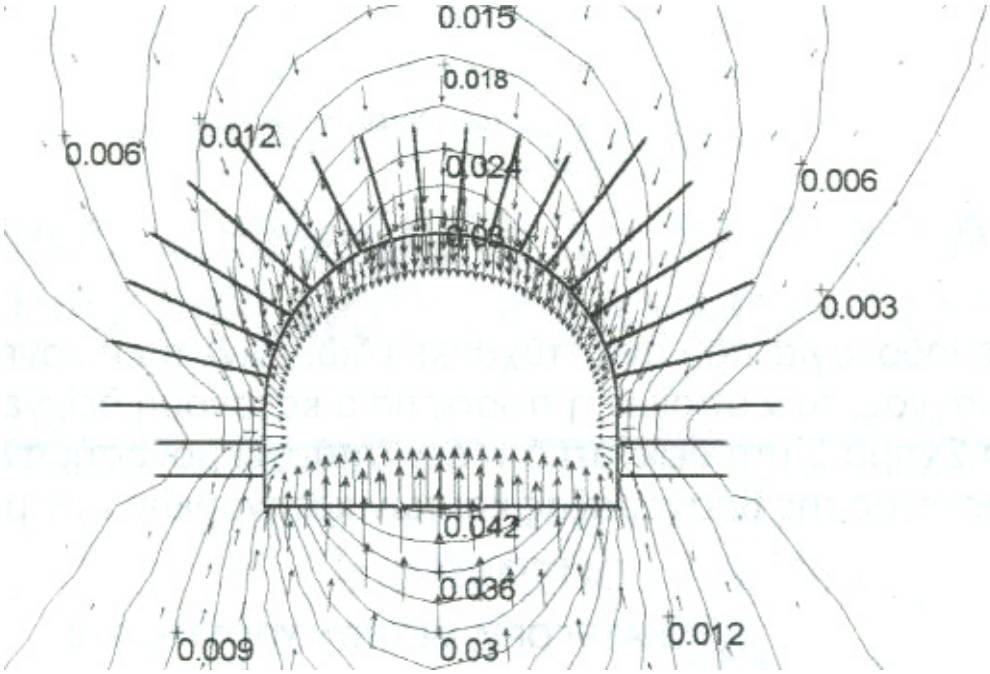
Στα πλαίσια της προμελέτης της σήραγγας επιλέγησαν τέσσερις κατηγορίες μέτρων υποστήριξης (ΙΙ έως V) με βάση εμπειρικές προτάσεις υποστήριξης υπόγειων εκσκαφών, για μέτρια έως πολύ πτωχής ποιότητας βραχοάζας (κατηγορίες ΙΙ έως V κατά Bieniawski). Οι κατηγορίες των μέτρων υποστήριξης οριστικοποιήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα εκτεταμένων αριθμητικών αναλύσεων τάσεων – παραμορφώσεων, κατά τις οποίες ελήφθησαν υπόψην όλα εκείνα τα κριτήρια που αναφέρονται στις προδιαγραφές που ορίζει ο **Οδηγός Σχεδιασμού Μελετών Έργων Οδοποιίας** (**ΟΣΜΕΟ**). Σύμφωνα με την αρχική μελέτη διαστασιολογήθηκαν 5 τυπικές διατομές εκσκαφής και μέτρων προσωρινής υποστήριξης (ΙΙ, ΙΙΙ, IV, Va και Vb), οι οποίες προέβλεπαν την εφαρμογή

εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων μήκους 3-4 μέτρων για τις κατηγορίες ΙΙ και ΙΙΙ, το συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος, μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων και αγκυρίων μήκους 4-6 μέτρων γαι την κατηγορία IV, το συνδυασμό εκτοξευόμενου σκυροδέματος χαλύβδινων πλαισίων τύπου HEA160 ή HEB180, αγκυρίων μήκους 5-6 μέτρων και το κλείσιμο του πυθμένα για τις κατηγορίες Va και Vb. Για την κατηγορία Vb προβλεπόταν επιπλέον η χρήση δοκών προπορείας και το κλείσιμο του πυθμένα της άνω ημιδιατομής με διαμόρφωση ανάστροφου τόξου.

Στα σχήματα (6.4) και (6.5), δίνονται ενδεικτικά οι ισουψείς των μετακινήσεων για τμήμα της σήραγγας που διανοίγεται σε λιθολογικό σχηματισμό SaSi κατηγορίας βραχομάζας IV με ύψος υπερκειμένων 100, 170, 200 μέτρων αντίστοιχα και υποστηρίζεται με μέτρα υποστήριξης IV. Οι τελικές μετακινήσεις στην κλείδα είναι 1.3, 2.25, και 3 cm αντίστοιχα, ενώ υπάρχει τοπικά υπέρβαση φορτίου στα αγκύρια του σχήματος 3β) και εκτεταμένη υπέρβαση στα αγκύρια του σχήματος 8.5. Ανάλογες παραμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για τους υπόλοιπους τρεις λιθολογικούς τύπους που επιλέχθηκαν.



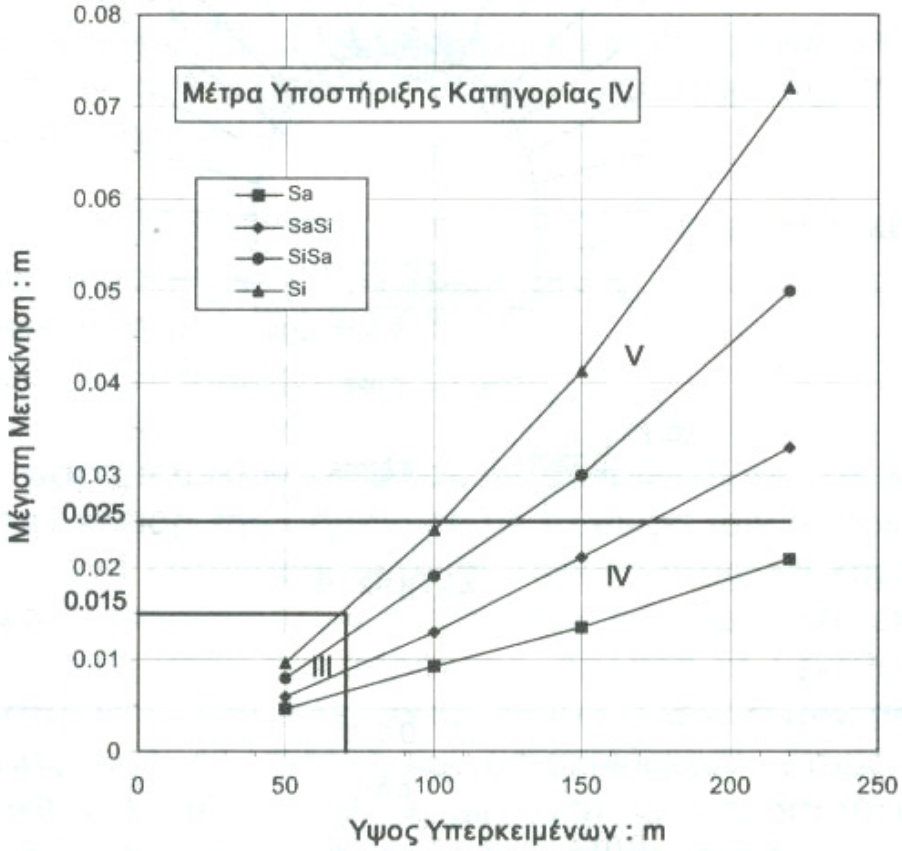
Σχήμα 6.4. Ισοκαμπύλες μετακινήσεων για τμήμα της σήραγγας που διανοίγεται σε λιθολογικό σχηματισμό SaSi με ύψος υπερκειμένων α) 100m και β) 170m. (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999).



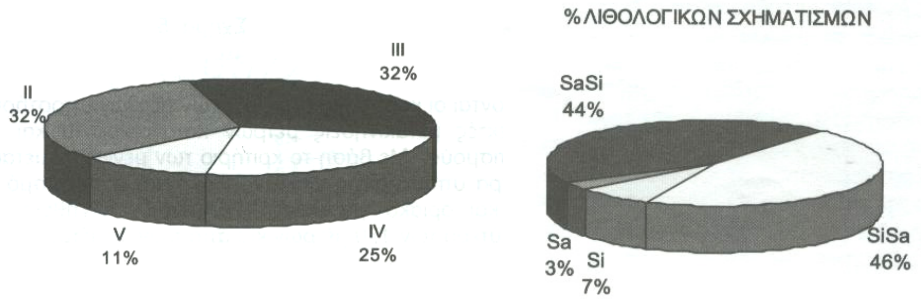
Σχήμα 6.5. Ισοκαμπύλες μετακινήσεων για τμήμα της σήραγγας που διανοίγεται σε λιθολογικό σχηματισμό SaSi με ύψος υπερκειμένων 220m. (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999).

Στο σχήμα (6.6) δίνονται οι καμπύλες επιλογής των μέτρων υποστήριξης κατηγορίας IV, καθώς και οι μέγιστες ανεκτές μετακινήσεις μέτρων κατηγορίας III και IV, για τους κυριότερους λιθολογικούς σχηματισμούς. Με βάση το κριτήριο των μέγιστων μετακινήσεων είναι σαφές από το σχήμα, ότι τα μέτρα υποστήριξης για τον λιθολογικό σχηματισμό SaSi επαρκούν για ύψος υπερκειμένων 100m και οριακά για το ύψος 170m. Αντίθετα δεν επαρκούν για ύψος υπερκειμένων μεγαλύτερο των 170m και απαιτούνται μέτρα υποστήριξης κατηγορίας V.

Με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε, έγινε η επιλογή των μέτρων υποστήριξης κατά μήκος της σήραγγας, των οποίων η ποσοστιαία κατανομή παρουσιάζεται στο σχήμα (6.6). Σύγκριση του σχήματος αυτού, με το σχήμα (6.2) υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των κατηγοριών της ποιότητας της βραχομάζας και των κατηγοριών των μέτρων υποστήριξης (σχήμα 6.7).



Σχήμα 6.6. Μέτρα υποστήριξης κατηγορίας IV, σε συνάρτηση με τις μέγιστες ανεκτές μετακινήσεις μέτρων κατηγορίας III και IV, για όλους τους λιθολογικούς τύπους. (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999).



Σχήμα 6.7. α) Ποσοστά Κατηγοριών μέτρων υποστήριξης σε σύγκριση με τη β)λιθολογία (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999)

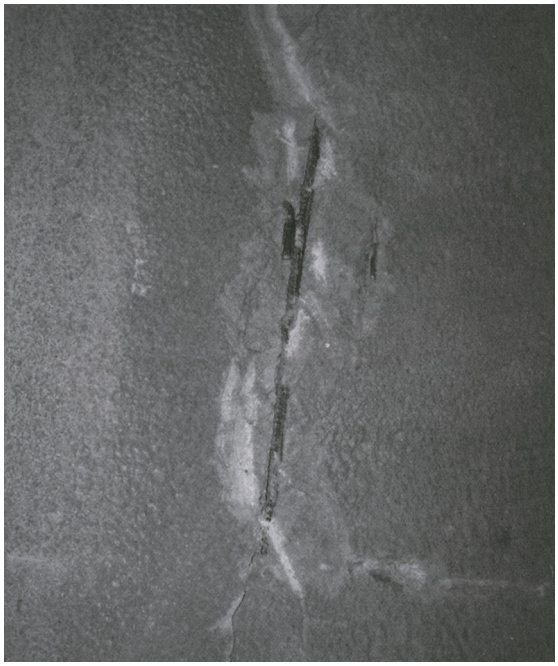
6.5 Εμφάνιση προβλημάτων στα μέτρα υποστήριξης

Στον αρχικό σχεδιασμό των κατηγοριών των μέτρων υποστήριξης, ελήφθησαν υπόψην το εύρος διακύμανσης της ποιότητας της βραχομάζας, ο αντίστοιχος λιθολογικός σχηματισμός και το ύψος των υπερκείμενων. Χαρακτηριστικό του σχεδιασμού, λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών

γεωλογικών σχηματισμών, ποιότητας βραχομάζας και διακύμανσης πάχους υπερκείμενων ήταν ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ κατηγοριών μέτρων υποστήριξης και ποιότητας βραχομάζας.

Το διανοιχθέν τμήμα της σήραγγας Δρίσκου, είχε παρουσιάσει σε αρκετά τμήματά του μεγαλύτερες συγκλίσεις από τις προβλεπόμενες του αρχικού σχεδιασμού και άρα έπρεπε να γίνουν αναπροσαρμογές στα μέτρα υποστήριξης. Αυτές οι συγκλίσεις είχαν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση αστοχιών στα αγκύρια και στο εκτοξευόμενο σκυροδέματο σε αρκετές θέσεις (σχήματα 6.8 και 6.9). Γεγονός, που υποδήλωνε τη σχετική ανεπάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης για τη συγκεκριμένη βραχομάζα, σε τοπική κλίμακα και σε μερικές ακραίες, εν γένει, συνθήκες. Από τη χρήση των αποτελεσμάτων των γεωτεχνικών οργάνων (κυψέλων μέτρησης φορτίου αγκυρίων, παραμορφωσίμετρα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και στο μεταλλικό πλαίσιο) επιβεβαιώθηκαν οι επικείμενες αστοχίες.

Σχήμα 6.8. Παραμόρφωση της πλάκας αγκύρωσης λόγω της υπερφόρτωσης του συστήματος υποστήριξης (Hoek & Marinos, 2001).



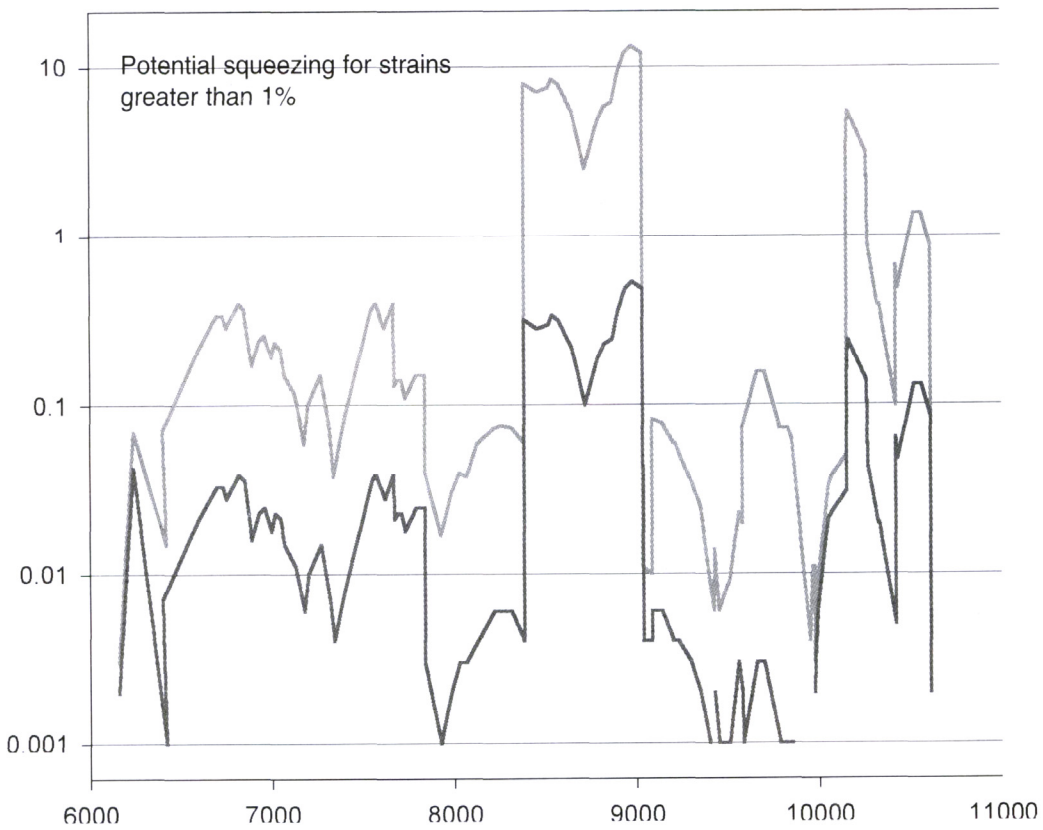
Σχήμα 6.9. Ρηγμάτωση σκυροδέματος γύρω από υψηλές τάσεις γύρω από τη δοκό στήριξης με τα δικτυωτά (Hoek & Marinos, 2001).

Με βάση τα παραπάνω, υφίσταται η αναγκή λήψης επιπλέον μέτρων υποστήριξης του ήδη διανοιχθέντος τμήματος, όπως επίσης και υπολογισμού των διατομών στο μη διανοιχθέν τμήμα, όπου θα λαμβάνονται υπόψη η εμπειρία από τη μέχρι σήμερα διάνοιξη, όπως και η ύπαρξη του νερού, η οποία υποβαθμίζει περαιτέρω τις παραμέτρους αντοχής και ποιότητας της βραχομάζας. Θα πρέπει επομένως κατά τους υπολογισμούς της διαστασιολόγησης της προσωρινής υποστήριξης να

λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη νερού και να μειώνονται κατάλληλα οι παράμετροι αντοχής της βραχομάζας. Στα φύλλα αποτύπωσης των μετώπων, σχεδόν σε όλες τις θέσεις, αναφέρεται η παρουσία νερού με μορφή υγρασίας έως ροής υπό μέτρια πίεση. Επίσης, είναι έντονη η παρουσία παρακατακόρυφων ρηγμάτων σε κάθε διατομή αποτύπωσης, πληρωμένων με μυλωνιτιωμένο, χαμηλών αντοχών, υλικό. Τα στρώματα φλύσχη και ιλυολίθου έχουν διάταξη παραοριζόντια ως προς το μέτωπο κυρίως στην περιοχή της εισόδου. Οι μηχανικές ιδιότητες του φλύσχη παρουσιάζονται τοπικά με μειωμένες τιμές λόγω της ύπαρξης υψηλότερων τάσεων, από τις κανονικές συγκεντρώσεις, οι οποίες προκαλούνται όταν τα παραοριζόντια στρώματα του φλύσχη διατέμνονται από ομάδες ρηγμάτων. Σύμφωνα επίσης, με τους Hoek και Μαρίνος (2000) για τις τιμές των μηχανικών παραμέτρων του φλύσχη, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψην και η επίδραση της ύπαρξης των υπόγειων υδάτων. Η ύπαρξη του νερού έχει αρνητική επίδραση στην τιμή της αντοχής σε θλίψη του άρρηκτου πετρώματος σci, όπως επίσης και στη τιμή της σταθεράς mi. Επομένως, θα πρέπει κατά την κατηγοριοποίηση της βραχομάζας να λαμβάνεται υπόψη και η ύπαρξη υδροφορίας, ώστε οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων της να απομειώνονται κατάλληλα. Η τιμή του δείκτη GSI επηρεάζεται επίσης από την εφαρμογή μη επαρκών μέτρων υποστήριξης, η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ζώνης χαλάρωσης γύρω από την εκσκαφή. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του βαθμού αλληλεμπλοκής των τεμαχών της βραχομάζας, και τη διεύρυνση του ανοίγματος των ασυνεχειών που διασχίζουν τη βραχομάζα, φαινόμενο το οποίο επιδρά αρνητικά στη τιμή του δείκτη GSI. Οι γεωτεχνικές οργανομετρήσεις άλλωστε, με χρήση μηκυνσιομέτρου, επιβεβαιώνουν μάλλον την παρουσία ζώνης χαλάρωσης, μεγαλύτερου εύρους από το προβλεφθέν της οριστικής μελέτης του έργου.

6.5.1 Μέτρα υποστήριξης σε περιοχές με προβλήματα έντονου κερματισμού της βραχομάζας

Σε κάποια από τις αναφορές της μελέτης για την τρόπο εκσκαφής και υποστήριξης, παρουσιάστηκε το σχήμα (6.10), το οποίο αναδεικνύει ότι θα υπάρξουν ενδεχόμενα έντονα προβλήματα τεμαχισμού του ιλιολίθου, κάτω από ένα υψηλό κάλυμμα υπερκειμένων μεταξύ των χιλιομετρικών θέσων 8385- 9035- 10150- 10620- 10520 και 10560. Στις συγκεκριμένες θέσεις, μετά από διορθώσεις στη μελέτη, υιοθετήθηκε η επιλογή της «βαρειά υποστήριξης» -heavy support-, η οποία περιλαμβάνει πασσάλους προπορείας και χαλύβδινα πλαίσια. Παρότι σχεδιάστηκε αυτού του είδους η βαριά υποστήριξη, επαληθέφθηκε από τους ελεγκτές (CAT III), ότι η σήραγγα μεταξύ 8411 και 9061 πρόκειται να υποφέρει από μία συνολική αστάθεια, δεδομένου ότι αυτό το κομμμάτι περιλαμβάνει τον ασθενέστερο φλύσχη από άποψη μηχανικών χαρακτηριστικών, κάτω από ένα μεγάλο πάχος υπερκειμένων.



Σχήμα 6.10: Ανάλυση ενδεχόμενου έντονου τεμαχισμού κατά μήκος της Σήραγγας του Δρίσκου, βασισμένο στην αντοχή της βραχομάζας και του πάχους των υπερκειμένων, έτσι όπως προτάθηκε από τον Μελετητή. Χαρτογράφηση των υπολογισμένων επί τοις εκατό, παραμορφώσεων (strain) σε συνάρτηση με τη χιλιομετρική θέση (Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999).

Παρά τις επιφυλάξεις για την αξιοπιστία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων από τους ελεγκτές CAT III, και οι ίδιοι υπέθεσαν παρόμοιες χαμηλές τιμές για τις παραμέτρους αντοχής, με αυτές του Μελετητή. Για τις δισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις, χρησιμοποιήθηκε ο λόγος της οριζόντιας και της κατακόρυφης τάσης ισοδύναμος με k=0,5. Τα αποτελέσματα από τις δύο αυτές υποθέσεις ήταν ότι τα αριθμητικά μοντέλα δείχνουν μια μεγάλη αστάθεια και των δύο κλάδων μέσα στον ασθενή φλύσχη κάτω από μεγάλο πάχος υπερκειμένων.

6.6 Έλεγχος μέτρων υποστήριξης με χρήση γεωτεχνικών οργάνων

Τα γεωτεχνικά όργανα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφορούν τον έλεγχο του σχεδιασμού του τεχνικού έργου, την ποιότητα στην εκτέλεση των εργασιών, ενώ τα αποτελέσματα που απορρέουν αποσκοπούν στην ασφάλεια τόσο της ίδιας της κατασκευής, όσο και του περιβάλλοντος χώρου.

- Πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι το πρόγραμμα ενοργάνωσης είναι πολύ σημαντικό και δίδεται έμφαση στην αγορά του εξοπλισμού ανάλογα με την ταξινόμηση της βραχομάζας, στην ευκολία λήψης των μετρήσεων, στο είδος της εκσκαφής, και άλλα τέτοιου είδους στοιχεία,

τα οποία μπορεί να επηρρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα ή ακόμα και στην εφαρμογή επιπλέον ενεργειών για την προσωρινή, είτε για τη μόνιμη υποστήριξη της σήραγγας.

Γενικά, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η τοποθέτηση των οργάνων, κυρίως στις περιπτώσεις όπου ξεπερνούν τον αριθμό. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί η τοποθέτηση του ενός να επηρεάζει τη λειτουργία των άλλων οργάνων. Θα πρέπει εξαρχής να γνωστοποιούνται τα είδη των οργάνων που πρόκειται αν χρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε η τοποθέτηση να γίνεται ταυτόχρονα, για να αποφευχθούν τυχόν λάθη.

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται δύο σκαριφήματα, στα οποία παρουσιάζεται το πως πρέπει να τοποθετούνται τα όργανα. Από τη σύγκριση των δύο σκαριφημάτων παρατηρείται ότι άλλα όργανα προτιμούνται, κατά τη διάρκεια εκσκαφής (προσωρινή επένδυση) και άλλα, κατά τη φάση της τελικής επένδυσης. Τέτοιου είδους σκαριφήματα, πρέπει να δίνονται με την παράδοση των αποτελεσμάτων από τις μετρήσεις των οργάνων, ώστε να μπορεί να γίνει η οποιαδήποτε συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων από το κάθε όργανο.

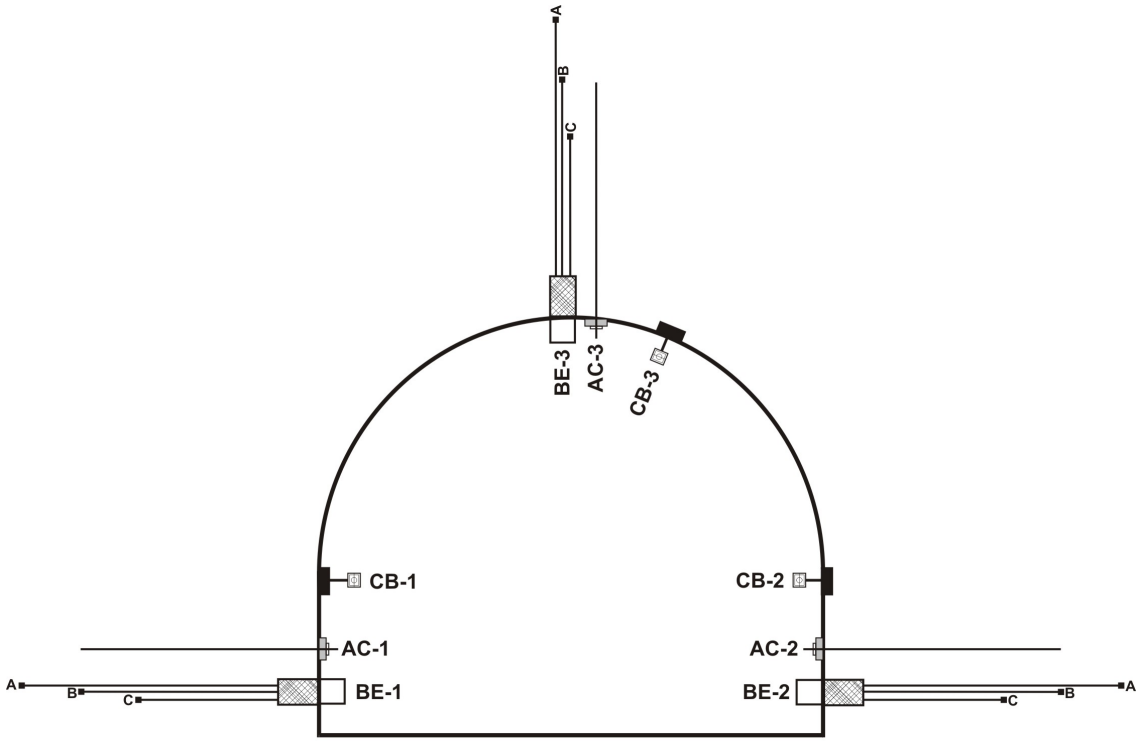
Στη συγκεκριμένη μελέτη, πέρα από τα κλισιόμετρα τα οποία τοποθετήθηκαν για να διαπιστωθούν θέματα ευστάθειας του πρανούς της σήραγγας, τοποθετήθηκαν και γεωτεχνικά όργανα εντός της σήραγγας για τη διαπίστωση μικρομετακινήσεων. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα από τη δεύτερη φάση εκσκαφής σε πετρώματα κατηγορίας IV (κατά Bieniawski). Η εκσκαφή έγινε με τη χρήση εκρηκτικών. Τα όργανα που τοποθετήθηκαν στην έξοδο της σήραγγας αφορούν το δεξιό κλάδο της σήραγγας.

Τα όργανα που εγκαταστάθηκαν είναι, μηκυνσιόμετρα διατρήματος (BE), κυψέλες αγκυρίων (AC) και ακίδες σύγκλισης / χωροστάθμισης (CB) (σχήμα 6.16), τα οποία εγκαταστάθηκαν σε ομάδες, που η κάθε μία περιελάμβανε ένα όργανο από τον κάθε τύπο και τοποθετήθηκαν στις εξής θέσεις:

- Στην αριστερή παρειά της σήραγγας, σε ύψος 2,5 μέτρων περίπου από το δάπεδο εκσκαφής.
- Στη δεξιά παρειά, σε ύψος 2,5 μέτρων περίπου από το δάπεδο της σήραγγας.

Κάθε φορά που είναι να τοποθετηθεί κάποιο όργανο θα πρέπει να δίδονται σκαριφήματα όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Έπίσης άλλοι τύποι οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν στη σήραγγα μελέτης παρουσιάζονται στο σχήμα (6.17), όπου δίνεται ένα παράδειγμα από την τελική επένδυση σε πετρώματα κατηγορίας III (κατά Bieniawski). Τα όργανα που τοποθετήθηκαν στην έξοδο της σήραγγας αφορούν το δεξιό κλάδο της σήραγγας.

Τα όργανα που εγκαταστάθηκαν είναι, δύο (2) πιεζόμετρα διατρήματος (PM), τρία (3) επιφανειακά πιεζόμετρα (PS), δύο (2) ζεύγη υδραυλικών κυψελών πίεσης (HC) και πέντε (5) ζεύγη παραμορφωσίμετρα οπλισμού (SG).

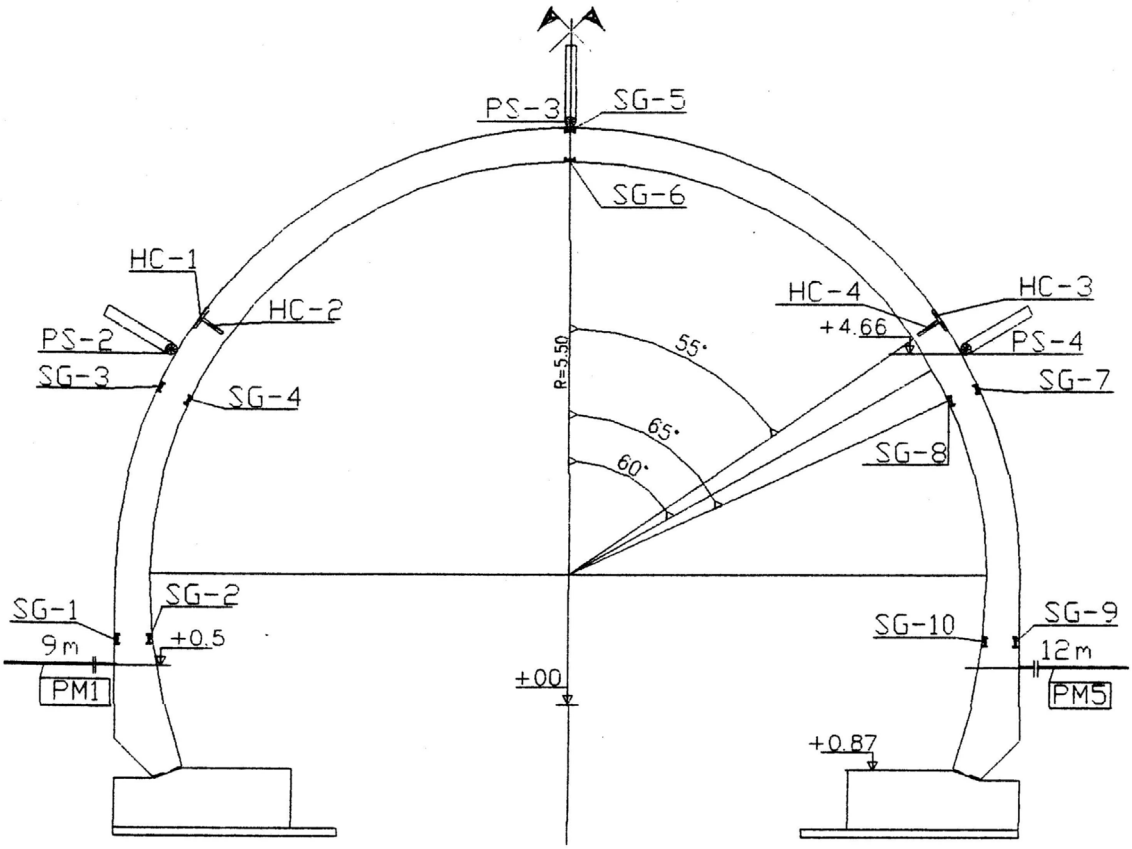


Σχήμα 6.16. Τα όργανα που εγκαταστάθηκαν είναι, μηκυνσιόμετρα διατρήματος (ΒΕ), κυψέλες αγκυρίων (ΑC) και ακίδες σύγκλισης / χωροστάθμισης (CB). (Κ/Ξ ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ-ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ ΑΕ- ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ- ΕΥΚΛΕΙΔΗΣ, 2003)

6.6.1 Παρακολούθηση ευστάθειας εισόδου της σήραγγας του Δρίσκου με κλισιόμετρα

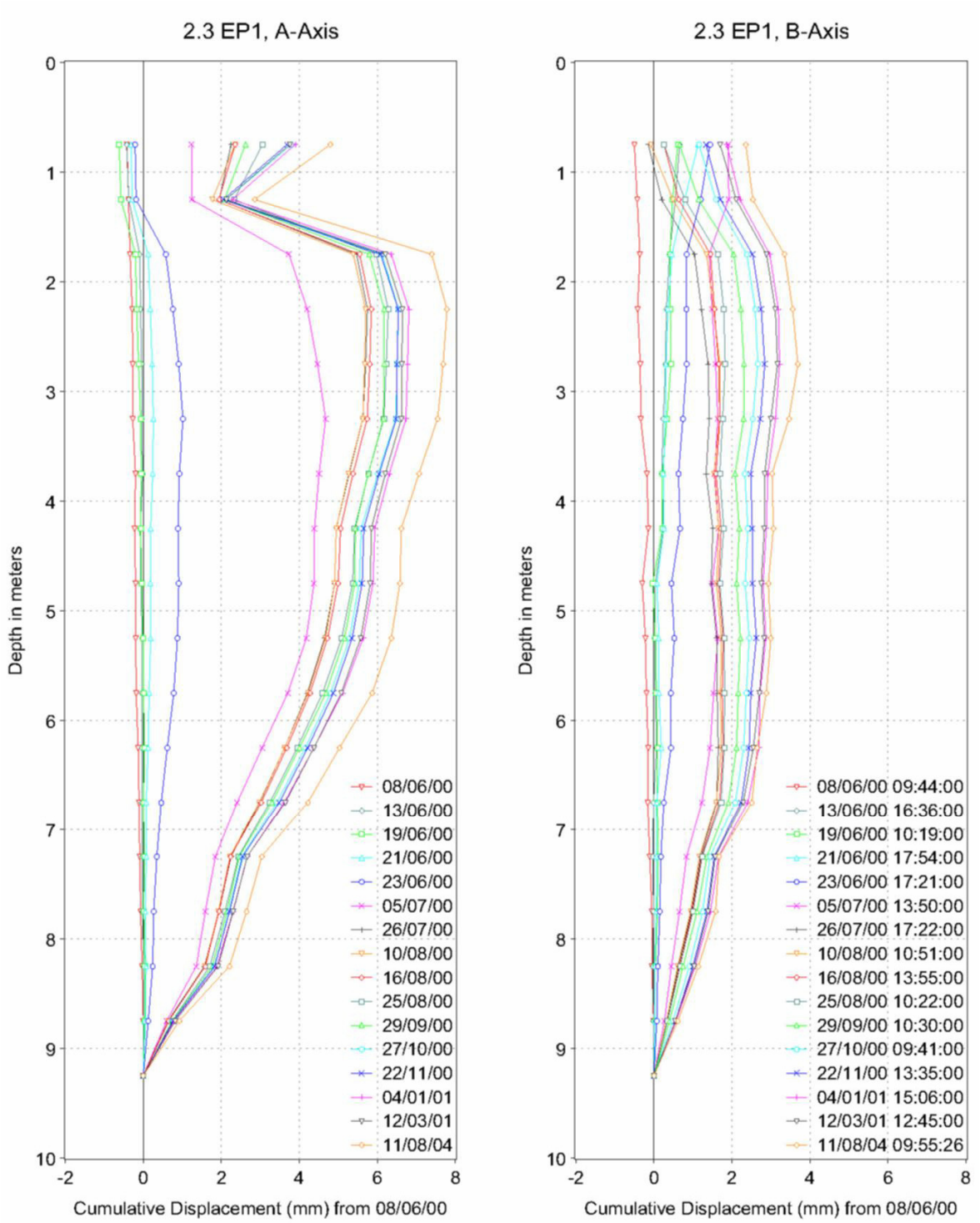
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο δεξιός κλάδος θα βρίσκεται κάτω από ένα μικρό, σε πάχος, -της τάξης των 5μ περίπου-, κάλυμμα επιφανειακού μανδύα για περίπου 30μ, με την τοποθέτηση ενός σταθεροποιητικού στρώματος,-όπως ένα λεπτό στρώμα σκυροδέματος-, πάνω από την περιοχή που θα διανοιγεί η σήραγγα. Μετά από την επίσκεψη στο ύπαιθρο και εξετάζοντας την τοπογραφία της περιοχής, σχηματίστηκε η άποψη ότι μπορεί να προκύψουν διάφορα θέματα, τα οποία θα πρέπει να εξεταστούν με ακρίβεια πριν ακόμα αρχίσει ο σχεδιασμός του. Θα πρέπει να διαπιστωθεί η ευστάθεια αυτού του στρώματος, λόγω αυτής της απότομης ρεματιάς.

Για το λόγο αυτό προτάθηκε η τοποθέτηση δύο κλισιομέτρων ΕΡ1 και ΕΡ1Α πάνω στο πρανές του δεξιού κλάδου, αμέσως μετά τη διάνοιξη του μετώπου. Έγινε η επιλογή του αζιμούθιου της κύριας διεύθυνσης πιθανών μετακινήσεων για το κλισιομετρικό όργανο ΕΡ1 στις 41 μοίρες και για το ΕΡ1Α στις 47 μοίρες. Από τα διαγράμματα (σχήμα 6.18 και 6.19) έχει βγει το συμπέρασμα ότι υπάρχουν ενδείξεις μετακίνησης, αλλά πρόκειται για ελαστική, δεδομένου ότι το υλικό, μέσα στο οποίο είναι εγκατεστημένα τα κλισιόμετρα, είναι χαλαρό. Πρόκειται για κάλυμμα επιφανειακού μανδύα, το οποίο, με τις εργασίες της διάνοιξης και μετά από περιόδους βροχοπτώσεων, έχει υποστεί μία ανακατάταξη του γεωυλικού, η οποία φαίνεται στα διαγράμματα των αθροιστικών και των σταδιακών μετακινήσεων (βλ. Σχήματα 6.19 και 6.20).

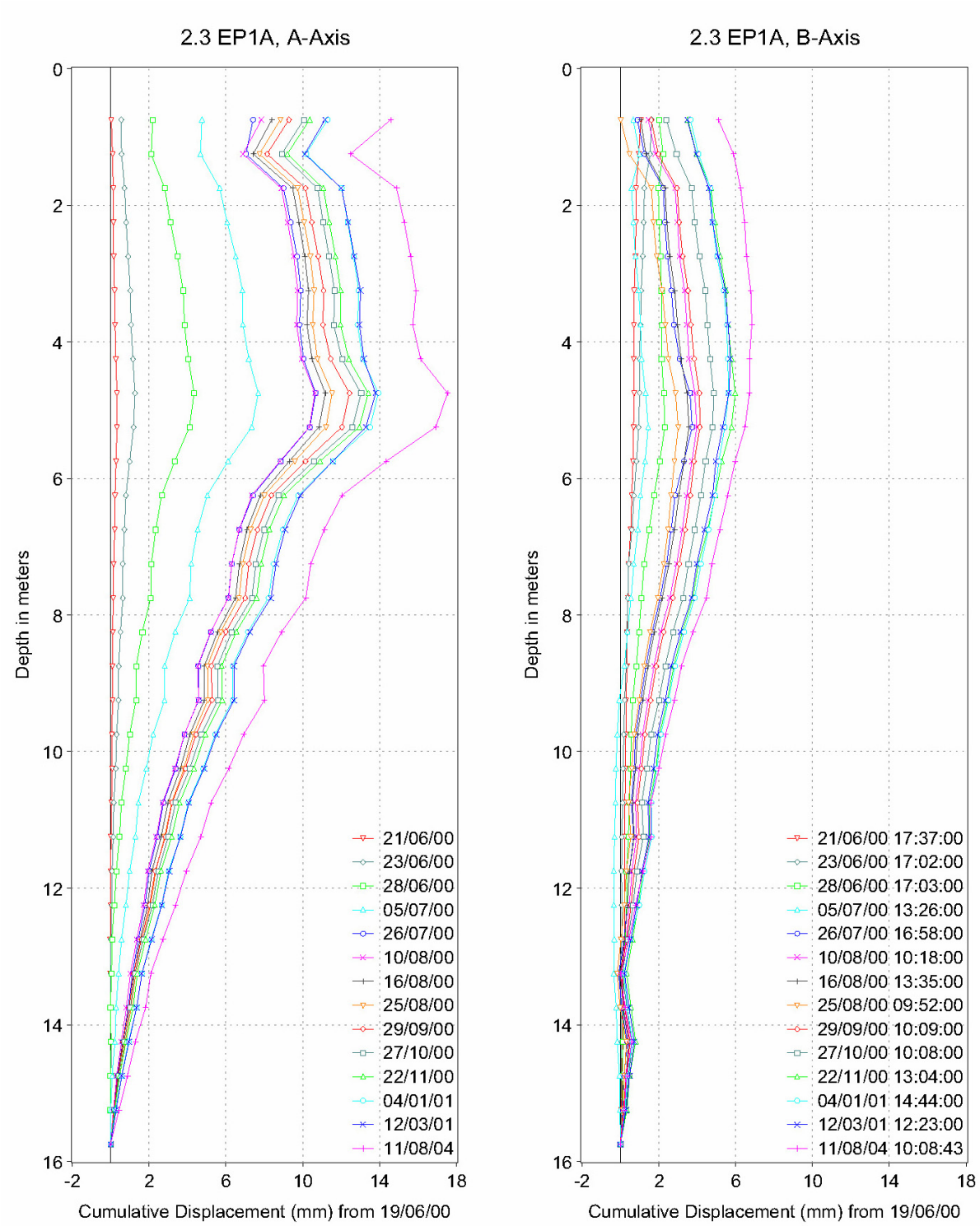


Σχήμα 6.17: Τα όργανα που εγκαταστάθηκαν είναι πιεζόμετρα επιφανειακά (PS), πιεζόμετρα διατρήματος (PM), υδραυλικές κυψέλες πίεσης (HC) και παραμορφωσίμετρα οπλισμού (SG). (Κ/Ξ ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ- ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ ΑΕ- ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ- ΕΥΚΛΕΙΔΗΣ, 2003)

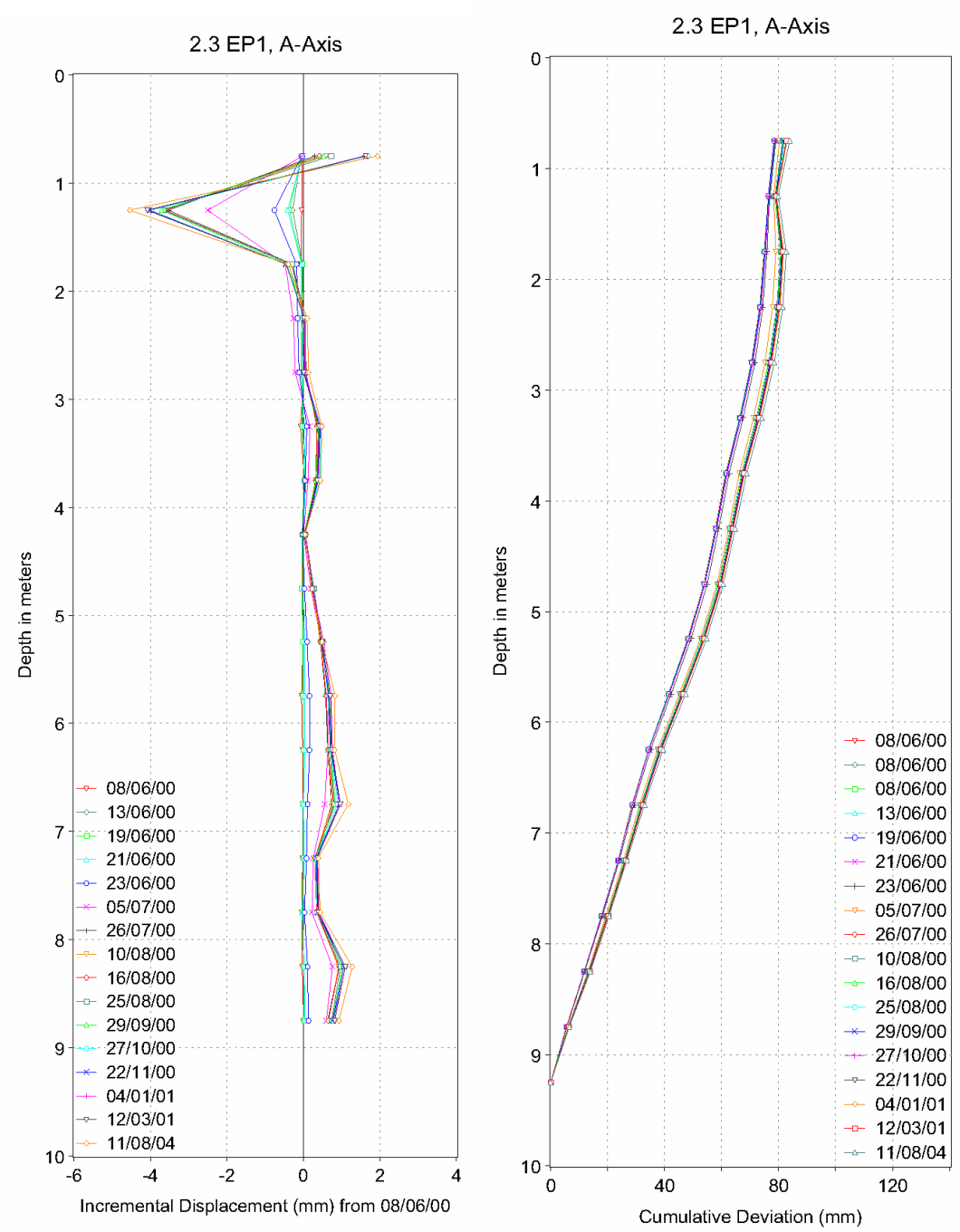
Επίσης, από το διάγραμμα της αθροιστικής απόκλισης (σχήμα 6.20 και 6.21), παρατηρείται ότι δεν πρόκειται για μετακίνηση λόγω κάποιας ασυνέχειας αλλά για μία χαλάρωση της βραχομάζας, δηλαδή για ελαστική μετακίνηση, η οποία ολοκληρώνεται με το πέρας των εργασιών διάνοιξης. Οι εργασίες διάνοιξης ξεκίνησαν την περιοδό του Ιουνίου του 2000 και έλαβαν τέλος τον Σεπτέμβριο του 2002. Από τα κλισιόμετρα, το πρώτο εγκαταστάθηκε στις αρχές και το δεύτερο στο τέλος του Ιουνίου του 2000, όπου και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βάσεις μετά από μία εβδομάδα, αντίστοιχα. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα μέχρι και το Μάρτιο του 2001, όπου και πραγματοποιήθηκε μία ακόμα μέτρηση τον Αύγουστο του 2004, για λόγους επιβεβαίωσης της απουσίας μικρομετακινήσεων. Το διάστημα μεταξύ του Ιουνίου και Ιουλίου του 2000, παρουσιάστηκαν ενδείξεις πιθανής μετακίνησης, η οποία ελέκτηκε με προσοχή λαμβάνοντας μετρήσεις σε συχνότερα διαστήματα. Αποδείχθηκε ότι πρόκειται για τιμές μέσα στα όρια σφάλματος του οργάνου. Από τη μελέτη είχαν ληφθεί υπόψην και τα όρια μετακίνησης που λαμβάνει υπόψην του, ο Μελετητής. και διαπιστώθηκε ότι οι ενδείξεις αυτές δεν τα ξεπέρασαν



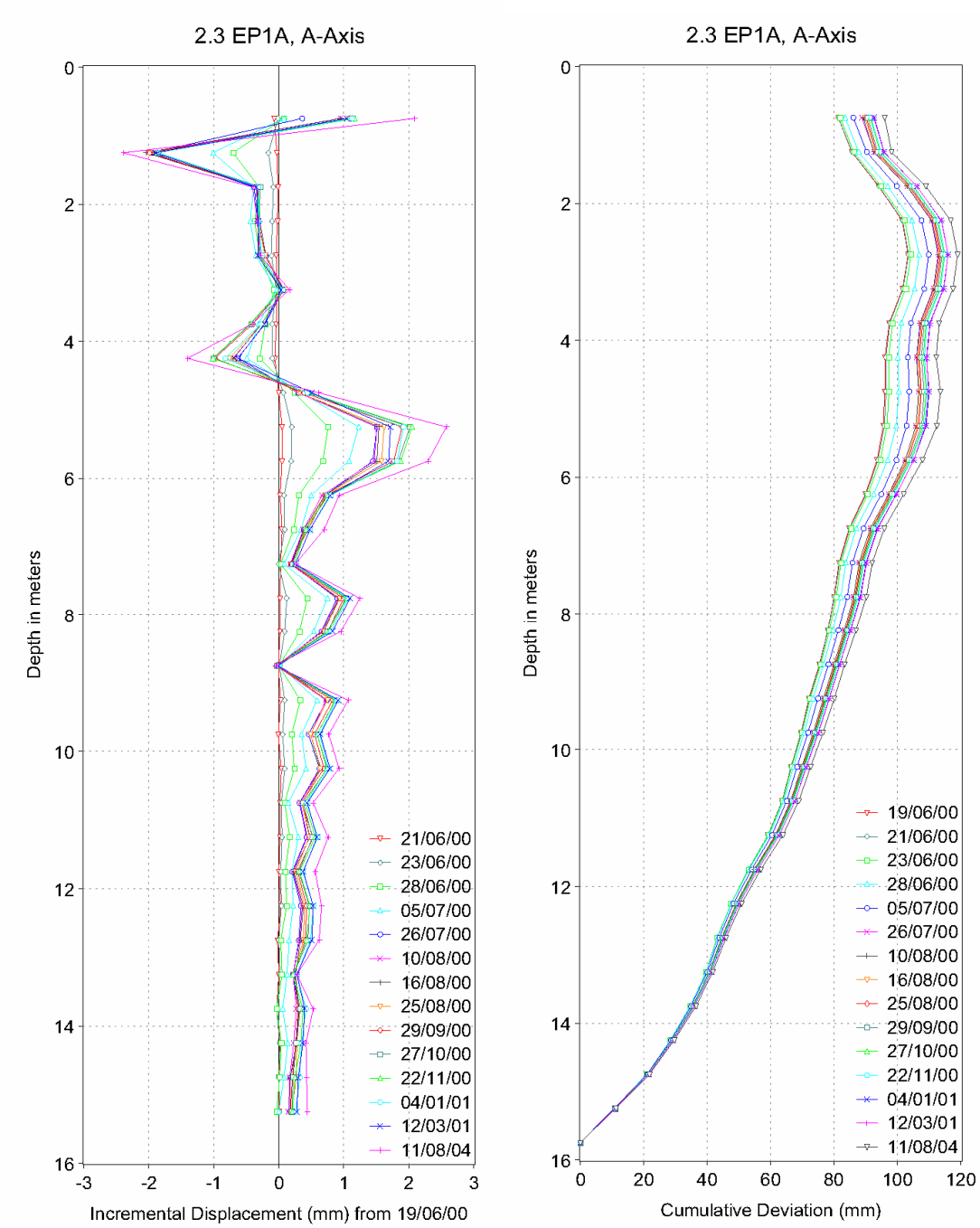
Σχήμα 6.18. Διάγραμμα αθροιστικής μετακίνησης. Ενδείξεις για μετακίνηση από τις 23/06/00 (Ομάδα Εγνατίας Οδού, 2000).



Σχήμα 6.19. Διάγραμμα αθροιστικής μετακίνησης. Ενδείξεις για μετακίνηση από τις 28/06/00 (Ομάδα Εγνατίας Οδού, 2000).



Σχήμα 6.20. Διάγραμμα σταδιακής μετακίνησης και αθροιστικής απόκλισης. Από το διάγραμμα της αθροιστικής απόκλισης φαίνεται ότι πρόκειται για ελαστική μετακίνηση (Ομάδα Εγνατίας Οδού, 2000).



Σχήμα 6.21. Διάγραμμα σταδιακής μετακίνησης και αθροιστικής απόκλισης (Ομάδα Εγνατίας Οδού, 2000).

6.6.2 Εκτίμηση μέτρων υποστήριξης με τη χρήση οργάνων μέτρησης παραμορφώσεων

Στη σήραγγα του Δρίσκου χρησιμοποιήθηκαν όργανα μέτρησης παραμόρφωσης, για την καταγραφή των επιφανειακών μετακινήσεων, δηλαδή μηκυνσιόμετρα τύπου ράβδου. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν το μηκυνσιόμετρο πολλαπλών σημείων, το οποίο αποτελείται από τρεις (3) ράβδους των 3, 6 και 9 μέτρων, τοποθετημένες στην ίδια γεώτρηση για να καταγράψουν τη μετατόπιση των σημείων αγκύρωσης των διαφόρων ράβδων. Πιο αναλυτικά τοποθετήθηκε ένα μηκυνσιόμετρο στην αριστερή, ένα στη δεξιά παρειά του κάθε κλάδου και ένα στο θόλο. Για την κατανόηση των διαγραμμάτων θα πρέπει να αναφερθεί ότι η διάνοιξη του κάθε κλάδου πραγματοποιήθηκε σε 2 φάσεις. Την Α'φάση (Top heading) και τη Β'φάση (Bench). Στην παρούσα μελέτη ξεκίνησε η διάνοιξη του αριστερού κλάδου και μετά από τη διάνοιξη κάποιων μέτρων αυτού, ξεκίνησε η διάνοιξη του δεξιού κλάδου. Η κάθε μέτρηση αφορά συγκεκριμένη χιλιομετρική θέση. Οι μετρήσεις λαμβάνονται για να εξακριβωθεί πόσο επηρεάζεται ο ένας κλάδος από τη διάνοιξη του άλλου κλάδου.

6.6.2.1 Μηκυνσιόμετρα τριών σημείων 3, 6 και 9m

Με το μηκυνσιόμετρο θέλουμε να εντοπίσουμε την ύπαρξη της πλαστικής ζώνης. Στα σχήματα (6.22) έως (6.24), παρουσιάζεται ο τρόπος εγκατάστασης ενός μηκυνσιόμετρου τριών μη τεταμένων ράβδων και συγκεκριμένα παρουσιάζεται το ειδικό κάλυπτρο του συστήματος αναφοράς στην κορυφή της γεώτρησης, με σκοπό την προστασία του. Πριν τοποθετηθεί το όργανο, για να ληφθούν οι μετρήσεις, και για λόγους ασφαλείας, μετράμε με ένα παχύμετρο τις υποδοχές για να εντοπίσουμε τυχόν παραμόρφωση αυτών.

Σχήμα 6.22. Εφαρμογή ειδικού καλύπτρου στην κορυφή της γεώτρησης (προσωπικό αρχείο).

Σχήμα 6.23. Εγκατάσταση μηκυνσιόμετρου τριών ράβδων (προσωπικό αρχείο).

Σχήμα 6.24. Μη τεταμένη ράβδος από ανοιξείδωτο χάλυβα πριν την εγκατάστασή της (προσωπικό αρχείο).

Η τοποθέτηση του μηκυνσιομέτρου στον αριστερό κλάδο έγινε χρονικά πιο μπροστά από αυτή του δεξιού, στις 29/10/2001. Οι αρχικές μετρήσεις λαμβάνονται σχεδόν ανά 2 ημέρες για τον πρώτο μήνα διάνοιξης και αραιώνουν μέχρις ότου ξεκινήσουν οι εργασίες διάνοιξης και του δεξιού κλάδου στις 31/12/01. Σε όλα τα διαγράμματα από τις 29/10/2001 έως 23/11/2001 παρατηρείται μία μικρή ανοδική πορεία της καμπύλης, η οποία οφείλεται στο χρονικό διάστημα μέχρις ότου σταθεροποιηθεί το τασικό περιβάλλον, από την εγκατάσταση του οργάνου αλλά και από την έναρξη των εργασιών διάνοιξης. Από τη στιγμή αυτή, οι μετρήσεις λαμβάνονται ταυτόχρονα και στους δύο κλάδους και παρατηρείται μία μετακίνηση και στους δύο κλάδους με παρόμοιο σταθερό ρυθμό, ο οποίος φαίνεται από την κλίση των καμπύλων. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες του ιδίου σχήματος έχουν την ίδια μορφή. Στην περίπτωση που δεν είχαν την ίδια μορφή, αλλά έστω και μία καμπύλη παρουσίαζε κάποιο μέγιστο, τότε θα πρέπει να εξακριβωθεί ο λόγος για τον οποίο έγινε, γιατί μπορεί να οφείλεται σε κάποια επί τόπου εργασία ή ακόμα και να είναι μετακίνηση.

Στο σχήμα (6.25) παρατηρούνται οι σχετικές μετακινήσεις της κεφαλής, του σημείου στα 3m, του σημείου στα 6m και του σημείου στα 9m, αριστερά, δεξιά και στον άξονα της σήραγγας. Το σχήμα αυτό συνοψίζει τα συμπεράσματα, τα οποία προκύπτουν από την αξιολόγηση των τριών επόμενων σχηματών (6.26, 6.27 και 6.28) και αφορούν τα μηκυνσιόμετρα ΒΕ-1, ΒΕ-2, ΒΕ-3. Πιο αναλυτικά παρατηρούμε μετακινήσεις και στις τρεις ράβδους στην αριστερή παρειά, ενώ στη δεξιά

παρεία παρατηρούμε κυρίως στη ράβδο των 3 μέτρων. Στο θόλο δεν παρατηρούνται μετακινήσεις. Συνήθως χρησιμοποιείται ο όρος πιθανή μετακίνηση και πάντα γίνεται έλεγχος για πιθανόν λάθη, τόσο στα δεδομένα που λαμβάνονται, όσο και από την ερμηνεία των άλλων οργάνων που τοποθετήθηκαν, για παράδειγμα την ακίδα σύγκλισης. Επίσης μετακίνηση θεωρείται όταν υπερβεί και το όριο που θέτει ο εκάστοτε μελετητής για το αντίστοιχο τεχνικό έργο. Συνήθως αυτό το όριο κυμαίνεται στα 8-12mm. Οι ρυθμοί μετακίνησης διαφέρουν μεταξύ τους.

Το σχήμα (6.26) αναφέρεται στις μετρήσεις του μηκυνσιομέτρου στην αριστερή παρειά του αριστερού κλάδου και παρατηρείται η μπλε καμπύλη να παρουσιάζει μία μικρομετακίνηση μετά τη μέτρηση στις 21/1/2002, όπου και πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση του άνω αισθητήρα (top heading) του δεξιού κλάδου που αναφέρεται με τη μπλε στικτή καμπύλη. Ομοίως και η ροζ καμπύλη. Στην καμπύλη αυτή παρατηρείται ακόμα μία μικρομετακίνηση στη μέτρηση στις 20/5/2002, όπου πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση του κεκαμμένου άξονα (bench) του αριστερού κλάδου, και η οποία παρουσιάζεται στο διάγραμμα με τη σκούρη πράσινη γραμμή.

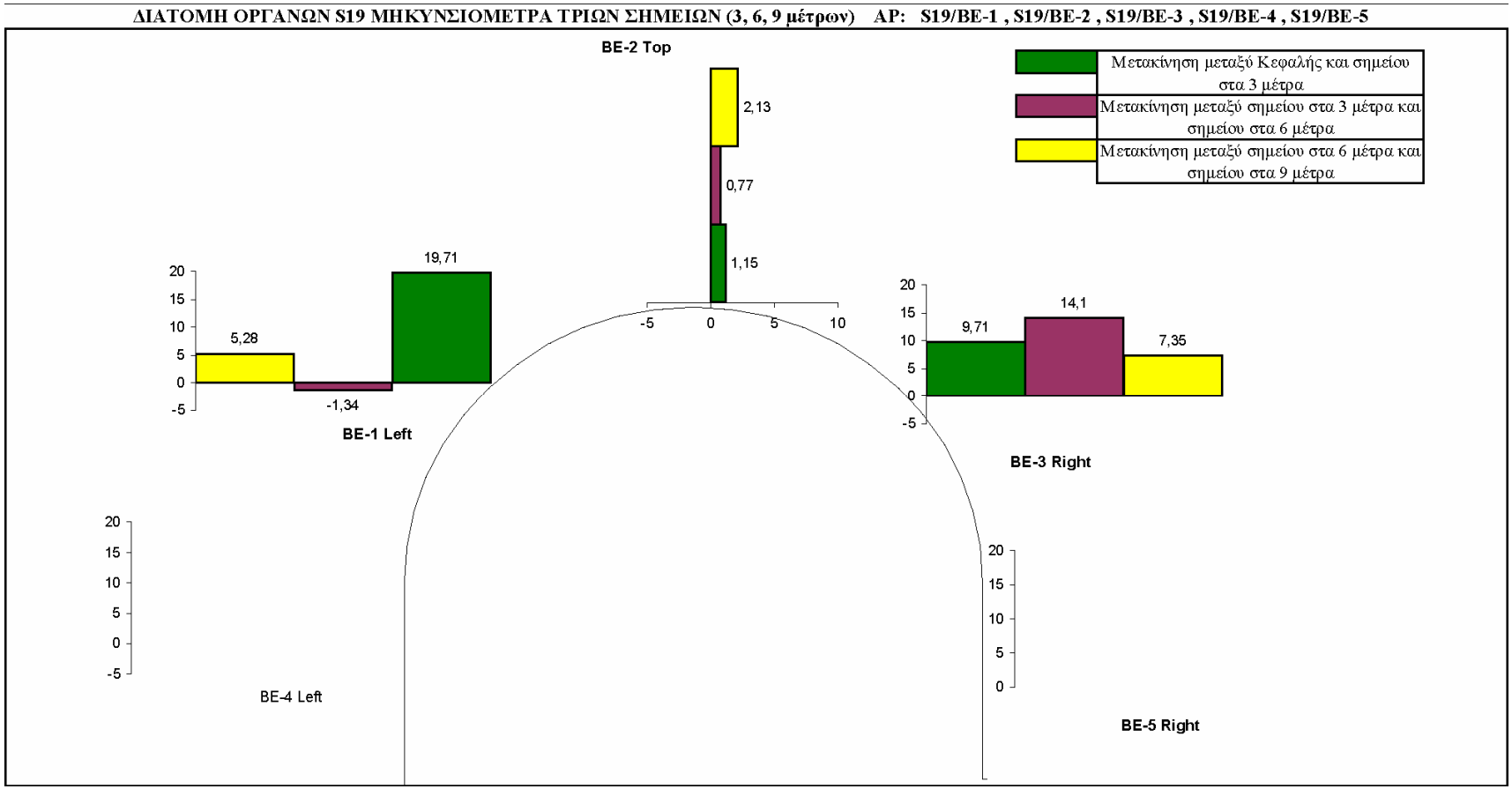
Στο μηκυνσιόμετρο ΒΕ-2, που βρίσκεται επάνω στον άξονα του αριστερού κλάδου παρατηρείται αύξηση του ρυθμού μετακίνησης με την τοποθέτηση του bench του αριστερού κλάδου και ο οποίος σταθεροποιήθηκε αμέσως μετά (βλ. Σχήμα 6.27), ενώ αριστερά (σχήμα 6.26) και δεξιά (6.28) του άξονα η αύξηση αυτή δεν ήταν μεγάλη, έως και αμελητέα. Αυτό που παρατηρείται και στα τρία διαγράμματα των σχημάτων (6.26, 6.27 και 6.28), είναι ότι δεν παρουσιάζουν μετακινήσεις αλλά αυτές οι μικρομετακινήσεις οφείλονται σε εργασίες διάνοιξης των κλάδων.

Ομοίως και στο διάγραμμα (6.28) παρατηρείται μικρομετακινήσεις με την τοποθέτηση τόσο του Top heading του αριστερού κλάδου, όσο και με την τοποθέτηση του Bench του αριστερού κλάδου.

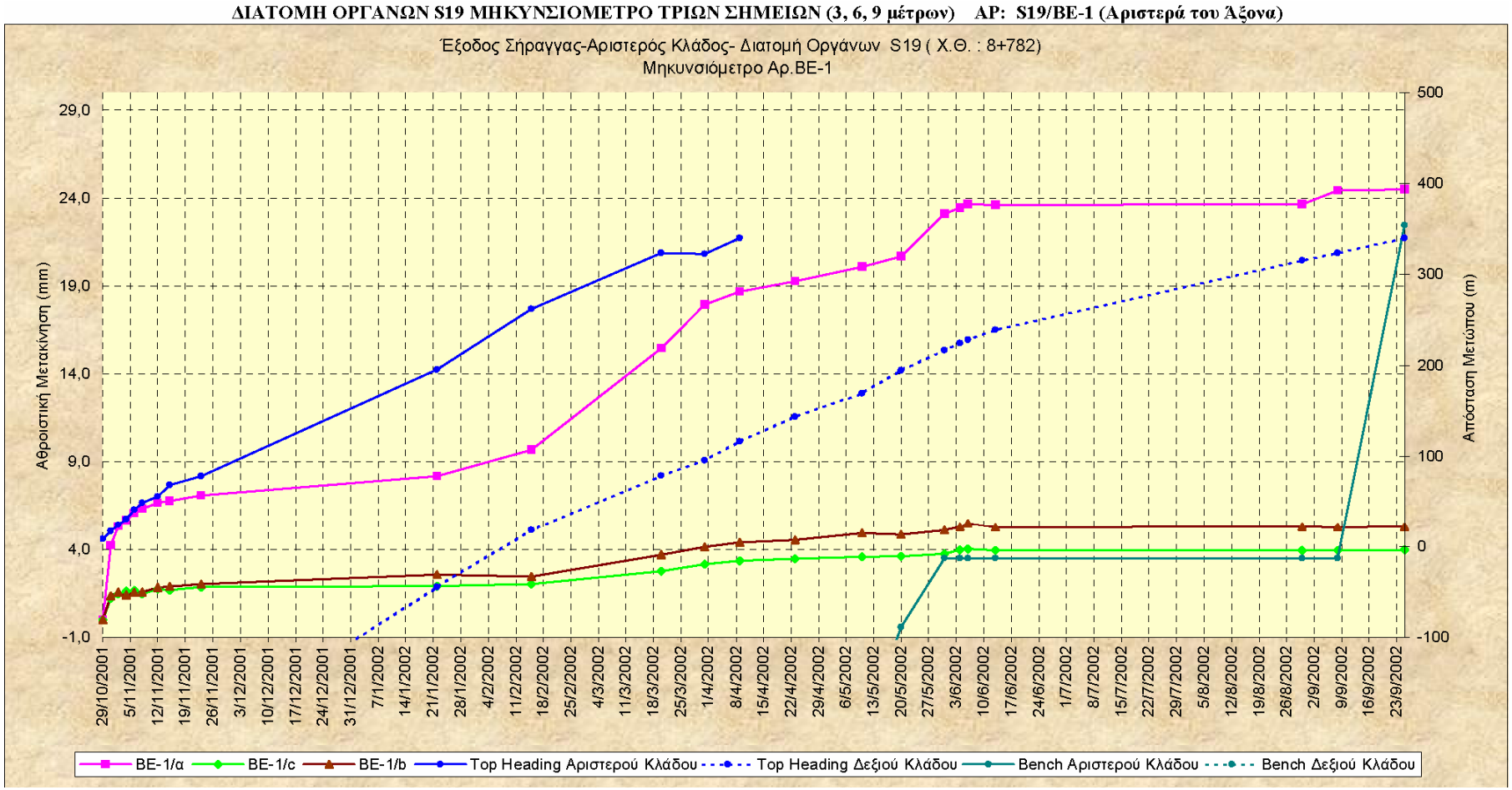
6.6.2.2 Ακίδες σύγκλισης/ χωροστάθμισης

Κάθε όργανο που τοποθετείται συνοδεύεται συνήθως και από μία ακίδα σύγκλισης . Με τον τρόπο αυτό γίνεται ένας έλεγχος στην περίπτωση που μετακινείται όλο το σύστημα καταμέτρησης, ενώ δεν παρατηρούμε καμία ένδειξη μετακίνησης.

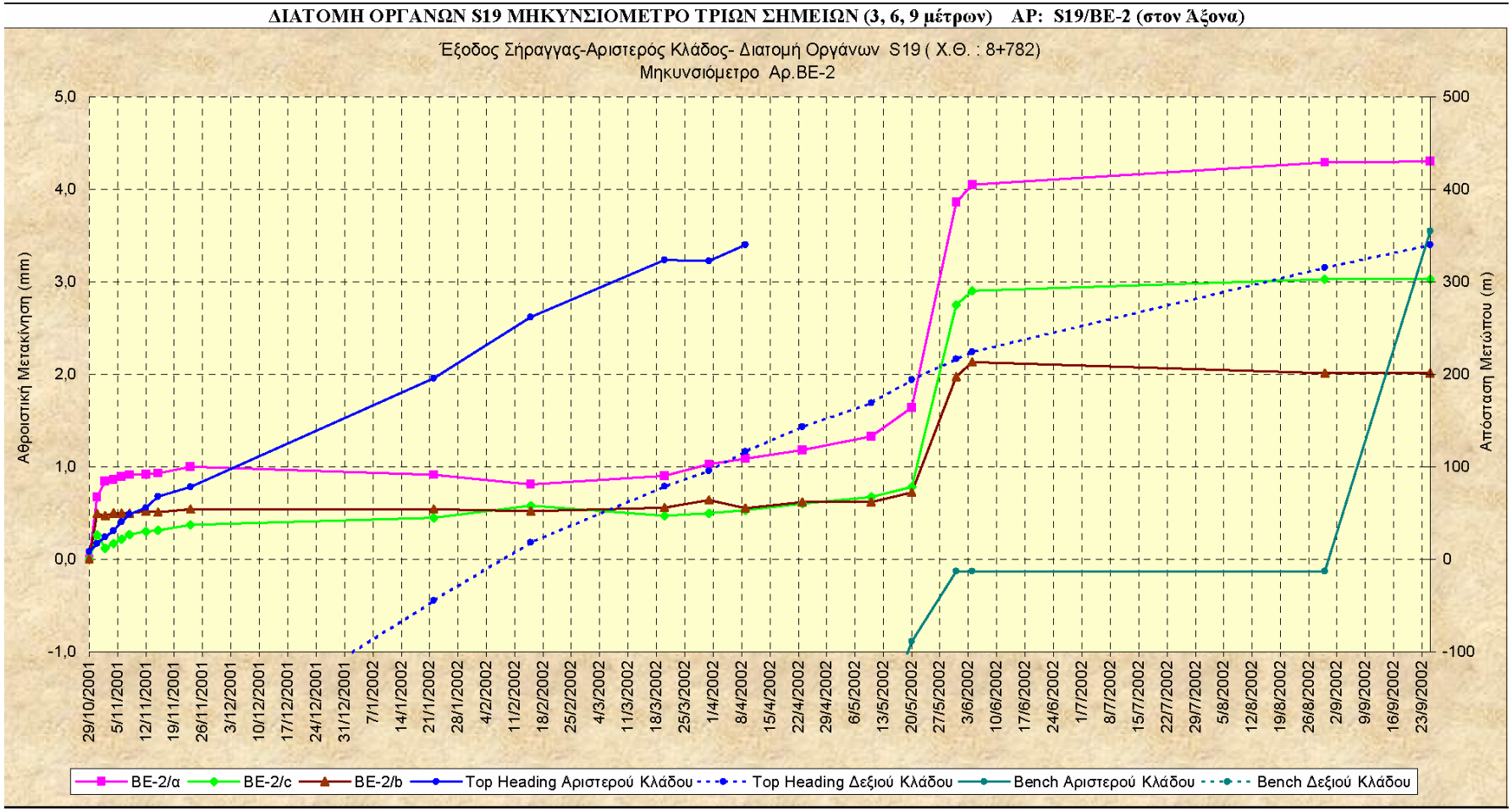
Όλες οι μετρήσεις των ακίδων λαμβάνονται από στάσεις, οι οποίες βρίσκονται είτε στη δεξιά, είτε στην αριστερή παρειά και στην περίπτωση εμφάνισης συγκλίσεων γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις. Οι σταθμοί για τις στάσεις είναι σχετικά κοντά στο μέτωπο, συνήθως σε απόσταση το πολύ 3m. Επίσης, λαμβάνονται μετρήσεις και απο στάσεις έξω από τη σήραγγα, οι οποίες αποτελούν σταθερά σημεία μέτρησης μέχρι το πέρας της κατασκευής της.



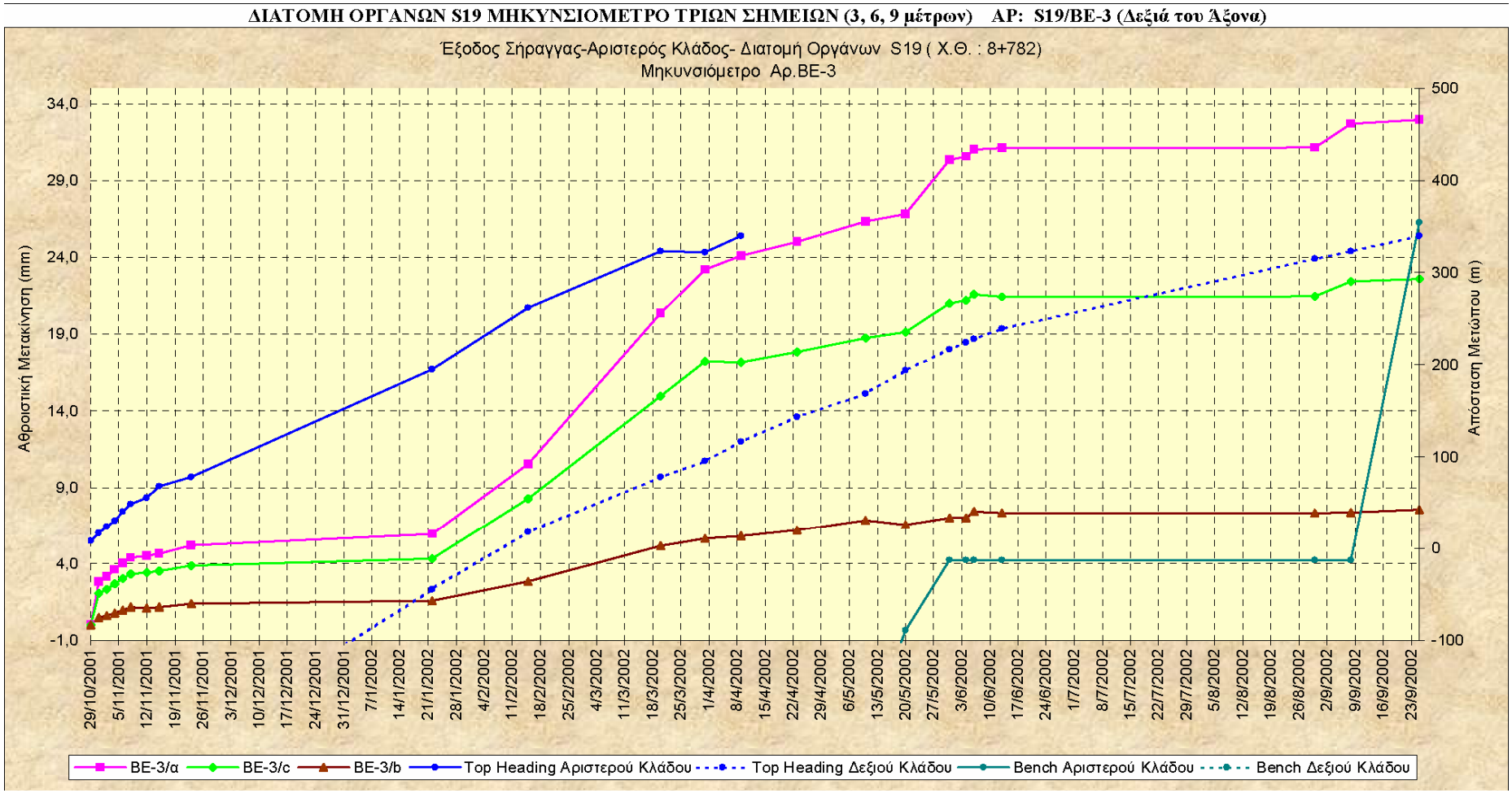
Σχήμα 6.25. Σχετικές μετακινήσεις της κεφαλής, του σημείου στα 3m, του σημείου στα 6m και του σημείου στα 9m, αριστερά, δεξιά και στον άξονα της σήραγγας (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).



Σχήμα 6.26. Διάγραμμα χρονικά μεταβαλλόμενης αθροιστικής μετακίνησης μυκηνσιομέτρου στην αριστερή παρειά του αριστερού κλάδου της σήραγγας (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).



Σχήμα 6.27: Διάγραμμα χρονικά μεταβαλλόμενηγς αθροιστικής μετακίνησης μυκηνσιομέτρου στον άξονα του αριστερού κλάδου της σήραγγας. (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ)



Σχήμα 6.28: Διάγραμμα χρονικά μεταβαλλόμενης αθροιστικής μετακίνησης μυκηνσιομέτρου στη δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου της σήραγγας (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).

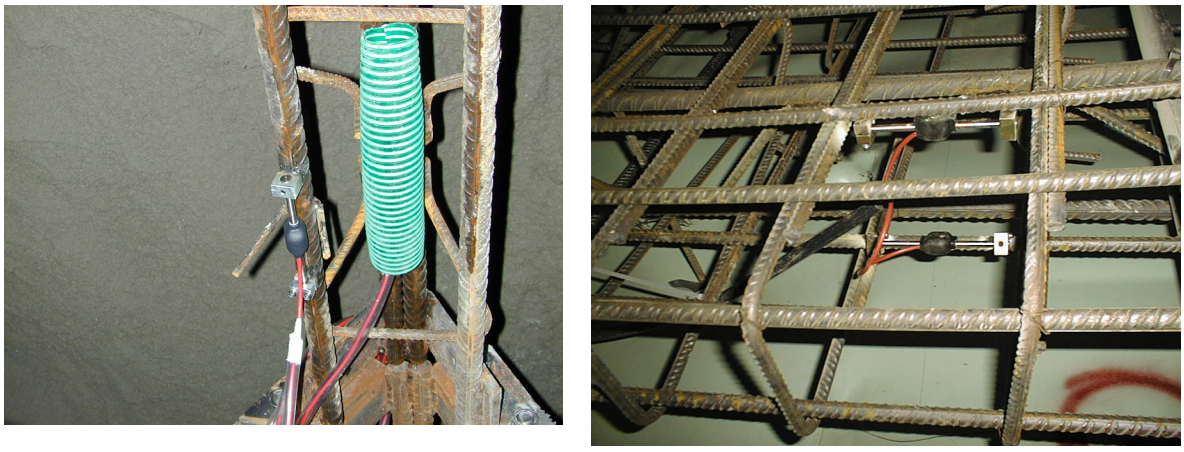
6.6.3 Γεωτεχνικά όργανα μέτρησης ολικών τάσεων

Τα γεωτεχνικά όργανα μέτρησης των ολικών τάσεων χρησιμοποιούνται κυρίως στις διεπιφάνειες εδάφους- κατασκευής και πρόκειται είτε για εντοιχισμένες μονάδες, οι οποίες μετράνε εδαφικές τάσεις είτε για μονάδες επαφής, οι οποίες μετράνε εδαφικές πιέσεις στη διεπιφάνεια. Από τη μέτρηση των τάσεων προσδιορίζονται ολικές τάσεις, τάσεις θεμελίωσεις, τάσεις στην επιφάνεια και το εσωτερικό της επικάλυψης των υπόγειων κατασκευών καθώς και τάσεις στις διεπιφάνειες. Επίσης, για την επιλογή ενός τέτοιου οργάνου λαμβάνονται υπόψην η γεωμετρία της μονάδας, η ακαμψία της μονάδας σε σχέση με το έδαφος, η ανομοιομορφία του εδάφους για την τοποθέτηση της μονάδας και άλλα τέτοια στοιχεία τα οποία μπορεί να επηρεάσουν το τασικό πεδίο του εδαφούς ή τουλάχιστον να επηρεάσουν το λιγότερο δυνατόν, για την αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουν χρησιμοποιηθεί κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρίων, παραμορφωσίμετρα στο σκυρόδεμα και στο μεταλλικό πλαίσιο και υδραυλικές κυψέλες μέτρησης πετρώματος.

6.6.3.1 Παραμορφωσίμετρα σε μεταλλικό πλάισιο

Πρόκειται για όργανα μέτρησης ολικών τάσεων, προκειμένου να μετρηθούν οι παραμορφώσεις της κατασκευής, δεδομένου ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία υποβάλλονται σε θλίψη ή και κάμψη. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν μετρητές τύπου δονούμενης χορδής, οι οποίοι είναι εύκολοι στην τοποθέτησή τους και δεν επηρεάζεται η λειτουργία τους από πιθανή υγρασία. Στο σχήμα (6.29) παρουσιάζεται η τοποθέτηση παραμορφωσίμετρου σε μεταλλικό πλαίσιο και στο σχήμα (6.30) παρουσιάζεται το όργανο –μονάδα καταγραφής δεδομένων- λήψης των μετρήσεων.

Τα παραμορφωσίμετρα τοποθετούνται κατά ζεύγη και στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπήκαν 5 ζεύγη –ένα στο εσωράχιο και ένα στο εξωράχιο-, στη διατομή, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα (6.17), και η αρίθμησή τους ξεκινάει από την αριστερή παρειά του κλάδου της σήραγγας. Στους δύο επόμενους πίνακες (6.1) και (6.2) παρουσιάζονται τα δεδομένα καταγραφής, από παραμορφωσίμετρο σε μεταλλικό πλαίσιο αριστερά του άξονα, όπως μεταβάλλονται με το χρόνο.

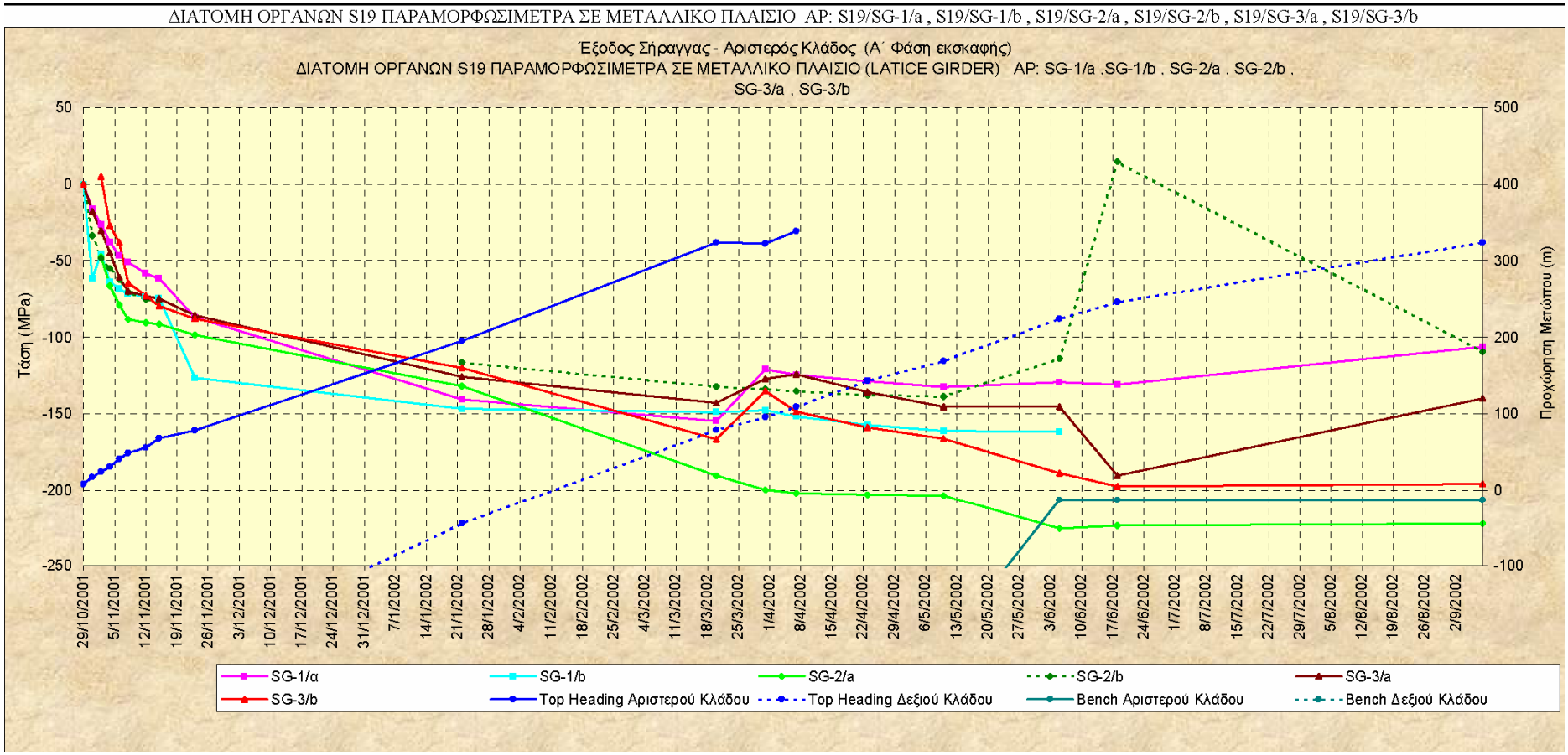


Σχήμα 6.29. Τοποθέτηση παραμορφωσίμετρου σε μεταλλικό πλαίσιο (προσωπικό αρχείο).

Σχήμα 6.30. Όργανο μέτρησης παραμορφωσίμετρου (προσωπικό αρχείο).

Στο σχήμα (6.31), βλέπουμε τις μετρήσεις που μεταβάλλονται με το χρόνο και αφορούν τις μετρήσεις στον αριστερο κλάδο της εξόδου της σήραγγας. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται στον άξονα των ψ η διακύμανση της τάσης (αριστερός άξονας), σε συνάρτηση με το χρόνο και επίσης παρουσιάζεται η προχώρηση του μετώπου (δεξιός άξονας) σε συνάρτηση με το χρόνο. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για το ζεύγος παραμορφωσίμετρου SG1 (a- εξωράχιο, b-εσωράχιο), το οποίο τοποθετείται αριστερά του κλάδου, για το ζεύγος παραμορφωσίμετρου SG2 (a- εξωράχιο, b-εσωράχιο), το οποίο τοποθετείται στον άξονα του κλάδου και το ζεύγος παραμορφωσίμετρου SG3 (a- εξωράχιο, b-εσωράχιο), το οποίο τοποθετείται δεξιά του κλάδου. Το αριστερό τμήμα του διαγράμματος αφορά τις εναλλαγές της τάσης (MPa) και το δεξιό τμήμα αυτού, την προχώρηση του μετώπου σε μέτρα, σε συνάρτηση με το χρόνο. Η ερμηνεία των καμπύλων μέτρησης πρέπει να γίνεται με σύγκριση μεταξύ των καμπύλων ανά ζεύγος,- κανονικά πρέπει οι δύο καμπύλες που αφορούν το ζεύγος του ενός παραμορφωσίμετρου να είναι παράλληλες, σε αντίθετη περίπτωση, ερμηνεύεται παραμόρφωση του πλέγματος, όταν δηλαδή αποκλίνουν- όπου παρατηρείται και η τυχόν παραμόρφωση του μεταλλικού πλέγματος.

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται η συμπεριφορά του παραμορφωσίμετρου από την αρχή της πρώτης φάσης εκσκαφής του αριστερού κλάδου (βλ. Μπλε στικτή γραμμή), στις 29/10/2001. Στην αρχή και ανά διαστήματα των 7 ημερών περίπου, λαμβάνονται μετρήσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως μετρήσεις βάσεις, όπου και παρατηρείται και η συμπεριφορά του οργάνου. Δηλαδή αναμένεται η ύπαρξη μεγάλων μεταβολών λόγω των εκσκαφών που πραγματοποιούνται στην περιοχή και έχουν ως επίδραση την αλλαγή του τασικού πεδίου της περιοχής. Με την έναρξη των εργασιών εκσκαφής του δεξιού κλάδου (βλ. Μπλε στικτή γραμμή) παρατηρούμε μεταβολλές της τάσης σχεδόν σε όλα τα παραμορφωσίμετρα. Οι μεταβολές αυτές υποδηλώνουν την σταδιακή αύξηση των θλιπτικών φορτίων στην επένδυση της σήραγγας. Από τις αρχικές μετρήσεις και μέχρι το πέρας της πρώτης φάσης εκσκαφής του αριστερού κλάδου ο ρυθμός μεταβολής των παραμορφώσεων παραμένει σταθερός (βλ.μορφή καμπύλης). Με την έναρξη των εργασιών της δεύτερης φάσης εκσκαφής (βλ. Λαδί γραμμή) παρατηρούμε μεταβολή των τάσεων, κυρίως στο ζεύγος SG-2a και SG-2b, όπου και αποκλείνουν μεταξύ τους οι καμπύλες. Οι αποκλίσεις αυτές υποδηλώνουν ότι οι μεταβολές του τασικού πεδίου και ο τρόπος με το οποίο επιβάλλονται τα θλιπτικά φορτία προκαλούν την κάμψη της επένδυσης – η εσωτερική παρειά της εφελκύεται και η εξωτερική της θλίβεται – για το λόγο αυτό και οι δύο καμπύλες αποκλίνουν. Με την πάροδο του χρόνου και αφού επέρθει ισορροπία των τάσεων στην περιοχή ο ρυθμός τείνει να σταθεροποιηθεί όπως παρατηρούμε από τις καμπύλες, μετά από τη μέτρηση, στις 5/6/2002. Στον πίνακα (6.1) και (6.2), δίνεται ένα φύλλο καταγραφής των μετρήσεων των παραμορφωσίμετρων σε μια συγκεκριμένη διατομή, σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχήμα 6.31. Χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο σε μεταλλικό πλαίσιο στον αριστερό κλάδο της εξόδου της σήραγγας. (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ)

ΕΡΓΟ : ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΤΜΗΜΑ 2.4 ΣΗΡΑΓΓΑ
ΚΥΡΙΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ : ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.
ΑΝΑΔΟΧΟΣ : Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - Ι

ΔΙΑΤΟΜΗ ΟΡΓΑΝΩΝ S19 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΑ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

ΘΕΣΗ:Έξοδος Σήραγγας, Αριστερός Κλάδος (Α΄ Φάση εκσκαφής)

Ημ/νία	Απόσταση Μετώπου Αριστερού Κλάδου (m)		Απόσταση Μετώπου Δέξιου Κλάδου (m)		Αριστερά του Άξονα					
					SG-1/a(εξωρράχιο)			SG-1/b(εσωρράχιο)		
	Top Heading	Bench	Top Heading	Bench	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)
29/10/2001	8,0	-1914,7	-299,0	-1848,6	2515,00	0,00	0,00	2734,00	0,00	0,00
31/10/2001	17,0	-1914,7	-292,0	-1848,6	2436,96	-78,04	-16,15	2436,37	-297,63	-61,61
2/11/2001	23,8	-1914,7	-284,9	-1848,6	2387,64	-127,36	-26,36	2514,65	-219,35	-45,41
4/11/2001	30,5	-1914,7	-276,5	-1848,6	2332,60	-182,40	-37,76	2426,32	-307,68	-63,69
6/11/2001	40,6	-1914,7	-266,0	-1848,6	2288,90	-226,10	-46,80	2403,51	-330,49	-68,41
8/11/2001	48,5	-1908,3	-256,8	-1848,6	2269,53	-245,47	-50,81	2386,95	-347,05	-71,84
12/11/2001	55,8	-1894,0	-245,0	-1848,6	2232,54	-282,46	-58,47	2379,65	-354,35	-73,35
15/11/2001	67,9	-1847,8	-233,2	-1848,6	2218,07	-296,93	-61,46	2374,10	-359,90	-74,50
23/11/2001	78,1	-1758,4	-210,7	-1848,6	2095,47	-419,53	-86,84	2122,31	-611,69	-126,62
22/1/2002	195,4	-962,8	-44,7	-1848,6	1835,26	-679,74	-140,71	2024,35	-709,65	-146,90
20/3/2002	323,5	-479,5	78,5	-1848,6	1767,54	-747,46	-154,72	2013,52	-720,48	-149,14
31/3/2002	322,5	-375,9	95,4	-1848,6	1930,25	-584,75	-121,04	2019,56	-714,44	-147,89
7/4/2002	338,3	-333,8	108,7	-1848,6	1913,26	-601,74	-124,56	1999,69	-734,31	-152,00
23/4/2002		-283,7	143,3	-1831,1	1892,65	-622,35	-128,83	1973,21	-760,79	-157,48
10/5/2002		-206,9	168,9	-1671,5	1873,65	-641,35	-132,76	1954,23	-779,77	-161,41
5/6/2002		-13,3	224,3	-1604,0	1889,67	-625,33	-129,44	1952,64	-781,36	-161,74
18/6/2002		-13,0	246,1	-1346,5	1882,37	-632,63	-130,95			
8/9/2002		-13,0	323,5	-666,0	2001,86	-513,14	-106,22			
		8782,0	8779,0	8779,0						
		8782,0	8779,0	8779,0						

Πίνακας 6.1. Χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα καταγραφής από παραμορφωσίμετρο σε μεταλλικό πλαίσιο αριστερά του άξονα (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).

Α ΔΡΙΣΚΟΥ

ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΙ

Ο (HEB 160) ΑΡ: S19/SG-1/a , S19/SG-1/b , S19/SG-2/a , S19/SG-2/b , S19/SG-3/a , S19/SG-3/b

ΗΜ/ΝΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ : 25/10/01									Χ.Θ: 8+782		
Στον Άξονα						Δεξιά του Άξονα					
SG-2/a(εξωρράχιο)			SG-2/b(εσωρράχιο)			SG-3/a(εξωρράχιο)			SG-3/b(εσωρράχιο)		
Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)
2426,00	0,00	0,00	1497,64	0,00	0,00	2453,17	0,00	0,00	2136,42	0,00	0,00
			1335,91	-161,73	-33,48	2366,99	-86,18	-17,84			
2197,54	-228,46	-47,29	1264,15	-233,49	-48,33	2305,96	-147,21	-30,47	2160,22	23,80	4,93
2105,32	-320,68	-66,38	1231,35	-266,29	-55,12	2236,41	-216,76	-44,87	2005,12	-131,30	-27,18
2045,13	-380,87	-78,84	1196,32	-301,32	-62,37	2158,34	-294,83	-61,03	1952,36	-184,06	-38,10
1999,03	-426,97	-88,38	1156,32	-341,32	-70,65	2114,56	-338,61	-70,09	1824,53	-311,89	-64,56
1988,13	-437,87	-90,64	1135,46	-362,18	-74,97	2099,89	-353,28	-73,13	1785,32	-351,10	-72,68
1984,69	-441,31	-91,35	1129,47	-368,17	-76,21	2092,50	-360,67	-74,66	1751,68	-384,74	-79,64
1949,37	-476,63	-98,66				2039,15	-414,02	-85,70	1712,34	-424,08	-87,78
1788,32	-637,68	-132,00	934,65	-562,99	-116,54	1844,68	-608,49	-125,96	1556,35	-580,07	-120,07
1505,24	-920,76	-190,60	858,62	-639,02	-132,28	1763,28	-689,89	-142,81	1330,24	-806,18	-166,88
1460,21	-965,79	-199,92	851,42	-646,22	-133,77	1838,74	-614,43	-127,19	1483,25	-653,17	-135,21
1449,68	-976,32	-202,10	844,55	-653,09	-135,19	1852,21	-600,96	-124,40	1417,68	-718,74	-148,78
1445,25	-980,75	-203,02	832,32	-665,32	-137,72	1796,68	-656,49	-135,89	1367,85	-768,57	-159,09
1441,21	-984,79	-203,85	827,46	-670,18	-138,73	1749,58	-703,59	-145,64	1333,25	-803,17	-166,26
1336,65	-1089,35	-225,50	947,37	-550,27	-113,91	1749,67	-703,50	-145,62	1223,64	-912,78	-188,95
1345,27	-1080,73	-223,71	1567,89	70,25	14,54	1532,64	-920,53	-190,55	1182,57	-953,85	-197,45
1352,24	-1073,76	-222,27	968,48	-529,16	-109,54	1775,98	-677,19	-140,178	1189,14	-947,28	-196,087

Πίνακας 6.2. Χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα καταγραφής από παραμορφωσίμετρο σε μεταλλικό πλαίσιο στον άξονα και δεξιά του άξονα (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).

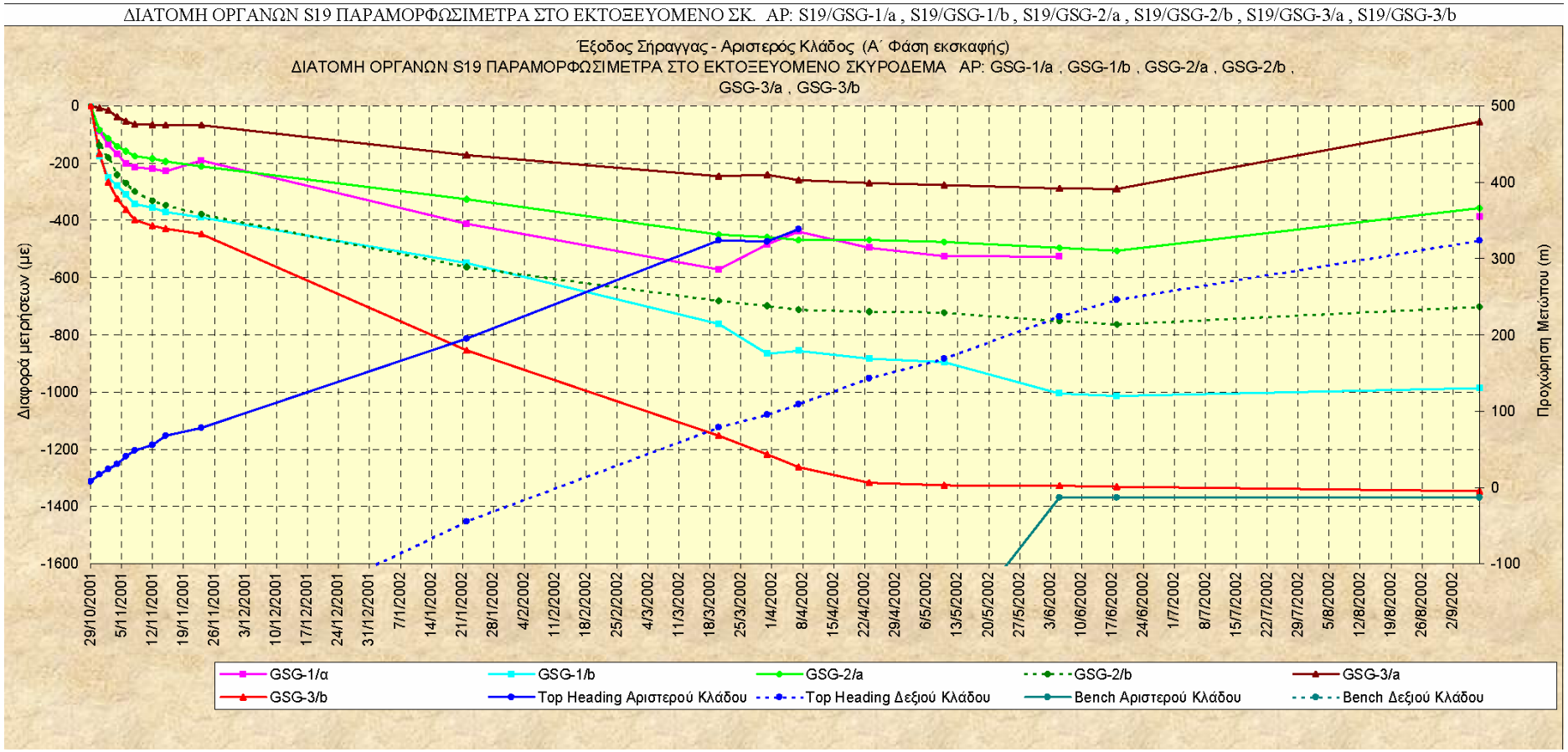
6.6.3.2 Παραμορφωσίμετρα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Τα όργανα αυτά συγκολλώνται ή επικολλώνται σε επιφάνειες από σκυρόδεμα για να μετρήσουν τις παραμορφώσεις του ενισχυμένου σκυροδέματος, ή κατά την πήξη του σκυροδέματος ή κατά την επικάλυψη της σήραγγας. Οι μονάδες εγκαθίστανται στις σήραγγες σε ομάδες των τριών για τη μέτρηση της ακτινικής της περιμετρικής και της αξονικής τάσης.

Στο σχήμα (6.32) παρουσιάζεται το διάγραμμα που προκύπτει από τη διαφορά της επόμενης μέτρησης με την προηγούμενη (αριστερός άξονας) σε συνάρτηση με το χρόνο και την προχώρηση του μετώπου σε συνάρτηση με το χρόνο (δεξιός άξονας). Για την ερμηνεία των διαγραμμάτων αυτών, επίσης, πρέπει να γίνεται σύγκριση μεταξύ των καμπύλων ανά ζεύγος,- κανονικά πρέπει οι δύο καμπύλες που αφορούν το ζεύγος του ενός παραμορφωσίμετρου να είναι παράλληλες, σε αντίθετη περίπτωση, ερμηνεύεται αστοχία του σκυροδέματος, όταν δηλαδή αποκλίνουν-, όπου παρατηρείται και η τυχόν παραμόρφωση του σκυροδέματος. Η απόκλιση των καμπυλών υποδηλώνει την κάμψη του σκυροδέματος. Επομένως όπου υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις το δύσκαμπτο σκυρόδεμα αστοχεί. Στο διάγραμμα αυτό, παρατηρούνται μεταβολές της τάσης και στα τρία ζεύγη των παραμορφωσίμετρων, με την έναρξη των εργασίων εκσκαφής του αριστερού κλάδου, πράγμα αναμενόμενο, έως ότου πήξει το σκυρόδεμα. Οι αρχικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ανά δύο περίπου μέρες και μετά από τη σταθεροποίηση του ρυθμού μεταβολής (βλ. Μορφή καμπύλης), έγιναν ανα πιο αραιά χρονικά διαστήματα. Μόνο σε περιπτώσεις, όπου αναμένονταν ή/και παρατηρούνταν μεταβολή του ρυθμού λαμβάνονταν μετρήσεις σε πιο συχνά διαστήματα, όπως λίγο πριν την έναρξη των εργασιών της δεύτερης φάσης του αριστερού κλάδου. Είναι προφανές οτι δεν πρέπει να παρατηρηθεί μεταβολή της κλίσης της καμπύλης με την έναρξη των εργασιών της πρώτης φάσης εκσκαφής του δεξιού κλάδου, γιατί κάτι τέτοιο θα μαρτυρούσε αστοχία. Σαφώς και θα υπάρχουν διαφορές στις μετρήσεις που θα λαμβάνονται, για αυτό παρατηρούμε κλίση στις καμπύλες, αλλά αυτές οι διαφορές πρέπει να κυμαίνονται μέσα στα όρια που δίνει το όργανο μέτρησης. Για το λόγο αυτό, για την ερμηνεία των διαγραμμάτων, θα πρέπει να συνοδεύεται και το αντίστοιχο φύλλο καταγραφής των μετρήσεων, όπως παρατηρείται στον πίνακα (6.3). Από το χρονικό διάστημα 3/6/2002, οι ρυθμοί των καμπύλων τείνουν να μηδενιστούν όπως φαίνεται και από τις μορφές των καμπύλων.

Από την εξέταση των καμπυλών προκύπτει ότι ούτε η έναρξη των εργασιών της δεύτερης φάσης του αριστερού κλάδου αλλά ούτε και των εργασιών του δεξιού κλάδου δεν προκάλεσαν σημαντικές παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα. Η μικρή εκτόνωση του σκυροδέματος και η αλλαγή της φοράς κλίσης των καμπυλών μετά την έναρξη των εργασιών της δεύτερης φάσης του αριστερού κλάδου είναι αναμενόμενη και δεν συνεπάγετε την αστοχία της επένδυσης.

Στον επόμενο πίνακα (6.3) παρουσιάζονται τα δεδομένα καταγραφής, από παραμορφωσίμετρο στο εκτοξευμένο σκυρόδεμα αριστερά του άξονα, όπως μεταβάλλονται με το χρόνο.



Σχήμα 6.32. Χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο σε εκτοξευμένο σκυρόδεμα στον αριστερό κλάδο της εξόδου της σήραγγας. (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ)

ΕΡΓΟ : ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ ΤΜΗΜΑ 2.4 ΣΗΡΑΓΓΑ ΔΡΙΣΚΟΥ
ΚΥΡΙΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ : ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε.
ΑΝΑΔΟΧΟΣ : Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ

ΔΙΑΤΟΜΗ ΟΡΓΑΝΩΝ S19 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΙΜΕΤΡΑ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΡ: S19/GSG-1/a , S19/GSG-1/b , S19/GSG-2/a , S19/GSG-2/b , S19/GSG-3/a , S19/GSG-3/b

ΘΕΣΗ:Έξοδος Σήραγγας, Αριστερός Κλάδος (Α΄ Φάση εκσκαφής) | ΗΜ/ΝΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ : 25/10/01 | Χ.Θ: 8+782

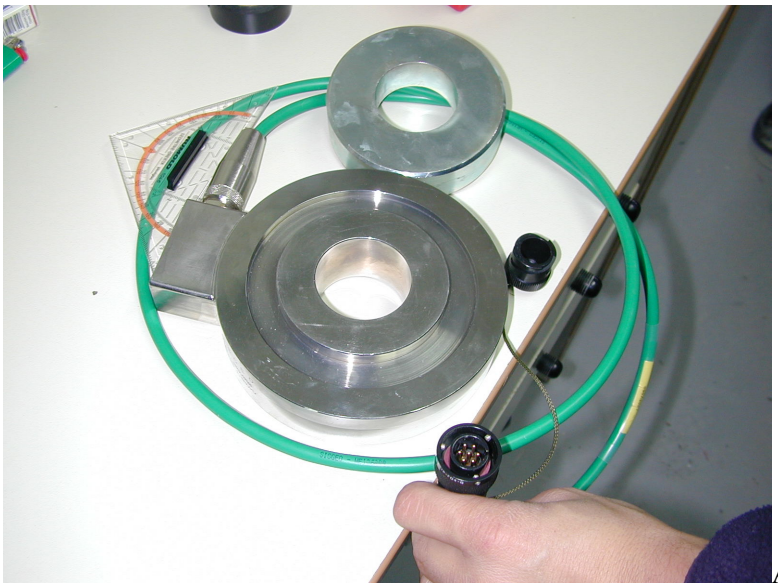
Ημ/νία	Απόσταση Μετώπου Αριστερού Κλάδου (m)		Απόσταση Μετώπου Δέξιου Κλάδου (m)		Αριστερά του Άξονα						Στον Άξονα						Δεξιά του Άξονα					
					GSG-1/a(εξωρράχιο)			GSG-1/b(εσωρράχιο)			GSG-2/a(εξωρράχιο)			GSG-2/b(εσωρράχιο)			GSG-3/a(εξωρράχιο)			GSG-3/b(εσωρράχιο)		
	Top Heading	Bench	Top Heading	Bench	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)	Μέτρηση (με)	Διαφορά Μετρήσεων (με)	Τάση (MPa)
29/10/2001	8,0	-1914,7	-299,0	-1848,6	2356,00	0,00	0,00	2074,00	0,00	0,00	2426,99	0,00	0,00	2231,91	0,00	0,00	2845,26	0,00	0,00	3139,15	0,00	0,00
31/10/2001	17,0	-1914,7	-292,0	-1848,6	2269,25	-86,75	-17,96	1897,18	-176,82	-36,60	2342,93	-84,06	-17,40	2094,86	-137,05	-28,37	2837,87	-7,39	-1,53	2973,19	-165,96	-34,35
2/11/2001	23,8	-1914,7	-284,9	-1848,6	2220,67	-135,33	-28,01	1824,45	-249,55	-51,66	2314,48	-112,51	-23,29	2051,37	-180,54	-37,37	2829,59	-15,67	-3,24	2873,09	-266,06	-55,07
4/11/2001	30,5	-1914,7	-276,5	-1848,6	2188,56	-167,44	-34,66	1796,51	-277,49	-57,44	2286,56	-140,43	-29,07	1992,35	-239,56	-49,59	2807,41	-37,85	-7,83	2814,52	-324,63	-67,20
6/11/2001	40,6	-1914,7	-266,0	-1848,6	2154,63	-201,37	-41,68	1763,21	-310,79	-64,33	2268,45	-158,54	-32,82	1962,53	-269,38	-55,76	2792,58	-52,68	-10,90	2777,25	-361,90	-74,91
8/11/2001	48,5	-1908,3	-256,8	-1848,6	2141,23	-214,77	-44,46	1731,32	-342,68	-70,93	2251,43	-175,56	-36,34	1933,25	-298,66	-61,82	2781,42	-63,84	-13,21	2742,15	-397,00	-82,18
12/11/2001	55,8	-1894,0	-245,0	-1848,6	2135,64	-220,36	-45,61	1718,45	-355,55	-73,60	2243,65	-183,34	-37,95	1900,56	-331,35	-68,59	2779,68	-65,58	-13,58	2721,53	-417,62	-86,45
15/11/2001	67,9	-1847,8	-233,2	-1848,6	2128,26	-227,74	-47,14	1703,33	-370,67	-76,73	2232,74	-194,25	-40,21	1885,59	-346,32	-71,69	2777,60	-67,66	-14,01	2710,53	-428,62	-88,72
23/11/2001	78,1	-1758,4	-210,7	-1848,6	2166,04	-189,96	-39,32	1685,49	-388,51	-80,42	2215,75	-211,24	-43,73	1855,42	-376,49	-77,93	2777,59	-67,67	-14,01	2691,92	-447,23	-92,58
22/1/2002	195,4	-962,8	-44,7	-1848,6	1944,66	-411,34	-85,15	1524,58	-549,42	-113,73	2101,35	-325,64	-67,41	1669,48	-562,43	-116,42	2674,15	-171,11	-35,42	2284,53	-854,62	-176,91
20/3/2002	323,5	-479,5	78,5	-1848,6	1785,62	-570,38	-118,07	1312,56	-761,44	-157,62	1978,45	-448,54	-92,85	1551,15	-680,76	-140,92	2600,12	-245,14	-50,74	1986,52	-1152,63	-238,59
31/3/2002	322,5	-375,9	95,4	-1848,6	1871,62	-484,38	-100,27	1208,47	-865,53	-179,16	1968,57	-458,42	-94,89	1533,63	-698,28	-144,54	2604,51	-240,75	-49,84	1921,85	-1217,30	-251,98
7/4/2002	338,3	-333,8	108,7	-1848,6	1917,24	-438,76	-90,82	1218,44	-855,56	-177,10	1958,22	-468,77	-97,04	1520,32	-711,59	-147,30	2586,57	-258,69	-53,55	1877,47	-1261,68	-261,17
23/4/2002		-283,7	143,3	-1831,1	1860,23	-495,77	-102,62	1190,75	-883,25	-182,83	1959,68	-467,31	-96,73	1514,12	-717,79	-148,58	2575,24	-270,02	-55,89	1821,45	-1317,70	-272,76
10/5/2002		-206,9	168,9	-1671,5	1831,24	-524,76	-108,63	1178,59	-895,41	-185,35	1952,46	-474,53	-98,23	1509,68	-722,23	-149,50	2568,97	-276,29	-57,19	1813,27	-1325,88	-274,46
5/6/2002		-13,3	224,3	-1604,0	1830,21	-525,79	-108,84	1069,67	-1004,33	-207,90	1931,42	-495,57	-102,58	1481,57	-750,34	-155,32	2557,45	-287,81	-59,58	1811,29	-1327,86	-274,87
18/6/2002		-13,0	246,1	-1346,5				1060,97	-1013,03	-209,70	1921,64	-505,35	-104,61	1469,56	-762,35	-157,81	2555,84	-289,42	-59,91	1807,64	-1331,51	-275,62
8/9/2002		-13,0	323,5	-666,0	1969,50	-386,50	-80,01	1088,03	-985,97	-204,10	2070,04	-356,95	-73,89	1531,24	-700,67	-145,04	2790,55	-54,71	-11,32	1792,86	-1346,29	-278,68
		8782,0	8779,0	8779,0																		
		8782,0	8779,0	8779,0																		
		8782,0	8779,0	8779,0																		

Πίνακας 6.3. Χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις με παραμορφωσίμετρο σε εκτοξευμένο σκυρόδεμα αριστερά, στον άξονα και δεξιά του άξονα στον αριστερό κλάδο της εξόδου της σήραγγας (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ).

6.6.3.3 Κυψέλες μέτρησης φορτίου αγκυρίων

Οι μονάδες μέτρησης φορτίου (load cells) χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και την καταγραφή του επιβαλλόμενου φορτίου σε αγκύρια βράχου ή σε αγκύρια εδάφους για να εξασφαλίσει τον έλεγχο του φορτίου σε συγκεκριμένο αριθμό αγκυρίων ή ακόμα και για έγκαιρη προειδοποίηση υπερφόρτισης για αποφυγή αστοχιών.

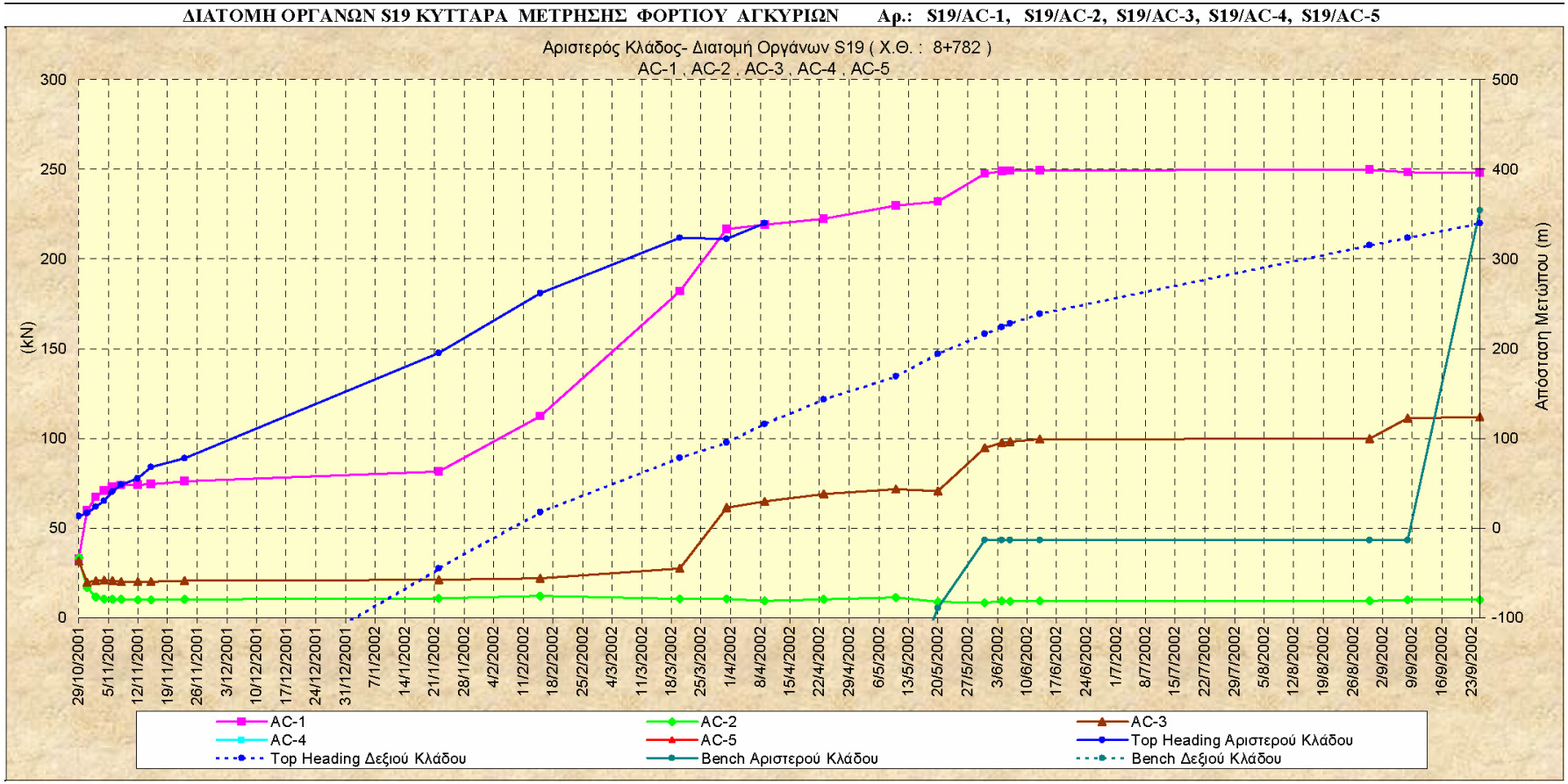
Η τοποθέτηση της κυψέλης μέτρησης φορτίου αγκυρίων τοποθετήθηκε ταυτόχρονα με το μηκυνσιόμετρο, δηλαδή στις 29/10/01, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα (6.32), για την αποφυγή τυχόν προβλημάτων εγκατάστασης των οργάνων και κατά συνέπεια επίδραση στις μετρήσεις αυτών.


A

B

Σχήμα 6.32. Κυψέλη μέτρησης φορτίου αγκυρίων και επίδειξη λήψης μέτρησης, δίπλα σε ένα μηκυνσιόμετρο τριών σημείων (προσωπικό αρχείο).

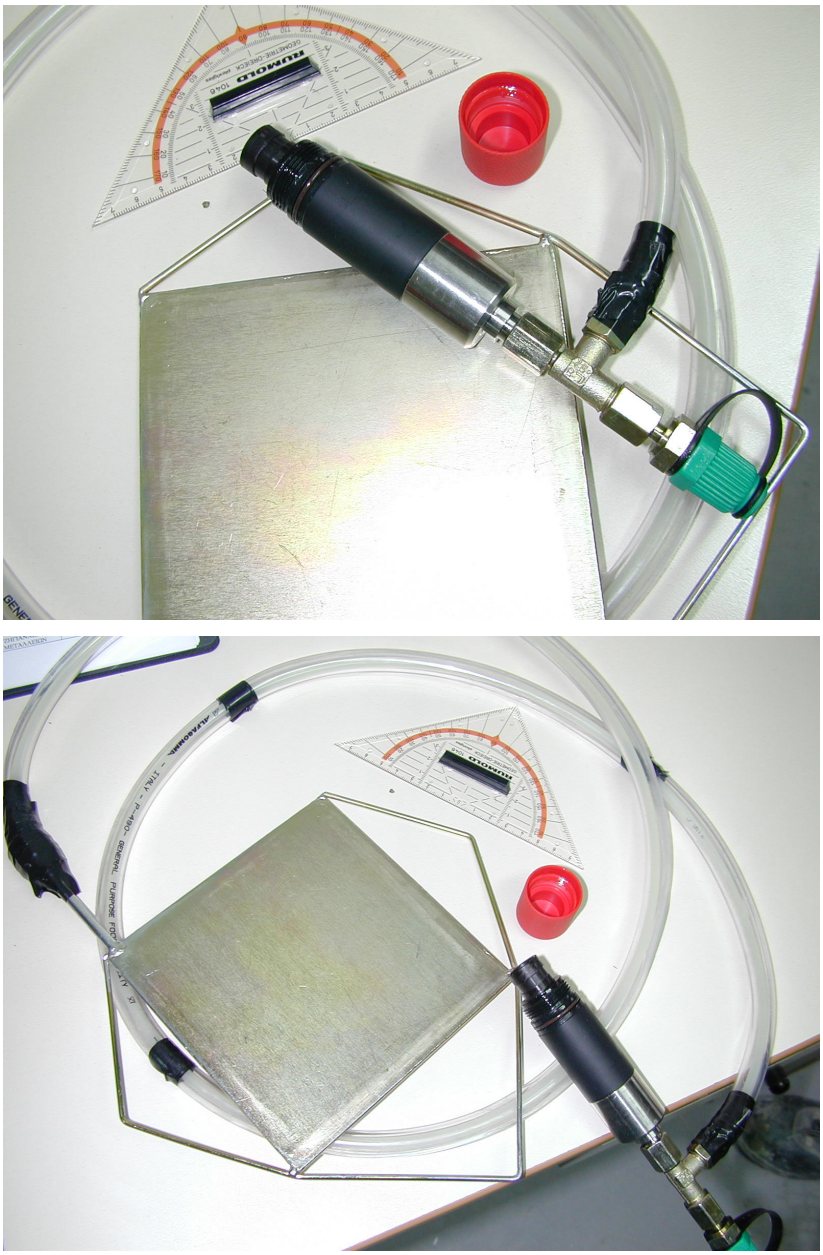
Στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται η χρονική μεταβολή των φορτίων των αγκυρίων στον αριστερό κλάδο. Η αρίθμηση των αγκυρίων ξεκινάει από τα αριστερά AC-1, AC-2, επάνω στον άξονα του κλάδου AC-3 και καταλήγει στα δεξιά AC-4 και AC-5. Η μπλέ καμπύλη και η μπλε στικτή καμπύλη αφορούν την προχώρηση του μετώπου του αριστερού και του δεξιού κλάδου, αντίστοιχα και η λαδί γραμμή τη δεύτερη φάση του αριστερού κλάδου. Επιπλέον, οι καμπύλες αυτές επισημαίνουν την σταδιακή αύξηση των εφελκυστηκών φορτίων που παραλαμβάνουν τα αγκύρια. Η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη και ταυτίζεται απόλυτα με την αύξηση των θλιπτικών φορτίων που παραλαμβάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα μεταλλικά πλαίσια.



Σχήμα 6.33: Χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις με κύτταρα μέτρησης φορτίου αγκυρίων στον αριστερό κλάδο της σήραγγας. (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ)

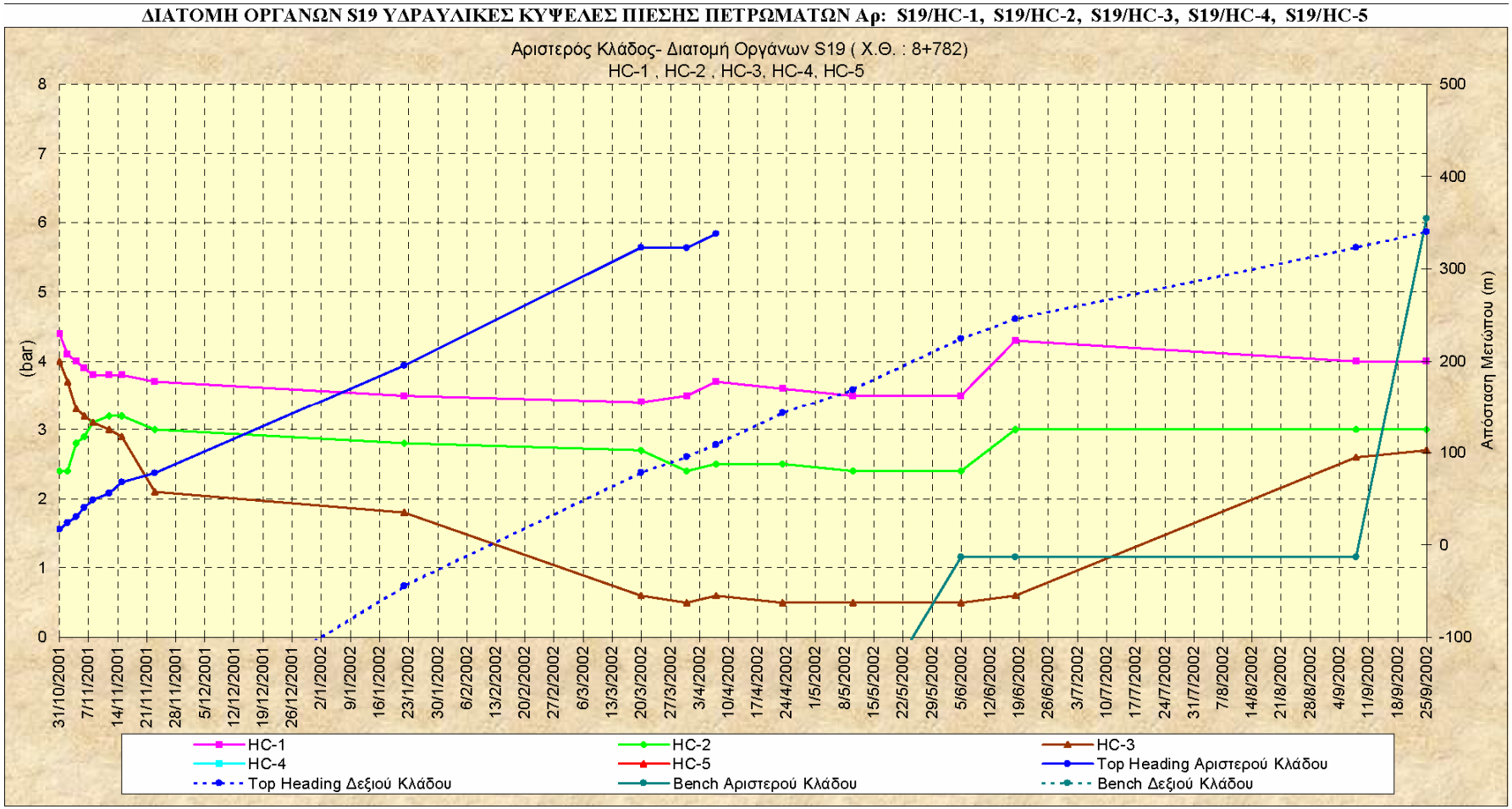
6.6.3.4. Υδραυλικές κυψέλες πίεσης πετρωμάτων

Πρόκειται για μονάδα μέτρησης πίεσης σε διεπιφάνεια εδάφους σκυροδέματος, με βασική προϋπόθεση η ενεργός επιφάνεια της μονάδας να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την μία επιφάνεια και σε απόλυτη επαφή με την άλλη πλευρά της διεπιφάνειας. Λόγω της μικρής ακαμψίας της μονάδας και της ευαισθησίας –παρουσία σχετικά μεγάλης μάζας υγρού- σε μεταβολές θερμοκρασίας, οι οποίες απαντώνται στις διεπιφάνειες, η μονάδα περιβάλλεται από μία χαλύβδινη πλάκα, πάχους 13mm, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα (6.34).



Σχήμα 6.34. Υδραυλικές κυψέλες πίεσης πετρώματος πριν την εγκατάσταση στη σήραγγα (προσωπικό αρχείο).

Η τοποθέτηση των υδραυλικών κυψέλων έγινε ανά ζεύγη, αριστερά της διατομής, HC-1 και HC-2 και δεξιά αυτής, HC-3 HC-4, περίπου 55 μοίρες με ακτίνα 5.50m του τόξου. Από τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα (6.35), διαπιστώνεται ότι με την εκσκαφή του αριστερού κλάδου παρατηρήθηκε μια αύξηση της πίεσης κατά 1 bar. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ανακατανομή του τασικού πεδίου που προκάλεσε η εκσκαφή και είναι αναμενόμενη. Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής, η πίεση άρχισε να εκτονώνεται και έτεινε να επανέλθει στις προηγούμενες τιμές.



Σχήμα 6.35: Χρονικά μεταβαλλόμενες μετρήσεις από υδραυλικές κυψέλες πίεσης πετρωμάτων στον αριστερό κλάδο της σήραγγας. (Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΑΕΤΒ & ΤΕ)

7. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι το πρόγραμμα ενοργάνωσης είναι πολύ σημαντικό και δίδεται έμφαση στην αγορά του εξοπλισμού ανάλογα με την ταξινόμηση της βραχομάζας, στην ευκολία λήψης των μετρήσεων, στο είδος της εκσκαφής, και άλλα τέτοιου είδους στοιχεία, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και να οδηγήσουν σε λάθος συμπεράσματα ή ακόμα και στην εφαρμογή επιπλέον ενεργειών για την προσωρινή, είτε για τη μόνιμη υποστήριξη της σήραγγας.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της εργασίας αυτής θα χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή του κλισιομέτρου και σε αυτά που προκύπτουν από τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των μικρομετακινήσεων σε μέτωπο σήραγγας και στη φάση της τελικής επένδυσης της σήραγγας.

Γενικά, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η τοποθέτηση των οργάνων, κυρίως στις περιπτώσεις όπου ξεπερνούν το ένα όργανο. Στις περιπτώσεις αυτές, μπορεί η τοποθέτηση του ενός να επηρεάζει τη λειτουργία των άλλων οργάνων. Θα πρέπει εξαρχής να γνωστοποιούνται τα είδη των οργάνων που πρόκειται αν χρησιμοποιηθούν, έτσι ώστε η τοποθέτηση να γίνεται ταυτόχρονα, για να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα στις μετρήσεις.

Οσον αφορά το κλισιόμετρο, είναι ένα από τα ευρέως χρησιμοποιούμενα γεωτεχνικά όργανα παρακολούθησης με κύρια εφαρμογή τον εντοπισμό των ζωνών χαλάρωσης και στη παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εφαρμόστηκε σε δύο περιπτώσεις: α) μετά από αστοχία πρανούς (Ανήλιο), για τον έλεγχο του κατασκευασμένου πρανούς και β) σε μέτωπο εισόδου σήραγγας (Δρίσκος και Ανήλιο), για προληπτικούς λόγους. Από την εφαρμογή του οργάνου προέκυψε ότι, είναι ένα εύχρηστο όργανο, μικρό, εύκολο στη μεταφορά. Επιπλέον, η αξιολόγηση των μετρήσεων μπορεί να γίνει με ακρίβεια, αρκεί να αποφευχθούν τα σφάλματα που οφείλονται στο χειριστή, στον τρόπο εγκατάστασης και ενεμάτωσης και στα συστηματικά λάθη του οργάνου. Τα συστηματικά λάθη μπορούν να εξαλειφθούν εύκολα, εάν παρατηρηθούν έγκαιρα και συνήθως οι διορθωτικές επεμβάσεις πραγματοποιούνται από το ίδιο το λογισμικό πακέτο.

Όσον αφορά τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο των μικρομετακινήσεων, δίδεται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα, τα όργανα που πρέπει να χρησιμοποιούνται πριν, μετά και κατά τη διάρκεια κατασκευής μίας σήραγγας. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο πίνακας αυτός αναφέρεται στην εγκατάσταση γεωτεχνικών οργάνων, τα αποτελέσματα των οποίων χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συμπεριφοράς τόσο της βραχομάζας, όσο και της ίδιας της κατασκευής. Πρέπει να αναφερθεί ότι δεν έχει υπεισέρθει ο παράγοντας του κόστους για την αγορά ενός οργάνου, την εγκατάσταση αυτού και τη λήψη των μετρήσεων. Ο παράγοντας κόστος, είναι πολύ σημαντικός και καθοριστικός για το εάν θα τοποθετηθεί το όργανο, για τον αριθμό των γεωτεχνικών οργάνων που πρόκειται να εγκατασταθούν, καθώς και για τη αγορά του οργάνου. Σε

κάθε περίπτωση, η επιλογή των γεωτεχνικών οργάνων που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί γίνεται με βάση την εμπειρία από προηγούμενες ανάλογες περιπτώσεις, από την εμπειρία και τη γνώση του επιβλέποντα μηχανικού και τέλος από τις υπάρχουσες συνθήκες που επικρατούν στο χώρο εκσκαφής –προβληματικές περιοχές-.

Πίνακας

Α/Α	Γεωτεχνικά όργανα	Σκοπός Μέτρησης	Συχνότητα εφαρμογής
1	Συγκλίσεις (Χωροσταθμήσεις εντός της σήραγγας-5 σημείων μέτρησης)	-Προσδιορισμός παραμόρφωσης της σήραγγας -Έλεγχος επάρκειας μέτρων αντιστήριξης	-Τακτικά σε διατομές ανά 50μ και αναλόγως των γεωλογικών σχηματισμών. -Σε δυσμενείς συνθήκες θα γίνεται πύκνωση των σταθμών (π.χ. τοποθέτηση σταθμού σε κάθε ομπρέλα προπορείας ανά 12m περίπου)
2	Επιμηκυνσιόμετρα τριών ράβδων μήκους 3,6 και 9 m. (κάθε σταθμός θα αποτελείται από 5 επιμηκυνσιόμετρα)	-Παραμόρφωση περιβάλλοντος εδάφους -Εκτίμηση πάχους ζώνης χαλάρωσης (πλαστικοποίηση)	Δύο σταθμοί και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού. Η έναρξη τοποθέτησης θα γίνει σε υπερκείμενο μεγαλύτερο από 10m.
3	Δείκτες φορτίου αγκυρίων. (κάθε σταθμός θα αποτελείται από 5 σημεία μέτρησης)	-Αποτελεσματικότητα τοποθετούμενων αγκυρίων -Έλεγχος για την υπέρβαση του φορτίου λειτουργίας.	Δύο σταθμοί με 5 σημεία μέτρησης έκαστος και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.
4	Κυψέλες φορτίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος	-Παραμορφώση προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης. -Πιέσεις βραχομάζας επί της προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης. -Αποτελεσματικότητα προσωρινής αντιστήριξης/ τελικής επένδυσης.	Δύο κυψέλες και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.
5	Δοκιμές αγκυρίων	-Προσδιορισμός οριακής δύναμης αστοχίας. -Έλεγχος της ποιότητας κατασκευής -Επαλήθευση του συντελεστή	Δειγματοληπτικά σε όλο το μήκος της σήραγγας (ανά 50m) και σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού.

		ασφαλείας για το φορτίο λειτουργίας που έχει γίνει δεκτό στη μελέτη του έργου.	
6	Μετρήσεις πίεσης πόρων στην επένδυση της σήραγγας	Μέτρηση πιέσεων πόρων πίσω από την προσωρινή και τη μόνιμη επένδυση	Τακτικά ανά 100m και σε τμήματα υδροφορίας.
7	Κλισιόμετρα	-προσδιορισμός αστοχίας (βάθος, ρυθμός και διεύθυνση μετακίνησης)	Στο μέτωπο εισόδου και εξόδου κάθε σήραγγας.
8	Πιεζόμετρα	Στοιχεία για τον υδροφόρο ορίζοντα- πίεση πόρων	Στην ευρύτερη περιοχή της σήραγγας Πίσω από το μέτωπο εκσκαφής

Γενικότερα, προτείνεται η τοποθέτηση κλισιομέτρων για την παρακολούθηση της ευστάθειας και τον εντοπισμό των ζωνών διάτμησης (βάθος, ρυθμός και διεύθυνση μετακίνησης). Παράλληλα το διάγραμμα μετατόπισης (βάθος σε συνάρτηση με τη μετατόπιση), θα πρέπει να αναχθεί στο απόλυτο υψόμετρο και να τοποθετηθούν και οι αλλαγές των γεωλογικών σχηματισμών, για να μπορεί να γίνει ο συσχετισμός των αποτελεσμάτων όλων των κλισιομετρικών οργάνων. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται το εύρος της μετατόπισης, δηλαδή εάν πρόκειται για μεμονομένο γεγονός ή για μετατόπιση σε μεγάλη έκταση. Ταυτόχρονα με τα αποτελέσματα από τα κλισιομετρικά όργανα, θεωρείται απαραίτητη και η επί τόπου έρευνα από τον εκάστοτε μηχανικό για οπτικές παρατηρήσεις, όπως είναι οι μικρορηγματώσεις και οι αποκολλήσεις, κυρίως στο άνω και το κάτω τμήμα της περιοχής.

Οι συγκλίσεις είναι μία από τις βασικότερες μετρήσεις που πρέπει να λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια κατασκευής της σήραγγας για την επίτευξη της μέγιστης ασφάλειας της κατασκευής και όχι μόνον. Με βάση τις μετρήσεις αυτές και σε συνδυασμό με τους δείκτες μέτρησης φορτίων αγκυρίων και τις κυψέλες φορτίου εκτοξευόμενου σκυροδέματος αποφασίζεται ο τρόπος υποστήριξης των φάσεων εκσκαφής.

Τέλος τα επιμηκυνσιόμετρα τριών ράβδων παρέχουν πληροφορίες για τις μετέπειτα συνθήκες εκσκαφής και προτείνεται να τοποθετούνται σε κάθε αλλαγή γεωλογικού σχηματισμού για να εκτιμηθεί ο βαθμός παραμόρφωσης του περιβάλλοντα χώρου. Το όργανο αυτό θα πρέπει να συνυπάρξει με τους μετρητές πίεσης πόρων, γιατί αυτοί με τη σειρά τους δίνουν πληροφορίες για τις αυξομειώσεις της πίεσης νερού στους πόρους των σχηματισμών. Ο παράγοντας πίεσης νερού στους πόρους των σχηματισμών είναι καθοριστικός για τη συμπεριφορά αυτού κατά τη διάρκεια της κατασκευής και η γνώση αυτή μπορεί να αποτρέψει αστοχίες.

Ανακεφαλαιώνοντας, πριν γίνει η μελέτη για την κατασκευή μιας σήραγγας, η μεθοδολογία για την ενοργάνωση της σήραγγας, η οποία αναφέρεται σε αυτήν τη μεταπτυχιακή εργασία, αποδείχθηκε αποτελεσματική, αφού εκμηδενίζει:

- Τις πιθανές αστοχίες που μπορεί να φέρουν οι εργασίες κατασκευής μιας σήραγγας
- Το κόστος κατασκευής- δεν λαμβάνονται επιπλέον μέτρα υποστήριξης
- Το χρόνο κατασκευής, αφού δεν εμφανίζονται αστοχίες στο έργο και
- Την απώλεια ανθρώπινου δυναμικού και των μηχανημάτων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διαγραμμάτων από τις μετρήσεις των γεωτεχνικών οργάνων που προκύπτουν, δεν αποτελούν από μόνα τους μία πηγή αξιολόγησης για την ευστάθεια ή όχι του πρανούς ή του μετώπου εκσκαφής, αλλά ένα σημαντικό κομμάτι της γεωτεχνικής έρευνας, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη δημιουργία της σήραγγας, με σκοπό την πρόωρη αντιμετώπιση περαιτέρω προβλημάτων αστοχίας, ή ακόμα και την εξέλιξη κάποιων αστοχιών σε τεχνικά έργα.

Βιβλιογραφία

Alberro, J. and Borbon, J.Z., 1985, Testing of earth pressure cells, Behavior of Dams built in Mexico (1974-1984), Vol. 11, Commission Federal de Electricidad, Contrib. to 15th ICOLD, Lausanne, pp. 2.1-2.15.

Anastasiadis A., Klimis N., Makra K. and Margaris B., 2004, On seismic behaviour of a 130m high rockfill dam: an integrated approach, presented at the 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, paper no. 2933.

Barton, N.R., Lien, R. and Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech. 6(4), pp. 189-239.

Brown E.T., 1981, Rock characterisation. testing & monitoring – ISRM Suggested Methods.

Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses. Transactions South Africa Inst. Of Covil Engin., Vol.15, No 12, pp.335-344.

Bieniawski Z.T., 1976, Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (Edited by Bieniawski Z.T.) 1, 97-106. Cape Town, Balkema.

Bieniawski, Z.T., 1979, Engineering Rock Mass Classification. Wiley-Interscience Pub1ication. New York, New York: John Wiley & Sons. TIC 226350

Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classification, New York, Wiley.

Carranza- Torres, C. and Fairhurst, C., 1999, General formulation of the elasto-plastic response of openings in rock using the Hoek-Brown failure criterion. Submitted for publication in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.

Γεωργιαννού, Β. Ν., 2000, Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων – Οργανομετρήσεις, Επιστ. Εκδόσεις Γρ. Παρισιανός, Αθήνα, ISBN 960-340-170-6.

Deere, D. U., Peck, R. B., Parker, H. W., Monsees, J. E., and Schmidt, B. 1970. "Design of Tunnel Support Systems: Highway Res. Rec. No. 339:26-33.

Despairies A. (1978). Etude sedimentologique de formations a caracteres Flysch et Molasse, Macedoine, Epire, (Grece). Mem. Soc. Geol. France, 136, 339-354.

Δημόπουλος Γ., 1986, Τεχνική Γεωλογία, Εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη, σελ. 342.

Dunicliff, J., 1993, Geotechnical instrumentation for monitoring field performance, J. Wiley and Sons, Inc., USA, ISBN 0-471-00546-0, 577pp.

Εγνατία Οδός, 1999, Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού, Επιστημονική Διημερίδα, 15 και 16 Οκτωβρίου 1999, Ιωάννινα.

Ε.Ο.Α.Ε., 2000, Τεχνική εκθεση παρακολούθησης γεωτεχνικών οργάνων έτους 2000, Ομάδα Παρακολούθησης Γεωτεχνικών Οργάνων.

Εγνατία Οδός, 2001, Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού, Επιστημονική Διημερίδα, 7 και 8 Δεκεμβρίου 2001, Ιωάννινα.

Εγνατία Οδός, 2003, Γεωλογικά, Γεωτεχικά θέματα – Σημασία και πρόοδος της Εγνατίας Οδού, Επιστημονικό συνέδριο, 13-15 Νοεμβρίου 2003, Ιωάννινα.

Ε.Ο.Α.Ε., 2004, Τεχνική εκθεση παρακολούθησης γεωτεχνικών οργάνων έτους 2004, Ομάδα Παρακολούθησης Γεωτεχνικών Οργάνων.

Feder, G., Arwanitakis, M., 1986, Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche tiefliegender Hohlraumbauten, Berg-und Huttennmannische Monatshefte, 121, Vol. 4.

Feder, G., 1978, Versuchsergebnisse und analytische Ansatze zum Scherbruchmechanismus im Bereich tiefliegender Tunnel, Rock Mechanics, Suppl. 6, pp 71-102.

Franklin, J.A., Broch, E. and Walton, G., 1971, Logging the mechanical character of rock, Trans IMM, Sect. A., V. 80, Bulletin 77a, pp. A1-A9.

Hoek E., 1994 Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal,* **2**(2), 4-16.

Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. 1995, Support of Underground Excavations in Hard Rock, Balkema Publishers.

Hoek, E., 1998, Reliability of Hoek- Brown estimates of rock mass propertiew and their impact on design, Int. J. Rock Mech, Min. Sci 35(1), 63-68.

Hoek, E. and Marinos, P., 2000, Seventh Technical report by Panel of experts (geotechnical/tunneling) on Egnatia Odos Highway project, Sections 1.1.4, 1.1.6, 2.3, 3.2 and 11.23, Egnatia Odos S.A.

Hoek, E. and Marinos, P., 2001, Twelveth technical report by Panel of experts (geotechnical/tunneling) on Egnatia Odos Highway project, Sections 1.1.6, 2.3, 2.4, 3.2 and 5.2, Egnatia Odos S.A.

Hoek, E. and Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rockmass strength, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstracts, Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.

Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M., 1998, Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak ad sheared rock masses. The case of Athens schist formation, Bull. Eng. Geol. Env., Vol. 57, pp. 151-160.

Hudson J.A., 1989, Rock Mechanics Principles in Engineering Practice,. CIRIA/ Butterworths, London, 72pp.

ISRM 1987, Suggested methods for the determination of the shore hardness of rock. Committee on laboratory testing. Third Draft—April 1987.

Jagger, F.E. and Enever, J.R., 1978, An evaluation of different stress measuring techniques conducted in the southern development headings at Pelton Colliery, Proj. Report 78-6, Joint Report by Australian Coal Industry Research Laboratory Ltd and CSIRO Division of Applied Geomechanics, Australia.

Καβαδάς, Μ, 2005, Σημειώσεις σχεδιασμού υπογείων έργων, εκδόσεις Ε.Μ.Π., http://www.civil.ntua.gr/~kavvadas/

Καβουνίδης Σ., Ντουνιάς Γ., Μπαρδάνης Μ., 2003, "Αντιμετωπίζοντας τα ασταθή εδάφη του Τμήματος 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι – Ανθοχώρι)", Πρακτικά Επιστημονικής Διημερίδας 13-14-15 Νοεμβρίου 2003, Ιωάννινα, σελ. 93 – 103.

Kirschke, D., Kovàri, K. and Prommersberger, G., 1991a, Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart: der Freudensteintunnel, No. 7, pp. 40-57.

Kirschke, D., Kuhnhenn, K. and Prommersberger, G., 1991b, Der Freudensteintunnel: Eine Herausforderung für den planenden Ingenieur. Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart: der Freudensteintunnel, No. 7, pp. 5-39.

Kohlbeck, F. and Scheidegger A.E., 1986, Low cost monitoring of strain changes, in Proc.of the International Symp. of Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, K. Kovari (eds), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 775-788.

Κ/Ξ ΑΚΤΩΡ ΑΤΕ- ΘΕΜΕΛΙΟΔΟΜΗ ΑΕ- ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ- ΕΥΚΛΕΙΔΗΣ, 2003 Μελέτη Κατασκευής Οδικής Σήραγγας Δρίσκου, ΕΟΑΕ.

Κ/Ξ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΕ - ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ ΑΕ - ΤΕΡΝΑ ΑΕ - ΑΘΗΝΑ ΕΤΒ & ΤΕ, Μελέτη Κατασκευής Οδικής Σήραγγας Δρίσκου.

Lauffer, H. 1958. "Gebirgsklassifizierung fur den Stollenbau, " Geologie and Bauwesen, Vol. 24, No. 1, pp. 46-51.

Marchetti, S., 1980, In situ tests by flat dilatometer, J. Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 106, No. GT3, Mar., pp. 299-321.

Μαρίνος, 1979 Μαρίνος Π., Γεωτεχνική ταξινόμηση βραχομάζας και υποστήριξη σηράγγων – μία επισκόπηση και μία προσπάθεια ελέγχου και κριτικής στις ασβεστολιθικές μάζες του Παρνασού – Γκιώνας, Ορυκτός Πλούτος 3/1979, 13-40

Mikkelsen, P. E., 2003, Advances in Inclinometer Data Analysis, paper presented at Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway, September.

Μουρτζάς Ν. και Σωτηρόπουλος Η., 1999, Σήραγγα Ανηλίου – Γεωλογική Δομή, Σχεδιασμός και Ανάλυση, Διημερίδα οι Σήραγγες της Εγνατίας Οδού, Ιωάννινα 1999.

Muir A and Wood, A. M. 1975, The Circular Tunnel in Elastic Ground, *Geotechnique 25*, No. 1,

Ομάδα παρακολούθησης Εγνατίας Οδού, 2001-2003, Τεχνικές εκθέσεις παρουσίασης μετρήσεων των κλισιομετρικών οργάνων.

ΟΜΕΤΕ – Εδαφοστατική Ε.Π.Ε., 2003, Εναλλακτική μελέτη υπόγειας εκσκαφής, προσωρινής υποστήριξης και αντίστοιχης τελικής επένδυσης τμήματος της σήραγγας Ανθοχωρίου, Τεχνική έκθεση, Εγνατία Οδός Α.Ε.

ΟΜΕΤΕ και συνεργάτες (2003) Σήραγγα Τ6 στο τμήμα Αραχθος - Περιστέρι της Εγνατίας Οδού και Σήραγγα Ανθοχωρίου στην Εγνατία Οδό.

Schubert W. 1996. Dealing with squeezing conditions in alpine tunnels ; Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 29, No.3, pp 145-153.

SISGEO Corporation, http://www.sisgeo.com/

Soil Instruments Ltd, http://www.soil.co.uk/

Σοφιανός Α.Ι., 2002, Υποστήριξη σηράγγων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ηλώσεις, επιμορφωτικό σεμινάριο : Θέματα σχεδιασμού αο κατασκευής υπόγειων έργων, Ιωάννινα, 19/06/2002.

Στάρα-Γκαζέτα και Παρηγόρης, 1999, Σήραγγα Δρίσκου – Σχεδιασμός μέτρων προσωρινής υποστήριξης, Ε.Ο.Α.Ε. και Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., Διημερίδα : Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού, 15-16 Οκτωβρίου 1999.

Σωτηρόπουλος, Η. και Μουρτζάς, Ν. (2001), Σήραγγα Ανηλίου- Αστοχία Πρανούς Ανατολικού μετώπου, Ε.Ο.Α.Ε. και Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., Διημερίδα : Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού, 7-8 Δεκεμβρίου 2001.

Terzaghi, K., 1946, *Rock defects and loads on tunnel supports, Rock tunneling with steel supports,* Proctor, R.V., White, T.L., and Terzaghi, K., editors, Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, Ohio.

Τριανταφυλλίδης Μανόλης, 1976, Νεοελληνική γραμματική, εκδ. Οργανισμός Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων

Τσουτρέλης Χ. (1985). «Στοιχεία Μηχανικής των Πετρωμάτων, Μέρος 1, Βασικά θεωρητικά στοιχεία και πειραματικές μέθοδοι», ΕΜΠ.

Uff J. F., 1970, In-situ measurements of earth pressure for a quay wall at Seaforth, Liverpool, Proceedings of the Conference on In Situ Investigations in Soil & Rock, British Geotechnical Society, London, pp. 229-239.

Wroth, C.P. and Hughes, J.M.O., 1973, An instrument for the in situ measurement of the properties of soft clays, in Procedings of the 8th International Conf. on SM & FE, Moscow, Vol. 1,2, pp. 487-494.

Ζούρος Ν., Μουντράκης Δ. (1990). Η επώθηση της ζώνης της Πίνδου και η σχέση μεταξύ των εξωτερικών γεωτεκτονικών ζωνών στην περιοχή Μετσόβου – Ανατολικού Ζαγορίου (Βορειοδυτική Ελλάδα), Δελτ. Ελλην. Γεωλ. Εταιρίας, Τομ. XXV/1, 245-262.

Παράρτημα Α – Ταξινόμηση της μάζας του πετρώματος

Η ανάγκη ύπαρξης κάποιας ταξινόμησης των πετρωμάτων, η οποία, βασιζόμενη σε γενικά τεχνικά κριτήρια ή σε παραμέτρους του πετρώματος, να μπορεί να παρέχει κάποιες πληροφορίες για την συμπεριφορά του πετρώματος όταν μεταβληθεί η φυσική εντατική κατάστασή του, έχει από καιρό αναγνωριστεί. Έτσι μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει ασχοληθεί με το θέμα αυτό προτείνοντας αντίστοιχες ταξινομήσεις για γενική ή ειδική χρήση (Τσουτρέλης, 1985, Μαρίνος, 1979).

Α1. Περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας

Η βραχομάζα σπανίως είναι συνεχής, ομογενής και ισότροπη. Συνήθως είναι μεταβλητό (από θέση σε θέση) βαθμό αποσάθρωσης και εξαλλοίωσης και έχει ανισότροπη συμπεριφορά. Συνεπώς, η εκτίμηση αντιπροσωπευτικών τιμών των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας δεν γίνεται με άμεσο τρόπο (π.χ. με εργαστηριακές ή επιτόπου δοκιμές) αλλά έμμεσα, δηλαδή μέσω της περιγραφής και ταξινόμησης της βραχομάζας σε κατηγορίες και στη συνέχεια γίνεται εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων κάθε κατηγορίας με εμπειρικές σχέσεις. Για την περιγραφή και ταξινόμηση της βραχομάζας συνήθως χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

- Η μηχανική αντοχή του πετρώματος που δομεί τη βραχομάζα
- Ο δείκτης κερματισμού της βραχομάζας (RQD)
- Οι ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους
- Η παρουσία υπόγειου νερού

Α1.1 Μηχανική αντοχή του πετρώματος

Η μηχανική αντοχή του πετρώματος από το οποίο δομείται η βραχομάζα εκφράζεται μέσω της αντοχής (σci) που προκύπτει κατά τη δομική μοναξονικής θλίψης (uniaxial compression strength) σε κυλινδρικά δοκίμια του ‘’συμπαγούς’’ πετρώματος. Συχνά, τα αποτελέσματα των δοκιμών επηρεάζονται από την παρουσία εντός των δοκιμίων επιφανειών μικρής αντοχής σε δυσμενή διεύθυνση, όπως επιφανειών στρώσης, διακλάσεων ή άλλων ασυνεχειών, με συνέπεια οι μετρούμενες τιμές της αντοχής να μην είναι αντιπροσωπευτικές της αντοχής του ‘’συμπαγούς’’ πετρώματος.

Με βάση την αντοχή (σci), τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας Α1. Κατηγορίες των πετρωμάτων με βάση την αντοχή (κατά ISRM, 1987)

Αντοχή σci (MPa)	Κατηγορία πετρώματος	Περιγραφή

>250	Εξαιρετικά ισχυρό	Δεν θραύεται με γεωλογικό σφυρί
100-250	Πολύ ισχυρό	Θραύεται μετά από αρκετούς κτύπους με γεωλογικό σφυρί
50-100	Ισχυρό	Θραύεται με περισσότερους από ένα κτύπους με γεωλογικό σφυρί
25-50	Μετρίως ισχυρό	Δε χαράσσεται με μαχαίρι
5-25	Ασθενές	Δύσκολα χαράσσεται με μαχαίρι
1-5	Πολύ ασθενές	Χαράσσεται εύκολα με μαχαίρι. Δεν χαράσσεται με νύχι
0.25-1	Εξαιρετικά ασθενές	Χαράσσεται με νύχι

Η μηχανική αντοχή του ‘’συμπαγούς’’ πετρώματος εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και το βάθος αποσάθρωσης. Με βάση το βαθμό αποσάθρωσης, τα πετρώματα μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας Α2. Κατηγορίες των πετρωμάτων με βάση το βαθμό αποσάρθρωσης.

Κατηγορία πετρώματος	**Περιγραφή**
Υγιές (F)	Χωρίς ίχνη αποσάθρωσης
Ελάχιστα αποσαθρωμένο (F.W)	Η αποσάθρωση περιορίζεται στις επιφάνειες των ασυνεχειών
Ολίγον αποσαθρωμένο (S.W)	Έντονη αποσάθρωση στις επιφάνειες των ασυνεχειών και ελαφρά αποσάθρωση στη μάζα του υλικού
Μετρίως αποσαθρωμένο (M.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, χωρίς το υλικό να παρουσιάζει ευθρυπτότητα
Έντονα αποσαθρωμένο (H.W)	Εκτεταμένη αποσάθρωση στη μάζα του υλικού, με τοπική ευθρυπτότητα του υλικού
Πλήρως αποσαθρωμένο (C.W)	Πλήρης αποσάθρωση και μεγάλη ευθρυπτότητα του υλικού, με διατήρηση της υφής και της δομής
Έδαφος (R.S)	Η υφή και δομή του υλικού έχει καταστραφεί και το υλικό μπορεί να χαρακτηρισθεί ως έδαφος (υπολειμματικός σχηματισμός)

Α1.2 Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

Ο δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (Rock Quality Designation- RQD) αποτελεί ποσοτική εκτίμηση του κερματισμού της βραχόμαζας με βάση τους πυρήνες γεωτρήσεων. Ο δείκτης RQD ορίζεται ως το ποσοστό (επί τοις εκατό) των τεμαχίων μήκους άνω των 100mm σε κάποιο μήκος της γεώτρησης, δηλαδή:

$$RQD = \frac{\sum(\mu\acute{\eta}\kappa o\varsigma\ \ \tau\varepsilon\mu\alpha\chi\acute{\iota}\omega\nu\ \ \mu\acute{\eta}\kappa o\upsilon\varsigma > 10cm)}{\text{Ο}\lambda\iota\kappa\acute{o}\ \ \mu\acute{\eta}\kappa o\varsigma\ \ \tau o\upsilon\ \ \pi\upsilon\rho\acute{\eta}\nu\alpha} \times 100\%$$

Ο δείκτης RQD αποτελεί έναν από τους συνηθέστερα χρησιμοποιούμενους δείκτες περιγραφής της βραχομάζας αν και παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα:

- Είναι πολύ ευαίσθητος σε μικρές μεταβολές του μήκους των πυρήνων. Για παράδειγμα ένας πυρήνας μήκους 101mm αυξάνει τον δείκτη RQD κατά 10% ενώ ένας πυρήνας μήκους 99mm δεν προκαλεί καμία αύξηση του δείκτη RQD.
- Είναι πολύ ευαίσθητος στον τρόπο της δειγματοληψίας (είδος και διάμετρος του δειγματολήπτη) αλλά και σε ‘’λεπτομέρειες’’ της γεώτρησης, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση στην κοπτική κεφαλή, το είδος της κοπτικής κεφαλής κλπ. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν το βαθμό της πυρηνοληψίας και μπορούν να προκαλέσουν δευτερογενή κερματισμό του επιτόπου πετρώματος.
- Εξαρτάται από το σχετικό προσανατολισμό της γεώτρησης ως προς τις ασυνέχειες της βραχομάζας. Για παράδειγμα, ο δείκτης RQD μιας γεώτρησης με άξονα παράλληλο προς τις ασυνέχειες δίνει πού υψηλότερο δείκτη RQD απ’ ότι μια γεώτρηση κάθετα στις ασυνέχειες.

Α1.3 Ασυνέχειες και τα χαρακτηριστικά τους

Οι ασυνέχειες (discontinuities) της βραχομάζας μπορεί να οφείλονται σε: Ρήγματα (faults), διακλάσεις (jounts), Επιφάνειες στρώσης (bedding planes), Επιφάνειες σχιστότητας (foliation).

Ο αριθμός των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζεται από:

- Τον αριθμό των συστημάτων (οικογενειών) ασυνεχειών (number of joint sets). Κάθε σύστημα ασυνεχειών αποτελείται από παράλληλες ασυνέχειες του ιδίου τύπου. Για παράδειγμα οι επιφάνειες στρώσης αποτελούν ένα σύστημα ασυνεχειών.
- Την απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ενός συστήματος (joint spacing). Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών χαρακτηρίζεται ως εξής:

Πίνακας Α3. Χαρακτηρισμός της απόστασης των ασυνεχειών σε διαρρηγμένα πετρώματα.

Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (m)	Χαρακτηρισμός της απόστασης μεταξύ των ασυνεχειών

>2m	Μεγάλη
0.6-2m	Αρκετά μεγάλη
0.2-0.6m	Μέση
0.06-0.2m	Μικρή
<0.06m	Πολύ μικρή

Η κατάσταση των ασυνεχειών της βραχομάζας καθορίζεται από:

- Την τραχύτητα (roughness). Αναλόγως του βαθμού τραχύτητας, οι ασυνέχειες χαρακτηρίζονται ως: πού τραχείες, ελαφρώς τραχείες, πρακτικώς λείες, ολισθηρές (slickensided).
- Το βαθμό εξαλλοίωσης (alteration) των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζεται από τη σχετική ολίσθηση που απαιτείται να συμβεί κατά μήκος της ασυνέχειας ώστε να αποκατασταθεί η επαφή των εκατέρωθεν βραχωδών τεμαχών:

  (α) Μηδενική ολίσθηση (δηλαδή υφίσταται επαφή)

  (β) Ολίσθηση έως 100mm

  (γ) Ολίσθηση άνω των 100mm

  Εναλλακτικά, ο βαθμός εξαλλοίωσης χαρακτηρίζεται από το πάχος του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών (συνήθως προϊόν της εξαλλοίωσης του πετρώματος): Πάχος 0, πάχος έως 1mm, πάχος 1-5mm, πάχος άνω των 5mm.

A1.4 Επιρροή του υπόγειου νερού

Η παρουσία υπόγειου νερού επηρεάζει δυσμενώς τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, ιδίως σε βραχομάζες μικρής αντοχής με σημαντική εξαλλοίωση κατά μήκος των ασυνεχειών (προς αργιλικό υλικό) και σημαντική αποσάθρωση του πετρώματος. Στις περιπτώσεις αυτές, η παρουσία υπόγειου νερού προκαλεί διόγκωση των αργιλικών ορυκτών, υποβάθμιση της συνοχής και της δομής της βραχομάζας και μείωση της γωνίας διατμητικής αντοχής. Σε βραχομάζες χωρίς αξιόλογη αποσάθρωση και με υγιείς ασυνέχειες (χωρίς υλικό πλήρωσης), η δυσμενής επιρροή του υπόγειου νερού είναι μικρή έως αμελητέα, με εξαίρεση τις περιπτώσεις βραχομάζας με μεγάλη διαπερατότητα και μεγάλο υδραυλικό φορτίο οπότε μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα αστάθειας λόγω των μεγάλων υδατικών παροχών και των μεγάλων δυνάμεων διηθήσεως.

A2 Συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας

Η ταξινόμηση της βραχόμαζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη τόσο κατά τον σχεδιασμό όσο και κατά την επακόλουθη κατασκευή των υπογείων έργων. Τυπικά ο σχεδιασμός των υπογείων έργων μεγάλου μήκους (σήραγγες) γίνεται για περισσότερες της μιας κατηγορίες βραχομάζας (που αντιστοιχούν σε κάποιες τυπικές διατομές σχεδιασμού), με διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά.

Κατά τη φάση της κατασκευής, η ταξινόμηση της επιτόπου βραχομάζας σε κατηγορίες είναι απαραίτητη στην απόφαση περί της εφαρμοστέας τυπικής διατομής της μελέτης του έργου.

Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα ταξινόμησης της βραχόμαζας είναι:

1. Το σύστημα RMR (Bieniawski)
2. Το σύστημα Q (NGI)

Προφανώς έχει προταθεί από τον Hoek (1994) ένα νέο σύστημα κατάταξης (GSI) το οποίο είναι συμβατό με το σύστημα RMR και βελτιώνει αρκετά από τα μειονεκτήματά του. Στα επόμενα συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων RMR, GSI και Q.

A.2.1 Σύστημα RMR Bieniawski

Το σύστημα RMR (Rock Mass Rating) προτάθηκε από τον Bieniawski το 1976, έλαβε την τελική του μορφή το 1979 (Bieniawski, 1979) και παρουσιάστηκε (χωρίς ουσιαστικές τροποποιήσεις) εκ νέου το 1989 (Bieniawski, 1989). Κατά το σύστημα αυτό, η ταξινόμηση της βραχομάζας γίνεται με έξι (6) παραμέτρους εκάστη των οποίων λαμβάνεται μια τιμή. Το άθροισμα των τιμών των έξι παραμέτρων αποτελεί την τιμή του δείκτη RMR. Οι έξι παράμετροι και οι τιμές τους είναι:

Πίνακας Α4. Αντοχή του ‘’συμπαγούς’’ πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη (σci).

Αντοχή σci (MPa)	**Δείκτης R1**
>250	15
100-250	12-15
50-100	7-12
25-50	4-7
5-25	2-4
1-5	1-2
<1	0

Πίνακας Α5. Δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας (RQD)

RQD (%)	**Δείκτης R2**
>90	20
75-90	17-20
50-75	13-17
12-50	8-13
<25	3

Πίνακας Α6. Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Απόσταση (m)	Δείκτης R3
>2	20
0,6-2	15-20
0,2-0,6	10-15
0,06-0,2	8-10
<0,06	5

Πίνακας Α7. Κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών

Κατάσταση επιφανειών ασυνεχειών	Δείκτης R4
Πολύ τραχείες, χωρίς εξαλλοίωση	30
Ελαφρώς τραχείες, ελαφρά εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	25
Ελαφρώς τραχείες, πολύ εξαλλοιωμένες, υλικό πλήρωσης <1mm	20
Λείες ή γυαλιστερές (slickensided), υλικό πλήρωσης 1-5mm	10
Υλικό πλήρωσης πάχους άνω των 5mm	0

Πίνακας Α8. Παρουσία υπόγειου νερού

Παρουσία υπόγειου νερού	Δείκτης R5
Καθόλου νερό	15
Παρουσία υγρασίας	10
Υγρές επιφάνειες	7
Στάγδην	4
Με ροή	0

Πίνακας Α9. Προσανατολισμός των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου

Προσανατολισμός ασυνεχειών	Δείκτης R6
Πολύ ευμενής	0
Ευμενής	-2
Αδιάφορος	-5
Δυσμενής	-10
Πολύ δυσμενής	-12

Ο δείκτης RMR υπολογίζεται ως το άθροισμα των δεικτών R1 έως R6. Με βάση τη τιμή του δείκτη RMR, η βραχομάζα κατατάσσεται στις εξής κατηγορίες:

Πίνακας Α10. Κατάταξη βραχομάζας με βάση τη τιμή του RMR.

Κατηγορία βραχομάζας	**Τιμές του δείκτη RMR**
Πολύ καλή – I	81-100
Καλή – II	61-80
Μέτρια – III	41-60
Πτωχή – IV	21-40
Πολύ πτωχή – V	0-20

Ο δείκτης RMR αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρία από στοές ορυχείων που συνήθως η βραχομάζα είναι καλής ποιότητας (RMR>40). Για βραχόμαζας πτωχής ποιότητας (RMR<40) η μέθοδος δεν είναι πρόσφορη επειδή δεν διαθέτει επαρκές εύρος τιμών, όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας Α11. Εύρος πιθανών τιμών του δείκτη RMR για πτωχής ποιότητας βραχόμαζας

Παράμετρος	**Τιμές**	**Πιθανές τιμές του δείκτη**
Αντοχή	<5Mpa	0, 1.2
RQD	<25%	3
Απόσταση ασυνεχειών	<15cm	5,5,9
Κατάσταση ασυνεχειών	Με υλικό πλήρωσης	0, 10
Παρουσία νερού	Υγρές – Στάγδην	4, 7
Προσανατολισμός ασυνεχειών	Αδιάφορος	-5

Από τον ανωτέρω πίνακα προκύπτει ότι οι πιθανές τιμές του RMR είναι 7-26, δηλαδή 20 τιμές. Επιπλέον, στη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη RMR έχει τεράστια σημασία η κατάσταση των επιφανειών των ασυνεχειών με πιθανό εύρος τιμών 0 ή 10 εάν το πάχος του υλικού πληρώσεως είναι περισσότερα από 5mm ή λιγότερο από 5mm. Τούτο σημαίνει ότι η τιμή του RMR αλλάζει κατά 10 μονάδες (ποσοστό 50% της συνολικής τιμής) εάν το πάχος του υλικού πληρώσεως μεταβληθεί από 4.9mm σε 5.1mm. Είναι προφανές ότι η επιρροή αυτή είναι υπερβολική και μάλιστα δεδομένου ότι η εκτίμηση του πάχους του υλικού πληρώσεως των ασυνεχειών έχει σημαντική αβεβαιότητα.

Κατά τη χρήση του δείκτη RMR για την εκτίμηση των μηχανικών παραμέτρων αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχόμαζας συνιστάται ο υπολογισμός του RMR να γίνει με άθροιση μόνον των πέντε πρώτων παραμέτρων, δηλαδή χωρίς συμμετοχή της επιρροής του προσανατολισμού των ασυνεχειών σε σχέση με τη φορά διάνοιξης του έργου, δεδομένου ότι η επιρροή αυτή

λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης του έργου με διαφορετικό τρόπο.

A2.2 Σύστημα GSI

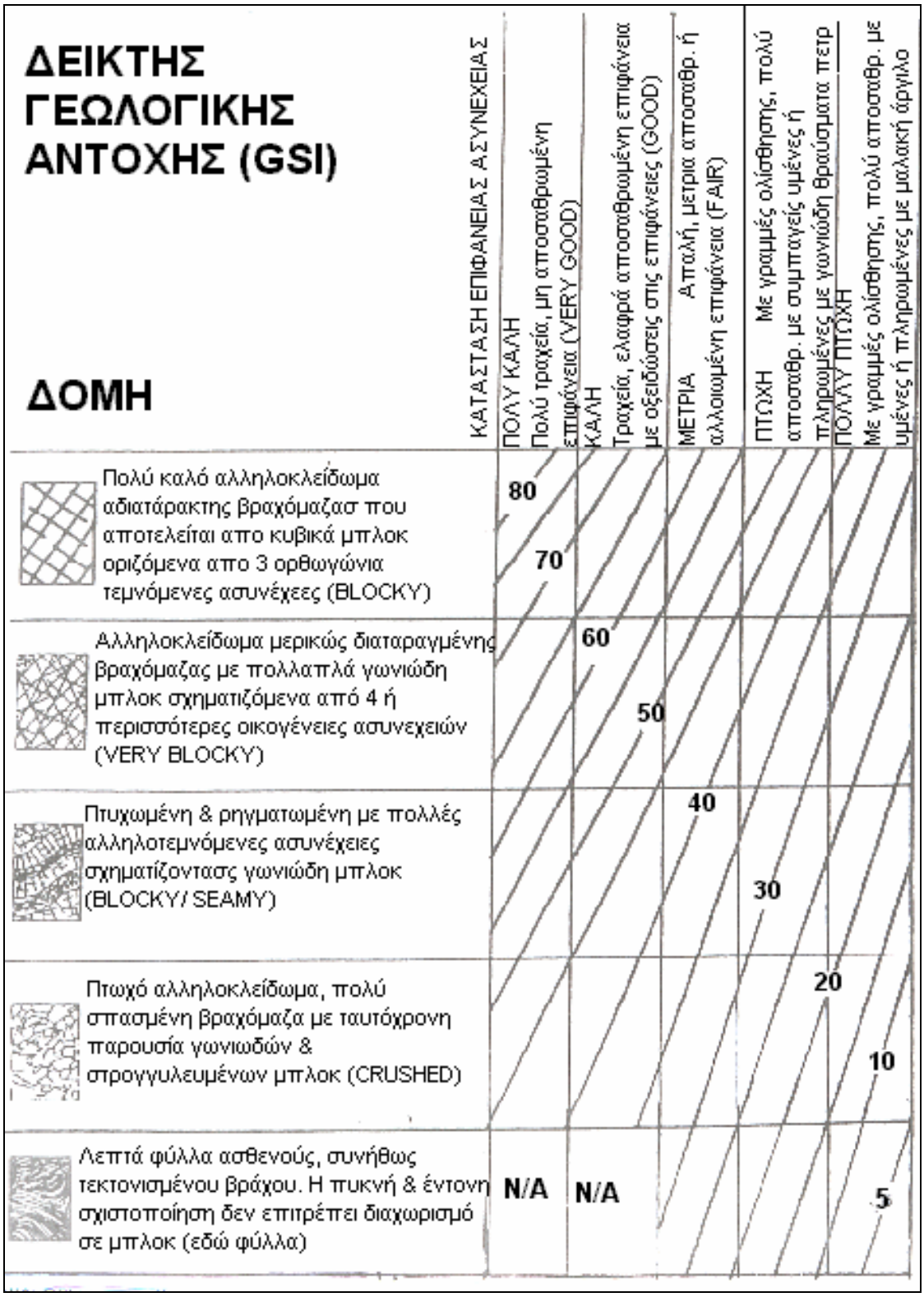
Το σύστημα GSI (Geological Strength Index) προτάθηκε από τον Hoek (1994, 1998) και δίνει ιδιαίτερη έμφαση σε σχετικώς πτωχής ποιότητας βραχόμαζες με RMR<40 αλλά με λειτουργία αλληλεμπλοκής μεταξύ των βραχώδων τεμαχών. Τέτοιου τύπου βραχόμαζες δομούν ένα σημαντικό ποσοστό του Ελληνικού χώρου και συνεπώς έχουν μεγάλη σημασία στο σχεδιασμό υπογείων έργων.

Το σύστημα GSI σχεδιάστηκε ώστε εν γένει να είναι συμβατό με το σύστημα RMR για βραχομάζας RMR>40, δηλαδή οι τιμές του δείκτη GSI είναι περίπου ίσες με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη RMR. Για βραχόμαζες με RMR<40, το σύστημα GSI πλεονεκτεί επειδή παρέχει καλύτερη διακριτοποίηση, χωρίς απότομες μεταβολές της τιμής του δείκτη, ενώ ταυτοχρόνως παραμένει συμβατό με το σύστημα RMR.

Το σύστημα GSI βασίζεται στη συναξιολόγηση δυο παραμέτρων: (α) Της δομής της βραχόμαζας, που σχηματίζει το βαθμό αλληλεμπλοκής των βραχωδών τεμαχών και (β) Της κατάστασης των επιφανειών των ασυνεχειών που χαρακτηρίζει το μέγεθος της διατμητικής αντοχής τους.

Η συναξιολόγηση των παραμέτρων και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη GSI φαίνονται στο Σχήμα Α1. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

Ποσοτικός χαρακτηρισμός ρωγματομένης βραχομάζας κατά Hoek, Μαρίνος και Μπενίση (1998)



Σχήμα Α1. Ταξινόμηση της βραχομάζας κατά το σύστημα GSI. Το σύστημα GSI εφαρμόζεται σε βραχόμαζες με αλληλεμπλοκή μεταξύ των βραχωδών τεμαχών, δηλαδή σε βραχόμαζες με μικρό ποσοστό συμμετοχής εδαφικού υλικού (τυπικά λιγότερο από 20% του συνολικού όγκου της βραχόμαζας).

A2.3 Σύστημα Q (NGI)

Το σύστημα Q αναπτύχθηκε στο Νορβηγικό Γεωτεχνικό Ινστιτούτο (NGI) από τους Barton, Lien και Lunde το 1974 με σκοπό τον εμπειρικό σχεδιασμό των μέτρων άμεσης υποστήριξης σηράγγων που διανοίγονται με τη ‘’μέθοδο NATM’’. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του δείκτη Q από τη σχέση:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right)\left(\frac{J_r}{J_\alpha}\right)\left(\frac{J_w}{SRF}\right)$$

όπου: RQD= δείκτης κερματισμού της βραχόμαζας, Jn δείκτης του αριθμού των συστημάτων των ασυνεχειών, Jr= βαθμός τραχύτητας των επιφανειών των ασυνεχειών, Jα= βαθμός εξαλλοίωσης των επιφανειών των ασυνεχειών, Jw= συντελεστής επιρροής του υπόγειου νερού, SRF = συντελεστής απομείωσης λόγω υψηλών τάσεων (Stess Reduction Factor).

Στην παραπάνω σχέση, ο πρώτος λόγος (RQD / Jn) εκφράζει το μέσο μέγεθος των τεμαχών που συνιστούν τη βραχόμαζα. Ο δεύτερος λόγος (Jr/Jα) εκφράζει τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής των ασυνεχειών της βραχόμαζας. Τέλος, ο τρίτος λόγος (Jw/SRF) εκφράζει τις τάσεις που επικρατούν στη βραχόμαζα. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων συνοψίζονται στα επόμενα.

A2.3.1 Συντελεστής RQD

Χρησιμοποιείται η τιμή του δείκτη RQD. Εάν RQD < 10%, χρησιμοποιείται η συμβατική τιμή 10.

A2.3.2 Συντελεστής Jn

Πίνακας Α12. Υπολογισμός τιμή του συντελεστή Jn.

Οικογένειες ασυνεχειών	**Τιμή του Jn**
Συμπαγές πέτρωμα ή λίγες ασυνέχειες	0.5-1.0
Μια οικογένεια	2
Μια οικογένεια και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	3
Δύο οικογένειες	4
Δύο οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	6
Τρεις οικογένειες	9
Τρεις οικογένειες και μερικές τυχαίες ασυνέχειες	12

Τέσσερις ή περισσότερε οικογένειες	15
Θρυμματισμένο πέτρωμα	20

Σε περιοχές διασταύρωσης σηράγγων, η τιμή του Jn τριπλασιάζεται. Σε περιοχές στομίων, η τιμή του Jn διπλασιάζεται.

A2.3.3 Συντελεστής Jr

(α) Περίπτωση βραχόμαζας με ασυνέχειες χωρίς υλικό πλήρωσης ή με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Πίνακας Α13. Τιμή συντελεστή Jr.

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του Jr
Ασυνεχείς διακλάσεις	4
Τραχείες και ακανόνιστες, κυματώδεις	3
Ομαλές, κυματώδεις	2
Ολισθηρές (slickensided), κυματώδεις	1,5
Τραχείες ή ακανόνιστες, επίπεδες	1,5
Ομαλές επίπεδες	1,0
Ολισθηρές επίπεδες	0,5

(β) Περίπτωση βραχόμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σημαντική σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Πίνακας Α14. Τιμή συντελεστή Jr.

Κατάσταση επιφάνειας των ασυνεχειών	Τιμή του Jr
Με υλικό πλήρωσης από αργιλικό υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1,0
Με υλικό πλήρωσης από αμμώδες ή χαλικώδες υλικό σε επαρκές πάχος ώστε να παρεμποδίζεται η επαφή των τοιχωμάτων του πετρώματος	1,0

Στην περίπτωση αυτή η μέση απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών υπερβαίνει τα τρία μέτρα, η τιμή του Jr αυξάνεται κατά 1.

A2.3.4 Συντελεστής Ja

(α) Περίπτωση βραχόμαζας με επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος.

Πίνακας Α15. Τιμή συντελεστή Jα.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του Jα
Υγιή και πλήρως ‘’επουλωμένα’’ τοιχώματα	0,75
Οξειδωμένα τοιχώματα χωρίς αποσάθρωση	1,0
Ελαφρώς αποσαθρωμένα τοιχώματα με αμμώδες (όχι αργιλικό) υλικό πλήρωσης	2,0
Αμμώδες ή ιλυώδες υλικό πλήρωσης	3,0
Υλικό πλήρωσης από αργιλικά ορυκτά πάχους έως 2mm	4,0

(β) Περίπτωση βραχόμαζας με υλικό πλήρωσης μικρού πάχους (ώστε να αποκαθίσταται επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τεμαχών για σχετική ολίσθηση μικρότερη των 10cm).

Πίνακας Α16. Τιμή συντελεστή Jα.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του Jα
Υλικό πλήρωσης από αμμώδη συστατικά	4,0
Υλικό πλήρωσης από στιφρή άργιλο πάχους έως 5mm	6,0
Υλικό πλήρωσης από μαλακή άργιλο πάχους έως 5mm	8,0
Υλικό πλήρωσης από διογκούμενη άργιλο πάχους έως 5mm. Η τιμή του Jα εξαρτάται από το ποσοστό της διογκούμενης αργίλου	8-12

(γ) Περίπτωση βραχόμαζας χωρίς επαφή των εκατέρωθεν της ασυνέχειας τοιχωμάτων του πετρώματος ακόμη και μετά σχετική ολίσθηση κατά μήκος της ασυνέχειας.

Πίνακας Α17. Τιμή συντελεστή Jα.

Κατάσταση εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των ασυνεχειών	Τιμή του Jα
Ζώνες από θρυμματισμένο ιλυο-αμμώδες υλικό	5
Παχιές ζώνες από αργιλικό υλικό (στιφρή άργιλος, μαλακή άργιλος ή διογκούμενη άργιλος	6-24

Α2.3.5 Συντελεστής Jw

Πίνακας Α18. Τιμή συντελεστή Jw.

Παρουσία Υπόγειων Υδάτων	Τιμή του Jw
Στεγνή εκσκαφή ή μικρή τοπική εισροή νερού έως 5lt/min	1,0
Μέτρια εισροή νερού με μερική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0,66
Μεγάλη εισροή νερού σε καλό πέτρωμα με ρωγμές χωρίς υλικό	0,50

πλήρωσης	
Μεγάλη εισροή νερού με σημαντική απόπλυση του υλικού πλήρωσης	0,33
Πολύ μεγάλη εισροή νερού βαθμιαίως μειούμενη με την πάροδο του χρόνου	0,2-0,1
Πολύ μεγάλη εισροή νερού χωρίς μείωση με την πάροδο του χρόνου	0,05-0,1

A2.3.6 Συντελεστής SRF

(α) Διέλευση από ζώνες ρηγμάτων. Διέλευση από ασθενείς ζώνες που είναι δυνατόν να προκαλέσουν χαλάρωση της βραχομάζας.

Πίνακας Α19. Τιμή συντελεστή SRF.

Περίπτωση	Τιμή του SRF
Άφθονες ασθενείς ζώνες με αργιλικό ή αποσαθρωμένο πέτρωμα, πολύ χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	10
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <50m)	5
Μεμονωμένες ασθενείς ζώνες ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >50m)	2,5
Άφθονες ζώνες διάτμησης σε σκληρό πέτρωμα, χωρίς αργιλικό υλικό, χαλαρό περιβάλλον πέτρωμα (για οποιοδήποτε βάθος)	7,5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας <50m)	5
Μεμονωμένες ζώνες διάτμησης ως ανωτέρω (βάθος σήραγγας >50m)	2,5
Χαλαρές ανοιχτές ασυνέχειες, έντονα διακλασμένη μάζα (για οποιοδήποτε βάθος)	5

(β) Περίπτωση πετρώματος ικανής αντοχής υπό σχετικώς υψηλές τιμές γεωστατικών τάσεων

Πίνακας Α20. Τιμή συντελεστή SRF.

Περίπτωση	σc/σ1	σθ/σ1	Τιμή του SRF
Χαμηλές τάσεις, κοντά στην επιφάνεια, ανοιχτές ασυνέχειες	>200	>13	2,5
Μέσες τάσεις	200-10	13-0,66	1,0
Υψηλές τάσεις πολύ ‘’σφιχτή δομή	10-5	0,66-0,33	0,5-2,0
Μέτρια ‘’εκτίναξη’’ σκληρού πετρώματος, μετά από 1 ώρα	5-2,5	0,33-0,16	5-10
Έντονη ‘’έκρηξη’’ και δυναμικές παραμορφώσεις σκληρού πετρώματος	<2,5	<0,16	10-20

(γ) Συνθλίβον πέτρωμα, έντονες πλαστικές παραμορφώσεις λόγω πολύ υψηλών τάσεων.

Πίνακας Α21. Τιμή συντελεστή SRF.

Περίπτωση	**Τιμή του SRF**
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	10-20

(δ) Διογκούμενο πέτρωμα, λόγω χημικής ενεργότητας με προσρόφηση νερού.

Πίνακας Α22. Τιμή συντελεστή SRF.

Περίπτωση	**Τιμή του SRF**
Μέτρια πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	5-10
Μεγάλη πίεση εξαιτίας της συμπίεσης	10-15

Με βάση το δείκτη ποιότητας κατά το σύστημα Q, η βραχόμαζα μπορεί να καταταγεί στις ακόλουθες κατηγορίες:

Α2.3.7 Ταξινόμηση ποιότητας βραχομάζας κατα το Q σύστημα

Πίνακας 23. Ταξινόμηση βραχομάζας κατά Q.

Q	**Κλάση**	**Χαρακτηρισμός**
>400	Q-Ia	Εξαιρετικά καλή
100-400	Q-Ib	Πάρα πολύ καλή
40-100	Q-II	Πολύ καλή
10-40	Q-IIIa	Καλή
4-10	Q-IIIb	Μέτρια
1-4	Q-IVa	Πτωχή
0,0-1	Q-Ivb	Πολύ πτωχή
0,01-0,1	Q-Va	Πάρα πολύ πτωχή
<0,01	Q-Vb	Εξαιρετικά πτωχή