



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

**Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητα Εδαφών
στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου**

Διδακτορική Διατριβή

Ε. Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗ

Χανιά 2003

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, από το 1997 ως το 2002. Είχε στόχο τη διερεύνηση της κινητικότητας εκσκαφών μεγάλου βάθους και πεδίο εφαρμογής απετέλεσε το λιγνιτωρυχείο “Τομέας-6” του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου.

Στο πλαίσιο αυτής της έρευνας, ολοκληρώθηκε η εγκατάσταση και βαθμονόμηση των απαραίτητων εργαστηριακών οργάνων, διαμορφώθηκε το απαιτούμενο λογισμικό για την επεξεργασία των εργαστηριακών μετρήσεων, ενώ τμήματα της εργασίας απετέλεσαν και αντικείμενο της εκπαιδευτικής διαδικασίας προπτυχιακών φοιτητών.

Επιβλέπων της διατριβής ήταν ο Καθηγητής Διον. Μονόπωλης, στον οποίο εκφράζω τις θερμές μου ευχαριστίες για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που μου παρείχε για την επιτυχή ολοκλήρωση της.

Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται στον Καθηγητή Ζαχ. Αγιουτάντη για την αμέριστη βοήθεια και τις εύστοχες υποδείξεις του, όπως επίσης και στον Αν. Καθηγητή και διευθυντικό στέλεχος της ΔΕΗ Κων. Καβουρίδη, για τη διάθεση των απαραίτητων στοιχείων και τη συμβολή του στην υλοποίηση της έρευνας.

Αισθάνομαι επίσης την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τα στελέχη της ΔΕΗ για την πολύτιμη ενημέρωση και την τεχνική υποστήριξη που προσέφεραν, όπως επίσης και τους φοιτητές Ειρ. Καλογήρου, Αφρ. Παπαγιάννη και Στεφ. Στειακάκη για τη βοήθεια τους κατά την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών.

Τέλος ευχαριστώ όλους όσους συνέβαλαν με εποικοδομητικές συζητήσεις και ηθική συμπαράσταση.

στην Ολγα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος της επιφανειακής εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων εφαρμόζεται όλο και περισσότερο τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως λόγω της βελτίωσης των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στην εκμετάλλευση. Η ανάπτυξη των εκσκαφών είναι πλέον εφικτή σε μεγαλύτερα βάθη, γεγονός που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της μεταλλευτικής. Εντούτοις, απαιτεί πιο εμπεριστατωμένες μελέτες όσον αφορά την ευστάθεια των πρανών λόγω του ενδεχόμενου κινδύνου εκδήλωσης κατολισθήσεων που πιθανόν να έχουν σοβαρές συνέπειες στην εκμετάλλευση.

Στα λιγνιτωρυχεία της λεκάνης Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου, οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ικανοποιητικής αντοχής και επιτρέπουν το σχεδιασμό υψηλών πρανών μεγάλης κλίσης, συμβάλλοντας στη βέλτιστη οικονομικά εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Η όποια κινητικότητα εκδηλώνεται στα μέτωπα εκσκαφής και το δάπεδο των Ορυχείων, οφείλεται κατά το πλείστον

- στη μειωμένη αντοχή τεκτονικών ασυνεχειών και αρμών στρώσης και
- σε φαινόμενα εκτόνωσης των τάσεων, λόγω της αποφόρτισης των γεωλογικών σχηματισμών.

Προφανώς, η τεκτονική διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά των πρανών, αλλά αποτελεί ιδιαιτερότητα τοπικού χαρακτήρα που θα πρέπει να αξιολογείται κατά περίπτωση, με το σχεδιασμό ή και την ανάπτυξη των Ορυχείων. Σε αντίθεση, τα φαινόμενα ανάκτησης λόγω εκτόνωσης των τάσεων, αφορούν τους γεωλογικούς σχηματισμούς σε όλη τους την έκταση και η μελέτη τους απαιτεί τη διερεύνηση ιδιαίτερων γεωτεχνικών παραμέτρων.

Η εργασία αυτή έχει σκοπό

- να διερευνήσει και να αξιολογήσει τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των εκσκαφών μεγάλου βάθους, με ιδιαίτερη έμφαση στις εκσκαφές των λιγνιτωρυχείων,
- να αξιολογήσει τις μετρήσεις και παρατηρήσεις πεδίου που αφορούν την κινητικότητα των δυτικών (μόνιμων) πρανών του λιγνιτωρυχείου “Τομέας-6”, το οποίο απετέλεσε και το πεδίο εφαρμογής της παρούσας έρευνας και τέλος
- να προσδιορίσει το μέγεθος της κινητικότητας που αποδίδεται στην αποφόρτιση και την κατ’ όγκο ανάκτηση λόγω της εκσκαφής, συμβάλλοντας στον καθορισμό του μηχανισμού της κινητικής συμπεριφοράς τόσο του συγκεκριμένου Ορυχείου, όσο και των υπολοίπων εκσκαφών στην ευρύτερη περιοχή. Το μέγεθος αυτό είναι καθοριστικό για την απάντηση του ερωτήματος που συχνά τίθεται, αν δηλαδή η κινητικότητα που εκδηλώνεται κατά την εκμετάλλευση αφορά ή όχι κατολισθητικές κινήσεις.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι (δυστροπία, αντοχή, ανισοτροπία, συμπίεστικότητα) χαρακτηριστικών μαργαϊκών οριζόντων του Λιγνιτικού Κέντρου Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου, που επηρεάζουν καθοριστικά τη συμπεριφορά των εκσκαφών.

Είναι γεγονός ότι η αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών της ευρύτερης περιοχής, έχει διερευνηθεί στο παρελθόν από πολλούς ερευνητές, η δε εκτίμηση των μέτρων δυστροπίας βασίσθηκε σε αποτελέσματα των κλασσικών τριαξονικών δοκιμών αντοχής. Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών με πλέον δόκιμες τεχνικές, απετέλεσε επιδίωξη της εργασίας αυτής, δεδομένου ότι είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιόπιστη διερεύνηση της συμπεριφοράς της εκσκαφής.

Με βάση τη δομή της εργασίας, επιχειρήθηκε κατ' αρχάς η ανάλυση των παραμορφώσεων που εκδηλώνονται στις εκσκαφές μεγάλου βάθους και η ανάδειξη των μηχανισμών και των παραγόντων που επηρεάζουν την κινητικότητα και ελέγχουν την πιθανή αστοχία (Κεφάλαιο 1). Ακολουθεί αναφορά στις ιδιαιτερότητες των λιγνιτωρυχείων ανοικτής εκσκαφής (Κεφ. 2) και στις μεθόδους αξιολόγησης της κινητικότητας που εκδηλώνεται κατά την εκμετάλλευση τους (Κεφ. 3). Τέλος, ολοκληρώνοντας βιβλιογραφικά τη διερεύνηση της κινητικότητας των εκσκαφών, επιχειρήθηκε μια συγκριτική παρουσίαση των μεθόδων μαθηματικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών (Κεφ. 4).

Το Κεφ. 5 αναφέρεται στο λιγνιτωρυχείο “Τομέας-6” που απετέλεσε και το πεδίο εφαρμογής της παρούσας έρευνας ενώ στο Κεφ. 6 αναλύεται η συμπεριφορά που επιδεικνύει το Ορυχείο κατά την εκμετάλλευση. Για την αξιολόγηση των γεωλογικών και γεωτεχνικών δεδομένων, σχεδιάσθηκε μια αντιπροσωπευτική γεωλογική τομή εγκάρσια στα δυτικά (μόνιμα) πρανή, τα οποία εμφάνιζαν ανησυχητική κινητικότητα.

Το Κεφ. 7 περιγράφει τη δειγματοληψία που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της ερευνητικής εργασίας και παρουσιάζει την ορυκτολογική ανάλυση - πετρογραφική ταυτοποίηση, την κοκκομετρική διαβάθμιση, τα όρια Atterberg και τη γεωτεχνική ταξινόμηση των μαργαϊκών οριζόντων της περιοχής.

Στο Κεφ. 8 ερευνάται η αντοχή των δειγμάτων σε ανεμπόδιστη θλίψη, η ανισοτροπία τους και η συμπίεστικότητα που επιδεικνύουν. Ακολουθεί το Κεφ. 9 το οποίο αναφέρεται στον προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των μαργαϊκών σχηματισμών και το Κεφ. 10 όπου καθορίζεται η μεθοδολογία και περιγράφεται ο προσδιορισμός των μέτρων δυστροπίας των σχηματισμών με τριαξονικές δοκιμές.

Τέλος, στο Κεφ. 11 παρουσιάζεται η προσομοίωση της εκσκαφής του “Τομέα-6” και διερευνάται η συμπεριφορά του Ορυχείου με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης, υπολογίζοντας την αναθόλωση (με βάση την ελαστική θεωρία), εκτιμώντας την ευστάθεια των πρανών (με μεθόδους οριακής ισορροπίας) και προβλέποντας την εν γένει κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής (με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων). Σκοπός της προσομοίωσης ήταν η εκτίμηση της ευστάθειας των δυτικών (μόνιμων) πρανών και ο προσδιορισμός του μεγέθους της κινητικότητας (τόσο των πρανών όσο και του δαπέδου του Ορυχείου), που αναμένεται να εκδηλωθεί με την εκσκαφή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ	1-1
1.1	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΔΗΛΩΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ	1-2
1.1.1	Ανάκτηση των γεωλογικών σχηματισμών και κίνηση των πρानών προς το εσωτερικό της εκσκαφής	1-2
1.1.2	Κύρτωση του δαπέδου της εκσκαφής και κινήσεις των πρानών λόγω σύνθλιψης	1-3
1.1.3	Καθίζηση γύρω από την εκσκαφή	1-5
1.1.4	Ερπυσμός των γεωλογικών σχηματισμών	1-6
1.2	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ	1-8
1.2.1	Μηχανισμοί αστοχίας των πρानών	1-9
1.2.2	Προοδευτική θραύση σε πρανή εκσκαφών	1-11
1.2.3	Ερπυσμός και προοδευτική θραύση	1-12
1.2.4	Αστοχίες σε υφιστάμενες επιφάνειες αδυναμίας	1-13
1.3	ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	1-15
1.3.1	Τασικό πεδίο	1-15
1.3.1.1	Τασικό πεδίο πριν την εκσκαφή	1-15
1.3.1.2	Μεταβολή του τασικού πεδίου κατά την εκσκαφή	1-16
1.3.2	Γεωλογική δομή και ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών	1-19
1.3.2.1	Γεωλογία, Στρωματογραφία, Τεκτονική	1-19
1.3.2.2	Ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών ως προς τη διατμητική τους αντοχή	1-23
1.3.3	Υδρογεωλογικές συνθήκες	1-25
2	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	2-1
2.1	ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΝ	2-1
2.1.1	Διαπερατότητα και φαινόμενο βάρος των λιγνιτών	2-2
2.1.2	Διατμητική αντοχή των λιγνιτών	2-3
2.1.3	Διατμητική αντοχή αρμών στρώσης μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών	2-5
2.1.4	Μακρόχρονη συμπεριφορά των γαιανθράκων κάτω από σταθερό φορτίο	2-6
2.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ	2-7

3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΚΣΚΑΦΗ	3-1
3.1	ΠΡΩΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ	3-1
3.2	ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	3-2
3.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	3-4
4	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ	4-1
4.1	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ - ΧΡΟΝΟΥ	4-1
4.1.1	Μέτρα δυστροφίας	4-2
4.1.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη δυστροφία του εδάφους	4-5
4.1.2.1	Τασική συνθήκη και επιφάνεια οριακής κατάστασης	4-5
4.1.2.2	Σύγχρονη τασική κατάσταση	4-6
4.1.2.3	Τασική διαδρομή (περίοδος διακοπής και περιστροφής της τασικής διαδρομής)	4-6
4.1.2.4	Ρυθμός φόρτισης	4-7
4.1.3	Η σχέση τάσης - παραμόρφωσης στα εδάφη	4-9
4.1.4	Προσδιορισμός της δυστροφίας	4-10
4.2	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	4-12
4.2.1	Γραμμικά ελαστικά μοντέλα	4-13
4.2.2	Μη γραμμικά μοντέλα	4-13
4.2.2.1	Μοντέλα μεταβλητής ελαστικότητας (μη γραμμικά ελαστικά ή ψευδοελαστικά)	4-14
4.2.2.1.1	Γραμμικά μοντέλα δυστροφίας για πολύ μικρές παραμορφώσεις	4-17
4.2.2.1.2	Μη γραμμικά μοντέλα δυστροφίας για μικρές και μεγάλες παραμορφώσεις	4-18
4.2.2.2	Ελαστικοπλαστικά μοντέλα	4-19
5	ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ – ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΟ “ΤΟΜΕΑΣ-6”	5-1
5.1	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ – ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ	5-2
5.2	ΟΡΥΧΕΙΟ “ΤΟΜΕΑΣ-6”	5-10
5.2.1	Ανάπτυξη του Ορυχείου “Τομέας-6”	5-11
5.2.2	Γεωλογία, Στρωματογραφία, Τεκτονική	5-11
5.2.2.1	Υδρογεωλογία και γεωτρήσεις αποστράγγισης	5-16

5.2.2.2	Γεωτεχνική έρευνα στο πλαίσιο του σχεδιασμού ανάπτυξης του Ορυχείου	5-16
5.2.3	Κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής	5-17
5.2.4	Μέτρα ελέγχου και αντιμετώπισης της κινητικότητας	5-18
5.2.4.1	Εγκατάσταση Γεωδαιτικών Σημείων ελέγχου	5-19
5.2.4.2	Εγκατάσταση Κλισιμέτρων	5-19
5.2.4.3	Περαιτέρω γεωτεχνική διερεύνηση μετά την εμφάνιση της κινητικότητας των δυτικών μόνιμων πρανών	5-20
6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	6-1
6.1	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	6-1
6.2	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ	6-2
6.3	ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ	6-6
6.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	6-6
6.5	ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΜΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΑ ΔΥΤΙΚΑ ΠΡΑΝΗ	6-9
7	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ, ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “TOMEA-6”	7-1
7.1	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ	7-1
7.2	ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	7-4
7.2.1	Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)	7-4
7.2.2	Προσδιορισμός οργανικής ύλης και ανθρακικών με καύση στο φούρνο	7-6
7.2.3	Προσδιορισμός ανθρακικών και οργανικής ύλης με την θερμοβαρυτομετρική μέθοδο TGA	7-7
7.2.4	Ορυκτολογικές αναλύσεις με περιθλασιμετρία XRD	7-8
7.2.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και πετρογραφική κατάταξη των δειγμάτων	7-11
7.3	ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ	7-12
7.3.1	Κοκκομετρία	7-12
7.3.1.1	Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα	7-12
7.3.1.2	Κοκκομετρική ανάλυση με την υδρομετρική μέθοδο	7-12
7.3.1.3	Αποτελέσματα κοκκομετρικής διαβάθμισης	7-13

7.3.2	Όρια Atterberg	7-15
7.3.3	Εδαφομηχανική Ταξινόμηση	7-17
7.3.4	Προσδιορισμός ειδικού βάρους των κόκκων	7-17
8	ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ	8-1
8.1	ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	8-1
8.2	ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ	8-7
8.2.1	Αρχικός και τελικός λόγος κενών	8-8
8.2.2	Συντελεστής συμπίεστότητας	8-11
8.2.3	Δείκτης συμπίεστότητας	8-11
8.2.4	Τάση προφόρτισης	8-12
8.2.5	Συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης	8-12
8.2.6	Συντελεστής διαπερατότητας	8-12
8.2.7	Μέτρο συμπίεστότητας	8-12
8.3	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ	8-14
8.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ	8-14
8.4.1	Τάση προφόρτισης	8-14
8.4.2	Συντελεστής στερεοποίησης	8-16
8.4.3	Μέτρο δυστροπίας και ανισοτροπία	8-16
9	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	9-1
9.1	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	9-1
9.1.1	Παράγοντες που επηρεάζουν τη παραμένουσα διατμητική αντοχή	9-2
9.1.2	Μέγεθος της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των μαργών	9-7
9.2	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “ΤΟΜΕΑ-6”	9-10
9.2.1	Περιγραφή της συσκευής δακτυλοειδούς διάτμησης τύπου Bromhead	9-10
9.2.2	Προετοιμασία των δοκιμών	9-13
9.2.3	Διαδικασία διάτμησης	9-14
9.2.4	Προσδιορισμός της παραμένουσας γωνίας τριβής	9-15

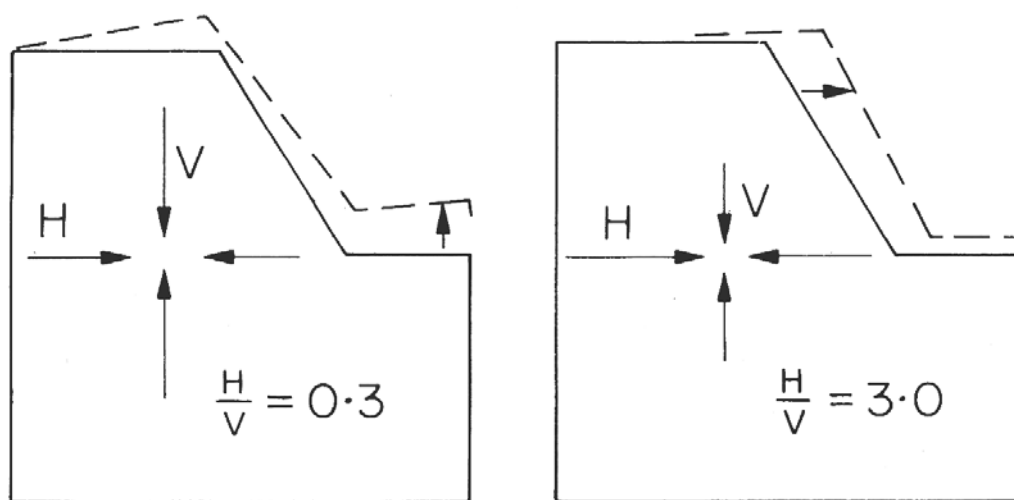
9.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “TOMEA-6”	9-18
10	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	10-1
10.1	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΗΣ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΜΕ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	10-1
10.1.1	Συμβατική τριαξονική δοκιμή	10-1
10.1.2	Υδραυλική τριαξονική συσκευή	10-3
10.1.3	Απαιτούμενη ακρίβεια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό της δυστροπίας	10-3
10.1.3.1	Αξιοπιστία μέτρησης της παραμόρφωσης με μετρητές εξωτερικά της κυψέλης	10-5
10.1.3.2	Μετρήσεις μικρών παραμορφώσεων με χρήση τοπικών μετρητών	10-6
10.1.3.3	Εκτίμηση της δυστροπίας σε πολύ μικρές παραμορφώσεις με δυναμικές εργαστηριακές δοκιμές	10-8
10.2	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	10-8
10.3	ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ	10-9
10.3.1	Πρόγραμμα των δοκιμών	10-9
10.3.2	Εργαστηριακό σύστημα τριαξονικής φόρτισης	10-10
10.3.3	Διεξαγωγή των δοκιμών	10-15
10.3.3.1	Ορισμός του επιπέδου αναφοράς των μετρούμενων πιέσεων	10-15
10.3.3.2	Έλεγχος του συστήματος	10-15
10.3.3.3	Προετοιμασία του δοκιμίου και εγκατάσταση του στη συσκευή	10-16
10.3.3.4	Εγκατάσταση των μετρητών παραμόρφωσης τύπου Hall effect	10-17
10.3.3.5	Κορεσμός	10-18
10.3.3.6	Στερεοποίηση	10-19
10.3.3.7	Τριαξονικές δοκιμές με κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης	10-19
10.3.3.8	Αποτελέσματα	10-20
10.3.4	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων	10-21
11	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ “TOMEA-6”	11-1
11.1	ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	11-1
11.1.1	Ανάλυση της ανάκτησης θεωρώντας κατανομή τάσεων κατά Boussinesq	11-1
11.1.1.1	Εκτίμηση των τάσεων με το βάθος	11-1
11.1.1.2	Εκτίμηση της ανηγμένης παραμόρφωσης και ανάκτησης	11-4
11.1.2	Ανάκτηση του δαπέδου εκσκαφής του “Τομέα-6” με βάση την ελαστική θεωρία	11-5

11.1.2.1	Υπολογισμός της φόρτισης που προκαλεί κάθε εδαφικός τομέας	11-7
11.1.2.2	Εκτίμηση της ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής	11-7
11.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΥΤΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ “TOMEA-6” ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ	11-10
11.2.1	Σύνταξη γεωλογικού προσομοιώματος των δυτικών πρανών	11-10
11.2.2	Εκτίμηση της ευστάθειας	11-12
11.2.3	Παρατηρήσεις σχετικά με τις αναλύσεις ευστάθειας των δυτικών πρανών	11-14
11.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	11-14
11.3.1	Λογισμικό Plaxis	11-16
11.3.2	Μοντέλο εδαφικής κράτυνσης	11-17
11.3.3	Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου κράτυνσης για την απόδοση της συμπεριφοράς των μαργαϊκών οριζόντων	11-20
11.3.4	Προσομοίωση της εκσκαφής	11-24
11.3.4.1	Καθορισμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων	11-24
11.3.4.1.1	Διαστάσεις του μοντέλου και οριακές συνθήκες	11-24
11.3.4.1.2	Ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και παράμετροι των διεπιφανειών	11-27
11.3.4.1.3	Διαμόρφωση δικτύου στοιχείων	11-29
11.3.4.1.4	Ορισμός αρχικών συνθηκών	11-29
11.3.4.2	Επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμοί	11-30
11.3.4.3	Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της εκσκαφής	11-31
11.3.4.3.2	Συμπεριφορά του ορύγματος μέχρι το 6 ^ο στάδιο εκσκαφής (+574 m)	11-32
11.3.4.3.3	Συμπεριφορά του λιγνιτωρυχείου στο 11 ^ο στάδιο εκσκαφής (+526 m)	11-42
11.3.4.4	Παραμετρικές αναλύσεις σε σχέση με τις γεωτεχνικές παραμέτρους του λιγνίτη	11-45
11.3.4.5	Συμπεράσματα και σύγκριση προβλεπόμενης και παρατηρούμενης συμπεριφοράς της εκσκαφής	11-46
12	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	12-1

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΕΚΣΚΑΦΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

Οι εκσκαφές προκαλούν παραμορφώσεις των γεωλογικών σχηματισμών στους οποίους αναπτύσσονται (Σχ. 1-1). Το μέγεθος της ανοδικής κίνησης (ανάκτησης) του δαπέδου σε σχέση με τη παραμόρφωση των πρανών, εξαρτάται από το λόγο των οριζοντίων προς τις κατακόρυφες τάσεις που αναπτύσσονται στο πεδίο (Yu and Coates, 1979).



Σχ. 1-1 Κινητικότητα εκσκαφής που αναπτύσσεται σε ομογενή γεωλογικό σχηματισμό (Blyth and de Freitas, 1984 από Yu and Coates, 1979)

Οι προαναφερόμενες κινήσεις είναι ποιοτικά ανάλογες με αυτές που εμφανίζονται κατά τη φυσική ανάπτυξη (διάβρωση) των κοιλάδων (Lancellota, 1993), ενώ η έκταση της εμφάνισης και το μέγεθος τους εξαρτάται από τη γεωλογική δομή, τις μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών, το τασικό πεδίο, τις υδρογεωλογικές συνθήκες, τη τεχνική και το πρόγραμμα εκσκαφής (διαστάσεις, χρόνος, γεωμετρία).

Δεδομένης της σπουδαιότητας της εμφανιζόμενης κινητικότητας όσον αφορά την ευστάθεια των πρανών, αναλύονται παρακάτω οι κυριότεροι μηχανισμοί που τη προκαλούν και αξιολογούνται οι παράγοντες που την επηρεάζουν.

1.1 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΕΚΔΗΛΩΝΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ

Οι παραμορφώσεις που εκδηλώνονται με την εκσκαφή αφορούν την ανάκτηση, τη πτύχωση (κύρτωση) του δαπέδου, τις κινήσεις των πρανών λόγω σύνθλιψης και καθίζησης των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή, αλλά και τις παραμορφώσεις που προκαλούνται με τον ερπυσμό.

1.1.1 Ανάκτηση των γεωλογικών σχηματισμών και κίνηση των πρανών προς το εσωτερικό της εκσκαφής

Με τον όρο ανάκτηση νοείται η κατά την κατακόρυφο διεύθυνση ανοδική κίνηση που εμφανίζεται εξαιτίας της διόγκωσης του γεωλογικού σχηματισμού και προκαλείται κατά την εκσκαφή λόγω σταδιακής μείωσης του εξασκούμενου φορτίου.

Ο Peterson (1958) διακρίνει δύο φάσεις ανάκτησης :

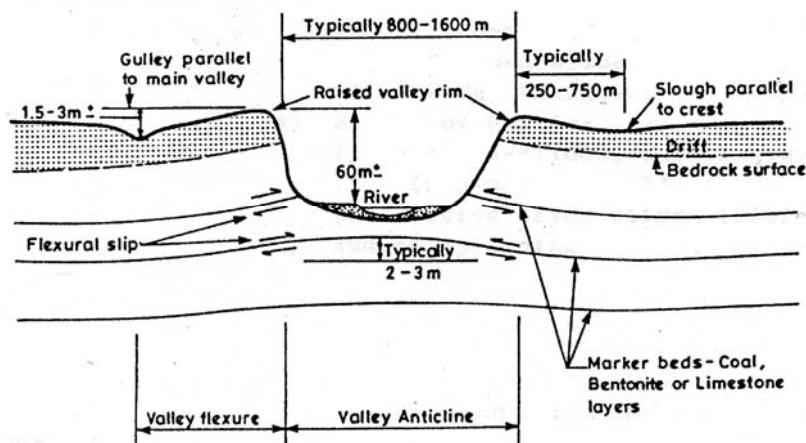
- αυτή που εκδηλώνεται άμεσα με την εκσκαφή - αποφόρτιση, η οποία αποδίδεται στην ελαστική συμπεριφορά του σχηματισμού και είναι ανάλογη με το αφαιρούμενο φορτίο και
- την ανάκτηση που εξελίσσεται με το χρόνο (χρονο-ανάκτηση) και συνεχίζει να εκδηλώνεται για πολλά χρόνια.

Οι γρήγορες ή ελαστικές παραμορφώσεις είναι εύκολο να εξετασθούν θεωρητικά, σε αντίθεση με τις χρονο - εξαρτώμενες που δεν έχουν αναλυθεί ικανοποιητικά ούτε έχουν περιγραφεί επαρκώς οι γεωλογικές διεργασίες που τις προκαλούν (Nichols, 1980).

Οι Matheson and Thompson (1973), μελέτησαν την ανάκτηση του δαπέδου που εκδηλώνεται κατά τη φυσική ανάπτυξη (διάβρωση) μιας κοιλάδας (Σχ. 1-2) και αναφέρουν ότι το συνολικό μέγεθος της άμεσης και της χρονο-εξαρτώμενης ανάκτησης μπορεί να φτάσει μέχρι και το 10% του βάθους της κοιλάδας, ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητας και τη στρωσιγένεια των γεωλογικών σχηματισμών. Συγκρίνοντας το ποσοστό αυτό με την άμεση ανάκτηση των τεχνητών εκσκαφών σε γεωλογικούς σχηματισμούς της ίδιας περιοχής, που ήταν της τάξης του 1% του βάθους εκσκαφής, γίνεται εμφανές το μέγεθος και η σπουδαιότητα της χρονο - εξαρτώμενης ανάκτησης.

Όπως αναφέρει ο Nichols (1980), φαινόμενα ανάκτησης έχουν καταγραφεί σε εκσκαφές για την κατασκευή φραγμάτων (Garrison, Oahe, Fort Peck και Gardiner), κτηρίων, δρόμων και άλλων έργων σε Κρητιδικούς αργιλικούς σχιστόλιθους στις Δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες και στο Καναδά (Peterson

& Peters 1963, Fleming *et al.* 1970), αλλά και σε προστερεοποιημένες αργίλους της Δυτικής Ευρώπης (Skempton 1948, Henkel 1957, De Beer 1969, Vaughan & Wahlbancke 1973, May 1975).



Σχ. 1-2 Χαρακτηριστικά ανάκτησης σε παγετώδη κοιλάδα (Matheson and Thomson, 1973)

Στην εκσκαφή για το αντλιοστάσιο Buena Vista (Καλιφόρνια), βάθους 200 ft (=61m), παρατηρήθηκε ανάκτηση 2,43 ft (=1,7 m) (Chang και Duncan, 1970), ενώ δύο μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις εκδηλώθηκαν σε αμμώχο ορίζοντα ο οποίος υπέρκειται αδιαπέρατου αργιλικού στρώματος (το οποίο οριοθετεί και το πέρας της εκσκαφής). Αποδείχθηκε ότι οι κινήσεις αυτές δεν ήταν ενδεικτικές μιας επερχόμενης καταστροφικής αστοχίας αλλά αποτέλεσμα της συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών λόγω της εκσκαφής – αποφόρτισης τους.

Τέλος, ο Nichols (1980) αναφέρει μια εντυπωσιακού μεγέθους ανάκτηση που καταγράφηκε σ' ένα μεταλλείο ανοικτής εκσκαφής στο Καναδά. Όταν το Ορυχείο έφθανε σε βάθος 15 m, αναπτύχθηκε ρωγμή μήκους 150 m και ο παχυστρωματώδης ασβεστόλιθος του δαπέδου ανυψώθηκε και στις δύο πλευρές της ρωγμής κατά 2,4 m, δημιουργώντας έναν επιμήκη θόλο πλάτους 30 cm.

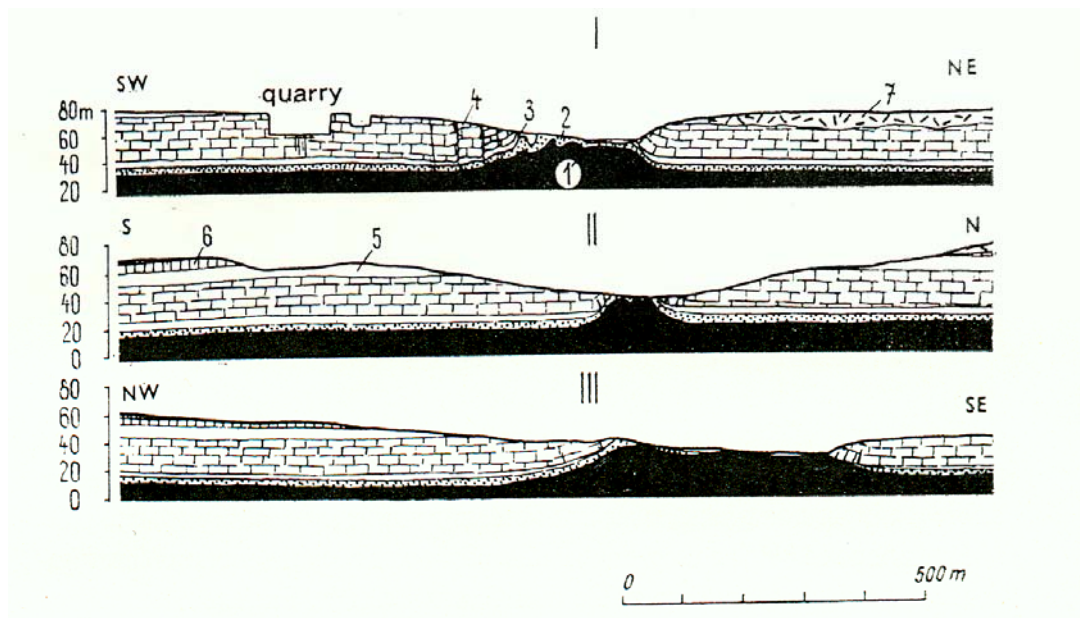
1.1.2 Κύρτωση του δαπέδου της εκσκαφής και κινήσεις των πρανών λόγω σύνθλιψης

Η σύνθλιψη μαλακών σχηματισμών που είναι σε στρώση με άλλους πιο στιφρούς και αποκαλύπτονται στο πυθμένα των εκσκαφών, προκαλεί μικρού εύρους κάμψεις (κυρτώσεις) του δαπέδου (Σχ. 1-3). Τα πλευρικά γεωστατικά φορτία από τις δύο πλευρές της εκσκαφής δεν αντισταθμίζονται (αφού δεν υφίσταται πλευρική ανάλυση), με αποτέλεσμα τα μαλακά στρώματα του πυθμένα να συμπιέζονται και να συνθλίβονται σχηματίζοντας υπο-επιφανειακές πτυχώσεις στο δάπεδο της εκσκαφής. Στο αρχικό στάδιο εμφανίζεται μία ελαφρά αντικλινική δομή, ενώ στη συνέχεια κάμπτονται δημιουργώντας μικρότερες πτυχές. Στο πόδα των πρανών μπορεί να

σχηματισθούν ακόμα και ρήγματα παράλληλα με τον άξονα της εκσκαφής. Γεωλογικά παραμένουσες (υπολειμματικές) τάσεις μέσα στα ιζήματα συμβάλλουν συχνά στο προαναφερόμενο μηχανισμό.

Όπως αναφέρουν οι Zaruba and Mencl (1982), κύρτωση και σχετικές δομές περιγράφηκαν αρχικά από τους Hollingworth *et al.* (1944) στην κοιλάδα Lincolnshire (Κεντρική Αγγλία) όπου αναπτύχθηκαν ορυχεία ανοικτής εκσκαφής για την εξόρυξη σιδηρομεταλλεύματος (Σχ. 1-3). Με τον όρο “bulging” (αναθόλωση), περιέγραψαν την ανοδική κίνηση των αργιλικών πετρωμάτων εξαιτίας της συμπίεσης τους στο δάπεδο της κοιλάδας ενώ με τον όρο “cambering” απέδωσαν την υποχώρηση των περιφερειακών τμημάτων της (στη στέψη των πρανών). Παραμορφώσεις αναπτύχθηκαν μόνο στα ανώτερα στρώματα της αργίλου στο δάπεδο της κοιλάδας, οι οποίες εξαφανίζονται στο πόδα και το εσωτερικό του πρανούς όπου τα στρώματα διατηρούν την υπο-οριζόντια θέση τους.

Ανάλογα φαινόμενα (ελαφρά περιφερειακή υποχώρηση και αναθόλωση) παρατηρήθηκαν επίσης και στη θέση κατασκευής του φράγματος Empingham στην Κεντρική Αγγλία.



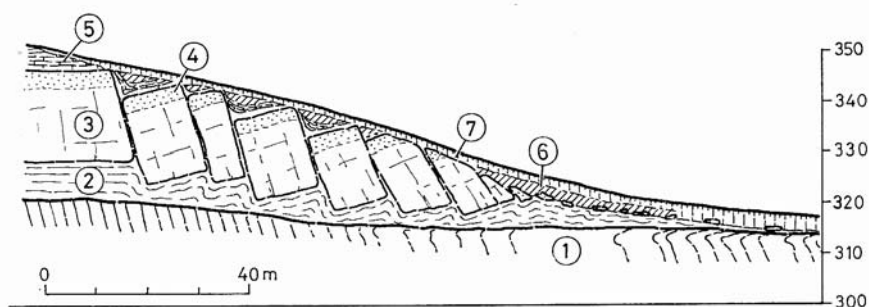
Σχ. 1-3 Πτύχωση λόγω κύρτωσης της αργίλου στο δάπεδο της κοιλάδας του Lincolnshire (Αγγλία), σε τρεις γεωλογικές τομές (Zaruba and Mencl, 1982 από Hollingworth *et al.*, 1944)

(1,3,5 - άργιλος, 2 - ψαμμίτης, 4 - ασβεστόλιθος, 6 - αργιλικός σχιστόλιθος, 7 - παγετώδεις αποθέσεις)

Το φαινόμενο της κύρτωσης μαλακών πετρωμάτων στους πυθμένες διαβρωσιγενών κοιλάδων έχει περιγραφεί στη Ρουμανία σαν “αντίκλινο των κοιλάδων” (Voitesti, 1938 σύμφωνα με Zaruba and Mencl, 1982). Οι Ρουμάνοι γεωλόγοι έχουν μελετήσει το μηχανισμό σύνθλιψης και αναθόλωσης αποθέσεων άλατος και έχουν περιγράψει αντικλινικές δομές που εμφανίζονται στο δάπεδο των

κοιλάδων, όπως επίσης και κατολισθήσεις που διαταράσσουν τα παρακείμενα πρηνή, ενώ τα στρώματα είναι σχεδόν οριζόντια σε αρκετή απόσταση από την κοιλάδα.

Με τη σύνθλιψη υποκειμένων μαλακών στρωμάτων στη βάση της εκσκαφής πολλές φορές εκδηλώνονται και ολισθήσεις υπερκείμενων συμπαγών τεμαχών (Σχ. 1-4). Τέτοια φαινόμενα λαμβάνουν χώρα σε θέσεις όπου μαλακά αργιλικά στρώματα υπόκεινται καταταμημένων συμπαγών πετρωμάτων τα οποία σχηματίζουν υψηλά πρηνή. Τα συμπαγή τεμάχια βυθίζονται βαθμιαία στο μαλακό υπόβαθρο και κινούνται προς τα κατάντη.



Σχ. 1-4 Ολισθήσεις ψαμμιτικών τεμαχών σε αργίλους στην κοιλάδα Motol (Πράγα)
(Zaruba and Mencl, 1982) (1 - αποσαθρωμένοι αργιλοί σχιστόλιθοι,
2 - άργιλοι, 3, 4 - ψαμμίτης, 5 - αμμούχες μάργες, 6, 7 - αιολική γη)

1.1.3 Καθίζηση γύρω από την εκσκαφή

Οι παραμορφώσεις των πρηνών και η ανύψωση του δαπέδου της εκσκαφής συνοδεύονται από μια καθίζηση περιφερειακά της εκσκαφής. Οι Terzaghi and Peck (1967) αναφέρουν ότι κατά την κατασκευή ανοικτού ορύγματος σε μαλακό σχηματισμό (άργιλο), το μέγεθος της υποχώρησης εξαρτάται από : το λόγο του πλάτους προς το βάθος του ορύγματος, τη μέθοδο της εκσκαφής, το πάχος του μαλακού αργιλικού στρώματος κάτω από το δάπεδο του ορύγματος και από τη σχέση τάσης - παραμόρφωσης του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο αναπτύσσεται η εκσκαφή.

Στη περίπτωση που το όρυγμα έχει μικρό πλάτος, ή το δάπεδο πλησιάζει στριφρό ορίζοντα, η άργιλος υποχωρεί πλευρικά σε μικρή μόνο έκταση και η καθίζηση περιορίζεται σε λωρίδες πλάτους όχι μεγαλύτερο από βάθος της εκσκαφής. Εάν όμως το όρυγμα έχει μεγάλο πλάτος και η άργιλος είναι μαλακή σε σημαντικό βάθος κάτω από το πυθμένα, η πλευρική υποχώρηση επηρεάζει ευρύτερη μάζα η οποία εκτείνεται σε μεγάλο βάθος. Στη περίπτωση αυτή, είναι δυνατόν να εκδηλωθεί σημαντικό μεγέθους καθίζηση στις πλευρές της εκσκαφής και σε απόσταση από το χείλος του ορύγματος, πολύ μεγαλύτερη από το βάθος του.

Όσον αφορά το μέγεθος της κατακόρυφης υποχώρησης, εφόσον θεωρηθεί ότι είναι ανάλογο με αυτό που εκδηλώνεται στα ορύγματα που έχουν πλευρική υποστήριξη, εκτιμάται σε 0,5 έως 2% του βάθους της εκσκαφής, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Peck, 1969.

Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τις υποχωρήσεις που αποδίδονται στη παραμόρφωση των γεωλογικών σχηματισμών, καθιζήσεις γύρω από την εκσκαφή προκαλούνται και λόγω του υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της επακόλουθης στερεοποίησης. Με την απομάκρυνση του εδάφους κατά την εκσκαφή, η αποστράγγιση διευκολύνεται και η στερεοποίηση επιταχύνεται (Osaimi and Clough, 1979). Η διαδικασία όμως αυτή, συχνά γίνεται πολύπλοκη λόγω της παρουσίας εμποδίων στην κίνηση του νερού, της συνεχούς μεταβολής των ορίων στράγγισης και του υφιστάμενου τασικού πεδίου.

Δεδομένων των προβλημάτων αυτών, η στερεοποίηση και οι επακόλουθες παραμορφώσεις γύρω από τις εκσκαφές έχουν μελετηθεί σε περιορισμένη έκταση.

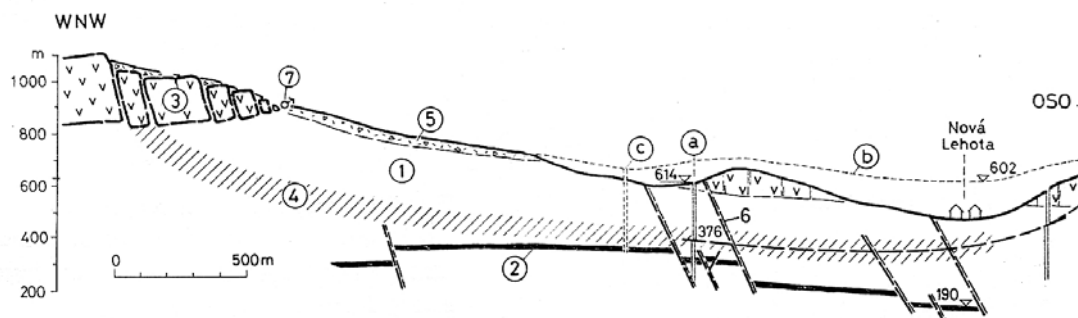
1.1.4 Ερπυσμός των γεωλογικών σχηματισμών

Ο ερπυσμός των πρανών αφορά μια αργή (μακράς διάρκειας) παραμόρφωση, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις προηγείται των κατολισθήσεων. Ο Ter Stepanian (1980), ορίζει σαν ερπυσμό τη παραμόρφωση που υφίσταται η εδαφική μάζα σαν ενιαίο (συνεχές) σώμα. Αναφέρει ότι εμφανίζεται σε εδάφη με μεγάλες δυνάμεις επαφής μεταξύ των κόκκων και την αντιδιαστέλλει με την κινητικότητα που εκδηλώνεται στα πολύ επιφανειακά στρώματα λόγω σχετικής κίνησης μεμονωμένων κόκκων.

Στο Σχήμα 1-5 παρουσιάζεται ένα πρανές από τη περιοχή της Κεντρικής Σλοβακίας με τυπική κίνηση ερπυσμού (Zaruba and Mencl, 1982). Το πρανές αναπτύσσεται σε ηφαιστειακούς σχηματισμούς που καλύπτονται από τεταρτογενείς αποθέσεις. Μια αργή κίνηση (ερπυσμός) που εκδηλώθηκε εξαιτίας της έντονης μορφολογίας, έχει προκαλέσει αστοχίες στη περιοχή, η εξέλιξη των οποίων είναι γνωστή από το παρελθόν.

Ο ερπυσμός στη ρεολογία των ιξωδοπλαστικών (βισκοπλαστικών) υλικών υποδηλώνει την αργή αύξηση της παραμόρφωσης με το χρόνο κάτω από τη δράση σταθερών τάσεων που υπερέχουν συγκεκριμένου μεγέθους, χωρίς η παραμόρφωση αυτή να φτάνει τη τιμή που αντιστοιχεί στη αντοχή του γεωυλικού. Ο ερπυσμός εκδηλώνεται είτε στη περίπτωση που το όριο ερπυσμού* είναι μικρό, είτε στη περίπτωση που ο βαθμός ενεργοποίησης της διατμητικής αντοχής (δηλ. ο λόγος της εφαρμοζόμενης διατμητικής τάσης προς τη διατμητική αντοχή) είναι υψηλός. Και οι δύο συνθήκες είναι δυνατόν να εμφανισθούν στα πρανά (Ter Stepanian, 1980).

* διατμητική τάση μετά την οποία εμφανίζεται ερπυσμός



Σχ. 1-5 Σχηματική τομή σε θέση που εκδηλώνεται ερπυσμός, στη λιγνιτοφόρα λεκάνη Handlova, Σλοβακία (Zaruba and Mencl, 1982)

(1 - αργιόλιθος, 2 - γαιάνθρακας, 3 - ανδεδίτης, 4 - θεωρούμενη ζώνη διάτμησης, 5 - πλευρικά κορήματα, 6 - ρήγμα, 7 - πηγή)

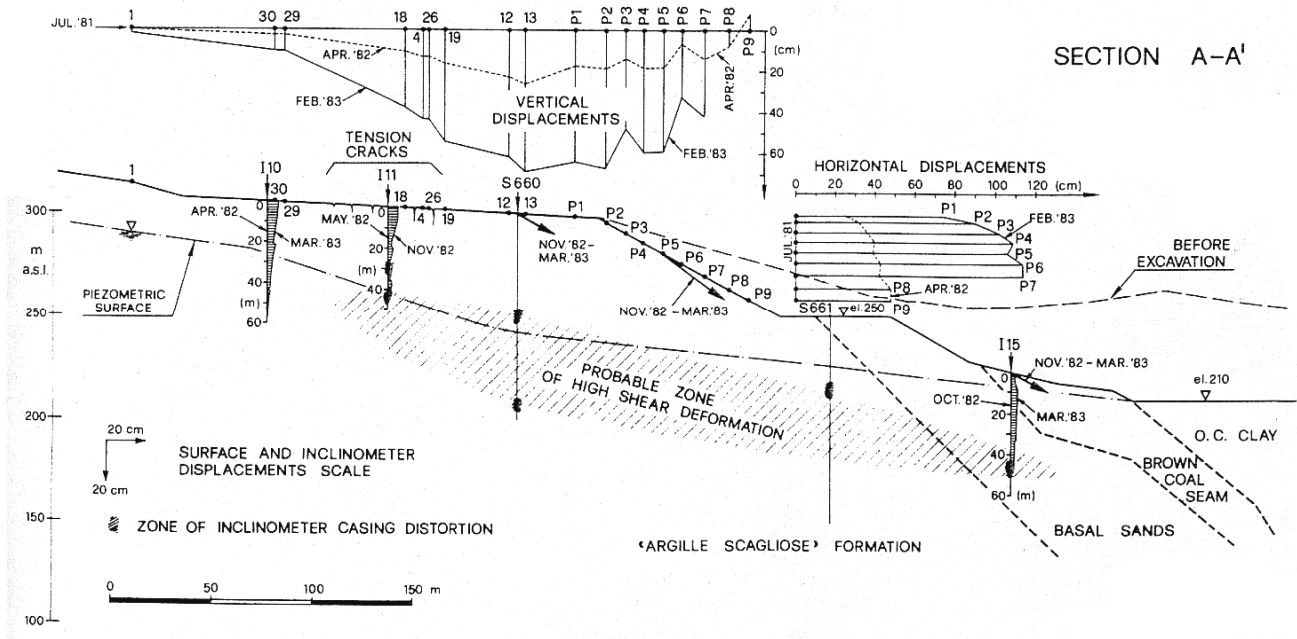
Η πρώτη περίπτωση εμφανίζεται σε επιφανειακά στρώματα, όπου εξαιτίας της αποσάθρωσης και της εποχικής μεταβολής υγρασίας και θερμοκρασίας, η διατμητική αντοχή του εδάφους δεν είναι μεγάλη, το όριο ερπυσμού είναι μικρό και ένα έντονο φαινόμενο ερπυσμού λαμβάνει χώρα (υπο - επιφανειακός ερπυσμός). Η δεύτερη περίπτωση εκδηλώνεται σε βάθος, όπου εξαιτίας της βαρύτητας και της συγκέντρωσης των διατμητικών τάσεων, ο βαθμός ενεργοποίησης της διατμητικής αντοχής είναι υψηλός (ερπυσμός βάθους).

Σε χαμηλά και μεσαία μεγέθη διατμητικών τάσεων, ο ρυθμός ερπυσμού μειώνεται βαθμιαία και το φαινόμενο εξελίσσεται με εξαιρετικά χαμηλό ρυθμό, το οποίο μπορεί να διαρκέσει δεκαετίες ή και εκατονταετίες. Όμως, σε πολύ υψηλές διατμητικές τάσεις που προσεγγίζουν τη θραύση, ο ρυθμός του ερπυσμού αυξάνει με το χρόνο και το φαινόμενο ολοκληρώνεται με την αστοχία του πρανούς (Ter Stephanian, 1980).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στη περίπτωση που οι διατμητικές τάσεις κατανέμονται ανομοιόμορφα στο πρανές, ο ρυθμός ερπυσμού μειώνεται με το χρόνο στους εδαφικούς τομείς στους οποίους οι διατμητικές τάσεις έχουν χαμηλές ή ενδιάμεσες τιμές και αυξάνει με το χρόνο στους τομείς με υψηλές διατμητικές τάσεις (φαινόμενο πύκνωσης / επικέντρωσης του ερπυσμού με το χρόνο). Σταδιακά, αναπτύσσεται μια ζώνη ερπυσμού που ορίζει μια λανθάνουσα επιφάνεια ολίσθησης. Στη ζώνη αυτή μπορεί να υπάρχουν τμήματα με πλήρη ενεργοποίηση της διατμητικής αντοχής, (ο σχηματισμός στα τμήματα αυτά βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση). Εξαιτίας της παραμόρφωσης του εδάφους μέσα σ' αυτή τη ζώνη, εμφανίζονται στην επιφάνεια ρωγματώσεις ή και ασυνέχειες οι οποίες προσδιορίζουν την έκταση της ζώνης (Ter Stephanian, 1980).

Η εξέλιξη της παραμόρφωσης, η οποία εμφανίστηκε κατά τη διάρκεια μιας εκσκαφής βάθους 90 m, σε χαοτικό melange (αποτελούμενο από έντονα τεκτονισμένους αργιλίτες και ασβεστολιθικά

τεμάχη) στο λιγνιτωρυχείο ανοικτής εκσκαφής St Barbara (Arezzo, Italy), θα μπορούσε να αποδοθεί σε ερπυσμό βάθους (Σχ. 1-6, D' Elia, *et al.*, 1984). Το μεγάλο πάχος της ζώνης ερπυσμού δικαιολογεί τις μεγάλες μετακινήσεις που μετρήθηκαν στην επιφάνεια.



Σχ. 1-6 Χαρακτηριστικά της παραμόρφωσης των πρανών στα διάφορα στάδια εκσκαφής του λιγνιτωρυχείου St Barbara (D' Elia *et al.*, 1984)

1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Το τασικό πεδίο που διαμορφώνεται με την ανάπτυξη μιας εκσκαφής, προκαλεί παραμορφώσεις των γεωλογικών σχηματισμών που αν υπερβούν μια οριακή τιμή, το πρανές αστοχεί.

Για μια αξιόπιστη εκτίμηση της ευστάθειας των πρανών οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας θα πρέπει να διερευνώνται σε σχέση με τη γεωλογική δομή και τις μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών. Παρακάτω, αναλύονται οι κυριότεροι μηχανισμοί που προκαλούν αστοχίες στα εδαφικά πρανή, χωρίς όμως να γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο τύπο της αστοχίας (κυκλικός τομέας, σφηνοειδής κ.λ.π.), δεδομένου ότι αυτός διαμορφώνεται ανάλογα με τις τοπικές συνθήκες.

1.2.1 Μηχανισμοί αστοχίας των πρανών

Η αστοχία (έναρξη διαρροής) του εδάφους εμφανίζεται όταν η διατμητική τάση προσεγγίζει στο 60% της διατμητικής του αντοχής και εκδηλώνεται, όπως αναφέρουν οι Zaruba and Mencl (1982), είτε :

- με **αύξηση του όγκου** (φαινόμενο που στο διάγραμμα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης εκδηλώνεται σαν χαλάρωση /strain softening και στη σχέση όγκου - ανηγμένης παραμόρφωσης σαν **διασταλτικότητα**[†] /dilatancy) και εξελίσσεται σε **ψαθυρή θραύση** με την εμφάνιση μιας λεπτής επιφάνειας ολίσθησης, είτε
- με **μείωση του όγκου**, (φαινόμενο που στο διάγραμμα τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης εκδηλώνεται σαν κράτυνση /strain hardening και στη σχέση όγκου - ανηγμένης παραμόρφωσης σαν **συρρίκνωση** ή αρνητική διόγκωση /negative dilatancy) και εξελίσσεται σε μία **όλκιμη**[‡] **διαρροή**[§] /ductile failure με την ανάπτυξη μιας διατμητικής ζώνης μεγάλου πάχους.

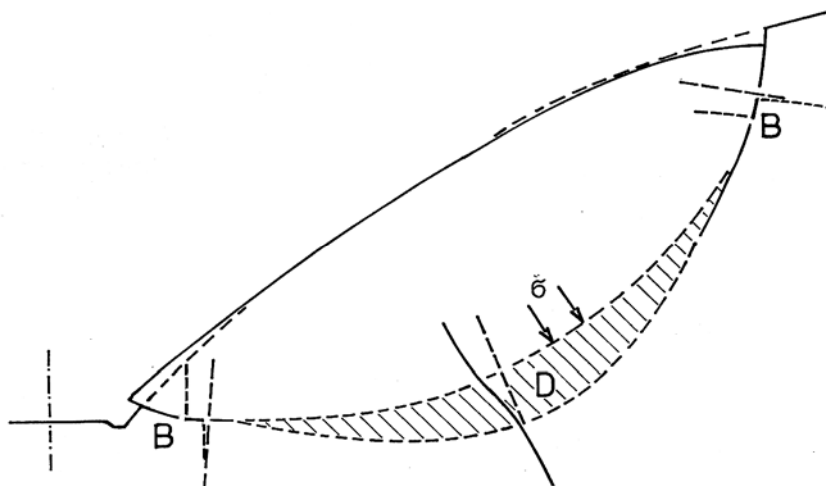
Η χαλάρωση και ψαθυρή θραύση εμφανίζεται κάτω από συνθήκες σχετικά μικρών πιέσεων της εδαφικής μάζας, ενώ η κράτυνση και η όλκιμη διαρροή λαμβάνει χώρα όταν η μάζα δέχεται υψηλές πιέσεις (Σχ.1-7). Η τάση που οριοθετεί αυτούς τους δύο τύπους θραύσης είναι της τάξης των 0,4 MPa για τη στιφρή άργιλο και 0,8 MPa για τον αργιλίτη (Zaruba and Mencl, 1982).

Η ζώνη που υφίσταται όλκιμη διαρροή, προκαλεί εξαιτίας του πάχους της μεγάλες μετακινήσεις, ακόμα και όταν ο κλασσικός συντελεστής ευστάθειας του πρανούς είναι υψηλός - της τάξης του 1,5 (Mencl, 1977). Κατά συνέπεια, η διερεύνηση της ευστάθειας ενός πρανούς εκσκαφής με βάση τις συνθήκες οριακής ισορροπίας δεν ερμηνεύει τη συμπεριφορά του πρανούς όσον αφορά τις παρατηρούμενες παραμορφώσεις.

[†] διόγκωση

[‡] αστοχία με σημαντικές παραμορφώσεις μέχρι τη θραύση. Θα μπορούσε επίσης να αποδοθεί με τον όρο “ρευστική” ή “ρεολογική”

[§] άδηλη θραύση



Σχ. 1-7 Ανάπτυξη ψαθυρής θραύσης (λεπτή επιφάνεια ολίσθησης B) και όλκιμης διαρροής (μεγάλου πάχους διατμητική ζώνη D) (Zaruba and Mencl, 1982 από Mencl, 1968)

Είναι γεγονός ότι η μείωση του όγκου με τη διάτμηση (κάτω από μεγάλο υπερκείμενο φορτίο) και η όλκιμη συμπεριφορά, δεν είναι δυνατόν να συνεχισθούν απεριόριστα. Η μείωση του όγκου σταδιακά φθίνει και η μάζα αρχίζει να κινείται προς τα κατάντη λόγω ερπυσμού. Αν όμως, για κάποιο λόγο οι τάσεις που ωθούν τη μάζα σε ολίσθηση αυξηθούν, τότε μια μικρού πάχους, ψαθυρή επιφάνεια ολίσθησης, αναπτύσσεται.

Οι D' Elia *et al.* (1984) αναφέρουν ότι γεωολικά τα οποία επιδεικνύουν όλκιμη διαρροή κάτω από υψηλές ενεργές τάσεις, ευνοούν φαινόμενα ερπυσμού στο εσωτερικό του πρανούς, ακόμα και αν τα επίπεδα της διατμητικής τάσης είναι σχετικά χαμηλά. Δοκιμές άμεσης διάτμησης στους αργιλίτες του λιγνιτωρυχείου ανοικτής εκσκαφής St Barbara (Arezzo, Italy), έδειξαν μείωση του όγκου κάτω από μεγάλου μεγέθους ενεργές τάσεις και διασταλτικότητα σε μικρά ενεργά ορθά φορτία. Με βάση τα παραπάνω, οι D' Elia *et al.* (1984) υποστηρίζουν ότι η κινητικότητα που εμφανίστηκε στο Ορυχείο, οφείλεται σε ερπυσμό βάθους που οδήγησε σε όλκιμη διαρροή τη βάση της κατολίσθησης και σε ψαθυρή θραύση τα ανώτερα και κατώτερα τμήματα του πρανούς.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι στη περίπτωση ύπαρξης υπεδαφικού νερού, καθώς ο όγκος του εδάφους στη ζώνη της όλκιμης συμπεριφοράς μειώνεται, η πίεση του νερού των πόρων αυξάνει και η ευστάθεια του πρανούς είναι μικρότερη της αναμενόμενης. Μια τέτοια αύξηση της πίεσης των πόρων επέρχεται πολύ γρήγορα και η θραύση του πρανούς εμφανίζεται σχεδόν αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής. Αντίθετα, στα πρανά που επιδεικνύουν διασταλτικότητα, η αύξηση του όγκου του εδάφους κατά μήκος της αναπτυσσόμενης επιφάνειας ολίσθησης, μειώνει προσωρινά τη πίεση των πόρων και η θραύση επέρχεται με κάποια καθυστέρηση.

1.2.2 Προοδευτική θραύση σε πρανή εκσκαφών

Η προοδευτική θραύση (Bjerrum, 1967), αναφέρεται σε μια μη ομοιόμορφη ενεργοποίηση της διατμητικής αντοχής κατά μήκος της αναπτυσσόμενης επιφάνειας αστοχίας. Παράδειγμα αποτελεί η ανομοιόμορφη φόρτιση ενός ψαθυρού εδάφους, με αποτέλεσμα κάποια εδαφικά στοιχεία να φτάσουν την αντοχή τους ταχύτερα από κάποια άλλα και να αρχίσει να αναπτύσσεται μια επιφάνεια αστοχίας. Αλλά και στη περίπτωση ομοιόμορφης φόρτισης μη ομογενών εδαφικών μαζών, όπου τα επιμέρους στρώματα είναι διαφόρου ακαμψίας, μια προοδευτική ανάπτυξη θραύσης μπορεί να εκδηλωθεί από τα πιο δύσκαμπτα (που επιδεικνύουν μικρή παραμορφωσιμότητα) προς τα πιο συμπίεστα στρώματα (Andrei *et al.*, 1996). Με περαιτέρω φόρτιση, η σχετική μετακίνηση αυξάνει και η αντοχή μειώνεται από τη μέγιστη προς την υπολειπόμενη (παραμένουσα) τιμή της. Κατάρρευση της εδαφικής μάζας μπορεί να εκδηλωθεί πριν τη πλήρη ανάπτυξη της επιφάνειας αστοχίας.

Ο μηχανισμός της προοδευτικής θραύσης αναγνωρίστηκε πριν πολλά χρόνια (Terzaghi and Peck, 1948, Taylor, 1948) και στο μηχανισμό αυτό αποδίδονται αστοχίες εκσκαφών και επιχωμάτων σε πλαστικές αργίλους, στις Βρετανικές εθνικές οδούς (Potts *et al.*, 1967). Σ' αυτές τις αστοχίες, η μέση ενεργοποιούμενη αντοχή κατά τη θραύση ήταν σημαντικά μικρότερη από τη αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών και η προοδευτική θραύση θεωρήθηκε σαν ο γενεσιουργός μηχανισμός τους. Είναι όμως βέβαιο ότι και εξωγενείς παράγοντες (όπως η αποσάθρωση) πρέπει να επηρέασαν σημαντικά τη συμπεριφορά αυτών των πρανών.

Πολύ καλή ανάλυση του μηχανισμού της προοδευτικής θραύσης σε προστερεοποιημένες αργίλους και αργιλικούς σχιστολίθους δόθηκε από τον Bjerrum (1967). Αναφέρει ότι η αποσάθρωση τους συνοδεύεται από μία βαθμιαία καταστροφή των δεσμών και απελευθέρωση ενέργειας που έχει αποθηκευτεί λόγω της παραμόρφωσης που έχουν υποστεί οι σχηματισμοί. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί την ανάγκη διόγκωσης του εδάφους (κατά τη διεύθυνση της ολίσθησης) και συμβάλλει στην ανάπτυξη προοδευτικής θραύσης.

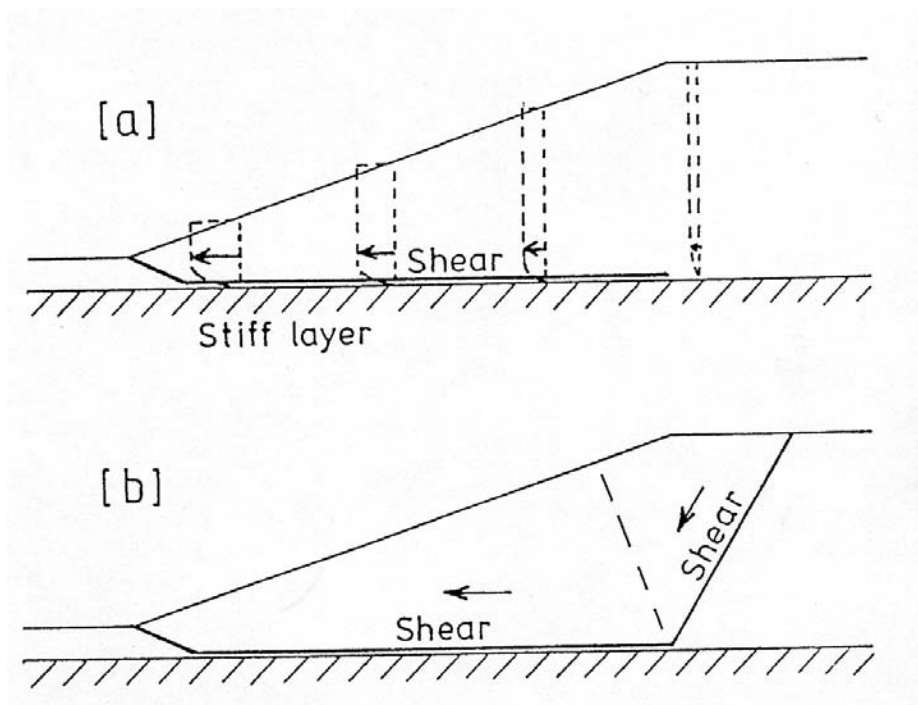
Στην εκδήλωση προοδευτικής θραύσης συμβάλλουν επίσης και οι μεγάλες παραμορφώσεις που προκαλεί η όλκιμη διαρροή των γεωλογικών σχηματισμών (MencI, 1977). Όταν ένα τμήμα του σχηματισμού φορτίζεται με μεγάλες ορθές τάσεις και εκδηλώνει όλκιμη διαρροή, ενώ το παρακείμενο τμήμα του επιδεικνύει διασταλτικότητα και ψαθυρή διάτμηση, το διαφορετικό μέγεθος της παραμόρφωσης που εκδηλώνεται οδηγεί στην ανάπτυξη προοδευτικής αστοχίας.

Ένας ακόμα παράγοντας που συμβάλλει στην ανάπτυξη προοδευτικής θραύσης ενός πρανούς είναι η υψηλή πλευρική τάση. Η τάση αυτή εκτονώνεται με την εκσκαφή, μέσω της διόγκωσης του γεωλογικού σχηματισμού, (γιατί διαφορετικά δεν μπορεί να επέλθει ισορροπία κατά την οριζόντια), και στη περίπτωση που η εκτόνωση αυτή είναι μεγάλη, οι ανηγμένες παραμορφώσεις ως προς ένα

υποκείμενο στιφρό στρώμα ή ως προς ένα αρμό στρώσης, είναι δυνατόν να προκαλέσουν υπέρβαση της αντοχής.

Αποτέλεσμα είναι να αναπτυχθεί μια επιφάνεια διάτμησης (Σχ. 1-8α), στην οποία η διατμητική αντίσταση μειώνεται με τη παραμόρφωση. Αυτός ο μηχανισμός έχει διαπιστωθεί από τον Vaughan (1991), σε μια βαθιά εκσκαφή στην Οξφόρδη.

Μετά την ανάπτυξη σε κάποιο βάθος, μιας επιφάνειας μειωμένης διατμητικής αντοχής, είναι πιθανό να προκληθεί κίνηση από μια σφήνα που οδηγείται με τη βαρύτητα (Σχ. 1-8β). Ένας τέτοιος μηχανισμός μπορεί να προκαλέσει αστοχίες σε μεγάλο βάθος, οι οποίες δεν μπορούν να εξηγηθούν μόνο από τις δυνάμεις βαρύτητας.



Σχ. 1-8 Προοδευτική θραύση σε πρανές εκσκαφής σε στιφρή άργιλο (Vaughan, 1991)

- (α) ανάπτυξη ζώνης διάτμησης σε βάθος, με οριζόντια διόγκωση του στρώματος που βρίσκεται πάνω σ' ένα στιφρό σχηματισμό
 (β) επιβάρυνση της ζώνης διάτμησης από ολίσθηση λόγω βαρύτητας

Τέλος, προοδευτική θραύση είναι δυνατόν να προκληθεί και με τη διόγκωση του πρανούς της εκσκαφής λόγω απορρόφησης υγρασίας, είτε από την επιφάνεια του πρανούς είτε μέσω ενός διαπερατού γεωλογικού στρώματος. Με τη διόγκωση προκαλούνται παραμορφώσεις που συμβάλλουν στην εκδήλωση προοδευτικής θραύσης.

1.2.3 Ερπυσμός και προοδευτική θραύση

Στη περίπτωση γεωλογικών σχηματισμών που επιδεικνύουν όλκιμη διαρροή και ερπυσμό, ενεργοποιούνται δύο μηχανισμοί: η “επικέντρωση” (πύκνωση) του ερπυσμού και “η προοδευτική θραύση” (Ter Stepanian, 1980).

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, ο ρυθμός του ερπυσμού αυξάνει με το χρόνο στους εδαφικούς τομείς με υψηλή φόρτιση (που προσεγγίζει τη θραύση) και οι οποίοι βρίσκονται στον κεντρικό τομέα της ζώνης ερπυσμού, κατά μήκος της αναπτυσσόμενης επιφάνειας ολίσθησης. Το αποτέλεσμα είναι η βαθμιαία αύξηση της παραμόρφωσης και η εξέλιξη του φαινομένου σε κατολίσθηση.

Στη περίπτωση που προστεροποιημένοι άργιλοι και κανονικά στερεοποιημένοι ιλυώδεις άργιλοι σχηματίζουν αντίστοιχα πρανή με ίδια κλίση, η ζώνη ερπυσμού στο πρανές της πρώτης περίπτωσης θα είναι πολύ μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με το πρανές της δεύτερης, εξαιτίας της διαφορετικής ρεολογικής καμπύλης των δύο σχηματισμών. Σαν αποτέλεσμα, το τελικό μέγεθος της μετατόπισης πριν από τη θραύση θα είναι σημαντικά μεγαλύτερο στη περίπτωση των προστεροποιημένων αργίλων, σε σχέση με την περίπτωση των κανονικά στερεοποιημένων ιλυούχων αργίλων. Το γεγονός αυτό εξηγεί την εμφάνιση παραμορφώσεων (λόγω ερπυσμού) στα πρανή των προστεροποιημένων αργίλων πολύ πριν από την καταστροφή, φαινόμενο που δεν εμφανίζεται σε κανονικά στερεοποιημένες ιλυώδεις αργίλους. Στα πρανή αυτά οι ενδείξεις μιας επερχόμενης κατολίσθησης παρουσιάζονται πολύ αργά και μερικές φορές δεν γίνονται αντιληπτές (Ter Stepanian, 1980).

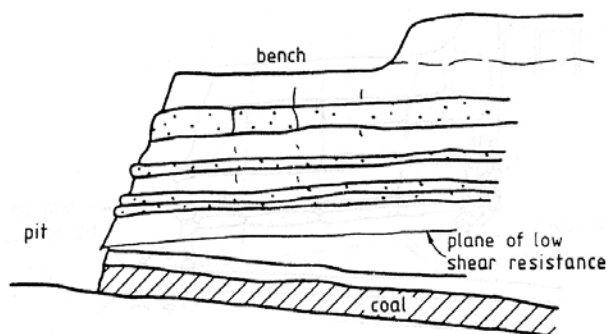
1.2.4 Αστοχίες σε υφιστάμενες επιφάνειες αδυναμίας

Σε μια στρωματογραφική ακολουθία, λόγω της ανομοιογένειας των γεωλογικών σχηματισμών, η εκτόνωση των τάσεων που προκαλείται με την εκσκαφή, συχνά έχει σαν αποτέλεσμα τη διαφορική κίνηση μεταξύ των στρωμάτων (Mallett, 1981). Πιο συγκεκριμένα, όταν η οριζόντια τασική συνιστώσα (η οποία αυξάνει με το βάθος), υπερβεί τη διατμητική αντοχή ενός επιπέδου στρώσης ή ενός λεπτού στρώματος μικρής διατμητικής αντοχής (Σχ. 1-9a), τότε θα εμφανισθεί μια σχετική κίνηση, με αποτέλεσμα τη μείωση των δυνάμεων οι οποίες προκαλούν τη διάτμηση (Cox, 1981).

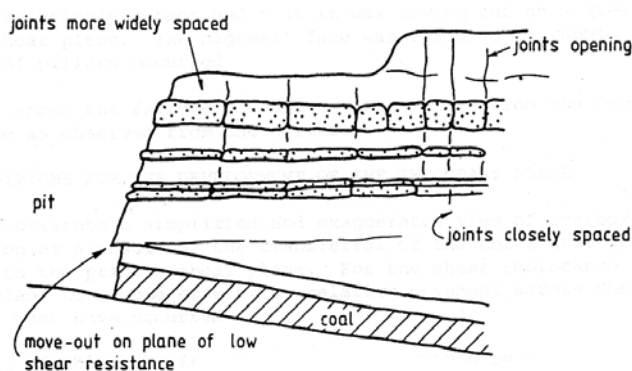
Με την εξέλιξη της εκσκαφής, η πλευρική στήριξη μειώνεται, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται στο γεωλογικό σχηματισμό εφελκυστικές τάσεις που προκαλούν διεύρυνση και ανάπτυξη ρωγμών (Σχ. 1 - 9b). Στην περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβούν την αντοχή του σχηματισμού, ένα δευτερογενές επίπεδο διάτμησης αναπτύσσεται και αστοχία της όλης μάζας θα πρέπει να αναμένεται (Σχ. 1-9c).

Ο παραπάνω μηχανισμός κινητικότητας και αστοχίας, διαπιστώθηκε σε ορυχείο της λεκάνης Bowen (Αυστραλία) από τους Cox (1981) και Mallett (1981). Κατά την εκδήλωση της αστοχίας,

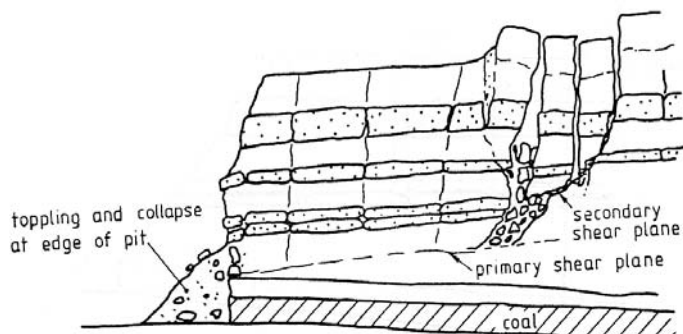
αναπτύχθηκαν δύο επιφάνειες θραύσης: η αρχική επιφάνεια, με μικρή κλίση προς το όρυγμα (Σχ. 1-9b), κατά την οποία παρουσιάστηκε η αρχική κινητικότητα λόγω της εκτόνωσης των τάσεων και μια δευτερογενής επιφάνεια η οποία τέμνει το αρχικό επίπεδο ολίσθησης σχηματίζοντας ένα κινητήριο σφηνοειδές τέμαχος που συμβάλλει στην κινητικότητα της μάζας προς το όρυγμα (Σχ. 1-9b και Σχ. 1-9c).



(a) Highwall geometry soon after excavation.



(b) Highwall geometry after stress relaxation.



(c) Highwall geometry after failure.

Σχ. 1-9 Μηχανισμοί κινητικότητας σε ανθρακωρυχείο στη λεκάνη Bowen (Cox, 1981)

1.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τους μηχανισμούς παραμόρφωσης και την κινητικότητα στα περιθώρια μιας βαθιάς εκσκαφής (δάπεδο, πρανή και στέψη πρανών) είναι :

- οι αρχικές τάσεις και η μεταβολή του τασικού πεδίου που προκαλείται με την εκσκαφή
- η γεωλογική σύσταση - δομή και οι μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών
- η υπεδαφική υγρασία και οι μεταβολές της
- οι διαστάσεις (γεωμετρία) της εκσκαφής
- οι δονήσεις, τεχνητές (λόγω εξόρυξης) ή φυσικές (λόγω σεισμών).

Η γεωμετρία (σχήμα, έκταση και βάθος εκσκαφής), όπως και οι δονήσεις, επηρεάζουν κρίσιμα το μέγεθος και την κατανομή των κινήσεων. Εντούτοις, δεν απέτέλεσαν αντικείμενο εμπεριστατωμένης διερεύνησης στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, δεδομένου ότι δεν αφορούν αμιγώς γεωτεχνικές παραμέτρους.

Όσον αφορά του υπόλοιπους παράγοντες, ο συντελεστής βαρύτητας τους διαφέρει σύμφωνα με την ανάλυση που ακολουθεί.

1.3.1 Τασικό πεδίο

1.3.1.1 Τασικό πεδίο πριν την εκσκαφή

Η επιφάνεια του εδάφους είναι πάντα ελεύθερη τανυσμού (εφελκυστικών τάσεων) και η κατακόρυφη ορθή τάση σ' ένα σημείο του υπεδάφους είναι ανάλογη του μοναδιαίου βάρους του γεωυλικού και του βάθους που βρίσκεται το θεωρούμενο σημείο (λιθοστατική σχέση). Η οριζόντια τάση αντίστοιχα, είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με βάση την κατακόρυφη τάση και τη θεωρία της ελαστικότητας (λόγο Poisson).

Εντούτοις, στις προστερεοποιημένες αργίλους, τα γεωλογικά φορτία κάτω από τα οποία έχουν στερεοποιηθεί, έχουν προκαλέσει μικρού μεγέθους βισκοελαστική παραμόρφωση και οι οριζόντιες τάσεις μέσα στο ίζημα δεν μπορούν να υπολογισθούν αξιόπιστα με βάση τα προαναφερόμενο σκεπτικό.

Γενικά, στους περισσότερους τύπους πετρωμάτων, από τους πολύ μαλακούς προστερεοποιημένους αργιλίτες μέχρι τα υψηλότερης αντοχής μεταμορφωμένα πετρώματα, οι μετρούμενες οριζόντιες τάσεις είναι μεγαλύτερες από τις κατακόρυφες ($k_0^{**} > 1$). Ο Peterson (1958) αναφέρει ότι κατά την έρευνα σε φράγμα στο Νότιο Saskatchewan (Δυτικός Καναδάς), η οριζόντια τάση σε προφορτισμένο αργιλικό σχιστόλιθο (σχηματισμός Bearpaw) εκτιμήθηκε περίπου 150% της κατακόρυφης.

Πολλοί ερευνητές στο χώρο της Εδαφομηχανικής αποδίδουν τις τιμές αυτές ($k_0 > 1$) στη διατηρούμενη ενέργεια παραμόρφωσης (stored strain energy) η οποία προκαλεί διογκώσεις και πλευρική ανάπτυξη τάσεων (Bjerrum, 1967).

Επίσης, όπως αναφέρουν οι Brady and Brown (1985), μέχρι το βάθος μεταλλευτικού ενδιαφέροντος, η διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σπάνια ταυτίζεται με την κατακόρυφο. Και τούτο, εξαιτίας της πολύπλοκης γεωλογικής ιστορίας και της τασικής διαδρομής (λόγω πτυχωσεων, ρηγματώσεων κ.λ.π.) που ακολούθησε το στοιχειώδες τμήμα του γεωυλικού μέχρι να φθάσει στη τρέχουσα κατάσταση ισορροπίας.

Με βάση τα παραπάνω, είναι φανερό ότι ο προσδιορισμός της τασικής κατάστασης στο υπέδαφος, είναι ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα.

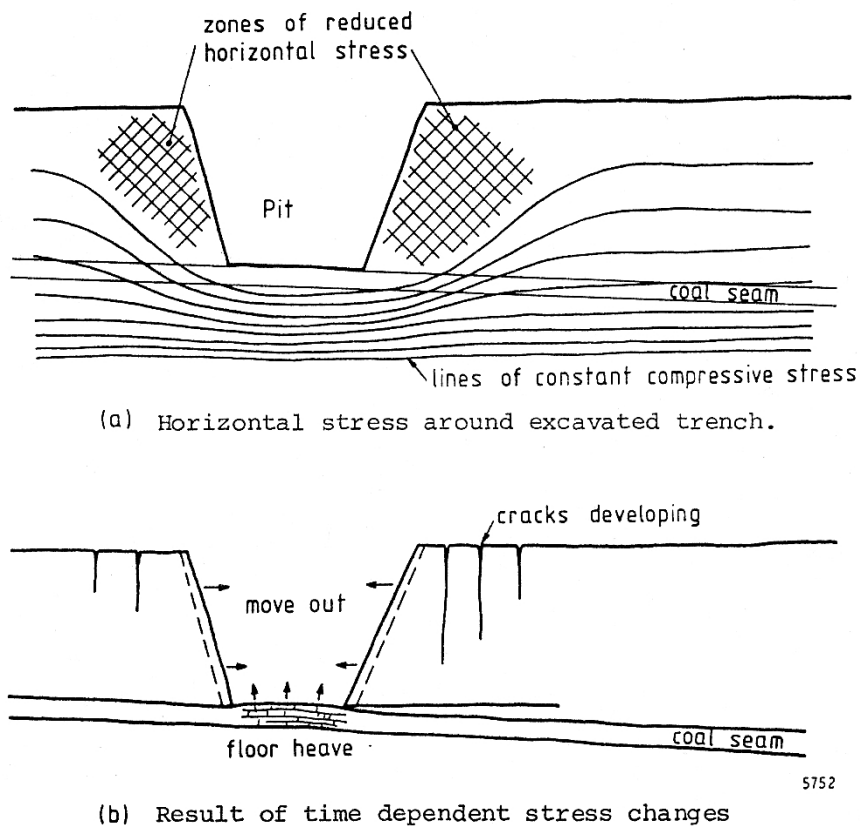
1.3.1.2 Μεταβολή του τασικού πεδίου με την εκσκαφή

Οι οριζόντιες τάσεις (οι οποίες όπως αναφέρθηκε προηγούμενα αυξάνουν με το βάθος), μεταβάλλονται με την εκσκαφή. Με την εκβάθυνση αναπτύσσονται υψηλές διατμητικές τάσεις και οι μεγαλύτερες τιμές τους εμφανίζονται στο πόδα του πρανούς. Εάν το μέγεθος τους υπερβεί τη διατμητική αντοχή του γεωλογικού σχηματισμού, θα εκδηλωθεί σχετική κίνηση ως προς ένα αναπτυσσόμενο επίπεδο διάτμησης, γεγονός που θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των δυνάμεων που το προκάλεσαν. Όπως αναφέρει ο Cox (1981), αυτή η κίνηση θα σταματήσει όταν οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στο επίπεδο αστοχίας εξισορροπήσουν τις διατμητικές δυνάμεις που προκαλούν την κίνηση.

Στο Σχήμα 1-10α, οι ισοκαμπύλες αφορούν τη συμπιεστική (θλιπτική) οριζόντια τάση που διαμορφώνεται με την εκσκαφή ενός ορυχείου. Στο υπερκείμενο του γαιάνθρακα στρώμα, εμφανίζεται μια μείωση στη συμπιεστική τάση κοντά στο μέτωπο του πρανούς, πιθανόν μέχρι του μεγέθους που προϋφιστάμενες ασυνέχειες αρχίσουν να διευρύνονται. Απεναντίας, στο δάπεδο του

** λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη ενεργή τάση

ορυχείου η συμπίεστική τάση αυξάνει, και όταν υπερβεί ένα συγκεκριμένο μέγεθος, προκαλεί αναθόλωση του δαπέδου.



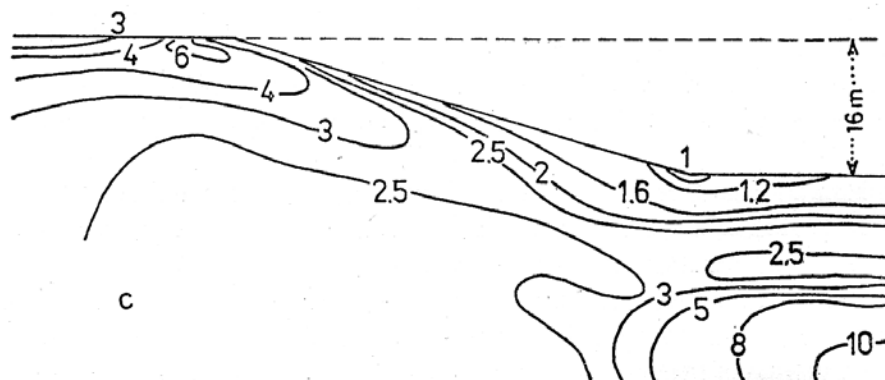
Σχ. 1-10 Αποτελέσματα εκσκαφής ενός ορύγματος (Cox, 1981)

Μέρος των θλιπτικών τάσεων που αναπτύσσονται με την εκσκαφή, θα μεταβιβαστεί βαθύτερα του δαπέδου, στο υποκείμενο στρώμα (Σχήμα 1-10b). Το στρώμα αυτό με τη σειρά του θα υπερφορτισθεί, θα καμφθεί προς τα επάνω και θα μεταβιβάσει μέρος των τάσεων στο υποκείμενο του. Με αυτό το τρόπο η αποφόρτιση και η κάμψη προχωρά σε βάθος. Ο μηχανισμός αυτός δίδει μια εξήγηση για τις ανοδικές κινήσεις (αναθολώσεις) που έχουν παρατηρηθεί σε ορυχεία ακόμα και σε μεγάλα βάθη (Cox, 1981).

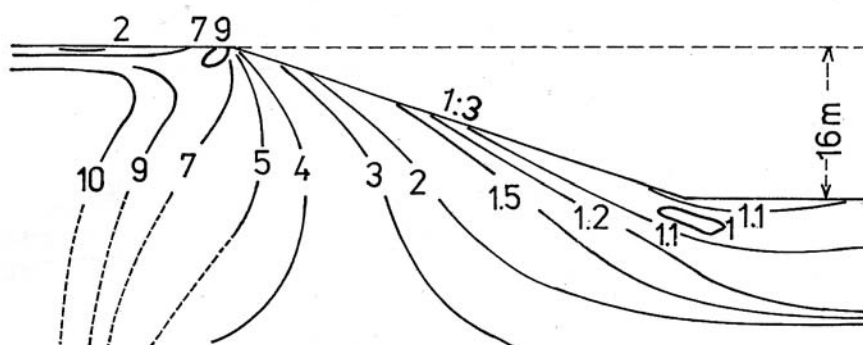
Επίσης, οι Zaruba and Mencl (1982) αναφέρουν ότι όπου υπάρχουν μεγάλου μεγέθους εγκλωβισμένες οριζόντιες τάσεις (δηλ. υψηλός συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία k_0) όπως συμβαίνει στις προστερεοποιημένες αργίλους, οι εδαφικές παραμορφώσεις γύρω από τις εκσκαφές είναι μεγάλες, ακόμα και σε σχετικά μικρά βάθη. Για εδάφη με σχετικά χαμηλές τιμές του k_0 , οι παραμορφώσεις είναι μικρότερες.

Το Σχήμα 1-11 παρουσιάζει τις ισοκαμπύλες των συντελεστών ευστάθειας σ' ένα πρανές εκσκαφής βάθους 16 m σε σφιγρή άργιλο, με συντελεστή $k_0=0,75$, ενώ το Σχήμα 1-12 παρουσιάζει την ίδια εκσκαφή θεωρώντας ένα συντελεστή $k_0=1$ (Zaruba and Mencl, 1982). Οι συντελεστές ευστάθειας στο κατώτερο τμήμα του πρανούς μειώνονται όταν το $k_0=1$ (Σχ. 1-12), με τις ελάχιστες τιμές να

εντοπίζονται όχι κοντά στην επιφάνεια αλλά μέσα στην εδαφική μάζα, κάτω από το πόδα του πρανούς. Η περιοχή αυτή συμπίπτει με τη θέση που αναπτύσσονται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις.

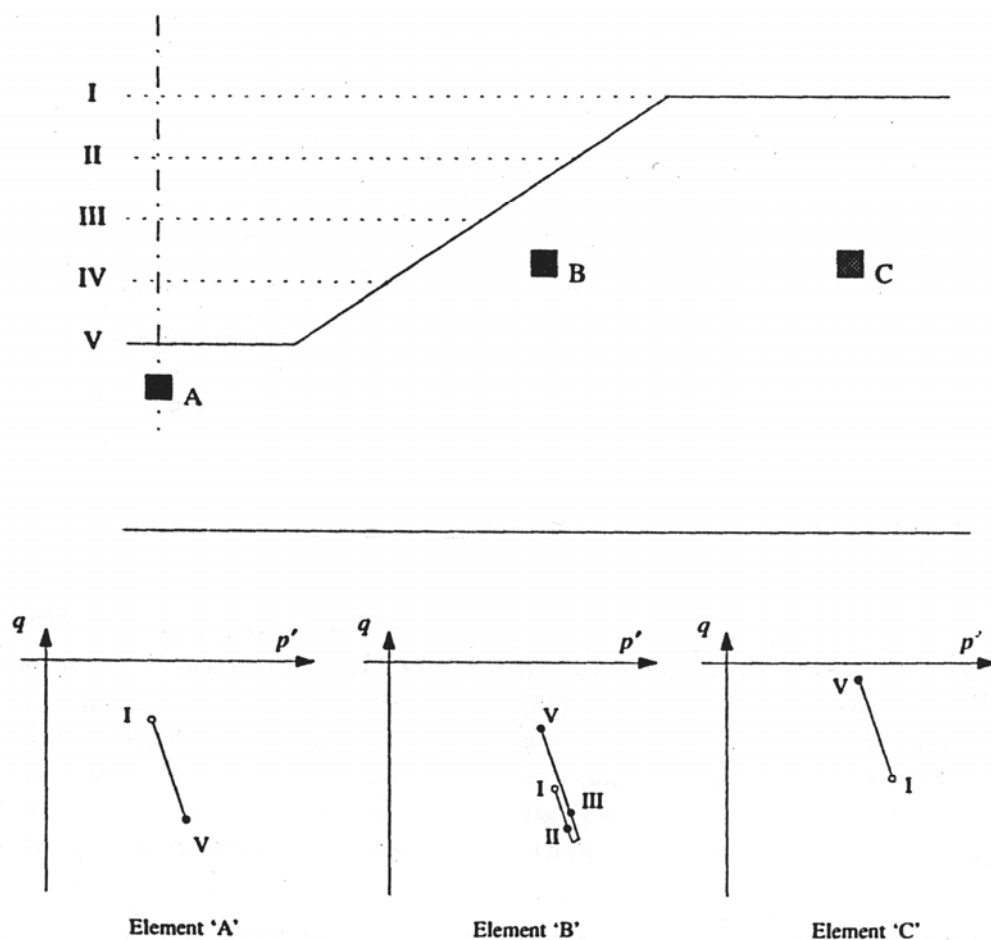


Σχ. 1-11 Ισοκαμπύλες συντελεστών ασφάλειας πρανούς σε στιφρή άργιλο με $k_0=0.75$ και ύψος 16m. Οι μικρότερες τιμές των συντελεστών ασφάλειας με την αύξηση του βάθους αποδίδεται στις μικρές τιμές της αρχικής οριζόντιας τάσης. (Zaruba and Mencil, 1982 από Mejzlik and Mencil, 1975)



Σχ. 1-12 Ισοκαμπύλες συντελεστών ασφάλειας του πρανούς του Σχ. 1-11, θεωρώντας $k_0=1$ (Zaruba and Mencil, 1982)

Επίσης, ο Pierpoint (1996), ερευνώντας το τασικό πεδίο που διαμορφώνεται με την εκσκαφή, αναφέρει ότι ακριβώς κάτω από το δάπεδο (Σχ. 1-13, Στοιχείο Α) η μέση ενεργή τάση (p') αυξάνει από το πρώτο ως το τελευταίο στάδιο της εκσκαφής, ενώ η αποκλίνουσα τάση (q) αντίστοιχα, μειώνεται. Για ένα στοιχείο (Β) πίσω ακριβώς από το πρανές (Σχ. 1-13), το p' αυξάνει (με μειούμενο το q) για τα στάδια εκσκαφής Ι και ΙΙ, ενώ στη συνέχεια, όταν το επίπεδο της εκσκαφής φτάσει το επίπεδο του συγκεκριμένου στοιχείου εκδηλώνεται μία αναστροφή και το p' μειώνεται με αντίστοιχη αύξηση του q μέχρι το τελευταίο στάδιο της εκσκαφής. Για μια θέση πολύ πίσω από το πρανές (Στοιχείο C), το p' μειώνεται και το q αυξάνει από το πρώτο έως το τελευταίο στάδιο.



Σχ. 1-13 Αναστροφή της φόρτισης στα διάφορα στάδια μιας εκσκαφής (Pierpoint, 1996)

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε μια ανάλυση της συμπεριφοράς μιας εκσκαφής, κάθε εδαφικό στοιχείο θα πρέπει να προσομοιώνεται ανάλογα με τη θέση του. Δυστυχώς αυτό εγείρει ερωτηματικά όσον αφορά τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθόδων όταν η επίδραση της περιστροφής των αξόνων των τάσεων δεν λαμβάνεται υπόψη.

1.3.2 Γεωλογική δομή και ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών

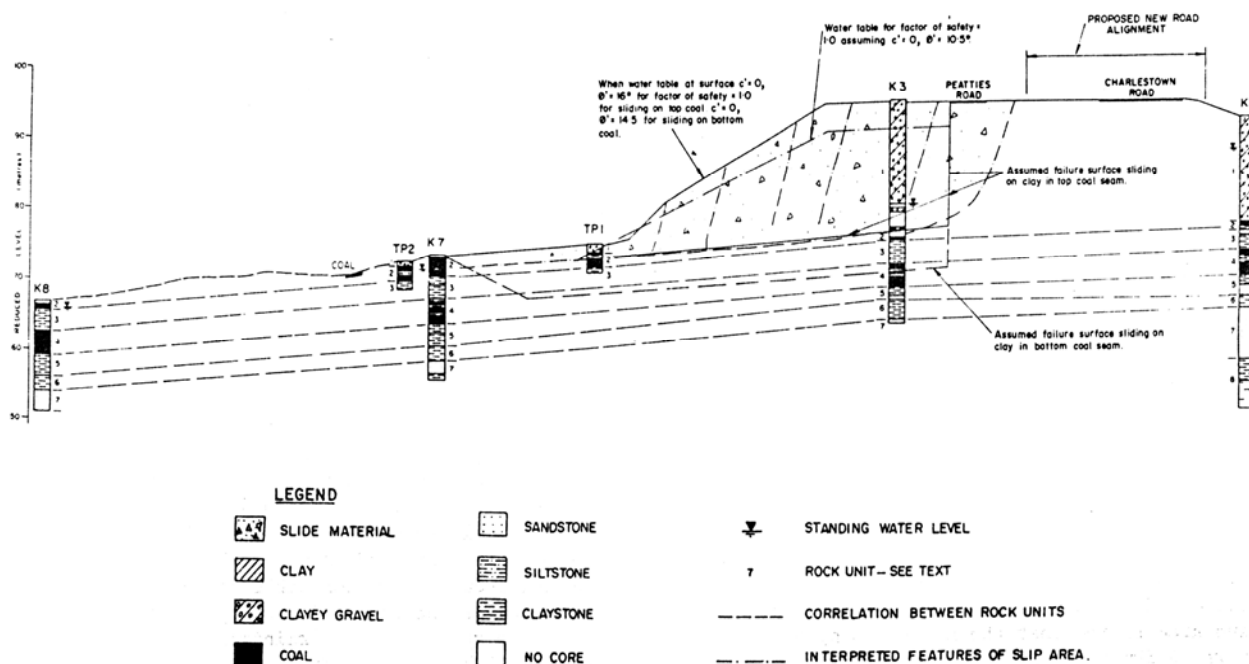
1.3.2.1 Γεωλογία, Στρωματογραφία, Τεκτονική

Η ανάλυση της κινητικότητας των πρανών, γίνεται πιο περίπλοκη κάτω από σύνθετες γεωλογικές και μορφολογικές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές καθορίζουν και το τύπο της πιθανής αστοχίας (ολίσθηση κατά κυκλικό τομέα, σφήνα, ανατροπή).

Δεδομένου όμως ότι η πολυπλοκότητα των γεωλογικών συνθηκών (συνδυασμός λιθολογίας και τεκτονικής) είναι θέμα τοπικού χαρακτήρα, η επίδραση της στρωματογραφίας και της τεκτονικής στη

συμπεριφορά των πρηνών τεκμηριώνεται παρακάτω με αναφορά σε συγκεκριμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τη στρωματογραφία, οι επιφάνειες στρώσης έχουν πολλές φορές μειωμένη διατμητική αντοχή και συμβάλλουν στην κινητικότητα των πρηνών. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα κατολισθήσεων στο λιγνιτωρυχείο του Newcastle, (Fell *et al.*, 1988). Η μειωμένη διατμητική αντοχή και οι αστοχίες ως προς τις επιφάνειες στρώσης (Σχ. 1-14), προήλθαν από τη διαφορετική στερεοποίηση των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών κατά τη διάρκεια της ιζηματογένεσης, από διαφορικές κινήσεις κατά τη διάρκεια των πτυχώσεων και από την εκτόνωση των τάσεων κατά τη διαμόρφωση της σύγχρονης μορφολογίας.

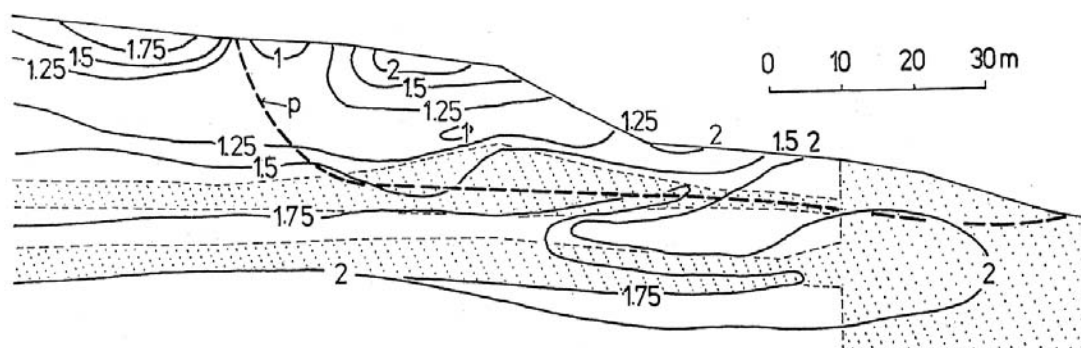


Σχ. 1-14 Κατολίσθηση σε λιγνιτωρυχείο δίπλα στο State Highway 23 στο Newcastle, Αυστραλία, (Fell *et al.*, 1988)

Όσον αφορά τη λιθολογία, σχηματισμοί που επιδεικνύουν χαλάρωση, προκαλούν αστάθεια όταν βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις στη γεωλογική δομή του πρηνούς. Τα στρώματα αυτά είναι πιθανόν να επιδείξουν σημαντική μείωση της αντοχής τους σε συνθήκες που διαμορφώνονται κατά την εκμετάλλευση. Στο μηχανισμό αυτό αποδόθηκε η αστοχία πρηνών στο λιγνιτωρυχείο Goonyella (λεκάνη Bowen, Αυστραλία) (Mallett and Wooltorton, 1982).

Μια από τις πιο σοβαρές καταστάσεις διαμορφώνεται όταν ψαθυρά στρώματα (χαλίκια) υπέρκεινται περισσότερο πλαστικών στρωμάτων (αργίλων). Το Σχήμα 1-15 παρουσιάζει ένα πρηνές στο νεογενές του Kosice (Ανατολική Σλοβακία). Οι στικτές ζώνες αντιστοιχούν σε μαλακή έως στιφρή ιλυώδη άργιλο του Νεογενούς και οι υπόλοιπες ζώνες σε ιλυώδη και αργιλούχα χαλίκια

μέτριας πυκνότητας. Οι ισοκαμπύλες με συνεχή γραμμή αφορούν συντελεστές ευστάθειας και η διακεκομμένη γραμμή (p) επιφάνεια πιθανής ολίσθησης (με το μικρότερο συντελεστή ασφάλειας). Εξαιτίας της διαρροής των αργιλικών στρωμάτων, οι οριζόντιες τάσεις στα χαλίκια μειώνονται, γεγονός που επηρεάζει το μέγεθος των συντελεστών ασφάλειας. Αν και ο γενικός συντελεστής ευστάθειας κατά μήκος της επιφάνειας (p) είναι της τάξης του 1,9, οι τοπικοί συντελεστές ασφάλειας είναι μικροί και προσεγγίζουν τη μονάδα στο ανώτερο τμήμα του πρανούς. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι μικροί συντελεστές ασφάλειας εμφανίζονται στις περιοχές με τα χαλίκια, ενώ οι τιμές τους στην άργιλο είναι σημαντικά υψηλότερες (Zaruba and Mencl, 1982).



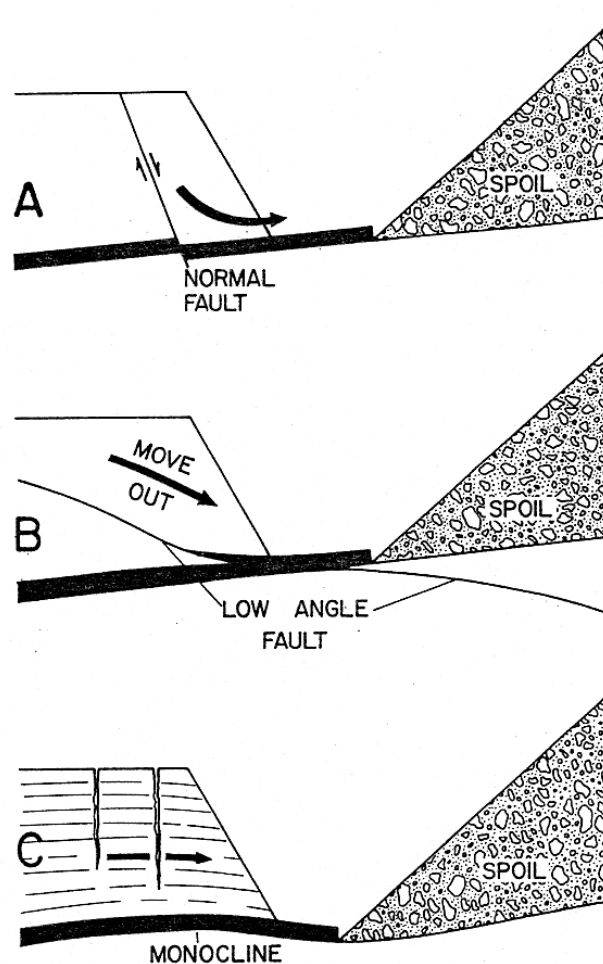
Σχ. 1-15 Πρανές στο Kosice (Α. Σλοβακία). Οι ισοκαμπύλες με συνεχή γραμμή αφορούν συντελεστές ευστάθειας και η έντονη διακεκομμένη γραμμή (p) την επιφάνεια πιθανής ολίσθησης. (Zaruba and Mencl, 1982 από Mejzlik and Mencl, 1975)

Τέλος, μια άλλη επισφαλής κατάσταση διαμορφώνεται όταν υπάρχουν διαπερατές αμμώδεις ενστρώσεις στη μάζα αργιλικού πρανού. Η διήθηση του νερού μέσω των διαπερατών ενστρώσεων εξασθενεί την ευαίσθητη αργιλική μάζα και σε συνδυασμό με τεκτονικές ασυνέχειες προκαλεί αστοχίες. Το φαινόμενο είναι συχνό στα πρανή των λιγνιτωρυχείων της Πτολεμαΐδας και προκαλεί τη προς τα κατάντη ολίσθηση τμημάτων του κοιτάσματος (Kavvadas *et al.*, 1992).

Όσον αφορά τη συμβολή της τεκτονικής στην κινητικότητα των πρανών, τα ρήγματα από μόνα τους ή και σε συνδυασμό με τις επιφάνειες στρώσης είναι δυνατόν να προκαλέσουν κινητικότητα της μάζας προς το εσωτερικό της εκσκαφής (Σχήμα 1-16, α, β).

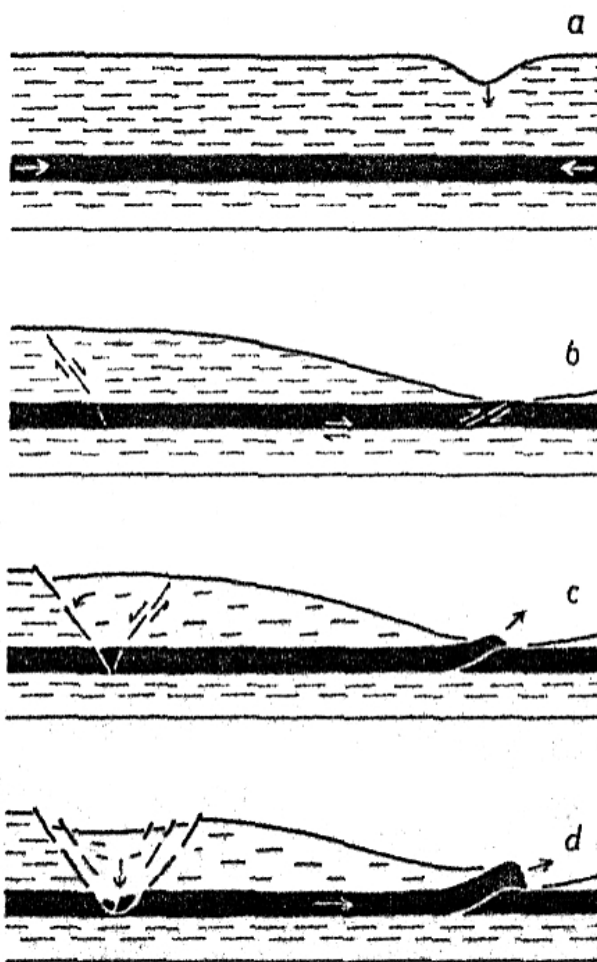
Επίσης οι μονοκλινικές κάμψεις με κλίση προς την εκσκαφή (Σχήμα 1-16 c) είναι επικίνδυνες διότι μειώνουν την αντοχή σε εφελκυσμό της μάζας του πρανού και επιτρέπουν διήθηση κατακρημνισμάτων στα γεωλογικά στρώματα (Mallett and Woollorton, 1982). Αυτές όμως οι δομές

είναι συνήθως μεγάλων διαστάσεων (σε σχέση με την έκταση ενός ορυχείου) και είναι δύσκολο να καθορισθούν με σαφήνεια κατά τη διατρητική έρευνα που προηγείται της εκμετάλλευσης.



Σχ. 1-16 Επίδραση των ρηγμάτων και των πτυχών στην ευστάθεια των πρανών των λιγνιτωρυχείων στην περιοχή Marica-Iztok (Mallett and Woollorton, 1982).
(A – Κανονικό ρήγμα σε βαθμίδες εξόρυξης, B – Ανάστροφο ρήγμα μικρής κλίσης, C – Μονοκλινική κάμψη)

Τέλος, η αποθήκευση ανώμαλων οριζόντιων τάσεων τεκτονικής προέλευσης είναι δυνατόν να προκαλέσει κινητικότητα, όπως επώθηση με μεγάλη κλίση. Τέτοιο φαινόμενο εκδηλώθηκε στο λιγνιτωρυχείο ανοικτής εκσκαφής στη λεκάνη Marica - Iztok στην Βουλγαρία (Σχ. 1-17), όπου αναπτύχθηκε αστοχία με τη μείωση του πάχους των υπερκειμένων του γαιάνθρακα και την απελευθέρωση οριζόντιων τάσεων (Rybar, 1971).

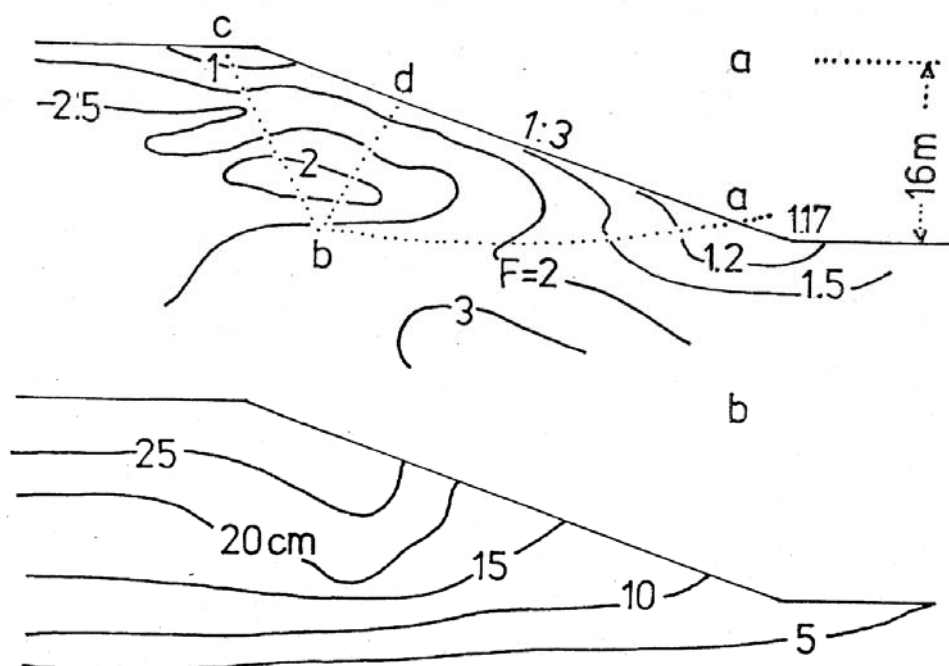


Σχήμα 1-17 Σχηματική παράσταση κατολίσθησης που εκδηλώθηκε με την απελευθέρωση οριζόντιων τάσεων, εξ αιτίας της μείωσης του πάχους των υπερκειμένων του γαιάνθρακα (Rybar, 1971)

Σε τάσεις τεκτονικής προέλευσης αποδόθηκαν και οι παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν στην εκμετάλλευση του Ορυχείου Braunkohlenbecken στο βορειοδυτικό Bohmen (Γερμανία) και λόγω της σπουδαιότητάς τους μελετήθηκαν συστηματικά (Rybar, 1971). Από την έρευνα προέκυψε ότι το στρώμα του γαιάνθρακα που βρίσκεται ανάμεσα σε λιγότερο δύστροπα (δύσκαμπτα) αργιλικά στρώματα συγκεντρώνει τις τάσεις που προκύπτουν από την οριζόντια συνιστώσα του εντατικού πεδίου. Η συσσωρευμένη τάση μέσα στους γαιάνθρακες απελευθερώνεται με την εκσκαφή, ο γαιάνθρακας μετατοπίζεται στο πόδα του πρανούς και εκδηλώνεται θραύση.

1.3.2.2 Ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών ως προς τη διατμητική τους αντοχή

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την κινητικότητα των πρανών είναι η ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών η οποία εντούτοις, μειώνει τη πιθανότητα εκδήλωσης προοδευτικής θραύσης.



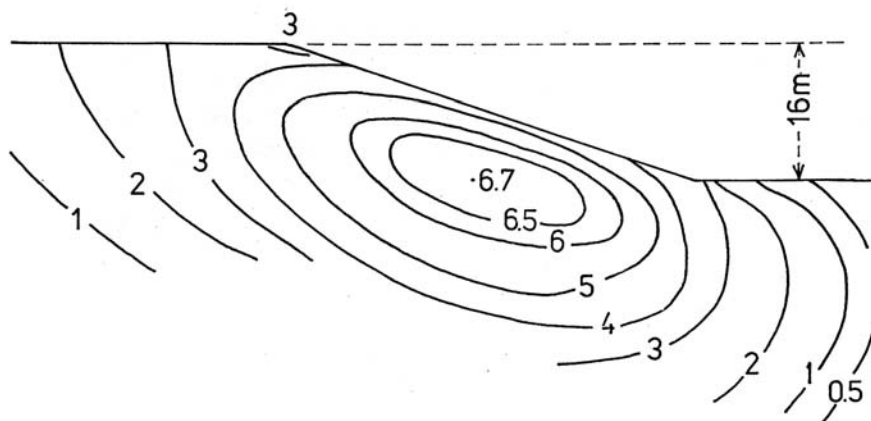
Σχ. 1-18 Ισοκαμπύλες τοπικών συντελεστών ευστάθειας (α) και κατακόρυφης υποχώρησης (β) στο πρανές του Σχ. 1-11, θεωρώντας ανισοτροπία του γεωλογικού σχηματισμού (Zaruba and Mencl, 1982)

Όπως αναφέρουν οι Zaruba and Mencl (1982), η διατμητική αντοχή των περισσότερων αργίλων είναι μικρότερη κατά την έννοια της στρώσης, σε σχέση με την αντοχή που επιδεικνύουν εγκάρσια στη στρώση. Η διαφορά αυτή είναι συχνά της τάξης του 15%.

Θεωρώντας ένα πρανές (όμοιο με αυτό του Σχ. 1-11), σε υπο-οριζόντιες Νεογενείς αργίλους, οι οποίες εμφανίζουν μειωμένη διατμητική αντοχή παράλληλα στη στρώση κατά 25%, οι ισοκαμπύλες του συντελεστή ευστάθειας και οι ισοκαμπύλες κατακόρυφης υποχώρησης διαμορφώνονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-18. Οι διαφορές του συντελεστή ευστάθειας κατά μήκος της θεωρούμενης επιφάνειας ολίσθησης (στικτή γραμμή στο Σχήμα 1-18α) είναι μικρότερες από εκείνες του Σχ. 1-11 υποδηλώνοντας μικρότερη πιθανότητα εκδήλωσης προοδευτικής θραύσης.

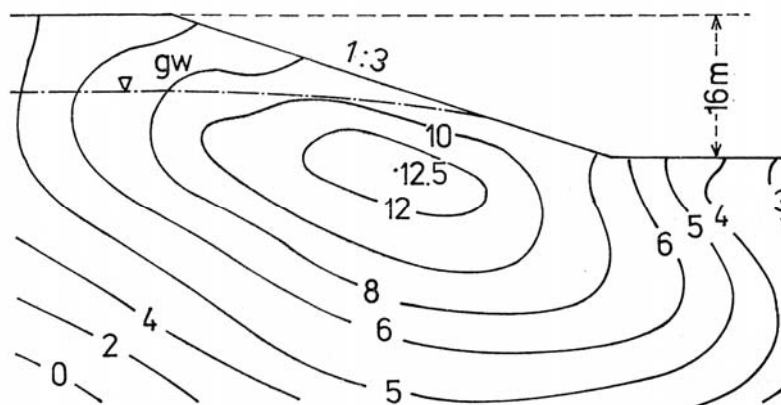
1.3.3 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η παρουσία υπεδafικού νερού στο πρανές και η αναπτυσσόμενη πίεση πόρων, μειώνει τις ορθές και αυξάνει τη διατμητική αντίσταση σε μια πιθανή επιφάνεια ολίσθησης.



Σχ. 1-19 Οριζόντιες μετατοπίσεις (σε cm) του πρανούς του Σχ. 1-11, με μέγιστη εμφανιζόμενη παραμόρφωση στο μέσο του ύψους του (Zaruba and Mencl, 1982)

Το Σχήμα 1-19 παρουσιάζει τις εκτιμώμενες οριζόντιες μετατοπίσεις ενός πρανούς εκσκαφής βάθους 16 m σε ομοιογενή σχηματισμό, ενώ το Σχ. 1-20 παρουσιάζει τη διαφοροποίηση των μετατοπίσεων αυτών με τη παρουσία υπεδafικού νερού, (θεωρώντας ελεύθερη πιεζομετρική επιφάνεια στο μέσο περίπου του ύψους του πρανούς). Η αύξηση των οριζόντιων μετατοπίσεων στο πόδα και στο κατώτερο τρίτο του πρανούς, είναι εντυπωσιακή (Zaruba and Mencl, 1982).



Σχ. 1-20 Οριζόντιες μετατοπίσεις (σε cm) του πρανούς του Σχ. 1-11, με παρουσία νερού (Zaruba and Mencl, 1982 από Mejzlik and Mencl, 1975)

Εμπεριστατωμένη διερεύνηση όσον αφορά τη μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων (Bishop and Henkel, 1953), οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η διόγκωση του εδάφους που εκδηλώνεται με την εκσκαφή, προκαλεί κάτω από αστράγγιστες συνθήκες, μείωση της πίεσης του νερού των πόρων.

Οι πιέσεις των πόρων που διαμορφώνονται με την αποφόρτιση είναι γενικά μικρότερες σε σύγκριση με τις πιέσεις που αντιστοιχούν στις τελικές συνθήκες και σταδιακά τείνουν σε αυτές. Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων με το χρόνο, προκαλεί μείωση των μέσων ενεργών τάσεων που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του πρανούς. Πολλές εκσκαφές στην άργιλο του Λονδίνου, αστόχησαν 20 έως και 60 χρόνια μετά την διαμόρφωση τους και η αστοχία τους αποδόθηκε σε μείωση της αντοχής με τη πάροδο του χρόνου.

Η μείωση του συντελεστή ασφάλειας με το χρόνο δεν μπορεί βέβαια να αποδοθεί σε όλες τις περιπτώσεις μόνο στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων. Σε πολλές περιπτώσεις προκύπτει και από τη μείωση της αντοχής κατά μήκος διακλάσεων και ρωγμών (που αναπτύσσονται με την εκσκαφή λόγω της εκτόνωσης των πλευρικών τάσεων). Η ανάπτυξη των ρωγμών αυτών οδηγεί σε αύξηση της διαπερατότητας και του ρυθμού εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση του χρόνου θραύσης (Eigenbrod, 1975).

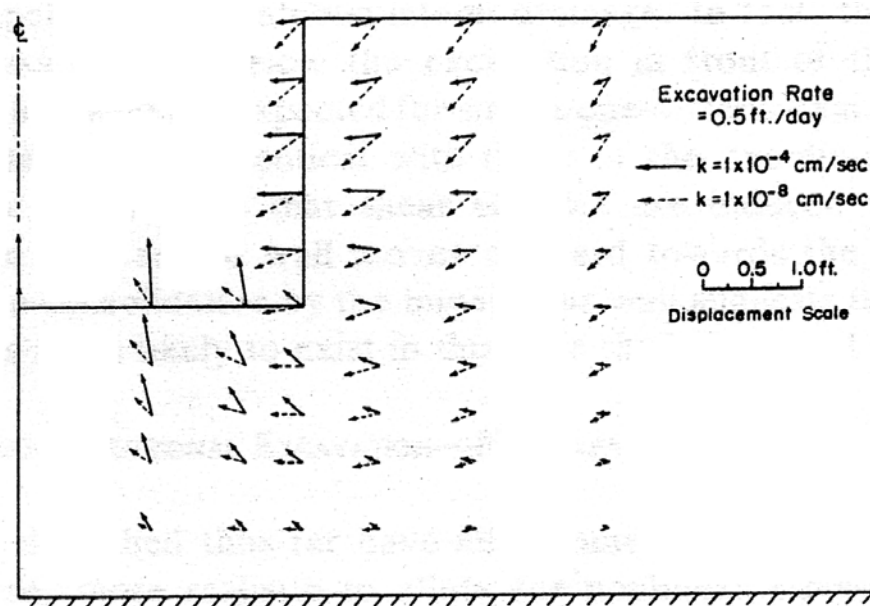
Επιπλέον, μελετώντας τη διασταλτικότητα (διόγκωση κατά τη διάτμηση) που επιδεικνύουν ορισμένα εδάφη, προέκυψε ότι αυτή επηρεάζει σημαντικά στη διαμόρφωση του μεγέθους της πίεσης των πόρων. Η αστοχία αναβάλλεται χρονικά, επειδή προκαλείται τοπική μείωση της πίεσης (αλλά και αύξηση της εισροής νερού) (Kirkebo et al., 1996). Για τον λόγο αυτό, τα εδάφη που επιδεικνύουν διασταλτικότητα, εμφανίζουν μια διατμητική αντίσταση στην επιφάνεια της αναπτυσσόμενης αστοχίας, ακόμα και μετά την πλήρη ενεργοποίηση της γωνίας τριβής. Αντιθέτως, τα εδάφη που επιδεικνύουν μείωση του όγκου κατά τη διάτμηση, εμφανίζουν αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και η αστοχία επιταχύνεται.

Θα πρέπει τέλος να αναφερθεί ότι για το σχεδιασμό των εκσκαφών σε αργιλικές αποθέσεις θεωρούνται συχνά αστράγγιστες συνθήκες. Όμως, λίγες πληροφορίες είναι διαθέσιμες ως προς το χρόνο που η αστράγγιστη συμπεριφορά της αργίλου είναι πραγματικά εφαρμόσιμη. Αναλύσεις των Osaimi and Clough (1979) έδειξαν ότι σ' ένα πρανές εκσκαφής βάθους 15 m σε εδαφικό σχηματισμό με πάχος 30 m και μικρή διαπερατότητα (της τάξης του 1×10^{-8} cm/sec), που υπέρκειται ενός αδιαπέρατου υποβάθρου, εκδηλώνεται ουσιαστικά μηδενική στερεοποίηση (στράγγιση) ανεξάρτητα από το ρυθμό της εκσκαφής. Κατά συνέπεια, σε περιπτώσεις μικρής διαπερατότητας, η θεώρηση της αστράγγιστης συμπεριφοράς είναι αποδεκτή για την εκτίμηση της κατάστασης που διαμορφώνεται με το τέλος της εκσκαφής.

Όμως, για εδάφη με υψηλότερες διαπερατότητες (10^{-4} έως 10^{-6} cm/sec), ο ρυθμός στερεοποίησης είναι έντονα εξαρτώμενος από την διαπερατότητα του εδάφους αλλά και από το ρυθμό εκσκαφής.

Επιπλέον, η παρουσία φακών ή και στρώσεων στράγγισης, επιταχύνουν την στερεοποίηση ακόμα περισσότερο. Με βάση τα παραπάνω, στην περίπτωση αυτή, η κλασική ανάλυση αστράγγιστης συμπεριφοράς είναι γενικά εφαρμόσιμη μόνο σαν υπόθεση εργασίας (Osaimi and Clough, 1979).

Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ότι η περατότητα, επηρεάζει την εξέλιξη των μετατοπίσεων (Σχήμα 1-21). Ένα υψηλής διαπερατότητας έδαφος παρουσιάζει μεγαλύτερες ανοδικές κινήσεις του πυθμένα και κυρίως μεγαλύτερες πλευρικές κινήσεις του κατακόρυφου μετώπου της εκσκαφής σε σχέση με ένα έδαφος χαμηλής περατότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το έδαφος με υψηλή περατότητα έχει στραγγίσει με την ολοκλήρωση της εκσκαφής, ενώ τα χαμηλής περατότητας εδάφη παραμένουν ουσιαστικά αστράγγιστα. Με την εξέλιξη της στερεοποίησης, οι μετατοπίσεις του εδάφους χαμηλής περατότητας τείνουν προς αυτές του πλέον υδροπερατού εδάφους και τελικώς ταυτίζονται, όταν η στερεοποίηση ολοκληρωθεί (Osaimi and Clough, 1979).



Σχ. 1-21 Ανύσματα μετατόπισης μη υποστηριζόμενης εκσκαφής σε υψηλής και χαμηλής υδροπερατότητας εδάφη (Osaimi and Clough, 1979)

2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Η ευστάθεια ενός πρανούς διερευνάται με βάση τη γεωλογική τομή εγκάρσια στο μέτωπο του πρανούς. Στην περίπτωση όμως που η γεωλογική δομή περιλαμβάνει και στρώματα γαιανθράκων, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή λόγω της ιδιαιτερότητας των γεωτεχνικών τους παραμέτρων. Το μικρό φαινόμενο βάρος, η αντοχή των αρμών στρώσης τους με τους άλλους εδαφικούς σχηματισμούς και η μικρή διαπερατότητα τους είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ιδιαίτερων μηχανισμών κινητικότητας και αστοχίας. Οι παράμετροι αυτοί αναλύονται παρακάτω.

2.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΝ

Ο λιγνίτης, συχνά αποκαλούμενος και φαιάνθρακας, είναι ένα ενδιάμεσο γεωυλικό μεταξύ της τύρφης και του λιθάνθρακα. Όπως αναφέρουν οι Kanvadas *et al.* (1992), περιορισμένη έρευνα (κυρίως από τους Rosengen, 1963, Brown, 1963, Hobbs, 1964, Trollope *et al.*, 1965), έχει πραγματοποιηθεί σχετικά με τις ιδιότητες του λιγνίτη από την σκοπιά της Εδαφομηχανικής. Με βάση την έρευνα αυτή προέκυψε ότι ο λιγνίτης

- α) είναι ένα στρωσιγενές υλικό με έντονη ανισοτροπία
- β) διαθέτει δομή αποτελούμενη από ένα σκελετό αλειφατικών ανθρακικών αλυσίδων και ένα σύστημα από μικροπόρους που διαμορφώνει υψηλό πορώδες (0,6 έως 0,7) και έχει περιεκτικότητα σε νερό που κυμαίνεται από 100 ως 150%
- γ) έχει ένα πολύ μικρό φαινόμενο βάρος
- δ) η αντοχή της δομής του είναι μεγάλη σαν συνέπεια της υψηλής συνοχής και της ψευδο-προστερεοποίησης του και τέλος
- ε) κάτω από δεδομένους συνδυασμούς τάσεων, εκδηλώνεται καταστροφή της δομής του με μεγάλη μείωση του όγκου του.

Ειδικότερα ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας, χαρακτηρίζεται σαν μαλακό, υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία εδαφικό υλικό με εμφανή στρωσιγένεια. Το χρώμα του είναι σκούρο καστανό, το οποίο μετά την αποκάλυψη του μετατρέπεται γρήγορα σε μαύρο, λόγω οξειδωσης. Στην μάζα του περιέχει διάφορα ποσοστά στείρων υλικών (άργιλο, μάργα) καθώς επίσης και κελύφη (Anagnostopoulos *et al.*, 1988).

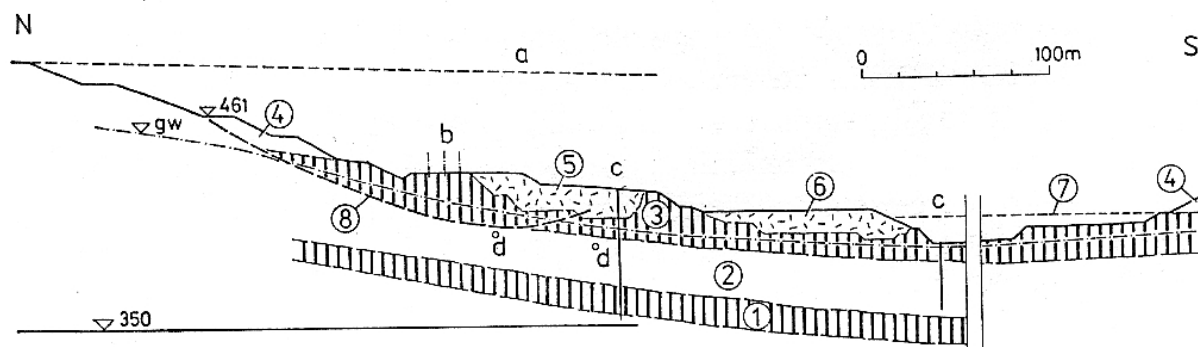
Η μέση ποσοστιαία περιεκτικότητα του λιγνίτη της Πτολεμαΐδας σε οργανικό υλικό, είναι 75% επί του ξηρού βάρους του (προσδιορισμός με καύση στους 550°C) και η κατώτερη θερμιδική του αξία εκτιμάται σε 1850 kcal/kg.

Με τη ξήρανση του λιγνίτη στους 60°C, το ποσοστό της φυσικής του υγρασίας εκτιμάται σε 142% επί ξηρού, ενώ με ξήρανση στους 105°C το ποσοστό αυξάνεται σε 154% (Anagnostopoulos *et al.*, 1988). Η μέση τιμή του φαινομένου βάρους του υπολογίστηκε στα 1,16 g/cm³, το αντίστοιχο ειδικό βάρος των κόκκων κυμαίνεται από 1,59 έως 1,62 (Anagnostopoulos *et al.*, 1988) και η τιμή του λόγου κενών θεωρείται μεταξύ 1,9 και 2,1 (Kavvas *et al.*, 1993).

2.1.1 Διαπερατότητα και φαινόμενο βάρος των λιγνιτών

Ο Schultze (1956) αναφέρει ότι η διαπερατότητα των λιγνιτών όπως εκτιμάται στο πεδίο, (λιγνιτωρυχεία του Κάτω Ρήνου), παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις από θέση σε θέση και τις αποδίδει στο γεγονός ότι οι λιγνίτες διαπερνώνται από λεπτές ενστρώσεις αυξημένης υδροπερατότητας. Γενικά, η διαπερατότητα του λιγνίτη είναι μικρή και αναμένεται αυξημένη κατά την οριζόντια (παράλληλα στη στρώση) διεύθυνση, γεγονός που αποδίδεται στην ιζηματογένεση και στο αδρομερέστερο (στείο) υλικό που συχνά περιέχει.

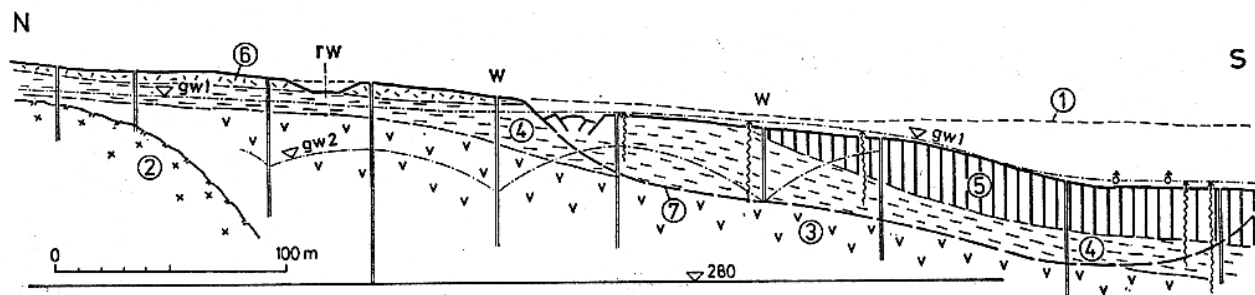
Η μικρή διαπερατότητα, σε συνδυασμό με το μικρό φαινόμενο βάρος του λιγνίτη, δημιουργούν προβλήματα στην περίπτωση που υπό πίεση υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται στα περιθώρια της εκσκαφής ενός λιγνιτωρυχείου. Το Σχ. 2-1 παρουσιάζει το περιθώριο μιας λιγνιτοφόρου λεκάνης στο Solokon (Βοημία). Η πίεση που επενεργούσε στη βάση του κοιτάσματος από τον υποκείμενο υδροφορέα, είχε σαν αποτέλεσμα την αναθόλωση του λιγνιτοφόρου κοιτάσματος αν και το πάχος του ήταν 10 m (Zaruba and Mencl, 1982).



Σχ. 2-1 Λιγνιτωρυχείο ανοικτής εκσκαφής στο Sokolon – Βοημία (Zaruba and Mencl, 1982)

(1 και 3 - στρώματα γαιάνθρακα, 2 - ενδιάμεσα, 4 - υπερκείμενο γεωυλικό, c, d - γεωτρήσεις αποστράγγισης, 5, 6 - εκσκαφές απόληψης του κοιτάσματος που επαναπληρώθηκαν για τον έλεγχο - αντιμετώπιση της κινητικότητας, 8 - επιφάνεια ολίσθησης)

Μια άλλη αστοχία σε πρανές λιγνιτωρυχείου της Βοημίας, που αποδίδεται στην επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα και στο μικρό φαινόμενο βάρος των λιγνιτών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2. Δυνάμεις άνωσης ενεργούν στην επαφή του αργιλικού σχηματισμού με τα υποκείμενα-περισσότερο διαπερατά τοφφοειδή κροκαλοπαγή, μειώνοντας την διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας.



Σχ. 2-2 Πρανές σε λιγνιτωρυχείο ανοικτής εκσκαφής στο Chomutov, Βοημία (Zaruba and Mencl, 1982)

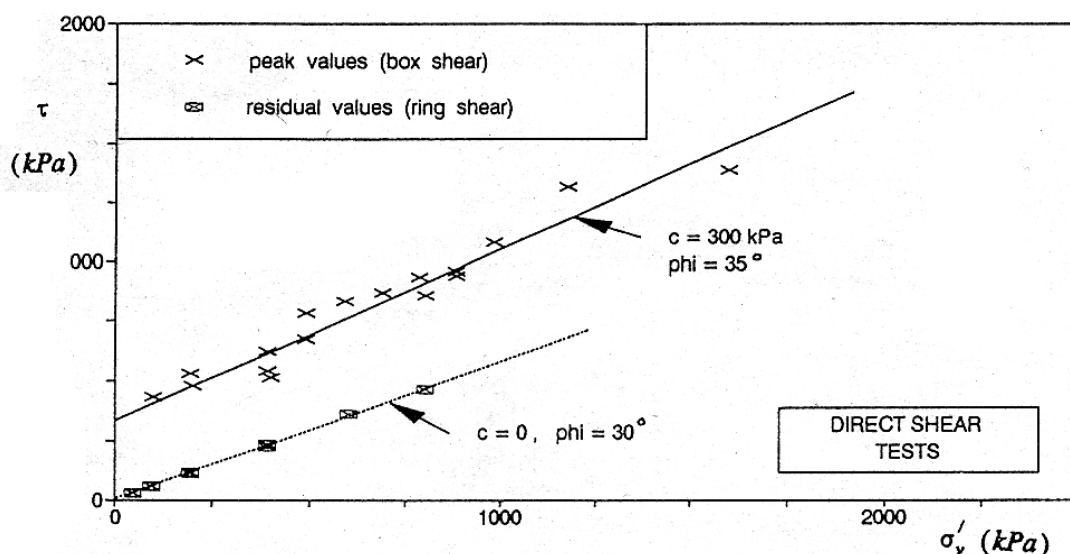
(2 - γνεύσιος, 3 - τοφφοειδή κροκαλοπαγή, 4 - άργιλος, 5 - λιγνίτης, 6 - πλευρικά κορήματα, 7 - επιφάνεια ολίσθησης και gw1 - υδροφόρος ορίζοντας πριν την αποστράγγιση)

2.1.2 Διατμητική αντοχή των λιγνιτών

Ο Schultse (1956) μελέτησε την διατμητική αντοχή των λιγνιτών και αναφέρει γωνία εσωτερικής τριβής 35° για λιγνίτες με φαινόμενο βάρος $1,38$ έως $2,6 \text{ g/cm}^3$ και φυσική υγρασία $37,8$ έως $179,4\%$ (επί ξηρού).

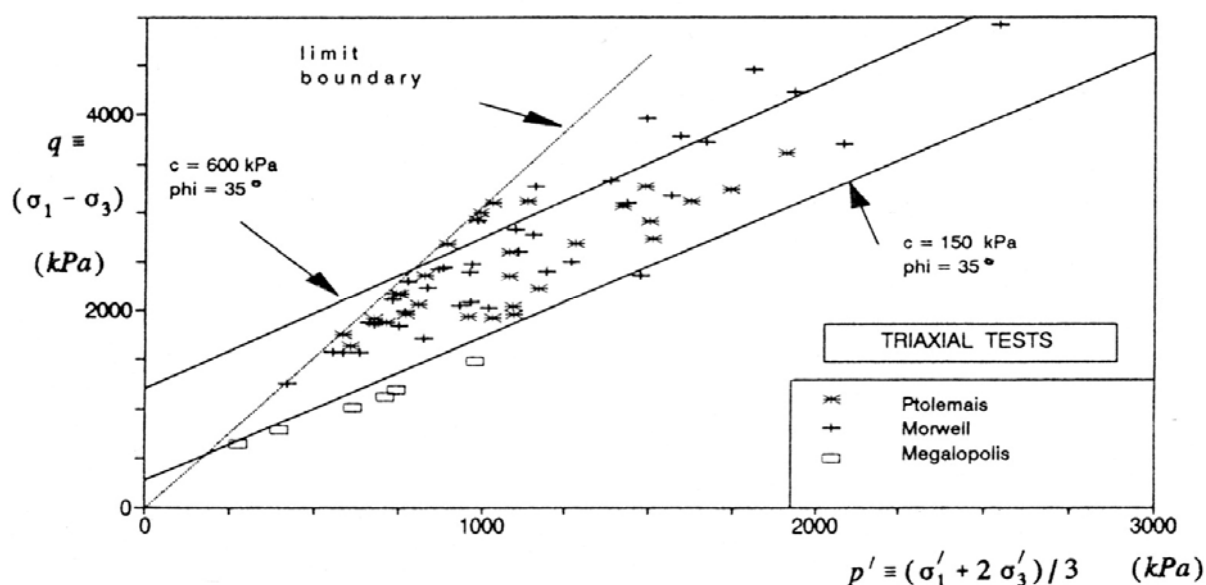
Από άλλες εργαστηριακές δοκιμές του Γεωλογικού Ινστιτούτου του Krefeld (Γερμανία) προέκυψε γωνία εσωτερικής τριβής μεταξύ $\phi=39,6^\circ$ και $42,5^\circ$ ενώ η συνοχή προσδιορίστηκε σε $c=3,2 \text{ kg/cm}^2$. Τα αποτελέσματα αυτά θεωρήθηκαν μερικώς παραδεκτά λόγω της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε (Dolezalek and Doro, 1962).

Οι Kanvadas *et al.* (1992), προσδιόρισαν την μέγιστη και την παραμένουσα διατμητική αντοχή των λιγνιτών της Πτολεμαΐδας με δοκιμές άμεσης διάτμησης και δοκιμές σε στρέψη αντίστοιχα. Αναφέρουν ότι η γωνία εσωτερικής τριβής είναι ίση με 35° , η συνοχή ίση με 300 kPa ενώ η παραμένουσα γωνία τριβής είναι περίπου 30° (Σχ. 2-3).



Σχ. 2-3 Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης και δοκιμών στρέψης, σε λιγνίτες της Πτολεμαΐδας (Kavvas et al., 1992)

Οι ίδιοι ερευνητές πραγματοποίησαν στον λιγνίτη της Πτολεμαΐδας τριαξονικές δοκιμές μετά από στερεοποίηση (με και χωρίς στράγγιση), σ' ένα μεγάλο εύρος ισότροπων τάσεων (Σχ. 2-4). Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντική διασπορά που αποδόθηκε στην διαφοροποίηση της αρχικής υγρασίας των δοκιμίων (110 έως 140%) και στην φύση του οργανικού υλικού. Για σύγκριση, στο διάγραμμα των αποτελεσμάτων παρουσίασαν αντίστοιχες μετρήσεις στον λιγνίτη Morwell της Αυστραλίας (Brown, 1963) και τον λιγνίτη της Μεγαλόπολης (Αναγνωστόπουλος, 1979).



Σχ. 2-4 Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε λιγνίτες (Kavvas et al., 1992)

Από το διάγραμμα του Σχ. 2-4 προκύπτει μέγιστη γωνία εσωτερικής τριβής 35° και συνοχή που κυμαίνεται μεταξύ 150 και 600 kPa ανάλογα με την περιεχόμενη υγρασία.

Με βάση τα παραπάνω, είναι εμφανής η μεγάλη διακύμανση των τιμών της αντοχής των λιγνιτών. Αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι στις εργαστηριακές δοκιμές χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού σχετικά μεγέθους, με συνέπεια οι τιμές συνοχής που προκύπτουν να είναι μάλλον μεγαλύτερες απ' ό,τι στην πραγματικότητα, μια αξιόπιστη εκτίμηση της διατμητικής αντοχής των λιγνιτών είναι πολύ δύσκολη.

2.1.3 Διατμητική αντοχή αρμών στρώσης μεταξύ διαφορετικών γεωλογικών σχηματισμών

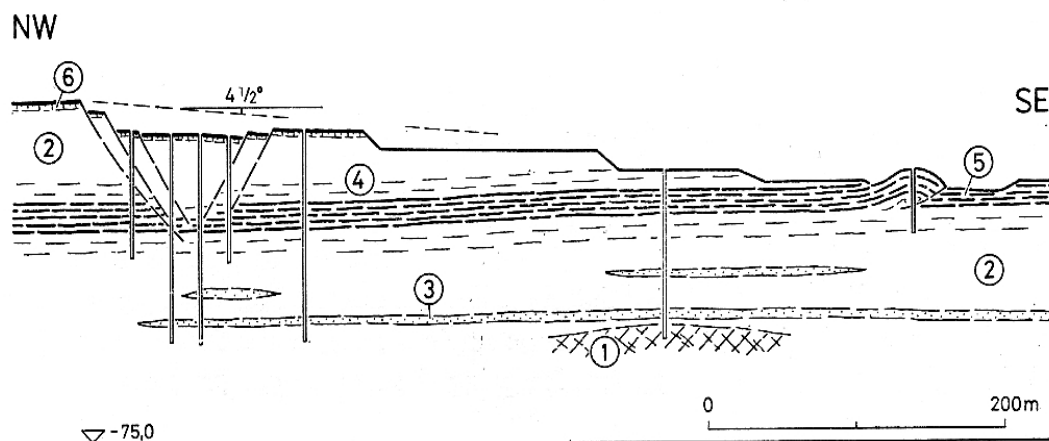
Οι αρμοί στρώσης υδροπερατών στρωμάτων που υπέρκεινται μη υδροπερατών σχηματισμών (αργίλου ή λιγνίτη), χαρακτηρίζονται σαν επιφάνειες μικρής διατμητικής αντοχής. Στην λιγνιτοφόρα περιοχή του Κάτω Ρήνου (δυτικά της Κολωνίας), τέτοιες επιφάνειες απετέλεσαν έδρες κατολισθητικών φαινομένων (Dolezalek and Doro, 1962).

Πειράματα άμεσης διάτμησης (με άργιλο στο κατώτερο και άμμο ή λιγνίτη στο ανώτερο κιτίο της συσκευής, κατέδειξαν ότι η διατμητική αντοχή στις επιφάνειες αυτές μειώνεται έντονα (περίπου κατά 42%), με τον υδατο-εμποτισμό των αργίλων.

Επιπλέον, από μετρήσεις διατμητικής αντοχής που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα από τις εκμεταλλεύσεις Inden και Frechent, προέκυψε ότι ο αρμός στρώσης μεταξύ αργίλου και λιγνίτη επιδεικνύει σε συνθήκες κορεσμού μια πολύ μικρή συνοχή (μέχρι $0,05 \text{ kg/cm}^2$) και γωνία τριβής $\phi=16,3^\circ$ και $14,5^\circ$ αντίστοιχα για τις δύο θέσεις δειγματοληψίας. Οι αντίστοιχες τιμές της γωνίας τριβής σε συνθήκες φυσικής υγρασίας, ήταν αυξημένες κατά $12,4^\circ$ και $9,5^\circ$.

Σε ορυχεία ανοικτής εκσκαφής της Τσεχοσλοβακίας έχει εκτιμηθεί ότι η γωνία τριβής στον αρμό στρώσης γαιάνθρακα με άργιλο είναι 8° , παρά το γεγονός ότι η παρενεστρωμένη με τον γαιάνθρακα άργιλος, εμφανίζει γωνία διατμητικής αντοχής 20° έως 38° (Zaruba and Mencl, 1982). Οι ίδιοι συγγραφείς επικαλούμενοι αδημοσίευτη έκθεση του Kasda (1976), αποδίδουν την ανωμαλία αυτή στην ύπαρξη εξαιρετικά λεπτών οργανικών κολλοειδών ενστρώσεων στην άργιλο (στην ζώνη μετάβασης της προς τον γαιάνθρακα), ενώ δεν αποκλείουν και την πιθανότητα η πίεση των αερίων που παράγονται από τον γαιάνθρακα να αποτελεί παράγοντα μείωσης της ενεργής τάσης και κατά συνέπεια της τριβής.

Η χαμηλή διατμητική αντοχή του αρμού στρώσης ήταν η αιτία που δημιούργησε προβλήματα και σε ορυχεία της Βουλγαρίας (Σχ. 2-5) και επέτρεψε σε στρώμα λιγνίτη στο Ορυχείο Marica-Iztok, να κινηθεί ανοδικά (Rybar, 1971).



Σχ. 2-5 Αστοχία πρανούς στο Ορυχείο Marica-Iztok, Βουλγαρία (Rybar, 1971)

(1 - κρυσταλλικό υπόβαθρο, 2 - άργιλος, 3 - άμμος, 4 - ανθρακούχος άργιλος,
5 - λιγνίτης, 6 - Τεταρτογενείς προσχώσεις)

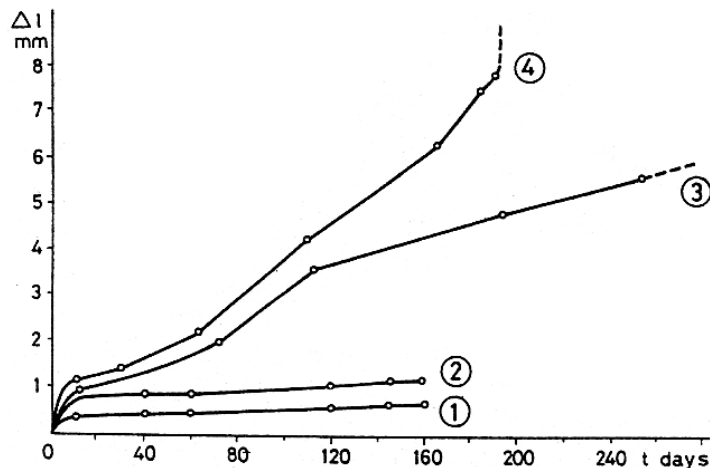
Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι εκτός από τη χαμηλή διατμητική αντοχή του αρμού στρώσης, η αποφόρτιση και η κατ' όγκο ανάκτηση των γεωλογικών σχηματισμών αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα της διαμόρφωσης του τασικού πεδίου, της διατμητικής αντοχής και της εξέλιξης της σχετικής κίνησης μεταξύ των στρωμάτων.

2.1.4 Μακρόχρονη συμπεριφορά των γαιανθράκων κάτω από σταθερό φορτίο

Η μακρόχρονη αντοχή του γαιάνθρακα, (όπως προκύπτει από διαγράμματα παραμόρφωσης - χρόνου σε δοκίμια κάτω από σταθερή φόρτιση), είναι μερικές φορές υψηλότερη της αντίστοιχης αντοχής των αργίλων. Κατά συνέπεια, όταν οι άργιλοι αστοχούν σαν αποτέλεσμα μιας προϊούσας παραμόρφωσης, το πρανές υποστηρίζεται από το στρώμα του γαιάνθρακα, έως ότου προσεγγίσει και αυτό την μακρόχρονη αντοχή του, οπότε μία απότομη κατολίσθηση λαμβάνει χώρα. Με βάση τα παραπάνω, τα αδιατάρακτα στρώματα των γαιανθράκων συμβάλλουν θετικά στην ευστάθεια των πρανών.

Οι Metchkarski *et al.* (1977) μελέτησαν τις παραμορφώσεις που εμφανίσθηκαν στο λιγνιτωρυχείο ανοικτής εκσκαφής East Maritsa, στην Βουλγαρία. Εργαστηριακές δοκιμές μακρόχρονης φόρτισης σε ημιδιαταραγμένα δείγματα γαιάνθρακα με φορτίο 20 έως 40% της αντοχής τους, έδειξαν να επιδεικνύουν ερπυσμό με σταθερή ταχύτητα (Σχ. 2-6, καμπύλη 3).

Κάτω όμως από υψηλότερη φόρτιση (60% της αντοχής), το δείγμα του γαιάνθρακα επέδειξε μια αύξηση της ταχύτητας ερπυσμού με τον χρόνο και η εξέλιξη της παραμόρφωσης διακόπηκε από μια απότομη αστοχία, (Σχ. 2-6, καμπύλη 4).



Σχήμα 2-6 Σχέση μεταξύ παραμόρφωσης και χρόνου σε δοκίμια γαιάνθρακα, κάτω από σταθερό φορτίο (Metchkarski *et al.*, 1977)

Με βάση λοιπόν τις ποιοτικές διαφορές στην παραμόρφωση των δοκιμίων, προκύπτει ότι η εξέλιξη της παραμόρφωσης των πρανών εξαρτάται από τη τασική κατάσταση που διαμορφώνεται με την πρόοδο της εκσκαφής και την διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των επιμέρους γεωλογικών στρωμάτων.

2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΙΚΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Η ύπαρξη ενστρώσεων γαιάνθρακα σ' έναν υδροφορέα, συνδυάζεται συχνά με αυξημένη αλατότητα του νερού, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στις συνθήκες ιζηματογένεσης και απόθεσης φυτικών υπολειμμάτων.

Η αυξημένη αυτή αλατότητα μειώνει την αποσταθεροποιητική δράση του νερού όσον αφορά τα πρανά των εκσκαφών. Στη λεκάνη του Bowen (Αυστραλία), σε αποθέσεις δελταϊκού και οριακά θαλάσσιου περιβάλλοντος, με διαπερατότητα από 0,3 έως 5,9 m/day, η αλατότητα του νερού λόγω των παρεμβολών του γαιάνθρακα αυξάνει μέχρι 16.000 ppm. Αν και το νερό εξασθενεί γενικά τους αργιλικούς σχηματισμούς, η υψηλή του αλατότητα μειώνει την διασπορά (dispersive effects) των αργίλων και ελαττώνει την αποσταθεροποιητική τους επίδραση (Mallett and Woollorton, 1981).

Η διαφοροποίηση της ποιότητας του νερού κατά την υγρή περίοδο, όταν μεγάλες ποσότητες μετεωρικού νερού (με χαμηλή αλατότητα) κατεισδύουν, επηρεάζει αρνητικά την συμπεριφορά των αργιλικών οριζόντων συμβάλλοντας στην αύξηση της διασποράς και κατά συνέπεια στη μείωση της αντοχής τους. Το φαινόμενο ήταν έντονο στο Ορυχείο Goonyella στην Αυστραλία (Mallett and Woollorton, 1981).

3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΓΝΩΣΗΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΕΚΣΚΑΦΗ

3.1 ΠΡΩΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ

Οι πρώτες προσπάθειες πρόγνωσης της κινητικής συμπεριφοράς των εκσκαφών βασιζόταν στην ελαστική θεωρία και περιοριζόταν στην εκτίμηση της αναμενόμενης ανάκτησης του δαπέδου. Οι αδυναμίες των μεθόδων αυτών σχετίζονται με τις θεωρούμενες τιμές των εδαφικών παραμέτρων, τον προσδιορισμό της αρχικής τασικής κατάστασης και την αδυναμία θεώρησης της διασταλτικότητας που επιδεικνύει το έδαφος με τη διατμητική παραμόρφωση.

Οι Forsyth *et al.* (1975) αναφέρουν ότι ο Terzaghi (1948) προέβλεψε ανάκτηση σε εκσκαφές θεμελίων που πραγματοποιήθηκαν σε άργιλο, με βάση την εφαιπτομένη στο αρχικό τμήμα της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης που προέκυψε από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Σε μια εκσκαφή εκτιμήθηκε ανύψωση 5 in (=13 cm) - με παρατηρηθείσα 3,5 in (=8,9 cm), ενώ σε μια άλλη θέση προβλέφθηκε ανύψωση 14 in (=35,6 cm) χωρίς να παρατηρηθεί καμιά παραμόρφωση. Το γεγονός αποδόθηκε στο μηχανισμό της στράγγισης που είχε αναπτυχθεί.

Συστηματική διερεύνηση της ανάκτησης σε βαθιές εκσκαφές (βάθους >300 ft = 91m) άρχισε τις αρχές της δεκαετίας του '60 με την κατασκευή αυτοκινητοδρόμων στη Β. Αμερική (Καλιφόρνια). Οι Forsyth *et al.* (1975), εκτίμησαν την ανάκτηση που θα εκδηλωνόταν σε εκσκαφή βάθους 260 ft (= 79m) σ' ένα αργιλίτη βόρεια από το Λος Άντζελες. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο κατανομής τάσεων κατά Westergaard σε μη ισότροπο ελαστικό υλικό και θεωρώντας τον αφαιρούμενο (εκσκαπτόμενο) γεωλογικό σχηματισμό σαν αρνητικό φορτίο, υπολόγισαν ανάκτηση 1,08 ft (=0,33 m), 0,72 ft (=0,22 m) και 0,54 ft (=0,16 m) με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών πρεσσιομέτρου, οιδημέτρου και ανεμπόδιστης θλίψης αντίστοιχα. Η ανάκτηση που παρατηρήθηκε ήταν 0,70 ft (=0,21 m).

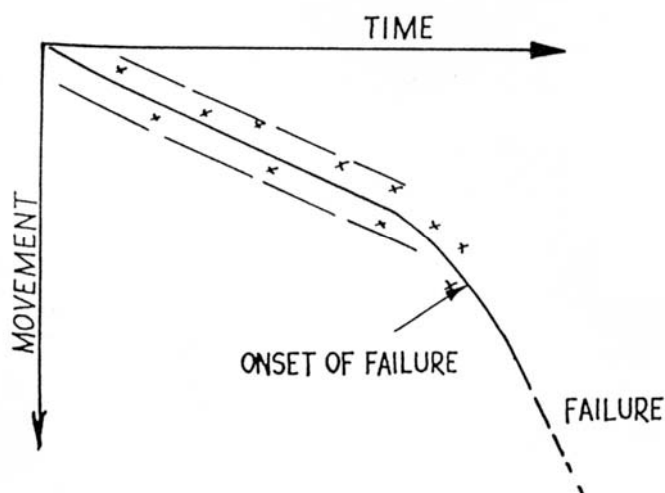
Κατά την κατασκευή του φράγματος Garrison στο ποταμό Μισούρι (Β. Ντακότα), το μέτρο δυστροπίας του αργιλικού σχιστόλιθου προσδιορίστηκε σε 2000 tons/ft² (=214.000 kN/m²) και η τιμή αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ελαστικής ανάκτησης (Forsyth *et al.*, 1975). Η αναμενόμενη και εκδηλωθείσα ανάκτηση σε μια εκσκαφή βάθους 180 ft (=55 m) ήταν της τάξης των 0,8 ft (=0,24) και 1,0 ft (=0,3 m) αντίστοιχα. Χρονο-εξαρτώμενες παραμορφώσεις πρόσθεσαν άλλα 0,7 – 1,0 ft (=0,2 – 0,3 m) δύο με τρία χρόνια μετά την εκσκαφή.

3.2 ΠΡΟΓΝΩΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΟΡΥΧΕΙΑ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Η μεθοδολογία πρόγνωσης των παραμορφώσεων σε πρηνή ορυχείων ανοικτής εκσκαφής βασίζεται σύμφωνα με τον Rozsypal (1988) :

- (i) σ' ένα συνδυασμό παρατηρήσεων της συμπεριφοράς των πρηνών
- (ii) σε συνεχή εκτίμηση των γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών συνθηκών και
- (iii) σε βελτίωση των θεωρητικών αναλύσεων, που πραγματοποιήθηκαν είτε με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας είτε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Τόσο οι οριζόντιες όσο και οι κατακόρυφες κινήσεις που καταγράφονται σε συνάρτηση με το χρόνο ή και με το βάθος, δίνουν ουσιαστικές πληροφορίες σχετικά με την εκτίμηση της συμπεριφοράς της εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, μια σαφής ένδειξη για την έναρξη αστοχίας, προκύπτει όταν η γραφική παράσταση της μετακίνησης θεωρούμενου σημείου σε σχέση με το χρόνο (Σχ. 3-1), παύει να διατηρεί γραμμική σχέση και κάμπτεται δυσανάλογα με τον αρχικό ρυθμό μετακίνησης, (Rozsypal, 1988).



Σχ. 3-1 Υπόδειξη έναρξης κατολίσθησης με βάση το ρυθμό της κινητικότητας (Watt, 1970)

Κατά συνέπεια, γεωδαιτικές παρατηρήσεις ικανοποιητικού βαθμού ακρίβειας, αποτελούν απαραίτητα στοιχεία για την εκτίμηση της αναμενόμενης κινητικότητας και συμβάλλουν στη λήψη μέτρων για την αποτροπή μιας καταστροφικής αστοχίας. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια των τοπογραφικών μετρήσεων, τόσο πιο έγκαιρα είναι δυνατόν να προβλεφθούν οι επικίνδυνες καταστάσεις (Watt, 1970).

Σε περιπτώσεις υψηλού βαθμού αβεβαιότητας σχετικά με τη συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση των πρανών από την αρχή της εκσκαφής και όχι όταν προκύπτει το πρόβλημα (D' Elia *et al.*, 1984). Θα πρέπει εντούτοις να σημειωθεί, ότι η συνεχής αύξηση της επιτάχυνσης της ολίσθησης θα πρέπει να διαχωρίζεται από περιστασιακές φάσεις επιτάχυνσης και επιβράδυνσης (αποτέλεσμα slip-stick). Αυτές μπορεί να προκύψουν είτε από μια βαθμιαία ανακατανομή των τάσεων στο εσωτερικό του πρανούς, (η οποία συνοδεύει τη προοδευτική παραμόρφωση του γεωλογικού σχηματισμού), είτε από εναλλαγές κάποιων παραμέτρων όπως η γεωμετρία της πιεζομετρικής επιφάνειας (Rozsypal, 1988).

Για την αξιόπιστη ερμηνεία των μετρήσεων, είναι απαραίτητη και η συνεχής επανεκτίμηση του μηχανισμού της κινητικότητας του πρανούς σε σχέση με τις αρχικές γεωμηχανικές υποθέσεις, στις οποίες βασίσθηκε ο σχεδιασμός των παρατηρήσεων ελέγχου. Επίσης, όταν διερευνάται η προσέγγιση ή όχι του σταδίου λήψης μέτρων αντιμετώπισης της κινητικότητας, θα πρέπει να γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς όλης της μάζας ή των κινηματικά αυτόνομων τμημάτων του πρανούς όπως υπαγορεύονται από τη τοπική γεωλογία και τις γεωτεχνικές συνθήκες. Δεδομένα από ένα μεμονωμένο σημείο παρατήρησης είναι πιθανόν να αποδειχθούν λανθασμένες ενδείξεις.

Τέλος, τα στάδια για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης της κινητικότητας, προσδιορίζονται είτε με θεωρητικές αναλύσεις όσον αφορά την ευστάθεια, είτε με βάση το επιτρεπτό όριο (ή τον ρυθμό) της παραμόρφωσης που καθορίζουν οι τεχνικές λειτουργίες του ορυχείου.

Οι Λεονάρδος και Τερεζόπουλος (2001), μελέτησαν πέντε κατολισθήσεις περιφερειακών (τελικών) πρανών λιγνιτωρυχείων και υπέδειξαν σαν βέλτιστο κριτήριο εκτίμησης της κινητικότητας, τη ταχύτητα που υπολογίζεται με βάση δύο διαδοχικές μετρήσεις της απόστασης σημείων παρατήρησης. Υπέδειξαν ότι εφόσον η ταχύτητα αυξάνει σταθερά πάνω από το όριο των 20 mm / ημέρα, τότε θα πρέπει να αναμένεται κατάρρευση του πρανούς εντός 6-12 ημερών από την ημέρα υπέρβασης του παραπάνω ορίου, ενώ όταν η ταχύτητα πλησιάσει τα 100 mm / ημέρα η κατάρρευση είναι θέμα ωρών.

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, η πρόγνωση της κινητικότητας των πρανών είναι σκόπιμο να γίνει με πιο συστηματικό τρόπο, χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους, κυρίως αυτή των πεπερασμένων στοιχείων (Rozsypal, 1988). Βασική προϋπόθεση της προσέγγισης αυτής είναι τα αξιόπιστα δεδομένα όσον αφορά τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών.

Η εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην επαναλαμβανόμενη ανάστροφη ανάλυση και βελτίωση του μαθηματικού μοντέλου, προκειμένου τα αποτελέσματα των υπολογισμών και των επί τόπου μετρήσεων σε μια φάση της εκμετάλλευσης, να ταυτίζονται. Στη συνέχεια, το μοντέλο χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό της συμπεριφοράς στην επόμενη φάση της εκσκαφής.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Ο συντελεστής ασφάλειας για μια θεωρούμενη επιφάνεια ολίσθησης προσδιορίζεται συγκρίνοντας τη διατμητική αντοχή του εδάφους κατά την έννοια της επιφάνειας αυτής, με την αντίστοιχη τιμή της επενεργούσας διατμητικής τάσης.

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση, η τασική κατανομή στην επιφάνεια ολίσθησης εκτιμάται χωρίς τη θεώρηση των παραμορφώσεων του γεωλογικού σχηματισμού, γεγονός που απλοποιεί σημαντικά την επίλυση. Για ομοιόμορφα πρανή, αποτελούμενα από ελαστικοπλαστικά γεωυλικά ή γεωυλικά που επιδεικνύουν κράτυνση, αυτή η απλοποίηση δεν οδηγεί σε ουσιαστικές αποκλίσεις από τη πραγματικότητα. Οι Stefanoff *et al.* (1976) αναφέρουν ότι αυτό αποδείχθηκε με συγκριτικούς υπολογισμούς των Wright *et al.* (1973).

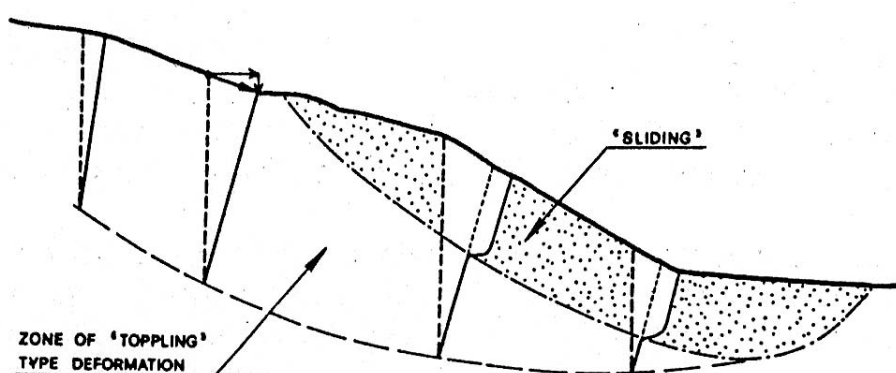
Εντούτοις, στη περίπτωση μη ομοιογενών πρανών που αποτελούνται από γεωλογικούς σχηματισμούς ποικίλης δυστροπίας, είναι πιθανόν να προκύψουν ανεπίτρεπτα μεγάλες τελικές παραμορφώσεις (Ivanov, 1971). Ακόμα σοβαρότερο είναι το πρόβλημα στη περίπτωση πρανών που επιδεικνύουν χαλάρωση, όπου η πιθανότητα προοδευτικής θραύσης είναι αυξημένη και η κατάρρευση του πρανούς είναι πιθανή, ακόμα και με ένα “μέσο” συντελεστή ευστάθειας μεγαλύτερο της μονάδας. Κατά συνέπεια, σε πολλές περιπτώσεις οι συμβατικές μέθοδοι υπολογισμού της ευστάθειας πιθανόν να δώσουν αναξιόπιστα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την εφαρμογή και άλλων μεθόδων ανάλυσης (π.χ. πεπερασμένων στοιχείων) με τις οποίες εκτιμώνται η παραμόρφωση του γεωλογικού σχηματισμού, με βάση μια πιο αξιόπιστη τασική κατανομή.

Εφαρμόζοντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) οι Stefanoff *et al.* (1976), υπολόγισαν την κατανομή των συντελεστών ευστάθειας στη μάζα ενός πρανούς, στη δομή του οποίου συμμετέχει ψαθυρό στρώμα ασβεστούχου πηλού (που επιδεικνύει χαρακτηριστική μείωση της διατμητικής αντίστασης μετά τη μέγιστη τιμή της). Το πρανές σχεδιάζόταν αρχικά με βάση την ανάλυση κατά Fellenius και με ένα υψηλό συντελεστή ευστάθειας, αλλά ισοκαμπύλες του συντελεστή ασφάλειας με τιμή ίση ή και μικρότερη της μονάδας, υπέδειξαν πιθανότητα εκδήλωσης προοδευτικής θραύσης. Αυτό αποδεδειγμένα θα οδηγούσε σε επιπρόσθετη μείωση της τοπικής και γενικής ευστάθειας του πρανούς.

Οι D' Elia *et al.* (1988), μελέτησαν τη συμπεριφορά των πρανών στο λιγνιτωρυχείο Allori, η εκσκαφή του οποίου αναπτύσσεται σ' ένα χαοτικό «melange» αργιλιτών με ασβεστολιθικούς ολισθολίθους μεγέθους μερικών εκατοστών έως μερικών μέτρων (σχηματισμός του Aglille Scagliose). Διαφοροποιήσεις του ρυθμού παραμόρφωσης του πρανούς με το χρόνο, διαπιστώθηκαν με την αύξηση του βάθους αλλά και κατά την αποφόρτιση του ανώτερου τμήματος του πρανούς. Κατά την εκσκαφή σε βάθος μεγαλύτερο από 100 m, οι μετρήσεις των κλισιμέτρων έδειξαν ότι οι επιφάνειες ολίσθησης

απουσίαζαν και ότι το χαμηλότερο όριο της παραμορφούμενης ζώνης βάθαινε ανάλογα με το δάπεδο της εκσκαφής.

Η ανάλυση των μετρήσεων υπέδειξε ένα μηχανισμό “περιστροφής” του σχηματισμού πάνω στη παραμορφούμενη ζώνη. Τέτοιου τύπου παραμόρφωση είναι ανάλογη με την ανατροπή (toppling) που εμφανίζεται σε κατατμημένη βραχομάζα. Με την ενεργοποίηση του μηχανισμού “ανατροπής” (Σχ. 3-3), ο μηχανισμός θραύσης “κατά ολίσθηση” θα μπορούσε να εκδηλωθεί στις ζώνες με τη μεγαλύτερη διατμητική παραμόρφωση (στο πόδα του πρανούς), δίδοντας τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας επιφάνειας ολίσθησης που επεκτείνεται προς τα ανάντη (D’ Elia *et al.*, 1988).



**Σχ. 3-3 Μοντέλο παραμόρφωσης πρανούς εκσκαφής στο λιγνιτωρυχείο Allori
(D’ Elia *et al.*, 1988)**

Λαμβάνοντας υπόψη τη παραπάνω συμπεριφορά, οι αναλύσεις ευστάθειας με μεθόδους οριακής ισορροπίας αποδείχθηκαν ανεπαρκείς, είτε για την ερμηνεία, είτε για τη πρόγνωση της συμπεριφοράς. Οι εμπειρικές σχέσεις που προέκυψαν με βάση τις μετρήσεις των οργάνων παρακολούθησης, βοήθησαν στον έλεγχο της κινητικότητας ενώ όσον αφορά τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, επιβεβαίωσε το μοντέλο κινητικότητας, παρόλο που η αξιοπιστία των γεωτεχνικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν δεν επέτρεψε την ακριβή εκτίμηση των μετακινήσεων.

Με βάση τα παραπάνω, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων συμβάλλει καθοριστικά στη μελέτη της ευστάθειας των πρανών. Η μέθοδος αυτή δίδει τη δυνατότητα προσδιορισμού των θέσεων συγκέντρωσης των τάσεων, που και πώς μπορεί να αναπτυχθεί παραμόρφωση και ποια δομικά στοιχεία του πρανούς μπορεί να παίξουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά του.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται η χρήση καταστατικών μοντέλων (μαθηματικών σχέσεων) που αποδίδουν τη συμπεριφορά του γεωυλικού, τα κυριότερα από τα οποία περιγράφονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Οι ιδιότητες των γεωυλικών και οι παράμετροι που τις επηρεάζουν πρέπει να σχετίζονται με μια μαθηματική σχέση, για να είναι δυνατή η πρόγνωση της συμπεριφοράς τους και ο αξιόπιστος σχεδιασμός των γεωτεχνικών έργων.

Η έρευνα έχει οδηγήσει στη διατύπωση μαθηματικών σχέσεων (κατασταστικών μοντέλων), οι οποίες είτε προσδιορίζουν την αντοχή του εδάφους κάτω από φόρτιση (κριτήρια θραύσης), είτε συσχετίζουν τις τάσεις με τις παραμορφώσεις ή και το χρόνο, τόσο στην περίπτωση στατικών όσο και δυναμικών καταπονήσεων. Τα μοντέλα συσχέτισης τάσεων - παραμορφώσεων, χρησιμοποιούνται κατά το πλείστον για την εκτίμηση της παραμόρφωσης των γεωλογικών σχηματισμών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Δυστυχώς όμως, δεν υπάρχει ένα καταστατικό μοντέλο αρκετά γενικό, που να καλύψει την ανάλυση όλων των προβλημάτων για κάθε τύπο γεωυλικού. Ως εκτούτου, ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που εξετάζεται, θα πρέπει να επιλέγεται και το κατάλληλο μοντέλο.

4.1 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ - ΧΡΟΝΟΥ

Ένα μοντέλο τάσης - παραμόρφωσης - χρόνου, είναι της μορφής :

$$\delta\epsilon = F(\delta\sigma', \delta t) \quad [4.1]$$

όπου $\delta\epsilon$: οι μεταβολές της παραμόρφωσης αναφορικά με μια αρχική κατάσταση (έναρξη ενός τεχνικού έργου ή ενός επιμέρους σταδίου μιας δοκιμής).

$\delta\sigma'$: οι μεταβολές της ενεργής τάσης και

δt : οι μεταβολές του χρόνου

Οι μεταβολές της τάσης σχετίζονται άμεσα με τις παραμορφώσεις ενώ η επίδραση του χρόνου εξαρτάται κυρίως από την στράγγιση – στερεοποίηση, τον ερπυσμό ή το ρυθμό παραμόρφωσης του εδάφους.

4.1.1 Μέτρα δυστροπίας

Για τη συσχέτιση της μεταβολής της τάσης με τις μεταβολές της παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται τα μέτρα ακαμψίας (δυστροπίας), τα οποία συσχετίζουν την αντίδραση του εδάφους με την επιβαλλόμενη τάση.

Δεδομένου ότι η παραμόρφωση που προκαλείται με τη φόρτιση (κάτω από συνθήκες στράγγισης), οφείλεται σε αλλαγή σχήματος ή και σε μεταβολή του όγκου του εδάφους, τα μέτρα δυστροπίας αποδίδουν τόσο την επίδραση της τάσης στην αλλαγή του σχήματος (μέτρο διάτμησης G) όσο και την επίδραση της τάσης στη μεταβολή του όγκου (μέτρο μεταβολής όγκου K).

Όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991), τα περισσότερα εδαφικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια με αξονική συμμετρία (δηλ. τις τριαξονικές δοκιμές και τις δοκιμές οιδημέτρου) και ως εκτούτου, για την απόδοση της τασικής κατάστασης θεωρούν τους όρους της αποκλίνουσας (q) και μέσης ενεργής τάσης (p') που προσδιορίζονται με τις σχέσεις :

$$q' = (\sigma'_a - \sigma'_r) \quad \text{και} \quad p' = 1/3 (\sigma'_a + 2\sigma'_r) \quad [4.2]$$

Οι δείκτες a και r αναφέρονται στη διεύθυνση του άξονα και της διαμέτρου του δοκιμίου αντίστοιχα.

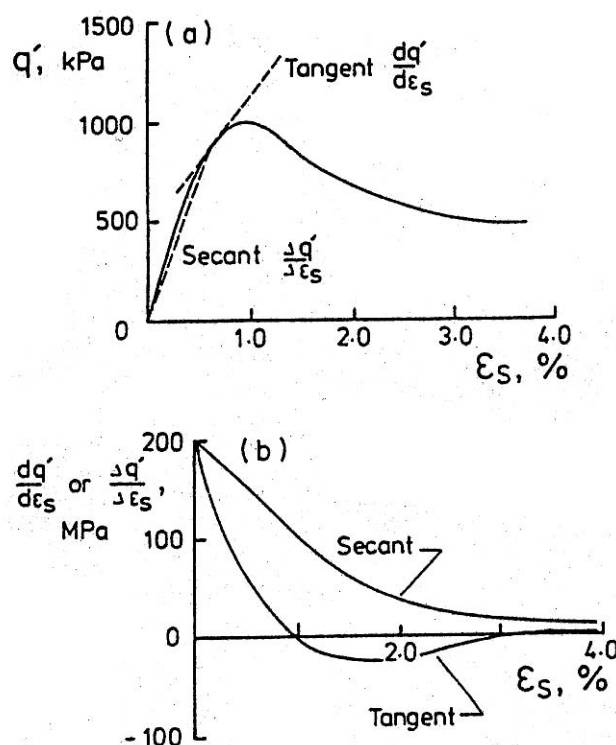
Για την απόδοση της παραμόρφωσης, χρησιμοποιούνται οι όροι της αποκλίνουσας παραμόρφωσης (ϵ_s) και της μεταβολής όγκου (ϵ_v) που προσδιορίζονται από τις σχέσεις :

$$\epsilon_s = 2/3 (\epsilon_a - \epsilon_r) \quad \text{και} \quad \epsilon_v = (\epsilon_a + 2\epsilon_r) \quad [4.3]$$

Όσον αφορά δε, τα μέτρα δυστροπίας (μέτρο διάτμησης G' και μέτρο μεταβολής όγκου K') που χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση της τασικής κατάστασης με την παραμόρφωση, αυτά ορίζονται από τις εξισώσεις :

$$\frac{\delta q'}{\delta \epsilon_s} = 3G' \quad \text{και} \quad \frac{\delta p'}{\delta \epsilon_v} = K' \quad [4.4]$$

Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται σε μικρές αυξήσεις της τάσης και της παραμόρφωσης και προκύπτουν από τριαξονικές δοκιμές με $\delta p' = 0$ και $\delta q' = 0$ αντίστοιχα. Καθώς οι αυξήσεις αυτές τείνουν στο μηδέν, τα μέτρα γίνονται εφαπτομενικά, ενώ όταν οι αυξήσεις από την έναρξη της φόρτισης είναι μεγάλες, τα μέτρα χαρακτηρίζονται σαν τέμνοντα (βλέπε Σχ. 4-1).



Σχ. 4-1 (α) Εφαπτομενικό και τέμνον μέτρο δυστροπίας και (β) μεταβολή των μέτρων σε συνάρτηση με την ανηγμένη παραμόρφωση (Atkinson and Sallfors, 1991)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μέτρο διάτμησης (G') και το μέτρο μεταβολής όγκου (K'), αποδίδουν τις διατμητικές και ογκομετρικές επιδράσεις χωριστά, και γι αυτό το λόγο παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία στους υπολογισμούς σε σύγκριση με το μέτρο του Young (E) και λόγο Poisson (ν). Εντούτοις, δεν αποδίδουν απαραίτητα μόνο την ελαστική συμπεριφορά και δεν μπορούν να συσχετισθούν άμεσα με τις παραμέτρους αυτές (E , ν).

Οι Graham and Houlsby (1983) πρότειναν μια πιο ολοκληρωμένη διατύπωση των καταστατικών εξισώσεων (δηλ. των εξισώσεων συμπεριφοράς) του εδάφους, εισάγοντας επιπλέον τα εγκάρσια μέτρα δυστροπίας J'_1 και J'_2 , που “συσχετίζουν” τις επιδράσεις της διάτμησης και της μεταβολής του όγκου.

Με τη θεώρηση των μέτρων αυτών, η συμπεριφορά του εδάφους περιγράφεται πληρέστερα με τις εξισώσεις:

$$\delta \varepsilon_s = \frac{1}{3G'} \delta q' + \frac{1}{J'_1} \delta p' \quad [4.5]$$

$$\delta \varepsilon_v = \frac{1}{J'_2} \delta q' + \frac{1}{K'} \delta p' \quad [4.6]$$

Για υλικά τα οποία είναι “τέλεια” ελαστικοπλαστικά, ο πίνακας της δυστροπίας είναι συμμετρικός και το $J'_1 = J'_2$ (Pierpoint, 1996 με πηγή τους Atkinson and Richardson, 1985), ενώ για ένα ελαστικό και ισότροπο εδαφικό υλικό το $J'_1 = J'_2 = \infty$ και οι επιδράσεις της διάτμησης και της μεταβολής του όγκου αποδεσμεύονται η μία από την άλλη.

Παρόλο που κάποια εδάφη είναι δυνατόν να θεωρηθούν ισότροπα και ελαστικά (τουλάχιστον για σχετικά μικρό εύρος φόρτισης), είναι γενικά απαραίτητο να εκτιμηθούν όλες οι παράμετροι δυστροπίας προκειμένου να προκύψουν ικανοποιητικές πληροφορίες για τις παραμορφώσεις που προκαλούνται με τις μεταβολές της ενεργής τάσης.

Με βάση τις προαναφερόμενες σχέσεις, οι παράμετροι δυστροπίας δεν περιέχουν τον παράγοντα χρόνο και μια βασική θεώρηση που γίνεται, είναι ότι η συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης του εδάφους είναι ανεξάρτητη από το ρυθμό φόρτισης και γενικά από το χρόνο. Υπάρχουν κάποιες θεωρίες στις οποίες ο χρόνος λαμβάνεται υπόψη, αλλά αυτές δεν θα αποτελέσουν αντικείμενο σχολιασμού επειδή είναι εκτός ενδιαφέροντος της παρούσας έρευνας.

Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι τα μέτρα δυστροπίας στις εξισώσεις [4.4] θεωρούνται σταθερά για μικρές αυξήσεις, αλλά γενικά ποικίλλουν και εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της σύγχρονης τασικής κατάστασης, του ιστορικού της φόρτισης, της τασικής διαδρομής και του χρόνου.

Μια άλλη, έμμεση συσχέτιση της δυστροπίας του εδάφους με την παραμόρφωση, είναι η συσχέτιση της με την ενέργεια παραμόρφωσης, το έργο δηλαδή που την προκαλεί. Η αυξανόμενη ενέργεια παραμόρφωσης ανά μονάδα όγκου, κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου σταδίου φόρτισης τριαξονικής δοκιμής, μπορεί να υπολογισθεί από την εξίσωση (Hird and Pierpoint, 1997):

$$U = \sum_0^{\varepsilon_v} \Delta p' \cdot \delta \varepsilon_v + \sum_0^{\varepsilon_s} \Delta q \cdot \delta \varepsilon_s \quad [4.7]$$

όπου $\Delta p'$ και Δq είναι οι μεταβολές των τάσεων από την αρχή του δεδομένου σταδίου της δοκιμής.

Οι μεταβολές των παραμέτρων δυστροπίας, σε σχέση με την αυξανόμενη ενέργεια παραμόρφωσης, είναι δυνατόν να εκτιμηθούν και να χρησιμοποιηθούν στη μαθηματική προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους (Pierpoint, 1996, Hird and Pierpoint, 1997).

Τέλος, η δυστροπία του εδάφους μπορεί να συσχετισθεί με ένα αριθμό θεμελιωδών εδαφικών σταθερών (βασικές παράμετροι Cam clay : M , λ , Γ , κ και γ), οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τις επιδράσεις του ιστορικού φόρτισης και της τασικής κατάστασης (συνθήκης).

4.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη δυστροφία του εδάφους

Οι Atkinson and Saalfors (1991) παρουσίασαν μια ανασκόπηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη δυστροφία και κατ' επέκταση την παραμόρφωση των εδαφών. Οι πιο σημαντικοί αναφέρονται παρακάτω και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον προσδιορισμό των μέτρων δυστροφίας.

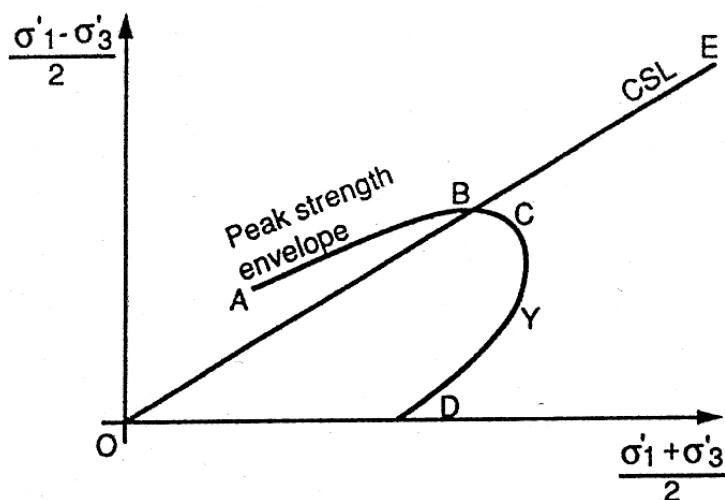
4.1.2.1 Τασική συνθήκη και επιφάνεια οριακής κατάστασης

Σημαντικό στοιχείο για τον προσδιορισμό της εδαφικής συμπεριφοράς είναι η διάκριση μεταξύ του μέτρου δυστροφίας για τασικές συνθήκες που αντιστοιχούν εσωτερικά και εξωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης. Κι αυτό γιατί, η δυστροφία που επιδεικνύει το έδαφος εξαρτάται από τη θέση της σύγχρονης τασικής του συνθήκης (current state) σε σχέση με την επιφάνεια οριακής κατάστασης*. Θεωρήθηκε αρχικά ότι για τασικές συνθήκες εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης, οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές, ενώ για τασικές συνθήκες πάνω στην επιφάνεια αυτή, οι παραμορφώσεις είναι ελαστικοπλαστικές. (Η επιφάνεια οριακής κατάστασης θεωρήθηκε ότι αποτελεί μια επιφάνεια διαρροής).

Σ' ένα διάγραμμα τάσεων ενός κορεσμένου εδάφους (Σχ. 4-2), η επιφάνεια οριακής κατάστασης (καμπύλη διαρροής Y) οριοθετεί μια περιοχή (OCD) μέσα στην οποία οι παραμορφώσεις θεωρούνται κατά το πλείστον ανακτήσιμες (εδαφική συμπεριφορά κατά το πλείστον ελαστική). Κατά μήκος του τμήματος BCD, εκδηλώνονται πλαστικές παραμορφώσεις (κατά το πλείστον λόγω μεταβολής όγκου), ενώ κατά μήκος της AB επέρχεται θραύση (Leroueil *et al.*, 1996).

Μεταγενέστερες εργασίες έδειξαν ότι η συμπεριφορά των περισσότερων εδαφών, για τασικές συνθήκες εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης, δεν θα πρέπει να θεωρείται ελαστική και στα αναθεωρημένα μοντέλα, η μόνη περιοχή ελαστικής συμπεριφοράς αφορά τις πολύ μικρές παραμορφώσεις. Εντούτοις, η επιφάνεια οριακής κατάστασης είναι ένα χαρακτηριστικό όριο για τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης καθώς παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές της συμπεριφοράς των εδαφών με την προσέγγιση και την πορεία της τασικής τους συνθήκης πάνω σ' αυτή την επιφάνεια.

* Η επιφάνεια οριακής κατάστασης (state boundary surface), διαχωρίζει πιθανές από μη πιθανές τασικές συνθήκες στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα έδαφος.



Σχ. 4-2 Σχηματική μηχανική συμπεριφορά των εδαφών (Leroueil *et al.*, 1996)

4.1.2.2 Σύγχρονη τασική κατάσταση

Όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991), η επίδραση του ιστορικού της φόρτισης και της τασικής συνθήκης στη δυστροπία του εδάφους, διερευνήθηκε από τους Atkinson and Little (1988) σε αναζυμωμένα δοκίμια από παγετώδη άργιλο. Προέκυψε ότι η δυστροπία αυξάνει γραμμικά με την αύξηση της μέσης τάσης (p') και μειώνεται με την αύξηση της αποκλίνουσας φόρτισης (q).

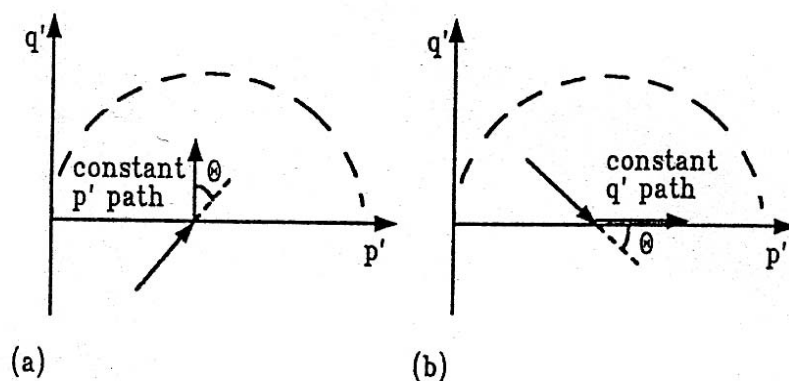
Επίσης, η δυστροπία σε μία συγκεκριμένη τασική συνθήκη και παραμόρφωση τείνει να αυξηθεί ανάλογα με το λογάριθμο του λόγου προστερεοποίησης του εδάφους. Όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991), ανάλογη συμπεριφορά διαπιστώθηκε και από άλλους ερευνητές όπως οι Wroth (1971), και Atkinson (1975).

4.1.2.3 Τασική διαδρομή (περίοδος διακοπής και περιστροφής της τασικής διαδρομής)

Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει τη δυστροπία των εδαφών, είναι το πλέον πρόσφατο ιστορικό παρελθόν του δείγματος. Περιλαμβάνει:

- την περίοδο κατά την οποία το έδαφος παραμένει σε σταθερή φόρτιση από τη λήξη της προηγούμενης μέχρι την έναρξη της τρέχουσας τασικής διαδρομής. Κατά τη διάρκεια αυτή, μπορεί να προκληθεί εκτόνωση της πίεσης των πόρων, ερπυσμός και αύξηση της δυστροπίας.
- την εκτροπή (περιστροφή) της τρέχουσας σε σχέση με την προηγούμενη τασική διαδρομή.

Όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991), μεταβολές της δυστροπίας μετά από περιστροφή[†] (θ) της τασικής τους διαδρομής (Σχ. 4-3), διαπιστώθηκαν από τους Atkinson *et al.* (1990), σε δοκιμές σε ανασυμπυκνωμένα δείγματα της αργίλου του Λονδίνου.



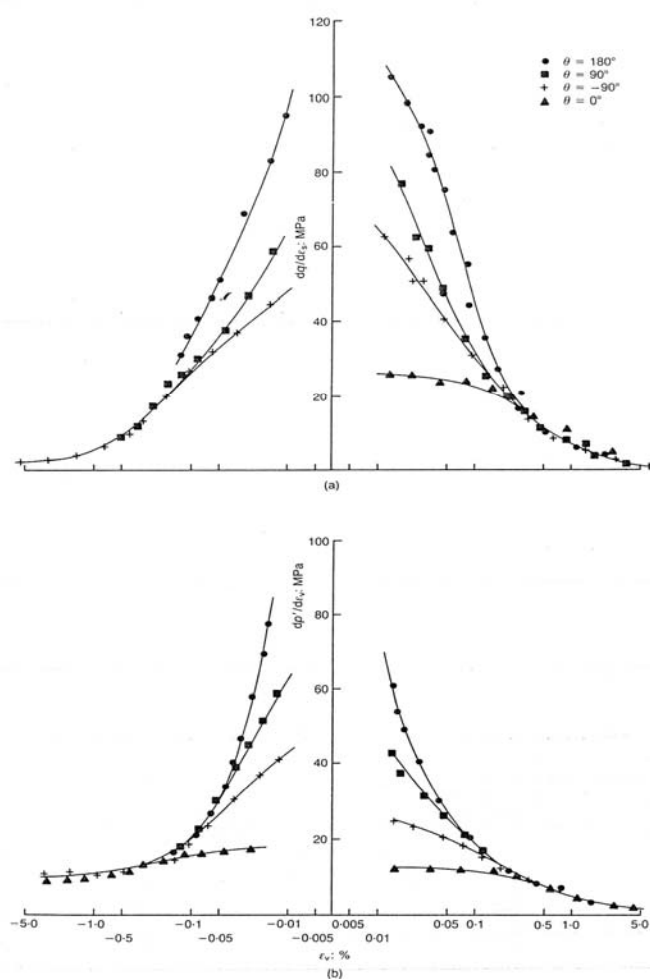
Σχ. 4-3 Περιστροφή των τασικών διαδρομών κατά γωνία θ (Atkinson and Sallfors, 1991).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-4 επιδεικνύουν τις πολύ σημαντικές μεταβολές στη δυστροπία (G' και K') μετά από περιστροφή της διεύθυνσης της τασικής διαδρομής κατά διάφορες γωνίες θ . Στα διαγράμματα αυτά είναι εμφανής επίσης η μη γραμμική σχέση τάσης - παραμόρφωσης για όλο το εύρος των παραμορφώσεων (από 0,01% μέχρι κοντά στη θραύση). Είναι σαφές ότι για παραμόρφωση μεγαλύτερη από ένα όριο (0,2% στη συγκεκριμένη περίπτωση), η παρατηρούμενη δυστροπία γίνεται ουσιαστικά ανεξάρτητη από την αλλαγή διεύθυνσης της τασικής διαδρομής.

4.1.2.4 Ρυθμός φόρτισης

Η έρευνα σχετικά με την επίδραση του ρυθμού φόρτισης στη συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης του εδάφους, έδειξε ότι η δυστροπία του εδάφους μπορεί να είναι σχετικά ανεξάρτητη του ρυθμού φόρτισης, εφόσον ο ρυθμός είναι ικανοποιητικά αργός ώστε να επιτρέπει εξισορρόπηση της πίεσης του νερού των πόρων (Atkinson and Sallfors, 1991).

[†] Μια τιμή $\theta=0^\circ$ υποδεικνύει ότι η τασική διαδρομή είναι συνεχής, ενώ τιμή της $\theta=180^\circ$ υποδεικνύει πλήρη αναστροφή στη διεύθυνση της φόρτισης (από συμπίεση επέρχεται έκταση ή αντίστροφα).



Σχ. 4-4 Επίδραση του πλέον πρόσφατου τασικού ιστορικού, σε δείγματα της αργίλου του Λονδίνου (Atkinson *et al.*, 1990)

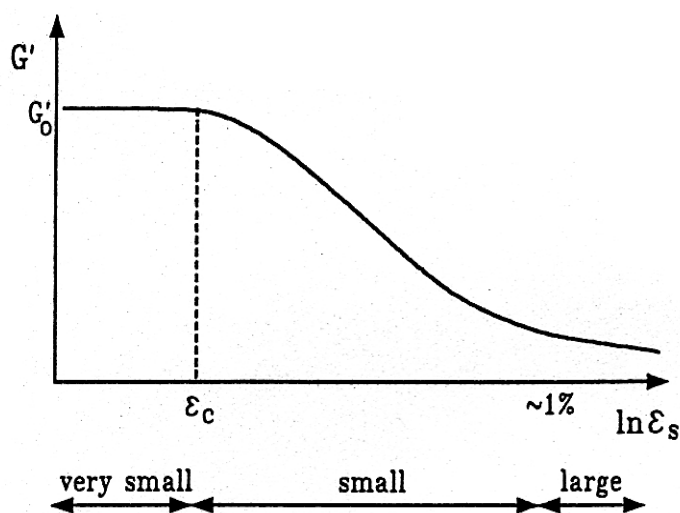
Με βάση την παραπάνω διαπίστωση, η επιλογή του ρυθμού φόρτισης στις εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό της δυστροπίας, θα πρέπει να γίνεται με κριτήριο την εξισορρόπηση της πίεσης των πόρων και της στράγγισης. Εάν η επίδραση του ρυθμού φόρτισης στην παρατηρούμενη εδαφική δυστροπία είναι μικρή, τότε η επιλογή μεταξύ δοκιμών ελεγχόμενης τάσης και ελεγχόμενης παραμόρφωσης γίνεται κατά κύριο λόγο με βάση την ευκολία πραγματοποίησης της δοκιμής.

Σε δοκιμές προστερεοποιημένων εδαφών, η επιλογή του ρυθμού φόρτισης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική στο εύρος των μικρών παραμορφώσεων, όπου τα μέτρα δυστροπίας πιθανόν να είναι σχετικά μεγάλα και οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης έντονα μη γραμμικές. Σ' αυτή την περίπτωση, οι πολύ υψηλοί ρυθμοί φόρτισης σε δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης, είναι δυνατόν να αποφευχθούν, πραγματοποιώντας το πρώτο μέρος της δοκιμής κάτω από ελεγχόμενη φόρτιση (Atkinson and Sallfors, 1991, από Atkinson and Evans, 1985).

4.1.3 Η σχέση τάσης - παραμόρφωσης στα εδάφη

Η θεώρηση ότι η συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης των εδαφών είναι περίπου γραμμική για τασικές συνθήκες εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης, ήταν μέχρι τα τελευταία χρόνια θεμελιώδης αρχή για όλες σχεδόν τις γεωτεχνικές εφαρμογές.

Εντούτοις, όπως αναφέρουν οι Atkinson *et al.* (1993), έρευνες σχετικά με τη δυστροπία των έντονα προστερεοποιημένων εδαφών και των μαλακών βράχων (Jardine 1985, Richardson 1988), έδειξαν ότι η σχέση τάσης - παραμόρφωσης που επιδεικνύουν οι σχηματισμοί αυτοί, είναι πάντοτε μη γραμμική (δηλαδή ότι τόσο το μέτρο μεταβολής του όγκου K' , όσο και το μέτρο διάτμησης G' , μεταβάλλονται μη γραμμικά με την παραμόρφωση), κάτω από όλες σχεδόν τις τασικές συνθήκες.



Σχ. 4-5 Μεταβολή της δυστροπίας με την παραμόρφωση του εδάφους (Atkinson and Sallfors, 1991)

Στο Σχ. 4-5, είναι εύκολη η διάκριση τριών ζωνών παραμόρφωσης, οι οποίες εμφανίζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης. Αυτές οι ζώνες αφορούν παραμορφώσεις :

- σε εύρος μικρότερο του 0,001% (πολύ μικρές παραμορφώσεις), όπου η δυστροπία είναι σχεδόν σταθερή σε σχέση με την παραμόρφωση.
- στο εύρος από 0,001% έως 1% (μικρές παραμορφώσεις), όπου η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης είναι έντονα μη γραμμική και
- σε εύρος μεγαλύτερο από περίπου 1% έως και 10% (μεγάλες παραμορφώσεις), όπου το έδαφος προσεγγίζει τη θραύση και η δυστροπία γίνεται πολύ μικρή.

Κατά συνέπεια, η διαφοροποίηση του μέτρου διάτμησης G' με τη διατμητική παραμόρφωση ε_s όπως και η διαφοροποίηση του μέτρου K' σε σχέση με τη μεταβολή του όγκου του εδάφους ε_v , επιδεικνύουν γενικά έντονα μη γραμμική συμπεριφορά (Atkinson *et al.*, 1993).

Τα παραπάνω προέκυψαν μετά τις βελτιώσεις των εργαστηριακών δοκιμών και των οργάνων μέτρησης που έδωσαν την δυνατότητα να διαπιστωθεί έως και υποδεκαπλασιασμός της δυστροφίας μέσα στο εύρος των τάσεων που ενδιαφέρει το μηχανικό.

Η μη γραμμικότητα της δυστροφίας του εδάφους θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό γιατί επηρεάζει τη συμπεριφορά των κατασκευών και έχει πολύ μεγάλη σημασία στον προγραμματισμό των κατάλληλων δοκιμών (πεδίου - εργαστηρίου) που πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων δυστροφίας. Ο Burland (1989) έδειξε ότι εάν ληφθεί υπόψη η σχετικά μεγάλη δυστροφία που παρατηρείται σε μικρές παραμορφώσεις, η υπολογιζόμενη και παρατηρούμενη κινητικότητα του εδάφους είναι συγκρίσιμες για μια μεγάλη ποικιλία κατασκευών.

4.1.4 Προσδιορισμός της δυστροφίας

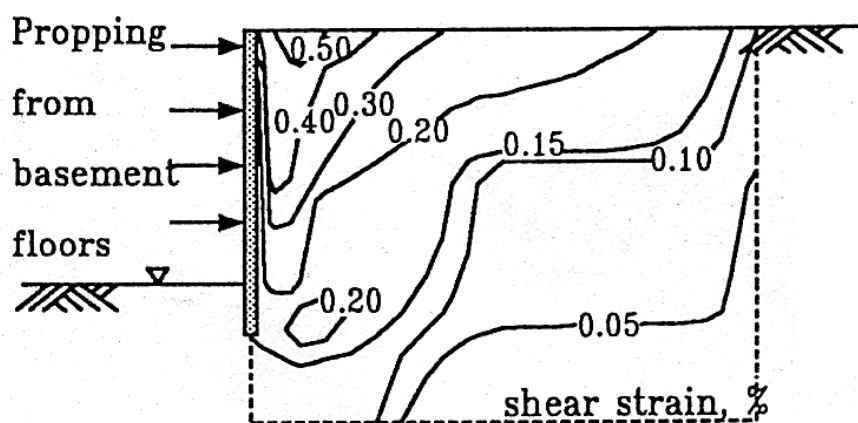
Οι παράμετροι δυστροφίας ενός εδαφικού σχηματισμού, προσδιορίζονται με δοκιμές πεδίου ή εργαστηρίου. Οι πρώτες εφαρμόζουν στο έδαφος μη ομοιόμορφες τάσεις (δεδομένου ότι οι τάσεις μειώνονται με την απόσταση από το όργανο της δοκιμής) και συνεπώς, δεν είναι δυνατό χωρίς επιπρόσθετες πληροφορίες να προκύψει η μη γραμμική συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης.

Στις εργαστηριακές δοκιμές, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, θεωρητικά τουλάχιστον είναι ομοιόμορφες σε όλο το δοκίμιο (Atkinson *et al.*, 1993) και όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991) επικαλούμενοι έρευνα του Atkinson (1990), αποτελούν τις μόνες δοκιμές από τις οποίες είναι πιθανόν να ληφθούν επαρκείς πληροφορίες για τη μη γραμμική συμπεριφορά του εδάφους.

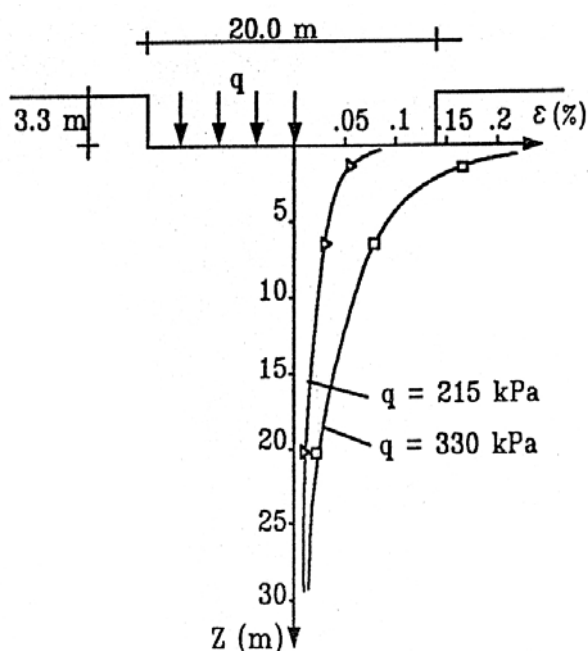
Όσον αφορά το εύρος των παραμορφώσεων που ενδιαφέρει, παρατηρήσεις στο πεδίο αποδεικνύουν ότι οι παραμορφώσεις που εμφανίζονται στο έδαφος γύρω από κατασκευές (θεμελιώσεις και εκσκαφές) είναι γενικά μικρότερες από περίπου 0,1%, εύρος που αντιστοιχεί σε πολύ μικρές έως και μικρές παραμορφώσεις. Εξαίρεση αποτελούν μόνο μερικές μικρές τοπικές ζώνες. Ως εκ τούτου, για τον αξιόπιστο προσδιορισμό των παραμέτρων δυστροφίας που ενδιαφέρουν στο σχεδιασμό, θα πρέπει οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται στο κατάλληλο εύρος παραμόρφωσης, λαμβάνοντας υπόψη την αντίστοιχη διαφοροποίηση της δυστροφίας (Atkinson *et al.*, 1993).

Μελέτες πεδίου με επαρκή δεδομένα για τον υπολογισμό των διατμητικών παραμορφώσεων και των μεταβολών του όγκου είναι σπάνιες. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές καλά τεκμηριωμένες περιπτώσεις που αποδεικνύουν ότι οι παραμορφώσεις κάτω από τον άξονα θεμελίωσης ενός κτιρίου (Σχ. 4-6), περιορίζονται κάτω από το 0,5% (Atkinson and Sallfors, 1991 από Burland, 1989).

Επίσης, το Σχήμα 4-7 παρουσιάζει τη μεταβολή της κατακόρυφης ανηγμένης παραμόρφωσης με το βάθος, κάτω από τη θεμελίωση ενός ψηλού κτιρίου σε παγετώδη άργιλο, όπως διαμορφώνεται σε δύο στάδια κατασκευής (Atkinson *et al.*, 1993 από Kriegel and Weisner, 1973). Οι παραμορφώσεις είναι γενικά μικρές, με τις μέγιστες τιμές να περιορίζονται κάτω από 0,2%.



Σχ. 4-6 Ισοκαμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης (ϵ_s) σε εκσκαφή στην άργιλο του Λονδίνου για τη θεμελίωση της British Library (Atkinson *et al.*, 1990 από Loxham, 1990)



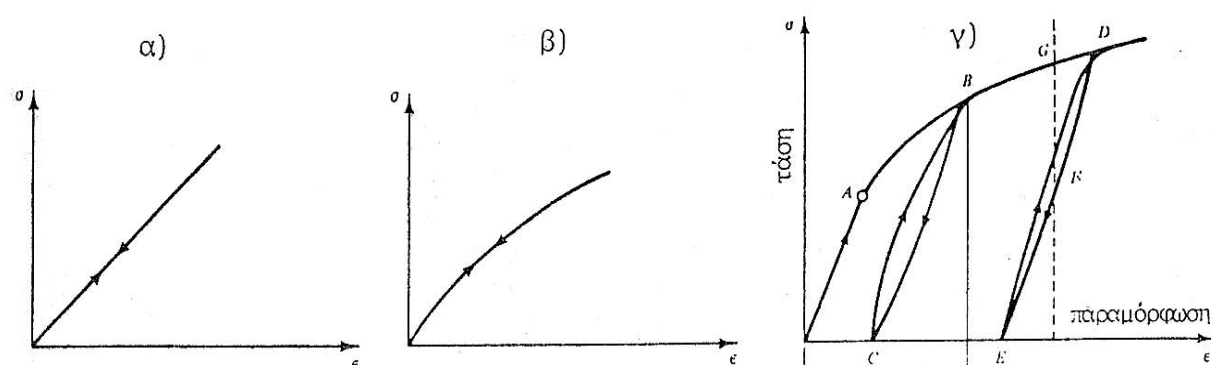
Σχ. 4-7 Κατακόρυφες ανηγμένες παραμορφώσεις κάτω από τη θεμελίωση ενός ψηλού κτιρίου σε άργιλο παγετώνων (Atkinson *et al.*, 1993 από Kriegel and Weisner, 1973)

Όσον αφορά τις παραμορφώσεις που εκδηλώνονται σε πρανή εκσκαφών είναι επίσης μικρές. Πιο συγκεκριμένα, στο πρανές εκσκαφής στιφρής αργίλου (Σχήμα 1-11), ύψους 16 m, η ανηγμένη παραμόρφωση (έκταση) κατά την οριζόντια διεύθυνση εκτιμήθηκε σε 0,16% (Zaruba and Mencl, 1982). Για πρανή ύψους 10 και 13,5 m, η έκταση μειώνεται σε 0,05% και 0,09% αντίστοιχα, ενώ σε μια εκσκαφή με βάθος περίπου 20 m, θα πρέπει να αναμένεται παραμόρφωση (διάταση) κατά την οριζόντια διεύθυνση της τάξης του 1% (Zaruba and Mencl, 1982).

Από τα παραπάνω παραδείγματα, που αφορούν διαφορετικούς τύπους γεωτεχνικών κατασκευών, προκύπτει ότι οι παραμορφώσεις που εκδηλώνονται στο έδαφος είναι σχετικά μικρές αλλά εμφανίζουν σημαντικό εύρος διακύμανσης. Στις προαναφερόμενες περιπτώσεις οι παραμορφώσεις κυμαίνονται από 0,2% μέχρι 0,5% ή και 1%, μειούμενες γενικά με την απόσταση από την κατασκευή.

4.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Τα πρώτα καταστατικά μοντέλα (νόμοι συμπεριφοράς) που αναπτύχθηκαν για την περιγραφή και πρόγνωση της εδαφικής συμπεριφοράς βασιζόταν στην ελαστική θεωρία (γραμμικά ελαστικά μοντέλα, Σχ. 4-8α). Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν τα μοντέλα μεταβλητής ελαστικότητας (ή μη γραμμικά ελαστικά) προκειμένου να αποδοθεί η μη γραμμικότητα της σχέσης τάσης – παραμόρφωσης (Σχ. 4-8β) και ακολούθησαν τα ελαστικοπλαστικά (Σχ. 4-8γ).



Σχήμα 4-8 Πρότυπα διαγράμματα μηχανικής συμπεριφοράς : (α) Γραμμικά ελαστική, (β) Μη Γραμμικά ελαστική, (γ) Ελαστικοπλαστική

4.2.1 Γραμμικά ελαστικά μοντέλα

Οι Poulos and Davis (1974) δημοσίευσαν μια εκτενή σειρά γραμμικά ελαστικών επιλύσεων για ένα αριθμό κοινών κατασκευαστικών προβλημάτων. Οι εξισώσεις αυτές εφαρμόζουν την τεχνική της υπέρθεσης (που ισχύει για τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά) και χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Εντούτοις, είναι σαφές ότι δεν βρίσκουν εφαρμογή σε οριακές καταστάσεις, για τις οποίες τα μοντέλα της ελαστικής παραμόρφωσης συμπληρώνονται με ένα γραμμικά στερεο-πλαστικό κριτήριο θραύσης.

Αν και τα γραμμικά ελαστικά μοντέλα είναι απλά στην εφαρμογή, έχει αποδειχθεί ότι το εύρος εφαρμογής της γραμμικής ελαστικότητας είναι ουσιαστικά πιο περιορισμένο από ότι αρχικά θεωρήθηκε. Όπως προαναφέρθηκε, η θεωρία της ελαστικότητας είναι εφαρμόσιμη μόνο στην περιοχή των πολύ μικρών παραμορφώσεων.

4.2.2 Μη γραμμικά μοντέλα

Η προσέγγιση της μη γραμμικής δυστροπίας του εδάφους επιτυγχάνεται είτε με :

- προσομοίωση των καμπυλών τάσης - παραμόρφωσης που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές, είτε με
- προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους με βάση τη θεωρία της ελαστικοπλαστικότητας, χρησιμοποιώντας ελαστικοπλαστικά μοντέλα κινηματικής κράτυνσης[‡] με πολλαπλές επιφάνειες δυνητικής πλαστικής συμπεριφοράς.

Κατά την πρώτη προσέγγιση (μοντέλα μεταβλητής ελαστικότητας), η συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης θεωρείται ότι είναι ελαστική (η καλλίτερα ψευδο-ελαστική) και εμπειρικές σχέσεις προσαρμόζονται στις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης. Αυτή η διαδικασία υιοθετήθηκε από τους Duncan and Chang (1970), οι οποίοι προσέγγισαν την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης με μια υπερβολή και από τον Sun (1990) ο οποίος χρησιμοποίησε ένα απλό εκθετικό νόμο (Atkinson and Sallfors, 1991). Περισσότερο πολύπλοκες εκφράσεις προτείνονται από τους Jardine *et al.* (1991). Για τον προσδιορισμό των απαραίτητων εμπειρικών σχέσεων, απαιτούνται δεδομένα από τις εργαστηριακές (ή και τις επιτόπου) δοκιμές, οι οποίες θα πρέπει να πραγματοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη δυστροπία, όπως η σύγχρονη τασική συνθήκη, το ιστορικό φόρτισης και η τρέχουσα τασική διαδρομή.

[‡] Οι επιφάνειες διαρροής διαφοροποιούνται με την εμφάνιση της πλαστικής παραμόρφωσης. Εάν η επιφάνεια διαρροής δεν μεταβάλλεται σε διαστάσεις αλλά αλλάζει θέση στον τασικό χώρο, το φαινόμενο ονομάζεται κινηματική κράτυνση.

Κατά τη δεύτερη προσέγγιση της μη γραμμικής δυστροπίας των εδαφών (*χρήση ελαστοπλαστικών μοντέλων*), η συμπεριφορά τάσης - παραμόρφωσης εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης, θεωρείται ότι είναι μη ελαστική και για την απόδοση της συμπεριφοράς του εδάφους αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα. Η απλούστερη προσέγγιση, όπως αναφέρουν οι Atkinson and Sallfors (1991), φαίνεται να είναι η προσαρμογή των μοντέλων Cam-clay, στα οποία περιλαμβάνονται επιπρόσθετες επιφάνειες διαρροής εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης (Mroz *et al.*, 1979, Hashiguchi, 1985, Al Tabaa and Wood, 1989).

4.2.2.1 Μοντέλα μεταβλητής ελαστικότητας (μη γραμμικά ελαστικά ή ψευδοελαστικά)

Η εφαρμογή των μοντέλων μεταβλητής ελαστικότητας, απαιτεί μόνο ένα κατάλληλο μαθηματικό τύπο για την προσομοίωση της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης. Τέτοια μοντέλα είναι πολύ δημοφιλή, δεδομένου ότι είναι άμεσα εφαρμόσιμα και κατανοητά, ενώ είναι και ικανά για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωυλικού τόσο σε κλίμακα εργαστηρίου όσο και σε κλίμακα πεδίου.

Οι Tatsuoka and Shibuya (1992) έδωσαν μία ανασκόπηση των πολυάριθμων μη γραμμικών ελαστικών μοντέλων. Το πρώτο μοντέλο αυτού του τύπου (Kondner and Zelasco, 1963, Duncan and Chang, 1970) και πιθανότατα το πιο γνωστό, βασίζεται στην παραδοχή ότι η σχέση μεταξύ της αποκλίνουσας τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$) και της αξονικής παραμόρφωσης (ε) είναι υπερβολικής μορφής και δίδεται από την εξίσωση:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{op}}} \quad [4.8]$$

όπου σ_1 μέγιστη κύρια τάση

σ_3 ελάχιστη κύρια τάση

ε αξονική παραμόρφωση στη διεύθυνση της σ_1

E_i μέτρο ελαστικότητας στην αρχή της φόρτισης, (*κλίση της εφαπτόμενης στο αρχικό τμήμα της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης*)

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{op}$ η οριακή τιμή της αποκλίνουσας τάσης κατά τη θραύση.

(*Η τιμή $(\sigma_1 - \sigma_3)_{op}$ αντιστοιχεί σε 2-3% ανηγμένης παραμόρφωσης και ισούται με το 90-100% της ιδεατά ασύμπτωτης τιμής*).

R_f συντελεστής που κυμαίνεται από 0,75 έως 1,0 και συσχετίζει την $(\sigma_1 - \sigma_3)_{op}$ με την τιμή $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ασύμπτ}$ που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση απείρου μεγέθους.

Δεδομένου όμως ότι

$$\alpha) \text{ η οριακή τιμή αποκλίνουσας τάσης υπολογίζεται από τη σχέση: } (\sigma_1 - \sigma_3)_{op} = \frac{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

η οποία προκύπτει από τριγωνομετρικές σχέσεις με βάση τον κύκλο του Mohr και

β) η αρχική τιμή του μέτρου του Young υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση που πρότεινε ο Janbu

$$E_i = k \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad [4.9]$$

όπου P_a η ατμοσφαιρική πίεση (η οποία θεωρείται σαν τάση αναφοράς) και ισούται με τις τάσεις στην ελεύθερη επιφάνεια

k η αρχική τιμή του μέτρου του Young στην επιφάνεια, όταν $\sigma_3 = P_a$

n ο συντελεστής που καθορίζει το ρυθμό αύξησης του E_i σε συνάρτηση με την αύξηση της ελάχιστης κύριας τάσης σ_3 ,

το εφαπτομενικό μέτρο του Young κατά τη φόρτιση, δίδεται από τη σχέση

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \cdot k \cdot P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad [4.10]$$

Κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση, η συμπεριφορά του εδάφους φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από το ποσοστό της αντοχής που έχει ενεργοποιηθεί και προσεγγίζει ικανοποιητικά τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά με κλίση E_{ur} . Οι τιμές του μέτρου E_{ur} εξαρτώνται από την ελάχιστη κύρια τάση σ_3 και εκτιμώνται από την εξίσωση:

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad [4.11]$$

όπου K_{ur} συντελεστής που εξαρτάται από το έδαφος και τον τρόπο φόρτισης

P_a η ατμοσφαιρική πίεση και

n συντελεστής που καθορίζει το ρυθμό αύξησης του E_{ur} σε σχέση με την αύξηση της σ_3 .

Το μοντέλο αυτό (Duncan and Chang, 1970) χρησιμοποιήθηκε περισσότερο από κάθε άλλο σε θέματα εδαφομηχανικής. Το πλεονέκτημα του έγκειται στην εύκολη σύνταξη του απαραίτητου λογισμικού, ενώ οι παράμετροι του έχουν καθαρή φυσική σημασία και εκτιμώνται σχετικά εύκολα. Επίσης, θεωρεί ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών, όπως τη μη ελαστικότητα, τη μη γραμμικότητα και την εξάρτηση της παραμορφωσιμότητας τους από την ελάχιστη κύρια τάση. Όμως, αγνοεί την εξάρτηση της παραμόρφωσης από την ενδιάμεση κύρια τάση,

τη διαδρομή των τάσεων, τη μεταβολή του όγκου κατά τη διάτμηση και τη μη ταύτιση των αξόνων των κυρίων τάσεων με τους άξονες μεταβολής των παραμορφώσεων.

Ένα άλλο, ευρύτατα εφαρμόσιμο μοντέλο είναι αυτό της εδαφικής κράτυνσης (Hardening Soil Model). Πρόκειται για ένα πιο βελτιωμένο μοντέλο όσον αφορά την προσομοίωση της συμπεριφοράς, τόσο των μαλακών όσο και των στιφρών εδαφών (Schanz and Vermeer, 1998). Βασίζεται στην προσομοίωση της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης, αλλά χρησιμοποιεί και τη θεωρία της πλαστικότητας. Η επιφάνεια διαρροής του δεν είναι σταθερή στον τρισδιάστατο χώρο των κύριων τάσεων, αλλά μπορεί να διογκωθεί ανάλογα με την πλαστική παραμόρφωση που επιδεικνύει το εδαφικό υλικό. Διακρίνει δύο τύπους κράτυνσης, τη *κράτυνση διάτμησης (shear hardening)* και τη *κράτυνση συμπίεσης (compression hardening)*. Η κράτυνση διάτμησης αποδίδει μη ανακτήσιμες παραμορφώσεις που προκύπτουν από την αποκλίνουσα φόρτιση ενώ η κράτυνση συμπίεσης αποδίδει μη ανακτήσιμες πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της συμπίεσης σε ισότροπη φόρτιση και σε φόρτιση τύπου οιδημέτρου (Plaxis, 1998).

Το μοντέλο αυτό που αναλυτικά παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 11, πλεονεκτεί έναντι του απλού υπερβολικού, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη του την πλαστικότητα και τη διασταλτικότητα του εδάφους. Η βασική ιδέα για τη διατύπωση του ήταν η υπερβολική σχέση μεταξύ της κατακόρυφης παραμόρφωσης (ε_1) και της αποκλίνουσας τάσης (q) κατά την τριαξονική δοκιμή (Σχήμα 4-9). Οι συμβατικές τριαξονικές δοκιμές υπό στράγγιση, τείνουν σε καμπύλες διαρροής οι οποίες αποδίδονται με τη σχέση

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{για } q < q_f \quad [4.12]$$

όπου q η αποκλίνουσα τάση

q_a η ασύμπτωτη τιμή της αποκλίνουσας τάσης

q_f η αποκλίνουσα τάση κατά την αστοχία και

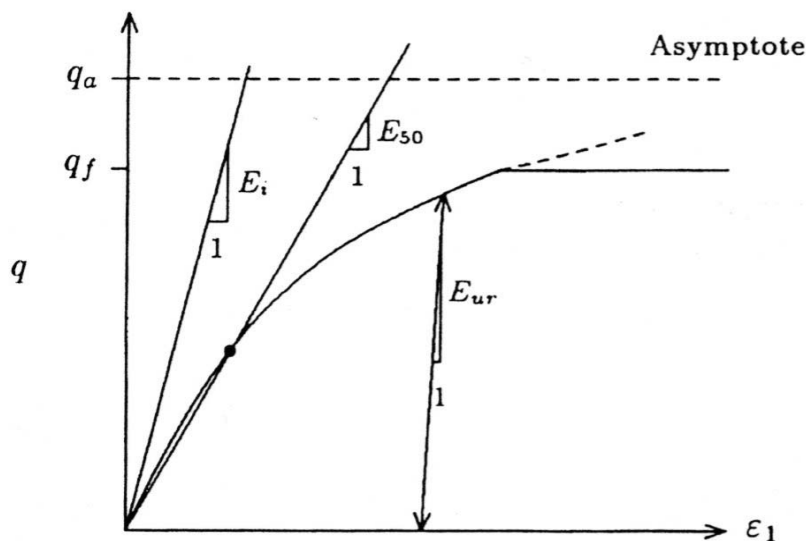
E_{50} το τέμνον μέτρο δυστροπίας στο 50% της αντοχής του εδάφους, το οποίο εξαρτάται από την πλευρική τάση και προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma_3'}{c \cot \varphi + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad [4.13]$$

όπου E_{50}^{ref} είναι το μέτρο δυστροπίας αναφοράς που αντιστοιχεί στην πλευρική τάση αναφοράς p^{ref} (συνήθως $p^{\text{ref}} = 100$ μονάδες τάσης) και

m εκθέτης που προσδιορίζει το μέγεθος της εξάρτησης της δυστροπίας από την πλευρική τάση σ_3' [§].

[§] με αρνητικό πρόσημο ($-\sigma_3'$) για την περίπτωση συμπίεσης



Σχ. 4-9 Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη φόρτιση εδαφικού δοκιμίου σε μια τριαξονική δοκιμή υπό στράγγιση (Schanz *et al.*, 1999)

Για τασικές διαδρομές αποφόρτισης και επαναφόρτισης, η παραμόρφωση εκτιμάται σε συνάρτηση με το μέτρο E_{ur} που προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma_3'}{c \cot \varphi + p^{ref}} \right)^m \quad [4.14]$$

όπου E_{ur}^{ref} το μέτρο για αποφόρτιση - επαναφόρτιση που αντιστοιχεί στην τάση αναφοράς p^{ref} .

Σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ότι $E_{ur}^{ref} \cong 3 E_{s0}^{ref}$.

Εκτός από τα προαναφερθέντα, ερευνητικές προσπάθειες για προσέγγιση της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης με μεγαλύτερη ακρίβεια, οδήγησαν στην ανάπτυξη μοντέλων που διαφοροποιούνται ανάλογα με το μέγεθος της παραμόρφωσης. Μερικά απο αυτά αναφέρονται παρακάτω.

4.2.2.1.1 Γραμμικά μοντέλα δυστροπίας για πολύ μικρές παραμορφώσεις

Ενα μοντέλο που εκφράζει την εξάρτηση της δυστροπίας του εδάφους (G') από το επίπεδο της σύγχρονης τάσης (p') σε πολύ μικρές παραμορφώσεις, δίδεται με την εξίσωση που αναφέρεται από τους Viggiani and Atkinson (1995), με πηγή τους Wroth and Houlsby (1985) :

$$\frac{G'}{p_r} = A \left(\frac{p'}{p_r} \right)^n \quad [4.15]$$

όπου p_r = η τάση αναφοράς (π.χ. 1 kPa)

A, n = αδιάστατες παράμετροι εξαρτώμενες από την παραμόρφωση και τη φύση του εδάφους.

Όπως αναφέρει ο Pierpoint (1996), ο Viggiani (1992) τροποποίησε την παραπάνω σχέση προκειμένου να συμπεριλάβει την επίδραση της αλλαγής στη δομή του εδάφους που προκύπτει από τις προηγούμενες τασικές συνθήκες και πρότεινε την εξίσωση :

$$\frac{G'}{p_r} = A \left(\frac{p'}{p_r} \right)^n R_o^m \quad [4.16]$$

όπου R_o = ο λόγος προστεροποίησης

A, n, m = αδιάστατες παράμετροι εξαρτώμενες από την παραμόρφωση και τη φύση του εδάφους

Αν και η παραπάνω εξίσωση αρχικά επιβεβαιώθηκε σε πολύ μικρά επίπεδα παραμόρφωσης (με δυναμικές δοκιμές φόρτισης), διαπιστώθηκε ότι εφαρμόζεται εξίσου καλά και σε υψηλότερα επίπεδα παραμόρφωσης. Επίσης οι Viggiani and Atkinson (1995) αναφέρουν ότι αποδίδει τη συμπεριφορά τόσο των προστεροποιημένων αδιατάρακτων δειγμάτων της αργίλου του Λονδίνου (με $R_o > 20$) όσο και των κανονικά στερεοποιημένων (μετά από αναζύμωση) δοκιμών της ίδιας αργίλου. Ερμηνεύοντας τη διαπίστωση αυτή, αναφέρουν ότι η επίδραση της δομής της αργίλου στη δυστροπία, είναι μικρή σε πολύ χαμηλά επίπεδα παραμόρφωσης και ότι όλες οι άλλες επιδράσεις της δομής εκφράζονται ικανοποιητικά μέσω του λόγου προστεροποίησης.

4.2.2.1.2 Μη γραμμικά μοντέλα δυστροπίας για μικρές και μεγάλες παραμορφώσεις

Όπως αναφέρει ο Pierpoint (1996), ένα από τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν μελετώντας τη δυστροπία σε μικρές παραμορφώσεις, ήταν αυτό των Jardine *et al.* (1986). Πρόκειται για μια περιοδική λογαριθμική σχέση, η οποία στη συνέχεια τροποποιήθηκε για εφαπτομενικές αποκλίνοσες δυστροπίας και δυστροπίας μεταβολής όγκου (Jardine *et al.*, 1991) και αποδίδεται με τις σχέσεις :

$$\begin{aligned}\frac{G'}{p'} &= \frac{d}{d\varepsilon_s} \left(\varepsilon_s \left[A + B \cos \left(\alpha \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_s}{C} \right)^\gamma \right) \right] \right) \\ \frac{K'}{p'} &= \frac{d}{d\varepsilon_v} \left(\varepsilon_v \left[A + B \cos \left(\alpha \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_v}{C} \right)^\gamma \right) \right] \right)\end{aligned}\quad [4.17]$$

όπου A, B, C, α , γ παράμετροι που εκφράζουν τη συμπεριφορά του εδάφους.

4.2.2.2 Ελαστικοπλαστικά μοντέλα

Οι Potts and Zdravkovic (1999) αναφέρουν ότι η πρώτη εφαρμογή της θεωρίας της πλαστικότητας στην εδαφομηχανική έγινε από τους Drucker *et al.* (1957). Η επιτυχία της στην προσομοίωση της συμπεριφοράς του εδάφους οφείλεται στη δυνατότητα που έχει να αποδίδει ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων για τις οποίες οι ελαστικές θεωρίες είναι ανίσχυρες. Οι Drucker *et al.* (1957) εισηγήθηκαν την επιφάνεια διαρροής που ελέγχεται από τη μεταβολή του όγκου, οι Roscoe *et al.* (1958) έθεσαν ένα πλαίσιο συμπεριφοράς βασισμένο στις έννοιες της κρίσιμης κατάστασης και τη θεώρηση της επιφάνειας οριακής κατάστασης και ο Calladine (1963) πρότεινε τη θεωρία της πλαστικότητας με κράτυνση.

Τα πρώτα μοντέλα κρίσιμης κατάστασης είναι οι σειρές των μοντέλων Cam clay που αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Cambridge (Roscoe and Schofield, 1963 και Schofield and Wroth, 1968) ενώ στη συνέχεια οι Roscoe and Burland πρότειναν το τροποποιημένο μοντέλο Cam clay το οποίο αποτελεί και το πλέον δημοφιλές από τα μοντέλα πλαστικότητας. Οι πρώτες αριθμητικές επιλύσεις με βάση το μοντέλο αυτό, χρονολογούνται από τις αρχές της δεκαετίας του 1970.

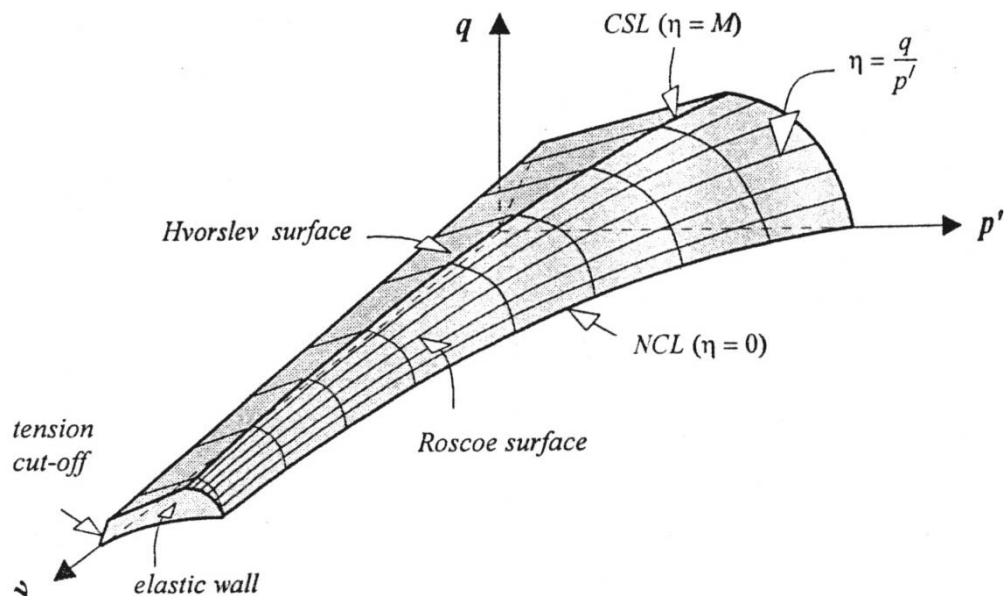
Κύριο χαρακτηριστικό των μοντέλων κρίσιμης κατάστασης είναι η θεώρηση της επιφάνειας οριακής κατάστασης (state boundary surface). Η επιφάνεια αυτή διαχωρίζει πιθανές από μη πιθανές συνθήκες (καταστάσεις) στις οποίες μπορεί να βρεθεί το εδαφικό υλικό, ορίζει δηλαδή τα όρια των δυνατών συνδυασμών τάσεων q - p' και ειδικού όγκου v , (Σχ. 4-10).

Η επιφάνεια οριακής κατάστασης σύμφωνα με το μοντέλο Cam-Clay (Σχ. 4-10) δίδεται από την εξίσωση :

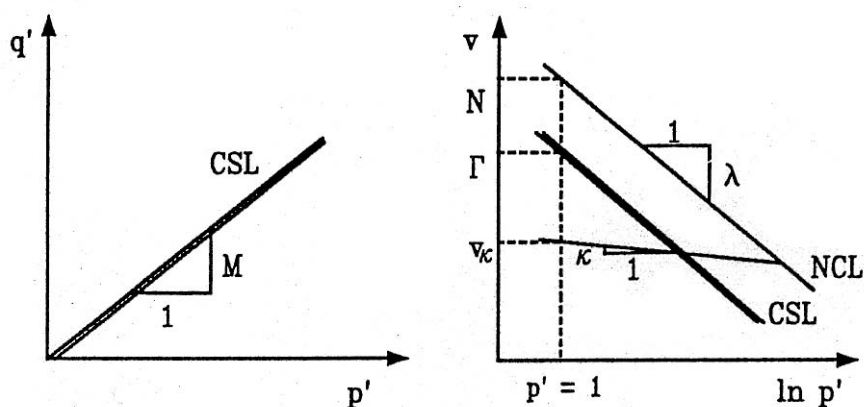
$$q' = \frac{Mp'[\Gamma + \lambda - \kappa - v - \lambda \ln p']}{(\lambda - \kappa)} \quad [4.18]$$

όπου οι παράμετροι M, Γ , λ και κ ορίζονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-11.

Αρχικά θεωρήθηκε ότι για καταστάσεις του εδάφους εσωτερικά της επιφάνειας οριακής κατάστασης, οι παραμορφώσεις είναι ελαστικές, ενώ για καταστάσεις πάνω σ' αυτή την επιφάνεια, οι παραμορφώσεις είναι ελαστικοπλαστικές. Ως εκτούτου η επιφάνεια οριακής κατάστασης ελήφθη σαν μια επιφάνεια διαρροής.



Σχ. 4-10 Πλήρης επιφάνεια οριακής κατάστασης (Fethi Azizi, 2000)



Σχ. 4-11 Βασικές παράμετροι μοντέλου Cam – clay (Atkinson and Sallfors, 1991).

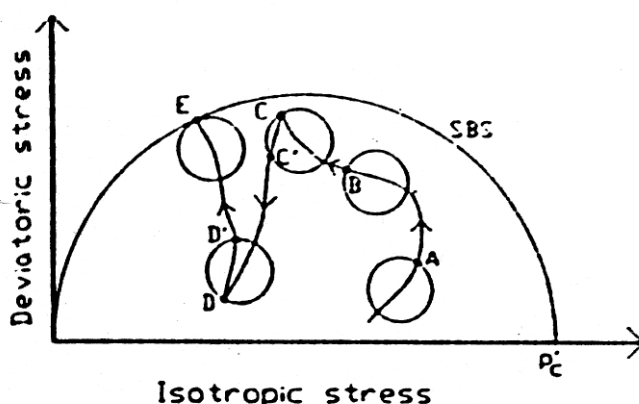
(Η γραμμή κρίσιμης κατάστασης CLS προσδιορίζει τις καταστάσεις διαρροής σε σταθερό όγκο, κάτω από σταθερές τάσεις)

Εντούτοις, όσο η τασική διαδρομή ενός δοκιμίου βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια διαρροής, τα μοντέλα αυτά είναι αδύναμα να αποδώσουν την παρατηρούμενη μη γραμμική συμπεριφορά του και ως εκ τούτου περαιτέρω ανάπτυξη τους ήταν απαραίτητη.

Όπως αναφέρουν οι Potts and Zdravkovic (1999) επικαλούμενοι τους Dafalias (1975), Krieg (1975), Dafalias and Puvion (1976), η εισαγωγή της “οριακής επιφάνειας πλαστικότητας” (bounding surface plasticity) απέτελεσε μια βελτίωση. Το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης μπορεί να υπολογισθεί σε συνάρτηση με τη συμπεριφορά του εδάφους σε τασικές συνθήκες που αντιστοιχούν στην “οριακή (bounding) επιφάνεια πλαστικότητας” και την εγγύτητα της σύγχρονης τασικής συνθήκης στην επιφάνεια αυτή.

Ενα μοντέλο αυτής της μορφής είναι το MIT-E3 που περιλαμβάνει τη μη γραμμική ελαστικότητα σε μικρές παραμορφώσεις και την “οριακή επιφάνεια πλαστικότητας”. Αναπτύχθηκε από τον Whittle στο MIT το 1987, προκειμένου να περιγράψει τη συμπεριφορά προστερεοποιημένων αργίλων και αποτελεί εξέλιξη του MIT-E1 που ανέπτυξε ο Kavvasas το 1982 για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους.

Ενώ τα παραπάνω μοντέλα είναι βελτιωμένα σε σχέση με τα συμβατικά ελαστοπλαστικά, έχουν ακόμα ελλείψεις δεδομένου ότι η εδαφική συμπεριφορά σε σχέση με τις μεταβολές στη διεύθυνση της τασικής διαδρομής δεν αποδίδεται ικανοποιητικά. Μια περαιτέρω βελτίωση απέτελεσε η εισαγωγή μιας μικρής “κινηματικής επιφάνειας διαρροής” (bubble), η οποία κινείται εντός της οριακής επιφάνειας πλαστικότητας. Εσωτερικά αυτής της κινηματικής επιφάνειας διαρροής η συμπεριφορά είναι ελαστική, ενώ εξωτερικά αυτής ελαστοπλαστική. Όπως αναφέρουν οι Potts and Zdravkovic (1999), το μοντέλο που αναπτύχθηκε, αποκαλούμενο “bulb model” (Al Tabbaa, 1987, Al Tabbaa and Wood, 1989) απαιτεί μόνο δύο παραμέτρους επιπλέον των πέντε που απαιτούνται για το modified Cam clay και παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 4-12.

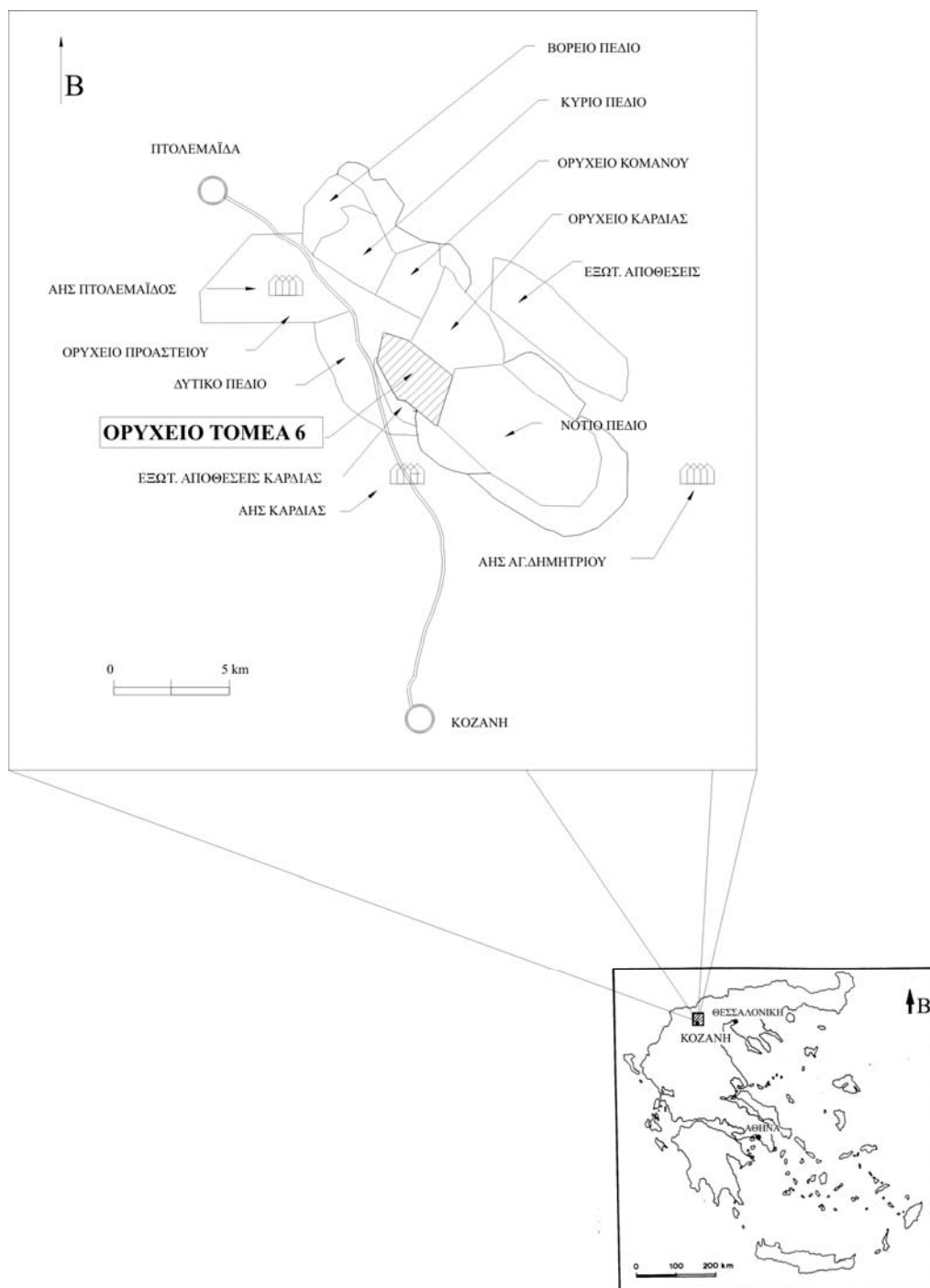


Σχ. 4-12 Μοντέλο με κινηματική επιφάνεια διαρροής (Pierpoint, 1996 από Al Tabbaa and Wood, 1989)

Οι Stallebrass and Taylor (1997) ανέπτυξαν περαιτέρω το προαναφερόμενο μοντέλο ενσωματώνοντας δύο κινηματικές επιφάνειες διαρροής τη μια εσωτερικά της άλλης. Η επιπρόσθετη επιφάνεια καλείται “επιφάνεια ιστορικού” (history surface) και προστέθηκε προκειμένου το μοντέλο να μπορεί να προσομοιώνει τόσο τη διαρροή σε μικρές παραμορφώσεις όσο και την επίδραση του πρόσφατου τασικού ιστορικού του εδάφους.

5 ΛΙΓΝΙΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ – ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΩΡΥΧΕΙΟ “ΤΟΜΕΑΣ-6”

Το Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου (ΛΚΠ-Α), αναπτύχθηκε από τη ΔΕΗ στη Δ.Μακεδονία, 110 km δυτικά της Θεσσαλονίκης (Σχ.5-1).



Σχ. 5-1 Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου (ΛΚΠ-Α)

Καλύπτει μια έκταση 120 km² με 4.000 Mt γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη, από τα οποία 2.700 Mt είναι εκμεταλλεύσιμα σύμφωνα με τα σημερινά οικονομικά και τεχνικά κριτήρια. Την τριετία 1996-99, η παραγωγή του λιγνίτη στο ΛΚΠ-Α συνέβαλε περισσότερο από 65% στην ολική παραγόμενη ενέργεια της Ελλάδος, ενώ εκτιμάται ότι ο λιγνίτης της λεκάνης Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου θα χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας για περίπου 50 χρόνια ακόμα.

Τα χαρακτηριστικά του εκσκαπτόμενου λιγνίτη (Πίνακας 5-1) υποδηλώνουν ότι τα κοιτάσματα αυτά είναι ποιοτικά από τα χειρότερα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας και για 1 kWh παραγόμενης ενέργειας καταναλώνονται περίπου 2 kg λιγνίτη.

Πίνακας 5-1 Χαρακτηριστικά του παραγόμενου λιγνίτη στο ΛΚΠ-Α (Monopolis *et al.*, 1999)

Λιγνίτης του ΛΚΠ-Α	
Ποσοστό υγρασίας (%)	54-60
Τέφρα του φυσικού λιγνίτη (%)	12-18
Τέφρα του ξηρού λιγνίτη (%)	28-32
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (kcal/kg)	1.250-1.450

Η εξόρυξη του λιγνίτη γίνεται με τη συνεχή (γερμανική) μέθοδο εκμετάλλευσης, η οποία χρησιμοποιεί καδοφόρους εκσκαφείς, ταινιοδρόμους και αποθέτες. Ο υψηλός ρυθμός εκσκαφής που επιτυγχάνεται με τους καδοφόρους εκσκαφείς, σε συνδυασμό με τη συνεχή ροή του υλικού μέσω των ταινιοδρόμων και των αποθετών, παρέχουν τη δυνατότητα υψηλών ρυθμών παραγωγής.

Την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η παρούσα έρευνα, τα ενεργά Ορυχεία του Λιγνιτικού Κέντρου ήταν τέσσερα (Βόρειο Πεδίο, Τομέας-6, Νότιο Πεδίο, Ορυχείο Αμυνταίου), η θέση των οποίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

5.1 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ – ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ

Η λεκάνη της Πτολεμαΐδας αποτελεί τμήμα της τεκτονικής τάφρου Φλώρινας - Αμυνταίου - Πτολεμαΐδας, που αναπτύσσεται παράλληλα με τον κύριο ορεογραφικό άξονα των Ελληνίδων με διεύθυνση βορειοδυτική - νοτιοανατολική. Η τεκτονική τάφρος σχηματίστηκε κατά τις ορογενετικές κινήσεις της μετα-αλπικής πτύχωσης, που προκάλεσαν εκτεταμένες ρηγματώσεις διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ.

Η ευρύτερη περιοχή (περιθώρια και βάση της λεκάνης) καλύπτεται από τους Περμο-λιθανθρακοφόρους (και παλαιότερους) κρυσταλλικούς σχιστολίθους της Πελαγονικής ζώνης, τους υπερκείμενους ασβεστολίθους του Τριαδικού - Ιουρασικού και τέλος τα ασβεστολιθικά πετρώματα του Κρητιδικού που αποτέθηκαν μετά την επίκλιση του Κενομανίου (Παπασταματίου, 1952). (Βλέπε Σχ. 5-2, 5-3 και 5-4). Στα κρυσταλλοσχιστόδη και ασβεστολιθικά πετρώματα επικάθονται ασύμφωνα τα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα.

Κατά τη διάρκεια του Νεογενούς επικράτησαν ιδανικές συνθήκες για το σχηματισμό λιγνίτη στις ελώδεις περιοχές και τις αβαθείς λίμνες που είχαν σχηματισθεί. Συνεχής αργή κινητικότητα προκάλεσε τη βύθιση του πυθμένα των ελών και τεράστιες ποσότητες συγκεντρωμένων φυτικών λειψάνων σχημάτισαν τα λιγνιτικά στρώματα της Πτολεμαΐδας. Ο σχηματισμός του λιγνίτη περιστασιακά διεκόπτετο λόγω διαφοροποίησης του ρυθμού βύθισης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό μαργών και άλλων στείων ιζημάτων τα οποία αποτελούν τα σημερινά ενδιάμεσα της λιγνιτοφόρου σειράς.

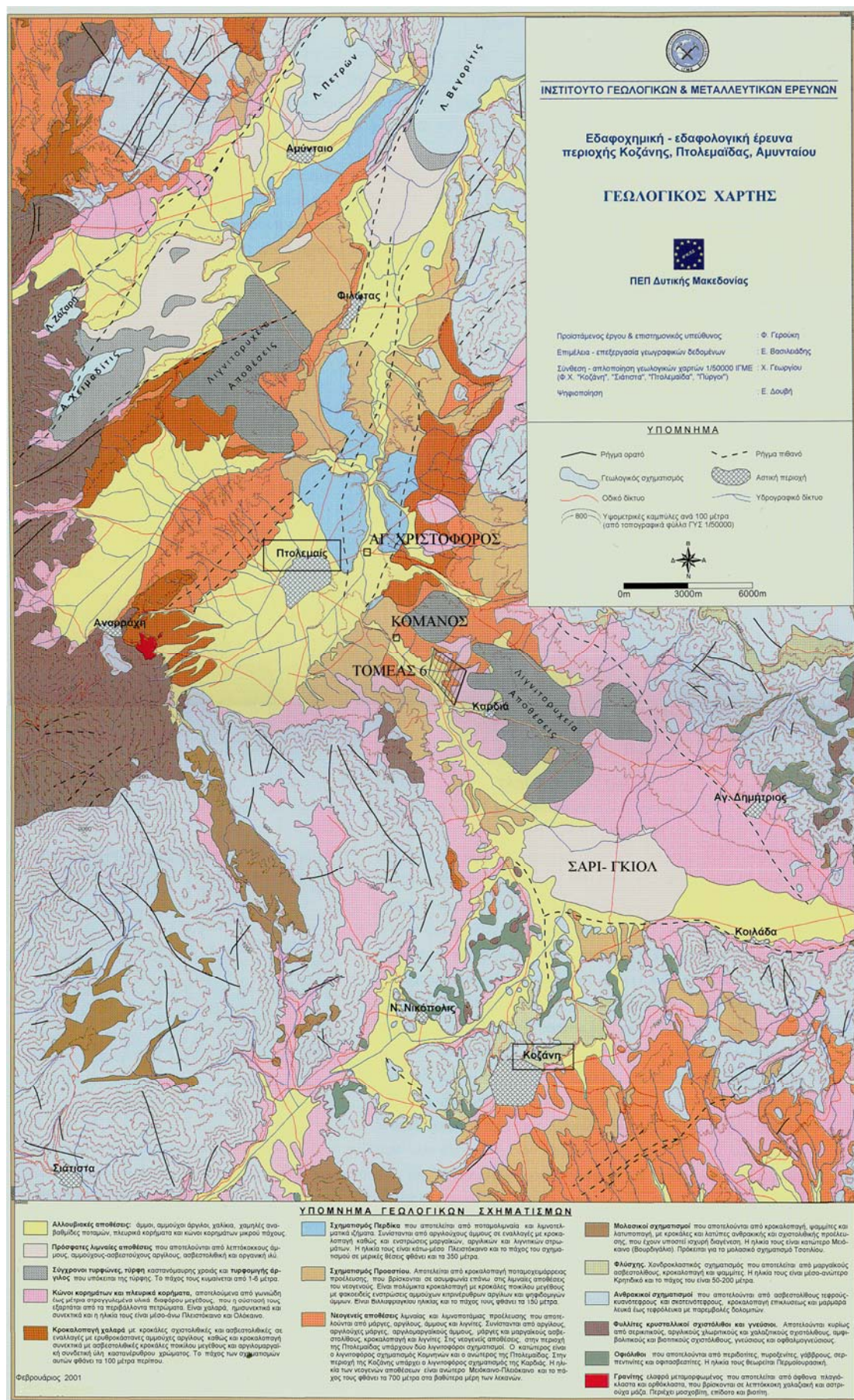
Όπως αναφέρουν οι Αναστόπουλος και Κούκουζας (1972), τα Νεογενή ιζήματα (αποκλειστικά λιμναίας προέλευσης) αποτελούνται από τρεις σειρές (Σχ. 5-5): **την ανώτερη** (υπερκείμενη της λιγνιτοφόρας), **τη λιγνιτοφόρα** και **την κατώτερη** (υποκείμενη της λιγνιτοφόρας) **σειρά**.

Η ανώτερη (υπερκείμενη) σειρά περιλαμβάνει κιτρινόφαια κλαστικά ιζήματα και πρασινότεφρες αργίλο-μαργαϊκές αποθέσεις.

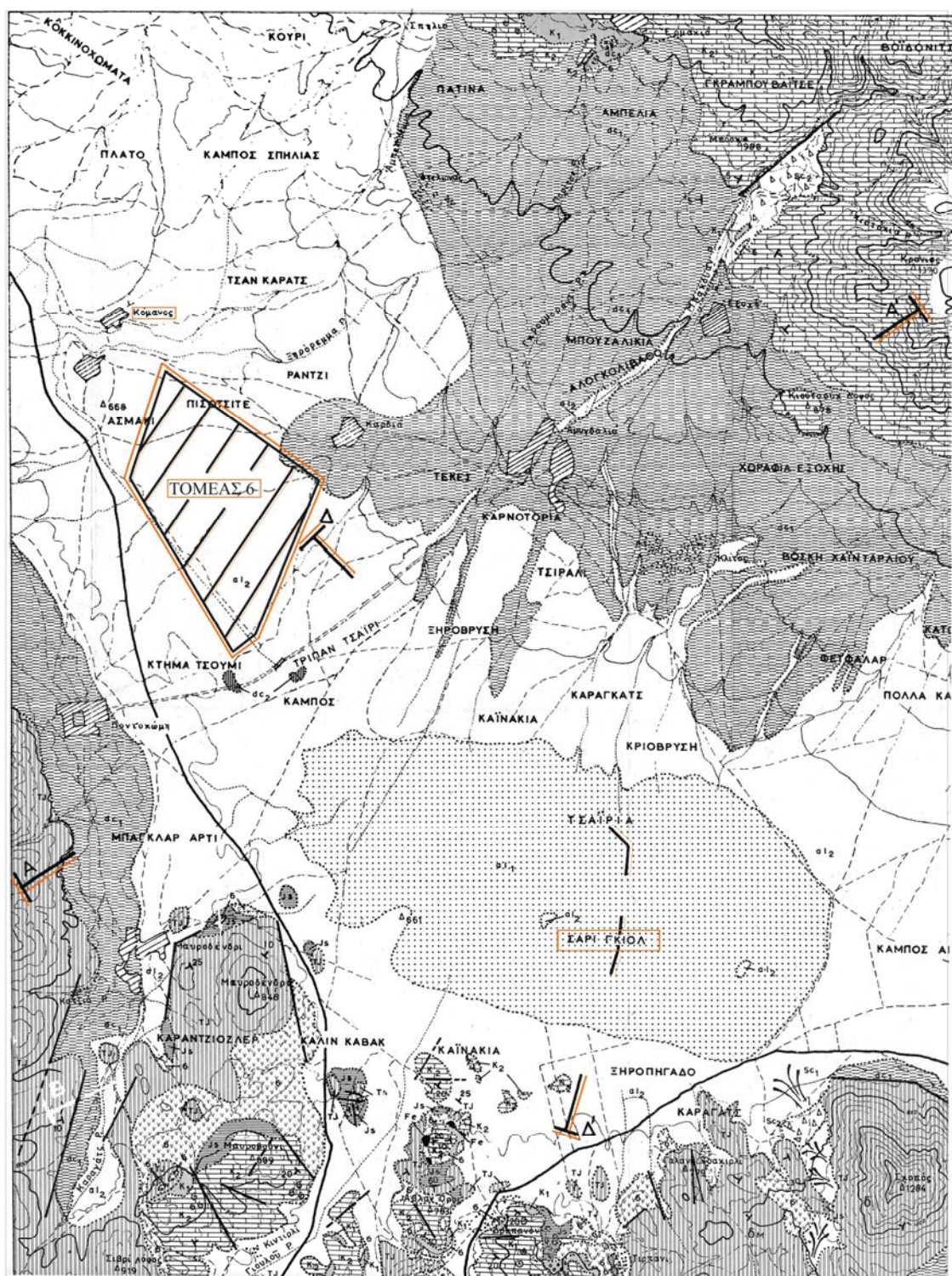
Η λιγνιτοφόρος σειρά περιλαμβάνει

- την **ανώτερη λιγνιτοφόρα στοιβάδα** με 9-10 στρώματα λιγνίτη πάχους μερικών εκατοστών και 1-3 λεπτότερα στρώματα ξυλίτη, μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται στείρες ενστρώσεις αργίλου, μαργών και λιμναίας κρητίδος.
- την **ενδιάμεση στοιβάδα** των στείων ιζημάτων όπου επικρατούν οι ασθενώς αμμούχες μάργες και
- την **κατώτερη λιγνιτοφόρο στοιβάδα** που αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα λιγνίτη (πάχους μέχρι 4 m), μαργών, αργίλων με μεταβαλλόμενο πάχος και δύο χαρακτηριστικούς ορίζοντες : της *χαρακτηριστικής άμμου* και της *λιμναίας κρητίδος*.

Ο πρώτος συνίσταται από ηφαιστειακό τόφο και εμφανίζεται κοντά στη βάση της λιγνιτοφόρου στοιβάδας ως λεπτόκοκκη, χαλαρή άμμος με ανοικτότεφρο χρώμα (Σχ. 5-5). Παρουσιάζεται ενιαίος σε ολόκληρη τη λεκάνη, με πάχος 20-30 cm και παρεμβάλλεται μεταξύ λιγνιτικών στρωμάτων.



Σχ. 5-2 Γεωλογικός Χάρτης περιοχής Κοζάνης - Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου (ΓΓΜΕ, 2001)

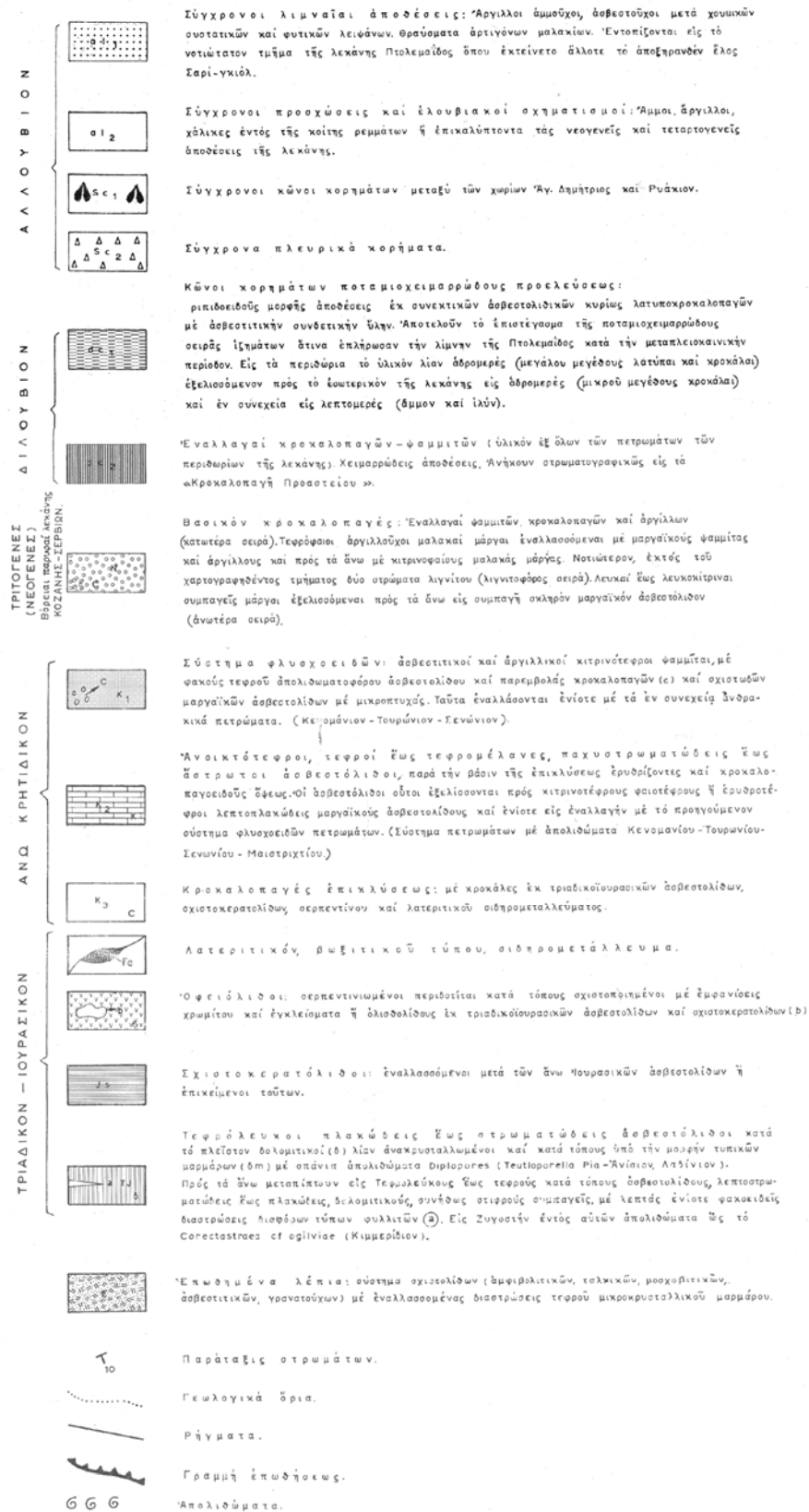


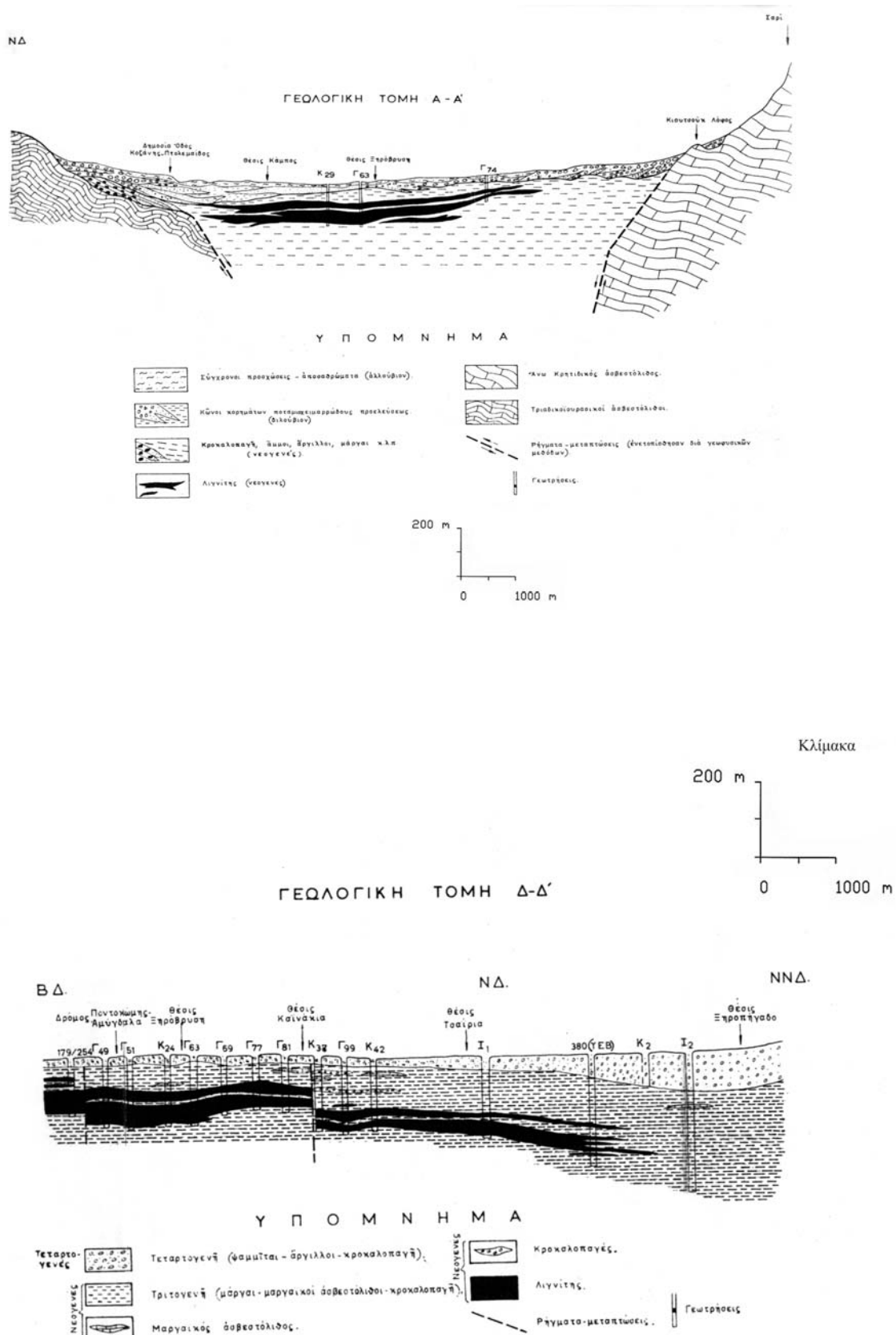
ΑΠΟΣΠΑΣΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΟΣ
(Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972)

0 1 2 km

Σχ. 5-3 Γεωλογικός Χάρτης της ευρύτερης περιοχής του “Τομέα-6” (Απόσπασμα από τον γεωλογικό χάρτη Αναστόπουλου και Κούκουζα, 1972)

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΟΣ (ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΙ ΚΟΥΚΟΥΖΑΣ, 1972)





Σχ. 5-4 Γεωλογικές Τομές στην ευρύτερη περιοχή του "Τομέα-6" (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972)

Ο δεύτερος (λιμναία κρητίδα) βρίσκεται στην οροφή της λιγνιτικής στοιβάδος και περιέχει το χαρακτηριστικό απολίθωμα *Theodoxus macedonicus*, γνωστό με το όνομα Neritina.

Τέλος, η κατώτερη (υποκείμενη) σειρά αποτελείται από τους

- **ανώτερους ορίζοντες** (με συνολικό πάχος 40 m) που αποτελούνται από τεφρές αργιλούχες μάργες, κατά τόπους αμμούχες, με φακοειδείς ενστρώσεις μαργαϊκού αβεστολίθου και στην κορυφή μια ένσθρωση λιμναίας κρητίδος, και
- **τους κατώτερους ορίζοντες** που αποτελούνται από αμμούχες αργίλους με αραιές ενστρώσεις αργιλούχων μαργών.

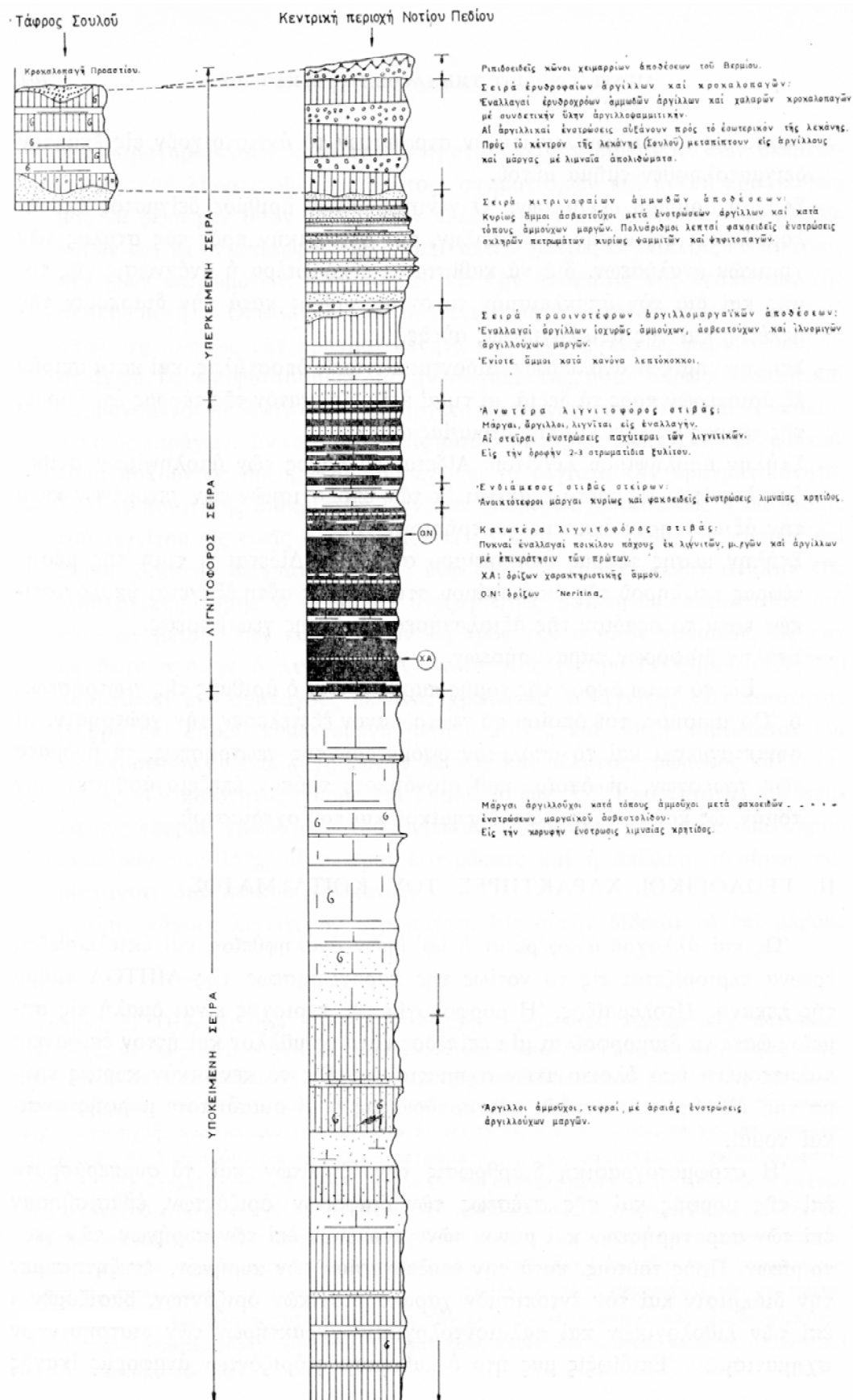
Τα προαναφερόμενα Νεογενή ιζήματα καλύπτονται με μικρού πάχους (περίπου 15 m) ποταμοχειμαρρώδεις ή χερσαίες αποθέσεις του Τεταρτογενούς, αποτελούμενες από άμμους και κροκάλες ποικίλης σύστασης, αργίλους, μάργες, ερυθροπηλούς και πλευρικά ριπίδια (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972).

Κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς, δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων με διευθύνσεις ΒΔ-ΝΑ @ ΒΑ-ΝΔ διέρρηξαν τη λεκάνη (Αναστόπουλος, Κούκουζας, 1972) και δημιουργήθηκαν υβώματα (*Άγιου Χριστόφορου, Κομάνου κ.α.*) και μικρότερες λεκάνες (*Πτολεμαΐδας, Σαριγκιόλ*). (Βλέπε Σχ. 5-2, 5-3 και 5-4). Εξαιτίας των κινήσεων που προκλήθηκαν, τα λιγνιτικά στρώματα περιπτωσιακά εκάμπτοντο και εμφάνισαν τοπικά μικρές κλίσεις.

Υδρογεωλογικές έρευνες υποδεικνύουν ότι, ενώ στην περιοχή δεν αναπτύσσεται ενιαίος υδροφόρος ορίζοντας, οι πολυστρωματικοί υδροφόροι είναι συχνοί. Η υδροφορία εμφανίζεται στις τεκτονικά καταπονημένες ζώνες και στην υπερκείμενη (πράσινη) σειρά, η οποία περιέχει εγκλωβισμένους θύλακες άμμου. Όταν εκσκαφθούν, εκτονώνονται αποβάλλοντας μεγάλες ποσότητες νερού για 2-3 μέρες. Τα φαινόμενα όμως αυτά είναι τοπικού χαρακτήρα και δεν προκαλούν ιδιαίτερα προβλήματα.

Τέλος, υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας αναπτύσσεται στις ενστρώσεις άμμου και χαλίκων της υποκείμενης του λιγνίτη μάργας, αλλά ο υδροφόρος αυτός εντοπίζεται σε μεγάλο βάθος και δεν δημιουργεί προβλήματα στην εκμετάλλευση.

Με βάση τα παραπάνω, η τοποθέτηση των γεωτρήσεων για την ταπείνωση της στάθμης πριν την ανάπτυξη των Ορυχείων είναι γενικά προβληματική. Κατά κανόνα, κατασκευάζονται αρχικά κάποιες γεωτρήσεις και ανάλογα με το αποτέλεσμα της άντλησης αρχίζει η πύκνωση του δικτύου. Γενικά όμως, δεν αντλούνται μεγάλες ποσότητες νερού, δεδομένου ότι οι σχηματισμοί είναι λίγο έως πολύ συνεκτικοί - μικρής διαπερατότητας. Επίσης διατηρούνται υπολειμματικές περιοχές νερού οι οποίες απαιτούν επί πλέον (περιορισμένης έκτασης) μέτρα αποστράγγισης κατά το στάδιο εξόρυξης.



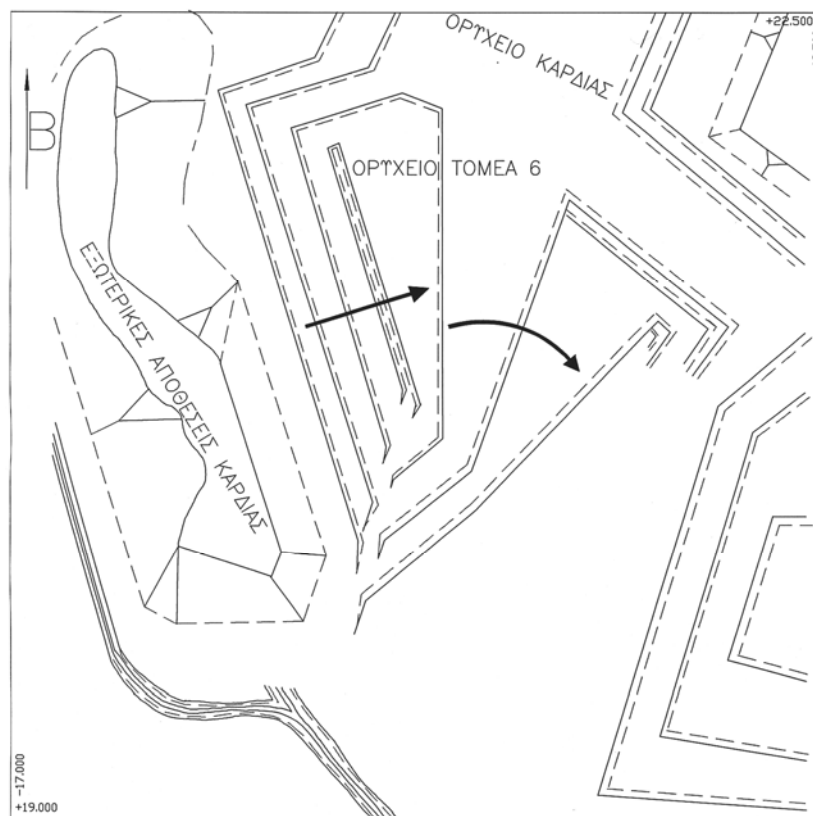
Σχ. 5-5 Στρωματογραφικὴ ἀκολουθία τοῦ Νεογενούς τῆς Πτολεμαΐδας (Αναστόπουλος καὶ Κούκουζας, 1972)

5.2 ΟΡΥΧΕΙΟ “ΤΟΜΕΑΣ-6”

Ένα από τα ενεργά Ορυχεία του ΛΚΠ-Α είναι το Ορυχείο “Τομέας-6” που οφείλει την ονομασία του στο γεγονός ότι κατά τον αρχικό μεταλλευτικό σχεδιασμό αποτελούσε τομέα του Ορυχείου του Νοτίου Πεδίου.

Το Ορυχείο “Τομέας-6” βρίσκεται νοτιοδυτικά του Ορυχείου Καρδιάς, με εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη 202 Mt. Σχεδιάσθηκε για μια ετήσια παραγωγή 12 έως 15 Mt (και για χρονικό διάστημα 15 ετών), ποσότητα που αποτελεί το 35-40% της ετήσιας παραγωγής λιγνίτη στο ΛΚΠ-Α (Καβουρίδης κ.α., 1997). Ο “Τομέας-6” (Σχ. 5-1) ορίζεται νότια από το Νότιο Πεδίο και τον ΑΗΣ Καρδιάς, ανατολικά από το Πεδίο Καρδιάς, βόρεια από την περιοχή της Κοινότητας Κομάνου και δυτικά από το Δυτικό Πεδίο.

Η τοπογραφία στην περιοχή είναι γενικά ομαλή, εκτός από τη δυτική περιοχή του Ορυχείου στην οποία βρίσκονται οι εξωτερικές αποθέσεις του Ορυχείου Καρδιάς, με ύψος που φτάνει τα 60 - 70 m (Σχ. 5-6). Το μέσο υψόμετρο του φυσικού εδάφους είναι στα +670 m, ενώ το τελικό δάπεδο του Ορυχείου (τεχνικό πέρας) προγραμματιζόταν στα +510 m (βάθος εκσκαφής 160 m). Η επιφάνεια του διευρυμένου πεδίου εκτιμάται σε 6,0 km², με διαμήκη άξονα 4,1 km και εγκάρσιο 2,3 km. Με βάση τις διαστάσεις αυτές και συγκριτικά με τις υπόλοιπες εκμεταλλεύσεις στην περιοχή, ο “Τομέας - 6” μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα στενό και βαθύ Ορυχείο.



Σχ. 5-6 Μοντέλο εκμετάλλευσης του Ορυχείου “Τομέας-6”

Η κινητικότητα των πρανών κατά την εξόρυξη του “Τομέα-6” ήταν ασυνήθους κλίμακας σε σχέση με μικρότερου βάθους παρακείμενα Ορυχεία. Δεδομένου ότι οι εξορύξεις ανάλογου βάθους θα γίνονται εφεξής συστηματικά, με διαφαινόμενη κινητικότητα μεγάλου μεγέθους τόσο στα μόνιμα πρανή όσο και μέτωπα εξόρυξης, κρίθηκε σκόπιμο το Ορυχείο “Τομέας-6” να αποτελέσει πεδίο έρευνας όσον αφορά την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κινητικής συμπεριφοράς ανοικτών εκσκαφών μεγάλου βάθους.

5.2.1 Ανάπτυξη του Ορυχείου “Τομέας-6”

Η ανάπτυξη της εκσκαφής και η εκμετάλλευση του κοιτάσματος του “Τομέα-6”, γίνεται στροφικά αρχίζοντας δυτικότερα από τα ανοικτά δυτικά πρανή του Ορυχείου Καρδιάς και εξελίσσεται μέχρι και τα ανοικτά Β.Δ. πρανή του Ορυχείου “Νότιο Πεδίο” (Σχ. 5-6).

Η προ-αποκάλυψη του Ορυχείου ξεκίνησε το 1987 και η ένταξη έξι (6) εκσκαφών (Σχ. 5-9) πραγματοποιήθηκε χρονολογικά όπως παρακάτω :

Εκσκαφές	E_1	:	Οκτώβριος '87
	E_2	:	Νοέμβριος '88
	E_3	:	Σεπτέμβριος '89
	E_4	:	Μάιος '93
	E_5	:	Μάρτιος '95
	E_6	:	Σεπτέμβριος '95

Η παραγωγή του λιγνίτη άρχισε το 1989 και το Ορυχείο στην πλήρη ανάπτυξη του εικονίζεται στη Φωτ. 5-1.

5.2.2 Γεωλογία, Στρωματογραφία, Τεκτονική

Στην περιοχή του “Τομέα-6”, η στρωματογραφική ακολουθία (από τους ανώτερους προς τους κατώτερους ορίζοντες) έχει ως ακολούθως (Μπάρμπας κ.α., 1995) :

1. Άργιλοι, αμμοχάλικα, κροκαλολατυποπαγή (Καστανέρυθη σειρά)
2. Άργιλοι, άμμοι, ψαμμιτοκροκαλοπαγή (Γκριζοκίτρινη σειρά)
3. Άργιλοι, άμμοι (Γκριζοπράσινη σειρά)

Το συνολικό πάχος των σειρών αυτών κυμαίνεται από μερικά μέτρα στα δυτικά, μέχρι 30 m στο ΝΑ τμήμα του Ορυχείου, εκ των οποίων τα 5-6 m ανήκουν στη γκριζοπράσινη σειρά.



Φωτ. 5-1 Ορυχείο “Τομέας-6”. Άποψη από δυτικά.

4. Λιγνιτοφόρος στοιβάδα (εναλλαγές μαργαϊκών ενστρώσεων και λιγνίτη).

Αποτελείται κατά μέσο όρο από 21 λιγνιτικά στρώματα, που εναλλάσσονται με αντίστοιχο αριθμό ενδιάμεσων στείρων, ποικίλου πάχους. Από τις κοιτασματολογικές γεωτρήσεις, προκύπτει ότι το μέσο πάχος των λιγνιτικών στρωμάτων είναι 1,9 m. Ποσοστό πάνω από 60% έχουν πάχος μικρότερο από 1,5 m και μόνο το 20% έχει μέσο πάχος μεγαλύτερο από 3 m. Τα στρώματα αυτά εντοπίζονται στα βαθύτερα τμήματα του κοιτάσματος (Καβουρίδης κ.α., 1997).

5. Αργιλούχος - τελική μάργα (Υποκείμενη σειρά).

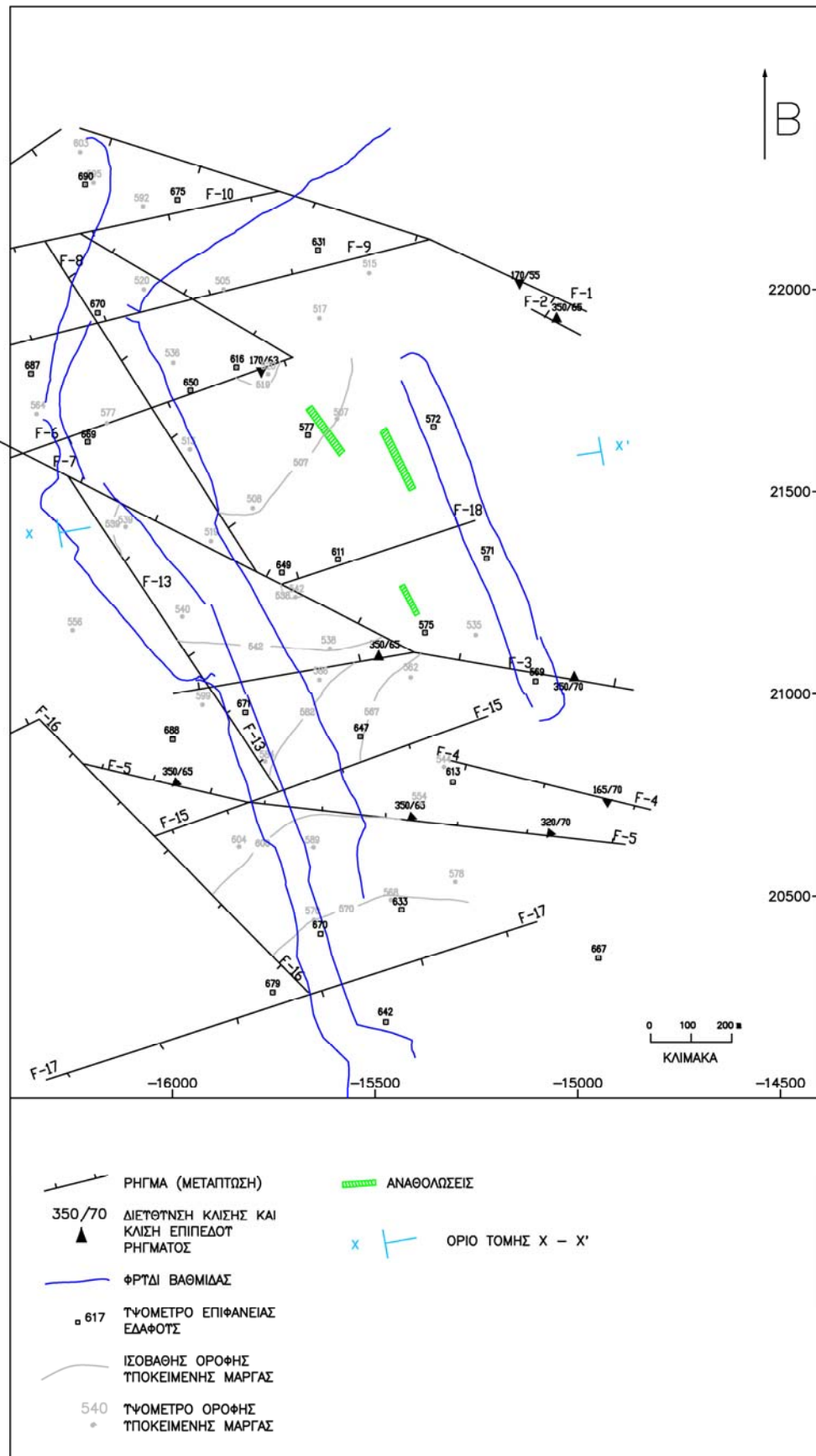
Το απολίθωμα Neritina (ορίζοντας H2) εντοπίζεται στη γκριζοκίτρινη μάργα του μεσαίου τμήματος της λιγνιτοφόρου στοιβάδος (Σχ. 5-5) σε στρώμα με κυμαινόμενο πάχος 20-50 cm, ενώ ο ορίζοντας της χαρακτηριστικής άμμου (XA), με πάχος 10-20 cm, βρίσκεται στη βάση της λιγνιτοφόρου στοιβάδος και συγκεκριμένα 5-12 m πάνω από το γεωλογικό δάπεδο του κοιτάσματος (Σχ. 5-5).

Όσον αφορά την τεκτονική και σύμφωνα με τον χάρτη της περιοχής (ΔΕΗ - ΛΚΠΑ, 1995), επικρατούν δύο συστήματα ρηγμάτων (Σχ. 5-7 και Σχ. 5-8). Το πρώτο με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (παράλληλη με τα δυτικά πρηνή του Ορυχείου) και συνολικό άλμα 90 m, χωρίζει τον “Τομέα-6” από το πεδίο Καρδιάς, ενώ το δεύτερο με διεύθυνση περίπου Δ-Α βυθίζει το Νότιο Πεδίο προς το έλος Σαριγκιόλ (Νότια). Πιο αναλυτικά:

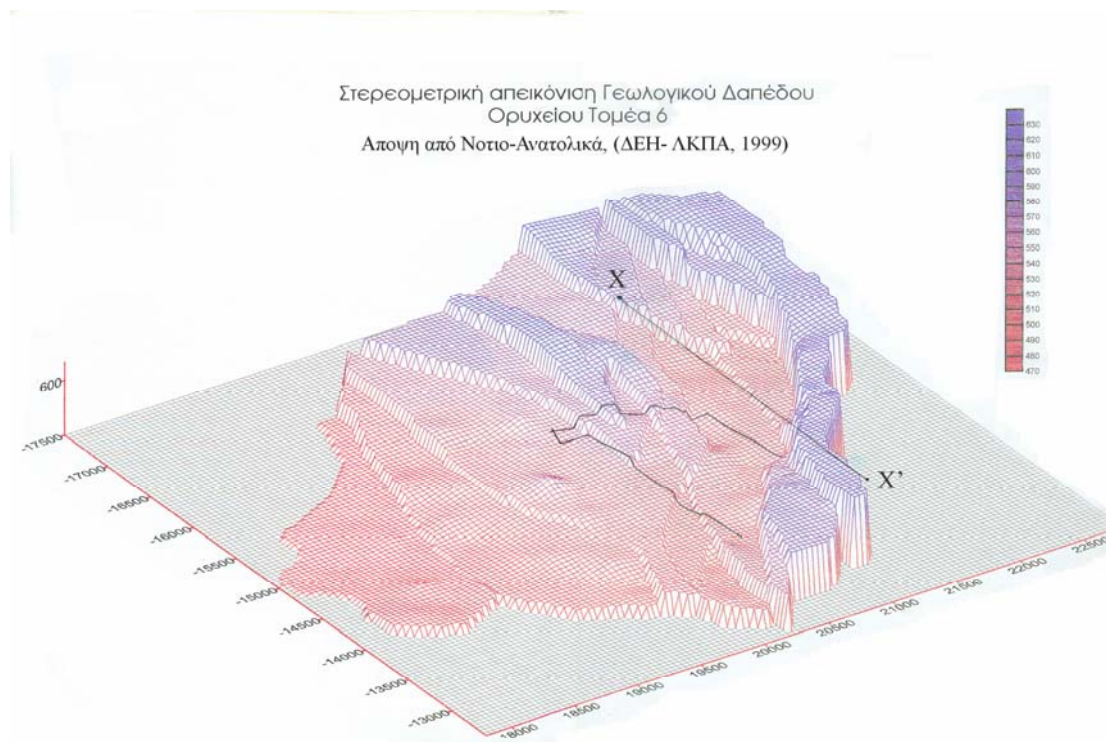
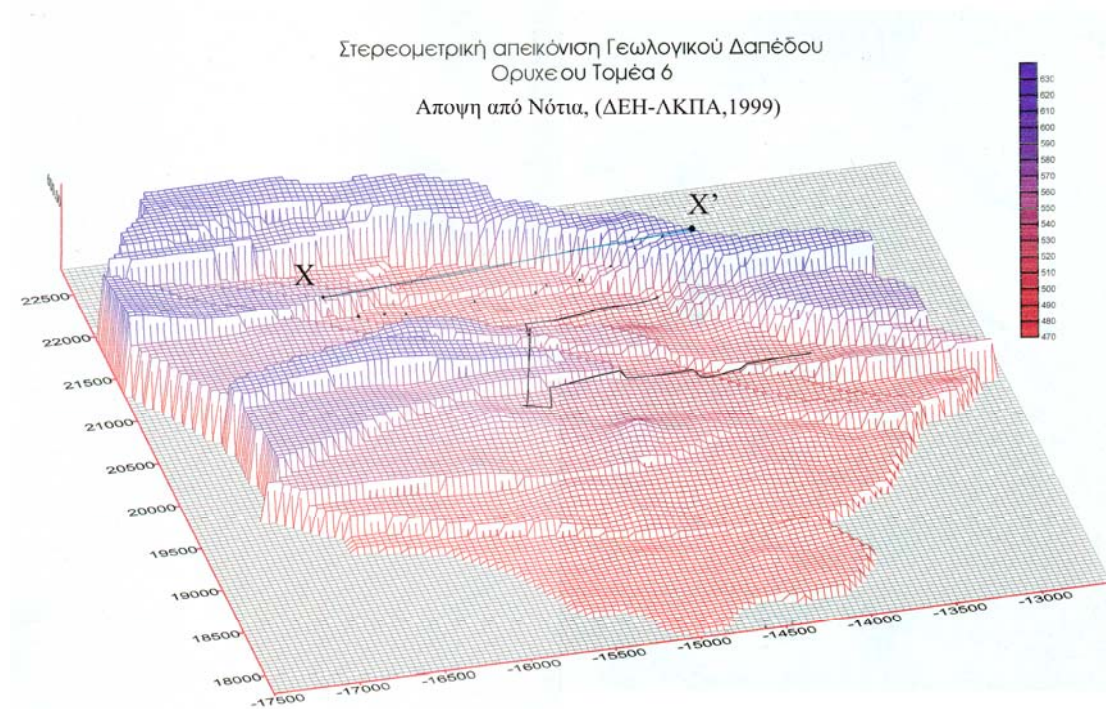
1. Τα κύρια ρήγματα F_1 και F_5 με άλματα 25-20 m, σε συνδυασμό με τα δευτερεύοντα F_3 και F_6 (άλματος 5-10 m) δημιουργούν ένα τεκτονικό βύθισμα.
2. Τα ρήγματα F_2 και F_4 με άλμα 20 m περίπου, σχηματίζουν επιμέρους τεκτονικά βυθίσματα.
3. Τα ρήγματα F_8 και F_{13} με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και διάταξη παράλληλη με τα δυτικά πρηνή τέμνουν τα προαναφερόμενα ρήγματα και βυθίζουν την περιοχή προς τα ανατολικά, δηλαδή προς το Ορυχείο.

Τα υπόλοιπα ρήγματα που σημειώνονται στον τεκτονικό χάρτη του Σχήματος 5-7, συμπληρώνουν το τεκτονικό μοντέλο της περιοχής, η στερεομετρική απεικόνιση του οποίου παρουσιάζεται στο Σχ. 5-8, (ΔΕΗ - ΛΚΠΑ, 1999).

Οι κλίσεις των στρωμάτων είναι γενικά υπο-οριζόντιες μικρές ($<5^\circ$) και οφείλονται κυρίως στις διαφορικές κινήσεις ή/ και στις κάμψεις των τεκτονικών τεμαχών. Με βάση τα δεδομένα της γεωλογικής αποτύπωσης πιθανολογούνται (χωρίς να είναι διαθέσιμα ακριβή στοιχεία) και θέσεις με μεγαλύτερες κλίσεις (μέχρι $\approx 10^\circ$) στα τεκτονικά τεμάχια των περιοχών με συντεταγμένες : -16.200 / 22.200, -15.600/21.000 και -15.600/20.600. Οι δύο απ’ αυτές τις περιπτώσεις έχουν γενικά κλίσεις νότιες και πρακτικά βρίσκονται στις εξωτερικές παρυφές του Ορυχείου, ενώ η τρίτη (-15.600/21.000) βρίσκεται στο χώρο του Ορυχείου με διεύθυνση κλίσης ΝΑ και επομένως, λοξά ως προς το μέτωπο των δυτικών μόνιμων πρηνών.



Σχ. 5-7 Σκαρίφημα Γεωλογίας – Τεκτονικής Ορυχείου “Τομέας-6”



Σχ. 5-8 Στερεομετρική απεικόνιση του γεωλογικού δαπέδου του “Τομέα-6”
(ΔΕΗ - ΛΚΠΑ, 1999)

5.2.2.1 Υδρογεωλογία και γεωτρήσεις αποστράγγισης

Υπο - επιφανειακή υδροφορία αναπτύσσεται στη γκριζοκίτρινη και γκριζοπράσινη σειρά και σε βάθος 15-20 m από την επιφάνεια. Για την ταπείνωση αυτού του υδροφόρου ορίζοντα κατασκευάστηκαν δεκαπέντε (15) γεωτρήσεις, στη δυτική, βόρεια και νότια περίμετρο της εξόρυξης (Σχ. 6-3). Ανορύχθηκαν έως και τον Οκτ. '95 σε απόλυτο υψόμετρο +665 έως +670 m και είχαν μέσο βάθος 30 m. Αποσκοπούσαν στον έλεγχο της στάθμης των υπόγειων νερών και την αποστράγγιση του Ορυχείου για την κατά το δυνατό εργασία εν ξηρώ. Προφανώς δεν εξαντλούν το στρωματογραφικό βάθος και το μέτωπο υδροφορίας του Ορυχείου. Απ' αυτές τις γεωτρήσεις, τέσσερις (4) δεν εξοπλίστηκαν με αντλία (άγονες), ενώ τον Οκτώβριο '95, δύο (2) δεν λειτουργούσαν λόγω στάθμης και οι υπόλοιπες εννέα (9) λειτουργούσαν με ποικίλες παροχές (από ελάχιστη μέχρι 11.500 m³/μήνα), (ΔΕΗ, 1995).

Υπό πίεση υδροφόρος με προσωρινή παροχή 100 m³/h που εντοπίζεται στις ενστρώσεις άμμου και χαλίκων της τελικής μάργας (υποκείμενης του λιγνίτη), δεν φαίνεται να δημιουργεί προβλήματα κατά την εξόρυξη. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η προαναφερόμενη παροχή δεν αιτιολογείται παρά μόνο στην περίπτωση συσχέτισης της με παλαιοκοίτη του Σουλού.

5.2.2.2 Γεωτεχνική έρευνα στο πλαίσιο του σχεδιασμού ανάπτυξης του Ορυχείου

Στο πλαίσιο του σχεδιασμού του Ορυχείου “Τομέας-6”, πραγματοποιήθηκε προμελέτη (Λεονάρδος, 1986) που περιέγραψε κατ' αρχήν τη φύση και το μέγεθος του προβλήματος της ευστάθειας των δυτικών (μόνιμων) πρανών του Ορυχείου. Θεωρώντας ύψος πρανών περί τα 200 m (συμπεριλαμβανομένης της εξωτερικής απόθεσης του Ορυχείου Καρδιάς), κλίση πρανών 1: 3,5 και ορισμένες προσεγγιστικές γεωτεχνικές παραμέτρους, εκτιμήθηκε ένας συντελεστής ασφάλειας FS=1,2. Προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι πλέον επικίνδυνοι (πιθανοί) κύκλοι ολίσθησης, είναι κύκλοι ποδός που καταλήγουν στα υπερκείμενα, αφήνοντας έξω από τον κύκλο την εξωτερική απόθεση της Καρδιάς.

Η παραπάνω προμελέτη έκρινε αναγκαία εκτενέστερη γεωλογική, τεκτονική και υδρογεωλογική διερεύνηση της περιοχής. Στα πλαίσια της προτεινόμενης περαιτέρω έρευνας, πραγματοποιήθηκαν δύο εδαφοτεχνικές γεωτρήσεις (EKP-5 και EKP-6), βάθους περί τα 140 m, σε διάταξη παράλληλη με τα δυτικά μόνιμα πρανή και σε θέσεις που η εκσκαφή πλησίαζε περισσότερο την εξωτερική απόθεση του Ορυχείου Καρδιάς.

Σε αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δείγματα των γεωτρήσεων αυτών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κατάταξης και μετρήσεις για την εκτίμηση της διατμητικής αντοχής (ΔΕΗ - ΚΔΕΠ, 1987). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές συνοχής και γωνίας εσωτερικής τριβής που προέκυψαν από τριαξονικές δοκιμές (με προστερεοποίηση - χωρίς στράγγιση) στα δείγματα της γεώτρησης EKP-5,

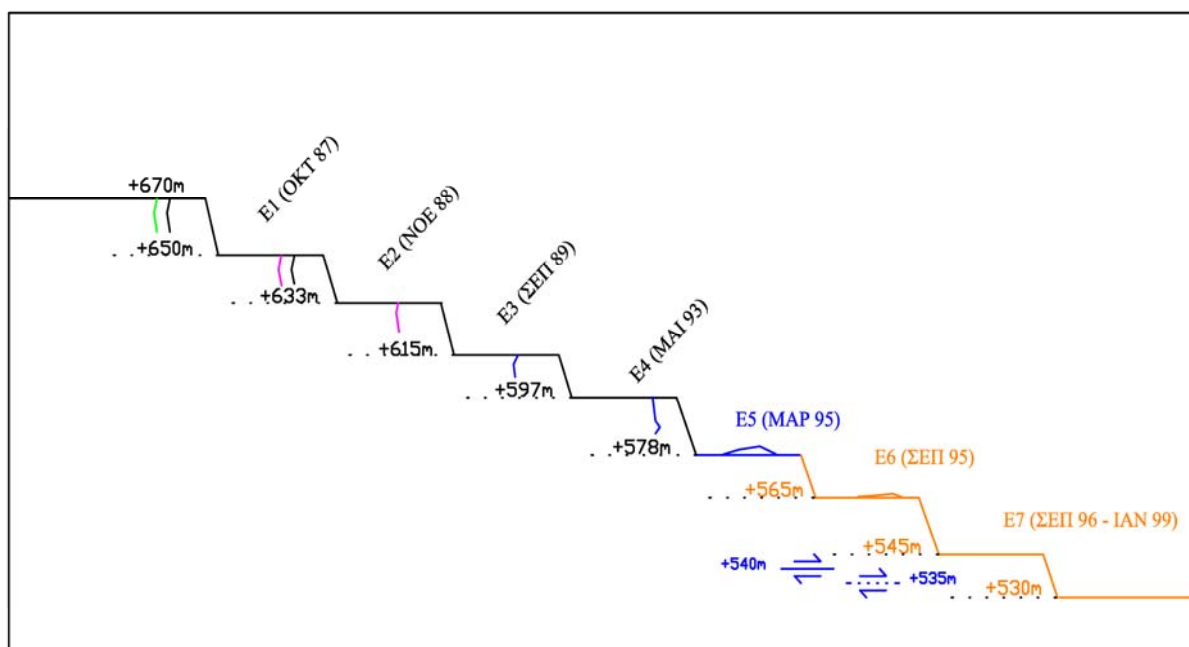
ήταν ανάλογες των τιμών που χρησιμοποιήθηκαν στην Προμελέτη (Λεονάρδος, 1986) και ανάλογες αυτών που είχαν προκύψει από αντίστοιχες έρευνες σε παρακείμενα Ορυχεία (Καράς, 1988).

Επιπλέον των προαναφερομένων γεωτεχνικών γεωτρήσεων, πραγματοποιήθηκαν το 1992 άλλες οκτώ (8) γεωτρήσεις, τοποθετημένες σε ζεύγη, κάθετα προς τα δυτικά πρηνή του Ορυχείου (Σχ. 6-2, θέσεις ΚΛ), όπου εγκαταστάθηκαν κλισίμετρα για την παρακολούθηση της κινητικής συμπεριφοράς των πρηνών.

5.2.3 Κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής

Στο τέλος του 1994, όταν το δάπεδο της εκσκαφής έφτανε στα +578 m (Σχ. 5-9), παρατηρήθηκαν ρωγματώσεις μικρού μεγέθους, στις βαθμίδες των δυτικών πρηνών. Εντούτοις, οι σποραδικές μετρήσεις των κλισιμέτρων που είχαν τοποθετηθεί στα πρηνή, δεν υπέδειξαν ανησυχητικές μετακινήσεις.

Την άνοιξη του 1995 διαπιστώθηκαν αφενός μεν αναθολώσεις στο αργιλομαργαϊκό δάπεδο του ταινιόδρομου T/Δ5 και αφετέρου εμφάνιση νέων ρωγμών στις βαθμίδες των δυτικών πρηνών του Ορυχείου με διάταξη παράλληλη προς αυτά. Από τις νέες μετρήσεις των κλισιμέτρων προέκυψε θραύση και καταστροφή τους στο επίπεδο των +535 έως +540 m (Σχ. 5-9), φαινόμενο που αποδόθηκε σε μετατόπιση εδαφικών μαζών (ΔΕΗ, 1995).



Σχ. 5-9 Εξέλιξη του Ορυχείου “Τομέας-6” με το βάθος και κινητική συμπεριφορά των δυτικών των πρηνών

Σε παρένθεση ο χρόνος ένταξης του αντίστοιχου καδοφόρου εκσκαφέα (E)

Αναλυτικότερα, η εξέλιξη των φαινομένων που παρατηρήθηκαν έχει όπως παρακάτω (RE Geomechanics - Pierschke, J., 1995) :

Τον Οκτώβριο του 1994 εντοπίστηκαν για πρώτη φορά ασυνέχειες στο επίπεδο της φυσικής επιφάνειας του εδάφους στο βόρειο πρανές, μέχρι και 100 m πίσω από τη στέψη του πρανούς. Η κύρια ρωγμή που αποδόθηκε σε γεωλογική διαταραχή, συνέχιζε σε χαμηλότερα επίπεδα μέσα στο σύστημα των πρανών.

Το Μάρτιο του 1995, παρατηρήθηκε στο υψόμετρο +578 m ανύψωση του δαπέδου κατά 0,6 m, σε μια ζώνη με πλάτος 1 m και μήκος 250 m. Αυτή η κύρτωση εμφανίστηκε αμέσως μετά την αποκάλυψη του δαπέδου με τον καδοφόρο εκσκαφέα (βλέπε Σχ. 5-9). Ταυτόχρονα, εμφανίσθηκαν ρωγματώσεις στα δάπεδα δύο βαθμίδων (στα +597 m και +615 m στα δυτικά πρανή).

Τον Ιούνιο του 1995 παρουσιάσθηκαν νέες ρωγμές στις άκρες των επιπέδων εργασίας που βρίσκονται ανάντη, δηλαδή μέχρι την πρώτη βαθμίδα, στα +650 m.

Τον Αύγουστο του 1995 εμφανίσθηκαν ρωγμές στην επιφάνεια, σε απόσταση 5-20 m από τη στέψη του δυτικού πρανούς που εκτείνονταν σε μήκος ίσο περίπου με το 75% του ολικού μήκους του πρανούς. Το σύστημα των ρωγμών αποτελείτο από μία κύρια ρωγμή (που αναπτύχθηκε παράλληλα με την παράταξη των τεκτονικών ρηγμάτων του συστήματος των πρανών) και πολλές άλλες μικρότερες.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η εμφάνιση των ρωγμών στους ανώτερους ορίζοντες δεν είναι υποχρεωτικά αποτέλεσμα της προχώρησης της εκσκαφής σε βάθος, αλλά πιθανόν να οφείλονται σε κάποιο βαθμό και στην εξελισσόμενη αποξήρανση.

Το Σεπτέμβριο του 1995 μια νέα βαθμίδα διαμορφώθηκε στα +565 m και μία ελαφρά κύρτωση του υποκειμένου σημειώθηκε αν και σε πολλή μικρότερη έκταση από αυτήν του Μαρτίου του 1995.

Τέλος, μέχρι το Νοέμβριο του 1995 δεν διαπιστώθηκε καμιά σοβαρή διαφοροποίηση της κατάστασης, ενώ μέχρι τον Ιανουάριο 1996 η βαθμίδα στα +565 m δεν είχε περαιτέρω αναπτυχθεί προς την κατεύθυνση των δυτικών πρανών για την απόληψη και του υπολοίπου κοιτάσματος.

5.2.4 Μέτρα ελέγχου και αντιμετώπισης της κινητικότητας

Το πρώτο επιχειρησιακό μέτρο που ελήφθη μετά την εκδήλωση των μετακινήσεων στο βόρειο πρανές, αφορούσε τη διαμόρφωση ηπιότερης κλίσης στα πρανή κάτω από το επίπεδο +614 / +618 m. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δύο (2) αποστραγγιστικές γεωτρήσεις με βάθος μέχρι το υποκείμενο του λιγνίτη στρώματος, στην περιφέρεια των βόρειων πρανών. Κατά τη διάρκεια της διάτρησης εκδηλώθηκαν σημαντικές κινήσεις στην κύρια ρωγμή, η οποία ακολουθεί την πορεία του ρήγματος F10 (Σχ. 5-7). Οι κινήσεις ήταν κατά την διεύθυνση της κατακόρυφου (μάλλον λόγω στερεοποίησης των γεωυλικών) και στην πλευρά του βυθισμένου τμήματος.

Ένα άλλο επιχειρησιακό μέτρο που έλαβε χώρα ήταν να αναβληθεί οποιαδήποτε περαιτέρω εκμετάλλευση του Ορυχείου στην περιοχή των δυτικών πρανών (Σχ. 5-9), έως ότου διερευνηθεί ο μηχανισμός κινητικότητας των πρανών και προκύψουν σαφή συμπεράσματα όσον αφορά την ευστάθεια.

Επίσης, άρχισε και η αποφόρτιση των εξωτερικών αποθέσεων της Καρδιάς που βρίσκονται πίσω από τη στέψη των δυτικών πρανών. Τέλος, οι περισσότερες από τις ρωγμές που είχαν εμφανισθεί, διευθετήθηκαν προκειμένου να μην εισρέουν κατακρημνίσματα και να αποτραπεί η ανάπτυξη υδροστατικών πιέσεων που συμβάλλουν στη μείωση της ασφάλειας των πρανών.

5.2.4.1 Εγκατάσταση Γεωδαιτικών Σημείων ελέγχου

Με την εμφάνιση των κινήσεων, οι τοπογράφοι εγκατέστησαν επτά (7) “μάρτυρες” παρακολούθησης της κινητικότητας (Ιούλιος 1995). Όλοι οι μάρτυρες τοποθετήθηκαν στη βαθμίδα των +645 m έως +650 m των δυτικών πρανών (σε θέσεις που αντιστοιχούσαν στα ήδη εγκατεστημένα κλισίμετρα) εκτός από το ΓΣ11 που τοποθετήθηκε στα βόρεια πρανή, στη βαθμίδα των +627 έως +632 m (Σχ. 6-1).

Οι γεωδαιτικές παρατηρήσεις που ακολούθησαν, αφορούσαν την οριζοντιογραφική παρακολούθηση έξι (6) από τα γεωδαιτικά βάθρα (ΓΣ 3,4,5,6,7,11), τα οποία διατάσσονται στα βόρεια και δυτικά πρανή του Ορυχείου (ΔΕΗ -ΛΚΠΑ, 1995). Η εγκατάσταση και οι μετρήσεις ελέγχου πραγματοποιήθηκαν από το Τοπογραφικό Τμήμα του Ορυχείου Καρδιάς και τα στοιχεία που αξιολογήθηκαν στην παρούσα έρευνα αφορούν τη χρονική περίοδο από τον Ιούλιο έως και τον Οκτώβριο '95.

5.2.4.2 Εγκατάσταση Κλισιμέτρων

Μετά την εμφάνιση της κινητικότητας στα δυτικά πρανή, οι υπάρχουσες οκτώ (8) γεωτρήσεις κλισιμέτρων, οι οποίες είχαν πραγματοποιηθεί το 1992, αποτυπώθηκαν τοπογραφικά (Ιούνιος 1995, Σχ. 6-2), ενώ διαπιστώθηκε ότι τα κλισίμετρα ΚΛ1, 3, 4, 6 και 7 είχαν καταστραφεί* στο επίπεδο των +540 m και τα κλισίμετρα ΚΛ5 και ΚΛ8 στο επίπεδο των +590 m. Το εάν η καταστροφή οφείλεται σε θραύση ή σε σοβαρή κάμψη του σωλήνα των κλισιμέτρων δεν ήταν δυνατόν να διερευνηθεί επειδή οι γεωτρήσεις δεν είχαν εξετασθεί από την εγκατάστασή τους (1992) μέχρι και τον Ιούνιο του 1995.

* Αυτό σημαίνει ότι από το 1992 μέχρι την άνοιξη του 1995 (επίπεδο εκσκαφής στα +578 m), η σχετική μετακίνηση στο υποδεικνυόμενο από τα κλισίμετρα επίπεδο διάτμησης ήταν τουλάχιστον 5 cm.

Το καλοκαίρι του '95, δεδομένης της θραύσης των κλισιμέτρων και του περιορισμού των μετρήσεων μόνο μέχρι το ανώτερο επίπεδο της αστοχίας τους, κατασκευάστηκαν άλλα εννέα (9) κλισίμετρα στα νεοδημιουργηθέντα πρανή. Τοποθετήθηκαν σε τρεις (3) σειρές, με άξονα κάθε σειράς κάθετο στη διεύθυνση των πρανών (Σχ. 6-2).

5.2.4.3 Περαιτέρω γεωτεχνική διερεύνηση μετά την εμφάνιση της κινητικότητας των δυτικών μόνιμων πρανών

Εκτός από τις δύο πρώτες γεωτρήσεις (EKP-5 και EKP-6) που πραγματοποιήθηκαν κατά την προμελέτη του Ορυχείου, μια δεύτερη σειρά έξι (6) γεωτρήσεων (ΓΤ6-1,-2,-3,-4,-5,-6/95), με διάταξη Β.ΒΔ – Ν.ΝΔ, εξορύχθηκε στα δυτικά πρανή μετά την εμφάνιση της κινητικότητας το 1995. Οι τέσσερις (4) απ' αυτές (ΓΤ6-1,-2,-3,-4/95), πραγματοποιήθηκαν με συνεχή δειγματοληψία (και σε ορισμένους ορίζοντες ελαμβάνοντο αδιατάρακτα δείγματα), ενώ στις υπόλοιπες δύο (ΓΤ6-5, -6/95), πραγματοποιήθηκε ασυνεχής δειγματοληψία αδιατάρακτων μόνο δειγμάτων.

Οι γεωτρήσεις αυτές διέτρησαν αρχικά απολιθωματοφόρα μάργα, διαφοροποιούμενη κατά θέσεις ως προς το χρώμα, την ύπαρξη φυτικών λειψάνων και το εύθρυπτο του χαρακτήρα της. Ακολούθησε ένας ορίζοντας που χαρακτηρίζεται από εναλλαγές λιγνίτη με μαργαϊκές ενστρώσεις και στη συνέχεια διατρήθηκε γκριζοπράσινη - γκριζόλευκη (υποκείμενη) μάργα με μεταβαλλόμενη πλαστικότητα.

Ενστρώσεις αργίλου και μαργαϊκού ασβεστόλιθου μέσα στην υποκείμενη μάργα, συναντήθηκαν σε μία από τις γεωτρήσεις. Επιφάνειες ολίσθησης τεκτονικής προέλευσης, διαπιστώθηκαν σε όλους τους ορίζοντες και με διαφορετική πυκνότητα σε κάθε γεώτρηση, χωρίς να διαφαίνεται σαφής διαφοροποίηση του πλήθους των επιφανειών αυτών με το βάθος. Γενικά, ήταν πυκνότερες μέσα στο κοίτασμα και στη ζώνη μετάβασης από το κοίτασμα στην υποκείμενη μάργα (υψόμετρο από +515 m έως +550 m). Επίσης, η δειγματοληψία, όπου πραγματοποιήθηκε, δεν εντόπισε θιζοτροφικές ενστρώσεις ή επιφάνειες ολίσθησης με σαφή τάση προσανατολισμού. Τέλος, η απώλεια δειγματοληψίας που διαπιστώθηκε σε ελάχιστες ζώνες, αποδόθηκε κατά δήλωση του επιβλέποντος γεωλόγου, σε τεχνικούς λόγους.

Το Δεκέμβριο 1995, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα από τους μαργαϊκούς ορίζοντες που διέτρησαν οι προαναφερόμενες γεωτρήσεις και πιο συγκεκριμένα σε δείγματα από την ενδιάμεση μάργα της λιγνιτοφόρου σειράς αλλά και την υποκείμενη μάργα (Γεώγνωση, 1995). Τα δείγματα λόγω του τρόπου δειγματοληψίας και της ευαισθησίας τους στη διαβροχή, θεωρήθηκαν ημι-διαταραγμένα. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τις τριαξονικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στους Πίνακες 5-2 και 5-3.

Πίνακας 5-2 Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε δείγματα της γεώτρησης ΓΤ6 – 1/95
(Γεώγνωση, 1995)

Γεώτρηση ΓΤ6 – 1/95				
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑ- ΦΙΚΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ	Βάθος από την κορυφή της γεώτρησης (m)	Απόλυτο υψόμετρο (m)	Συνοχή c' (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής φ' (deg)
<i>Τριαξονικές δοκιμές με στερεοποίηση, χωρίς αποστράγγιση</i>				
Υποκείμενη μάργα	106,3	508,4	41	36,8
	112,3	502,4	114	34,0
<i>Τριαξονική δοκιμή με στερεοποίηση και αποστράγγιση</i>				
Υποκείμενη μάργα	116,8	497,9	27	36,2

Πίνακας 5-3 Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε δείγματα της γεώτρησης ΓΤ6 – 5/95
(Γεώγνωση, 1995)

Γεώτρηση ΓΤ6 – 5/95				
<i>Τριαξονική δοκιμή με στερεοποίηση και αποστράγγιση</i>				
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑ- ΦΙΚΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ	Βάθος από την κορυφή της γεώτρησης (m)	Απόλυτο υψόμετρο (m)	Συνοχή c' (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής φ' (deg)
Λιγνιτοφόρος σειρά (Ενδιάμεση μάργα)	15,0	561,2	80	33,9

**Πίνακας 5-4 Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε δείγματα των γεωτρήσεων
ΓΤ6 – 5/95 και ΓΤ6 – 6/95 (Πολυτεχνείο Κρήτης, 1997)**

Γεωτρήσεις ΓΤ6 – 5/95 και ΓΤ6 – 6/95		
<i>Τριαξονικές δοκιμές με στερεοποίηση και αποστράγγιση</i>		
ΣΤΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΚΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΣ	Συνοχή c' (kPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής φ' (deg)
Λιγνιτοφόρος σειρά (Ενδιάμεση μάργα)	55,6	42,6
Αποσαθρωμένη υποκείμενη μάργα	25,3	37,4
Τελική-υποκείμενη μάργα	23,5	37,0

Εργαστηριακές μετρήσεις σε δείγματα των γεωτρήσεων ΓΤ6-5/95 και ΓΤ6-6/95 πραγματοποιήθηκαν και στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, (ΠΟΛ.Κ.,1997). Τα δείγματα αφορούσαν την ενδιάμεση μάργα της λιγνιτοφόρου σειράς αλλά και την υποκείμενη μάργα, η οποία διαχωρίστηκε σε αποσαθρωμένη (μαλακή τεφροκάστανη αργιλώδη ιλύ) και σε τελική μάργα (στερεή έως μαλακή πρασινότεφρη ιλύ). Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με στερεοποίηση και στράγγιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-4.

Στα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών της *ενδιάμεσης μάργας* που πραγματοποιήθηκαν με στερεοποίηση και στράγγιση των δοκιμών (Πίνακες 5-2, 5-3, 5-4), δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές. Η γωνία εσωτερικής τριβής κυμαίνεται από 33,9° έως 42,6°, ενώ η συνοχή από 80 έως 55,6 kPa αντίστοιχα (Γεώγνωση, 1995, ΠΟΛ.Κ., 1997). Το εύρος διακύμανσης των προαναφερόμενων μετρήσεων οφείλεται πιθανότατα στο διαφορετικό ποσοστό αργιλικού κλάσματος και στη τυχόν διαταραχή των δειγμάτων.

Όσον αναφορά την *υποκείμενη μάργα*, οι τιμές της γωνίας εσωτερικής τριβής που προσδιορίστηκαν με στερεοποίηση και στράγγιση των δοκιμών, είναι σχεδόν ταυτόσημες (κυμαίνονται από 36,2° έως 37°), ενώ και η διακύμανση στις τιμές της συνοχής είναι μικρές (μεταξύ 27 και 23,5 kPa).

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Ένα κρίσιμο ερώτημα που τέθηκε το 1995 αφορούσε την κινητικότητα των δυτικών πρανών του “Τομέα-6” και το μηχανισμό που την προκάλεσε. Οι εμφανιζόμενες κινήσεις ήταν αποτέλεσμα εκτόνωσης των τάσεων (λόγω της εκσκαφής), ή η έναρξη μιας επερχόμενης αστοχίας; Η δεύτερη περίπτωση θα είχε τεράστιες συνέπειες για την περαιτέρω λειτουργία του Ορυχείου.

Για τη διερεύνηση της κινητικότητας που εκδηλώθηκε, αξιολογήθηκαν οι μετρήσεις των γεωδαιτικών σημείων ελέγχου και των κλισιμέτρων. Τα διαθέσιμα στοιχεία περιορίζονται χρονικά στο διάστημα από τον Ιούλιο έως τον Νοέμβριο '95 όσον αφορά τα τοπογραφικά σημεία (Σχ. 6-1), στο διάστημα από τον Ιούνιο '95 έως τον Οκτώβριο '95 για την αρχική (παλιά) σειρά κλισιμέτρων (ΚΛ) και από τον Οκτώβριο '95 έως το Μάρτιο '96 για τα νεότερα (ΝΚΛ) κλισίμετρα (Σχ. 6-2).

6.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αξιολογήθηκαν με διαγράμματα οριζόντιων μετακινήσεων κλίμακας 1:1 που διατέθηκαν από τη ΔΕΗ - ΛΚΠΑ. Οι μετρήσεις αρχικά ήταν πυκνές (ημερήσιες) ενώ στη συνέχεια πραγματοποιούνταν ανά χρονικά διαστήματα μερικών έως δέκα ημερών. Το άνυσμα που ορίστηκε από την αρχική και τελική θέση κάθε σημείου μεταξύ δύο συγκεκριμένων ημερομηνιών υποδεικνύει την πορεία κίνησης του γεωδαιτικού σημείου. Η κίνηση των σημείων ακολουθεί τεθλασμένη γραμμή, αλλά η τάση μετακίνησης είναι σε όλες τις περιπτώσεις προς το όρυγμα ή σαφώς συγκλίνουσα προς αυτό (ΠΟΛ.Κ., 1996).

Στο χάρτη του Σχήματος 6-1 έχει παρασταθεί ανυσματικά (διεύθυνση /σχετικό μέγεθος) η “κεντροβαρής” της πορείας που ακολούθησε κάθε γεωδαιτικό σημείο.

Την περίοδο από τον Ιούλιο έως το Νοέμβριο του 1995 (επίπεδο εκσκαφής $\approx +565$ m) οι κινήσεις που μετρήθηκαν στα γεωδαιτικά σημεία ελέγχου (Σχ. 6-1) ήταν της τάξης των 20 cm (διακύμανση 16 - 22 cm) εκτός από το Νοτιότερο (ΓΣ 7) με μετατόπιση 7 cm και το σημείο στο Βόρειο μέτωπο (ΓΣ 11) με μετατόπιση 30 cm. Η αθροιστική μετακίνηση, υπολογιζόμενη με τον προαναφερόμενο τρόπο, εκτιμάται περί τα 15 cm (μέση τιμή) για χρονικό διάστημα 3,5 μηνών. Το μέγεθος αυτό που αν αναχθεί σε ημερήσια βάση, προκύπτει ότι ο ρυθμός επιφανειακής μετακίνησης είναι ίσος με 1,43 mm/ημέρα.

Η κύρια κίνηση των σημείων ήταν προς το Ορυχείο, προς το επίκεντρο δηλαδή της μεταλλευτικής δραστηριότητας. Επίσης, οι φάσεις επιτάχυνσης - επιβράδυνσης που παρουσιάζουν τα διαθέσιμα διαγράμματα (που αναφέρονται στην πορεία των γεωδαιτικών σημείων συναρτήσει του χρόνου), συνδέονται εμφανώς με τη μεταλλευτική δραστηριότητα.

Είναι προφανές ότι οι τιμές μετακίνησης, αφορούν το άθροισμα των διαφορικών (σχετικών) κινήσεων μεταξύ των οριζόντων της στρωματογραφικής ακολουθίας και όχι μιας συγκεκριμένης στρώσης. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο ρυθμός της μετακίνησης είναι αρκετά μικρότερος των 20 mm/ημέρα που σύμφωνα με τους Λεονάρδο και Τερεζόπουλο (2002), αποτελεί ένδειξη επερχόμενων επικίνδυνων καταστάσεων.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι τα γεωδαιτικά σημεία διατάσσονται στο ίδιο περίπου επίπεδο, χωρίς να κατανέμονται υψομετρικά στις διάφορες βαθμίδες του πρανούς, γεγονός που δεν επιτρέπει τη σύγκριση της κινητικότητας σε διάφορα υψόμετρα και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της ευρύτερης μάζας.

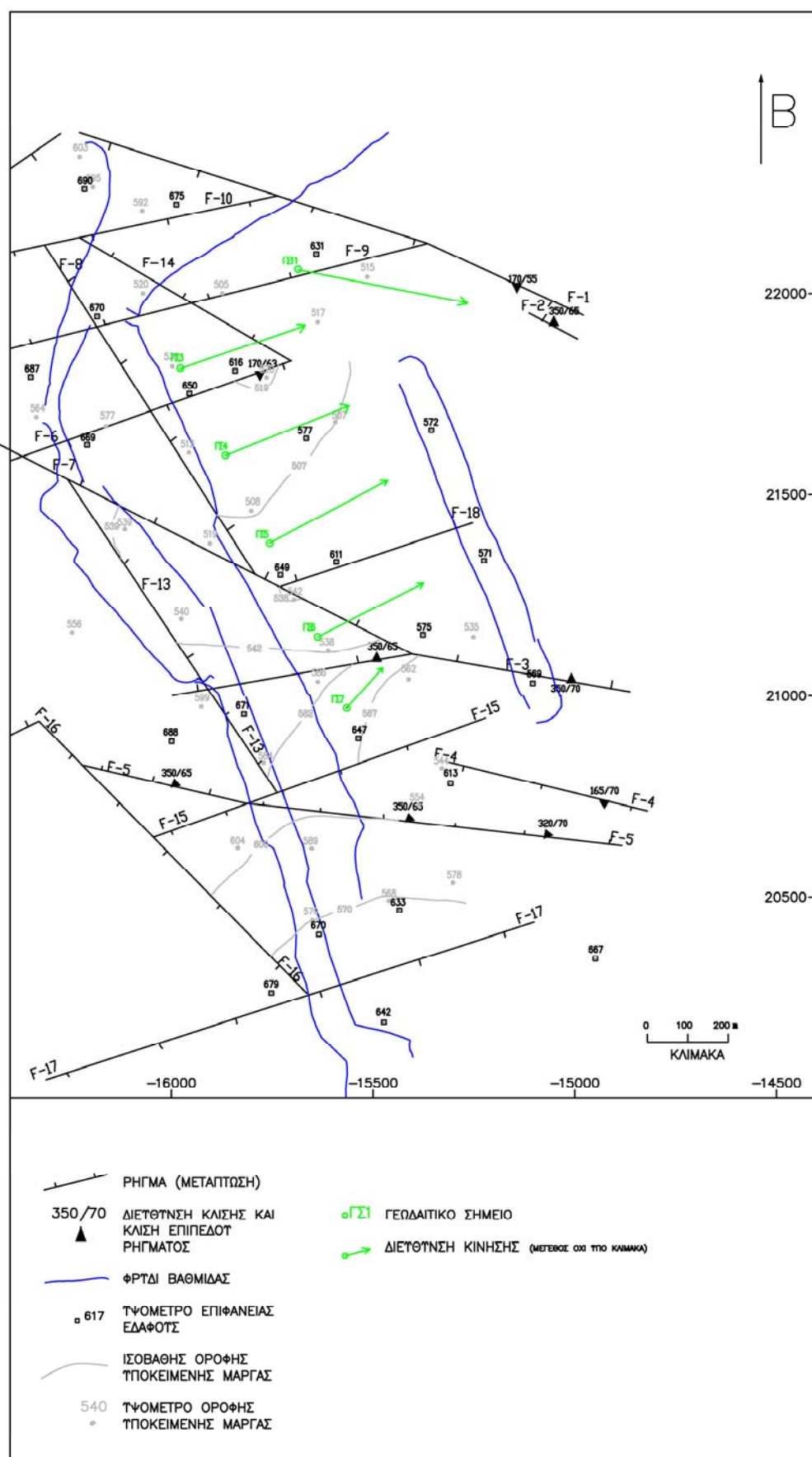
Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, οι παρατηρούμενες κινήσεις (διεύθυνση και τάξη μεγέθους) είναι δυνατόν να αποδοθούν στην αποφόρτιση και την αποστράγγιση των γεωλογικών στρωμάτων, που προκαλούνται με την εξόρυξη. Όμως, η έλλειψη μετρήσεων της κατακόρυφου συνιστώσας των κινήσεων δεν επιτρέπει την αποτίμηση της ποσοστιαίας συμβολής των δύο παραγόντων στο τελικό αποτέλεσμα, ενώ η ύπαρξη μικρών και μεγάλων ρωγμών στο έδαφος των τεχνητά αποκαλυμμένων πρανών συγχέουν προσθετικά την όλη εικόνα.

6.2 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ

Με βάση τα δεδομένα από

- τα επτά (7) παλαιότερα κλισίμετρα (ΚΛ1 έως 8, παραλειπομένου του υπ' αριθμ. 2), με τρεις μετρήσεις μεταξύ Ιουνίου και Οκτωβρίου 1995 και
- τα τέσσερα (4) νεότερα κλισίμετρα (ΝΚΛ3, 5, 9, 10), με μετρήσεις μεταξύ Οκτωβρίου '95 και Μαρτίου '96, επιχειρήθηκε μια ανάλυση της κινητικότητας που εκδηλώθηκε στα δυτικά πρανή.

Από τα διαθέσιμα στοιχεία (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Καταγραφές κλισιμέτρων), δεν είναι σαφής ο προσανατολισμός των διαδρομών της βολίδας (άξονες A_0 και B_0) σε κάθε κλισίμετρο. Από προφορικές πληροφορίες συνάγεται ότι, για την παλιά σειρά των κλισιμέτρων (ΚΛ) ο άξονας A_0 έχει προσανατολισμό ανατολικό και ο άξονας B_0 νότιο, ενώ για τη νεότερη σειρά κλισιμέτρων (ΝΚΛ) ο άξονας A_0 συμπίπτει με διεύθυνση ABA και ο άξονας B_0 με διεύθυνση NNA (δηλ. κάθετα και παράλληλα, στο μέτωπο των τεχνητών πρανών αντίστοιχα).



Σχ. 6-1 Γεωδαιτικά σημεία ελέγχου στα δυτικά πρανή του “Τομέα-6” (Monopolis *et. al.*, 1999)

Στο Σχ. 6-2 καταχωρήθηκαν οι αθροιστικές σχετικές κινήσεις της κεφαλής κάθε γεώτρησης ως προς το βαθύτερο επισκέψιμο σημείο μέτρησης. Από τις διευθύνσεις των κινήσεων αυτών, προκύπτει ότι οι παρατηρούμενες κινήσεις (σε αντίθεση με αυτές των γεωδαιτικών σημείων), δεν υποδεικνύουν οργανωμένη μορφή κίνησης. Οι ανυσματικές παρεκκλίσεις από τη γενική ΑΒΑ διεύθυνση οφείλονται σε τοπικές συνθήκες, δεδομένου ότι οι μετρήσεις των κλισιμέτρων αφορούν την κινητικότητα της ζώνης που επηρεάζει τη διαδρομή της βολίδας.

Η σχετική επιφανειακή μετακίνηση της κεφαλής των κλισιμέτρων ως προς τη βάση, αποτελεί ποσοστό της πραγματικής επιφανειακής μετακίνησης όπως αυτή δίδεται από τα παρακείμενα γεωδαιτικά σημεία. Για να υπάρξει συσχέτιση των αποτελεσμάτων με αυτά των γεωδαιτικών σημείων, πρέπει οι κινήσεις των κλισιμέτρων να αναχθούν ως προς την κεφαλή της γεώτρησης που θα αποτελεί ταυτόχρονα και σημείο οπτικού - γεωδαιτικού ελέγχου.

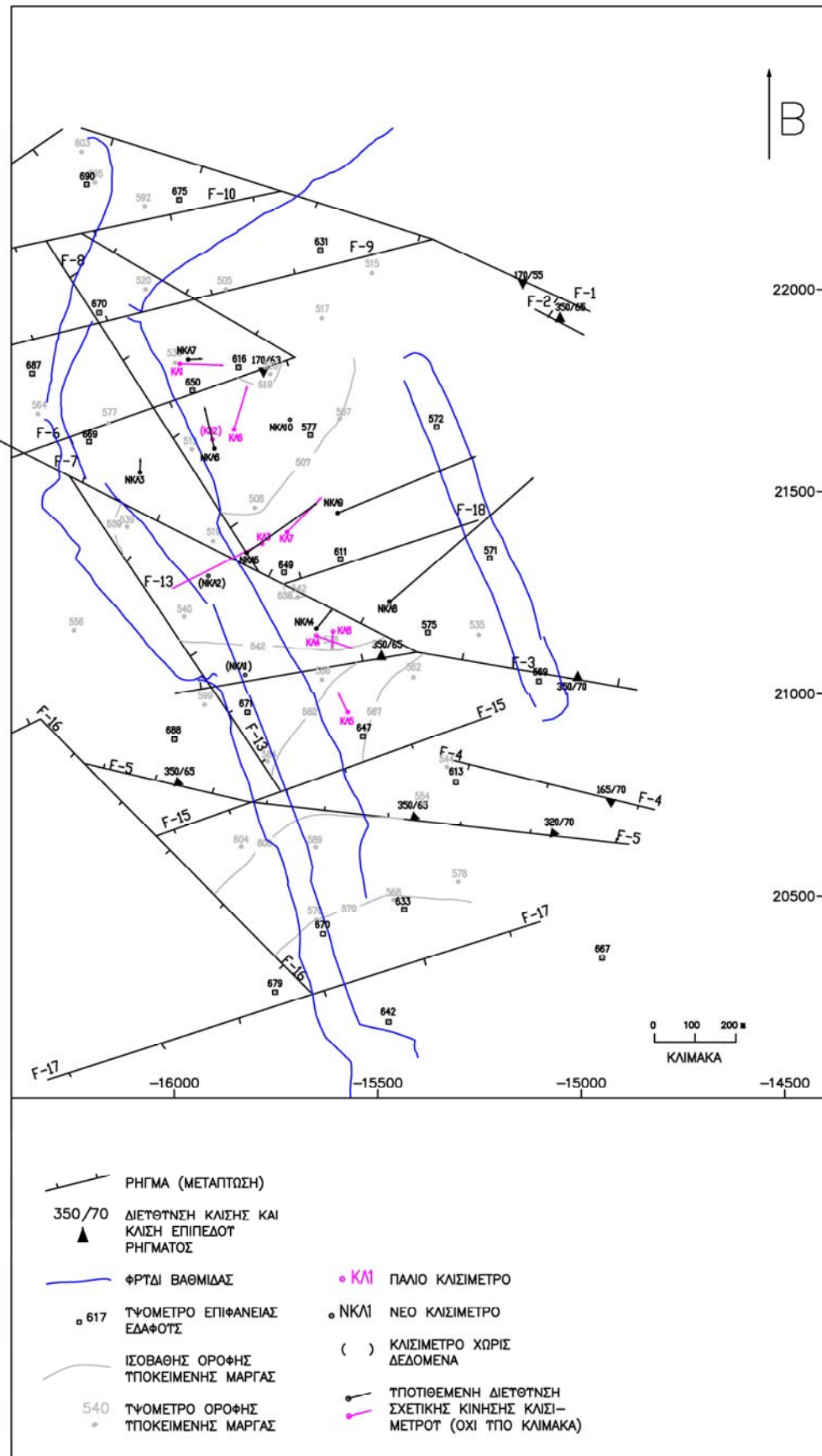
Πάντως, με βάση τις καταγραφές των κλισιμέτρων (βλέπε ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Καταγραφές κλισιμέτρων) είναι γεγονός ότι η πλειονότητα των παλιών κλισιμέτρων (ΚΛ) έχει καταστραφεί στο βάθος ή περίπου στο βάθος του δαπέδου του λιγνιτικού κοιτάσματος / οροφή υποκείμενης μάργας (ΚΛ7 στα +560 m), ή στη ζώνη μετάβασης του λιγνίτη προς την οργανομιγή μάργα (ΚΛ3 περίπου στα +550 m), όπου και τα νέα κλισίμετρα (ΝΚΛ6 στα \approx +520 m και ΝΚΛ9 στα +515 m) εμφανίζουν ισχυρές αποκλίσεις. Η απόκλιση του ΝΚΛ10 στα +545 m και ΝΚΛ9 στα +540 m (μέσα στο κοιτάσμα) μάλλον θα πρέπει να αποδοθεί σε υψηλή διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο αυτό, ενώ η απόκλιση του ΝΚΛ5 στα +531 m αποδίδεται στη διασταύρωση του κλισιμέτρου στο επίπεδο αυτό με το ρήγμα F8.

Τέλος, οι έντονες τοπικές “κυματώσεις” που εμφανίζουν οι καταγραφές των κλισιμέτρων (π.χ. κλισίμετρο ΝΚΛ5 από τα +560 έως τα +580 m, κλισίμετρο ΝΚΛ6 από τα +600 έως +620 m) αποδίδονται σε περισφίξεις από “πλαστικές” διαστρώσεις.

Όσον αφορά τις τιμές της σχετικής μετακίνησης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο στη γεώτρηση ΝΚΛ9 και στο επίπεδο +515 m εμφανίζεται μια οριζόντια μετακίνηση \approx 50 mm και μια δεύτερη στα +540 m, που ερμηνεύεται επιφυλακτικά σαν μία πιθανή επιφάνεια διάτμησης.

Η καταστροφή των παλιών κλισιμέτρων στο επίπεδο των \approx +550 m όπως διαπιστώθηκε το 1995, υποδηλώνει ότι από το 1992 μέχρι την Άνοιξη του 1995 (επίπεδο εκσκαφής στα +578 m), η σχετική μετακίνηση στο επίπεδο αστοχίας των κλισιμέτρων ήταν τουλάχιστον 5 cm. Ανάλογο συμπέρασμα προκύπτει και για τα νεότερα κλισίμετρα, για το χρονικό διάστημα από τον Οκτώβριο '95 μέχρι το Μάρτιο '96, οπότε παρουσιάσθηκαν αδυναμίες μέτρησης στο επίπεδο των +531 m για το ΝΚΛ5, στα +518 m για το ΝΚΛ6, στο επίπεδο +515 m για το ΝΚΛ9 και στα +511 m για το ΝΚΛ10.

Τα παραπάνω δεν υποδεικνύουν εξέλιξη οργανωμένης κίνησης που θα ήταν δυνατό να εξελιχθεί σε κατολίσθηση. Για την καλλίτερη τεκμηρίωση της όποιας υπόθεσης, κρίνεται απαραίτητη



Σχ. 6-2 Κλισίμετρα στα δυτικά πρηνή του “Τομέα-6”

η συγκέντρωση περισσότερων δεδομένων από κλισίμετρα, προκειμένου να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα όσον αφορά τις οριζόντιες μετατοπίσεις και περισσότερες τοπογραφικές μετρήσεις όσον αφορά την κίνηση της κεφαλής των κλισιμέτρων, προκειμένου να ελεγχθούν αξιόπιστα οι σχετικές και απόλυτες μεταθέσεις τους.

6.3 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ

Για την αποτύπωση της μορφολογίας της ελεύθερης πιεζομετρικής επιφάνειας και την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη διαμόρφωση της ανώτερης επιφάνειας της ζώνης κορεσμού, σχεδιάστηκε ο πιεζομετρικός χάρτης του Σχ. 6-3.

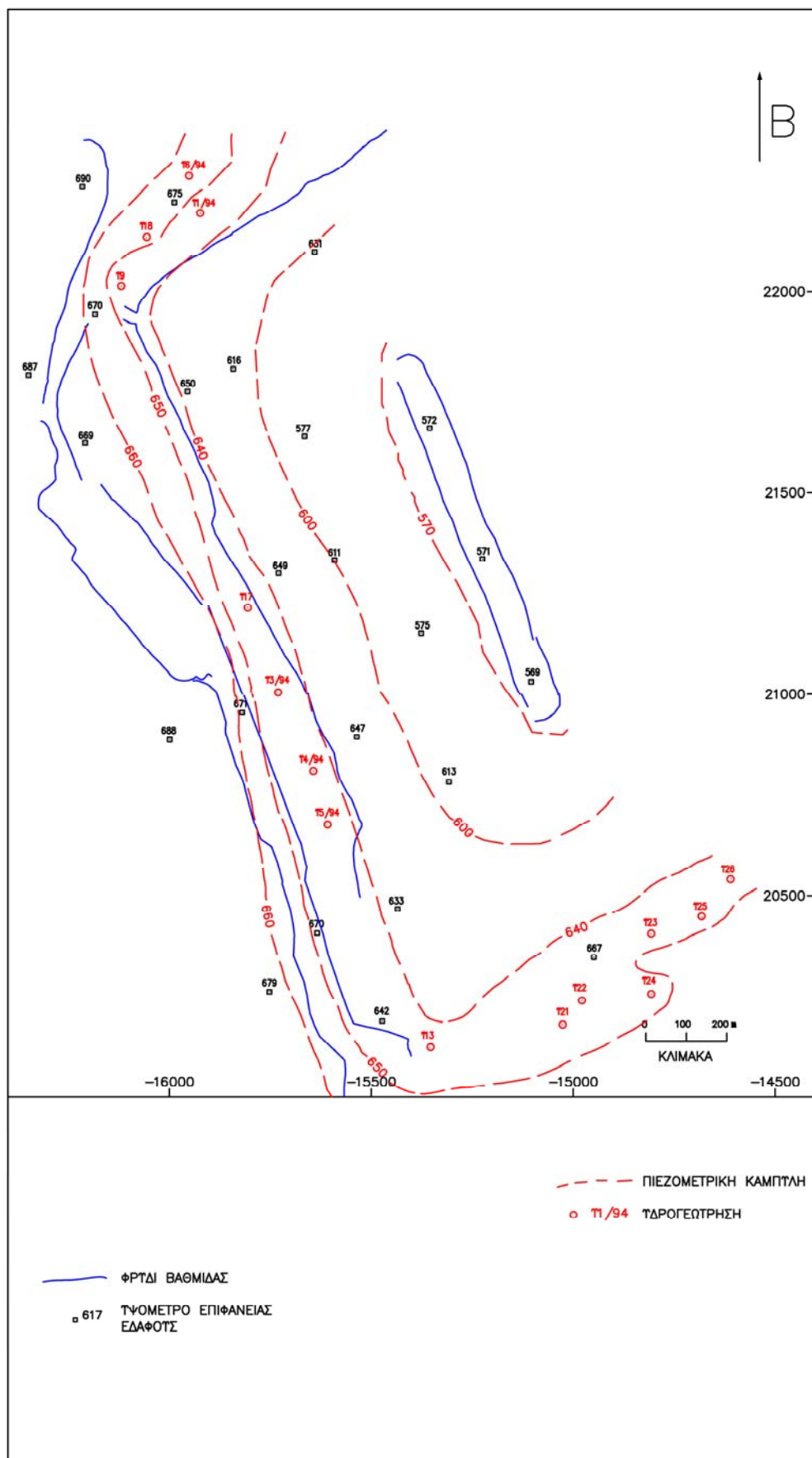
Η σύνταξη του χάρτη έγινε με βάση τις σταθμημετρήσεις της 25/10/95 (περίοδος αντλήσεων). Επειδή οι υδρογεωτρήσεις αναπτύσσονται σε πολύ στενή ζώνη στη δυτική ημιπερίμετρο του Ορυχείου, η σχεδίαση του χάρτη έγινε με βάση επτά (7) τομές που σχεδιάστηκαν εγκάρσια στα πρανή της δυτικής ημιπεριμέτρου της εξόρυξης. Θεωρήθηκε ότι η ζώνη κορεσμού βρίσκεται σε μικρό βάθος (2-3 μέτρα) στο ανατολικό πόδι των εξωτερικών αποθέσεων της Καρδιάς, διέρχεται από τη στάθμη άντλησης των υδρογεωτρήσεων και καταλήγει στη στάθμη της βαθύτερης βαθμίδας εξόρυξης (δάπεδο εκσκαφής).

Από τη γενική μορφή ανάπτυξης των πιεζομετρικών καμπυλών (Σχ. 6-3) συνάγεται το συμπέρασμα ότι η μορφολογία της ζώνης κορεσμού (ανώτερη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα) επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη μορφολογία των τεχνητών πρανών και λιγότερο από τις αντλήσεις, οι οποίες φαίνεται να υποστηρίζουν την αποστράγγιση περιθωριακά.

Παράλληλα, συνάγεται το συμπέρασμα ότι εκτός από τον αβαθή φρεάτιο ορίζοντα (τεταρτογενείς αποθέσεις), τα βαθύτερα στρώματα (λιγνιτική σειρά) έχουν πολύ μικρές περατότητες και στερούνται αξιόλογων υδροφόρων οριζόντων. Η μικρή ασυνεχής υδροφορία που απαντάται σε ορισμένες ζώνες είναι συμπτωματική και συνδέεται με ζώνες διάρρηξης των Νεογενών ή με παλαιοκοίτες των Τεταρτογενών αποθέσεων. Δυστυχώς, επιμέρους μετρήσεις της πίεσης του νερού των πόρων στους διάφορους ορίζοντες δεν είναι διαθέσιμες.

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

Οι παρατηρούμενες κινήσεις (γεωδαιτικά σημεία, κλισίμετρα, ρωγμές, αναθολώσεις) είναι δυνατό να αποδοθούν στις τεχνητές επεμβάσεις που προκαλούνται με την εξόρυξη (αποφόρτιση, αποστράγγιση-στερεοποίηση) σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες (ρήγματα - κλίσεις στρωμά-



Σχ. 6-3 Πιεζομετρία στην περιοχή του “Τομέα-6” / Κατάσταση Οκτωβρίου ’95

των, εξαλλοίωση, κ.ά.), χωρίς απαραίτητα να συνδέονται με οργανωμένες κατολισθητικές τάσεις.

Δεδομένων των επιφανειών ολίσθησης που διαπιστώθηκαν στους πυρήνες των γεωτεχνικών γεωτρήσεων, ενδέχεται να εκδηλωθεί ολίσθηση είτε στην επαφή κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας, είτε στους αρμούς στρώσης του λιγνίτη και των μαργαϊκών ενστρώσεων μέσα στο κοιτάσμα. Εντούτοις, η υπόθεση αυτή δεν μπορεί να τεκμηριωθεί περαιτέρω λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων παρατήρησης (γεωδαιτικά σημεία, κλισίμετρα, γεωλογική δομή). Επίσης οι πληροφορίες γύρω από τη διεύθυνση και την ταχύτητα των μετατοπίσεων δεν είναι ικανοποιητικού επιπέδου, δεδομένου ότι η θέση εγκατάστασης των τοπογραφικών σημείων δεν είναι η βέλτιστη και οι μετρήσεις των κλισιμέτρων δεν είναι αρκετές. Κατά συνέπεια, με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η εξέλιξη της κινητικότητας.

Η ανάπτυξη των επιφανειών ολίσθησης που διαπιστώθηκαν με τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις, φαίνεται να προηγήθηκαν χρονικά της εκσκαφής (τεκτονική-παλαιογεωγραφία) χωρίς όμως να αποκλείεται και η συσχέτιση ή επαναδραστηριοποίηση τους με την ανάπτυξη του Ορυχείου. Είναι τυχαίου προσανατολισμού, ενώ η ζώνη στην οποία εντοπίζονται επηρέασε την αστοχία των κλισιμέτρων. Η ανάπτυξη των ασυνεχειών αυτών μπορεί να αποδοθεί στη συγκέντρωση τάσεων, στην ύπαρξη ζώνης μειωμένης αντοχής, στην ενέργεια που εκτονώνεται με την αποφόρτιση των στρωμάτων, ή και σε διατμήσεις που οφείλονται στις διαφορικές διογκώσεις των διαδοχικών στρωμάτων (ετερογένεια). Δεδομένου όμως του πολυστρωματικού χαρακτήρα του σχηματισμού, ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει την ανάπτυξη ή επαναδραστηριοποίηση των ασυνεχειών αυτών, διαφαίνεται να είναι η διαφορική διόγκωση ή και συρρίκνωση (λόγω αποστράγγισης) των εδαφικών οριζόντων.

Όσον αφορά το μέγεθος της διόγκωσης (ανάκτησης) και τη κίνηση των παρειών της εκσκαφής, είναι συνάρτηση της εκτόνωσης της πλευρικής τάσης και των ιδιοτήτων των διαφόρων στρωμάτων. Το μέτρο δυστροπίας, ο λόγος του Poisson, ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία και ο συντελεστής στερεοποίησης επηρεάζουν το μέγεθος των κινήσεων αυτών, που εξαιτίας του πολυστρωματικού χαρακτήρα των σχηματισμών ποικίλουν από ορίζοντα σε ορίζοντα και προκαλούν διαφορικές κινήσεις μεταξύ των στρωμάτων. Επιπλέον, κάτω από το δάπεδο της εκσκαφής, τα στρώματα ανάλογα με το μέγεθος του αφαιρούμενου φορτίου αλλά και τις ιδιότητες τους, έχουν την τάση να σχηματίσουν ψευδο-αντικλινικές δομές. Η αναθόλωση τους, συνοδεύεται λόγω της καμπυλότητας που προκαλείται, από σχετική ολίσθηση μεταξύ των αρχικά επίπεδων στρωμάτων με αποτέλεσμα την ανάπτυξη επιφανειών διάτμησης.

Όποιοι και αν είναι οι γενεσιουργοί παράγοντες αυτών των επιφανειών ολίσθησης, το βασικό και κρίσιμο ερώτημα είναι αν αυτές αποτελούν ή μπορούν να αποτελέσουν εκτός από επιφάνειες διαφορικής κίνησης και επιφάνειες αστοχίας (κατολίσθησης) μεγάλων εδαφικών μαζών. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό εξαρτάται από την πλευρική ανάπτυξη τους, την παραμένουσα διατμητική αντοχή του σχηματισμού στον οποίο αναπτύσσονται και φυσικά την γεωλογική δομή της περιοχής (κλίση στρωμάτων, ρήγματα κλπ).

Επίσης, για την αξιολόγηση της κινητικής συμπεριφοράς απαιτούνται πρόσθετες εργαστηριακές μετρήσεις, διερεύνηση της ευστάθειας με μεθόδους οριακής ισορροπίας και προσομοίωση της εκσκαφής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή ανάλογων μεθόδων.

Με βάση τα παραπάνω και για μια πληρέστερη διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς της εκσκαφής, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός των αναγκαίων γεωτεχνικών παραμέτρων και η προσομοίωση της κινητικής συμπεριφοράς με βάση μια γεωλογική τομή εγκάρσια στα δυτικά πρηνή, σε θέση που θεωρητικά δεν θα επηρεάζεται από την κινητικότητα πλευρικών τεμαχών, γεγονός που ικανοποιεί την υπόθεση της επίπεδης παραμόρφωσης (πολύ μικρή παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση κάθετα στη τομή).

6.5 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΑΞΗ ΑΝΤΙΠΡΟΣΩΠΕΥΤΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΜΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΣΤΑ ΔΥΤΙΚΑ ΠΡΑΝΗ

Προκειμένου να μελετηθεί εμπειριστικά η κινητική συμπεριφορά των πρηνών του Ορυχείου, σχεδιάστηκε γεωλογική τομή με βάση κοιτασματολογικές, γεωτεχνικές γεωτρήσεις και επιφανειακές διαπιστώσεις που έγιναν κατά την εκμετάλλευση του Ορυχείου.

Η τομή (XX') με διεύθυνση Δ.ΝΔ - Α.ΒΑ, (Σχ. 5-7 και Σχ. 6-4), αρχίζει από το άκρο των εξωτερικών αποθέσεων του Ορυχείου Καρδιάς (τοπογραφικό σημείο με συντεταγμένες στο σύστημα Hatt, x : -16278, y: 21400) και καταλήγει στο σημείο με συντεταγμένες x : -14076 και y : 21831.

Η θέση και η διεύθυνση της τομής επελέγη έτσι ώστε να διέρχεται εγκάρσια από ένα τεκτονικό τέμαχος μεγάλων διαστάσεων που οριοθετείται προς Βορρά από το ρήγμα F6 και Νότια από το ρήγμα F18, ενώ τέμνει τα δυτικά πρηνή με διεύθυνση σχεδόν κάθετη στη μορφολογία τους (Σχ. 5-7).

Τα δεδομένα τα οποία ελήφθησαν υπόψη για το σχεδιασμό, αφορούν μία ζώνη 150 - 200 m εκατέρωθεν της τομής και αφορούσαν στοιχεία από :

- τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις ΓΤ6-1/95, ΓΤ6-2/95, ΓΤ6-3/95 των οποίων το βάθος κυμαίνεται από 75 έως 135 m (και έχουν απόλυτο υψόμετρο κεφαλής στα +614 έως +575 m) και
- τις κοιτασματολογικές γεωτρήσεις που είχαν προηγηθεί του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης του Ορυχείου (Δ-Δ'/4, Δ-Δ'/5, Δ-Δ'/6, ΠΔ-ΠΔ'/7, ΠΔ-ΠΔ'/8, Ε-Ε'/2, Ε-Ε'/3), οι ακριβείς θέσεις των οποίων προσδιορίστηκαν με χρήση ψηφιοποιητή. (Το βάθος των γεωτρήσεων αυτών κυμαίνεται από 95 έως 163 m και το απόλυτο υψόμετρο κεφαλής είναι μεταξύ των +683 έως +667 m).

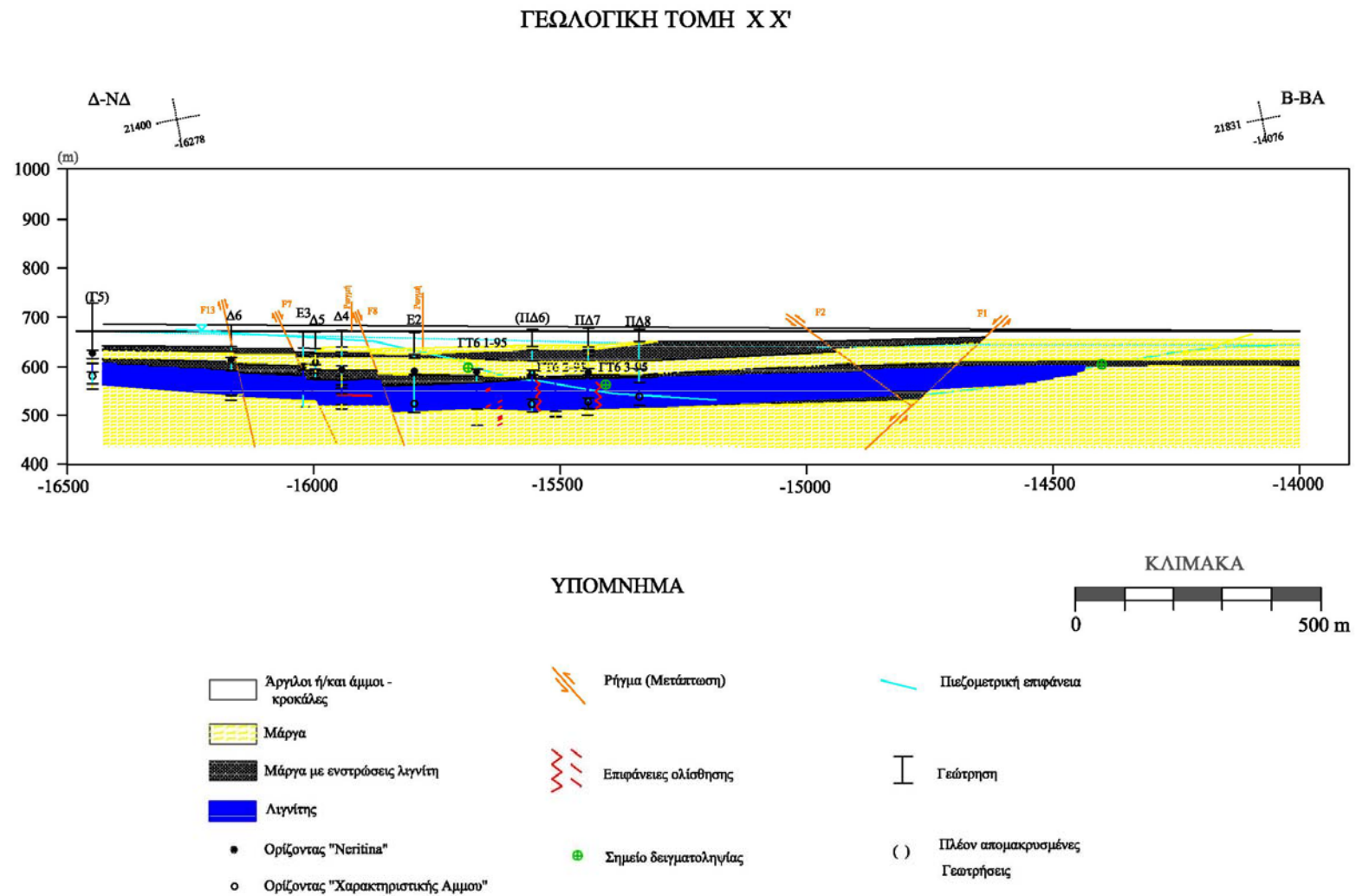
Με βάση τα δελτία περιγραφής των γεωτεχνικών γεωτρήσεων, τις κοιτασματολογικές γεωτρήσεις και τους καθοδηγητικούς ορίζοντες της “Χαρακτηριστικής Άμμου” και της “Neritina” στη λιγνιτοφόρο σειρά (Σχ. 6-4 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ- Γεωλογική τομή XX'), προέκυψε η εξής στρωματογραφική ακολουθία από την επιφάνεια προς το βάθος :

- **προσχώσεις (άμμος ή και άργιλος) με πάχος 50 m**
- **μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη και πάχος 27 m**
- **ενδιάμεση μάργα με πάχος 25 m**
- **μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη και πάχος 20 m**
- **κοίτασμα (εναλλαγές λιγνιτικών και μαργαϊκών στρώσεων) με πάχος 50 m**
- **υποκείμενη μάργα (κάτω από το υψόμετρο +530 m).**

Όσον αφορά την τεκτονική, η τομή τέμνει από τα Δ.ΝΔ προς τα Β.ΒΑ, τα ρήγματα F13, F7, F8 (Σχ. 6-4), τα οποία βυθίζουν την περιοχή προς τα ανατολικά. Στο Σχ. 6-5 παρουσιάζονται οι θέσεις των επιφανειών ολίσθησης (με βάση τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις και τα κλισίμετρα), όπως επίσης και οι θέσεις κλισιμέτρων, γεωδαιτικών σημείων και γεωτρήσεων αποστράγγισης της περιοχής που βρίσκονται κοντά στην τομή.

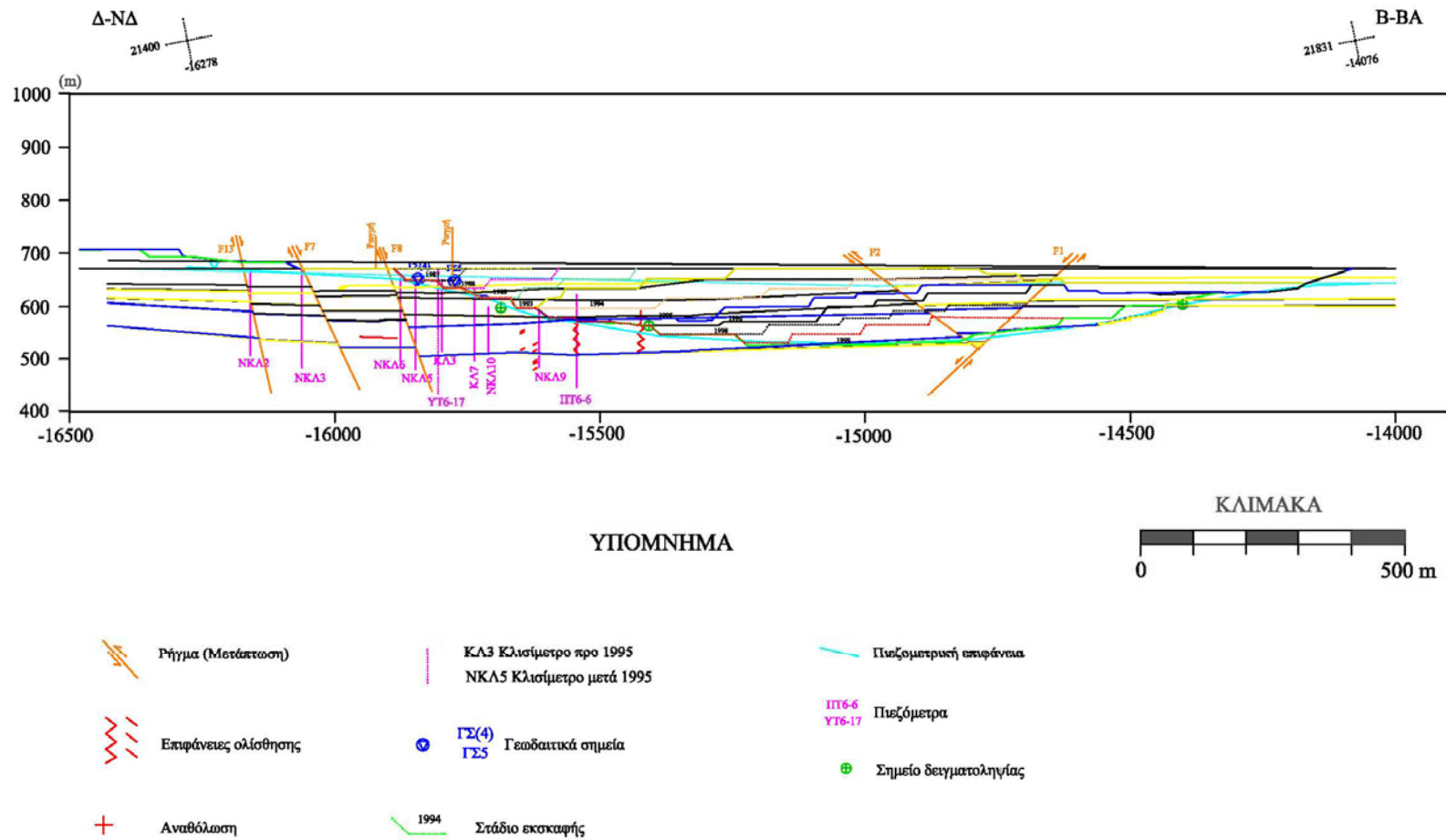
Όσον αναφορά την πιεζομετρία δεν ήταν δυνατόν να αποδοθεί με ακρίβεια λόγω έλλειψης επαρκών στοιχείων. Για το λόγο αυτό, η ζώνη κορεσμού θεωρήθηκε ότι αναπτύσσεται 20 m κάτω από την επιφάνεια του φυσικού εδάφους και διαμορφώνεται ανάλογα με την εκσκαφή. Διέρχεται δηλαδή από τον πόδα της πρώτης και τελευταίας βαθμίδας του πρανούς και εξελίσσεται στη συνέχεια παράλληλα με το δάπεδο της εκσκαφής.

Τέλος, στο Σχ. 6-5 παρουσιάζονται τα στάδια εκσκαφής όπως προέκυψαν με βάση τα τοπογραφικά διαγράμματα ανάπτυξης του Ορυχείου (ΔΕΗ-ΛΚΠΑ, 1998) και οι θέσεις δειγματοληψίας που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό γεωτεχνικών παραμέτρων στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση ψηφιοποιητή και του λογισμικού AutoCAD R14 συνέβαλαν στη βέλτιστη σχεδίαση της τομής, ενώ η ψηφιακή της μορφή προσδίδει ευελιξία στον προσδιορισμό των απαραίτητων μεγεθών για την ανάλυση της κινητικότητας.



Σχ. 6-4 Γεωλογική τομή ΧΧ' εγκάρσια στα δυτικά πρανή του "Τομέα-6". (Η ακριβής θέση της τομής ορίζεται στο Σχ. 5-7).

ΘΕΣΕΙΣ ΟΡΓΑΝΩΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (ΤΟΜΗ Χ Χ')



Σχ. 6-5 Θέσεις οργάνων παρακολούθησης και στοιχεία κινητικής συμπεριφοράς της εκσκαφής (Γεωλογική Τομή XX')

7 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ, ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “ΤΟΜΕΑ-6”

7.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Για τη διερεύνηση των γεωτεχνικών παραμέτρων των μαργαϊκών οριζόντων του “Τομέα-6”, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε τρεις στρωματογραφικούς ορίζοντες (Φωτ. 7-1).



Φωτ. 7-1 Θέσεις δειγματοληψίας

Η **θέση Α** βρίσκεται στο μαργαϊκό ορίζοντα της “Neritina”. Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε 2 m κάτω από το επίπεδο της βαθμίδος στην οποία βρίσκεται η κεφαλή του κλισιμέτρου ΝΚΛ10. Στη θέση αυτή εμφανίζονται τρεις διαστρώσεις από τις οποίες έγινε δειγματοληψία ενός δείγματος από την κάθε μία.

Από την επιφάνεια προς το βάθος, εμφανίζεται υποπράσινη έως τεφροπράσινη, υπο-οριζόντια πολύ στιφρή απολιθωματοφόρα μάργα* πάχους 1,5 m, από την οποία ελήφθη το δείγμα Α1.

* περιγραφή πεδίου

Ακολουθεί μια υποκίτρινη έως υποκάστανη αργιλομάργα πάχους 5 cm και στη συνέχεια εμφανίζεται υποπράσινη μάργα από την οποία ελήφθη το δείγμα A2.

Τέλος συναντάται υποκίτρινη ψαθυρή μάργα που με το βάθος εμφανίζει μικρού πάχους ενστρώσεις ανθρακομιγούς υλικού. Από τον ορίζοντα αυτό ελήφθη το δείγμα A3.

Στη **θέση Β**, μετά το λιγνίτη ακολουθεί μια αργιλούχος μάργα πάχους 60 cm, από την οποία ελήφθη το δείγμα B1 και στη συνέχεια συναντάται μια ασβεστούχος μάργα από την οποία ελήφθη το δείγμα B2. Η αργιλούχος μάργα είναι γκριζοπράσινη, στρωσιγενής και στιφρή. Η ασβεστούχος είναι υποκίτρινη με παρεμβολές μικρού πάχους ανθρακούχων (λιγνιτικών) ενστρώσεων (μεγέθους χιλιοστούμετρων). Είναι απολιθωματοφόρα (vitrification, union), περιέχει φυτικά υπολείμματα και χαρακτηρίζεται σαν “σκληρή” (ανθίσταται στη διεύθυνση πενετρομέτρου τσέπης).

Τέλος, στη **θέση Γ** εμφανίζεται απολιθωματοφόρα (vitrification, union), γκριζοπράσινη και ζωνώδους υφής μάργα, από την οποία ελήφθησαν τα δείγματα Γ1, Γ2 και Γ3. Πιο αναλυτικά, μετά την ανθρακούχο, εύθρυπτη, “σπογγώδη” μάργα, συναντάται μια υποκίτρινη έως κίτρινη κιμωλιώδης μάργα με πάχος 50 cm, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί μια υποπράσινη μάργα που επιδεικνύει πλασιμότητα και έχει υψηλότερο ποσοστό υγρασίας.

Οι συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας (Πίνακας 7-1) καθορίστηκαν μέσω δορυφορικού συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS) ως προς το σύστημα συντεταγμένων Hatt.

Πίνακας 7-1 Συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας

Θέση Δειγματοληψίας	Συντεταγμένες (Hatt)		Απόλυτο Υψόμετρο (m)
	X	Y	
A	-15725,53	21710,57	596,27
B	-15406,90	21564,73	561,72
Γ	-15289,15	22203,66	613,97

Οι θέσεις δειγματοληψίας παρουσιάζονται και στην τομή του Σχήματος 6-4. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θέση (Γ) βρίσκεται σε θέση των ανατολικών πρανών του Ορυχείου.

Για τη λήψη αδιατάρακτων δειγμάτων ήταν απαραίτητη η εκσκαφή φρεάτων με εκσκαφέα ανεστραμμένου κάδου. Το βάθος κάθε φρεάτος καθαριζόταν από τον όγκο του εδάφους που έπρεπε να απομακρυνθεί προκειμένου να αποκαλυφθεί ο μη αποσαθρωμένος - μη διαταραγμένος γεωλογικός σχηματισμός. Το ελάχιστο βάθος ήταν περίπου 1,5 m και έφτανε ένα μέγιστο 2,5 m στην πιο αποσαθρωμένη/ διαταραγμένη θέση δειγματοληψίας.



Φωτ. 7-2 Εκσκαφή και διαμόρφωση αδιατάρακτου δείγματος

Τα δείγματα ελήφθησαν με τη βοήθεια του εκσκαφέα και τη διαμόρφωση εδαφικών τεμαχών, που ελαβεύοντο σταδιακά, αποκτώντας διαστάσεις 0,3x0,3x0,3 m περίπου. Ας σημειωθεί επίσης ότι η ανώτερη και κατώτερη επιφάνεια κάθε τεμάχους σημειωνόταν ευδιάκριτα (Φωτ. 7-2).

Από τις θέσεις (Α) και (Γ), ελήφθησαν από τρία δείγματα, (Α1, Α2, Α3 και Γ1, Γ2, Γ3) ενώ από τη θέση Β δύο (Β1, Β2).

Η επιφάνεια τους καλύφθηκε με πλαστικό χρώμα αρκετού πάχους και συσκευάστηκαν σε πλαστικές σακούλες προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια της φυσικής τους υγρασίας, ενώ για να αποφευχθεί η διατάραξη τους κατά τη μεταφορά τοποθετήθηκαν σε ξύλινα κιβώτια. Τα δείγματα διατηρήθηκαν συσκευασμένα στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας έως ότου άρχισαν οι εργαστηριακές δοκιμές.

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, το δείγμα αποσυσκευαζόταν και με τη χρήση ηλεκτρικής σέγας (Φωτ. 7-3), κοβόταν αδιατάρακτο τμήμα του και διαμορφωνόταν τα απαραίτητα δοκίμια. Στη συνέχεια, η επιφάνεια που προέκυπτε με την κοπή, καλυπτόταν με φύλλο αλουμινίου και κερί, προκειμένου να αποφευχθεί απώλεια υγρασίας από το υπόλοιπο δείγμα.



Φωτ. 7-3 Κοπή τμήματος του αδιατάρακτου τεμάχους για τη διαμόρφωση δοκιμίου

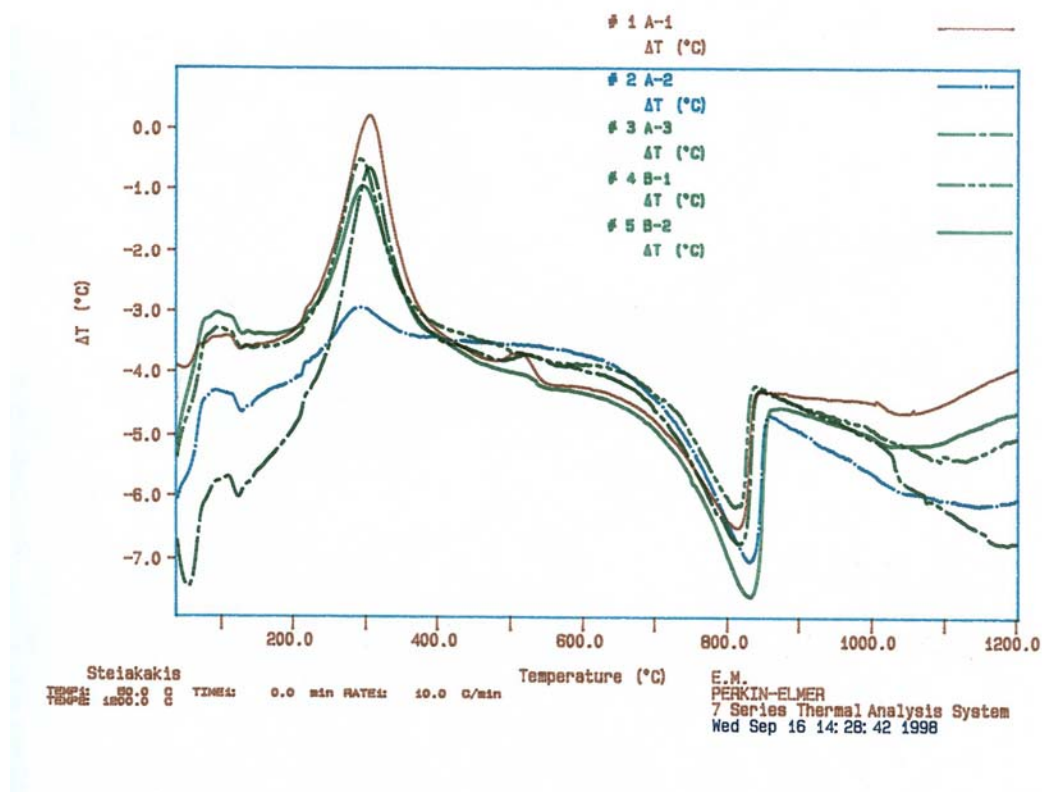
7.2 ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Για τη λιθολογική ταυτοποίηση των δειγμάτων, πραγματοποιήθηκε αριθμός ορυκτολογικών αναλύσεων όπως περιγράφεται παρακάτω. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών χρησιμοποιήθηκαν και για την ερμηνεία – αξιολόγηση των γεωτεχνικών μετρήσεων που ακολούθησαν.

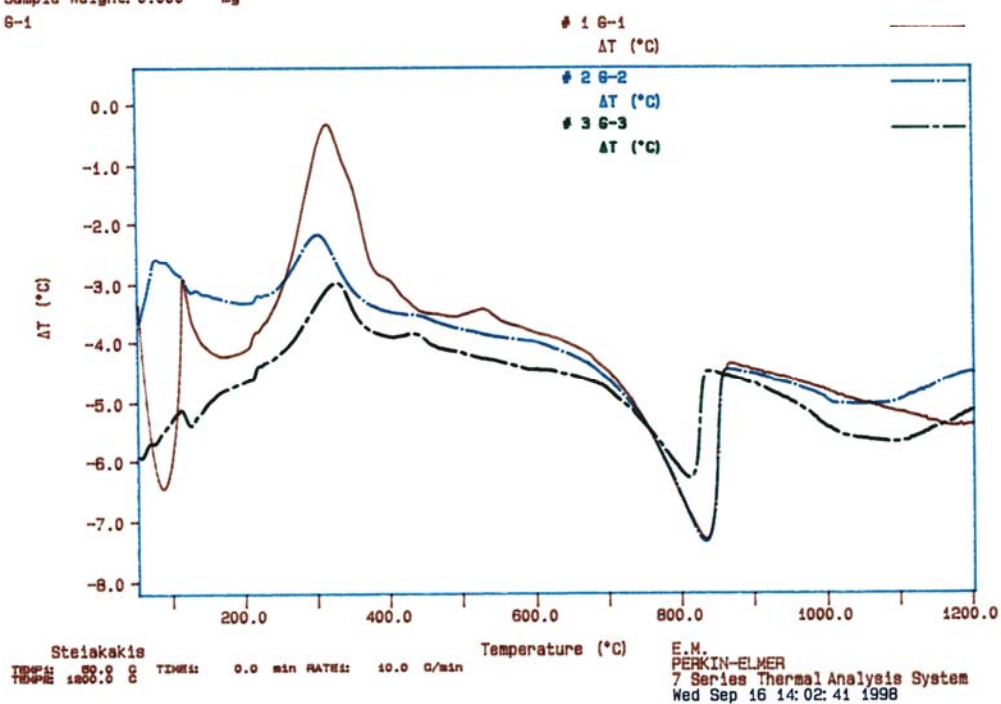
7.2.1 Διαφορική Θερμική Ανάλυση (DTA)

Σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο προσδιορισμός των αργλικών ορυκτολογικών φάσεων που τυχόν περιείχαν τα δείγματα, αλλά και η διερεύνηση του εύρους της θερμοκρασίας που καίγεται το οργανικό κλάσμα των δειγμάτων. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε

- (α) σε φυσικά δείγματα, μετά την αφαίρεση της φυσικής υγρασίας και λειοτρίβησης τους σε τριβείο (ιγδίο) αχάτη και
- (β) στο αδιάλυτο υπόλειμμα των δειγμάτων μετά τη διαλυτοποίηση των ανθρακικών ορυκτών με HCl (10 % κατ' όγκο), προκειμένου να διερευνηθούν τα υπόλοιπα ορυκτολογικά τους συστατικά.



Curve 1: DTA in DTA Mode
 File info: 6-1 Thu Jul 2 01:24:36 1998
 Sample Weight: 0.000 mg
 6-1



Σχ. 7-2 Αποτελέσματα Διαφορικής Θερμικής Ανάλυσης (DTA) σε φυσικά δείγματα

Αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα και από τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων πριν τη διαλυτοποίηση των ανθρακικών (Σχ. 7-2), υποδεικνύουν ένα μέγιστο ενδόθερμης αντίδρασης στους 800°C περίπου που αποδίδεται στα ανθρακικά (Mineralogical Society, 1957). Στους 100°C και στους 550°C εμφανίζονται τα μέγιστα ενδόθερμης αντίδρασης του ιλίτη (σε όσα δείγματα υπάρχει), ενώ στους 250°C - 300°C καίγεται το σύννηθες οργανικό υλικό.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προκύπτει ότι τα δείγματα A1, A2 και A3 είναι παρόμοια ως προς τη σύσταση και την περιεκτικότητα σε ανθρακικά, διαφέρουν όμως ως προς την περιεκτικότητα τους σε οργανικό κλάσμα (ιδιαίτερα το δείγμα A2). Επίσης τα δείγματα B1 και B2 παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα στις θερμικές τους μεταβολές, γεγονός που υποδηλώνει τη σχεδόν ορυκτολογική τους ταύτιση. Τέλος, το δείγμα Γ1 είναι σαφώς πιο πλούσιο σε οργανικό υλικό (υψηλότερη η αιχμή της εξώθερμης στους 300°C περίπου) ενώ τα δείγματα Γ1 και Γ2 περιέχουν ανάλογο ποσοστό ανθρακικών (ταύτιση ενδόθερμων στους 810°C).

Στα δείγματα A2, B1 και Γ2, πραγματοποιήθηκε διαφορική θερμική ανάλυση (DTA) και μετά τη διαλυτοποίηση του ανθρακικού ασβεστίου με ψυχρό υδροχλωρικό οξύ (HCl) 10% κ.ο. το οποίο δεν επηρεάζει τα οργανικά υλικά. Στα αποτελέσματα αυτά εμφανίζονται εξώθερμες αιχμές που συνδέονται με την παρουσία της οργανικής ύλης, αλλά δεν διαπιστώθηκε παρουσία άλλων ορυκτών.

7.2.2 Προσδιορισμός οργανικής ύλης και ανθρακικών με καύση στο φούρνο

Το ποσοστό οργανικής ύλης προσδιορίστηκε με καύση στο φούρνο και τη θερμοβαρυτομετρική μέθοδο. Περίπου 4g από το δείγμα τοποθετήθηκε σε ξηραντήριο και θερμοκρασία 60°C για αφαίρεση της υγρασίας του και στη συνέχεια λειοτριβήθηκε σε ιγδίο αχάτη και ζυγίστηκε με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου.

Ακολούθως θερμάνθηκε σε φούρνο με σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι 550°C και ανάδευση του για ομοιογενή καύση. Εκτιμήθηκε η επί τοις εκατό (%) απώλεια βάρους του, που αποδόθηκε στην παρουσία οργανικής ύλης και αργιλικών ορυκτών (π.χ. ιλίτη).

Η καύση και η εκτίμηση της απώλειας του βάρους συνεχίστηκε και μετά τους 550°C, μέχρι τους 1050°C. Σ' αυτό το εύρος θερμοκρασιών, η απώλεια βάρους αποδόθηκε κατά κύριο λόγο στη διάσπαση των ανθρακικών ορυκτών (και την απόδοση CO₂), αλλά και στην αποβολή του κρυσταλλικού νερού των ένυδρων ορυκτών που τυχόν υπάρχουν στο δείγμα (μοσχοβίτη, ιλίτη κ.λ.π.). Η διαδικασία επαναλήφθηκε σε κάθε δείγμα, για επιβεβαίωση των μετρήσεων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-2.

Πίνακας 7-2 Προσδιορισμός ποσοστού οργανικής ύλης και ανθρακικών με καύση στο φούρνο

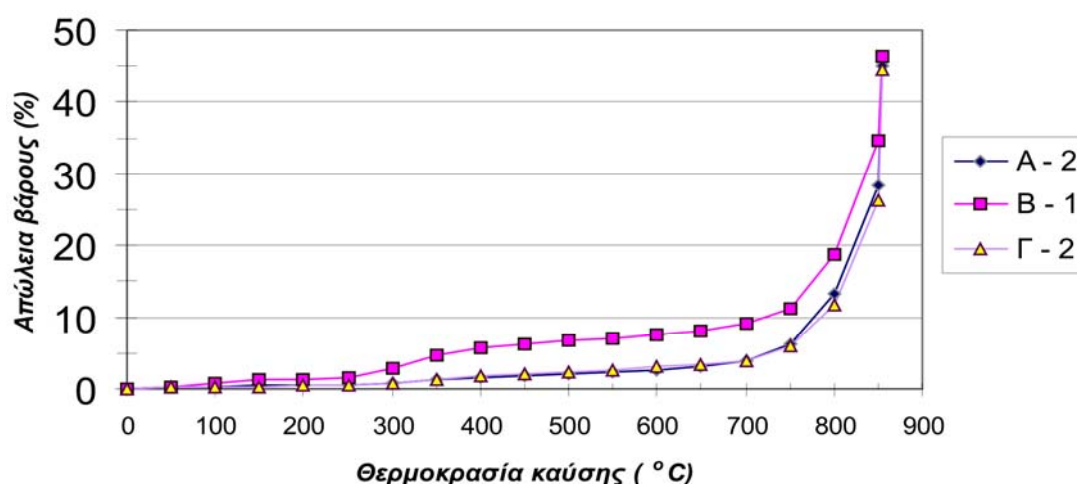
Δείγμα	Ποσοστό οργανικής ύλης (%) με βάση την απώλεια βάρους από 250 ° έως 550°C	Ποσοστό ανθρακικών (%) με βάση την απώλεια βάρους από 550 ° έως 1050°C
A2	3	96,22
B1	8	91,58
B2	5	95,40
Γ2	3	96,54

7.2.3 Προσδιορισμός ανθρακικών και οργανικής ύλης με την θερμοβαρυτομετρική μέθοδο TGA

Λεπτομερέστερη διερεύνηση της απώλειας βάρους του δείγματος με την αύξηση της θερμοκρασίας, πραγματοποιήθηκε με το θερμοβαρυτομετρικό αναλυτή TGA - 6 του Εργαστηρίου Εξευγενισμού και Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η συσκευή καταγράφει αυτόματα την απώλεια βάρους με αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 855°C, με γραμμικό ρυθμό ανόδου της θερμοκρασίας 10°C/min και ροή αέρα 30 ml/min.

Η θερμοβαρυτομετρική ανάλυση (TGA) πραγματοποιήθηκε σε φυσικά δείγματα από τα οποία είχε αφαιρεθεί η υγρασία και είχαν λειοτριβηθεί σε ιγδίο αχάτη.

Τα αποτελέσματα (καμπύλες απώλειας βάρους με αύξηση της θερμοκρασίας) για τα δείγματα A2, B1, Γ2 παρουσιάζονται στο Σχ. 7-3.

**Σχ. 7-3 Καμπύλες θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης TGA για τα δείγματα A2, B1, Γ2**

Σαν οργανικό ποσοστό θεωρήθηκε η απώλεια βάρους στο εύρος των 250-550°C (όπως και κατά την καύση στο φούρνο), ενώ η απώλεια βάρους που καταγράφηκε μεταξύ των 550° και 855°C αποδόθηκε στη διάσπαση ανθρακικών. Το περιεχόμενο ποσοστό των οργανικών και ανθρακικών συστατικών που εκτιμήθηκε, παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-3.

Πίνακας 7-3 Ποσοστό οργανικών και ανθρακικών συστατικών στα δείγματα A2, B1, Γ2 με βάση τα αποτελέσματα θερμοβαρυτομετρικής ανάλυσης TGA

Δείγμα	Οργανικά (%) με βάση την απώλεια βάρους από 250 - 550°C	Ανθρακικά ορυκτά (%) με βάση την απώλεια βάρους από 550 - 855°C
A2	1,8	97,11
B1	5,6	88,93
Γ2	2,2	95,11

7.2.4 Ορυκτολογικές αναλύσεις με περιθλασιμετρία XRD

Λειοτριβημένο δείγμα 25g, ξηράνθηκε στους 60°C για 48 h και διαλυτοποιήθηκε με ψυχρό[†] υδροχλωρικό οξύ (HCl) 10% κ.ο. με στόχο την απομάκρυνση των ανθρακικών ορυκτών. Τα αποτελέσματα της διαλυτοποίησης για τα δείγματα A2, B1 και Γ2 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-4.

Πίνακας 7-4 Αποτελέσματα διαλυτοποίησης των ανθρακικών ορυκτών

Δείγμα	Αρχική ποσότητα δείγματος (g)	Τελική ποσότητα δείγματος (g)	Ποσοστό ανθρακικών ορυκτών (κυρίως $CaCO_3$) (%)	Αδιάλυτο ποσοστό δείγματος (%)
A2	25,3155	0,7492	97,04	2,96
B1	26,8931	2,2441	91,66	8,34
Γ2	25,8739	1,1215	95,67	4,33

[†] δεν επηρεάζει τα οργανικά

Η διαλυτοποίηση αποτέλεσε ένα πρώιμο στάδιο της ορυκτολογικής διερεύνησης με το περιθλασίμετρο ακτίνων X SIEMENS D500 του Εργαστηρίου Γενικής και Τεχνικής Ορυκτολογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης, προκειμένου να αφαιρεθεί η αιχμή του CaCO_3 από τα ακτινοδιαγράμματα (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Ακτινοδιαγράμματα) και να μην επικαλύπτει τις αιχμές άλλων ορυκτών που τυχόν υπάρχουν στα δείγματα.

Η περιθλασιμετρία που ακολούθησε στο αδιάλυτο υπόλειμμα, έδειξε ότι στα δείγματα ανιχνεύονται εκτός από τα ανθρακικά και τα ορυκτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-5. Η σειρά με την οποία αναφέρονται είναι ανάλογη της έντασης στις αιχμές του ακτινοδιαγράμματος, δηλαδή της ανάκλασης που εμφανίζουν και κατά συνέπεια της ποσοτικής τους αναλογίας στο δείγμα.

Πίνακας 7-5 Ορυκτολογική σύσταση με βάση τις αναλύσεις με XRD

Δείγμα	Ορυκτολογική σύσταση πλέον των ανθρακικών (κυρίως CaCO_3) ορυκτών
A2	Σιδηροπυρίτης, ιλίτης, χαλαζίας, μοντμοριλονίτης
B1	Σιδηροπυρίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, αντιγορίτης
Γ2	Χαλαζίας, πυρίτης, μοσχοβίτης, αλβίτης, αντιγορίτης

Επίσης, ημιποσοτικός προσδιορισμός της ορυκτολογικής σύστασης των δειγμάτων A1, B2, Γ2 και Γ3, με τη μέθοδο της περιθλασιμετρίας, πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο του Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Για το σκοπό αυτό, προετοιμάστηκαν πρότυπα δείγματα συγκεκριμένων αναλογιών (κατά βάρος) που αποτελούνταν από καθαρά ορυκτά ασβεστίτη (96%), δολομίτη (1%), μαρμαρυγία (2%) και χλωρίτη (1%). Ο υπολογισμός των αναλογιών αυτών προέκυψε από μια αρχική ποιοτική αξιολόγηση περιθλασιογραμμάτων και την εκτίμηση του ποσοστού των ορυκτολογικών φάσεων με βάση τις συγκεκριμένες ανακλάσεις, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το συντελεστή απορρόφησης μάζας (CuK_α) των ορυκτολογικών φάσεων.

Στον Πίνακα 7-6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ορυκτολογικής κατά βάρος (%) σύστασης των δειγμάτων με βάση την περιθλασιμετρία στα δείγματα που εξετάστηκαν (αρχικό δείγμα).

Πίνακας 7-6 Ημιποσοτική ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) των δειγμάτων με τη μέθοδο XRD

Δείγμα	Ποσοστιαία (%) κατά βάρος ορυκτολογική σύσταση (αρχικό δείγμα)					
	<i>Αραγωνίτης</i>	<i>Ασβεστίτης</i>	<i>Χαλαζίας</i>	<i>Μαρμαρυγίας</i>	<i>Χλωρίτης</i>	<i>Αργιλικά ορυκτά</i>
A1	-	97	1	-	2	-
B2	-	99	1	-	-	-
Γ2	-	96	1	2	1	-
Γ3	53	13	5	13	14	2

Η ημιποσοτική ορυκτολογική σύσταση του αδιάλυτου υπολείμματος, που προέκυψε μετά την κατεργασία κάθε δείγματος με HCl, παρουσιάζεται στον Πίνακα 7-7. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν ακριβέστερη ανάλυση της ορυκτολογικής σύστασης εξαιρουμένου του ασβεστίτη και αραγωνίτη. Ας σημειωθεί ότι το οργανικό υλικό θεωρήθηκε άμορφο και δεν επηρεάζει τις αναλύσεις XRD.

Πίνακας 7-7 Ημιποσοτική ορυκτολογική σύσταση (% κ.β.) του αδιάλυτου υπολείμματος των δειγμάτων, με τη μέθοδο XRD

Δείγμα	Ποσοστιαία (%) κατά βάρος ορυκτολογική σύσταση του αδιάλυτου υπολείμματος του δείγματος							
	<i>Χαλαζίας</i>	<i>Μαρμαρυγίας</i>	<i>Χλωρίτης</i>	<i>Σμεκτίτης</i>	<i>Σιδηροπυρίτης</i>	<i>Πλαγιόκλαστο (αλβίτης)</i>	<i>Αμφίβολος</i>	<i>Αδιάλυτο υπόλειμμα (%)</i>
A1	47	-	53	-	-	-	-	4
B2	40	6	37	-	17	-	-	2
Γ2	23	21	32	15	-	9	-	4
Γ3	25	41	26	-	-	5	3	36

7.2.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και πετρογραφική κατάταξη των δειγμάτων

Τα αποτελέσματα προσδιορισμού του CaCO_3 και του εκτιμώμενου οργανικού ποσοστού των δειγμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7-8. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το ποσοστό του CaCO_3 μπορεί να είναι εν μέρει πλασματικό, δεδομένου ότι εκτιμήθηκε με βάση τον προσδιορισμό του CO_2 το οποίο πιθανόν να συνδέεται και με μαγνήσιο ή και άλλα στοιχεία.

Στα αποτελέσματα του Πίνακα 7-8 περιλαμβάνονται και οι εκτιμήσεις του περιεχόμενου οργανικού ποσοστού στα δείγματα Α1 (0,7%) και Γ3 (1,8%) που προσδιορίσθηκε με τη μέθοδο H_2O_2 στο Εργαστήριο του ΑΠΘ.

Πίνακας 7-8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσδιορισμού των ανθρακικών (κυρίως CaCO_3) από διαφορετικές μεθόδους

Δείγμα	Περιεκτικότητα των δειγμάτων σε CaCO_3 (%) με διάφορες μεθόδους προσδιορισμού			Οργανικό ποσοστό (%)
	Διαλυτοποίηση	Καύση	TGA	
A1	-	-	-	0,7 *
A2	97,04	96,22	97,11	3
B1	91,66	91,58	88,93	8
B2	-	95,4	-	5
Γ 2	95,67	96,54	95,11	3
Γ3	-	-	-	1,8 *

* προσδιορισμός με τη μέθοδο H_2O_2

Με βάση την περιεκτικότητα των δειγμάτων σε CaCO_3 , οι σχηματισμοί που εξετάσθηκαν κατατάσσονται στην κατηγορία του ασβεστολίθου ή του μαργαϊκού ασβεστολίθου (Bell, 1992 από Barth, 1939).

Δεδομένης όμως της άποψης του Pettijohn (1975) ότι ο όρος μάργα χρησιμοποιείται για όλες τις εύθρυπτες ανθρακικές γαίες που έχουν σχηματισθεί σαν λιμναία ιζήματα, αλλά και με βάση τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά που επιδεικνύουν τα δείγματα, ο βέλτιστος περιγραφικός όρος που μπορεί να τους αποδοθεί είναι η “κιμωλιώδης (ή ασβεστούχος) μάργα”.

7.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

7.3.1 Κοκκομετρία

Για τη διερεύνηση της κοκκομετρικής διαβάθμισης των δειγμάτων A2, B1, B2, Γ1, Γ2 και Γ3, πραγματοποιήθηκαν πλήρεις κοκκομετρικές αναλύσεις (με χρήση κοσκίνων και υδρομέτρου).

7.3.1.1 Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα

Δεδομένης της λεπτόκοκκης φύσης των δειγμάτων, θεωρήθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί υγρή κοσκίνιση. Αρχικά το δείγμα εμποτιζόταν με απιονισμένο νερό προκειμένου να καταστεί δυνατή η διάσπαση των συσσωματωμάτων και η αποδέσμευση των λεπτότερων κόκκων από τα πιο αδρομερή κλάσματα. Το υγρό δείγμα διερχόταν από τα κόσκινα N° 60 (μέγεθος οπής 0,25 μm) για τη συγκράτηση των χονδρότερων κόκκων και το N° 200 (μέγεθος οπής 0,075 μm) όπου και ξεπλενόταν μέχρι διαύγειας του διερχομένου νερού.

Η ποσότητα του δείγματος που παρέμενε στους βρόγχους των προαναφερόμενων κοσκίνων, χρησιμοποιήθηκε για περαιτέρω κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, ενώ το δείγμα που διερχόταν από το κόσκινο N° 200, ξηραινόταν στον αέρα. Μετά την ξήρανση του, ζυγιζόταν και κλάσμα του χρησιμοποιείτο για την κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο του υδρομέτρου (βλέπε επόμενο υποκεφάλαιο).

Η κοκκομετρική ανάλυση με τα κόσκινα ολοκληρωνόταν με τη διαβάθμιση του υλικού που είχε συγκρατηθεί στο N° 200 (μέγεθος κόκκων μεγαλύτερο από 0,075 mm). Μετά τη διέλευση του από μια σειρά κοσκίνων ξεπλένοντας το με απιονισμένο νερό, προσδιορίσθηκε η ξηρή ποσότητα που εσυγκρατείτο σε κάθε κόσκινο.

Η υποδεικνυόμενη κατά ASTM μηχανική κοσκίνιση (εν ξηρώ), δεν υιοθετήθηκε γιατί δεν συνέβαλε στην πλήρη αποδέσμευση των λεπτών κόκκων από τα χονδρότερα κλάσματα.

7.3.1.2 Κοκκομετρική ανάλυση με την υδρομετρική μέθοδο

Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης του κλάσματος που διερχόταν από το κόσκινο N° 200 (μέγεθος οπής 0,075 μm), εφαρμόσθηκε η υδρομετρική μέθοδος (καθίζηση). Μια ποσότητα δείγματος ίση περίπου με 40g, ετοποθετείτο σε δοχείο 250 ml και προστίθετο παράγοντας διασποράς 125 ml (νατριούχο εξαμεταφωσφορικό διάλυμα, 5% κατά βάρος).

Μετά τη διαδικασία της ανάμιξης, της τοποθέτησης του διαλύματος σε ογκομετρικό κύλινδρο 1000 ml και της προσθήκης απιονισμένου νερού μέχρι πλήρωσης του κυλίνδρου, το διάλυμα ετοποθετείτο σε υδατόλουτρο και αποκτούσε ομοιόμορφη θερμοκρασία 20°C. Στη συνέχεια ο κύλινδρος ανακινείται για ανατάραξη του διαλύματος, ετοποθετείτο ξανά στο υδατόλουτρο και με την

έναρξη της καθίζησης καταγραφόταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα η πυκνότητα του, βάσει της οποίας υπολογιζόταν το βάρος των εδαφικών κόκκων που βρισκόταν εν αιωρήσει. Για την εκτίμηση της πυκνότητας, χρησιμοποιήθηκε το υδρόμετρο τύπου ASTM 152H και για τον υπολογισμό του μεγέθους των κόκκων, ο νόμος του Stokes.

7.3.1.3 Αποτελέσματα κοκκομετρικής διαβάθμισης

Τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων παρουσιάζονται στις κοκκομετρικές καμπύλες διαβάθμισης του Σχ. 7-4 και συγκεντρωτικά αναφέρονται στον Πίνακα 7-9.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προκύπτει ότι είναι σαφής η επικράτηση της ιλυώδους φάσης (60-70%) σε όλα τα δείγματα εκτός από το B1 και Γ3 όπου επικρατεί η άργιλος έναντι της ιλύος. Όσον αφορά την άμμο, κυμαίνεται σε πολύ μικρά ποσοστά και μόνο στα δείγματα A2 και B2 είναι της τάξης του 10-15%.

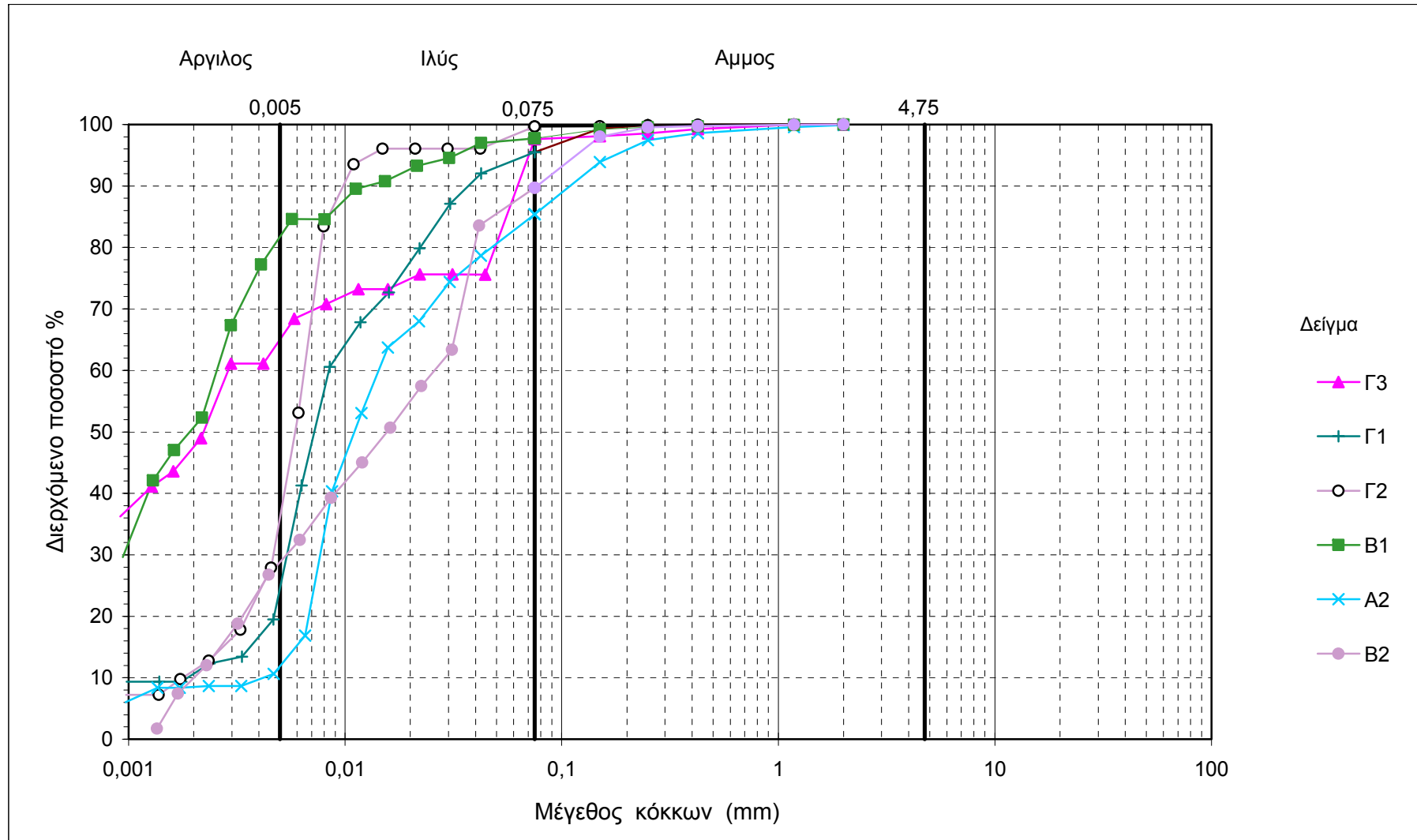
Πίνακας 7-9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

Δείγμα	Άργιλος (%)	Ιλύς (%)	Άμμος (%)	Λεπτομερές <2 μm κατά βάρος (%)
A2	12	73	15	8,4
B1	83	15	2	51,2
B2	30	60	10	10,0
Γ1	25	70	5	11,0
Γ2	35	65	0	11,5
Γ3	65	33	2	47,5

Η γενική μορφή και η κλίση της κάθε καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης (Σχ. 7-4) εκφράσθηκε με το συντελεστή ομοιομορφίας C_u , ο οποίος ορίζεται από τη σχέση :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [7.1]$$

όπου : d_{60} η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων
 d_{10} η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων



Σχ. 7-4 Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης

Από τους συντελεστές ομοιομορφίας (Πίνακας 7-10), προκύπτει ότι όλα τα δείγματα εκτός από το B2, χαρακτηρίζονται ομοιόμορφα.

Πίνακας 7-10 Συντελεστές ομοιομορφίας και χαρακτηρισμός των δειγμάτων

Δείγμα	Συντελεστής ομοιομορφίας (Cu)	Χαρακτηρισμός
A2	3,8	Ομοιόμορφο
B1	2,5	Ομοιόμορφο
B2	12,5	Ανομοιόμορφο
Γ1	4,7	Ομοιόμορφο
Γ2	3,6	Ομοιόμορφο
Γ3	3,0	Ομοιόμορφο

Με βάση τα παραπάνω, είναι σαφής η διαστρωμάτωση των ιζημάτων της περιοχής, παρότι η επιλεκτική (ασυνεχής) δειγματοληψία δεν μας επιτρέπει την ανάλυση όλων των λιθοφασικών εναλλαγών.

Οι ορίζοντες που εντοπίστηκαν στις θέσεις A2 και B2 περιέχουν ποσοστό άμμου (λεπτόκοκκης - μεσόκοκκης) που ανέρχεται σε 15% και 10% αντίστοιχα, ενώ τα δείγματα από τις θέσεις B1 και Γ3 είναι πιο λεπτομερή, με το αργιλικό ποσοστό να φθάνει τα 83% και 65% αντίστοιχα. (Πίνακας 7-9).

7.3.2 Όρια Atterberg

Για τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Casagrande. Τα δείγματα προερχόταν από τα τρίμματα διαμόρφωσης δοκιμίων για τις δοκιμές αντοχής και συμπίεστότητας.

Δείγμα βάρους 150 g περίπου που διερχόταν από το κόσκινο N° 40 (425 μm), ετοποθετείτο σε κάψα πορσελάνης και προστίθετο ποσότητα απιονισμένου νερού (περίπου 15 ml). Μετά την ανάμιξη με σπάτουλα για περίπου 10 min και τη διαμόρφωση μιας ομοιογενούς, χωρίς συσσωματώματα μάζας, το δείγμα ετοποθετείτο σε υγραντήρα περίπου 24 h, για πλήρη, ομοιόμορφη διαβροχή. Η δοκιμή που ακολουθούσε, πραγματοποιείτο σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318 και επαναλαμβάνετο σε δοκίμια με αυξημένη κάθε φορά υγρασία.

Οι μετρήσεις για κάθε δείγμα ολοκληρωνόταν με τον προσδιορισμό τριών τουλάχιστον τιμών υγρασίας, για τις οποίες απαιτούντο 5 έως 40 πτώσεις του κυπέλλου της συσκευής Casagrande προκειμένου να κλείσει η χαραγμένη αύλακα.

Για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας, η διαδικασία προετοιμασίας του δείγματος ήταν ανάλογη εκείνης του προσδιορισμού των ορίων υδαρότητας και οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D-4318.

Δοκιμές ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα δείγματα και από τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας. Η υγρασία προσδιοριζόταν σε θερμοκρασία 60°C μέχρι σταθερού βάρους (για αποφυγή καύσης τυχόν οργανικού υλικού) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 7-11.

Πίνακας 7-11 Όρια υδαρότητας, πλαστικότητας και δείκτης πλαστικότητας των δειγμάτων

Δείγμα	Όριο υδαρότητας LL (%)	Όριο πλαστικότητας PL (%)	Δείκτης πλαστικότητας PI (%)
A1	73,49	49,31	24,19
A2	43,68	26,41	17,26
A3	70,15	56,17	13,98
B1	85,81	69,71	16,10
B2	59,32	45,92	13,40
Γ1	60,71	52,90	7,82
Γ2	55,60	31,72	23,88
Γ3	62,47	44,18	18,29

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προκύπτει ότι οι τιμές του ορίου υδαρότητας κυμαίνονται από 44 ως 86%. Το δείγμα B1 που έχει και το υψηλότερο ποσοστό λεπτομερούς υλικού, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη τιμή ορίου υδαρότητας. Το όριο πλαστικότητας ποικίλλει από 26 έως 70% και φαίνεται να επηρεάζεται από το ποσοστό του οργανικού υλικού (το οποίο δεν επιδεικνύει πλαστικότητα). Ο δείκτης πλαστικότητας κυμαίνεται από 8 έως 24. Οι μεγαλύτερες τιμές (>20) προέκυψαν για τα δείγματα A1 και Γ2 υποδεικνύοντας ότι στα υπόλοιπα (με PI <20%) θα πρέπει να αναμένεται παραμένουσα γωνία τριβής που δεν θα αποκλίνει σημαντικά από τη μέγιστη (Chandler, 1984). Επίσης, με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα δεν θα πρέπει να αναμένεται γραμμική διαφοροποίηση της συμπίεστότητας του γεωυλικού με το βάθος, αλλά κλιμακωτή, με βάση τη λιθολογία των διαφόρων οριζόντων.

7.3.3 Εδαφομηχανική Ταξινόμηση

Με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση και τα όρια Atterberg, κάθε δείγμα περιγράφηκε και ταξινομήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D-2478.

Σύμφωνα με τη θέση προβολής των δειγμάτων στο διάγραμμα πλαστικότητας (Σχ. 7-5), τα περισσότερα κατατάσσονται στην κατηγορία της αργιλώδους ή οργανικής ιλύος υψηλής πλαστικότητας, εκτός από το δείγμα Α2 που χαρακτηρίζεται σαν εδαφικό υλικό χαμηλής πλαστικότητας.

7.3.4 Προσδιορισμός ειδικού βάρους των κόκκων

Δεδομένου ότι το ειδικό βάρος των κόκκων είναι απαραίτητο για την επεξεργασία των μετρήσεων στις δοκιμές στερεοποίησης και αντοχής, έγινε προσπάθεια προσδιορισμού της τιμής του για όλα τα δείγματα. Το μέγεθος αυτό προκύπτει από το λόγο του βάρους ορισμένου όγκου εδαφικών κόκκων (W_s) προς το βάρος (W_w) ίσου όγκου απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας 4°C, σύμφωνα με την εξίσωση

$$G_s = \frac{W_s/V}{W_w/V} = \frac{W_s}{W_w} \quad [7.2]$$

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός του όγκου των εδαφικών κόκκων στηρίζεται στην αρχή του Αρχιμήδη και συνήθως πραγματοποιείται με χρήση απιονισμένου νερού. Εντούτοις, λόγω πιθανής ύπαρξης αργιλικών ορυκτών (τα οποία έχουν την τάση να διογκώνονται και να αλλοιώνουν το αποτέλεσμα), αλλά και για το λόγο ότι η χρήση του απιονισμένου νερού απαιτεί απαέρωση (διαδικασία επίπονη και με υποκειμενικά αποτελέσματα), χρησιμοποιήθηκε αντί νερού, κηροζίνη. Η σχετική πυκνότητα της κηροζίνης σε διάφορες θερμοκρασίες προσδιορίστηκε με χρήση ληκύθου και υδατόλουτρου (για τον έλεγχο της θερμοκρασίας) και με βάση τα αποτελέσματα, προέκυψε μια εξίσωση βαθμονόμησης.

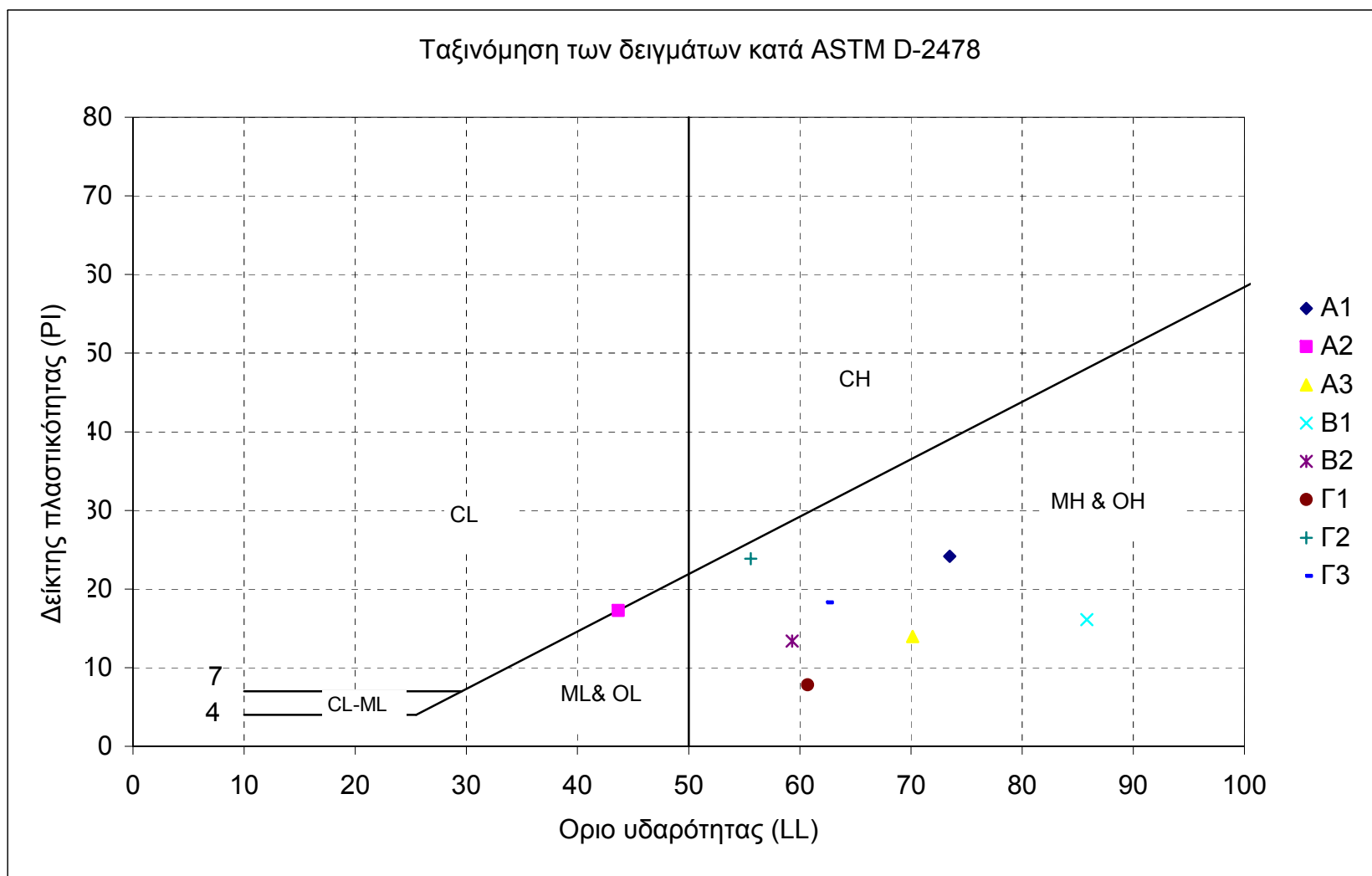
Ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους των εδαφικών κόκκων πραγματοποιήθηκε σε ογκομετρική φιάλη 500 ml χρησιμοποιώντας ξηρό δείγμα 80 g, στο οποίο επιτρεπόταν η διαβροχή του με κηροζίνη για 24 h πριν τη δοκιμή. Για την αξιοπιστία των μετρήσεων, η δοκιμή επαναλαμβανόταν τουλάχιστο δύο φορές για κάθε δείγμα και οι τιμές που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-12.

Πίνακας 7-12 Ειδικό βάρος των εδαφικών κόκκων

Δείγμα	A1	A2	A3	B1	B2	Γ1	Γ2	Γ3
Θερμοκρασία δοκιμής (t°C)	21,8	21,3	25,7	20,1	23,2	23,3	20,5	20,7
Πυκνότητα κηροζίνης (ρ_k στους t°C)	0,7969	0,7969	0,7969	0,7969	0,7969	0,7969	0,7969	0,7969
Πυκνότητα κηροζίνης (ρ_k στους 20°C)	0,7942	0,796	0,7948	0,7963	0,7954	0,7954	0,7966	0,7961
Συντελεστής διόρθωσης K ($\rho_k \text{ t } ^\circ\text{C} / \rho_k \text{ 20}^\circ\text{C}$)	0,9966	0,9988	0,9973	0,9992	0,9982	0,9981	0,9996	0,9990
Βάρος φιάλης W ₁ (g)	161,81	157,8	157,81	161,82	159,92	161,82	154,33	159,93
Βάρος (φιάλης & ξηρού εδάφους) W ₂ (g)	245,61	238,07	237,12	242,15	240,25	241,58	234,87	246,62
Βάρος (φιάλης, ξηρ.εδάφους & κηροζ.) W ₃ (g)	615,9	611,52	609,67	615,13	613,28	614,47	608,25	617,97
Βάρος φιάλης με κηροζίνη W ₄ (g)	558,92	555,78	555,20	559,96	557,64	559,53	552,61	557,99
Ειδικό βάρος κόκκων στους 20°C G _s	2,47	2,60	2,53	2,54	2,58	2,55	2,58	2,58

Οι τιμές αυτές είναι χαμηλές αν συγκριθούν με τα ειδικά βάρη των κυριοτέρων ορυκτών που συμμετέχουν στη σύσταση των μαργών (ασβεστίτης 2,72 - χαλαζίας 2,65 - χλωρίτης 2,6 έως 2,9).

Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί, αφενός μεν στη συσσωμάτωση των λεπτομερών (αργιλικών) σωματιδίων με αποτέλεσμα οι κόκκοι ιλύος που προκύπτουν να μην είναι συμπαγείς και αφετέρου στην παρουσία οργανικής ύλης.

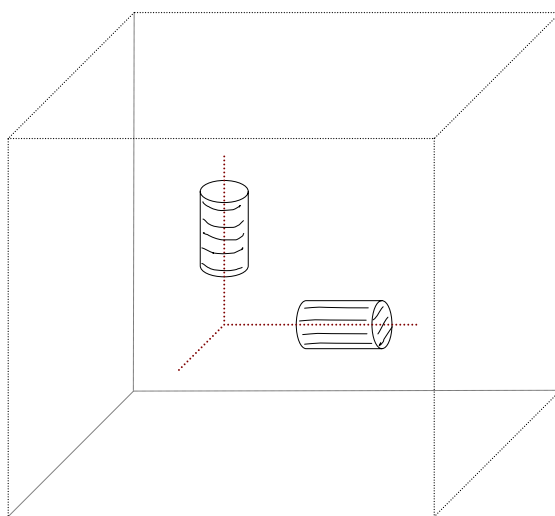


Σχ. 7-5 Ταξινόμηση των δειγμάτων

8 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

8.1 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Για τη διερεύνηση της αντοχής, της ανισοτροπίας αλλά και της δυστροπίας των μαργαϊκών σχηματισμών, πέντε ζεύγη δοκιμών από τις θέσεις Α2, Β1, Β2, Γ1 και Γ3 υποβλήθηκαν σε ανεμπόδιστη θλίψη. Τα δοκίμια ήταν κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο 50 mm και ύψος 125 mm (ή 38 mm και 80 mm αντίστοιχα) και είχαν μεταξύ τους εγκάρσιο προσανατολισμό. Το ένα δοκίμιο ήταν προσανατολισμένο κάθετα και το άλλο παράλληλα στη στρώση (Σχ. 8-1).

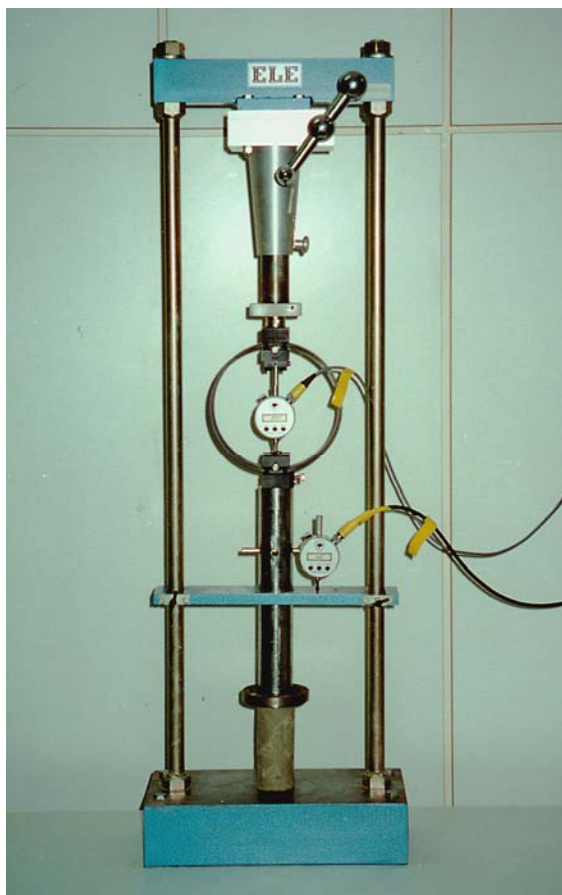


Σχ. 8-1 Διαμόρφωση δοκιμών παράλληλα και εγκάρσια στη στρώση

Για τη διαμόρφωση των δοκιμών, κοβόταν από το αρχικό δείγμα ένα τέμαχος κατάλληλων διαστάσεων. Με οδηγό το ίχνος ενός κύκλου που εχαράσσετο στην κορυφαία επιφάνεια του, το δοκίμιο ελαξεύετο σταδιακά με χρήση λεπίδας. Οι επιφάνειες έδρασης διαμορφωνόταν προσεκτικά προκειμένου να γίνουν κατά το δυνατόν επίπεδες, παράλληλες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου. Η επιδίωξη να διαμορφωθούν δοκίμια μεγάλων διαστάσεων (διαμέτρου 50 mm και ύψους 125 mm) δεν ήταν πάντα εφικτή. Στις περιπτώσεις που το δοκίμιο κατά τη διαμόρφωση του παρουσίαζε επιφάνειες αδυναμίας, διαμορφωνόταν δοκίμιο μικρότερων διαστάσεων για εξοικονόμηση χρόνου και δείγματος.

Επίσης η φυσική υγρασία του δοκιμίου προσδιοριζόταν πριν και μετά τη δοκιμή, με ξήρανση δείγματος μέχρι σταθερής μάζας σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη των 60°C, προκειμένου να αποφευχθεί καύση οργανικού υλικού που τυχόν περιείχε το δοκίμιο.

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας (Φωτ. 8-1). Για την εύκολη και αξιόπιστη λήψη των μετρήσεων της εφαρμοζόμενης τάσης και της αντίστοιχης παραμόρφωσης του δοκιμίου, εγκαταστάθηκαν ψηφιακά μηκυνσιόμετρα και η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μέσω του συστήματος MPX32 Datalogger.



Φωτ. 8-1 Εργαστηριακή συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης

Το δοκίμιο ετοποθετείτο στη συσκευή έτσι ώστε ο άξονας του να διέρχεται από το κέντρο της πλάκας φόρτισης. Ακολούθως η πλάκα ρυθμιζόταν ανάλογα, έτσι ώστε να εφάπτεται στην ανώτερη επιφάνεια του δοκιμίου και μηδενιζόταν οι ενδείξεις των μηκυνσιόμετρων. Στη συνέχεια εφαρμοζόταν θλιπτικό φορτίο με σταθερό ρυθμό, που προκαλούσε αξονική παραμόρφωση 1,5 ή 2 mm / min ανάλογα με τη διάμετρο (38 ή 50 mm) του δοκιμίου. Οι μετρήσεις του φορτίου καταγραφόταν ανά 0,1 mm της αξονικής παραμόρφωσης και στις περιπτώσεις που η αστοχία που εκδηλωνόταν ήταν τύπου διάτμησης, γινόταν εκτίμηση της γωνίας της επιφάνειας διάτμησης σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Στη συνέχεια, υπολογιζόταν η ανηγμένη παραμόρφωση που επεδείκνυε το δοκίμιο με τη φόρτιση, όπως επίσης και η αντίστοιχη διορθωμένη επιφάνεια του δοκιμίου λόγω μεταβολής του σχήματος του.

Το διορθωμένο εμβαδόν (A) υπολογιζόταν σε συνάρτηση με τη μεταβολή του ύψους του δοκιμίου θεωρώντας ότι ο όγκος του παραμένει σταθερός, με βάση την εξίσωση:

$$A = \frac{A_0}{1 - \frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad [8.1]$$

όπου A_0 το αρχικό εμβαδόν της βάσης του δοκιμίου

L_0 το αρχικό ύψος του και

ΔL η μεταβολή του ύψους του στο αναφερόμενο στάδιο φόρτισης.

Με βάση το διορθωμένο εμβαδόν (A), υπολογιζόταν η αξονική τάση (q) που επιβάλλονταν στο δοκίμιο λόγω της φόρτισης του με φορτίο (P), με βάση τη σχέση

$$q = \frac{P}{A} = \frac{P(1 - \varepsilon)}{A_0} \quad [8.2]$$

Η αντοχή (q_{\max}) που παρουσίασε το κάθε δοκίμιο, προέκυψε από την καμπύλη τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης (Βλέπε Σχ. 8-2 για το δείγμα B1 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Ανεμπόδιστης Θλίψης, για τα υπόλοιπα δείγματα). Η τιμή της αντοχής ισούται με τη μέγιστη αξονική τάση που επιβάλλεται κατά τη δοκιμή και σε κάθε περίπτωση αντιστοιχεί σε αξονική ανηγμένη παραμόρφωση μικρότερη από 15%.

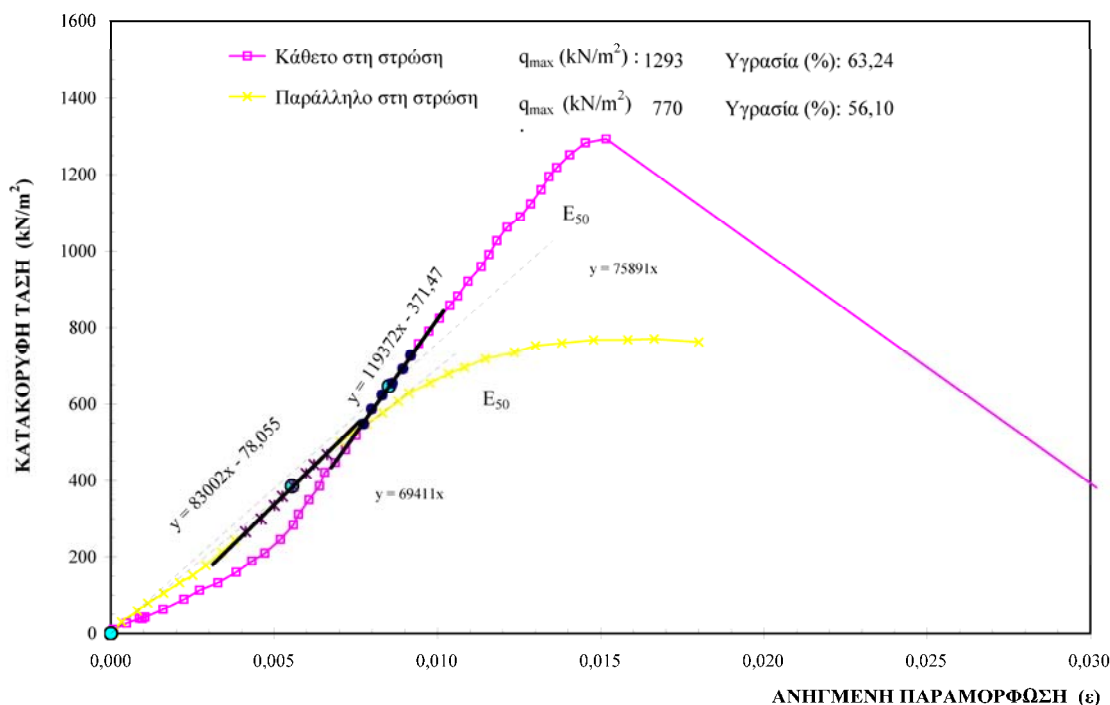
Από την ίδια καμπύλη (τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης) προέκυψαν και πληροφορίες για το μέτρο δυστροπίας του γεωλογικού υλικού με βάση την κλίση της καμπύλης (Σχ. 8-2).

Στον Πίνακα 8-1 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης στα δείγματα A2, B1, B2, Γ1 και Γ3. Όπως προκύπτει, τις μεγαλύτερες τιμές αντοχής παρουσιάζουν τα δείγματα με υψηλό ποσοστό ανθρακικού ασβεστίου το οποίο υποδηλώνει και κάποιο βαθμό διαγένεσης. Η σειρά κατάταξης κατά φθίνουσα αντοχή είναι B1, B2, Γ1, A2 και Γ3, αν και τα δοκίμια που συγκρίθηκαν δεν χαρακτηρίζονται από το ίδιο ποσοστό υγρασίας.

Η λεπτομερής ιλυοαργιλώδης φάση φαίνεται επίσης να συμβάλλει στη αύξηση της αντοχής. Το δείγμα B1 με ποσοστό λεπτομερούς 51%, παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη αντοχή, σε μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση συγκριτικά με τα υπόλοιπα δείγματα. Στα δείγματα αυτά, το λεπτομερές συνδετικό υλικό μεταξύ των κόκκων βρίσκεται σε μικρότερο ποσοστό και πιθανόν με πλέον ανομοιομερή κατανομή.

ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 1



Σχ. 8-2 Αποτελέσματα ανεμπόδιστης θλίψης (δείγμα Β1)

Και στα πέντε ζεύγη δοκιμών είναι χαρακτηριστική η διαφορά που παρουσιάζει η αντοχή ως προς τις δύο διευθύνσεις φόρτισης (παράλληλα και εγκάρσια στη στρώση). Στα δοκίμια με προσανατολισμό εγκάρσια στη στρώση, η αντοχή κυμαίνεται μεταξύ 638 και 1293 kN/m², ενώ για τα δοκίμια τα παράλληλα στη στρώση η τιμή της κυμαίνεται από 479 έως 808 kN/m². Κατά συνέπεια, τα παράλληλα στη στρώση προσανατολισμένα δοκίμια παρουσιάζουν αντοχή μειωμένη σ' ένα ποσοστό από 22% (δείγμα Β2) έως 40% (δείγμα Β1), (βλέπε Πίνακα 8-1). Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανότατα στα επίπεδα αδυναμίας λόγω αρμών στρώσης, στην τυχόν παρουσία μικροσκοπικών ρωγμών που προκαλούνται από την εκτόνωση των τάσεων, αλλά και στα φυλλώδη ορυκτά. Το δείγμα Γ3 παρουσιάζει τις μικρότερες τιμές και κατά τις δύο διευθύνσεις, γεγονός που δικαιολογείται από τη ορυκτολογική του σύσταση που χαρακτηρίζεται από μειωμένη περιεκτικότητα σε ανθρακικά και συμμετοχή μαρμαρυγία και χλωρίτη σε ποσοστό 27% κ.β. Πιθανότατα, λόγω της μικρής περατότητας δεν εγκαταστάθηκε “ορυκτή κόλλα” μεταξύ των ορυκτών με αποτέλεσμα το μικρό βαθμό διαγένεσης.

Με βάση τα παραπάνω (τιμές $q_{max} > 400$ kN/m²), τα δείγματα χαρακτηρίζονται σαν “πολύ σκληρά” (Bell, 1992 από Geological Society of London, Anon 1970).

Πίνακας 8-1 Αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιαστης θλίψης

ΔΕΙΓΜΑ - προσανατο λισμός	Αντοχή σε ανεμπόδιαστη θλίψη q_{\max} (kN/m ²)	Διαφοροποίηση (%) της q_{\max} ως προς τη διεύθυνση	Κορεσμός S (%)	Πορώδες n (%)	Λόγος κενών e	Ανηγμένη παραμόρ- φωση θραύσης ε_f (%)	Μέτρο δυστρο- πίας E_{50tan} (kN/m ²)	Λόγος οριζοντί- ου προς κατακό- ρυφο μέτρο E_H/E_V	Αρχική Υγρασία w_i (%)	Διάμετρος Δοκιμίου d (mm)	Λεπτο- μερές <2μm (%)	Οργανι- κά κατά βάρος (%)	Ορυκτολογία
A2 κάθ.	784	38	87	63	1,69	1,08	123.993	1,4	36,72	49,05	8,4	3	Ασβεστίτης (96%), σιδηροπυρίτης, ιλίτης, χαλαζίας, μοντμοριλονίτης
A2 παράλ.	490					0,61			43,15	47,60			
B1 κάθ.	1293	40	95	62	1,62	1,52	119.372	1,4	63,20	38,00	51,2	8	Ασβεστίτης (92%), σιδηροπυρίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης, αντιγορίτης
B1 παράλ.	770					1,67			56,10	50,00			
B2 κάθ.	1035	22	95	58	1,43	1,56	119.486	1,1	47,34	39,30	10,0	5	Ασβεστίτης (99%), χαλαζίας
B2 παράλ.	808					1,11			44,02	37,16			
Γ1 κάθ.	953	39	59	62	1,64	0,98	130.530	1,8	36,97	38,25	11,0	2	Ασβεστίτης >90%
Γ1 παράλ.	584					1,60			37,67	48,70			
Γ3 κάθ.	638	25	96	52	1,07	0,82	105.265	1,5	46,26	52,75	47,5	2 *	Αραγωνίτης-Ασβεστίτης 66%), χαλαζίας(5%)μαρμαρυγίας(13%) χλωρίτης(14%), αργιλικά (2%)
Γ3 παράλ.	479					1,03			47,67	51,25			

* Μέτρηση με H₂O₂

Το μέτρο παραμορφωσιμότητας / δυστροπίας (κατά αδόκιμο τρόπο συχνά αναφερόμενο σαν μέτρο ελαστικότητας) και η ανισοτροπία των γεωλογικών υλικών διερευνήθηκε με βάση το εφαπτομενικό μέτρο E_{50tan} που προσδιορίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στη καμπύλη φόρτισης, στο σημείο που η τάση φόρτισης αντιστοιχεί στο μισό της αντοχής (Σχ. 8-2).

Το αρχικό μέτρο $E_{initial}$ (που προσδιορίζεται από την κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης), όπως και το τέμνον μέτρο E_{50} (που προκύπτει από το ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ της αρχής των αξόνων και του σημείου της καμπύλης στο οποίο η φόρτιση αντιστοιχεί στο μισό της αντοχής), θεωρήθηκαν αναξιόπιστα. Τα μέτρα αυτά εξαρτώνται τόσο από τη διαμόρφωση των δοκιμών (κατακορυφότητα και έδραση) όσο και από την μειωμένη ακρίβεια μέτρησης των μικρών παραμορφώσεων του δοκιμίου.

Με βάση τις τιμές των εφαπτομενικών μέτρων E_{50tan} , προκύπτει ότι τα δοκίμια με προσανατολισμό εγκάρσια στη στρώση, επιδεικνύουν υψηλότερο μέτρο δυστροπίας με μέση τιμή $E_{50tan}=119.729 \text{ kN/m}^2$, ενώ τα παράλληλα στη στρώση επιδεικνύουν μια μέση τιμή $E_{50tan}=85.448 \text{ kN/m}^2$. Φαίνεται να διαμορφώνεται μια γραμμική αύξηση του μέτρου και της αντοχής τόσο στα δοκίμια με παράλληλο, όσο και σ' αυτά με εγκάρσιο ως προς τη στρώση προσανατολισμό, αλλά ο αριθμός των δοκιμών δεν επιτρέπει τέτοιου είδους τεκμηρίωση.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η βιβλιογραφία της βραχομηχανικής (Rzhevsky, V. and Novik, G., 1971) δίδει - σε αντίθεση με τα προαναφερόμενα αποτελέσματα - μεγαλύτερες τιμές μέτρου δυστροπίας για προσανατολισμό παράλληλο στη στρώση. Το γεγονός ότι δεν επιβεβαιώνεται ανάλογη συμπεριφορά στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, αποδίδεται στη σύσταση του συγκεκριμένου γεωλογικού υλικού, στο ήρεμο περιβάλλον ιζηματογένεσης του – με αποτέλεσμα τον τυχαίο προσανατολισμό των ορυκτών κόκκων - στην πλαστική δυναμική των ιζημάτων της περιοχής και στην τεκτονική καταπόνηση των στρωμάτων από τα οποία προέρχονται τα δείγματα.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, η ανισοτροπία των υλικών, όπως προκύπτει από το λόγο

$$a = \frac{E_{50tan(H)}}{E_{50tan(V)}} \quad [8.3]$$

όπου $E_{50tan(H)}$: μέτρο δυστροπίας παράλληλα στη στρώση και

$E_{50tan(V)}$: μέτρο δυστροπίας εγκάρσια στη στρώση,

είναι της τάξης του 1,4 (Πίνακας 8-1), με δύο ακραίες τιμές 1,8 για το δείγμα Γ1, και 1,1 για το δείγμα Β2.

Συμπερασματικά, θα μπορούσε να λεχθεί ότι : (α) τα γεωυλικά χαρακτηρίζονται σαν σκληρά, (β) η αντοχή τους συσχετίζεται κατά κύριο λόγο με την ορυκτολογία και κατά δεύτερο λόγο με την κοκκομετρική διαβάθμιση και το κορεσμό και (γ) η ανισοτροπία όσον αφορά τη δυστροπία τους εκτιμάται σε 1,4, διαφοροποιούμενη τοπικά από 1,1 έως 1,8.

8.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδημέτρου) πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της συμπεστότητας των μαργαϊκών οριζόντων.

Οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν (Φωτ. 8-2), ρυθμίσθηκαν τοποθετώντας το μοχλό φόρτισης τους στη σχέση 1:10, προκειμένου να δεκαπλασιάζεται το φορτίο που θα επιβαλλόταν στο άγκιστρο της συσκευής. Τα δοκίμια είχαν ύψος 20 mm και διάμετρο 50 mm και οι μετρήσεις (καταγραφές των παραμορφώσεων) πραγματοποιήθηκαν με ψηφιακά μηκυνσιόμετρα και το σύστημα MPX32 Datalogger.



Φωτ. 8-2 Εργαστηριακές συσκευές συμπίεστούτητας

Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν με λάξευση και με οδηγό το δακτύλιο της συσκευής. Μόλις η διάμετρος του δείγματος προσέγγιζε τη διάμετρο του δακτυλίου, αυτός εισπνεζόταν στο δείγμα και στη συνέχεια διαμορφωνόταν οι δύο επιφάνειες έδρασης του δοκιμίου προκειμένου να είναι επίπεδες και παράλληλες.

Δοκιμές συμπίεστούτητας πραγματοποιήθηκαν σε επτά ζεύγη δοκιμίων από τα δείγματα A1, A3, B1, B2, Γ1, Γ2 και Γ3. Σε κάθε ζεύγος, το ένα δοκίμιο ήταν προσανατολισμένο παράλληλα και το

άλλο εγκάρσια στη στρώση, προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά του σχηματισμού και προς τις δύο κατευθύνσεις, (Σχήμα 8-1).

Το πρόγραμμα των δοκιμών καθορίστηκε με βάση την πίεση που δεχόταν τα δείγματα στο πεδίο πριν από την έναρξη της εκσκαφής. Κάθε δοκιμή περιελάμβανε 5 έως 11 στάδια φόρτισης (με μέγιστο φορτίο 1600 kPa) και 3 έως 6 βήματα αποφόρτισης.

Το φορτίο που ασκήθηκε στα δοκίμια στο πρώτο στάδιο φόρτισης, ήταν μικρό, της τάξης των 98 kPa (2 kg στο άγκιστρο της συσκευής), ενώ σε δύο περιπτώσεις (δοκίμια B2N, Γ2N) ήταν 2,5 kPa. Στα επόμενα στάδια, το φορτίο ήταν κάθε φορά διπλάσιο του προηγούμενου σταδίου. Το κάθε στάδιο φόρτισης διαρκούσε 24 h, κατά τη διάρκεια του οποίου θεωρείτο ότι ολοκληρωνόταν η πρωτεύουσα στερεοποίηση του δοκιμίου.

Οι μετρήσεις της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου σε κάθε στάδιο, άρχιζαν με την έναρξη της φόρτισης (ή της αποφόρτισης) και οι τιμές καταγραφόταν από το σύστημα MPX32-Datalogger σε επιλεγμένα χρονικά διαστήματα λογαριθμικής κλίμακας, (Βλέπε Σχ. 8-3 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Συμπίεστότητας).

Η επεξεργασία των μετρήσεων περιελάμβανε τα διαγράμματα της αθροιστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, του λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (Σχ. 8-4), όπως επίσης και την εκτίμηση των παραμέτρων στερεοποίησης, (Βλέπε ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Συμπίεστότητας).

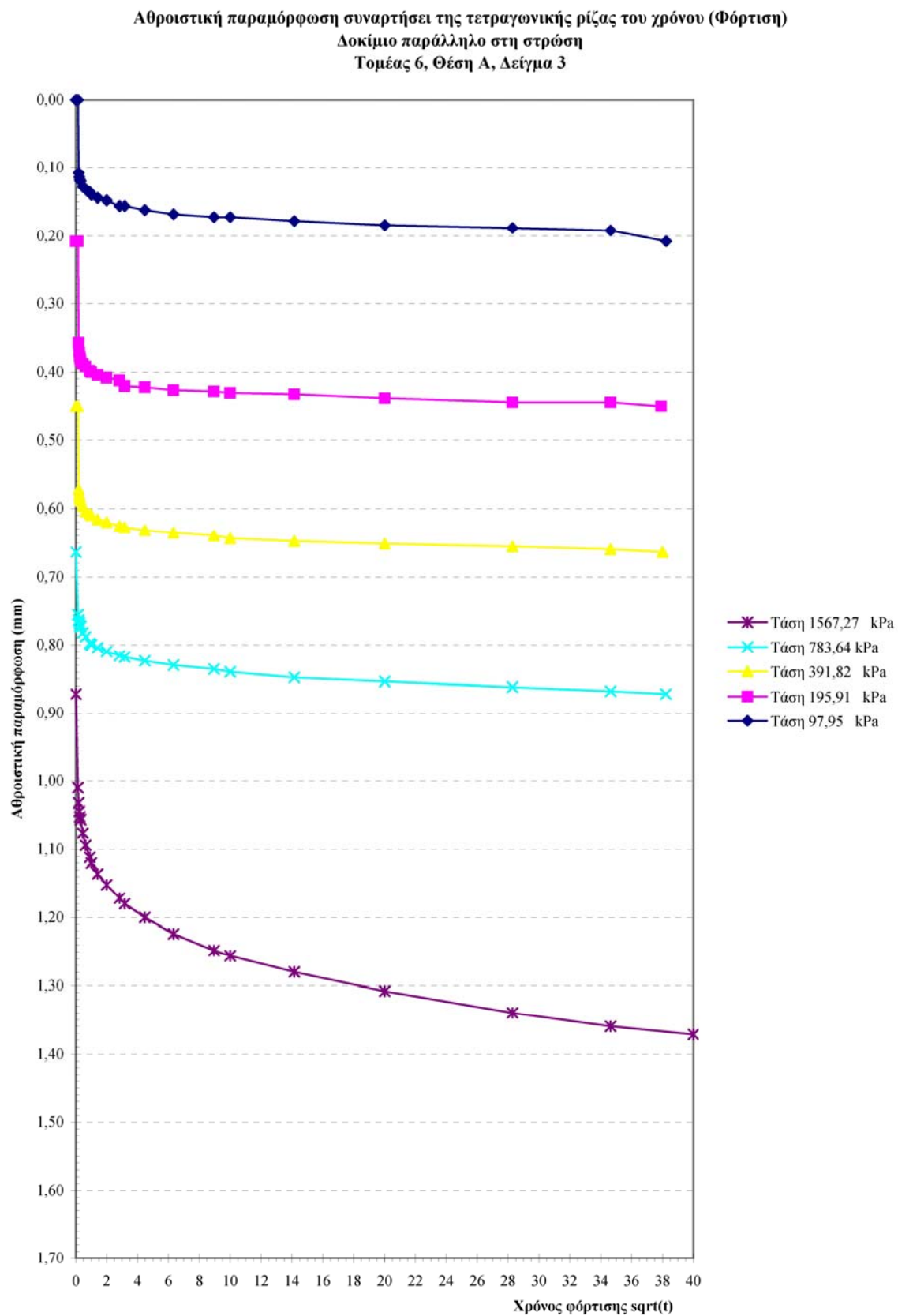
Στον Πίνακα 8-2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών και αναφέρονται σε φορτίο 780 kPa, που θεωρείται ως η τάση προφόρτισης των γεωλογικών σχηματισμών στο πεδίο.

8.2.1 Αρχικός και τελικός λόγος κενών

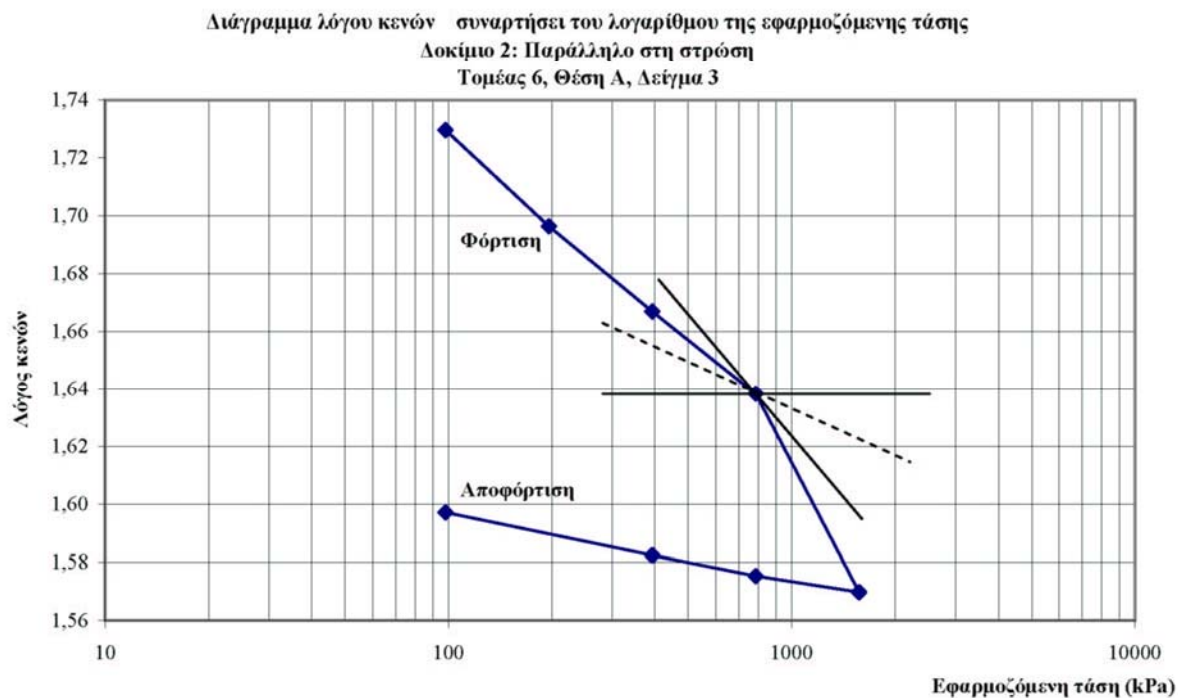
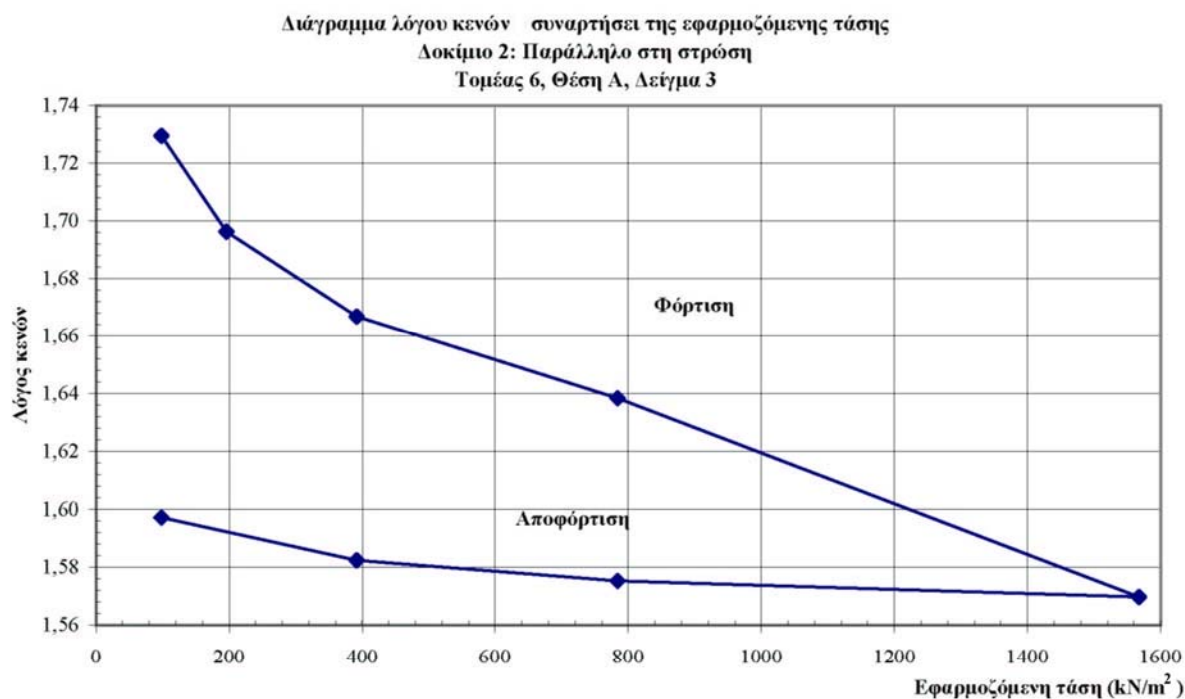
Ο αρχικός λόγος κενών (e_0) παρουσιάζει παρόμοιες τιμές για τα δείγματα A1, A3, B1 και Γ1 και κυμαίνεται από 1,82 έως 1,58. Με φθίνουσα σειρά μεγέθους του λόγου κενών ακολουθούν τα δείγματα B2, Γ2 και Γ3 (με τιμές που κυμαίνονται από 1,59 έως 1,08).

Οι μικρές τιμές του ξηρού φαινομένου βάρους (9,28 έως 12,19 kN/m³) και οι υψηλές τιμές του λόγου κενών (1,08 έως 1,82) αποδίδονται στη συγκόλληση των λεπτομερών σωματιδίων των υλικών και το σχηματισμό συσσωματωμάτων με αποτέλεσμα έναν "ανοικτό" ιστό με σύστημα μικροπόρων. Βέβαια, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις χαμηλές τιμές του ξηρού φαινομένου βάρους συμβάλλει και το ποσοστό του οργανικού υλικού που περιέχουν τα δείγματα.

Οι τιμές των προαναφερόμενων φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων συμφωνούν με τα αποτελέσματα και άλλων ερευνών που έχουν πραγματοποιηθεί στις μάργες της Πτολεμαΐδας και των Σερβίων (Kotzias and Stamatoopoulos, 1983, ΑΠΘ, 1998, ΠΟΛ.Κ., 1997).



Σχ. 8-3 Διαγράμματα της αθροιστικής παραμόρφωσης του δοκιμίου συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (Δείγμα A3)



Σχ. 8-4

Λόγος κενών συνάρτησε της εφαρμοζόμενης τάσης (Δείγμα Α3)

8.2.2 Συντελεστής συμπιεστότητας

Οι τιμές του συντελεστή συμπιεστότητας (C_c) είναι αρκετά μικρές. Για φορτίο 780 kPa κυμαίνονται από 0,067 μέχρι 0,326 και οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε δοκίμια με αρχικό λόγο κενών 1,28 και 1,69 αντίστοιχα. Η μεγάλη τιμή του λόγου κενών και ο μικρός συντελεστής συμπιεστότητας που εμφανίζουν τα δείγματα, μπορεί να αποδοθεί σε συσσωμάτωση των λεπτομερών κόκκων. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές του συντελεστή συμπιεστότητας (C_c) είναι γενικά μεγαλύτερες για τα παράλληλα σε σχέση με τα κάθετα στη στρώση δοκίμια.

Με βάση τα αποτελέσματα της συμπιεστότητας, προκύπτει ότι τα δείγματα έχουν δομή, με τη φόρτιση συμπίεζονται αλλά ανακτούν σε κάποιο βαθμό με τη μείωση του φορτίου (Σχ. 8-4 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Συμπιεστότητας). Το πλέον αργλικό δείγμα (Γ3) υπέστη τη μεγαλύτερη συμπιεστότητα, χωρίς όμως να προκύψει σχετική ανάκτηση του λόγου κενών κατά το στάδιο της αποφόρτισης. Το υψηλό, σε σχέση με τα υπόλοιπα, ποσοστό αργλικών ορυκτών, διευκόλυνε την υποχώρηση με τον υδατεμποτισμό και επηρέασε τη μερική καταστροφή της δομής του δείγματος.

Στα δοκίμια με μεγάλη περιεκτικότητα CaCO_3 , οι υποχωρήσεις ήταν μικρότερες και οι παραμορφώσεις μη μόνιμες. Στα δοκίμια αυτά η ανάκτηση ήταν μεγαλύτερη (ο λόγος κενών κατά την αποφόρτιση πλησίαζε περισσότερο στην αρχική του τιμή) και οι διαγενετικοί δεσμοί του υλικού εμφανίζονται πιο ισχυροί.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα παραπάνω αφορούν το στάδιο της πρωτεύουσας στερεοποίησης. Το φαινόμενο της δευτερεύουσας συμπίεσης, αν και σημαντικό, είναι πολυσύνθετο και βρίσκεται έξω από το πλαίσιο αυτής της έρευνας.

8.2.3 Δείκτης συμπιεστότητας

Ο δείκτης συμπιεστότητας (α_v) εκτιμήθηκε για κάθε στάδιο φόρτισης και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Αποτελέσματα Συμπιεστότητας. Σχολιάζοντας τις τιμές που προκύπτουν, για μέγεθος φορτίου ανάλογο των υπερκειμένων στις θέσεις δειγματοληψίας (Πίνακας 8 - 2), θα μπορούσε να λεχθεί ότι τα δοκίμια από τη θέση Γ1 παρουσιάζουν αξιοσημείωτη διαφορά της συμπιεστότητας σε σχέση με τον προσανατολισμό τους. Η τιμή α_v είναι υπερ-διπλάσια για το παράλληλο, σε σχέση με το εγκάρσια στη στρώση δοκίμιο ($9,55 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{MN}$ έναντι $3,89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{MN}$).

Αντίθετη συμπεριφορά και σε μικρότερο βαθμό, παρουσιάζει το δείγμα Α3 ($7,28 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{MN}$ έναντι $4,2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{MN}$ για προσανατολισμό κάθετα και παράλληλα στη στρώση αντίστοιχα).

Όσον αφορά το συντελεστή μείωσης του όγκου (m_v), ισχύουν όπως είναι φυσικό ανάλογες παρατηρήσεις. Είναι σαφής η διαφοροποίηση του δείγματος Γ1 (με προσανατολισμό παράλληλα στη στρώση), το οποίο παρουσίασε και τη μεγαλύτερη τιμή ($0,04 \text{ m}^2/\text{MN}$).

8.2.4 Τάση προφόρτισης

Η τάση προφόρτισης (P_c) προσδιορίστηκε γραφικά με τη μέθοδο της διχοτόμου (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ-Αποτελέσματα Συμπίεστότητας) και είναι πολύ κοντά στο ενεργό γεωστατικό φορτίο (P_o) των δειγμάτων - την τάση δηλαδή που δέχονται στο πεδίο. Ο λόγος προστερεοποίησης (ή προφόρτισης) είναι πολύ κοντά στη μονάδα για όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν (Πίνακας 8-2) και κατά συνέπεια οι σχηματισμοί θεωρούνται κανονικά στερεοποιημένοι.

8.2.5 Συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης

Ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης (C_v) που αναφέρεται στον Πίνακα 8-2 είναι η μέση αριθμητική τιμή των επιμέρους συντελεστών που προέκυψαν κατά τα στάδια φόρτισης κάθε δοκιμίου. Η τιμή αυτή κυμαίνεται από $9 \text{ m}^2/\text{year}$ για το Γ1 (κάθετα στη στρώση) μέχρι $43,3 \text{ m}^2/\text{year}$ για το Α1 (κάθετα στη στρώση). Για τα δοκίμια από το δείγμα Γ1 ο συντελεστής είναι διπλάσιος κατά την οριζόντια σε σχέση με την κατακόρυφο διεύθυνση. Η ιδιαιτερότητα αυτή αντιβαίνει της συμπεριφοράς των υπολοίπων δειγμάτων (Α1, Β1), στα οποία ο συντελεστής στερεοποίησης εγκάρσια στη στρώση είναι γενικά μεγαλύτερος.

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει έντονη διαφοροποίηση των τιμών σε σχέση με τον προσανατολισμό των δοκιμίων αλλά και με το βάθος. Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική όσον αφορά τη γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών, δεδομένου ότι διαφορετικός συντελεστής στερεοποίησης υποδηλώνει διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης κατά την στράγγιση και διαφορετική σχετική μετακίνηση του ενός στρώματος ως προς το άλλο με τη μεταβολή του τασικού πεδίου.

8.2.6 Συντελεστής διαπερατότητας

Με βάση τις τιμές του συντελεστή στερεοποίησης, προέκυψε ότι ο συντελεστής διαπερατότητας (k) είναι της τάξης του $1 \text{ έως } 2 \times 10^{-7} \text{ m/sec}$ για την πλειονότητα των δειγμάτων (Πίνακας 8-2 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Συμπίεστότητας).

8.2.7 Μέτρο συμπίεστότητας

Τα μέτρα συμπίεστότητας (E_s) που εκτιμήθηκαν είναι της τάξης των δεκάδων MPa και κυμαίνονται στα δείγματα τα εγκάρσια στη στρώση, από περίπου 38.000 kPa (Α3) μέχρι 71.000 kPa (Γ2Ν).

Πίνακας 8-2 Αποτελέσματα συμπιεστότητας για τάση φόρτισης των δειγμάτων ίση περίπου με την τάση των υπερκειμένων τους (780 kPa)

Δείγμα – Προσανατολι- σμός	Αρχική Υγρασία w_i (%)	Τελική Υγρασία w_f (%)	Λόγος κενών e_o	Ξηρό φαινό- μενο βάρος γ_d (kN/m ³)	Κορε- σμένο φαινό- μενο βάρος γ_{sat} (kN/m ³)	Λόγος προ- στερεο- ποίησης OCR	Συντελε- στής συμπιεστό- τητας C_c	Δείκτης Συμπιεστό- τητας a_v (m ² /kN)	Συντελε- στής μείωσης του όγκου m_v (m ² /MN)	Μέτρο συμπιε- στότητας E_s (kN/m ²)	Συντελε- στής στερεοποί- ησης C_v (m ² /year)	Συντελε- στής διαπερα- τότητας k (m/sec)
A1 κάθετο	63,47	63,81	1,824	9,28	15,61		0,15	5,75E-05	0,0211	49.100	43,310	2,84E-07
A1 παράλληλο	56,62	57,15	1,699	9,71	15,88	0,98	0,326	6,7E-05	0,0259	40.281	22,099	1,78E-07
A3 κάθετο	57,47	57,74	1,758	10,39	15,96		0,085	7,28E-05	0,0276	37.863	19,149	1,64E-07
A3 παράλληλο	47,33	51,78	1,578	9,71	16,39	1,01	0,228	4,27E-05	0,0170	60.431	19,366	1,03E-07
B1 κάθετο	61,41	62,33	1,625	9,49	15,56	1,03	0,125	4,58E-05	0,0180	57.325	28,102	1,57E-07
B2 N κάθετο	58,80	59,47	1,595	9,75	15,78	1,02	0,215	4,55E-05	0,0178	57.069	27,680	1,53E-07
B2 κάθετο	48,99	53,74	1,434	10,28	16,06		0,081	4,4E-05	0,0186	55.324	35,928	2,08E-07
B2 παράλληλο	56,92	59,63	1,534	9,87	15,81	1,03	0,209	5,52E-05	0,0227	45.904	19,315	1,36E-07
Γ1 κάθετο	37,39	55,80	1,642	9,58	15,68	0,99	0,122	3,89E-05	0,0151	67.893	9,069	4,26E-08
Γ1 παράλληλο	37,95	55,74	1,648	9,56	15,66	0,99	0,217	9,55E-05	0,0402	27.729	20,853	2,61E-07
Γ2 N κάθετο	39,97	54,27	1,472	10,24	16,08	0,98	0,073	3,49E-05	0,0144	70.773	35,830	1,60E-07
Γ2' παράλληλο	35,94	49,28	1,279	11,11	16,61		0,067	3,26E-05	0,0147	69.968	25,604	1,17E-07
Γ3 κάθετο	39,86	41,02	1,076	12,19	17,28	0,99	0,181	3,58E-05	0,0180	58.053	16,897	9,47E-08

Στα δοκίμια με διεύθυνση παράλληλα στη στρώση και για φόρτιση από τα 392 έως τα 780 kPa, η τιμή του μέτρου συμπιεστότητας κυμαίνεται από 28.000 kPa (Γ1) μέχρι 70.000 kPa (Γ2'). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει έντονη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς του σχηματισμού λόγω της διάστρωσης.

Από το διάγραμμα του μέτρου συμπιεστότητας, συναρτήσει της φόρτισης (Σχ. 8-5) προκύπτει ότι το μέτρο συμπιεστότητας αυξάνει μέχρι την τάση προφόρτισης του σχηματισμού και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται. Επίσης, από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο ρυθμός ανάκτησης μειώνεται γρήγορα μέχρι την τάση προφόρτισης (δηλαδή ο κλάδος αποφόρτισης προσεγγίζει ένα μέγιστο E_s) και στη συνέχεια αυξάνει έντονα μέχρι την τάση των 400 kPa και πιο ομαλά στη συνέχεια. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ότι για το μισό περίπου του βάθους εκσκαφής (που αντιστοιχεί στο τμήμα του κλάδου αποφόρτισης από τα 800 έως τα 400 kPa) θα εμφανισθεί απότομη μείωση του μέτρου συμπιεστότητας και ταχύτερος ρυθμός ανάκτησης.

8.3 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΑ ΜΕΤΡΑ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ

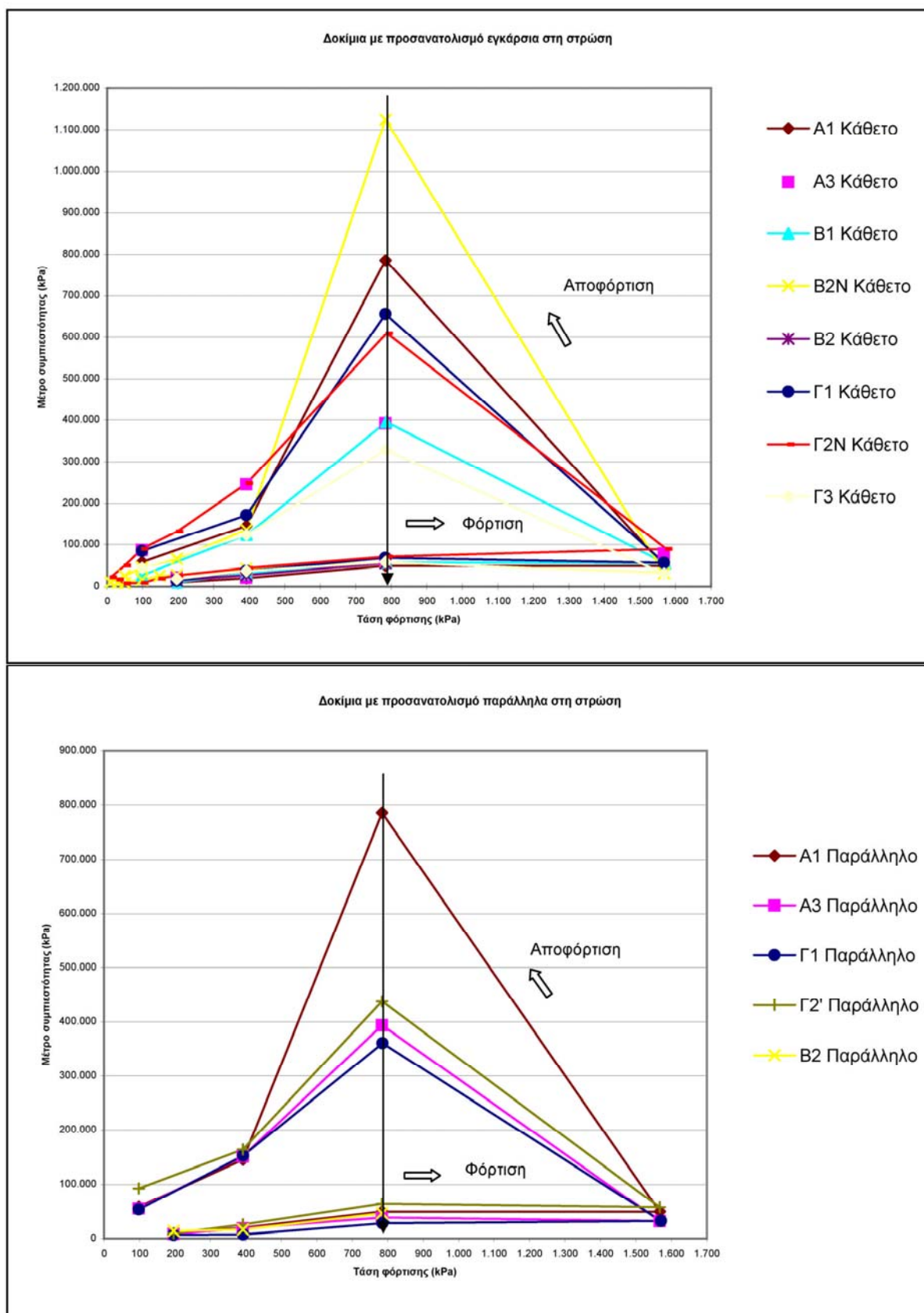
Τα μέτρα δυστροπίας που εκτιμήθηκαν από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (E_{50tan}) και τις δοκιμές συμπιεστότητας (μέτρα συμπιεστότητας E_s) αποκλίνουν σημαντικά. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις διαφορετικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι δοκιμές (ελεγχόμενη φόρτιση σε σχέση με την ελεγχόμενη παραμόρφωση, πλευρικός περιορισμός και κορεσμός δοκιμίου, μέγεθος του φορτίου).

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές που προσδιορίστηκαν, τόσο κατά την ανεμπόδιστη θλίψη όσο και κατά τις δοκιμές συμπιεστότητας, δεν αφορούν το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών το οποίο πρέπει να εκτιμάται σε πολύ αρχικό στάδιο της φόρτισης με διαδοχικές φορτίσεις - αποφορτίσεις. Στην περίπτωση των δοκιμών συμπιεστότητας, πραγματοποιήθηκε μόνο ένα στάδιο αποφόρτισης και σε ανηγμένη παραμόρφωση πέρα από το εύρος της ελαστικής συμπεριφοράς. Εντούτοις, οι δοκιμές αυτές θεωρείται ότι προσομοιώνουν καλλίτερα τις συνθήκες ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής που εκδηλώνεται με την αποφόρτιση και η τιμή του μέτρου συμπιεστότητας (που υπολογίζεται από τα στάδια αποφόρτισης), θεωρείται να είναι αποδεκτή για την εκτίμηση του μεγέθους ανάκτησης του δαπέδου.

8.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ

8.4.1 Τάση προφόρτισης

Οι Kavvas *et al.* (1993), αναφέρουν ότι ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας φαίνεται να είναι κανονικά στερεοποιημένο γεωυλικό. Εκτίμησαν ότι η τάση προφόρτισης με βάση τη γεωλογία της



περιοχής κυμαίνεται μεταξύ 1000 και 2000 kPa κατά μήκος του κοιτάσματος. Εντούτοις, με βάση τις δοκιμές συμπίεστότητας του αδιατάρακτου λιγνίτη που πραγματοποιήσαν, εκτιμήθηκε ότι είναι σε μεγάλο βαθμό προφορτισμένος. Η εκτίμηση αυτή αποδόθηκε μάλλον στη φύση του υλικού και όχι στο πραγματικό μέγιστο φορτίο το οποίο είχε υποστεί στο παρελθόν.

Σε αντίθεση με τις προαναφερόμενες δοκιμές των λιγνιτών, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών συμπίεστότητας που πραγματοποιήθηκαν στους μαργαϊκούς ορίζοντες στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας (Βλέπε Πίνακα 8-2 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα Συμπίεστότητας), συμφωνούν με τις γεωλογικές ενδείξεις. Υποδεικνύουν ένα λόγο προφόρτισης $OCR \approx 1$, μέγεθος που υποδηλώνει ότι οι σχηματισμοί είναι κανονικά στερεοποιημένοι.

8.4.2 Συντελεστής στερεοποίησης

Ο συντελεστής στερεοποίησης (C_v) του λιγνίτη κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 $m^2/year$, με τις μικρότερες τιμές να αντιστοιχούν στις υψηλές τάσεις στερεοποίησης (Kavvas *et al.*, 1994).

Σε αντίθεση, ο συντελεστής στερεοποίησης των μαργαϊκών οριζόντων είναι αρκετά μεγαλύτερος, κυμαίνοντας από 9 έως 43 $m^2/year$. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι οι μαργαϊκοί ορίζοντες αναμένεται να επιδεικνύουν στερεοποίηση με μεγαλύτερο ρυθμό έναντι του λιγνίτη, κάτω από την επιβολή ίδιου φορτίου.

8.4.3 Μέτρο δυστροπίας και ανισοτροπία

Οι Kavvas *et al.* (1994) αναφέρουν σαν μέτρο “ελαστικότητας” του λιγνίτη την κλίση του αρχικού (γραμμικού) τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης που προέκυψε από τριαξονικές δοκιμές με στερεοποίηση - αποστράγγιση (CD) και δοκιμές με στερεοποίηση - χωρίς αποστράγγιση (CU). Από τις δοκιμές CD εκτιμήθηκε ένα μέτρο “ελαστικότητας” $E_1 = 90$ MPa και από τις δοκιμές CU ένα μέτρο $E_2 = 70$ MPa, τιμές που φαίνεται να είναι ίδιες για όλες τις τάσεις προφόρτισης που εφαρμόστηκαν.

Το μέτρο συμπίεστότητας (E_s) της μάργας που προέκυψε από τις δοκιμές οιδημέτρου (κλάδος αποφόρτισης από τα 784 έως τα 392 MPa, σε δοκίμια εγκάρσια στη στρώση), εκτιμήθηκε σε 170 MPa (μέση τιμή), ενώ με βάση τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης προέκυψε ένα μέτρο δυστροπίας E_{50tan} ίσο με 88 MPa (μέση τιμή). Σύγκριση των αποτελεσμάτων δεν είναι εφικτή, δεδομένου ότι απαιτείται διόρθωση των “υπό περιορισμό” μέτρων του οιδημέτρου με βάση το λόγο Poisson.

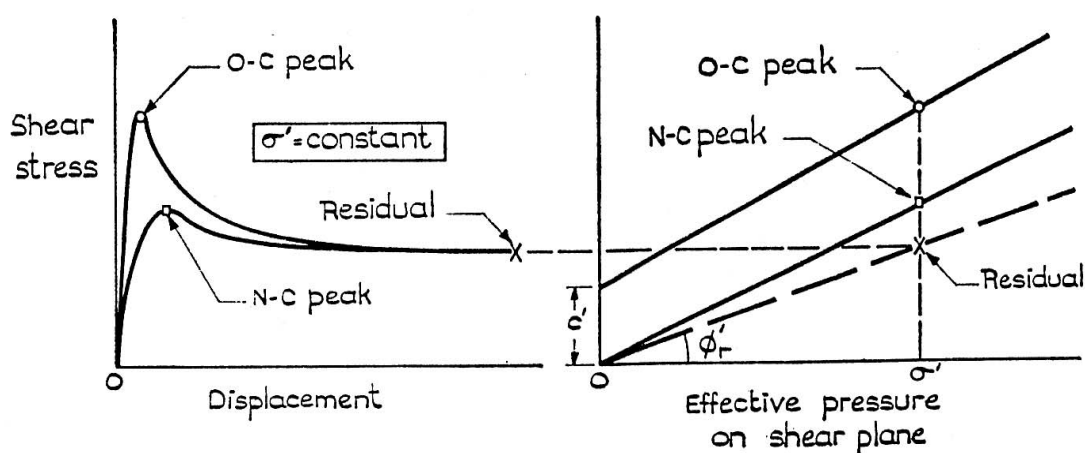
Τέλος, με βάση το λόγο των μέτρων δυστροπίας που προσδιορίστηκαν, εκτιμήθηκε ένας λόγος ανισοτροπίας για το λιγνίτη ίσος με 1,3 (Kavvas *et al.*, 1994), ανάλογη του 1,4 που προσδιορίζεται με βάση τις δοκιμές στους μαργαϊκούς ορίζοντες.

9 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

9.1 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Στους γεωλογικούς σχηματισμούς, θραύση αναπτύσσεται είτε σε μια υφιστάμενη χαρακτηριστική επιφάνεια (αρμός στρώσης ή επίπεδο ασυνέχειας το οποίο έχει προκληθεί με εκτόνωση των τάσεων), είτε σε κάποιο σημείο της εδαφικής μάζας και στη συνέχεια εξαπλώνεται σταδιακά. Κατά την ανάπτυξη της επιφάνειας της θραύσης, οι εδαφικοί κόκκοι τείνουν να προσανατολισθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιδεικνύουν μειωμένη αντίσταση στην ολίσθηση, και με τη προχώρηση της διάτμησης, η αντίσταση προοδευτικά μειώνεται. Σε μεγάλες μετατοπίσεις η αντίσταση τείνει σε μια σταθερή τιμή (Skempton 1964) που καλείται υπολειπόμενη (παραμένουσα) διατμητική αντοχή (residual shear strength), (Σχ. 9-1).

Η παραμένουσα αντοχή του εδάφους είναι ανεξάρτητη της αρχικής δομής του και του ιστορικού φόρτισης. Αποτελεί παράμετρο μεγάλης σπουδαιότητας για τη γεωτεχνική μηχανική και είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών σε εδάφη που επιδεικνύουν ψαθυρή συμπεριφορά ή έχουν επιφάνειες διάτμησης (ρωγματομενά εδάφη και εδάφη με διάστρωση). Επίσης η παραμένουσα αντοχή αποτελεί σημαντική παράμετρο για την εκτίμηση της ευστάθειας επανα-δραστηριοποιούμενων κατολισθήσεων, για την διερεύνηση πιθανής προοδευτικής θραύσης (Skempton, 1985) αλλά και για τη πρόγνωση των εδαφικών μετακινήσεων στη περίπτωση σεισμικών καταπονήσεων (Tika *et al.*, 1996).



Σχ. 9-1 Μέγιστη και παραμένουσα διατμητική αντοχή για κανονικά στερεοποιημένες (NC) και προστερεοποιημένες (OC) αργίλους

Η παραμένουσα διατμητική αντοχή (τ_r) εξαρτάται από την ορθή στην επιφάνεια διάτμησης τάση (σ_n) σύμφωνα με την σχέση:

$$\tau_r = c'_r + \sigma_n \text{εφφ}'_r \quad [9.1]$$

όπου c'_r η συνοχή και ϕ'_r η γωνία τριβής που αντιστοιχούν στη παραμένουσα διατμητική αντοχή κάτω από συνθήκες στράγγισης.

Δεδομένου ότι η συνοχή c'_r έχει πολύ μικρή ή και μηδενική τιμή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η παραμένουσα διατμητική αντοχή προσεγγίζεται με την εξίσωση:

$$\tau_r = \sigma'_n \text{εφφ}'_r \quad [9.2]$$

Οι αργιλικοί και μαργαϊκοί σχηματισμοί που έχουν υποστεί κάποια προστερεοποίηση είτε με την επίδραση του βάρους υπερκειμένων, είτε εξαιτίας άλλων παραγόντων, παρουσιάζουν έντονη μείωση της διατμητικής τους αντοχής με την αύξηση της παραμόρφωσης (Σχ. 9-1). Ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάζουν και οι εδαφικοί σχηματισμοί που αποτέθηκαν σε ποταμολιμναίο ή αβαθές θαλάσσιο περιβάλλον και έχουν υποστεί διαγένεση σε κάποιο βαθμό. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί είτε στην διασταλτικότητα που παρουσιάζουν τα προστερεοποιημένα εδάφη κατά την διάτμηση τους σε σχετικά μικρή ορθή τάση (με αποτέλεσμα να αυξάνεται η περιεχόμενη υγρασία και να μειώνεται η αντοχή τους), είτε στη ανάπτυξη λεπτών ζωνών στην ευρύτερη ζώνη διάτμησης, όπου παρατηρείται αναδιάταξη των αργιλικών σωματιδίων με προσανατολισμό σχεδόν παράλληλο με το επίπεδο διάτμησης (Skempton, 1964).

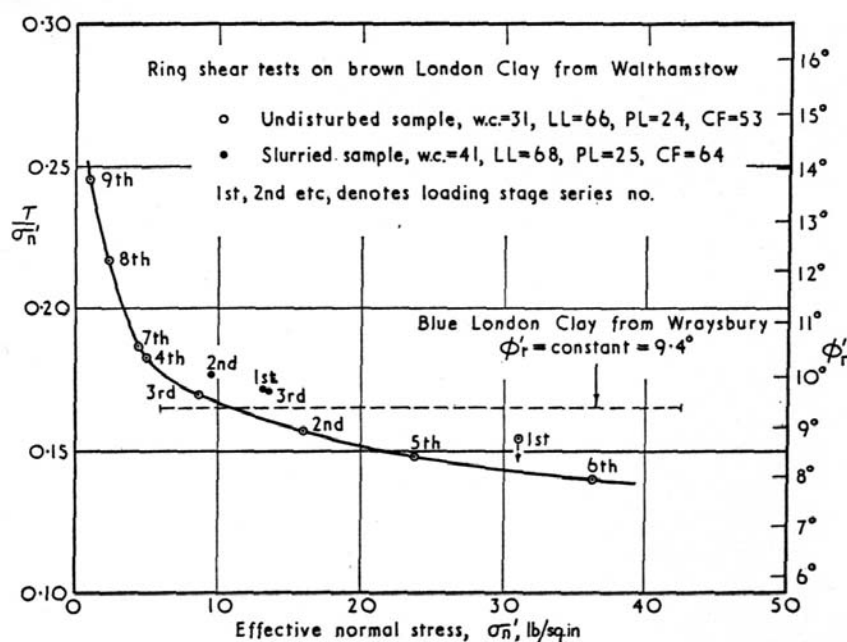
Αντίθετα, οι κανονικά στερεοποιημένοι αργιλικοί και μαργαϊκοί σχηματισμοί που μετά την απόθεση τους δεν υπέστησαν έντονες τεκτονικές διεργασίες ή δεν διαβρώθηκαν σε σημαντικό βαθμό, εμφανίζουν μικρή διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

Όσον αφορά την περίπτωση του “Τομέα-6”, δεδομένης της εμφάνισης των ζωνών διάτμησης στα δυτικά πρηνή του Ορυχείου (βλέπε καταγραφές κλισιμέτρων), αλλά και των επιφανειών διάτμησης που διαπιστώθηκαν με τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις, κρίθηκε σκόπιμο στο πλαίσιο της διερεύνησης της εμφανιζόμενης κινητικότητας, να εκτιμηθεί η παραμένουσα διατμητική αντοχή των μαργαϊκών οριζόντων.

9.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη παραμένουσα διατμητική αντοχή

Ο Skempton (1964), διαπίστωσε ότι με την αύξηση του αργιλικού κλάσματος του εδάφους, επέρχεται μείωση της παραμένουσας γωνίας τριβής. Απέδωσε το γεγονός στην επικράτηση της ολίσθησης μεταξύ των αργιλικών σωματιδίων και στη μείωση της τριβής μεταξύ των μη αργιλικών ορυκτών (που παρουσιάζουν και μεγαλύτερη γωνία τριβής).

Οι Bishop *et al.* (1971), μελέτησαν την επίδραση του ορθού φορτίου στη παραμένουσα διατμητική αντοχή με δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης και διαπίστωσαν μείωση της παραμένουσας γωνίας τριβής με την αύξηση του ορθού φορτίου. Στη καστανή άργιλο του Λονδίνου η παραμένουσα γωνία τριβής ϕ'_r εκτιμήθηκε ίση με 14° για ορθό φορτίο $\sigma'_n=6,9$ kPa και 8° για ορθό φορτίο $\sigma'_n=250$ kPa (Σχ. 9-2).



Σχ. 9-2 Παραμένουσα διατμητική αντοχή της καστανής αργίλου του Λονδίνου, σε σχέση με το φορτίο (Bishop *et al.*, 1971) ($1 \text{ lb/sq.in} \approx 7 \text{ kN/m}^2$)

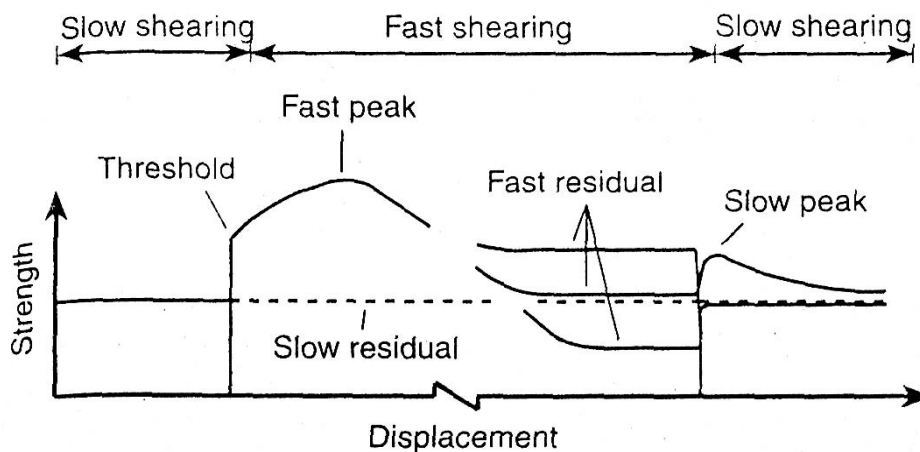
Οι ερευνητές απέδωσαν τη μείωση αυτή στο υψηλό ποσοστό μοντμοριλονίτη της καστανής αργίλου δεδομένου ότι, η μπλε άργιλος του Λονδίνου, της οποίας η περιεκτικότητα σε μοντμοριλονίτη είναι μικρή, παρουσιάζει παραμένουσα γωνία τριβής $9,4^\circ$ ανεξάρτητα από το μέγεθος του ορθού φορτίου (Σχ. 9-2).

Επίσης, ο Hawkins (1985) βασιζόμενος σε εκτεταμένες δοκιμές των Hawkins and Privett (1984, 1985), έδειξε ότι στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών η σχέση παραμένουσας γωνίας τριβής και φορτίου είναι μη γραμμική όταν οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε ορθή τάση μικρότερη των 200 kPa. Θεωρώντας ότι η c'_r είναι μηδενική, οι υπολογισμοί έδειξαν μια σημαντική μείωση της ϕ'_r με την αύξηση του φορτίου σε δοκιμές ιλυούχου αργίλου. Με βάση τα παραπάνω, η παραμένουσα διατμητική αντοχή θα πρέπει να μελετάται σε σχέση με το θεωρούμενο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης. Σε κατολίσθηση κυκλικού τομέα, το βάρος των υπερκειμένων ίσως ποικίλει από σχεδόν μηδενικό φορτίο μέχρι και πάνω από 200 kPa. Κατά συνέπεια, η τιμή της ϕ'_r θα διαφοροποιείται κατά μήκος της ζώνης διάτμησης ανάλογα με το εάν η κατολίσθηση εκδηλώνεται υπο-επιφανειακά ή σε βάθος.

Όπως αναφέρει ο Bromhead (1986), οι Lupini *et al.* (1981), μελέτησαν την επίδραση του ρυθμού επιβολής της διατμητικής τάσης στη παραμένουσα διατμητική αντοχή. Διαπιστώθηκε ότι σε αργή διάτμηση που επιτρέπει την στράγγιση, η τυχόν αύξηση του ρυθμού μπορεί να προκαλέσει αύξηση της παραμένουσας αντοχής, και η μείωση του ρυθμού μείωση της αντοχής αντίστοιχα. Το φαινόμενο αποδόθηκε στην αλλοίωση της ζώνης διάτμησης από δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις αργές συνθήκες διάτμησης.

Στη συνέχεια, οι Lemos *et al.* (1985), όπως αναφέρουν οι Tika and Hutchinson (1999), διαπίστωσαν με βάση δακτυλιοειδείς διατμήσεις, ότι αν γίνει προσέγγιση της παραμένουσας αντοχής με ένα αργό ρυθμό επιβολής φορτίου ο οποίος να επιτρέπει την στράγγιση και στη συνέχεια το έδαφος υποβληθεί σ' ένα γρήγορο ρυθμό διάτμησης, τότε εκδηλώνεται η ακόλουθη συμπεριφορά (Σχ. 9-3):

- α) Αρχικά και σε πρακτικά αμελητέα μετατόπιση, εμφανίζεται μια άμεση αύξηση της διατμητικής αντίστασης μέχρι μιας οριακής τιμής (threshold), που πιθανόν να οφείλεται στη προσωρινή αρνητική πίεση του νερού των πόρων, αναπτύσσεται λόγω της διασταλτικότητας που παρουσιάζει το έδαφος κατά τη διάτμηση.
- β) Κάτω από συνθήκες μεγαλύτερου ρυθμού διάτμησης, εμφανίζεται μια περαιτέρω αύξηση της διατμητικής αντίστασης μέχρι μιας μέγιστης τιμής, την “ταχεία” μέγιστη αντοχή, (η οποία είναι επίσης συνάρτηση του ρυθμού μετατόπισης) και στη συνέχεια



Σχ. 9-3 Επίδραση του ρυθμού μετατόπισης στη παραμένουσα διατμητική αντοχή
(Tika *et al.*, 1996 από Lemos *et al.*, 1985)

- γ) η αντίσταση μειώνεται σε μια ελάχιστη τιμή, την επονομαζόμενη “ταχεία” παραμένουσα αντοχή. Η “ταχεία” παραμένουσα αντοχή είναι ίση με την “αργή” στραγγιζόμενη

παραμένουσα αντοχή (σε περίπτωση ουδέτερης επίδρασης του ρυθμού μετατόπισης), μεγαλύτερη της “αργής” (σε περίπτωση θετικής επίδρασης του ρυθμού), ή μικρότερη της “αργής” (σε περίπτωση αρνητικής επίδρασης του ρυθμού μετατόπισης)

Όσον αφορά την επίδραση του σχήματος των κόκκων και της υγρασίας, οι Lupini *et al.* (1981) έδειξαν ότι κάτω από συνθήκες στράγγισης, ο τύπος της διάτμησης[‡] και σε μικρότερο βαθμό η παραμένουσα γωνία τριβής, εξαρτάται από το δείκτη πόρων των στρογγυλόμορφων κόκκων (granular void ratio, e_g). Η τιμή του ορίζεται σαν ο λόγος του όγκου των πλακωδών τεμαχιδίων και του νερού προς τον όγκο των υποστρόγγυλων κόκκων μεγέθους ιλύος και άμμου.

Ο Hawkins (1985) μελέτησε την επίδραση του σχήματος και του μεγέθους των κόκκων στη παραμένουσα διατμητική αντοχή ιλυολίθων. Αναφέρει ότι στη περίπτωση αργιλικού δείγματος, που οι περισσότεροι κόκκοι είναι μικροί και πλακώδεις, τα αργιλικά τεμαχίδια προσανατολίζονται γύρω από το επίπεδο της διάτμησης ως προς μια κατεύθυνση προκειμένου να αναπτυχθεί η επιφάνεια διάτμησης.

Στη περίπτωση μη αργιλικών εδαφών, οι κόκκοι είναι κατά το πλείστον υποστρόγγυλοι και τείνουν να “κυλήσουν” (τουλάχιστον αρχικά), προκειμένου να “προσανατολισθούν” καλύτερα και να παρουσιάσουν μειωμένη αντίσταση. Η ευκολία με την οποία οι κόκκοι περιστρέφονται, εξαρτάται από το σχήμα τους και όπως είναι φυσικό, οι πλέον γωνιώδεις επιδεικνύουν την μεγαλύτερη αντίσταση. Εκτός της περιστροφής των κόκκων, εκδηλώνεται και μερική διόγκωση του εδάφους προκειμένου να δοθεί η δυνατότητα στους κόκκους να ολισθήσει ο ένας ως προς τον άλλο. Για το λόγο αυτό, η αρχική διατμητική αντίσταση σχετίζεται με τη πυκνότητα του υλικού και η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και παραμένουσας αντοχής είναι μικρή.

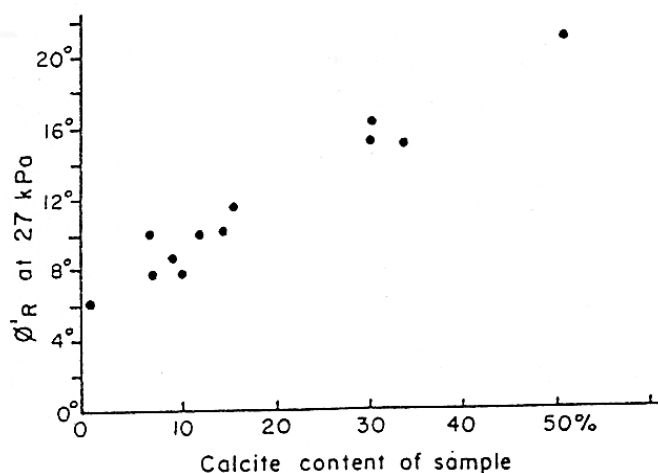
Σε αντίθεση, οι άργιλοι εμφανίζουν μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τιμών της μέγιστης και της παραμένουσας τιμής και η διαφορά αυτή αποδίδεται στην αρχική αλλαγή του προσανατολισμού των αργιλικών τεμαχιδίων.

Οι Ελπέκος κ.α. (2001), με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών σε μάργες της περιοχής Κομάνου και Καρδιάς (Πτολεμαΐδα), υποστηρίζουν ότι ο μηχανισμός διάτμησης των εδαφών αυτών στη παραμένουσα κατάσταση αλλά και ο προσδιορισμός της παραμένουσας διατμητικής αντοχής σχετίζονται με το δείκτη πόρων των στρογγυλόμορφων κόκκων. Η συσχέτιση αυτή δεν ισχύει όταν τα εδάφη περιέχουν γωνιώδεις κόκκους ή όστρακα που αυξάνουν την αλληλεπίδραση και εμπλοκή μεταξύ των κόκκων.

Ένα επίσης σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας τους είναι ότι η παραμένουσα γωνία τριβής των εδαφών που μελετήθηκαν μεταβάλλεται με το μέγεθος της ενεργής ορθής τάσης. Η μεταβολή δε αυτή, ήταν ανεξάρτητη από τον τύπο διάτμησης των εδαφών στην παραμένουσα κατάσταση.

[‡] κύλιση, ολίσθηση, ή ενδιάμεσος τύπος

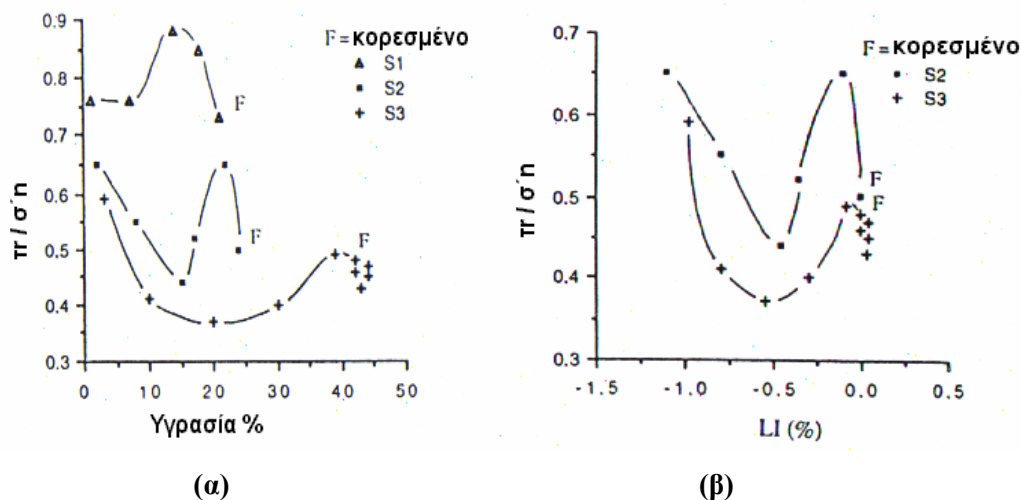
Αναφορικά με την επίδραση της ορυκτολογίας, ο Hawkins (1985) μελέτησε την επίδραση της περιεκτικότητας ασβεστίτη στη παραμένουσα γωνία τριβής ασβεστούχων αργίλων. Για τη περίπτωση των μη αποσαθρωμένων αργιλικών στρωμάτων του Fuller στη Νότια Αγγλία (στρώματα πλούσια σε μοντμοριλονίτη) η σχέση μεταξύ του περιεχόμενου CaCO_3 και της παραμένουσας γωνίας τριβής ϕ'_r είναι γραμμική (Σχ. 9-4). Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι η μείωση της περιεκτικότητας σε ασβεστίτη που προκαλείται με την αποσάθρωση, έχει μια σημαντική επίδραση στις τιμές της παραμένουσας διατμητικής αντοχής.



Σχ. 9-4 Περιεκτικότητα CaCO_3 συναρτήσει της παραμένουσας γωνίας τριβής, στα αργιλικά στρώματα του Fuller, Ν. Αγγλία, για ενεργή τάση 200 kPa ($c_r=0$), (Hawkins, 1985)

Η επίδραση της υγρασίας στη παραμένουσα διατμητική αντοχή διαφόρων εδαφικών τύπων διερευνήθηκε από τους Isabel *et al.* (1996). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν μια σημαντική επίδραση της υγρασίας στο συντελεστή παραμένουσας τριβής (τ_r/σ'_n), επίδραση διαφορετική για κάθε έδαφος (Σχ. 9-5α). Στο πλέον χονδρόκοκκο έδαφος (S_1), η παραμένουσα διατμητική αντοχή παρουσιάζει ελάχιστες τιμές όταν είναι ξηρό ή πλήρως κορεσμένο. Τα πιο λεπτόκοκκα εδάφη S_2 και S_3 παρουσιάζουν μια μείωση της αντοχής με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας, μέχρι μια ελάχιστη τιμή, μετά την οποία η αντοχή αυξάνει. Η ελάχιστη αντοχή δεν ανταποκρίνεται σε συνθήκες κορεσμού (όπου ο δείκτης υδαρότητας[§] $LI=0$) αλλά σ' ένα δείκτη υδαρότητας LI γύρω στο -0,5% (Σχ. 9-5β). Ιδιαίτερα, το πιο αργιλώδες έδαφος S_3 παρουσιάζει ένα ελάχιστο συντελεστή παραμένουσας τριβής που αντιστοιχεί στο 77% της αντοχής του σε κορεσμένη κατάσταση.

[§] το ποσοστό υγρασίας του δείγματος μείον το ποσοστό υγρασίας του στο όριο πλαστικότητας, προς το δείκτη πλαστικότητας. Όταν η άργιλος έχει υγρασία ίση με το όριο υδαρότητας, τότε $LI=100\%$, ενώ όταν έχει υγρασία ίση με το όριο πλαστικότητας τότε $LI=0\%$.



Σχ. 9-5 Μεταβολή του συντελεστή παραμένουσας τριβής με την υγρασία και το δείκτη υδαρότητας (Isabel *et al.*, 1996)

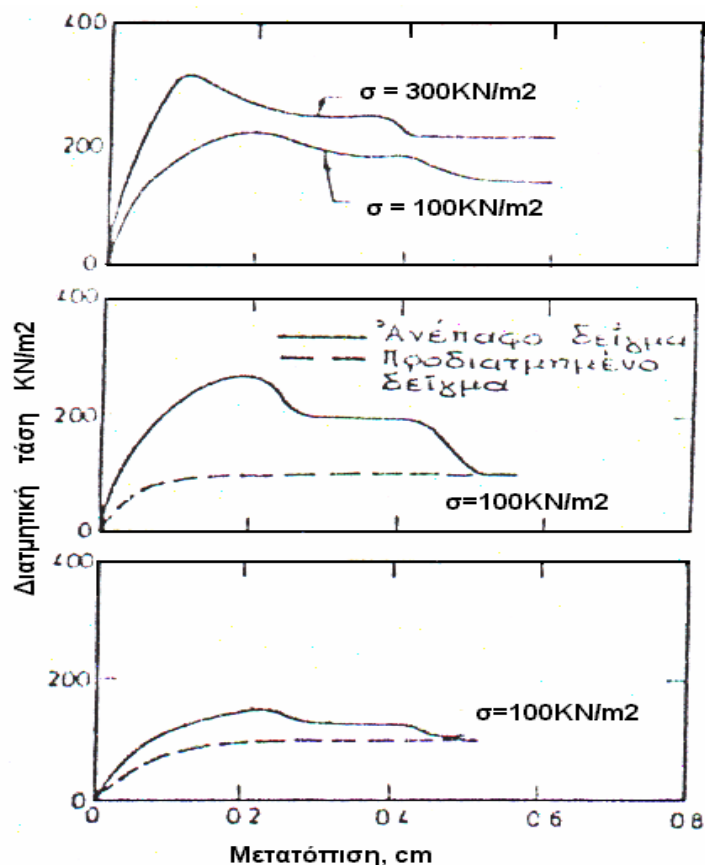
9.1.2 Μέγεθος της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των μαργών

Ο Chandler (1966, 1969), μελέτησε τη παραμένουσα διατμητική αντοχή της μάργας του Keuper σε σχέση με την αποσάθρωση. Η μάργα του Keuper ανήκει στα αργιλικά ιζήματα τριαδικής ηλικίας που καλύπτουν μεγάλο τμήμα της κεντρικής Αγγλίας. Ορυκτολογικά συνίσταται από ανθρακικό ασβέστιο σε ποσοστό μέχρι 20%, χαλαζία που κυμαίνεται από 5-35% και τα κύρια αργιλικά ορυκτά που είναι ο ιλίτης και ο χλωρίτης. Από τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε ότι η παραμένουσα γωνία τριβής κυμαίνεται μεταξύ 18° και 24° για την αποσαθρωμένη μάργα, 22° μέχρι 29° για την μέτρια αποσαθρωμένη και 23° μέχρι 32° για την υγιή μάργα.

Ο Σωτηρόπουλος (1982), εξέτασε δείγματα τεφρής – κυανότεφρης μάργας του Νεογενούς από πρηνή εκσκαφών του δρόμου Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας. Πραγματοποιώντας δοκιμές άμεσης διάτμησης, κάτω από γρήγορες συνθήκες, προσδιόρισε συνοχή c_t από 0 έως 55 kN/m² και παραμένουσα γωνία τριβής ϕ_t που κυμαίνεται από 22° έως 34,5°. Με βάση τα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης (Σχ. 9-6), εμφανίζεται κάποια ενδιάμεση (“ημιπαραμένουσα”) βαθμίδα μεταξύ της μέγιστης και παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Δεν δόθηκε σαφής ερμηνεία για τα αίτια εμφάνισης της βαθμίδας αυτής, αλλά αποδόθηκε στις συνθήκες του περιβάλλοντος απόθεσης, στην παρουσία ρωγματώσεων και στον προσανατολισμό τους σε σχέση με το επίπεδο θραύσης.

Εντούτοις, για την αξιολόγηση του φαινομένου, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η μέθοδος διερεύνησης της παραμένουσας αντοχής δεν ήταν η δόκιμος (περιορίζε το μέγεθος της διατμητικής

παραμόρφωσης). Επιπλέον, η πιθανή διαφοροποίηση του μηχανισμού διάτμησης με την προϋούσα παραμόρφωση (διόγκωση με την διάτμηση - πιθανή λειοτρίβηση του γεωυλικού), επηρέασε τη συμπεριφορά του κατά τη διάτμηση.

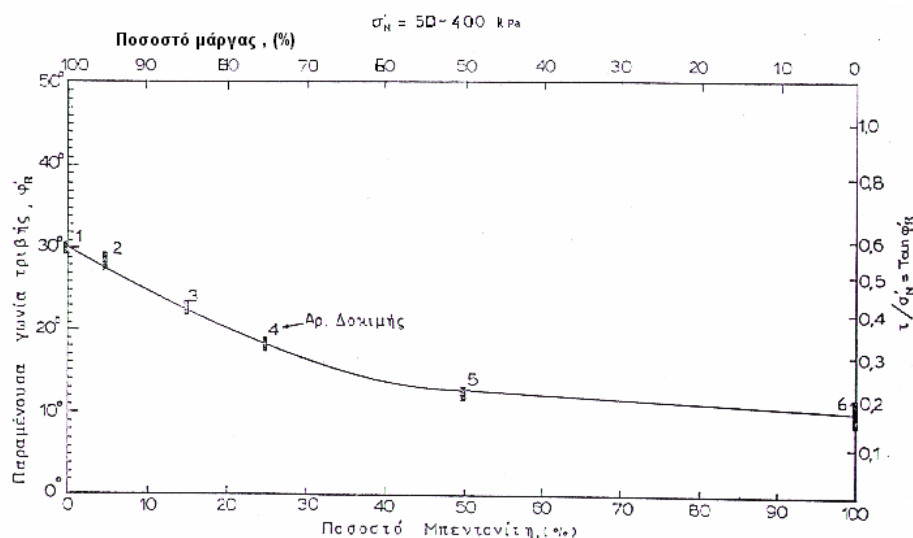


Σχ. 9-6 Αποτελέσματα γρήγορων δοκιμών άμεσης διάτμησης σε μάργα (Σωτηρόπουλος, 1982)

Ο Τσιαμπάος (1984) πραγματοποιώντας δοκιμές με τη συσκευή Bromhead, προσδιόρισε για τις θαλάσσιες προέλευσης μάργες του Ηρακλείου, παραμένονσα γωνία τριβής που κυμαίνεται από 28° έως 34° για τις λευκοκίτρινες και καστανοκίτρινες μάργες, και από 32° έως 36° για τις τεφρές. Παρατήρησε ότι η ομάδα των λευκοκίτρινων - καστανοκίτρινων μαργών, παρουσιάζει κατά τη διάτμηση έντονες διακυμάνσεις της παραμένουσας γωνίας τριβής, ιδίως στα μικρά ορθά φορτία, ενώ σε μεγαλύτερα φορτία, η διακύμανση αυτή μειώνεται σημαντικά. Το φαινόμενο αποδόθηκε στη παρουσία πολυάριθμων κελυφών και θραυσμάτων από απολιθώματα (που αποτελούνται από ανθρακικό ασβέστιο), καθώς και στη παρουσία μικριτικής ασβεστιτικής ιλύος που δημιουργεί ισχυρούς συγκολλητικούς δεσμούς. Στα μικρά ορθά φορτία τα κελύφη ανθίστανται και μαζί με τους χαλαζιακούς κόκκους, δυσχεραίνουν την ανάπτυξη του επιπέδου διάτμησης.

Επίσης ο Τσιαμπάος (1984) εξετάζοντας τους τρεις τύπους διάτμησης που προτάθηκαν από τους Lupini *et al.* (1981), συμπέρανε ότι ο τύπος της κύλισης (τυρβώδης διάτμηση), είναι αυτός που λαμβάνει χώρα κατά τη διάτμηση των μαργών του Ηρακλείου. Στο συμπέρασμα αυτό συνηγόρησαν οι υψηλές τιμές της παραμένουσας γωνίας τριβής αλλά και η μακροσκοπική εξέταση της επιφάνειας διάτμησης κατά την οποία διαπιστώθηκε ότι η επιφάνεια ήταν λεία, χωρίς την ανάπτυξη χαρακτηριστικών γραμμώσεων ολίσθησης ή κάποιου εκλεκτικού προσανατολισμού των αργιλικών ορυκτών.

Τέλος, ο Τσιαμπάος (1984) πραγματοποιώντας δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης σε μίγματα μάργας – μπετονίτη, διαπίστωσε απότομη μείωση των τιμών της παραμένουσας γωνίας τριβής με μικρή αύξηση του αργιλικού κλάσματος στο δοκίμιο (Σχ. 9-6). Για ποσοστό μπετονίτη μέχρι 25%, η παραμένουσα γωνία τριβής μειώνεται από 29° σε 17°, ενώ για ποσοστά μεγαλύτερα από 50% η μείωση της παραμένουσας γωνίας τριβής είναι μικρή (από 11° σε 7°). Με βάση τη διαπίστωση αυτή, συνάγεται ότι η ύπαρξη έστω και λεπτών στρώσεων με αυξημένο ποσοστό αργιλικών ορυκτών σε μαργαϊκούς σχηματισμούς, συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του κινδύνου ολίσθησης των πρανών ακόμα και με ήπια κλίση.



Σχ. 9-6 Επίδραση της αναλογίας μάργας – μπετονίτη στη παραμένουσα διατμητική αντοχή των μαργών (Τσιαμπάος, 1984)

Ο Τσιφουτίδης (1993) χρησιμοποιώντας τις συσκευές Bromhead και Armfield πραγματοποίησε δοκιμές στρέψης σε δείγματα μάργας και αργιλώδους μάργας από διάφορες περιοχές της Ελλάδος (Πρέβεζα-Ηγουμενίτσα, Κόρινθο, Ηράκλειο, Αμαλιάδα). Τα περισσότερα δείγματα από τη περιοχή της Κορίνθου παρουσιάζουν τιμή παραμένουσας γωνίας τριβής που κυμαίνεται από 21,8° μέχρι 26,6° (για ορθό φορτίο 200 – 400 kPa) και εμφανίζουν μια πτώση του λόγου τ' / σ'_h με την αύξηση της ορθής τάσης, η οποία δεν υπερβαίνει το 35% της αρχικής τιμής. Αντίθετα, τα δείγματα από τις άλλες

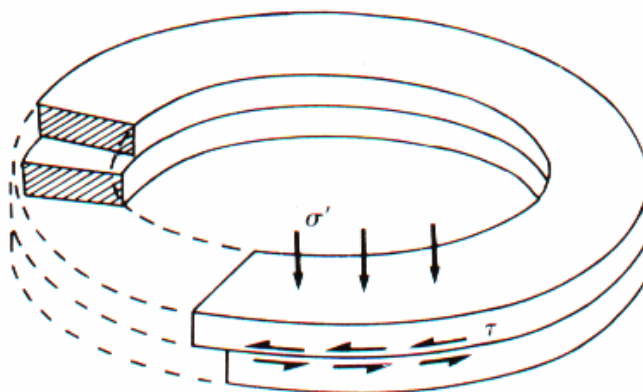
περιοχές, επιδεικνύουν μια ποικιλόμορφη συμπεριφορά. Η τιμή της παραμένουσας γωνίας τριβής στα δείγματα της Πρέβεζας – Ηγουμενίτσας κυμαίνεται από $11,3^\circ$ - $18,8^\circ$ και στα δείγματα της Αμαλιάδος από 14° - $16,7^\circ$, ενώ η πτώση του λόγου τ_t / σ'_n ήταν της τάξης του 10 έως 15% .

9.2 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “ΤΟΜΕΑ-6”

9.2.1 Περιγραφή της συσκευής δακτυλιοειδούς διάτμησης τύπου Bromhead

Για το προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των μαργαϊκών οριζόντων του “Τομέα-6”, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης τύπου Bromhead που εγκαταστάθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας.

Για τη πραγματοποίηση της δοκιμής (Σχ. 9-8), το αναζυμωμένο δοκίμιο πάχους 5 mm, διαμορφώνεται μέσα σ’ ένα δακτύλιο με εξωτερική και εσωτερική διάμετρο 100 και 70 mm αντίστοιχα (Φωτ. 9-1).



Σχ. 9-8 Δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης

Το δοκίμιο περιορίζεται κατακόρυφα μεταξύ πορωδών πλακών με τραχείες επιφάνειες και ακτινικές εγκοπές.

Η δακτυλιοειδής μήτρα του δοκιμίου τοποθετείται μέσα στο κελί διάτμησης (Σχ. 9-9, Σχ. 9 - 10, Φωτ. 9-2), το οποίο μπορεί να πληρωθεί με νερό προκειμένου η δοκιμή να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες κορεσμού. Η κατακόρυφη τάση εφαρμόζεται μέσω ενός ζυγού - μοχλού φόρτισης που δεκαπλασιάζει το φορτίο που επιβάλλεται στο άγκιστρο του ζυγού. Η προκαλούμενη κατακόρυφη μετακίνηση της πάνω πλάκας του δοκιμίου, καταγράφεται τόσο κατά την διάρκεια της προετοιμασίας (στερεοποίησης) όσο και κατά την διάρκεια της διάτμησης, μέσω ενός μηκυνσιόμετρου που εγκαθίσταται στη κορυφή του ζυγού φόρτισης (Φωτ. 9-2).

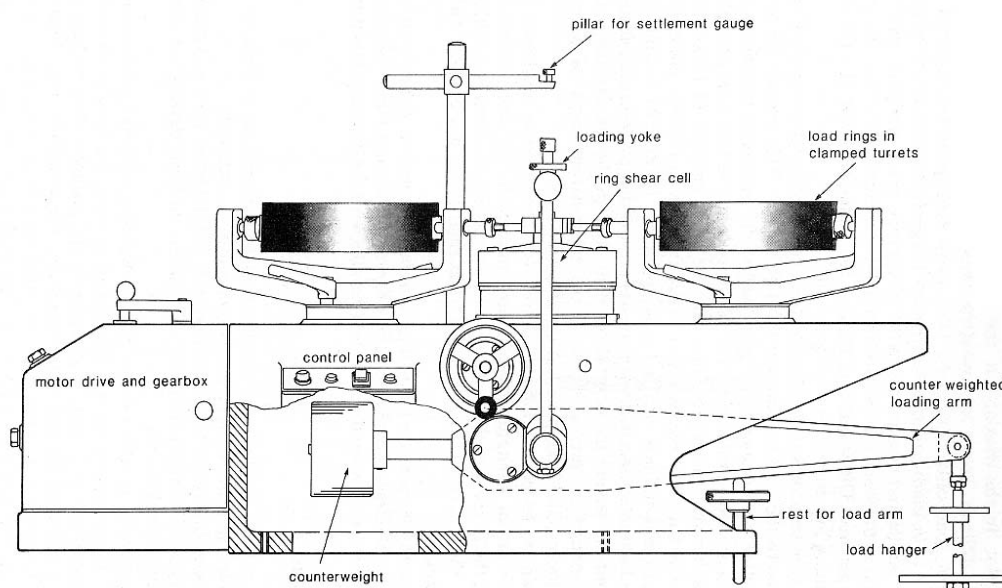


Φωτ. 9-1 Τοποθέτηση αναζυμωμένου δείγματος μάργας στη δακτυλιοειδή μήτρα

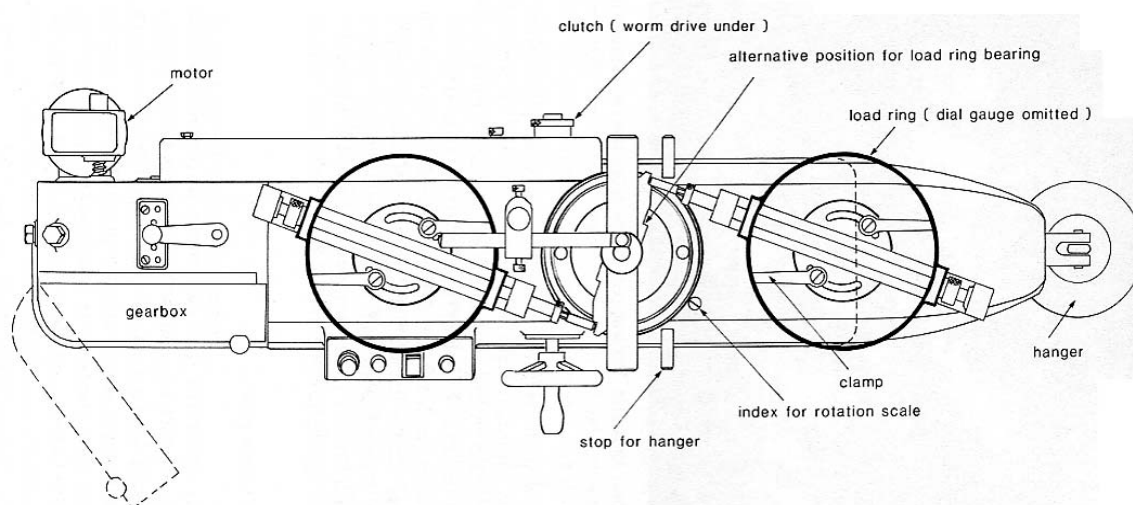
Το κελί διάτμησης με την δακτυλιοειδή μήτρα περιστρέφεται με την βοήθεια ενός ηλεκτροκινητήρα. Ο ρυθμός περιστροφής επιλέγεται με τη βοήθεια του μοχλού ταχυτήτων και μπορεί να κυμαίνεται από 60 έως 0,024 deg / min. Μια κλίμακα με διαβάθμιση από 0° έως 360°, που βρίσκεται περιμετρικά της πλάκας περιστροφής, παρέχει την δυνατότητα ελέγχου της περιστροφής του κελιού.

Επίσης, ένας βραχίονας που είναι προσαρμοσμένος στη πάνω πλάκα φόρτισης της μήτρας, αντιδρά έναντι δυο δυναμομετρικών δακτυλίων (στους οποίους έχουν τοποθετηθεί μηχανοσκόμμετρα ίδιας ακρίβειας), για την μέτρηση της επιβαλλόμενης ροπής (Σχ. 9-9, 9-10, Φωτ. 9-2, Σχ. 9-12). Ο βραχίονας έχει δυο διαφορετικές θέσεις αντίδρασης των δυναμομετρικών δακτυλίων που επιλέγονται ανάλογα με τα φορτία και το εύρος μέτρησης των δακτυλίων.

Τυχόν διαφορές στη δυσκαμψία των δυναμομετρικών δακτυλίων πιθανόν να προκαλέσουν μια ασύμμετρη φόρτιση και τριβή στον κεντρικό άξονα περιστροφής της μήτρας. Το πρόβλημα της τριβής οξύνεται και από πιθανή κλίση της πλάκας φόρτισης. Εξάλλου, μη ελεύθερη κίνηση της πάνω πλάκας του δοκιμίου ως προς την δακτυλιοειδή μήτρα, είναι δυνατόν να προκληθεί και από πιθανή εξώθηση του δείγματος κατά τη διάτμηση. Για το λόγο αυτό, το γεωυλικό που κατά την διάρκεια της δοκιμής αποβάλλεται της μήτρας, θα πρέπει να απομακρύνεται με χρήση υδροβολέα που παρέχει νερό υπό πίεση.



Σχ. 9-9 Διάταξη της συσκευής διάτμησης σε στρέψη (Bromhead, 1986)



Σχ. 9-10 Κάτοψη της συσκευής διάτμησης σε στρέψη (Bromhead, 1986)

Η περιστροφή του κελιού με την δακτυλιοειδή μήτρα, προκαλεί διάτμηση στο δοκίμιο, σχηματίζοντας μια επιφάνεια διάτμησης κοντά στη πάνω πλάκα φόρτισης του δοκιμίου. Η πλάκα αυτή είναι αρκετά τραχεία ώστε να αποτρέπει ολίσθηση του εδάφους ως προς την επιφάνεια της.

Η μέγιστη ορθή τάση που μπορεί να επιβάλλει η συσκευή είναι 1000 kPa, ενώ η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση μετράται με δυναμομετρικούς δακτυλίους μέγιστου φορτίου 0,5 kN. Για την ακριβή και αξιόπιστη λήψη των μετρήσεων, τοποθετήθηκαν ψηφιακά μηκυνσιόμετρα και η καταγραφή των παραμορφώσεων τους έγινε μέσω του συστήματος MPX32 Datalogger.

9.2.2 Προετοιμασία των δοκιμίων

Το δοκίμια διαμορφώθηκαν από εδαφικό υλικό που μετά τον αποχωρισμό των κόκκων που είχαν συσσωματωθεί, διήλθε εν ξηρώ από κόσκινο τετραγωνικής οπής 1,18 mm. Στη συνέχεια με προσθήκη απιονισμένου νερού, αναζυμωνόταν μέχρι να προκύψει μια εύπλαστη μάζα και ετοποθετείτο σ' ένα κλειστό υποδοχέα για 24 ώρες για πλήρη εμποτισμό του. Το δοκίμιο διαμορφωνόταν με το χέρι, μέσα στην δακτυλιοειδή μήτρα της συσκευής Bromhead, με προσοχή ώστε να αποφευχθεί εγκλωβισμός αέρα μέσα στην μάζα του. Στη συνέχεια, η ανώτερη επιφάνεια του επιπεδωνόταν με χρήση λεπίδας, κινώντας την προς τη κατεύθυνση κίνησης της πάνω πλάκας κατά τη διάτμηση (Φωτ. 9-1). Η παραπάνω ενέργεια διευκολύνει το προσανατολισμό των τεμαχιδίων στη ζώνη όπου θα αναπτυχθεί η επιφάνεια διάτμησης.

Στη συνέχεια, ελπιαίνεται ο κεντρικός άξονας περιστροφής του κελιού διάτμησης για μείωση των τριβών, ετοποθετείτο η δακτυλιοειδής μήτρα και το κελί γέμιζε με απιονισμένο νερό (Φωτ. 9-2). Τέλος, πριν από την έναρξη της δοκιμής επιτρεπόταν ο πλήρης κορεσμός του δοκιμίου με αναμονή μερικών ωρών. Η προαναφερόμενη διαδικασία προετοιμασίας του δοκιμίου ήταν σύμφωνη με την οδηγία BS 1377 : Part 7 : 1990, (Head, 1992).



Φωτ. 9-2 Συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης Bromhead

9.2.3 Διαδικασία διάτμησης

Οι περισσότερες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας τρεις τουλάχιστον φάσεις διάτμησης με διαφορετικά ορθά φορτία.

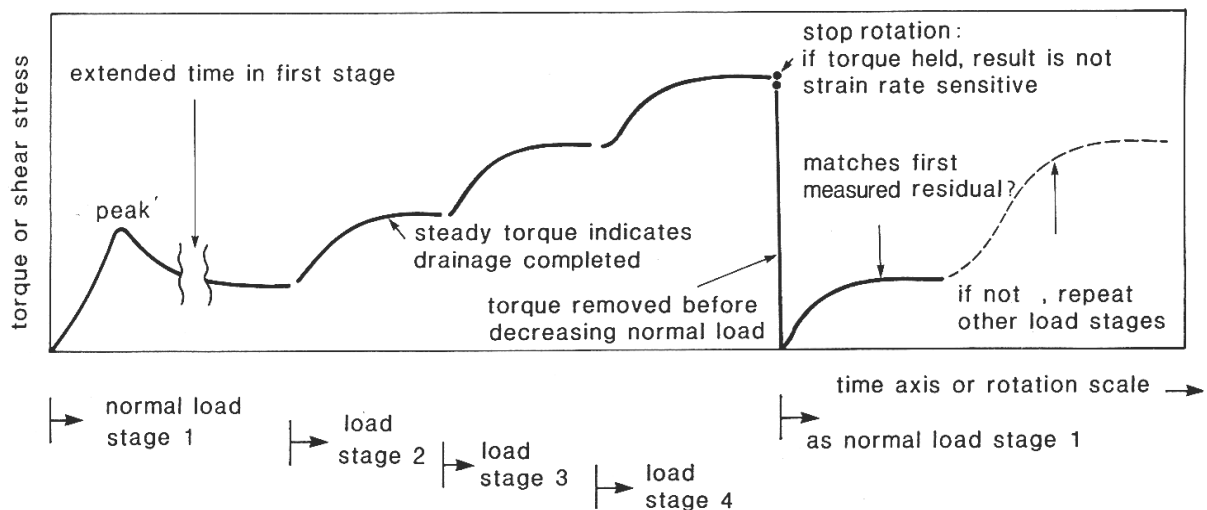
Πριν από την έναρξη κάθε φάσης, το δείγμα εστερεοποιείται κάτω από το επιβαλλόμενο φορτίο για 24h. Στη συνέχεια, για τη ταχύτερη ενεργοποίηση της παραμένουσας αντοχής, επραγματοποιείται ταχεία διάτμηση. Ο ηλεκτροκινητήρας ετίθεται σε κίνηση για 2-3 min με ταχύτητα 6 mm/min. Η ενέργεια αυτή (που επραγματοποιείται πριν την αρχική φάση της δοκιμής), είχε σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη της επιφάνειας διάτμησης. Στη συνέχεια, το δοκίμιο αποφορτιζόταν από την επιβαλλόμενη ροπή και η δοκιμή διεκόπτετο για 1/2 έως 1 h προκειμένου να εκτονωθεί η πίεση του νερού των πόρων που τυχόν είχε αναπτυχθεί.

Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας, ακολουθούσε η “τυπική” διάτμηση του δοκιμίου. Εξαιτίας του μικρού πάχους, οι ενδείξεις της στερεοποίησης δεν ήταν δυνατόν να δώσουν μια αξιόπιστη τιμή του t_{100}^{**} που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ρυθμού διάτμησης. Ως εκ τούτου, η ταχύτητα περιστροφής, επελέγη με βάση βιβλιογραφικές αναφορές και με στόχο να είναι αρκετά αργή προκειμένου να αποφευχθεί η ανάπτυξη πίεσης στο νερό των πόρων. Κρίθηκε ότι μια ταχύτητα 0,048 deg/min (=0,0356 mm/min) ήταν ικανοποιητική (Lupini *et al.*, 1981, Τσιαμπάος 1988, Tsifoutidis 1993). Αυτό επιβεβαιώθηκε με την διακοπή της διάτμησης κατά την διάρκεια της δοκιμής και την διατήρηση της ροπής που εφαρμοζόταν στο δοκίμιο. (Οι ενδείξεις των μηχανοσυστημάτων δεν μεταβαλλόταν).

Η διάτμηση του δοκιμίου με το πρώτο ορθό φορτίο, συνεχιζόταν για χρονικό διάστημα 24h. Μετά το τέλος της πρώτης φάσης, η τάση αυξανόταν και το δείγμα εστερεοποιείτο κάτω από το νέο φορτίο για άλλες 24 h. Στη συνέχεια, ακολουθούσε και πάλι διάτμηση στον ίδιο πάντοτε ρυθμό (Σχ. 9-11). Η διαδικασία επαναλαμβανόταν για όλα τα επόμενα φορτία (στο ίδιο δοκίμιο). Συνήθως μια ακολουθία τριών διαφορετικών ορθών φορτίων ήταν ικανοποιητική για το προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής του δοκιμίου.

Μετά την ολοκλήρωση της διάτμησης κάτω και από την μεγαλύτερη ορθή τάση, η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα διεκόπτετο και ακολουθούσε μια σειρά διατμήσεων με σταδιακή μείωση του ορθού φορτίου (Σχ. 9-11), (ανάλογη της σειράς που είχε προηγηθεί με αυξανόμενη φόρτιση). Εφόσον οι ενδείξεις των δυναμομετρικών δακτυλίων ήταν παραπλήσιες με αυτές της αρχικής διάτμησης, η δοκιμή εθεωρείτο επιτυχής και πλήρης. Στην περίπτωση που οι ενδείξεις διέφεραν σημαντικά, η δοκιμή επαναλαμβανόταν. Τέλος, μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, προσδιοριζόταν η υγρασία σε αντιπροσωπευτικό δείγμα του δοκιμίου.

^{**} χρόνος ολοκλήρωσης της στερεοποίησης



Σχ. 9-11 Πρόγραμμα μιας πλήρους δοκιμής στη συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης (Bromhead, 1986)

9.2.4 Προσδιορισμός της παραμένουσας γωνίας τριβής

Θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή της ενεργής (σ'_n) και της διατμητικής τάσης (τ) πάνω στην επιφάνεια αστοχίας^{††}, η ενεργή τάση (σ'_n) που εφαρμόζεται πάνω στο δοκίμιο δίδεται από τη σχέση :

$$\sigma'_n = \frac{9810 * W}{A} \quad (\text{kPa}) \quad [9.1]$$

όπου W = το ορθό φορτίο σε kg

$A = \pi (R_2^2 - R_1^2)$ η επιφάνεια διάτμησης του δακτυλιοειδούς δοκιμίου και

R_1 και R_2 η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δοκιμίου σε mm

(Για τη συσκευή του Εργαστηρίου, $R_1 = 50 \text{ mm}$ και $R_2 = 35 \text{ mm}$,

οπότε $A = 4006 \text{ mm}^2$).

Η φαινόμενη μέση γραμμική μετατόπιση (D), δηλαδή η μετακίνηση της κάτω πλάκας του δοκιμίου, δίδεται από τη σχέση:

$$D = \frac{\theta * r}{57,3} \quad (\text{mm}) \quad [9.2]$$

^{††} οπότε και τα σφάλματα για γωνίες $\phi_r' < 18^\circ$, δεν υπερβαίνουν το $\pm 2\%$

όπου r η μέση ακτίνα ($r = \frac{R_1 + R_2}{2}$) και

θ η μετρούμενη γωνία περιστροφής σε μοίρες.

(Η ταχύτητα μετατόπισης σε μοίρες / λεπτό, πολλαπλασιαζόμενη

με τον συντελεστή 0,742 δίδει την αναπτυσσόμενη ταχύτητα σε mm / min).

Η μέση γραμμική μετατόπιση (d) της πάνω πλάκας υπολογίζεται από τη σχέση :

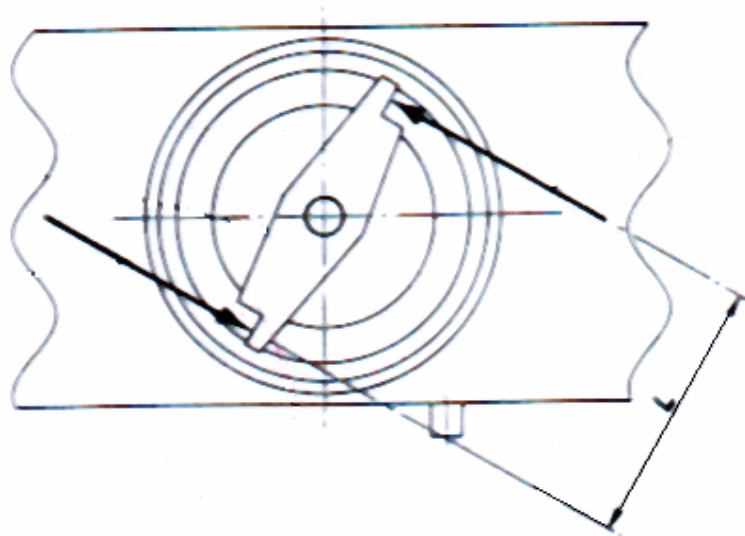
$$d = \frac{(A + B) * F * r}{L} \quad (\text{mm}) \quad [9.3]$$

όπου A, B οι ενδείξεις (divisions) των δύο δυναμομετρικών δακτυλίων

F ο συντελεστής μετατροπής των ενδείξεων των μηκυνσιόμετρων των δυναμομετρικών δακτυλίων σε mm (ισούται με 0,001 mm/division).

r η μέση ακτίνα (mm)

L η απόσταση των σημείων εφαρμογής των δυναμομετρικών δακτυλίων (150 mm) (Βλέπε Σχ. 9-12)



Σχ. 9-12 Σημεία εφαρμογής των δυναμομετρικών δακτυλίων

Με βάση τα παραπάνω, η διορθωμένη μέση γραμμική μετατόπιση (D_1), δηλ. η μετατόπιση της ανώτερης σε σχέση με τη κατώτερη πλάκα, προκύπτει από τη σχέση :

$$D_1 = D - d \quad [9.4]$$

Επίσης, για δεδομένο ζεύγος δυνάμεων, η ροπή (T) που αναπτύσσεται λόγω της διατμητικής αντίστασης του δοκιμίου, προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$T = \tau \int_{R_1}^{R_2} 2\pi r^2 dr = \tau \frac{2\pi}{3} (R_2^3 - R_1^3) \quad [9.5]$$

όπου τ η διατμητική τάση και
 R_1 και R_2 η εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του δοκιμίου.

Επιπλέον, η μέση ροπή (\bar{T}) που υπολογίζεται με βάση τους δυναμομετρικούς δακτυλίους, προκύπτει από την εξίσωση:

$$\bar{T} = \frac{f_1 \times A + f_2 \times B}{2} \times L \quad [9.6]$$

όπου f_1 και f_2 οι συντελεστές μετατροπής των ενδείξεων των δυναμομετρικών δακτυλίων σε δύναμη,

A & B οι ενδείξεις (divisions) των δυναμομετρικών δακτυλίων και

L η απόσταση των σημείων εφαρμογής τους.

Συνεπώς, η μέση διατμητική τάση ($\bar{\tau}$) που προκύπτει με βάση τις δυο παραπάνω εξισώσεις [9.5] και [9.6] ισούται με:

$$\bar{\tau} = \frac{3 * L(f_1 \times A + f_2 \times B)}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)} \times 1000 \quad (\text{kPa}) \quad [9.7]$$

Από τις μετρήσεις και την γραφική παράσταση της μέσης διατμητικής τάσης ($\bar{\tau}$) ως προς την διορθωμένη μέση γραμμική μετατόπιση, προκύπτει η παραμένουσα διατμητική αντοχή τ_r για κάθε επιβαλλόμενο ορθό φορτίο, (Σχ. 9-13).

Τέλος, από την γραφική παράσταση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής (τ_r) συναρτήσει της ορθής τάσης (σ'_n) για όλα τα δοκίμια του ίδιου δείγματος, προκύπτει η παραμένουσα γωνία τριβής ϕ'_r και η συνοχή c'_r (Σχ. 9-14). Θεωρώντας ότι η συνοχή είναι αμελητέα, η σχέση μεταξύ της διατμητικής αντοχής (τ_r) και της ορθής τάσης (σ'_n) δίδεται από την εξίσωση

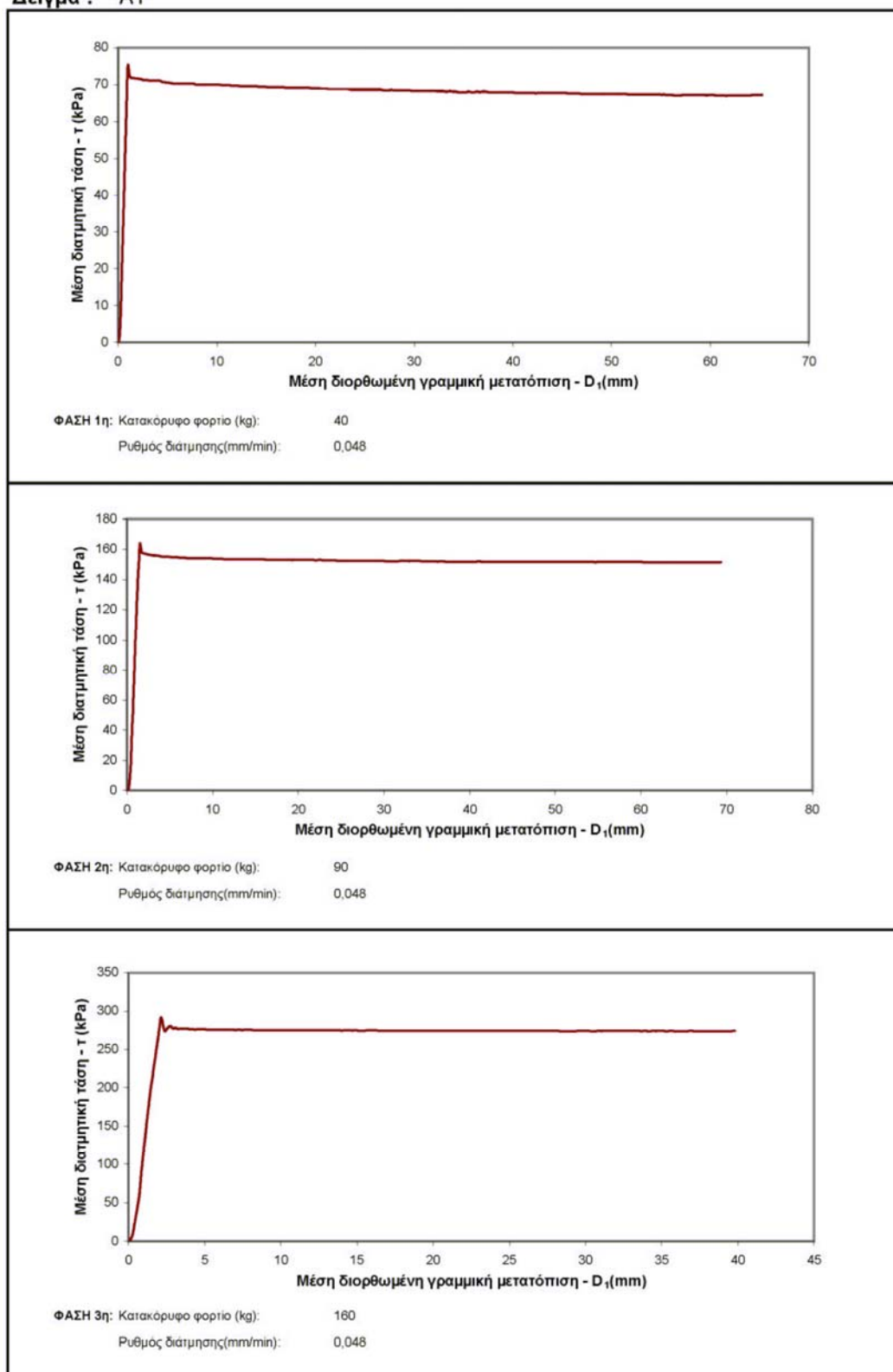
$$\tau_r = \sigma'_n \tan(\phi'_r) \quad [9.8]$$

και η παραμένουσα γωνία τριβής υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\phi'_r = \arctan(\tau_r / \sigma'_n) \quad [9.9]$$

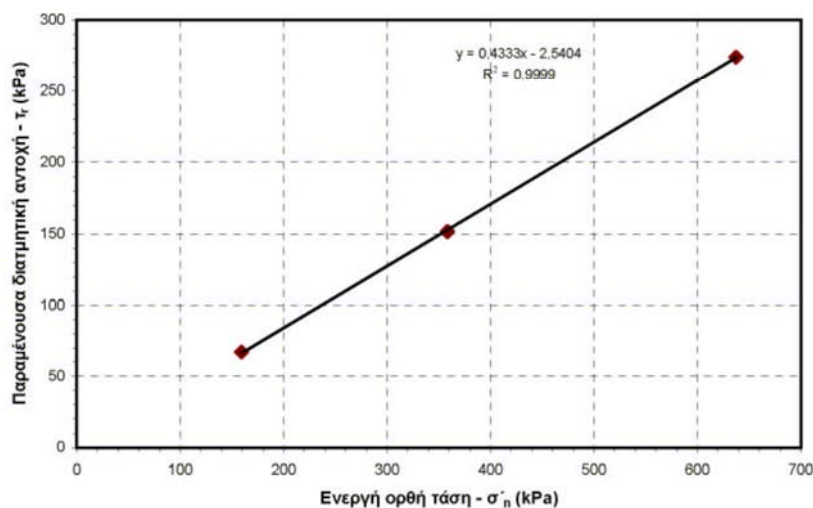
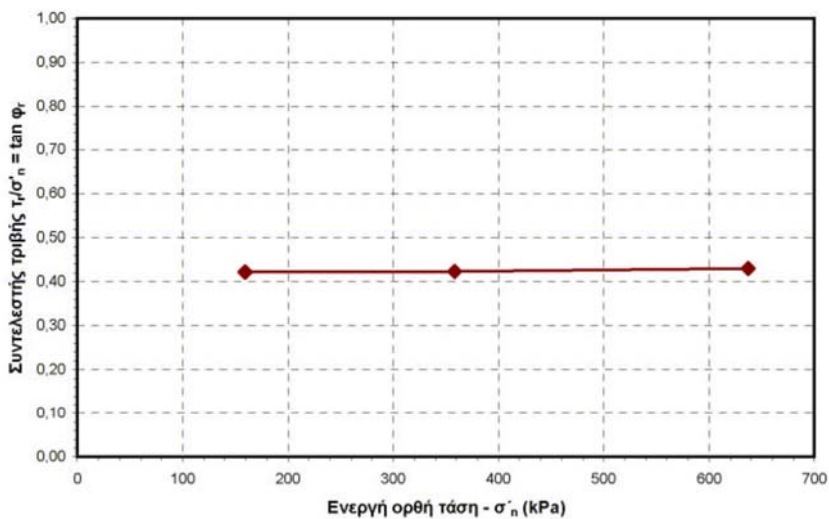
ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Δείγμα : A1



Σχ. 9-13 Αποτελέσματα δοκιμής σε στρέψη (Δείγμα A1)

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



Δείγμα : A1

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ (kPa)	τ / σ'_n
1	40	159,25	67,16	0,422
2	80	318,51	151,52	0,476
3	160	637,01	273,97	0,430

$c'_r =$	5,94	ή	0	kPa
$\varphi'_r =$	23,07		23,67	deg

Σχ. 9-14 Εκτίμηση παραμέτρων παραμένουσας διατμητικής αντοχής (Δείγμα A1)

9.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ ΤΟΥ “TOMEA-6”

Τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης για το προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής τους, προερχόταν από τις θέσεις A1, A2, A3, B1, B2 και Γ2.

Επιπλέον, δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σ' ένα δείγμα λιγνίτη και σε δύο δείγματα μαργαϊκών οριζόντων, τα οποία προερχόταν από την δειγματοληπτική γεώτρηση ΓΤ6-1/95. Το πρώτο μαργαϊκό δείγμα αφορούσε την υποκείμενη μάργα, ενώ το δεύτερο (που είχε περιγραφεί στο πεδίο ως ανθρακομιγής μάργα), προερχόταν από τις στείρες ενστρώσεις της λιγνιτοφόρου στιβάδας.

Στα διαγράμματα των αποτελεσμάτων κάθε δοκιμίου, παρουσιάζεται η μέση διατμητική τάση συναρτήσει της μέσης διορθωμένης γραμμικής μετατόπισης για κάθε ενεργό ορθό φορτίο (Σχ. 9-13). Επίσης παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις του συντελεστή τριβής (τ_r / σ'_n) αλλά και της παραμένουσας διατμητικής αντοχής (τ_r) συναρτήσει της ενεργής ορθής τάσης (σ'_n), (Σχ. 9-14). Από το τελευταίο διάγραμμα προκύπτει η παραμένουσα γωνία τριβής με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και η συσχέτιση τους με την υγρασία, κοκκομετρία και την ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων παρουσιάζονται στο Πίνακα 9-1 και αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Αποτελέσματα Δακτυλιοειδούς Διάτμησης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές στα δείγματα A1, A2, A3, B1 και B2, προσδιόρισαν μια παραμένουσα γωνία τριβής που κυμαίνεται από 22,10° (A3) μέχρι 24,42° (B1) (βλέπε Πίνακα 9-1 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Αποτελέσματα δακτυλιοειδούς διάτμησης). Οι δοκιμές των δειγμάτων της γεώτρησης ΓΤ6-1/95 έδωσαν μια τιμή 22,26° για την υποκείμενη μάργα και 23,59° για την ανθρακομιγή μάργα, ενώ για τον λιγνίτη εκτιμήθηκε παραμένουσα γωνία τριβής 24,1°.

Οι τιμές αυτές είναι σχετικά υψηλές, αν συγκριθούν με αντίστοιχες τιμές αργιλικών εδαφών (Hawkins, 1985, Bishop, 1971), αλλά είναι παραπλήσιες άλλων μαργαϊκών σχηματισμών του Ελληνικού χώρου (Τσιαμπάος 1988, Tsifoutidis 1993). Το μέγεθος τους αποδίδεται στο περιεχόμενο CaCO_3 (που υπερβαίνει το 90%) ή και στα οργανικά, δεδομένου ότι το δείγμα B1 με το μεγαλύτερο ποσοστό οργανικών (8%) παρουσιάζει και την μεγαλύτερη παραμένουσα γωνία τριβής (24,4°), παραπλήσια αυτής του λιγνίτη.

Σε ότι αφορά το μηχανισμό διάτμησης των δειγμάτων και με βάση τους τρεις τύπους που προτάθηκαν από τους Lupini *et al.* (1981), φαίνεται ότι ο τύπος της κύλισης εκδηλώνεται κατά την διάτμηση των δοκιμίων. Στο γεγονός αυτό συνηγορούν:

- (i) οι υψηλές τιμές της παραμένουσας γωνίας τριβής, σε συνδυασμό με το μεγάλο ποσοστό σφαιρικών κόκκων ιλύος και λεπτόκοκκης άμμου, αλλά και
- (ii) η μακροσκοπική εξέταση της επιφάνειας διάτμησης των δοκιμίων, η οποία ήταν λεία χωρίς χαρακτηριστικές γραμμώσεις ολίσθησης.

Πίνακας 9-1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών δακτυλιοειδούς διάτμησης

Δείγμα	Υγρασία (%)	PL	Κόκκοι <2 μm (%)	Ταξινομηση USCS	Παραμένουσα γωνία τριβής φ _r (deg)	Ορυκτολογική σύσταση ^{‡‡}	Ποσοστό Οργανικών (%)
A1	53,7	24,19	-	MH	23,67	Ασβεστίτης 97%, χαλαζίας 1%, χλωρίτης 2%	-
A2	45,0	17,26	8,4	CL-ML	24,13	Ασβεστίτης 96%, σιδηροπυρίτης, ιλίτης, χαλαζίας	3
A3		13,98	-	MH	22,10	-	-
B1	54,0	16,10	5,1	MH	24,42	Ασβεστίτης 92%, σιδηροπυρίτης, χαλαζίας, μοσχοβίτης	8
B2		13,40	10,0	MH	22,29	Ασβεστίτης 99%, χαλαζίας 1%	5
Γ2	53,5	23,88	11,5	MH	23,55	Ασβεστίτης 96%, χαλαζίας 1%, μαρμαρυγίας 2%, χλωρίτης 1%	3
Υποκείμενη μάργα (ΓΤ6-1/95)	44,0	-	-	-	22,26	-	-
Ανθρακομιγής μάργα	50,0	-	-	-	23,59	-	-
Λιγνίτης	-	-	-	-	24,09	-	-

^{‡‡} Το ποσοστό αποδίδεται μόνο στο ανόργανο κλάσμα

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα δακτυλιοειδούς διάτμησης), δεν προκύπτει εξάρτηση της παραμένουσας γωνίας τριβής από το επιβαλλόμενο ορθό φορτίο. Δεν διαφαίνεται σαφής μείωση της παραμένουσας γωνίας τριβής με την αύξηση της ενεργής ορθής τάσης, (στο εύρος των 160 - 260 kPa), όπως έχουν διαπιστώσει οι Bishop (1971) και Τσιαμπάος (1988) σε άλλους βέβαια σχηματισμούς και σε μικρότερες τιμές ορθής τάσης (μέχρι περίπου 180 kPa). Πιθανότατα για φορτία μεγαλύτερα από 200 kPa, η μεταβολή του συντελεστή τριβής με την ενεργό ορθή τάση είναι ανεξάρτητη του μηχανισμού διάτμησης.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές της παραμένουσας γωνίας τριβής (Πίνακας 9-1) υπολείπονται έως και 10° των τιμών της γωνίας εσωτερικής τριβής που προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών, Κεφάλαιο 10). Η διαφορά είναι της τάξης των 12° για το δείγμα Γ2 και 7° για το δείγμα Β2, υποδεικνύοντας ψαθυρότητα των σχηματισμών (δηλ. χαλάρωση μετά τη θραύση). Η ένδειξη αυτή είναι σκόπιμο να διερευνηθεί περαιτέρω με τριαξονικές δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης.

10 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΜΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

10.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΕΥΝΑ ΤΗΣ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ

Ένα εργαστηριακό σύστημα προσδιορισμού παραμέτρων δυστροπίας (ακαμψίας) θα πρέπει να έχει δυνατότητα εφαρμογής ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων στο δοκίμιο, όπως επίσης και δυνατότητα ελέγχου της στράγγισης του και μέτρησης της πίεσης των πόρων που αναπτύσσεται στη μάζα τους.

Επιπρόσθετα θα πρέπει να έχει δυνατότητα να εφαρμόσει φορτίο είτε με ελεγχόμενη τάση είτε με ελεγχόμενη παραμόρφωση, αξονικά και αντιδιαμετρικά. Η απαίτηση αυτή είναι απαραίτητη για την προετοιμασία του δοκιμίου κάτω από μια προκαθορισμένη τασική κατάσταση και ένα συγκεκριμένο ιστορικό φόρτισης, αλλά και για την πραγματοποίηση δοκιμών τασικών διαδρομών με ελεγχόμενη τάση ή ελεγχόμενη παραμόρφωση.

Επιπλέον, το σύστημα θα πρέπει να μετρά με ακρίβεια τις μικρές παραμορφώσεις του εδαφικού δοκιμίου και τις αντίστοιχες υψηλές τιμές δυστροπίας στο αρχικό στάδιο φόρτισης του.

Όπως αναφέρουν οι Atkinson *et al.* (1993), παρόλο που ένας αριθμός διαφορετικών διατάξεων και τεχνικών έχουν αναπτυχθεί για τη μέτρηση των παραμορφώσεων, καμιά δεν καλύπτει τις απαιτήσεις σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται γύρω από συνήθεις κατασκευές σε στιφρά εδάφη και ασθενείς βράχους.

Η πλέον κατάλληλη συσκευή για τον προσδιορισμό των παραμέτρων δυστροπίας είναι η συσκευή φόρτισης ή έκτασης κυλινδρικού δοκιμίου, γνωστή σαν τριαξονική συσκευή.

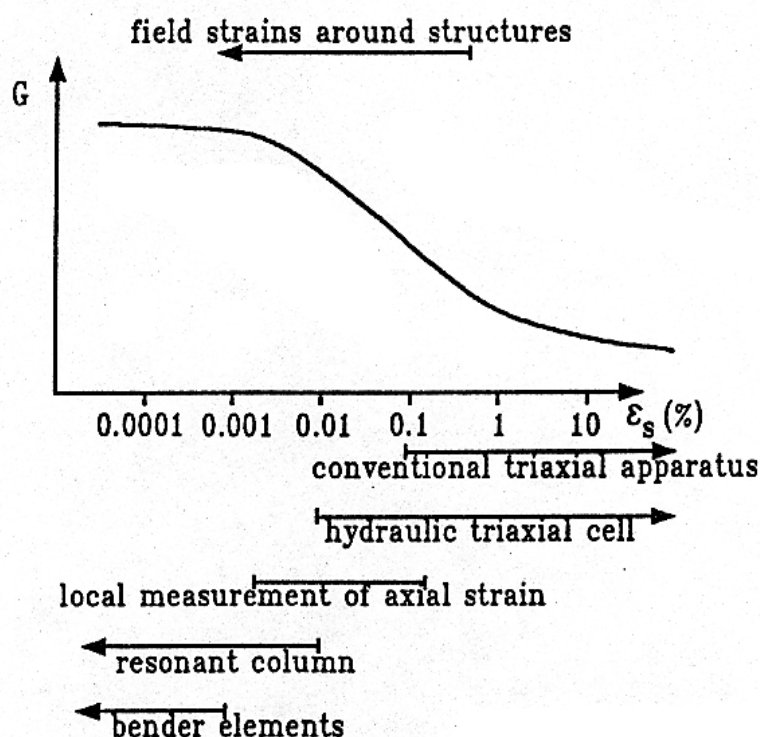
10.1.1 Συμβατική τριαξονική δοκιμή

Το δοκίμιο τοποθετείται σε μια κυψέλη και μέσω ενός πλαισίου φόρτισης επιβάλλεται σταθερός ρυθμός μετατόπισης σ' ένα έμβολο που φορτίζει το δοκίμιο. Αυτή η διάταξη δύσκολα εφαρμόζει ελεγχόμενες αξονικές τάσεις, που είναι απαραίτητες για δοκιμή τασικών διαδρομών ή για ανισότροπα φορτιζόμενη δοκιμή.

Επίσης, στη συγκεκριμένη συσκευή οι αξονικές παραμορφώσεις του δοκιμίου προσδιορίζονται από τη μετατόπιση του εμβόλου φόρτισης ως προς το κορυφαίο τμήμα της κυψέλης. Η τεχνική αυτή έχει σαν αποτέλεσμα ένα αριθμό σφαλμάτων και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση βασικών μόνο χαρακτηριστικών παραμόρφωσης του εδάφους.

Οι Atkinson *et al.* (1985) αναφέρουν ότι το σπουδαιότερο σφάλμα της συμβατικής τριαξονικής δοκιμής, προέρχεται από την κακή έδραση του εμβόλου φόρτισης στην κορυφαία πλάκα του δοκιμίου, γεγονός που προκαλεί μετακινήσεις του, οι οποίες δεν οφείλονται στην παραμόρφωση του δείγματος. Άλλα σφάλματα οφείλονται στην υποχωρητικότητα του κελιού φόρτισης (load cell) και στην κάμψη του δοκιμίου (ιδιαίτερα στην κορυφή και τη βάση του).

Επίσης οι Baldi *et al.* (1988) αναφέρουν ότι εκτιμήσεις δυστροπίας με συμβατικές τριαξονικές δοκιμές, είναι γενικά αναξιόπιστες για παραμορφώσεις μικρότερες από 1% της ανηγμένης παραμόρφωσης μη στερεοποιημένων δοκιμίων και για λίγο μικρότερες παραμορφώσεις στα ισότροπα στερεοποιημένα δοκίμια (Σχ. 10-1).



Σχ. 10-1 Διαφοροποίηση της δυστροπίας με την παραμόρφωση και αντίστοιχες τιμές μέτρησης (Atkinson *et al.*, 1993)

Με βάση τα παραπάνω, οι μετρήσεις της αξονικής παραμόρφωσης που πραγματοποιούνται στις συμβατικές τριαξονικές δοκιμές, είναι συνήθως ακατάλληλες για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς (τάσης – παραμόρφωσης) του εδάφους και την εκτίμηση παραμέτρων δυστροπίας που απαιτούνται στο σχεδιασμό των γεωτεχνικών έργων.

10.1.2 Υδραυλική τριαξονική συσκευή

Προκειμένου να διερευνηθεί αξιόπιστα η σχέση της τάσης – παραμόρφωσης που επιδεικνύει το έδαφος και οι παράγοντες που την επηρεάζουν (τασική κατάσταση, ιστορικό φόρτισης, τασική διαδρομή) έχουν αναπτυχθεί ειδικά εργαστηριακά συστήματα και τεχνικές. Η βασική τους καινοτομία αφορά την αξονική φόρτιση του δοκιμίου, η οποία πραγματοποιείται μέσω μιας υδραυλικής ή πνευματικής διάταξης.

Το πλέον γνωστό σύστημα που παρέχει ακρίβεια και ευελιξία φόρτισης, είναι η υδραυλική τριαξονική κυψέλη (Bishop and Wesley, 1975), (Σχ. 10-2). Είναι παρόμοια με τη συμβατική αλλά στην περίπτωση της υδραυλικής κυψέλης, η αξονική φόρτιση εφαρμόζεται μέσω ενός εμβόλου που είναι σε συναρμογή με την κατώτερη πλάκα φόρτισης του δοκιμίου. Διάφορες τροποποιήσεις του βασικού σχεδιασμού έχουν αναπτυχθεί, αλλά ουσιαστικά όλες στηρίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Η φόρτιση με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης επιτυγχάνεται υδραυλικά, χρησιμοποιώντας μία κλειστή διάταξη εμβόλου, ενώ έχουν αναπτυχθεί και συστήματα που επιτρέπουν τη αλλαγή της φόρτισης από ελεγχόμενης τάσης σε φόρτιση ελεγχόμενης παραμόρφωσης (Atkinson *et al.*, 1985). Οσον αφορά τα σφάλματα που οφείλονται στο έμβολο και στην επαφή του με την πλάκα φόρτισης, ελαχιστοποιούνται, αφού τα δύο αυτά εξαρτήματα είναι σε συναρμογή.

Υδραυλική φόρτιση θα μπορούσε να επιτευχθεί και στις συμβατικές τριαξονικές συσκευές εγκαθιστώντας απλά έναν υδραυλικό κύλινδρο σε σειρά με την τριαξονική κυψέλη. Το κύριο πρόβλημα αυτού του εγχειρήματος είναι οι τριβές που αναπτύσσονται στο έμβολο, οι οποίες μειώνουν την ακρίβεια του φορτίου πέρα από το επιτρεπτό όριο (Baldi *et al.*, 1988). Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση που αντιμετωπισθεί το πρόβλημα αυτό, η διερεύνηση παραμέτρων παραμόρφωσης που εξαρτώνται από την τασική κατάσταση, το ιστορικό και την τασική διαδρομή, απαιτεί χρήση υδραυλικής κυψέλης.

Τέλος, με τη χρήση της υδραυλικής κυψέλης, ενός κατάλληλου εσωτερικού κελιού μέτρησης του φορτίου (load cell) και με μια καλή βαθμονόμηση του συστήματος, είναι δυνατόν να επεκταθεί το εύρος αξιόπιστης μέτρησης της δυστροπίας μέχρι και το 0,01% της παραμόρφωσης (Σχ. 10-1).

10.1.3 Απαιτούμενη ακρίβεια των μετρήσεων για τον προσδιορισμό της δυστροπίας

Οι παράμετροι δυστροπίας (εφαπτομενικού ή τέμνοντος τύπου), προκύπτουν από τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Το μέτρο διάτμησης (G') και το μέτρο μεταβολής του όγκου (K') υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις:

$$3G' = dq' / d\varepsilon_s \quad [10.1]$$

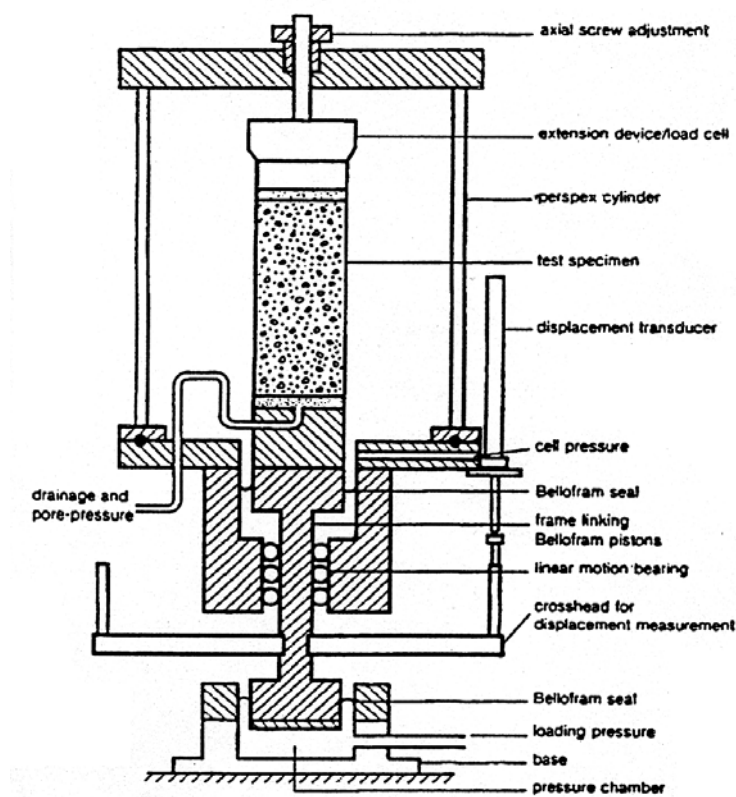
$$K' = dp' / d\varepsilon_v \quad [10.2]$$

όπου

q' : η αποκλίνουσα τάση, p' η μέση ενεργή τάση και

$\varepsilon_s = 2(\varepsilon_a - \varepsilon_r)/3$, όπου ε_a και ε_r οι ανηγμένες παραμορφώσεις αξονικά και αντιδιαμετρικά του δοκιμίου, ενώ

ε_v = η ογκομετρική παραμόρφωση

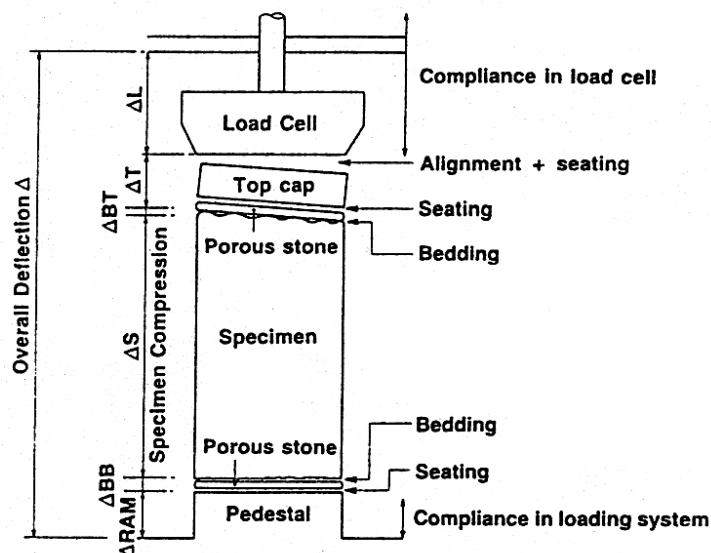


Σχ. 10-2 Διάταξη της υδραυλικής κυψέλης τασικών διαδρομών

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις, ο προσδιορισμός της δυστροπίας ελέγχεται από την ακρίβεια μέτρησης τόσο της τάσης όσο και της παραμόρφωσης. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κελιά φορτίου και αισθητήρες πίεσης, οι τάσεις είναι δυνατόν να μετρηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια (± 1 kPa), οπότε τα σοβαρά σφάλματα περιορίζονται στη μέτρηση των παραμορφώσεων. Γι' αυτές, η απαιτούμενη ακρίβεια αυξάνει με την αύξηση της δυστροπίας (δηλαδή από δεξιά προς τα αριστερά στο Σχ. 10-1), (Atkinson *et al.*, 1993).

10.1.3.1 Αξιοπιστία μέτρησης της παραμόρφωσης με μετρητές εξωτερικά της κυψέλης

Οι κυριότερες πηγές σφαλμάτων στη μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης κατά τις τριαξονικές δοκιμές με χρήση υδραυλικής κυψέλης (Σχ. 10-3), αφορούν τον περιορισμό κίνησης των άκρων του δοκιμίου και την τυχόν κάμψη του (Baldi *et al.*, 1988).



Σχ. 10-3 Πηγές σφαλμάτων μέτρησης αξονικής παραμόρφωσης σε τριαξονικές δοκιμές (Baldi *et al.*, 1988)

Όσον αφορά τα άκρα του δοκιμίου, η κίνηση τους περιορίζεται λόγω της τριβής τους με τις πλάκες φόρτισης. Αποτέλεσμα είναι το δοκίμιο να παραμορφώνεται ανομοιόμορφα, με αξονική και αντιδιαμετρική παραμόρφωση μηδενική στα άκρα του και μέγιστη στο μεσαίο τμήμα του. Δεδομένου λοιπόν ότι σ' ένα δοκίμιο (με ύψος διπλάσιο της διαμέτρου), η κίνηση των άκρων του περιορίζεται τοπικά, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του είναι λίγο έως πολύ ανεμπόδιστο, οι παραμορφώσεις του είναι σκόπιμο να μετρώνται κατά το δυνατόν στο ανεμπόδιστο αυτό τμήμα.

Επίσης, σφάλματα λόγω κάμψης προκύπτουν εξαιτίας της μη απόλυτης επιπέδωσης και παραλληλότητας των εδρών του δοκιμίου. Η κορυφαία πλάκα μπορεί να εδράζεται πάνω σε ανωμαλίες της επιφάνειας του δοκιμίου, ή και να έχει πλημμελή επαφή (στη μία μόνο άκρη του). Εξαιτίας της “σημειακής” αυτής φόρτισης, θα εμφανισθεί απότομη παραμόρφωση κατά την αρχική επιβολή του φορτίου έως ότου η κορυφαία πλάκα εδράσει πλήρως πάνω στο δοκίμιο.

Τέλος, σημαντική πηγή σφάλματος στη μέτρηση των μικρών παραμορφώσεων (στο αρχικό δηλαδή στάδιο της δοκιμής), αφορά και η μη ευθυγράμμιση του εμβόλου φόρτισης, ή του κελιού μέτρησης του φορτίου (load cell) με το κέντρο της κορυφαίας πλάκας, ιδιαίτερα όταν η επαφή τους γίνεται μέσω ενός σφαιρικού άκρου που εδράζεται σε κωνική εσοχή.

Με βάση τα παραπάνω, για αξιόπιστες εκτιμήσεις της δυστροπίας του εδάφους, κρίνεται επιβεβλημένη η μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων τοπικά, πάνω στο δοκίμιο.

10.1.3.2 Μετρήσεις μικρών παραμορφώσεων με χρήση τοπικών μετρητών

Πιθανά σφάλματα λόγω κάμψης, έδρασης και ευαισθησίας του συστήματος με το οποίο πραγματοποιείται η δοκιμή, ελαχιστοποιούνται χρησιμοποιώντας αισθητήρες που μετρούν τις παραμορφώσεις πάνω στο δοκίμιο (τόσο κατά την έννοια του άξονα, όσο και κατά την έννοια της διαμέτρου του). Ένας αριθμός διαφορετικών τέτοιων αισθητήρων έχει αναπτυχθεί, που ταξινομούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες (Tatsuoka *et al.*, 1993):

- αισθητήρες που προσαρμόζονται εξ ολοκλήρου στο δοκίμιο (δηλαδή καθόλο το μήκος τους),
- αισθητήρες που αγκυρώνονται στη βάση της κυψέλης και σ' ένα σημείο πάνω στο δοκίμιο και
- αισθητήρες που αγκυρώνονται στη βάση της κυψέλης και καταγράφουν κινήσεις στόχων που βρίσκονται πάνω στο δοκίμιο.

Οι αισθητήρες που προσαρμόζονται εξ ολοκλήρου πάνω στο δοκίμιο είναι οι πλέον δημοφιλείς. Βασίζονται σε διατάξεις που μετατρέπουν τη μετατόπιση σε περιστροφή, σε διατάξεις που στηρίζονται στο ηλεκτρικό φαινόμενο Hall, ή σε διατάξεις που έχουν τη μορφή χαλύβδινων ελατηρίων (λωρίδων).

Διάφορες έρευνες υποδεικνύουν ότι με τη μέτρηση της παραμόρφωσης πάνω στο δοκίμιο είναι δυνατόν να προκύψουν αξιόπιστες εκτιμήσεις των μέτρων δυστροπίας μέχρι 0,005% και με ιδιαίτερη προσοχή μέχρι και 0,001% της ανηγμένης παραμόρφωσης (Atkinson *et al.*, 1993), (Σχ. 10-1). Ας σημειωθεί ότι οι περισσότερες από τις καμπύλες δυστροπίας συναρτήσεως της παραμόρφωσης οι οποίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία, περικλύπονται στο εύρος από 0,001% μέχρι 0,01% της ανηγμένης παραμόρφωσης υποδηλώνοντας τα πιθανά όρια αξιοπιστίας των μετρήσεων.

Αισθητήρες τύπου “Hall effect” για μέτρηση της παραμόρφωσης των δοκιμίων

Η λειτουργία των αισθητήρων τύπου “Hall effect” στηρίζεται στο φαινόμενο Hall σύμφωνα με το οποίο, όταν ένας ημιαγωγός που διαρρέεται από ρεύμα, κινηθεί σ' ένα μαγνητικό πεδίο (*η ένταση του οποίου είναι κάθετη στη ροή του ρεύματος*), τότε στις άκρες του ημιαγωγού εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού.

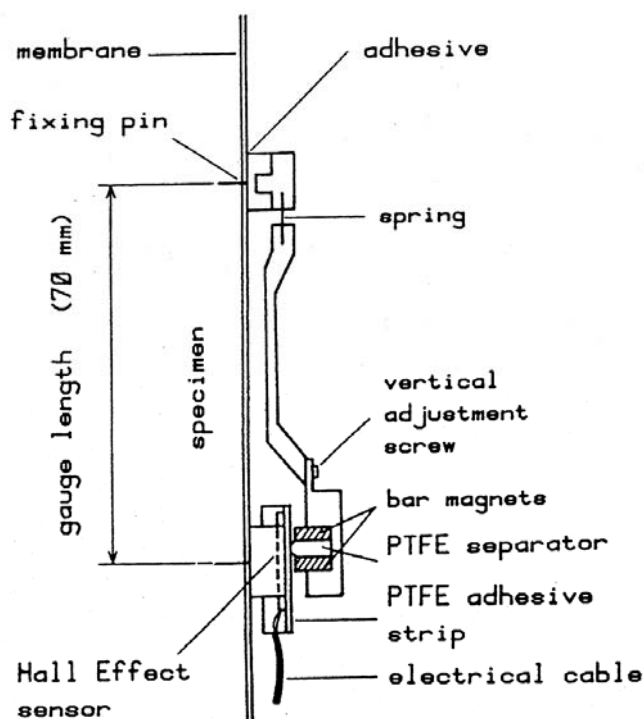
Οι αισθητήρες αυτοί αναπτύχθηκαν στο Πανεπιστήμιο του Surrey (Clayton and Khatroush, 1986, Clayton *et al.*, 1989). Απαιτούνται δύο τέτοιοι αισθητήρες για τη μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης (Σχ. 10-4, Φωτ. 10-2) και ένας για τη μέτρηση της μεταβολής της διαμέτρου του δοκιμίου.

Ο μετρητής αξονικής παραμόρφωσης αποτελείται από μια ευλύγιστη διάταξη στην άκρη της οποίας βρίσκεται ένας μαγνήτης (Σχ. 10-4, Φωτ. 10-2). Αναρτάται από μια βάση στήριξης που εγκαθίσταται στο ανώτερο τμήμα του δοκιμίου.

Στο κατώτερο τμήμα του δοκιμίου προσαρμόζεται ο φορέας με τον ημιαγωγό “Hall effect”, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το μαγνήτη της διάταξης (Clayton and Khatrush, 1986).

Ο μετρητής μεταβολής της διαμέτρου αποτελείται από ένα παχυμετρικό διαβήτη ο οποίος προσαρμόζεται στο δοκίμιο μέσω δύο βάσεων στήριξης. Το αισθητήριο (ημιαγωγός) “Hall effect” τοποθετείται σε κατάλληλη υποδοχή και κινείται ως προς ένα μαγνήτη με το άνοιγμα και κλείσιμο των σιαγόνων του διαβήτη.

Καθώς το δοκίμιο παραμορφώνεται, οι ημιαγωγοί μετακινούνται ως προς τους μαγνήτες και οι προκαλούμενες μεταβολές στην τάση καταγράφονται και ανάγονται σε παραμορφώσεις.



Σχ. 10-4 Μετρητής αξονικής παραμόρφωσης τύπου Hall effect (Clayton *et al.*, 1989)

Το εύρος αξιόπιστης μέτρησης των διατάξεων αυτών περιορίζεται σε 2,5 mm για την αξονική παραμόρφωση και σε 1,5 mm για την παραμόρφωση κατά την έννοια της διαμέτρου. Αν και είναι ακατάλληλες για μεγάλες παραμορφώσεις, οι διατάξεις αυτές έχουν αποδειχθεί ικανές για καταγραφές αξονικών παραμορφώσεων μέχρι ενός ελαχίστου 0,0014% και μέχρι 0,0028% για παραμορφώσεις κατά την έννοια της διαμέτρου - σε δοκίμια με διάμετρο 100 mm (Sholey *et al.*, 1995).

10.1.3.3 Εκτίμηση της δυστροπίας σε πολύ μικρές παραμορφώσεις με δυναμικές εργαστηριακές δοκιμές

Η δυστροπία σε πολύ μικρές παραμορφώσεις (Σχ. 10-1) είναι δυνατόν να εκτιμηθεί και με μετρήσεις της ταχύτητας εγκάρσιων ή διαμηκών κυμάτων που διατρέχουν το δοκίμιο (Pierpoint, 1996). Οι ταχύτητες αυτές μετρώνται χρησιμοποιώντας πιεζοκεραμικούς αισθητήρες (bender elements) που τοποθετούνται στις έδρες του δοκιμίου και δίδουν τη δυνατότητα καταγραφής πολύ μικρών ανηγμένων παραμορφώσεων (κάτω από 0,001%).

Μια άλλη δυναμική μέθοδος είναι αυτή της ηχητικής κολώνας (resonant column), κατά την οποία μετράται ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων (με μέγιστο όριο περίπου το 0,01% της ϵ_s). Το μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι η εφαρμογή της απαιτεί υποθέσεις αφορικά με τη συμπεριφορά του εδάφους, οι οποίες δεν είναι πάντα αποδεκτές, ιδιαίτερα σε μεγάλες παραμορφώσεις.

10.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Όπως αναφέρουν οι Tatsuoka *et al.* (1993), τα μέτρα δυστροπίας που εκτιμώνται με δοκιμές πεδίου συνήθως διαφέρουν σημαντικά από αυτά που προκύπτουν με εργαστηριακές δοκιμές. Τα αποκαλούμενα στατικά ελαστικά μέτρα (που εκτιμώνται από μοναξονικές ή τριαξονικές δοκιμές, δοκιμή φόρτισης πλάκας ή δοκιμές πρεσιομέτρου), είναι συχνά πολύ μικρότερα από τα αποκαλούμενα δυναμικά μέτρα που προκύπτουν από μετρήσεις πεδίου ή εργαστηρίου. Ως εκ τούτου θεωρούνται σαν ξεχωριστές και μη συνδεδεμένες μεταξύ τους παράμετροι.

Οι Tatsuoka *et al.* (1993) πραγματοποίησαν δοκιμές σε δείγματα ιλυολίθων και συμπέραναν ότι το αποκαλούμενο στατικό ελαστικό μέτρο του Young E_{initial} , όπως προσδιορίζεται με τις συμβατικές μεθόδους (μετρώντας τις παραμορφώσεις του δοκιμίου εξωτερικά της κυψέλης) είναι πολύ μικρότερο από τις τιμές E_{max}^* και E_f^\dagger και δεν αντιστοιχεί σε ελαστικές παραμορφώσεις. Χαρακτηρίστηκε σαν μια πολύ “υποκειμενική” τιμή και εισηγούνται ότι η χρήση αυτού του όρου θα πρέπει να σταματήσει.

Από τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποίησαν οι Tatsuoka *et al.* (1993) και τις αξονικές ανηγμένες παραμορφώσεις που μετρήθηκαν στις πλευρικές επιφάνειες των δοκιμίων, προέκυψαν ακριβείς και συνεχείς σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης, για παραμορφώσεις από 0,01%

* Το E_{max} προκύπτει βάσει των ανηγμένων παραμορφώσεων που είναι μικρότερες από 0,001%

† Το E_f προκύπτει από δοκιμές πεδίου με βάση τις ταχύτητες εγκάρσιων κυμάτων

μέχρι και μετά το μέγιστο της αντοχής. Επιπλέον, οι ανηγμένες παραμόρφώσεις που ήταν μικρότερες από περίπου 0,001%, ήταν ανακτήσιμες, δηλαδή η συμπεριφορά των δοκιμίων ήταν ελαστική, και η δυστροπία ανεξάρτητη από το ρυθμό της ανηγμένης παραμόρφωσης.

Για τέσσερα δείγματα ιζηματογενών μαλακών πετρωμάτων, τα μέγιστα μέτρα ελαστικότητας E_{max} που προσδιορίστηκαν με βάση τις τριαξονικές δοκιμές (και τις μετρήσεις των παραμορφώσεων πάνω στο δοκίμιο) ήταν παραπλήσια με τα δυναμικά μέτρα E_f που προέκυψαν με βάση τις ταχύτητες των εγκαρσίων κυμάτων που μετρήθηκαν στο πεδίο (field shear wave).

Εντούτοις, όπως έχει αναφερθεί, το εύρος της παραμόρφωσης για το οποίο ένα δεδομένο όργανο ή τεχνική, μπορεί να δώσει αξιόπιστες τιμές, είναι διαφορετικό (Σχ. 10-1), (Atkinson *et al.*, 1993). Επίσης, το εύρος εφαρμογής της κάθε μεθόδου δεν είναι καθορισμένο με ακρίβεια και εξαρτάται μεταξύ των άλλων από την ποιότητα του οργάνου και το χειριστή. Δυστυχώς, δεν υπάρχει σύστημα, το οποίο να μπορεί να καλύψει αξιόπιστα όλο το εύρος των παραμορφώσεων, και κατά συνέπεια διαφορετικές τεχνικές και όργανα είναι απαραίτητα για τη διερεύνηση της δυστροπίας στα διάφορα εύρη παραμόρφωσης.

10.3 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΔΥΣΤΡΟΠΙΑΣ ΜΑΡΓΑΪΚΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΩΝ

10.3.1 Πρόγραμμα των δοκιμών

Ο προσδιορισμός των παραμέτρων δυστροπίας των μαργαϊκών οριζόντων του “Τομέα-6”, πραγματοποιήθηκε με βάση την καμπύλη αποκλίνουσας τάσης - αξονικής παραμόρφωσης τριαξονικών δοκιμών. Το πρόγραμμα περιελάμβανε και κύκλο φόρτισης - αποφόρτισης του εκτροπέα των τάσεων, προκειμένου να προσδιορισθεί και το μέτρο δυστροπίας κατά την αποφόρτιση - επαναφόρτιση. Οι παράμετροι που προέκυψαν, επέτρεψαν την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωλογικού σχηματισμού.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με ελεγχόμενη φόρτιση και ολοκληρώθηκαν με τη θραύση των δοκιμίων. Ως εκ τούτου, εκτιμήθηκαν και οι παράμετροι αντοχής (c' , ϕ') οι οποίες είναι επίσης απαραίτητες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της εκσκαφής.

Δεδομένου ότι μια μη γραμμική σχέση της τάσης - παραμόρφωσης ήταν αναμενόμενη, κρίθηκε σκόπιμο οι μικρές παραμορφώσεις να μετρηθούν πάνω στο δοκίμιο με διατάξεις ακριβείας.

Η τριαξονική φόρτιση πραγματοποιήθηκε σ' ένα υδραυλικό κελί τύπου Bishop and Wesley, το οποίο είχε τροποποιηθεί ανάλογα προκειμένου να είναι δυνατή η μέτρηση των τοπικών παραμορφώσεων στην κεντρική ζώνη των δοκιμίων με χρήση αισθητήρων τύπου Hall effect.

Δύο απ' αυτούς τους αισθητήρες, τοποθετημένοι σε αντιδιαμετρικές θέσεις στις πλευρές του δοκιμίου, μετρούσαν την αξονική παραμόρφωση και ένας τρίτος αισθητήρας, στο μέσο του ύψους του δοκιμίου, μετρούσε τη μεταβολή της διαμέτρου του. Η πίεση των πόρων προσδιοριζόταν με ένα αισθητήρα πίεσης στη βάση του δοκιμίου, ενώ η μεταβολή του όγκου υπολογιζόταν μέσω μιας μονάδας μέτρησης που ήταν εγκατεστημένη στον ελεγκτή της επιβαλλόμενης πίεσης.

Η αρχική επιδίωξη να επαν-εγκατασταθούν στο δοκίμιο οι επιτόπου τάσεις, (δηλ. οι τασικές συνθήκες πεδίου), εγκαταλείφθηκε με σκοπό να αποφευχθούν υπερβολικές παραμορφώσεις του δοκιμίου κατά τη στερεοποίηση, αλλά και λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων επιβολής φορτίου του εργαστηριακού συστήματος. Ως εκ τούτου οι τάσεις στερεοποίησης των δοκιμίων υπολείπονται των τάσεων του πεδίου (οι οποίες ανέρχονται σε ≈ 780 kPa).

Η επιλογή του ρυθμού φόρτισης επελέγη με βάση την απαίτηση να επιτευχθούν συνθήκες στράγγισης και γενικά η μη εκτονούμενη πίεση των πόρων να είναι αρκετά μικρή προκειμένου τα αποτελέσματα των δοκιμών να μην επηρεάζονται σημαντικά.

Είναι γνωστό ότι η επιλογή του ρυθμού φόρτισης στις τριαξονικές δοκιμές, βασίζεται στο χρόνο μέχρι τη θραύση (Head, 1986, με πηγή αναφοράς τους Bishop and Henkel, 1962). Όπως αναφέρει ο Pierpoint (1996), άλλη μια προσέγγιση του ρυθμού φόρτισης για τασικές διαδρομές που απέχουν της θραύσης, έχει προταθεί από τον Cherrill (1990). Εντούτοις, δεν υπήρχε διαθέσιμος χρόνος προκειμένου να πραγματοποιηθεί παραμετρική μελέτη της επίδρασης του χρόνου και αποφασίστηκε κατ'αρχήν οι δοκιμές να πραγματοποιηθούν με ρυθμό φόρτισης (ονομαστικό ρυθμό μεταβολής της αξονικής τάσης) 25 kPa/h. Ο ρυθμός αυτός αποδείχθηκε στη συνέχεια ικανοποιητικός, τόσο για τη στράγγιση, όσο και για τη χρονική διάρκεια της κάθε δοκιμής. Κρίθηκε επίσης ότι μια τυχόν μικρή αύξηση της πίεσης των πόρων, θα έπρεπε να θεωρείται ανεκτή και ο ρυθμός αυτός χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να είναι επιτρεπτές οι μεταξύ τους συγκρίσεις.

10.3.2 Εργαστηριακό σύστημα τριαξονικής φόρτισης

Οι τριαξονικές δοκιμές για τη διερεύνηση της δυστροπίας των μαργαϊκών οριζόντων, πραγματοποιήθηκαν σ' ένα ηλεκτρονικά ελεγχόμενο σύστημα υδραυλικής τριαξονικής φόρτισης (Φωτ.10-1, Σχ.10-5), το οποίο είχε τη δυνατότητα να εφαρμόσει προδιαγεγραμμένες τασικές διαδρομές.

Το σύστημα εγκαταστάθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας και αποτελείται από:

- α) Την κλασσική τριαξονική κυψέλη τασικών διαδρομών τύπου Bishop and Wesley. Έδινε τη δυνατότητα εφαρμογής πίεσης στην κυψέλη μέχρι 1700 kPa και επιβολής αξονικού φορτίου 7 kN σε δοκίμια διαμέτρου 38 mm ή και 50 mm. Επίσης, περιελάμβανε εσωτερικό (καταδυόμενο) κελί

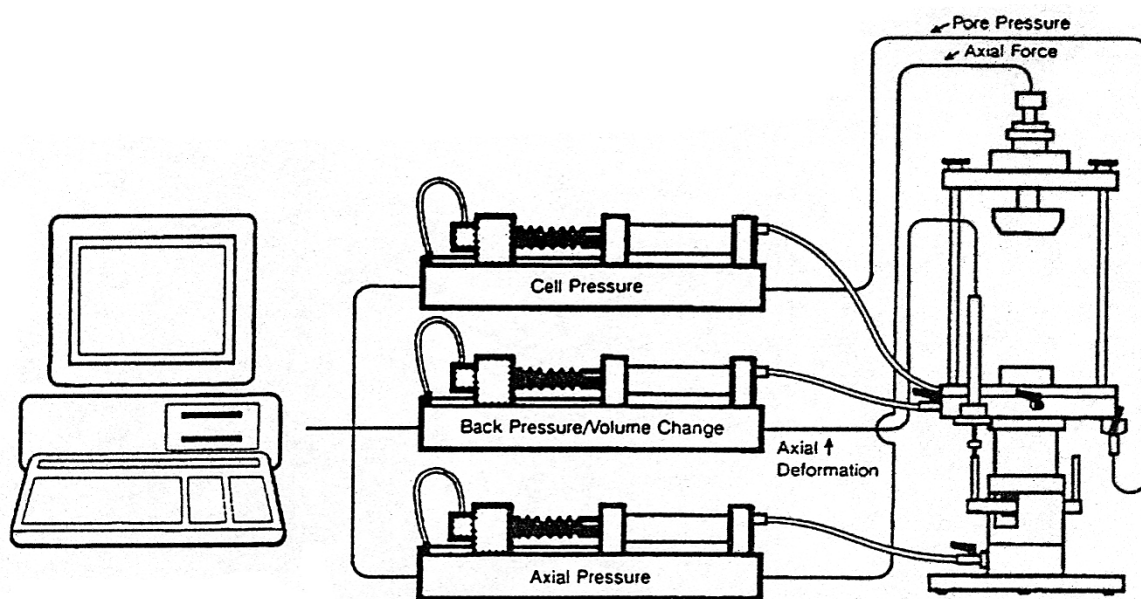
φορτίου 2 kN & 4 kN, αισθητήρα πίεσης των πόρων με δυνατότητα μέτρησης μέχρι 2000 kPa και ένα μετρητή της μετατόπισης (LVDT) με εύρος μέτρησης ± 20 mm. Ένα δεύτερο, εξωτερικό ψηφιακό μηκυνσιόμετρο χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα για τον έλεγχο των μετρήσεων της μετατόπισης.



Φωτ. 10-1 Σύστημα τριαξονικής φόρτισης για τη διερεύνηση της δυστροπίας των μαργών

- β) Τρεις ελεγκτές (controllers) πίεσης - όγκου (3 MPa / 200 cc) με δυνατότητα μέτρησης της μεταβολής του όγκου και ηλεκτρονική μονάδα απομακρυσμένης ανάδρασης (RFM). Η μονάδα αυτή δίδει τη δυνατότητα ένδειξης της μέτρησης ενός εξωτερικού αισθητήρα[‡] και τη δυνατότητα ελέγχου της επιβαλλόμενης πίεσης με βάση την ένδειξη αυτή.
- γ) Στο σύστημα περιλαμβάνονται και μηκυνσιόμετρα υψηλής ακρίβειας τύπου “Hall effect”, για τη μέτρηση των μικρών παραμορφώσεων πάνω στο δοκίμιο, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα λόγω κάμψης και έδρασης του δοκιμίου.

[‡] Εξωτερικός αισθητήρας νοείται ο αισθητήρας ο οποίος βρίσκεται εξωτερικά του ελεγκτή πίεσης (controller).



Σχ. 10-5 Σχηματική διάταξη του συστήματος τριαξονικής δοκιμής (GDS, 2000)

Το σύστημα είναι πλήρως ελεγχόμενο - προγραμματιζόμενο από PC μέσω του λογισμικού STDITS (Standard Triaxial Testing System) και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά (GDS, 2000):

1. Χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της μεταβολής του όγκου και της αξονικής παραμόρφωσης (μετατόπισης του εμβόλου) για να υπολογίζει τη μέση τρέχουσα επιφάνεια του δοκιμίου, η οποία λαμβάνεται υπόψη σε όλους τους υπολογισμούς ελέγχου της δοκιμής.
2. Η πίεση του νερού των πόρων μετράται στο βάθος έδρασης του δοκιμίου χρησιμοποιώντας έναν άκαμπτο αισθητήρα πίεσης πόρων.
3. Οι συνέπειες των τριβών του συστήματος, περιορίζονται μετρώντας το αξονικό φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο με καταδύόμενο κελί φορτίου (μέσα στην τριαξονική κυψέλη). Επίσης, η επιβαλλόμενη αποκλίνουσα τάση ελέγχεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή με βάση τις εξισώσεις των Bishop and Wesley (1975).
4. Η λήψη και καταγραφή των μετρήσεων πίεσης γίνεται μέσω των ηλεκτρονικών μονάδων ανάδρασης (RFMs) και τους ελεγκτές πίεσης - όγκου.

5. Η αξονική μετατόπιση μετράται άμεσα με τα μηκυνσιόμετρα του συστήματος και υπολογίζεται έμμεσα με βάση τη μεταβολή του όγκου στον κατώτερο θάλαμο εφαρμογής του αξονικού φορτίου.
6. Το σύστημα έχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης κλασσικών τριαξονικών δοκιμών (U-U, C-U, C-D), είτε με ελεγχόμενη παραμόρφωση είτε με ελεγχόμενη τάση (σε συμπίεση ή εφελκυσμό).
7. Τέλος, το σύστημα επιτρέπει τον προγραμματισμό μιας γραμμικής τασιακής διαδρομής. Οποιοσδήποτε συνεχόμενες τασιακές διαδρομές είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σταδιακά με παρέμβαση του χειριστή.

Η λήψη και η καταγραφή των μετρήσεων από τους αισθητήρες τύπου Hall effect που εγκαταστάθηκαν πάνω στο δοκίμιο αλλά και από το επιπλέον, εξωτερικά της κυψέλης ψηφιακό μηκυνσιόμετρο, πραγματοποιήθηκε μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρικών σημάτων (VJT 1400) και του καταγραφικού συστήματος MPX-32 Data Logger (Φωτ. 10-1).

Όλες οι μετρούμενες τιμές έχουν μία ανάλυση[§] η οποία είναι καλύτερη από 0,1% της κλίμακας των τιμών και η ακρίβεια^{**} λήψης των δεδομένων είναι καλύτερη από 0,5% της μέτρησης.

Ο έλεγχος της μετατόπισης πραγματοποιήθηκε μέσω της μεταβολής του όγκου του νερού στον κατώτερο θάλαμο της κυψέλης, αλλά και μέσω του εξωτερικού αισθητήρα μετατόπισης. Η ακρίβεια της μέτρησης για την αξονική μετατόπιση (μέσω του εξωτερικού αισθητήρα) είναι καλύτερη από 0,5% της πλήρους κλίμακας των τιμών και ο ρυθμός παραμόρφωσης επιτυγχάνεται με απόκλιση μικρότερη από 0,5% της επιλεγμένης τιμής. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10-1.

Βαθμονόμηση των επιμέρους μονάδων του συστήματος δεν πραγματοποιήθηκε, θεωρώντας την εργαστασιακή σαν αξιόπιστη. Μόνο στο μετατροπέα VJT, που συνέδεε τα μηκυνσιόμετρα τύπου Hall effect με το καταγραφικό MPX-32, πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση για τρεις πλήρεις κύκλους μετατόπισης, χρησιμοποιώντας μικρόμετρο ακριβείας.

Για τον έλεγχο του συστήματος και τη συλλογή - καταγραφή των πληροφοριών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό STDTTTS (Standard Triaxial Testing System) της GDS, που λειτουργεί σε περιβάλλον Windows. Οι μετρήσεις εισάγονταν σε λογισμικό φύλλο που διαμορφώθηκε κατάλληλα για την επεξεργασία τους.

[§] Ανάλυση (resolution) θεωρείται η μικρότερη διακριτή αύξηση που μπορεί να είναι αξιόπιστη.

^{**} Ακρίβεια (accuracy) είναι το όριο (σαν ποσοστό της κλίμακας της μέτρησης) μέσα στο οποίο οι μετρήσεις θεωρούνται αξιόπιστες.

Πίνακας 10-1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των μονάδων του συστήματος τριαξονικής φόρτισης (GDS, 2000)

Όνομα μονάδος	Κατασκευαστής	Τύπος	Εύρος μέτρησης	Ακρίβεια μέτρησης	Ανάλυση
Αισθητήρας πίεσης πόρων	GDS	Αισθητήρας τύπου ημιαγωγών, σ' ένα σχεδιασμό γέφυρας Wheaston. Μετατρέπει την πίεση που επιβάλλεται από παραμόρφωση ενός εσωτερικού διαφράγματος, σ' ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της επιβαλλόμενης πίεσης.	2000 kPa	Σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης 0,1% του εύρους μέτρησης.	
Κυψέλη	GDS	Υδραυλική κυψέλη τασικών διαδρομών	Μέγιστη πίεση κυψέλης 1700 kPa. Μέγιστο αξονικό φορτίο 7 kN και μέγιστη αξονική μετατόπιση 25 mm.		

Κελί φόρτισης	GDS	Εσωτερικό, καταδεδυμένο κελί λαδιού με αισθητήρες τύπου ημιαγωγών.	2 kN	Σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης 0,1% του εύρους μέτρησης.	Απόκριση σε μεταβολές της πίεσης του κελιού, μικρότερη από 0,2% / MPa.
Μετρητές παραμόρφωσης (εξωτερικά της κυψέλης)	GDS	LVDT	25 mm	Σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης $\pm 0,25\%$ του εύρους μέτρησης.	
	WF	Ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο	25 mm		
Μετρητές τοπικής παραμόρφωσης	GDS	Hall effect	2,5 mm για αξονική και 1,5 mm για αντιδιαμετρική μέτρηση		

10.3.3 Διεξαγωγή των δοκιμών

10.3.3.1 Ορισμός του επιπέδου αναφοράς των μετρούμενων πιέσεων

Στο σύστημα υπάρχουν τέσσερις αισθητήρες πίεσης, ένας για κάθε ελεγκτή^{††} και ένας για την πίεση του νερού των πόρων. Για όλους του αισθητήρες καθορίστηκε το μέσο του ύψους του δοκιμίου σαν επίπεδο αναφοράς (μηδενικής πίεσης).

10.3.3.2 Έλεγχος του συστήματος

Το σύστημα ελέγχθηκε για τη λειτουργία και την αξιοπιστία των μετρήσεων, τόσο αρχικά, όσο και μεταξύ διαφόρων δοκιμών, προκειμένου να διαπιστωθεί το μέγεθος των τριβών στην τριαξονική

^{††} που αφορούν την πίεση του κατωτέρου θαλάμου της κυψέλης, την κυψέλη και την αντιπίεση πόρων

κυψέλη, η σταθερότητα των ηλεκτρονικών μονάδων και ιδιαίτερα η βραχυχρόνια και μακροχρόνια συμπεριφορά των μηχανομετρώων. Πριν την έναρξη των μετρήσεων το σύστημα ετίθετο σε λειτουργία για τουλάχιστον 3-5 h προκειμένου όλες οι διατάξεις μετατροπής και τα συστήματα ελέγχου να αποκτήσουν σταθερή θερμοκρασία.

10.3.3.3 Προετοιμασία του δοκιμίου και εγκατάσταση του στη συσκευή

Από τα αρχικά δείγματα των μαργαϊκών σχηματισμών, απεκόπτετο με ηλεκτρική σέγα χειρός, τμήμα κατάλληλου μέγεθους για τη διαμόρφωση κυλινδρικού δοκιμίου με προσανατολισμό εγκάρσια στη στρώση. Με τη βοήθεια κυκλικού περιγράμματος που εχαράσσεται στην ανώτερη επιφάνεια του και με σταδιακή λάξευση χρησιμοποιώντας κατάλληλο οδηγό, διαμορφωνόταν δοκίμιο με διάμετρο 38 mm και ύψος 80 mm.

Για τη βέλτιστη διαμόρφωση των εδρών του δοκιμίου χρησιμοποιείται αυτοσχέδια μεταλλική μήτρα. Με οδηγούς τα άκρα της μήτρας και τη χρήση λεπίδας, οι επιφάνειες των άκρων διαμορφωνόταν ώστε να είναι επίπεδες, παράλληλες και κάθετες στον άξονα του δοκιμίου. Η όλη διαδικασία αποδείχθηκε επίπονη και επραγματοποιείται κάθε φορά που επρόκειτο να αρχίσει μια δοκιμή.

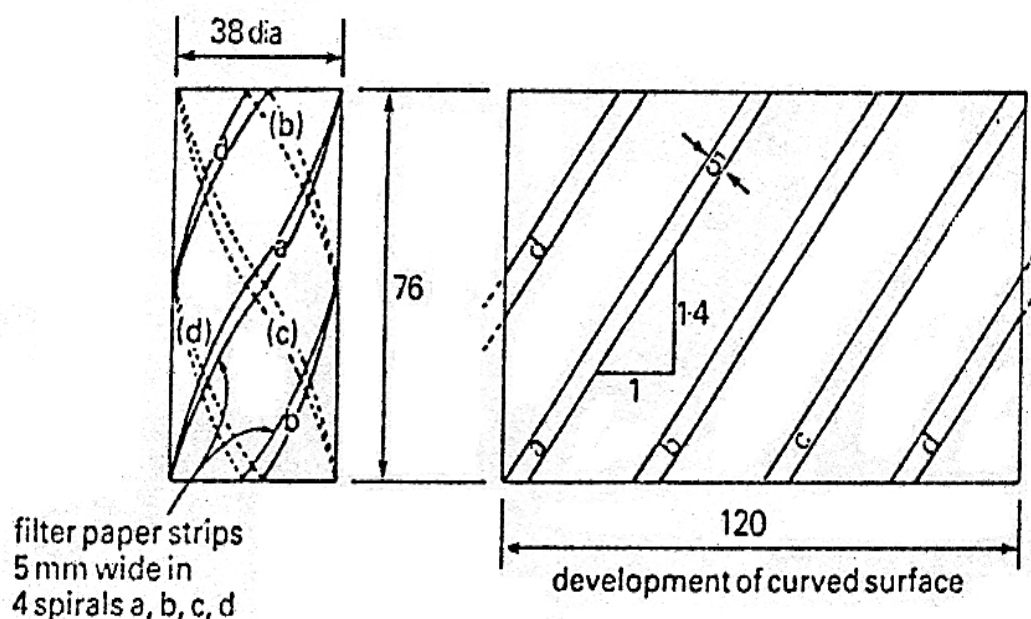
Οι πορώδεις δίσκοι καθαριζόταν με επιμέλεια (εάν απαιτείτο και με χρήση υπερήχων) και στη συνέχεια βράζονταν σε απιονισμένο - απαερωμένο νερό για περίπου 30 min. Στο μεταξύ γινόταν απαέρωση του συστήματος και ο ορισμός της μηδενικής πίεσης αναφοράς.

Ο ένας από τους δίσκους ετοποθετείτο στην έδρα της βάσης του δοκιμίου και η βαλβίδα της αντιπίεσης άνοιγε ελάχιστα, προκειμένου να εκρεύσει νερό μέσω του πορολίθου. Από το δοκίμιο απομακρυνόταν η διαφανής μεμβράνη (που είχε τοποθετηθεί μετά τη διαμόρφωση του για τη διατήρηση της υγρασίας του), επραγματοποιούνται οι απαραίτητες μετρήσεις για τον ακριβή προσδιορισμό των διαστάσεων του και στη συνέχεια το δοκίμιο ετοποθετείτο πάνω στον πορόλιθο της βάσης έδρασης του.

Τέσσερις λωρίδες από χαρτί Whitman No 54, πλάτους 5 mm ετοποθετούντο ελικοειδώς γύρω από το δοκίμιο (Σχ. 10-6) με κλίση 1,4 (κατακόρυφα) προς 1 (κατά την οριζόντιο). Οι λωρίδες αυτές επιταχύνουν το χρόνο κορεσμού του δοκιμίου, ενώ όπως αναφέρει ο Head (1986), η ελικοειδής τους διάταξη δεν επηρεάζει καθόλου τη μετρούμενη αντοχή είτε σε συμπίεση είτε σε έκταση. Το δε αποτέλεσμα της στράγγισης είναι ισοδύναμο με αυτό των συμβατικών λωρίδων στράγγισης.

Στη συνέχεια, προσαρμοζόταν η μεμβράνη κάλυψης του δοκιμίου και σφραγιζόταν στο βάθρο έδρασης του με λαστιχένια δαχτυλίδια. Στη μεμβράνη είχαν εκ των προτέρων σημειωθεί οι ακριβείς θέσεις που θα εγκατασταθούν στη συνέχεια οι μετρητές τύπου “Hall Effect”. Αφαίρεση τυχόν εγκλωβισμένων φυσαλίδων αέρα μεταξύ της μεμβράνης και του δοκιμίου επιτυγχάνετο σύροντας την παλάμη του χεριού με ελαφρά πίεση επί της μεμβράνης. Στην κορυφή του δοκιμίου ετοποθετείτο ο

δεύτερος πορόλιθος με το κορυφαίο κάλυμμα του δοκιμίου και η μεμβράνη εσφραγίζεται με δύο ακόμα λαστιχένιους δακτυλίους.



Σχ. 10-6 Τοποθέτηση πλευρικών λωρίδων στράγγισης στο δοκίμιο (Head, 1986)

10.3.3.4 Εγκατάσταση των μετρητών παραμόρφωσης τύπου Hall effect

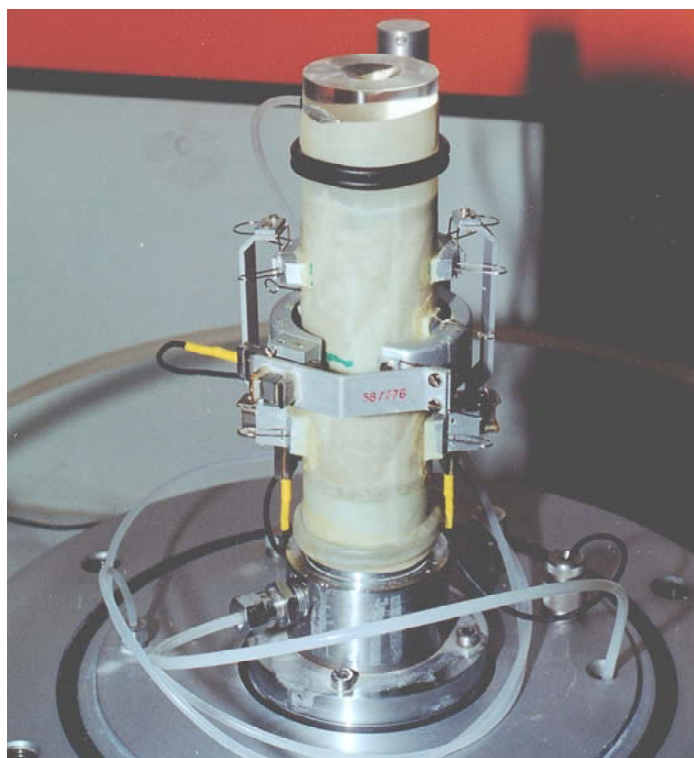
Για την εγκατάσταση των μετρητών παραμόρφωσης στις θέσεις που είχαν εκ των προτέρων σημειωθεί πάνω στη μεμβράνη, εκολλούνται αρχικά οι βάσεις στήριξης των αισθητήρων της αξονικής παραμόρφωσης στο κατώτερο τμήμα του δοκιμίου. Στη συνέχεια, ετοποθετείτο ο μετρητής της μεταβολής της διαμέτρου (με ταυτόχρονη συναρμολόγηση του) και ακολουθούσε η ολοκλήρωση της εγκατάστασης των μετρητών της αξονικής παραμόρφωσης, έτσι ώστε ο βραχίονας τους να αναρτάται σαν εκκρεμές από το κορυφαίο τμήμα του δοκιμίου (Φωτ. 10-2). Οι διατάξεις αυτές των αξονικών μετρητών ετοποθετούντο σε αντιδιαμετρικές πλευρές του δοκιμίου, με κατακόρυφο προσανατολισμό και εκάλυπταν το μέσο τρίτο του ύψους του.

Μετά από 12 h, οπότε η κόλλα είχε στερεοποιηθεί, οι αισθητήρες Hall effect ετοποθετούντο στις βάσεις στήριξης τους (απέναντι από το κατώτερο άκρο κάθε μαγνητικού βραχίονα).

Η απόσταση μεταξύ της ανώτερης και κατώτερης βάσης στήριξης κάθε μιας από τις διατάξεις των μετρητών της αξονικής παραμόρφωσης, μετράτο με ηλεκτρονικό βερνιέρο. Με βάση την απόσταση αυτή, που καταγραφόταν σαν αρχικό μήκος, υπολογιζόταν στη συνέχεια η ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου. Για τον ίδιο λόγο καταγραφόταν και οι αντίστοιχες ενδείξεις μέτρησης των αισθητήρων.

10.3.3.5 Κορεσμός

Το κορυφαίο τμήμα της κυψέλης ετοποθετείτο πάνω στη βάση της και εβιδώνοντο οι απαραίτητοι κοχλίες. Η κυψέλη γέμιζε με απιονισμένο – απαερωμένο νερό (που δεν επέτρεπε την ανάπτυξη βούρκου) και ακολουθούσε μια περίπου ώρα αναμονής, προκειμένου να εξισορροπηθεί η θερμοκρασία του συστήματος με εκείνη του περιβάλλοντος και να σταθεροποιηθεί η ένδειξη των αισθητήρων πίεσης και παραμόρφωσης. Στη συνέχεια, με την περιστροφή του κατάλληλου κοχλία ρυθμιζόταν η θέση του καταδυόμενου κελιού φόρτισης προκειμένου να έρθει σε επαφή με το κορυφαίο κάλυμμα του δοκιμίου.



Φωτ. 10-2 Δοκίμιο με τους εγκατεστημένους μετρητές τύπου Hall effect

Ακολούθως, εφαρμοζόταν πλευρική πίεση, (με κλειστή τη βαλβίδα της αντιπίεσης για να μην επιτραπεί αποστράγγιση του δοκιμίου) και από την τιμή $B = \Delta u_w / \Delta \sigma_3$ (όπου Δu_w και $\Delta \sigma_3$ οι αυξήσεις της πίεσης των πόρων και του νερού της κυψέλης αντίστοιχα), προσδιοριζόταν ο βαθμός κορεσμού (Head, 1986).

Στη συνέχεια, η πίεση των πόρων μέσα στο δοκίμιο αυξανόταν σταδιακά με ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής πίεσης, προκειμένου ο παγιδευμένος αέρας μέσα στο σύστημα της αντιπίεσης και στο δοκίμιο να διαλυθεί στο εισπνεζόμενο νερό. Η διαδικασία επραγματοποιείτο μέσω της επιλογής αυτόματου κορεσμού και μέχρι αντιπίεσης 650 kPa, επειδή προκαταρκτικές δοκιμές υπέδειξαν ότι σ' αυτή την πίεση, επιτυγχάνετο ικανοποιητικός κορεσμός του δοκιμίου.

10.3.3.6 Στερεοποίηση

Η στερεοποίηση επραγματοποιείται σε ισότροπες συνθήκες και σταθερή πίεση της κυψέλης. Η αρχική επιδίωξη να επανεγκατασταθούν στο δοκίμιο οι τάσεις που εφαρμόζοντο στο πεδίο, εγκαταλήφθηκε (για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγούμενα). Κατά συνέπεια, οι τάσεις στερεοποίησης των δοκιμίων, υπολείπονται γενικά των τάσεων που επικρατούσαν στο πεδίο.

Με το λογισμικό ελέγχου του συστήματος, γινόταν η εγκατάσταση της αποκλίνουσας τάσης, της αντιπίεσης πόρων και της πίεσης του κελιού και στη συνέχεια, με το άνοιγμα της βαλβίδας της αντιπίεσης, άρχιζε η στερεοποίηση. Όλες οι τιμές μεταβολής του όγκου σε σχέση με το χρόνο εμφανιζόταν στην οθόνη του PC και καταγραφόταν από το σύστημα.

10.3.3.7 Τριαξονικές δοκιμές με κύκλο φόρτισης – αποφόρτισης

Μετά το στάδιο της στερεοποίησης, ακολουθούσε ο προγραμματισμός της δοκιμής φόρτισης μέσω του λογισμικού ελέγχου του συστήματος. Δεδομένου ότι το ενδιαφέρον εστιαζόταν στη διερεύνηση της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με σταθερό ρυθμό μεταβολής του φορτίου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ελεγχόμενη φόρτιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διερεύνηση της δυστροπίας σε μικρές παραμορφώσεις, όπου τα μέτρα δυστροπίας μπορεί να είναι σχετικά μεγάλα και οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης έντονα μη γραμμικές.

Ο προγραμματισμός των δοκιμών περιελάμβανε αύξηση της αποκλίνουσας τάσης (q) από 0 έως 600 kPa, αποφόρτιση κατά 125 kPa και στη συνέχεια επαναφόρτιση μέχρι θραύσης του δοκιμίου. Η αποκλίνουσα τάση (q) εφαρμοζόταν με ένα ρυθμό 25 kPa/h, ενώ η πλευρική τάση (σ_3) παρέμενε σταθερή και στο δοκίμιο επιτρεπόταν στράγγιση με σταθερή αντιπίεση πόρων. Οι μετρήσεις των ελεγκτών πίεσης - όγκου καταγραφόταν μέσω του λογισμικού ελέγχου ενώ οι ενδείξεις των αισθητήρων Hall effect καταγραφόταν μέσω του συστήματος MPX32 Datalogger.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια (διαμέτρου 38 mm και ύψους 80 mm), που διαμορφώθηκαν εγκάρσια στη στρώση από τα δείγματα B2 (υποκίτρινη αργίλο-ιλύς με ελάχιστα κογχύλια) και Γ2 (φαιοπράσινη ιλύς με ελάχιστα κογχύλια).

10.3.3.8 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών παρουσιάζονται σε διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης (q) - αξονικής παραμόρφωσης (ε) η οποία μετρήθηκε με μηχανοσκόπιο εξωτερικά της κυψέλης αλλά και από τους μετρητές που τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο. Ενδεικτικά, στο Σχ. 10-7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα φόρτισης του δοκιμίου B2S9, ενώ τα υπόλοιπα περιλαμβάνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών. Σε όλες τις δοκιμές, είναι εμφανής η απόκλιση της αξονικής παραμόρφωσης που μετράται τοπικά πάνω στο δοκίμιο (με τους αισθητήρες τύπου Hall effect) από αυτήν που μετράται με το μηχανοσκόπιο εξωτερικά της κυψέλης.

Πιο συγκεκριμένα, ένας μεγαλύτερος ρυθμός αξονικής παραμόρφωσης με την έναρξη της δοκιμής (καμπύλη λιγότερο επικλινής) καταγράφεται από τους εξωτερικούς μετρητές συγκριτικά με τους τοπικούς αισθητήρες τύπου “Hall effect”. Ο μεγαλύτερος αυτός ρυθμός της παραμόρφωσης στην αρχή της φόρτισης, οφείλεται πιθανότατα σε ολίσθηση του δοκιμίου ως προς την πάνω πλάκα / κελί φόρτισης και σε σφάλματα κάμψης στα άκρα του δοκιμίου που προκαλούνται από συμπίεση λεπτών ασθενικών ζωνών που αναπόφευκτα προκύπτουν κατά τη διαμόρφωση του. Οι επιδράσεις των σφαλμάτων της κάμψης δεν μπορούν να αποφευχθούν πλήρως ακόμα και με εξαιρετικά προσεκτική διαμόρφωση του δοκιμίου (Tatsuoka *et al.*, 1993 από Kim *et al.*, 1992). Το γεγονός αυτό υποδηλώνει σαφώς ότι οι εξωτερικά της κυψέλης μετρούμενες παραμορφώσεις είναι αναξιόπιστες για την εκτίμηση της δυστροπίας σε μικρές παραμορφώσεις. Με βάση τα παραπάνω, μόνο οι τοπικές μετρήσεις πάνω στο δοκίμιο αποδίδουν αξιόπιστα την παραμόρφωση της κεντρικής ζώνης του δοκιμίου και οδηγούν σε αξιόπιστη εκτίμηση της δυστροπίας.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 10-2 και αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών.

Πίνακας 10-2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της αντοχής μαργαϊκών οριζόντων

Δοκίμιο	Συνθήκες αστοχίας				Παράμετροι Αντοχής	
	ε (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ (kN/m ²)	u_f (kN/m ²)	σ_{3f} (kN/m ²)	c_d (kN/m ²)	φ_d (°)
B2S3	2,38	1299	499	801	216,67	29,03
B2S5	2,29	928	497	601		
B2S6	2,09	1132	499	701		
Γ2S1	2,31	1308	698	1001	101,57	36,93
Γ2S4	2,67	1643	647	1049		
Γ2S5	2,57	1873	211	701		

10.3.4 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Θεωρώντας ότι η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης μπορεί να προσομοιωθεί με το μοντέλο εδαφικής κράτυνσης (Hardening Soil Model, Κεφ. 4), εκτιμήθηκαν οι απαραίτητες παράμετροι δυστροπίας που απαιτούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δοκιμίων και κατ' επέκταση των γεωλογικών σχηματισμών από τους οποίους ελήφθησαν τα δείγματα.

Πιο αναλυτικά, από τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, εκτιμήθηκε

- το τέμνον μέτρο δυστροπίας (E_{50}), με βάση την ευθεία που διέρχεται από το σημείο έναρξης της παραμόρφωσης και το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στο μισό της αντοχής του δοκιμίου (Σχ. 10-7), και
- το μέτρο αποφόρτισης – επαναφόρτισης (E_{ur}), με βάση την εφαπτομένη στις επανακτούμενες παραμορφώσεις του κύκλου αποφόρτισης – επαναφόρτισης (Σχ. 10-7).

Τα αποτελέσματα προκύπτουν με βάση τις εξισώσεις που παρουσιάζονται στα επιμέρους διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης και συγκεντρωτικά παρουσιάζονται στους Πίνακες των Σχημάτων 10-8 έως 10-11.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, υπολογίσθηκαν στη συνέχεια:

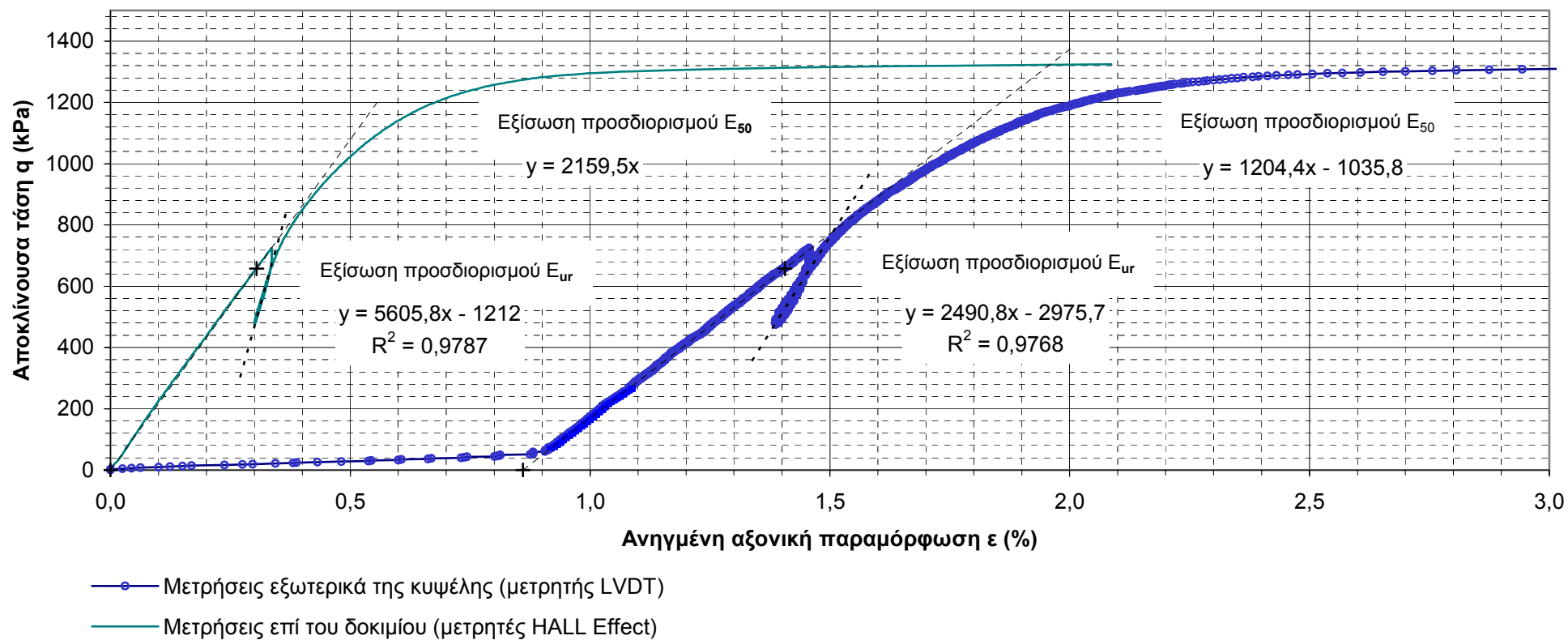
- οι τιμές του μέτρου δυστροπίας αναφοράς E_{50}^{ref} , δηλ. του μέτρου E_{50} που αντιστοιχεί σε πλευρική πίεση αναφοράς $\sigma_3 = 100$ kPa,
- ο συντελεστής εξάρτησης m της δυστροπίας από την πλευρική τάση σ_3 και
- το μέτρο αναφοράς για αποφόρτιση και επαναφόρτιση E_{ur}^{ref} που αντιστοιχεί στην τάση αναφοράς $p^{ref} = 100$ kPa.

Οι υπολογισμοί για τις δύο πρώτες παραμέτρους έγιναν με βάση την εξίσωση [10.3] του μοντέλου εδαφικής κράτυνσης (Plaxis, 1998, Schanz and Vermeer, 1999):

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma_3'}{c \cot \varphi + p^{ref}} \right)^m \quad [10.3]$$

όπου E_{50}^{ref} το μέτρο δυστροπίας αναφοράς που αντιστοιχεί στην πλευρική πίεση αναφοράς p^{ref} (= 100 μονάδες τάσης) και
 m εκθέτης που προσδιορίζει το μέγεθος της εξάρτησης της δυστροπίας από την πλευρική τάση σ_3' .

Δοκίμιο B2S9
Σύγκριση ανηγμένης παραμόρφωσης που μετράται εξωτερικά της κυψέλης και
πάνω στο δοκίμιο



Σχ. 10-7 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής με ανακύκλιση φόρτισης

Από τη λογαρίθμηση της εξίσωσης [10.3], προκύπτει η σχέση

$$\log E_{50} = \log E_{50}^{\text{ref}} + m \log A \quad [10.4]$$

$$\text{όπου } A = \frac{c \cot \varphi - \sigma_3'}{c \cot \varphi + p^{\text{ref}}}$$

Με βάση τις γεωτεχνικές παραμέτρους (c' , φ') κάθε δείγματος και την πλευρική τάση (σ_3') που επιβαλλόταν σε κάθε δοκιμή, υπολογίστηκε η τιμή A . Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το διάγραμμα $\log E_{50} - \log A$ με βάση τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα (Σχ. 10-8) και με γραμμική παρεμβολή υπολογίστηκαν οι τιμές των παραμέτρων m και E_{50}^{ref} .

Πιο αναλυτικά, για το δείγμα B2 εκτιμήθηκε $m=0,37$ και $E_{50}^{\text{ref}}=168.532$ kPa (Σχ. 10-8) ενώ για το δείγμα Γ2 υπολογίστηκε $m=0,147$ και $E_{50}^{\text{ref}}=344.634$ kPa (Σχ. 10-10).

Η τρίτη παράμετρος (μέτρο αναφοράς για αποφόρτιση και επαναφόρτιση E_{ur}^{ref}) εκτιμήθηκε με βάση την εξίσωση [10.4]

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma_3'}{c \cot \varphi + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad [10.5]$$

όπου E_{ur}^{ref} είναι το μέτρο για αποφόρτιση και επαναφόρτιση που αντιστοιχεί στην τάση αναφοράς
και οι υπόλοιπες παράμετροι όπως ορίστηκαν προηγούμενα.

Με τη λογαρίθμηση της εξίσωσης [10.5], προέκυψε η σχέση

$$\log E_{ur} = \log E_{ur}^{\text{ref}} + m \log A \quad [10.6]$$

Στη συνέχεια, με βάση τις τιμές E_{ur} που εκτιμήθηκε σε κάθε δοκιμή, τις γεωτεχνικές παραμέτρους των δειγμάτων (c' , φ') και την επιβαλλόμενη πλευρική τάση (σ_3'), υπολογίστηκε η τιμή A και εκτιμήθηκε το μέτρο αναφοράς για αποφόρτιση και επαναφόρτιση E_{ur}^{ref} , που αντιστοιχεί στην πλευρική τάση αναφοράς $p^{\text{ref}}=100$ kPa. Η διαδικασία ήταν ανάλογη της προηγούμενης και το μέτρο E_{ur}^{ref} εκτιμήθηκε σε 495.975 kPa για το δείγμα B2 (Σχ. 10-9) και σε 977.425 kPa για το Γ2 (Σχ. 10-11).

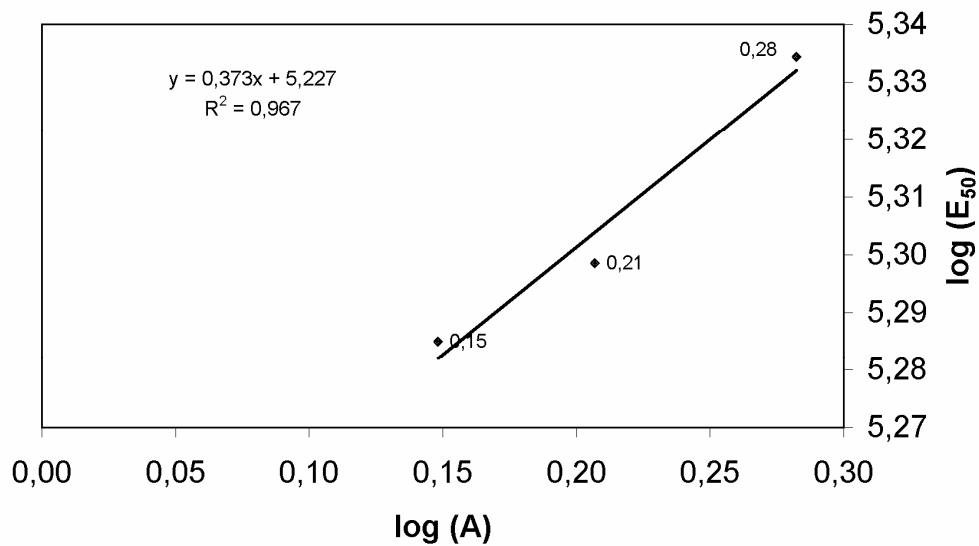
Κωδικός	c (kN/m ²)	φ (°)	σ' ₃ (kN/m ²)	p _{ref} (kN/m ²)	ccotφ	A	log (A)	E ₅₀ (kN/m ²)	log E ₅₀
B2s3	217,00	29,00	300	100	391,48	1,41	0,15	192.760	5,29
B2S9	217,00	29,00	550	100	391,48	1,92	0,28	215.950	5,33
B2S10	217,00	29,00	400	100	391,48	1,61	0,21	198.850	5,30

$$m = 0,373$$

$$\log (E_{50}^{ref}) = 5,227$$

$$E_{50}^{ref} = 168.532 \quad \text{kN/m}^2$$

Προσδιορισμός E₅₀^{ref}, m



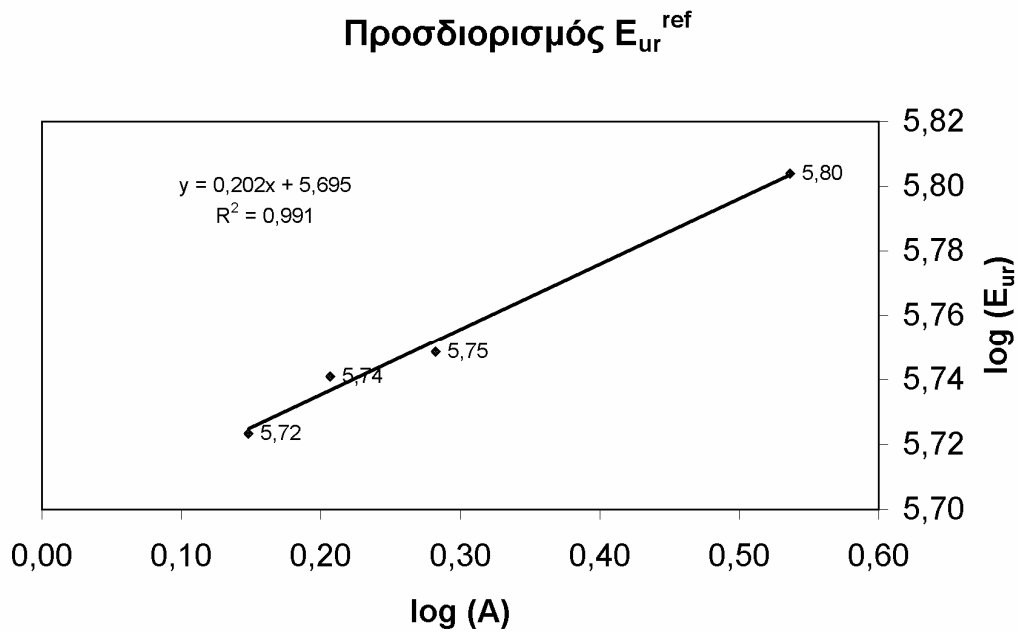
Σχ. 10-8 Προσδιορισμός μέτρου δυστροπίας (E_{50}^{ref}) και της εξάρτησης της δυστροπίας (m) από την πλευρική τάση σ'_3 στο δείγμα B2

Κωδικός	c (kN/m ²)	φ (°)	σ' ₃ (kN/m ²)	p _{ref} (kN/m ²)	ccotφ	A	log (A)	E _{ur} (kN/m ²)	log E _{ur}
B2s3	217,00	29,00	300	100	391,48	1,41	0,15	528.920	5,72
B2s9	217,00	29,00	550	100	391,48	1,92	0,28	560.580	5,75
B2s10	217,00	29,00	400	100	391,48	1,61	0,21	550.720	5,74
B2s11	217,00	29,00	1300	100	391,48	3,44	0,54	636.760	5,80

$$m = 0,188$$

$$\log (E_{ur}^{ref}) = 5,695$$

$$E_{ur}^{ref} = 495.975 \quad \text{kN/m}^2$$



Σχ. 10-9 Προσδιορισμός μέτρου δυστροπίας (E_{ur}^{ref}) και της εξάρτησης της δυστροπίας (m) από την πλευρική τάση (σ'_3) στο δείγμα B2

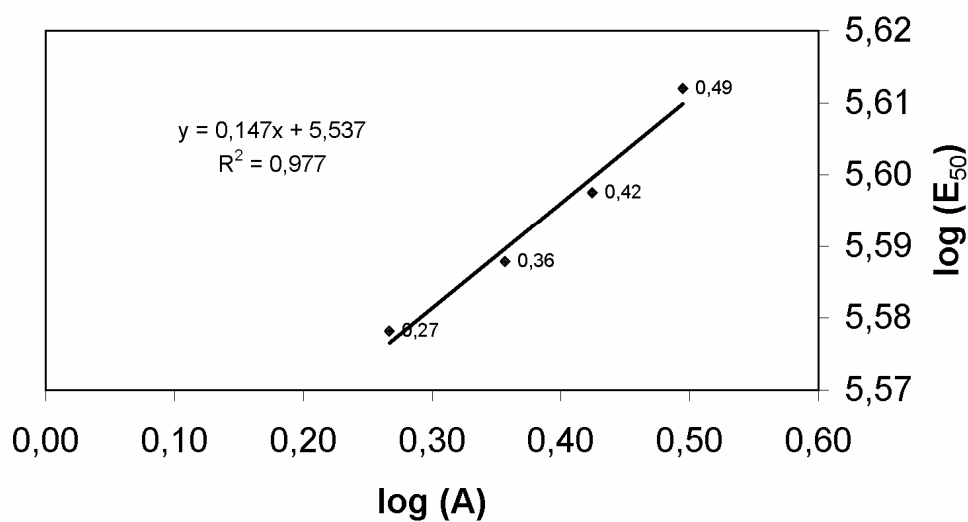
Κωδικός	c (kN/m ²)	φ (°)	σ' ₃ (kN/m ²)	p _{ref} (kN/m ²)	ccotφ	A	log (A)	E ₅₀ (kN/m ²)	log E ₅₀
Γ2s1	102	37	300	100	135,36	1,85	0,27	378.610	5,58
Γ2s3	102	37	600	100	135,36	3,12	0,49	409.210	5,61
Γ2s4	102	37	400	100	135,36	2,27	0,36	387.160	5,59
Γ2s5	102	37	490	100	135,36	2,66	0,42	395.850	5,60

$$m = 0,147$$

$$\log (E_{50}^{ref}) = 5,537$$

$$E_{50}^{ref} = 344.634 \quad \text{kN/m}^2$$

Προσδιορισμός E_{50}^{ref} , m



Σχ. 10-10 Προσδιορισμός μέτρου δυστροπίας (E_{50}^{ref}) και της εξάρτησης της δυστροπίας (m) από την πλευρική τάση (σ'_3) στο δείγμα Γ2

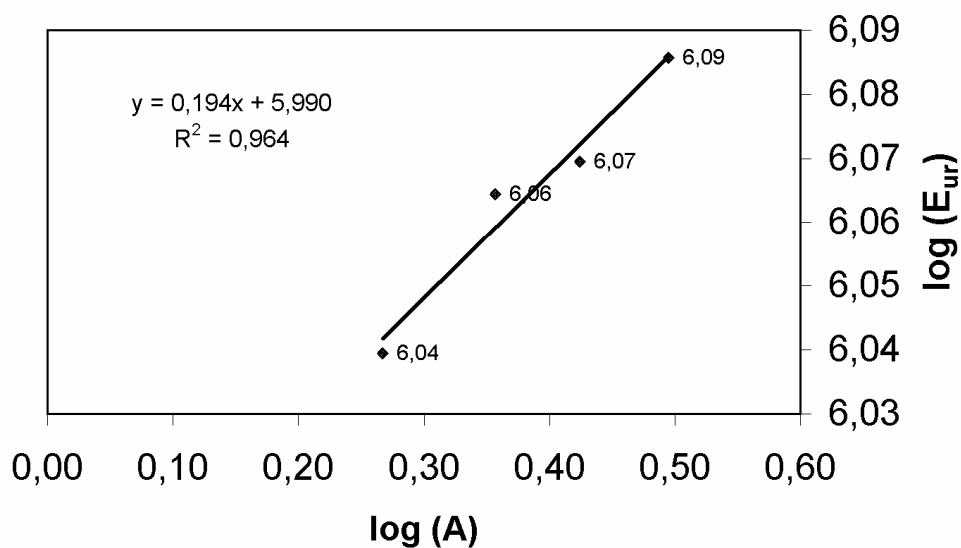
Κωδικός	c (kN/m ²)	φ (°)	σ' ₃ (kN/m ²)	p _{ref} (kN/m ²)	ccotφ	A	log (A)	E _{ur} (kN/m ²)	log E _{ur}
Γ2s1	102	37	300	100	135,36	1,85	0,27	1.095.200	6,04
Γ2s3	102	37	600	100	135,36	3,12	0,49	1.218.200	6,09
Γ2s4	102	37	400	100	135,36	2,27	0,36	1.159.900	6,06
Γ2s5	102	37	490	100	135,36	2,66	0,42	1.173.700	6,07

$$m = 0,194$$

$$\log (E_{ur}^{ref}) = 5,990$$

$$E_{ur}^{ref} = 977.425 \text{ kN/m}^2$$

Προσδιορισμός E_{ur}^{ref}



Σχ. 10-11 Προσδιορισμός μέτρου δυστροπίας (E_{ur}^{ref}) και της εξάρτησης της δυστροπίας (m) από την πλευρική τάση (σ'_3) στο δείγμα Γ2

Οι τιμές E_{ur}^{ref} που προέκυψαν, είναι ανάλογες της υφής των γεωλογικών σχηματισμών και είναι μεγαλύτερες των λιγνιτών (ΑΠΘ, 1998) και των αργίλων οι οποίες επιδεικνύουν μικρότερη δυστροπία. Τέλος, η εξάρτηση του E_{ur}^{ref} από τη σ_3 είναι μικρή και αποδίδεται στην πυκνή δομή των δειγμάτων.

Παρότι ο αριθμός των μετρήσεων είναι περιορισμένος, προκύπτει υψηλός συντελεστής συσχέτισης ($R^2 > 0,97$) σε όλα τα διαγράμματα επεξεργασίας (Σχ. 11-8, 11-9, 11-10 και 11-11). Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ακρίβεια των μετρήσεων των αισθητήρων τύπου Hall effect, οι οποίοι δίδουν τη δυνατότητα με λίγες μετρήσεις να προσδιορισθεί ένα αξιόπιστο μέτρο δυστροπίας.

Εντούτοις, τα αποτελέσματα θα πρέπει να εμπλουτισθούν με περισσότερες μετρήσεις από διάφορες θέσεις δειγματοληψίας, προκειμένου οι παράμετροι να είναι αντιπροσωπευτικές των σχηματισμών στους οποίους αναφέρονται και να μην θεωρούνται σημειακού ενδιαφέροντος.

11 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ “TOMEA-6”

11.1 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Η κατ’ όγκο ανάκτηση των σχηματισμών λόγω της ελαστικής τους συμπεριφοράς, εμφανίζεται ταυτόχρονα με την αποφόρτιση που προκαλεί η εκσκαφή. Δεδομένου ότι η γνώση της αναμενόμενης ανάκτησης συμβάλλει στη διερεύνηση του μηχανισμού της κινητικότητας των πρυνών, επιχειρείται μια εκτίμηση του μεγέθους της. Στην προσπάθεια αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα μέτρα συμπίεστότητας (που προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές οιδημέτρου), θεωρώντας ότι οι τιμές τους προσεγγίζουν το μέτρο “ελαστικότητας” των σχηματισμών.

Όπως έχει αναφερθεί, η μηχανική συμπεριφορά των εδαφών είναι πολύπλοκη και είναι διάφορη της γραμμικά ελαστικής συμπεριφοράς. Εντούτοις, σε προβλήματα που απαιτούν την εκτίμηση του τασικού πεδίου στο εσωτερικό του εδάφους, και μάλιστα για καταστάσεις μακράν της οριακής, η παραδοχή ενός γραμμικά ελαστικού μοντέλου αποτελεί κοινή πρακτική.

Με βάση τα παραπάνω και δεδομένου ότι η χρήση ενός σύνθετου προσομοιώματος (μοντέλου) έχει ως επακόλουθο πολύπλοκους υπολογισμούς, με ανυπέρβλητες πολλές φορές δυσκολίες, επιχειρήθηκε η εκτίμηση της ανάκτησης θεωρώντας ένα απλό ελαστικό μοντέλο συμπεριφοράς χωρίς να ληφθεί υπόψη η παράμετρος του χρόνου.

11.1.1 Ανάλυση της ανάκτησης θεωρώντας κατανομή τάσεων κατά Boussinesq

Η ελαστική ανάκτηση του δαπέδου μιας εκσκαφής μπορεί να υπολογισθεί θεωρώντας με αρνητικό πρόσημο το φορτίο των εδαφικών τμημάτων (τομέων) που αφαιρούνται με την εκσκαφή. Το επιβαλλόμενο φορτίο μπορεί να εκτιμηθεί με την κατανομή κατά Boussinesq (ή κατά Westergaard), και η παραμόρφωση που έχει προκληθεί στα υποκείμενα στρώματα, θεωρείται σαν πλήρως ανακτήσιμη.

11.1.1.1 Εκτίμηση των τάσεων με το βάθος

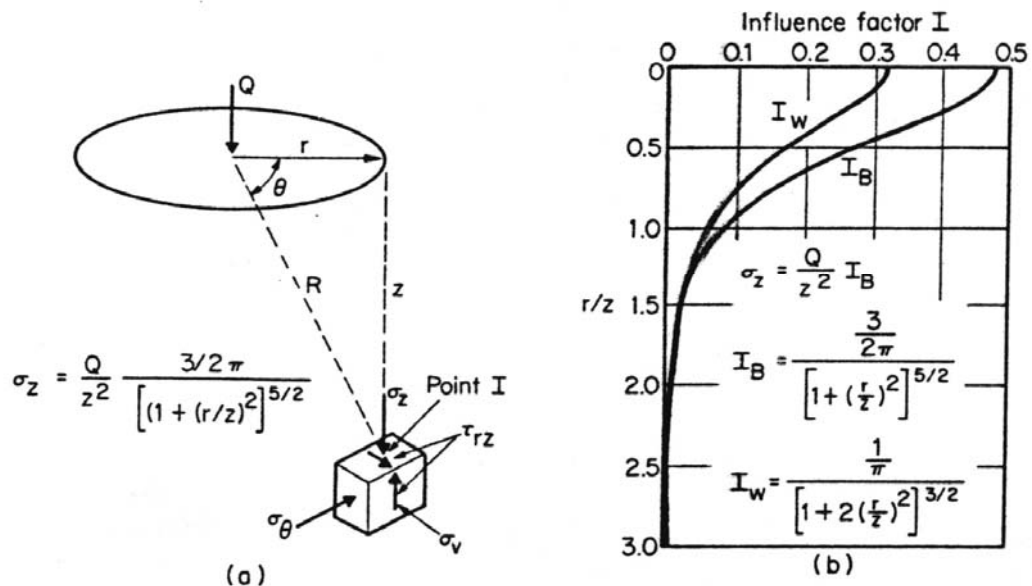
Ο Boussinesq παρουσίασε το 1885 μια μέθοδο εκτίμησης των τάσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό αβαρούς, ομογενούς, ισότροπου, γραμμικά ελαστικού ημίχωρου, εξαιτίας μιας κατακόρυφης σημειακής φόρτισης στην επιφάνεια (Σχ. 11-1). Η κατακόρυφη ορθή τάση (σ_z) σε βάθος

z , είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του βάθους (z^2) και ανάλογη ενός αδιάστατου συντελεστή (I_B), όπως υποδεικνύει η εξίσωση

$$\sigma_z = \frac{Q}{z^2} I_B \quad [11.1]$$

όπου Q το φορτίο που επιβάλλεται στην επιφάνεια
 z το βάθος του θεωρούμενου σημείου και
 I_B αδιάστατος συντελεστής. Η τιμή του εξαρτάται από το λόγο r/z (Σχ. 11-1α) και εκτιμάται από το διάγραμμα του Σχ. 11-1b.

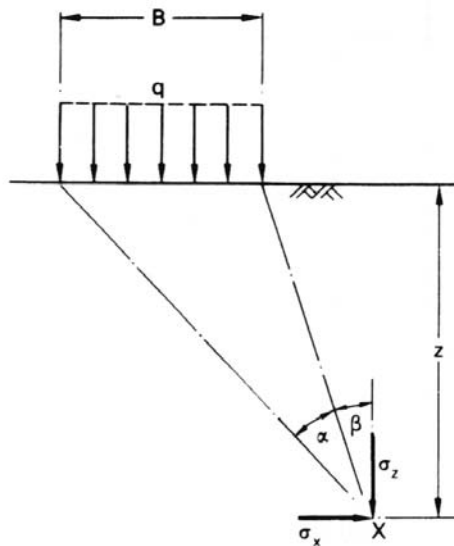
Με βάση τη σχέση του Boussinesq [11.1], ο Newmark και άλλοι ερευνητές, μελέτησαν πολλές περιπτώσεις συνηθισμένων φορτίσεων και έδωσαν είτε σύνθετες αλλά ακριβείς λύσεις, είτε προσεγγιστικά αλλά εύχρηστα νομογράμματα.



Σχ. 11-1 Τάσεις σε ελαστικό ημίσφωρο που προκαλούνται από επιφανειακή σημειακή φόρτιση Q , (Hunt, 1986 από Taylor, 1948)

(α) τάσεις σε στοιχειώδες τμήμα του υπεδάφους, (β) τιμές των παραμέτρων I_B , I_W που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης.

Ο Craig (1978), αναφέρει ότι οι τάσεις που προκαλούνται στο υπέδαφος από ομοιόμορφη επιφανειακή φόρτιση λωρίδας (Σχ. 11-2), είναι δυνατόν να υπολογισθούν με ολοκλήρωση των εξισώσεων που αναφούν τη σημειακή φόρτιση.



Σχ. 11-2 Τάσεις από ομοιόμορφη φόρτισης λωρίδας (Craig, 1978)

Πιο συγκεκριμένα, η κατακόρυφη τάση σ' ένα σημείο X που βρίσκεται σε βάθος z (Σχ. 11-2), μπορεί να υπολογισθεί με την εξίσωση :

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \left\{ \alpha + \sin \alpha \cos (\alpha + 2\beta) \right\} \quad [11.2]$$

όπου

- q η τάση που εφαρμόζεται ομοιόμορφα σε μια λωρίδα της επιφανείας του εδάφους,
- α η γωνία που σχηματίζεται από τα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τα πλευρικά άκρα της λωρίδας και το σημείο X και
- β η γωνία που σχηματίζει η κατακόρυφος και το ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει το πλευρικό όριο της λωρίδας με το σημείο X, (Σχ. 11-2).

11.1.1.2 Εκτίμηση της ανηγμένης παραμόρφωσης και ανάκτησης

Η κατά τον κατακόρυφο άξονα ανηγμένη παραμόρφωση (ε_1) ενός εδαφικού στοιχείου που φορτίζεται με τρεις κάθετες μεταξύ τους τάσεις (θεωρώντας τη διεύθυνση της μέγιστης τάσης σ_1 να ταυτίζεται με την κατακόρυφο), υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad [11.3]$$

όπου σ_1 η μεταβολή της κατακόρυφης τάσης
 σ_2, σ_3 οι μεταβολές των κάθετων στη σ_1 τάσεων
 E το μέτρο ελαστικότητας και
 ν ο λόγος του Poisson του εδαφικού στοιχείου

Στην περίπτωση που θεωρηθεί ότι ο λόγος Poisson $\nu=0$, η εξίσωση [11.3] διαμορφώνεται στην ακόλουθη

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad [11.4]$$

και ο υπολογισμός της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης (κατά την κατακόρυφο δηλαδή έννοια), απλουστεύεται.

Στην περίπτωση όμως που θεωρηθούν συνθήκες μηδενικής πλευρικής παραμόρφωσης, ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία (k_0) ισούται με $k_0=\nu/(1-\nu)$ και οι πλευρικές τάσεις δίδονται από τη σχέση :

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_1 \quad [11.5]$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση [11.5] στη σχέση [11.3] προκύπτει ότι

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \cdot \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right) \quad [11.6]$$

Με βάση την παραπάνω εξίσωση [11.6], η ανηγμένη παραμόρφωση κατά την έννοια της κατακόρυφου, μειώνεται περίπου στο 50% εάν ο λόγος Poisson (ν) θεωρηθεί ίσος με 0,4 και περίπου στο 25% εάν το $\nu=0,3$. Θα πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που η πλευρική παραμόρφωση δεν είναι μηδενική (όπως στην περίπτωση μιας ανοικτής εκσκαφής), η επίδραση του λόγου του Poisson στις τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων είναι μικρότερη από αυτή που υποδεικνύει η εξίσωση [11.6].

Με βάση τα παραπάνω, και για να εκτιμηθεί η κατά την κατακόρυφο έννοια ανάκτηση που εμφανίζεται σε δεδομένο βάθος, υπολογίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση όπως προκύπτει από την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων (με $v=0$ ή $v \neq 0$), και το μέγεθος της ανάκτησης (Δ) υπολογίζεται από τη σχέση:

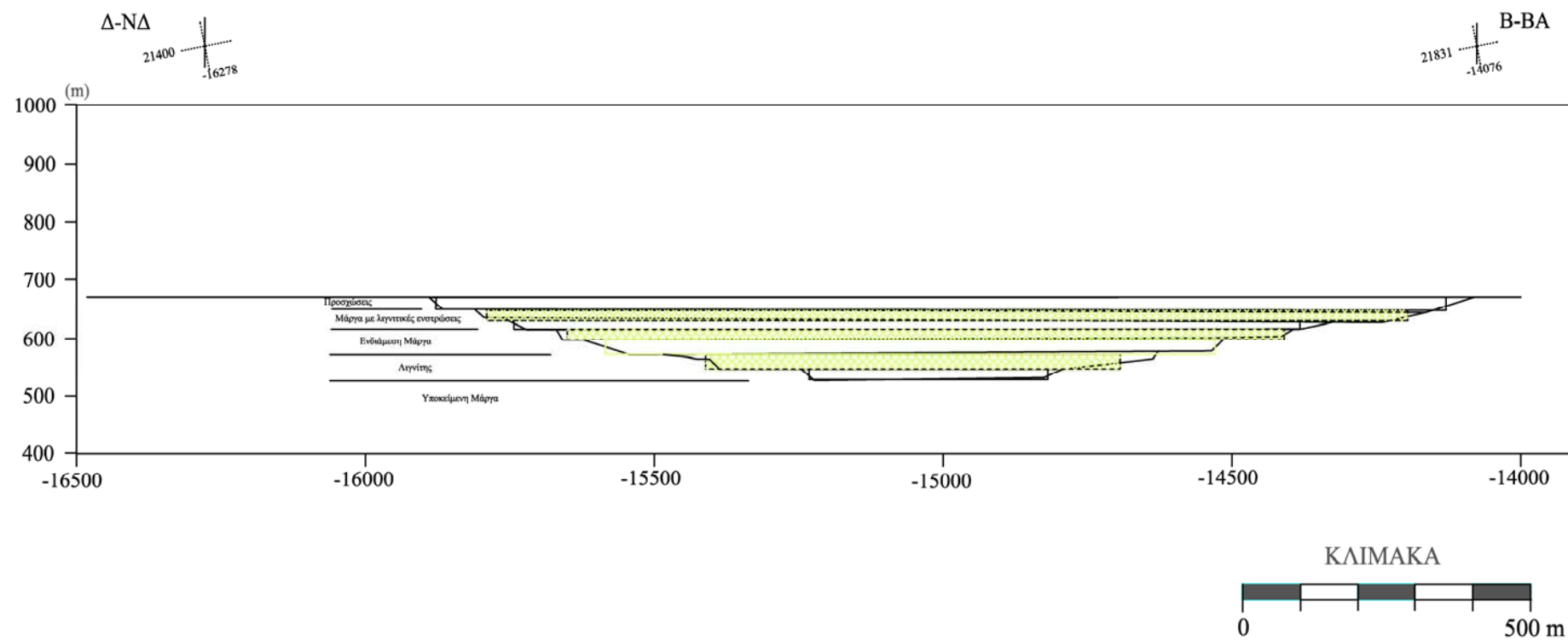
$$\Delta = \varepsilon \cdot h \quad [11.7]$$

όπου ε η ανηγμένη παραμόρφωση κατά την έννοια της κατακορύφου και
 h το πάχος της ζώνης που ανακτά.

11.1.2 Ανάκτηση του δαπέδου εκσκαφής του “Τομέα-6” με βάση την ελαστική θεωρία

Η ανάκτηση της εκσκαφής του “Τομέα-6” υπολογίστηκε με βάση την τασική κατανομή που προκύπτει από το επίμηκες φορτίο του κάθε τομέα εκσκαφής και για την απλούστευση των υπολογισμών, έγιναν κάποιες παραδοχές. Κατ’ αρχάς θεωρήθηκε μία απλοποιημένη τομή (προσομοίωμα) της εκσκαφής, η οποία παρουσιάζεται στο Σχ. 11-3. Τα γεωλογικά στρώματα θεωρήθηκαν οριζόντια, ομογενούς σύστασης, ισότροπα και ελαστικά, με μηδενικό λόγο Poisson και μέσο πάχος που προέκυψε από τη γεωλογική τομή του Σχήματος 6-4. Το πάχος των επτά (7) τομέων που αφαιρούνται διαδοχικά με την εξέλιξη της εκσκαφής, θεωρήθηκε σταθερό σ' όλη τους την έκταση, ενώ το μήκος τους είναι πολύ μεγάλο προκειμένου να ικανοποιεί τις προδιαγραφές της λωρίδας. Τέλος, έγινε η παραδοχή ότι το φορτίο των υπερκειμένων εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια του υποκειμένου εδαφικού στρώματος - η κατανομή δηλαδή του φορτίου είναι ομοιόμορφη στην επιφάνεια επαφής. Επιπλέον, το μέτρο “ελαστικότητας” του υποκειμένου, είναι σταθερό μέσα στο βάθος επίδρασης του υπερκειμένου φορτίου.

Σύμφωνα με την ανάλυση του προβλήματος, η εκσκαφή αναπτύσσεται κατά στάδια (Σχ. 11-3) και κάθε φορά ο τομέας εκσκαφής θεωρείται σαν μεμονωμένο φορτίο που αφαιρείται άμεσα. Αθροίζοντας την ανάκτηση των επιμέρους υποκειμένων στρωμάτων που προκύπτει με την απομάκρυνση δεδομένου τομέα, εκτιμάται η ανάκτηση που εκδηλώνεται στο συγκεκριμένο επίπεδο εκσκαφής (Πίνακας 11-1). Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση που κατά την εκμετάλλευση δεν μεταβαλλόταν οι οριακές συνθήκες (πλευρικά όρια του Ορυχείου), η ανάλυση θα μπορούσε να ολοκληρωθεί σ’ ένα στάδιο. Δεδομένης όμως της διαφοροποίησης του πλάτους κάθε τομέα εκσκαφής, η απομάκρυνση του φορτίου θεωρήθηκε κατά στάδια.



Σχ. 11-3 Απλοποιημένη τομή εκσκαφής για την εκτίμηση της ανάκτησης, με βάση την ελαστική θεωρία

11.1.2.1 Υπολογισμός της φόρτισης που προκαλεί κάθε εδαφικός τομέας

Το φορτίο που επιβάλλει καθένας από τους εδαφικούς τομείς στον υποκείμενο σχηματισμό, εκτιμήθηκε με βάση το μέσο πάχος του.

Σημειώνεται ότι σε κάθε ορίζοντα εκσκαφής, η ενεργή τάση αντιστοιχεί στο φορτίο μόνο του υπερκείμενου τομέα (Πίνακας 11-1), αφού οι ανώτεροι τοπογραφικά τομείς έχουν αφαιρεθεί στα προγενέστερα στάδια της εκσκαφής. Επίσης, ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρήθηκε αρχικά σε βάθος 21 m από την επιφάνεια του εδάφους και όλα τα στρώματα, εκτός από τις προσχώσεις, θεωρήθηκαν κορεσμένα σε νερό. Τέλος, η υποκείμενη μάργα θεωρήθηκε μεγάλου πάχους και το φορτίο που ασκεί στο υποκείμενο στρώμα της, ουσιαστικά δεν ενδιαφέρει.

Η τάση, ουσιαστικά η τασική μεταβολή, που προκαλεί η επιφανειακή φόρτιση κάθε τομέα σε στοιχειώδες τμήμα στο μέσο του πάχους των υποκειμένων του, υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση [11.2] και τη γεωμετρία του Σχήματος 11-3. Από τις τιμές της τασικής μεταβολής στο μέσο κάθε τομέα των υποκειμένων στρωμάτων (Πίνακα 11-1), εκτιμήθηκε η συνολική μεταβολή της τάσης σ' όλο του το πάχος.

11.1.2.2 Εκτίμηση της ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής

Ένα μέσο μέτρο “ελαστικότητας” του σχηματισμού στον οποίο αναπτύχθηκε η εκσκαφή προέκυψε αναλογικά (Θεοδωράκης, Πλυτάς, 1997 από Bowles, 1988), με βάση το πάχος των στρωματογραφικών οριζόντων και τα εργαστηριακά αποτελέσματα τόσο της παρούσας έρευνας όσο και προγενέστερων μελετών.

Το μέτρο δυστροπίας των μαργαϊκών οριζόντων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του προαναφερόμενου μέτρου και της ανάκτησης, προέκυψε από τα στάδια αποφόρτισης των δοκιμών συμπίεστότητας, δεδομένου ότι οι τασικές συνθήκες της δοκιμής αυτής φαίνεται να προσεγγίζουν καλύτερα τις φυσικές συνθήκες που διαμορφώνονται με την εκσκαφή.

Επίσης, το μέτρο δυστροπίας του λιγνίτη θεωρήθηκε ίσο με 100 MPa, με βάση τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών (Kavvas et al., 1993, ΑΠΘ, 1998, Anagnostopoulos et al., 1988), ενώ για τα ενδιάμεσα στρώματα η δυστροπία θεωρήθηκε ως η μέση τιμή των αντίστοιχων μέτρων του λιγνίτη και της μάργας.

Το μέσο μέτρο “ελαστικότητας” του σχηματισμού στον οποίο αναπτύχθηκε η εκσκαφή εκτιμήθηκε με βάση τη σχέση

$$E_{(\text{μέσο})} = \frac{E_1 H_1 + E_2 H_2 + \dots E_n H_n}{H} \quad [11.8]$$

όπου $E_1, E_2, \dots E_n$ το μέτρο δυστροπίας των επιμέρους οριζόντων
 $H_1, H_2, \dots H_n$ το αντίστοιχο πάχος τους και
 H το συνολικό πάχος του σχηματισμού εκσκαφής.

Πίνακας 11-1 Εκτίμηση της ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής με βάση την ελαστική θεωρία

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΠΟ ΤΟ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΤΡΩΜΑ ΣΤΟΝ ΑΡΜΟ ΕΠΑΦΗΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΟ ΤΟΥ									
Στρώμα	Περιγραφή	Πάχος (m)	Πλάτος B στρώματος (m)	Βάθος ελεύθερης πτώσης επιρροής (m)	Φαιν. Βάρος kN/m^3	Τάση εν κάθε στρώμα-τος στο επίπεδο δράσης του (kN/m^2)	Πίεση πόρων $u (kN/m^2)$	Ενεργή Τάση σ_v	Μέσο $E (kN/m^2)$
1	Προσχώσεις	21	1749	25	18,5	388,50	0,00	388,50	180.000
2a	Μάρμα με ενστρ. Λιγνίτη	20	1594		14,0	280,00	147,00	133,00	
2β	Μάρμα με ενστρ. Λιγνίτη	15	1360		14,0	210,00	147,00	63,00	
3a	Ενδιάμεση Μάρμα	20	1241		15,9	318,00	196,00	122,00	
3β	Ενδιάμεση Μάρμα	24	1056		15,9	381,60	235,20	146,40	
4a	Λιγνίτης	25	718		12,0	300,00	245,00	55,00	
4β	Λιγνίτης	20	413		12,0	240,00	196,00	44,00	
	Μάρμα (υποκ/νη)	150	300		16,2	2430,00	1470,00	960,00	
	Σύνολο	295							
ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΠΟΥ ΔΕΚΕΙ ΚΑΘΕ ΣΤΡΩΜΑ ΣΕ ΒΑΘΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΗΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΦΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ									
ΣΤΡΩΜΑ 1 (Προσχώσεις)		ΠΛΑΤΟΣ B=		1749 m					
Τάση σ_v που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m^2)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μείση σημειακή μεταβολή σ_v (kN/m^2)	Συνολική μεταβολή $(\sigma_v \cdot d)$ (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m^2)	Ανάκτηση στρώματος (m)
388,50	2a - Μάρμα με λιγνίτη	20	10	3,12	-1,56	388,50	7770,00	180.000	0,043
	2β - Μάρμα με λιγνίτη	15	27,5	3,08	-1,54	388,49	5827,42	180.000	0,032
	3a - Ενδιάμεση Μάρμα	20	45	3,04	-1,52	388,48	7769,55	180.000	0,043
	3β - Ενδιάμεση Μάρμα	24	67	2,99	-1,49	388,43	9322,23	180.000	0,052
	4a - Λιγνίτης	25	91,5	2,93	-1,47	388,31	9707,84	180.000	0,054
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	388,14	7762,84	180.000	0,043
	5 - Μάρμα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	386,67	58000,72	180.000	0,322
ΣΤΡΩΜΑ 2a (Μάρμα με λιγνίτη)		ΠΛΑΤΟΣ B=		1594 m					
Τάση σ_v που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m^2)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μείση σημειακή μεταβολή σ_v (kN/m^2)	Συνολική μεταβολή $(\sigma_v \cdot d)$ (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m^2)	Ανάκτηση στρώματος (m)
133,00	2β - Μάρμα με λιγνίτη	15	27,5	3,08	-1,54	133,00	1994,97	180.000	0,011
	3a - Ενδιάμεση Μάρμα	20	45	3,04	-1,52	132,99	2659,85	180.000	0,015
	3β - Ενδιάμεση Μάρμα	24	67	2,99	-1,49	132,97	3191,40	180.000	0,018
	4a - Λιγνίτης	25	91,5	2,93	-1,47	132,94	3323,40	180.000	0,018
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	132,88	2657,55	180.000	0,015
	5 - Μάρμα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	132,37	19856,10	180.000	0,110
ΣΤΡΩΜΑ 2β (Μάρμα με λιγνίτη)		ΠΛΑΤΟΣ B=		1360 m					
Τάση σ_v που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m^2)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μείση σημειακή μεταβολή σ_v (kN/m^2)	Συνολική μεταβολή $(\sigma_v \cdot d)$ (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m^2)	Ανάκτηση στρώματος (m)
63,00	3a - Ενδιάμεση Μάρμα	20	45	3,04	-1,52	63,00	1259,93	180.000	0,007
	3β - Ενδιάμεση Μάρμα	24	67	2,99	-1,49	62,99	1511,71	180.000	0,008
	4a - Λιγνίτης	25	91,5	2,93	-1,47	62,97	1574,24	180.000	0,009
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	62,94	1258,84	180.000	0,007
	5 - Μάρμα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	62,70	9405,52	180.000	0,052
ΣΤΡΩΜΑ 3a (Ενδιάμεση Μάρμα)		ΠΛΑΤΟΣ B=		1241 m					
Τάση σ_v που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m^2)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επίδρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μείση σημειακή μεταβολή σ_v (kN/m^2)	Συνολική μεταβολή $(\sigma_v \cdot d)$ (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m^2)	Ανάκτηση στρώματος (m)
122,00	3β - Μάρμα	24	67	2,99	-1,49	121,98	2927,45	180.000	0,016
	4a - Λιγνίτης	25	91,5	2,93	-1,47	121,94	3048,54	180.000	0,017
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	121,89	2437,75	180.000	0,014
	5 - Μάρμα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	121,43	18213,87	180.000	0,101

συνεχίζεται

ΣΤΡΩΜΑ 3β (Ενδιάμεση Μάργα)									
ΠΑΛΑΤΟΣ Β= 1056 m									
Τάση σ' που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επιδόρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ. (kN/m ²)	Συνολική μεταβολή (σ* d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m ²)	Ανάκτηση στρώματος (m)
146,40									
	4α - Λιγνίτης	25	91,5	2,93	-1,47	146,33	3658,24	180.000	0,020
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	146,27	2925,30	180.000	0,016
	5 - Μάργα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	145,71	21856,64	180.000	0,121
ΣΤΡΩΜΑ 4α (Λιγνίτης)									
ΠΑΛΑΤΟΣ Β= 718 m									
Τάση σ' που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επιδόρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ. (kN/m ²)	Συνολική μεταβολή (σ* d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m ²)	Ανάκτηση στρώματος (m)
55,00									
	4β - Λιγνίτης	20	114	2,88	-1,44	54,95	1098,99	180.000	0,006
	5 - Μάργα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	54,74	8211,17	180.000	0,046
ΣΤΡΩΜΑ 4β (Λιγνίτης)									
ΠΑΛΑΤΟΣ Β= 413 m									
Τάση σ' που ασκεί στα υποκείμενα (kN/m ²)	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος * επιδόρασης (m)	Γωνία α (radians)	Γωνία β (radians)	Μέση σημειακή μεταβολή σ. (kN/m ²)	Συνολική μεταβολή (σ* d) (kN/m)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kN/m ²)	Ανάκτηση στρώματος (m)
44,00									
	5 - Μάργα (υποκ/νη)	150	199	2,69	-1,35	43,79	6568,94	180.000	0,036
* στο μέσο του κάθε στρώματος									

Τομέας εκσκαφής / στρώμα		Ανάκτηση κάθε στρώματος (m) ανά στάδιο εκσκαφής							Συνολική ανάκτηση κάθε στρώματος (m)
		1ο Στάδιο	2ο Στάδιο	3ο Στάδιο	4ο Στάδιο	5ο Στάδιο	6ο Στάδιο	7ο Στάδιο	
1	Προσχώσεις								
2α	Μάργα με ενστρώσεις Λιγνίτη	0,043							0,043
2β	Μάργα με ενστρώσεις Λιγνίτη	0,032	0,011						0,043
3α	Ενδιάμεση Μάργα	0,043	0,015	0,007					0,065
3β	Ενδιάμεση Μάργα	0,052	0,018	0,008	0,016				0,094
4α	Λιγνίτης	0,054	0,018	0,009	0,017	0,020			0,118
4β	Λιγνίτης	0,043	0,015	0,007	0,014	0,016	0,006		0,101
5	Μάργα (υποκείμενη)	0,322	0,110	0,052	0,101	0,121	0,046	0,036	0,790
Συνολική ανάκτηση (m) ανά στάδιο εκσκαφής		0,590	0,187	0,083	0,148	0,158	0,052	0,036	

Στον Πίνακα 11-1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών για τον προσδιορισμό της ανάκτησης με την απομάκρυνση καθενός από τους εδαφικούς τομείς. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι θεωρώντας τασική κατανομή κατά Boussinesq και λόγο Poisson $\nu=0$, θα πρέπει να αναμένεται ανάκτηση 0,590 m με την απομάκρυνση κατ' αρχάς των προσχώσεων, μέγεθος το οποίο μειώνεται σημαντικά στα επόμενα στάδια της εκσκαφής.

Η μέγιστη ανάκτηση κάθε στρώματος στα διάφορα στάδια εκσκαφής κυμαίνεται από 0,790 m στην υποκείμενη μάργα, μέχρι 0,043 m στον πρώτο εδαφικό τομέα (μάργας με ενστρώσεις λιγνίτη), μεγέθη ανάκτησης που εκδηλώνεται με την αφαίρεση των προσχώσεων. Οι ανακτήσεις αυτές θεωρείται ότι αντιστοιχούν στο κέντρο της εκσκαφής και αναμένεται να μειώνονται προς την περιφέρεια της.

Εντούτοις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η τασική κατανομή που υποδεικνύεται με την υπόθεση ενός τέλει ελαστικού εδάφους δεν πρέπει να θεωρείται η πλέον αξιόπιστη. Στην πραγματικότητα, η ζώνη που επηρεάζεται με την εκσκαφή είναι πολύ μικρότερη από αυτή που υπαινίσσεται η ελαστική θεωρία και κατά συνέπεια η ανάκτηση θα πρέπει να αναμένεται μικρότερη. Επίσης, μικρότερη θα είναι και για το λόγο ότι στους υπολογισμούς θεωρήθηκε λόγος Poisson $\nu=0$. Μικρή αύξηση της τιμής του θα μειώσει το μέγεθος της ανάκτησης σε μεγάλο ποσοστό.

11.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΩΝ ΔΥΤΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΤΟΥ “ΤΟΜΕΑ-6” ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Εκτός από τον υπολογισμό της ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής, επιχειρήθηκε η εκτίμηση της ευστάθειας των δυτικών (μόνιμων) πρανών του “Τομέα-6”. Η εκτίμηση αυτή είχε σκοπό την αξιολόγηση της κινητικότητας των πρανών, και πραγματοποιήθηκε με μεθόδους οριακής ισορροπίας (Bishop και Janbu) χρησιμοποιώντας το λογισμικό Larix-BS σ' ένα δισδιάστατο γεωλογικό προσομοίωμα.

11.2.1 Σύνταξη γεωλογικού προσομοιώματος των δυτικών πρανών

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της τεκτονικής με το λογισμικό Larix – BS, κάθε ρήγμα θεωρήθηκε σαν στρώμα μειωμένης διατμητικής αντοχής.

Εξαιτίας της καινοτομίας αυτής αλλά και των περιορισμένων δυνατοτήτων του λογισμικού, ήταν αναγκαίο να γίνουν κάποιες παραδοχές όσον αφορά τη στρωματογραφία (μείωση του αριθμού των στρωμάτων), αλλά και την τεκτονική (μείωση αριθμού των ρηγμάτων) του πρανούς. Έτσι προέκυψε ένα απλοποιημένο μοντέλο, ενσωματώνοντας το ανώτερο στρώμα των ενδιάμεσων (μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη) στο μαργαϊκό ορίζοντα και το κατώτερο μαργαϊκό στρώμα με τις λιγνιτικές

ενστρώσεις στο λιγνιτικό ορίζοντα (Σχ. 6-4). Θεωρήθηκε επίσης μια ρηγματωμένη ζώνη (ένα στρώμα μειωμένης διατμητικής αντοχής) στη θέση του ρήγματος F8.

Η γεωμετρία κάθε στρώματος ορίσθηκε στο λογισμικό μέσω πολυγωνικής γραμμής που καθόριζε την ανώτερη επιφάνεια του. Με τον ίδιο τρόπο ορίσθηκε και η ανώτερη επιφάνεια του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Το πάχος κάθε στρώματος προέκυψε από τη διαφορά υψομέτρου της ανώτερης και κατώτερης επιφανείας του, ενώ το κατώτερο στρώμα (υποκείμενη μάργα) θεωρήθηκε απεριορίστου πάχους.

Μετά τη γεωμετρία, ορίσθηκαν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά κάθε στρώματος (γωνία εσωτερικής τριβής, συνοχή) και το φαινόμενο βάρος των στρωμάτων σε σχέση με τον υδροφόρο ορίζοντα. Όσον αφορά την πίεση του νερού των πόρων, θεωρήθηκε ότι αυξάνει γραμμικά με το βάθος, ορίζοντας σαν επίπεδο αναφοράς μηδενικής πίεσης τον ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα.

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων (συνοχή, γωνία τριβής, φαινόμενο βάρος) που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, παρουσιάζονται στον Πίνακα 11-2. Οι τιμές αυτές προέκυψαν με βάση τη στρωματογραφία τα γεωτεχνικά ευρήματα των γεωτρήσεων (διακλάσεις, ασυνέχειες) και τα αποτελέσματα δοκιμών διατμητικής αντοχής,

Πίνακας 11-2 Γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση οριακής ισορροπίας

Εδαφικό στρώμα	Συνοχή c (kPa)	Γωνία εσωτ. τριβής ϕ ($^{\circ}$)	Υγρό φαινόμενο βάρος γ_b (kN/m ³)	Κορεσμένο φαινόμενο βάρος γ_{sat} (kN/m ³)
Επιχωμάτωση	10	19	18,12	18,34
Αργιλοαμμώδεις αποθέσεις	35	19	18,12	18,34
Ενδιάμεση Μάργα *	217	29		15,90
Κοίτασμα (Λιγνίτης)	50	24,1		12,00
Υποκείμενη Μάργα	102	37		16,20
Ρηγματωμένη ζώνη	0	23		16,00
Ρηγματωμένη ζώνη και στρώμα Εξαλλοιωμένης Υποκείμενης Μάργας	50	23		16,00

* Περιλαμβάνει το στρώμα της ενδιάμεσης μάργας και το ανώτερο στρώμα της μάργας με τις λιγνιτικές ενστρώσεις (Βλέπε Σχ. 6-4).

Πιο αναλυτικά, για το στρώμα του κοιτάσματος, η τιμή της συνοχής θεωρήθηκε μειωμένη σε σχέση με αυτή που προτείνουν οι Kanvadas *et al.* (1994), ενώ η γωνία εσωτερικής τριβής ίση με την παραμένουσα γωνία τριβής. Στην επιλογή αυτή συνέβαλαν οι επιφάνειες διάτμησης που διαπιστώθηκαν με τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις αλλά και στη διάστρωση του κοιτάσματος με λεπτές παρεμβολές μαργαϊκού υλικού.

Οι παράμετροι της διατμητικής αντοχής και το φαινόμενο βάρος της ενδιάμεσης και υποκείμενης μάργας προσδιορίστηκαν με τριαξονικές δοκιμές στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Οι ανάλογες παράμετροι των προσχώσεων και της επιχωμάτωσης καθορίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα εργαστηριακών μετρήσεων σε ομόλογους σχηματισμούς της ευρύτερης περιοχής (ΑΠΘ, 1998).

Για το στρώμα της μειωμένης διατμητικής αντοχής που αντιστοιχεί στο ρήγμα, θεωρήθηκε γωνία εσωτερικής τριβής ίση με την παραμένουσα γωνία τριβής των μαργών (23°) και συνοχή ίση με 0 ή και 50 kPa (στο πλαίσιο μιας παραμετρικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε).

Τέλος, αναφορικά με το φαινόμενο βάρος, θεωρήθηκε ότι όλα τα στρώματα κάτω από το βάθος των 15 m είναι κορεσμένα, δεδομένου ότι στο βάθος αυτό διαμορφώνεται ο υδροφόρος ορίζοντας.

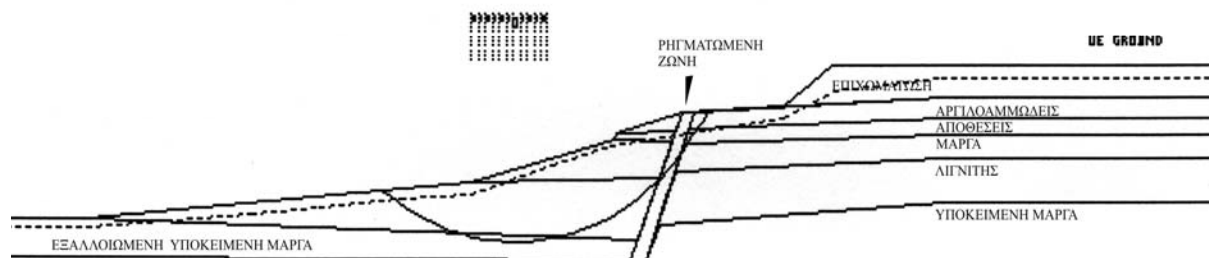
11.2.2 Εκτίμηση της ευστάθειας

Η ανάλυση των κινήσεων που έχουν καταγραφεί (βλέπε Κεφ. 6), υποδεικνύει ότι ενδέχεται να αναπτυχθεί αστοχία είτε στην επαφή κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας είτε μεταξύ του λιγνίτη και των μαργαϊκών ενστρώσεων του κοιτάσματος.

Ακολουθώντας την ανάλυση ευστάθειας κατά Bishop και εξετάζοντας την πιθανότητα ολίσθησης κατά κυκλικό τομέα ο οποίος εφάπτεται της επαφής κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας, προέκυψε συντελεστής ασφάλειας $FS = 1,13$ (Σχ. 11-4α).

Δεδομένης της στρωσιγένειας των σχηματισμών αλλά και της τεκτονικής, η κατά Janbu μέθοδος ανάλυσης θεωρήθηκε σαν η πλέον κατάλληλη. Λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια διάτμησης που αναπτύσσεται στα +530 m (με βάση τις καταγραφές των κλισιμέτρων), εκτιμήθηκε η ευστάθεια τεμάχους που ορίζεται από το επίπεδο αυτό (+530 m) και τη ρηγματωμένη ζώνη (Σχ. 11-4 β). Από την επίλυση αυτή, η οποία έγινε με τις πλέον συντηρητικές θεωρήσεις όσον αφορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους, προέκυψε συντελεστής ασφάλειας $FS = 1,11$.

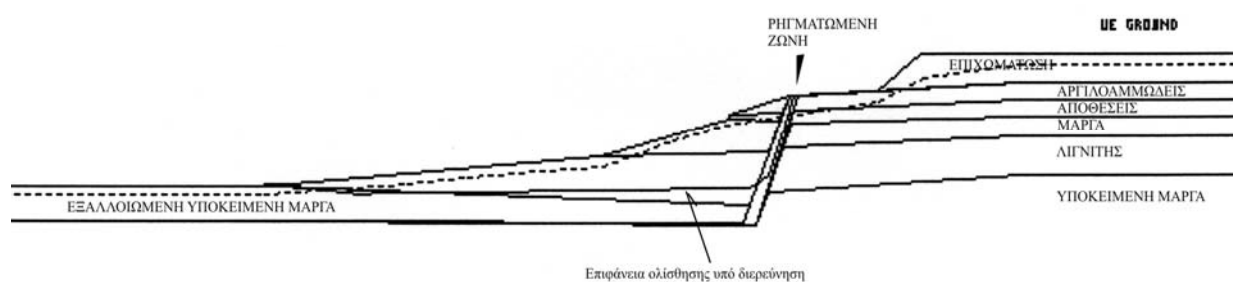
Οι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν θεωρώντας μια ενιαία εδαφική στρώση μειωμένης διατμητικής αντοχής που περιλαμβάνει το ρήγμα και το εδαφικό στρώμα μεταξύ του υψομέτρου +510 m και +540 m. Η εκτίμηση της ευστάθειας διαφοροποιείται μερικώς και η μέθοδος Bishop δίδει $FS=1,11$ ενώ η μέθοδος Janbu $FS=1,18$ (Σχ. 11-5).



Α-ΒΑ

Δ-ΝΔ

(α)

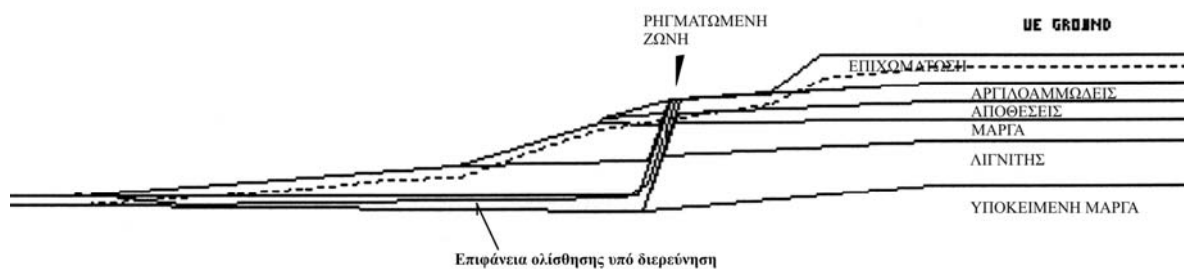


Α-ΒΑ

Δ-ΝΔ

(β)

Σχ. 11-4 Αναλύσεις με τη μέθοδο Bishop (α) και Janbu (β). (Θεώρηση ρηγματωμένης ζώνης και ορίζοντα εξαλλοιωμένης υποκείμενης μάργας)



Α-ΒΑ

Δ-ΝΔ

Σχ. 11-5 Μέθοδος Janbu. Θεώρηση ρήγματος και ζώνης μειωμένης αντοχής στη επαφή του λιγνίτη με την υποκείμενη μάργα

11.2.3 Παρατηρήσεις σχετικά με τις αναλύσεις ευστάθειας των δυτικών πρανών

Από τις προαναφερόμενες αναλύσεις, επιβεβαιώνεται η ασφάλεια των δυτικών πρανών. Με βάση τους συντελεστές ασφάλειας που εκτιμήθηκαν ($FS = 1,1$ στην πλέον απαισιόδοξη περίπτωση), μια συνολική αστοχία δεν είναι αναμενόμενη. Επίσης από τις αναλύσεις ευστάθειας προκύπτει ότι τα υπο-κατακόρυφα ρήγματα (όπως έχουν σχεδιασθεί στη γεωλογική τομή), σε συνδυασμό με τη δεδομένη στρωματογραφία, δεν φαίνεται να επηρεάζουν την ευστάθεια των πρανών, ακόμα και αν θεωρηθούν με μηδενική διατμητική αντοχή.

Από τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι επιφάνειες ολίσθησης που διαπιστώθηκαν με τα κλισίμετρα, οφείλονται πιθανότατα στην εκτόνωση των τάσεων λόγω της αποφόρτισης που προκαλείται με την εκσκαφή του Ορυχείου, αλλά δεν οδηγούν σε υποβάθμιση της ευστάθειας των πρανών.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιήθηκε με ενεργές τάσεις, θεωρώντας ότι η πίεση των πόρων είναι ανάλογη της υδροστατικής. Εντούτοις, όλοι οι σχηματισμοί δεν έχουν την ίδια διαπερατότητα και πιθανόν να αναπτύσσεται διαφορετική πίεση πόρων στους διάφορους στρωματογραφικούς ορίζοντες (π.χ. ένστρωση χαρακτηριστικής άμμου, αργίλων). Επίσης, η σχετική υστέρηση στη μείωση της πίεσης (εξαιτίας της εκσκαφής) στις ενστρώσεις των αργίλων, ίσως να ευνόησε και την αστοχία των σωλήνων των κλισιμέτρων. Η πίεση του νερού των πόρων συμβάλλει προσθετικά στη διόγκωση των αργιλικών στρωμάτων και την παραμόρφωση (περισφίξεις) των σωλήνων των κλισιμέτρων.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι η ανάλυση της ευστάθειας πραγματοποιήθηκε με βάση τη θεωρούμενη στρωματογραφία. Η ύπαρξη αργιλικών ενστρώσεων μικρής διατμητικής αντοχής δεν αποκλείει τη διαφοροποίηση της ευστάθειας τουλάχιστον τοπικά. Κατά συνέπεια, μια λεπτομερέστερη γεωλογική τομή και ένα πιο αναβαθμισμένο λογισμικό που θα θεωρούσε τη στρωματογραφία με υψηλότερη ανάλυση, θα αύξανε την αξιοπιστία της ανάλυσης.

Επιπρόσθετα, κρίθηκε σκόπιμο να διερευνηθεί η συμπεριφορά του πρανούς και με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της δυστροπίας των σχηματισμών και την κατανομή των τάσεων, οι οποίες διαφοροποιούνται έντονα λόγω της στρωσιγένειας και της τεκτονικής.

11.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η περιοχή μέσα στην οποία ένα πρόβλημα πρόκειται να διερευνηθεί, υποδιαιρείται σε διακριτά στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους σε κάποια σημεία, (τους κόμβους). Σε κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία, θεωρείται ότι συγκεκριμένες

ιδιότητες του γεωυλικού (όπως το μέτρο του Young) είναι σταθερές, ενώ μεταβλητές όπως η παραμόρφωση μεταβάλλονται με βάση συγκεκριμένο νόμο (γραμμικό, εκθετικό κλπ). Οι εξισώσεις που συνδέουν τις μετατοπίσεις με τις δυνάμεις στους κόμβους του στοιχείου, μπορούν να αποδοθούν με τη μορφή ενός πίνακα που ονομάζεται μητρώο ακαμψίας (δυστροπίας) του στοιχείου. Από τους πίνακες δυστροπίας των επιμέρους στοιχείων, προκύπτει ο πίνακας δυστροπίας όλης της περιοχής.

Επιπρόσθετα, προσδιορίζοντας τις οριακές συνθήκες του προβλήματος και τις εφαρμοζόμενες φορτίσεις, προκύπτει ένας αριθμός από ταυτόχρονα ισχύουσες εξισώσεις που συσχετίζουν τις μετατοπίσεις των κόμβων, τις παραμέτρους δυστροπίας και τα εφαρμοζόμενα φορτία. Με βάση το σύστημα των εξισώσεων ισορροπίας υπολογίζονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις σε κάθε στοιχείο.

Σε μια δισδιάστατη ανάλυση, χρησιμοποιούνται συνήθως τριγωνικά ή τετραγωνικά στοιχεία, και οι εξισώσεις περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων αυτών θεωρώντας την παραμόρφωση στην τρίτη διάσταση πολύ μικρή (συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης - plane strain analysis).

Κατά τη χρήση των αριθμητικών μεθόδων σε γεωτεχνικά προβλήματα, προκύπτουν δυσκολίες από το γεγονός ότι τα περισσότερα εδάφη έχουν ιδιότητες που χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα, είναι συχνά ετερογενή, ενώ η υδροφορία και οι τοπικές πιέσεις του νερού των πόρων έχουν μεγάλη επίδραση στην αντοχή τους. Το πρόβλημα γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο όταν τα δεδομένα που αφορούν τις αρχικές τάσεις στο πεδίο, είναι ελλιπή.

Οι πρώτες εφαρμογές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, θεωρούσαν ότι τα εδάφη είναι γραμμικά ελαστικά υλικά. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι σχεδόν πάντα ανεπαρκές προκειμένου να αποδώσει με ακρίβεια την εδαφική συμπεριφορά, αλλά έχει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους και της εύκολης εφαρμογής. Στη συνέχεια, τα μοντέλα προσομοίωσης βελτιώθηκαν συμπεριλαμβάνοντας περισσότερες παραμέτρους της καταστατικής σχέσης που αποδίδει την εδαφική συμπεριφορά (Βλέπε Κεφ. 4). Υιοθετήθηκαν μη γραμμικές ελαστικές σχέσεις, όπως οι διγραμμικές και οι υπερβολικές. Χρησιμοποιήθηκαν πολυγραμμικές και πολυκάμπυλες σχέσεις (spline functions) για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ η θεωρία της πλαστικότητας έδωσε τη δυνατότητα να περιγραφούν οι μη γραμμικές σχέσεις σε συνάρτηση με τη μεταβολή του όγκου η οποία προκύπτει με τη αλλαγή των τάσεων. Έγιναν επίσης προσπάθειες να θεωρηθεί η επίδραση της στερεοποίησης, η ανισοτροπία, ο ερπυσμός και η ρωγμάτωση λόγω διάτασης (εφελκυσμού). Είναι γεγονός όμως ότι, όσο αυξάνει η πολυπλοκότητα του μοντέλου αυξάνει και το κόστος της ανάλυσης, συχνά πέρα από τα επιτρεπτά όρια, (Morgenstern and Sangrey, 1978).

Τα λογισμικά των πεπερασμένων στοιχείων προσφέρουν στο χρήστη τη δυνατότητα επιλογής ενός καταστατικού μοντέλου από τα απλά ελαστικά μέχρι τα πλέον βελτιωμένα μη γραμμικά ελαστοπλαστικά. Η επιλογή του μοντέλου για τη διερεύνηση ενός προβλήματος εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια αλλά και τη διαθεσιμότητα των κατάλληλων δεδομένων, ιδιαίτερα όσον αφορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους.

Στην περίπτωση ανάλυσης της κινητικής συμπεριφοράς μιας εκσκαφής, οι γεωλογικοί σχηματισμοί υποδιαιρούνται σ' ένα αριθμό στοιχείων στα οποία προσδιορίζονται τα μεγέθη των

αρχικών τάσεων. Η εκσκαφή προσομοιώνεται με την απομάκρυνση των στοιχείων που βρίσκονται πάνω από το όριο της εκσκαφής και οι προκαλούμενες τασικές μεταβολές, (οι οποίες είναι ίσες σε τιμή και αντίθετες σε κατεύθυνση με τις αρχικά επιβαλλόμενες από τα γεωυλικά τάσεις), εφαρμόζονται στο όριο που αποκαλύπτεται. Οι τασικές αυτές μεταβολές προκαλούν μετακινήσεις και επιφέρουν διαφοροποίηση στο τασικό πεδίο του υπεδάφους. Η διαφοροποίηση αυτή εκτιμάται και συνυπολογίζεται προκειμένου να προσδιορισθούν οι τελικές τάσεις και μετακινήσεις που θα προκληθούν με την προχώρηση της εκσκαφής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων στην πρόγνωση της ευστάθειας των πρανών, δεν προσφέρει κανένα πλεονέκτημα σε σχέση με την ακρίβεια των μεθόδων της οριακής ισορροπίας (Morgestern and Sangrey, 1978). Εντούτοις, η χρησιμότητα τους έγκειται στην ανάλυση - διερεύνηση της παραμόρφωσης που εκδηλώνεται, και όσον αφορά το θέμα αυτό, αποτελεί ένα από τα πολύ λίγα μέσα πρόγνωσης της κινητικής συμπεριφοράς των πρανών και των εκσκαφών γενικότερα.

11.3.1 Λογισμικό Plaxis

Το λογισμικό PLAXIS (Version 7.2) το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση δισδιάστατων γεωτεχνικών προβλημάτων, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών χρησιμοποιώντας το μοντέλο Mohr Coulomb, το εδαφικό μοντέλο κράτυνσης (Hardening soil), ή το μοντέλο χαλάρωσης-ερπυσμού (Soft soil - creep soil), (Plaxis, 1988).

Το μοντέλο Mohr Coulomb αντιπροσωπεύει μία πρώτη προσέγγιση της συμπεριφοράς των σχηματισμών και χρησιμοποιείται κυρίως στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμα αξιόπιστα δεδομένα όσον αφορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους.

Το μοντέλο κράτυνσης του εδάφους (Hardening soil model) αντιπροσωπεύει ένα πιο αναβαθμισμένο μοντέλο. Το πλεονέκτημα του σε σχέση με το μοντέλο Mohr Coulomb, έγκειται στη χρήση υπερβολικής καμπύλης για την προσέγγιση της σχέσης τάσης - παραμόρφωσης, αλλά και στη θεώρηση της εξάρτησης της δυστροπίας του εδάφους από το τασικό επίπεδο. Οι οριακές καταστάσεις προσδιορίζονται με βάση τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ), τη συνοχή (c) και τη γωνία διασταλτικότητας (ψ), ενώ η εδαφική δυστροπία θεωρείται με τρεις παραμέτρους: το τέμνον μέτρο δυστροπίας (E_{50}), το μέτρο αποφόρτισης – επαναφόρτισης (E_{ur}) και το μέτρο δυστροπίας οידημέτρου (E_{oed}). Οι παράμετροι δυστροπίας E_{50} και E_{oed} συσχετίζονται με μία τάση αναφοράς (p_{ref}), που συνήθως θεωρείται αυτή των 100 kPa ($=1 \text{ bar}$).

Το μοντέλο κράτυνσης είναι κατάλληλο για όλα τα εδάφη αλλά δεν λαμβάνει υπόψη του τη χαλάρωση (μαλάκυνση) που παρουσιάζει το έδαφος εξαιτίας της διασταλτικότητας και της καταστροφής των διαγενετικών του δεσμών.

Τέλος, το μοντέλο χαλάρωσης - ερυσμού (Soft soil - creep soil model), θεωρεί τη χαλάρωση του εδάφους λόγω διασταλτικότητας και χρησιμοποιείται ευρύτατα στην περίπτωση των μαλακών εδαφών όπως οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι, οι ιλεείς και η τύρφη.

11.3.2 Μοντέλο εδαφικής κράτυνσης

Η βασική ιδέα για τη διατύπωση του μοντέλου εδαφικής κράτυνσης (Hardening soil model) ήταν η υπερβολική σχέση μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης (ε_1) και της αποκλίνουσας τάσης (q) σε μια τριαξονική φόρτιση (Plaxis, 1988). Η σχέση αυτή προσεγγίζεται με την εξίσωση

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \cdot \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{για } q < q_f \quad [11.9]$$

όπου q_a η ασύμπτωτη τιμή της διατμητικής αντοχής (βλέπε Σχήμα 4-9)

E_{50} το τέμνον μέτρο δυστροπίας στο 50% της αντοχής του εδάφους και

q_f η αποκλίνουσα τάση κατά την αστοχία

Το μέτρο E_{50} εκφράζει τις πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της αρχικής αποκλίνουσας φόρτισης και εξαρτάται από την πλευρική τάση σ'_3 σύμφωνα με τη σχέση

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \cdot \left(\frac{c \cot \varphi - \sigma'_3}{c \cot \varphi + p^{ref}} \right)^m \quad [11.10]$$

όπου E_{50}^{ref} το μέτρο δυστροπίας που αντιστοιχεί στην πλευρική τάση αναφοράς p^{ref} (που συνήθως θεωρείται ίση με 100 μονάδες τάσης) και

m συντελεστής που εκφράζει την εξάρτηση της δυστροπίας από την πλευρική τάση σ'_3 (η τιμή της οποίας θεωρείται με αρνητικό πρόσημο σε περίπτωση συμπίεσης).

Τέλος, η ασύμπτωτη τιμή της διατμητικής αντοχής (q_a) προσδιορίζεται σε συνάρτηση με την αποκλίνουσα τάση κατά την αστοχία (q_f) με βάση την εξίσωση

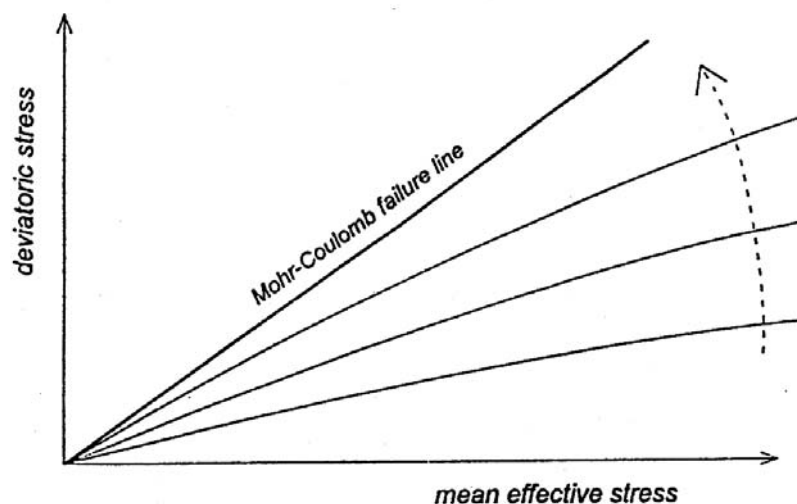
$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad [11.11]$$

$$\text{όπου } q_f = \left(c \cot \varphi - \sigma_3' \right) \cdot \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \text{ όπως προκύπτει με βάση το κριτήριο θραύσης}$$

Mohr Coulomb και

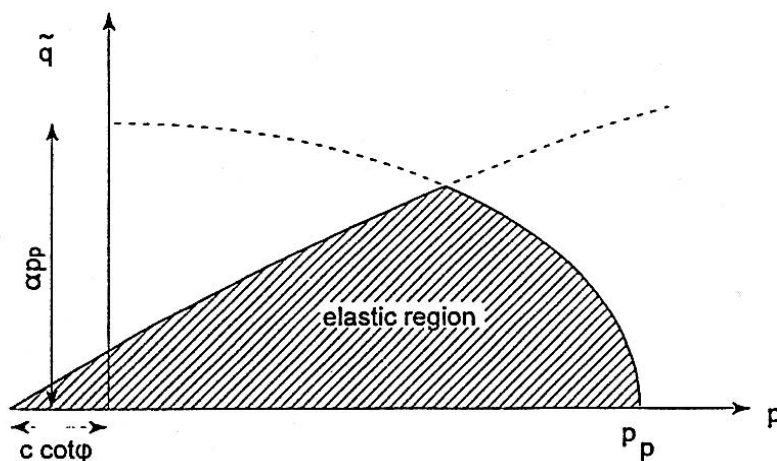
R_f ο λόγος θραύσης που συσχετίζει τις τιμές q_f και q_a και θα πρέπει να είναι μικρότερος της μονάδας. Στο Plaxis θεωρείται εξ ορισμού ότι $R_f = 0,9$.

Το μοντέλο κράτυνσης θεωρεί τις περιβάλλουσες θραύσης (λόγω διάτμησης) όπως υποδεικνύονται στο Σχ. 11-6, αλλά αυτές από μόνες τους δεν αποδίδουν τη μεταβολή του όγκου λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης, που παρουσιάζεται σε ισότροπη συμπίεση. Ως εκ τούτου, θεωρείται μια δεύτερη επιφάνεια “διαρροής” (yield cap) προκειμένου να ορισθεί η ελαστική ζώνη κατά τη διεύθυνση του άξονα της μέσης ενεργής τάσης (p). Πρόκειται για μια έλλειψη στο επίπεδο q - p (Σχ. 11-7), μετά την οποία επέρχεται πλαστική παραμόρφωση (yield cap surface).



Σχ. 11-6 Όρια διαρροής λόγω διάτμησης για διάφορα μεγέθη κράτυνσης (Plaxis, 1988).

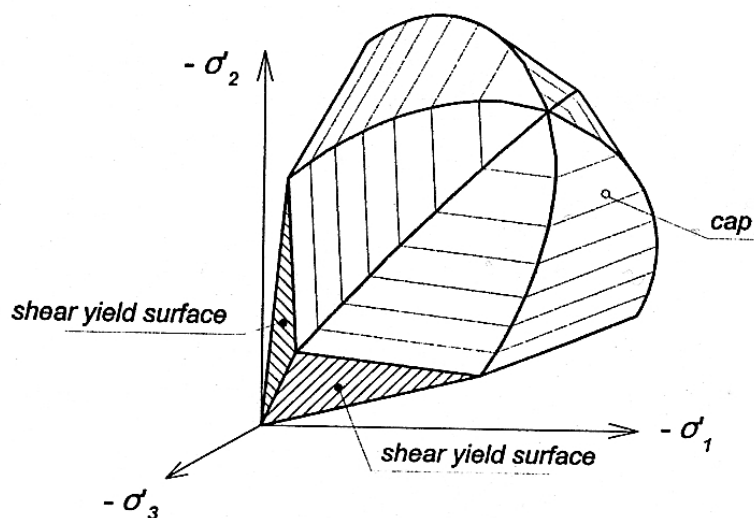
Το ελλειπτικό σχήμα της επιφάνειας “διαρροής” (Σχ. 11-7), προσδιορίζεται με βάση τις παραμέτρους m , p^{ref} , το συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία k_0^{nc} του εδάφους και το μέτρο δυστροπίας E_{oed}^{ref} που προκύπτει από δοκιμές οιδημέτρου. Οσον αφορά το μέγεθος της επιφάνειας διαρροής, αυτό διαμορφώνεται σε σχέση με την τάση προφόρτισης του εδάφους (p_p).



Σχ. 11-7 Επιφάνειες διαρροής (cap yield) του μοντέλου κράτυνσης στο επίπεδο q-p.

$$\alpha = k_0^{nc} \text{ και } p_p \text{ η ισότροπη τάση προφόρτισης (Plaxis, 1988)}$$

Στο Σχ. 11-8, παρουσιάζονται οι επιφάνειες διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$.



Σχ. 11-8 Επιφάνειες διαρροής (cap yield) του μοντέλου κράτυνσης στο χώρο των κυρίων τάσεων για ένα μη συνεκτικό έδαφος (Plaxis, 1988).

Το μέτρο αναφοράς $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ που χρησιμοποιείται για την απόδοση του μεγέθους των πλαστικών παραμορφώσεων σε ισότροπη συμπίεση, προκύπτει από την εφαπτομενική δυστροπία E_{oed} στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης που προσδιορίζεται με τις δοκιμές οιδημέτρου. Το μέτρο αναφοράς $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$, όπως αναφέρεται στο Plaxis Bulletin (2003), συσχετίζεται με το E_{oed} με βάση την εξίσωση

$$E_{\text{oed}} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma'_1 \sin \phi}{c \cot \phi + p^{\text{ref}} \sin \phi} \right)^m \quad [11.12]$$

Η τιμή του $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ θεωρείται από το λογισμικό ίση με το E_{50}^{ref} .

Όσον αφορά την προσομοίωση των τασικών διαδρομών αποφόρτισης και επαναφόρτισης θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά, το μοντέλο κράτυνσης χρησιμοποιεί το μέτρο δυστροπίας E_{ur} που εξαρτάται από την πλευρική τάση (σ'_3) σύμφωνα με τη σχέση :

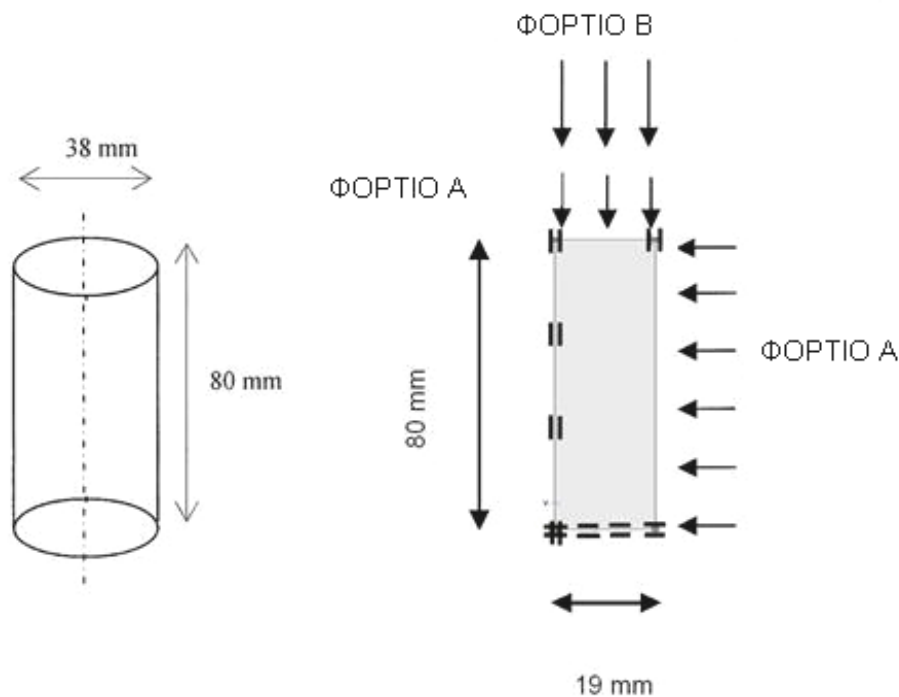
$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cot \phi - \sigma'_3}{c \cot \phi + p^{\text{ref}}} \right)^m \quad [11.13]$$

όπου $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ το μέτρο αναφοράς για αποφόρτιση και επαναφόρτιση, που αντιστοιχεί στη τάση αναφοράς p^{ref} . Θεωρείται ότι $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \approx 3 E_{50}^{\text{ref}}$.

11.3.3 Έλεγχος αξιοπιστίας του μοντέλου κράτυνσης για την απόδοση της συμπεριφοράς των μαργαϊκών οριζόντων

Στο πλαίσιο διερεύνησης της δυνατότητας χρησιμοποίησης του μοντέλου κράτυνσης για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των μαργαϊκών οριζόντων του πεδίου έρευνας, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση των δοκιμών που υποβλήθηκαν σε τριαξονική δοκιμή, χρησιμοποιώντας το λογισμικό PLAXIS v.7.2. Ακολούθως έγινε σύγκριση των καμπυλών αποκλίνουσας τάσης - ανηγμένης παραμόρφωσης που προέκυψαν, με τις αντίστοιχες καμπύλες των εργαστηριακών δοκιμών.

Η προσομοίωση των δοκιμών φόρτισης πραγματοποιήθηκε θεωρώντας αξονοσυμμετρία για το ήμισυ της διαμέτρου του κυλινδρικού δοκιμίου, δεσμεύοντας τους αντίστοιχους κόμβους (Σχ. 11-9). Η τριβή που αναπτύσσεται κατά τη δοκιμή μεταξύ της κορυφαίας έδρας του δοκιμίου και της πλάκας φόρτισης, θεωρήθηκε με δέσμευση του κορυφαίου δεξιού κόμβου, επιτρέποντας κίνηση του ως προς την κατακόρυφο (Agioutantis *et al.*, 2002).



Σχ. 11-9 Προσομοίωση της τριαξονικής δοκιμής

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία 15 κόμβων και οι γεωτεχνικές παράμετροι που είχαν προσδιορισθεί εργαστηριακά (Πίνακας 11-3). Υποθετική προσέγγιση αφορούσε μόνο τη γωνία διασταλτικότητας και το λόγο Poisson για αποφόρτιση - επαναφόρτιση του δοκιμίου.

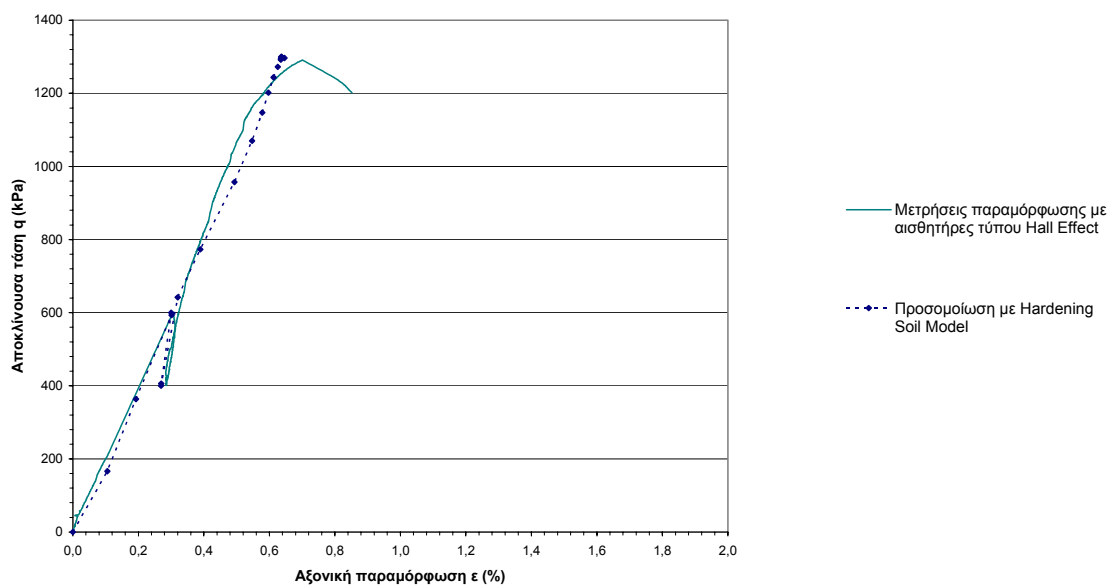
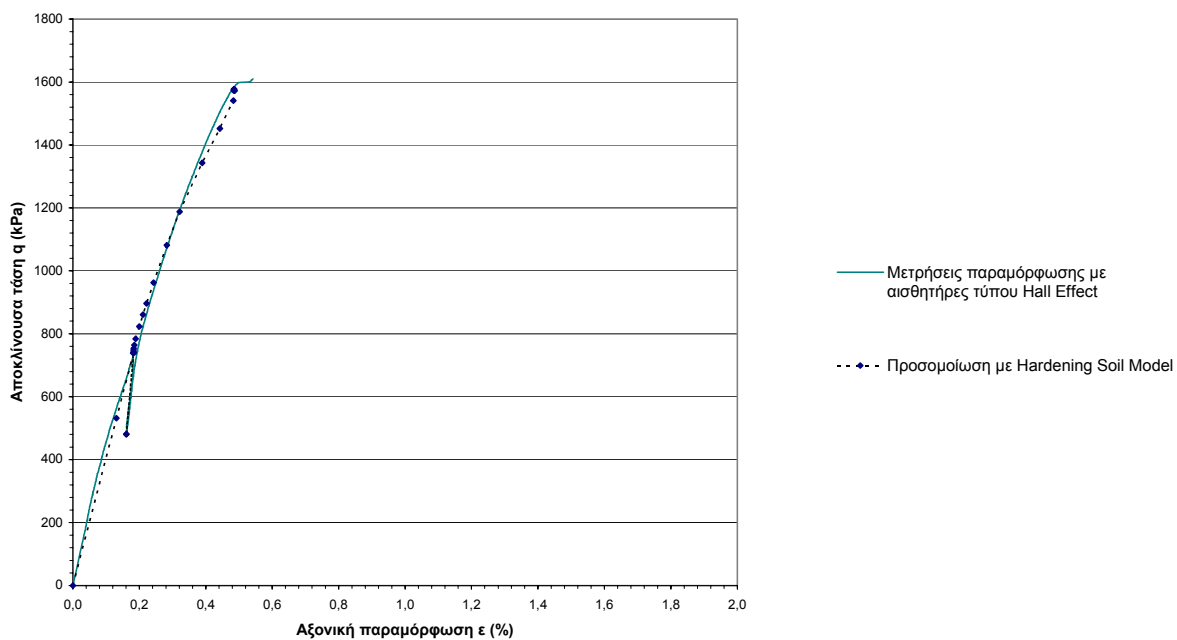
Με την κατάλληλη επιλογή του λογισμικού, επιβλήθηκε αξονικά (κατακόρυφα) και πλευρικά (οριζόντια) ένα Φορτίο Α (Σχ. 11-9), το οποίο αντιστοιχεί στη ενεργή τάση σ_3' με την οποία στερεοποιήθηκε το δοκίμιο κατά την τριαξονική δοκιμή. Στη συνέχεια εφαρμόσθηκε ένα Φορτίο Β που αυξανόταν μέχρι αστοχίας του δοκιμίου. Το Φορτίο Β αντιστοιχεί στην αποκλίνουσα τάση $q (= \sigma_1 - \sigma_3)$ που επιβαλλόταν με την τριαξονική δοκιμή. Με βάση την επίλυση του μοντέλου, σχεδιάσθηκε το διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης (q) – αξονικής παραμόρφωσης (ϵ), για ένα σημείο που επελέγη στο ανώτερο μισό τμήμα του δοκιμίου (κοντά στον άξονα συμμετρίας του) και συγκρίθηκε με το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε από την τριαξονική δοκιμή (Σχ. 11-10).

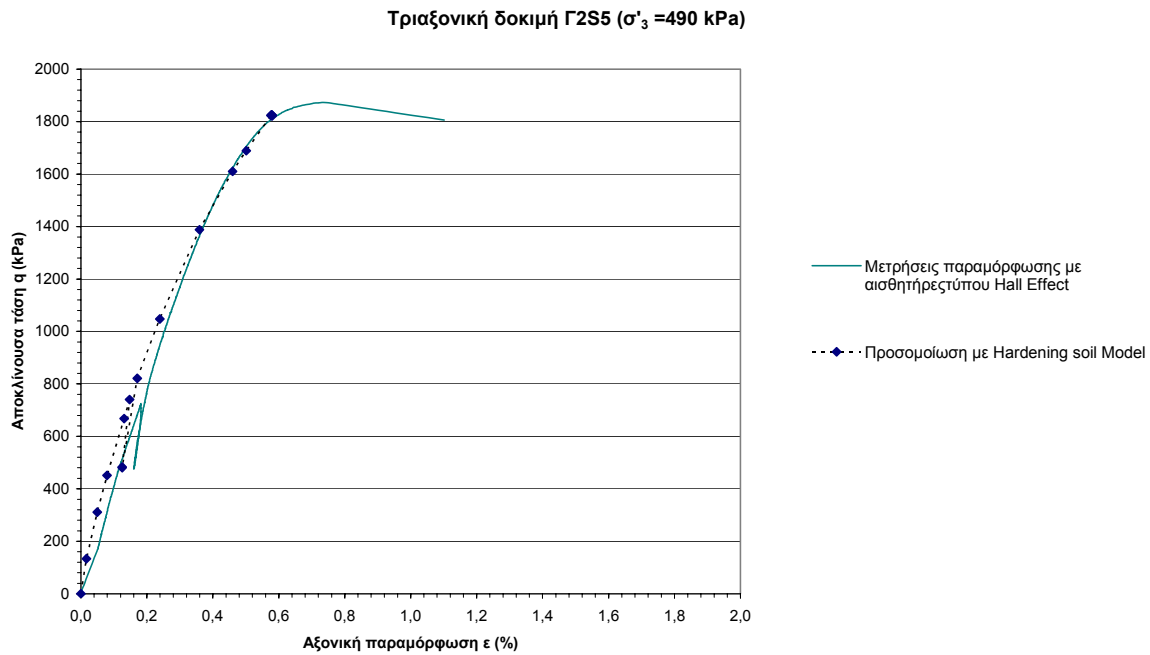
Έλεγχος για την καταλληλότητα του μοντέλου πραγματοποιήθηκε στα δοκίμια B2S3, B2S10 από τη θέση δειγματοληψίας B2 και στα δοκίμια Γ2S4, Γ2S5 από τη θέση δειγματοληψίας Γ2. Διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης (q) - ανηγμένης παραμόρφωσης (ϵ) που προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές και την αντίστοιχη προσομοίωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 11-10.

Πίνακας 11-3 Γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση των τριαξονικών δοκιμών

Γεωτεχνικές παράμετροι του μοντέλου κράτυνσης (Hardening Soil Model)	Δείγμα από τη θέση B2	Δείγμα από τη θέση Γ2
Συνοχή c (kPa)	217	102
Γωνία τριβής ϕ (deg)	29	37
Γωνία Διαστολής ψ (deg)	0	0
Μέτρο δυστροπίας αναφοράς E_{50}^{ref} (kPa)	168.530	344.634
Μέτρο δυστροπίας αναφοράς E_{ur}^{ref} (kPa)	495.980	977.425
Συντελεστής εξάρτησης m (-)	0,373	0,15
Τάση αναφοράς p^{ref} (kPa)	100	100
Μέτρο δυστροπίας αναφοράς E_{oed}^{ref} (kPa)	300.000	712.500
Λόγος Poisson ν_{ur} (-)	0,3	0,3
Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία k_o (-)	0,663	0,619
Φαινόμενο βάρος W (kN/m ³)	14,98	15,67
Περατότητα κατά την οριζόντιο $Perm-x$ (m/day)	0,051	0,035
Περατότητα κατά την κατακόρυφο $Perm-y$ (m/day)	0,045	0,022

Με βάση το ικανοποιητικό επίπεδο προσέγγισης των υπολογιζομένων και μετρούμενων τιμών, οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την επίλυση, κρίθηκαν κατάλληλοι για την προσομοίωση των συγκεκριμένων μαργαϊκών σχηματισμών και τη διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς της εκσκαφής. Οι όποιες αποκλίσεις στο ανώτερο κυρίως τμήμα στις καμπύλες του Σχ. 11-10, αποδίδονται στη θέση του σημείου στο οποίο αναφέρεται η ανηγμένη παραμόρφωση, στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο συγκεκριμένο εύρος φόρτισης, στην πιθανή ατελή επιπέδωση των άκρων του δοκιμίου, στη θέση εγκατάστασης των αισθητήρων Hall Effect αλλά και στην ανάπτυξη πίεσης πόρων (κατά το στάδιο προσέγγισης της αστοχίας του δοκιμίου).

Τριαξονική δοκιμή B2S3 ($\sigma'_3 = 300 \text{ kPa}$)Τριαξονική δοκιμή Γ2S4 ($\sigma'_3 = 400 \text{ kPa}$)



Σχ. 11-10 Προσομοίωση τριαξονικών δοκιμών με το μοντέλο κράτυνσης του λογισμικού Plaxis.

11.3.4 Προσομοίωση της εκσκαφής

Η κινητικότητα που εμφανίστηκε στο Ορυχείο “Τομέας-6”, διερευνήθηκε με προσομοίωση της εκσκαφής χρησιμοποιώντας το λογισμικό Plaxis (Version 7.2).

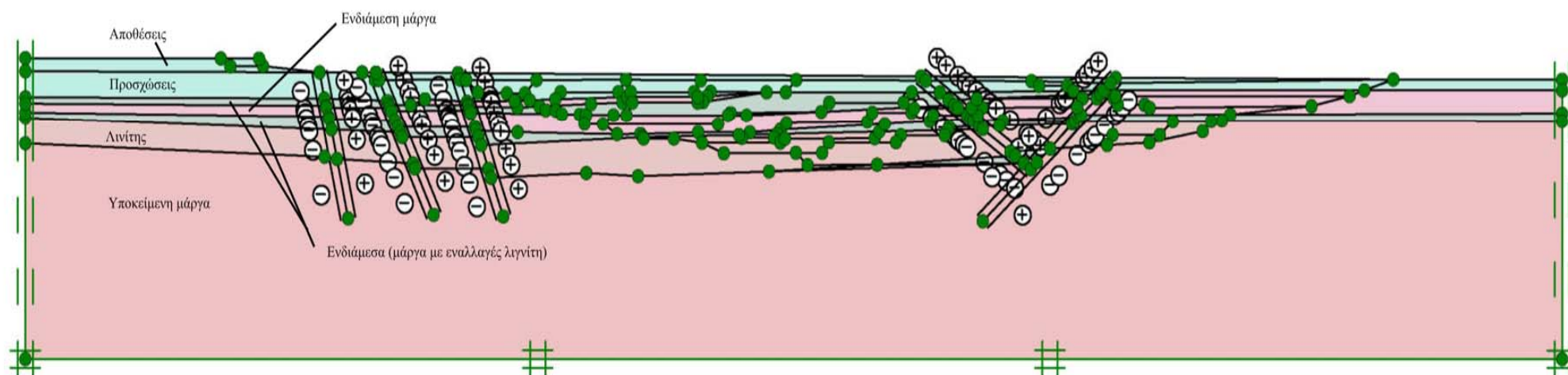
Σε πρώτο στάδιο σχεδιάστηκε η γεωμετρία, ορίστηκαν οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και δημιουργήθηκε το δικτύωμα των στοιχείων (Σχ. 11-11 και Σχ. 11-12). Στη συνέχεια ορίστηκαν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος και ακολούθησε η υπολογιστική φάση.

11.3.4.1 Καθορισμός της γεωμετρίας και εισαγωγή των δεδομένων

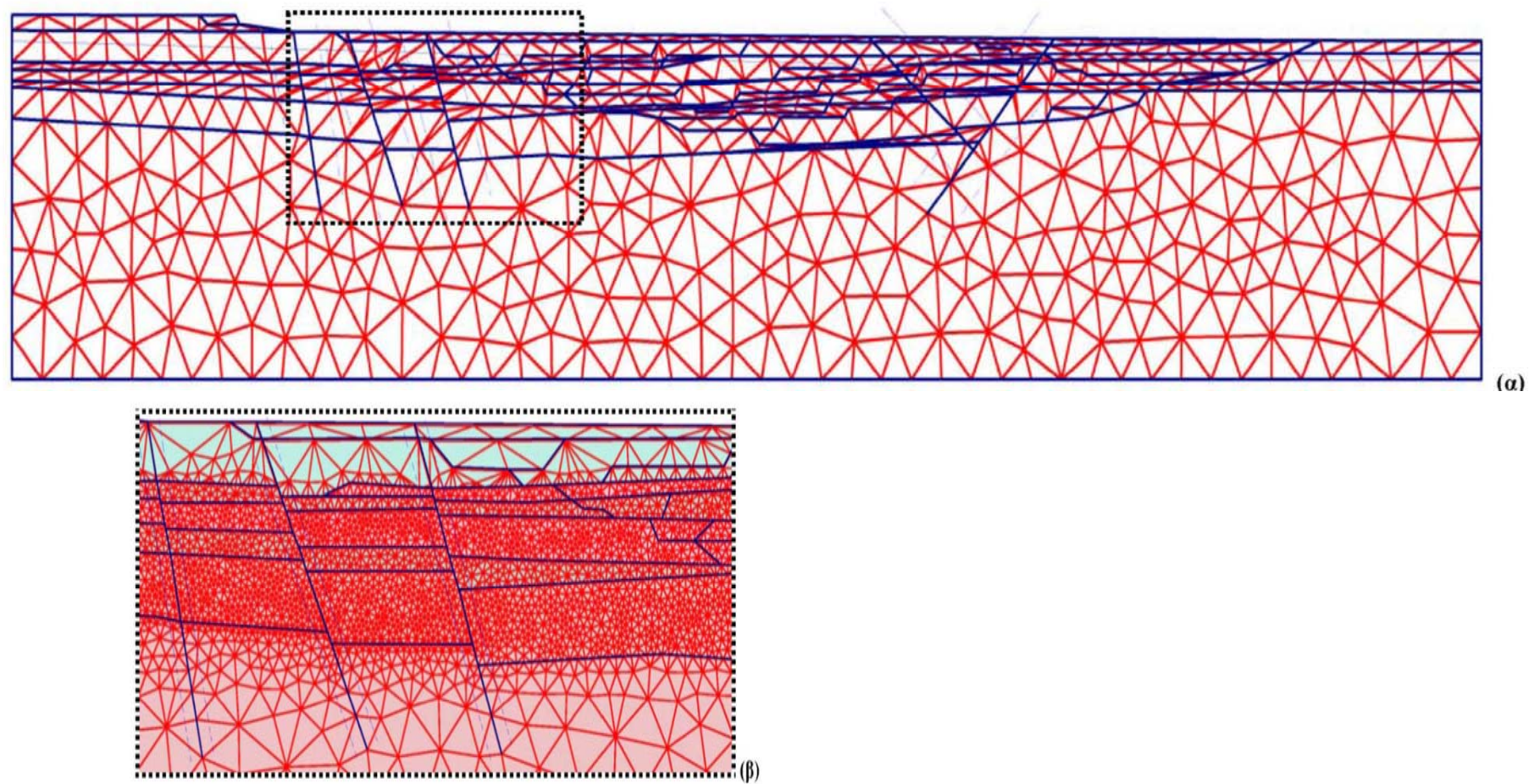
11.3.4.1.1 Διαστάσεις του μοντέλου και οριακές συνθήκες

Το λιγνιτωρυχείο θεωρήθηκε ότι αναπτύσσεται σε ισότροπους, ελαστοπλαστικούς σχηματισμούς. Το μήκος της εκσκαφής ορίστηκε πολύ μεγαλύτερο από το πλάτος της, γεγονός που ικανοποιεί τις συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain).

Το πρόβλημα αποδόθηκε γεωμετρικά στο Σχ. 11-11, με βάση τη γεωλογική τομή του Σχ. 6-4.



Σχ. 11-11 Γεωμετρία (στρωματογραφία, τεκτονική, ορισμός των σταδίων εκσκαφής) και οριακές συνθήκες



Σχ. 11-12 Αρχικό δικτύωμα για την προσομοίωση της εκσκαφής (α) και τμήμα του δικτυώματος σε μεγέθυνση (β)

Τα πλευρικά όρια του μοντέλου ορίσθηκαν σε έκταση 12πλάσια του τελικού βάθους της εκσκαφής, και η άκαμπτη βάση ορίσθηκε σε βάθος πλέον του διπλασίου του ύψους των πρανών που διαμορφώθηκαν. Σε τέτοιες αποστάσεις, οι περιορισμοί που τίθενται στα όρια του μοντέλου θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν τις τάσεις και τις μετακινήσεις των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή.

Γεωμετρικά όρια ορίσθηκαν επίσης με βάση τη στρωματογραφία, αλλά και την τοπογραφία (όπως διαμορφώνεται με την εκμετάλλευση του Ορυχείου). Τέλος, τα ρήγματα ορίσθηκαν σαν στοιχεία διεπιφάνειας στις θέσεις που υποδεικνύει η τεκτονική της περιοχής.

Ο περιορισμός του λογισμικού να δεχθεί γεωμετρικά στοιχεία με αρνητικές συντεταγμένες μεγάλου μεγέθους, οδήγησε στον καθορισμό της αρχής των γεωμετρικών στοιχείων το σημείο με συντεταγμένες $x : -16.500$ και $y : 670$. Επιπλέον περιορισμό για την απόδοση της ακρίβειας της γεωμετρίας, απετέλεσε το ανώτατο όριο των 200 σημείων (που θέτει το λογισμικό), για τον ορισμό της γεωμετρίας του προβλήματος. Μετά τη γεωμετρία, προσδιορίσθηκαν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος επιτρέποντας κύλιση του μοντέλου ως προς το κατακόρυφο άξονα για το αριστερό και δεξιό όριο και ορίζοντας πάκτωση για το κατώτερο όριο (Σχ. 11-11).

11.3.4.1.2 Ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών και παράμετροι των διεπιφανειών

Μετά τον ορισμό της γεωμετρίας και των συνοριακών συνθηκών, ακολούθησε ο ορισμός των ιδιοτήτων των σχηματισμών και των διεπιφανειών. Όσον αφορά τους γεωλογικούς σχηματισμούς, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων με τις ιδιότητες της μηχανικής τους συμπεριφοράς, τα φαινόμενα βάρη και τη διαπερατότητα τους (Πίνακας 11-4). Στη συνέχεια, ορίσθηκε το γεωλογικό υλικό σε καθένα από τα κλειστά γεωμετρικά σχήματα που προέκυψαν με τον ορισμό της γεωμετρίας και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο Σχ. 11-11, όπου η χρωματική διαβάθμιση αποδίδει τη στρωματογραφία.

Οι ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών είναι γνωστές σε δύο επίπεδα αξιοπιστίας. Για τους μαργαϊκούς ορίζοντες, οι παράμετροι που αφορούν τη δυστροπία είναι γνωστές με ακρίβεια, από τις πολύ μικρές παραμορφώσεις μέχρι τις παραμορφώσεις κοντά στην αστοχία. Τα δεδομένα όμως για τα επιφανειακά στρώματα και το κοίτασμα είναι πολύ περιορισμένα και καμιά επιπρόσθετη γνώση δεν ήταν δυνατόν να προκύψει κατά τη διάρκεια της παρούσας έρευνας, λόγω χρονικού περιορισμού. Οι παράμετροι τους επελέγησαν με βάση προγενέστερες ερευνητικές εργασίες (ΕΜΠ, 1992, Καρράς, 1998, Anagnostopoulos *et al.*, 1998, ΑΠΘ, 1998), αλλά και μια ανάστροφη ανάλυση που βασίσθηκε στις καταγραφές των οργάνων παρακολούθησης και τις παρατηρήσεις πεδίου.

Οι τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων στις ζώνες ρηγμάτωσης, θεωρήθηκαν σαν ποσοστό των τιμών των αντίστοιχων στρωμάτων από τα οποία διέρχονται τα ρήγματα.

Πίνακας 11-4 Γεωτεχνικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση της εκσκαφής

Γεωτεχνικές παράμετροι		Γεωλογικός Σχηματισμός				
		<i>Επιφανειακά (Προσχώσεις- Επιχώματα)</i>	<i>Ενδιάμεσα (Μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη)</i>	<i>Ενδιάμεση Μάργα</i>	<i>Λιγνίτης</i>	<i>Υποκείμενη Μάργα</i>
Συνοχή c	kPa	100	150	217	200	102
Γωνία τριβής φ	deg	20	29	29	35	37
Γωνία Διαστολής ψ	deg	0	0	0	0	0
Μέτρο δυστροπίας αναφοράς E_{50}^{ref}	kPa	30.000	130.000	168.530	50.000	344.634
Συντελεστής εξάρτηση m	-----	0,80	0,40	0,373	0,66	0,15
Μέτρο δυστροπίας αναφοράς E_{ur}^{ref}	kPa	90.000	375.000	495.980	200.000	977.425
Τάση αναφοράς p^{ref}	kPa	100	100	100	100	100
Λόγος Poisson ν_{ur}	-----	0,20	0,30	0,30	0,28	0,30
Συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία k_0	-----	0,658	0,700	0,663	0,800	0,619
Φαινόμενο βάρος W	kN/m ³	18,75	13,50	14,98	12,00	15,67
Περατότητα κατά την οριζόντιο Perm-x	m/day	0,05	0,043	0,051	0,035	0,035
Περατότητα κατά την κατακόρυφο Perm-y	m/day	0,03	0,034	0,045	0,022	0,022

Οι ζώνες ρηγμάτωσης που οριοθετήθηκαν με οριακές επιφάνειες γύρω από το ίχνος κάθε ρήγματος και συμβολίζονται στα Σχ. 11-11 και Σχ. 11-12 με (-) και (+) εκατέρωθεν του ίχνους των ρηγμάτων, έχουν ιδιότητες που προσδιορίστηκαν με βάση τις σχέσεις :

$$c_i = R_{inter} * c_{soil} \quad \tan \varphi_i = R_{inter} * \tan \varphi_{soil} \quad [11.14]$$

όπου R_{inter} : συντελεστής μείωσης αντοχής και

c_{soil}, φ_{soil} : η συνοχή και η γωνία εσωτερικής του γεωλογικού σχηματισμού
από τον οποίο διέρχεται το ρήγμα

Ο συντελεστής R_{inter} , θεωρήθηκε αρχικά ίσος με 0,6 (ανάλογος του ποσοστού μείωσης της γωνίας εσωτερικής τριβής από τη μέγιστη στη παραμένονσα τιμή της), ενώ στη συνέχεια διερευνήθηκε η συμπεριφορά του μοντέλου και με $R_{inter} = 0,4$.

11.3.4.1.3 Διαμόρφωση δικτύου στοιχείων

Μετά το καθορισμό των ιδιοτήτων των γεωλογικών σχηματισμών, ακολούθησε η ανάπτυξη του δικτύου των στοιχείων. Επελέγησαν τα τριγωνικά (έξι σημείων) στοιχεία και πραγματοποιήθηκε η διακριτοποίηση μέσω του λογισμικού.

Η γεωμετρία που αφορούσε την εξέλιξη της εκσκαφής κατά στάδια, επέτρεψε την υποδιαίρεση του καννάβου σε ένδεκα (11) στρώματα στοιχείων (ανάλογα των σταδίων εκσκαφής), τα οποία απενεργοποιήθηκαν σταδιακά κατά την επίλυση.

Αρχική σκέψη για την εισαγωγή γραμμικών στοιχείων στις θέσεις των οργάνων παρακολούθησης, (προκειμένου τα όρια των στοιχείων να ευθυγραμμισθούν με τις θέσεις αυτές και να είναι ευκολότερη η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της επίλυσης), δεν υλοποιήθηκε λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του λογισμικού.

Τέλος, πυκνωση του δικτύου πραγματοποιήθηκε επιλεκτικά σε συγκεκριμένες περιοχές, στις οποίες αναμενόταν αξιόλογη διαφοροποίηση των τάσεων (π.χ. ρήγματα). Το δίκτυο που προέκυψε, με 32.914 κόμβους και 16.060 στοιχεία (Σχ. 11-12), θεωρήθηκε ικανό για μια αξιόπιστη ανάλυση.

11.3.4.1.4 Ορισμός αρχικών συνθηκών

Η αρχική πίεση του νερού των πόρων καθορίστηκε με βάση τις γεωτρήσεις αποστράγγισης και τα πιεζόμετρα. Πριν από την έναρξη της εκσκαφής, ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρήθηκε 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ενώ στη συνέχεια η πιεζομετρική επιφάνεια διαμορφωνόταν ανάλογα με την εξέλιξη της εκσκαφής.

Η πίεση του νερού των πόρων θεωρήθηκε ανάλογη της υδροστατικής αν και η πραγματική πίεση του νερού σε κάποια στρώματα (π.χ. ενστρώσεις άμμου) πρέπει να είναι υπο-υδροστατική και

σε άλλα μεγαλύτερη απ' αυτή (όπως οι υπό πίεση υδροφόροι ορίζοντες που αναπτύσσονται στον υποκείμενο του κοιτάσματος σχηματισμό). Η παραπάνω υπόθεση, θεωρήθηκε ότι θα είχε μικρή σχετικά επίδραση στη κινητική συμπεριφορά της εκσκαφής.

11.3.4.2 Επεξεργασία δεδομένων και υπολογισμοί

Η υπολογιστική φάση προσομοίωσης της εκσκαφής του “Τομέα-6”, περιέλαβε δεκατρία (13) στάδια, εκ των οποίων τα δώδεκα (12) αφορούσαν απομάκρυνση των γεωλογικών σχηματισμών (Πίνακας 11 - 5).

Πίνακας 11-5 Υπολογιστικές φάσεις για την προσομοίωση της εκσκαφής

α/α	ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΦΑΣΗ (ενέργεια) για την επίλυση του προβλήματος
1.	Εφαρμογή ιδίου βάρους και μηδενισμός των παραμορφώσεων που προκαλεί
2.	Ενεργοποίηση σταδίου προ-αποκάλυψης, (Υψόμετρο +670 m)
3.	Ενεργοποίηση 1^{ου} σταδίου εκσκαφής (E1, έτος 1987, Υψόμετρο +648 m)
4.	Ενεργοποίηση 2^{ου} σταδίου εκσκαφής (E2, NOE 88, Υψόμετρο +635 m)
5.	Ενεργοποίηση 3^{ου} σταδίου εκσκαφής (E3, ΣΕΠ 89, Υψόμετρο +611 m)
6.	Ενεργοποίηση 4^{ου} σταδίου εκσκαφής (E4, ΜΑΙΟΣ 93, Υψόμετρο +595 m)
7.	Ενεργοποίηση 5^{ου} σταδίου εκσκαφής (E4, 1994, Συνέχιση στο Υψόμετρο +595 m)
8.	<i>Ενεργοποίηση 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (E5, NOE 94, Υψόμετρο +574 m)</i>
9.	Ενεργοποίηση 7^{ου} σταδίου εκσκαφής (E5, 1995, Συνέχιση στο Υψόμετρο +572 m)
10.	Ενεργοποίηση 8^{ου} σταδίου εκσκαφής (E6, ΙΟΥΛ 95, Υψόμετρο +561 m)
11.	Ενεργοποίηση 9^{ου} σταδίου εκσκαφής (E7, 1996, Υψόμετρο +545 m)
12.	Ενεργοποίηση 10^{ου} σταδίου εκσκαφής (E7, 1999, Υψόμετρο +526 m)
13.	Ενεργοποίηση 11^{ου} σταδίου εκσκαφής (E7, 1999, Συνέχιση στο Υψόμ. +526 m)

Στο πρώτο στάδιο ορίστηκε η εντατική κατάσταση και υπολογίσθηκαν οι παραμορφώσεις που προκαλούνται από το ίδιο το βάρος των γεωλογικών στρωμάτων. Στο στάδιο αυτό, ο πολλαπλασιαστής του βάρους ορίστηκε ίσος με τη μονάδα, με αποτέλεσμα να εφαρμοσθεί όλο το βάρος των γεωλογικών σχηματισμών και να υπολογισθούν οι ολικές παραμορφώσεις τους.

Στη συνέχεια, αυτές οι παραμορφώσεις μηδενίσθηκαν, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα επόμενα στάδια της προσομοίωσης, αφορούν μόνο τις παραμορφώσεις που προκύπτουν από την απομάκρυνση συγκεκριμένου γεωυλικού λόγω της εκσκαφής.

Σε κάθε ένα στάδιο, ορίστηκαν οι τομείς (clusters) που απομακρύνονται με την εξέλιξη της εκσκαφής (όπως υπέδειξαν τα τοπογραφικά διαγράμματα εκμετάλλευσης), ενώ ο υδροφόρος ορίζοντας σχεδιαζόταν ένα περίπου μέτρο κάτω από το πόδι της βαθμίδας που διαμορφώνεται σε κάθε στάδιο εκσκαφής.

Με την ολοκλήρωση του ορισμού του συνόλου των φάσεων εκσκαφής, πραγματοποιήθηκε η επίλυση του μοντέλου κατά στάδια.

11.3.4.3 Αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων της εκσκαφής

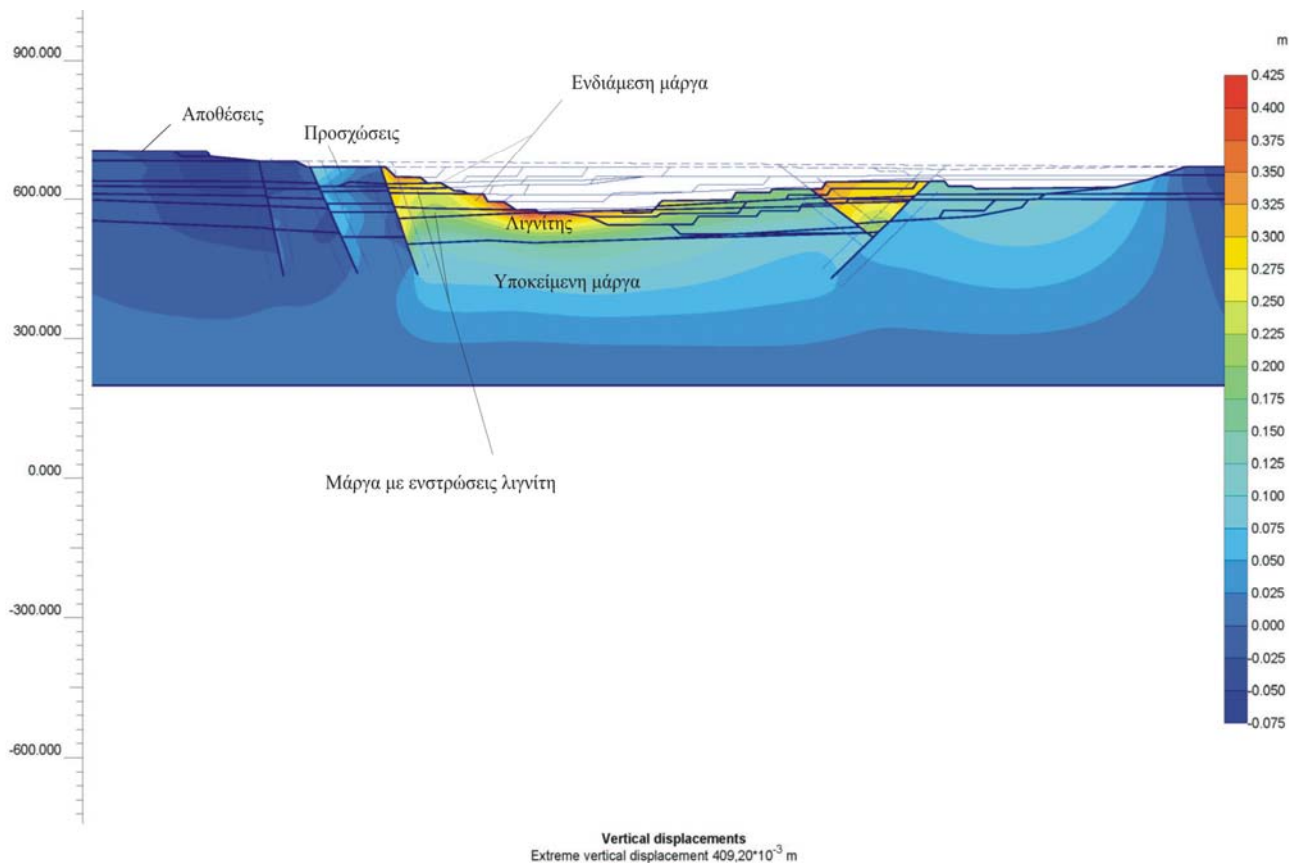
Οι αναλύσεις της εκσκαφής του “Τομέα-6” με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, έδωσαν πληροφορίες σχετικά με τις τασικές συνθήκες και τη κινητική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών γύρω από την εκσκαφή. Τα αποτελέσματα της επίλυσης παρουσιάζονται με βάση τη τομή έρευνας, είτε ως κατανομές των διαφόρων παραμέτρων (τάσεων, μετακινήσεων, διατμητικών παραμορφώσεων), με χρωματική διαβάθμιση (Σχ. 11-13 έως Σχ. 11-18), είτε ως γραφικές απεικονίσεις των μετακινήσεων στις θέσεις που είχαν τοποθετηθεί όργανα παρακολούθησης (Σχ. 11 - 19 και Σχ. 11-20).

Ο βαθμός στον οποίο τα αποτελέσματα αυτά αποδίδουν τη πραγματική συμπεριφορά της εκσκαφής, διαπιστώνεται με τη σύγκριση των μετακινήσεων που υπολογίσθηκαν με τις μετακινήσεις που μετρήθηκαν μέχρι το 6^ο στάδιο εκσκαφής (βλέπε Πίνακα 11-5).

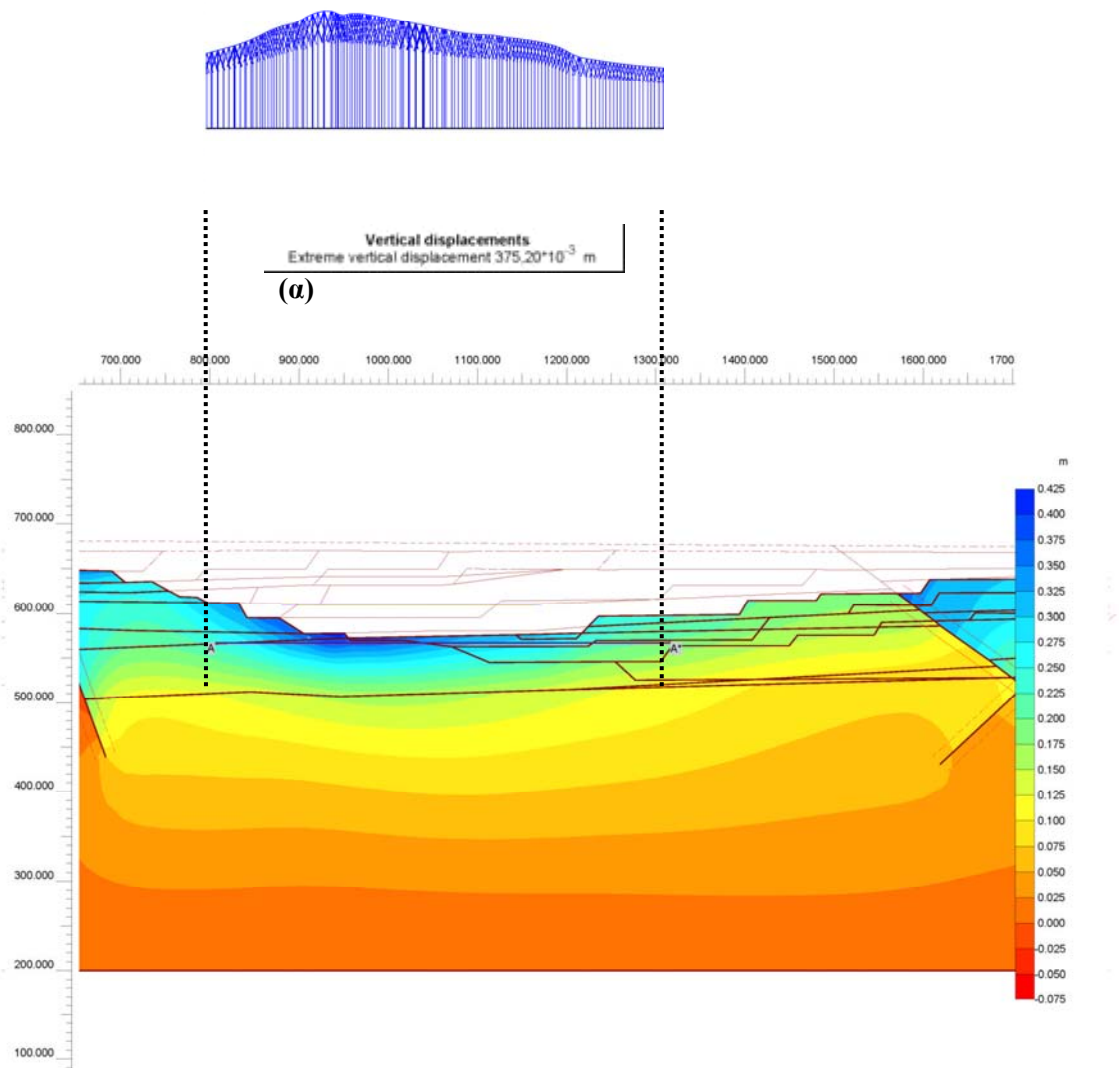
Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προχώρησε η προσομοίωση των επόμενων σταδίων της εκσκαφής και αξιολογήθηκαν τα σχετικά αποτελέσματα.

11.3.4.3.2 Συμπεριφορά του ορύγματος μέχρι το 6^ο στάδιο εκσκαφής (+574 m)

Όπως προκύπτει από το Σχ. 11-13, οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετακινήσεις μέχρι και το έκτο στάδιο εκσκαφής, εκδηλώνονται στα στρώματα των ενδιάμεσων (μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη), της ενδιάμεσης μάργας και του κοιτάσματος. Το αποτέλεσμα αυτό θα πρέπει να αναμένεται τόσο στα δυτικά (μόνιμα) πρανή, όσο και στα ανατολικά (προς τη πλευρά του Ορυχείου Καρδιάς), και πιο συγκεκριμένα στο τεκτονικό τέμαχος που διαμορφώνεται από τα ρήγματα. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχ. 11-13 και Σχ. 11-14) προκύπτει μέγιστη κατακόρυφη ανάκτηση 0,409 m στα δυτικά πρανή (στο επίπεδο E5, +578 m), πρόγνωση που συμφωνεί με τις μετρηθείσες μετακινήσεις κατά την εκμετάλλευση του Ορυχείου (Σχ. 5-9). Ανάλογα μεγέθη μετακινήσεων παρουσιάζονται και στην ανατολική πλευρά (περιοχή των μεταπτώσεων).



Σχ. 11-13 Κατακόρυφες κινήσεις (U_y) μέχρι το τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

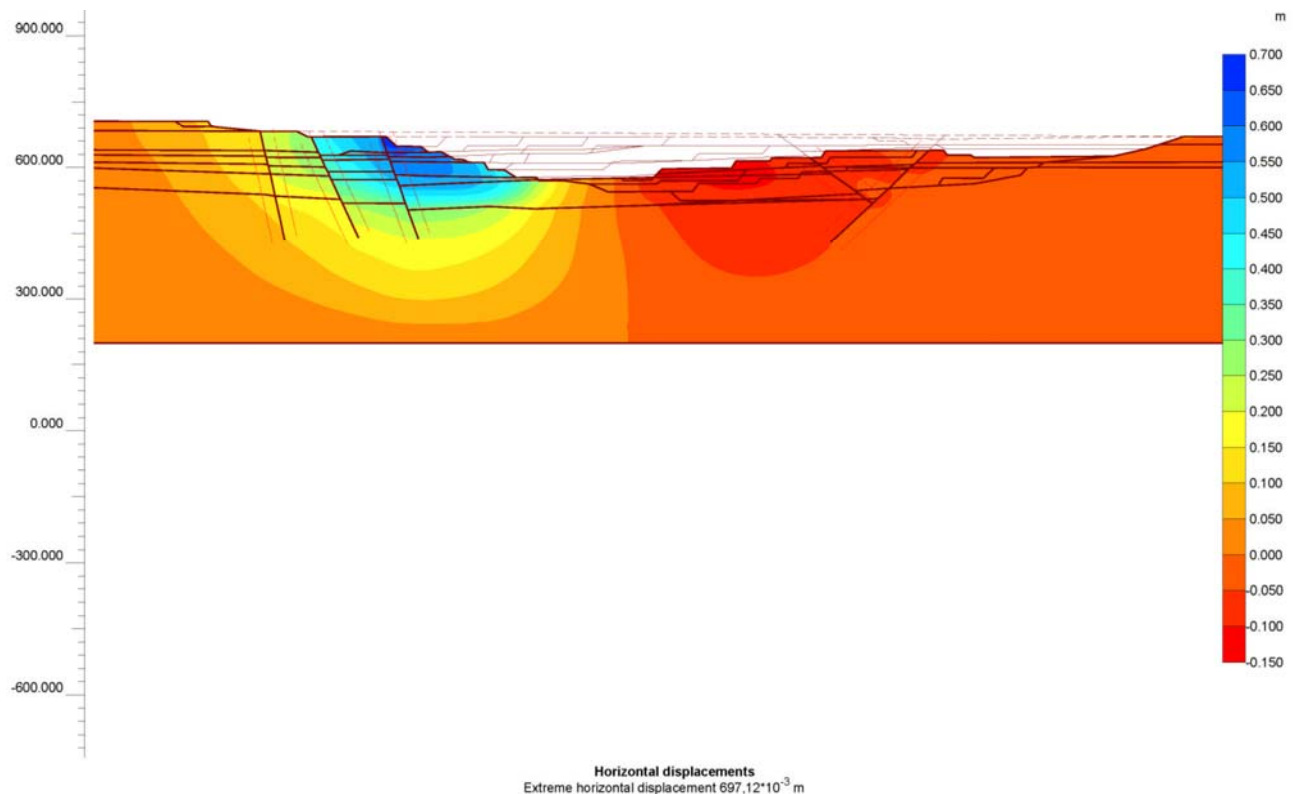


Σχ. 11-14 Πρόγνωση της κατακόρυφης κινητικότητας μέχρι το τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

(α) : μεγέθη της ανοδικής κίνησης στο κεντρικό τμήμα της εκσκαφής

Οι οριζόντιες κινήσεις που εκτιμώνται μέχρι και το 6^ο στάδιο της εκσκαφής (Σχ. 11-15), φαίνεται να μεταβάλλονται μεταξύ μιας μέγιστης θετικής τιμής 0,697 m (κίνηση προς το όρυγμα) στη κορυφή των δυτικών πρανών (στο στρώμα των προσχώσεων) και μιας ελάχιστης τιμής (-0,150 m) στην ανατολική πλευρά της εκσκαφής. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει αντίθετη φορά κίνησης σε σχέση με τη προαναφερόμενη (των δυτικών πρανών), έχει δηλαδή διεύθυνση προς την εκσκαφή.

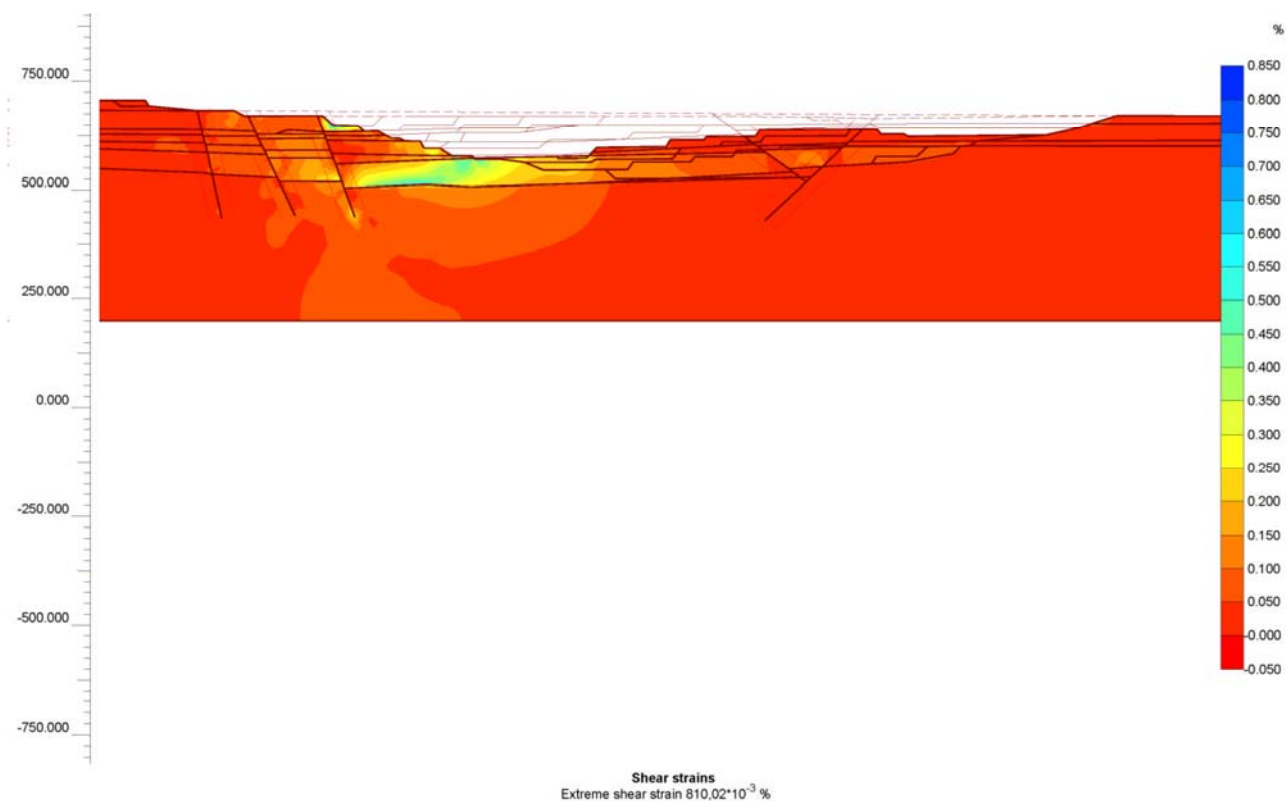
Εντούτοις, το μέγεθος της είναι σαφώς πολύ μικρότερο (υποτετραπλάσιο) σε σχέση με την κίνηση που αναμένεται στα δυτικά πρανή.



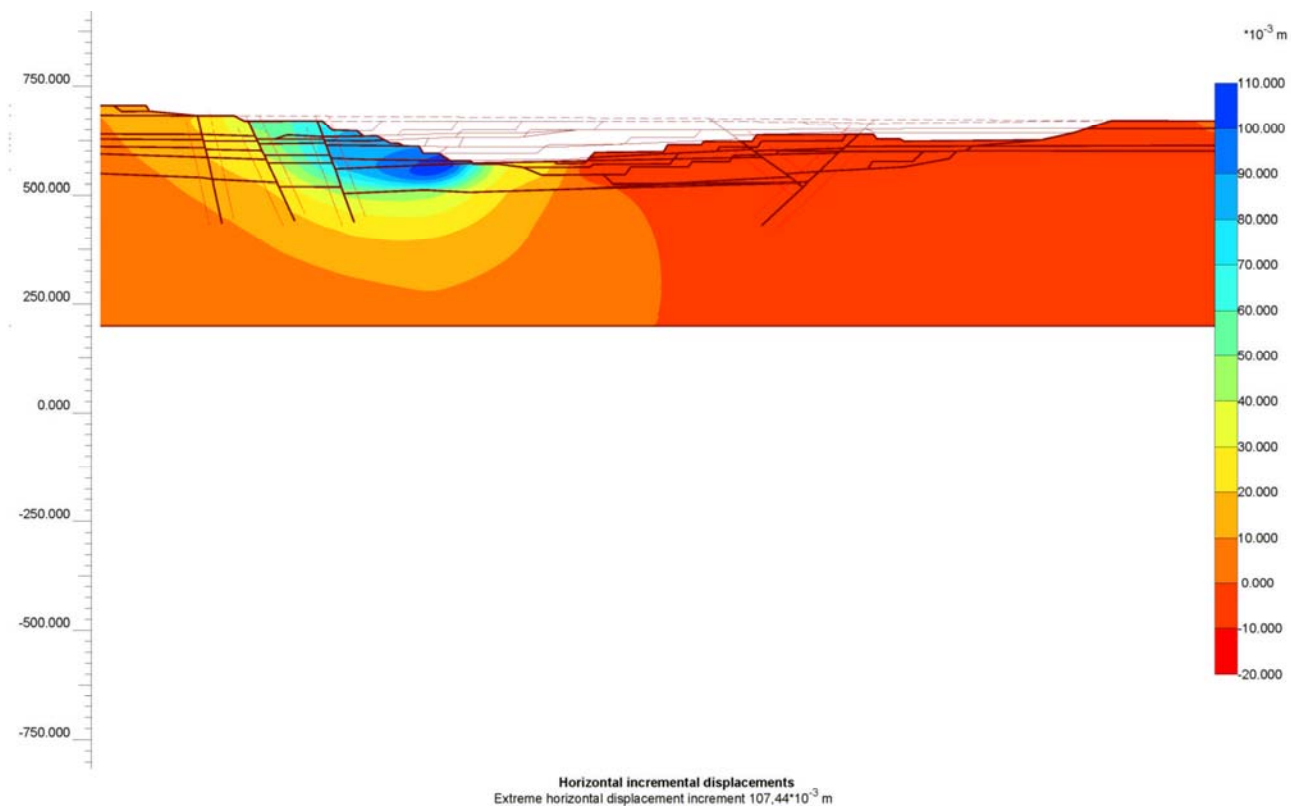
Σχ. 11-15 Οριζόντια κινητικότητα (Ux) στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

Οι διατμητικές παραμορφώσεις γ_{xy} (Σχ. 11-16) επικεντρώνονται με μια μέγιστη τιμή 0,81%, στη κορυφή των δυτικών πρανών, ενώ διατμητικές παραμορφώσεις της τάξης του 0,50% εμφανίζονται και στο στρώμα του λιγνίτη και πιο συγκεκριμένα στη βάση του κοιτάσματος.

Η αύξηση των οριζόντιων μετακινήσεων (horizontal incremental displacements) στο 6^ο στάδιο εκσκαφής, εμφανίζει μια μέγιστη τιμή 0,107 m στο πόδα των δυτικών πρανών (Σχ. 11-17) και η χρωματική διαβάθμιση των τιμών, υποδεικνύει το μέγεθος της κινούμενης μάζας όπως διαμορφώνεται στο συγκεκριμένο στάδιο εκσκαφής.

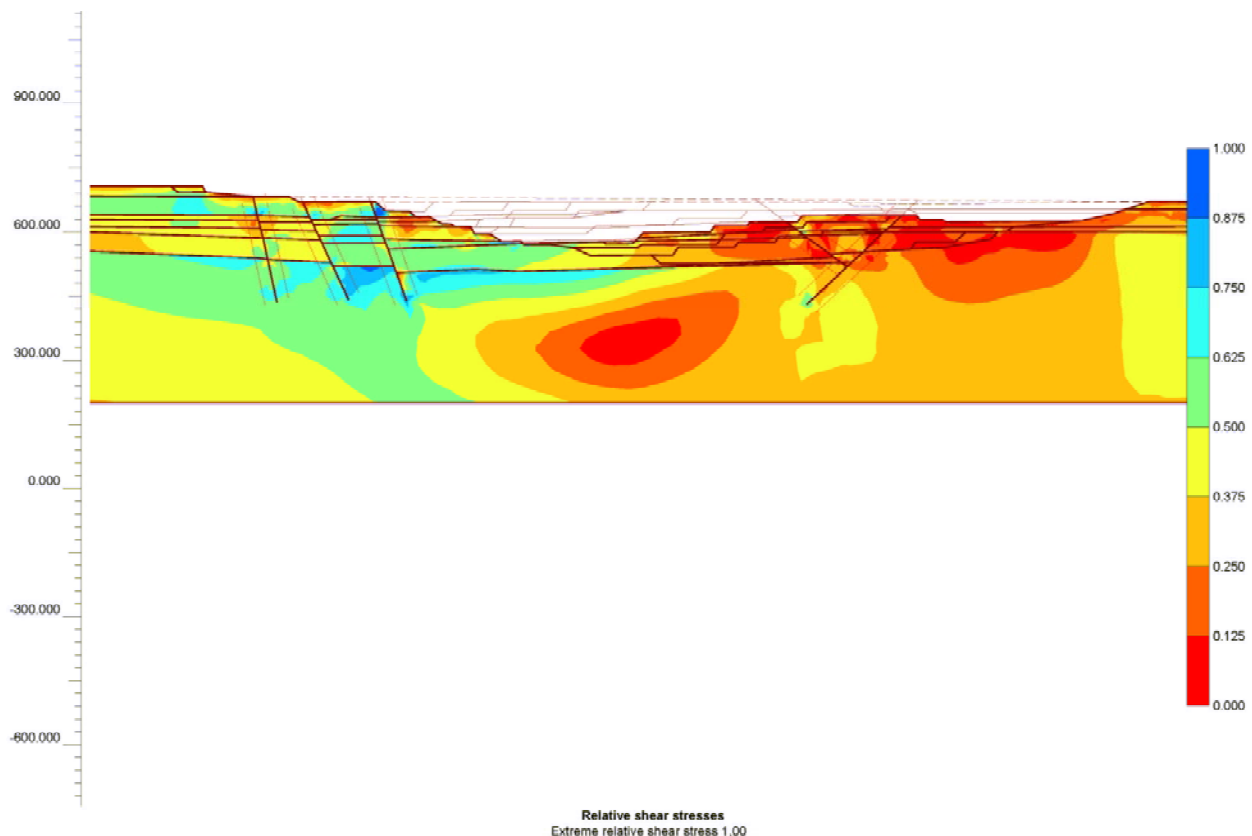


Σχ. 11-16 Κατανομή των διατμητικών παραμορφώσεων στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)



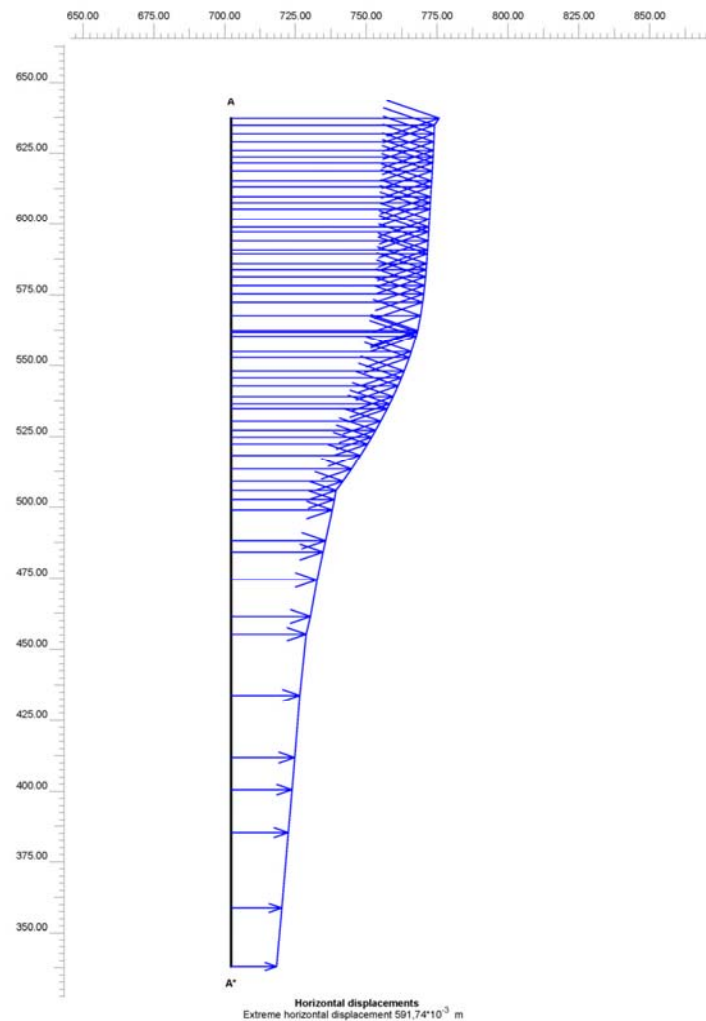
Σχ. 11-17 Κατανομή της αύξησης των οριζόντιων παραμορφώσεων στο 6^ο στάδιο εκσκαφής (+574 m)

Η σχετική διατμητική τάση $\tau_{rel} = (\tau/\tau_{max})$ στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m), πλησιάζει τη μονάδα (0,901) στο στρώμα των προσχώσεων στα δυτικά πρανή και στη ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη (Σχ. 11-18). Το μέγεθος και η κατανομή της τιμής αυτής υποδεικνύει ότι οι πιο επισφαλείς συνθήκες αναπτύσσονται στα δυτικά πρανή, στην ανώτερη ζώνη της υποκείμενης μάργας.



Σχ. 11-18 Σχετικές διατμητικές τάσεις ($\tau_{rel} = \tau/\tau_{max}$) στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

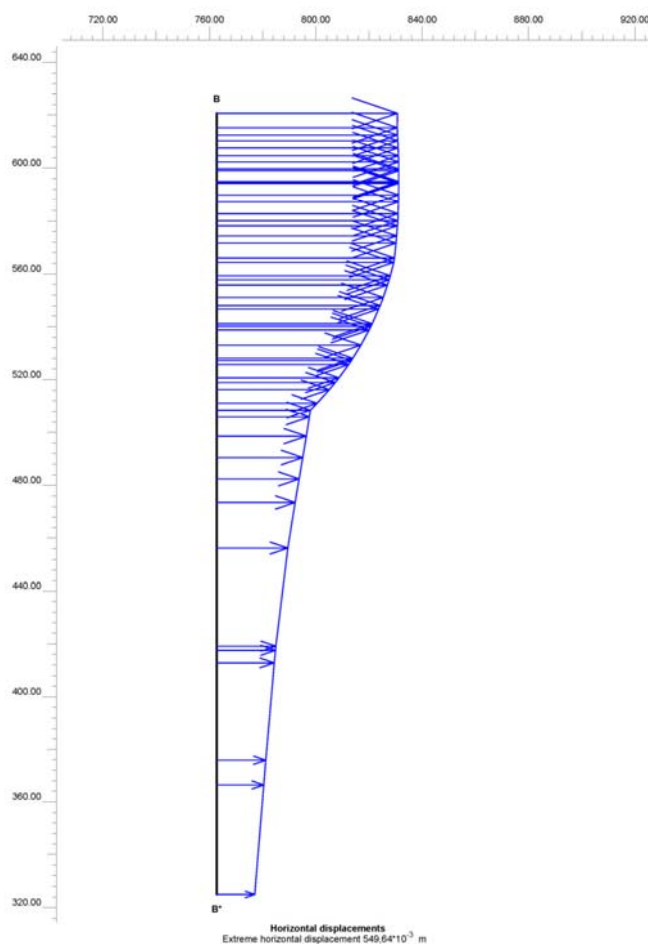
Οι οριζόντιες μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα κλισίμετρα μέχρι και το 6^ο στάδιο εκσκαφής συζητήθηκαν στο Κεφάλαιο 6. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, μόνο μια ποιοτική σύγκριση είναι εφικτή μεταξύ της προβλεπόμενης συμπεριφοράς στις θέσεις εγκατάστασης των κλισιμέτρων ΚΛ3 και ΚΛ7 (Σχ. 11-19 και Σχ.11-20) και των αντίστοιχων καταγραφών (Βλέπε Σχ. 6-5 και ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Καταγραφές κλισιμέτρων). Η απουσία μετρήσεων για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, αποκλείει συγκρίσεις ποσοτικού χαρακτήρα.



Σχ. 11-19 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΚΛ3, στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (Σχ. 11-19 και Σχ. 11-20), διαπιστώνονται ότι εκδηλώνονται μικρές μετακινήσεις στη ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη (+510 m), οι οποίες αυξάνονται σταδιακά μέσα στο στρώμα του κοιτάσματος. Στη συνέχεια, η οριζόντια μετακίνηση μειώνεται και ιδιαίτερα μετά το υψόμετρο των +560 m, στη ζώνη μετάβασης του λιγνίτη προς την υπερκείμενη ανθρακομιγή μάργα. Στους ανώτερους ορίζοντες των προσχώσεων, η μετακίνηση αυξάνει αλλά με μικρές σχετικά τιμές.

Από τις καταγραφές του κλισιμέτρου ΚΛ3 (Βλέπε ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Καταγραφές κλισιμέτρων) προέκυψε διάτμηση* στα +550 m, επιφάνεια που βρίσκεται μέσα στο λιγνίτη, αλλά αν ληφθεί υπόψη η σχετική θέση του κλισιμέτρου ως προς τη γεωλογική τομή έρευνας, το επίπεδο αυτό θα μπορούσε να ταυτιστεί με τον αρμό στρώσης του λιγνίτη με την ανθρακομιγή μάργα.



Σχ. 11-20 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΚΛ7, στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m)

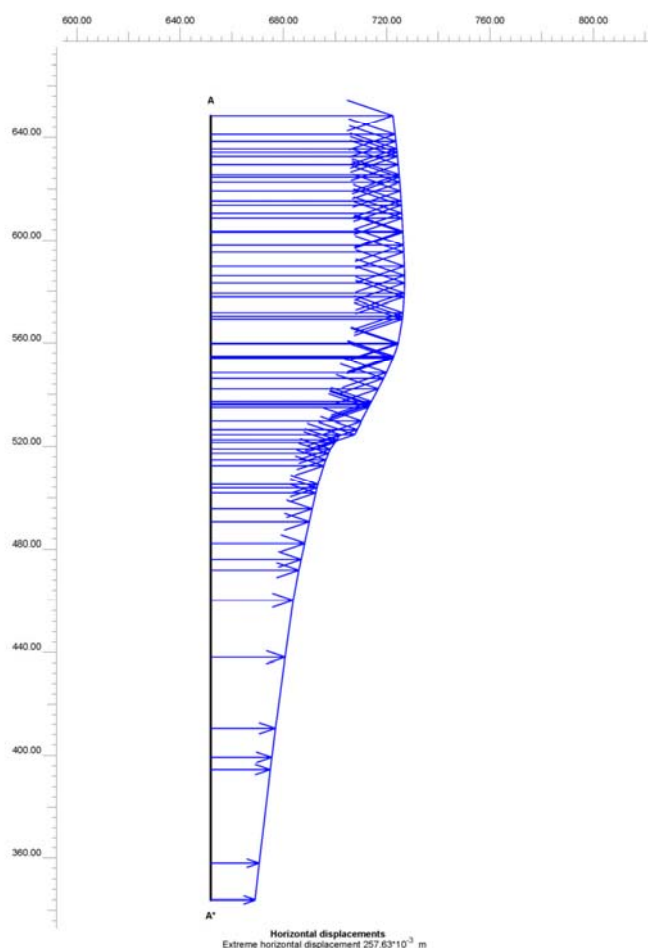
Στη θέση του κλισιμέτρου ΚΛ7, η πρόγνωση της κινητικής συμπεριφοράς εμφανίζει καλή (τουλάχιστο ποιοτική) συμφωνία με τις μετρούμενες παραμορφώσεις. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την προσομοίωση, προβλέπεται σχετική μετακίνηση των στρωμάτων στα +510 m, στη ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη (Σχ. 6-4, Σχ. 6-5, Σχ. 11-20), όπως επίσης και στα +560 m στη ζώνη μετάβασης της ανθρακομιγούς προς την ενδιάμεση μάργα. Οι αντίστοιχες καταγραφές του κλισιμέτρου ΚΛ7 (Βλέπε ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ – Καταγραφές κλισιμέτρων) υποδεικνύουν

* που σημαίνει σχετική μετακίνηση τουλάχιστον 4-5 cm

διάτμηση στα +560 m (θέση που όπως προαναφέρθηκε υποδεικνύεται και από την προσομοίωση), ενώ για το υψόμετρο των +510 m δεν υπάρχουν μετρήσεις.

Η ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα δεδομένα των καταγραφών, είναι σχετικά καλή αλλά για την ακριβέστερη εκτίμηση του μεγέθους της μετακίνησης, απαιτούνται δεδομένα παρατήρησης μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος.

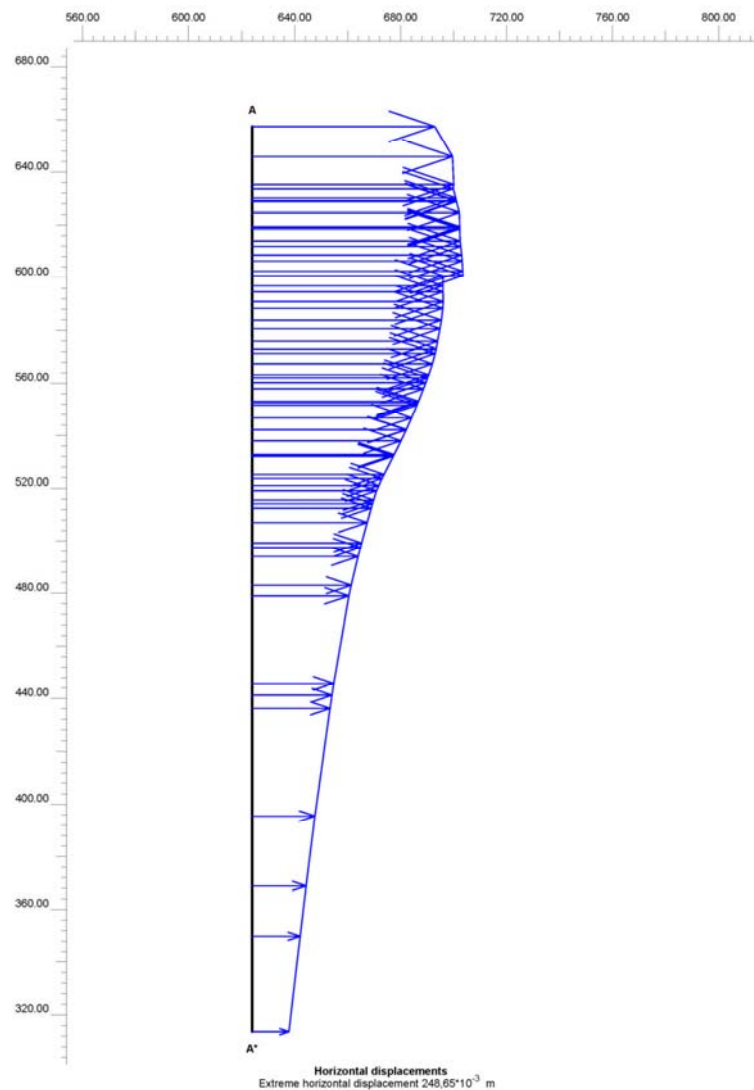
Σύγκριση της προβλεπόμενης και της πραγματικής συμπεριφοράς που καταγράφηκε με τα κλισίμετρα, πραγματοποιήθηκε και μεταξύ του 6^{ου} και 8^{ου} σταδίου της εκσκαφής. Με βάση τη πρόγνωση της οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ5 (Σχ. 11-21), αναμένεται διάτμηση στα +525 m, επιφάνεια που βρίσκεται στη ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη και ταυτίζεται με τη θέση διέλευσης του κλισιμέτρου από τη ζώνη ρηγμάτωσης F8 (Σχ. 6 - 5). Εμφανείς σχετικές μετακινήσεις θα πρέπει να αναμένονται και στα +560 m, στον αρμό στρώσης του λιγνίτη με την ανθρακομιγή μάργα. Οι προγνώσεις αυτές επιβεβαιώνονται από τη κάμψη που παρουσίασε το κλισίμετρο ΝΚΛ5 στα αντίστοιχα υψόμετρα.



Σχ. 11-21 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ5 μεταξύ του 6^{ου} και 8^{ου} σταδίου εκσκαφής

Στη θέση που βρίσκεται το κλισιόμετρο ΝΚΛ6, η ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη εντοπίζεται στο υψόμετρο των +520 m περίπου (Σχ. 6-5, ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Γεωλογική Τομή XX'). Ο ορίζοντας αυτός φαίνεται να υποδεικνύεται σαν ζώνη διάτμησης με βάση τις καταγραφές του κλισιμέτρου, αλλά και με βάση τις προβλέψεις του Σχ. 11-22.

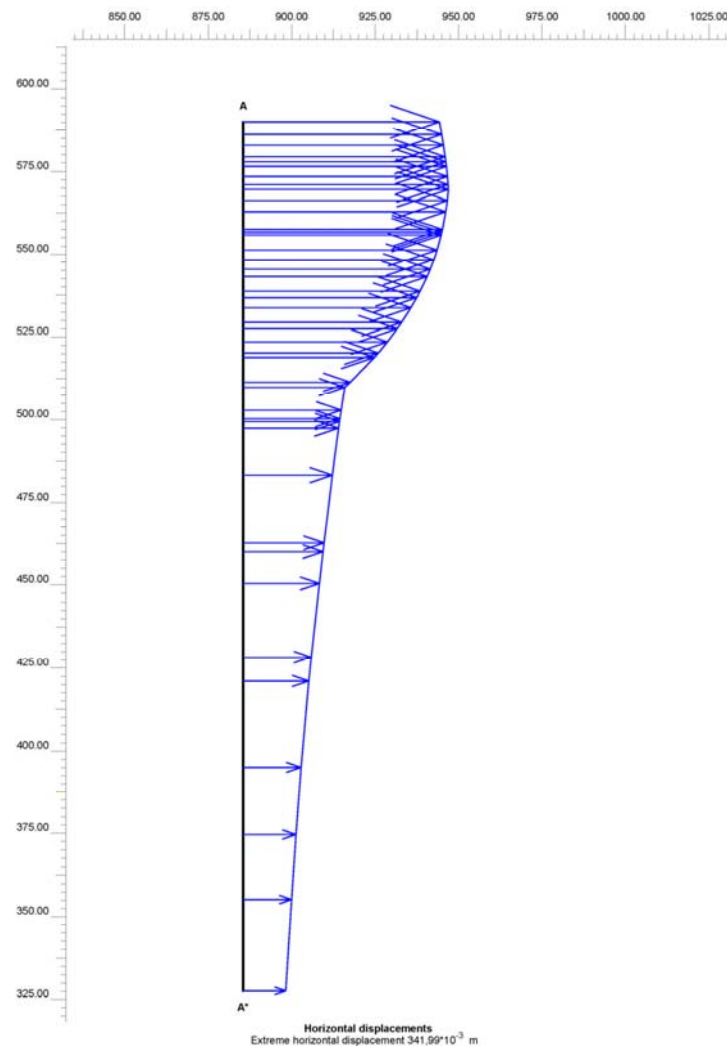
Επιπλέον, στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ6, η ζώνη μετάβασης του λιγνίτη προς την ανθρακομιγή μάργα (ενδιάμεσα) εντοπίζεται στα +573 m, ενώ η διέλευση του κλισιμέτρου από το ρήγμα F8, εκτιμάται στα +600 m. Το επίπεδο διάτμησης που διαπιστώθηκε στη θέση αυτή, υποδεικνύεται σαφώς και στο Σχ. 11-22.



Σχ. 11-22 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ6 μεταξύ του 6^{ου} και 8^{ου} σταδίου εκσκαφής

Στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ9, η ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη βρίσκεται στα +510 m και ταυτίζεται τόσο με τη επιφάνεια διάτμησης που υποδεικνύουν οι καταγραφές του κλισιμέτρου, όσο και με τις προβλέψεις του Σχ. 11-23.

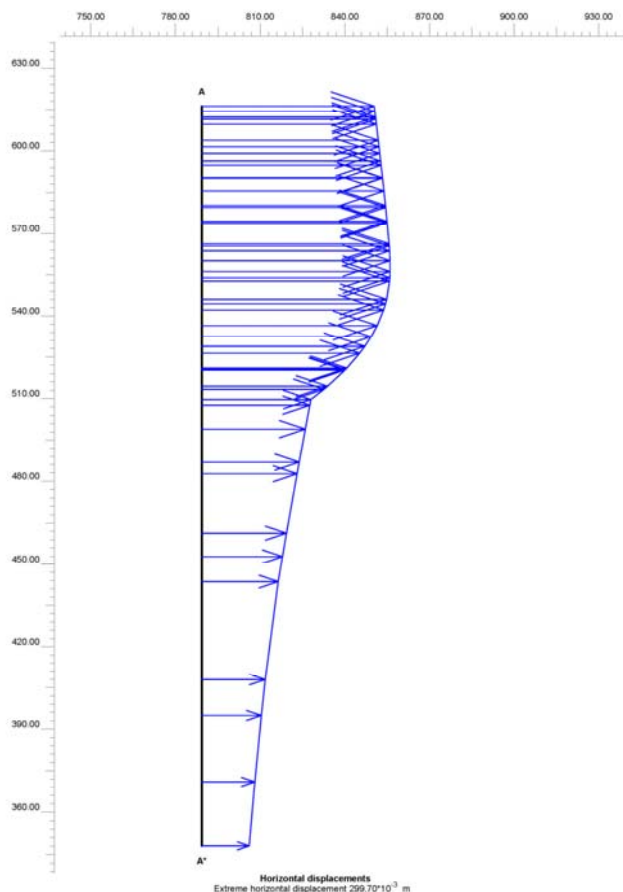
Όσον αφορά δε, την επιφάνεια διάτμησης που εντοπίζει το κλισίμετρο στα +540 m (μέσα στο λιγνιτικό κοιτάσμα) αποδίδεται στην υψηλή διατμητική παραμόρφωση του κοιτάσματος.



Σχ. 11-23 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ9 μεταξύ του 6^{ου} και 8^{ου} σταδίου εκσκαφής

Τέλος, στη θέση που είναι εγκατεστημένο το κλισίμετρο ΝΚΛ10, η ζώνη μετάβασης της υποκείμενης μάργας προς το λιγνίτη βρίσκεται στα +510 m και ταυτίζεται με την υποδεικνυόμενη επιφάνεια διάτμησης στο Σχ. 11-24.

Η επιφάνεια διάτμησης που εντοπίζει το κλισίμετρο στουσόμετρο των +545 m περίπου, μέσα στο λιγνιτικό κοίτασμα, υποδεικνύεται και από το Σχ. 11-24 και αποδίδεται στην υψηλή διατμητική παραμόρφωση του σχηματισμού.

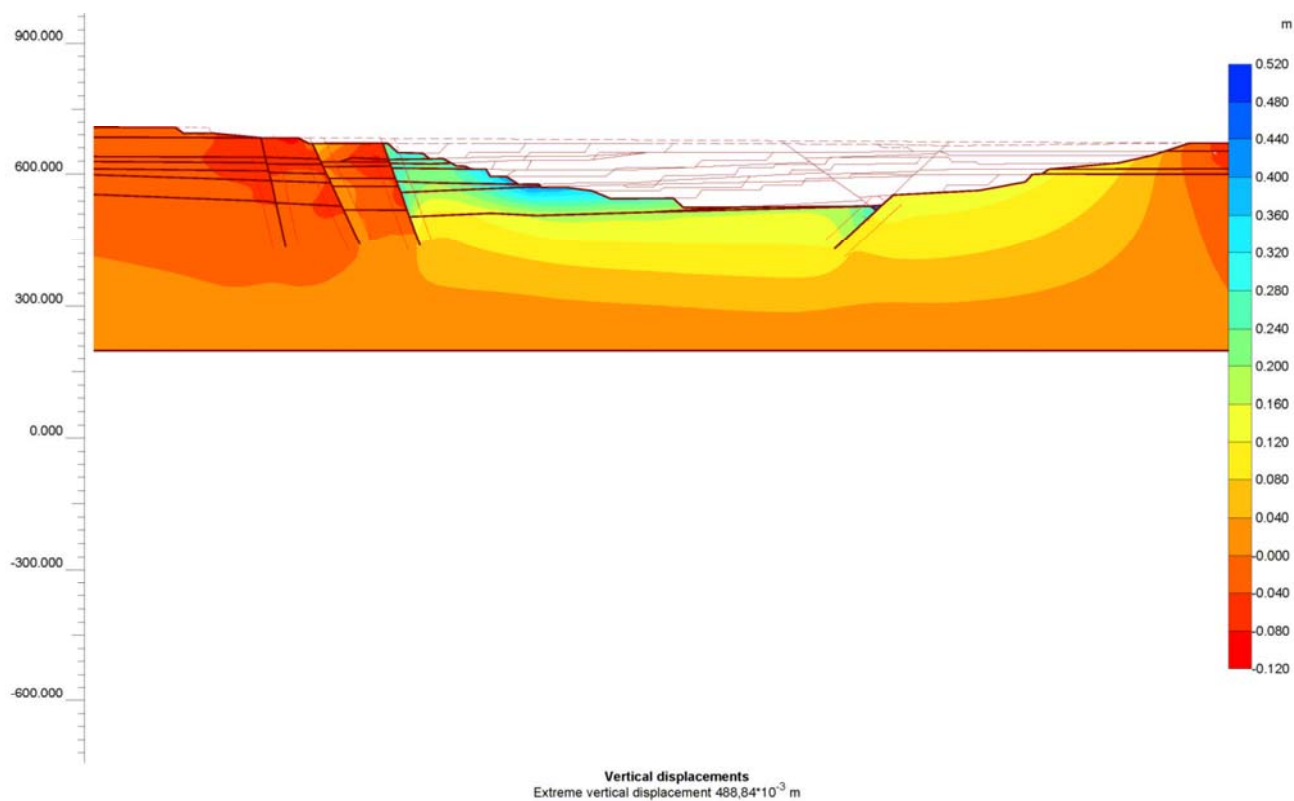


Σχ. 11-24 Πρόγνωση οριζόντιας μετακίνησης στη θέση του κλισιμέτρου ΝΚΛ10 μεταξύ του 6^{ου} και 8^{ου} σταδίου εκσκαφής

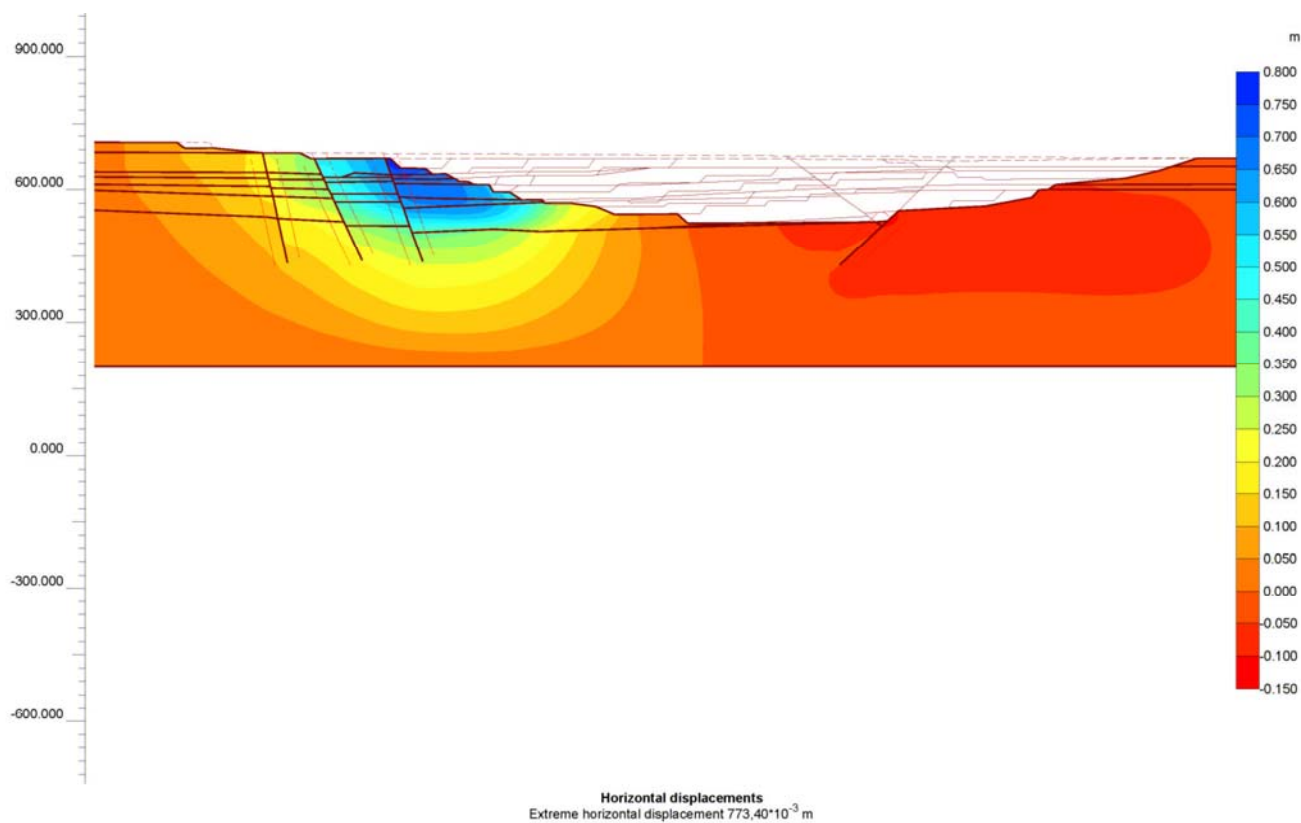
Με βάση τα παραπάνω, η καλή (ποιοτικά τουλάχιστον) ταύτιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της εκσκαφής με τις παρατηρήσεις πεδίου, επιτρέπει την υιοθέτηση της μεθόδου και των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, για τη πρόγνωση της κινητικής συμπεριφοράς της εκσκαφής σε μεταγενέστερα στάδια εκμετάλλευσης του Ορυχείου.

11.3.4.3.3 Συμπεριφορά του λιγνιτωρυχείου στο 11^ο στάδιο εκσκαφής (+526 m)

Από τη προσομοίωση της εκσκαφής όπως αυτή διαμορφώνεται στο 11^ο και τελικό στάδιο (+526 m), προκύπτει ότι οι τιμές της ανάκτησης στο δυτικό πρανάς θα είναι της τάξης των 0,489 m, υπερδιπλάσιες σε σχέση με αυτές του ανατολικού πρανούς (Σχ. 11-25).



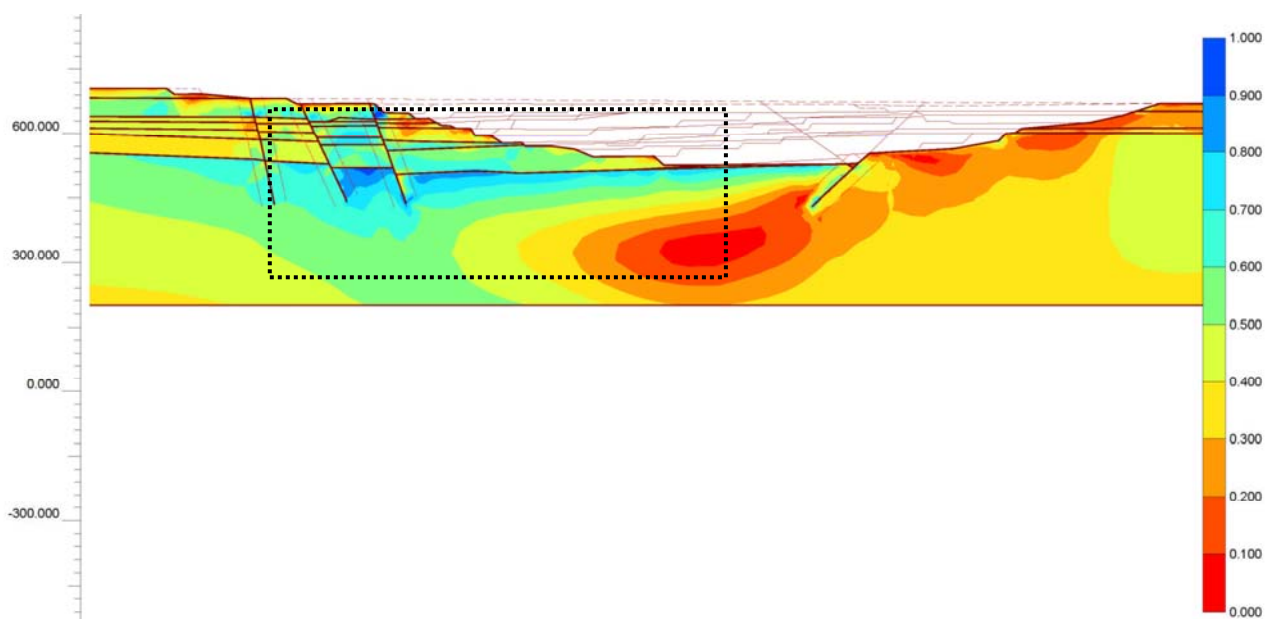
Σχ. 11-25 Κατακόρυφη κινητικότητα (U_y) στο τέλος του 11^{ου} σταδίου εκσκαφής (+526 m)



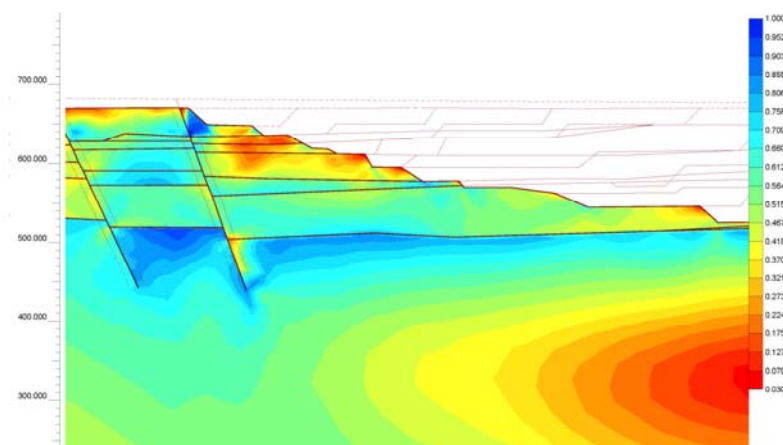
Σχ. 11-26 Οριζόντια κινητικότητα (U_x) στο τέλος του 11^{ου} σταδίου εκσκαφής (+526 m)

Οι οριζόντιες μετακινήσεις (Σχ. 11-26) θα αυξηθούν ελάχιστα με τη προχώρηση της εκσκαφής από το 6^ο στο 11^ο στάδιο και θα φτάσουν μια μέγιστη τιμή 0,773 m έναντι 0,697 m του 6^{ου} σταδίου. Οι μεγαλύτερες οριζόντιες μετακινήσεις εντοπίζονται στη ζώνη από τα +570 m ως +660 m στο στρώμα των προσχώσεων, της ενδιάμεσης μάργας και της μάργας με ενστρώσεις λιγνίτη (Σχ. 11-26).

Τέλος, οι σχετικές διατμητικές τάσεις θα εμφανίσουν μια μικρή αύξηση υπο-επιφανειακά του δαπέδου εκσκαφής, στη ζώνη μετάβασης από το λιγνίτη στην υποκείμενη μάργα. Η μέγιστη τιμή της σχετικής διατμητικής τάσης εκτιμάται σε $\tau_{rel}=0,903$, μέγεθος που υποδεικνύει τοπικού μεγέθους διατμήσεις (Σχ. 11-27). Σύμφωνα με την προσομοίωση, η ζώνη αυξημένης σχετικής διατμητικής τάσης που εμφανίστηκε στην υποκείμενη μάργα στο 6^ο στάδιο εκσκαφής (Σχ. 11-18), δεν διαφοροποιείται σημαντικά με την αύξηση του βάθους του ορύγματος. Η μόνη διαφοροποίηση έγκειται στην επέκταση της ζώνης αυτής μέχρι το ανατολικό πρυνές.



(α)



(β)

Σχ. 11-27 Σχετικές διατμητικές τάσεις ($\tau_{rel}=\tau/\tau_{max}$) στο τέλος του 11^{ου} σταδίου εκσκαφής (+526 m), (α) σε όλη την έκταση της εκσκαφής και (β) σε τμήμα της υπό μεγέθυνση

Στο Πίνακα 11-5, συνοψίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης που αφορούν την κατάσταση που διαμορφώνεται στο τέλος του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής, όπως επίσης και τις προβλέψεις για το 11^ο και τελικό στάδιο εκσκαφής. Αναφέρονται στην τασική κατάσταση και τις παραμορφώσεις που προκαλούνται με την εκσκαφή, παρέχοντας τη δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά το αναμενόμενο μέγεθος της κινητικότητας και την ασφάλεια της εκσκαφής.

Πίνακας 11-5 Συνοπτικά αποτελέσματα προσομοίωσης στο 6^ο και 11^ο (τελικό) στάδιο εκσκαφής

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ			
Εκτιμώμενο μέγεθος		6^ο στάδιο εκσκαφής (+574 m)	11^ο στάδιο εκσκαφής (+526 m)
Μέγιστη κατακόρυφη παραμόρφωση Uy	(m)	0,409	0,489
Μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση Ux	(m)	0,697	0,773
Μέγιστος λόγος σχετικής διατμητικής τάσης τ_{rel}	-	0,875 έως 1	0,9 έως 1

11.3.4.4 Παραμετρικές αναλύσεις σε σχέση με τις γεωτεχνικές παραμέτρους του λιγνίτη

Δεδομένης της αβεβαιότητας όσον αφορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους του λιγνίτη, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μια παραμετρική ανάλυση σχετικά με τα μέτρα δυστροπίας του. Οι τιμές θεωρήθηκαν σε ποσοστό 30, 50 και 75% ως προς τις τιμές της υποκείμενης μάργας. Κατ' αναλογία διαμορφώθηκαν και οι τιμές δυστροπίας του στρώματος των ενδιαμέσων (μάργα με ενστρώσεις λιγνίτη).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που ακολούθησαν, επιβεβαίωσαν ότι οι παράμετροι που αρχικά υιοθετήθηκαν (Πίνακας 11-4) είναι οι βέλτιστες, δεδομένου ότι έχουν σαν αποτέλεσμα τη καλλίτερη συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των παρατηρούμενων κινήσεων του εδάφους (τουλάχιστο μέχρι το 6^ο στάδιο της εκσκαφής).

Διερευνήθηκε επίσης η επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων αντοχής των ρηγματωμένων ζωνών σε σχέση με τις παραμέτρους αντοχής των σχηματισμών από τους οποίους διέρχονται. Χρησιμοποιώντας συντελεστές μείωσης 0,5 και 0,4 αντίστοιχα, δεν προέκυψε εμφανής διαφοροποίηση στα αποτελέσματα.

11.3.4.5 Συμπεράσματα και σύγκριση προβλεπόμενης και παρατηρούμενης συμπεριφοράς της εκσκαφής

Τα μεγέθη της ανάκτησης και οι ζώνες διάτμησης που διαπιστώθηκαν με τα κλισίμετρα, υποδεικνύουν ότι η προβλεπόμενη και παρατηρούμενη κινητική συμπεριφορά μέχρι το 6^ο στάδιο της εκσκαφής (υψόμετρο +574 m), είναι σε καλή συμφωνία.

Όπως αναφέρθηκε, δύο μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ των +510 m και +520 m, σαν αποτέλεσμα σχετικής κίνησης στην επαφή λιγνίτη - υποκείμενης μάργας και στο υψόμετρο των +560 m σαν αποτέλεσμα σχετικής κίνησης στη ζώνη μετάβασης από το λιγνίτη προς τη υπερκείμενη ανθρακομιγή μάργα. Αυτές οι ζώνες (στις οποίες αστόχησαν τα κλισίμετρα), εντοπίστηκαν και με την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, υποδηλώνοντας καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων της επίλυσης και της πραγματικής συμπεριφοράς της εκσκαφής. Επιπλέον, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων υπέδειξε συγκέντρωση διατμητικών παραμορφώσεων στο λιθολογικό όριο της υποκείμενης μάργας με το λιγνίτη.

Δυστυχώς, τα δεδομένα όσον αφορά τη κινητική συμπεριφορά των δυτικών πρυνών είναι περιορισμένα και η ανάστροφη ανάλυση που επιχειρήθηκε, δεν μπορεί να τεκμηριωθεί πλήρως. Εντούτοις, η ποιοτική και σ' ένα βαθμό ποσοτική συμφωνία των αποτελεσμάτων και των καταγραφών μέχρι το 6^ο στάδιο εκσκαφής (+574 m), διασφαλίζει την υιοθέτηση της προσομοίωσης για την πρόγνωση των αναμενόμενων παραμορφώσεων στα επόμενα στάδια της εκσκαφής.

Όσον αφορά την επικινδυνότητα, η κινητικότητα που εμφανίζεται, δεν αξιολογείται σαν καταλυστικό φαινόμενο. Παρόλο που το μέγεθος των παραμορφώσεων είχε σαν αποτέλεσμα τη διάτμηση των κλισιμέτρων, δεν υποδηλώνει κίνδυνο καταστροφικής αστοχίας που θα περιλαμβάνει μία μεγάλη εδαφική μάζα. Ο ελάχιστος διατμητικός λόγος μέσα στο πρυνές υποδεικνύει τοπικού χαρακτήρα διατμήσεις που πιθανότατα θα προκαλέσουν τοπικές ολισθήσεις ως προς τις ασυνέχειες και μία ανακατανομή των τάσεων παρά μια ολική κατάρρευση.

Εντούτοις, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βασίζονται σ' ένα καταστατικό νόμο που αποδίδει την κράτυνση του εδάφους, ενώ η ψαθυρότητα και η πιθανότητα προοδευτικής θραύσης δεν διερευνήθηκαν. Τέλος, η πίεση των πόρων θεωρήθηκε ίση με την υδροστατική και οι αναπτυσσόμενες τοπικά υδροδυναμικές πιέσεις ή και οι πιέσεις πόρων που διαμορφώνονται μετά τη στερεοποίηση δεν εξετάστηκαν.

Επίσης, είναι προφανές ότι αν ληφθεί υπόψη η ανισοτροπία των σχηματισμών (όπως αυτή προέκυψε από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και στερεοποίησης), οι αναλύσεις θα είναι περισσότερο ακριβείς.

Σε κάθε περίπτωση όμως, παρά τις προαναφερόμενες παραδοχές, η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσδιόρισε τις τοπικές τασικές συγκεντρώσεις, τις θέσεις εμφάνισης έντο-

νων παραμορφώσεων και ποια στοιχεία των πρανών παίζουν καθοριστικό ρόλο στη κινητική τους συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα αυτά δίδουν πληροφορίες σχετικά με την κινητικότητα της εκσκαφής, εκτιμήσεις για τις πιθανές αλλαγές στη πίεση των πόρων, ενώ συμβάλλουν και στην επιλογή των βέλτιστων θέσεων τοποθέτησης των οργάνων παρακολούθησης των πρανών.

Εντούτοις, για τη πρόγνωση της ακριβούς διεύθυνσης και του μεγέθους των μετακινήσεων, απαιτούνται πληρέστερα δεδομένα της γεωτεχνικής συμπεριφοράς όλων των γεωλογικών σχηματισμών και δεδομένα παρατήρησης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου συμπεριφοράς.

12 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η ανάλυση της συμπεριφοράς εκσκαφών μεγάλου βάθους, οδήγησε στον καθορισμό των μηχανισμών της κινητικότητας που εκδηλώνεται με την εκσκαφή και στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σπουδαιότητα των μηχανισμών αυτών στο σχεδιασμό των Ορυχείων. Η αναθόλωση του δαπέδου, η κάμψη του δαπέδου λόγω σύνθλιψης των μαλακών παρενεστρωμένων σχηματισμών, η συνίζηση γύρω από την εκσκαφή, ο ερπυσμός και η αστοχία των πρανών αξιολογήθηκαν σαν οι κύριοι μηχανισμοί που συμβάλλουν στη κινητικότητα που εκδηλώνεται.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τους μηχανισμούς αυτούς αφορούν :

- (i) τις αρχικές τάσεις και τη μεταβολή του τασικού πεδίου που προκαλείται με την εκσκαφή
- (ii) τη γεωλογική σύσταση - δομή και τις μηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών
- (iii) την υπόγεια υδροφορία
- (iv) τις διαστάσεις (γεωμετρία) της εκσκαφής και
- (v) τις δονήσεις, τεχνητές (λόγω εξόρυξης) ή φυσικές (λόγω σεισμών).

Πιο συγκεκριμένα, η εκτόνωση των τάσεων σε συνδυασμό με τις ιδιότητες των διαφόρων στρωμάτων καθορίζουν το μέγεθος της διόγκωσης και τη συνεπακόλουθη ανάκτηση του δαπέδου και την παραμόρφωση των παρειών της εκσκαφής. Το μέτρο ακαμψίας, ο λόγος Poisson, ο συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία και ο συντελεστής στερεοποίησης επηρεάζουν το μέγεθος των κινήσεων αυτών που στην περίπτωση πολυστρωματικού σχηματισμού ποικίλουν από ορίζοντα σε ορίζοντα και προκαλούν διαφορικές (σχετικές) κινήσεις μεταξύ των στρωμάτων.

Επί πλέον, οι κινήσεις των πρανών, γίνονται πιο περίπλοκες κάτω από σύνθετες γεωλογικές και μορφολογικές συνθήκες οι οποίες καθορίζουν και τον τύπο της πιθανής αστοχίας. Σχηματισμοί που επιδεικνύουν χαλάρωση, είναι δυνατόν ανάλογα με τη θέση τους στη γεωλογική δομή του πρανούς, να προκαλέσουν αστάθεια. Επίσης, η ύπαρξη διαπερατών ενστρώσεων στη μάζα αργιλικών πρανών προκαλούν λόγω διήθησης του νερού, εξασθένηση της ευαίσθητης αργιλικής μάζας και σε συνδυασμό με τεκτονικές ασυνέχειες είναι πιθανόν να προκληθούν αστοχίες. Ιδιαίτερη συμβολή στη κινητικότητα των πρανών και την εκδήλωση κατολισθήσεων έχουν και οι επιφάνειες στρώσης (που συνήθως χαρακτηρίζονται από μειωμένη διατμητική αντοχή), ενώ η ανισοτροπία των γεωλογικών σχηματισμών μειώνει την πιθανότητα εκδήλωσης προοδευτικής αστοχίας. Τέλος, όσον αφορά την τεκτονική, τα ρήγματα, ανάλογα με τον προσανατολισμό τους είναι δυνατόν να προκαλέσουν σε

συνδυασμό με τις επιφάνειες στρώσης, αποκοπή αυτοτελών τεμαχίων και κίνηση τους προς το εσωτερικό της εκσκαφής.

Όσον αφορά το υπεδάφικό νερό, η αναπτυσσόμενη πίεση πόρων μειώνει τις ορθές και αυξάνει τις διατμητικές τάσεις σε μια πιθανή επιφάνεια ολίσθησης προκαλώντας μετακινήσεις που πιθανόν να οδηγήσουν σε θραύση. Παράλληλα, οι ιδιότητες που επιδεικνύουν οι γεωλογικοί σχηματισμοί (διασταλτικότητα ή μείωση του όγκου κατά τη διάτμηση) επηρεάζουν ανάλογα την ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων και φυσικά τη συμπεριφορά των πρανών.

- Στην περίπτωση που η γεωλογική δομή του πρανού περιλαμβάνει και γαιάνθρακες, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή λόγω της ιδιαιτερότητας των γεωτεχνικών τους παραμέτρων. Το μικρό φαινόμενο βάρος, η αντοχή των αρμών στρώσης με άλλους εδαφικούς σχηματισμούς και η πολύ μικρή διαπερατότητα, είναι δυνατόν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη ιδιαίτερων μηχανισμών κινητικότητας και αστοχίας.

Επιπλέον, οι ενστρώσεις γαιάνθρακα σ' ένα υδροφορέα συνδυάζονται με αυξημένη αλατότητα του νερού η οποία επηρεάζει την αποσταθεροποιητική του δράση όσον αφορά την ευστάθεια των πρανών.

Η μακρόχρονη αντοχή του είναι συνήθως υψηλότερη αυτής των αργίλων, με αποτέλεσμα όταν οι άργιλοι αστοχούν λόγω προϊούσας παραμόρφωσης, το πρανές να υποστηρίζεται από το στρώμα του λιγνίτη έως ότου αυτός προσεγγίσει τη μακρόχρονη αντοχή του μετά την οποία μία απότομη αστοχία εκδηλώνεται. Ιδιαίτερα όσον αφορά το λιγνίτη, είναι ένα στρωσιγενές υλικό με έντονη ανισοτροπία, παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση στις τιμές της αντοχής του και η εκτίμηση αντιπροσωπευτικής τιμής της είναι πολύ δύσκολη.

- Οι πρώτες προβλέψεις της κινητικής συμπεριφοράς των εκσκαφών βασιζόταν στην ελαστική θεωρία και περιοριζόταν στην εκτίμηση της αναμενόμενης ανάκτησης του δαπέδου. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτών των προβλέψεων σχετίζονται με τις θεωρούμενες εδαφικές παραμέτρους, τον προσδιορισμό της αρχικής τασικής κατάστασης και την αδυναμία θεώρησης της διασταλτικότητας που επιδεικνύει το έδαφος με τη διατμητική παραμόρφωση.

Με το χρόνο, η μεθοδολογία πρόγνωσης των παραμορφώσεων σε πρανή Ορυχείων ανοικτής εκσκαφής εξελίχθηκε, και βασίζεται

- (i) σ' ένα συνδυασμό παρατηρήσεων της συμπεριφοράς τους,
- (ii) σε μια συνεχή εκτίμηση των γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών συνθηκών και
- (iii) σε βελτίωση των αναλύσεων, (είτε με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας, είτε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων).

Βασική προϋπόθεση της προσέγγισης αυτής είναι τα αξιόπιστα δεδομένα όσον αφορά τις γεωτεχνικές παραμέτρους των σχηματισμών. Δυστυχώς όμως, αυτά δεν είναι πάντα διαθέσιμα, ενώ και τα καταστατικά μοντέλα που συσχετίζουν τις τάσεις με τις παραμορφώσεις των γεωλικών δεν είναι αρκετά γενικά, ώστε να καλύπτουν την ανάλυση όλων των προβλημάτων σε κάθε τύπο εδάφους.

- Η επεξεργασία των μετρήσεων και παρατηρήσεων υπαίθρου στο Ορυχείο “Τομέας-6”, που απετέλεσε και το πεδίο έρευνας, υποδεικνύει ότι η παρατηρούμενη κινητικότητα οφείλεται στις τεχνητές επεμβάσεις που προκαλούνται με την εξόρυξη (αποφόρτιση-αποστράγγιση) σε συνδυασμό με τις γεωλογικές συνθήκες (τεκτονική, στρωματογραφία, δυστροπία των γεωλογικών σχηματισμών κ.ά.), χωρίς απαραίτητα η κινητικότητα αυτή να συνδέεται με οργανωμένες κατολισθητικές κινήσεις. Εντούτοις, η υπόθεση αυτή δεν ήταν δυνατόν να τεκμηριωθεί πλήρως με βάση τα δεδομένα παρατήρησης (γεωδαιτικά, κλισιμέτρα, γεωλογία). Οι πληροφορίες σχετικά με τις μετακινήσεις (διεύθυνση, ταχύτητα) δεν είναι ικανοποιητικού βαθμού για τέτοια εκτίμηση (δεδομένου ότι η εγκατάσταση των τοπογραφικών σημείων δεν είναι η βέλτιστη) και οι μετρήσεις των κλισιμέτρων δεν είναι επαρκείς.

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, οι αστοχίες των κλισιμέτρων, υποδεικνύουν ολίσθηση στον αρμό επαφής κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας, ή και μεταξύ του λιγνίτη και μαργαϊκών ενστρώσεων μέσα στο κοίτασμα.

Όσον αφορά τις επιφάνειες ολίσθησης με τυχαίο προσανατολισμό, που διαπιστώθηκαν από τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις, φαίνεται να προηγήθηκαν χρονικά της εκσκαφής (τεκτονική-παλαιογεωγραφία) χωρίς όμως να αποκλείεται και η συσχέτιση ή επαναδραστηριοποίηση τους με την ανάπτυξη του Ορυχείου. Οι ασυνέχειες αυτές μπορεί να αποδοθούν στη συγκέντρωση τάσεων, στην ύπαρξη ζώνης μειωμένης αντοχής και στην ενέργεια που εκτονώνεται λόγω φυσικής και τεχνητής αποφόρτισης των στρωμάτων. Δεδομένου όμως του πολυστρωματικού χαρακτήρα του σχηματισμού, σαν ο σημαντικότερος παράγοντας ανάπτυξης ή επαναδραστηριοποίησης των ασυνεχειών αυτών, αξιολογείται η διαφορική ανάκτηση (διόγκωση) ή και συρρίκνωση (λόγω αποστράγγισης) των εδαφικών οριζόντων.

- Εμπειριστατωμένη μελέτη της κινητικότητας των πρανών του Ορυχείου “Τομέας-6” πραγματοποιήθηκε με βάση μια γεωλογική τομή εγκάρσια στα δυτικά (μόνιμα) πρανή. Για την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, ελήφθησαν δείγματα από τους μαργαϊκούς ορίζοντες που θεωρούνται ως στρώματα καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά των πρανών, ενώ για τους υπόλοιπους σχηματισμούς θεωρήθηκαν συγκριτικά δεδομένα από ανάλογες μετρήσεις στην ευρύτερη περιοχή.

Τα δείγματα που εξετάστηκαν κατατάσσονται στη κατηγορία του ασβεστολίθου ή μαργαϊκού ασβεστολίθου, αλλά επειδή πρόκειται για εύθρυπτες ανθρακικές γαίες που έχουν σχηματισθεί σαν λιμναία ιζήματα, με γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ανάλογα των μαργών, κρίθηκε ότι ο χαρακτηρισμός “*κιμωλιώδης ή ασβεστούχος μάργα*” είναι ο βέλτιστος που μπορεί να τους αποδοθεί.

Από τη κοκκομετρική ανάλυση των δειγμάτων προκύπτει ότι είναι σαφής η επικράτηση της ιλυώδους φάσης (60-70%), εκτός από τα δείγματα B1 και Γ3 στα οποία επικρατεί η άργιλος έναντι της ιλύος, ενώ η άμμος κυμαίνεται γενικά σε πολύ μικρά ποσοστά. Τέλος, με βάση τους συντελεστές ομοιομορφίας, προκύπτει ότι όλα τα δείγματα εκτός από το B1, χαρακτηρίζονται σαν ομοιόμορφα. Η επικράτηση ενός κυρίως κλάσματος αιτιολογείται από το χαμηλό ενεργειακό επίπεδο ιζηματογένεσης όπως προσομοιάζει στους λιγνίτες.

- Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των δοκιμών με προσανατολισμό κάθετα στη στρώση, κυμαίνεται μεταξύ 638 και 1293 kN/m², ενώ οι αντίστοιχες τιμές των δοκιμών με προσανατολισμό του άξονα τους παράλληλα στη στρώση, κυμαίνονται από 479 έως 808 kN/m². Με βάση τα παραπάνω (τιμές $q_{max} > 400$ kN/m²), τα δείγματα χαρακτηρίζονται σαν “πολύ σκληρά”.

Τα παράλληλα στη στρώση προσανατολισμένα δοκίμια παρουσιάζουν αντοχή μειωμένη σ’ ένα ποσοστό από 22% (δείγμα B2) έως 40% (δείγμα B1) σε σχέση με αυτά που έχουν τον άξονα τους κάθετα στη στρώση, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται σε επίπεδα αδυναμίας λόγω της στρώσης ή και σε παρουσία μικροσκοπικών ρωγμών. Το δείγμα Γ3 παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές και για τις δύο διευθύνσεις, γεγονός που αποδίδεται στο χαμηλό βαθμό διαγένεσης και στην ορυκτολογική του σύσταση (μειωμένη περιεκτικότητα σε ανθρακικά ορυκτά και συμμετοχή μαρμαρυγία και χλωρίτη σε ποσοστό 27% κ.β.).

Το μέτρο δυστροπίας (ακαμψίας) όπως επίσης και η ανισοτροπία των εδαφικών δοκιμών διερευνήθηκαν με βάση το εφαπτομενικό μέτρο E_{50tan} (που αντιστοιχεί σε τάση φόρτισης ίση με το μισό της αντοχής των δοκιμών). Το αρχικό μέτρο $E_{initial}$, όπως και το τέμνον μέτρο E_{50} , θεωρήθηκαν αναξιόπιστα όσον αφορά τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, λόγω της εξάρτησης τους από τη διαμόρφωση των δοκιμών (κατακορυφότητα και έδραση) και της μειωμένης ακρίβειας των μετρήσεων σε μικρές παραμορφώσεις.

Με βάση τις τιμές E_{50tan} , προκύπτει ότι τα δοκίμια με προσανατολισμό εγκάρσια στη στρώση, επιδεικνύουν υψηλότερο μέτρο δυστροπίας με μέση τιμή 120.000 kN/m², ενώ τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια εμφανίζουν μια μέση τιμή ίση με 85.500 kN/m². Η ανισοτροπία του γεωυλικού, όσον τα μέτρα δυστροπίας εκτιμάται σε 1,4.

- Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπιεστότητας, ο αρχικός λόγος κενών (e_0) παρουσιάζει υψηλές τιμές (1,82 έως 1,58) για τα δείγματα A1, A3, B1 και Γ1, ενώ με φθίνουσα σειρά, μέχρι ελάχιστης τιμής 1,08, ακολουθούν τα δείγματα B2, Γ2 και Γ3.

Οι τιμές του συντελεστή συμπιεστότητας C_c είναι αρκετά μικρές, (0,1 έως 0,3 για τάση 780 kPa) αντικατοπτρίζοντας τη σύσταση, τη δομή και τους διαγενετικούς δεσμούς των γεωυλικών. Γενικά, τα δείγματα συμπιέζονται με τη φόρτιση αλλά ανακάμπτουν σε κάποιο βαθμό. Το πλέον αργλικό δείγμα Γ3 που δεν έχει τον ίδιο βαθμό διαγένεσης με τα υπόλοιπα, υπέστη τη μεγαλύτερη συμπίεση χωρίς να σημειωθεί ανάλογη ανάκτηση του λόγου κενών κατά το στάδιο της αποφόρτισης. Το υψηλό (σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα) ποσοστό αργλικών ορυκτών που περιέχει, διευκολύνει την υποχώρηση και τη μερική καταστροφή της δομής του.

Στα δοκίμια με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ανθρακικά ορυκτά, οι υποχωρήσεις ήταν μικρότερες και οι παραμορφώσεις μη μόνιμες. Στα δοκίμια αυτά, η ανάκτηση ήταν μεγαλύτερη, ο λόγος κενών με την αποφόρτιση πλησιάζει περισσότερο την αρχική του τιμή και οι διαγενετικοί δεσμοί παρουσιάζονται πιο ισχυροί.

Η τάση προφόρτισης που εκτιμήθηκε για όλα τα δοκίμια είναι παραπλήσια της ενεργής τάσης που δέχονται στο πεδίο. Ο λόγος προφόρτισης εκτιμάται πολύ κοντά στη μονάδα και κατά συνέπεια, τα δείγματα που μελετήθηκαν χαρακτηρίζονται σαν κανονικά στερεοποιημένα.

Όσον αφορά το συντελεστή στερεοποίησης, ο οποίος εκτιμήθηκε σαν η μέση τιμή των συντελεστών που προέκυψαν από τα επιμέρους στάδια φόρτισης κάθε δοκιμίου, κυμαίνεται από 9 m²/year για το Γ1 μέχρι 43,3 m²/year για το A1 (κάθετα στη στρώση δοκίμια).

Η διαφοροποίηση των τιμών είναι σαφής σε σχέση με τον προσανατολισμό των δοκιμών αλλά και με το βάθος. Το γεγονός αυτό παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών δεδομένου ότι διαφορετικός συντελεστής στερεοποίησης υποδηλώνει και διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης με την αποστράγγιση και κατά συνέπεια διαφορετική σχετική μετακίνηση του ενός στρώματος ως προς το άλλο.

Δεδομένου ότι ο συντελεστής στερεοποίησης του λιγνίτη, κυμαίνεται μεταξύ 2 και 8 m²/year, έναντι 9 έως 43 m²/year των μαργαϊκών οριζόντων, η μάργα αναμένεται να συμπιέζεται με ταχύτερο ρυθμό (σε σχέση με το λιγνίτη) κάτω από την επιβολή φορτίου ίδιου μεγέθους.

Από τις τιμές του συντελεστή στερεοποίησης, προέκυψε επίσης ότι ο συντελεστής διαπερατότητας των μαργαϊκών οριζόντων που εξετάστηκαν είναι πολύ μικρός, της τάξης των 10⁻⁷ m/sec.

Τέλος, τα μέτρα συμπιεστότητας (E_s) που προέκυψαν κατά τα στάδια φόρτισης είναι της τάξης των δεκάδων MPa. Για τα δείγματα τα εγκάρσια στη στρώση, οι τιμές κυμαίνονται από περίπου 38.000 kPa (δείγμα A3) μέχρι 71.000 kPa (δείγμα Γ2N), για εύρος φόρτισης από

392 έως 780 kPa. Η τιμή του μέτρου συμπιεστότητας για δοκίμια παράλληλα στη στρώση, κυμαίνεται από 28.000 kPa (δείγμα Γ1) μέχρι 70.000 kPa (δείγμα Γ2'), διακύμανση που υποδεικνύει τη διαφοροποίηση της συμπεριφοράς με το βάθος λόγω της διάστρωσης.

Γενικά το μέτρο συμπιεστότητας E_s αυξάνει μέχρι την τάση προφόρτισης του σχηματισμού και στη συνέχεια σχεδόν σταθεροποιείται. Προέκυψε επίσης ότι ο ρυθμός ανάκτησης μειώνεται γρήγορα μέχρι την τάση προφόρτισης (ο κλάδος αποφόρτισης προσεγγίζει ένα μέγιστο E_s) και στη συνέχεια αυξάνει έντονα μέχρι την τάση των 400 kPa και πιο ομαλά στη συνέχεια. Η συμπεριφορά αυτή υποδεικνύει ότι για το μισό περίπου του βάθους εκσκαφής θα εμφανισθεί απότομη μείωση του μέτρου συμπιεστότητας και ταχύτερος ρυθμός ανάκτησης.

- Τα μέτρα δυστροπίας που υπολογίσθηκαν από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (E_{50tan}) και τις δοκιμές συμπιεστότητας (μέτρο συμπιεστότητας E_s) αποκλίνουν σημαντικά, γεγονός που αποδίδεται στις διαφορετικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι δοκιμές (ελεγχόμενη παραμόρφωση σε σχέση με την ελεγχόμενη φόρτιση, πλευρικό περιορισμό, κορεσμό του δοκιμίου, μέγεθος φορτίου). Τυχόν σύγκριση των αποτελεσμάτων απαιτεί διόρθωση των "υπό περιορισμό" μέτρων που προκύπτουν από τις δοκιμές συμπιεστότητας με βάση το λόγο Poisson.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι τιμές που προσδιορίσθηκαν τόσο από την ανεμπόδιστη θλίψη όσο και από τις δοκιμές συμπιεστότητας, δεν αφορούν το μέτρο ελαστικότητας των δειγμάτων δεδομένου ότι αυτό θα πρέπει να εκτιμάται στο πολύ αρχικό στάδιο της φόρτισης με διαδοχικές φορτίσεις - αποφορτίσεις. Εντούτοις, τα στάδια αποφόρτισης των δοκιμών συμπιεστότητας προσομοιώνουν καλλίτερα τις φυσικές συνθήκες που διαμορφώνονται με την εκσκαφή και η τιμή του μέτρου που προκύπτει (E_s), θεωρείται να είναι αποδεκτή για εκτίμηση του μεγέθους ανάκτησης του δαπέδου της εκσκαφής.

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών στρέψης, προέκυψε ότι η παραμένουσα γωνία τριβής κυμαίνεται από 22,10° (δείγμα Α3) έως 24,42° (δείγμα Β1). Οι δοκιμές σε δείγματα της γεώτρησης ΓΤ6-1/95 έδωσαν τιμή 22,26 ° για την υποκείμενη μάργα και 23,59° για την ανθρακομιγή μάργα ενώ για το λιγνίτη η παραμένουσα γωνία τριβής εκτιμήθηκε ίση με 24,1°. Οι υψηλές τιμές της παραμένουσας αντοχής των μαργαϊκών οριζόντων αποδίδονται στην περιεκτικότητα ανθρακικών (τα δείγματα περιέχουν πάνω από 90% ανθρακικό ασβέστιο) ή και στην περιεκτικότητα οργανικών δεδομένου ότι το δείγμα Β1 με το μεγαλύτερο ποσοστό οργανικών (8%), παρουσιάζει τη μεγαλύτερη παραμένουσα γωνία τριβής (24,4°), παραπλήσια με αυτή του λιγνίτη.

Σε ότι αφορά το μηχανισμό διάτμησης των δειγμάτων, επικρατέστερος φαίνεται να είναι ο τύπος της κύλισης.

Όσον αφορά την εξάρτηση της παραμένουσας γωνίας τριβής από το ορθό φορτίο, δεν είναι σαφής. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει ότι για ενεργό φορτίο μεγαλύτερο από 200 kPa, η μεταβολή του συντελεστή παραμένουσας τριβής είναι ανεξάρτητη της ενεργής ορθής τάσης. Η μείωση που αναφέρεται από άλλους ερευνητές σε ανάλογους σχηματισμούς αφορά μικρότερες τιμές ορθής τάσης, που ανέρχεται μέχρι περίπου 180 kPa.

Τέλος, οι προαναφερόμενες τιμές της παραμένουσας γωνίας τριβής υπολείπονται έως και 12° από τις γωνίες εσωτερικής τριβής που προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές. Η διαφορά αυτή (12° για το δείγμα Γ2 και 7° για το δείγμα Β2), υποδηλώνει ψαθυρότητα των σχηματισμών, δηλαδή χαλάρωση μετά τη θραύση και είναι σκόπιμο να διερευνηθεί περαιτέρω με τριαξονικές δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης.

- Τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών ελεγχόμενης φόρτισης, υποδεικνύουν απόκλιση της αξονικής παραμόρφωσης που μετράται τοπικά πάνω στο δείγμα (με τους αισθητήρες τύπου Hall effect), από την αξονική παραμόρφωση που μετράται με τα μηχανοστάμια εξωτερικά της κυψέλης. Πιο συγκεκριμένα, μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά την έναρξη της δοκιμής (καμπύλη λιγότερο επικλινής) καταγράφονται από τους εξωτερικούς αισθητήρες σε σχέση με τους τοπικούς μετρητές. Η μεγάλη αύξηση της παραμόρφωσης στην αρχή της φόρτισης, που παρουσιάζουν οι εξωτερικές μετρήσεις, οφείλεται πιθανότατα σε ολίσθηση του δοκιμίου ως προς την πάνω πλάκα / κελί φόρτισης και στη κάμψη των άκρων του, εξαιτίας της συμπίεσης των λεπτών ασθενικών ζωνών οι οποίες αναπόφευκτα δημιουργούνται κατά τη διαμόρφωση του. Οι επιδράσεις των σφαλμάτων της κάμψης δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν πλήρως και κατά συνέπεια οι εξωτερικά μετρούμενες αξονικές παραμορφώσεις θεωρήθηκαν αναξιόπιστες για την εκτίμηση της δυστροπίας σε μικρές παραμορφώσεις.

Από τις τριαξονικές δοκιμές προέκυψαν τιμές $c_d=217 \text{ kN/m}^2$ και $\phi_d=29^\circ$ για το δείγμα Β2 και $c_d=102 \text{ kN/m}^2$ και $\phi_d=37^\circ$ για το δείγμα Γ2. Από τα διαγράμματα αποκλίνουσας τάσης – αξονικής παραμόρφωσης, εκτιμήθηκε το τέμνον μέτρο δυστροπίας E_{50} και το μέτρο αποφόρτισης – επαναφόρτισης E_{ur} . Επίσης για κάθε δείγμα εκτιμήθηκαν οι τιμές του τέμνοντος μέτρου δυστροπίας αναφοράς E_{50}^{ref} και ο συντελεστής εξάρτησης m της δυστροπίας από την πλευρική τάση σ'_3 . Για το Β2 προέκυψαν τιμές $E_{50}^{ref}=168.532 \text{ kPa}$ και $m=0,37$ ενώ για το δείγμα Γ2, $E_{50}^{ref}=344.634 \text{ kPa}$ και $m=0,147$.

Επιπλέον, με βάση τις τιμές E_{ur} , εκτιμήθηκε το μέτρο αναφοράς για αποφόρτιση και επαναφόρτιση E_{ur}^{ref} , και προέκυψε τιμή $E_{ur}^{ref}=495.975 \text{ kPa}$ για το δείγμα Β2 και $E_{ur}^{ref}=977.425 \text{ kPa}$ για το δείγμα Γ2.

Παρότι ο αριθμός των μετρήσεων είναι περιορισμένος, σε όλα τα διαγράμματα επεξεργασίας, ο συντελεστής συσχέτισης είναι υψηλός ($R^2 > 0,97$). Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ακρίβεια των μετρήσεων των αισθητήρων Hall effect, οι οποίοι δίδουν τη δυνατότητα με λίγες μετρήσεις να προσδιορισθεί ένα αξιόπιστο μέτρο δυστροπίας.

Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα θα πρέπει να εμπλουτισθούν με περισσότερες μετρήσεις από διάφορες θέσεις δειγματοληψίας προκειμένου να είναι αντιπροσωπευτικά των σχηματισμών στους οποίους αναφέρονται και να μην θεωρούνται σημειακού ενδιαφέροντος.

- Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπιεστότητας και θεωρώντας ότι τα μέτρα συμπιεστότητας που προσδιορίστηκαν κατά τα στάδια αποφόρτισης προσεγγίζουν το μέτρο ελαστικότητας των σχηματισμών, επιχειρήθηκε μια εκτίμηση της ανάκτησης που εκδηλώνεται με την αποφόρτιση (ελαστική συμπεριφορά).

Η ανάκτηση εκτιμήθηκε με βάση την τασική κατανομή που προκύπτει θεωρώντας ότι το στρώμα που αφαιρείται σε κάθε στάδιο εκσκαφής, προκαλούσε φόρτιση ανάλογη ενός επιμήκους φορτίου. Το μέγεθος της αναμενόμενης ανάκτησης ανά στάδιο εκσκαφής, προέκυψε αθροίζοντας το μέγεθος της αναθόλωσης όλων των στρωμάτων που ανακτούν στο συγκεκριμένο στάδιο εκσκαφής. Θεωρώντας την τασική κατανομή κατά Boussinesq και λόγο Poisson $\nu=0$, υπολογίστηκε ότι η αναθόλωση ανέρχεται στα 0,590 m στο πρώτο στάδιο της εκσκαφής και διαμορφώνεται στα 0,036 m κατά το τελευταίο στάδιο. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στο κέντρο του δαπέδου και αναμένεται να μειώνονται προς την περιφέρεια της εκσκαφής.

Είναι βέβαιο ότι η τασική κατανομή που υποδεικνύεται με την υπόθεση ενός τέλει ελαστικού μέσου δεν πρέπει να θεωρείται η πλέον αξιόπιστη. Στην πραγματικότητα, η ζώνη που επηρεάζεται από την εκσκαφή, είναι εξαιτίας της ανισοτροπίας του σχηματισμού, μικρότερη από αυτή που υπαινίσσεται η ελαστική θεωρία και κατά συνέπεια οι εκτιμώμενες τιμές μικρότερες. Επίσης, το μέγεθος της ανάκτησης θα πρέπει να θεωρείται μικρότερο και για το λόγο ότι στους υπολογισμούς θεωρήθηκε λόγος Poisson $\nu=0$. Η αύξηση του θα προκαλέσει μείωση της εκτιμώμενης τιμής. Κατά συνέπεια η ανάλυση αυτή αν και σχετικά εύκολη, υπολείπεται αξιοπιστίας.

- Σύμφωνα με τις μετρήσεις των κλισιμέτρων ενδέχεται να υπάρξει ολίσθηση στη ζώνη μετάβασης κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας ή στην επαφή λιγνίτη και μαργαϊκών ενστρώσεων που εμφανίζονται στο κοίτασμα.

Η διερεύνηση της ευστάθειας των δυτικών (μόνιμων) πρανών του Ορυχείου πραγματοποιήθηκε με μεθόδους οριακής ισορροπίας (θεωρώντας ενεργές τάσεις) με σκοπό την αξιολόγηση των κινήσεων που έχουν καταγραφεί από τα κλισίμετρα.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι στην περίπτωση ολίσθησης κατά κυκλικό τομέα ο οποίος εφάπτεται στη ζώνη μετάβασης κοιτάσματος – υποκείμενης μάργας, ο συντελεστής ασφάλειας είναι $FS = 1,13$ (ανάλυση κατά Bishop).

Δεδομένης της στρωσιγένειας των σχηματισμών αλλά και της τεκτονικής, ο κυκλικός τύπος αστοχίας θεωρήθηκε απίθανος και το πρόβλημα εξετάστηκε και με τη μέθοδο Janbu. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση της ευστάθειας αποκομμένου τεμάχους που ορίζεται από την επιφάνεια διάτμησης στα +530 m και τη ζώνη ρηγμάτωσης που τέμνει το πρανές. Από την επίλυση αυτή η οποία έγινε με τις πιο απαισιόδοξες θεωρήσεις προέκυψε συντελεστής ασφάλειας $FS = 1,11$.

Στη συνέχεια, οι υπολογισμοί επαναλήφθηκαν θεωρώντας ένα μοντέλο με ενιαία εδαφική ζώνη μειωμένης διατμητικής αντοχής, που περιλαμβάνει τη ρηγματωμένη ζώνη και τη ζώνη μεταξύ του υψομέτρου +510 και +540 m. Στην περίπτωση που η επιφάνεια διάτμησης θεωρηθεί ότι αναπτύσσεται μεταξύ του λιγνίτη και της ενδιάμεσης μάργας ο συντελεστής ασφάλειας εκτιμήθηκε σε $FS = 1,11$ με τη μέθοδο Bishop και σε $FS = 1,18$ με τη μέθοδο Janbu.

Από τις παραπάνω αναλύσεις επιβεβαιώνεται η ασφάλεια του πρανούς. Με βάση τους συντελεστές ασφάλειας, μια συνολική αστοχία του πρανούς δεν είναι πιθανή. Προκύπτει επίσης ότι τα υπο-κατακόρυφα ρήγματα (τουλάχιστον όπως αυτά έχουν σχεδιασθεί στην αντιπροσωπευτική τομή του “Τομέα-6”) σε συνδυασμό με τη δεδομένη στρωματογραφία, δε φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά την ευστάθεια.

Εντούτοις, η τυχόν ύπαρξη αργιλικών ενστρώσεων μικρής αντοχής δεν αποκλείει τη διαφοροποίηση της ευστάθειας τουλάχιστον τοπικά. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στους υπολογισμούς, η πίεση των πόρων θεωρήθηκε ανάλογη της υδροστατικής. Όμως, οι σχηματισμοί δεν έχουν την ίδια διαπερατότητα και η πίεση πόρων στους διάφορους στρωματογραφικούς ορίζοντες (π.χ. στην ένστρωση της χαρακτηριστικής άμμου, ή των αργίλων) πιθανότατα είναι διάφορη της υδροστατικής. Τυχόν σχετική υστέρηση στην εκτόνωση της πίεσης στις ενστρώσεις των αργίλων ίσως να ευνόησε και την αστοχία που διαπιστώνεται από τα κλισίμετρα.

- Από την προσομοίωση της εκσκαφής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει ότι η προβλεπόμενη και παρατηρούμενη κινητική συμπεριφορά μέχρι το επίπεδο του 6^{ου} σταδίου εκσκαφής (+574 m), είναι σε πολύ καλή συμφωνία. Οι δύο μεγάλες οριζόντιες μετακινήσεις που παρατηρήθηκαν στο υψόμετρο των +510 m έως +520 m (σαν αποτέλεσμα της διάτμησης που εκδηλώθηκε στη ζώνη μετάβασης του λιγνίτη προς την υποκείμενη μάργα) και στα +560 m (στη ζώνη μετάβασης του λιγνίτη προς την υπερκείμενη ανθρακομιγή μάργα), εκτιμήθηκαν κατά την ανάλυση. Το γεγονός αυτό επιβεβαίωσε ότι η μέθοδος των

πεπερασμένων στοιχείων (με τις θεωρούμενες γεωτεχνικές παραμέτρους), θα μπορούσε να εκτιμήσει την κινητικότητα και στα επόμενα στάδια της εκσκαφής.

Με βάση τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, θα πρέπει να αναμένεται μέγιστη οριζόντια παραμόρφωση 0,7 έως 0,8 m στο τέλος του 11^{ου} σταδίου εκσκαφής, (εντοπιζόμενη στο μέσο περίπου του ύψους των δυτικών πρανών) και κατακόρυφη ανάκτηση 0,5 m (στον ορίζοντα των ενδιαμέσων αλλά και τον ανώτερο ορίζοντα του κοιτάσματος).

Παρόλο που το μέγεθος των παραμορφώσεων είναι μεγάλο (με αποτέλεσμα τη θραύση των κλισιμέτρων), οι αναλύσεις της εκσκαφής του Τομέα-6, υπέδειξαν ότι δεν υπήρχε κίνδυνος καταστροφικής αστοχίας που θα περιλάμβανε μεγάλη εδαφική μάζα. Ο μέγιστος λόγος διατμητικής τάσης εκτιμήθηκε ίσος με 0,875 και τοπικά μόνο πλησιάζει τη μονάδα.

Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων προσδιορίστηκαν περιοχές συγκέντρωσης των τάσεων, που και πώς αναπτύσσεται η παραμόρφωση και ποια δομικά στοιχεία του πρανούς μπορούν να παίζουν καθοριστικό ρόλο στη κινητική συμπεριφορά, δεδομένα που είναι χρήσιμα και για τη βέλτιστη επιλογή των θέσεων τοποθέτησης οργάνων παρακολούθησης της συμπεριφοράς της εκσκαφής. Εντούτοις, για την πρόγνωση της ακριβούς διεύθυνσης των παραμορφώσεων σε συγκεκριμένα σημεία και για την εκτίμηση περισσότερων στοιχείων σχετικά με το ρυθμό της κινητικότητας, απαιτούνται πληρέστερα δεδομένα συμπεριφοράς όλων των γεωλογικών σχηματισμών και περισσότερα δεδομένα παρατήρησης για τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

- Με βάση τη μεθοδολογία που υιοθετήθηκε (καθορισμός γεωλογικού προσομοιώματος, αξιολόγηση των μετρήσεων και παρατηρήσεων πεδίου, προσδιορισμός των γεωτεχνικών παραμέτρων, ανάλυση της ευστάθειας με μεθόδους οριακής ισορροπίας και προσομοίωση της εκσκαφής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) έγινε μια αξιόπιστη προσέγγιση του μηχανισμού κινητικότητας των πρανών και του δαπέδου της εκσκαφής. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η κινητικότητα οφείλεται κατά το πλείστον στην ανάκτηση λόγω της αποφόρτισης με την εκσκαφή και την ελαστικο-πλαστική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών. Όπως είναι φυσικό, πληρέστερα δεδομένα τεκμηρίωσης θα βελτιώσουν την προσέγγιση του μηχανισμού και θα συμβάλλουν σε ακριβέστερες προβλέψεις της κινητικότητας.

ΛΗΜΜΑΤΑ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

- **Ανάκτηση ή αναθόλωση (bulging):** η κατά την κατακόρυφο διεύθυνση ανοδική κίνηση (διόγκωση) του γεωλογικού σχηματισμού, η οποία προκαλείται με την εκσκαφή και τη σταδιακή μείωση του φορτίου του.
- **Γαιάνθρακες (coal):** οι στερεές ορυκτές καύσιμες ύλες που προήλθαν από φυσικά υπολείμματα. Περιλαμβάνουν και τους λιγνίτες.
- **Διασταλτικότητα ή διαστολή (dilatancy):** η αύξηση του όγκου του εδαφικού δοκιμίου κατά τη διάτμηση, λόγω διαστολής της δομής του.
- **Γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL):** αντιπροσωπεύει τη συνθήκη στην οποία έχει ενεργοποιηθεί η αντοχή κρίσιμης κατάστασης. Έχει επέλθει αστοχία και χωρίς περαιτέρω μεταβολή της μέσης τάσης (p'), της αποκλίνουσας τάσης (q'), ή του λόγου κενών (e), το έδαφος εξακολουθεί να υφίσταται διάτμηση με πλαστικές μόνο παραμορφώσεις.
- **Δυστροπία ή ακαμψία (stiffness):** Η αντίδραση του εδάφους στην επιβαλλόμενη τάση. Τα μέτρα δυστροπίας (ακαμψίας) είναι παράμετροι που συσχετίζουν τη μεταβολή της τάσης με τις μεταβολές της παραμόρφωσης.
- **Επιφάνεια οριακής κατάστασης (state boundary surface):** η συνοριακή επιφάνεια στο διάγραμμα p' , q' , v ($=1+e$), η οποία διαχωρίζει πιθανές από μη πιθανές συνθήκες, στις οποίες μπορεί να βρεθεί το εδαφικό υλικό.
- **Κρίσιμη κατάσταση (critical state):** η κατάσταση που προσεγγίζεται με την παραμόρφωση, στην οποία οι πλαστικές διατμητικές παραμορφώσεις είναι δυνατόν να συνεχίζονται χωρίς περαιτέρω μεταβολή του όγκου του εδαφικού δοκιμίου.
- **Κράτυνση ή κράτυσμα ή σκλήρυνση λόγω έργου (work-hardening):** η απαίτηση μεγαλύτερης διατμητικής τάσης προκειμένου να επιτευχθεί περαιτέρω παραμόρφωση του εδαφικού δοκιμίου.
- **Χαλάρωση λόγω έργου (work-softening):** η εξασθένηση της απαιτούμενης διατμητικής τάσης για περαιτέρω παραμόρφωση του εδαφικού δοκιμίου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ

Agioutantis, Z., Maurigiannakis, S., Stiakakis, C. (2002). Modelling the uniaxial compression test in rocks: Comparison of different approaches. 4th GRACM Congress on Computational Mechanics, Patra, 27-29 June, 2002.

Anagnostopoulos, A. (1982). Compressibility behavior of soft lignite. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE 108, 1549-66.

Anagnostopoulos, A., Kalteziotis, N., Tsiambaos, G., Kavvadas, M. (1991). Geotechnical properties of the Corinth Canal marls. Geotechnical and Geological Engineering 9, pp.1-26.

Anagnostopoulos, A., Papadopoulos, B., Sideris, A., Kamariotis, A. (1988). The Compressibility of Ptolemais Lignite. Bulletin of the Greek Public Works Research Centre, 15, 3-4, pp. 87-98.

Andrei, S.V., Manea, S. & Jianu, L. (1996). Influence of degree of mobilization of shear strength on slope stability. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Anguelov, K., Lakov, A. (1988). Selection of analytical geotechnical parameters for evaluation of slope stability Landslides. Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides, Lausanne. Edited by C.Bonnard.

Anwar, H. Z., Shimada, H., Ichinose, M., Matsui, K. (1998). Deterioration of mechanical properties of coal measure rocks due to water. Proceedings of the Seventh International Symposium Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 6-9 October 1998. Singhal (ed.), Balkema, Rotterdam.

ASTM C110 (1995). Standard test methods for physical testing of quicklime, hydrated lime, and limestone. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01.

ASTM Designation: D4767-95 (1996). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils. Annual Book of ASTM Standards, vol 04.08.

Atkinson, J.H., (1993). An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations. McGraw-Hill International (UK) Limited, London.

Atkinson, J.H., Coop, M.R., Stallebrass, S.E., Viggiani, G. (1993). Measurement of stiffness of soils and weak rocks in laboratory tests. The Eng.Geology of Weak Rock. Proc. of the 26th Ann. Conf. the Eng. Group Geol. Society. Ed. by Cripps, J.C., Coulthard, J.M., Culshaw, M.G., Forster, A., Hencher, S.R., Moon, C.F. Engineering Geology Special Publication No.8.

Atkinson, J.H., Evans, J.S. and Scott, C.R. (1985). Developments in microcomputer stress path testing equipment for measurement of soil parameters. Ground Engineering 18, pp. 5-22.

Atkinson J.H., Richardson, D., Stallebrass, S.E. (1990). Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soil. Geotechnique 40, No 4, pp. 531-540.

Atkinson J.H., Sallfors G. (1991). Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in situ tests. Proc. 10th ECSMFE Determination of soils and displacements of structures, Florence, Italy.

Baldi, G., Hight, D.W. and Thomas G.E. (1988). State of the art paper. "A Re-evaluation of Conventional Triaxial Test Methods". Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, ASTM STP977, R.T. Donaghe, R.C. Chaney and M.L. Silver Eds., American Society for Testing and Materials. Philadelphia, pp. 219-263

Bell, F.G. (1992). Fundamentals of Engineering Geology. Aditya Books Private Ltd, N. Delhi.

Bishop, A.W., Green, G. E., Garga, V.K., Andresen, A. and Brown, J.D. (1971). A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. Geotechnique 21, No 4, pp. 273-328.

Bishop, A.W., Wesley L.D. (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. Geotechnique 25, No 4, pp. 657-670.

Bjerrum, L. (1967). Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. Journal of the soil mechanics and foundations division. ASCE 93, No SM5.

Blyth, F.G.H. & de Freitas M.H. (1986). A geology for engineers. Seventh edition. Published by Edward Arnold.

Borja, R.I., Lee, S.R., Seed, R. (1989). Numerical simulation of excavation in elastoplastic soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 13, pp. 231-249.

Bouazza, A., Bouteldja, M. & Van Impe, W.F. (1996). Residual characteristics of the Sahelian marls of Algiers (Algeria). *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Bowles, J.E. (1986). *Engineering Properties of soils and their measurements*. Mc Graw-Hill, Singapore.

Brady B.H.G. and Brown E.T. (1985). *Rock Mechanics for underground Mining*. George Allen & Unwin (Publishers), Ltd.

Brinkgreve, R.B.J., Bakker, H.L. (1991). Non-linear finite element analysis of safety factors. *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Beer, Brooker & Carter (eds). Balkema, Rotterdam, pp. 1117-1122.

Bromhead, E.N. (1979). A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering*, July 1979.

Bromhead, E.N. (1986). *The stability of slopes*. Surrey University Press. First Edition, Blackie and Son Ltd.

Brooker, E.W. (1967). Strain energy and behaviour of overconsolidated soils. *Can. Geotech. Journal*, 4, pp. 326-33.

BS 1377 (1975). Determination of the one-dimensional consolidation properties.

BS 1377 (1975). Methods of test for Soils for civil engineering purposes. Method using Casagrande apparatus.

Burland, J.B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays, 30th Rankine Lecture. *Geotechnique* 40, pp. 327-79.

Burland, J.B. (1989). Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: "Small is beautiful - the stiffness of soils at small strains". *Can. Geotech. J.* 26, pp. 499-516.

Burland, J.B., Hancock, R.J.R. (1977). Underground car park at the House of Commons, London: geotechnical aspects. *Structural Engineer*, Volume 55, No 2, pp. 87-100.

Chandler, R.J. (1984). Recent European experience of landslides in over-consolidated clays and soft rocks. State of the art report. 4th International Symposium on Landslides, Toronto 1984.

Chang, C.V. and Duncan, J.M. (1970). Analysis of soil movement around a deep excavation. *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.* 96, No 545.

Chang-Yu Ou, Dar-Chang Chiou and Tzong-Shiann Wu (1996). Three - dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. *Journal of Geotechnical Engineering* 122, No 5, pp. 347-345.

Chistodoulis, J., Giannaros, H. (1993). Engineering behaviour of weathered flysh in Greece. *The Engineering Geology of weak rock*, Cripps et al. (eds). Balkema.

Clayton, C.&I., Cordon, M.A. and Matthews M.C. (1994). Measurements of stiffness of soil and weak rocks using small strain laboratory testing and geophysics. *Proc. Int. Symp. on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.229-234.

Clayton, C.R.I. and Khatrush, S.A. (1986). A new device for measuring local strains on triaxial specimens. *Geotechnique* 36, No 4, pp. 593-97.

Clayton, C.R.I., Khatrush, S.A., Bica, A.D.V. & Siddique, A. (1989). The use of Hall effect semiconductors in geotechnical instrumentation. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ 12, No 1, pp. 69-76.

Clough, G.W., West, L.J. and Murdock, L.T. (1979). Pit slope performance in shale, Wyoming, U.S.A. *Developments in Geotechnical Engineering 14B, Rockslides and Avalanches, 2. Engineering Sites*, by Barry Voight (Editor), Elsevier.

Cox, R.H.T. (1981). Analysis of the Stability of a Highwall in on Opencut Coal Mine Queensland. CSIRO Aust. Division of Applied Geomechanics, *Geomechanics of Coal Mining*, Report No. 34.

Craig, R.F. (1978). Soil mechanics. 3rd Edition, Published by Van Nostrand Reinhold (UK) Co. Ltd, England, pp. 355-357.

Debray, S. and Savage, W.Z. (2001). A Preliminary Finite - Element Analysis of a Shallow Landslide in the Alki Area of Seattle, Washington. US Geological Survey - Open File Report 01-0357.

D' Elia, B., Distefano, D., Esu, F., Federico, G. (1988). Deformations and stability of high cuts in a structurally complex formation: Analysis and prediction Landslides. *Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides, Lausanne*. Edited by C.Bonnard.

D' Elia, B., Distefano, D., Federico, G., Oliva, S. (1984). Full scale of a high cut in a structurally complex formation. *Proceedings IV International Symposium on Landslides (2) Toronto* pp. 57-62.

Dolezalek, B., Duro, F. (1962). Probleme der Standfestigkeit hoher Buschungen im rheinischen Braunkolhenrevier. (Problems of stability of the high slopes in the Rhineland brown coal region). *Braunkohlee, Waerme, Energie* 14, pp. 209-221.

Dolezalova, M. (1984). Stability problems of a 210m deep open pit mine. *Proc. 6th Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Budapest, 1984* (G. Petrasovits Ed.).

Dolezalova, M., Rozsypal, A. (1988). Field measurements and computational models for solving an open pit mine stability problem. *2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*. Sakurai (ed.), Balkema.

Drucker D.C., Gibson, R.E. & Henkel D.J. (1957). Soil lMechanics and work hardening theories of plasticity. *Trans. ASCE*, Vol. 122, pp. 338- 346.

Duncan, J. M. (1996). State of the Art: Limit Equilibrium and Finite - Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE 112, No 7.

Duncan, J. M., Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soil. *ASCE J of the Soil Mech. and Found. Div* 96, pp. 1629-1653.

Eigenbrod, K.D. (1975). Analysis of the pore pressure changes following the excavation of a slope. *Canadian Geotechnical Journal* 16, pp. 5-17.

Fell, R., Sullivan, T.D., Mac Gregor, J.P. (1988). The influence of bedding plane shears on slope stability in sedimentary rocks landslides. *Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne. Edited by C.Bonnard.

Fethi Azizi (2000). *Applied Analyses in Geotechnics*. E & FN Spon, London.

Forsyth, R.A., Smith, R.E., Cortright, D.J. (1975). Rebound of a deep shale cut. *Cal. Dep. Transportation Rep. CA-DOT-TL-2722-1-75-11*.

Fun-Den Wang, Meng-Cherng Sun (1970). Slope stability analysis by the finite element stress analysis and limiting equilibrium method. *US Dept of the Interior, Bureau of Mines*.

Gartung M. Erwin (1986). Excavation in hard clays of the Keuper formation. *ASCE, Geotechnical Special Publication No 2*, pp. 69-83.

Gds Instruments Ltd (2000). *The Gds users handbook*.

Graham, J., Houlsby, G.T. (1983). Anisotropic elasticity of a natural clay. *Geotechnique* 33, No 2, pp. 165-180.

Goshtasbi, K.G., Hosseini, M. (2000). Stability analysis of Maydook Copper mine. *Proceedings of the ninth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Athens, 6-9 November 2000, pp. 295-298.

Hast, N. (1967). The state of stresses in the Upper part of the earth's crust. *Engineering Geology* 2 (1), pp.5-17.

Hawkins, A.B. (1985). Geological Factors Affecting Residual Shear Strength. Proc. IV th International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo, pp. 239-244.

Hayano, K., Sato, T., Tatsuoka, F. (1997). Deformation characteristics of a sedimentary soft mudstone from triaxial compression tests using rectangular prism specimens. *Geotechnique* 47, pp. 439-449.

Head, K. H. (1986). *Manual of Soil Laboratory Testing*, ELE Int. Limited, Pentech Press, London.

Hird, C.C., Pierpoint, N.D. (1997). Stiffness determination and deformation analysis for a trial excavation in Oxford Clay. *Geotechnique* 47, pp. 665-691.

Hobbs, D.W. (1964). The strength and the stress-strain characteristics of coal in triaxial compression. *Journal of Geology* 72, pp. 214-31.

Huergo, P., Christoulas, St., Tsiambaos, G. (1987). Some geotechnical aspects of Iraklion marls. *Bull. Assoc. Engineering Geologists*, Vol. XXIV, 1, pp. 93-103.

Hughes, D.B., Clarke, B.G. (1997). The glacial tills of Northern England in relation to the stability of screening and spoil mounds at opencast coal mines. *Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environmental*, IAEG, Athens, 23-27 June 1997.

Hunt, R.E. (1986). *Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation*. McGraw-Hill Book Company.

Hustrulid, W., Kuchta, M. (1995). *Open pit mine planning & design*. Edited by A.A.Balkema, Vol.1 - Fundamentals, pp.287-367.

Hutchinson, J.N. (1988). General report : Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Landslides. Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne. Edited by C. Bonnard.

Hutchinson, J.N., Bromhead E.N., Lupini, J.F. (1980). Additional observations on the Folkstone Warren landslides. *Q.J.Eng.Geol.*, London 13, pp.1-31.

Isabel, M., Pinto, M.I.M., Lemos, L.J.L. (1996). Residual strength variations by water content and its relevance to slope stability calculations. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Jackson M. L. (1974). Soil chemical analysis - Adv. Course, 2nd ed., 11th printing. Madison, WI, p. 895.

Janbu, N. (1963). Soil Compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. Proceedings of ECSMFE. Wiesbaden 1, pp. 19-25.

Janbu, N. (1969). The resistance concept applied to deformations of soils. Proceedings of the 7th ICSMFE, Mexico City, Vol 1, pp. 191-196.

Janbu, N. (1979). Mechanisms of Failure in Natural and Artificial Soil Structures. International Symposium on Soil Mechanics, Oaxaca 1979. Vol 1.

Jardine, R.J., Potts, D.M., St. John, H.D. and Hight D.W. (1991). Some practical applications of a non-linear ground model. Proc. 10th Eur. Conf. Soil Mech., Florence.

Jardine, R.J., Symes, M.J. and Burland, J.B. (1984). The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. Geotechnique 34, 3, pp. 323-340.

Jaremski, J. (1997). Geotechnical properties of calcite - clayey mixtures, especially marls. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environmental, IAEG, Athens, 23-27 June 1997.

John, C. M. ST. (1970). A note on the use of stress distributions in slope stability calculations. Proceedings of the Symposium on the theoretical background to the planning of open pit mines with special reference to slope stability, Johannesburg. Edited by P.W.J. Van Rensburg, Balkema.

Johnson R., De Graff J. (1988). Principles of Engineering Geology. John Wiley, N. York.

Kavvas M., Marinos P., Anagnostopoulos A. (1992). Stability of open-pit lignite slope in Ptolemais, Greece. Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, New Zealand, pp. 1293-8.

Kavvadas, M., Amorosi, A. (2000). A constitutive model for structured soils. *Geotechnique* 50, No 3, pp. 263-273.

Kavvadas, M., Anagnostopoulos, A., Kalteziotis, N. (1993). A framework for the mechanical behaviour of the cemented Corinth marl. *Int. Symp. on Hard Soils - Soft Rocks*, Athens, Greece.

Kavvadas, M., Anagnostopoulos, A., Leonardos, M., Karras, B. (1993). Mechanical properties of the Ptolemais lignite. *Proceedings of the International Symposium on Hard Soils and Soft Rocks*, Athens, Greece, pp. 585-592.

Kavvadas, M., Papadopoulos, B., Kalteziotis, N. (1994). Geotechnical properties of the Ptolemais lignite. *Geotechnical and Geological Engineering* 12 (2).

Khalili, N., Valliappan, S., Wan, C.F. (1999). Consolidation of fissured clays. *Geotechnique* 49, No 1, pp. 75-89.

Kirby, J.M., O' Sullivan, M.F. and Wood, J.T. (1998). Estimating critical state soil mechanics parameters from constant cell volume triaxial tests. *European Journal of Soil Science*. Conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15-18 April 1991.

Kirkebo, S., Nordal, S., Svano, G. (1996). Time-dependent stability of an excavated slope. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Kondner, R.L., Zelasko, J.S. (1963). A hyperbolic stress strain formulation for sands. 2nd Pan Am. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, pp. 289-324.

Kotzias, P.C., Stamatopoulos, A.C. (1983). Sensitivity of very hard Pliocene marl. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE* 109, No. 12.

Kuntsche, K. (1989). Beurteilung der Standfestigkeit einer tiefen Tagebaurandboschung bei maximaler Lagerstattennutzung. (Αξιολόγηση ευστάθειας πρανούς βαθείας εκμετάλλευσης). *Neue Bergbautechnik*, 19 Jg. Heft 3i, pp. 83-86.

Kuntsche, K. (1990). Slope stability prediction and monitoring techniques in surface mining. Proceedings of the Second International Symposium on Mine Planning and Equipment selection, Calgary. Edited by R.K.Singhal and M.Vavra.

Lancellotta Renato (1995). Geotechnical Engineering. A.A.Balkema, Rotterdam.

Larix Bs V.1.2 Software (1986). Οδηγίες Χρήσεως. Cubus Hellas Ltd.

Leroueil, S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Lee, H., Faure, R. (1996). Geotechnical characterization of slope movements. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Little, J.A. (1988). Pore Pressure Response of an Undisturbed and Reconstituted Anglian Till in Undrained Triaxial Compression. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, STP 977, ASTM. Edited by R.T. Donaghe, R.C. Chaney and M.L. Silver.

Little, J.A. and Hataf, N. (1993). Some monotonic and cyclic properties of weathered undisturbed and reconstituted Kueper Marl. The Eng.Geology of Weak Rock. Proc. of the 26th Ann. Conf. the Eng. Group Geol. Society. Ed. by Cripps, J.C., Coulthard, J.M., Culshaw, M.G., Forster, A., Hencher, S.R., Moon, C.F. Engineering Geology Special Publication No.8, Balkema, Rott.

Lupini, J.F., Skinner A.E., Vaughan, P.R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. Geotechnique 31, No 2, pp.181-213.

Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R., McGown, A. (1982). Discussion on drained residual strength of cohesive soils. Geotechnique 32, No 1.

Malcolm, Puller (1996). Deep excavations: A practical manual. Published by Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Services Ltd, pp. 405-428 - chapter11: Soil movement due to deep excavations.

Mallett, C.W. (1982). Sedimentological Control of Mining conditions in the Permian Measures of the Bowen Basin, Australia. Third International Conference on Stability in Surface Mining, June 1981, Vancouver. Edited by C.O.Brawner.

Mallett, G.W. and Woollorton, B. (1981). Characteristics and Mechanisms of Highwall Failures in Surface Coal Mines, Bowen Basin Queensland. Proc. Aust. I.M.M.Symp. Strip Mining 45 Metres and Beyond.

Manzari, M., Nour, M. (2000). Significance of Soil Dilatancy in Slope Stability Analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 126, No 1.

Matheson D.S., Thompson S. (1973). Geological Implications of Valley Rebound. Can. J. Earth Sci. 10, pp. 961-978.

Mencl, V. (1977). Modern methods used in the study of mass movements. Bull. I.A.E.G 16, pp. 185-193.

Mencl, V. and Seycek, J. (1976). Geotechnical properties of soils and rocks with respect to open pit slope stability at Kyjic Sbor. geol. ved, HIG, Praga 13, pp. 63-76.

Mersi, G. and Cepeda - Diaz, A.F. (1986). Residual shear strength of clays and shales.

Metchkarski, P., Stoeva, P., Iliev, T., Demirev, A. (1977). Studies of the deformation processes in East-Maritsa Open pit Mines, People's Republic of Bulgaria. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No 16, pp. 223-227.

Mineralogical Society (Clay Minerals Group) (1957). The Differential Thermal Investigation of Clays. Edited by Mackenzie, R., London.

Mitchell, J.K. (1994). Understanding –Soil- Behavior Runs Through It. Civil Engineering Practice Fall / Winter 1994.

Monopolis, D., Stiakakis, E., Agioutantis, Z. and Kavouridis, C. (1999). Geotechnical Investigation at Lignite Mines. Mineral Resources Engineering, Vol 8, No 4, pp. 405-418.

Morgenstern, N., Blight, G., Janbu, N., Resendiz, D. (1977). Slopes and excavations. State of the art report. 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation, Tokyo pp. 547-567.

Morgenstern, N.R. and Sangrey, D.A. (1978). Methods of Stability Analysis Landslides: Analysis and Control. Conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15-18 April 1991.

Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R. (1998). Compressibility behaviour of soft cemented soils. Technical note. Geotechnique 48, No. 2, pp. 281-287.

Ng, C.W.W. (1999). Stress paths in relation to deep excavations. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 125, No 5.

Nichols, T.C. (1980). Rebound, its nature and effect on engineering works. Quarterly Journal of Engineering Geology, 13, pp. 133-52.

Ochi, K., Tsubouchi, T., Tatsuoaka, F. (1993). Stiffness of sedimentary soft rock from in situ and laboratory tests. Proceedings International Symposium on hard soils and soft rocks, Athens, pp. 707-714.

Onur, A.H., Konak, G., Kose, H., Koca, Y., Yenice, H. & Karakus, D. (2000). A case study for an open pit coal mine induced slope failure affecting an industrial plant in Turkey. Proceedings of the ninth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, Athens, Greece, 6-9 November 2000, pp. 359- 363.

Osaimi, A.E. and Clough, G.W. (1979). Pore pressure dissipation during excavation. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division 105 (GT4), pp.481-498.

Peck, R.B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. Proc. 7th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Mexico, State of the Art, pp. 225-290.

Peterson, R. (1958). Rebound in the Bearpaw Shale, Western Canada. Bull. Geol. Soc. Amer. 69, pp. 1113-1123.

Phienwej, N., Comviravong, N. (1996). Slope stability at Mae Moh Open Cast Mine, Northern Thailand. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, 17-21 June 1996, Trondheim. Editor Senneset Kaare. Published by A.A.Balkema, Rotterdam.

Pierpoint, N.D. (1996). The prediction and back analysis of excavation behaviour in Oxford Clay. PhD Thesis. University of Sheffield.

Pierschke, K.J. (1978). Assessment of the stability of open pit mine slopes in the Phenish Brown Coal District. First Int. Symp. on stability in coal mining, Vancouver, Canada.

Plaxis V7. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses (1998). Manual. Edited by R.B.J.Brinkgreve, P.A.Vermeer. A.A.Balkema, Rotterdam.

Plaxis Bulletin (2003). Bulletin of the Plaxis Users Association (NL) No13, January 2003.

Potts, D.M., Kovacevic, N., Vaughan, P.R. (1997). Delayed collapse of cut slopes in stiff clay. *Geotechnique* 47, No. 5, pp. 953-982.

Potts, D.M., Zdravkovic, L. (1999). Finite element analysis in geotechnical engineering. Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd., Vol 1.

Poulos, H.G., and Davis, E.H. (1974). Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics. John Wiley and Sons. New York.

Puzrin, A.M., Burland, J.B. (1998). Non-linear model of small - strain behaviour of soils. *Geotechnique* 48, No. 2, pp. 217-233.

RE Geomechanics - Pierschke, J. (1995). Report on the visit to the Lignite Centres Ptolemais, Megalopolis and the Opencast Mines in the Florina Project (PPC), Greece. Rheinbraun Engineering Technical Report.

RE Geomechanics - Pierschke, J. (1997). Report on the visit to the Lignite Centres Megalopolis and Ptolemais. Rheinbraun Engineering Technical Report.

Roscoe K. H., Schofield A.N. & Wroth C. P. (1958). On the yielding of soils. *Geotechnique*, Vol. 8, pp 22-52.

Rozsypal, A. (1988). Problems of prognosis of slope deformation of open pit mines Landslides. Proceedings of the fifth International Symposium on Landslides, Lausanne. Edited by C. Bonnard.

Rybar, J. (1971). Tektonisch beeinflubte Hangdeformationen in Braunkohlenbecken. (Slope Deformations in Brown Coal Basins under the Influence of Tectonics). *Rock Mechanics* 3, pp.139-158.

Rybar, J., Dohr, J. (1966). Fold deformations in the North Bohemian Coal Basins Sbornik Geologických ved, Rada HIG 5, pp.133-140.

Rzhevsky, V., Novik, G. (1971). The Physics of Rocks. Translated from the Russian by A.K. Chatterjee. Mir Publishers. Moscow, 1971.

Schanz, T., Vermeer, P. A.(1995). Angles of Friction and Dilatancy of Sand. Technical Note. Geotechnique 46, No 1, pp.145-151.

Schanz, T. and Vermeer, P.A. (1998). Pre-failure deformation behaviour of geomaterials. Institution of Civil Engineers, Thomas Teleford, London. Jardine R. (Ed.) pp. 383-390.

Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. (1999). The Hardening soil model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Ten years of Plaxis international. Proceedings of the International symposium, Amsterdam, March 1999. Balkema, Eds Brinkgreve RBJ., pp. 281-296.

Scholey, G.K., Frost, J.D., Lo Presti, D.C.F., Jamiolkowski, M. (1995). A review of instrumentation for measuring small strains during triaxial testing of soil specimens. Geotechnical Testing Journal, ASTM 18, 2, pp. 137-156.

Schultze, E. (1956). Bodenuntersuchungen und Erdstatik in Braunkohlentagebau (Soil investigations and soil statics in brown coal open cuts). Braunkohle, Waerme, Energie 8, pp. 125-132.

Shogaki, T., Moro, H. (1997). Undrained strength anisotropy of soils which have suffered geological stress histories. Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environmental, IAEG, Athens, 23-27 June 1997.

Sijing, W. (1981). On the Mechanism and Process of Slope Deformation in an Open Pit Mine. Rock Mech, (Wien), Vol. 13, pp. 145-156.

Singh, V.K., Baliga, B.D. and Dhar, B.B. (1994). A statistical method to study the variability in strength parameters in an open pit. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical abstract, 38, 1-2, pp. 159-163.

Sjoberg, Jonny (1999). Analysis of Large Scale Rock Slopes. Doctoral thesis. Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering. <http://cassiopeia.anl.luth.se/~josj/slope.htm>.

Skempton, A.W. (1964). Long term stability of clay slopes (Fourth Rankine Lecture). *Geotechnique* 14 (2).

Skempton, A.W. (1985). Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory. *Geotechnique* 35, 1, pp. 3-18.

Smith, G.N. (1990). Elements of Soil Mechanics for civil and mining engineers. 5th Edition. Granada Publishing Ltd, p. 493.

Stacey, T.R. (1970). The stresses surrounding open - pit mine slopes. Proceedings of the Symposium on the theoretical background to the planning of open pit mines with special reference to slope stability, Johannesburg. Ed by Van Rensburg.

Stallebrass, S.E., Taylor, R.N. (1997). The development and evaluation of a constitutive model for the prediction of ground movements in overconsolidated clay. *Geotechnique* 47, No 2, pp. 235-253.

Stamatopoulos, A.C. & Kotzias, P.C. (1978). Soil compressibility as measured in the oedometer. *Geotechnique* 28, No 4, pp. 363-375.

Stamatopoulos, A.C., Kotzias, P.C. (1973). The specific constrained modulus. 8th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow 1, No 61, pp. 397-402.

Stamatopoulos, A.C. and Kotzias, P.C. (1981). Geotechnical Properties of Lignite. Proceedings of the Tenth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 4/55, Stockholm.

Stefanoff, G., Hamdajew, K. and Christov, T. (1976). Stability analysis and multilayered excavation slope. Proceedings of 6th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vienna, Austria 1 (16), pp. 85-88.

Tatsuoka, F. and Shibuya, S. (1992). Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. Report of the Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Japan 37.

Tatsuoka, F., Kohata, Y., Mizumoto, K., Kim, Y.-S., Ochi K. and Shi D. (1993). Measuring Small Strain Stiffness of Soft Rocks. Proceedings International Symposium on Hard Soils and Soft Rocks. Athens 1, pp. 809-816.

Tatsuoka, F., Sato, T., Park, C.-S., Kim, Y.-S., Mukabi, J.N. and Kohata, Y. (1994). Measurements of Elastic Properties of Geomaterials in Laboratory Compression Tests. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, No 17, pp. 80-94.

Tavenas, F. and Leroueil, S. (1981). Creep and failure of slopes in clays. Canadian Geotechnical Journal 18, pp. 106-120.

Ter-Stepanian G. (1980). Creep on natural slopes and cuttings. Proc 3rd ISL, New Delhi 2, pp. 95-108.

Terzaghi, K., Peck R.B. (1967). Εφαρμοσμένη Εδαφομηχανική. Μετάφραση 2ης εκδόσεως.

Tice, J.A. and Sams, C.E. (1974). Experiences with landslide instrumentation in the southeast. Transp. Res. Rec. No 482.

Tika, T.E., Vaughan, P.R. and Lemos, L.J.L.J. (1996). Fast shearing of pre-existing shear zones in soil. Geotechnique 46, No 2, pp. 197-233.

Tika, Th., Hutchinson, J.N. (1999). Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface. Geotechnique 49, No 1, pp. 59-74.

Tomlinson, M.J. (1984). Foundation design and construction. Foundation design and construction. Longman Scientific & Technical. Fifth Edition.

Toshitaka Kamai (1998). Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments. Engineering Geology Vol. 50, pp. 71-84.

Trollope, D.H., Rosengren, K.J., Brown, E.T. (1965). The mechanics of Brown Coal. Geotechnique 15, pp. 363-86.

Tsiambaos, G. (1991). Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology*, Vol. 30, pp. 357-369.

Tsifoutidis, G. (1993). Intrinsic properties of Hellenic marls. PhD Thesis. Durham, United Kingdom.

Vaughan, P.R. (1991). Stability analysis of deep slides in brittle soil-lessons from Carsington. Proceedings of the International conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15-18 April 1991.

Vermeer, P.A. and van Langen, H. (1989). Soil collapse computations with finite elements. *Ingenieur-Archiv*, Springer-Verlag 59, pp. 221-236.

Viggiani, G., Atkinson, J. H. (1995). Stiffness of fine-grained soil at very small strains. *Geotechnique* 45, No. 2, pp. 249-265.

Wang, B., Lighthall, P., Daly, S.(1998). Stability study of open pit slope at Highland Valley Copper Mine. Proceedings of the Seventh International Symposium Mine Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 6-9, October 1998. Singhal (ed.), Balkema, Rotterdam.

Watt, I.B. (1970). Control for early warning of potential danger in open pits. Proceedings of the Symp on the theoretical background to the planning of Open Pit Mines with special reference to slope stability. Johannesburg. Ed. by P.W.J.Van Rensburg.

Wykeham Farrance. Handbook for use with the WF25850 Bromhead Ring Shear. WF, Slough, England.

Zaruba, Q. and Mencl, V. (1976). *Engineering Geology*. Academia, Prague, Elsevier Amsterdam.

Zaruba, Q. and Mencl, V. (1982). Landslides and their control. Second Edition. *Developments in Geotechnical Engineering* 31. Elsevier Scientific Publ. Co.

Zou, D.H., Huang, Y., James, C.S. (1998). Highwall stability consideration in design of small scale surface mines - Case studies. Proceedings of the Seventh International Symposium Mine

Planning and Equipment Selection, Calgary, Canada, 6-9 October 1998. Singhal (ed.), Balkema, Rotterdam.

Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής. Μηχανική Πετρωμάτων. Εκδόσεις Ιων. Αθήνα, σελ.384.

Αναγνωστόπουλος, Α., Παπαδόπουλος, Β. (1989). Επιφανειακές Θεμελιώσεις. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα.

Αναστόπουλος Ι.Χ., Κούκουζας, Κ.Ν. (1972). Γεωλογική και κοιτασματολογική μελέτη Νοτίου Τμήματος Λιγνιτοφόρου Λεκάνης Πτολεμαΐδος. Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους. XIV, 1, σελ. 287.

ΑΠΘ, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων (1998). Επίδραση της επέκτασης προς Δυτικά του Νότιου Πεδίου στις εγκαταστάσεις του ΑΗΣ Καρδιάς. Ερευνητικό Πρόγραμμα (Κωδ. ΕΕ ΑΠΘ 7016) 1,2,3.

Βαλαλάς, Δ. (1985). Εδαφομηχανική. Εκδοτικός Οίκος Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη, σελ.131-137 & 306-322.

Βαρδουλάκης, Ι. (1997). Σημειώσεις Τεχνικής Μηχανικής ΙΙ. Τυπογραφείο ΕΜΠ.

Γεώγνωση ΑΕ (1995). Εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα από τα Δυτικά πρηνή του Τομέα 6 του λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας- Αμυνταίου. Θεσσαλονίκη.

Γιαλίδη, Στ., Ρούσκα, Γ. (1986). Μηχανική συμπεριφορά μαργών περιοχής Ισθμού Κορίνθου. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ.

ΔΕΗ - ΚΔΕΠ (1987). Κέντρο Δοκιμών Ερευνών και Προτύπων. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια από γεωτρήσεις για τη μελέτη ευστάθειας πρηνών του Ορυχείου Τομέα 6, Γεώτρηση ΕΚΡ-5 και ΕΚΡ-6.

ΔΕΗ - ΛΚΠΑ (1995). Τεκτονικός χάρτης (κλίμακα 1:2000). “Δυτικά πρηνή του Τομέα 6”. Σεπτέμβριος 1995.

ΔΕΗ - ΛΚΠΑ (1999). Στερεομετρικές Απεικονίσεις Γεωλογικού Δαπέδου Ορυχείου Τομέα 6.

ΔΕΗ - ΛΚΠΑ. Τομές κοιτασματολογικών γεωτρήσεων Ορυχείου Τομέα 6.

ΔΕΗ - ΛΚΠΑ (1995). Τοπογραφικό Τμήμα Ορυχείου Καρδιάς “Διαγράμματα οριζοντίων μετακινήσεων”. Οκτώβριος 1995.

ΔΕΗ - ΛΚΠΑ (1998). Τοπογραφικό Τμήμα Ορυχείου Καρδιάς (κλίμακα 1:5000). “Στάθμη εργασιών εκσκαφής Ορυχείου Τομέας 6”. Δεκέμβριος 1998.

ΔΕΗ (1995). Κλιμάκιο εκτελέσεως γεω-ερευνητικών γεωτρήσεων έργων Πτολεμαΐδας - Φλώρινας. Δελτία περιγραφής γεωτρήσεων ΓΤ6 - 1/95, ΓΤ6 - 2/95, ΓΤ6 - 3/95, Ορυχείου Τομέα 6.

E 105-86 (1986). Εργαστηριακές δοκιμές Εδαφομηχανικής.

E 106-86 (1986). Επιτόπου δοκιμές Εδαφομηχανικής.

Ελπέκος, Σ.Η., Τίκα, Θ.Μ., Καράς, Β. (2001). Η παραμένουσα αντοχή φυσικών αργιλικών εδαφών. 4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεω-περιβαλλοντικής Μηχανικής. Αθήνα, Τόμος 1, σελ. 57-64.

Ε.Μ.Π., Τομέας Γεωτεχνικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών (1992). Μηχανική συμπεριφορά των λιγνιτών Πτολεμαΐδας με έμφαση στην ευστάθεια πρανών των υπαίθριων εκσκαφών για εκμετάλλευση. Έκθεση Προόδου.

Θεοδωράκης, Σ., Πλυτάς, Κ. (1997). Αποτίμηση Δεικτών Εδάφους και Μέτρων Παραμορφωσιμότητας Εδάφους από Ανάστροφους Υπολογισμούς. Πρακτικά 3ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής. Πάτρα 20-22 Μαρτίου 1997, σελ. 27-34.

ΙΓΜΕ (2001). Εδαφοχημική - Εδαφολογική Έρευνα περιοχής Κοζάνης - Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου. Έκθεση Ερευνητικού Έργου Β ΚΠΣ, ΠΕΠ Δυτικής Μακεδονίας.

Καβουνίδης, Σ. (1988). Πρόταση ενιαίας προσέγγισης της μηχανικής συμπεριφοράς των μαργών. Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Καβουρίδης Κ., Χαλούλος, Κ., Βλαχαντώνης Α. (1997). Η ανάπτυξη του Ορυχείου του Τομέα 6 - Το χρονοδιάγραμμα διάνοιξης του Ορυχείου και η λειτουργία ανάλυσης του

πάγιου εξοπλισμού. Η συμβολή του Ορυχείου στο λιγν. ισοζύγιο του ΛΚΠ-Α. Τεχνικά Χρονικά, Οκτώβριος 97, Έτος 66, 5/97.

Καλαϊτζίδης, Στ., Μπουζίνος, Α., Χρηστάνης, Κ. (2000). Το παλαιοπεριβάλλον λιγνιτογένεσης πριν και μετά την απόθεση της "χαρακτηριστικής άμμου" στο λιγνιτικό κοιτάσμα Πτολεμαΐδας. Ορυκτός Πλούτος 115/ 2000.

Καλλέργης, Γ., Κούκης Γ. (1985). Τεχνική Γεωλογία. Πανεπιστήμιο Πάτρας.

Καλογήρου Ειρήνη (2000). Εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και υπολογισμός της αναθόλωσης του δαπέδου εκσκαφής του Τομέα 6. (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας). Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Καντηράνης Ν. (1998). Πετρολογική, γεωχημική και τεχνολογική μελέτη των Ιουρασικών ανθρακικών πετρωμάτων Αγίου Παντελεήμονα Φλώρινας. Διατριβή Ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ 69.

Καράς, Β. (1988). Ευστάθεια Πρανών στα Υπαίθρια Λιγνιτωρυχεία. Πρακτικά Πρώτου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής. Αθήνα 3-5 Φεβρουαρίου 1988. Τόμος 3, σελ. 193-197.

Κούκης, Γ. (1981). Γεωλογική δομή και φυσικά - μηχανικά χαρακτηριστικά των ιζημάτων της Νεογενούς Λεκάνης Κοζάνης - Σερβίων στην περιοχή Βαθυλάκκου. Ορυκτός Πλούτος 12.

Μονόπωλης, Δ. (1995). Εφαρμοσμένη Γεωλογία. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μπάρμπας, Τρ., Σίσκος, Δ., Τσιμπούκας Γ., Χατζησάββας, Κλ. (1995). Τεκτονική των Δυτικών πρανών του Ορυχείου του Τομέα 6 και της εξωτερικής απόθεσης του Ορυχείου Καρδιάς. ΔΕΗ, Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας- Αμυνταίου, Σεπτέμβριος 1995 .

Λεονάρδος, Μ. (1986). Μελέτη Ορυχείου Τομέα 6, Ευστάθεια εξωτερικής αποθέσεως Ορυχείου Καρδιάς. ΔΕΗ, Δ/ση Μελετών Κατασκευών Ορυχείων, Τομέας Μελετών Μεταλλευτικών Εργων. Προμελέτη. Αθήνα.

Λεονάρδος, Μ., Τερεζόπουλος, Ν. (2002). Προσδιορισμός του χρόνου επέλευσης της κατάρρευσης μιας κατολίσθησης στα περιφερειακά πρηνή των βαθέων λιγνιτικών εκμεταλλεύσεων. Ορυκτός Πλούτος, 124.

Παπαχαρίσης, Ν., Μάνου - Ανδρεάδη, Μ., Γραμματικόπουλος, Ι. (1999). Γεωτεχνική Μηχανική. Έρευνα - Γεωτρήσεις - Εργαστήριο. Εκδόσεις Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.

ΠΟΛ. Κ., Εργαστήρια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας - Μηχανικής Πετρωμάτων (1996). Προσδιορισμός Γεωτεχνικών παραμέτρων και ανάλυση ευστάθειας πρηνών σε μέτωπα εξόρυξης του "Τομέα 6" (Πτολεμαΐδα). Ερευνητικό έργο. Προκαταρκτική έκθεση.

ΠΟΛ. Κ., Εργαστήρια Εφαρμοσμένης Γεωλογίας - Μηχανικής Πετρωμάτων (1997). Προσδιορισμός Γεωτεχνικών παραμέτρων και ανάλυση ευστάθειας πρηνών σε μέτωπα εξόρυξης του "Τομέα 6" (Πτολεμαΐδα). Ερευνητικό έργο. Τελική έκθεση.

Στειακάκης Εμμ. (2001). Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Στειακάκης Στ. (2000). Ανάλυση ευστάθειας Δυτικών πρηνών του Λιγνιτωρυχείου "Τομέας 6". Θεώρηση παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Διπλωματική Εργασία. Πολυτεχνείο Κρήτης.

Σωτηρόπουλος, Η. (1982). Μάργες. Πρακτικά 2ης Ημερίδας Γεωτεχνικής. ΕΜΠ, Γεωτεχνικός Τομέας.

Τσιαμπάος, Γ. (1988). Τεχνικογεωλογικοί χαρακτήρες των μαργών Ηρακλείου. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πάτρας.

Τσιαμπάος, Γ., Χριστούλας, Στ. (1988). Μηχανική συμπεριφορά μαργών Ηρακλείου. 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής Μηχανικής, ΤΕΕ, ΕΕΕΕΘ, Αθήνα, τ.1, σελ. 109-112.

Τσιραμπίδης Α. (1993). Πετρολογία ιζηματογενών πετρωμάτων. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 244.

Τσιραμπίδης, Α. (2001). Ορυκτολογική σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά εδαφών Καλαμαριάς (Μακεδονία). Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας. Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου, Αθήνα. XXXIV/5, 1733-1740.

Τσιραμπίδης, Α., Παπαλιάγκας Θ. (2001). Ορυκτολογική σύσταση και φυσικά χαρακτηριστικά μαργαϊκών εδαφών Ηρακλείου Κρήτης. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Πρακτικά 9ου Διεθνούς Συνεδρίου, Αθήνα. XXXIV/3, 851-858.

Τσότσος, Στεφ. (1991). Εδαφομηχανική, Θεωρία - Μέθοδοι - Εφαρμογές. Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης & Π. Πολυχρονίδης Α.Ε., Θεσσαλονίκη σελ. 312.

Φυτρολάκης Ν. (1962). Συμβολή εις την γνώσιν της μεταβολής φυσικών και μηχανικών τινών ιδιοτήτων των αργίλων και μαργών εν σχέσει προς τας ορυκτολογικάς και γεωλογικάς συνθήκας. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, Τόμος IV, Τεμ 2, Σελ 1-12.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΕΚΣΚΑΦΩΝ ΜΕΓΑΛΟΥ ΒΑΘΟΥΣ

Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητας

Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας - Αμυνταίου

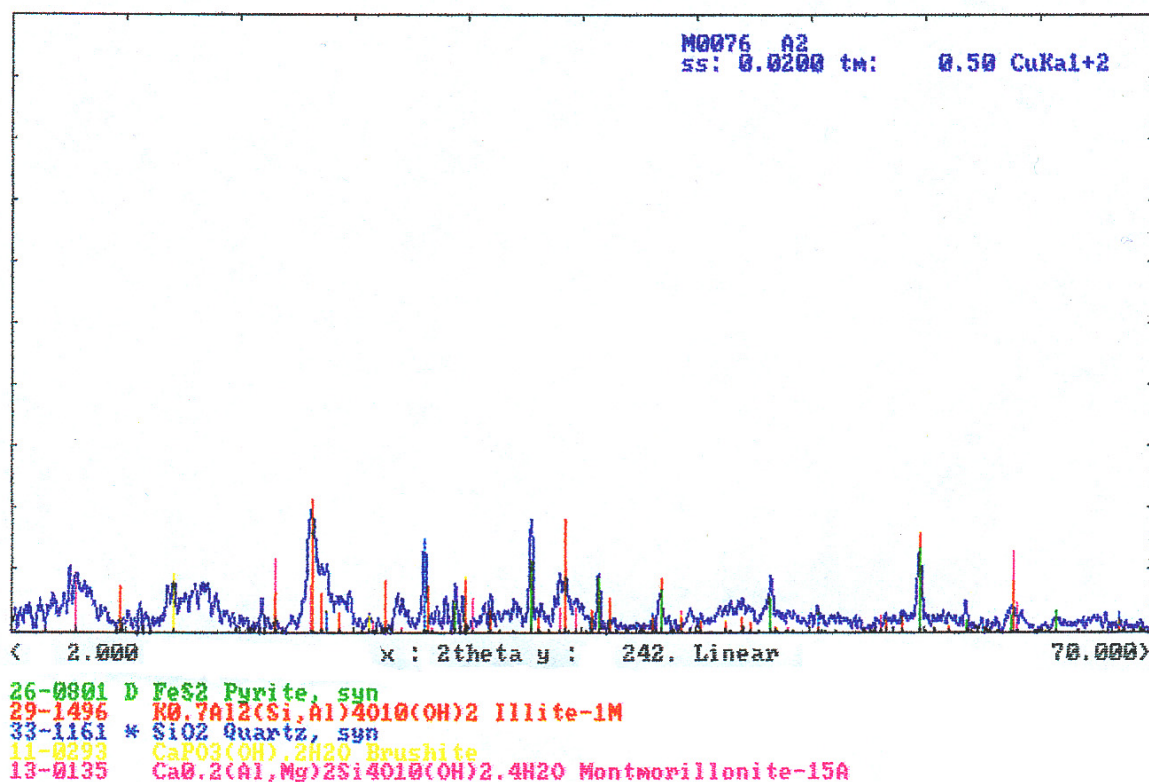
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ε. Κ. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗ

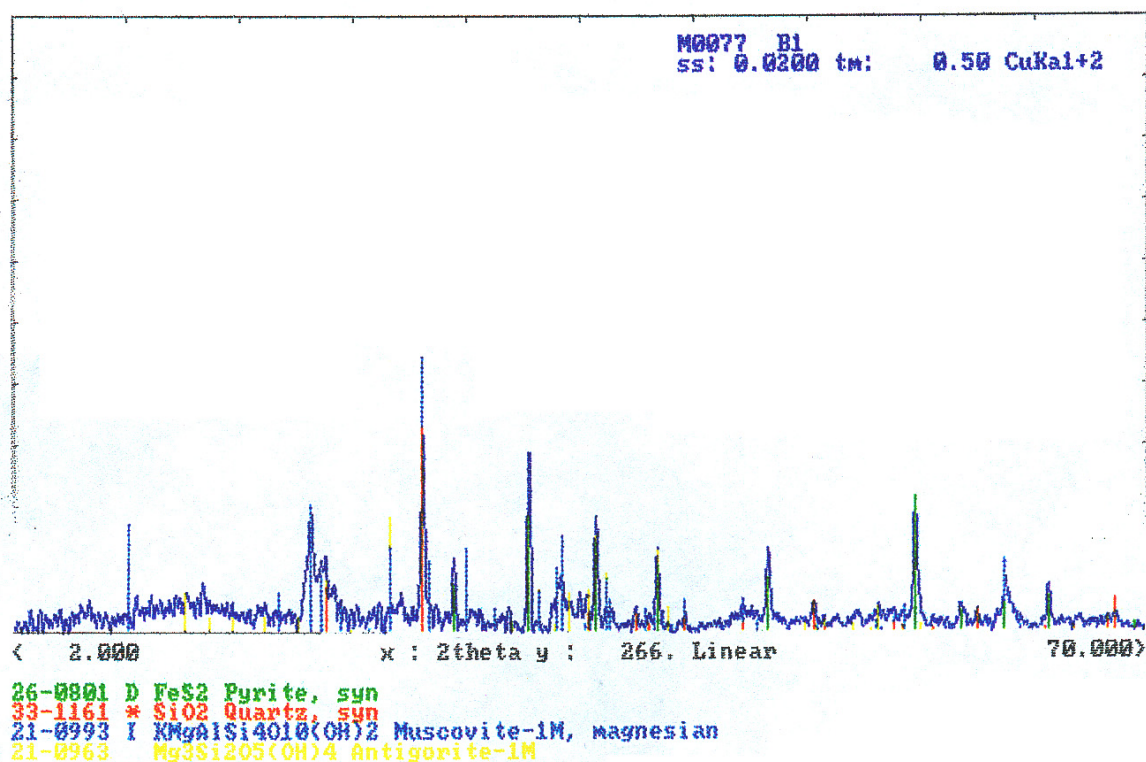
Χανιά 2003

ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΜΗ Χ Χ'

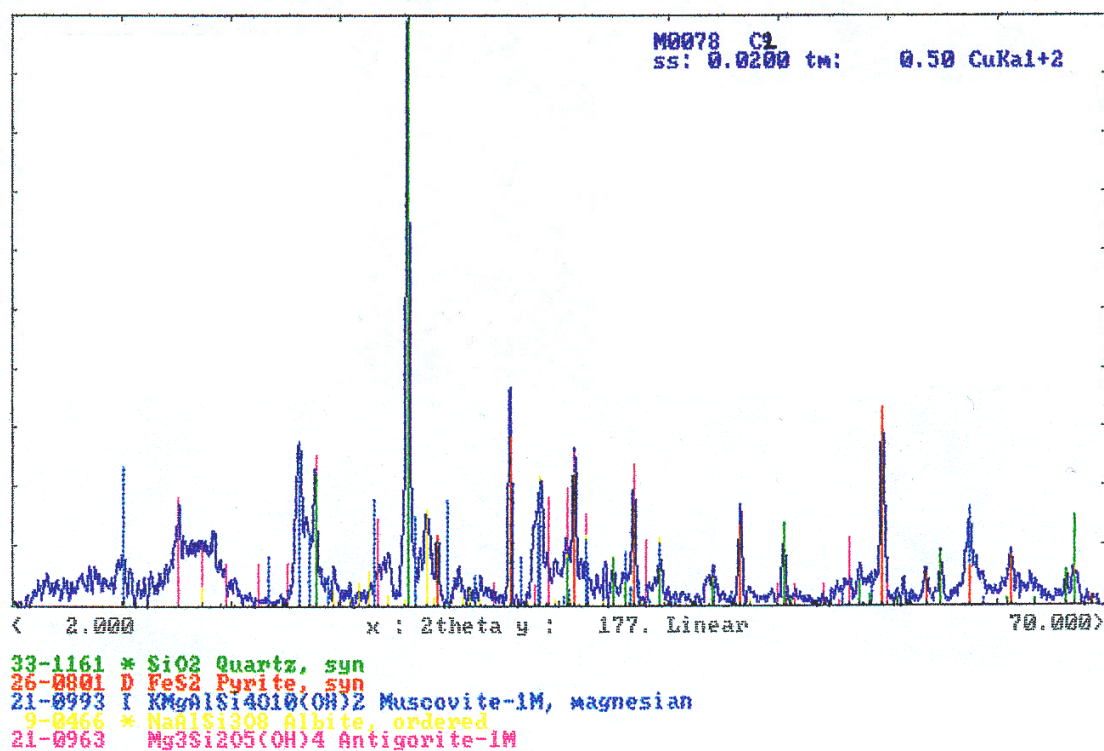
AKTINOΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ



Ακτινοδιάγραμμα δείγματος A2



Ακτινοδιάγραμμα δείγματος B1

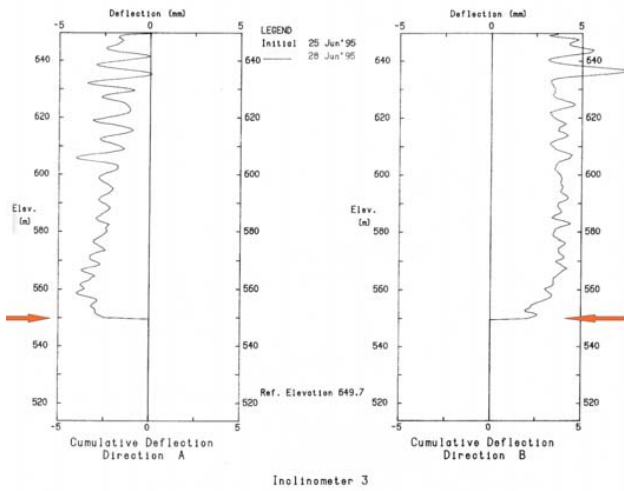


Ακτινοδιάγραμμα δείγματος Γ2

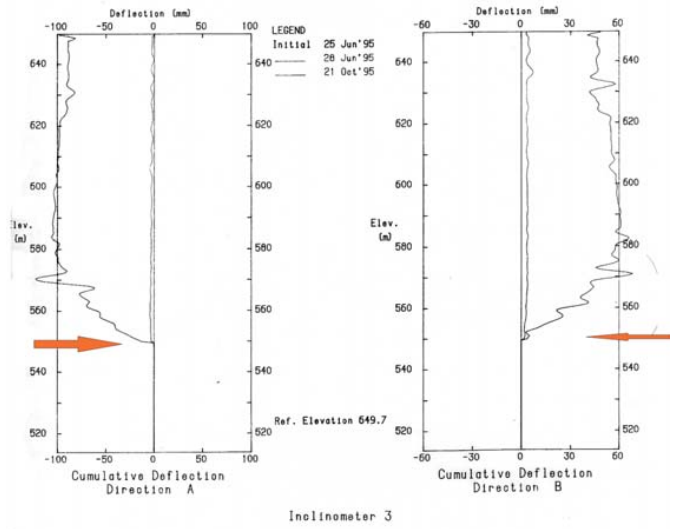
ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΚΛΙΣΙΜΕΤΡΩΝ

Inclinometer X : ΚΛΧ (παλιό κλισίμετρο)
NX : ΝΚΛΧ (νέο κλισίμετρο)

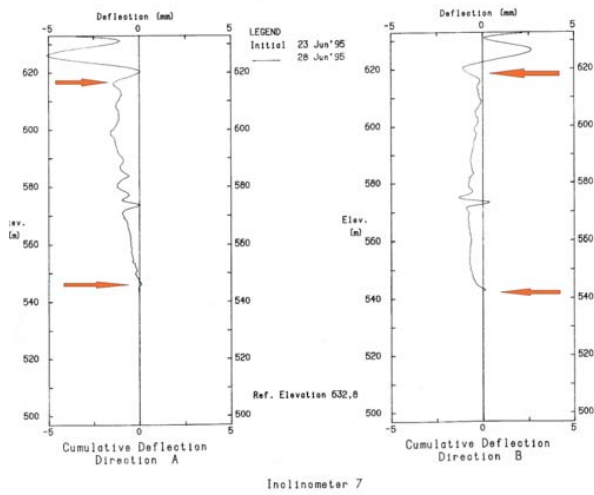
Public Power Corp., LCP-A\TMM Ptolemaida



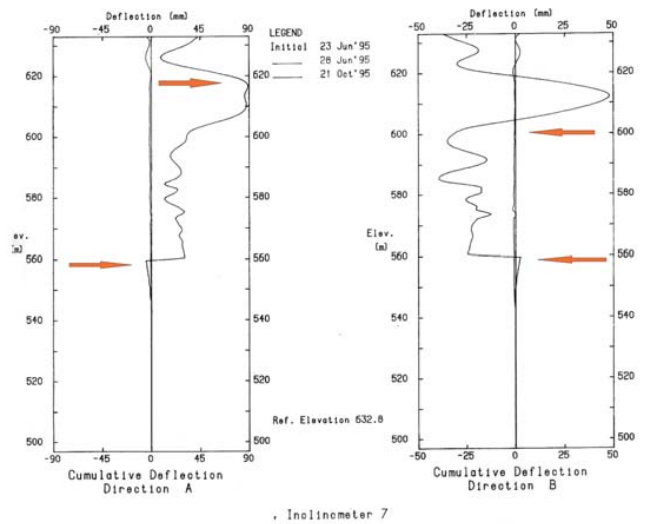
Public Power Corp., LCP-A\TMM Ptolemaida



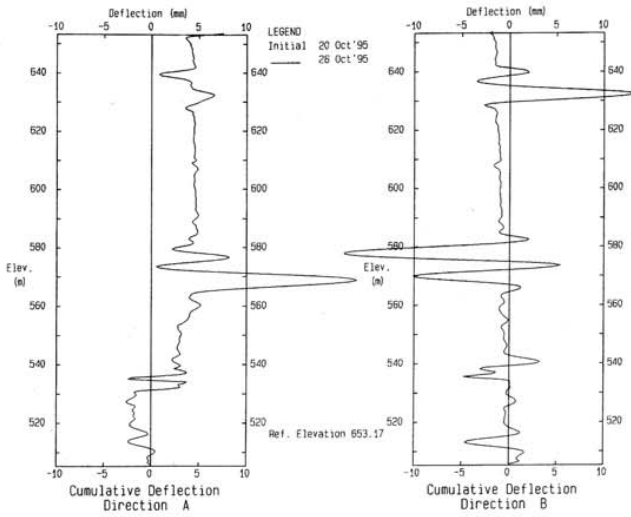
Public Power Corp., LCP-A\TMM - Ptolemaida



Public Power Corp., LCP-A\TMM - Ptolemaida

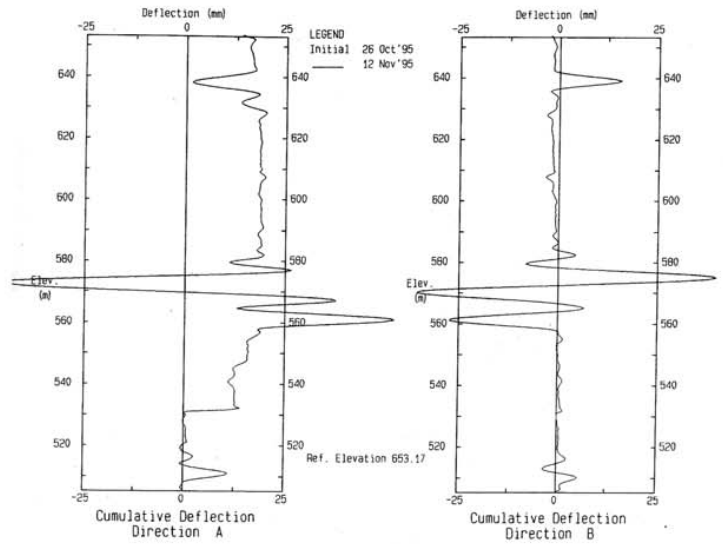


Public Power Corp., Mining Division - Athens



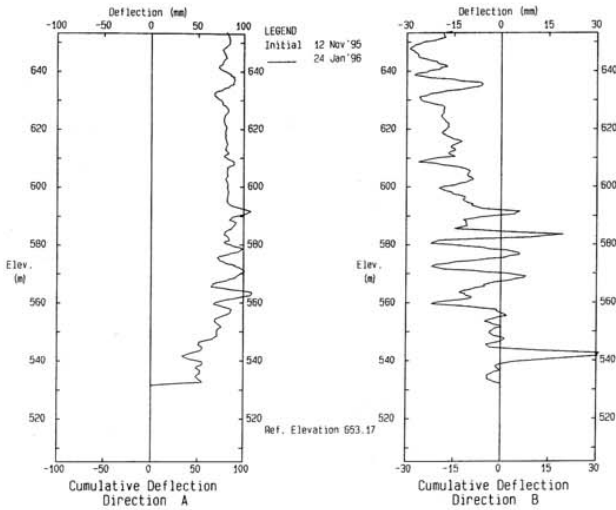
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



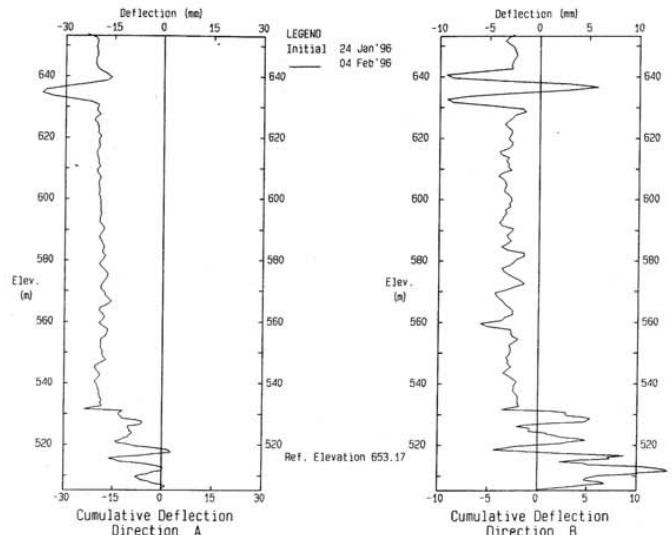
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



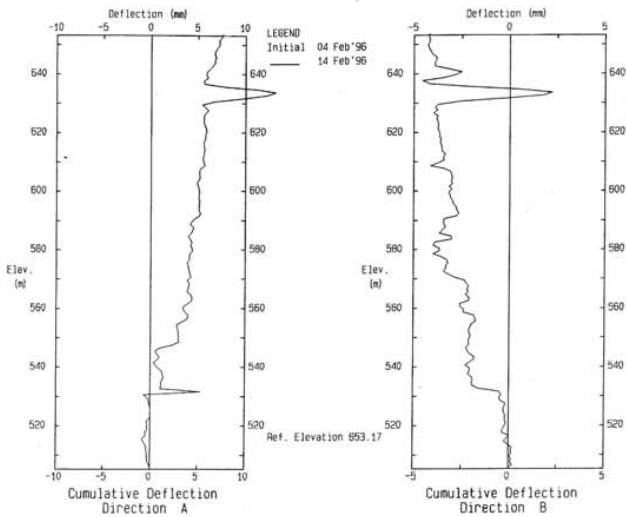
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



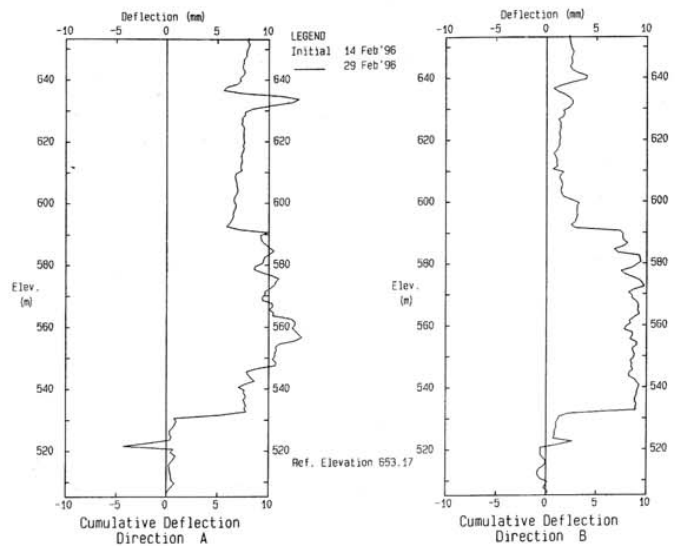
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



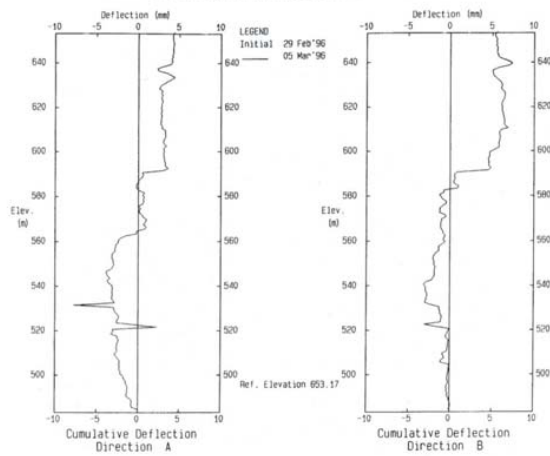
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



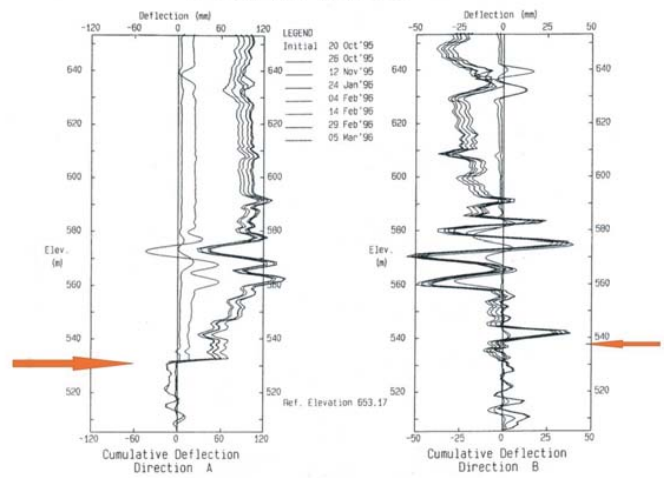
Inclinometer N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



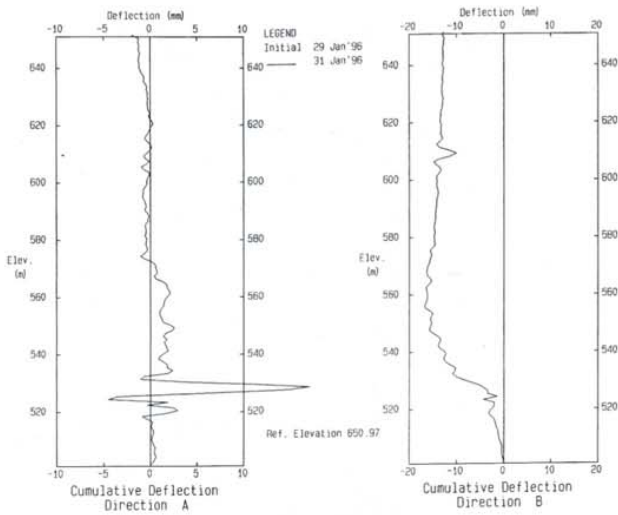
Inclinator N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



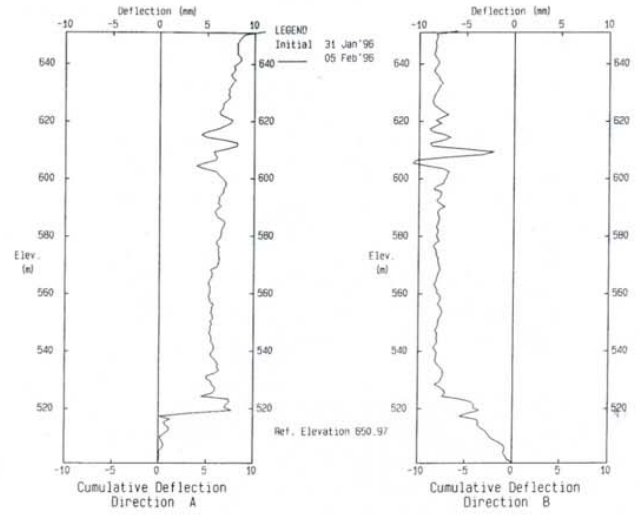
Inclinator N5
PPC/LKP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



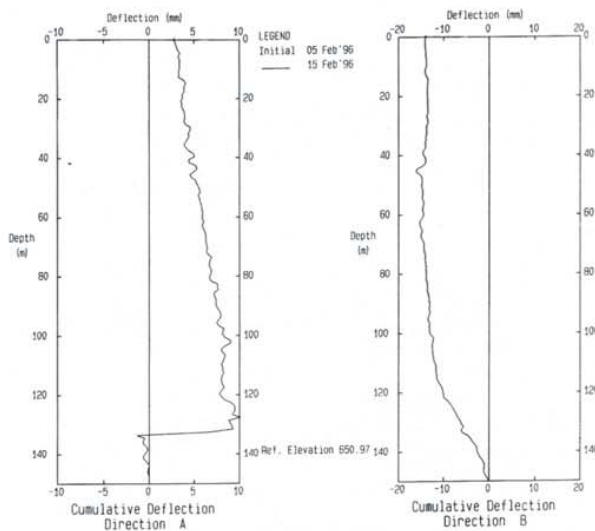
Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



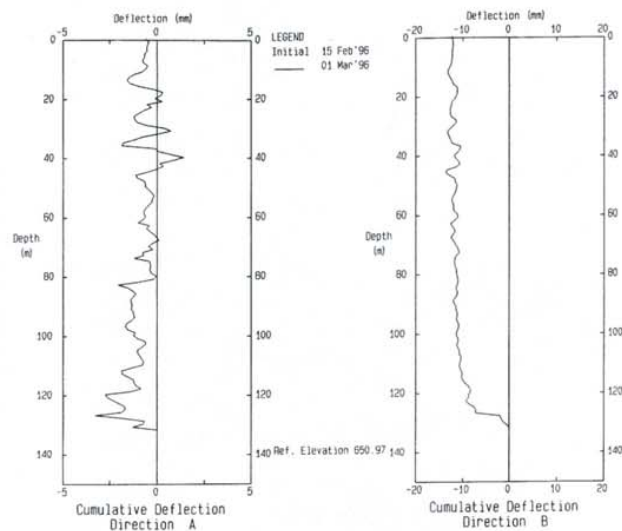
Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



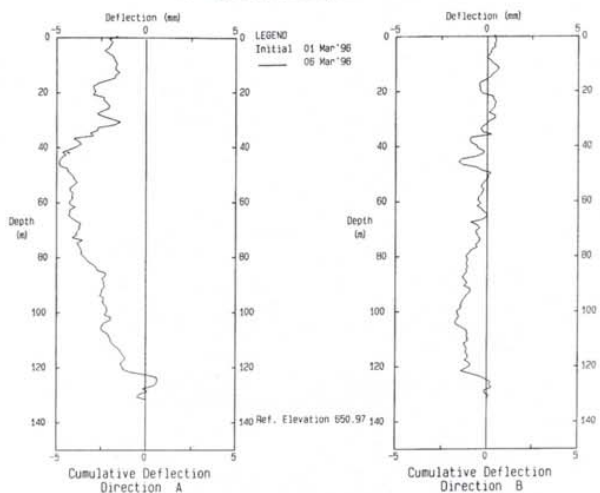
Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens



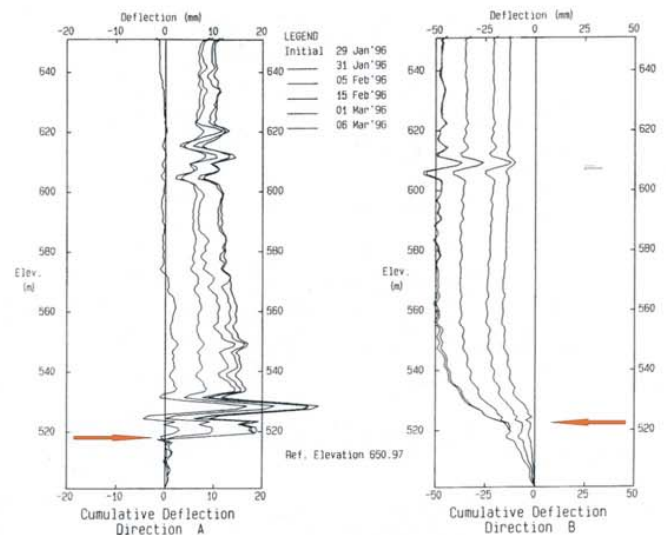
Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6

Public Power Corp., Mining Division - Athens

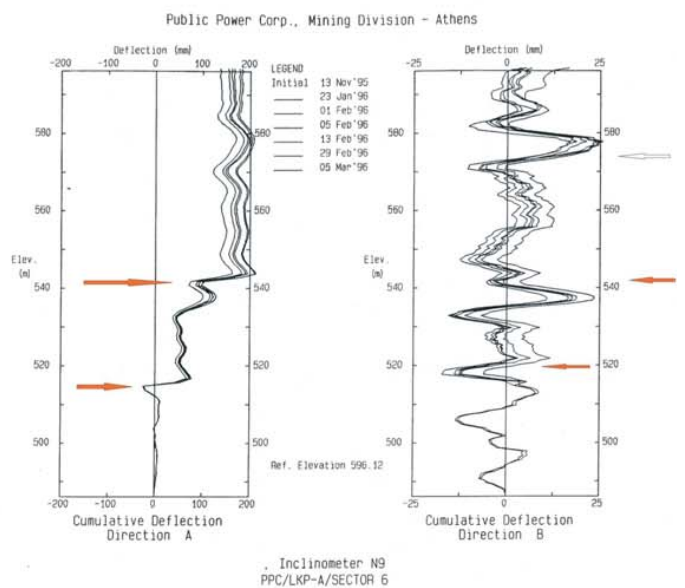
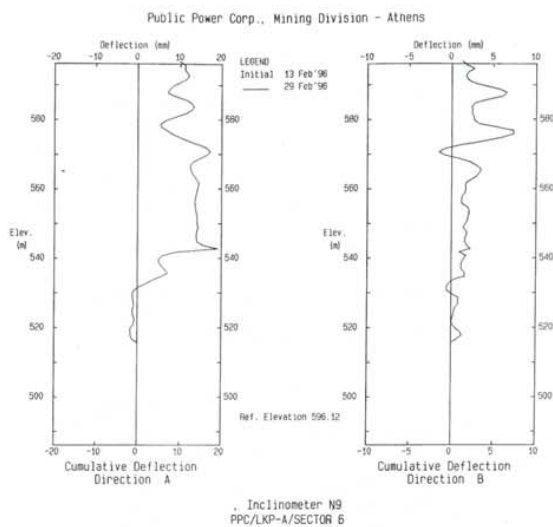
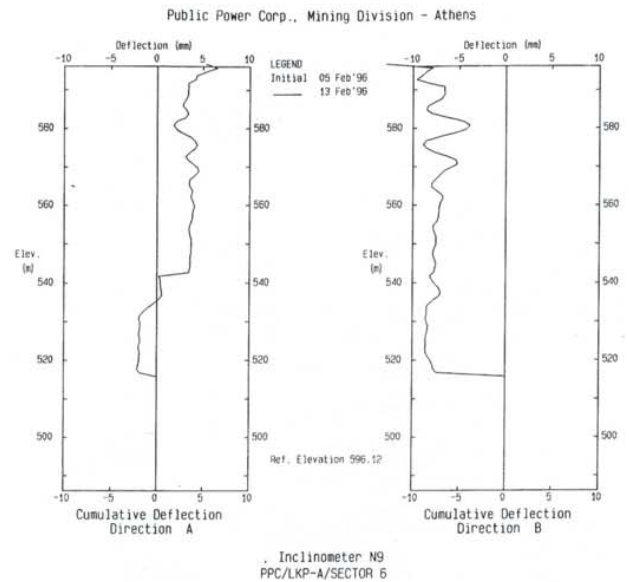
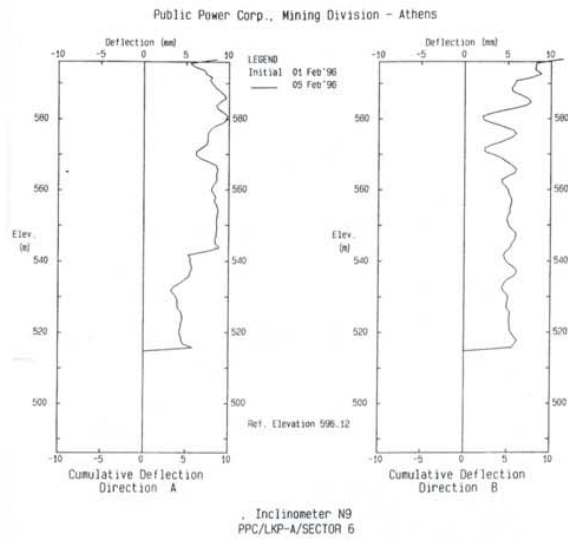
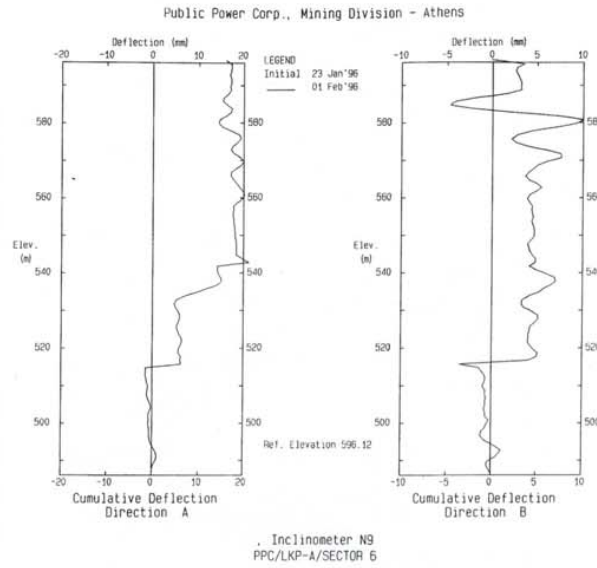
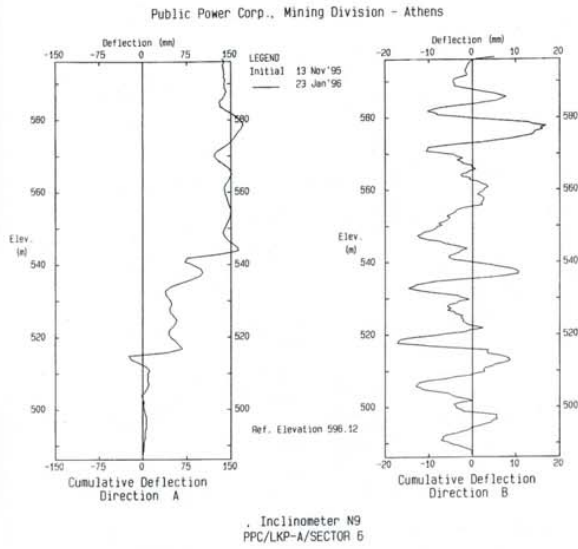


Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6

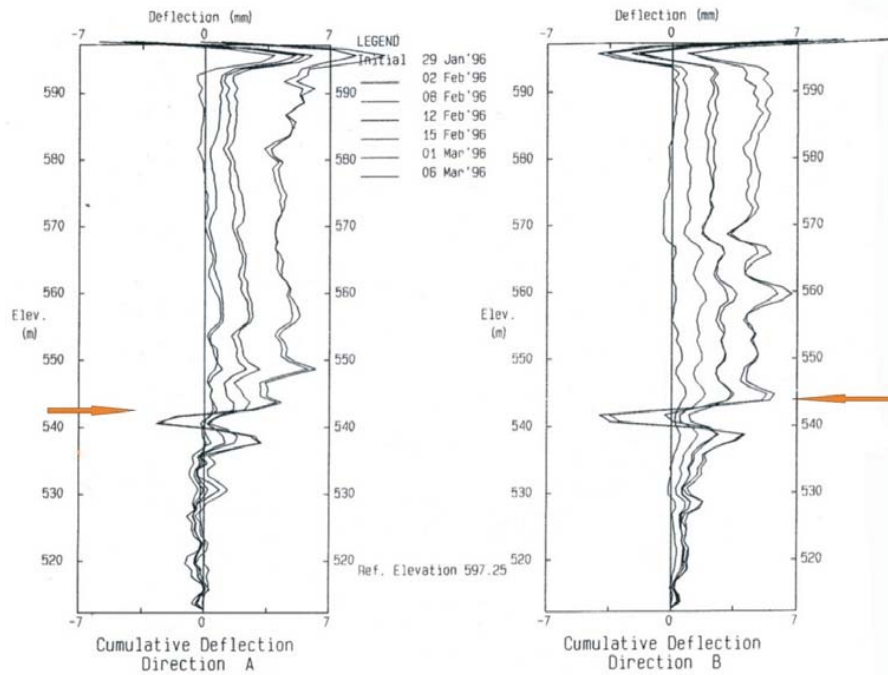
Public Power Corp., Mining Division - Athens



Inclinator N6
PPC/LCP-A/SECTOR 6



Public Power Corp., Mining Division - Athens

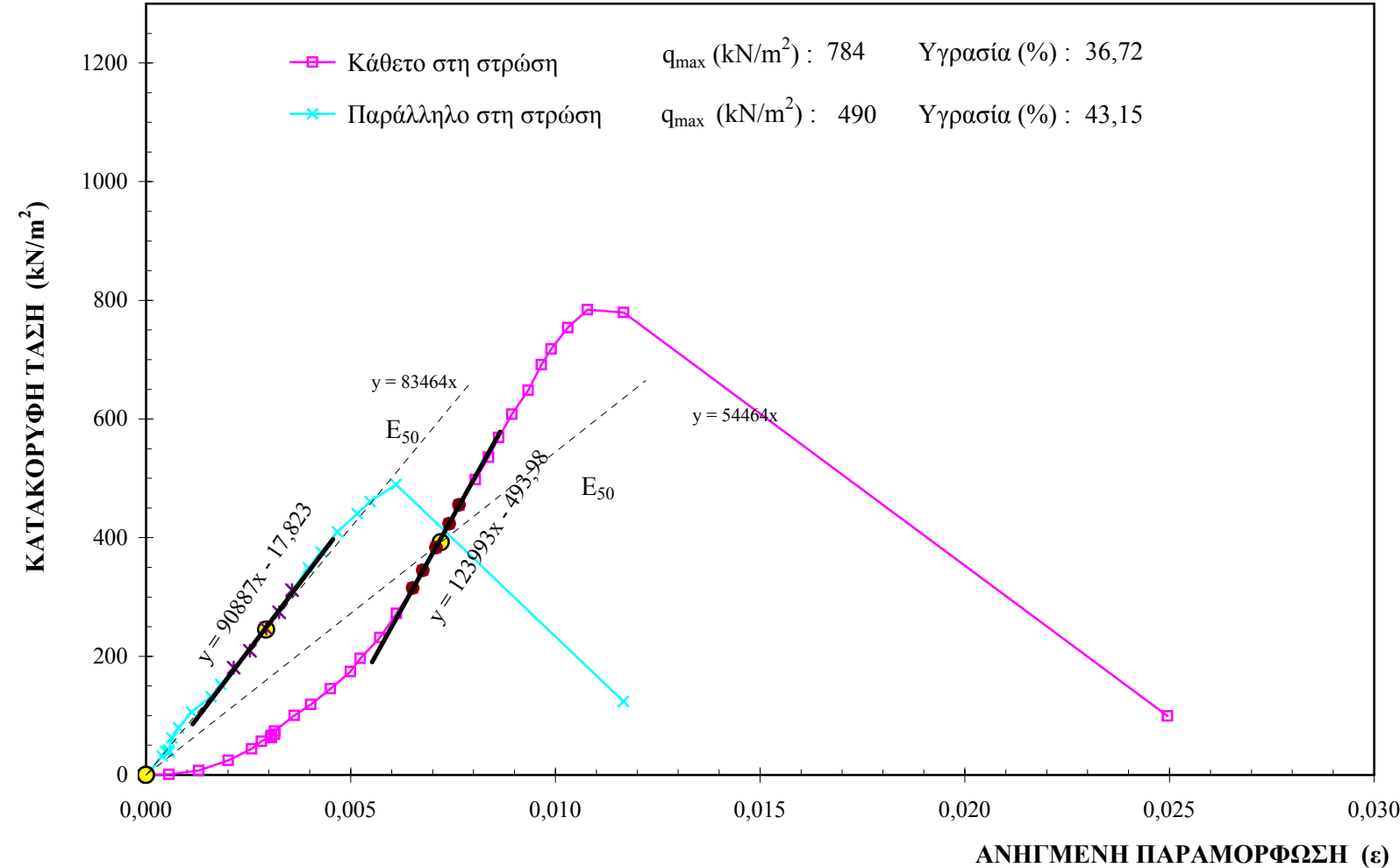


Inclinator N10
PPC/LCP-A/SECTOR 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΨΗΣ

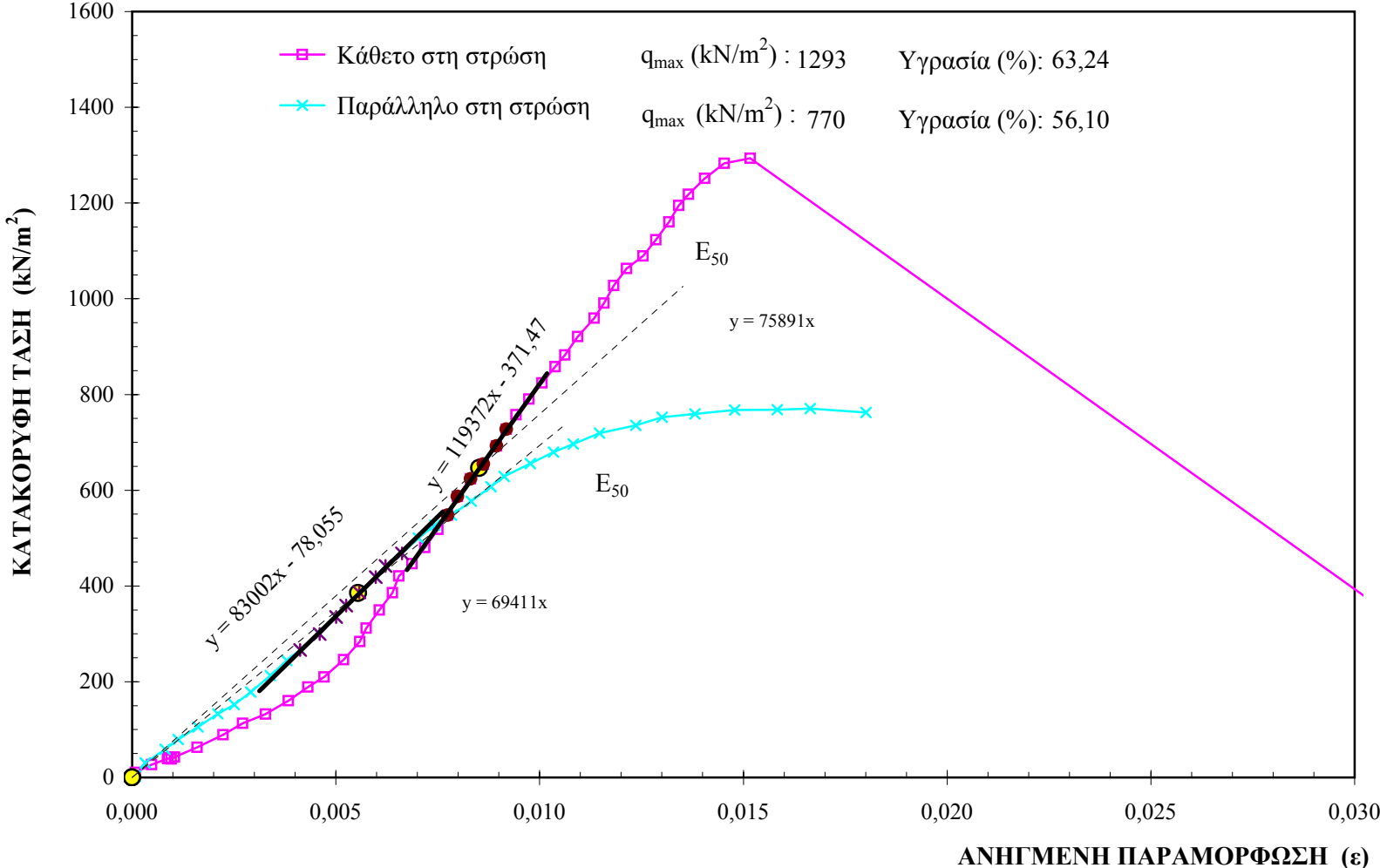
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας-6, Θέση Α, Δείγμα 2



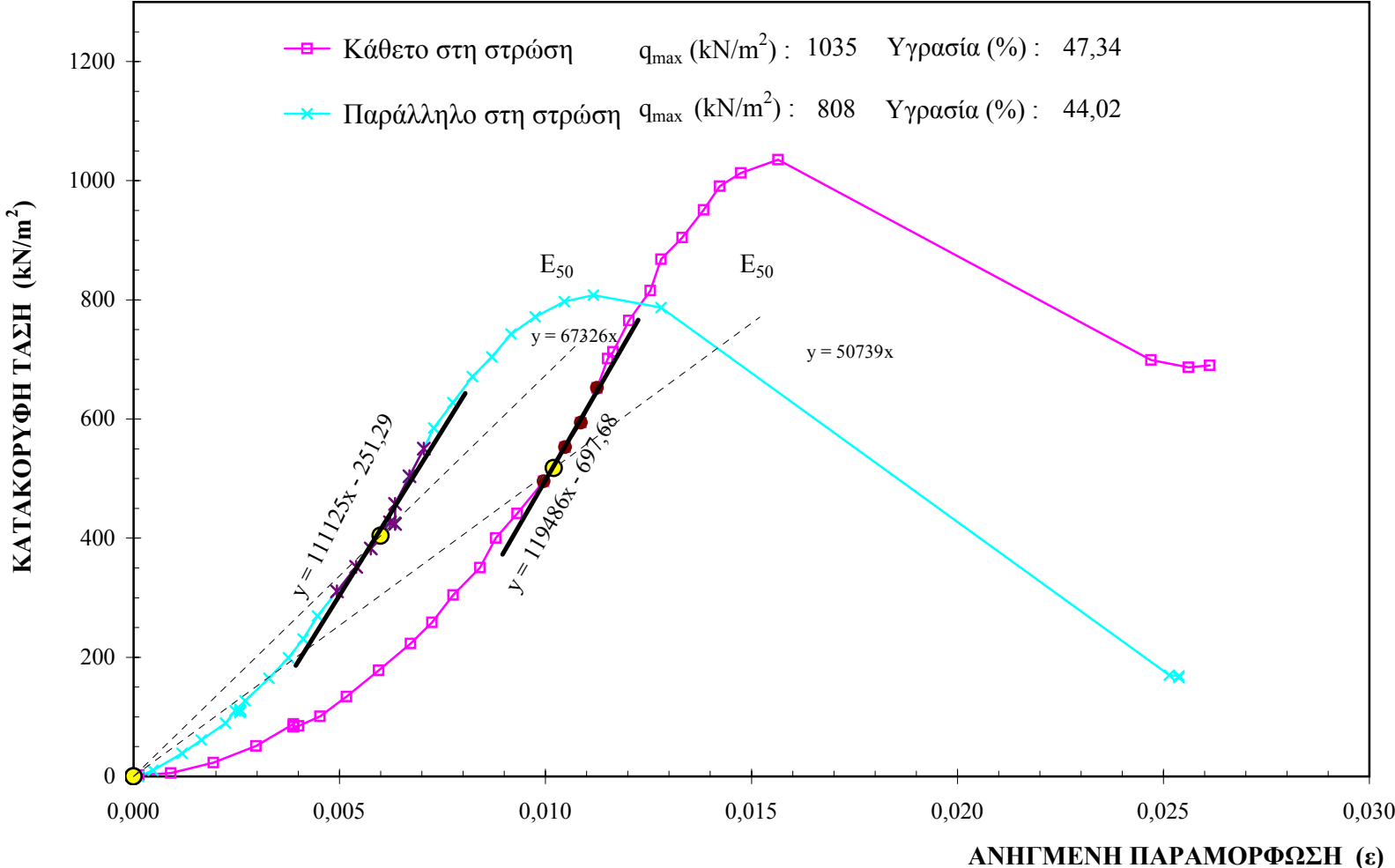
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας-6, Θέση Β, Δείγμα 1



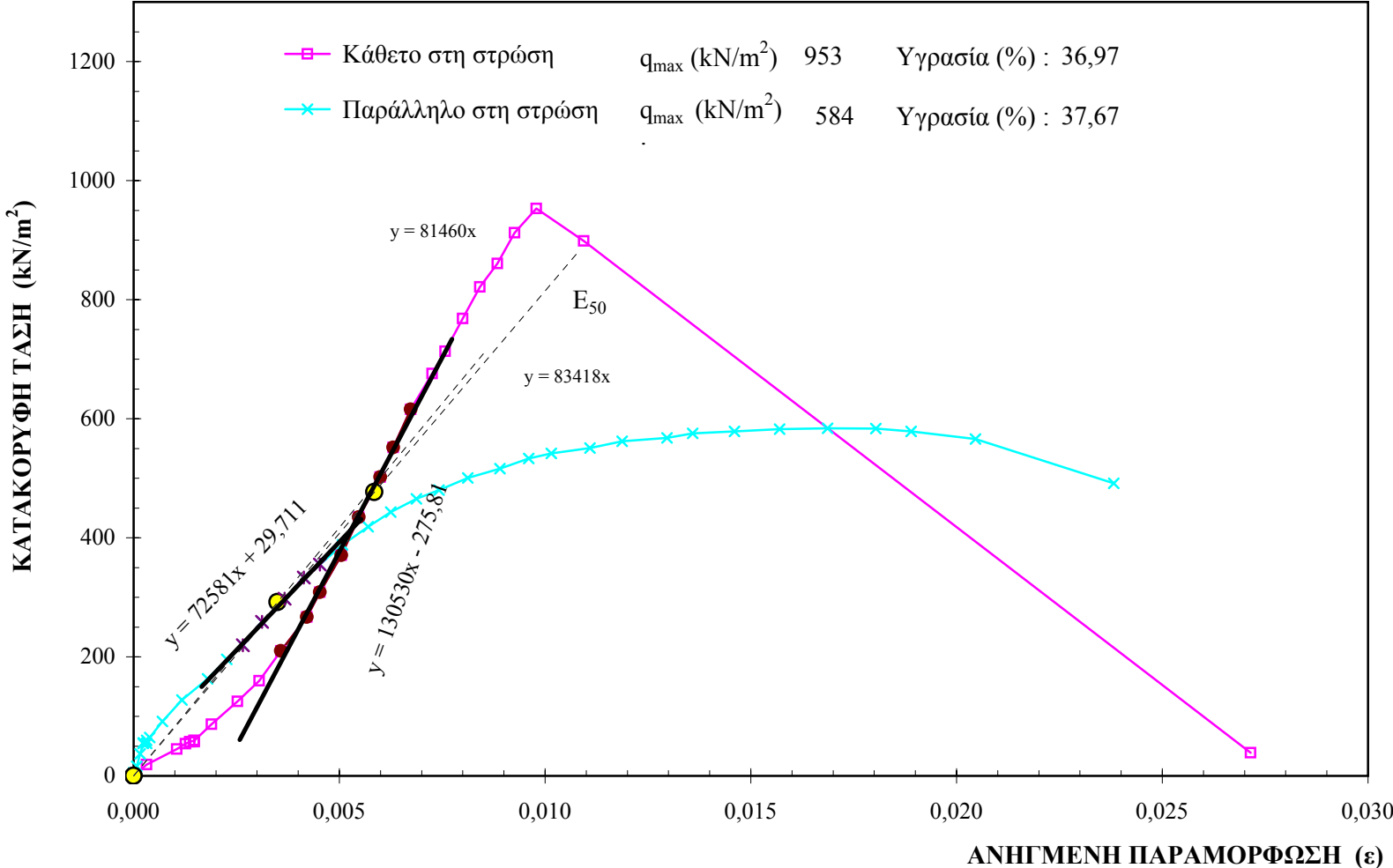
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας-6, Θέση Β, Δείγμα 2



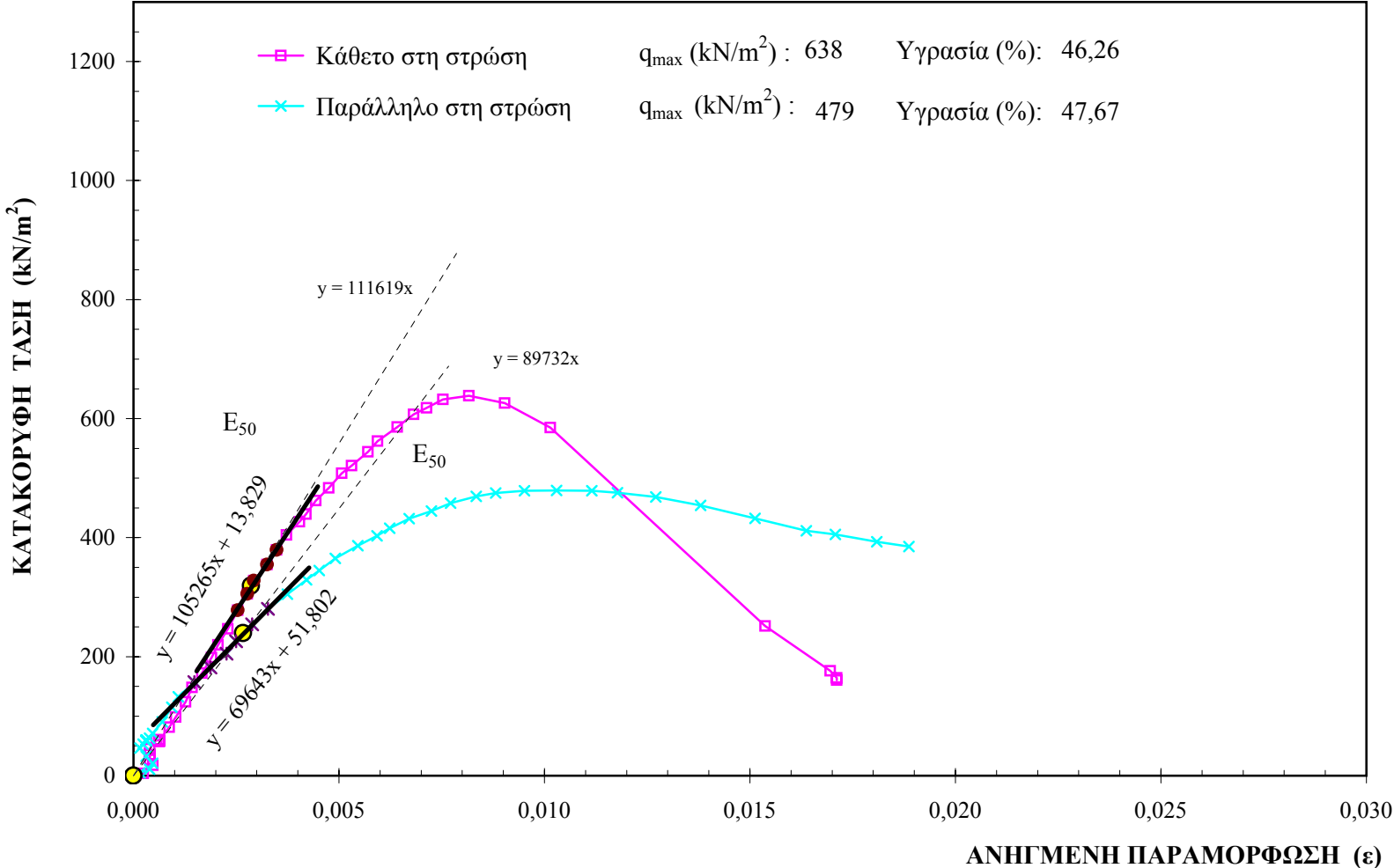
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας-6, Θέση Γ, Δείγμα 1



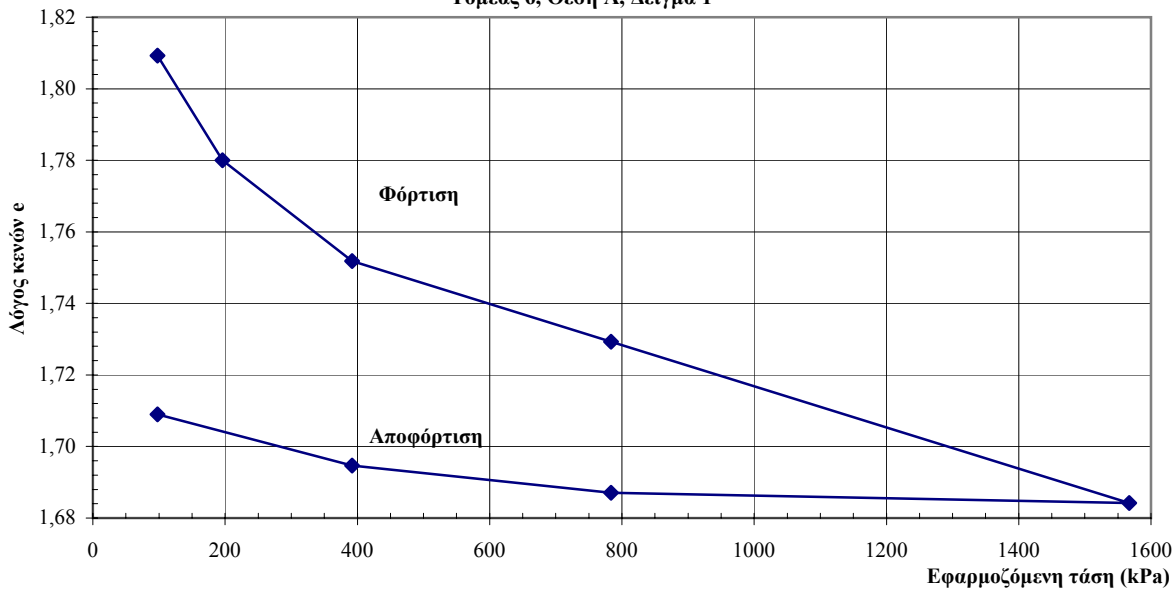
ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας-6, Θέση Γ, Δείγμα 3

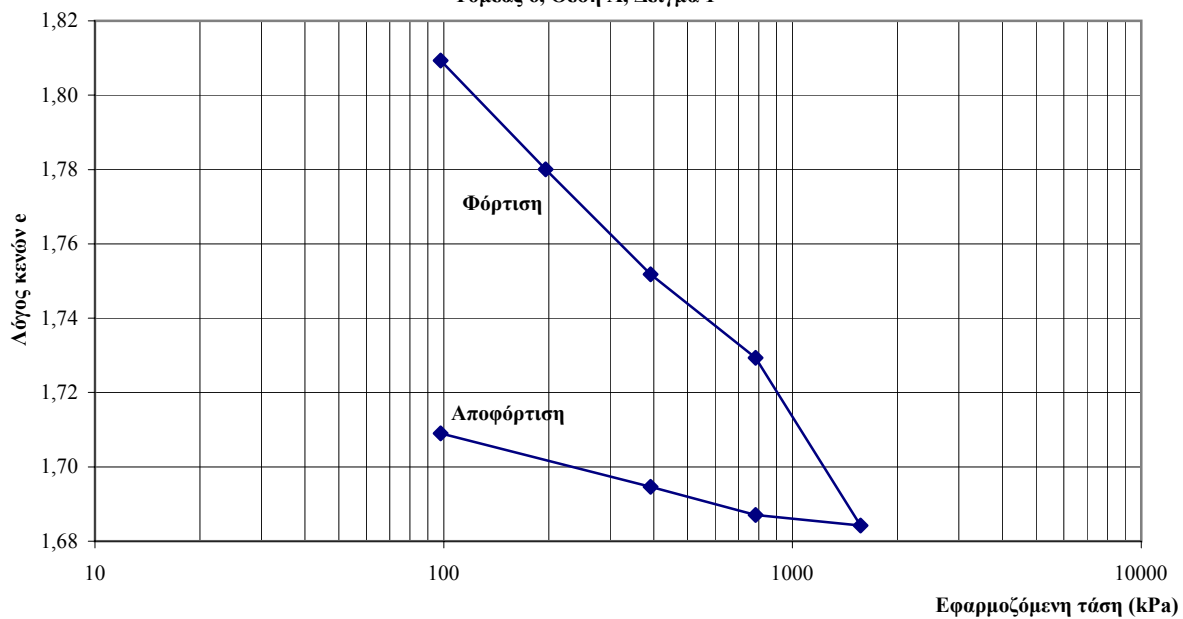


ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΠΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

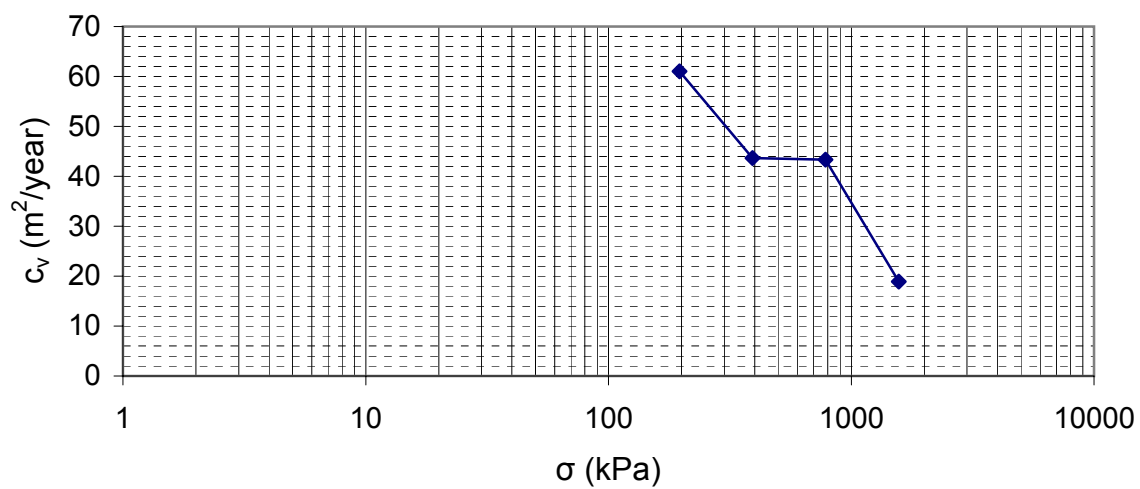
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 1



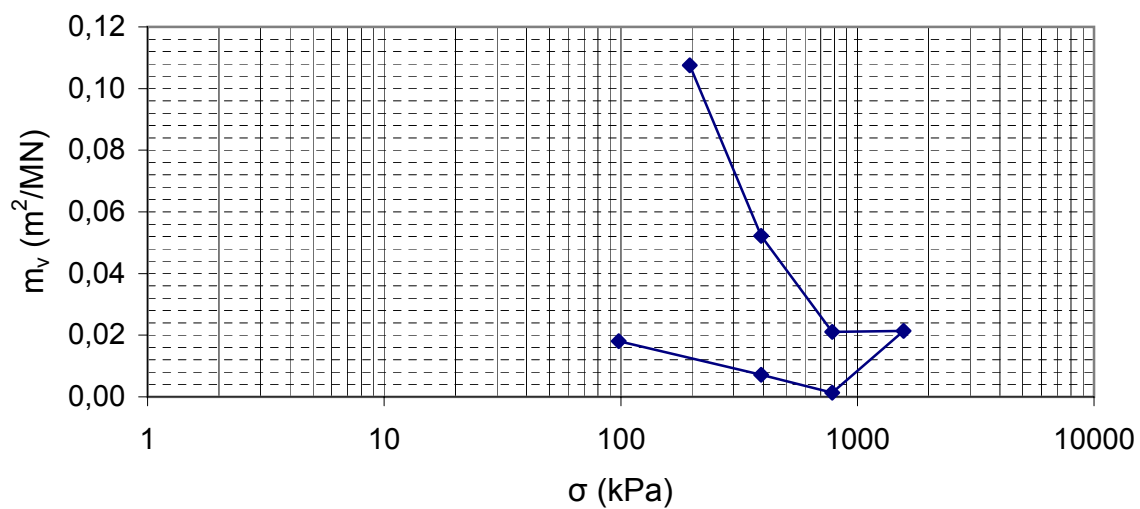
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 1



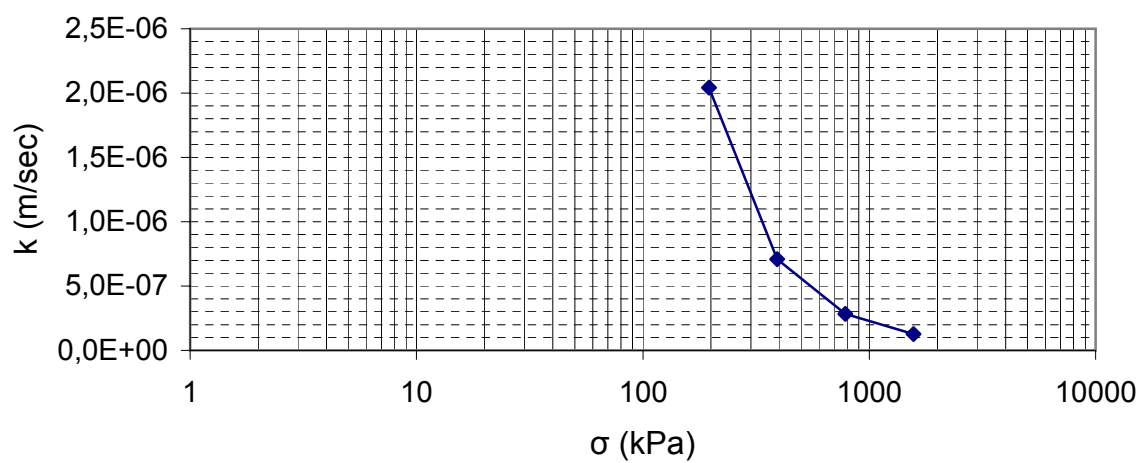
Τιμές c_v



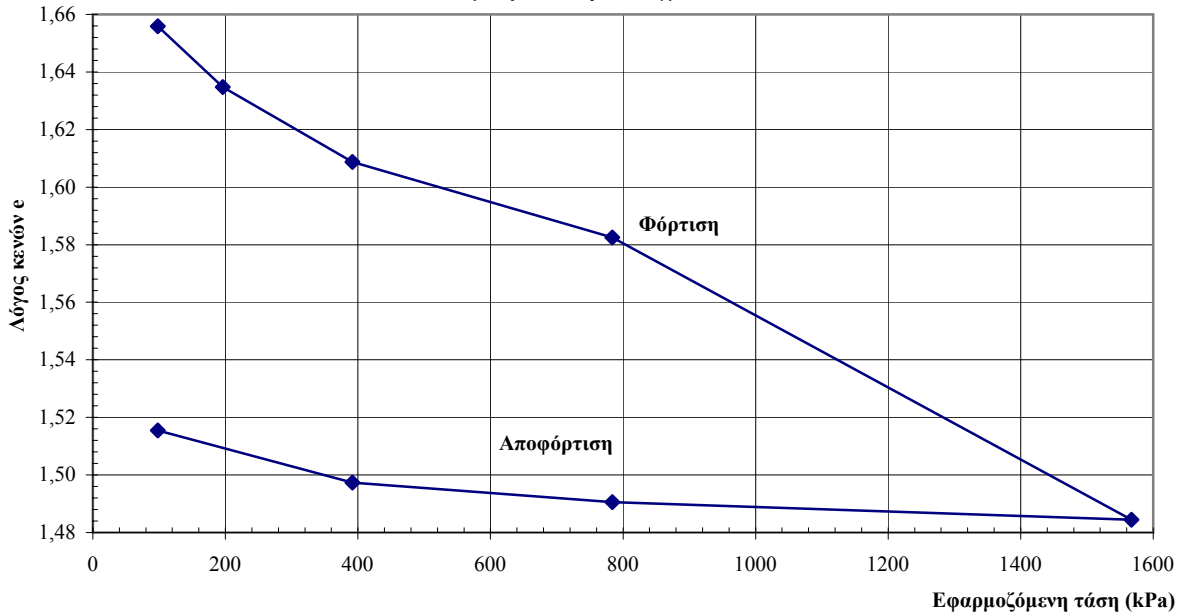
Τιμές m_v



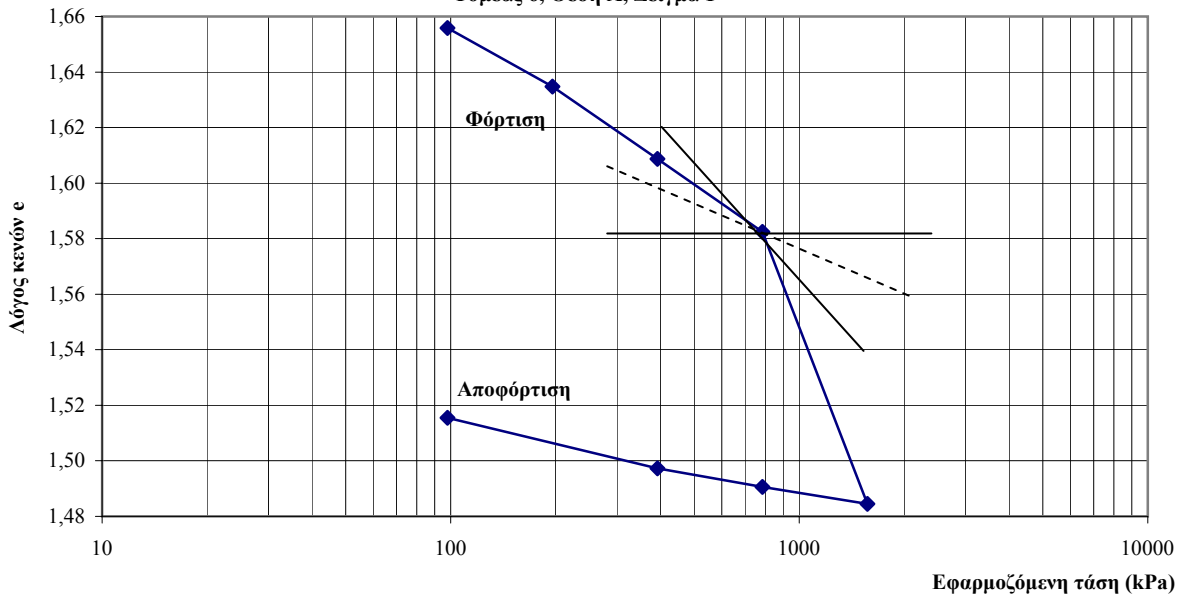
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



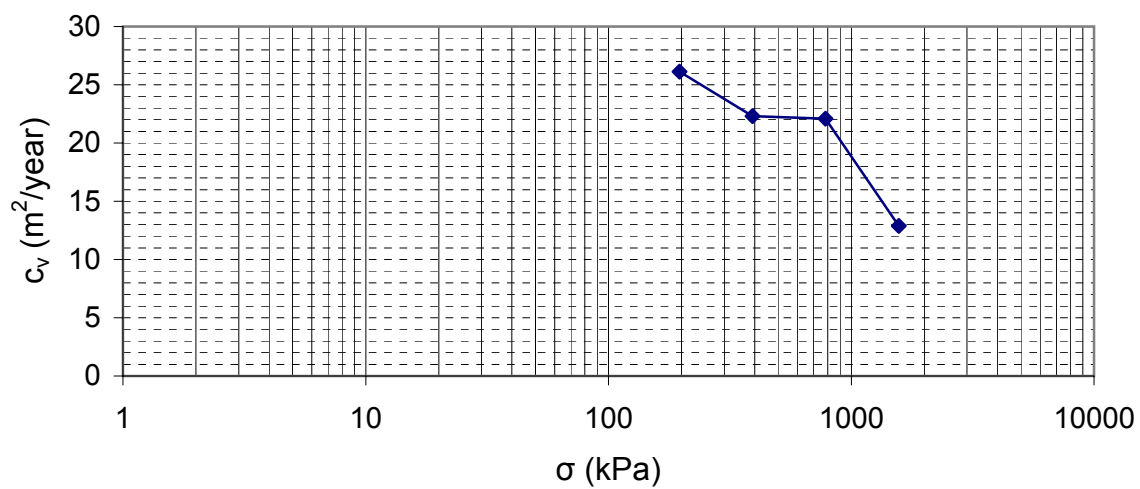
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 1



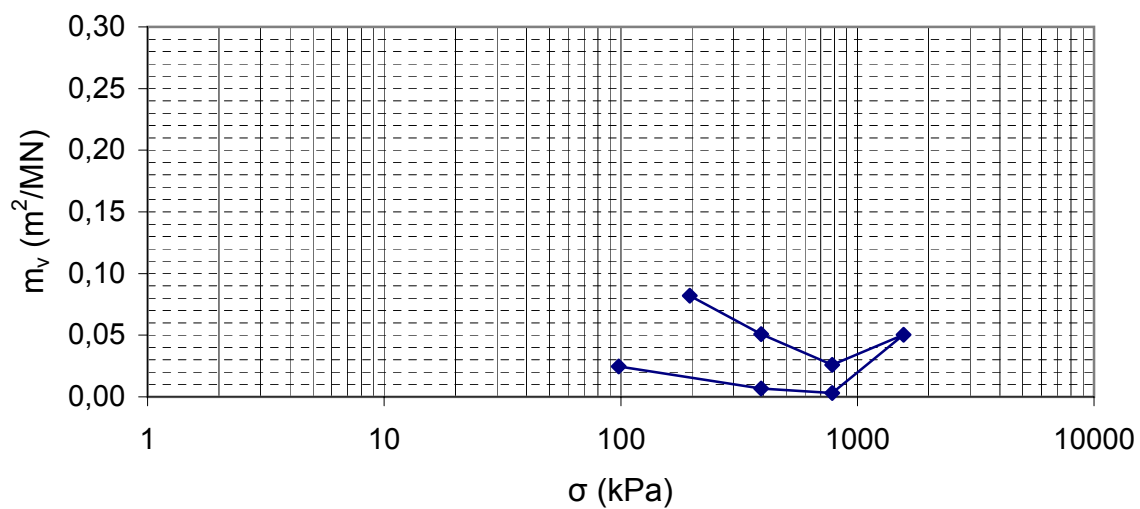
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 1



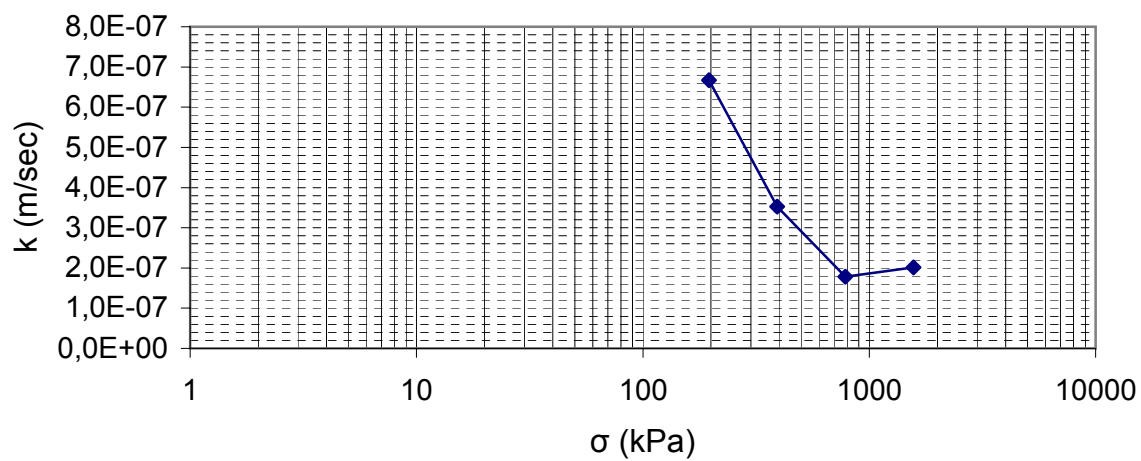
Τιμές c_v



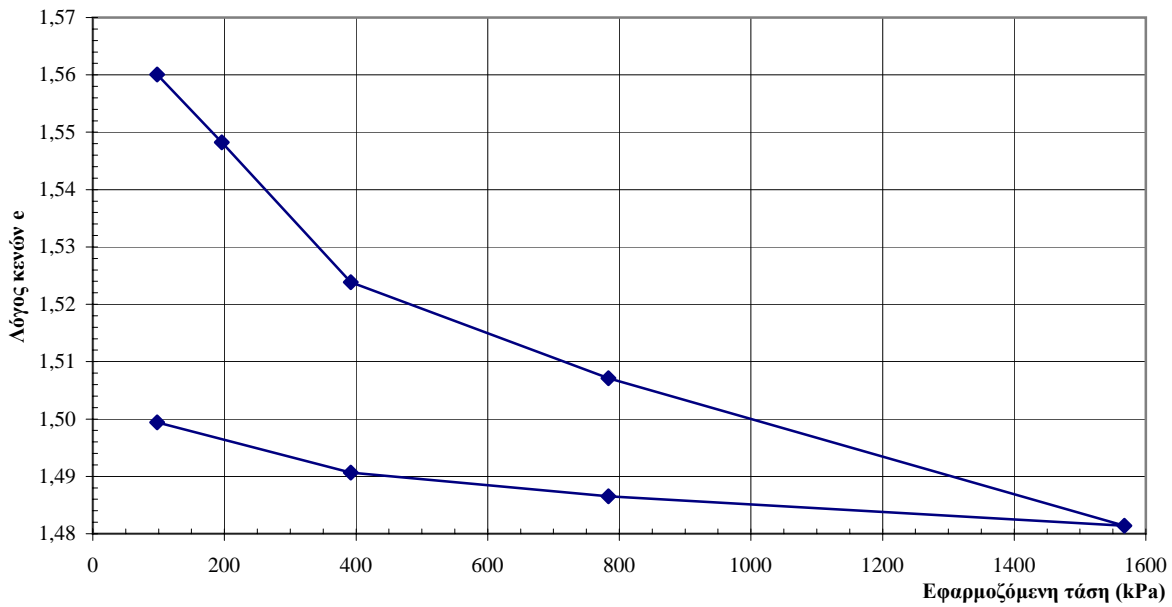
Τιμές m_v



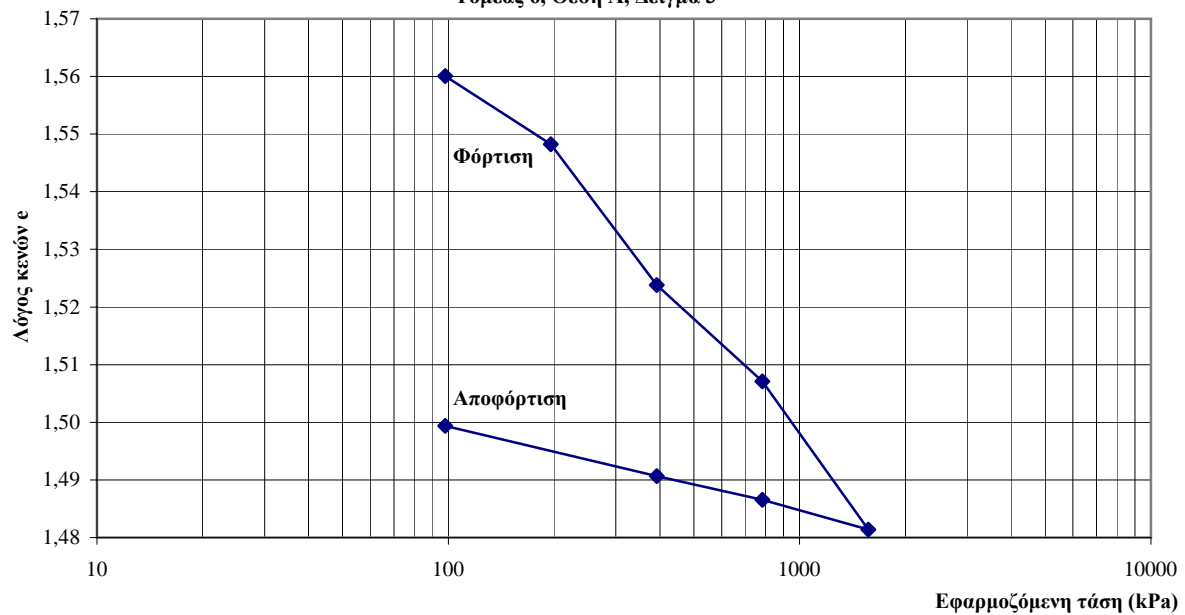
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



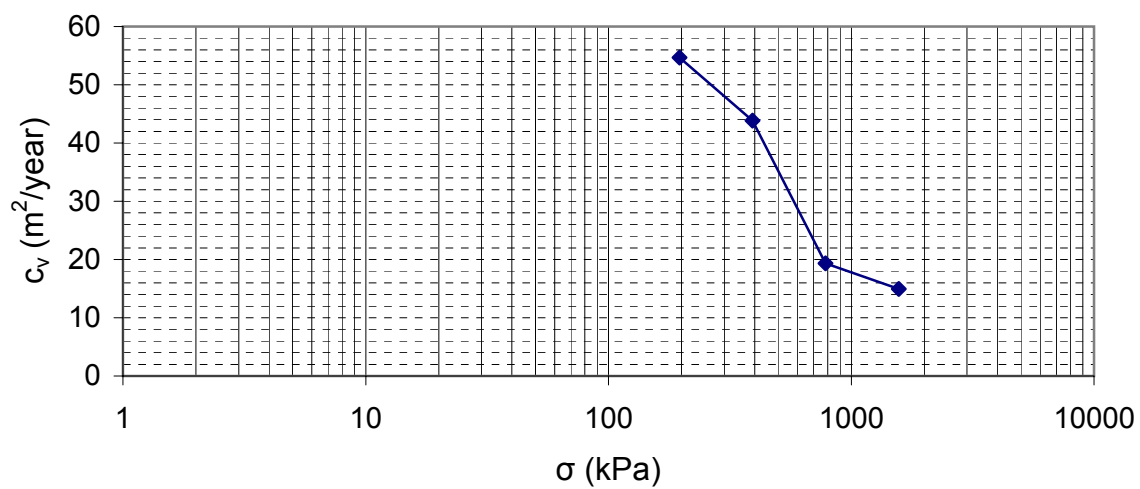
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 3



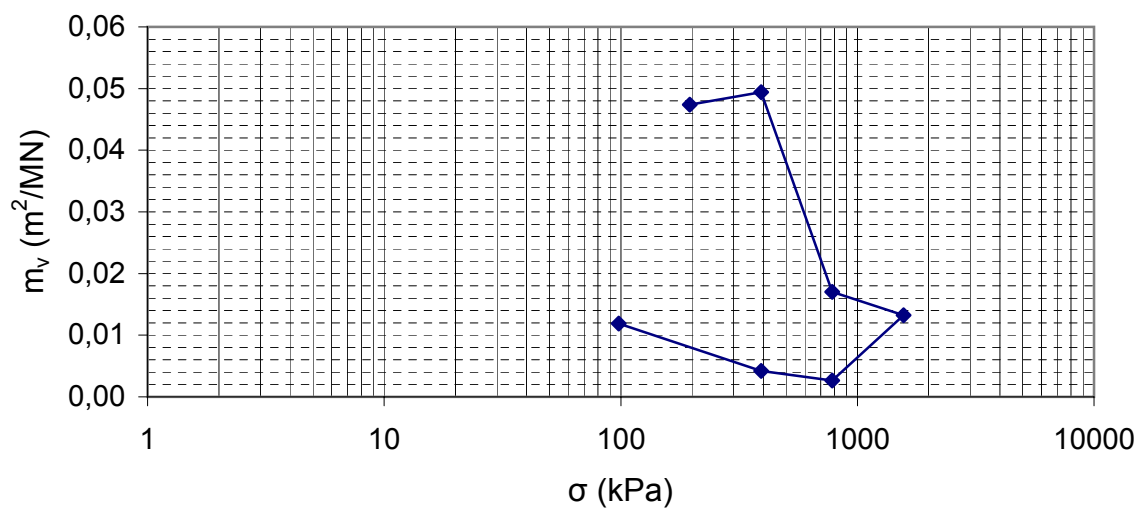
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 3



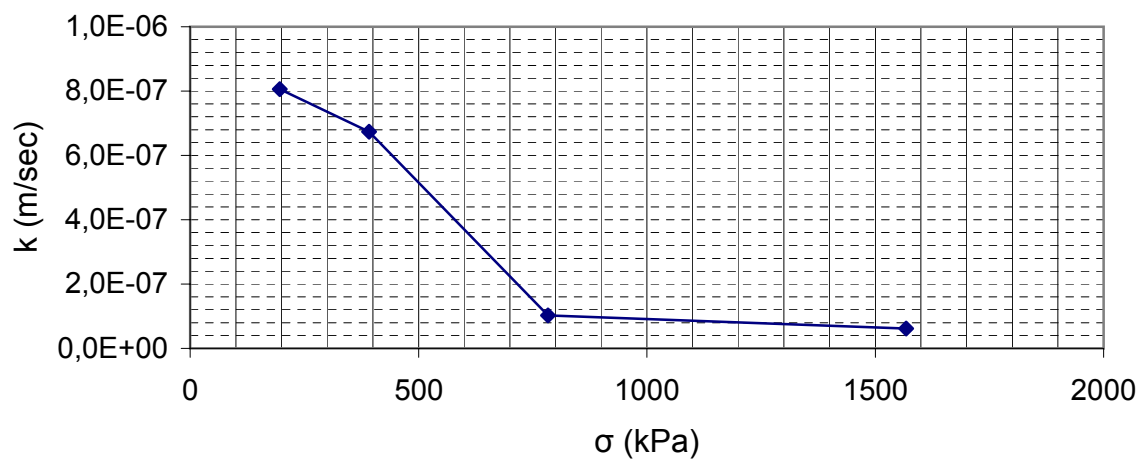
Τιμές c_v



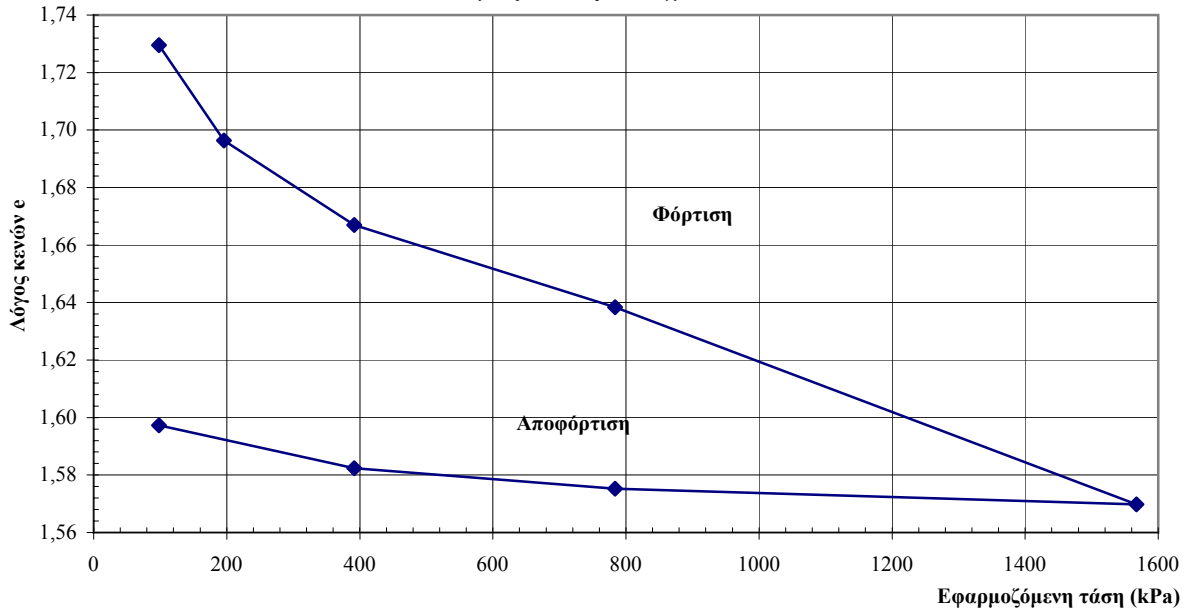
Τιμές m_v



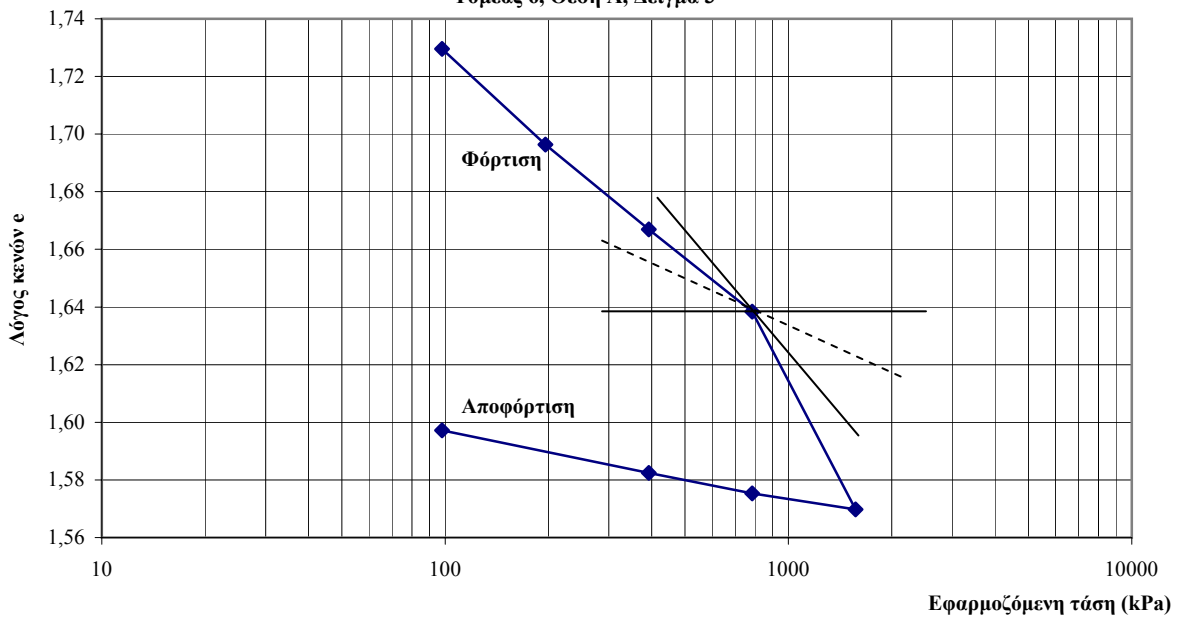
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



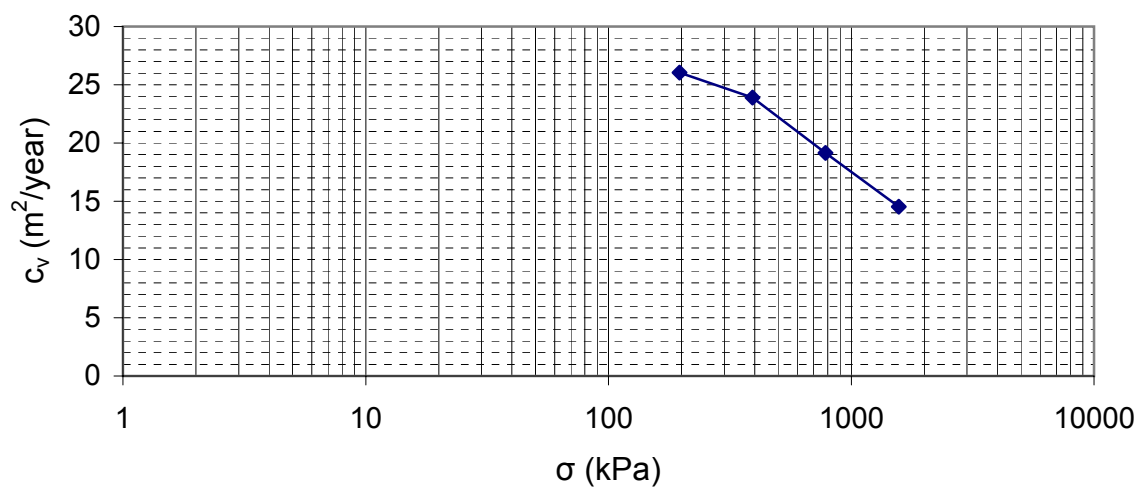
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 3



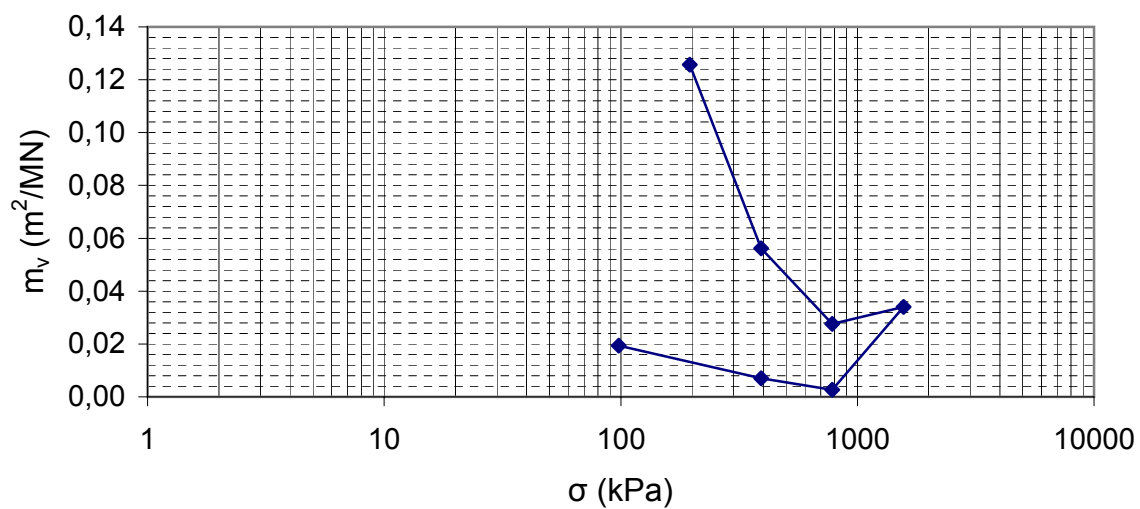
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 3



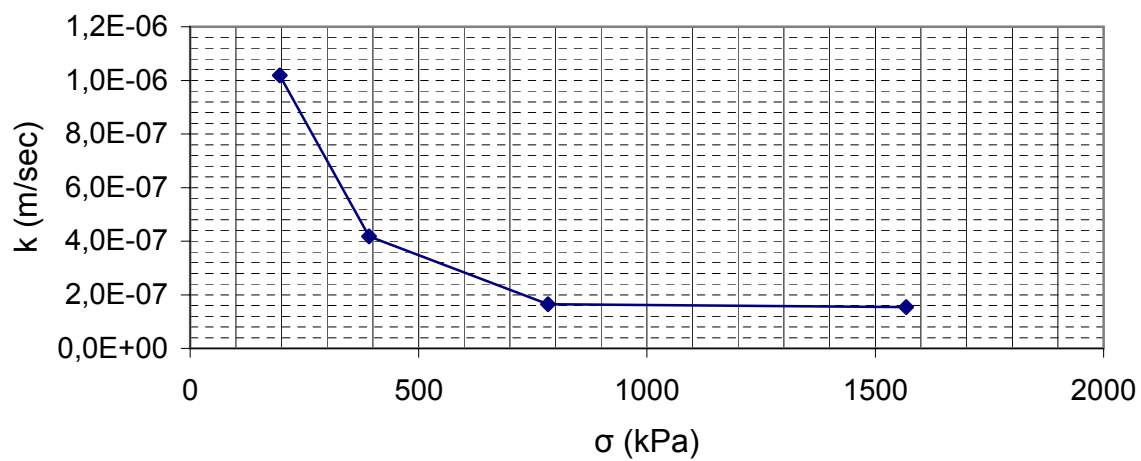
Τιμές c_v



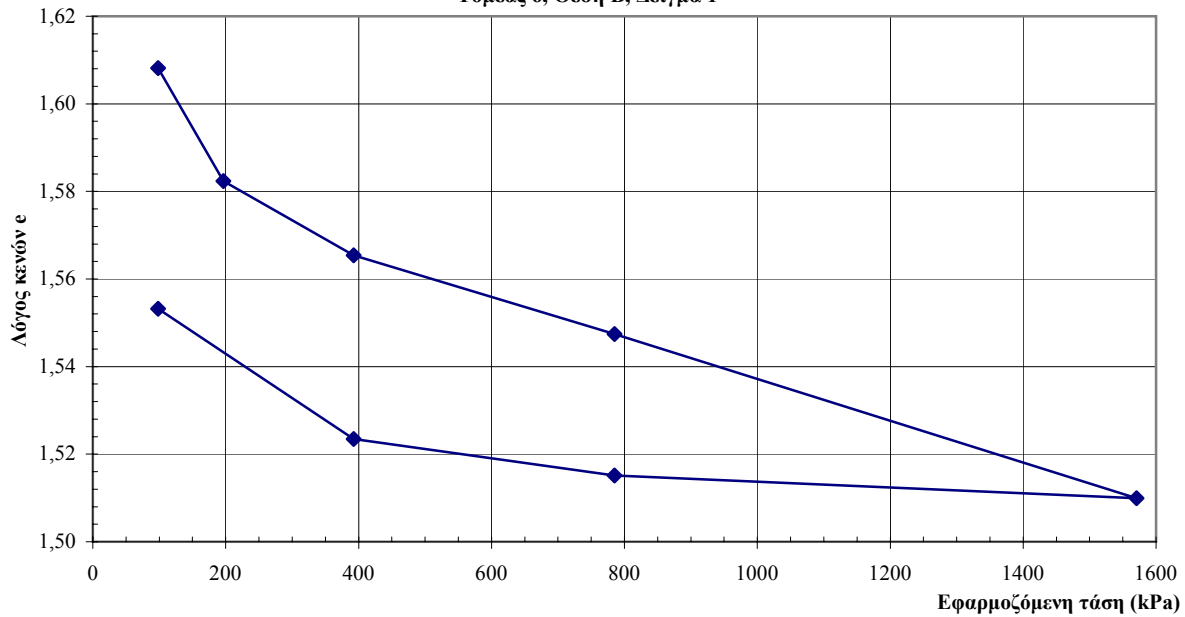
Τιμές m_v



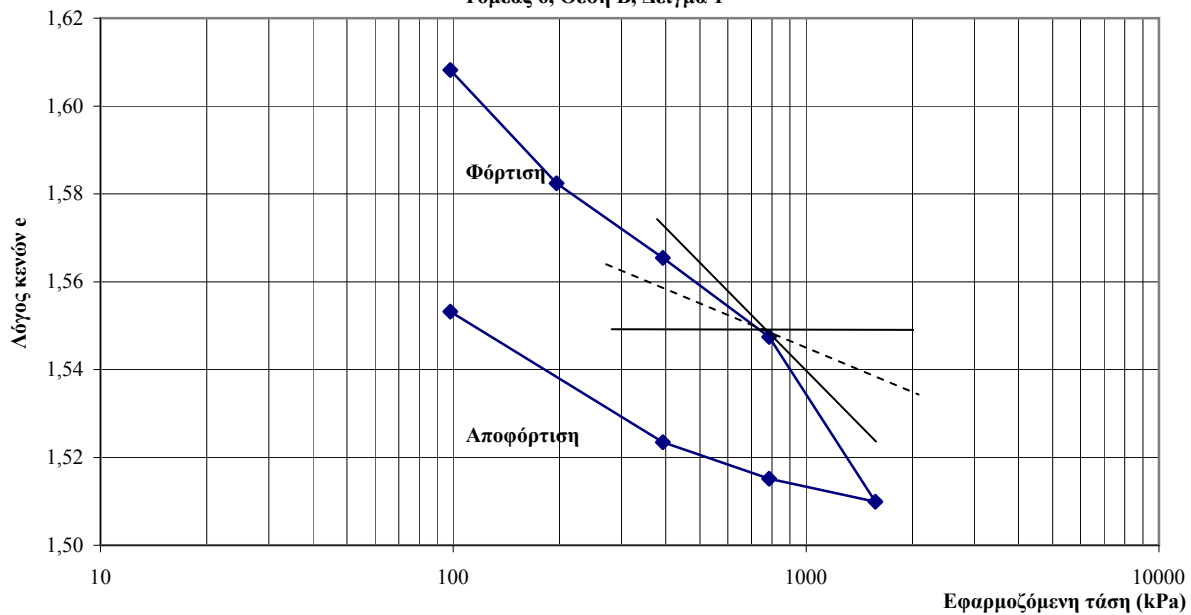
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



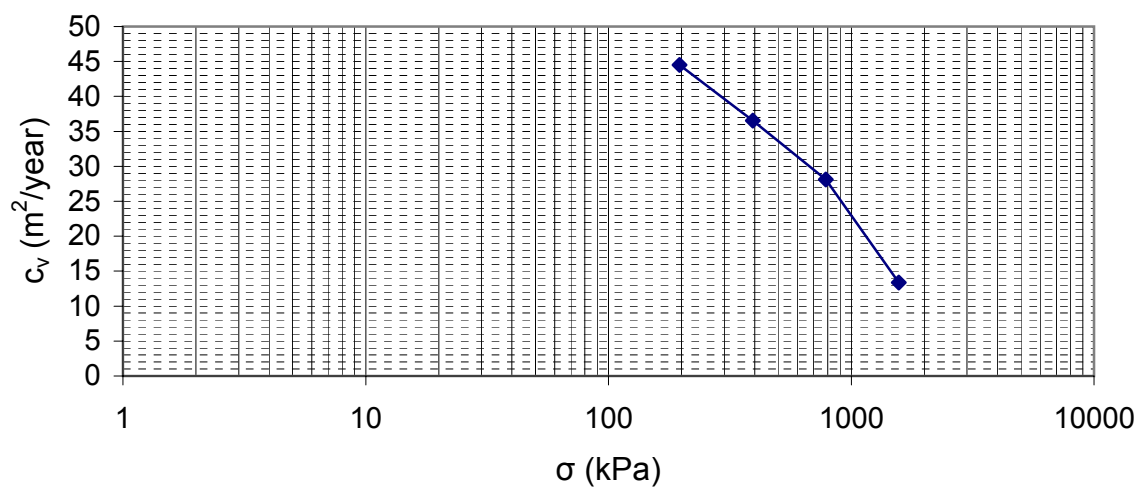
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 1



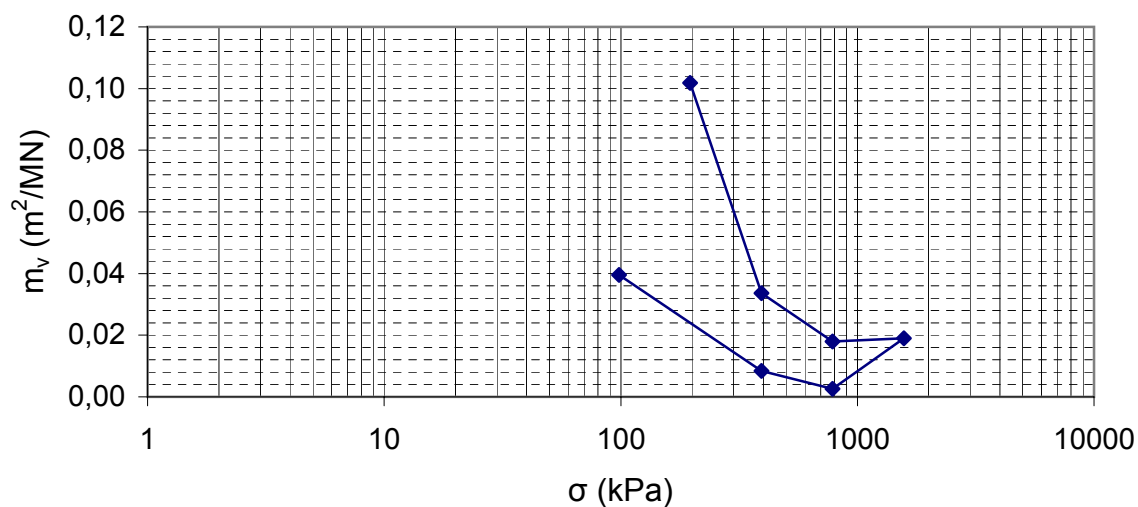
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 1



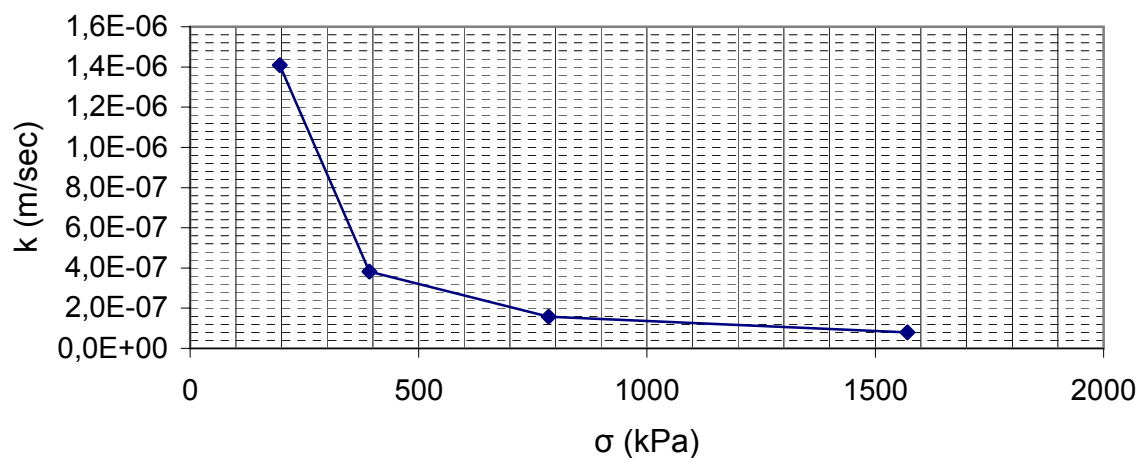
Τιμές c_v



Τιμές m_v



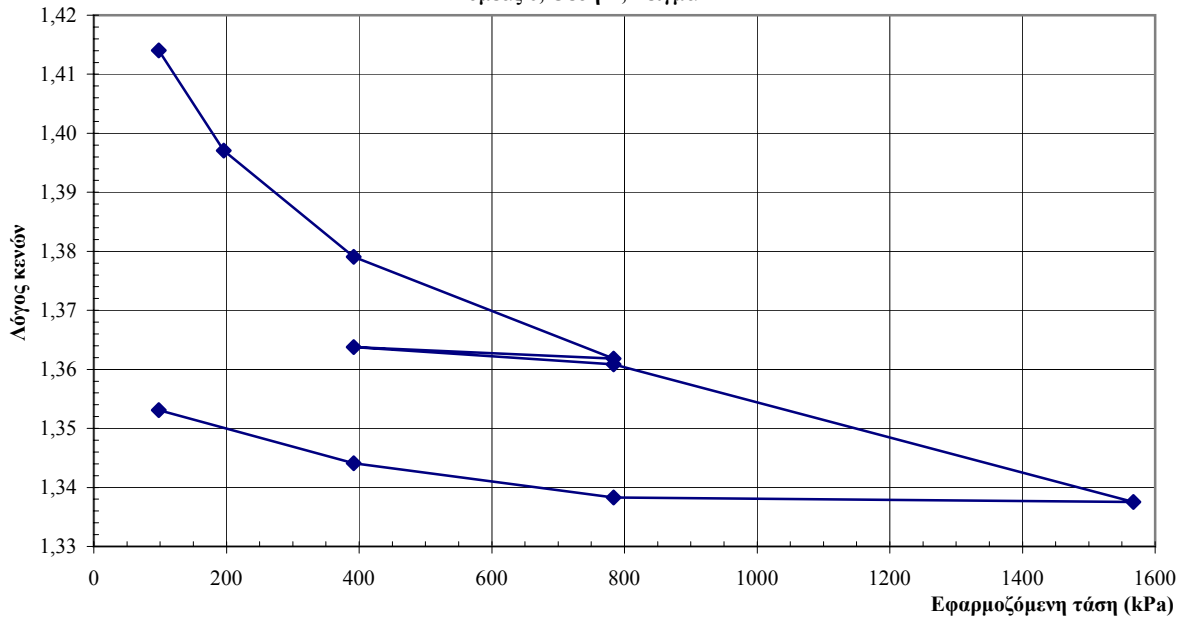
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



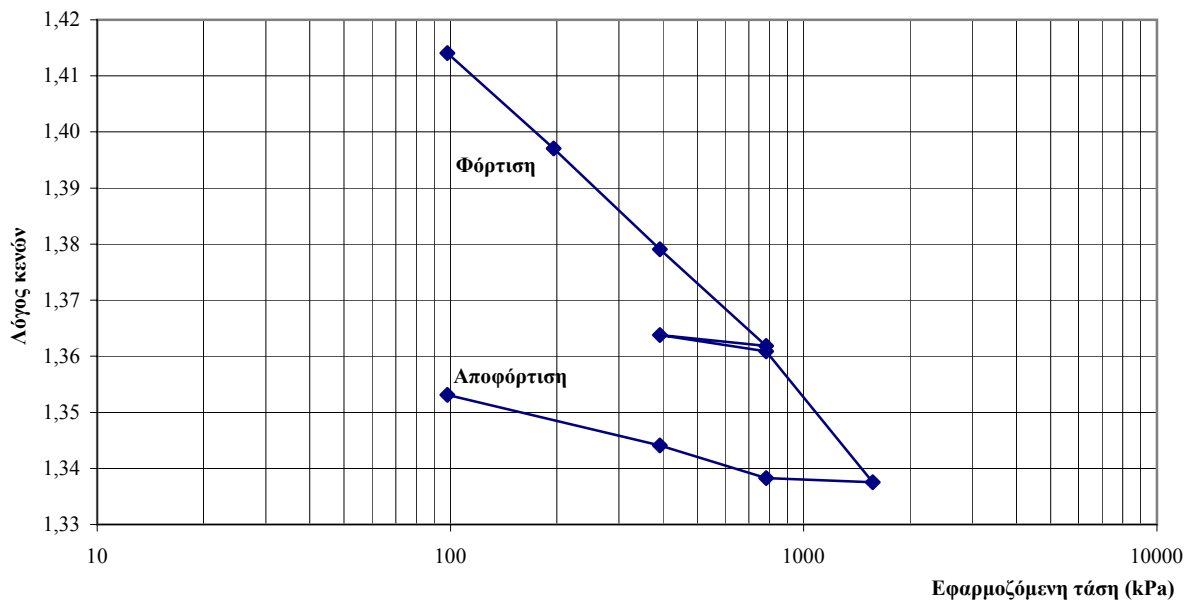
[illegible]

[illegible]

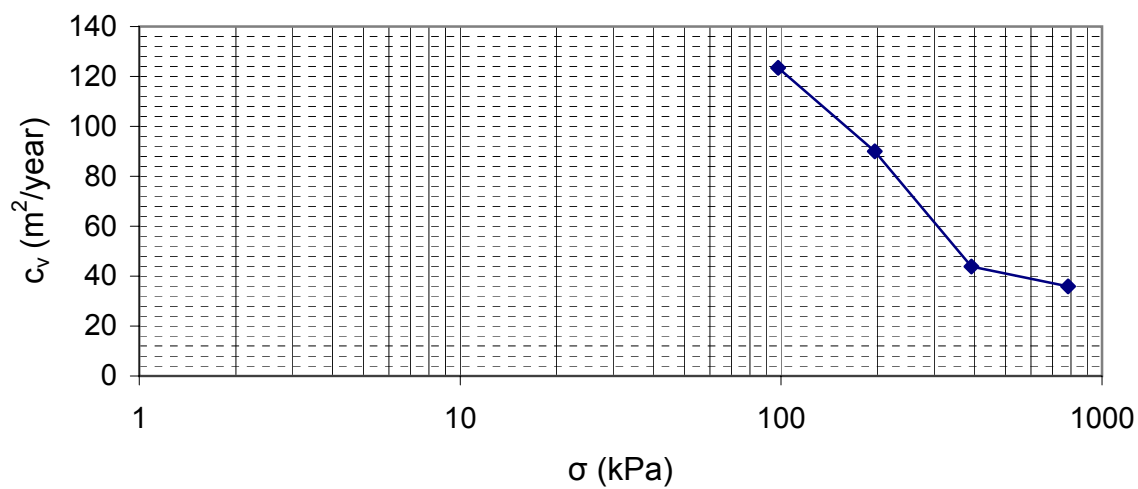
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2



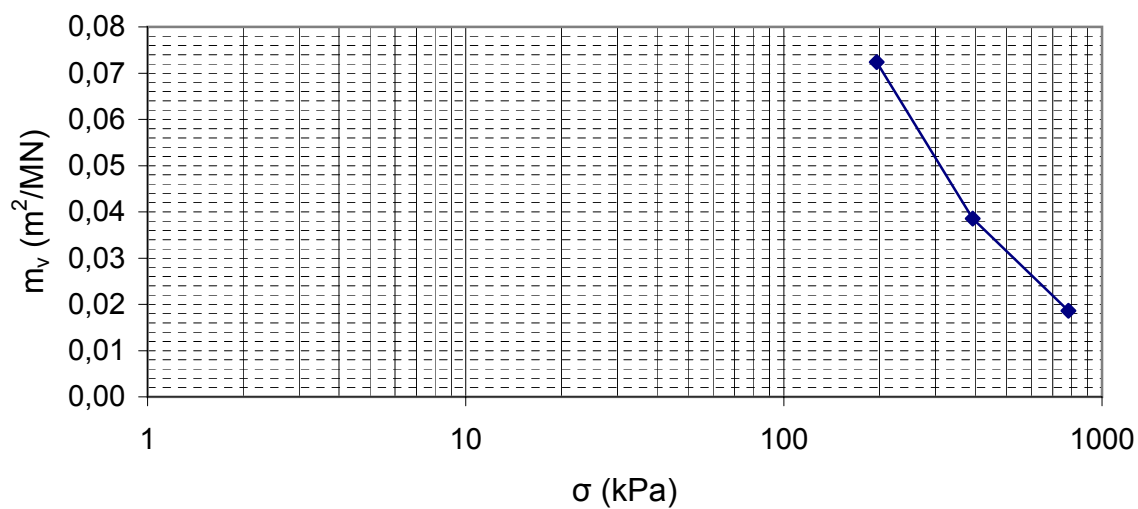
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2



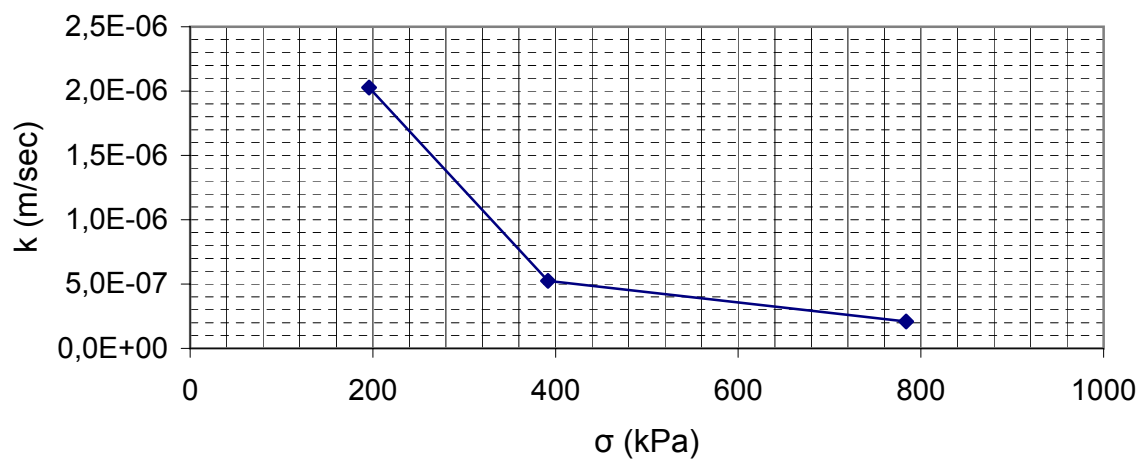
Τιμές c_v



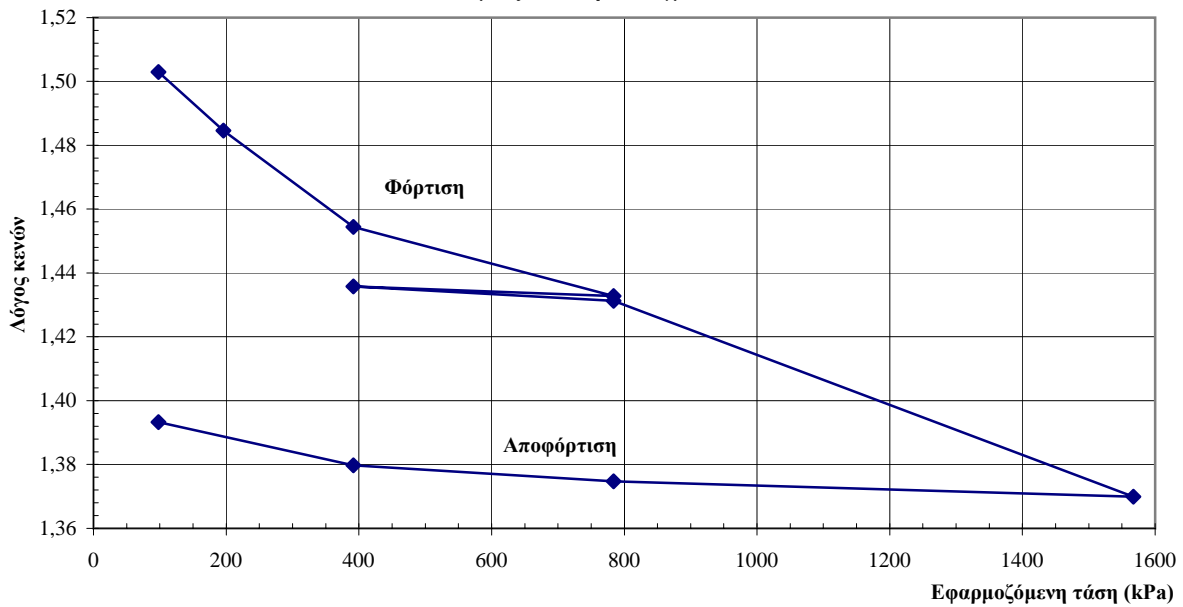
Τιμές m_v



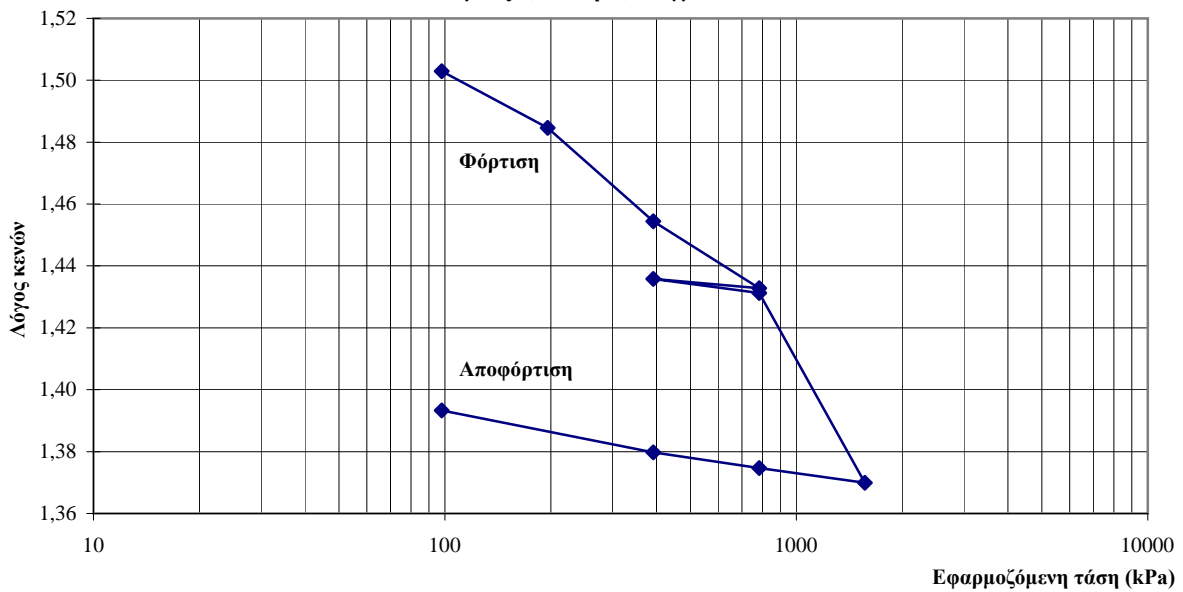
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



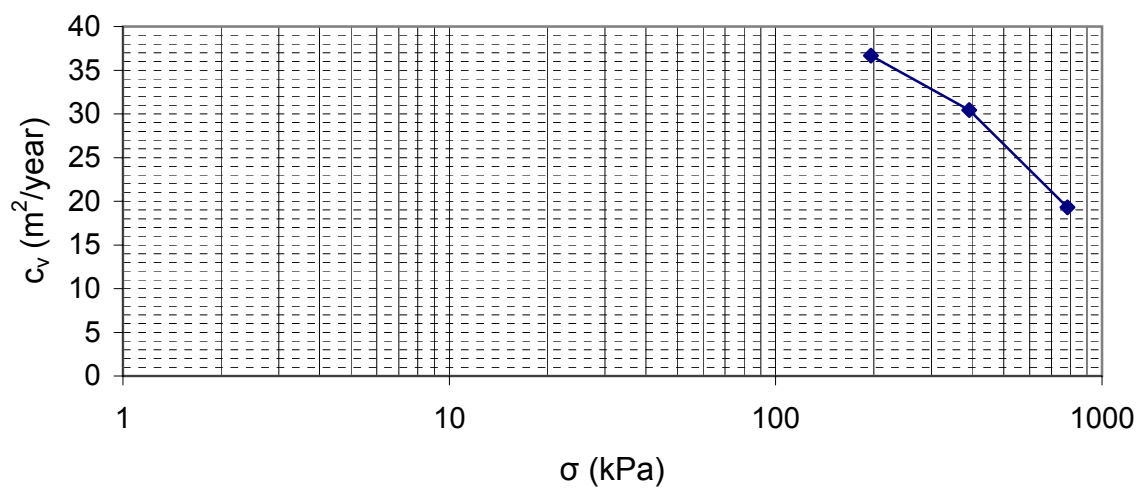
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2



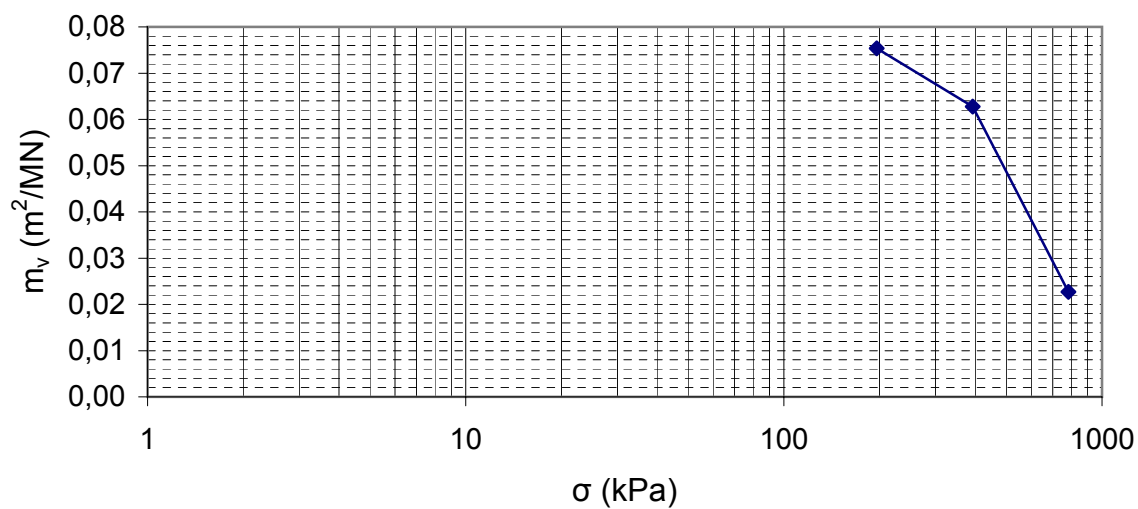
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2



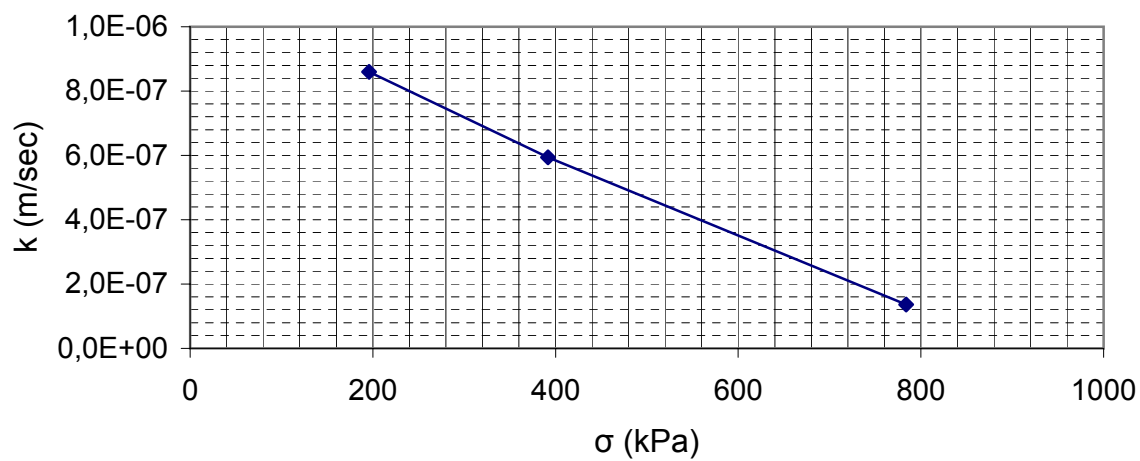
Τιμές c_v



Τιμές m_v



Τιμές k με βάση τις τιμές c_v

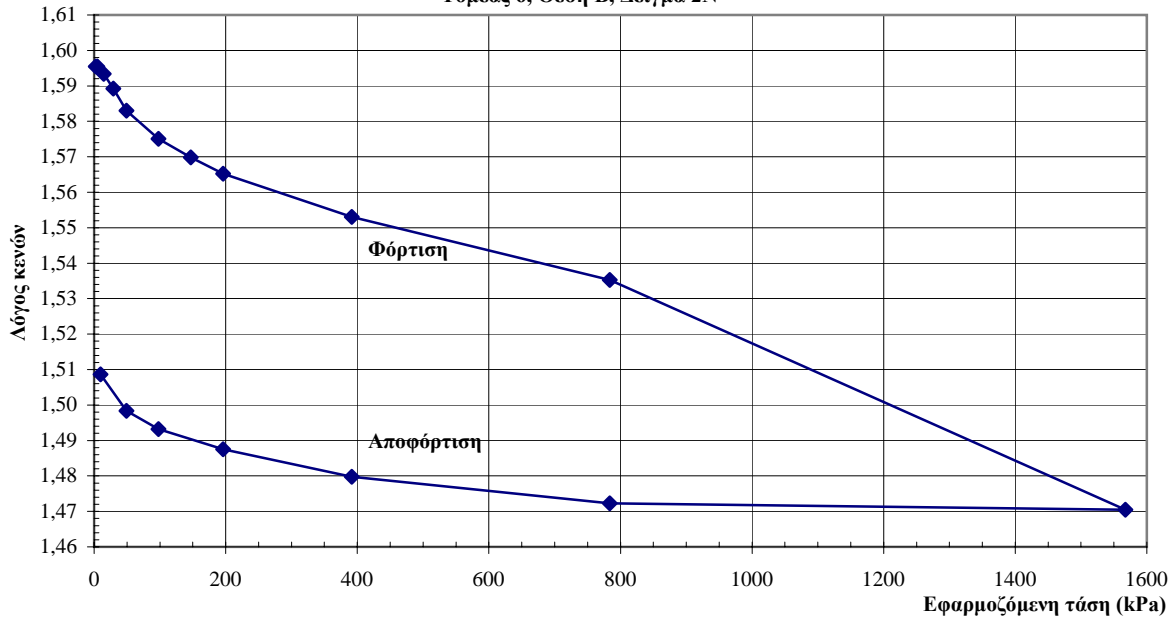


[illegible]

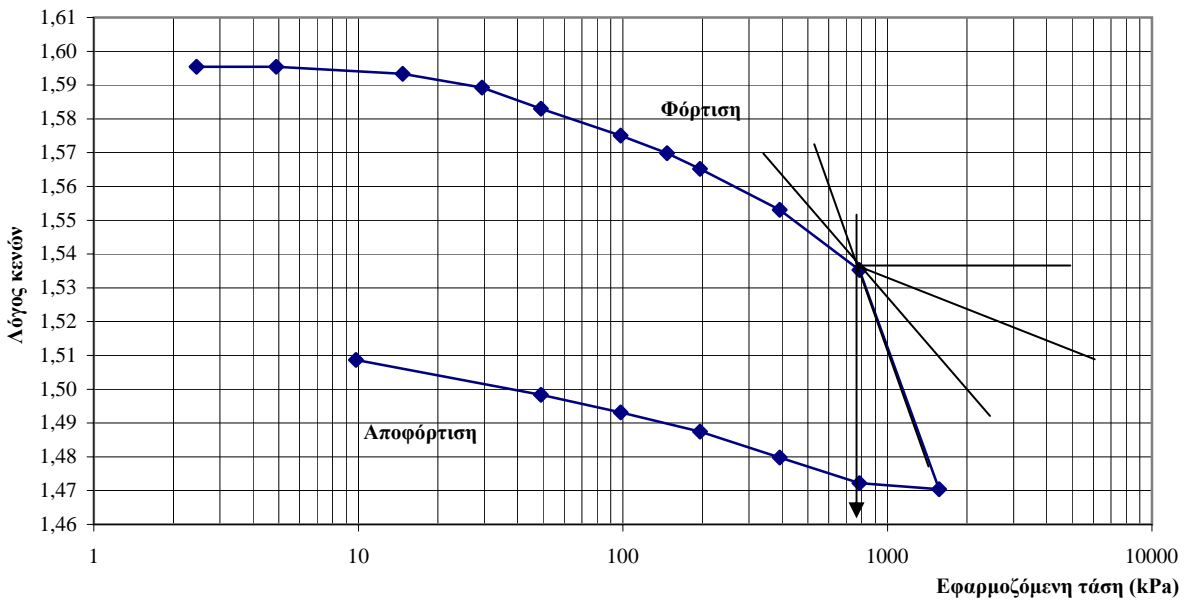
Φορτίο (Kg): 3				Φορτίο (Kg): 4				Φορτίο (Kg): 8				Φορτίο (Kg): 16				Φορτίο (Kg): 32			
Χρόνος φόρτισης		Φόρτιση (Kg)		Χρόνος αποφόρτισης		Φόρτιση (Kg)		Χρόνος αποφόρτισης		Φόρτιση (Kg)		Χρόνος αποφόρτισης		Φόρτιση (Kg)		Χρόνος αποφόρτισης		Φόρτιση (Kg)	
Τάση (kPa):		30		Τάση (kPa):		40		Τάση (kPa):		80		Τάση (kPa):		160		Τάση (kPa):		320	
146,932		146,932		195,910		195,910		391,820		391,820		783,640		783,640		1567,279		1567,279	
(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)
0.0000	0.00	0.158	0.158	0.0000	0.00	0.198	0.198	0.0000	0.00	0.234	0.234	0.0000	0.00	0.328	0.328	0.0000	0.00	0.466	0.466
0.0333	0.18	0.168	0.168	0.0333	0.18	0.210	0.210	0.0333	0.18	0.280	0.280	0.0333	0.18	0.388	0.388	0.0500	0.22	0.596	0.596
0.0500	0.22	0.170	0.170	0.0667	0.26	0.212	0.212	0.0500	0.22	0.288	0.288	0.0500	0.22	0.402	0.402	0.0667	0.26	0.614	0.614
0.0667	0.26	0.172	0.172	0.2000	0.45	0.214	0.214	0.0667	0.26	0.290	0.290	0.0667	0.26	0.408	0.408	0.0833	0.29	0.626	0.626
0.0833	0.29	0.174	0.174	0.8000	0.89	0.216	0.216	0.0833	0.29	0.292	0.292	0.0833	0.29	0.408	0.408	0.1000	0.32	0.632	0.632
0.2000	0.45	0.176	0.176	4.0000	2.00	0.218	0.218	0.1000	0.32	0.294	0.294	0.1000	0.32	0.410	0.410	0.2000	0.45	0.648	0.648
1.0000	1.00	0.178	0.178	10.0000	3.16	0.220	0.220	0.2000	0.45	0.296	0.296	0.2000	0.45	0.416	0.416	0.4000	0.63	0.670	0.670
4.0000	2.00	0.180	0.180	40.0000	6.32	0.224	0.224	0.4000	0.63	0.300	0.300	0.4000	0.63	0.420	0.420	0.8000	0.89	0.690	0.690
8.0000	2.83	0.184	0.184	200.0000	14.14	0.226	0.226	0.8000	0.89	0.304	0.304	0.8000	0.89	0.424	0.424	1.0000	1.00	0.698	0.698
40.0000	6.32	0.186	0.186	400.0000	20.00	0.228	0.228	1.0000	1.00	0.304	0.304	1.0000	1.00	0.426	0.426	2.0000	1.41	0.720	0.720
80.0000	8.94	0.188	0.188	800.0000	28.28	0.230	0.230	2.0000	1.41	0.306	0.306	2.0000	1.41	0.428	0.428	4.0000	2.00	0.734	0.734
100.0000	10.00	0.188	0.188	1200.0000	34.64	0.232	0.232	4.0000	2.00	0.308	0.308	4.0000	2.00	0.432	0.432	8.0000	2.83	0.748	0.748
200.0000	14.14	0.190	0.190	1425.0000	37.75	0.234	0.234	8.0000	2.83	0.312	0.312	8.0000	2.83	0.434	0.434	10.0000	3.16	0.754	0.754
400.0000	20.00	0.192	0.192					10.0000	3.16	0.312	0.312	10.0000	3.16	0.436	0.436	20.0000	4.47	0.772	0.772
800.0000	28.28	0.196	0.196					20.0000	4.47	0.314	0.314	20.0000	4.47	0.440	0.440	40.0000	6.32	0.800	0.800
1200.0000	34.64	0.198	0.198					40.0000	6.32	0.316	0.316	40.0000	6.32	0.442	0.442	80.0000	8.94	0.824	0.824
1400.0000	37.42	0.198	0.198					80.0000	8.94	0.318	0.318	80.0000	8.94	0.446	0.446	100.0000	10.00	0.834	0.834
								100.0000	10.00	0.320	0.320	100.0000	10.00	0.448	0.448	200.0000	14.14	0.860	0.860
								200.0000	14.14	0.320	0.320	200.0000	14.14	0.450	0.450	400.0000	20.00	0.890	0.890
								400.0000	20.00	0.324	0.324	400.0000	20.00	0.454	0.454	800.0000	28.28	0.922	0.922
								800.0000	28.28	0.326	0.326	800.0000	28.28	0.458	0.458	1200.0000	34.64	0.944	0.944
								1200.0000	34.64	0.328	0.328	1200.0000	34.64	0.462	0.462	1600.0000	40.00	0.960	0.960
								1415.0000	37.62	0.328	0.328	1600.0000	40.00	0.464	0.464	1910.0000	43.70	0.968	0.968
												2000.0000	44.72	0.464	0.464				
												2365.0000	48.63	0.466	0.466				

[illegible]

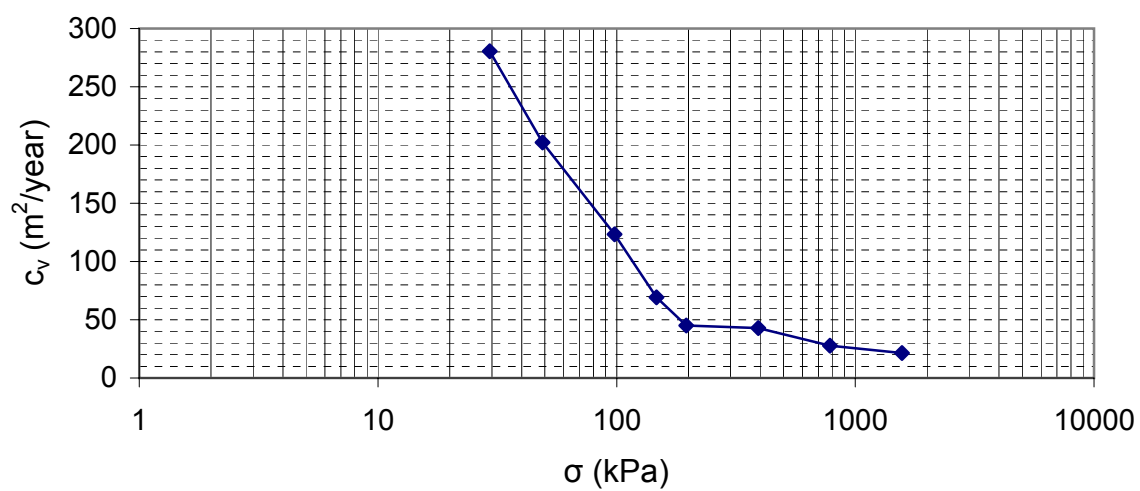
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
Δοκίμιο κάθετο στη στρώση
Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2Ν



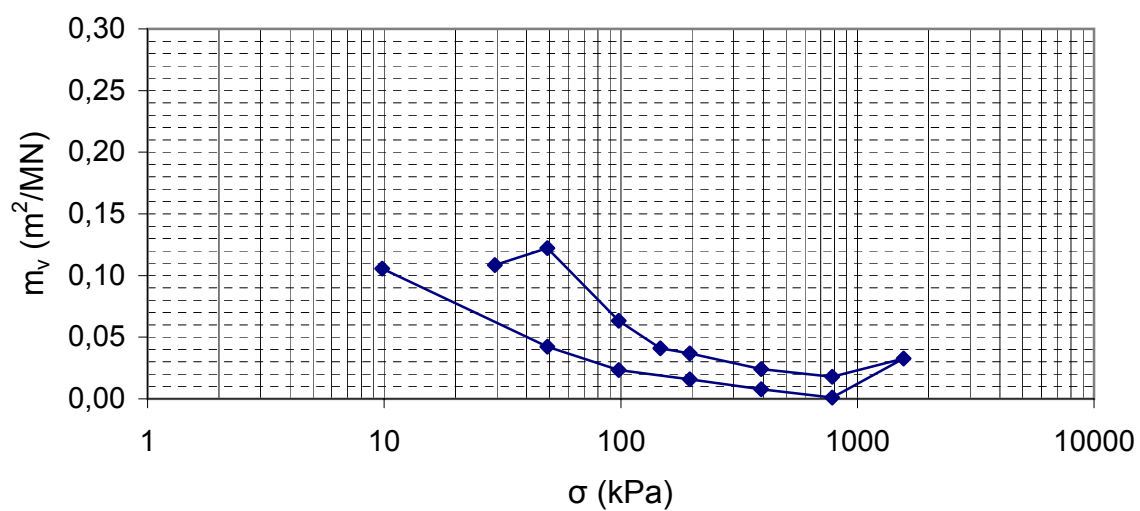
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
Δοκίμιο κάθετο στη στρώση
Τομέας 6, Θέση Β, Δείγμα 2Ν



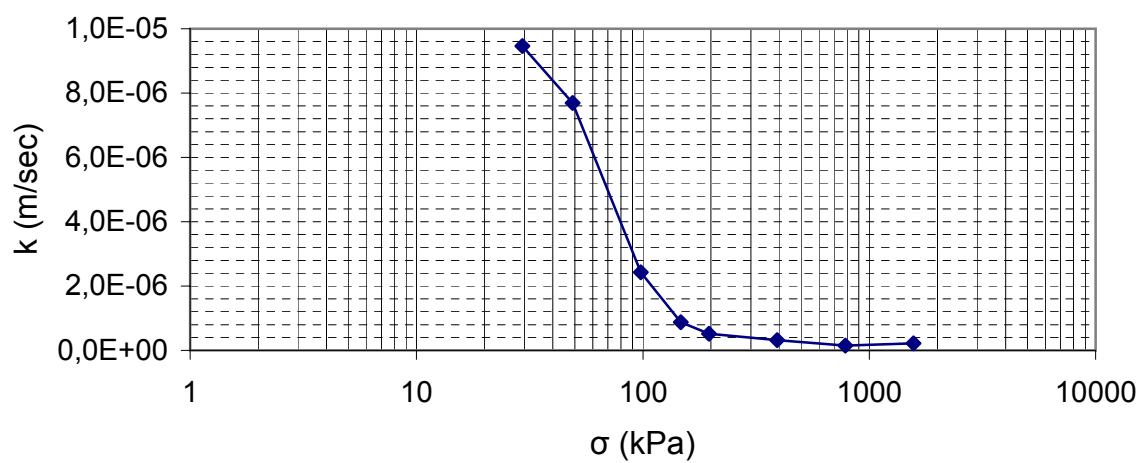
Τιμές c_v



Τιμές m_v



Τιμές k με βάση τις τιμές c_v

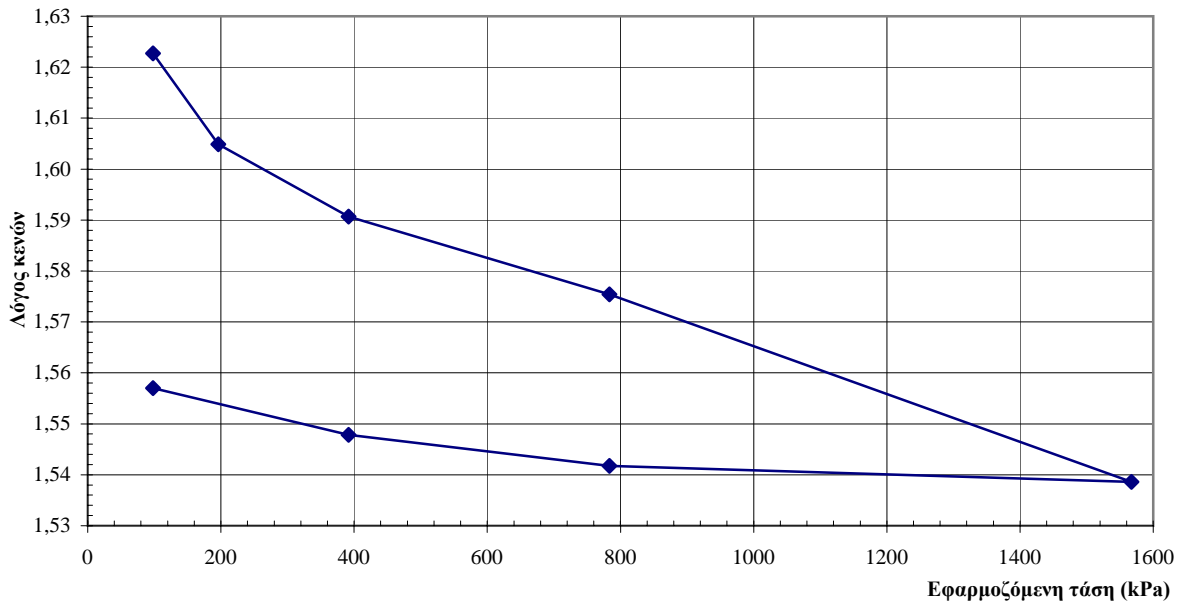


[illegible]

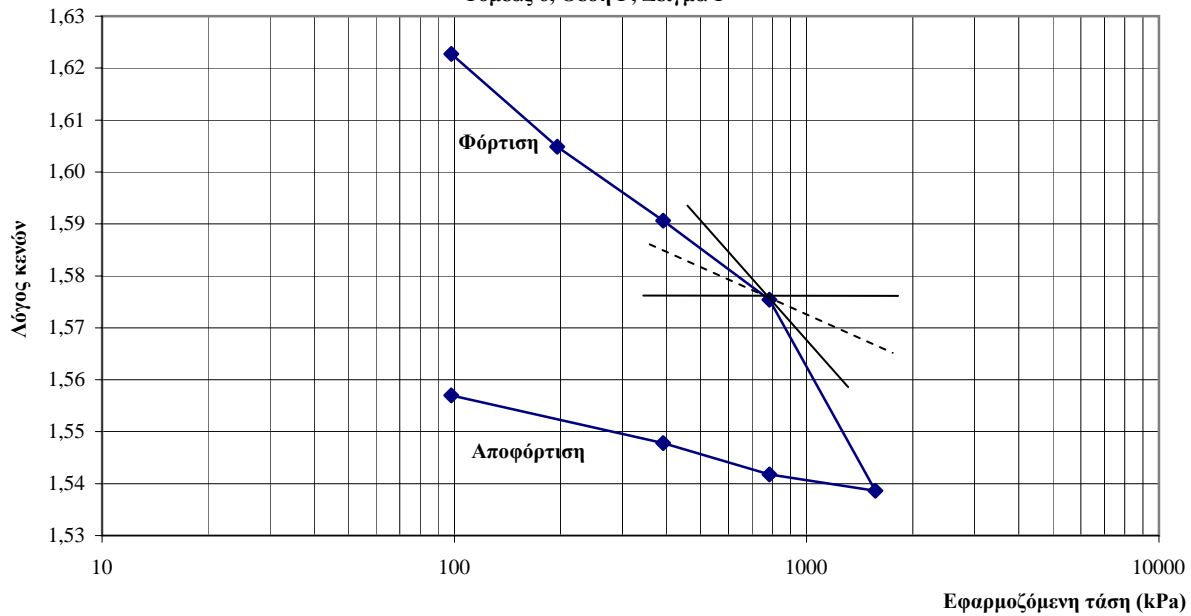
Αποφόρτιση

Φορτίο 16 Kg				Φορτίο 8 Kg				Φορτίο 2 Kg			
Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 160 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 80 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 20 Kg	
αποφόρτισης		Τάση 783.64 kPa		αποφόρτισης		Τάση 391.82 kPa		αποφόρτισης		Τάση 97.96kPa	
(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υποχ. (mm)
0.0000	0.00	0.784	0.784	0.0000	0.00	0.760	0.760	0.0000	0.00	0.714	0.714
0.0167	0.13	0.760	0.760	0.0167	0.13	0.760	0.760	0.0167	0.13	0.672	0.672
0.0333	0.18	0.760	0.760	0.0333	0.18	0.730	0.730	0.0333	0.18	0.668	0.668
0.0500	0.22	0.760	0.760	0.0500	0.22	0.730	0.730	0.0500	0.22	0.668	0.668
0.0667	0.26	0.760	0.760	0.0667	0.26	0.730	0.730	0.0667	0.26	0.668	0.668
0.0833	0.29	0.760	0.760	0.0833	0.29	0.730	0.730	0.0833	0.29	0.668	0.668
0.1000	0.32	0.760	0.760	0.1000	0.32	0.730	0.730	0.1000	0.32	0.668	0.668
0.2000	0.45	0.760	0.760	0.2000	0.45	0.728	0.728	0.2000	0.45	0.668	0.668
0.4000	0.63	0.760	0.760	0.4000	0.63	0.728	0.728	0.4000	0.63	0.664	0.664
0.8000	0.89	0.760	0.760	0.8000	0.89	0.728	0.728	0.8000	0.89	0.660	0.660
1.0000	1.00	0.760	0.760	1.0000	1.00	0.728	0.728	1.0000	1.00	0.660	0.660
2.0000	1.41	0.760	0.760	2.0000	1.41	0.728	0.728	2.0000	1.41	0.658	0.658
4.0000	2.00	0.760	0.760	4.0000	2.00	0.728	0.728	4.0000	2.00	0.656	0.656
8.0000	2.83	0.760	0.760	8.0000	2.83	0.728	0.728	8.0000	2.83	0.656	0.656
10.0000	3.16	0.760	0.760	10.0000	3.16	0.728	0.728	10.0000	3.16	0.656	0.656
20.0000	4.47	0.760	0.760	20.0000	4.47	0.728	0.728	20.0000	4.47	0.652	0.652
40.0000	6.32	0.760	0.760	40.0000	6.32	0.728	0.728	40.0000	6.32	0.650	0.650
80.0000	8.94	0.760	0.760	80.0000	8.94	0.728	0.728	80.0000	8.94	0.648	0.648
100.0000	10.00	0.760	0.760	100.0000	10.00	0.720	0.720	100.0000	10.00	0.648	0.648
200.0000	14.14	0.760	0.760	200.0000	14.14	0.720	0.720	200.0000	14.14	0.648	0.648
400.0000	20.00	0.760	0.760	400.0000	20.00	0.716	0.716	400.0000	20.00	0.644	0.644
800.0000	28.28	0.760	0.760	800.0000	28.28	0.716	0.716				
1200.0000	34.64	0.760	0.760	1200.0000	34.64	0.716	0.716				
1440.0000	37.95	0.760	0.760	1530.0000	39.12	0.714	0.714				

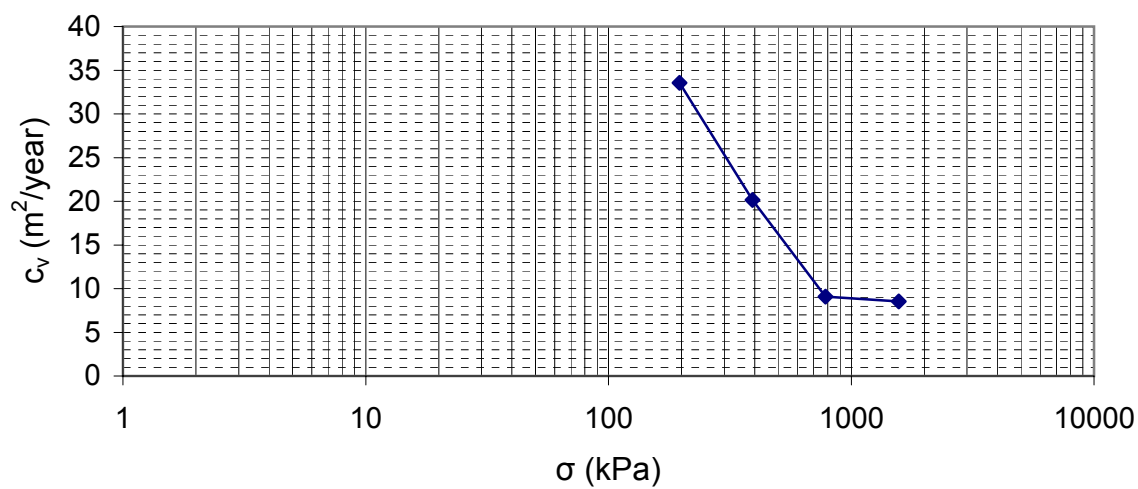
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1



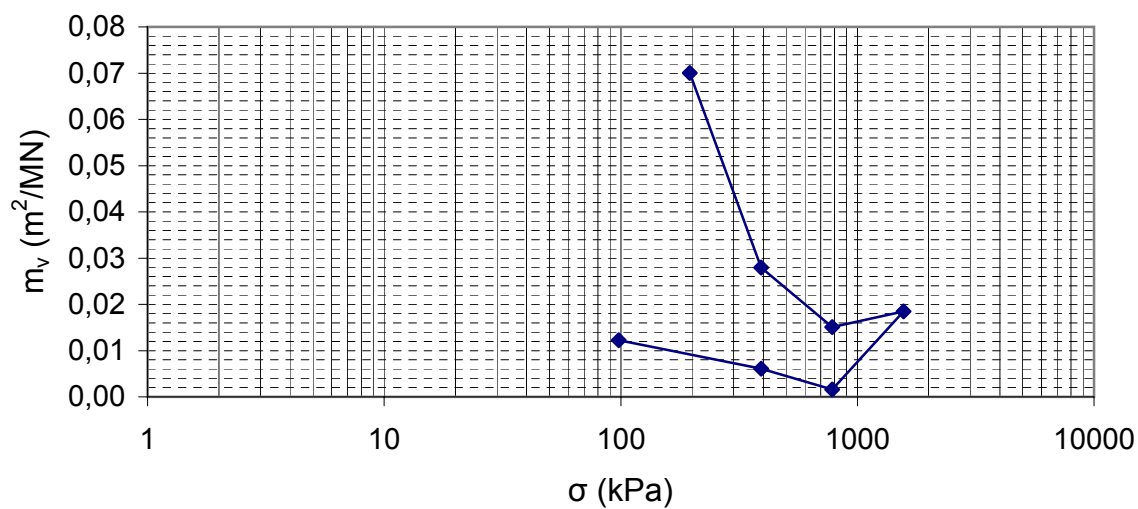
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1



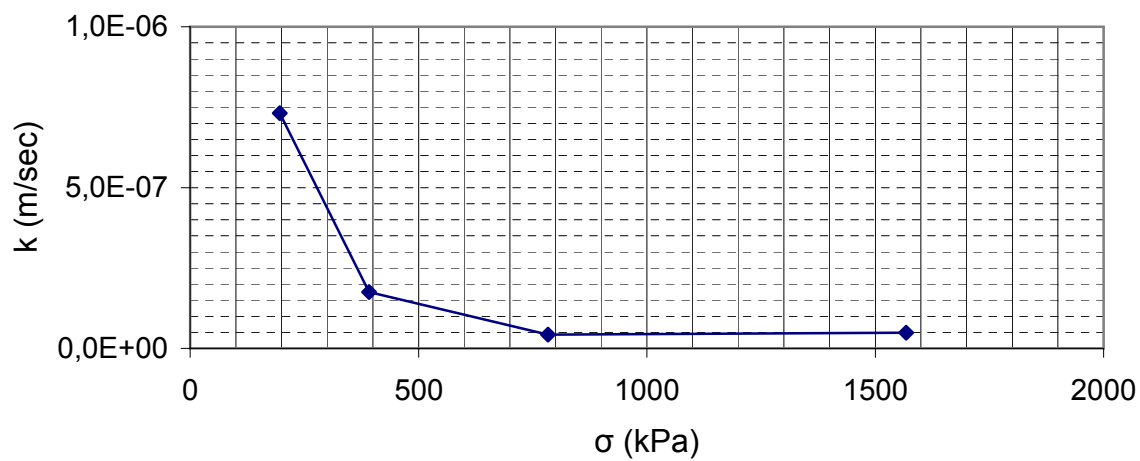
Τιμές c_v



Τιμές m_v



Τιμές k με βάση τις τιμές c_v

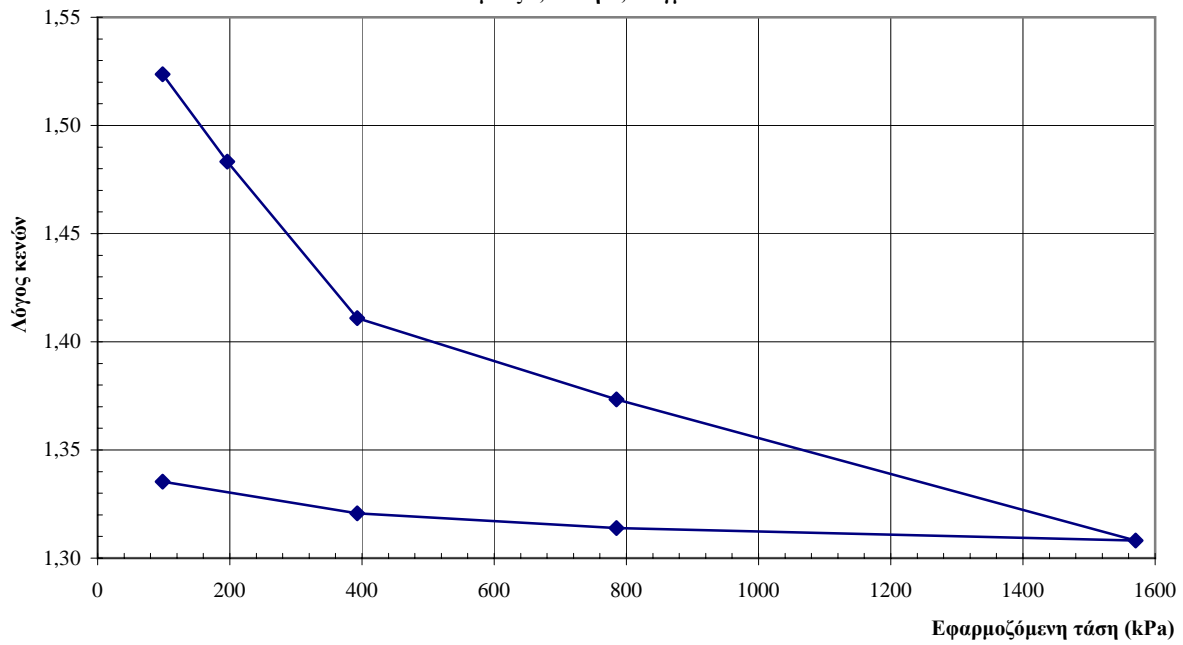


[illegible]

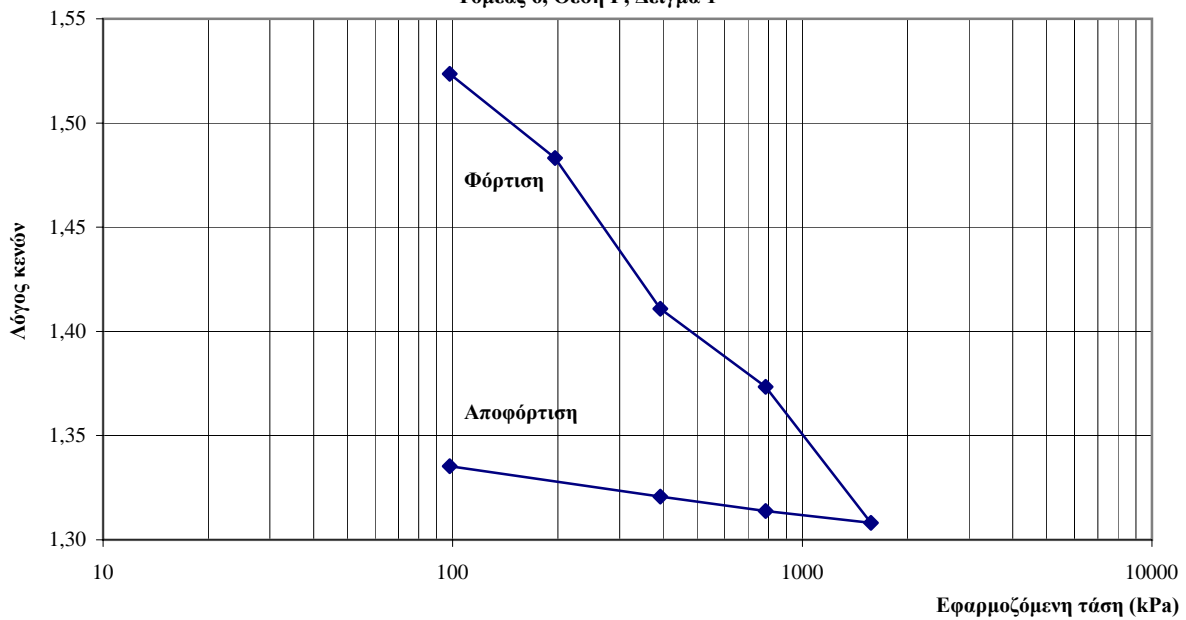
Φόρτιση

Φορτίο 2 Kg				Φορτίο 4 Kg				Φορτίο 8 Kg				Φορτίο 16 Kg				Φορτίο 32 Kg			
Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 20 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 40 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 80 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 160 Kg		Χρόνος		Πραγμ. Φορτ. 320 Kg	
φόρτισης		Τάση 98,15 kPa		φόρτισης		Τάση 196,30 kPa		φόρτισης		Τάση 392,60 kPa		φόρτισης		Τάση 785,19 kPa		φόρτισης		Τάση 1570,39 kPa	
(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ενδειξη	Υπολ. (mm)
0,0000	0,00	0,000	0,000	0,0000	0,00	0,950	0,950	0,0000	0,00	1,258	1,258	0,0000	0,00	1,810	1,810	0,0000	0,00	2,096	2,096
0,0167	0,13	0,172	0,172	0,0167	0,13	1,114	1,114	0,0167	0,13	1,282	1,282	0,0167	0,13	1,810	1,810	0,0167	0,13	2,102	2,102
0,0333	0,18	0,302	0,302	0,0333	0,18	1,114	1,114	0,0333	0,18	1,478	1,478	0,0333	0,18	1,890	1,890	0,0333	0,18	2,102	2,102
0,0500	0,22	0,478	0,478	0,0500	0,22	1,190	1,190	0,0500	0,22	1,646	1,646	0,0500	0,22	1,962	1,962	0,0500	0,22	2,158	2,158
0,0667	0,26	0,478	0,478	0,0667	0,26	1,194	1,194	0,0667	0,26	1,646	1,646	0,0667	0,26	1,996	1,996	0,0667	0,26	2,206	2,206
0,0833	0,29	0,650	0,650	0,0833	0,29	1,194	1,194	0,0833	0,29	1,722	1,722	0,0833	0,29	2,002	2,002	0,0833	0,29	2,274	2,274
0,1000	0,32	0,826	0,826	0,1000	0,32	1,196	1,196	0,1000	0,32	1,734	1,734	0,1000	0,32	2,004	2,004	0,1000	0,32	2,288	2,288
0,2000	0,45	0,902	0,902	0,2000	0,45	1,218	1,218	0,2000	0,45	1,742	1,742	0,2000	0,45	2,012	2,012	0,2000	0,45	2,318	2,318
0,4000	0,63	0,904	0,904	0,4000	0,63	1,222	1,222	0,4000	0,63	1,748	1,748	0,4000	0,63	2,018	2,018	0,4000	0,63	2,340	2,340
0,8000	0,89	0,908	0,908	0,8000	0,89	1,226	1,226	0,8000	0,89	1,754	1,754	0,8000	0,89	2,022	2,022	0,8000	0,89	2,358	2,358
1,0000	1,00	0,910	0,910	1,0000	1,00	1,226	1,226	1,0000	1,00	1,754	1,754	1,0000	1,00	2,026	2,026	1,0000	1,00	2,362	2,362
2,0000	1,41	0,912	0,912	2,0000	1,41	1,228	1,228	2,0000	1,41	1,760	1,760	2,0000	1,41	2,030	2,030	2,0000	1,41	2,382	2,382
4,0000	2,00	0,918	0,918	4,0000	2,00	1,230	1,230	4,0000	2,00	1,762	1,762	4,0000	2,00	2,038	2,038	4,0000	2,00	2,402	2,402
8,0000	2,83	0,922	0,922	8,0000	2,83	1,232	1,232	8,0000	2,83	1,766	1,766	8,0000	2,83	2,042	2,042	8,0000	2,83	2,422	2,422
10,0000	3,16	0,922	0,922	10,0000	3,16	1,234	1,234	10,0000	3,16	1,768	1,768	10,0000	3,16	2,044	2,044	10,0000	3,16	2,426	2,426
20,0000	4,47	0,926	0,926	20,0000	4,47	1,234	1,234	20,0000	4,47	1,772	1,772	20,0000	4,47	2,050	2,050	20,0000	4,47	2,446	2,446
40,0000	6,32	0,930	0,930	40,0000	6,32	1,238	1,238	40,0000	6,32	1,776	1,776	40,0000	6,32	2,056	2,056	40,0000	6,32	2,466	2,466
80,0000	8,94	0,934	0,934	80,0000	8,94	1,238	1,238	80,0000	8,94	1,782	1,782	80,0000	8,94	2,062	2,062	80,0000	8,94	2,486	2,486
100,0000	10,00	0,934	0,934	100,0000	10,00	1,240	1,240	100,0000	10,00	1,782	1,782	100,0000	10,00	2,062	2,062	100,0000	10,00	2,494	2,494
200,0000	14,14	0,938	0,938	200,0000	14,14	1,242	1,242	200,0000	14,14	1,786	1,786	200,0000	14,14	2,070	2,070	200,0000	14,14	2,516	2,516
400,0000	20,00	0,942	0,942	400,0000	20,00	1,246	1,246	400,0000	20,00	1,790	1,790	400,0000	20,00	2,078	2,078	400,0000	20,00	2,542	2,542
800,0000	28,28	0,942	0,942	800,0000	28,28	1,250	1,250	800,0000	28,28	1,798	1,798	800,0000	28,28	2,086	2,086	800,0000	28,28	2,566	2,566
1200,0000	34,64	0,946	0,946	1200,0000	34,64	1,252	1,252	1200,0000	34,64	1,802	1,802	1200,0000	34,64	2,090	2,090	1200,0000	34,64	2,580	2,580
1500,0000	38,73	0,950	0,950	1345,0000	36,67	1,258	1,258	1440,0000	37,95	1,810	1,810	1425,0000	37,75	2,096	2,096	1500,0000	38,73	2,594	2,594

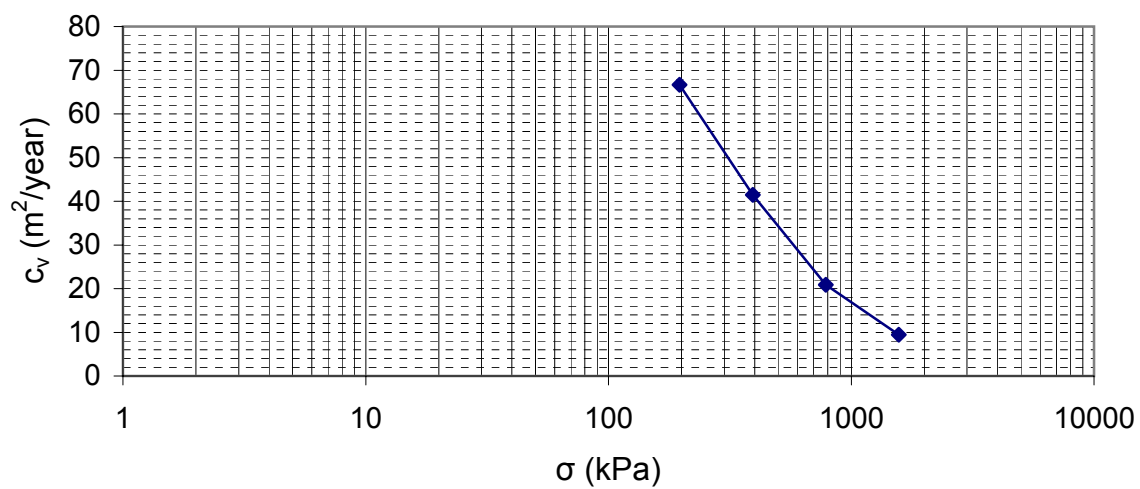
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1



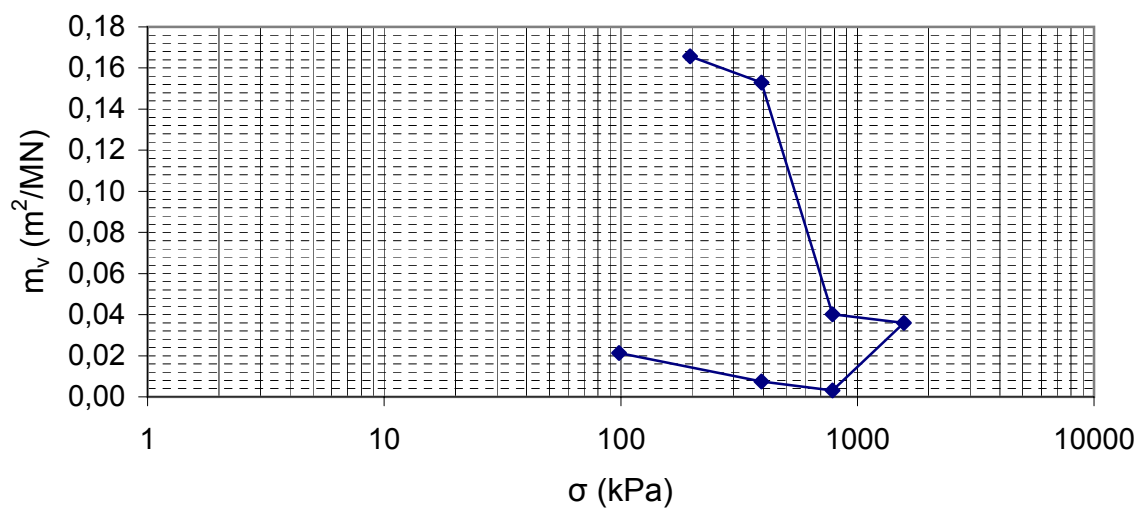
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1



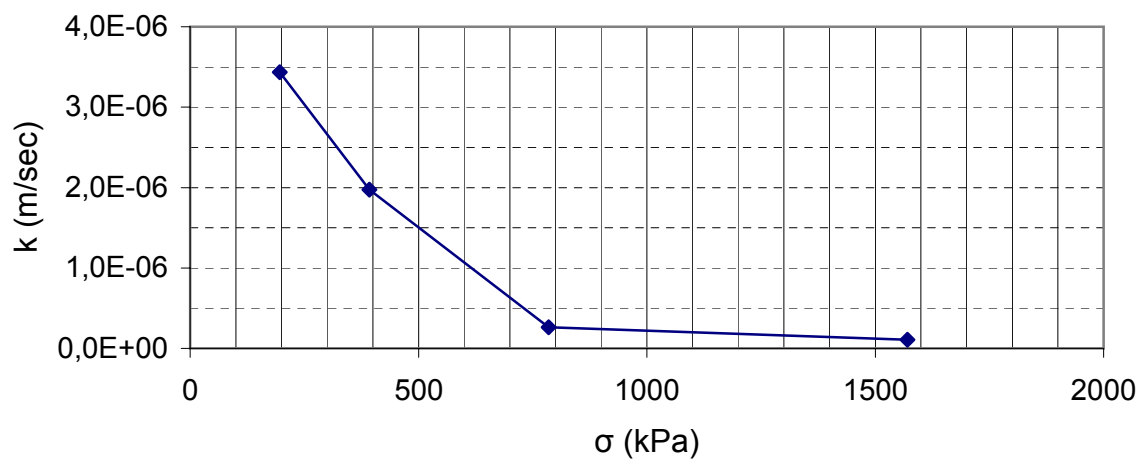
Τιμές c_v



Τιμές m_v

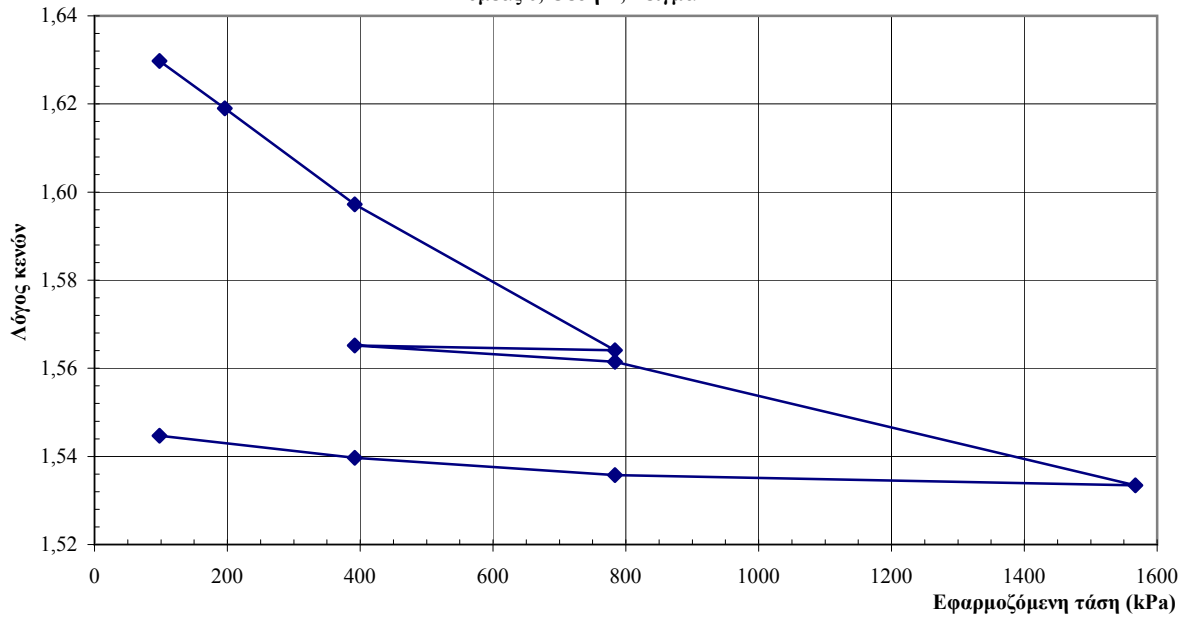


Τιμές k με βάση τις τιμές c_v

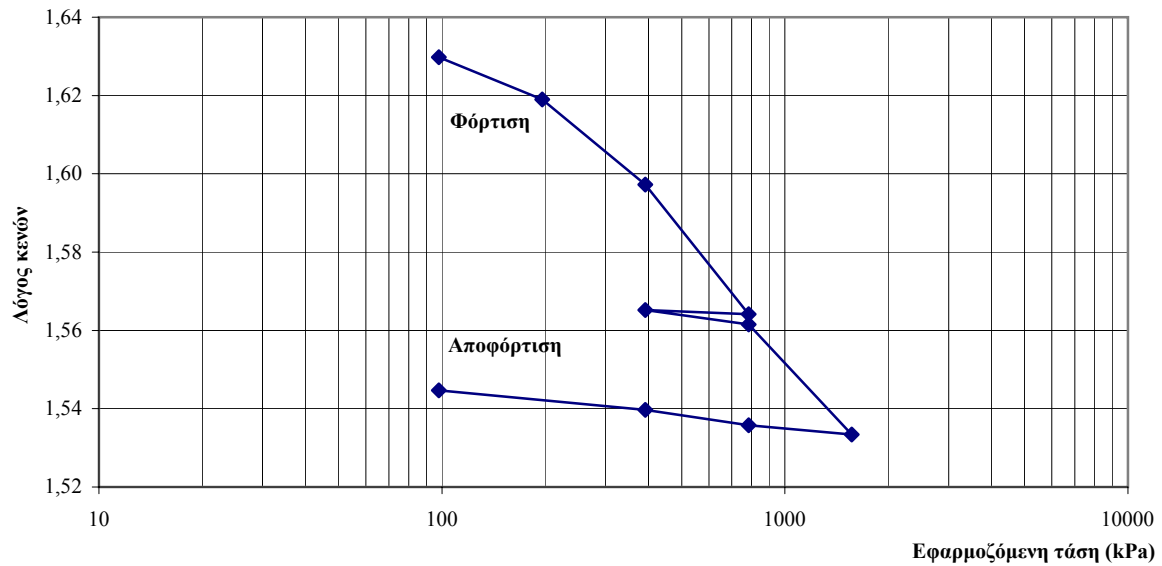


[illegible]

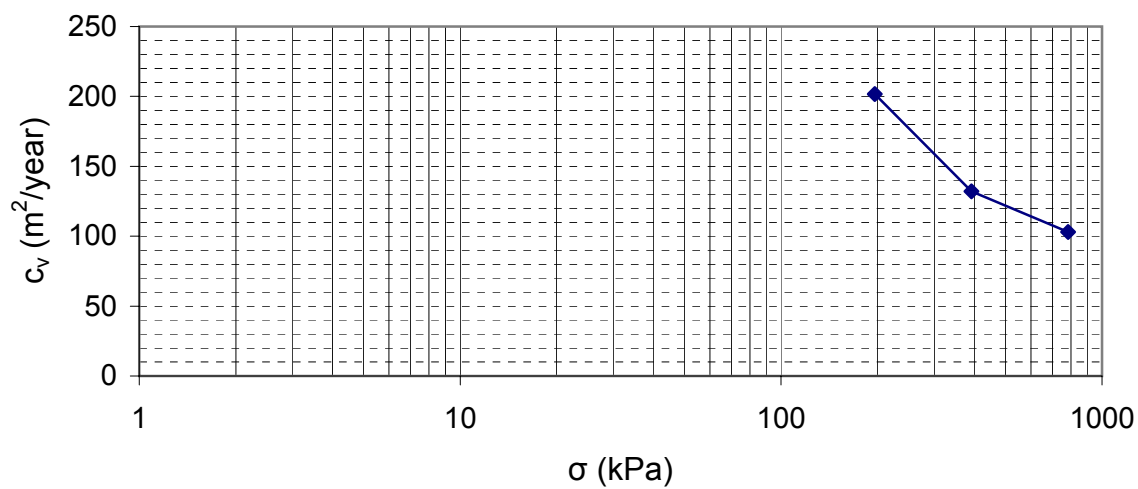
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2'



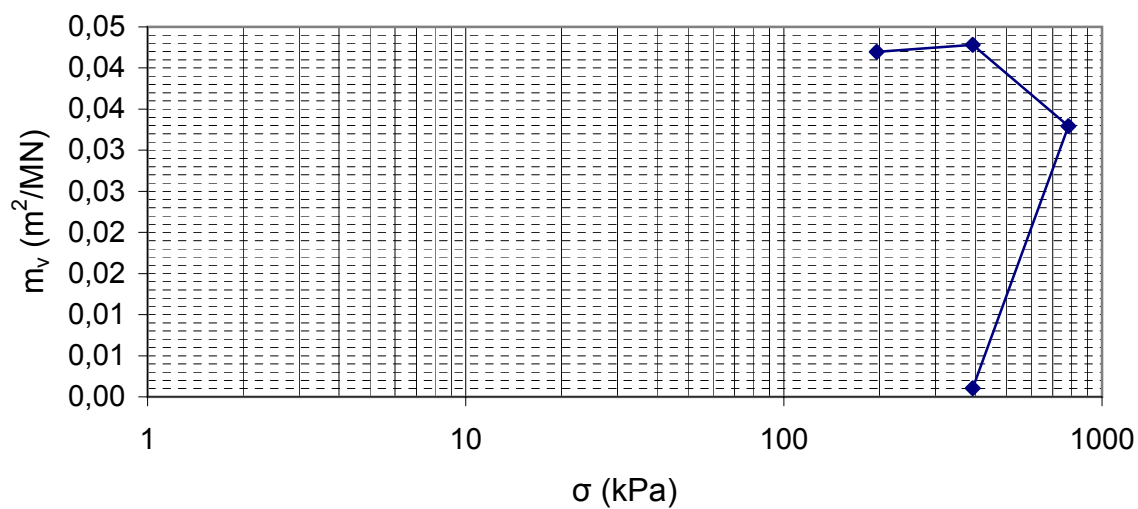
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2'



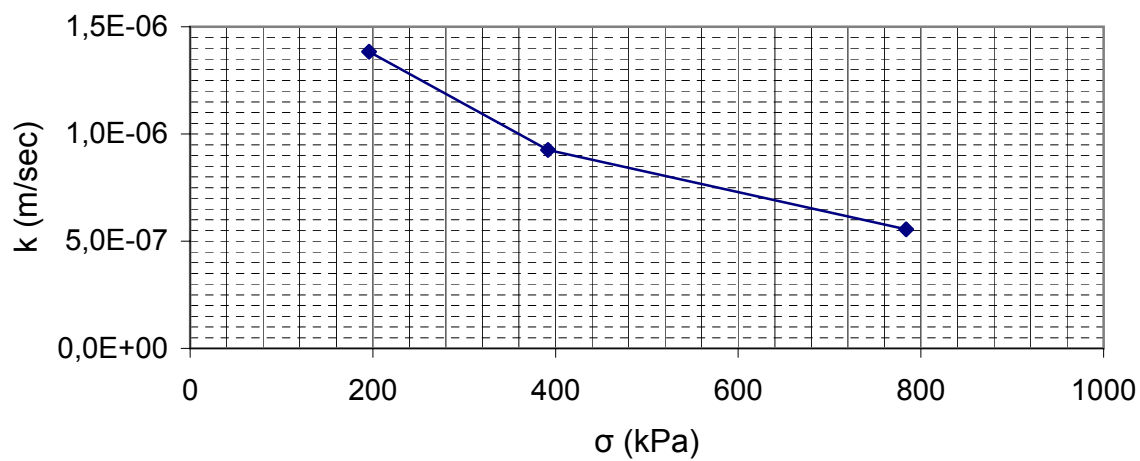
Τιμές c_v



Τιμές m_v



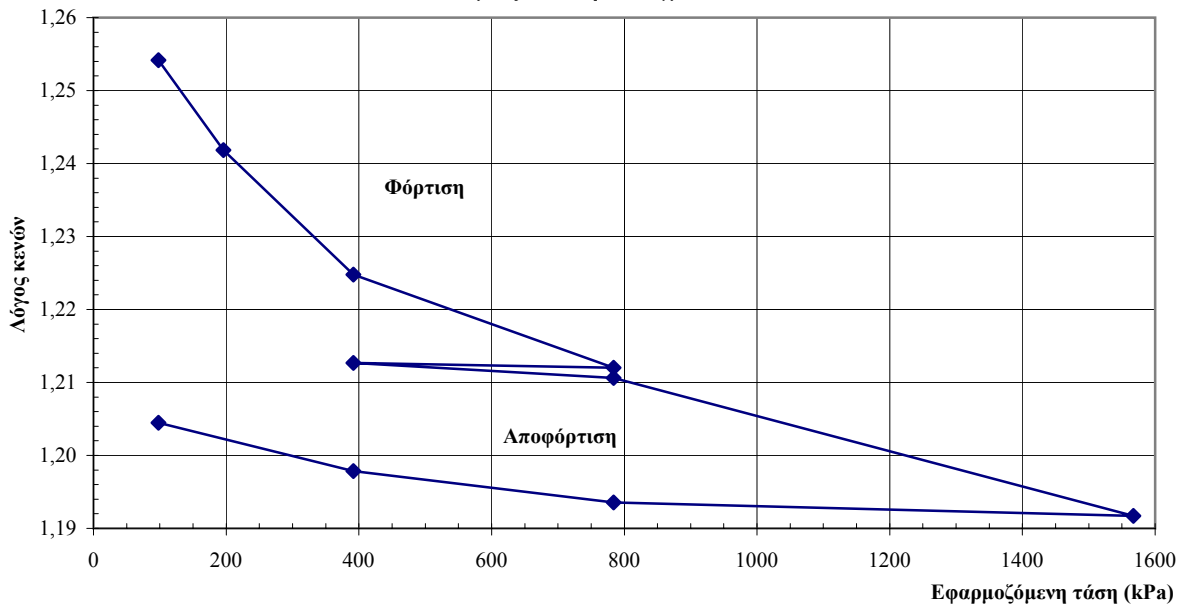
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



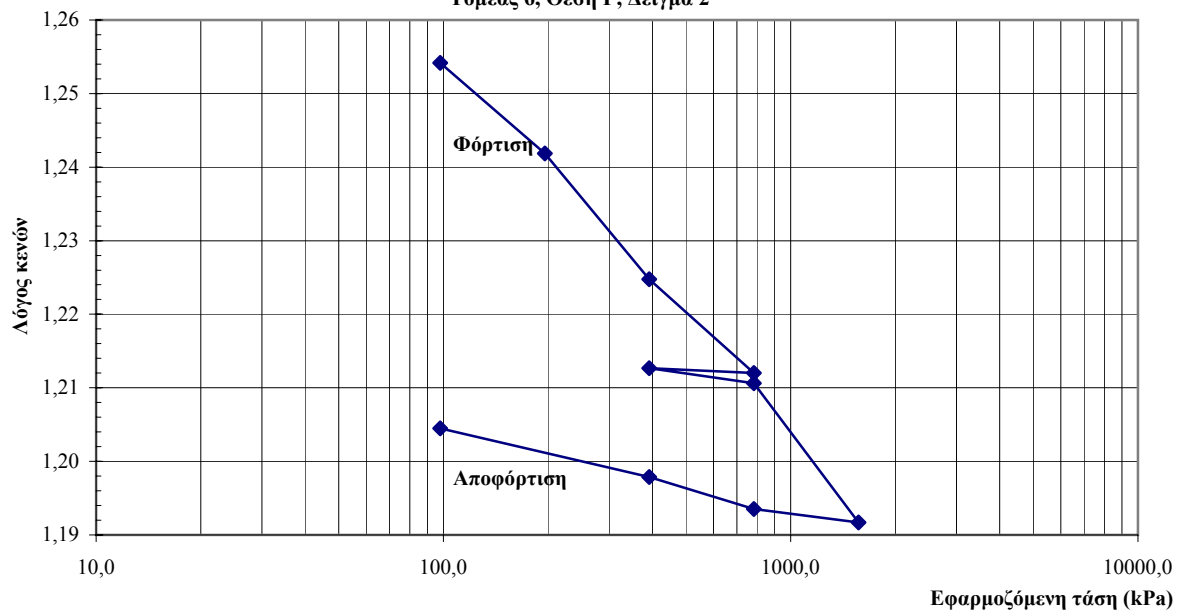
Δοκίμιο 2: Παρόλληλο στη στρώση			TOMEAS:		6		Τάση P (kPa)		ΔH (mm)		Δε=ΔH/HS		ε=ε _o -Δε		Τάση P (kPa)		ε		Δε		ΔP (kPa)		E (kN/m ³)		Cc		α _v (m ² /kN)		m _v (m ² /MN)		Pc	
Διάμ. δοκμ. D (mm):			50,50		ΘΕΣΗ:		Γ		97,95		0,218		0,025		1,254		97,95		0,011		-		-		-		-		-		-	
Ύψος δοκιμίου H _o (mm):			20,00		ΔΕΙΓΜΑ:		2'		195,91		0,326		0,037		1,242		195,91		0,016		0,005		97,95		18139,8		0,041		1,26E-04		0,056	
Επιφ. δοκιμίου A (mm ²):			2002,96						391,82		0,476		0,054		1,225		391,82		0,024		0,008		195,91		26121,3		0,057		8,72E-05		0,039	
Όγκος δοκιμίου (mm ³):			40059,23						783,64		0,588		0,067		1,212		783,64		0,029		0,006		391,82		69967,8		0,042		3,26E-05		0,015	
Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων H _s (mm):			8,78		Αρχ. μάζα δοκιμίου m _o (g):		61,65		391,82		0,582		0,066		1,213		391,82		0,029		0,000		-391,82		1306065,9		0,002		1,74E-06		0,001	
Αρχική υγρασία w _i (%):			35,94		Τελ. μάζα δοκιμίου m _f (g):		67,70		783,64		0,600		0,068		1,211		783,64		0,030		0,001		391,82		435355,3		0,007		5,23E-06		0,002	
Τελική υγρασία w _f (%):			49,28		Ξηρή μάζα δοκιμίου m _d (g):		45,35		1567,28		0,766		0,087		1,192		1567,28		0,038		0,009		783,64		88049,4		0,067		2,59E-05		0,012	
Πυκν. νερού ρ _w (Mg/m ³):			1,00		Ειδ. βάρ. κόκκων G _s :		2,58		783,64		0,750		0,085		1,194		783,64		0,038		-0,001		-783,64		979549,5		0,006		2,33E-06		0,001	
Αρχικός λόγος κενών e _o :			1,279		Αρχ. βαθμ. κορεσμού S _r :		72,50%		391,82		0,712		0,081		1,198		391,82		0,036		-0,002		-391,82		206220,9		0,014		1,11E-05		0,005	
Φαν. βάρος εδάφους γ (kN/m ³):			15,10		Τελ. βαθμ. κορεσμού S _r :		99,41%		97,95		0,654		0,075		1,204		97,95		0,033		-0,003		-293,86		101332,7		0,011		2,25E-05		0,010	
Κορ. φαν. βάρ. εδάφους γ _{sat} (kN/m ³):			16,61																													

[illegible]

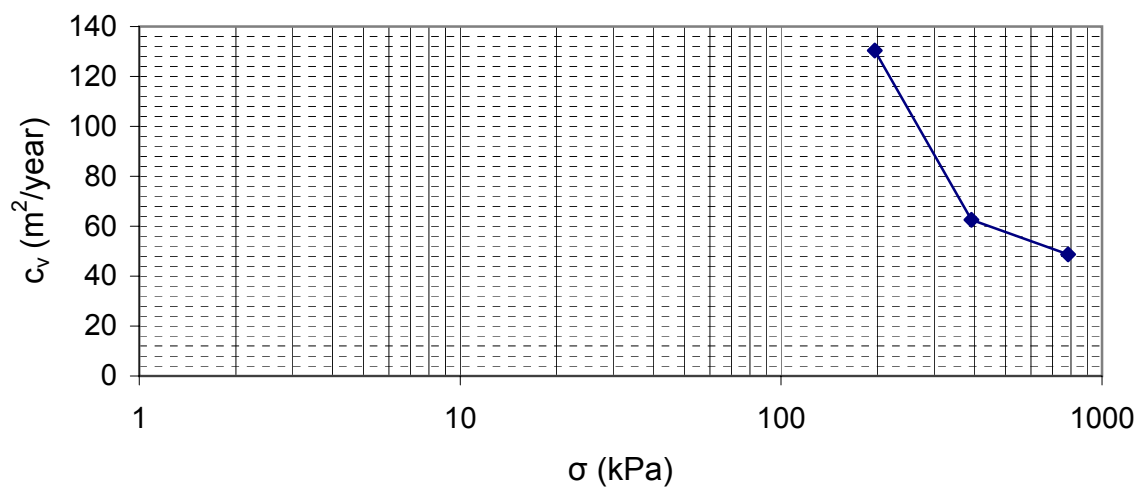
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2'



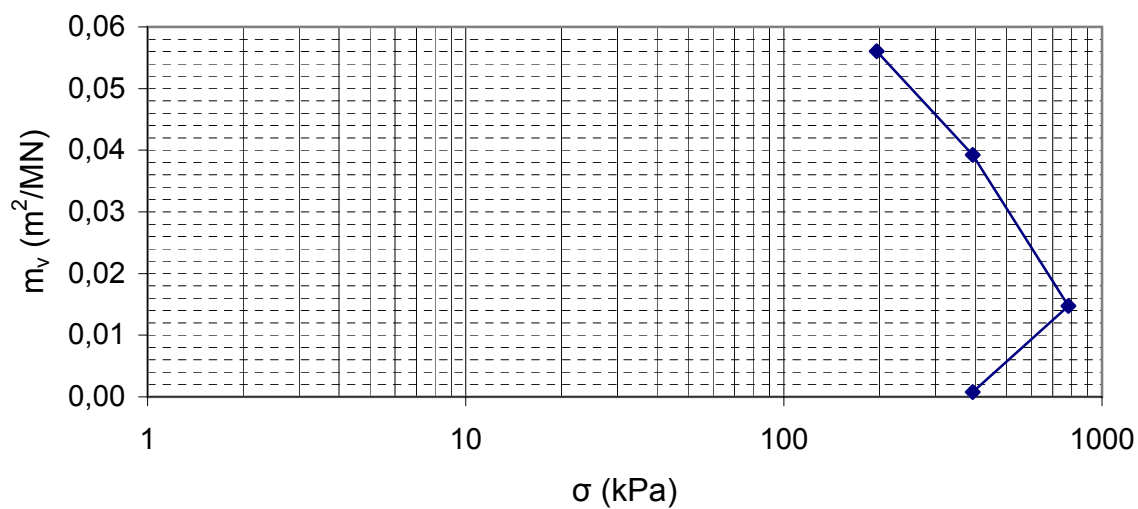
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2'



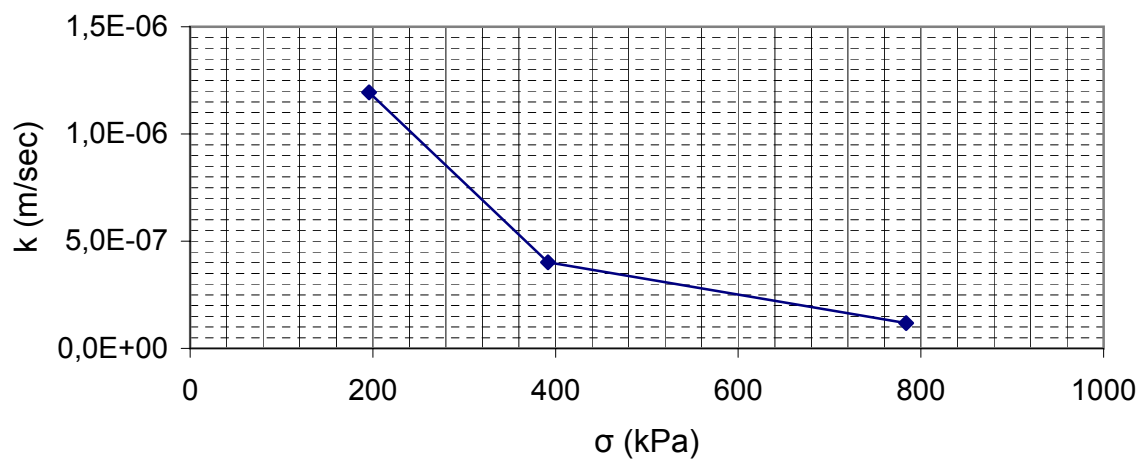
Τιμές c_v



Τιμές m_v



Τιμές k με βάση τις τιμές c_v

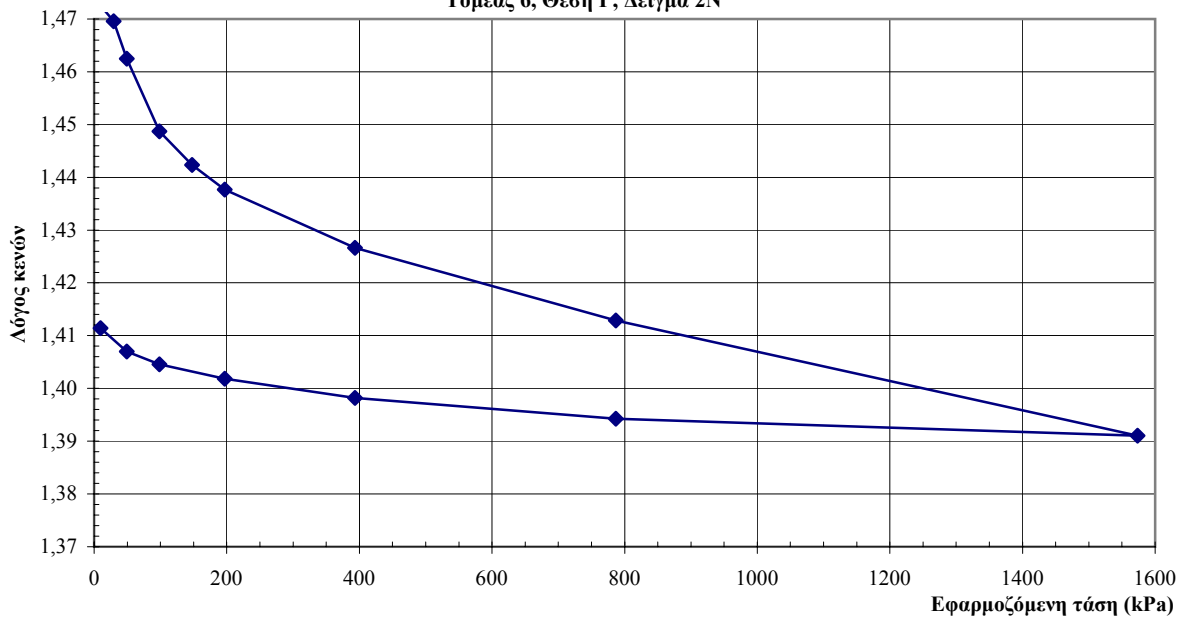


[illegible]

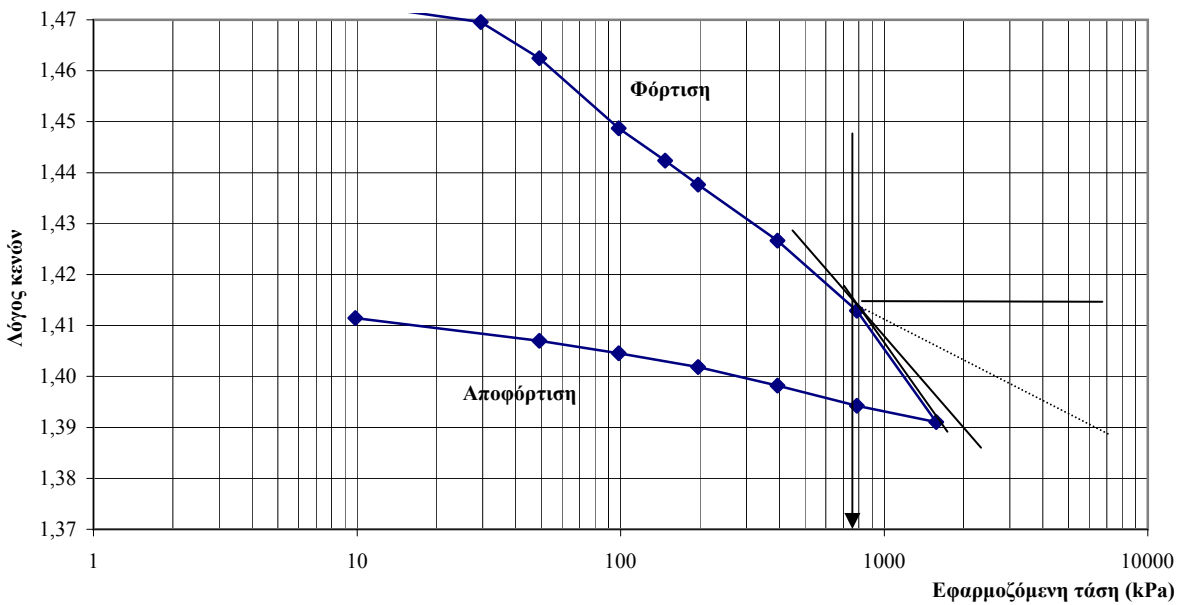
Φορτίο (Kg): 3				Φορτίο (Kg): 4				Φορτίο (Kg): 8				Φορτίο (Kg): 16				Φορτίο (Kg): 32			
Χρόνος		Φόρτιση (Kg)	30	Χρόνος		Φόρτιση (Kg)	40	Χρόνος		Φόρτιση (Kg)	80	Χρόνος		Φόρτιση (Kg)	160	Χρόνος		Φόρτιση (Kg)	320
φόρτισης		Τάση (kPa):	147,516	αποφόρτισης		Τάση (kPa):	196,688	αποφόρτισης		Τάση (kPa):	393,376	αποφόρτισης		Τάση (kPa):	786,752	αποφόρτισης		Τάση (kPa):	1573,505
(min)	sqrt(t)	Ένδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ένδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ένδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ένδειξη	Υπολ. (mm)	(min)	sqrt(t)	Ένδειξη	Υπολ. (mm)
0,0000	0,00	0,188	0,188	0,0000	0,00	0,242	0,242	0,0000	0,00	0,278	0,278	0,0000	0,00	0,368	0,368	0,0000	0,00	0,480	0,480
0,0333	0,18	0,208	0,208	0,0333	0,18	0,260	0,260	0,0167	0,13	0,330	0,330	0,0333	0,18	0,434	0,434	0,0333	0,18	0,554	0,554
0,0500	0,22	0,212	0,212	1,0000	1,00	0,264	0,264	0,0333	0,18	0,334	0,334	0,0500	0,22	0,436	0,436	0,0500	0,22	0,564	0,564
0,0667	0,26	0,212	0,212	4,0000	2,00	0,266	0,266	0,0500	0,22	0,336	0,336	0,0667	0,26	0,436	0,436	0,0667	0,26	0,568	0,568
0,0833	0,29	0,212	0,212	10,0000	3,16	0,268	0,268	0,0667	0,26	0,338	0,338	0,0833	0,29	0,438	0,438	0,0833	0,29	0,572	0,572
0,1000	0,32	0,214	0,214	100,0000	10,00	0,270	0,270	0,0833	0,29	0,340	0,340	0,1000	0,32	0,440	0,440	0,1000	0,32	0,574	0,574
0,2000	0,45	0,216	0,216	200,0000	14,14	0,272	0,272	0,1000	0,32	0,340	0,340	0,2000	0,45	0,444	0,444	0,2000	0,45	0,580	0,580
0,4000	0,63	0,218	0,218	800,0000	28,28	0,276	0,276	0,2000	0,45	0,342	0,342	0,4000	0,63	0,448	0,448	0,4000	0,63	0,588	0,588
0,8000	0,89	0,220	0,220	1428,0000	37,79	0,278	0,278	0,4000	0,63	0,344	0,344	1,0000	1,00	0,450	0,450	0,8000	0,89	0,592	0,592
1,0000	1,00	0,220	0,220					0,8000	0,89	0,348	0,348	2,0000	1,41	0,452	0,452	1,0000	1,00	0,598	0,598
2,0000	1,41	0,224	0,224					1,0000	1,00	0,348	0,348	4,0000	2,00	0,456	0,456	2,0000	1,41	0,602	0,602
4,0000	2,00	0,226	0,226					2,0000	1,41	0,348	0,348	8,0000	2,83	0,458	0,458	4,0000	2,00	0,608	0,608
8,0000	2,83	0,228	0,228					4,0000	2,20	0,352	0,352	10,0000	3,16	0,460	0,460	8,0000	2,83	0,612	0,612
10,0000	3,16	0,228	0,228					8,0000	2,83	0,354	0,354	20,0000	4,47	0,462	0,462	10,0000	3,16	0,612	0,612
40,0000	6,32	0,230	0,230					10,0000	3,16	0,356	0,356	40,0000	6,32	0,464	0,464	20,0000	4,47	0,616	0,616
80,0000	8,94	0,232	0,232					40,0000	6,32	0,360	0,360	80,0000	8,94	0,468	0,468	40,0000	6,32	0,622	0,622
100,0000	10,00	0,232	0,232					200,0000	14,14	0,364	0,364	400,0000	20,00	0,472	0,472	80,0000	8,94	0,628	0,628
200,0000	14,14	0,234	0,234					400,0000	20,00	0,366	0,366	800,0000	28,28	0,476	0,476	200,0000	14,14	0,634	0,634
400,0000	20,00	0,236	0,236					800,0000	28,28	0,368	0,368	1200,0000	34,64	0,476	0,476	400,0000	20,00	0,640	0,640
800,0000	28,28	0,238	0,238					1200,0000	34,64	0,368	0,368	1600,0000	40,00	0,478	0,478	800,0000	28,28	0,648	0,648
1200,0000	34,64	0,240	0,240					1415,0000	37,62	0,368	0,368	2000,0000	44,72	0,48	0,480	1200,0000	34,64	0,652	0,652
1403,0000	37,46	0,240	0,240									2365,0000	48,63	0,48	0,480	1600,0000	40,00	0,656	0,656
																1910,0000	43,70	0,658	0,658

[illegible]

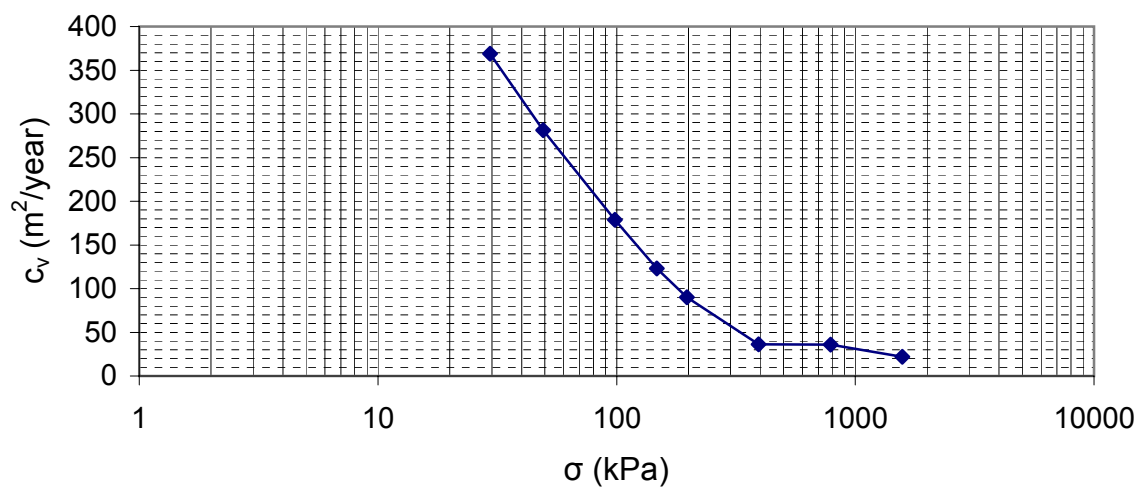
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2N



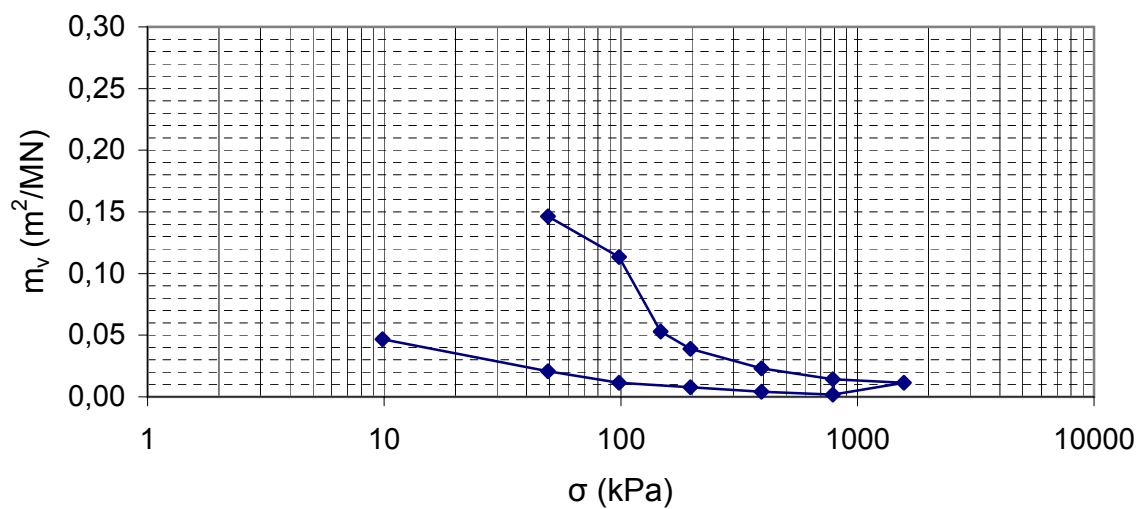
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 2N



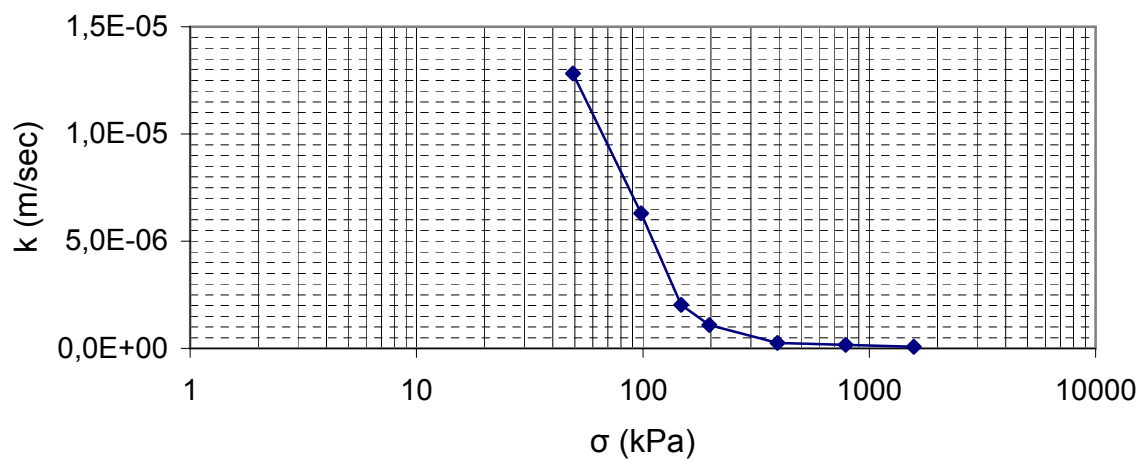
Τιμές c_v



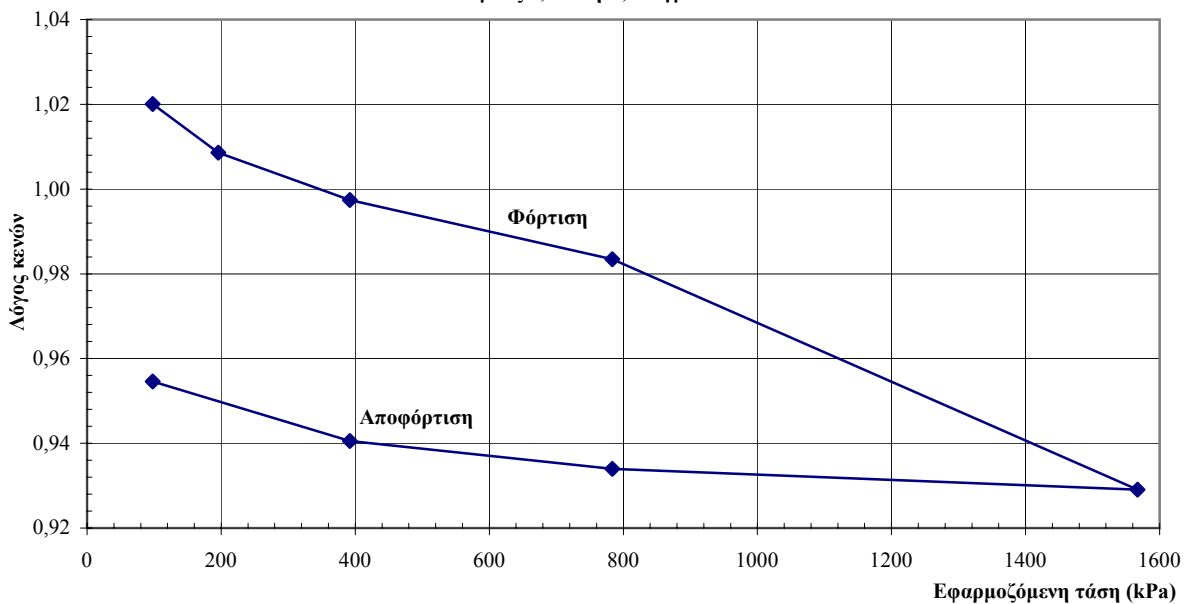
Τιμές m_v



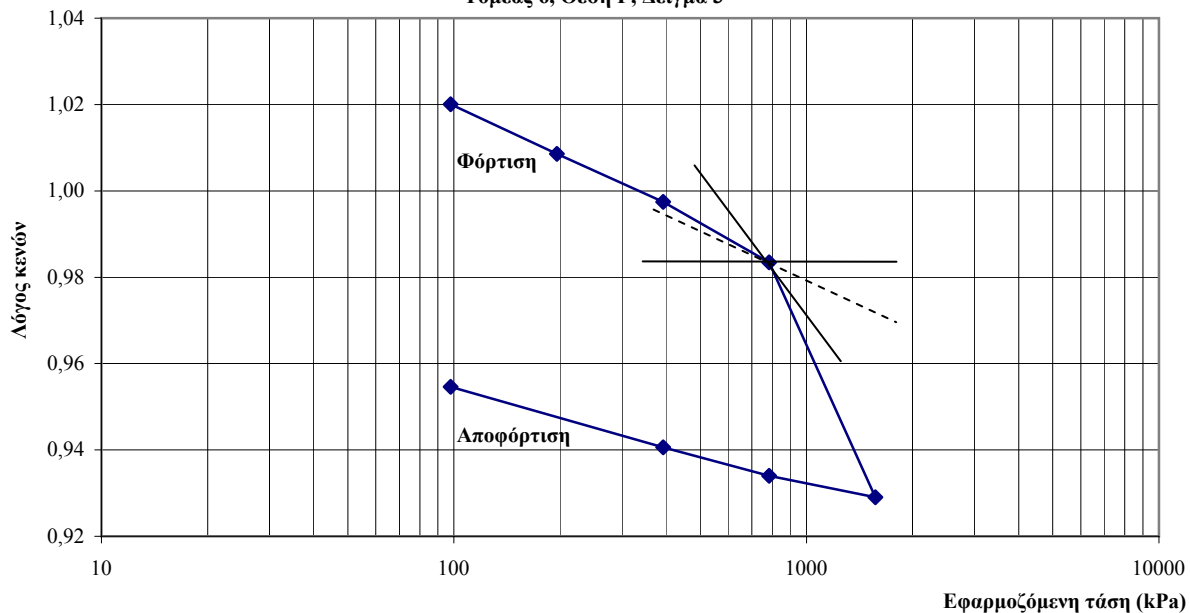
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



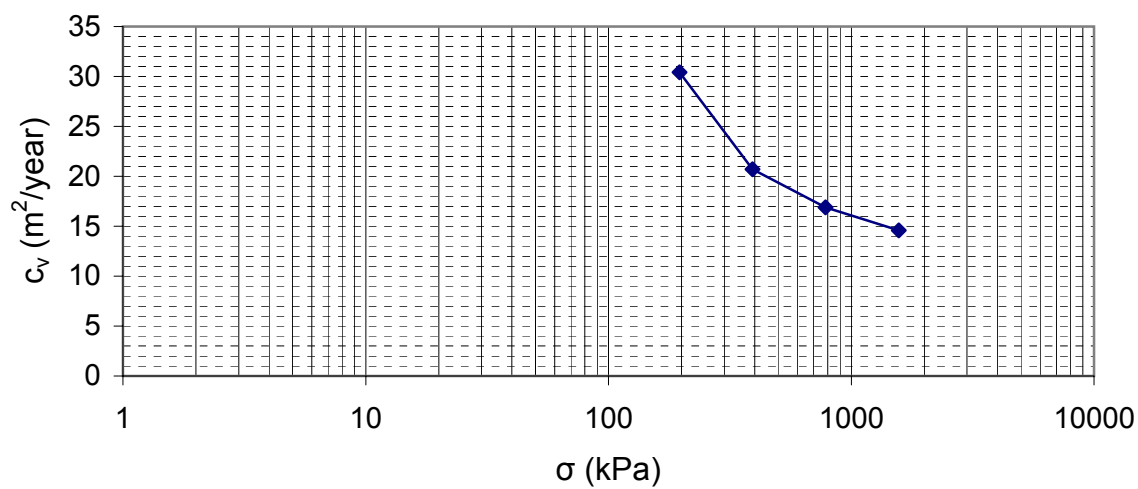
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 3



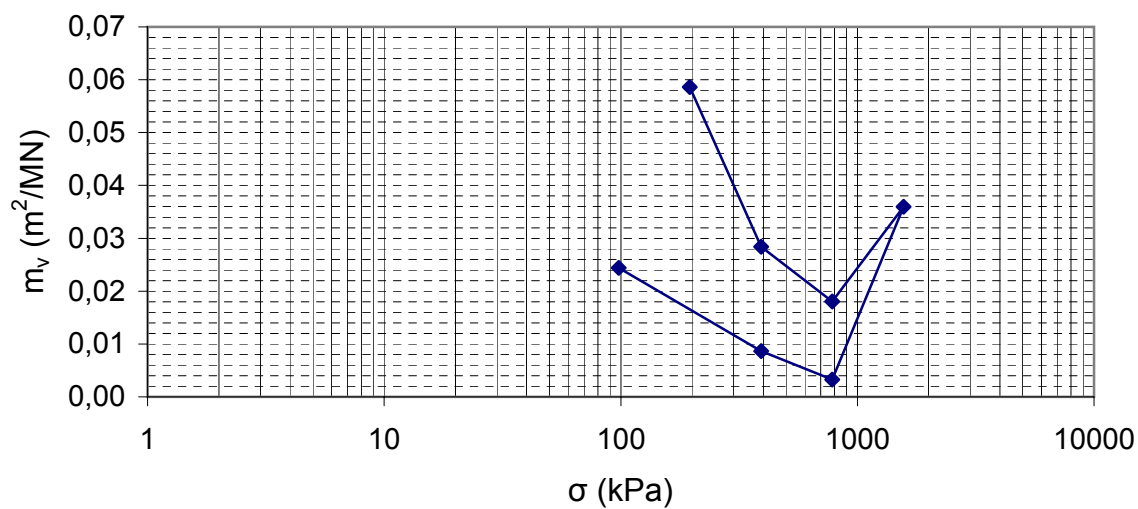
Διάγραμμα λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης
 Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση
 Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 3



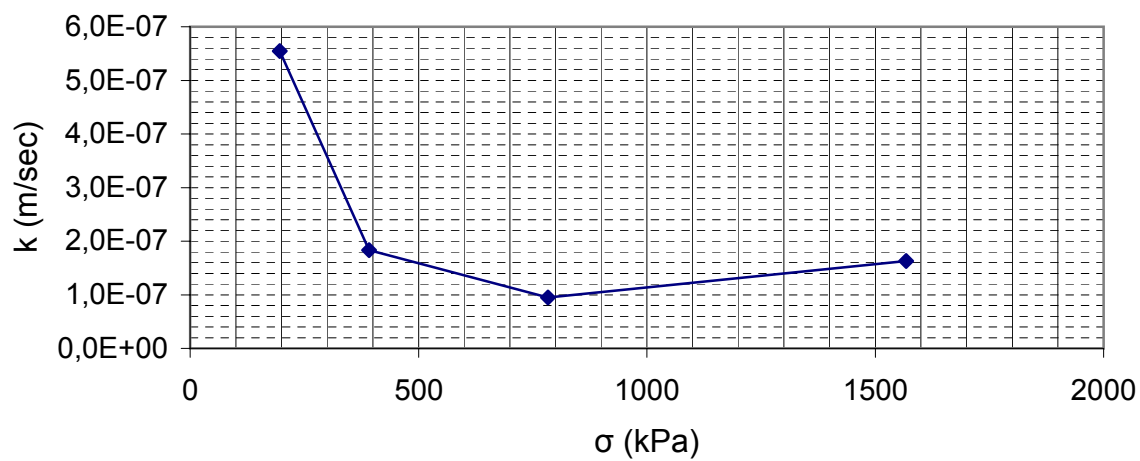
Τιμές c_v



Τιμές m_v



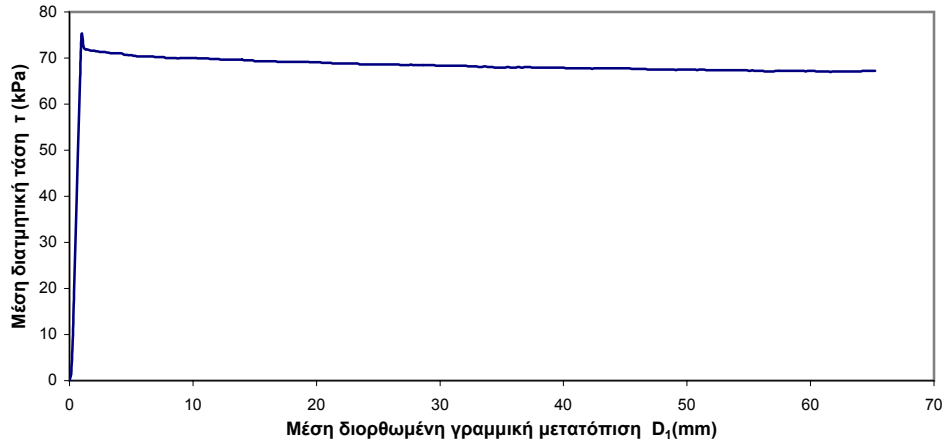
Τιμές k με βάση τις τιμές c_v



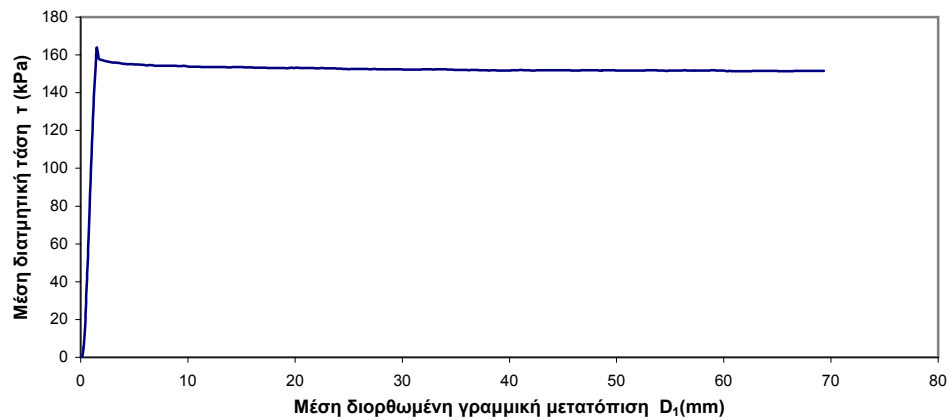
**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ
ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ**

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

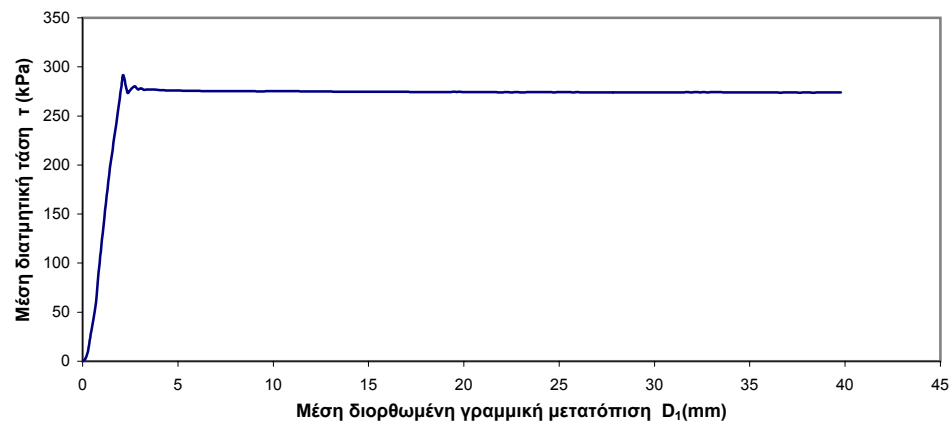
Δείγμα : Α1



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

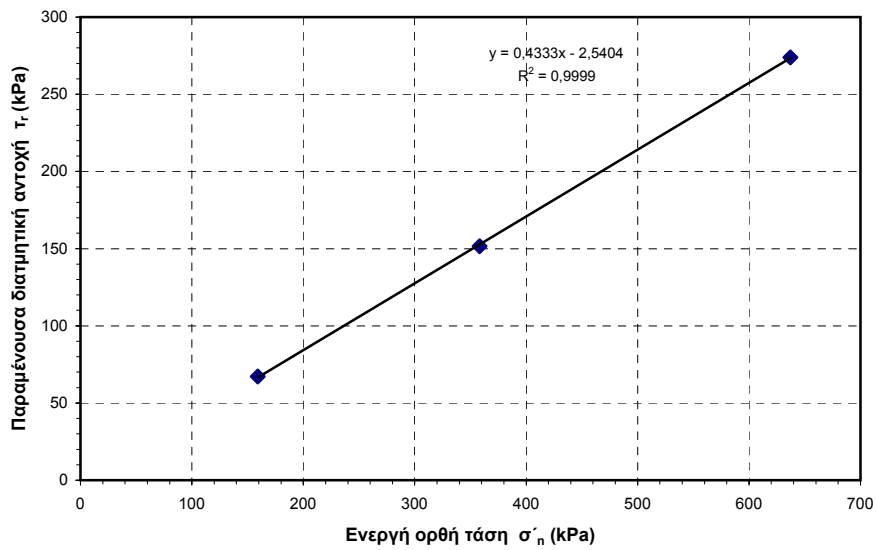
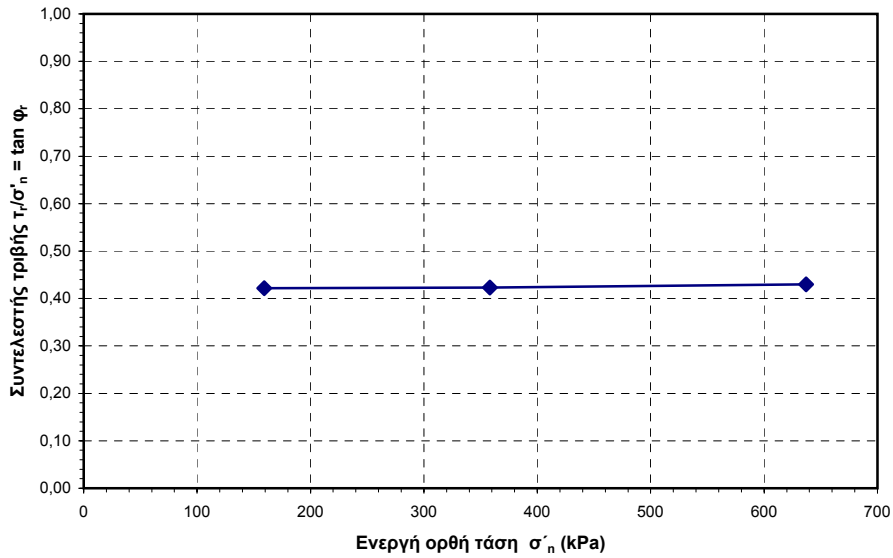


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 90
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



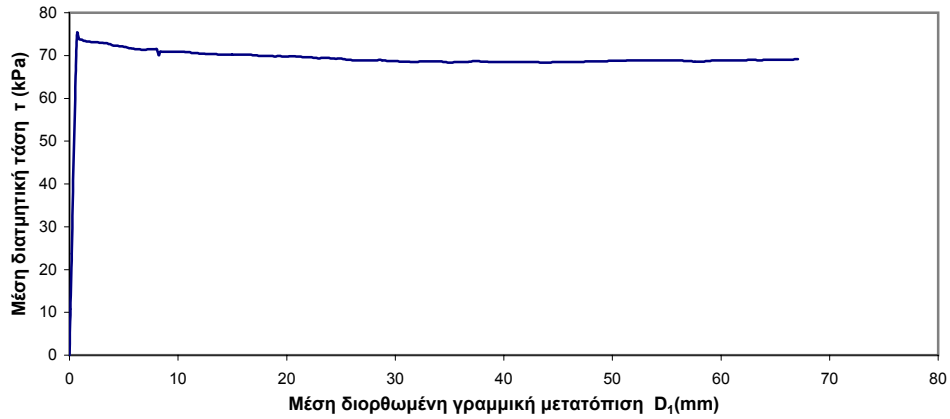
Δείγμα : A1

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	67,16	0,422
2	80	318,51	151,52	0,476
3	160	637,01	273,97	0,430

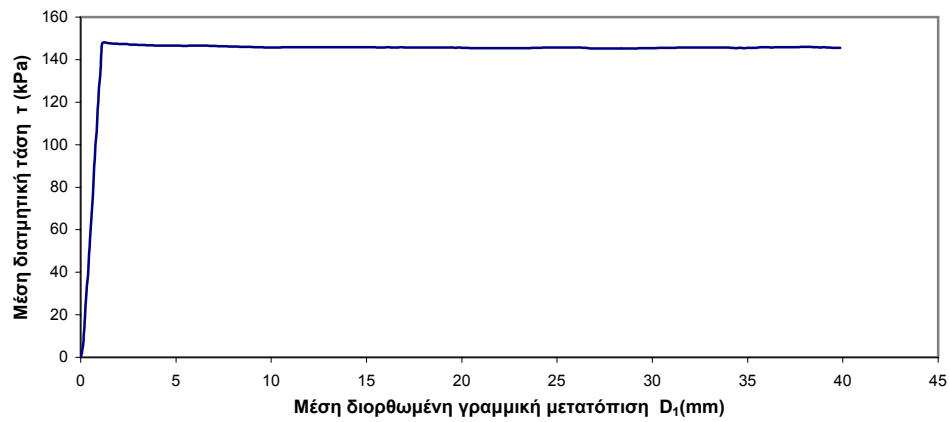
$c'_r =$	5,94	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	23,07		23,67	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Δείγμα : A2



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

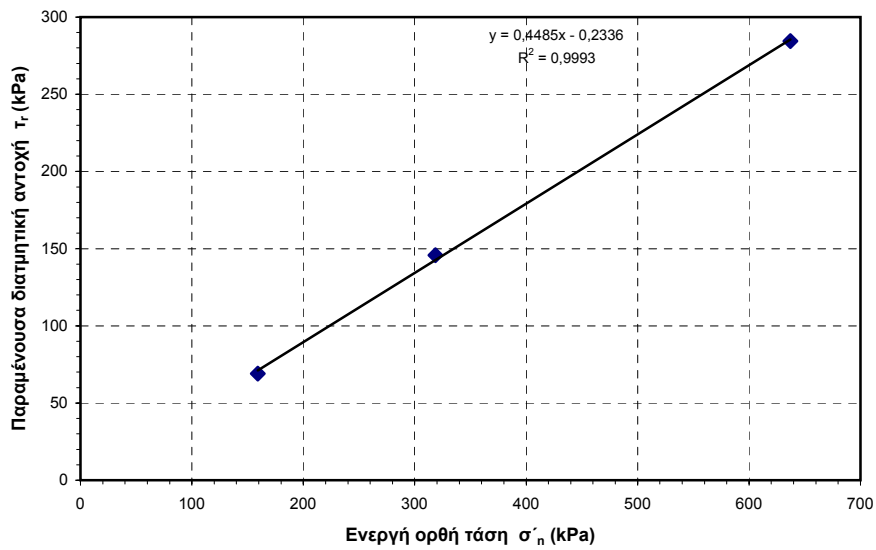
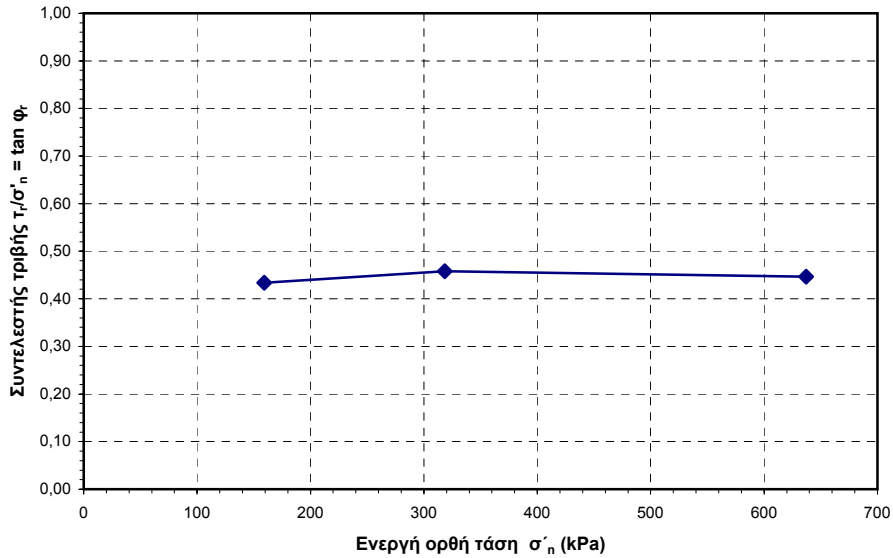


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



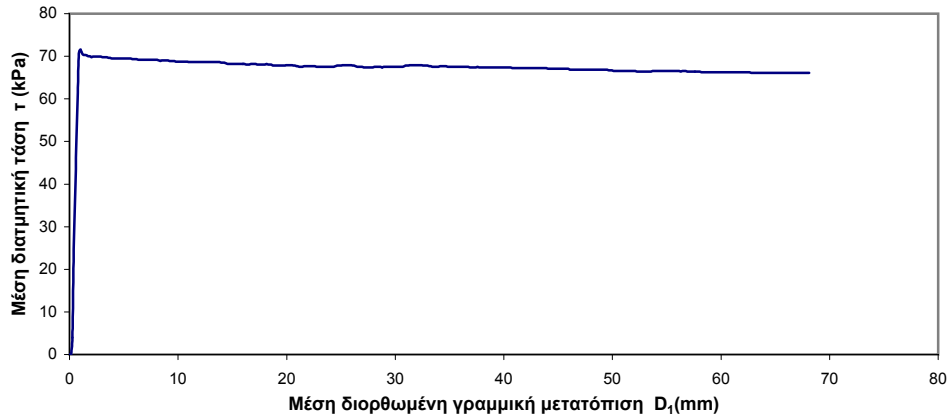
Δείγμα : A2

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	69,05	0,434
2	80	318,51	145,81	0,458
3	160	637,01	284,39	0,446

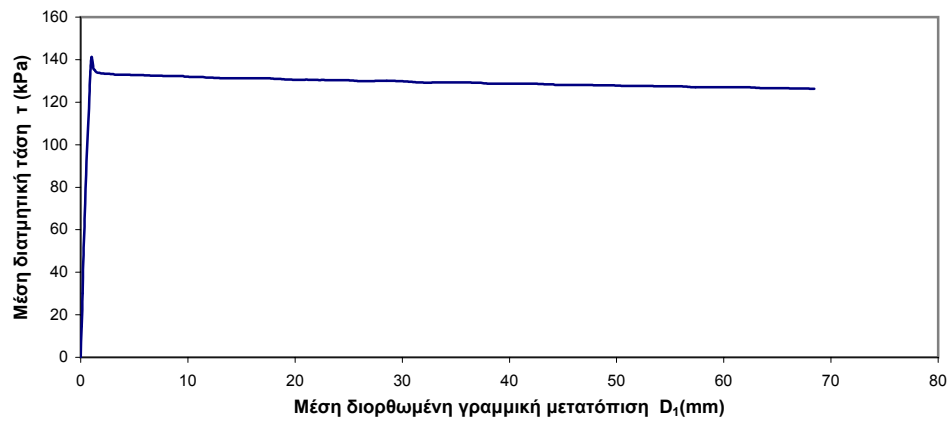
$c'_r =$	-0,23	ή	0 kPa
$\phi'_r =$	24,16		24,13 deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

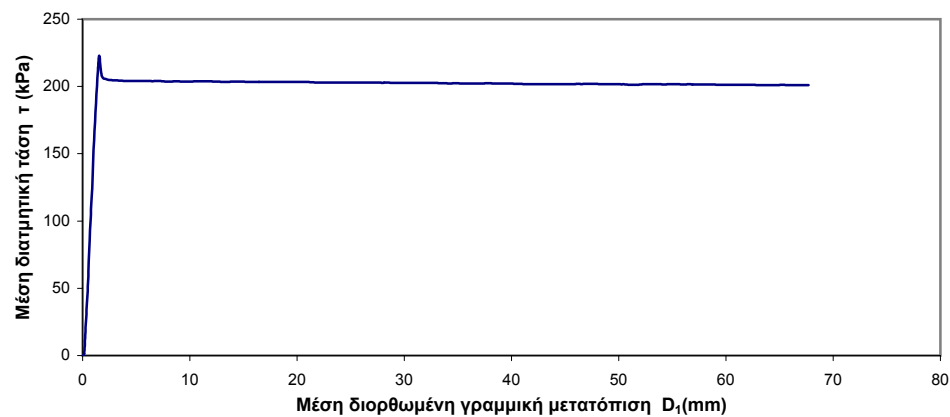
Δείγμα : A3



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048



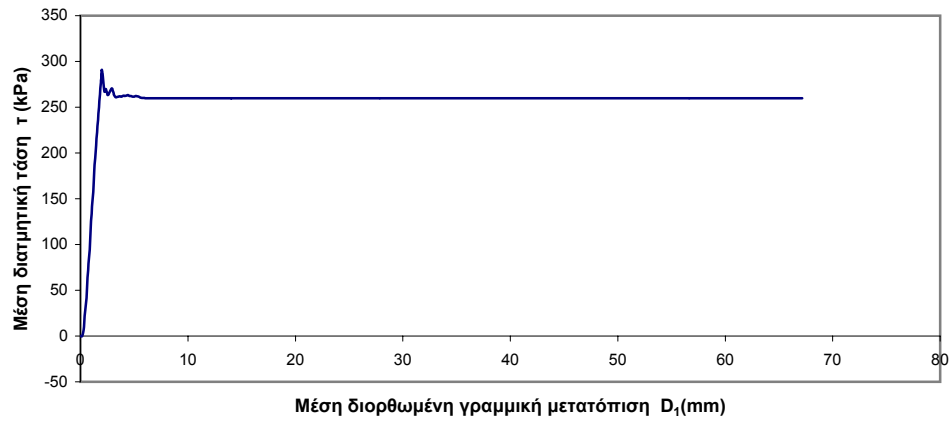
ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 120
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048

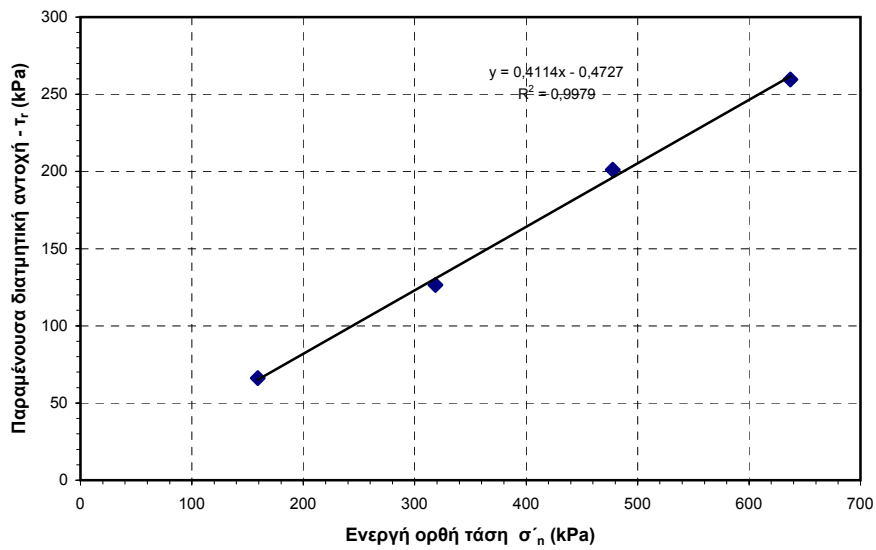
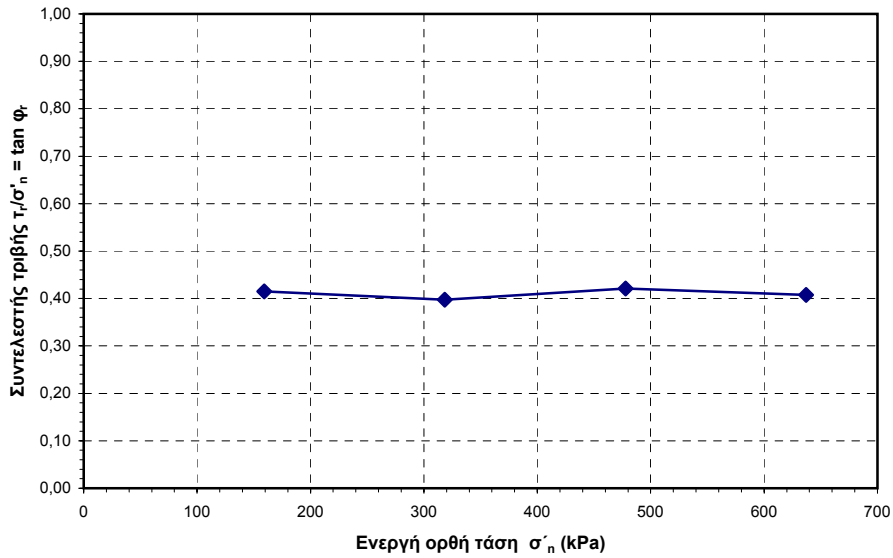
ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Δείγμα : A3



ΦΑΣΗ 4η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



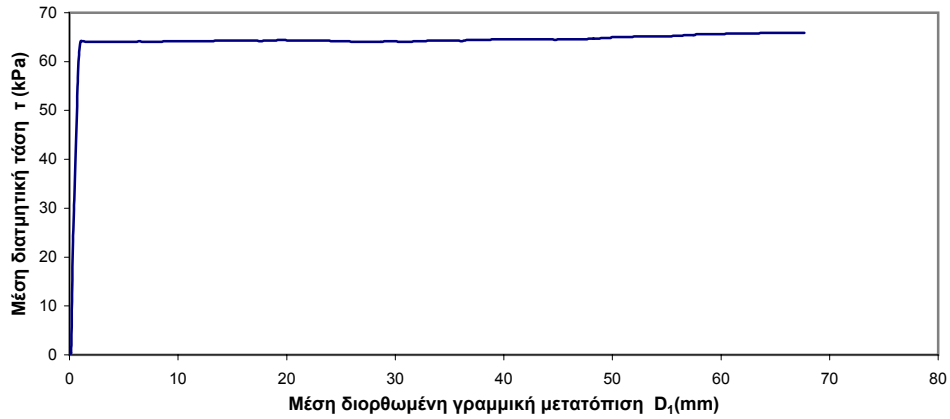
Δείγμα : A3

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	66,10	0,415
2	80	318,51	126,51	0,397
3	160	637,01	259,66	0,408

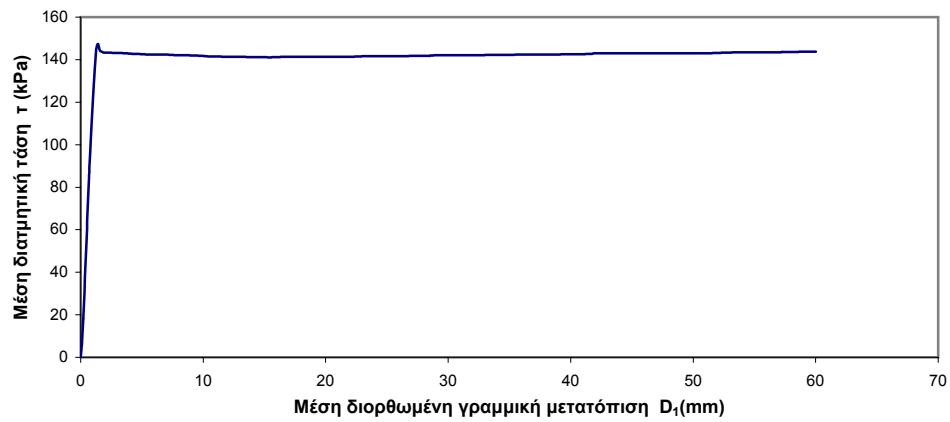
$c'_r =$	-0,47	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	22,15		22,10	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

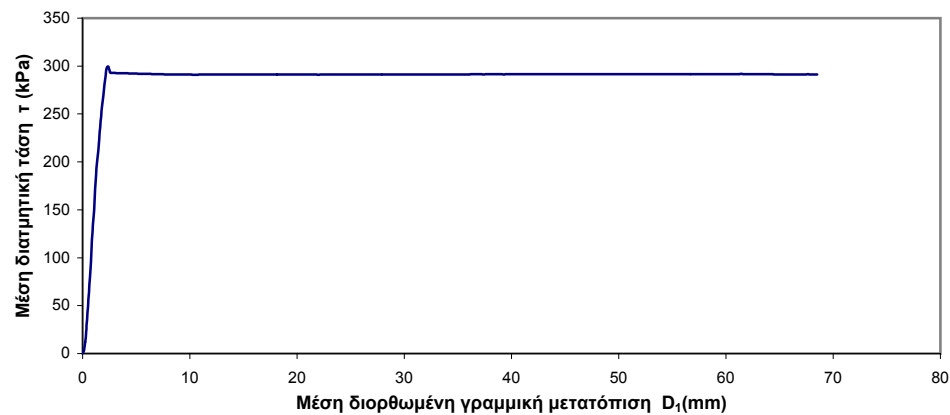
Δείγμα : B1



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

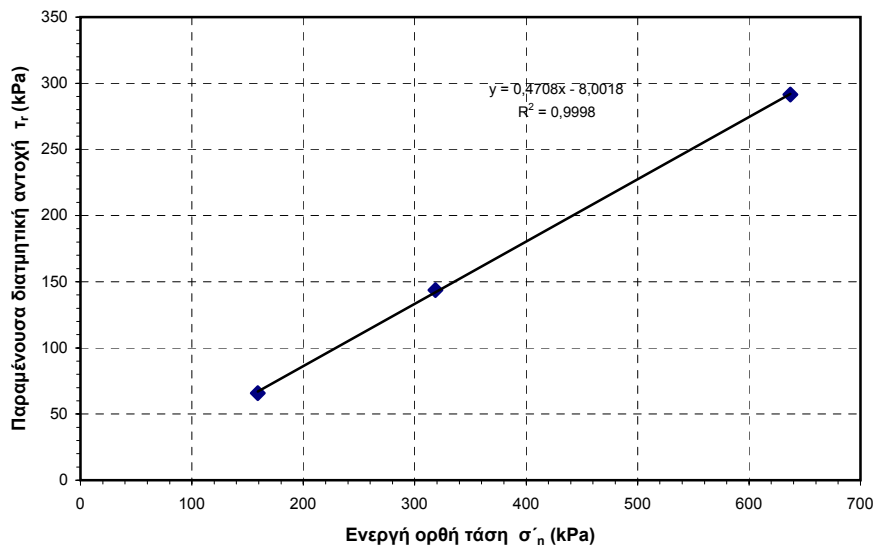
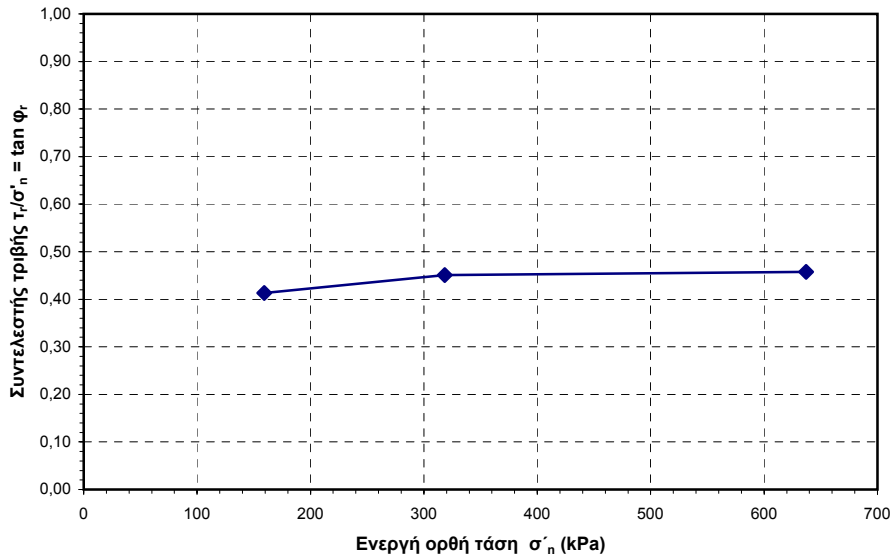


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



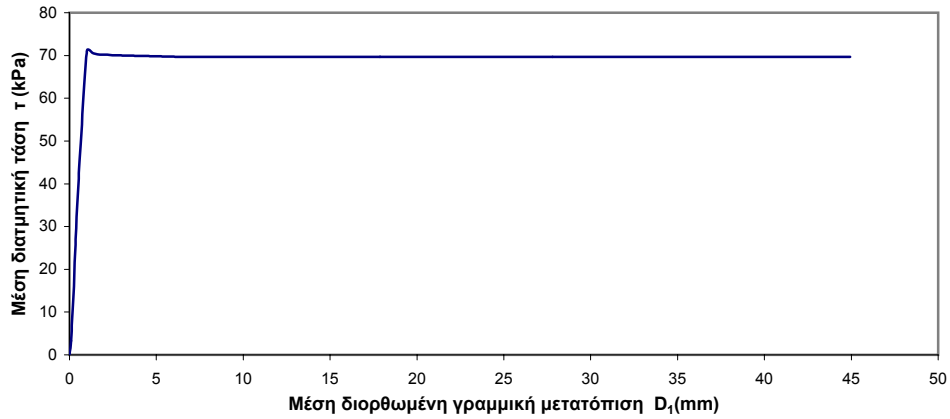
Δείγμα : B1

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	65,84	0,413
2	80	318,51	143,66	0,451
3	160	637,01	291,35	0,457

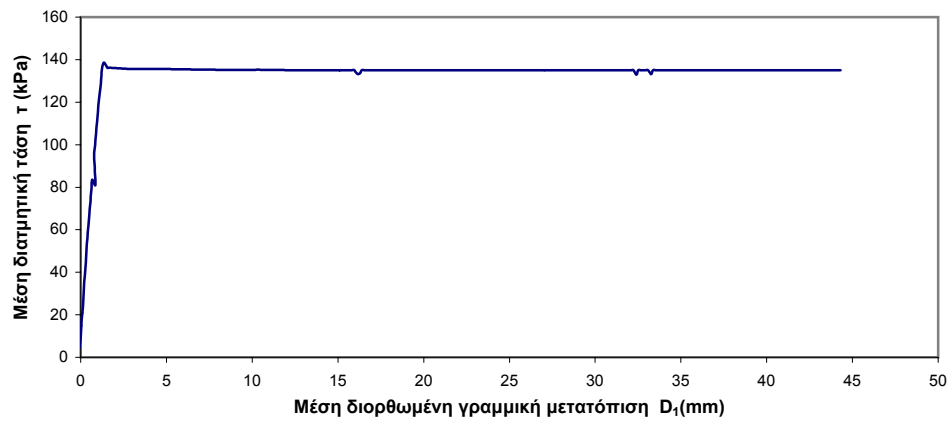
$c'_r =$	-8,00	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	25,21		24,42	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

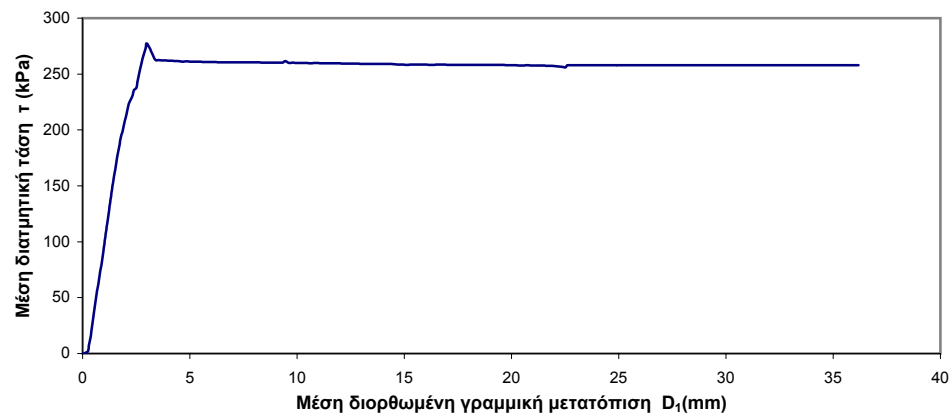
Δείγμα : B2



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

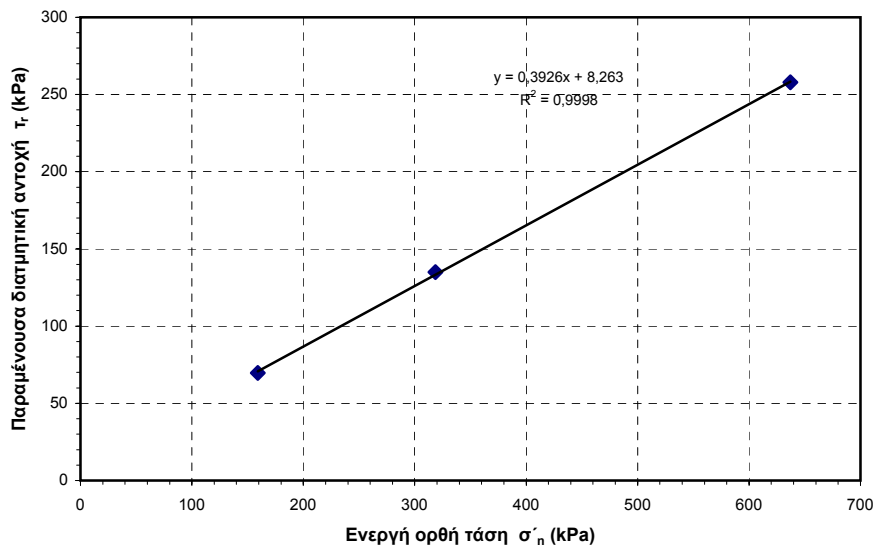
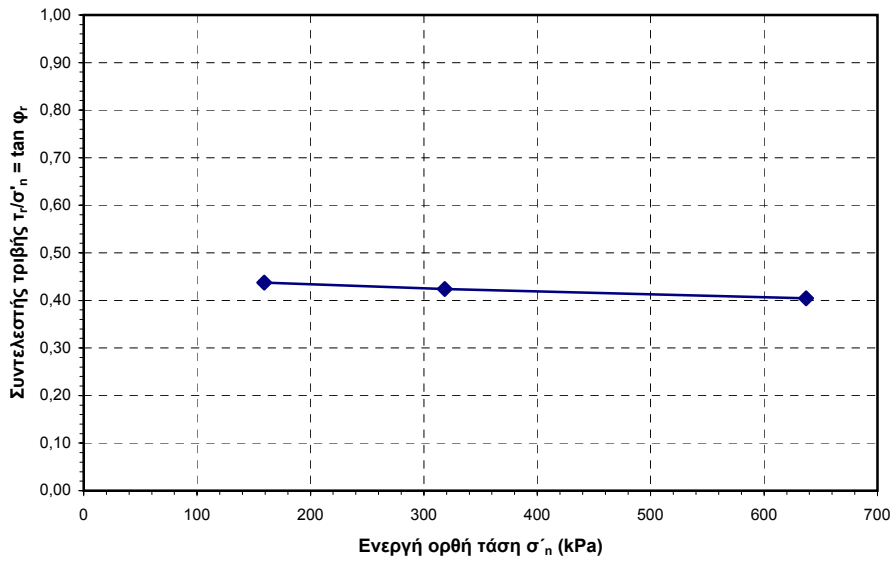


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



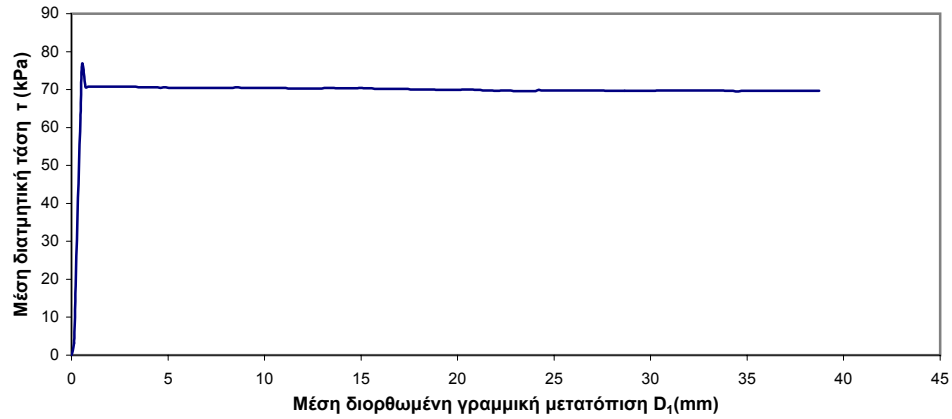
Δείγμα : B2

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	69,70	0,438
2	80	318,51	134,95	0,424
3	160	637,01	257,83	0,405

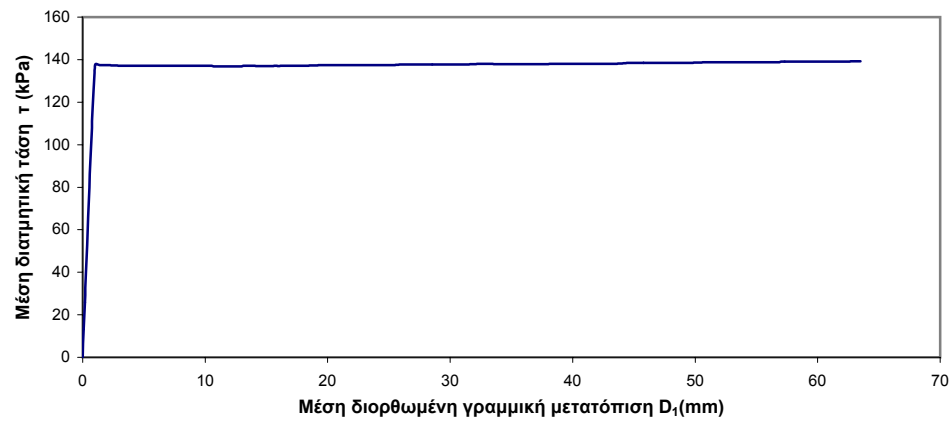
$c'_r =$	8,26	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	21,44		22,29	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

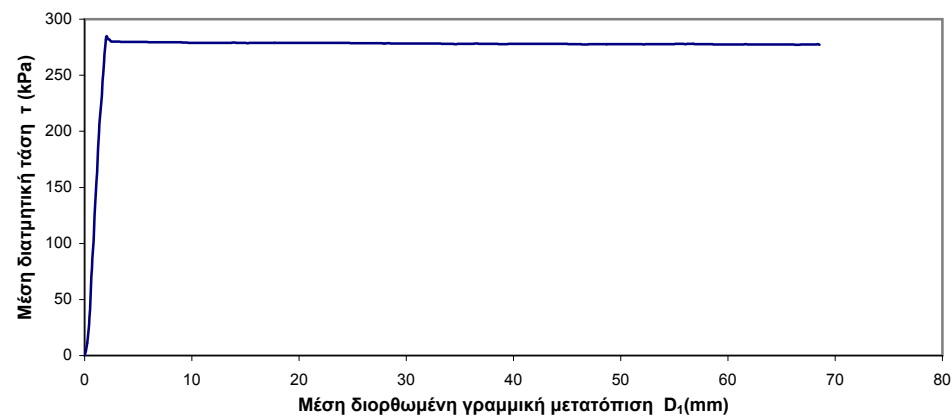
Δείγμα : Γ2



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

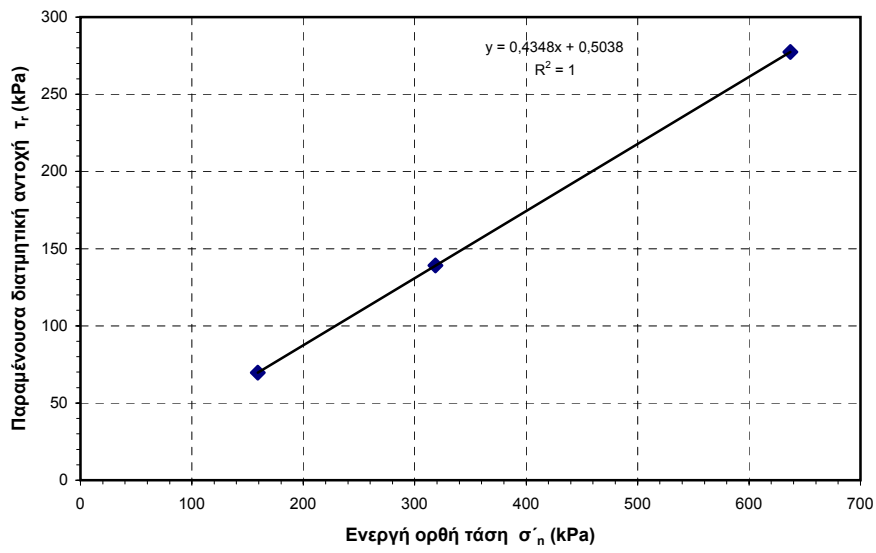
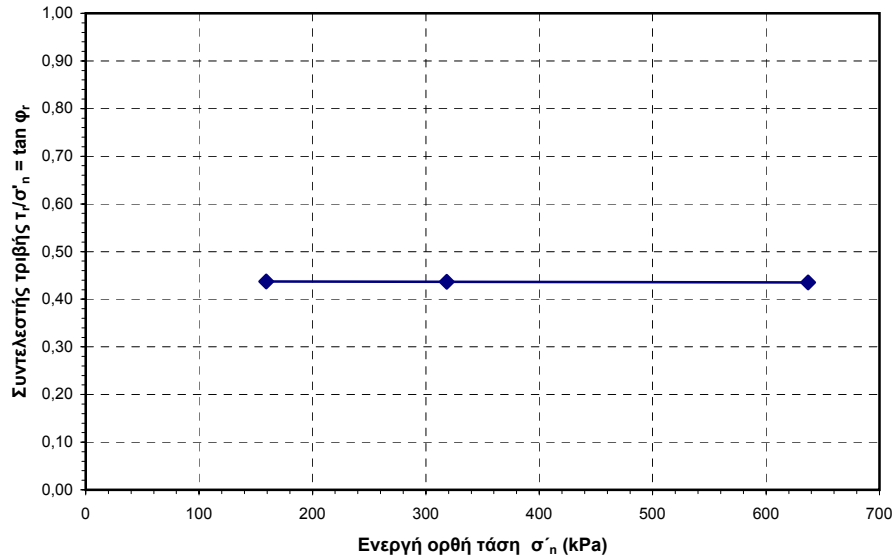


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



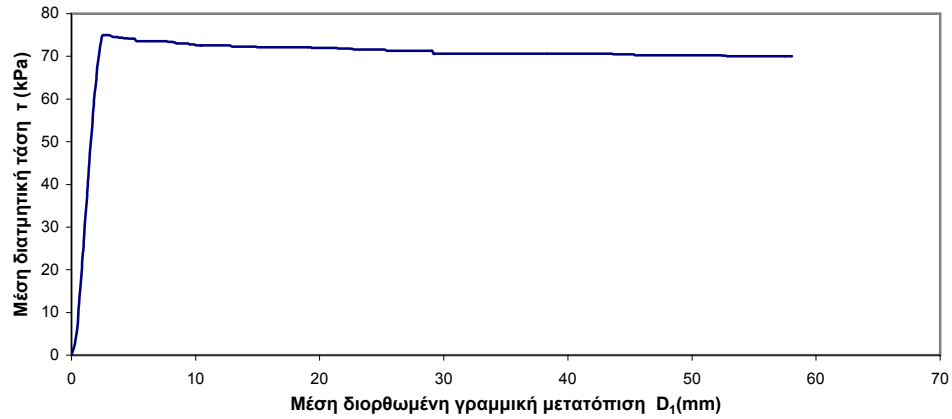
Δείγμα : Γ2

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	69,64	0,437
2	80	318,51	139,13	0,437
3	160	637,01	277,40	0,435

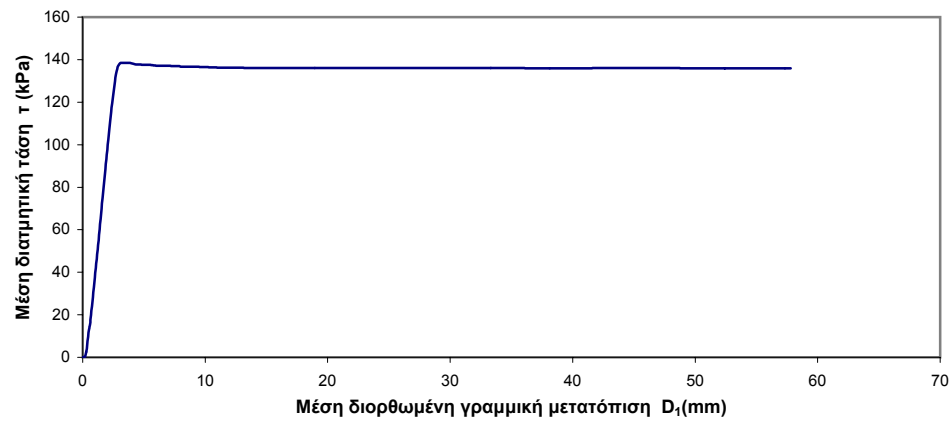
$c'_r =$	0,50	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	23,50		23,55	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Δείγμα : Λιγνίτης



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

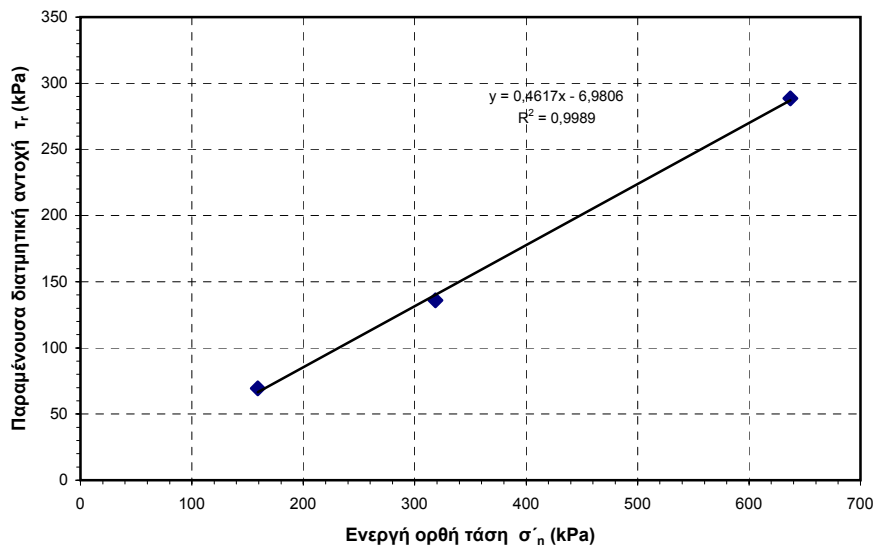
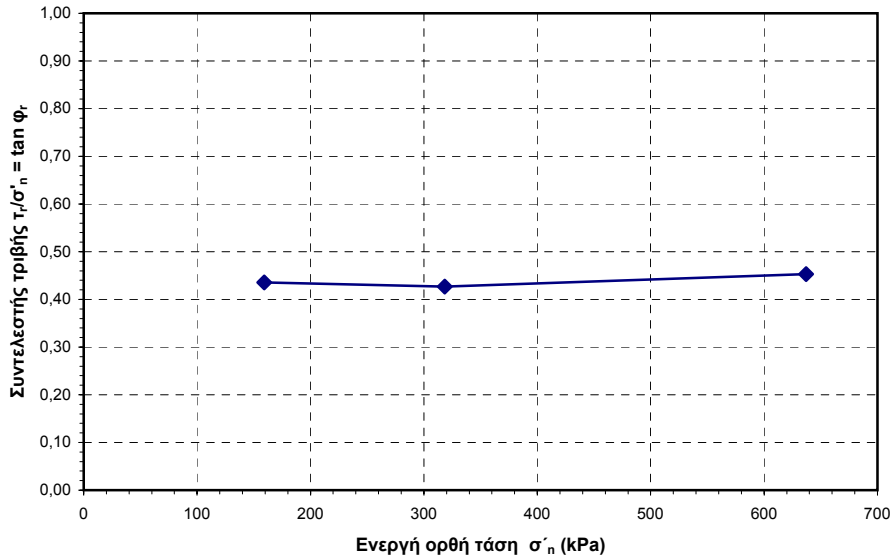


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης (mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



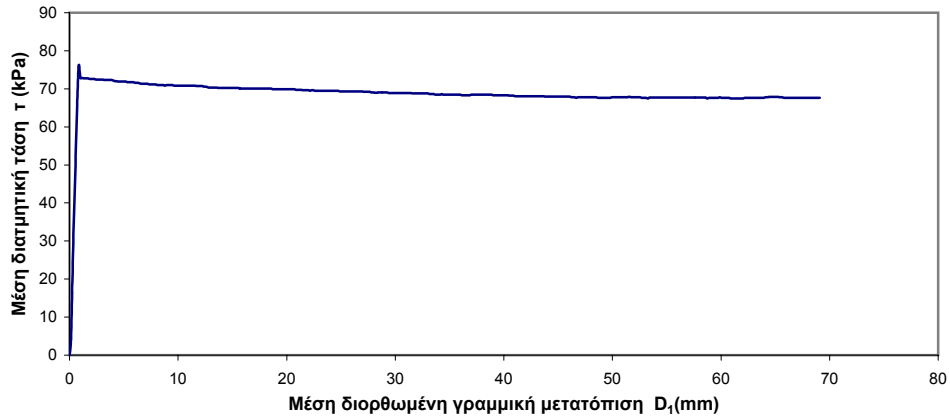
Δείγμα : Λιγνίτης

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	69,33	0,435
2	80	318,51	135,91	0,427
3	160	637,01	288,54	0,453

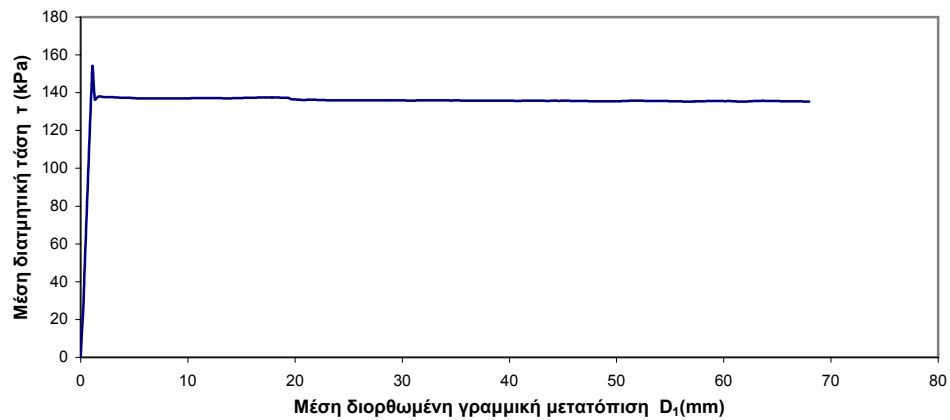
$c'_r =$	-6,98	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	24,78		24,09	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

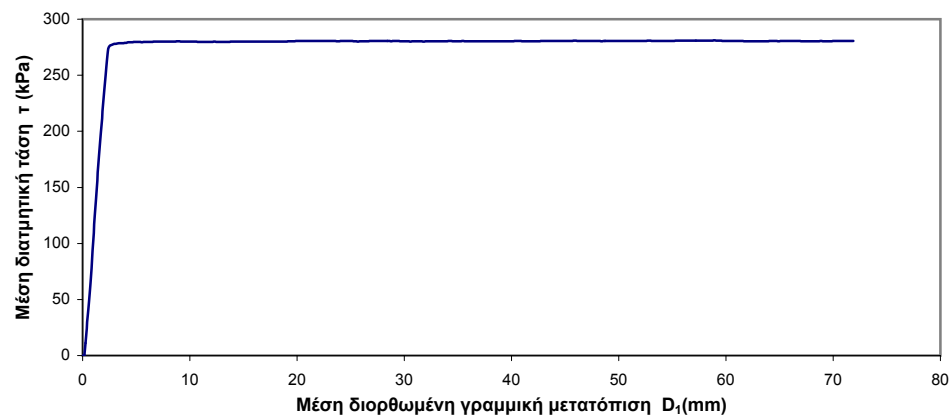
Δείγμα : Ανθρακομιγής μάργα



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048

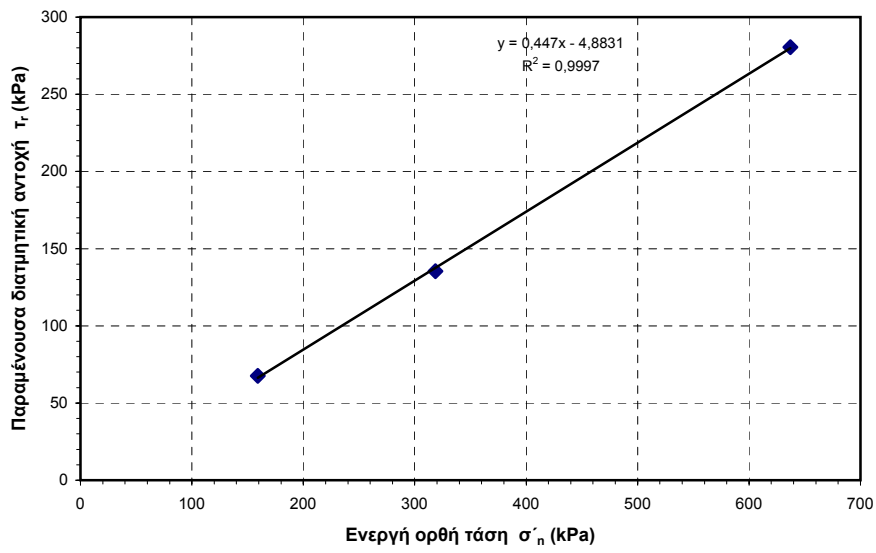
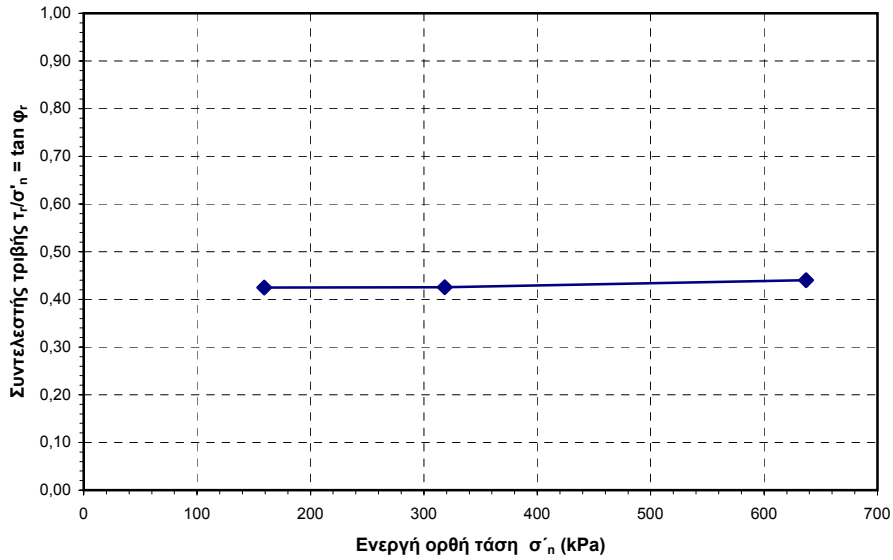


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



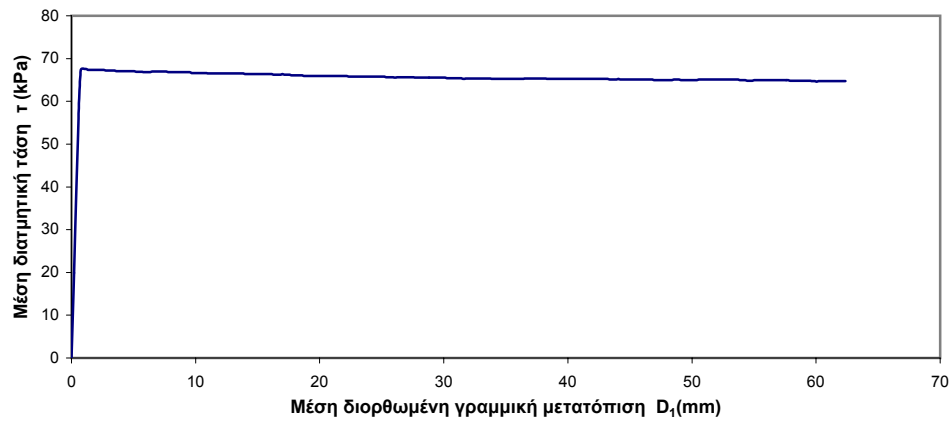
Δείγμα : Ανθρακομιγής μάργα

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	67,65	0,425
2	80	318,51	135,46	0,425
3	160	637,01	280,53	0,440

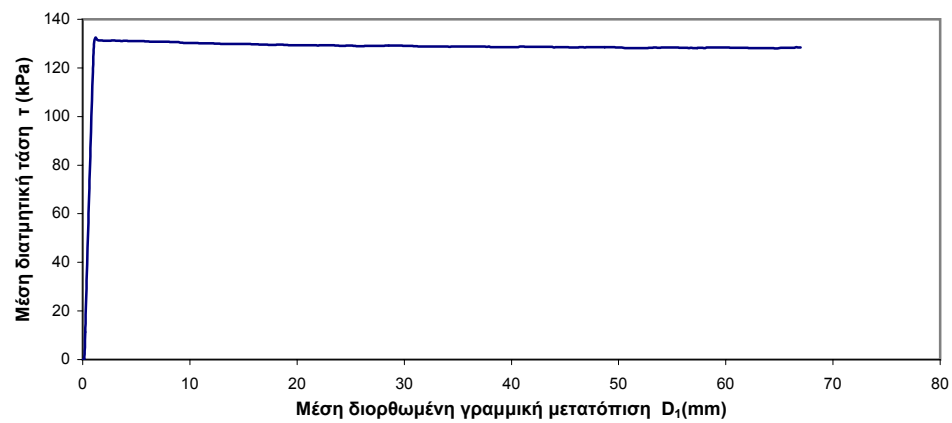
$c'_r =$	-4,88	ή	0	kPa
$\phi'_r =$	24,08		23,59	deg

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

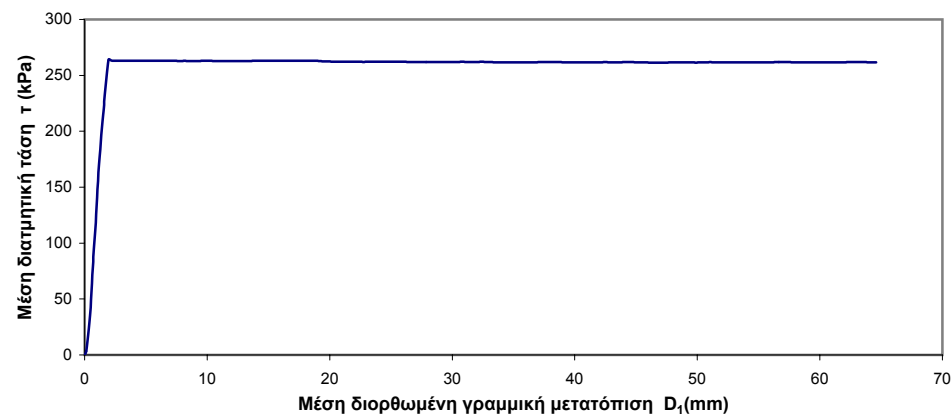
Δείγμα : ΓΤ6-95



ΦΑΣΗ 1η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 40
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048

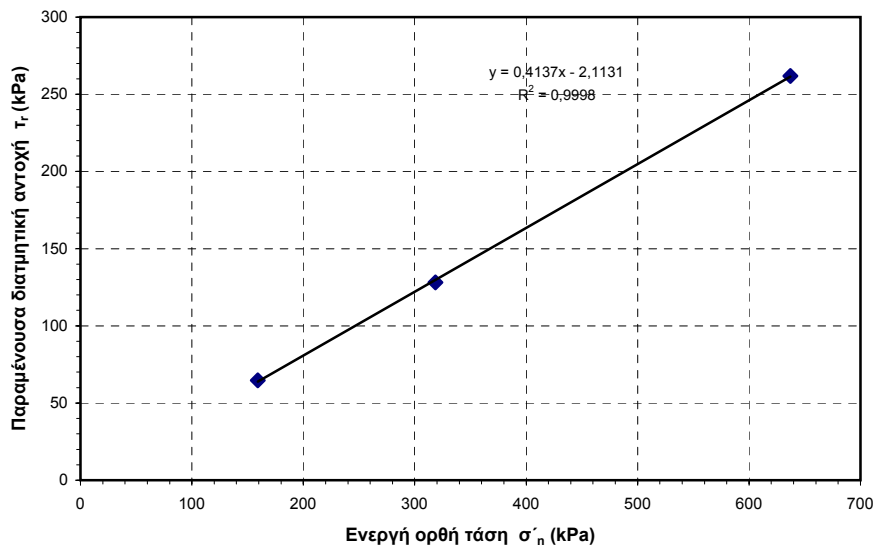
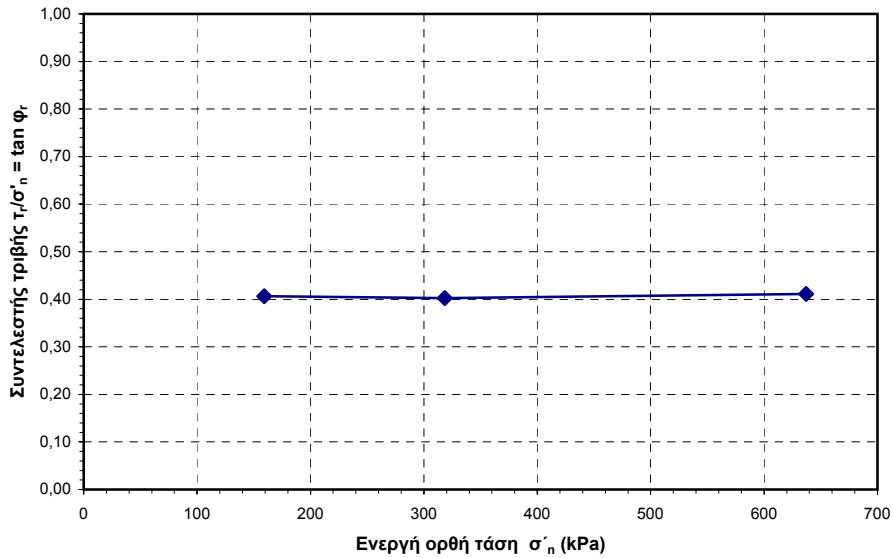


ΦΑΣΗ 2η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 80
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048



ΦΑΣΗ 3η: Κατακόρυφο φορτίο (kg): 160
Ρυθμός διάτμησης(mm/min): 0,048

ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



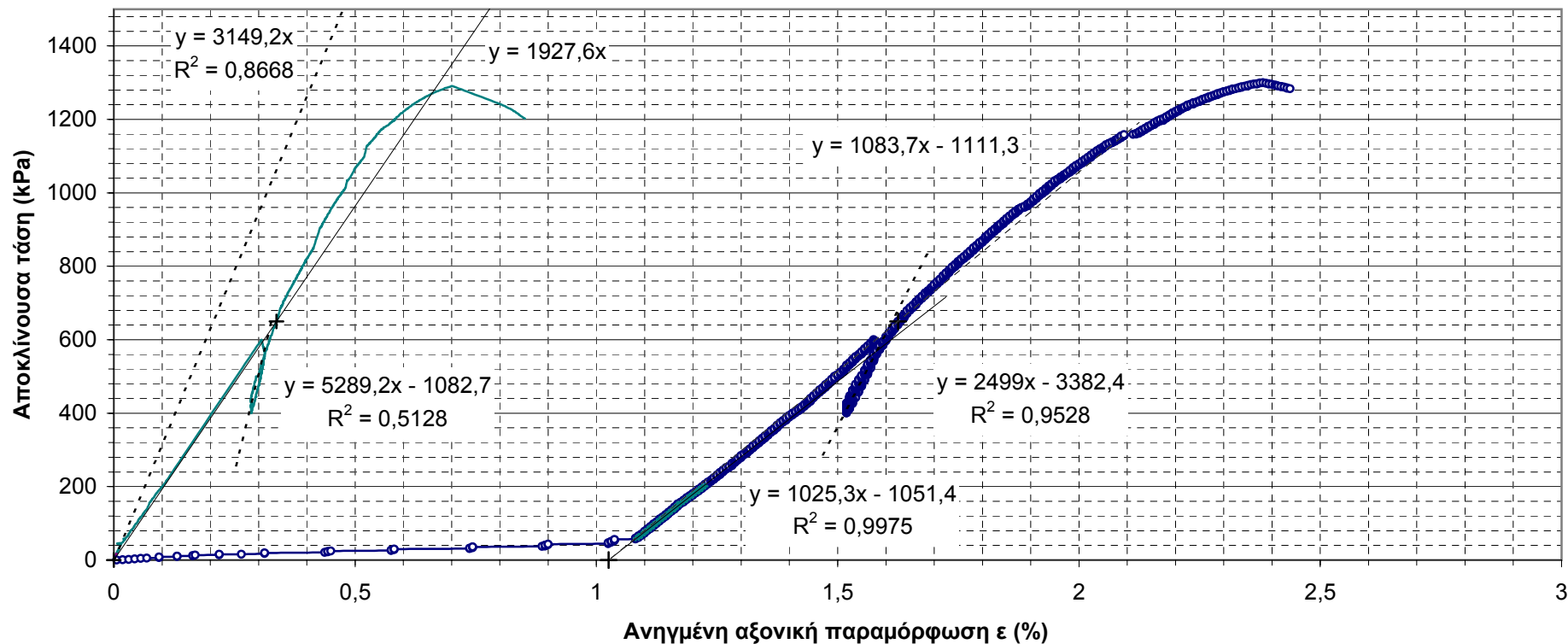
Δείγμα : ΓΤ6-95

ΦΑΣΗ	Κατ. φορτίο (kg)	Ορθή ενεργή τάση σ'_n (kPa)	τ_r (kPa)	τ_r / σ'_n
1	40	159,25	64,72	0,406
2	80	318,51	128,22	0,403
3	160	637,01	261,88	0,411

$c'_r =$	-2,11	ή	0,00	kPa
$\phi'_r =$	22,47		22,26	deg

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

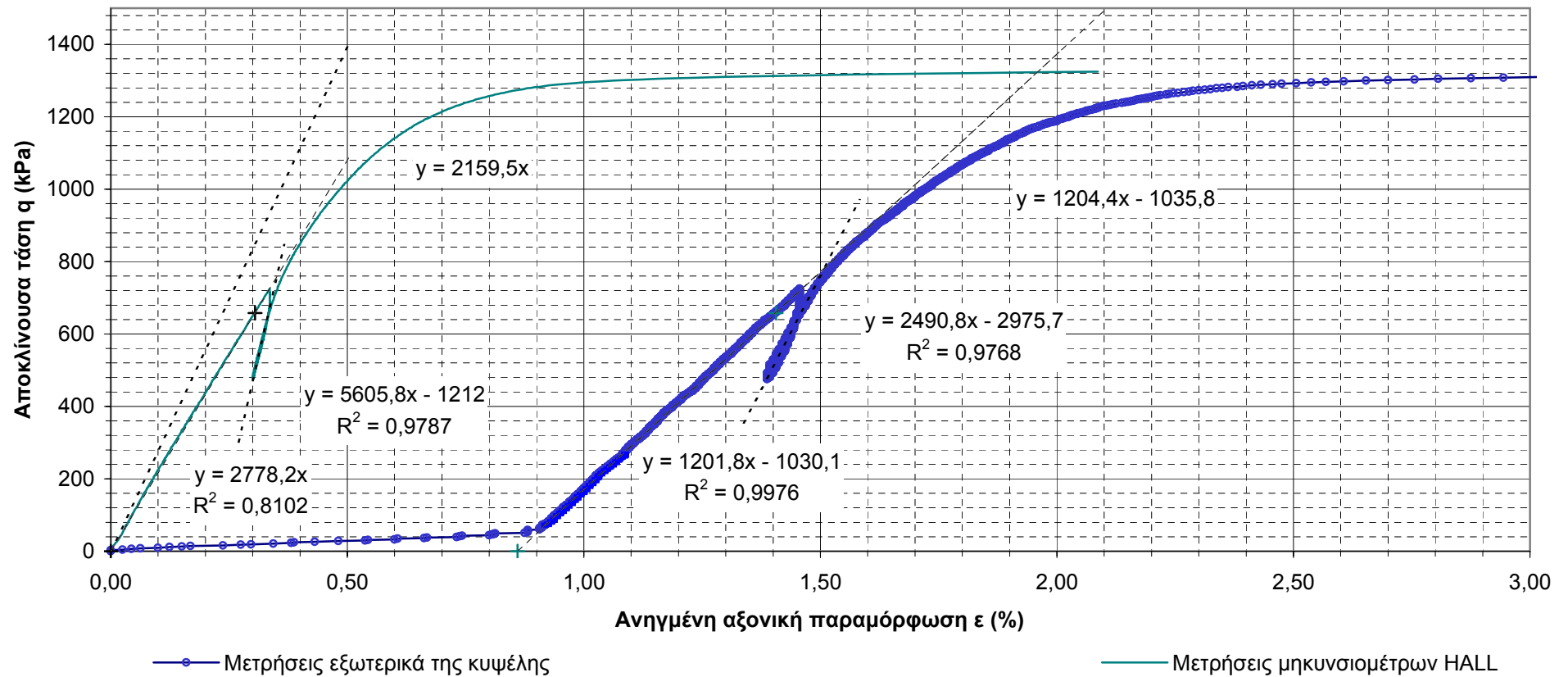
Δοκίμιο B2S3
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου



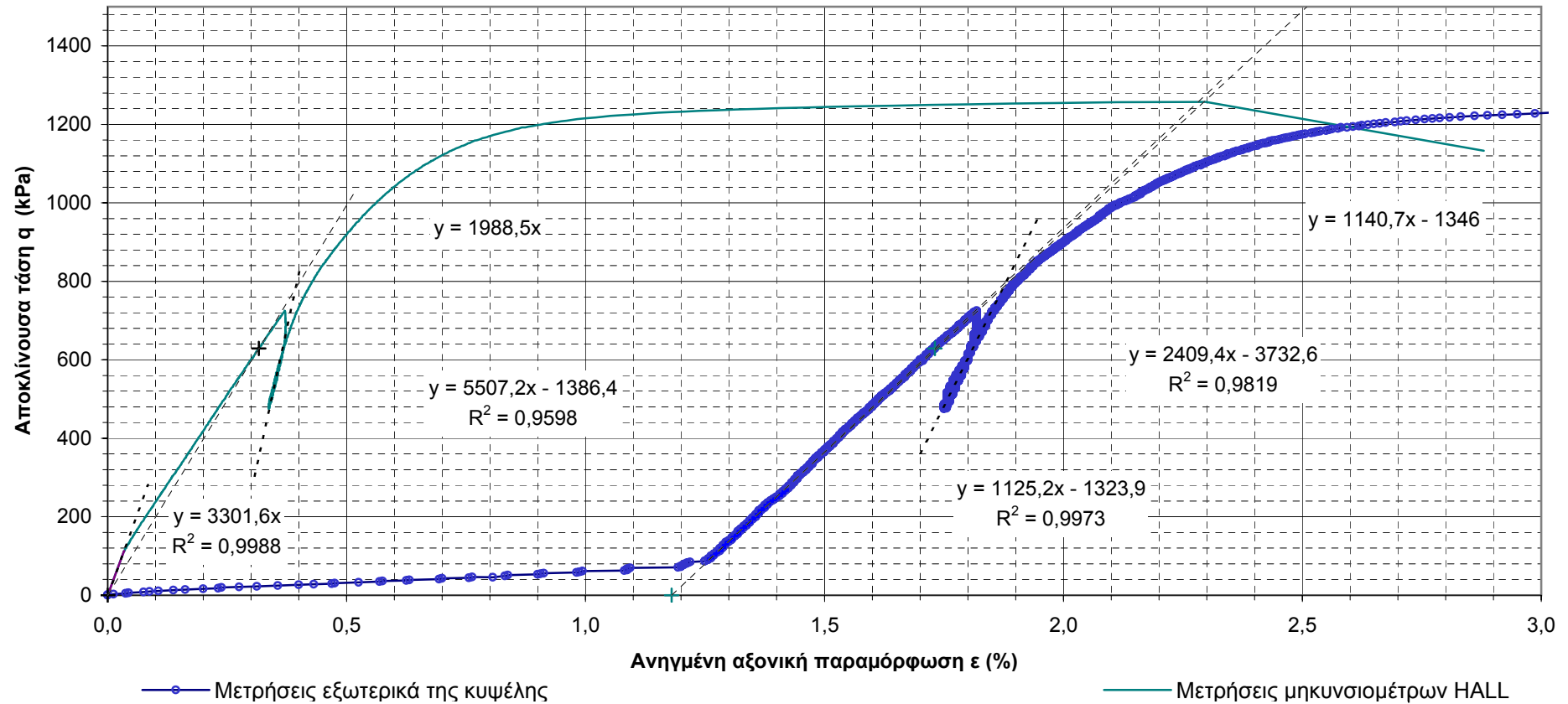
—○— Μετρήσεις εξωτερικά της κυψέλης

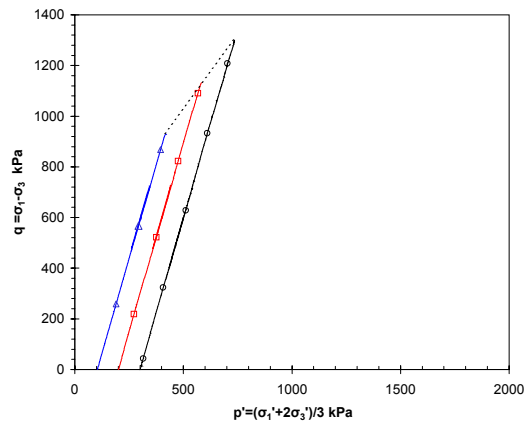
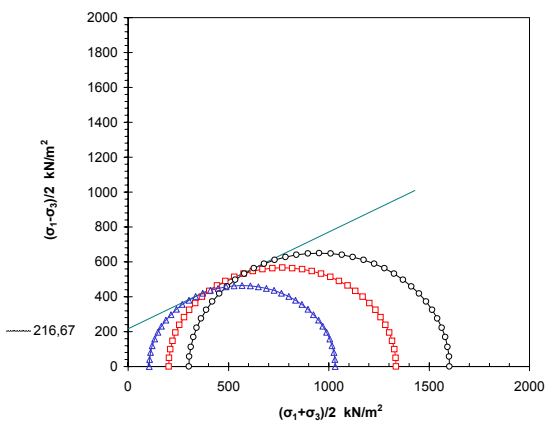
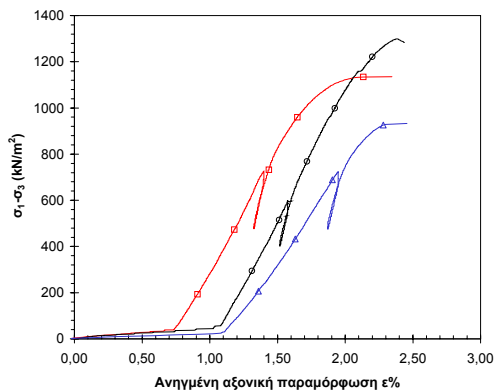
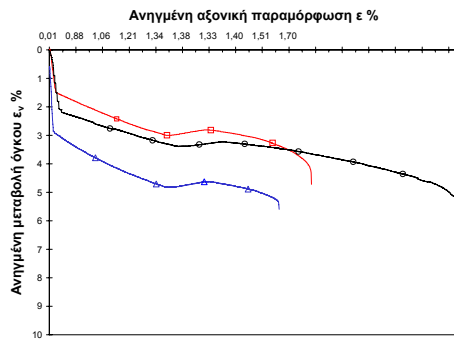
— Μετρήσεις μηχανομομέτρων HALL

Δοκίμιο B2S9
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου



Δοκίμιο B2s10
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου





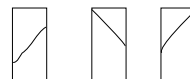
Δ Δοκίμο 1
□ Δοκίμο 2
○ Δοκίμο 3

B2S5
B2S6
B2S3

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
α) Πλευρικές λωρίδες στράγγισης NAI
β) Τα δοκίμια κορέσθηκαν με εφαρμογή αυξανόμενης αντιστάσεως κατά βαθμίδες. Η εκάστοτε βαθμίδα αντιστάσεως ήταν 10 kN/m² μικρότερη από την αντίστοιχη πίεση του κελιού.

ΤΥΠΟΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

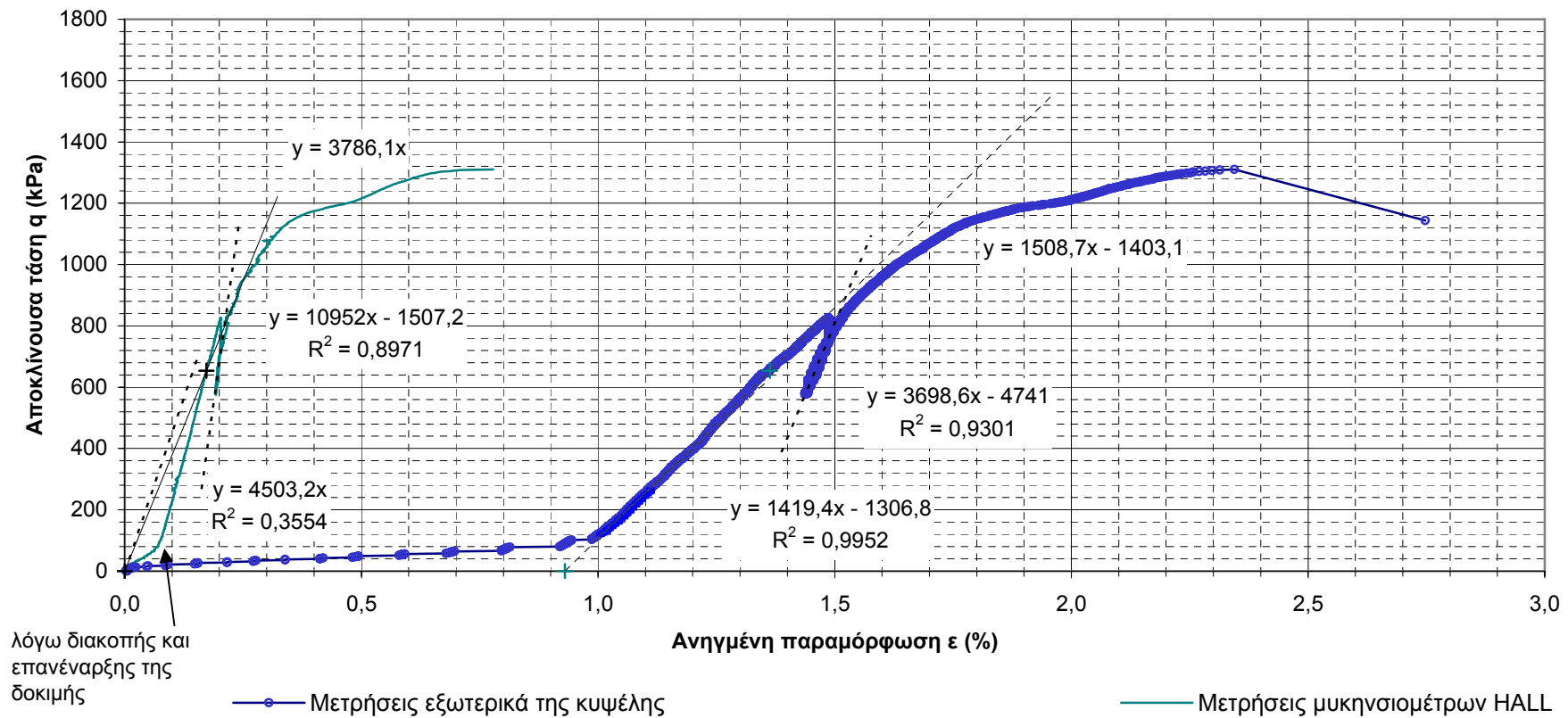
B2S5 B2S6 B2S3



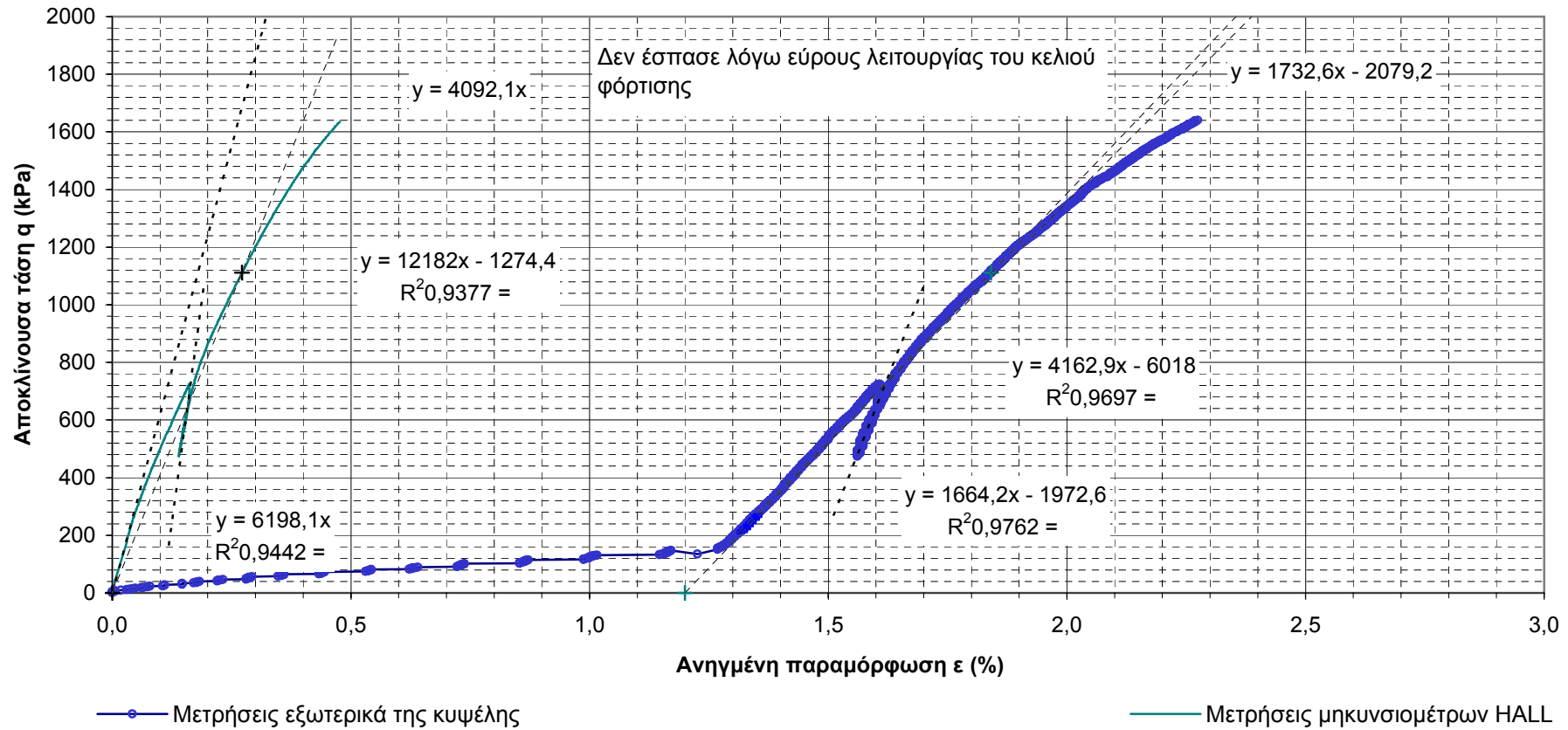
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΛΑΦΟΥΣ			
Υποκίτρινη αργίλο - ιλύς με ελάχιστα κοττάλια			
ΤΥΠΟΣ ΔΟΚΙΜΟΥ			
Αδιατάρακτο			
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm)			
38 x 80			
ΔΟΚΙΜΙΟ	B2S5	B2S6	B2S3
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ			
Πυκνότητα (Mg/m ³)	1,57	1,56	1,61
Υγρασία (%)	50,71	25,28	43,54
Ξηρό φαινόμενο βάρος (Mg/m ³)	1,02	1,06	1,05

Τιμή B		0,98	0,97	0,97
ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ				
Πίεση κελιού	kN/m ²	600	700	800
Αντίπείση πόρων		500	500	500
ΣΤΑΔΙΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ				
Πίεση κελιού	kN/m ²	600	700	800
Αντίπείση / Αρχική πίεση πόρων		500	500	500
Αρχική σ ₁		100	200	300
Ρυθμός φόρτισης (kPa/ h)		25	25	25
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ				
παραμόρφωση (%)		2,29	2,09	2,38
(σ ₁ -σ ₃) _f	kN/m ²	927,54	1132,36	1299,46
u _f		496,50	498,50	498,50
σ _{3f}		601,00	701,00	801,00
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ		c _d	216,67 kN/m ²	
ΑΝΤΟΧΗΣ		φ _d	29,03 °	

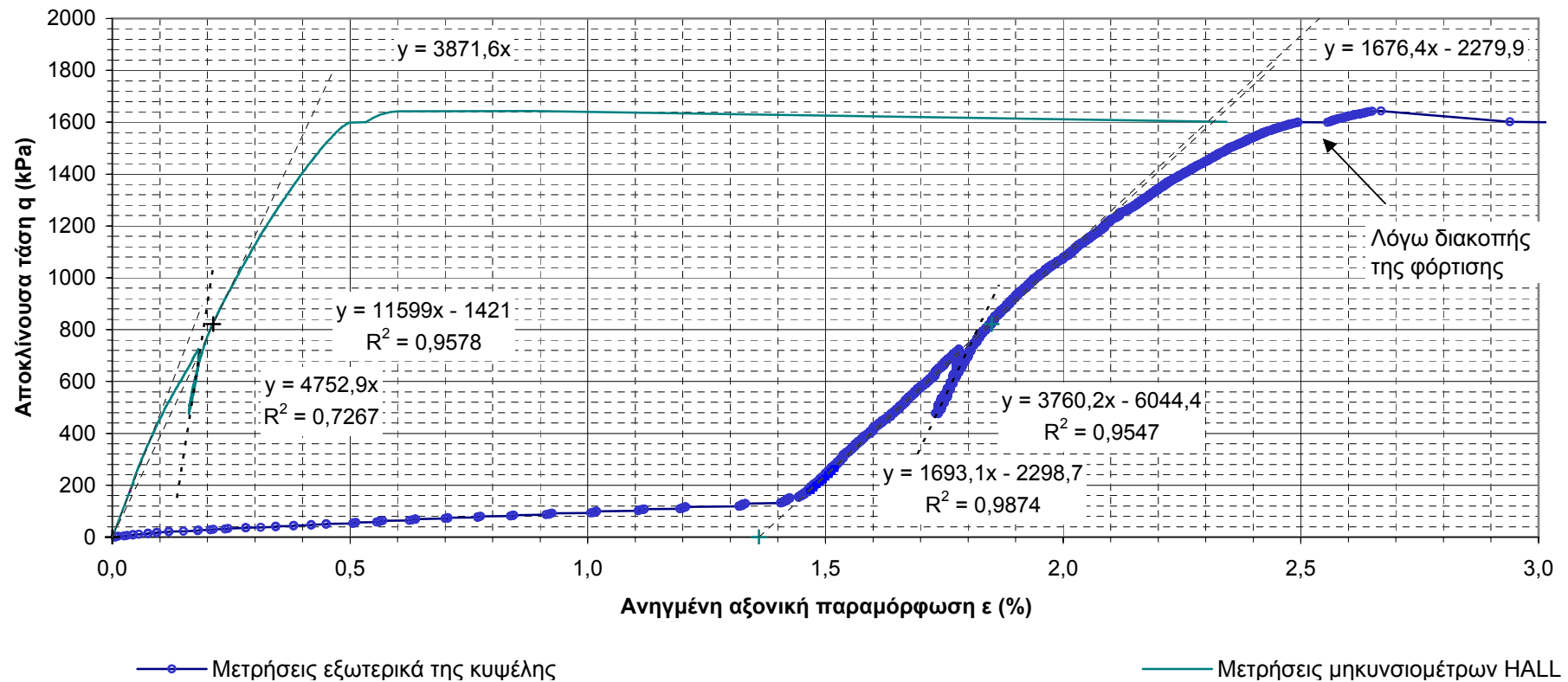
Δοκίμιο Γ2S1
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και μετρήσεων επί του δοκιμίου



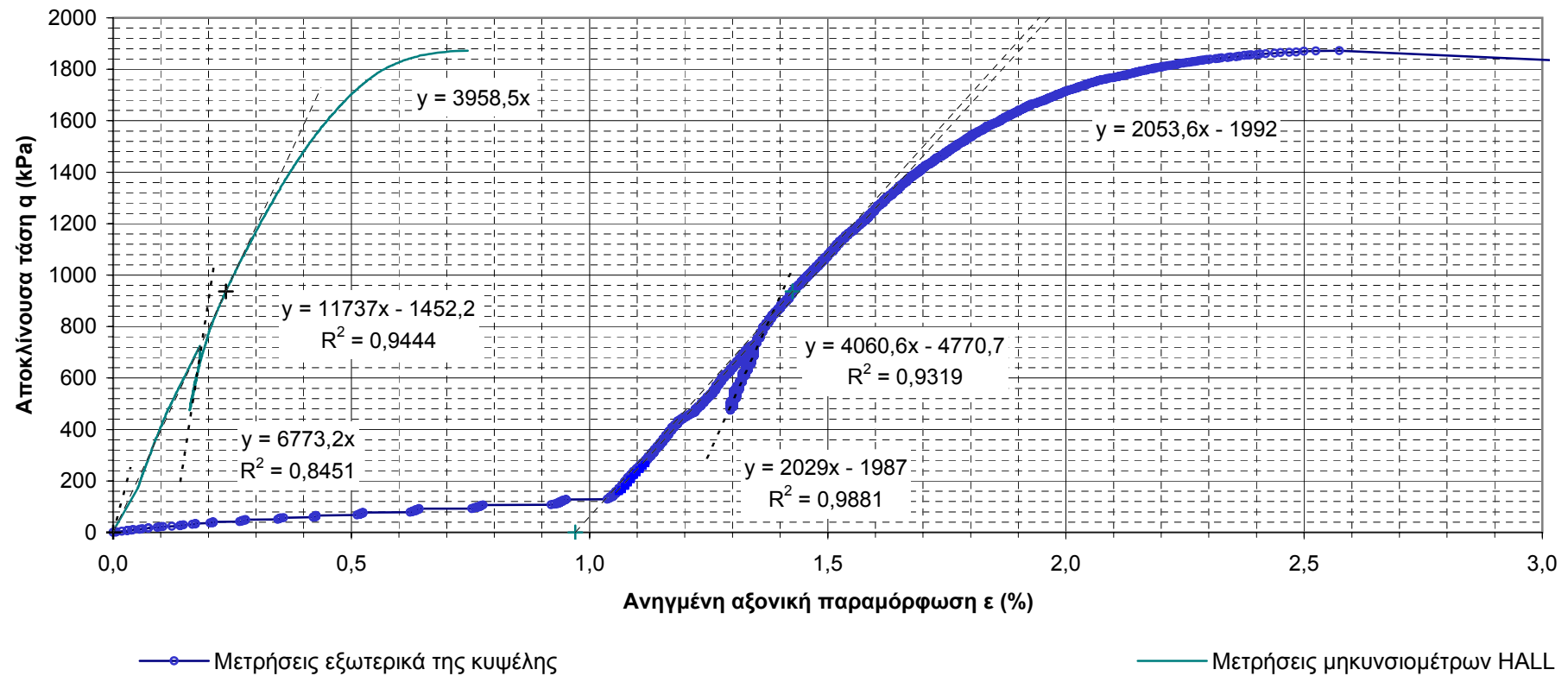
Δοκίμιο Γ2S3
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου

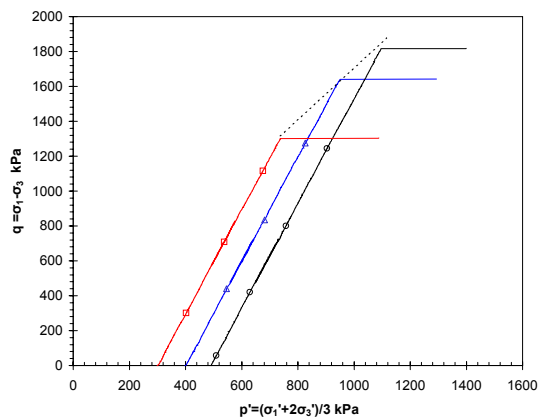
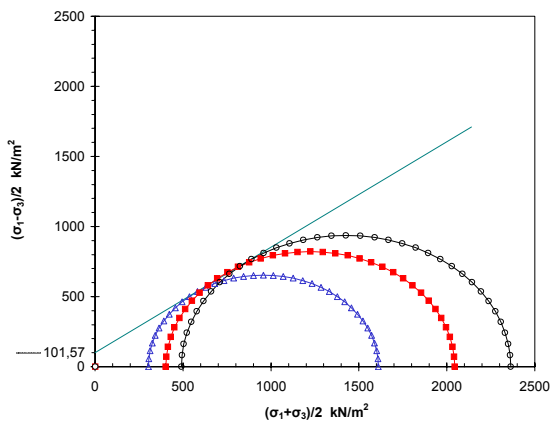
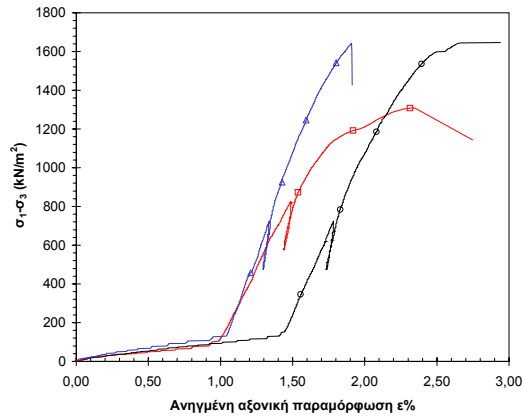
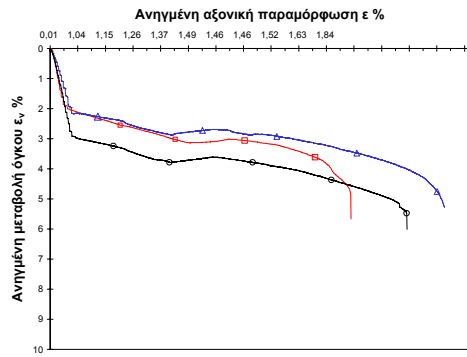


Δοκίμιο Γ2S4
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου



Δοκίμιο Γ2S5
Αποκλίνουσα τάση - ανηγμένη παραμόρφωση βάσει μετρήσεων εξωτερικά της κυψέλης και
μετρήσεων επί του δοκιμίου



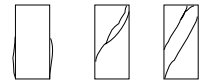


□ Δοκίμο 1 Γ2S1
○ Δοκίμο 2 Γ2S4
Δ Δοκίμο 3 Γ2S5

- α) Παρατηρήσεις: NAI
β) Τα δοκίμια κορέστηκαν με εφαρμογή αυξανόμενης αντιστάσεως κατά βαθμίδες. Η εκάστοτε βαθμίδα αντιστάσεως ήταν 10 kN/m² μικρότερη από την αντίστοιχη πίεση του κελιού.

ΤΥΠΟΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Γ2S1 Γ2S4 Γ2S5



ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΛΑΦΟΥΣ Φαινοπράσινη υλός με ελάχιστα κοχχύλια.			
ΤΥΠΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Αδιατάρακτο			
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ (mm) 38 x 80			
ΔΟΚΙΜΙΟ	Γ2S1	Γ2S4	Γ2S5
ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ			
Πυκνότητα (Mg/m ³)	1,54	1,63	1,59
Υγρασία (%)	45,70	46,10	43,00
Ξηρό φαινόμενο βάρος (Mg/m ³)	1,06	1,11	1,10

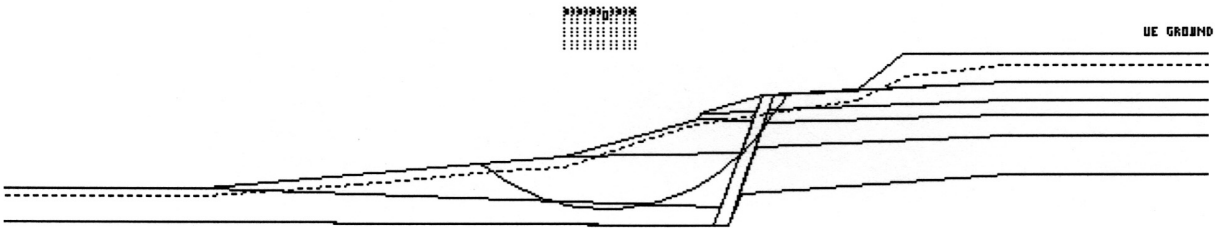
Τιμή B		0,97	0,98	0,99
ΣΤΑΔΙΟ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ				
Πίεση κελιού	kN/m ²	999	1050	700
Αντίσταση πόρων		700	649	210
ΣΤΑΔΙΟ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ				
Πίεση κελιού	kN/m ²	1000	1048	700
Αντίσταση πόρων / Αρχική πίεση πόρων		700	648	210
Αρχική σ ₁		300	400	490
Ρυθμός φόρτισης (kPa/ h)		25	25	25
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΘΡΑΥΣΗΣ				
παραμόρφωση (%)		2,31	2,67	2,57
(σ ₁ -σ ₃) _r	kN/m ²	1308,10	1642,90	1872,55
u _r		698,00	646,50	210,50
σ _{3r}		1001,00	1049,00	701,00
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ		c _d	101,57 kN/m ²	
ΑΝΤΟΧΗΣ		φ _d	36,93 °	

**ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΤΩΝ ΔΥΤΙΚΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟΥΣ
ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ**

LARIX-BS

STABILITY CALCULATION : Slip line Nr.16733 S= 1.13

Projecttitle: TOMH ME RHGMA KAI APOTHESEIS
Bishop method



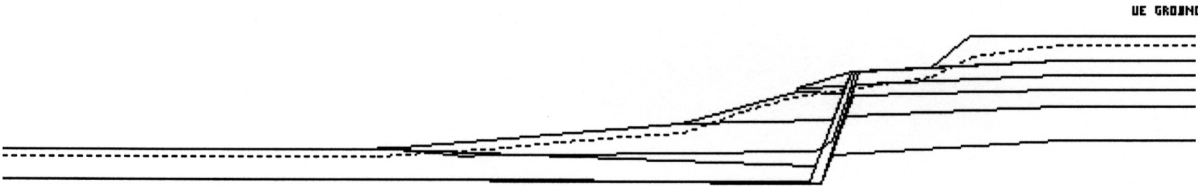
Scale = 1 : 11222

- Center of circle= 15660.00 Y= 795.00
- Obl. point : X= 15802.50 Y= 535.00

LARIX-BS

STABILITY CALCULATION : Slip line Nr.14512 S= 1.11

Projecttitle: TOMH ME RHGMA KAI APOTHESEIS
Janbu method

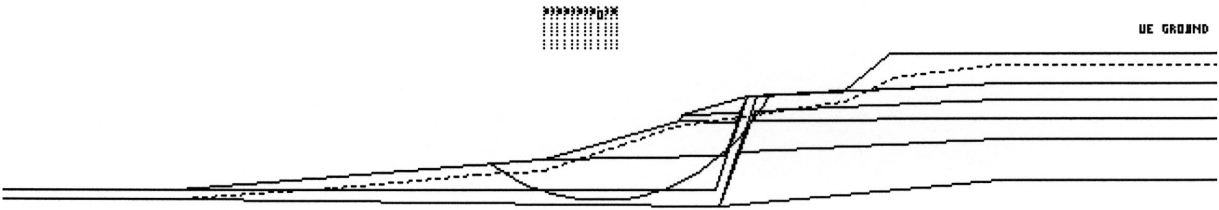


Scale = 1 : 13229

LARIX-BS

STABILITY CALCULATION : Slip line Nr.-12279 S= 1.11

Projecttitle: TOMH ME RHGMA, ZONH MEIOMENHS ANTOKHS KAI APOTHESEIS
Bishop method



Scale = 1 : 10941

- Center of circle= 15680.00 Y= 795.00
- Obl. point : X= 15771.50 Y= 533.00

LARIX-BS

STABILITY CALCULATION : Slip line Nr.-11997 S= 1.18

Projecttitle: TOMH ME RHGMA, ZONH MEIOMENHS ANTOKHS KAI APOTHESEIS
Janbu Method



Scale = 1 : 13229