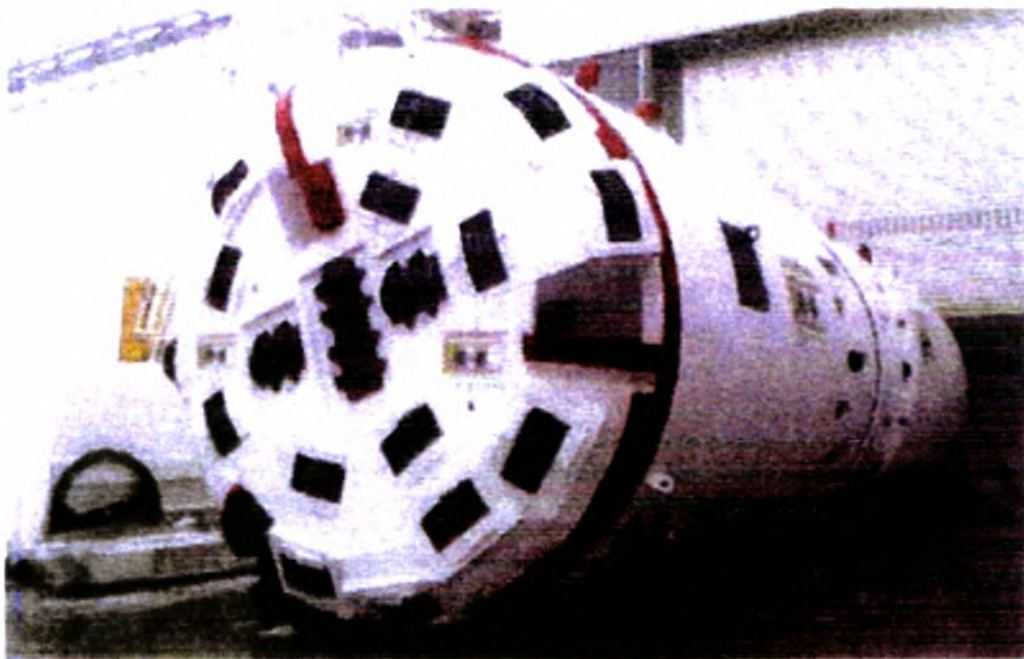


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
«ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ-ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ, ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ»**



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΣΥΡΙΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΕΜ: 474

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΡΑΜΠΑΤΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
Δρ.ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ**

ΒΟΛΟΣ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 5990/1
Ημερ. Εισ.: 12-11-2007
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2007
ΣΥΡ

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1°: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή.....	3
-------------------	---

Κεφάλαιο 2°: Μέθοδος κλειστής διάνοιξης σηράγγων

2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Συμβατικός τρόπος, κατασκευή σηράγγων με τη μέθοδο NATM.....	7
2.3 Κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης Διάνοιξης (TBM).....	8

Κεφάλαιο 3°: Στάδια εδαφικών μετακινήσεων

3.1 Εισαγωγή.....	26
3.2 Πρώιμες μετακινήσεις.....	27
3.3 Μετακινήσεις στο μέτωπο.....	27
3.4 Μετακινήσεις κατά μήκος της ασπίδας.....	28
3.5 Μετακινήσεις κατά τη διάρκεια και μετά την τοποθέτηση των στοιχείων της επένδυσης.....	29
3.6 Χρόνιες μετακινήσεις.....	30

Κεφάλαιο 4°: Εμπειρικές μέθοδοι

4.1 Εισαγωγή.....	35
4.2 Επιφανειακές μετακινήσεις.....	35
4.3 Υπόγειες εδαφικές μετακινήσεις.....	61
4.4 Μετακινήσεις του εδάφους από πολλαπλές σήραγγες.....	68

Κεφάλαιο 5°: Αναλυτικές μέθοδοι

5.1 Εισαγωγή.....	74
5.2 Αναλυτικές μέθοδοι για σήραγγες σε μεγάλο βάθος.....	75
5.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σήραγγες σε μικρό βάθος.....	80

Κεφάλαιο 6°: Αριθμητικές μέθοδοι

6.1 Εισαγωγή.....	91
6.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Ανάλυση σε δύο και τρεις διαστάσεις).....	92

Κεφάλαιο 7°: Παράδειγμα εφαρμογής αριθμητικών μεθόδων (Μ.Π.Σ)

7.1 Εισαγωγή.....	133
7.2 Μεθολογία διάνοιξης σηράγγων – Παραδοχές ανάλυσης.....	133
7.3 Εδαφικά μοντέλα.....	134
7.4 Παράδειγμα εφαρμογής διάνοιξης σήραγγας με τη μέθοδο N.A.T.M.....	136
7.5 Παράδειγμα εφαρμογής διάνοιξης σήραγγας με τη χρήση ασπίδας (shield tunneling).....	163

Βιβλιογραφία.....	173
--------------------------	------------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1°

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται εκτενώς οι - ευρύτερα χρησιμοποιούμενες- εμπειρικές, αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης σηράγγων. Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η εμπειριστατωμένη ανάπτυξη αυτών των μεθόδων καθώς και η τεκμηριωμένη αξιολόγησή τους, ώστε αφενός να αναδειχθεί το πεδίο εφαρμογής της καθεμιάς εξ' αυτών και αφετέρου να επισημανθούν κρίσιμα στοιχεία και παράμετροι που αφορούν την αξιοπιστία τους.

Συγκεκριμένα, στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος κλειστής διάνοιξης σηράγγων, όπου και αναφέρονται οι κύριοι τρόποι εφαρμογής αυτής της μεθόδου. Γίνεται μια περιγραφή του συμβατικού τρόπου κατασκευής σηράγγων με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM) και στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά η διάνοιξη σήραγγας με μηχανές ολομέτωπης κοπής (TBM).

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα στάδια των εδαφικών μετακινήσεων που εμφανίζονται κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Η ανάλυση των επιμέρους μετακινήσεων περιλαμβάνει την προσέγγιση του μεγέθους, του εύρους τιμών και της χρονικής εξέλιξής τους. Επίσης γίνεται αναφορά στις αιτίες εμφάνισης των μετακινήσεων, όπως και στους πιθανούς τρόπους και μεθόδους αντιμετώπισής τους.

Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφονται λεπτομερώς οι εμπειρικές μέθοδοι πρόβλεψης των μετακινήσεων και της απώλειας εδαφικού όγκου (volume loss) κατά τη διάνοιξη σηράγγων, των οποίων η δημιουργία οφείλεται στη συγκέντρωση και μελέτη σχετικών, επί τόπου, παρατηρήσεων και μετρήσεων. Καταγράφονται οι μεθοδολογίες πλήθους ερευνητών με την παράθεση μαθηματικών τύπων και διαγραμμάτων. Επιπλέον αναφέρονται και επεξηγούνται οι παραδοχές και οι παράμετροι στις οποίες στηρίζονται οι εμπειρικές μέθοδοι.

Στο 5° Κεφάλαιο αναπτύσσονται οι αναλυτικές μέθοδοι πρόβλεψης των μετακινήσεων και των επικρατουσών τάσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων. Αυτές οι μέθοδοι στηρίζονται αποκλειστικά στη χρήση μαθηματικών εξισώσεων και διαχωρίζονται με βάση το χρησιμοποιούμενο εδαφικό μοντέλο καθώς και την ύπαρξη ή όχι επένδυσης στη σήραγγα. Τα παραπάνω στοιχεία αποτελούν και τις βασικές παραδοχές οι οποίες καθορίζονται με σαφήνεια στις μεθοδολογίες των μελετητών που περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Στο 6° Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αριθμητικές μέθοδοι εκτίμησης των μετακινήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.). Βασικότερη μορφή αυτών των μεθόδων αποτελούν τα πεπερασμένα στοιχεία. Οι μέθοδοι αυτές αναπτύχθηκαν παράλληλα με την αλματώδη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της χρήσης εξειδικευμένου λογισμικού για την κατασκευή τεχνικών έργων. Παρατίθενται και επεξηγούνται οι κυριότερες αριθμητικές μέθοδοι και οι παραδοχές που τις συνοδεύουν, για ανάλυση σε δύο και τρεις διαστάσεις.

Στο 7° Κεφάλαιο παρέχονται τα δεδομένα και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση διάνοιξης σήραγγας με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Συγκεκριμένα, με την εφαρμογή της Μ.Π.Σ. γίνεται η προσομοίωση διάνοιξης σήραγγας με τη μέθοδο NATM, καθώς και με τη χρήση ασπίδας. Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία, οι παραδοχές ανάλυσης, τα εδαφικά μοντέλα και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται παρουσιάζονται υπό τη μορφή κατάλληλων σχημάτων και πινάκων.

Τέλος, η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την επισύναψη της χρησιμοποιούμενης βιβλιογραφίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2°

Μέθοδος κλειστής διάνοιξης σηράγγων

2.1 Εισαγωγή

Οι κυριότεροι τρόποι κατασκευής υπόγειων έργων είναι η μέθοδος του «ανοιχτού ορύγματος» (cut and cover) και η μέθοδος της κλειστής διάνοιξης. Η μέθοδος του ανοιχτού ορύγματος επιτυγχάνεται αρχικώς με επιφανειακή εκσκαφή (cut) και εν συνεχεία με επανεπίχωση (cover) ενώ η μέθοδος της κλειστής διάνοιξης πραγματοποιείται με υπόγεια εκσκαφή και αποσκοπεί στην ελάχιστη δυνατή διαταραχή της εδαφικής επιφάνειας.

Η δεύτερη εκ των ως άνω μεθόδων κατασκευής υπόγειων έργων χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε αστικές περιοχές κυρίως εξαιτίας της μικρότερων επιδράσεων - οχλήσεων που προκαλεί στο κυκλοφοριακό δίκτυο και στην καθημερινή ζωή των πολιτών. Είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί στους περισσότερους τύπους εδαφών όταν το βάθος εκσκαφής είναι σημαντικό και σχεδόν πάντοτε όταν η διάνοιξη πραγματοποιείται σε βραχώδες υλικό.

Οι κυριότεροι τρόποι διάνοιξης υπόγειου έργου με τη μέθοδο της κλειστής διάνοιξης είναι οι εξής:

- Ο συμβατικός τρόπος (Νέα Αυστριακή Μέθοδος Διάνοιξης-NATM)
- Η κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης(TBM)

2.2 Συμβατικός τρόπος, κατασκευή σηράγγων με τη Νέα Αυστριακή Μέθοδο - NATM

Η μέθοδος NATM θεμελιώθηκε από τον Rabcewinz και εξελίχθηκε σε μία από τις πιο σύγχρονες μεθόδους κατασκευής υπόγειων έργων. Η διάνοιξη συντελείται είτε με μηχανικά μέσα (roadheader, συμβατικές εκσκαφές) σε περιπτώσεις εδαφικών σχηματισμών, μαλακού ή αποσαθρωμένου βράχου, είτε με χρήση εκρηκτικών σε περίπτωση αντιμετώπισης σκληρών βραχωδών σχηματισμών.

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο αμέσως μετά τη διάνοιξη ενός τμήματος του υπόγειου έργου τοποθετείται σύστημα προσωρινής υποστήριξης που αποτελείται από λεπτή επένδυση εκτοξευόμενου σκυροδέματος , αγκύρια , σιδηρά πλαίσια κ.λπ το οποίο όταν φτάσει σε συνθήκες ισορροπίας αντικαθίσταται από την τελική επένδυση. Όταν το έδαφος που περιβάλλει την εκσκαφή είναι κακής ποιότητας, είναι δυνατόν να βελτιωθεί με τσιμεντενέσεις.

Η μόνιμη επένδυση προσφέρει αυξημένη ασφάλεια σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, δημιουργεί ομοιόμορφη εσωτερική επιφάνεια και βελτιώνει τη στεγανότητα του έργου. Η μέθοδος NATM χρησιμοποιεί όλα τα απαραίτητα μέτρα, ώστε το έδαφος να αναπτύξει την ικανότητα αυτοϋποστήριξης και να παρέχει τη μέγιστη δυνατή σταθερότητα στο υπόγειο άνοιγμα και στις παρακείμενες κατασκευές. Αποδεδειγμένα αποτελεί την οικονομικότερη και ταχύτερη μέθοδο από τις συμβατικές, τόσο σε βραχύδη όσο και σε μαλακά εδαφικά υλικά.

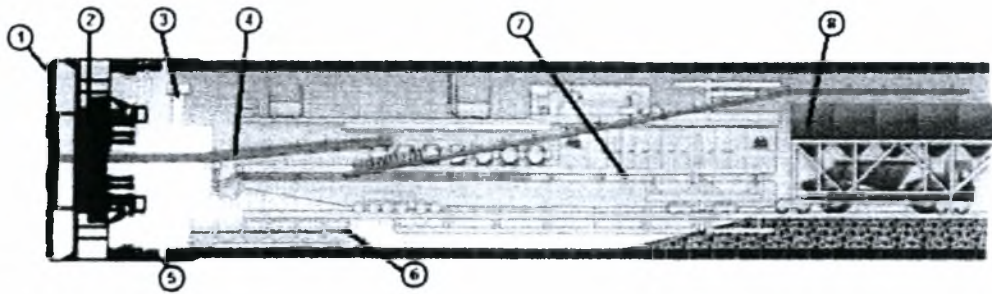
2.3 Κατασκευή του έργου με μηχανές ολομέτωπης Διάνοιξης (TBM)

Οι μηχανές ολομέτωπης διάνοιξης χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σηράγγων κυκλικής διατομής. Με τις μηχανές αυτές εκτελούνται ταυτόχρονα η διάνοιξη της σήραγγας, η υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων και η τοποθέτηση της μόνιμης επένδυσης. Έχουν διάμετρο μέχρι και 12 μέτρα και αποτελούνται από τα εξής τμήματα:

- Ολομέτωπη κοπτική κεφαλή (τύμπανο προώθησης) εφοδιασμένη με διάφορα είδη κοπτικών (σιαγώνες σύνθλιψης για εδάφη και κυλιόμενοι κοπτικοί δίσκοι για σκληρά πετρώματα). Στο τύμπανο προώθησης το οποίο, εκτός από τη διάνοιξη εξασφαλίζει και τη στήριξη του μετώπου της σήραγγας, υπάρχουν μεταβλητά ανοίγματα ώστε να είναι δυνατή η αλλαγή των κοπτήρων υπό ασφαλείς συνθήκες. Η κοπτική κεφαλή έχει την ικανότητα να περιστρέφεται και στις δυο διευθύνσεις, ώστε οι σιαγώνες να μπορούν να καθαριστούν από μόνες τους όταν γίνεται διάτρηση σε μαλακά εδάφη. Στο τύμπανο υπάρχουν ανθρωποθυρίδες για να μπορεί να γίνει επιθεώρηση του χώρου μεταξύ του μετώπου και του τυμπάνου, ώστε να αποφεύγονται ζημιές σε αρχαιολογικά ευρήματα.
- Μεταλλική κυλινδρική ασπίδα για την ακτινική υποστήριξη της σήραγγας.
- Θάλαμο εργασίας πίσω από την κοπτική κεφαλή.
- Ανυψωτική μηχανή η οποία μεταφέρει και τοποθετεί την επένδυση στο πίσω μέρος της ασπίδας. Η επένδυση αποτελείται από προκατασκευασμένα θολωτά στοιχεία από μπετόν ή από χυτοσίδηρο (θολίτες) τα οποία συνδεόμενα το ένα με το άλλο με κοχλίες σχηματίζουν ένα δακτύλιο. Η μεταλλική ασπίδα και οι

θολίτες είναι υδατοστεγείς ενώ νερό μπορεί να εισέλθει στο μέτωπο της σήραγγας μόνον από τα ανοίγματα της κοπτικής κεφαλής.

- Σύστημα υδραυλικών προωθητικών γρύλων σε κυκλική διάταξη εξασφαλίζει την προώθηση του τυμπάνου.
- Μηχανή αποκομιδής των προϊόντων της εκσκαφής. Τα προϊόντα απομακρύνονται από το μέτωπο , με μεταφορικές ταινίες , σε θέσεις έξω από τη σήραγγα όπου αποθηκεύονται προσωρινά μέχρι την τελική τους εναπόθεση.



1. Κοπτική κεφαλή
2. Κινητήρας
3. Σύστημα ανύψωσης στοιχείων επένδυσης
5. Προωθητικοί γρύλοι
6. Στοιχεία επένδυσης
7. Οπίσθιο σύστημα στήριξης
8. Βαγόνια απομάκρυνσης προϊόντων εκσκαφής

Σχήμα 2.1: Βασικά τμήματα μηχανής διάνοιξης TBM

2.3.1 Ταξινόμηση των μηχανοποιημένων τεχνικών διάνοιξης

Οι μηχανοποιημένες τεχνικές διάνοιξης είναι εκείνες στις οποίες η εκσκαφή γίνεται μηχανικά με τη βοήθεια οδόντων, αξινών ή δίσκων. Η ταξινόμησή τους διευκολύνει τη δύσκολη επιλογή της μεθόδου διάνοιξης σύμφωνα με τις υπάρχουσες γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες αλλά και τη συσχέτιση του έργου με άλλες υφιστάμενες κατασκευές. Ο πίνακας 2.1 ταξινομεί τις μηχανές με βάση την υποστήριξη που παρέχουν στην εκσκαφή, όπως προτείνεται από το AFTES.

2.3.2 Μηχανές που δεν παρέχουν άμεση υποστήριξη

Οι μηχανές που δεν παρέχουν άμεση υποστήριξη χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει κίνδυνος καταπτώσεων, οπότε δεν απαιτείται άμεση και συνεχής υποστήριξη.

2.3.2.1 Μηχανές διάνοιξης με βραχίονα (boom)

Οι μηχανές με βραχίονα (boom) αποτελούνται από ένα βραχίονα εκσκαφής τοποθετημένο σε ένα αυτοπρωθούμενο πλαίσιο κι εφοδιασμένο με έναν από τους παρακάτω τύπους εργαλείων:

- Εκσκαφέα, σπαστήρα ή υδραυλικό θραυστήρα στροφείου.
- Ευθύγραμμη ή εγκάρσια κοπτική κεφαλή (roadheader).

Ο βραχίονας πραγματοποιεί διαδοχικά σαρώματα στο μέτωπο της κεφαλής στο οποίο η πρόσβαση είναι εφικτή κάθε χρονική στιγμή. Στη δύναμη διεξόδου των εργαλείων ανθίσταται μόνο το βάρος του μηχανήματος. Οι μηχανές τύπου boom, που χρησιμοποιούνται σε διάφορες διατομές σηράγγων, είναι κατάλληλες για εδάφη υψηλής συνεκτικότητας και για μαλακό βράχο.



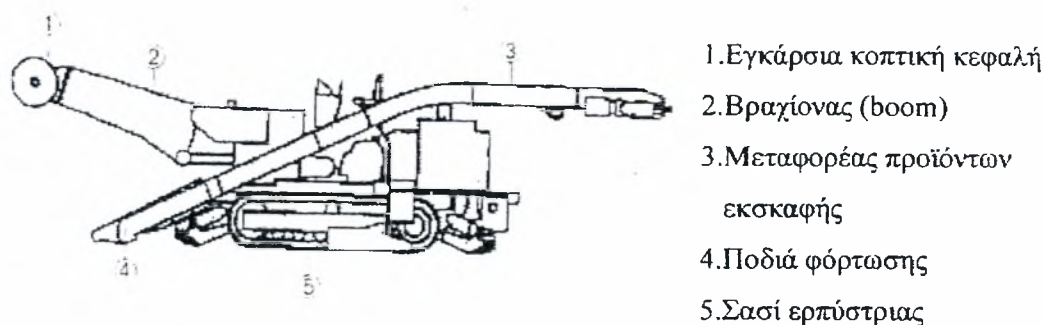
Σχήμα 2.2: Μηχανή διάνοιξης τύπου “roadheader”

Σε περίπτωση που γίνει χρήση των μηχανημάτων σε υδροφόρο ορίζοντα πρέπει να ληφθούν μέτρα για την αποφυγή εισροής υδάτων. Επίσης η μηχανή τύπου boom αντιστηρίζεται αποκλειστικά στο πάτωμα της εκσκαφής. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαίο το έδαφος να έχει επαρκή φέρουσα ικανότητα.

Τέλος καθώς αυτή η τεχνική διάνοιξης δεν παρέχει καμία άμεση υποστήριξη πρέπει να συνοδεύεται από τεχνική υποστήριξη όπως νεύρα χάλυβα, μάνταλα βράχου, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κ.λπ.

Είδος Υποστήριξης	Ομάδες	Κατηγορίες	Τύπος
καμία	μηχανή διάνοιξης τύπου boom	κοπτική κεφαλή	ευθυγραμμισμένη κοπτική κεφαλή εγκάρσια κοπτική κεφαλή
		εξοκαφικού τύπου	εξοκαφικός βραχιόννας αποξέστης ή σπαστήρας υδραυλικός θραυστήρας στροφαίλου
περιφερειακή υποστήριξη	μηχανή διάνοιξης main-beam		
	μηχανή διεύρυνσης σήραγγας		
	μηχανή διάνοιξης ανοιχτού μετώπου με ασπίδα	ασπίδα με στοιχεία συγκράτησης	ολικού μετώπου
περιφερειακή και μετωπιαία υποστήριξη	μηχανή διάνοιξης κλειστού μετώπου με ασπίδα	μηχανική υποστήριξη	ολικού μετώπου μερικού μετώπου
		ασπίδα με συμπιεσμένο αέρα	ολικού μετώπου
		slurry shield	ολικού μετώπου
		μηχανή EPB	μερικού μετώπου
		ασπίδα μικτού μετώπου	ολικού μετώπου ολικού μετώπου

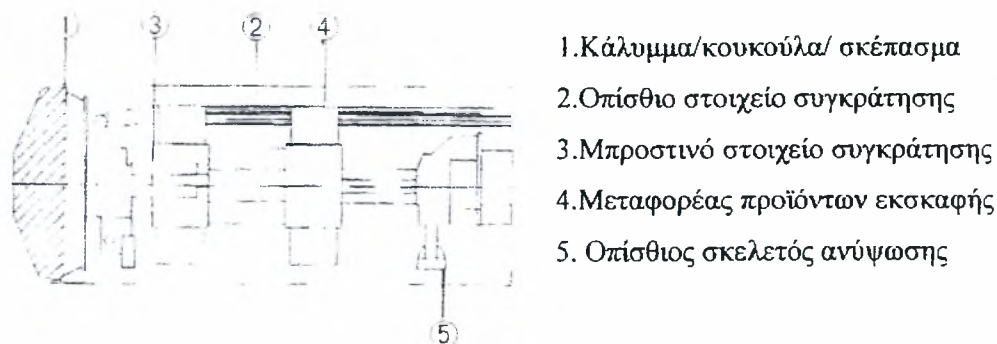
Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση μηχανών διάνοιξης (AFTES, 2000)



Σχήμα 2.3: Βασικά τμήματα μηχανή τύπου boom

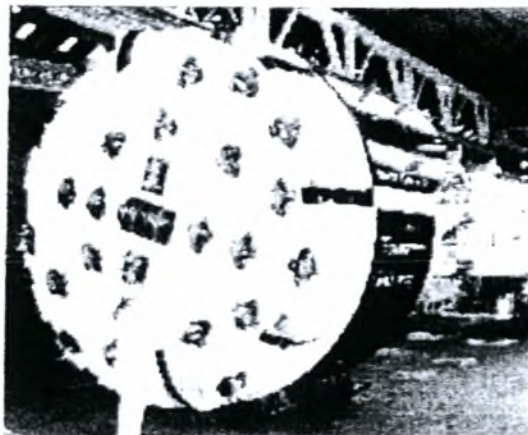
2.3.2.2 Μηχανές διάνοιξης τύπου κύριας δοκού (main beam)

Οι μηχανές διάνοιξης τύπου κύριας δοκού (main beam) φέρουν μία περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή που εκσκάπτει ολόκληρο το μέτωπο της σήραγγας σε ένα ενιαίο πέρασμα. Στην ώθησή του αντιδρούν στοιχεία συγκράτησης ακτινικής ώθησης που αντιστηρίζονται στις παρειές της εκσκαφής. Η κεφαλή φέρει διάφορους κόπτες (δίσκοι, περιστρεφόμενα πριονωτά τρυπάνια κ.λπ) ενώ η πρόσβαση στο μέτωπο είναι δυνατή μετά την απόσυρσή της, όταν παύει η λειτουργία της μηχανής.



Σχήμα 2.4: Βασικά τμήματα μηχανής main beam

Οι μηχανές αυτού του τύπου είναι κατάλληλες για τη διάνοιξη σηράγγων σε βράχο υψηλής αντοχής. Αντίθετα δεν είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε μη συνεκτικά εδάφη, ενώ υποχρεωτική είναι η λήψη μέτρων προστασίας όταν η διάνοιξη γίνεται κάτω από υδροφόρο ορίζοντα. Για αδύναμο βράχο η φέρουσα επιφάνεια των στοιχείων συγκράτησης πρέπει να αυξάνεται προκειμένου να αποτραπεί η διάτρηση του εδάφους από αυτά.

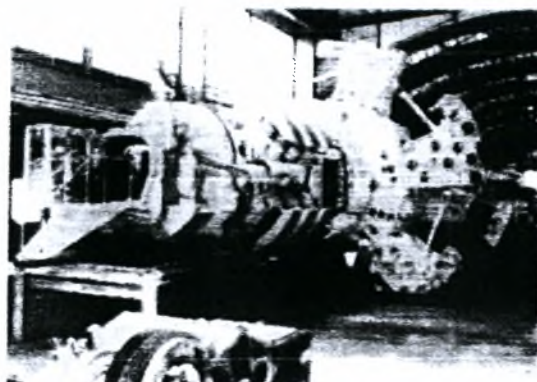


Σχήμα 2.5: Μηχανή διάνοιξης main beam

Τέλος αξίζει να αναφερθεί πως όταν γίνεται χρήση μηχανής main beam σε σκληρό έδαφος πρέπει να λαμβάνεται κάθε προφύλαξη, ώστε οι κόπτες της κεφαλής να μπορούν να αντικατασταθούν με τη μέγιστη δυνατή ασφάλεια.

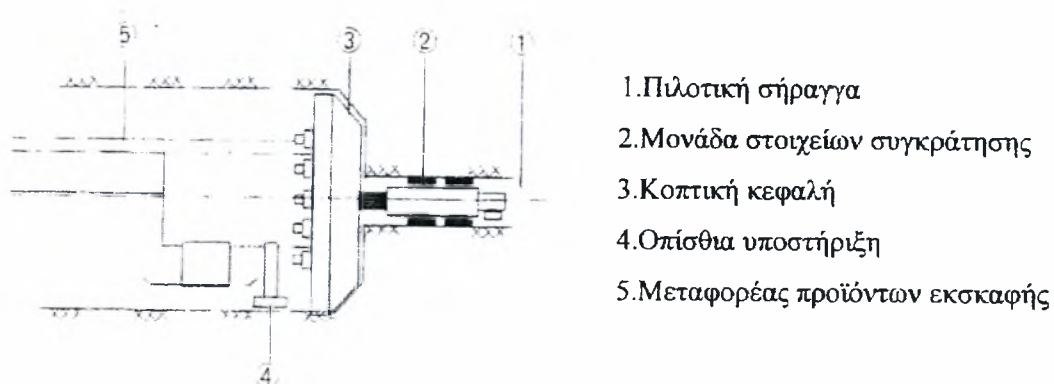
2.3.2.3 Μηχανές διεύρυνσης της σήραγγας (Tunnel Reaming Machine)

Οι μηχανές διεύρυνσης της σήραγγας λειτουργούν όπως και οι μηχανές main beam με μόνη διαφορά ότι η κεφαλή περισσότερο σύρεται παρά ωθείται. Η σήραγγα διανοίγεται με ενιαίο πέρασμα με μία κοπτική κεφαλή ή με πολλαπλά περάσματα με χρήση κοπτικών μηχανών αυξανόμενης διαμέτρου.



Σχήμα 2.6: Μηχανή διεύρυνσης της σήραγγας

Οι μηχανές αυτού του τύπου είναι κατάλληλες για την διάνοιξη μεγάλων οριζόντιων ή κεκλιμένων σηράγγων.



Σχήμα 2.7: Βασικά τμήματα μηχανής διεύρυνσης της σήραγγας

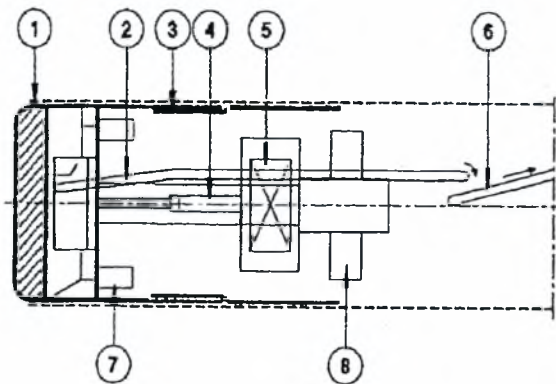
2.3.3 Μηχανές που παρέχουν άμεση πλευρική στήριξη

Οι μηχανές που παρέχουν άμεση πλευρική υποστήριξη ανήκουν στην κατηγορία των TBM ανοιχτού μετώπου. Πρέπει να αναφερθεί ότι, κατά την εκσκαφή, υποστηρίζουν τις παρειές της σήραγγας όχι όμως το μέτωπό της. Οι μηχανές μπορούν να έχουν δύο είδη ασπίδας:

- ασπίδα ενός δοχείου (one-can shield)
- ασπίδα δύο ή περισσότερων δοχείων που συνδέονται μεταξύ τους με αρθρώσεις.

2.3.3.1 TBM ανοιχτού μετώπου με ασπίδα με στοιχεία συγκράτησης (open face gripper shield)

Μία μηχανή διάνοιξης αυτού του τύπου είναι όμοια με ένα TBM main beam με τη διαφορά ότι περιβάλλεται ακτινικά από μία κυλινδρική ασπίδα, η οποία φέρει στοιχεία συγκράτησης.



1. Κοπτική κεφαλή
2. Ιμάντας εξαγωγής προϊόντων εκσκαφής
3. Τηλεσκοπικός τομέας
4. Έμβολο ώθησης
5. Ιμάντας μεταφοράς
6. Στοιχεία συγκράτησης
7. Μηχανή
8. Ανωψωτής στοιχείων επένδυση

Σχήμα 2.8: Βασικά τμήματα μηχανής διάνοιξης τύπου gripper shield

Η περιστρεφόμενη κοπτική κεφαλή πιέζει τους κοπτικούς δίσκους στην κεφαλή. Στην ώθηση της κοπτικής κεφαλής αντιδρούν τα αντιστηριζόμενα, στις παρειές της σήραγγας, ακτινικά παρεμβύσματα. Ένας υποστηρικτικός συρμός πίσω από τη μηχανή φέρει όλο τον απαραίτητο, για την λειτουργία της, εξοπλισμό. Τα προϊόντα της εκσκαφής συλλέγονται σε ειδικούς κάδους και μεταφέρονται σε θέσεις εκτός της σήραγγας με τη βοήθεια των ιμάντων απομάκρυνσης. Οι μηχανές διάνοιξης με ασπίδα με στοιχεία συγκράτησης είναι κατάλληλες για διάνοιξη σε βράχο. Η μηχανή παρέχει άμεση παθητική πλευρική υποστήριξη και προστασία των εργαζόμενων από τον κίνδυνο κατάρρευσης χωμάτινων όγκων. Ο συγκεκριμένος τύπος μηχανής δεν μπορεί να αντισταθμίσει την υδροστατική πίεση για αυτό και λαμβάνουμε πρόσθετα μέτρα προστασίας (βελτίωση εδάφους, ταπείνωση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα) κατά την εργασία κάτω από υδροφόρο ορίζοντα.

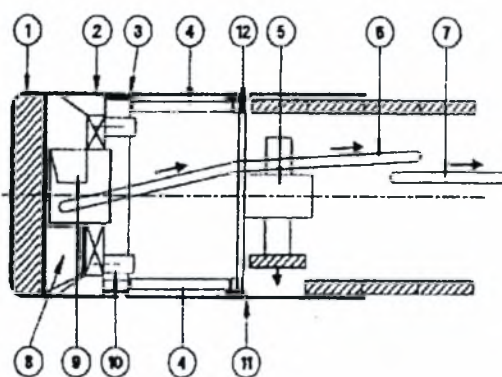
2.3.3.2 TBM ανοιχτού μετώπου με τμηματική ασπίδα (segment shield)

Οι μηχανές διάνοιξης ανοιχτού μετώπου με τμηματική ασπίδα διαθέτουν μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή ή ένα βραχίονα εκσκαφής. Ωθούνται προς τα εμπρός από έμβολα που αντιστηρίζονται στα στοιχεία της επένδυσης που τοποθετούνται

πίσω τους. Η πρόοδός τους είναι διαδοχική όπως περιγράφεται συνοπτικά ακολούθως:

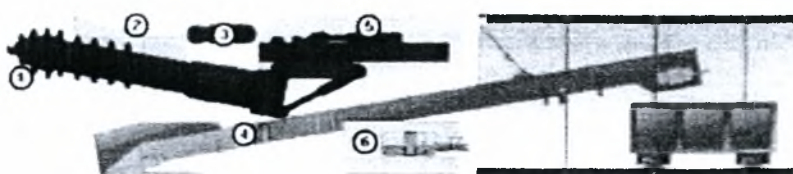
- Διάτρηση υπό την ώθηση επιμηκών εμβόλων που αντιστηρίζονται στην επένδυση.
- Απόσυρση των εμβόλων ώθησης και ανέγερση νέου δακτυλίου επένδυσης.

Η ασπίδα παρέχει παθητική πλευρική υποστήριξη, ενώ το μέτωπο της σήραγγας πρέπει να είναι αυτοϋποστηριζόμενο.



1. Κοπτική κεφαλή
2. Ασπίδα
3. Άρθρωση
4. Έμβολο ώθησης
5. Ανυψωτής στοιχείων επένδυσης
6. Ιμάντας απομάκρυνσης προϊόντων εκσκαφής
7. Ιμάντας μεταφοράς προϊόντων εκσκαφής
8. Δεξαμενή προϊόντων εκσκαφής
9. Μηχανή πλοήγησης κοπτικής κεφαλής
10. Ανοίγματα κοπτικής κεφαλής με θύρες
11. Πλευρικό παρέμβυσμα μεταξύ κοπτικής κεφαλής και ασπίδας
12. Ουραία άρθρωση

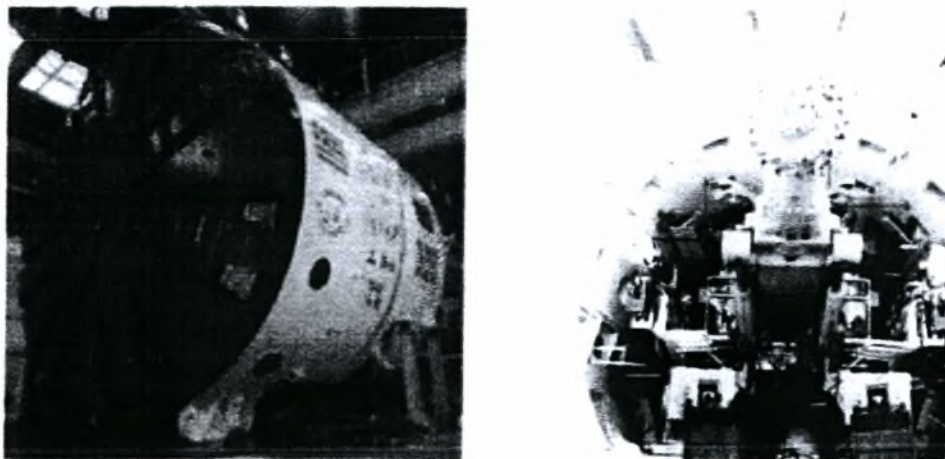
Σχήμα 2.10: Βασικά τμήματα TBM με τμηματική ασπίδα



1. Βραχίονας εκσκαφής
2. Ασπίδα
3. Περιστρεφόμενος κύλινδρος
4. Ιμάντες μεταφοράς
5. Έμβολο μηχανής
6. Υδραυλικό σύστημα προώθησης

Σχήμα 2.11: TBM μερικού μετώπου με τμηματική ασπίδα

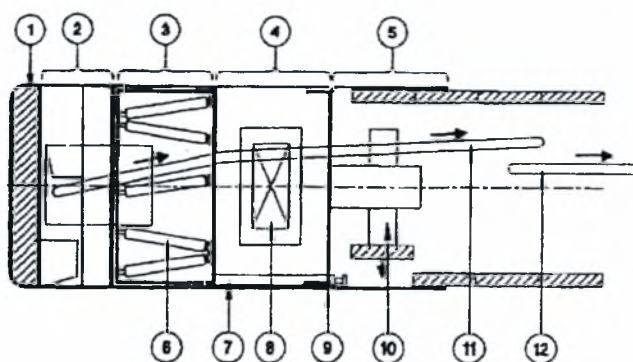
Αυτός ο τύπος μηχανής δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υδροφόρο ή ασταθές έδαφος χωρίς τη λήψη κατάλληλων μέτρων. Βρίσκει εφαρμογή σε μαλακού τύπου έδαφος ή σε μαλακό βράχο.



Σχήμα 2.12: Μηχανές διάνοιξης τμηματικής ασπίδας, με ολομέτωπη κεφαλή και βραχίονα εκσκαφής αντίστοιχα, που χρησιμοποιήθηκαν στο μετρό της Αθήνας

2.3.3.3 TBM ανοιχτού μετώπου με διπλή ασπίδα

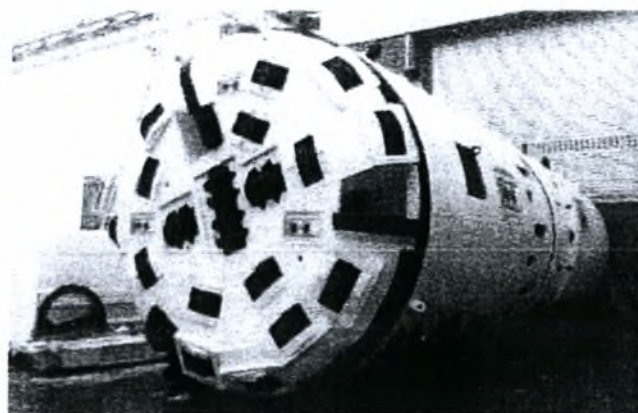
Ένα TBM με διπλή ασπίδα διαθέτει μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή και δύο έμβολα ώθησης που αντιστηρίζονται στους τοίχους (ακτινικά στοιχεία συγκράτησης) ή στην επένδυση της σήραγγας. Συνδυάζεται έτσι η ακτινική λαβή με τη βοήθεια στοιχείων συγκράτησης, με τη διαμήκη λαβή με τη βοήθεια εμβόλων που αντιστηρίζονται στην επένδυση.



1. Κοπτική κεφαλή
2. Εμπρόσθιο δοχείο
3. Τηλεσκοπική μονάδα
4. Μονάδα στοιχείων συγκράτησης
5. Ουρά
6. Έμβολο κύριας προώθησης
7. Επμήκη έμβολο ώθησης
8. Στοιχεία συγκράτησης
9. Ουραία άρθρωση
10. Ανυψωτής στοιχείων επένδυσης

Σχήμα 2.13: Βασικά τμήματα TBM διπλής ασπίδας

Με το οπίσθιο τμήμα της μηχανής εξασφαλισμένο από τα στοιχεία συγκράτησης το εμπρόσθιο τμήμα ωθείται προς τα εμπρός με τη βοήθεια των εμβόλων και διανοίγει τη σήραγγα. Ταυτόχρονα κατασκευάζεται ο δακτύλιος από τμήματα της επένδυσης. Τα στοιχεία συγκράτησης απελευθερώνονται και τα διαμήκη έμβολα ωθούνται για την προώθηση του οπισθίου τμήματος προς τα εμπρός. Το οπίσθιο τμήμα συγκρατείται ξανά και η ως άνω περιγραφείσα διαδικασία επαναλαμβάνεται.



Σχήμα 2.14: Μηχανή διάνοιξης διπλής ασπίδας

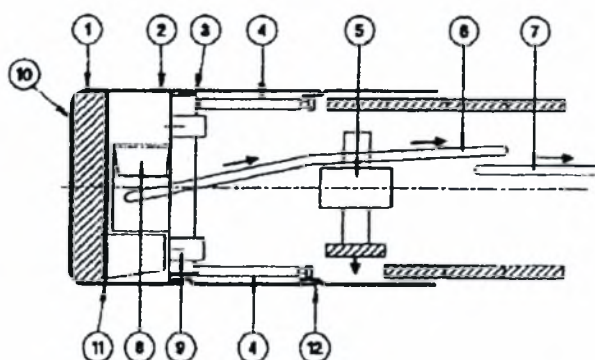
2.3.4 Μηχανές που παρέχουν ταυτόχρονα άμεση πλευρική και μετωπική υποστήριξη

Τα TBM που παρέχουν **άμεση πλευρική και μετωπική υποστήριξη** κατά τη διάρκεια της εκσκαφής σηράγγων ανήκουν στην κατηγορία μηχανών διάνοιξης κλειστού μετώπου με ασπίδα. Με εξαίρεση τα TBM μηχανικής υποστήριξης, όλα διαθέτουν ένα θάλαμο κοπτικής κεφαλής στο μέτωπο, απομονωμένο από το οπίσθιο μέρος της μηχανής με ένα διάφραγμα. Η προώθηση αυτών των μηχανών γίνεται με τη βοήθεια εμβόλων που αντιστηρίζονται στην επένδυση η οποία ανεγείρεται στην ουρά τους με χρήση κατάλληλου ανυψωτή

2.3.4.1 TBM μηχανικής υποστήριξης

Τα TBM μηχανικής υποστήριξης διαθέτουν μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή που παρέχει υποστήριξη στο μέτωπο ωθώντας συνεχώς τα υλικά της εκσκαφής

μπροστά από αυτήν προς το περιβάλλον έδαφος. Η ασπίδα παρέχει άμεση παθητική πλευρική υποστήριξη.

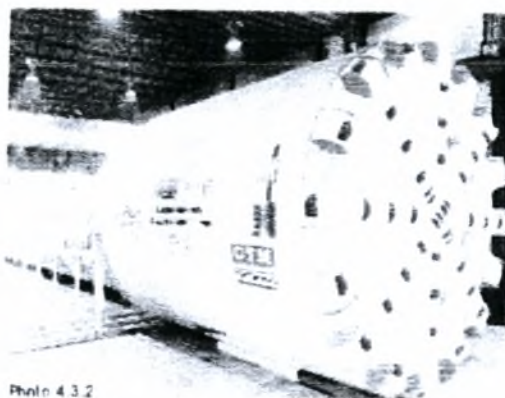


1. Κοπτική κεφαλή
2. Ασπίδα
3. Άρθρωση
4. Έμβολο ώθησης
5. Ανυψωτής στοιχείων επένδυσης
6. Ιμάντας απομάκρυνσης προϊόντων εκσκαφής
7. Ιμάντας μεταφοράς προϊόντων εκσκαφής
8. Δεξαμενή προϊόντων εκσκαφής
9. Μηχανή πλοήγησης κοπτικής κεφαλής
10. Ανοίγματα κοπτικής κεφαλής με θύρες
11. Πλευρικό παρέμβυσμα μεταξύ κοπτικής κεφαλής και ασπίδας
12. Ουραία άρθρωση

Σχήμα 2.15: Βασικά τμήματα TBM μηχανικής υποστήριξης

Τα προϊόντα της εκσκαφής εξάγονται έξω από τη σήραγγα με τη βοήθεια βαγονέτων ορυχείων ή μεταφορικών ιμάντων.

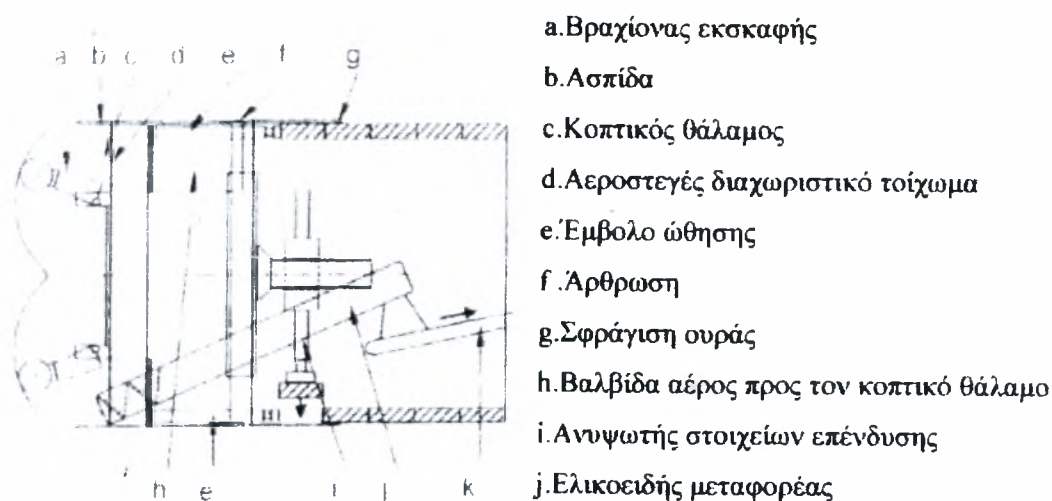
Το TBM μηχανικής υποστήριξης δεν μπορεί να αντισταθεί στην υδροστατική πίεση για αυτό τα συνοδευτικά μέτρα προστασίας (βελτίωση εδάφους, ταπείνωση υδροφόρου ορίζοντα) κρίνονται απαραίτητα. Εφαρμόζονται σε μαλακό βράχο και σε σταθεροποιημένο μαλακό έδαφος με ελάχιστη ή μηδενική υδροστατική πίεση.



Σχήμα 2.16: Μηχανή διάνοιξης μηχανικής υποστήριξης

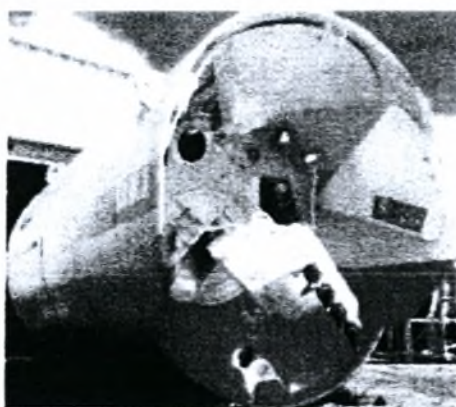
2.3.4.2 TBM συμπιεσμένου αέρα

Τα TBM συμπιεσμένου αέρα διαθέτουν μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή ή κοπτικούς βραχίονες. Η μηχανική άμεση υποστήριξη του μετώπου και των τοιχωμάτων παρέχονται από την κοπτική κεφαλή και την ασπίδα, αντίστοιχα. Τα προϊόντα της εκσκαφής απομακρύνονται από ένα σύστημα εκτόνωσης της πίεσης, ενώ η μεταφορά τους έξω από τη σήραγγα γίνεται με ιμάντες ή τροχοφόρα οχήματα.



Σχήμα 2.17: Βασικά τμήματα TBM συμπιεσμένου αέρα

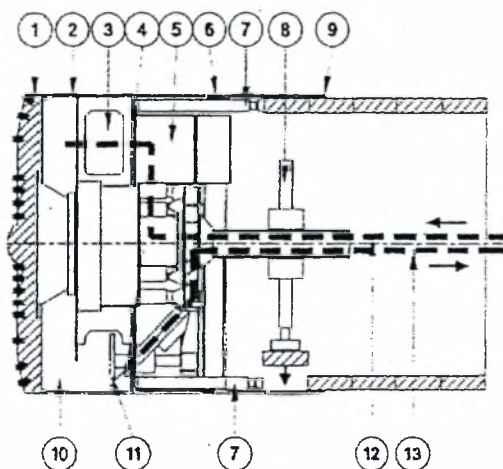
Οι μηχανές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε εδάφη χαμηλής διαπερατότητας χωρίς σημαντικές ασυνέχειες. Η χρήση τους δεν συνίσταται σε περιπτώσεις που το έδαφος στο μέτωπο είναι ετερογενές και είναι απαγορευτική σε οργανικά εδάφη, όπου υπάρχει κίνδυνος πυρκαγιάς.



Σχήμα 2.18: Μηχανή διάνοιξης συμπιεσμένου αέρα

2.3.4.3 TBM τύπου slurry shield

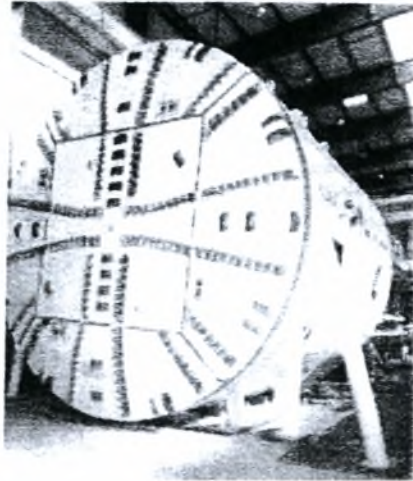
Τα TBM τύπου slurry shield διαθέτουν μία ολομέτωπη κοπτική κεφαλή. Η μετωπική και πλευρική υποστήριξη της σήραγγας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια πίεσης διαλύματος πηλού που παράγεται από το υδραυλικό σύστημα απομάκρυνσης των προϊόντων της εκσκαφής. Η επένδυση της σήραγγας κατασκευάζεται εντός του πίσω τμήματος («ουρά») του TBM. Τα προϊόντα της εκσκαφής αφαιρούνται με την άντλησή τους μέσω των σωλήνων που συνδέουν τη μηχανή διάνοιξης με τις εγκαταστάσεις διαχωρισμού και ανακύκλωσης του μίγματος slurry.



1. Κοπτική κεφαλή
2. Ασπίδα
3. Αεροφουσαλίδα
4. Υδατοστεγής διαφραγματικός τοίχος
5. Βαλβίδα αέρος προς τον θάλαμο της κοπτικής κεφαλής
6. Ουραία άρθρωση
7. Έμβολο ώθησης
8. Ανυψωτής στοιχείων επένδυσης
9. Αεροστεγής σφράγιση ουράς
10. Θάλαμος κοπτικής κεφαλής
11. Αναδευτήρας
12. Γραμμή εφοδιασμού slurry
13. Γραμμή επιστροφής slurry

Σχήμα 2.19: Βασικά τμήματα TBM τύπου slurry shield

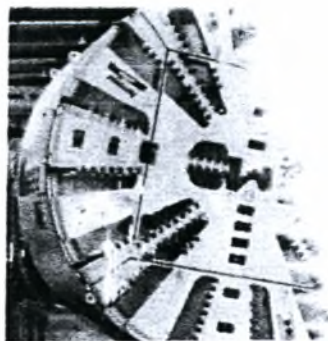
Οι μηχανές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε κοκκώδη εδάφη (άμμος, αμμοχάλικα), σε ετερογενή μαλακά εδάφη, σε περιοχές με τμήματα σκληρού βράχου και σε εδάφη υψηλής διαπερατότητας, ενώ ειδικά μέτρα προστασίας πρέπει να λαμβάνονται σε περίπτωση υψηλής πίεσης νερού.



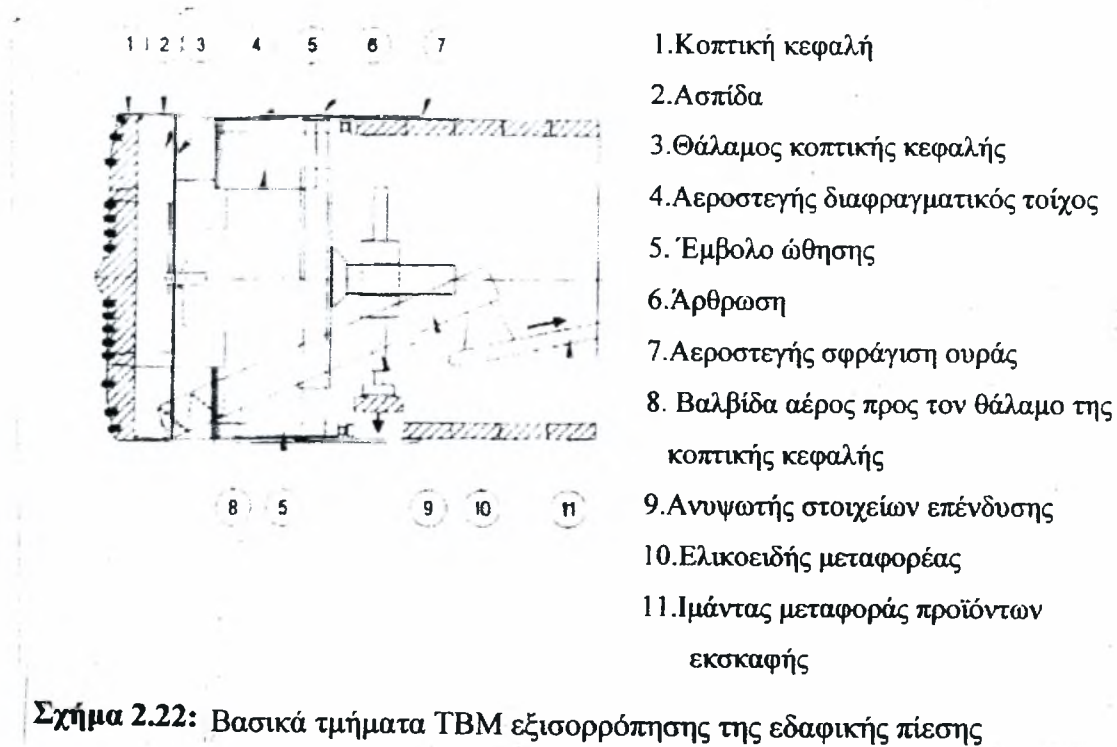
Σχήμα 2.20: Μηχανή διάνοιξης τύπου slurry shield

2.3.4.4 TBM εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης (EPBM)

Οι μηχανές διάνοιξης εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης διαθέτουν ολομέτωπη κοπτική κεφαλή. Η υποστήριξη του μετώπου επιτυγχάνεται με τη συμπίεση των προϊόντων εκσκαφής στο θάλαμο της κοπτικής κεφαλής ώστε να εξισορροπηθεί η ασκούμενη από το έδαφος πίεση. Η επένδυση κατασκευάζεται μέσα στην ουρά του TBM όπου αεροστεγής σφράγιση προστατεύει από οποιαδήποτε διαρροή. Τα προϊόντα εκσκαφής απομακρύνονται με έναν ελικοειδή μεταφορέα και στη συνέχεια μεταφέρονται εκτός της σήραγγας με μεταφορικές ταινίες ή με τροχοφόρα οχήματα.



Σχήμα 2.21: Μηχανή διάνοιξης εξισορρόπησης της εδαφικής πίεσης



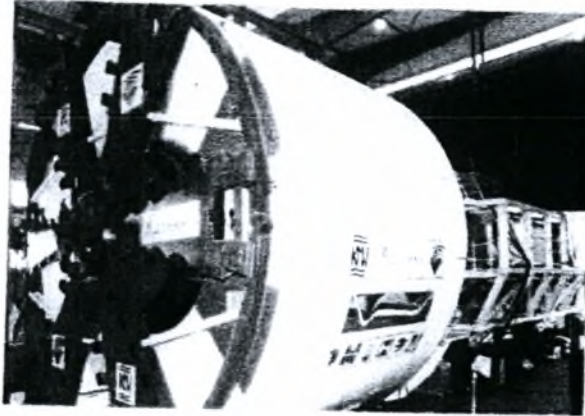
Οι μηχανές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται σε εδάφη που είναι πιθανό να παρουσιάσουν συνοχή ικανή να μεταβιβάσει την πίεση στο θάλαμο της κεφαλής (αργιλώδη εδάφη, μαλακή άσβεστος, ασβεστόλιθος κ.λπ), όπως και σε εδάφη υψηλής διαπερατότητας, ενώ σε σκληρό έδαφος είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων προστασίας (εγκατάσταση σκληρών δίσκων φθοράς στην κοπτική κεφαλή).

2.3.4.5 TBM ασπίδας μικτού μετώπου

Πολλές φορές λόγω σύνθετων γεωλογικών και υδραυλικών συνθηκών οδηγούμαστε στη χρήση μηχανών ασπίδας μικτού μετώπου οι οποίες, ανάλογα με τις ανάγκες, μπορούν να εργαστούν ως TBM ανοιχτού ή κλειστού τύπου. Οι κατηγορίες μηχανών μικτού τύπου είναι οι ακόλουθες:

- Μηχανές που μπορούν να εργαστούν ως ανοιχτού τύπου (με ένα μεταφορικό ιμάντα εξαγωγής των προϊόντων εκσκαφής) και με συγκεκριμένη αλλαγή της διαμόρφωσης τους, ως κλειστού τύπου EPBM.
- Μηχανές που μπορούν να εργαστούν ως ανοιχτού τύπου (με μεταφορικό ιμάντα απομάκρυνσης των προϊόντων εκσκαφής) και με αλλαγή της διαμόρφωσής τους, ως κλειστού τύπου slurry shield.
- Μηχανές που μπορούν να εργαστούν ως EPBM και ως slurry shield.

Οι μηχανές αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως για τη διάνοιξη σηράγγων μεγάλης διαμέτρου.



Σχήμα 2.23: Μηχανή διάνοιξης μικτού μετώπου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3°

Στάδια εδαφικών μετακινήσεων

3.1 Εισαγωγή

Οι καθιζήσεις που οφείλονται στη διάνοιξη σηράγγων ανήκουν σε δύο βασικές κατηγορίες:

α) τις άμεσες καθιζήσεις, που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της εκσκαφής και ολοκληρώνονται λίγο μετά το πέρας της και

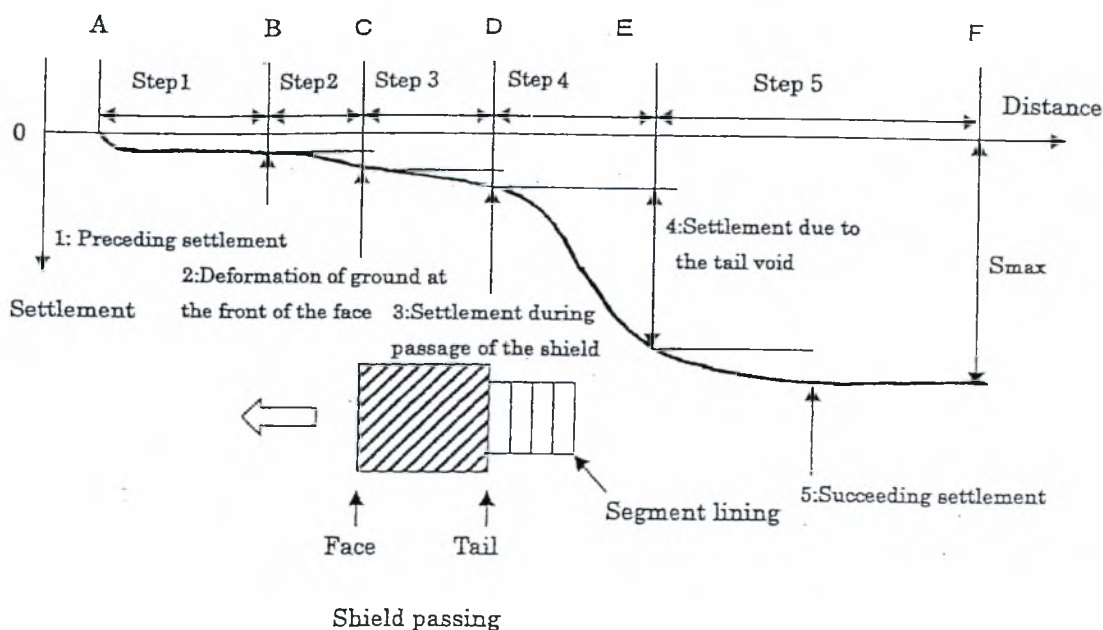
β) τις χρόνιες καθιζήσεις οι οποίες εκδηλώνονται σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα εξαιτίας φαινομένων όπως είναι ο ερπυσμός, η γήρανση και η στερεοποίηση του εδάφους.

Η εξέλιξη των μετακινήσεων (καθιζήσεων) μπορεί να διαρκέσει από κάποιες μέρες έως χρόνια ανάλογα με τον εδαφικό σχηματισμό που συναντάται στη θέση του έργου.

Οι επιμέρους μετακινήσεις που είναι δυνατόν να εμφανισθούν κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας ενός υπόγειου έργου είναι οι εξής:

1. «Πρώιμες» μετακινήσεις.
2. Μετακινήσεις στο μέτωπο.
3. Μετακινήσεις κατά μήκος της ασπίδας της μηχανής διάνοιξης.
4. Μετακινήσεις κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την τοποθέτηση των στοιχείων της επένδυσης.
5. Χρόνιες μετακινήσεις.

Αξίζει να τονισθεί ότι τα αίτια των μετακινήσεων είναι διαφορετικά για κάθε στάδιο του φαινομένου. Η ανάλυσή τους θα γίνει στα παρακάτω κεφάλαια.



Σχήμα 3.1: Επιφανειακές μετακινήσεις που συνοδεύουν την εκσκαφή

3.2 «Πρώιμες» μετακινήσεις

Οι μετακινήσεις αυτές προκύπτουν πολύ πριν την άφιξη της ασπίδας. Όταν συναντάται αμμώδης εδαφικός σχηματισμός, οι εν λόγω μετακινήσεις οφείλονται στην ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα.

3.3 Μετακινήσεις στο μέτωπο

Οι συγκεκριμένες μετακινήσεις προκύπτουν λίγο πριν την άφιξη της ασπίδας και οφείλονται σε μετατοπίσεις του εδάφους στο μέτωπο, στην κατεύθυνση δηλαδή προώθησης της μηχανής διάνοιξης. Πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη σε περίπτωση εκσκαφής σήραγγας σε αργιλικά εδάφη με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου (χωρίς υποστήριξη στο μέτωπο). Τρία είναι τα βασικά αίτια των εδαφικών μετακινήσεων σε αυτό το στάδιο.

1. Η πίεση που ασκείται στο μέτωπο από τον περιστρεφόμενο κοπτικό δίσκο.
2. Η διατάραξη της εδαφικής ζώνης στο μέτωπο λόγω προώθησης της ασπίδας και μεταβολής της πίεσης του κοπτικού θαλάμου.
3. Η τριβή λόγω επαφής ανάμεσα στην ασπίδα και το περιβάλλον έδαφος.

Όταν η εκσκαφή γίνεται με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου με ασπίδα η διαφορά πίεσης μεταξύ του κοπτικού θαλάμου και του εδάφους είναι πολλές φορές αρνητική. Σε αυτή την περίπτωση το έδαφος μετατοπίζεται με φορά αντίθετη με αυτή της προώθησης της μηχανής διάνοιξης.

Σε περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται μηχανές που παρέχουν υποστήριξη στο μέτωπο της εκσκαφής (slurry shield, EPB) οι μετακινήσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες υπό την προϋπόθεση ότι ελέγχεται επαρκώς η ασκούμενη πίεση στο μέτωπο. Σε αντίθετη περίπτωση παρατηρείται διόγκωση του εδάφους. Για τον περιορισμό των μετακινήσεων επιτακτικός είναι ο έλεγχος της πίεσης στον κοπτικό θάλαμο ο οποίος απαιτεί τα ακόλουθα:

- Γνώση των εδαφικών χαρακτηριστικών έμπροσθεν του μετώπου. Πολλές φορές είναι απαραίτητο η ασπίδα να είναι εξοπλισμένη με σύστημα δοκιμαστικής διάνοιξης και έρευνας.
- Η μηχανή διάνοιξης να είναι εφοδιασμένη με όργανα καταγραφής των εδαφικών παραμέτρων.

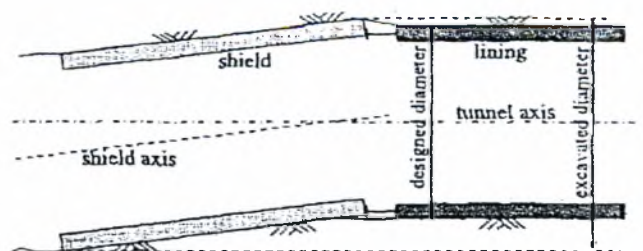
3.4 Μετακινήσεις κατά μήκος της ασπίδας

Οι μετακινήσεις κατά μήκος της ασπίδας εξηγούνται ως ακτινική χαλάρωση μεταξύ του μετώπου και της «ουράς» της ασπίδας. Το χαλαρωμένο έδαφος τείνει να καλύψει το κενό που δημιουργείται με την εκσκαφή ενώ ανάλογα με την παραμόρφωση του εδάφους κατά την προώθηση της ασπίδας μπορεί να το καλύψει πλήρως. Μετρήσεις στο πεδίο έδειξαν ότι οι μετακινήσεις στο τμήμα του εδάφους που διασχίζεται από την ουρά της ασπίδας δεν έχουν σταθερό ρυθμό ανάπτυξης, αφού απαιτείται κάποιος χρόνος απόκρισης του περιβάλλοντος εδάφους. Αυτός ο χρόνος μειώνεται με την αύξηση του πάχους της οροφής της σήραγγας.

Τα βασικά αίτια μετακινήσεων αυτού του σταδίου είναι τα εξής:

α) Υπερεκσκαφή: Για την προώθηση της ασπίδας είναι απαραίτητο να εκσκαφθεί μία μεγάλη οπή ώστε να υπάρχει άνεση χώρου και διευκόλυνση στην καθοδήγησή της. Η υπερεκσκαφή προκαλείται από διάφορα εξαρτήματα στην περιφέρεια της κοπτικής κεφαλής, από κακής ποιότητας εργασία ή εξαιτίας χονδρόκοκκου εδάφους που αφήνει κενά μετά την εκσκαφή του.

β) Δυσκολία στην καθοδήγησή της ασπίδας: Πολλές φορές λόγω δυσκολιών στη διατήρηση της σωστής πορείας της ασπίδας, η πορεία της παρεκκλίνει με αποτέλεσμα η διάμετρος εκσκαφής να διαφοροποιείται από τη διάμετρο της επένδυσης που έχει τοποθετηθεί. Για τη διατήρηση της σωστής πορείας της ασπίδας θα πρέπει να εξασφαλίζεται μία σταθερή κλίση προώθησης (pitch loss). Επίσης η πορεία της ασπίδας μπορεί να είναι τέτοια που να επιφέρει την εκσκαφή εγκάρσιων διατομών μεγαλύτερων από αυτής της ασπίδας και τη δημιουργία κενών.



Σχήμα 3.2: Απώλεια όγκου όταν ο άξονας της ασπίδας δε συμπίπτει με τον άξονα της επένδυσης

γ) Ασπίδες κωνικού σχήματος: Όσο αφορά αυτόν τον παράγοντα οι απόψεις μεταξύ των ειδικών δίστανται. Ο Y. Leblais και οι συνεργάτες του (AFTES 1995) θεωρούν την κωνικότητα παράγοντα πρόκλησης μετακινήσεων πάνω από την ασπίδα. Αντίθετα οι Benmebarek και R. Kastner & C. Ollier (2000), στη μελέτη τους για αστικές σήραγγες στη Λυών διαπίστωσαν ότι η κωνικότητα ήταν πολύ αποτελεσματική και οικονομική ως προς τη μείωση της τριβής μεταξύ ασπίδας και εδάφους.

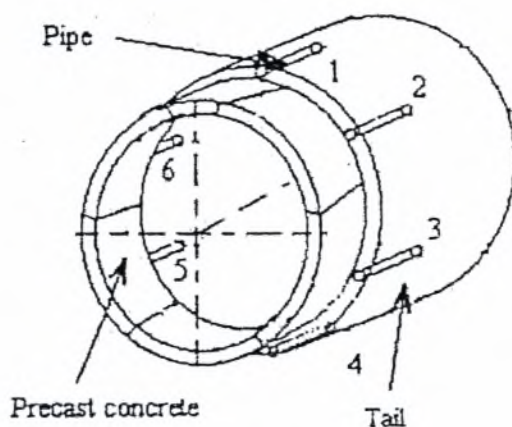
δ) Τραχύτητα της κοπτικής κεφαλής: Λόγω των δυνάμεων τριβής και διάτμησης που αναπτύσσονται στο περιβάλλον έδαφος της σήραγγας είναι δυνατό να προκληθούν μετακινήσεις της οροφής και παραμορφώσεις του εδάφους μπροστά από την ασπίδα.

ε) Εδαφικό υλικό που προσκολλάται στο σώμα της ασπίδας: Ο βαθμός προσκόλλησης εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική τάση μεταξύ του εδάφους και του σώματος της ασπίδας. Οι μετακινήσεις αυτού του σταδίου είναι σημαντικές και ο περιορισμός τους, ο οποίος είναι επιτακτικός, μπορεί να επιτευχθεί:

- με ελαχιστοποίηση της υπερεκκαφής,
- με τη μείωση του συνολικού μήκους της ασπίδας. Ασπίδα μεγάλου μήκους παρέχει μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο για την εξέλιξη των μετακινήσεων-καθιζήσεων αυτού του σταδίου. Η παράμετρος του μήκους της ασπίδας γίνεται ακόμα κρίσιμότερη σε περιπτώσεις διέλευσης από ασθενείς ζώνες, όπου λόγω αυξημένου ρυθμού καθιζήσεων η μεσολάβηση του χρόνου διέλευσης της ασπίδας είναι καθοριστική.
- με έγχυση ενέματος μέσω της «ουράς» της ασπίδας που χρησιμεύει και στη μείωση της τριβής.

3.5 Μετακινήσεις κατά τη διάρκεια και μετά την τοποθέτηση των στοιχείων της επένδυσης

Κατά την τοποθέτηση της επένδυσης δημιουργείται ένα μη υποστηριζόμενο κενό λόγω διαφοράς ανάμεσα στην εξωτερική διάμετρο της ασπίδας και στο στοιχείο της επένδυσης, στο οποίο μπορούν να εκδηλωθούν ακτινικές μετακινήσεις. Η έκταση αυτών των μετακινήσεων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι τα κενά κατά μήκος της ασπίδας, το πάχος της ουράς, η διάμετρος της σήραγγας και το μέγεθος του δημιουργούμενου κενού. Η αντιμετώπιση του τελευταίου παράγοντα αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο για τον περιορισμό των μετακινήσεων αυτού του σταδίου.



Σχήμα 3.3: Ουρά κωνικής ασπίδας και προκατασκευασμένο στοιχείο από σκυρόδεμα

Συνηθισμένη πρακτική αποτελεί το γέμισμα των κενών μεταξύ εδάφους και επένδυσης με κονίαμα το οποίο όμως μέχρι να αποκτήσει την απαιτούμενη σκληρότητα, οι ακτινικές μετακινήσεις συνεχίζονται. Άλλα μέτρα αντιμετώπισης αποτελούν η μείωση του πάχους της ασπίδας και η έγχυση κονιάματος από την «ουρά» της ασπίδας που έχει το πλεονέκτημα της άμεσης πλήρωσης των κενών μόλις αυτά δημιουργούνται από την προώθησή της. Συνίσταται η χρήση υλικών πλήρωσης χωρίς τσιμέντο με παρόμοιες όμως ιδιότητες (πουζολανικά υλικά).

Οι ακτινικές απώλειες της επένδυσης συνεχίζονται και μετά την έγχυση του κονιάματος λόγω της μεγάλης πίεσης στα νέα όρια της σήραγγας. Όταν η επένδυση αποτελείται από στοιχεία προκατασκευασμένου σκυροδέματος, τα οποία τοποθετούνται σωστά κι έχουν το απαιτούμενο πάχος, οι ακτινικές παραμορφώσεις του δακτυλίου είναι περιορισμένες. Στην περίπτωση εύκαμπτης επένδυσης από χυτοσίδηρο εμφανίζονται πρόσθετες μετακινήσεις. Σε σύγκριση με τις μετακινήσεις που δημιουργούνται κατά την τοποθέτηση της επένδυσης, οι εδαφικές μετακινήσεις λόγω παραμόρφωσης των στοιχείων της θεωρούνται αμελητέες.

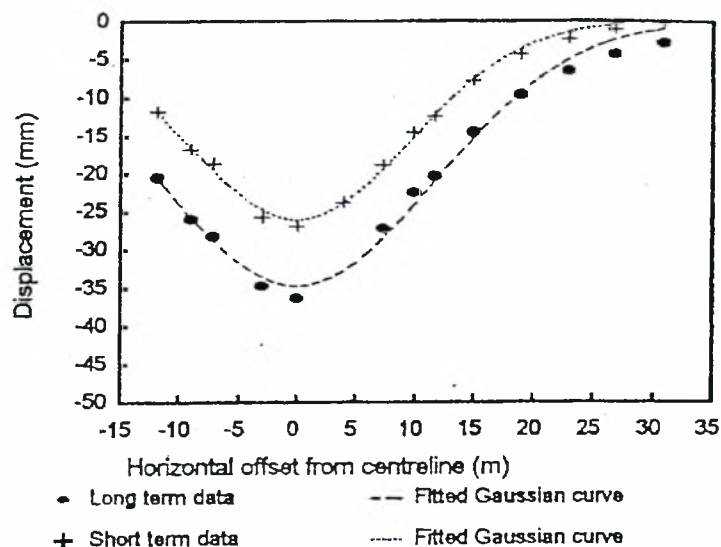
3.6 Χρόνιες μετακινήσεις

Η μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων γύρω από τη σήραγγα προκαλεί ισόποση αύξηση των ενεργών τάσεων του εδάφους με αποτέλεσμα τη γένεση καθιζήσεων. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει γιατί μετά τη διάνοιξη, η εκσκαφή λειτουργεί ως στραγγιστήριο αγωγός με αποτέλεσμα την εκτόνωση της πίεσης του νερού. Η ανάπτυξη των χρόνιων μετακινήσεων-καθιζήσεων οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- στη συμπιεστότητα και στη διαπερατότητα των εδαφικών σχηματισμών που περιβάλλουν την σήραγγα,
- στην κατανομή της πίεσης του νερού πριν την εκσκαφή, μετά την εκσκαφή και κατά την έναρξη της αποστράγγισης,
- στην διαπερατότητα της επένδυσης που κατασκευάζεται κατά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης της σήραγγας,
- στο μέγεθος και στην κατανομή της μεταβολής της πίεσης του νερού των πόρων Δu που προκύπτουν από την κατασκευή της σήραγγας.

Το μέγεθος και η κατανομή του Δu εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα φορτία που δέχεται το έδαφος κατά την κατασκευή της σήραγγας. Τα φορτία αυτά διαφέρουν ανάλογα με τη μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας, αφού με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου το έδαφος θεωρείται σχεδόν αφόρτιστο, ενώ κατά τη διάνοιξη με slurry shield ή EPB η πίεση που ασκείται στο μέτωπο ξεπερνά τις υφιστάμενες τάσεις. Στην περίπτωση διάνοιξης της σήραγγας με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου στα κανονικά στερεοποιημένα υλικά παρατηρείται αποτόνωση των τάσεων γύρω από τη σήραγγα με αποτέλεσμα να είναι αρνητική, ενώ όσο απομακρυνόμαστε από τη σήραγγα γίνεται θετικό.

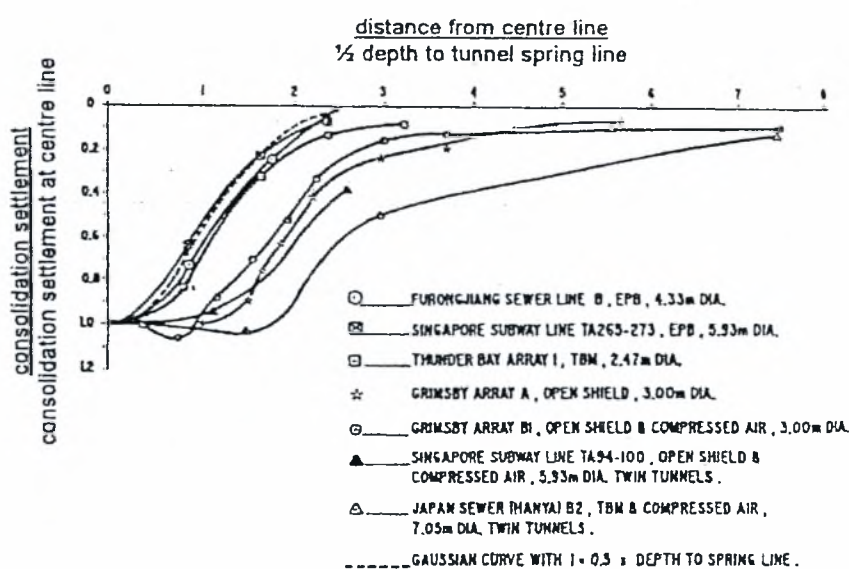
Στα υπερστερεοποιημένα υλικά η τιμή Δu είναι αρνητική σε όλη την έκταση οπότε υπάρχει τάση για διόγκωση του εδάφους. Η κατάσταση αλλάζει όταν ταυτόχρονα με την εκσκαφή επιβάλλονται φορτία στα τοιχώματά της, όπως με εφαρμογή αέρα υπό πίεση (EPB). Αν η πίεση ξεπεράσει τις γεωστατικές τάσεις τότε η τιμή Δu γίνεται θετική προκαλώντας σημαντικές χρόνιες καθιζήσεις όπως αναφέρθηκε από τον Clough (1983).



Σχήμα 3.4: Άμεσες και χρόνιες επιφανειακές καθιζήσεις στην περιοχή του Λονδίνου (Bowers και συνεργάτες, 1996)

Το ποσοστό των χρόνιων μετακινήσεων κυμαίνεται μεταξύ 20% και 50% των συνολικών μετακινήσεων, όμως έχουν παρατηρηθεί και μεγαλύτερα ποσοστά. Ο Shirlaw κατέληξε, ότι για καθιζήσεις από στερεοποίηση σε σήραγγες σε μαλακές αργίλους, οι χρόνιες καθιζήσεις φτάνουν ακόμα και το 90% της ολικής καθίζησης.

Οι χρόνιες καθιζήσεις παρουσιάζουν, σε σχέση με τις άμεσες, ευρύτερη κατανομή κατά την εγκάρσια διεύθυνση κάτι που εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος και την κατανομή των πρόσθετων πιέσεων του νερού των πόρων, οι οποίες αναπτύσσονται κατά τη διάνοιξη της σήραγγας. Αξίζει να τονιστεί ότι ορισμένοι ερευνητές (Shirlaw, Copsly, Yi) παρατήρησαν καμπύλες χρόνιων εγκάρσιων καθιζήσεων παρόμοιου πλάτους με αυτές των άμεσων.



Σχήμα 3.5: Κανονικοποιημένες χρόνιες καθιζήσεις λόγω στερεοποίησης σε μαλακές αργίλους (Shirlaw, 1995)

Οι χρόνιες καθιζήσεις, οι οποίες είναι ταχύτερες από τις καθιζήσεις λόγω ιδίου βάρους, δεν συνοδεύονται από οριζόντιες μετακινήσεις που συχνά δημιουργούν ανεπανόρθωτες βλάβες στις κατασκευές. Η αύξηση της διαπερατότητας του γεωλικού, λόγω χαλάρωσης κατά τη διάνοιξη και αποστράγγισης του νερού στη σήραγγα (και λόγω πιθανών εδαφικών ασυνεχειών σε αβαθείς σήραγγες) επιταχύνει το ρυθμό στερεοποίησης. Η τοποθέτηση επένδυσης με διαπερατότητα μικρότερη του εδάφους μειώνει τις χρόνιες καθιζήσεις και επιβραδύνει το ρυθμό εξέλιξής τους.

Τέλος σε αντίθεση με τις άμεσες καθιζήσεις, οι χρόνιες καθιζήσεις δεν εξαρτώνται από το μέγεθος της οπής της σήραγγας. Ενώ, λοιπόν, οι άμεσες

καθιζήσεις σχετίζονται περίπου αναλογικά με τη μείωση του όγκου της οπής, οι χρόνιες καθιζήσεις (με βάση το βαθμό στερεοποίησης) δεν επηρεάζονται από το μέγεθος της οπής παρά μόνο σε περιορισμένο βαθμό ως προς την εξέλιξή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°

Εμπειρικές μέθοδοι

4.1 Εισαγωγή

Ο κίνδυνος πρόκλησης βλαβών στις γειτονικές κατασκευές κατά την διάνοιξη σηράγγων δημιούργησε την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης των εδαφικών μετακινήσεων που προκαλούνται κατά την κατασκευή μεγάλων υπόγειων έργων, όπως η διάνοιξη σηράγγων. Όλες οι παρατηρήσεις και οι μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν βοήθησαν στη διατύπωση εμπειρικών νόμων για την εκτίμηση της κατανομής και του εύρους των εδαφικών μετακινήσεων ως συνάρτηση απλών παραμέτρων. Οι εμπειρικές μέθοδοι αποτελούν τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την πρόβλεψη των καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη σηράγγων.

Οι εμπειρικές μέθοδοι είναι κατάλληλες στις εξής περιπτώσεις:

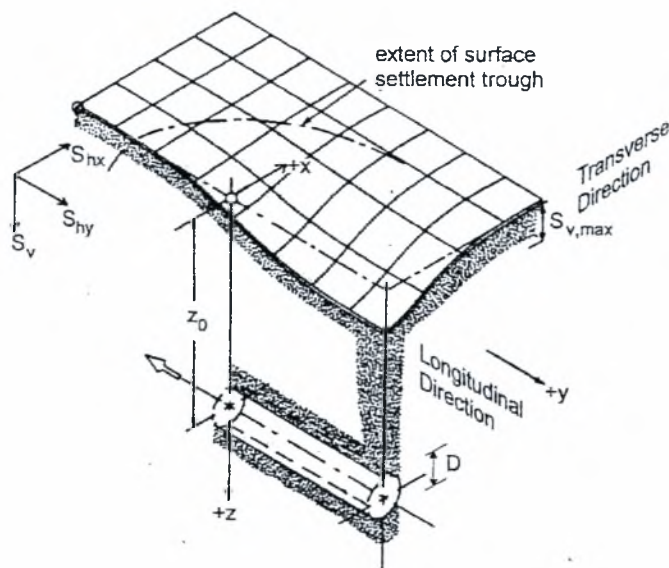
1. για μονή σήραγγα ή πολλαπλές σήραγγες ανάμεσα στις οποίες δεν παρατηρείται αλληλεπίδραση,
2. για τον υπολογισμό των άμεσων καθιζήσεων σε αργιλικά εδάφη και τέλος
3. για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, καθώς η παρουσία κατασκευών μεγάλης δυσκαμψίας είναι δύσκολο να ληφθεί υπόψη.

Κύρια προϋπόθεση για τη σωστή εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων είναι η επιλογή κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους. Αυτό απαιτεί τον καθορισμό της μεθόδου διάνοιξης και της γεωμετρίας της σήραγγας σε σχέση με την εδαφική διαστρωμάτωση, το βάθος του υδάτινου ορίζοντα και τις προκύπτουσες βασικές εδαφικές ιδιότητες.

4.2 Επιφανειακές μετακινήσεις

4.2.1 Συμπεριφορά κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Το παρακάτω σχήμα δείχνει γραφικά τις καθιζήσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του εδάφους.



Σχήμα 4.1: Γεωμετρία της κατανομής των καθιζήσεων που εισάγονται από τη διάνοιξη σηράγγων (Attewell και συνεργάτες, 1986)

Ο Peck μελετώντας τις καθιζήσεις σε περισσότερες από 20 περιπτώσεις σηράγγων κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μορφή τους, για συνθήκες ελεύθερου πεδίου, προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την κανονική κατανομή Gauss. Σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση, οι καθιζήσεις κατά την εγκάρσια διεύθυνση δίνονται από τη σχέση:

$$S_v(x) = S_{v,max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \quad (1)$$

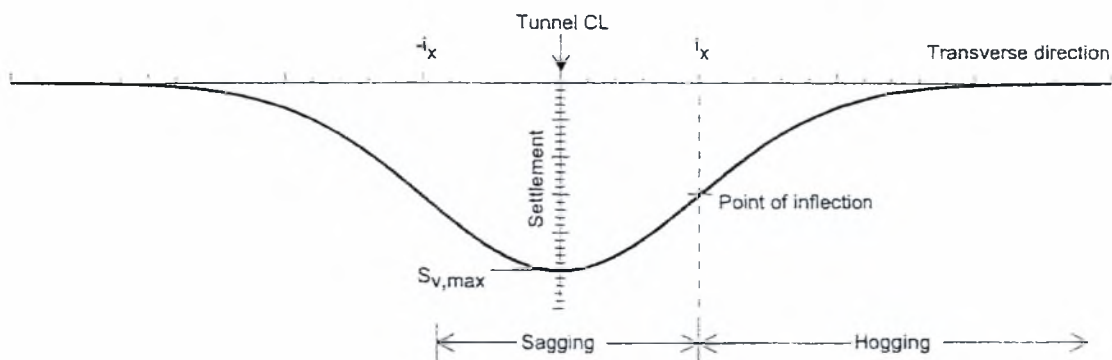
όπου

$S_{v,max}$: η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση που παρατηρείται στον άξονα της σήραγγας

x : η εγκάρσια απόσταση από τον κεντρικό άξονα της σήραγγας

i_x : η παράμετρος εγκάρσιου πλάτους

Η παράμετρος i_x υποδηλώνει την απόσταση του σημείου αλλαγής καμπυλότητας της κατανομής των καθιζήσεων από τον κεντρικό άξονα συμμετρίας. Στη θέση αυτή η καμπύλη παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση και διαχωρίζεται η κοίλη από την κυρτή ζώνη, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2: Κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων

Η περιοχή που περικλείεται από την κατανομή Gauss είναι εξ' ορισμού ίση με 1, καθώς εκφράζει την πιθανότητα η μεταβλητή x να έχει τιμή μεταξύ $-\infty$ και $+\infty$. Παρόλα αυτά, οι παράμετροι $S_{v,max}$ και i_x στην παραπάνω εξίσωση είναι μαθηματικά ανεξάρτητες. Το μέγεθος της περιοχής που περικλείεται από την καμπύλη των εγκάρσιων καθιζήσεων εκφράζεται από την εξίσωση:

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} i_x S_{v,max} \approx 2,5 i_x S_{v,max}$$

όπου V_s ο όγκος των εγκάρσιων καθιζήσεων ανά μονάδα μήκους.

Η υπόγεια εκσκαφή επιφέρει αποτόνωση των τάσεων. Παράλληλα εξελίσσεται και η σύγκλιση του εδάφους, που έχει σαν αποτέλεσμα την εκσκαφή επιπλέον όγκου εδάφους, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή διάμετρος της σήραγγας. Αυτός ο επιπλέον όγκος ανά μονάδα μήκους ονομάζεται απώλεια εδάφους.

$$V_L = \frac{V_s}{\pi \frac{D^2}{4}} \quad (3)$$

όπου

V_L : η απώλεια εδάφους

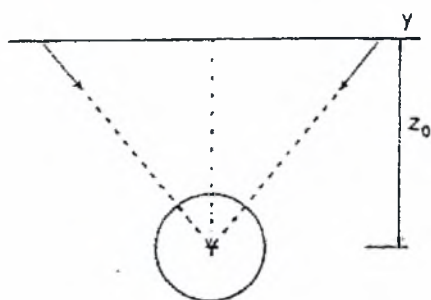
D : η εξωτερική διάμετρος της σήραγγας

Σε υλικά χαμηλής διαπερατότητας η διάνοιξη της σήραγγας μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε ασφραγγιστες εδαφικές συνθήκες. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο όγκος των επιφανειακών εγκάρσιων μετακινήσεων είναι ίσος με την τιμή των απωλειών εδάφους (V_L). Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, η εξίσωση των εγκάρσιων μετακινήσεων συναρτήσει της απώλειας όγκου είναι:

$$S_v(x) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{V_L D^2}{4i_x} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}}$$

Για δεδομένη διάμετρο σήραγγας, η ανάπτυξη εγκάρσιων μετακινήσεων εξαρτάται αποκλειστικά από την τιμή της απώλειας όγκου V_L και της παραμέτρου i_x .

Οι O' Reilly και New (1982) έδειξαν ότι οι επιφανειακές οριζόντιες εγκάρσιες μετακινήσεις μπορούν να υπολογιστούν από την παραπάνω εξίσωση, με την βασική παραδοχή ότι η προκύπτουσα μετακίνηση κατευθύνεται προς το κέντρο της σήραγγας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



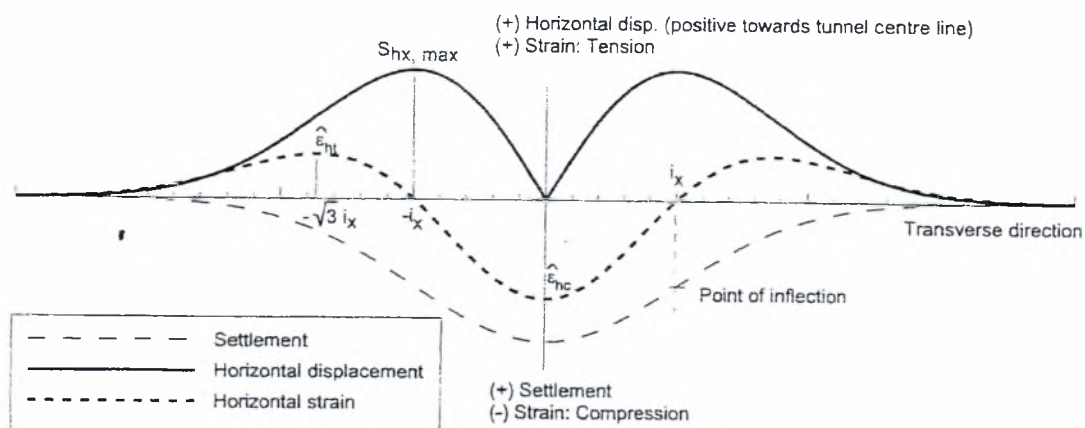
Σχήμα 4.3: Διανύσματα μετακινήσεων με κατεύθυνση προς τον άξονα της σήραγγας (Attewell, 1978 , O'Reilly και New, 1982)

Οι επιφανειακές οριζόντιες μετακινήσεις του εδάφους κατά την εγκάρσια διεύθυνση μπορούν να δοθούν από τη σχέση:

$$S_{hx}(x) = -\frac{x S_v(x)}{z_0}$$

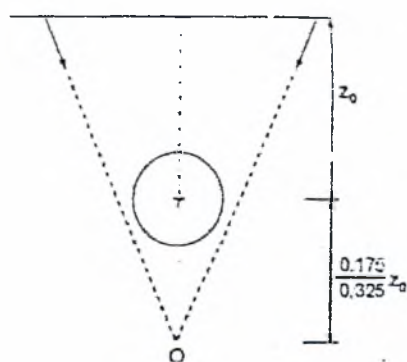
Η υπόθεση αυτή οδηγεί στην εξής κατανομή των επιφανειακών οριζόντιων μετακινήσεων:

$$\frac{S_h}{S_{h,max}} = 1.65 \frac{x}{i} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$



Σχήμα 4.4: Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων, των παραμορφώσεων και των καθιζήσεων στην επιφάνεια κατά την εγκάρσια διεύθυνση

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τις οριζόντιες μετακινήσεις σε συνδυασμό με τις εγκάρσιες καθιζήσεις κατά Gauss. Από το σχήμα φαίνεται ότι οι μέγιστες οριζόντιες μετακινήσεις πραγματοποιούνται στο σημείο αλλαγής καμπυλότητας της κατανομής Gauss και είναι ίσες με $0.61KS_{max}$. Αυτό είναι σύμφωνο με παρατηρήσεις πεδίου που έγιναν από διάφορους μελετητές. Ωστόσο, για σχεδόν αμετάβλητη κατάσταση του εδαφικού όγκου, προέκυψε ότι για μεταβολή του συντελεστή i ανάλογα με το βάθος, οι μετακινήσεις θα έπρεπε να κατευθύνονται προς ένα σημείο που βρίσκεται $0.175z_0/0.325m$ κάτω από το επίπεδο του άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 4.5: Διανύσματα μετακινήσεων με κατεύθυνση προς το σημείο O (Taylor, 1995b)

Σε περίπτωση αμμώδους εδάφους, η υπόθεση ότι οι εδαφικές μετακινήσεις κατευθύνονται προς τον άξονα της σήραγγας, μπορεί να οδηγήσει σε υποτίμηση των οριζόντιων επιφανειακών μετακινήσεων κοντά στα άκρα της κατανομής των εγκάρσιων καθιζήσεων.

4.2.2 Συμπεριφορά κατά μήκος του άξονα

Οι Attewell και Woodman (1982) έδειξαν ότι η κατανομή των διαμήκων καθιζήσεων μπορεί να προκύψει θεωρώντας διαδοχικά σημεία κατά μήκος της σήραγγας και τοποθετώντας τις κατανομές των εγκάρσιων καθιζήσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ένα από αυτά. Στην περίπτωση που θεωρούμε κατανομή Gauss για τις εγκάρσιες καθιζήσεις, η κατανομή των διαμήκων καθιζήσεων περιγράφεται από τη σχέση:

$$S_v(y)_{x=0} = S_{v,max} \Phi\left(\frac{y}{i}\right) \quad (7)$$

όπου

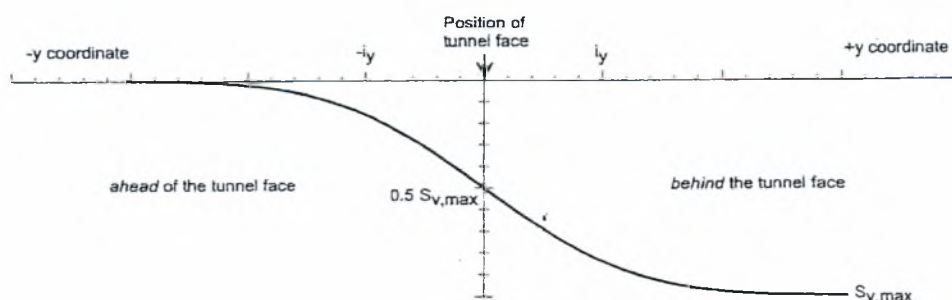
$\Phi(y)$: η καμπύλη των αθροιστικών πιθανοτήτων

y : η συντεταγμένη κατά τη διαμήκη διεύθυνση.

Η αθροιστική πιθανότητα ορίζεται ως:

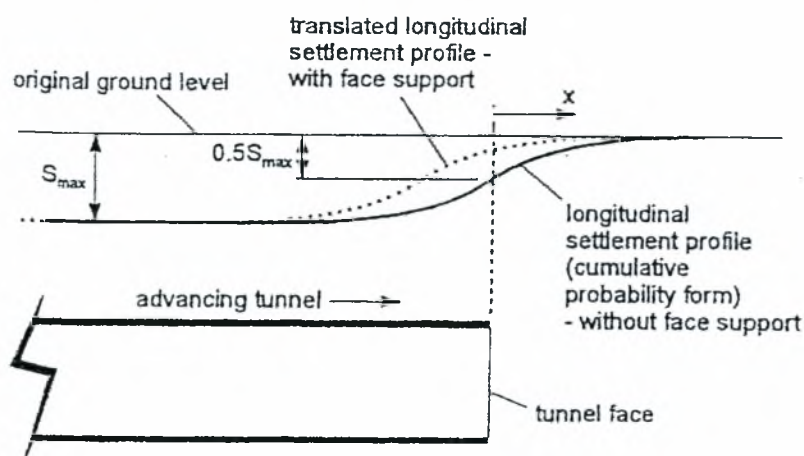
$$\Phi(y) = \frac{1}{i_y \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y e^{-\frac{y^2}{2i_y^2}} \quad (8)$$

και οι τιμές της δίνονται σε πίνακες πιθανοτήτων από τους Attewell και Woodman (1982), όπως και στα περισσότερα βιβλία στατιστικής.



Σχήμα 4.7: Μορφή των διαμήκων καθιζήσεων

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι οι διαμήκεις καθιζήσεις αυξάνουν κατά τον θετικό άξονα των y και φτάνουν στην τιμή $S_{v,max}$ για $y=\infty$, ενώ η τιμή $S_v=0$ εμφανίζεται για $y=-\infty$. Στο σημείο με συντεταγμένη $y=0$, όπου βρίσκεται το μέτωπο της σήραγγας, οι καθιζήσεις είναι ίσες με $S_{v,max}/2$. Οι Attewell και Woodman (1982) έδειξαν ότι για σκληρές αργίλους, περίπου το 40% της $S_{v,max}$ πραγματοποιείται πάνω από το μέτωπο της εκσκαφής. Για σήραγγες που κατασκευάστηκαν σε μαλακές αργίλους με τη μέθοδο του συμπιεσμένου αέρα, οι καθιζήσεις μπροστά από το μέτωπο ήταν αρκετά μικρότερες από το 1/2 του $S_{v,max}$ χάρη στην υποστήριξη του μετώπου την οποία παρέχει η συγκεκριμένη μέθοδος διάνοιξης σήραγγας. Το ίδιο αποδεικνύουν και μετρήσεις πεδίου από διάνοιξη σήραγγας με τις μεθόδους slurry shield και EPB. Η καμπύλη των διαμήκων καθιζήσεων αυτών των περιπτώσεων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα με την παραδοχή ότι στο μέτωπο της σήραγγας, που έχει συντεταγμένη $y=0$, αναπτύσσεται το 50% της $S_{v,max}$.



Σχήμα 4.8: Κατανομή των επιφανειακών διαμήκων καθιζήσεων

Το πλάτος της κατανομής των διαμήκων καθιζήσεων καθορίζεται από την παράμετρο i_y . Συχνά υποθέτουμε ότι $i_x = i_y$. Ο Attewell και οι συνεργάτες του (1986) συνέκριναν το μέγεθος των παραμέτρων i_x και i_y για πραγματικές μελέτες. Αν και οι εγκάρσιες καθιζήσεις είναι λίγο πιο εκτενείς από τις διαμήκεις, η παραπάνω υπόθεση ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις και είναι αρκετά συντηρητική για τις διαμήκεις καθιζήσεις. Στο εξής θα χρησιμοποιείται ο δείκτης i αντί των i_x και i_y .

Θεωρώντας ότι οι μετακινήσεις κατευθύνονται προς το κέντρο του μετώπου της εκσκαφής, οι Attewell και Woodman έδειξαν ότι οι οριζόντιες επιφανειακές μετακινήσεις κατά μήκος της σήραγγας δίνονται από τη σχέση:

$$S_{iv}(y)_{x=0} = \frac{V_L D^2}{8z_0} e^{-\frac{y^2}{2i^2}} \quad (9)$$

Διαφορίζοντας την παραπάνω σχέση ως προς y προκύπτει η οριζόντια τάση κατά τη διαμήκη διεύθυνση πάνω από τον άξονα της σήραγγας:

$$\varepsilon_{iv}(y)_{x=0} = -y \frac{V_L D^2}{8i^2 z_0} e^{-\frac{y^2}{2i^2}}$$

η οποία περιγράφει τον εφελκυσμό (θετική τιμή) μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας (αρνητικός άξονας y) και τη θλίψη πίσω από αυτό. Όλα τα στοιχεία για τις επιφανειακές καθιζήσεις εξαρτώνται από την παράμετρο i και την τιμή της απώλειας όγκου.

4.2.3 Παράμετρος μέγιστης καθίζησης S_{max}

Επί τόπου δοκιμές έκαναν δυνατή την εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων για τον προσδιορισμό της παραμέτρου S_{max} . Οι Attewell και Farmer (1977) πρότειναν την παρακάτω σχέση, ανεξάρτητα από το έδαφος και τη μέθοδο διάνοιξης:

$$S_{max} = \frac{D}{1000} \left(\frac{k \cdot D}{H} \right)^{1/n}$$

με το k να είναι 10 και το n 0.67. Η παραπάνω σχέση λαμβάνει υπόψη μόνο τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής. Οι Oteo και Sagaseta (1982) πρότειναν μια σχέση για το S_{max} λαμβάνοντας υπόψη το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο του Poisson του υλικού καθώς και το φαινόμενο βάρος του εδάφους:

$$S_{max} = \frac{\gamma D^2}{E} \cdot (0,85 - \nu)$$

Ο Descoeudres (1991) πρότεινε δυο ακόμα σχέσεις για τον υπολογισμό του S_{max} για αργιλικά και χονδρόκοκκα αμμώδη, για εκσκαφή με τη μέθοδο της ασπίδας:

$$\text{άργυλος} : S_{\max} = 6,208 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \left(\frac{H}{D} - 0,5\right)^{-0,57}$$

$$\text{χονδρόκοκκη άμμος} : S_{\max} = 9,9 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \left(\frac{H}{D} - 0,5\right)^{-0,974}$$

Τέλος το AFTES (1995) για τη μέγιστη επιφανειακή καθίζηση δίνει τη σχέση:

$$S_{\max} = k \cdot \lambda \cdot \frac{\gamma R^2}{E}$$

όπου

k: παράγοντας που εξαρτάται από την τάση του εδάφους, το είδος και τη διαμόρφωσή του, καθώς και από την εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού

λ: συντελεστής αποτόνωσης

R: ακτίνα εκσκαφής

γ: φαινόμενο βάρος εδάφους

E: μέσο μέτρο ελαστικότητας εδάφους

Οι παραπάνω σχέσεις συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα

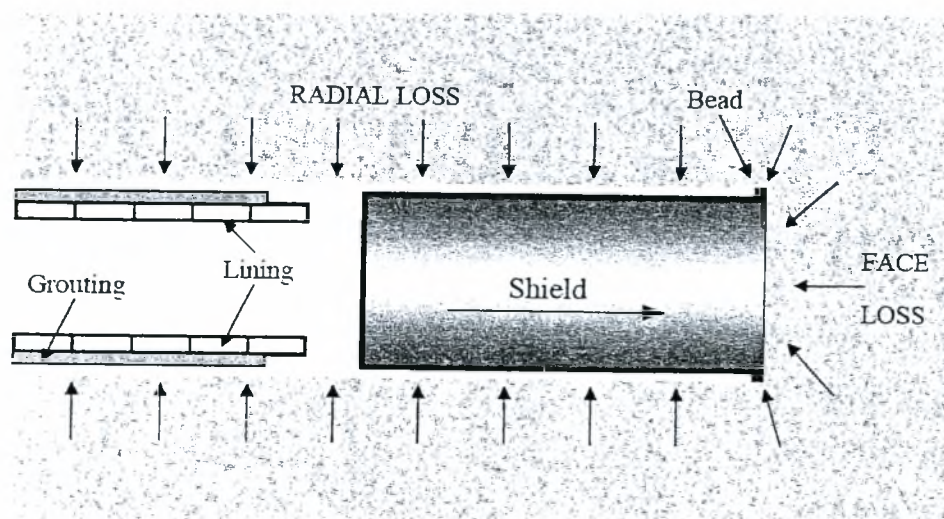
	S_{\max}	Χαρακτηριστικά
Farmer και Attewell (1977)	$\frac{D}{1000} \cdot \left(\frac{k \cdot D}{H}\right)^{\frac{1}{n}}$	k ταυτίζεται με 10 και n με 0,67
Oteo και Sagasetta (1982)	$\frac{\gamma \cdot D^2}{E} \cdot (0,85 - \nu)$	E: σταθερά του Young ν: λόγος του Poisson γ: φαινόμενο βάρος του εδάφους
Descoeudres (1991)	$6,208 \cdot 10^{-3} D \left(\frac{H}{D} - 0,5\right)^{-0,57}$	άργυλος
	$9,9 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \left(\frac{H}{D} - 0,5\right)^{-0,974}$	Χονδρόκοκκη άμμος , η εκσκαφή γίνεται με ασπίδα
AFTES (1995)	$k \cdot \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot D^2}{4 \cdot E}$	k: εξαρτάται από την εμπειρία και από τις τάσεις του υλικού (k=2) λ: συντελεστής αποτόνωσης

Πίνακας 4.1

4.2.4 Απώλεια όγκου

Η κατασκευή μιας σήραγγας οδηγεί σε εκσκαφή μεγαλύτερης ποσότητας εδάφους από αυτήν που αντιστοιχεί στον όγκο της σήραγγας. Η επιπλέον ποσότητα εδάφους που εκσκάπτεται εκφράζεται από την τιμή της απώλειας όγκου V_L που αποτελεί μέτρο της συνολικής διαταραχής του εδάφους. Ο Attewell διαχωρίζει την ως άνω τιμή σε τέσσερις συνιστώσες όπως φαίνεται στο σχήμα:

- Απώλειες στο μέτωπο
- Απώλειες στην ασπίδα
- Απώλειες εδάφους κατά τη διάρκεια αλλά και μετά την τοποθέτηση της επένδυσης
- Απώλειες εδάφους μετά την έγχυση κονιάματος πίσω από την επένδυση.



Σχήμα 4.9: Συνιστώσες του volume loss κατά τη διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο της ασπίδας

Η σωστή πρόβλεψη της απώλειας όγκου είναι μια πολύ δύσκολη διαδικασία, αφού προϋποθέτει τον ακριβή προσδιορισμό πολλών σημαντικών παραγόντων όπως η μέθοδος διάνοιξης, η διαδοχή των φάσεων κατασκευής, η αποτελεσματική έγχυση κονιάματος πίσω από την επένδυση και ο ανθρώπινος παράγοντας. Ο Attewell διατύπωσε μια προσέγγιση για τον υπολογισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την απώλεια όγκου. Ο υπολογισμός βασίζεται στο λόγο της τιμής των εδαφικών μετακινήσεων κατά την εκσκαφή προς το ρυθμό πρόωθησης της σήραγγας.

Για τον περιορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων στις σήραγγες που χρησιμοποιείται επένδυση από εκτοξευμένο σκυρόδεμα, ο Ice (1996) πρότεινε τα εξής:

- Τα στάδια εκσκαφής να είναι περιορισμένα από άποψη διαστάσεων και διάρκειας και
- να μην καθυστερείται η εκτόξευση του σκυροδέματος της επένδυσης.

Πολλές σχέσεις έχουν προταθεί για τον υπολογισμό του N_L οι οποίες βασίζονται στο συντελεστή υπερφόρτισης N που ορίστηκε από τους Broms και Bennermark (1967) ως:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma z - \sigma_t}{c_u}$$

όπου

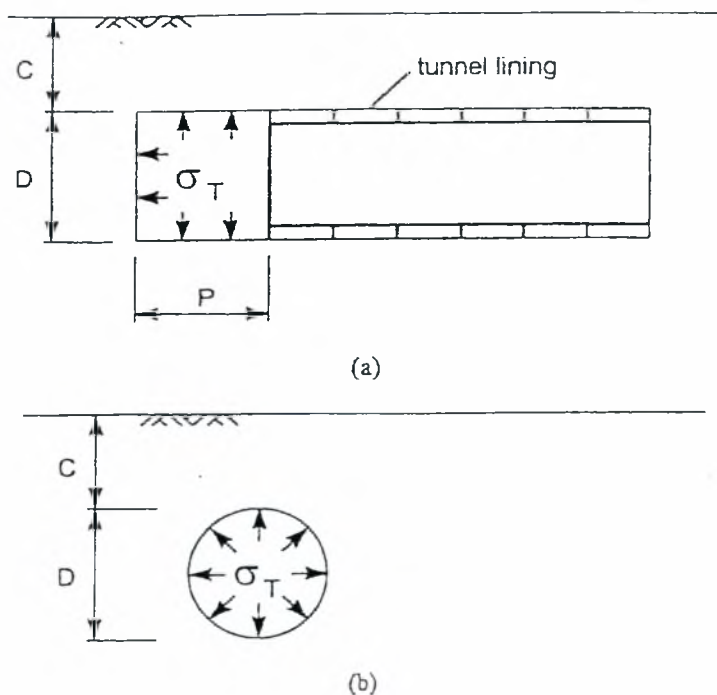
γ : φαινόμενο βάρος εδάφους

z : βάθος του άξονα της σήραγγας με $z = C + D/2$

σ_s : επιφανειακή επιπρόσθετη τάση

σ_t : πίεση υποστήριξης σήραγγας

c_u : αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργίλου.

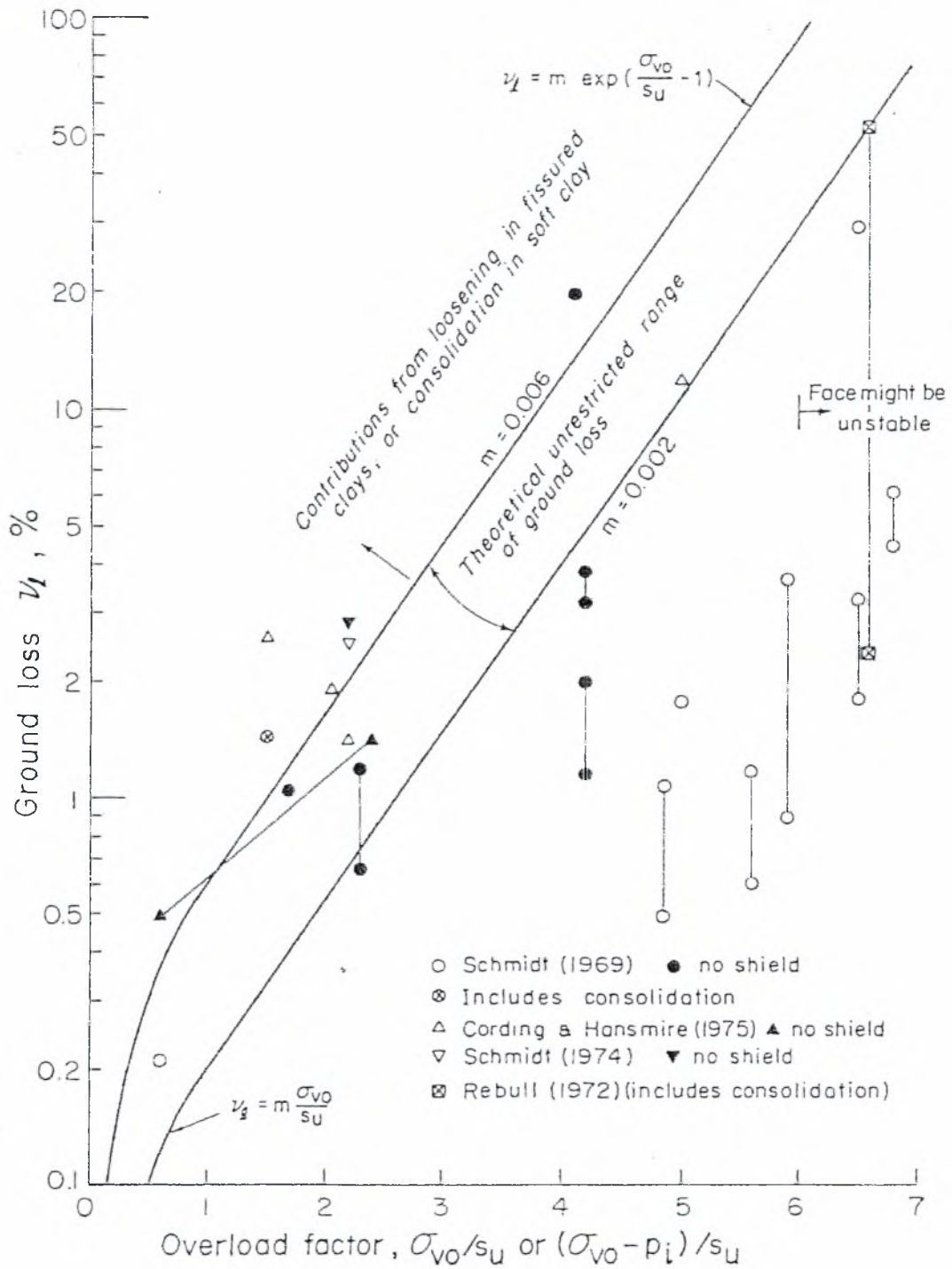


Σχήμα 4.10: α)Πορεία της σήραγγας σε μαλακό έδαφος β)Διασδιάστη προσομοίωσης της πορείας της σήραγγας

Για $N < 2$ η απόκριση του εδάφους είναι ελαστική με ευσταθές μέτωπο. Η απώλεια όγκου παίρνει τιμές γύρω στο 1%, ενώ οι καθιζήσεις που επιφέρει είναι αμελητέες. Ασπίδα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προλαμβάνει τη χαλάρωση και για να διανοίγει τη σήραγγα με ομαλό σχήμα. Η επένδυση μπορεί να τοποθετηθεί πάνω στο έδαφος πίσω από την ασπίδα και σε μικρή απόσταση από το έδαφος.

Για $2 \leq N < 4$ γύρω από τη σήραγγα αναπτύσσονται πλαστικές ζώνες με πιθανή τιμή της απώλειας όγκου περίπου 10%. Οι μετακινήσεις του εδάφους στο μέτωπο είναι μικρές και η ασπίδα μπορεί να περιορίσει το V_L σε τιμές μικρότερες από 2-3%. Η χρήση ασπίδας συνίσταται σε περιπτώσεις που γειτονικά κτίρια είναι δυνατό να επηρεαστούν αρνητικά από ανάπτυξη καθιζήσεων.

Για $4 \leq N < 6$ είναι πιθανές πλαστικές υποχωρήσεις και απαιτείται χρήση ασπίδας ακόμα κι αν μεγάλες τιμές καθιζήσεων είναι αποδεκτές. Για $N \geq 6$ υπάρχει σοβαρός κίνδυνος το μέτωπο της εκσκαφής να οδηγηθεί σε κατάρρευση κάτι που μπορεί να αποτραπεί μηχανικά με υποστήριξη slurry ή συμπιεσμένου αέρα. Οι τιμές που πρέπει να έχουν ο συμπιεσμένος αέρας και ο αέρας του slurry, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος κατάρρευσης, προσδιορίζονται από τις καμπύλες του παρακάτω σχήματος



Σχήμα 4.11: Συσχέτιση του συντελεστή υπερφόρτισης N με το volume loss

Για σήραγγες σε αργίλους, οι Clough και Schmidt (1981) πρότειναν μια σχέση για τον υπολογισμό του volume loss, που βασίζεται σε επίλυση κλειστού τύπου κυκλικής οπής σε γραμμικά ελαστικό-τέλεια πλαστικό μέσο υπό αξονοσυμμετρικές συνθήκες. Αν ο θεωρητικός όγκος της σήραγγας είναι V_0 και η μείωση του όγκου είναι ΔV , η σχετική απώλεια όγκου του εδάφους για ελαστικές συνθήκες είναι:

$$V_L = \frac{\Delta V}{V_0} = (1+K)\sigma_{v_0} \frac{1+\nu}{E_u}$$

Ελαστικές συνθήκες επικρατούν για $\sigma_{v_0} \leq \frac{2c_u}{3K-1}$, όταν $K \geq 1$, ή $\sigma_{v_0} \leq \frac{2c_u}{3-K}$, όταν

$K \leq 1$. Για λόγο Poisson $\nu = 0,5$ (μικρή ή μηδενική μεταβολή όγκου) και $K = 1$, ο λόγος μειώνεται σε:

$$V_L = 3 \frac{\sigma_{v_0}}{E_u} \quad (18)$$

όπου

E_u : μέσο ελαστικότητας αργίλου

Στην ανελαστική ζώνη, θεωρώντας $K=1$, η σχετική απώλεια όγκου εδάφους μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_L = \frac{\Delta V}{V_0} = 2c_u \frac{1+V}{E_u} \exp\left(\frac{\sigma_{v_0}}{c_u} - 1\right) \quad (19)$$

Για $\sigma_{v_0}/c_u=1$ η εξίσωση παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (18). Σαν μέτρο ελαστικότητας E παίρνουμε αυτό της αργίλου στην ελαστική περιοχή. Όταν εφαρμόζεται εσωτερική πίεση (αέρα ή επένδυσης) μεγέθους p_i στους τύπους (18) και (19) αντικαθιστούμε το σ_{v_0} με $(\sigma_{v_0}-p_i)$. Η μείωση της ακτίνας της σήραγγας είναι ίση με το μισό V_L . Ο λόγος E_u/c_u μεταβάλλεται σε περιορισμένο φάσμα για πολλούς τύπους αργιλικών εδαφών κάτι που μας βοηθά στην εξαγωγή τύπου για τον υπολογισμό της μέγιστης απώλειας εδάφους χωρίς εσωτερική πίεση:

$$V_L = m \cdot \exp\left(\frac{\sigma_{v_0}}{c_u} - 1\right) \quad (20)$$

για $\sigma_{v_0}/c_u \geq 1$ και για $0.002 \leq m \leq 0.006$

Για προσεκτική κατασκευή έργου:

$$V_L = 0,002 \exp (N-1)$$

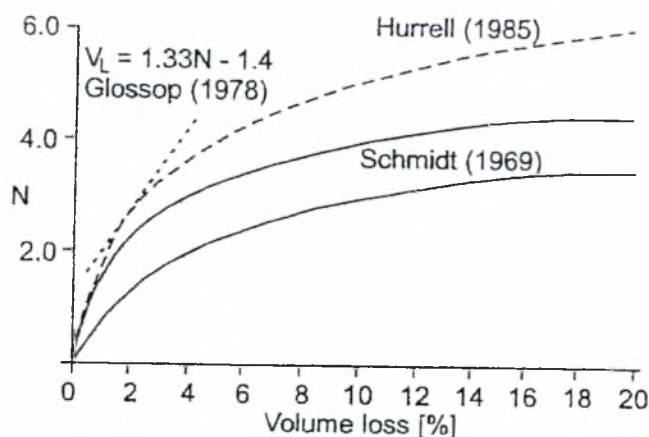
Για συνήθη επιμέλεια κατασκευής έργου:

$$V_L = 0,004 \exp (N-1)$$

Για $\sigma_v/c_u < 1$ η εξίσωση (20) γίνεται:

$$V_L = m \frac{\sigma_{v_o}}{c_u}$$

Ο Lake και οι συνεργάτες του συνόψισαν όλες τις σχέσεις μεταξύ V_L και N που προτάθηκαν από διάφορους μελετητές στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.12: Διάφορες συσχετίσεις του συντελεστή υπερφόρτισης N με το volume loss (Lake και συνεργάτες, 1992)

Ο Davis και οι συνεργάτες του (1980) έδειξαν ότι για αβαθείς σήραγγες ο συντελεστής υπερφόρτισης στην κατάρρευση εξαρτάται από το βάθος. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα έλαβαν υπόψη ο Maier και οι συνεργάτες του (1981) και με την πραγματοποίηση φυγοκεντρικών δοκιμών, εισήγαγαν τον συντελεστή υπερφόρτισης (load factor) που ορίζεται από τον εξής λόγο:

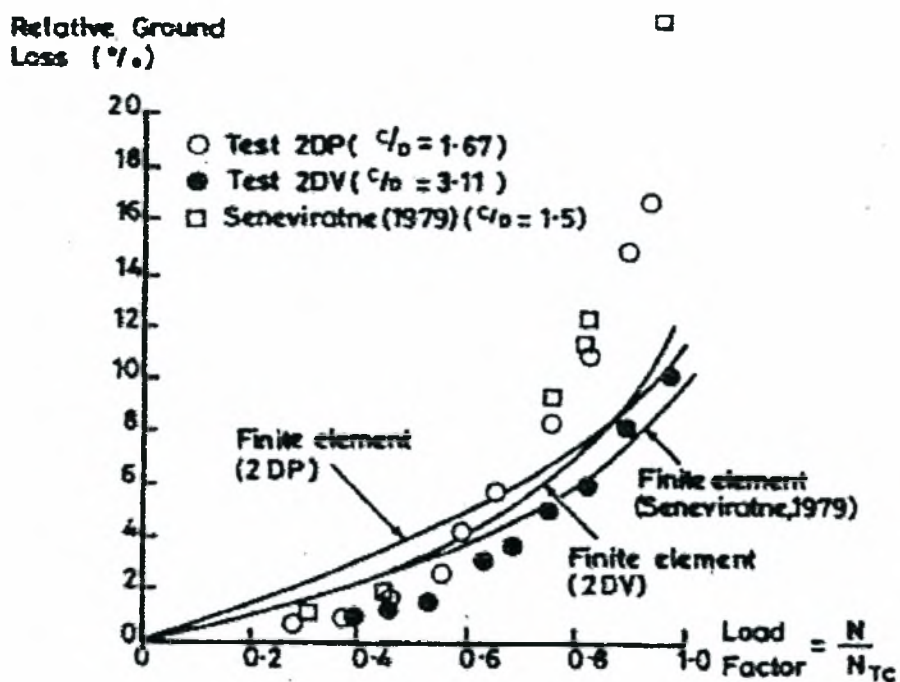
$$LF = \frac{N}{N_{TC}} \quad (23)$$

όπου

N : συντελεστής υπερφόρτισης της σήραγγας κατά την κατασκευή

N_{TC} : συντελεστής υπερφόρτισης κατά την κατάρρευση

Το επόμενο σχήμα εμφανίζει τα αποτελέσματα της εργασίας του Mair η οποία περιέλαβε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και φυγοκεντρικές δοκιμές. Παρατηρούμε ότι τιμές της απώλειας όγκου μικρότερες του 3% επιτυγχάνονται για συντελεστή φόρτισης $LF \leq 0.5$.



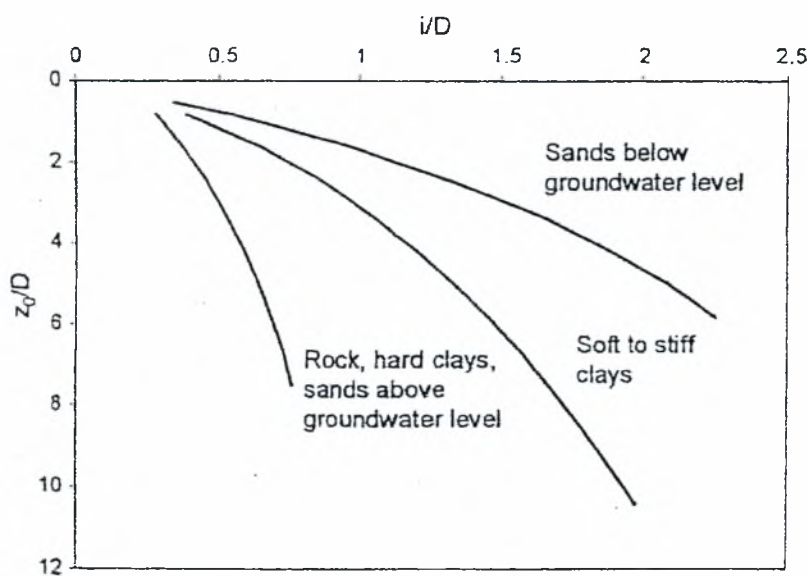
Σχήμα 4.13: Συσχέτιση του συντελεστή φόρτισης με το volume loss όπως αυτή προσδιορίστηκε από φυγοκεντρικές δοκιμές και αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων (Mair και συνεργάτες, 1981)

Πολλοί ερευνητές παρουσίασαν τιμές της απώλειας όγκου από μετρήσεις πεδίου που αφορούσαν την κατασκευή σηράγγων στην άργιλο του Λονδίνου με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου με ασπίδα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το V_L κυμάνθηκε από 1% έως 3.3%. Για σήραγγες κατασκευασμένες με επένδυση εκτοξευμένου σκυροδέματος (NATM) η απώλεια όγκου έχει παρόμοιο μέγεθος. Μετρήσεις διαφόρων μελετητών από την κατασκευή σηράγγων στην άργιλο του Λονδίνου με τη συγκεκριμένη μέθοδο έδωσαν τιμές από 0.5% έως 1.5%. Για διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο κλειστού τύπου με χρήση μηχανών EPB και slurry shield μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος των καθιζήσεων και ειδικότερα σε αμμώδη εδάφη. Τα αποτελέσματα των μελετών σε αργιλικά και αμμώδη εδάφη (με ή χωρίς την παρουσία υδάτινου οριζοντα) όσο αφορά

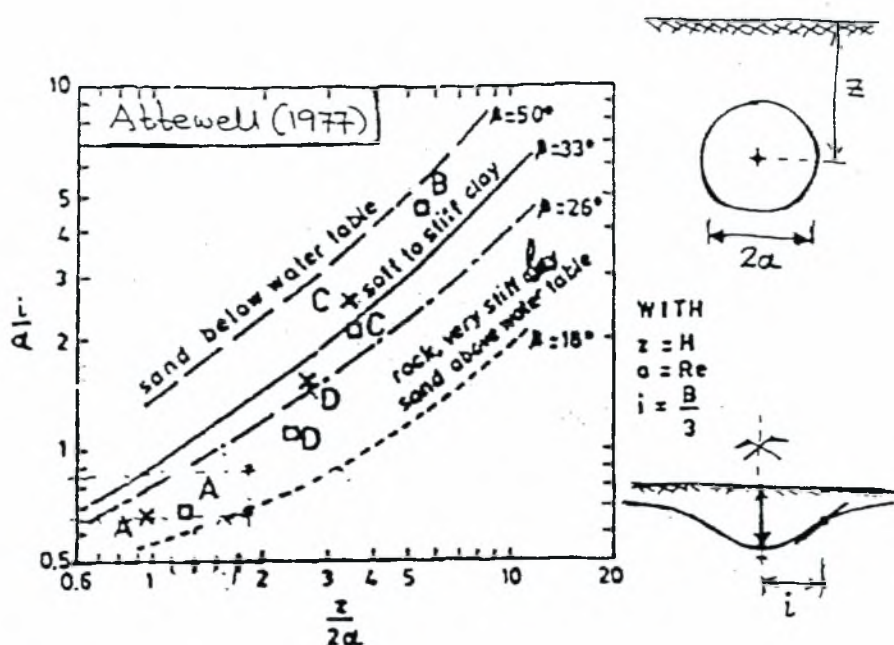
στην κατασκευή σηράγγων διαφόρων διαμέτρων με τη μέθοδο κλειστού τύπου έδωσαν τιμές του V_L από 0.5% έως 2%.

4.2.5 Παράμετρος i

Η παράμετρος i εκφράζει το εύρος των εγκάρσιων εδαφικών μετακινήσεων. Σε μια κατανομή εγκάρσιων καθιζήσεων ορίζεται ως η απόσταση του σημείου αλλαγής καμπυλότητας από τον άξονα της σήραγγας. Ο Peck πρότεινε μια σχέση μεταξύ της παραμέτρου i , του βάθους και της διαμέτρου της σήραγγας όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Η σχέση του Peck επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον εκάστοτε εδαφικό σχηματισμό κατασκευής της σήραγγας.



Σχήμα 4.14: Συσχέτιση της παραμέτρου i και του βάθους της σήραγγας z_0 σε διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (Peck, 1969)



Σχήμα 4.15: Καμπύλες Attewell (1977)

Από τις εργασίες του Peck και του Attewell μπορούν να διατυπωθούν οι παρακάτω καθαρά γεωμετρικές εμπειρικές σχέσεις για κυκλική σήραγγα ακτίνας r .

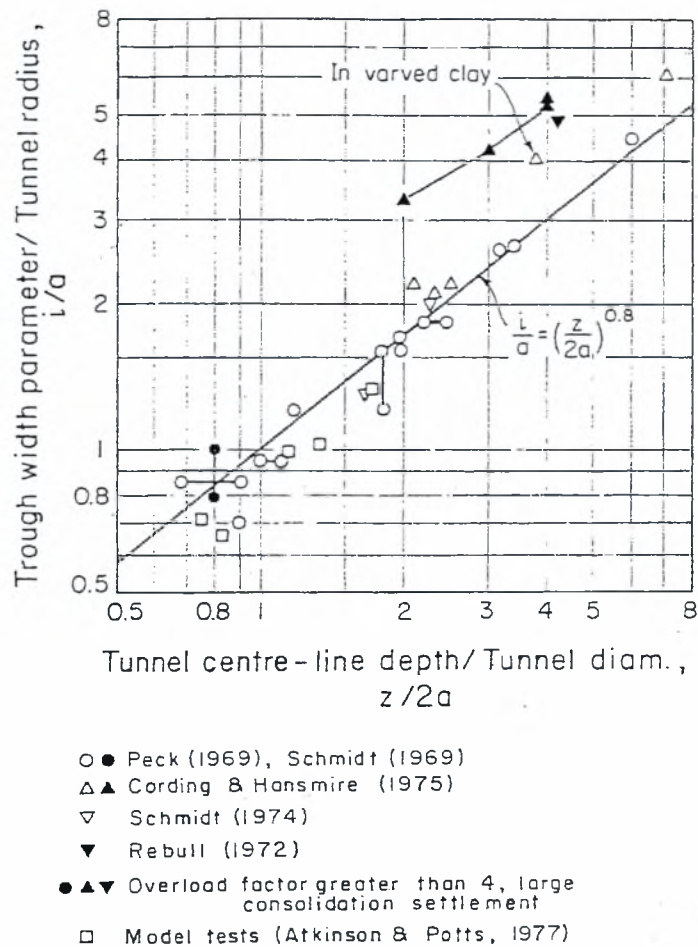
Σε μαλακές έως συμπαγείς αργίλους:

$$\frac{i}{r} = \left(\frac{z_0}{2r}\right)^{0.8} \quad (24)$$

Σε σκληρές αργίλους, μαλακούς βράχους και ψαθυρά εδάφη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα:

$$i = 0,6r \left(\frac{z_0}{2r}\right)^{0.5}$$

Οι Clough και Schmidt (1981) χρησιμοποίησαν τη σχέση (24) και κατασκεύασαν το ακόλουθο διάγραμμα.



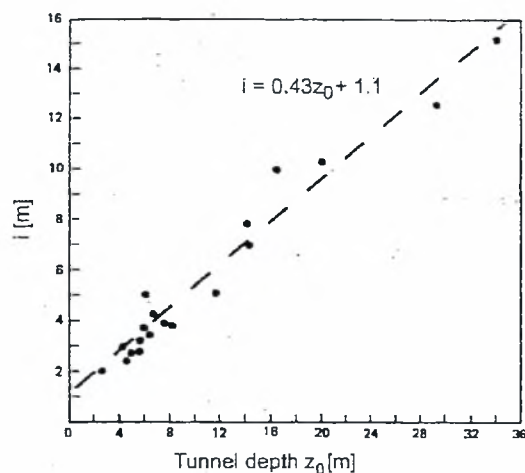
Σχήμα 4.16: Λογαριθμικό διάγραμμα του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z

Οι Atkinson και Potts (1977), λαμβάνοντας υπόψη μόνο το βάθος της εκσκαφής και την ακτίνα της σήραγγας πρότειναν για το i τις σχέσεις:

$$i = 0,375z_o + 0,125r \quad (26)$$

$$i = 0,25(z_o + r) \quad (27)$$

για πυκνά και υπερστερεοποιημένα αργιλικά εδάφη και χαλαρά αμμώδη εδάφη αντίστοιχα. Οι O' Reilly και New παρουσίασαν 19 περιπτώσεις κατασκευής σηράγγων σε αργιλικά εδάφη. Παριστάνοντας γραφικά την παράμετρο i σε σχέση με το βάθος της σήραγγας, προέκυψε το εξής διάγραμμα.



Σχήμα 4.17: Συσχέτιση του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z (O'Reilly και New, 1982)

Με γραμμική παλινδρόμηση προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$i = 0,43 z_0 + 1,1 \quad (28)$$

όπου i και z_0 σε μέτρα m . Για αμμώδη εδάφη κατέληξαν στη σχέση:

$$i = 0,28 z_0 - 0,1 \quad (29)$$

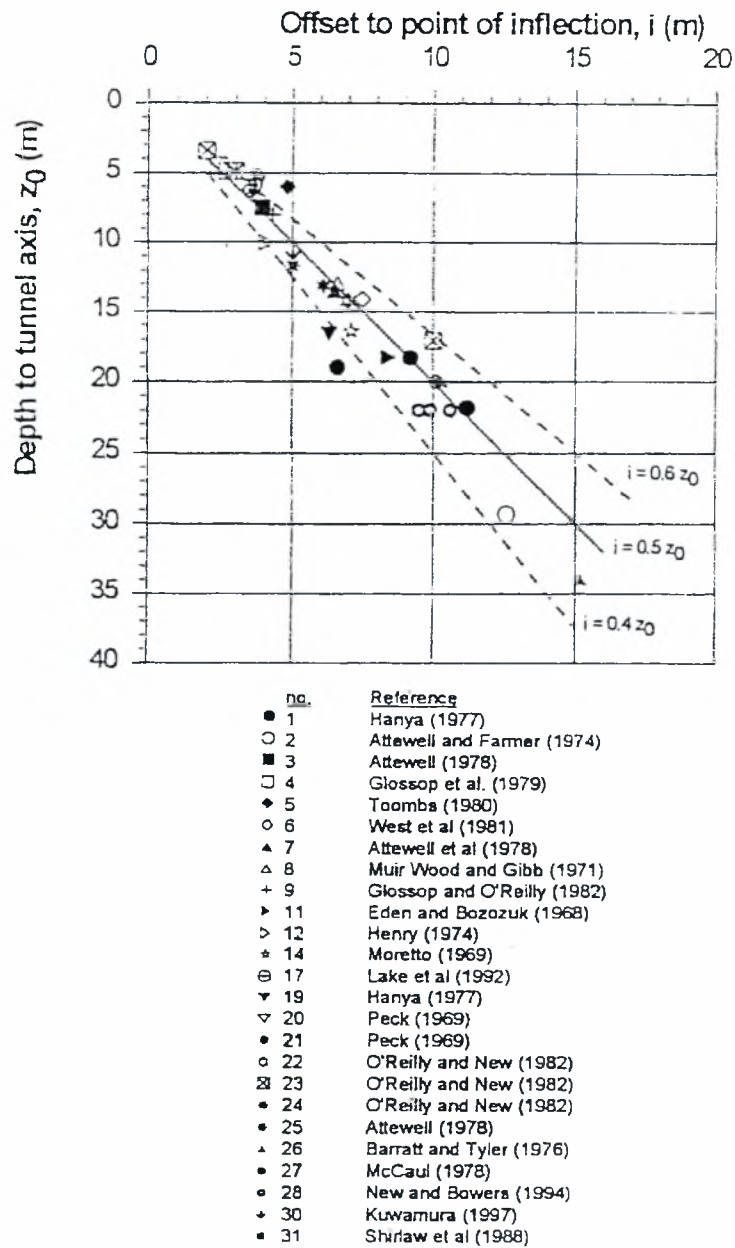
Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι η γραμμική παλινδρόμηση προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τα αρχικά σημεία. Γι' αυτό οι O' Reilly και New απλοποίησαν την παραπάνω εξίσωση σε:

$$i = K \cdot z_0 \quad (30)$$

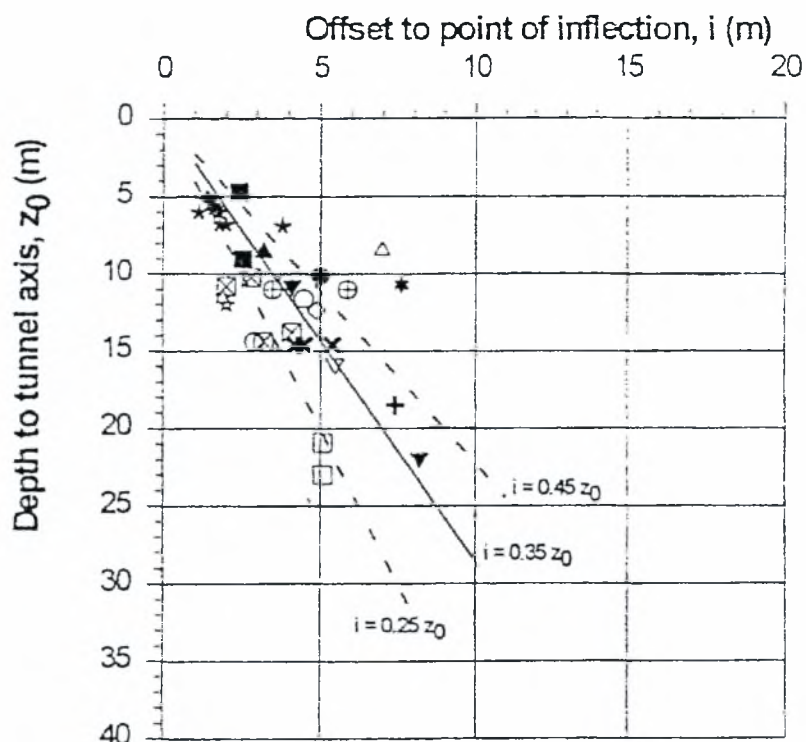
Από τα δεδομένα τους κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για αργιλικά εδάφη η τιμή $K=0.5$ είναι κατάλληλη στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως η τιμή του μπορεί να κυμανθεί από 0.4 έως 0.7 για σκληρές και μαλακές αργίλους αντίστοιχα. Ο Rankine (1988) παρουσίασε μια αντίστοιχη μελέτη με μεγαλύτερη βάση δεδομένων, που περιλάμβανε εδαφικούς τύπους από όλο τον κόσμο, αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στα παρακάτω σχήματα για σήραγγες σε άργιλο και σήραγγες σε αμμώδη και χαλικώδη εδάφη. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται αναλυτικά οι τιμές του K και της απώλειας όγκου ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους και τον τρόπο διάνοιξης της σήραγγας.

Εδαφικές συνθήκες	Μέθοδος διάνοιξης	Παράμετρος K	Volume loss	Σχόλια
Σκληρή ρωγματομένη αργίλος	Με ασπίδα ή χωρίς	0,4-0,5	0,5-3	Διαθέσιμος σημαντικός αριθμός στοιχείων. Συνήθεις απώλειες 1-2%
Παγετανοειδείς αποθέσεις	Ασπίδα σε ελεύθερο αέρα	0,5-0,6	2-2,5	
	Ασπίδα σε συμπιεσμένο αέρα*		1-1,25	* Η χρήση του βοηθάει τον έλεγχο των εδαφικών μετακινήσεων
Πρόσφατες αποθέσεις ιλυώδους αργίλου (cu=10-40 Kpa)	Ασπίδα σε συμπιεσμένο αέρα	0,6-0,7	2-10	
Κοκκώδη υλικά πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα		0,2-0,3	1-5	
Κοκκώδη υλικά κάτω από τη στάθμη	Συμπιεσμένος αέρας/ slurry/ EPB	0,4-0,5	1-10	

Πίνακας 4-2: Συνοπτικά στοιχεία επιφανειακών καθιζήσεων για διάφορα εδάφη του Ενωμένου Βασιλείου (με $C/D > 1$) (O'Reilly και New (1982) και Yeates (1984))



Σχήμα 4.18: Μεταβολή του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z για σήραγγες σε αργιλικά εδάφη



no.	Reference
<i>(a) below the water table</i>	
● 1	Boden and McCaul (1974)
■ 3	O'Reilly et al (1981)
▲ 4	O'Reilly et al (1981)
◆ 6	Eadie (1977)
▼ 7	Yoshikoshi et al (1978)
* 8	O'Reilly et al (1981)
* 11	Peck (1969)
+ 15	Moh et al (1996)
× 16	Cording and Hansmire (1975)
<i>(b) above the water table or dewatered</i>	
○ 2	Butler and Hampton (1975)
□ 5	MacPherson (1978)
△ 7	Yoshikoshi et al (1978)
◇ 9	Chambosse (1972)
▽ 10	Vinnel and Herman (1969)
* 11	Peck (1969)
⊕ 12	MacPherson (1978)
⊗ 13	MacPherson (1978)
⊙ 17	Cording and Hansmire (1975)

Σχήμα 4.19: Μεταβολή του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z για σήραγγες σε αμμώδη και χαλικώδη εδάφη

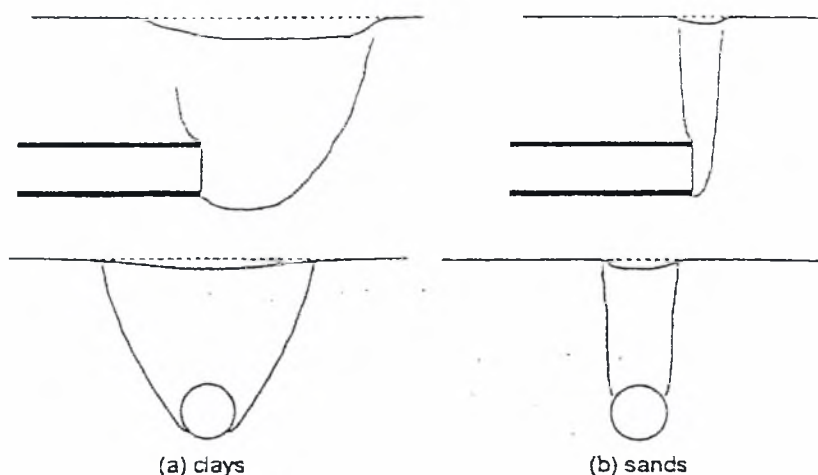


Figure 13. Observed failure mechanisms based on centrifuge model tests (Mair, 1979; Chambon and Corté, 1994)

Σχήμα 4.20: Μηχανισμοί αστοχίας a) σε αργίλους και b) σε άμμους. (Mair, 1979, Chambon και Corté, 1994)

Ο Schlosser πρότεινε την εισαγωγή δυο συντελεστών για τον υπολογισμό του i :

$$i = a r \left(\frac{z_o}{2r} \right)^n \quad (32)$$

όπου $0.5 \leq a \leq 1.1$ και $0.8 \leq n \leq 1.1$ κι εξαρτώνται από την περιοχή και την κατάσταση της αργίλου. Για σκληρή άργιλο πρότειναν $a=1$ και $n=1$. Οι Oteo και Sagasetta (1982) στηριζόμενοι κι αυτοί στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου πρότειναν την ακόλουθη σχέση:

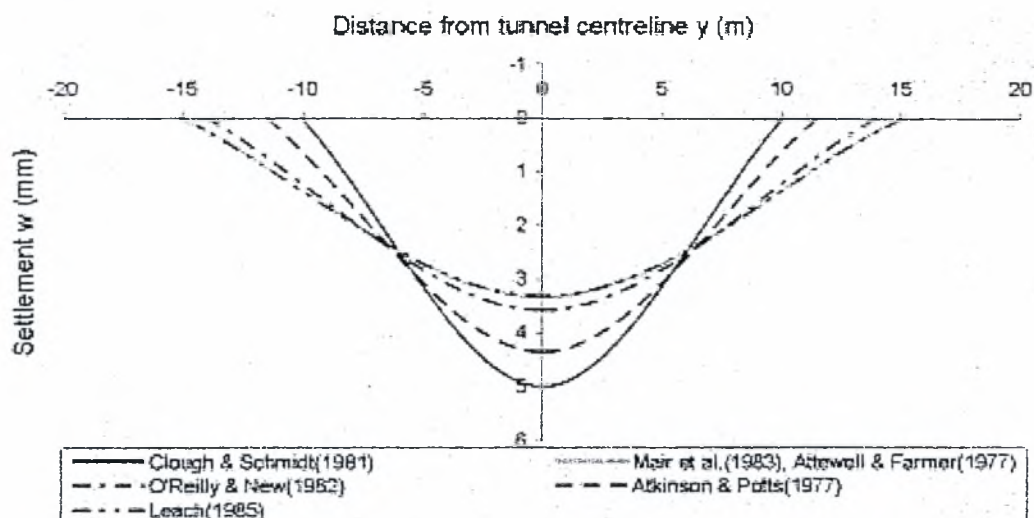
$$i = a (0,52z_o - 0,42r) \quad (33)$$

όπου $0.7 \leq a \leq 1.3$ κι εξαρτάται από τη φύση του εδάφους. Ο Leach (1985) για περιοχές όπου η επίδραση της στερεοποίησης δεν είναι σημαντική κατέληξε στη σχέση:

$$i = 0,57 + 0,45z_o \pm 1,01 \quad (34)$$

Όλες οι παραπάνω σχέσεις, οι οποίες για τον υπολογισμό του i βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στο διάγραμμα φαίνεται η διαφοροποίησή τους.

	i	Χαρακτηριστικά
Peck (1969) Attewell (1977)	$\frac{i}{r} = \left(\frac{z_o}{2r}\right)^{0,8}$	για μαλακές έως συμπαγείς αργίλους
	$i = 0,6r\left(\frac{z_o}{2r}\right)^{0,5}$	για σκληρές αργίλους, μαλακούς βράχους και ψαθυρά εδάφη
Atkinson και Potts (1977)	$i = 0,375z_o + 0,125r$	για πυκνά, υπερστερεοποιημένα αργιλικά εδάφη
	$i = 0,25(z_o + r)$	για χαλαρά αμμώδη εδάφη
O'Reilly και New (1982)	$i = 0,43z_o + 1,1$ $i = 0,5z_o$	για αργιλώδη εδάφη
	$i = 0,28z_o - 0,1$	για αμμώδη εδάφη
Schlosser (1985)	$i = a \cdot r \left(\frac{z_o}{2r}\right)^n$	για αργιλικά εδάφη $0,5 \leq a \leq 1,1$, $0,8 \leq n \leq 1,1$
Oteo και Sagaseta (1982)	$i = a(0,52z_o - 0,42r)$	ο συντελεστής a εξαρτάται από τη φύση του εδάφους: $0,7 \leq a \leq 1,3$
Leach (1985)	$i = 0,57 + 0,45z_o \pm 1,01$	για περιοχές όπου η επίδραση της στερεοποίησης δεν είναι σημαντική



Σχήμα 4.21: Σύγκρισης των κατανομών των εγκάρσιων καθιζήσεων που έχουν δοθεί από διάφορους ερευνητές

Για περίπτωση κατασκευής σήραγγας σε πολυστρωματικό έδαφος ο Selby (1988) και οι O' Reilly και New (1991) πρότειναν μια εξίσωση για τον υπολογισμό του i λαμβάνοντας υπόψη το πάχος της κάθε στρώσης είτε πρόκειται για άργιλο είτε για κοκκώδες υλικό:

$$i = K_1 z_1 + K_2 z_2 \quad (35)$$

όπου

K_1 : ο παράγοντας εγκάρσιου πλάτους της πρώτης στρώσης

z_1 : το πάχος της πρώτης στρώσης

K_2 : ο παράγοντας εγκάρσιου πλάτους της δεύτερης στρώσης

z_2 : το πάχος της δεύτερης στρώσης

Παρατηρήσεις πεδίου έδειξαν ότι σήραγγα που κατασκευάστηκε σε άμμο με υπερκείμενη στρώση αργίλου έχει ευρύτερη κατανομή εγκάρσιων καθιζήσεων από την περίπτωση διάνοιξης σήραγγας αποκλειστικά σε αμμώδη εδαφικό σχηματισμό.

4.3 Υπόγειες εδαφικές μετακινήσεις

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε εκτενής ανάλυση των επιφανειακών εδαφικών μετακινήσεων, που αποτελούν τον πιο άμεσο τρόπο περιγραφής της παραμόρφωσης του εδάφους. Όμως σημαντικό ρόλο στον έλεγχο της αλληλεπίδρασης εδάφους-σήραγγας κατέχουν οι υπόγειες εδαφικές μετακινήσεις.

Οι Mair και Taylor (1993) για την περιγραφή των υπόγειων εδαφικών μετακινήσεων χρησιμοποίησαν πλαστική επίλυση. Η επίλυση αυτή προέβλεπε γραμμική σχέση μεταξύ των εδαφικών μετακινήσεων, οριζόμενων ως S_v/R ή S_{hx}/R και του λόγου R/d , όπου R η ακτίνα της σήραγγας και d η κατακόρυφη ή οριζόντια απόσταση από τον άξονα της σήραγγας. Οι Mair και Taylor επικεντρώθηκαν στις κατακόρυφες μετακινήσεις πάνω από τον άξονα της σήραγγας και στις οριζόντιες μετακινήσεις στο επίπεδο του άξονα της σήραγγας. Στην έρευνά τους συμπεριέλαβαν στοιχεία από διάνοιξη σήραγγας σε μαλακές και σκληρές αργίλους, αλλά και φυγοκεντρικές δοκιμές σε μαλακές αργίλους. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν ήταν ότι η κατανομή των υπόγειων καθιζήσεων μπορεί να προσομοιωθεί ικανοποιητικά από την κατανομή Gauss, όπως και στις επιφανειακές καθιζήσεις.

Για την πρόβλεψη της παραμέτρου i για τις εγκάρσιες υπόγειες καθιζήσεις χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση:

$$i = 0,5 (z_0 - z) \quad (36)$$

όπου

z : το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

z_0 : το βάθος της σήραγγας

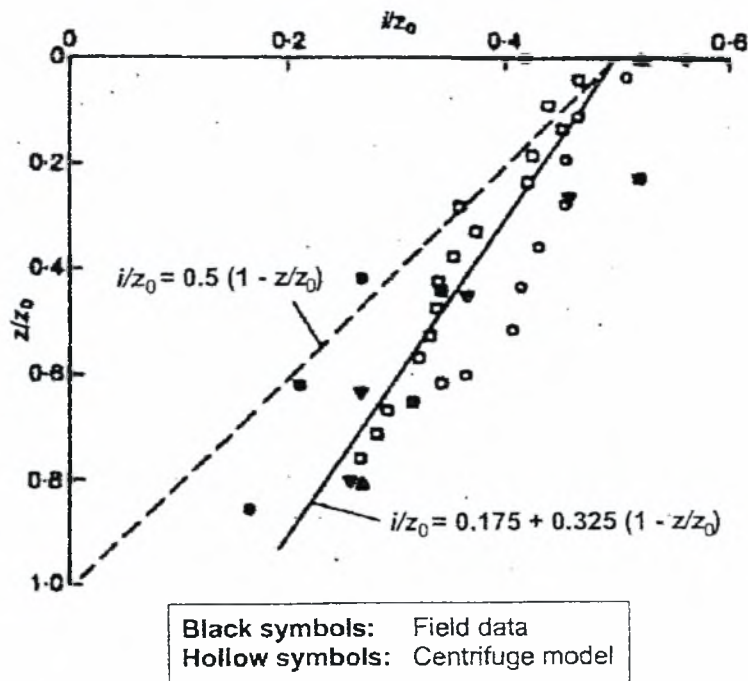
Τα φυγοκεντρικά στοιχεία και τα δεδομένα πεδίου που παρουσιάστηκαν έδειξαν ότι οι εγκάρσιες καθιζήσεις είναι αναλογικά ευρύτερη κατανομή με την αύξηση του βάθους z . Στο παρακάτω σχήμα η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την εξίσωση (36) ενώ η συνεχής γραμμή που περιγράφεται από την εξίσωση

$$\frac{i}{z_0} = 0,175 + 0,325 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \quad (37)$$

προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις. Προσαρμόζοντας κατάλληλα την εξίσωση (36)

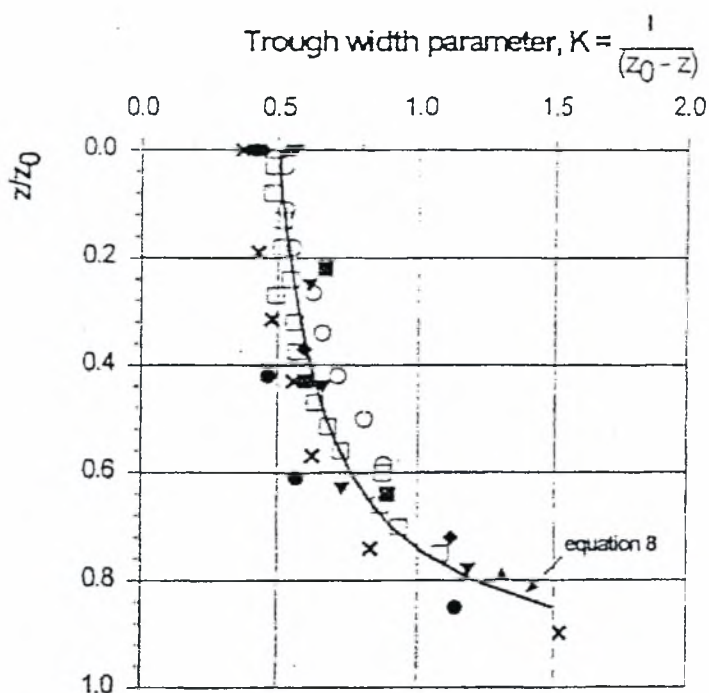
και αντικαθιστώντας την στην εξίσωση (37) προκύπτει:

$$k = 0,325 + \frac{0,175}{1 - \frac{z}{z_0}} \quad (39)$$



Σχήμα 4.22: Μεταβολή του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z (Maier και συνεργάτες, 1993)

Η τιμή του k αυξάνεται με το βάθος. Το παρακάτω σχήμα παριστάνει γραφικά το k συναρτήσει του λόγου z/z_0 για τις μετρήσεις του προηγούμενου σχήματος με επιπλέον στοιχεία από την πιλοτική σήραγγα της επέκτασης της γραμμής Jubilee του Λονδίνου και από την καμπύλη του τύπου (39). Από το διάγραμμα φαίνεται ότι για υψηλές τιμές του λόγου z/z_0 μια σταθερή τιμή $k=0.5$ θα υποτιμούσε το πλάτος των υπόγειων εγκάρσιων καθιζήσεων.

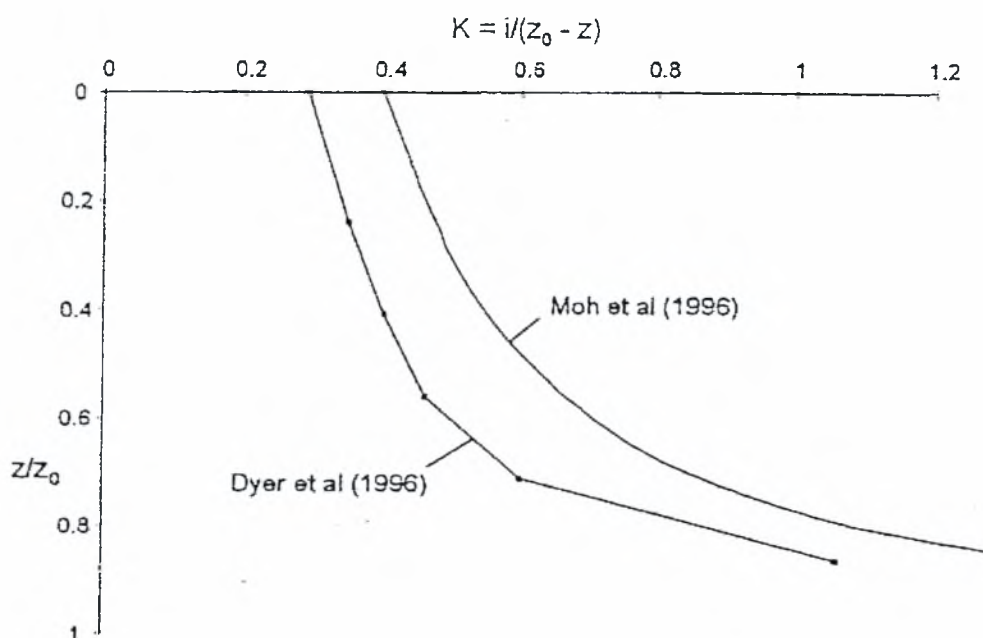


Location	Soil type	D (m)	z_0 (m)	Reference
● Green Park	London Clay	4.2	29	Attewell and Farmer (1974)
▲ Regents Park (northbound)	London Clay	4.2	20	Barrat and Tyler (1976)
▼ Regents Park (southbound)	London Clay	4.2	34	Barrat and Tyler (1976)
■ Willington Quay	Soft clay	4.3	13.5	Gossop (1978)
◆ Heathrow Express	London Clay	11.3	22	New and Bowers (1994)
× St. James's Park (westbound)	London Clay	4.85	31	Nyren (1998)
○ Centrituge* model ZDP	Soft clay	0.05	0.13	Mair (1979)
□ Centrituge* Model ZDV	Soft clay	0.05	0.22	Mair (1979)

*Models tested at 75g: equivalent full-scale D = 4.5m, $z_0 = 9.8m$ (ZDP), 16.5m (ZDV)

Σχήμα 4.23: Μεταβολή του παράγοντα K συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z για υπόγειες καθιζήσεις σε σήραγγες σε αργίλους (Mair και συνεργάτες, 1993)

Όμοιες παρατηρήσεις σχετικά με την κατανομή των υπόγειων μετακινήσεων διατυπώθηκαν από πολλούς μελετητές. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη διαφοροποίηση του k σε συνάρτηση με το βάθος όπως παρατηρήθηκε από τον Dyer και τους συνεργάτες του (1996) αλλά και από στοιχεία που δημοσίευσαν ο Moh και οι συνεργάτες του (1996).

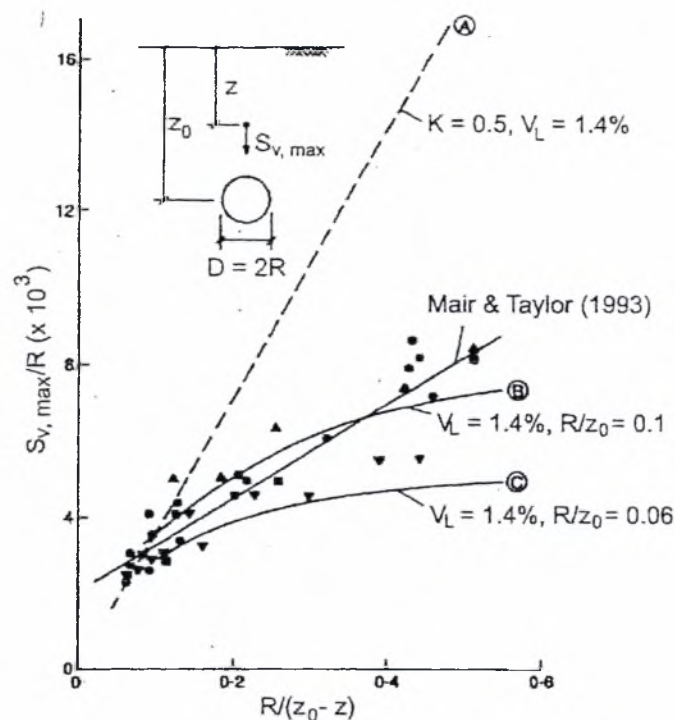


Σχήμα 4.24: Μεταβολή του παράγοντα K συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z για υπόγειες καθιζήσεις σε σήραγγες σε αργίλους

Από συνδυασμούς εξισώσεων η μέγιστη υπόγεια εγκάρσια καθίζηση εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{S_{v,max}}{R} = \frac{1,25V_L}{0,175 + 0,325\left(1 - \frac{z}{z_0}\right)} \cdot \frac{R}{z_0} \quad (40)$$

όπου R η ακτίνα της σήραγγας



Σχήμα 4.25: Υπόγειες καθιζήσεις πάνω από την κεντρική γραμμή της σήραγγας (Mair και συνεργάτες, 1993)

Το παραπάνω σχήμα δείχνει τη σχέση της μέγιστης καθίζησης $S_{v, \max}$ και του λόγου $R/(z_0-z)$. Το διάγραμμα περιλαμβάνει δεδομένα πεδίου από την κατασκευή σηράγγων στο Λονδίνο μαζί με τις γραφικές παραστάσεις των εξισώσεων (36) (καμπύλη A) και (40) (καμπύλες B και C). Για την τελευταία εξίσωση δίνονται καμπύλες ανώτερου και κατώτερου ορίου ανάλογα με το βάθος της σήραγγας και την τιμή της απώλειας όγκου, όπως αυτά μας δίνονται από τα δεδομένα πεδίου που ελήφθησαν υπόψη στο διάγραμμα. Η συνεχής ευθεία αφορά την πλαστική επίλυση των Mair και Taylor (1993). Τα δεδομένα πεδίου βρίσκονται σε μεγάλη αντιστοιχία με τις δυο καμπύλες. Αντίθετα φαίνεται ότι η εξίσωση (36) υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό την $S_{v, \max}$.

Οι Heath και West (1996) παρουσίασαν μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό της παραμέτρου i και της μέγιστης υπόγειας εγκάρσιας καθίζησης, εφαρμόζοντας διωνυμική κατανομή αντί της κανονικής κατανομής Gauss. Από την προσέγγιση αυτή προκύπτει:

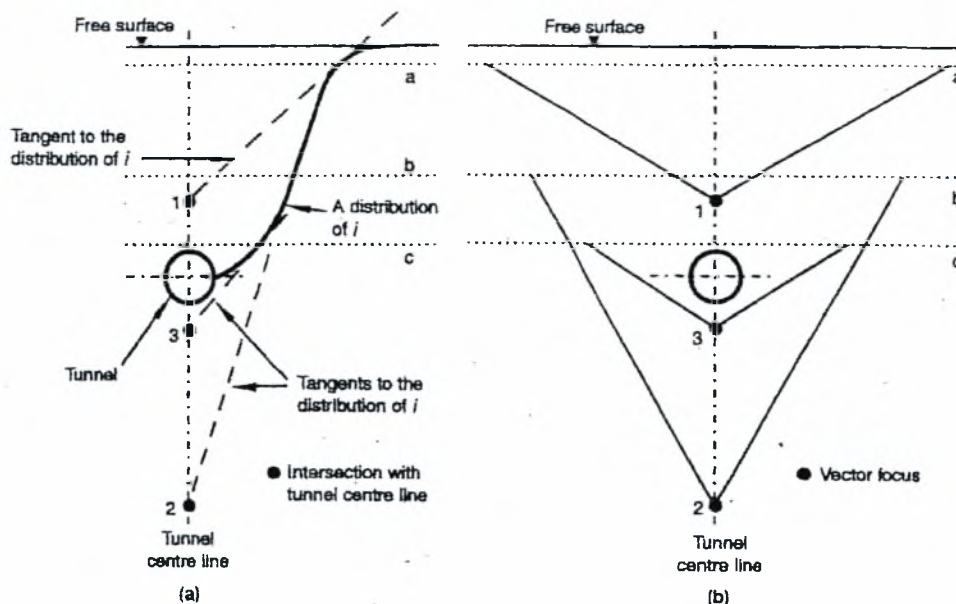
$$\frac{i}{i_0} = \sqrt{\frac{z_0 - z}{z_0}} \quad (41)$$

όπου i_0 η τιμή της παραμέτρου i στο επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους. Για σχεδιαστικούς σκοπούς πρότειναν να χρησιμοποιηθεί η κατανομή Gauss, όμως η παράμετρος i πρέπει να υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση. Όταν συνέκριναν τις προβλέψεις της εργασίας τους για το $S_{v,max}$ με τις αντίστοιχες από την έρευνα του *Mair*, συμπέραναν ότι οδηγούν σε παρόμοια αποτελέσματα για $0 \leq z/z_0 \leq 0.8$. Ωστόσο οι *Heath* και *West* προέβλεψαν μεγαλύτερες τιμές της $S_{v,max}$ κοντά στη σήραγγα, κάτι που έρχεται σε συμφωνία με τις μετρήσεις πεδίου.

Σε προηγούμενη παράγραφο αναφέρθηκε ότι οι οριζόντιες επιφανειακές μετακινήσεις υπολογίστηκαν με την παραδοχή ότι έχουν κατεύθυνση προς το κέντρο της σήραγγας. Βασιζόμενος στην εργασία του *Mair*, ο *Taylor* κατέληξε ότι για να υπάρξουν συνθήκες σταθερού όγκου, η μετακίνηση πρέπει να κατευθύνεται προς το σημείο στο οποίο η καμπύλη της εξίσωσης (37) τέμνει τον άξονα της σήραγγας.

Το γεγονός ότι η υπόθεση της μετακίνησης του εδάφους προς ένα μόνο σημείο του άξονα της σήραγγας δεν ικανοποιείται από την περιοχή γύρω από τη σήραγγα τονίστηκε από τους *New* και *Bowers* (1994) παρουσιάζοντας δεδομένα πεδίου από την πιλοτική σήραγγα *Heathrow Express*. Με την υπόθεση του μοναδικού σημείου, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υποτιμάται το πλάτος των υπόγειων εγκάρσιων καθιζήσεων, ενώ υπερεκτιμούνται οι καθιζήσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας. Γι' αυτό πρότειναν τη δημιουργία μοντέλου σύμφωνα με το οποίο οι απώλειες εδάφους είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες σε οριζόντια επιφάνεια στο επίπεδο του δαπέδου, ίδιου πλάτους με τη σήραγγα. Το μοντέλο αυτό προσέγγιζε καλύτερα τα δεδομένα πεδίου.

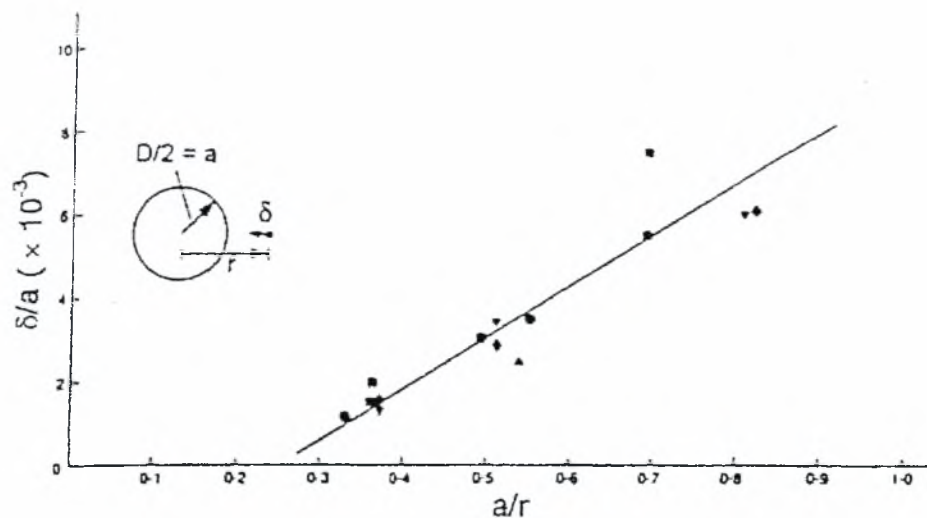
Οι *Grant* και *Taylor* (2000) παρουσίασαν στοιχεία υπόγειων εγκάρσιων μετακινήσεων που προέκυψαν από φυγοκεντρικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμφωνούν με την εξίσωση (37) εκτός από μια ζώνη γύρω από τη σήραγγα, όπου τα αποτελέσματα έδιναν μικρότερου πλάτους υπόγειες εγκάρσιες μετακινήσεις και μια ζώνη κοντά στην επιφάνεια, όπου μετρήθηκαν μετακινήσεις μεγαλύτερου πλάτους. Βασιζόμενοι στο συμπέρασμα του *Taylor* σχετικά με την κατεύθυνση των οριζόντιων μετακινήσεων, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι μετακινήσεις έχουν τη διεύθυνση της εφαπτομένης της καμπύλης του i . Τα σημεία τομής των εφαπτόμενων με τον κατακόρυφο άξονα για σήραγγες σε διάφορα βάθη, όπως και όλα τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.26: α) Κατανομή του παράγοντα i συναρτήσει του βάθους της σήραγγας z για υπόγειες καθιζήσεις β) Διανύσματα μετακινήσεων (Grant και Taylor, 2000)

Προκύπτει ότι η οριζόντια μετακίνηση κοντά στην επιφάνεια υποτιμάται όταν χρησιμοποιείται η εξίσωση (37) για τον καθορισμό του σημείου κατεύθυνσης των εδαφικών μετακινήσεων, κάτι που επιβεβαιώνεται από τα εργαστηριακά αποτελέσματα τα οποία δίνουν μεγάλες επιφανειακές οριζόντιες μετακινήσεις. Επιπλέον συμπεράναν ότι οι υψηλές τιμές του i κοντά στην επιφάνεια οφείλεται στην ύπαρξη ελεύθερου ορίου κάτι που είναι εξαιρετικά σπάνιο σε αστικό περιβάλλον.

Το επόμενο σχήμα δείχνει μετρήσεις από πέντε σήραγγες διαμέτρου 4m που κατασκευάστηκαν στην άργιλο του Λονδίνου. Οι τέσσερις σήραγγες κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της ασπίδας και η μια χωρίς ασπίδα. Για αστράγγιστες και αξονοσυμμετρικές συνθήκες, οι εδαφικές μετακινήσεις δ σε απόσταση r είναι ανάλογες του λόγου $1/r$. Μηδενική μετακίνηση αναμένεται σε απόσταση μεγαλύτερη του $1.5 \cdot \alpha$ στο επίπεδο του άξονά της, όπου α η ακτίνα της σήραγγας.



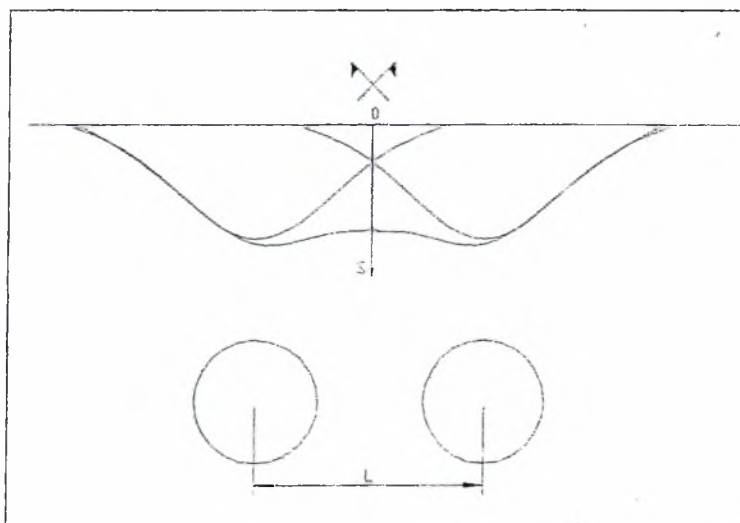
Σχήμα 4.27: Οριζόντιες μετακινήσεις στο επίπεδο του άξονα σε σήραγγες του Λονδίνου (Mair και Taylor, 1993)

Ο Hagiwara και οι συνεργάτες του (1990) μελέτησαν την επίδραση εδαφικών στρώσεων μεταβαλλόμενης δυσκαμψίας πάνω από αργιλικό στρώμα στο οποίο κατασκευάζεται σήραγγα. Εκτέλεσαν φυγοκεντρικές δοκιμές στις οποίες στρώματα άμμου διαφορετικής πυκνότητας τοποθετήθηκαν πάνω από στρώμα αργίλου. Το πάχος του υπερκείμενου στρώματος και το επίπεδο του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα επιλέχθηκαν ώστε να διατηρείται το ίδιο καθεστώς στην αργιλική στρώση σε όλες τις δοκιμές. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με περίπτωση όπου το έδαφος είναι μόνο αργιλικό. Όταν συνέκριναν την παράμετρο i από τις διάφορες δοκιμές με αυτά της δοκιμής μόνο σε αργιλικό στρώμα διαπίστωσαν ότι οι εγκάρσιες καθιζήσεις παρουσίασαν μεγαλύτερο πλάτος με την αύξηση της δυσκαμψίας του υπερκείμενου στρώματος. Οι δοκιμές έδειξαν ότι η συμπεριφορά των καθιζήσεων επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση της δυσκαμψίας της υπερκείμενης εδαφικής στρώσης με το έδαφος μέσα στο οποίο κατασκευάζεται η σήραγγα.

4.4 Μετακινήσεις του εδάφους από πολλαπλές σήραγγες

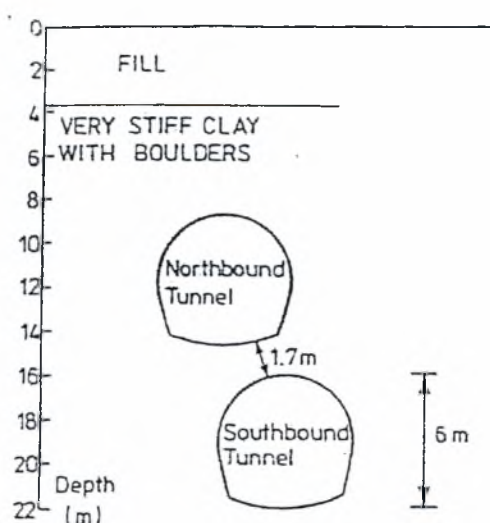
Στην περίπτωση διάνοιξης πολλαπλών σηράγγων, σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, ο υπολογισμός των καθιζήσεων γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο του σχήματος. Με βάση αυτή την επαλληλική μέθοδο οι τελικές καθιζήσεις είναι ίσες με το άθροισμα των καθιζήσεων των μεμονωμένων σηράγγων αν αυτές κατασκευάζονταν ανεξάρ-

τητα. Όμως οι Mair και Taylor (1997) παρατηρούν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος υποτιμά τις μετακινήσεις που δημιουργούνται από τη διάνοιξη διαδοχικών σηράγγων.

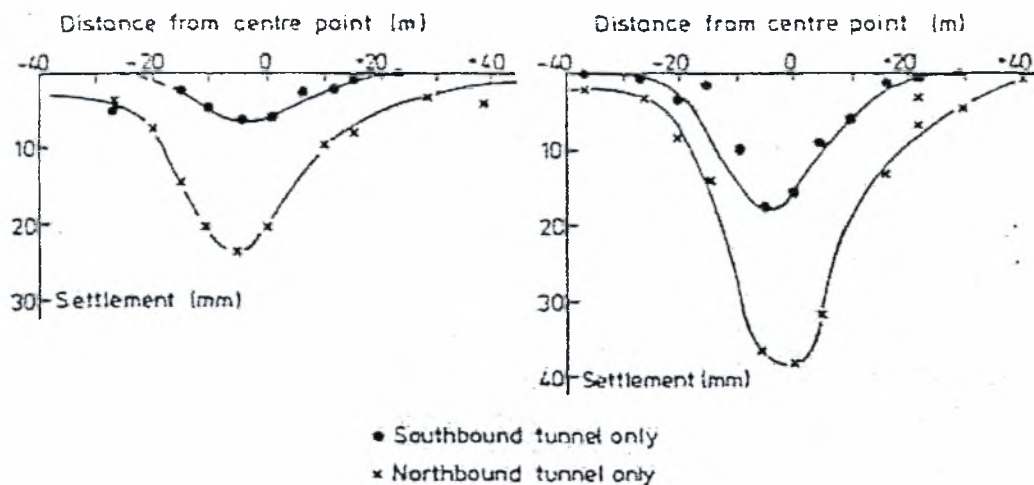


Σχήμα 4.28: Προσεγγιστική επίλυση για δύο σηράγγες

Οι Cording και Hansmire (1975) παρατήρησαν ασυμμετρία των επιφανειακών καθιζήσεων κατά τη διάνοιξη δύο σηράγγων στο μετρό της Ουάσινγκτον. Ασυμμετρία παρατηρήθηκε και από τον Standing και τους συνεργάτες του (1996) στην περίπτωση διάνοιξης δίδυμων σηράγγων στην άργιλο του Λονδίνου. Ο Shirlaw και οι συνεργάτες του (1998) παρατήρησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ γειτονικών σηράγγων που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο NATM στη σκληρή άργιλο της Σιγκαπούρης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έργου φαίνονται στο σχήμα.



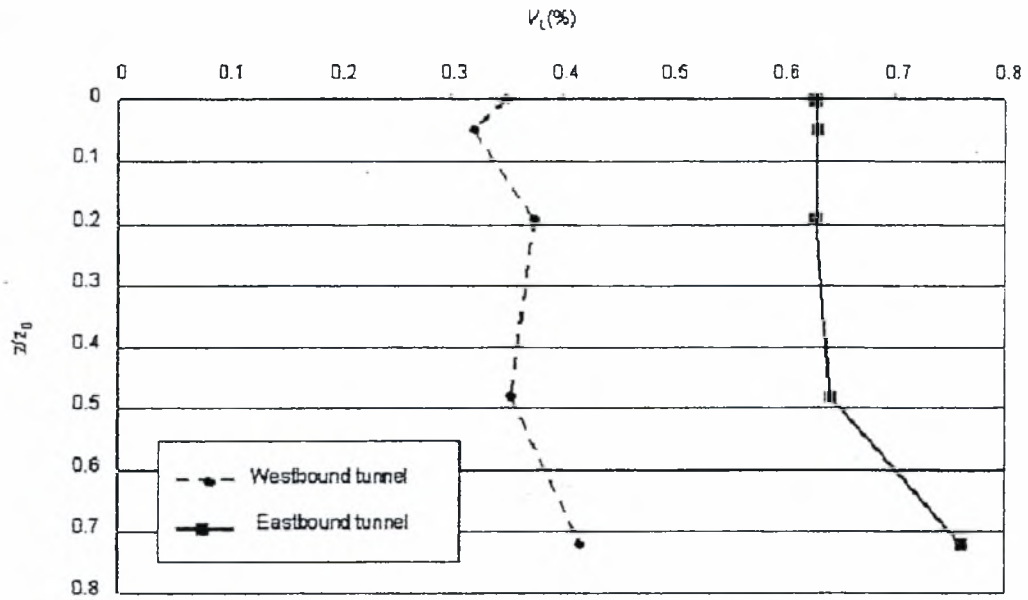
Το volume loss που παρατηρήθηκε ήταν της τάξης του 0.5-1% και η τιμή της παραμέτρου i δινόταν με ακρίβεια από τη σχέση $0.5 \cdot z$. Ωστόσο η απώλεια όγκου της δεύτερης σήραγγας ήταν μεγαλύτερο, της τάξης του 2-4% και η τιμή της παραμέτρου i ήταν απροσδόκητα μεγάλη ($i/z_0=1$).



Σχήμα 4.29: Κατανομές των εγκάρσιων καθιζήσεων για κοντινές σήραγγες στη Σιγκαπούρη (Shirlaw και συνεργάτες, 1998)

Είναι σαφές πως όταν κατασκευάζονται σήραγγες σε κοντινή απόσταση, το έδαφος μέσα στο οποίο διανοίγεται η δεύτερη σήραγγα έχει υποστεί ήδη παραμορφώσεις λόγω της κατασκευής της πρώτης, με αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας του. Αυτή η αλληλεπίδραση αποτελεί σοβαρή αιτία για την αύξηση της απώλειας όγκου της δεύτερης σήραγγας. Σε περίπτωση κατασκευής δυο κοντινών σηράγγων στο Καράκας, η απώλεια όγκου της δεύτερης σήραγγας ήταν μεγαλύτερο κατά 80-125% από αυτό της πρώτης.

Ο Mair (2001) αναφέρεται στην διάνοιξη δυο σηράγγων επέκτασης της γραμμής Jubilee κάτω από το South Park του Λονδίνου. Στο γράφημα που ακολουθεί παρατηρείται η σημαντική διαφορά της απώλειας όγκου ανάμεσα στις δυο σήραγγες. Στη σήραγγα Westbound που κατασκευάστηκε πρώτη η απώλεια όγκου στην επιφάνεια ήταν 0.3%, ενώ στη σήραγγα Eastbound, της οποίας η κατασκευή ακολούθησε, η επιφανειακή απώλεια όγκου ήταν 0.6% δηλαδή διπλασιάστηκε, κάτι που επαληθεύει την παραπάνω παρατήρηση περί αύξησης της απώλειας όγκου στη δεύτερη σήραγγα.



Σχήμα 4.30: Γραφική αναπαράσταση του volume loss σε σχέση με το z/z_0 στο South Park του Λονδίνου (Dimmock, 2001)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

Αναλυτικές μέθοδοι

5.1 Εισαγωγή

Με τον όρο αναλυτικές μέθοδοι ή λύσεις κλειστού τύπου νοούνται εκείνες κατά τις οποίες το πρόβλημα των καθιζήσεων επιλύεται με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Οι μέθοδοι αυτές στηρίζονται στις εξής παραδοχές:

- η διατομή είναι κυκλική, επενδεδυμένη ή όχι,
- η αλληλεπίδραση εδάφους-έργου παρουσιάζει τέλεια πρόσφυση ή τέλεια ολίσθηση,
- το μέσο είναι άπειρο (σήραγγες σε μεγάλο βάθος) ή ημιάπειρο (σήραγγες σε μικρό βάθος),
- έχει ως όριο οριζόντια επιφάνεια και είναι δισδιάστατο (επίπεδη παραμόρφωση), αξονοσυμμετρικό ή τρισδιάστατο,
- η πρωτογενής κατάσταση μπορεί να είναι ομογενής, ισότροπη ή ανισότροπη και
- η συμπεριφορά του εδάφους μπορεί να είναι γραμμικά ελαστική ή ελαστική τέλεια πλαστική.

Αν και σήμερα οι αριθμητικές μέθοδοι βρίσκουν ευρύ πεδίο εφαρμογής, όταν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντικαθίστανται από τις αναλυτικές. Τέτοιες περιπτώσεις είναι όταν δεν έχουμε επαρκή αριθμό πληροφοριών για τις ιδιότητες του εδάφους ή όταν είναι απαραίτητη η άμεση προσέγγιση των καμπύλων κατανομής των καθιζήσεων. Επομένως είναι ανέφικτη η χρήση αριθμητικών μεθόδων στηριζόμενων σε πολύπλοκα εδαφικά μοντέλα. Επίσης οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μεθόδων και για τη διεξαγωγή παραμετρικών μελετών.

Για την εύρεση της κατάλληλης αναλυτικής μεθόδου υπολογισμού επιφανειακών καθιζήσεων λόγω διάνοιξης σηράγγων έγινε πρωτεύων διαχωρισμός μεταξύ σηράγγων σε μεγάλο βάθος (άπειρο μέσο) και σηράγγων σε μικρό βάθος (ημιάπειρο μέσο) για ελαστικές ή ελαστοπλαστικές συνθήκες.

5.2 Αναλυτικές μέθοδοι για σήραγγες σε μεγάλο βάθος

5.2.1 Μη επενδεδυμένη σήραγγα σε ελαστικό γραμμικό μέσο

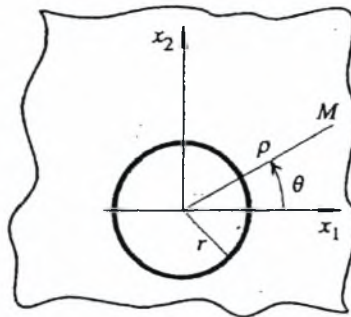
Το έργο προσομοιώνεται με μια οπή σε άπειρο μέσο και είναι αποδεκτό ότι η επίδραση της βαρύτητας είναι αμελητέα γύρω από την εκσκαφή. Οι αρχικές τάσεις είναι σταθερές και σε ένα σημείο A, που προσδιορίζεται από τις πολικές συντεταγμένες (r, θ) , υπολογίζονται από τις σχέσεις του Kirsch.

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \left(1 - 4 \frac{R^2}{r^2} + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_h) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \left(1 + 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) \left(1 + 2 \frac{R^2}{r^2} - 3 \frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

όπου σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ και $\sigma_{r\theta}$ είναι η ακτινική, η εφαπτομενική και η διατμητική τάση αντίστοιχα, R είναι η ακτίνα της διατομής και r είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο της σήραγγας. Οι τάσεις σ_v και σ_h είναι οι αρχικές κύριες τάσεις.



Σχήμα 5.1: Διατομή σήραγγας σε ελαστικό μέσο

Στην παρειά της εκσκαφής ($r=R$) η ακτινική και η διατμητική τάση είναι μηδενικές και η εφαπτομενική τάση είναι ίση με:

$$\sigma_{\theta\theta} = (\sigma_v + \sigma_h) - 2(\sigma_v - \sigma_h) \cos 2\theta$$

Το πρόσημο της τάσης αυτής εξαρτάται από τη σχέση ανάμεσα στις αρχικές κύριες τάσεις σ_v και σ_h . Η εφαπτομενική τάση συναρτήσει του συντελεστή ωθήσεων ηρεμίας K_0 γράφεται ως εξής:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_v (1 + K_0) - 2(1 - K_0) \cos 2\theta \sigma_v$$

Εφαρμόζοντας το νόμο γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς του Hooke, μετά από ολοκλήρωση, λαμβάνονται οι εξής τύποι για την ακτινική και την εφαπτομενική μετακίνηση:

$$u(r, \theta) = \frac{1+\nu}{2E} r \left\{ (\sigma_v + \sigma_h) \frac{R^2}{r^2} - (\sigma_v - \sigma_h) \left[4(1-\nu) \frac{R^2}{r^2} - \frac{R^4}{r^4} \right] \cos 2\theta \right\}$$

$$t(r, \theta) = \frac{1+\nu}{2E} r (\sigma_v - \sigma_h) \left[2(1-2\nu) \frac{R^2}{r^2} + \frac{R^4}{r^4} \right] \sin \theta$$

όπου E είναι το μέτρο του Young και ν ο λόγος του Poisson.

Υπό την επίδραση των ωθήσεων η διατομή της σήραγγας παίρνει ελλειψοειδή μορφή. Η ολοκλήρωση της ακτινικής συνιστώσας της μετακίνησης δίνει τη θεωρητική απώλεια όγκου:

$$V_s = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_v - \sigma_h) \pi R^2$$

5.2.2 Μη επενδεδυμένη σήραγγα σε ελαστοπλαστικό γραμμικό μέσο

Για την επίλυση σήραγγας κυκλικής διατομής, μη επενδεδυμένης, σε άπειρο ελαστοπλαστικό μέσο Mohr-Coulomb, υποθέτουμε ακτινικό πεδίο μετακινήσεων. Εάν R_p είναι η πλαστική ακτίνα, c η συνοχή και ϕ η γωνία τριβής του εδάφους, τότε προκύπτουν οι παρακάτω τύποι.

Στην πλαστική περιοχή ισχύει:

$$\sigma_{rr} = \frac{c}{\tan \phi} \left[\left(\frac{r}{R} \right)^{K_p-1} - 1 \right]$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{c}{\tan \phi} \left[K_p \left(\frac{r}{R} \right)^{K_p-1} - 1 \right]$$

$$u(r) = \frac{1+\nu}{E} r \left[\alpha_1 + \alpha_2 \left(\frac{r}{R} \right)^{K_p-1} + \alpha_3 \left(\frac{R_p}{r} \right)^{K_p-1} \right]$$

όπου $\alpha_1 = -(1-2\nu) \left(\sigma_0 + \frac{c}{\tan \phi} \right)$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$\alpha_2 = [1 - 2\nu + \sin^2 \phi] \frac{\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi}{(1 + \sin \phi) \sin \phi}$$

$$\alpha_3 = 2(1-\nu) \sin \phi \frac{\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi}{(1 + \sin \phi)}$$

$$R_p = R \left[\frac{(\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi)(1 - \sin \phi)}{c \cos \phi} \right]^{\frac{1 - \sin \phi}{2 \sin \phi}}$$

Στην ελαστική περιοχή ισχύει:

$$\sigma_{rr} = \sigma_0 - (\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi) \frac{R_p^2}{r^2}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_0 + (\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi) \frac{R_p^2}{r^2}$$

$$u(r) = \frac{1+\nu}{E} (\sigma_0 \sin \phi + c \cos \phi) \frac{R_p^2}{r^2}$$

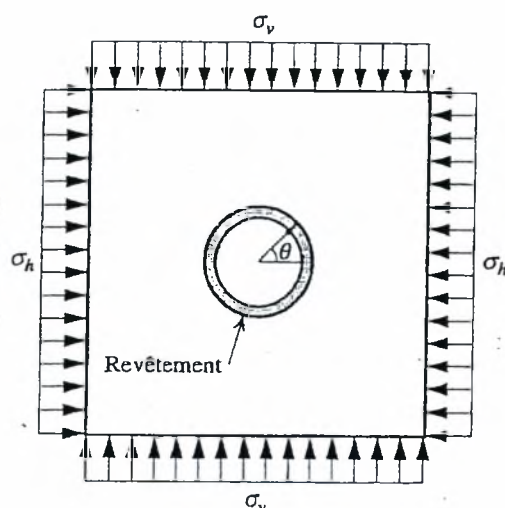
5.2.3 Επενδεδυμένη σήραγγα σε ελαστικό γραμμικό μέσο

5.2.3.1 Μέθοδος Einstein και Schwartz

Για τη μελέτη μίας επενδεδυμένης σήραγγας απαιτείται η θεώρηση της αλληλεπίδρασης εδάφους-υποστήριξης. Η πιο σαφής αναλυτική λύση διατυπώθηκε από τους Einstein και Schwartz (1979) και Pender (1980) οι οποίοι έλυσαν το πρόβλημα κυλινδρικού κελύφους απείρου μήκους σε μεγάλο βάθος, θεωρώντας επίπεδη παραμόρφωση και κάνοντας τις εξής παραδοχές:

- το μέσο θεωρείται γραμμικά ελαστικό,
- οι αρχικές τάσεις είναι σταθερές και ανισότροπες,
- το έδαφος και η επένδυση έχουν γραμμική ισότροπη συμπεριφορά και
- η υποστήριξη παραλαμβάνει αμέσως τις δημιουργημένες από την εκσκαφή δυνάμεις.

Οι Einstein και Schwartz μελέτησαν δύο μορφές αλληλεπίδρασης, την τέλεια πρόσφυση και την τέλεια ολίσθηση.



Σχήμα 5.2: Κυκλική επενδεδυμένη σήραγγα σε μεγάλο βάθος

Σημειώνονται οι εξής συμβολισμοί:

- E και ν είναι το μέτρο του Young και ο λόγος του Poisson του εδάφους αντιστοίχως,
- E_s και ν_s είναι το μέτρο του Young και ο λόγος του Poisson του υλικού της υποστήριξης αντιστοίχως,

- As είναι η επιφάνεια και Is η ροπή αδράνειας της διατομής της επένδυσης ανά μέτρο μήκους αντιστοίχως.

Η επένδυση λαμβάνεται υπόψη με την εισαγωγή των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων του Flugge:

$$\frac{d^2 U_{\theta}^{\text{επένδυση}}}{d\theta^2} + \frac{dU_r^{\text{επένδυση}}}{d\theta} = -\frac{C(1-\nu^2)}{E} r_o \tau_{r\theta}^{\text{επένδυση}}$$

$$\frac{dU_{\theta}^{\text{επένδυση}}}{d\theta} + U_r^{\text{επένδυση}} + \frac{C}{F} \left(\frac{d^4 U_r^{\text{επένδυση}}}{d\theta^4} + \frac{2d^2 U_r^{\text{επένδυση}}}{d\theta^2} + U_r^{\text{επένδυση}} \right) = \frac{C(1-\nu^2)}{E} r_o \sigma_r^{\text{επένδυση}}$$

- $F = \frac{ER^3(1-\nu^2)}{E_s I_s (1-\nu^2)}$ είναι ο συντελεστής ευκαμψίας της επένδυσης

- $C = \frac{ER(1-\nu^2)}{E_s A_s (1-\nu^2)}$ είναι ο συντελεστής συμπίεστικότητας της επένδυσης

Οι θεωρητικές σχέσεις για την περίπτωση τέλειας πρόσφυσης είναι:

ακτινική τάση: $\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)(1 - \alpha_0) - \frac{3}{2}(\sigma_v - \sigma_h)(1 - 2\alpha_1)\cos 2\theta$

εφαπτομενική τάση: $\sigma_{r\theta} = 0$

μετακινήσεις: $\frac{u_s E}{R(1+\nu)} = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)\alpha_0 - (\sigma_v - \sigma_h)[(5 - 6\nu)\alpha_1 - (1 - \nu)]\cos 2\theta$

$$\frac{v_s E}{R(1+\nu)} = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)[(5 - 6\nu)\alpha_1 - (1 - \nu)]\sin 2\theta$$

αξονική δύναμη: $N = \frac{R}{2}(\sigma_v + \sigma_h)(1 - \alpha_0) - \frac{R}{2}(\sigma_v - \sigma_h)(1 - 2\alpha_1)\cos 2\theta$

καμπτική ροπή: $M = \frac{R^2}{4}(\sigma_v - \sigma_h)(1 - 2\alpha_1)\cos 2\theta$

όπου $\alpha_0 = \frac{CF(1-\nu)}{C+F+CF(1-\nu)}$ και $\alpha_1 = \frac{(F+6)(1-\nu)}{2F(1-\nu)+6(5-6\nu)}$

Οι θεωρητικές σχέσεις για την περίπτωση τέλει ολίσθησης είναι:

$$\text{ακτινική τάση: } \sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)(1 - \alpha_0) - \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)[1 + 2\alpha_2(2 - 3\beta)]\cos 2\theta$$

$$\text{εφαπτομενική τάση: } \sigma_{r\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_v - \sigma_h)[1 - 2\alpha_2(2 - 3\beta)]\cos 2\theta$$

$$\text{μετακινήσεις: } \frac{u_s E}{R(1 + \nu)} = \frac{1}{2}(\sigma_v + \sigma_h)\alpha_0 + (\sigma_v - \sigma_h)\alpha_2 [2(1 - \nu) - \beta]\cos 2\theta$$

$$\frac{v_s E}{R(1 + \nu)} = -(\sigma_v - \sigma_h)\alpha_2 [\beta + (1 - \nu)]\sin 2\theta$$

$$\text{αξονική δύναμη: } N = \frac{R}{2}(\sigma_v + \sigma_h)(1 - \alpha_0) + \frac{R}{2}(\sigma_v - \sigma_h)(1 + 2\beta\alpha_2)\cos 2\theta$$

$$\text{καμπτική ροπή: } M = \frac{R^2}{4}(\sigma_v - \sigma_h)[1 + 2\alpha_2(1 - \beta)]$$

$$\text{όπου } \alpha_2 = \frac{C(1 - \nu)}{2[C(1 - \nu) + 4\nu - 6\beta - 3\beta C(1 - \nu)]} \quad \text{και} \quad \alpha_1 = \frac{(F + 6)C(1 - \nu) + 2F\nu}{3F + 3C + 2CF(1 - \nu)}$$

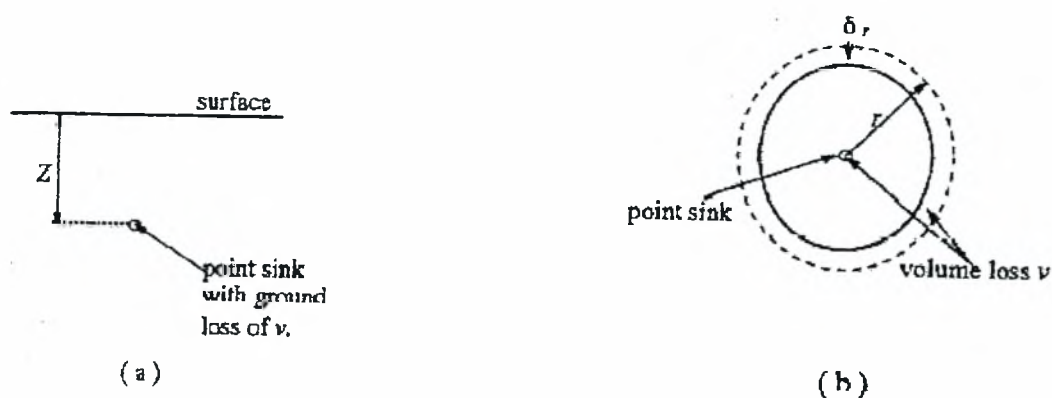
5.3 Αναλυτικές μέθοδοι για σήραγγες σε μικρό βάθος

5.3.1 Μη επενδεδυμένη σήραγγα σε ελαστικό γραμμικό μέσο

5.3.1.1 Μέθοδος Sagaseta

Ο Sagaseta πρότεινε στο πρόβλημα της διάνοιξης σήραγγας σε ελαστικό γραμμικό έδαφος σε μικρό βάθος, την απαλοιφή των τάσεων από τις εξισώσεις, ώστε όλη η μελέτη να πραγματοποιηθεί, με βάση τις παραμορφώσεις, σε απλά εδαφικά μοντέλα. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια δισδιάστατη ανάλυση των εδαφικών παραμορφώσεων σε αστράγγιστες συνθήκες. Το πλεονέκτημά της είναι ότι το πεδίο των παραμορφώσεων είναι ανεξάρτητο από την δυσκαμψία του εδάφους για αυτό κι ενδείκνυται η χρήση της σε ασυμπύεστα υλικά.

Η μέθοδος οδηγεί σε αναλυτικές λύσεις, αφού γίνει υπόθεση για την τιμή της απώλειας όγκου (volume loss) χωρίς όμως να λαμβάνεται υπόψη η αποτόνωση που προκαλείται από την αφαίρεση του εδάφους η οποία προσομοιώνεται ως σημειακή βύθιση. Η βύθιση αυτή αποσπά όγκο εδάφους V , σε βάθος z , ο οποίος κατανέμεται ακτινικά στην περιφέρεια της σήραγγας, ενώ σε πρώτη προσέγγιση η απώλεια του εδάφους υποτίθεται ότι είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο της σήραγγας.



Σχήμα 5.4: a) Χρήση σημειακής βύθισης για την προσομοίωση του volume loss
 b) Μετακίνηση του εδάφους λόγω σημειακής βύθισης σε ημιάπειρο μέσο

Αρχικά η ανάλυση έγινε αγνοώντας την επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας στον υπολογισμό των μετακινήσεων και θεωρώντας το έδαφος άπειρο μέσο. Τελικά ο Sagaseta κατέληξε στο συμπέρασμα πως το να μη ληφθεί υπόψη η επίδραση της επιφάνειας του εδάφους στον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων μπορούσε προσεγγιστικά να ισοσκελιστεί με διπλασιασμό των μετακινήσεων σε άπειρο μέσο. Επιπλέον διαπιστώθηκε πως ο συνδυασμός άκαμπτου ορίου και ελεύθερης επιφάνειας δημιουργούσε πολλαπλές ανακλάσεις.

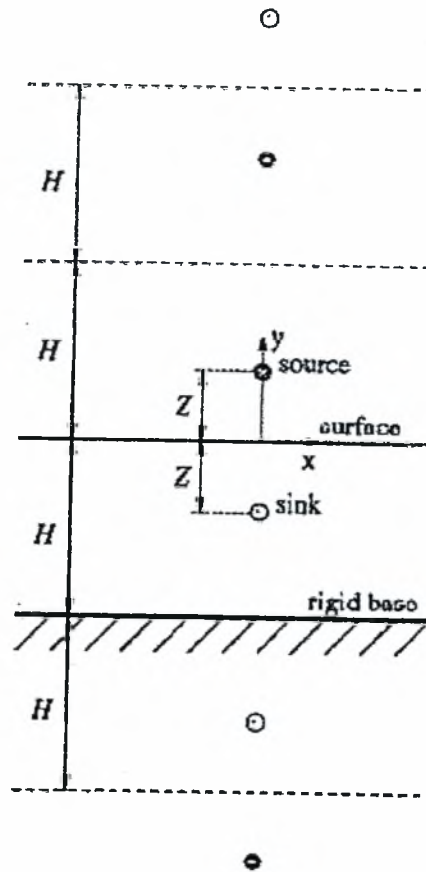
Σε ισότροπο ασυμπίεστο μέσο οι επιφανειακές μετακινήσεις (u , v , w) λόγω διάνοιξης σήραγγας κυκλικής διατομής, μη επενδεδυμένης, σε μικρό βάθος δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{u}{\delta_o} = -\frac{x D}{2(x^2 + H^2)} \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}}\right)$$

$$\frac{w}{\delta_o} = \frac{s}{\delta_o} = \frac{H D}{2(x^2 + H^2)} \left(1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}}\right)$$

$$\frac{v}{\delta_o} = \frac{D}{2\sqrt{x^2 + y^2 + H^2}}$$

όπου δ_o είναι η μέση ακτινική σύγκλιση της διατομής



Σχήμα 5.5: Διόρθωση των άκαμτων ορίων με τη χρήση πολλαπλών ανακλάσεων

Για ένα ανισότροπο πρωταρχικό πεδίο τάσεων και για δισδιάστατο μέσο πρότείνε τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{u}{\delta_o} = -\frac{x D}{(x^2 + H^2)} \left(1 - \frac{(1 - K_o)}{(1 + K_o)} \frac{8(x^4 - H^4) + H^2 D^2}{4(x^2 + H^2)} \right)$$

$$\frac{w}{\delta_o} = \frac{s}{\delta_o} = \frac{H D}{(x^2 + H^2)} \left(1 - \frac{(1 - K_o)}{(1 + K_o)} \frac{8(x^4 - H^4) + H^2 D^2}{4(x^2 + H^2)} \right)$$

Βασιζόμενος στις σχέσεις αυτές ο Abdallah απέδειξε ότι όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας K_o τόσο πιο βαθιά και περιορισμένη σε πλάτος είναι η λεκάνη κατανομής των καθιζήσεων. Αντίθετα, όσο μεγαλώνει ο συντελεστής K_o αυξάνει σημαντικά το εύρος κατανομής των καθιζήσεων.

Ο Sagasetta πρότεινε και μια προσεγγιστική λύση για την περίπτωση συμπιεστού δισδιάστατου μέσου. Παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις όγκου δίνονται ως συνάρτηση της διαστολής της διατομής της σήραγγας με τρόπο ανάλογο με ελαστοπλαστικό μέσο αν και κάτι τέτοιο έρχεται σε αντίθεση με τη συμπεριφορά των αργιλωδών εδαφών σε αστράγγιστες συνθήκες. Η λύση δίνεται από τους εξής τύπους:

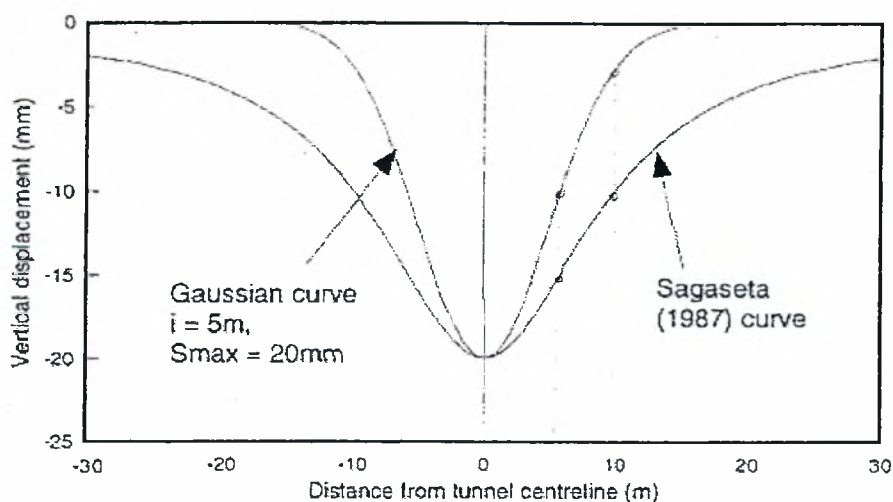
$$\frac{w}{\delta_o} = \frac{s}{\delta_o} = \frac{1}{4^{\alpha-1}} \frac{H}{D^{1-2\alpha}(x^2 + H^2)^\alpha}$$

$$\frac{u}{\delta_o} = \frac{1}{4^{\alpha-1}} \frac{x}{D^{1-2\alpha}(x^2 + H^2)^\alpha}$$

όπου $\alpha = \frac{1}{1 - \sin \psi}$ και ψ η γωνία διαστολής.

Οι σχέσεις δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για τιμές του συντελεστή α από 1,1 έως 1,2.

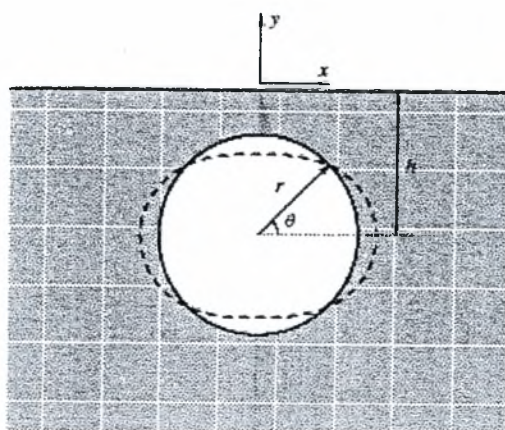
Οι τιμές των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με τη μέθοδο του Sagasetta για την πλευρική διασπορά και το εύρος των εδαφικών καθιζήσεων είναι πολύ μεγαλύτερες, προς την πλευρά της ασφάλειας, από αυτές που παρατηρήθηκαν στην πράξη αλλά και με την εμπειρική μέθοδο.



Σχήμα 5.6: Κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων κατά Gauss και κατά Sagasetta

5.3.1.2 Τροποποιήσεις στη μέθοδο Sagaseta

Οι Verruijt και Booker (1996) τροποποίησαν τις ελαστικές σχέσεις του Sagaseta εισάγοντας διαφορετικές τιμές του λόγου ν του Poisson και λαμβάνοντας υπόψη τη σταδιακή μεταβολή της διατομής της σήραγγας από κυκλική σε ελλειψοειδή.



Σχήμα 5.7: Μεταβολή της διατομής της σήραγγας από κυκλική σε ελλειψοειδή (ovalization)

Οι σχέσεις αυτές κατέληξαν σε ελαφρώς ευρύτερες κατανομές για τις πλευρικές καθιζήσεις που προκαλούνται κατά την διάνοιξη σπηραγγων. Δύο άλλοι ερευνητές, οι Loganathan και Poulos, επαναπροσδιορίζοντας την παράμετρο της απώλειας του εδάφους στηριζόμενοι στη μέθοδο του «χάσματος» (gap), τροποποίησαν τις παραπάνω σχέσεις και κατέληξαν σε ακριβέστερες κατανομές επιφανειακών, υπόγειων και πλευρικών καθιζήσεων όπως φάνηκε από πέντε μελέτες τους σε πραγματικές περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις εκτιμήθηκαν μηδενικές. Οι τροποποιημένες αναλυτικές σχέσεις των Loganathan και Poulos είναι οι παρακάτω:

$$U_z = 0 = \varepsilon_0 R^2 \left[\frac{4H(1-\nu)}{H^2 + x^2} \right] \exp \left\{ -\frac{1.38x^2}{(H \cot \beta + R)^2} \right\}$$

$$U_z = \varepsilon_e R^2 \left\{ -\frac{(z-H)}{[x^2 + (z-H)^2]} + \frac{(3-4\nu)(z+H)}{[x^2 + (z+H)^2]} - \frac{2z[x^2 - (z+H)^2]}{[x^2 + (z+H)^2]^2} \right\} \\ \exp \left\{ -\left[\frac{1.38x^2}{(H \cot \beta + R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

$$U_x = \varepsilon_e R^2 x \left\{ \frac{1}{[x^2 + (H-z)^2]} + \frac{(3-4\nu)}{[x^2 + (H+z)^2]} - \frac{4z(z+H)}{[x^2 + (H+z)^2]^2} \right\} \\ \exp \left\{ -\left[\frac{1.38x^2}{(H \cot \beta + R)^2} + \frac{0.69z^2}{H^2} \right] \right\}$$

όπου R = η ακτίνα της σήραγγας

z = το βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους

H = το βάθος έως το επίπεδο του άξονα της σήραγγας

ν = ο λόγος του Poisson για το έδαφος

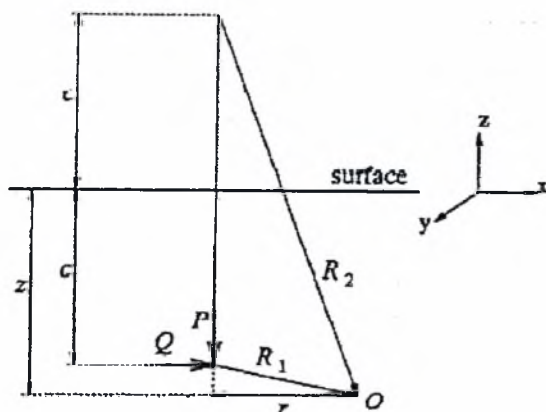
ε_e = η μέση τιμή του λόγου απώλειας του εδάφους

x = η πλευρική απόσταση από την κεντρική γραμμή (centerline) της σήραγγας

$\beta = 45^\circ + \varphi/2$, όπου φ η γωνία τριβής

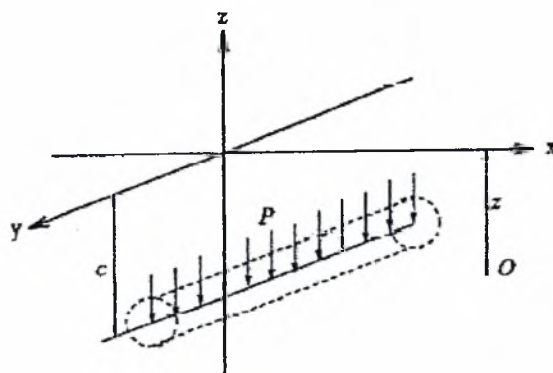
5.3.1.3 Μέθοδος Ρουλος και Davis (Μέθοδος ελαστικότητας)

Οι Ρουλος και Davis χρησιμοποίησαν τις υπάρχουσες αναλυτικές σχέσεις για εφαρμογή σημειακού φορτίου σε ελάχιστο ημιχώρο (1^ο πρόβλημα Mindlin).



Σχήμα 5.8: 1^ο πρόβλημα του Mindlin

Αυτή η προσπάθεια έγινε ώστε να προκύψουν λύσεις για γραμμική φόρτιση σε ελαστικό μέσο, οπότε το πρόβλημα του Mindlin τροποποιείται. Η γραμμική φόρτιση αναπαριστά τα φορτία που προκύπτουν, αφού έχει γίνει η διάνοιξη της σήραγγας.

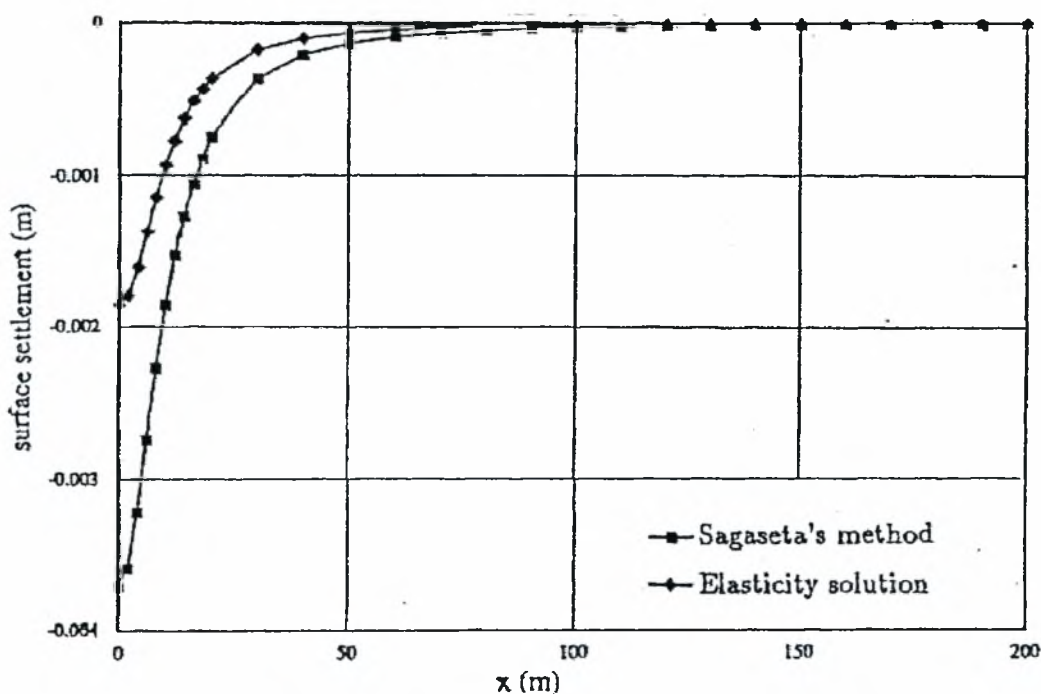


Σχήμα 5.9: Εφαρμογή του 1^{ου} προβλήματος του Mindlin στη διάνοιξη σηράγγων

Κατά την πρόβλεψη της μορφής των καθιζήσεων με τη μέθοδο της ελαστικότητας αγνοήθηκε η επίδραση του μετώπου και η σήραγγα θεωρήθηκε απείρου μήκους. Η επιφανειακή καθίζηση υπολογίστηκε με βάση καθίζηση σημείου σε πολύ μεγάλο βάθος ή σε πολύ μεγάλη απόσταση από τη σήραγγα και δίνεται από τη σχέση:

$$S = \frac{\gamma \cdot D^2 \cdot Z^2}{8G(x^2 + Z^2)}$$

Μια μέθοδος των Ρουλος και Davis αναπτύχθηκε σε προσπάθεια προσομοίωσης της αποτόνωσης που προκαλείται από την αφαίρεση εδάφους στο εσωτερικό της σήραγγας χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι μετακινήσεις του εδάφους λόγω volume loss που κυριαρχούν στην πραγματικότητα. Έτσι πολλές φορές προβλέπονται εσφαλμένα διογκώσεις αντί για καθιζήσεις. Επιπλέον οι καθιζήσεις που προβλέπει η μέθοδος της ελαστικότητας έχουν περιορισμένο εύρος σε σχέση με αυτές της εμπειρικής μεθόδου του Peck. Τέλος έχουν τη μισή τιμή από αυτή που προβλέπει η μέθοδος του Sagaseta με όμοιο όμως εύρος.



Σχήμα 5.10: Κατανομή των επιφανειακών καθιζήσεων κατά Ρουλος και Davis και κατά Sagaseta

5.3.2 Επενδεδυμένη ή μη σήραγγα σε ελαστοπλαστικό γραμμικό μέσο

5.3.2.1 Μέθοδος Mair και Taylor

Οι Mair και Taylor πρότειναν μια μέθοδο ανάλυσης για ελαστικό γραμμικό τέλεια πλαστικό μέσο. Μετά από μελέτες σε σήραγγες στην άργιλο του Λονδίνου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η αποφόρτιση μιας σφαιρικής κοιλότητας αποτελεί επαρκής προσέγγιση για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της άργιλου μπροστά από το μέτωπο εκσκαφής όπως και για τις μετακινήσεις πάνω και πλευρικά της σήραγγας. Οι λύσεις κλειστού τύπου που προέκυψαν για σφαιρικές και κυλινδρικές κοιλότητες είναι αντίστοιχα οι παρακάτω:

$$\frac{\delta}{D} = \frac{c_u}{3G} \left(\frac{D}{r} \right)^2 e^{(0.75 \cdot N - 1)} \quad (1)$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{c_u}{2G} \left(\frac{D}{r} \right) e^{(N-1)} \quad (2)$$

όπου δ : η ακτινική μετατόπιση για αρχική ακτίνα r

D : η εσωτερική ακτίνα της σήραγγας

N : ο συντελεστής υπερφόρτισης, $N = \frac{\sigma_o}{c_u}$, όπου σ_o : η αρχική τάση της

κεντρικής γραμμής (centerline) της κοιλότητας

Οι Mair και Taylor προσπάθησαν να συμπεριλάβουν και την περίπτωση της μόνιμης επένδυσης της σήραγγας η οποία όμως δεν επιτρέπει την πλήρη αποφόρτιση της κοιλότητας. Τελικά η σχέση (2) παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\delta}{D} = \frac{c_u}{2G} \left(\frac{D}{r} \right) e^{(N(1-n)-1)} \quad (3)$$

όπου n : το ποσοστό της πίεσης που αναλαμβάνεται από την επένδυση

Κεφάλαιο 6°

Αριθμητικές μέθοδοι

6.1 Εισαγωγή

Οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια στηρίζονται σε μια πολύ σημαντική όσο και περιοριστική παράμετρο για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν: πρέπει να επικρατούν συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Στην πράξη όμως κάτι τέτοιο πολύ σπάνια συμβαίνει. Τις περισσότερες φορές, για τη διάνοιξη μιας σήραγγας έχουμε να αντιμετωπίσουμε υφιστάμενες γειτονικές κατασκευές, υπόγεια έργα ή ακόμα και σύνθετες υπόγειες δομές (δίδυμες σήραγγες και υπόγειοι σταθμοί). Για την επίλυση αυτών των σύνθετων γεωτεχνικών προβλημάτων χρησιμοποιούνται ευρέως οι αριθμητικές μέθοδοι.

Οι μέθοδοι αυτές αναπτύχθηκαν παράλληλα με την αλματώδη εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών οι οποίοι δημιούργησαν ένα ευρύ φάσμα νέων γνώσεων και δυνατοτήτων. Η μεγάλη συνεισφορά των ηλεκτρονικών υπολογιστών στον κλάδο της κλασσικής Εδαφομηχανικής ήταν η ανάπτυξη σύνθετων εδαφικών μοντέλων ώστε να προσομοιωθεί επαρκώς η εκάστοτε εδαφική συμπεριφορά. Αξίζει να τονιστεί ότι η αναζήτηση για νέα πιο εξελιγμένα και ρεαλιστικά εδαφικά μοντέλα είναι συνεχής και αδιάκοπη.

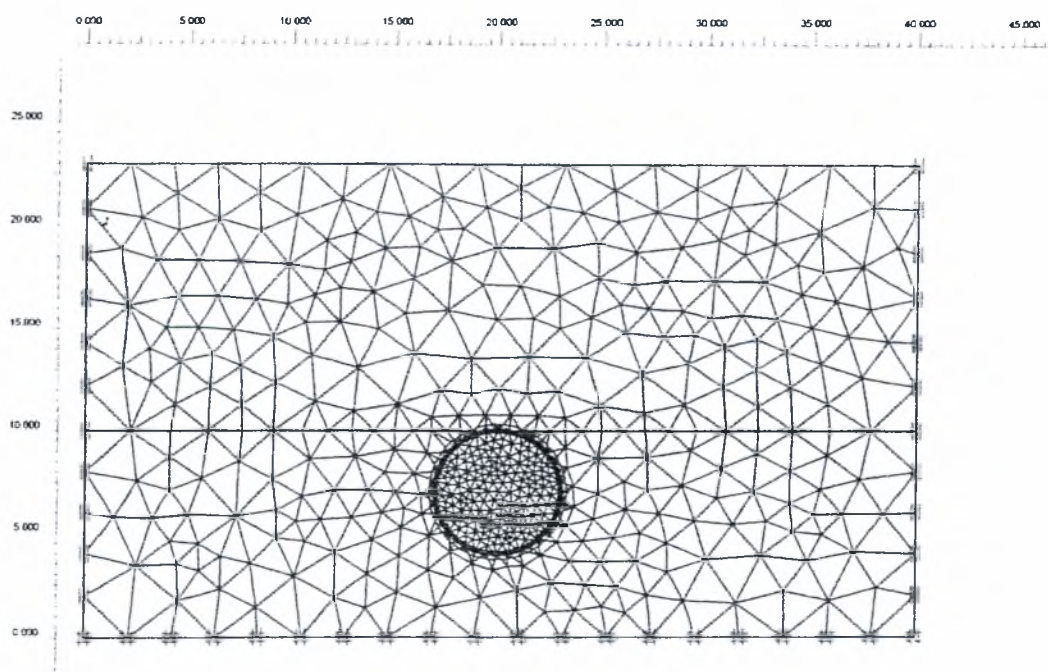
Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων και οι εξελιγμένοι νόμοι συμπεριφοράς των υλικών δίνουν τη δυνατότητα για την επίλυση σύνθετων γεωτεχνικών προβλημάτων ακόμα και σε τρεις διαστάσεις. Έτσι δίνεται η δυνατότητα στο μηχανικό να βρίσκει γρήγορες και οικονομικές λύσεις σε δύσκολα προβλήματα. Η πιο γνωστή αριθμητική μέθοδος είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων ενώ άλλες μέθοδοι είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών και η Μέθοδος Συνοριακών Συνθηκών.

6.2 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Χρησιμοποιείται σε γραμμικά ελαστικά υλικά αλλά και σε ελαστοπλαστικά υλικά όπως είναι το έδαφος. Εφαρμόζεται σε πληθώρα έργων όπως η ανάλυση θεμελιώσεων, η μελέτη φραγμάτων, η υποστήριξη υπόγειων έργων, η μελέτη υπόγειων ροών κτλ. Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων περιλαμβάνει έξι βήματα:

1. Διαίρεση του συνεχούς μέσου σε πεπερασμένα στοιχεία

Το συνεχές μέσο χωρίζεται με γραμμές σε μικρότερα τμήματα που ονομάζονται **στοιχεία** και συνδέονται μεταξύ τους με **κόμβους**. Τα στοιχεία αυτά είναι τριγωνικά ή τετράπλευρα σε δισδιάστατο εδαφικό ομοίωμα και τετράεδρα ή εξαέδρα πρίσματα σε τριδιάστατα προβλήματα. Γραμμικά στοιχεία χρησιμοποιούνται για να παραστήσουν αγκυρώσεις σηράγγων. Το πλήθος και το μέγεθος των στοιχείων δεν υπόκεινται σε κάποιο κανόνα. Συνήθως η διαίρεση του συνεχούς μέλους γίνεται πυκνότερη στις περιοχές μεταβολής των τάσεων και των παραμορφώσεων (κυρίως στην περιφέρεια της σήραγγας). Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των κύριων αγνώστων όπως είναι οι παραμορφώσεις των κόμβων, οι τάσεις κτλ. ώστε να μορφωθεί το πρόβλημα. Οι τιμές των άλλων μεγεθών προκύπτουν ύστερα από την επίλυση των κυρίων αγνώστων του προβλήματος.



Σχήμα 6.1: Διακριτοποίηση με τη χρήση τριγωνικών στοιχείων με το πρόγραμμα PLAXIS. Η εσωτερική επένδυση προσομοιώνεται με στοιχείο καμπυλωμένης δοκού.

2. Επιλογή της προσεγγιστικής συνάρτησης

Στο στάδιο αυτό θεωρείται γνωστή η μορφή της μεταβολής των κύριων μεγεθών σε κάθε στοιχείο και εκφράζεται συναρτήσει των κύριων μεγεθών στους κόμβους των στοιχείων. Αν για παράδειγμα, σαν κύριο μέγεθος εκλεγούν οι μετακινήσεις, επιδιώκεται η σύνδεση των μετακινήσεων στο εσωτερικό του στοιχείου με τις μετακινήσεις των κόμβων που περιβάλλουν το στοιχείο. Η επιλογή της κατάλληλης προσεγγιστικής συνάρτησης αποτελεί κριτήριο για την ταχύτητα και την ακρίβεια της επίλυσης.

3. Μόρφωση των εξισώσεων του στοιχείου

4. Μόρφωση των εξισώσεων ολόκληρου του συστήματος

5. Επίλυση του συστήματος

6. Υπολογισμός των άλλων μεγεθών

Στον τομέα της διάνοιξης και κατασκευής σηράγγων, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει τον καθορισμό των φορτίων και των τάσεων που αναλαμβάνονται από τα μέτρα υποστήριξης και ως ένα βαθμό τον καθορισμό των επιφανειακών καθιζήσεων. Τα ομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται στην επαλήθευση της συμπεριφοράς, στην ανάλυση της απόκρισης του εδάφους σε μια τεχνική κατασκευή και στην πραγματοποίηση μελετών που αφορούν στην παραμορφωσιμότητα και στην αντοχή του εδάφους.

6.2.1 Αναλύσεις σε δύο διαστάσεις

Η ανάλυση του προβλήματος της διάνοιξης σηράγγων απαιτεί τη χρήση τριδιάστατων προσομοιωμάτων. Λόγω όμως της πολυπλοκότητάς τους που συνίσταται στη μόρφωση των μοντέλων, στο χρόνο υπολογισμού της απόκρισής τους και στην εποπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους, η χρήση τους είναι περιορισμένη. Επομένως η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς των σηράγγων γίνεται με τη βοήθεια μοντέλων επίπεδης παραμόρφωσης (2-D) και με διαδοχικές επιλύσεις προσπαθούμε να προσεγγίσουμε την τριδιάστατη φύση του προβλήματος. Οι σημαντικότερες μέθοδοι είναι οι εξής:

- Η μέθοδος gap
- Η μέθοδος σύγκλισης-αποτόνωσης (μέθοδος λ)
- Η μέθοδος της προοδευτικής χαλάρωσης
- Η μέθοδος του volume loss
- Η μέθοδος εγκάρσιας-διαμήκου ανάλυσης.

6.2.1.1 Μέθοδος Gap

Ο Rowe και οι συνεργάτες του (1983) εισήγαγαν την παράμετρο gap για τον υπολογισμό των εδαφικών μετακινήσεων με διεύθυνση προς το εσωτερικό της σήραγγας μέχρι το έδαφος να κλείσει το κενό ανάμεσα στην επένδυση και στο αρχικό όριο εκσκαφής. Ο Lee και οι συνεργάτες του (1992) ποσοτικοποίησαν την παράμετρο gap με τη χρήση της τριδιάστατης μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για ελαστικό τέλεια πλαστικό έδαφος, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της στη διδιάστατη μέθοδο. Η παράμετρος gap υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$g = G_p + U_{3D}^* + w$$

όπου

- G_p η διαφορά ανάμεσα στην εξωτερική διάμετρο της μηχανής διάνοιξης και στην εξωτερική διάμετρο σχεδιασμού. Για σήραγγα κυκλικής διατομής η παράμετρος G_p δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$G_p = 2\Delta + \delta$$

με Δ το πάχος της ουράς και δ το πάχος της υπερεκσκαφής λόγω εκτροπής της επένδυσης.

- U_{3D}^* η τριδιάστατη ελαστοπλαστική παραμόρφωση του μετώπου της σήραγγας που δίνεται από τη σχέση:

$$U_{3D}^* = \frac{k}{2} \delta_x$$

με k τον συντελεστή αντίστασης του εδάφους στην εκσκαφή (0,7 – 0,9 για σκληρές έως μαλακές αργίλους και 1 για πολύ μαλακές αργίλους) και δ_x η διείσδυση του εδάφους στο μέτωπο εκσκαφής που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta_x = \frac{\Omega R P_o}{E}$$

όπου R η ακτίνα της σήραγγας, E το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους, Ω αδιάστατος παράγοντας παραμόρφωσης ο οποίος υπολογίζεται από τα διαγράμματα των Lee και Rowe και εξαρτάται από τον παράγοντα υπερφόρτισης N και επίσης $P_o = K_o P_v + P_w + P_i$

με K_o : συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία

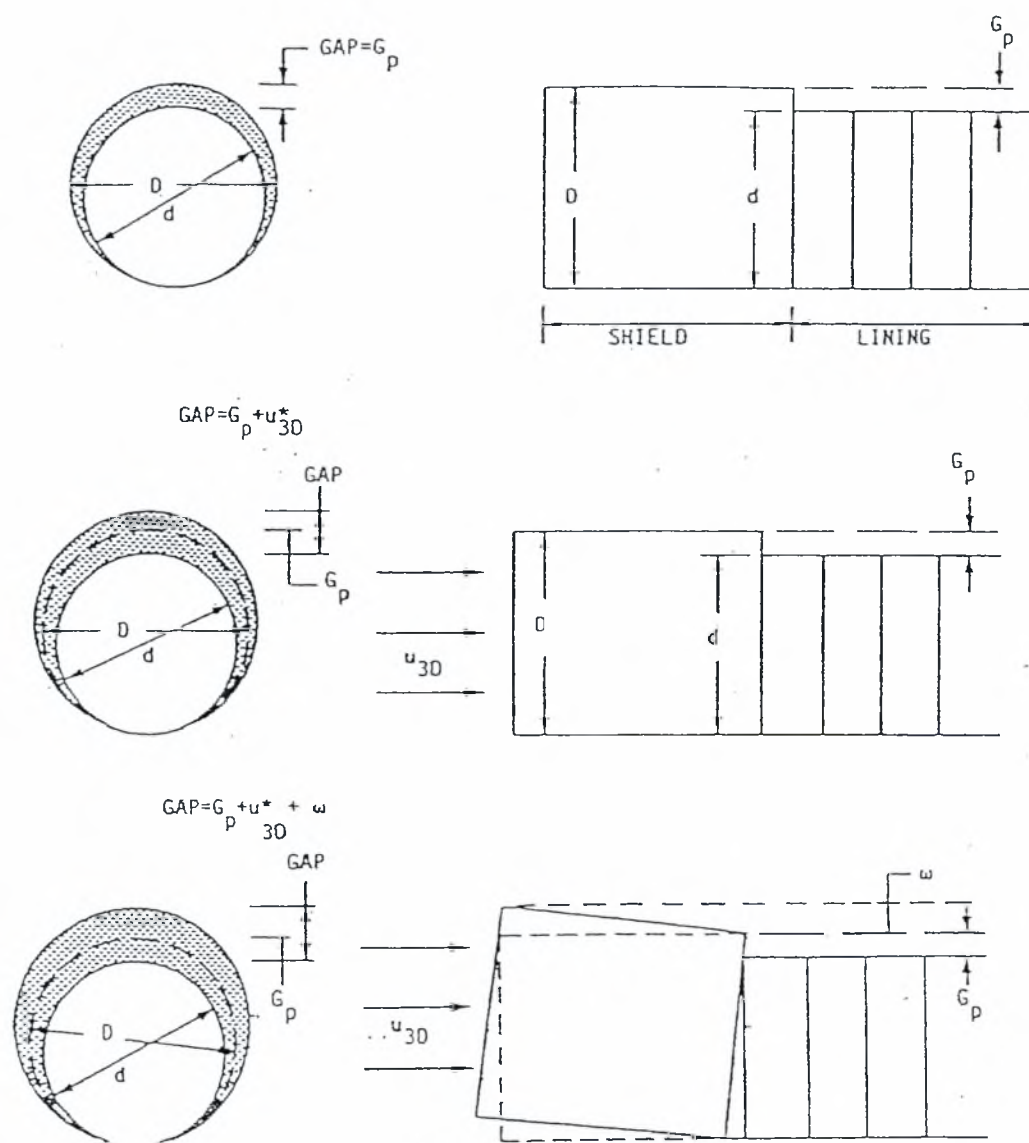
P_v : κατακόρυφη ενεργός τάση

P_w : πίεση των πόρων του νερού

P_i : πίεση υποστήριξης της σήραγγας

- w ο παράγοντας ποιότητας της εργασίας μικρότερος από $0,6G_p$ και από την ελαστοπλαστική παραμόρφωση U_i στην οροφή της σήραγγας όπως ορίζεται από τον L_0 και τους συνεργάτες του (1984).

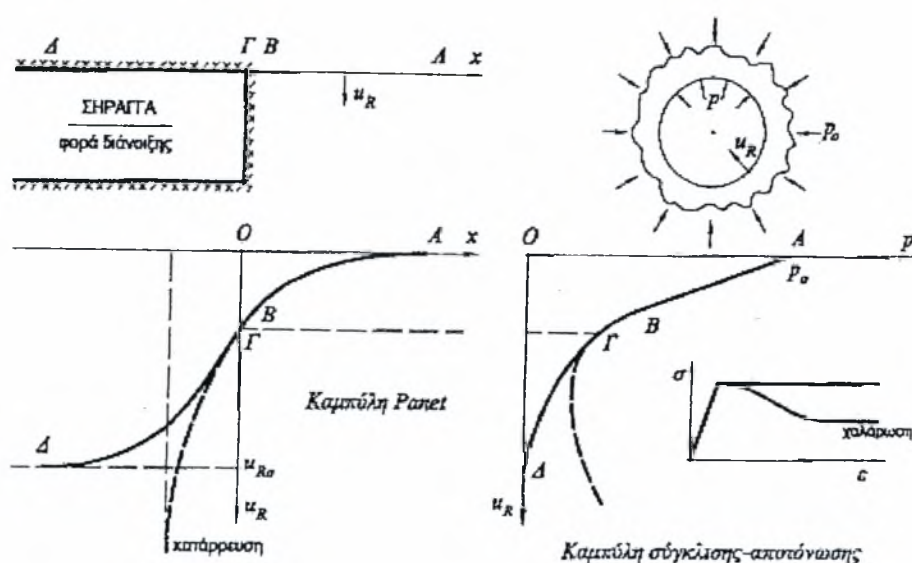
Όταν η διάνοιξη γίνεται με μηχανές τύπου EPB ή slurry shield οι οποίες ανήκουν στην κατηγορία κλειστού μετώπου με ασπίδα και παρέχουν πλήρη υποστήριξη του μετώπου της εκσκαφής, οι παράγοντες U^*3D και w μηδενίζονται. Επομένως η παράμετρος gap εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαφορά της εξωτερικής διαμέτρου της ασπίδας με αυτή της επένδυσης, δηλαδή από τον παράγοντα G_p . Σε αυτή την περίπτωση η διδιάστατη προσέγγιση αντικατοπτρίζει ικανοποιητικά την κατάσταση. Αντίθετα η ακρίβειά της είναι μειωμένη σε διάνοιξη σήραγγας με τη μέθοδο ανοιχτού μετώπου.



Σχήμα 6.2: Προσομοίωση της απώλειας εδάφους με τη μέθοδο gap

6.2.1.2 Μέθοδος σύγκλισης – αποτόνωσης (μέθοδος λ)

Η κατασκευή μιας σήραγγας αποτελεί ισχυρή επέμβαση στο τασικό πεδίο που επιδρά σε εδαφικό υλικό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή των τάσεων και τη δημιουργία εδαφικών μετακινήσεων. Το σχήμα που ακολουθεί απεικονίζει τη εξέλιξη των μετατοπίσεων για ανυποστήρικτη σήραγμα σε διάγραμμα $x-U_R$ όπου x είναι η απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής και U_R η σύγκλιση της οροφής της σήραγγας. Παρατηρούμε στο σχήμα ότι ένα ποσοστό της τάξης του 30-35% της συνολικής σύγκλισης U_{R0} πραγματοποιείται ακριβώς μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας πριν δηλαδή τοποθετηθεί η επένδυση.



Σχήμα 6.3: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Panet σε ανυποστήρικτη σήραγμα

Αν υποθετικά, αμέσως μετά τη διάνοιξη κατασκευαστεί ένας ισχυρός άκαμπτος δακτύλιος ικανός να εμποδίζει την οποιαδήποτε ελαστική παραμόρφωση του εδάφους, θα ασκηθεί πάνω του μια ακτινική πίεση σ_r (η ίδια τάση από το δακτύλιο στο όριο εκσκαφής ως αντίδραση) ίση με την αρχική, πριν τη διάνοιξη, γεωστατική τάση σ_0 δηλαδή $\sigma_0 = \sigma_r$.

Αντίθετα η κατασκευή μιας πιο εύκαμπτης υποστήριξης (εξωτερικός δακτύλιος) που θα επέτρεπε ελεγχόμενα κάποιες ελαστικές εδαφικές παραμορφώσεις θα επέφερε πολύ μικρότερες πιέσεις πάνω της. Έτσι το έδαφος κινείται προς την εκσκαφή με αργούς ελεγχόμενους ρυθμούς έως ότου με την ανάπτυξη των απαιτούμενων διατμητικών αντιστάσεων αποκατασταθεί η στατική ισορροπία.

Η κρίσιμη πίεση, που εξαρτάται από το βάθος της σήραγγας και την αντοχή του εδάφους και θα επέτρεπε την ανάπτυξη του συνόλου των ελαστικών μετατοπίσεων και την ταυτόχρονη εκδήλωση πλαστικών παραμορφώσεων στα τοιχώματα της σήραγγας ορίστηκε από τον Kastner, για κυκλική διατομή, ως:

$$p_{cr} = \frac{2\sigma_o - \sigma_{cr}}{1 + k_p}$$

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης. Σε κάθε θέση x κατά μήκος του άξονα της σήραγγας αντιστοιχεί μια τιμή σύγκλισης UR από την οποία μέσω του διαγράμματος σύγκλισης-αποτόνωσης παίρνουμε μια τάση σ_r που είναι μικρότερη από την αρχική γεωστατική τάση σ_o . Η σύγκλιση που πραγματοποιείται πριν την τοποθέτηση της επένδυσης συντελεί στην αποτόνωση του εδάφους και τη μείωση των πιέσεων επί των μέτρων υποστήριξης. Για να εκφραστεί το μέγεθος της αποφόρτισης πριν την κατασκευή της επένδυσης χρησιμοποιείται ο συντελεστής αποτόνωσης λ :

$$\sigma_r = (1 - \lambda)\sigma_o$$

ή

$$\lambda = \frac{u_n}{u_{max}} = 1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_o}$$

όπου u_n : η πραγματική ακτινική μετατόπιση κοντά στο μέτωπο της σήραγγας

u_{max} : η μέγιστη ακτινική μετατόπιση μακριά από το μέτωπο

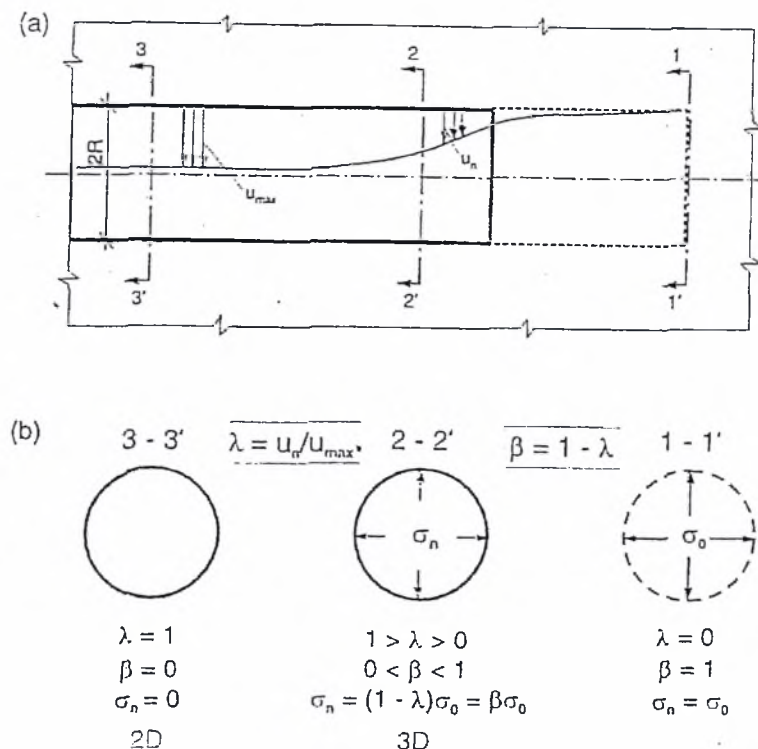
σ_r : η τάση που ασκείται στην επένδυση

σ_o : η αρχική γεωστατική τάση πριν τη διάνοιξη της σήραγγας

Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί για το συντελεστή αποτόνωσης λ ισχύει:

$$0 < \lambda < 1$$

- $\lambda=0$ για αποστάσεις $> 4R$ μπροστά από το μέτωπο, όπου $u_n=0$
- $\lambda=1$ για αποστάσεις $> 4R$ πίσω από το μέτωπο, όπου $u_n=u_{max}$



Σχήμα 6.4: a) σύγκλιση σήραγγας b) αρχή της μεθόδου λ για 2D ανάλυση

Καθώς η τάση στα όρια της σήραγγας ελαττώνεται, προκύπτουν ακτινικές μετατοπίσεις ισοδύναμες με την απώλεια όγκου. Η τάση που αφαιρείται από το έδαφος πριν την τοποθέτηση της επένδυσης είναι $\lambda\sigma_0$. Υποθέτοντας ότι οι δυνάμεις υποστήριξης είναι αντιστρόφως ανάλογες με το λ , για τον υπολογισμό της πραγματικής δύναμης υποστήριξης P_n , εισάγεται ένας μειωτικός συντελεστής $\beta = 1 - \lambda$ τέτοιος ώστε $P_n = \beta P_{max}$. Το P_{max} εκφράζει τη μέγιστη δύναμη υποστήριξης που αντιστοιχεί σε πρωτογενές πεδίο τάσεων σ_0 .

Η υποστήριξη τοποθετείται σε κάποια απόσταση d πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Η επιλογή του συντελεστή αποτόνωσης λ_d είναι το πιο κρίσιμο σημείο της μεθόδου. Η τιμή του λ_d επιλέγεται από τον καθορισμό της ακτινικής μετατόπισης u_d στο ανυποστήρικτο μήκος d πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής. Η u_d εξαρτάται από το μέγεθος του χωρίς υποστήριξη τμήματος και από τον καταστατικό νόμο του εδάφους και σε μικρότερο βαθμό από την ακαμψία της υποστήριξης. Υψηλές τιμές των μετακινήσεων u_d επιφέρουν υψηλές τιμές του συντελεστή αποτόνωσης λ_d .

Η ακτινική μετατόπιση u_d του τοιχώματος του ανυποστήρικτου τμήματος σε απόσταση x πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής, που βρίσκεται στη θέση $x=0$, μπορεί να γραφεί:

$$u_d = u_o + \alpha_d(u_\infty - u_o)$$

όπου το α_d δίνεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$\alpha_d = 1 - \left[\frac{mR}{mR + \xi d} \right]^2$$

Τα m και ξ είναι συντελεστές που εξαρτώνται από την καταστατική εξίσωση του εδάφους και το συντελεστή υπερφόρτισης $N_s = \sigma_o / c_u$. Ο συντελεστής ξ ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση:

$$\xi = \frac{u_\infty^e}{u_\infty}$$

Επομένως για τον υπολογισμό της σύγκλισης u_d πρέπει να καθοριστούν οι τιμές των u_o , u_∞ , m , και ξ

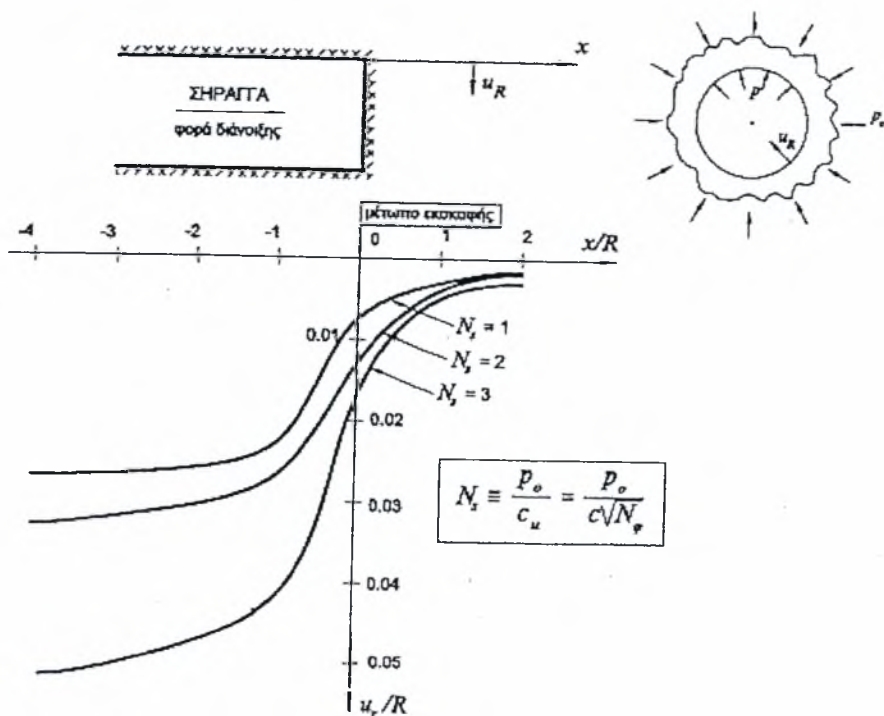
N_s	m	$u(0) / u_\infty$
≤ 1	0.75	0.27
2	0.80	0.30
4	0.85	0.33
6	0.90	0.35

Πίνακας 6.1

Ο ακόλουθος πίνακας δίνει τιμές της σύγκλισης του τοιχώματος της σήραγγας σε διάφορες αποστάσεις x από το μέτωπο:

x/R	$u(x)/u_\infty$ για			
	$N_s \leq 1$	$N_s = 2$	$N_s = 4$	$N_s = 6$
0	0.270	0.300	0.330	0.350
0.25	0.589	0.594	0.600	0.602
0.50	0.737	0.735	0.734	0.731
0.75	0.818	0.814	0.811	0.807
1.00	0.866	0.862	0.859	0.854
2.00	0.946	0.943	0.940	0.937

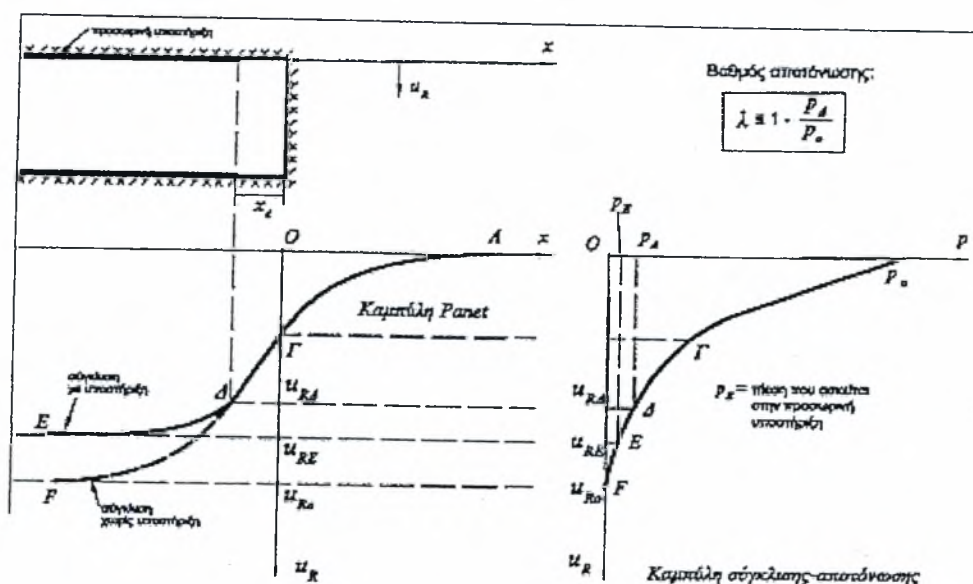
Πίνακας 6.2



Σχήμα 6.6: Τυπικές μορφές καμπύλων Panet κατά μήκος του άξονα της σήραγγας, για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει καμπύλες σύγκλισης σε διατομή σήραγγας που υποστηρίζεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η καμπύλη $x-U_R$ ακολουθεί τη διαδρομή ΑΓΔΕ και η τελική σύγκλιση URE είναι, όπως αναμενόταν, μικρότερη από την αντίστοιχη σύγκλιση της ανυποστήρικτης διατομής URO. Επίσης παρατηρούμε

την πίεση p που ασκείται στην προσωρινή υποστήριξη τόσο στην τελική κατάσταση ισορροπίας E όσο και κατά τη στιγμή τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης (κατάσταση Δ).



Σχήμα 6.7: Καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλες Papet σε σήραγγα υποστηριζόμενη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

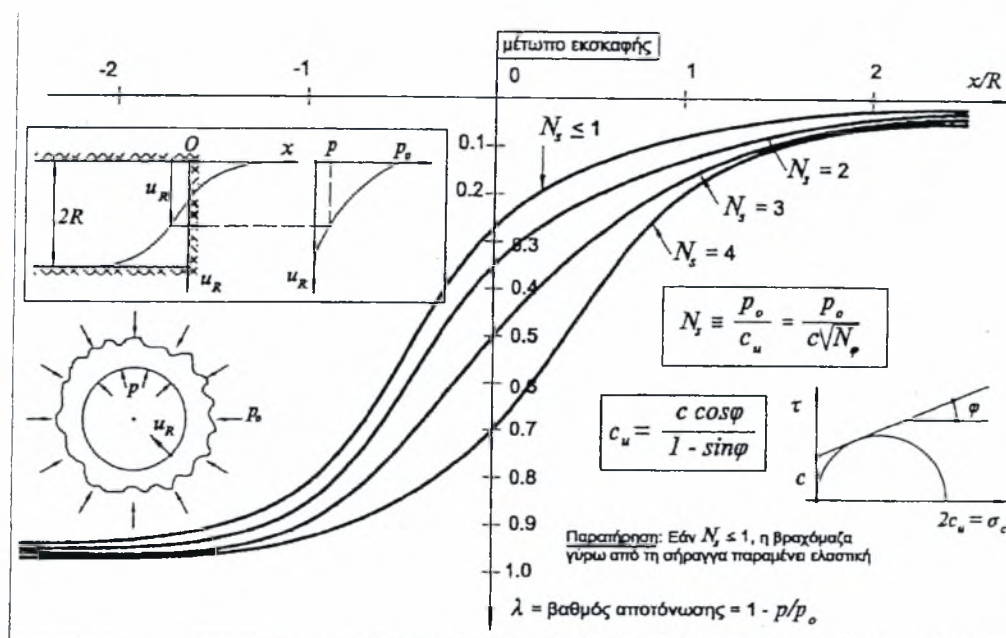
Ο πίνακας που ακολουθεί εκφράζει τη σχέση μεταξύ του συντελεστή αποτόνωσης λ και της θέσης τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης. Στην περίπτωση που για τον συντελεστή υπερφόρτισης ισχύει $N_s \leq 1$ το έδαφος γύρω από την σήραγγα παραμένει στην ελαστική περιοχή ακόμα και για πλήρη αποτόνωση της εσωτερικής πίεσης, δηλαδή $\lambda=1$. Αξίζει να τονιστεί ότι σε απόσταση ίση με τη διάμετρο της σήραγγας έχει επέλθει σχεδόν πλήρης αποτόνωση των εσωτερικών πιέσεων.

Απόσταση x από το μέτωπο της εκσκαφής	Συντελεστής αποτόνωσης λ για			
	$N_s \leq 1$	$N_s = 2$	$N_s = 3$	$N_s = 4$
0	0.27	0.39	0.52	0.67
$R/2$	0.69	0.80	0.84	0.89
R	0.82	0.86	0.88	0.92
$2R$	0.90	0.92	0.93	0.94

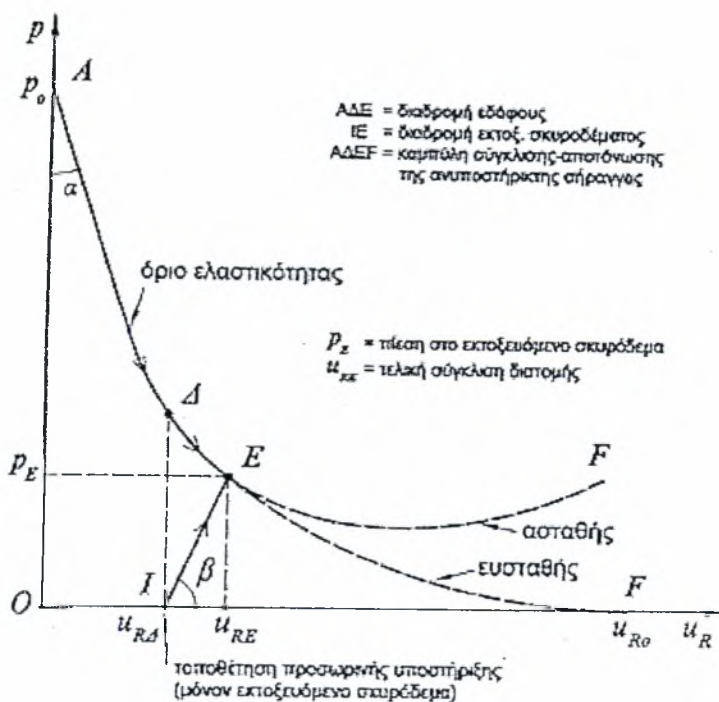
όπου R η ακτίνα της σήραγγας

Πίνακας 6.3:

Ο συνδυασμός των καμπύλων του Panet και της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης σήραγγας επιτρέπει την αρκετά ακριβή εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος σε κάθε θέση x του άξονα της σήραγγας.



Σχήμα 6.8: Τυπικές μορφές των καμπύλων Panet σε ανυποστήρικτη σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s



Σχήμα 6.9: Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Δύο είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες προσεγγίσεις της μεθόδου για τον υπολογισμό των εδαφικών μετακινήσεων:

1. Η πρώτη συνίσταται στην τοποθέτηση της επένδυσης μετά από προκαθορισμένη αποφόρτιση, δηλαδή επιλογή κατάλληλης τιμής του συντελεστή αποτόνωσης λ . Αυτό απαιτεί σημαντική κριτική ικανότητα. Οι αξονοσυμμετρικές αναλύσεις βοηθούν πολύ στην επιλογή του λ και η προκύπτουσα απώλεια όγκου εξαρτάται από την τιμή του λ που επιλέχθηκε. Στη διδιάστατη αυτή ανάλυση όταν το λ και ο παράγοντας μείωσης της φόρτισης β έχουν πριν την τοποθέτηση της επένδυσης δεδομένη τιμή λ_{rel} και β_{rel} , τότε τα βήματα της φόρτισης μπορούν να εξελιχθούν σε δύο μέρη: με $1 > \beta > \beta_{rel}$ για το μη υποστηριζόμενο τμήμα της σήραγγας και με $\beta_{rel} > \beta > 0$ για το υποστηριζόμενο τμήμα. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της απόστασης της υποστήριξης από το μέτωπο και υπολογίζονται πιο ρεαλιστικές τιμές για τη σύγκλιση της σήραγγας τις επιφανειακές καθιζήσεις και τα φορτία υποστήριξης.

Προκύπτουν όμως τρία προβλήματα κατά την διδιάστατη προσέγγιση της επίδρασης του μετώπου. Το πρώτο είναι η εκτίμηση του λ_{rel} . Το δεύτερο πρόβλημα είναι ότι η ευστάθεια του μετώπου δεν μπορεί να αποτιμηθεί και το τρίτο είναι η αξιοπιστία της βασικής θεώρησης της μεθόδου, ότι στο τμήμα της σήραγγας μακριά από το μέτωπο ικανοποιούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

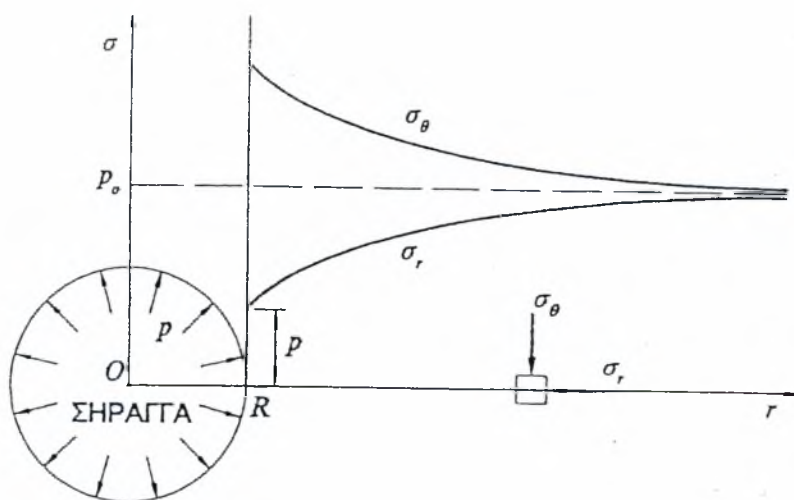
Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται μόνο όταν έχουμε μη υποστηριζόμενη σήραγγα σε γραμμικά ελαστικό μέσο και πρωτογενές πεδίο τάσεων με $K_0 = \nu / (1 - \nu)$. Σε διαφορετική περίπτωση η επίδραση της αξονικής συνιστώσας σ_z είναι μεγάλη και παύουν να υφίστανται οι συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για διάνοιξη σήραγγας σε υπερστερεοποιημένο έδαφος με $K_0 > 1$. Εξαιτίας των παραπάνω μια τριδιάστατη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο λ . Ακόμη και το ελαστικό τέλει πλαστικό μοντέλο Mohr-Coulomb, που είναι ανεξάρτητο της τάσης σ_2 , διαφοροποιείται σημαντικά σε περίπτωση διαρροής, γιατί σε μια τριδιάστατη θεώρηση μπορεί στο μέτωπο να ισχύει $\sigma_2 = \sigma_3$, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις παραδοχές της διδιάστατης ανάλυσης. Έχει διαπιστωθεί ότι οι επιφανειακές καθιζήσεις και η σύγκλιση, όπως υπολογίζονται από μια τριδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων, είναι δύσκολο να προσομοιωθούν με τη μέθοδο λ , χρησιμοποιώντας την ίδια τιμή του λ_{rel} .

Συμπερασματικά διδιάστατες προσεγγίσεις για την προσομοίωση της τρισδιάστατης συμπεριφοράς σηράγγων σε μικρό βάθος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συμπληρωματικές μελέτες και για σήραγγες όπου είναι γνωστές οι συνθήκες πεδίου ή υπάρχουν αποτελέσματα επί τόπου μετρήσεων. Σε διαφορετική περίπτωση χρησιμοποιούνται τρισδιάστατες αριθμητικές αναλύσεις με ανεπτυγμένα εδαφικά μοντέλα.

2. Η δεύτερη προσέγγιση συνίσταται στον προκαθορισμό της τομής της απώλειας όγκου, οπότε η επένδυση τοποθετείται μετά από τον κατάλληλο βαθμό αποφόρτισης, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή. Οι τάσεις που θα ασκηθούν στην επένδυση εξαρτώνται από την ως άνω τιμή.

Οποιαδήποτε προσέγγιση κι αν χρησιμοποιείται πρέπει οι τιμές των υπολογιζόμενων τάσεων στην επένδυση και της απώλειας όγκου να έχουν αντίστοιχες τιμές με τις μετρήσεις πεδίου για διάνοιξη σήραγγας σε παρόμοιες εδαφικές συνθήκες.

- Αξονοσυμμετρία: γραμμικό ελαστικό έδαφος κι επένδυση



Σχήμα 6.10: Κατανομή τάσεων γύρω από κυκλική οπή. Παραδοχή γραμμικώς ελαστικού εδάφους

Η πίεση υποστήριξης p_s και η ακτινική μετατόπιση u_R δίνονται από τις σχέσεις:

$$p_s = \frac{K_{SN}}{2G + K_{SN}} (1 - \lambda_d) \sigma_o$$

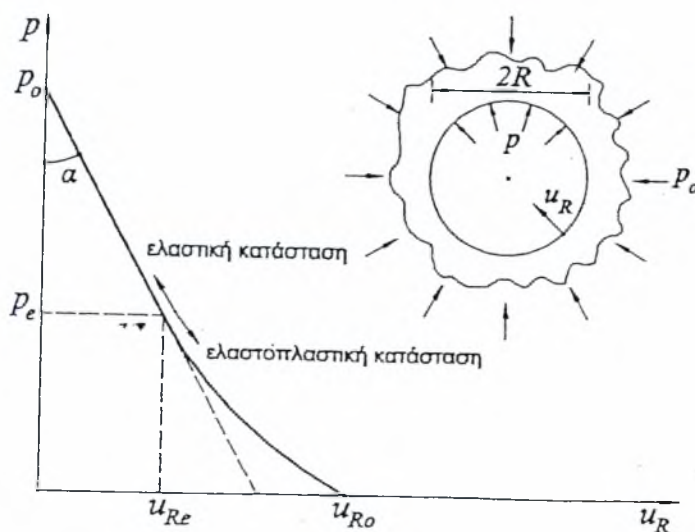
$$\frac{u_R}{R} = \frac{2G + \lambda_d K_{SN}}{2G + K_{SN}} \frac{\sigma_o}{2G}$$

όπου $2G = \frac{E}{1 + \nu}$ και

K_{SN} : το μέτρο ακαμψίας της επένδυσης

- Αξονοσυμμετρία: ελαστοπλαστικό έδαφος

Όταν ο συντελεστής λ προσεγγίζει τη μονάδα, το όριο της ζώνης ελαστικής απόκρισης φτάνει μέχρι τα τοιχώματα της σήραγγας με τιμή του συντελεστή αποτόνωσης λ_e . Όταν $\lambda > \lambda_e$ παρουσιάζεται πλαστική ζώνη και η καμπύλη σύγκλισης τείνει να γίνει μια ευθεία γραμμή λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 6.11: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης κυκλικής σήραγγας (ακτίνα R)

Η μετακίνηση στην ελαστική περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{c_2}{r}$$

Στην περίπτωση που δεν σχηματίζεται πλαστική ζώνη τότε η σύγκλιση στο όριο της σήραγγας δίνεται από την εξίσωση:

$$u_R = R(1+\nu)\frac{\sigma_o - \sigma_r}{E} = R\frac{\sigma_o - \sigma_r}{2G}$$

Στην περίπτωση που σχηματίζεται πλαστική ζώνη γύρω από τη σήραγγα, η μετακίνηση στο όριο της πλαστικής περιοχής ($r = r_p$) δίνεται από τη σχέση:

$$u_p = r_p \left(\frac{1+\nu}{k_p+1} \right) \frac{\sigma_o(k_p-1) + 2c\sqrt{k_p}}{E} = r_p \frac{\sigma_o(k_p-1) + \sigma_{cr}}{2G(k_p+1)}$$

- Αξονοσυμμετρία: μετακίνηση στην πλαστική περιοχή

Με την παραδοχή ότι στην πλαστική περιοχή η μετακίνηση γίνεται χωρίς μεταβολή του όγκου, η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_R = R - \sqrt{R^2 - u_p(2r_p - u_p)}$$

Η ακτίνα της πλαστικής ζώνης r_p δίνεται από τις σχέσεις:

$$\left(\frac{r_p}{R}\right)^{k_p-1} = \left(\frac{2}{k_p+1}\right) \frac{N_s + \frac{2}{k_p-1}}{N_s \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_o}\right) + \frac{2}{k_p-1}} \quad \text{για } \varphi \neq 0$$

$$r_p = R \cdot e^{\frac{1}{2} [N_s (1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_o}) - 1]} \quad \text{για } \varphi = 0$$

Πρέπει να αναφερθούμε και στις μεθόδους που μας δίνουν τη σύγκλιση u_d στο ανυποστήρικτο μήκος της σήραγγας για το οποίο απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο καθορισμός των u_0 , u_∞ και λ_d .

α) Μέθοδοι που βασίζονται στη σύγκλιση σήραγγας χωρίς υποστήριξη

- Ελαστική συμπεριφορά εδάφους

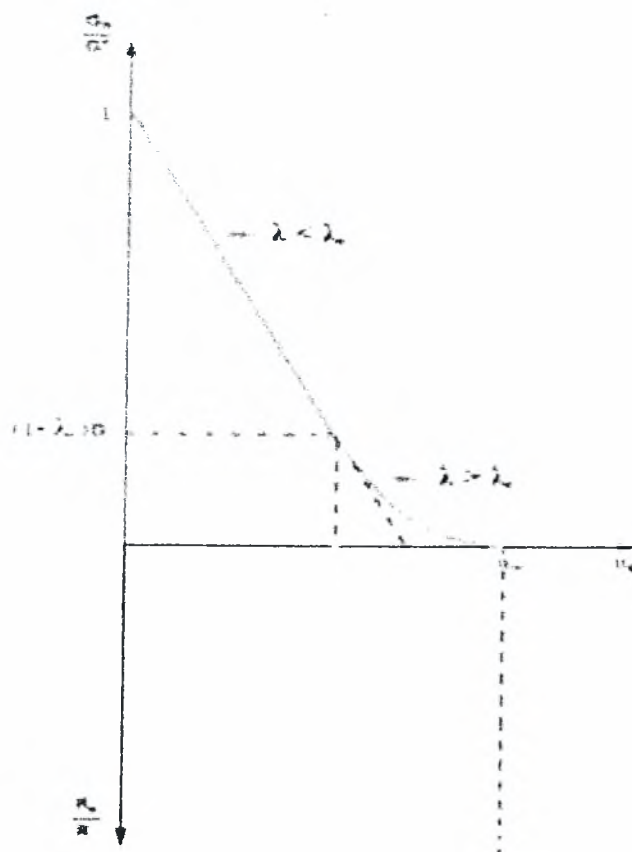
$$u_\infty = \frac{\sigma_0 R}{2G}$$

$$u_0 = a_0 u_\infty$$

όπου $a_0=0.25$ $m=0.75$ και $\xi=1$. Ο συντελεστής αποτόνωσης λ_d στη θέση τοποθέτησης της επένδυσης δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_d = 1 - 0.75 \left[\frac{0.75R}{0.75R + d} \right]^2$$

Είναι φανερό ότι για το μέτωπο της σήραγγας ($d=0$) ισχύει $\lambda=0.25$, ωστόσο η τιμή του εξαρτάται κατά μεγάλο βαθμό από το λόγο του Poisson. Μόνο για λόγους $d/R > 0.25$ ο συντελεστής αποτόνωσης δεν εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο του Poisson.

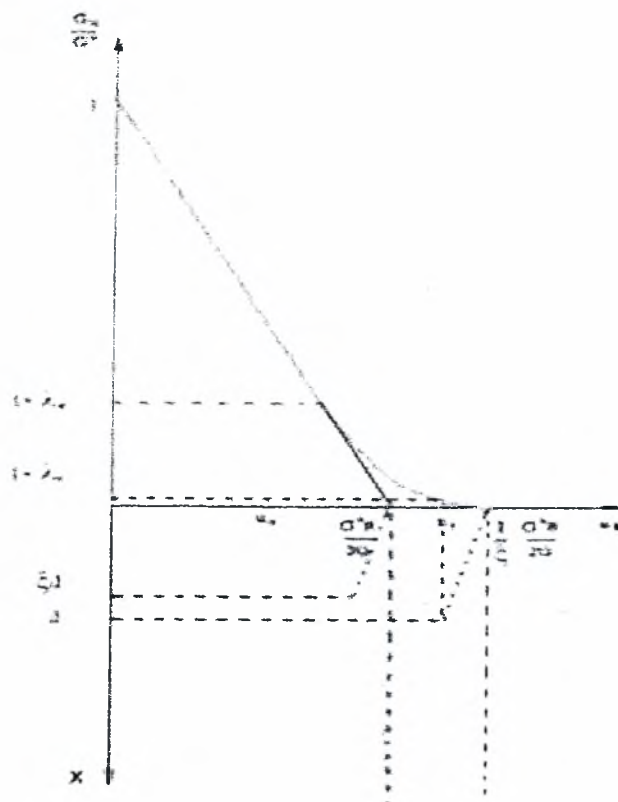


Σχήμα 6.12: Ακτινική μετατόπιση συναρτήσει του x για διάφορες τιμές του λόγου του Poisson

- Ελαστοπλαστική συμπεριφορά εδάφους

Η τιμή του u_0 καθορίζεται θεωρώντας συνθήκες όμοιες με ελαστικές, όπως προτάθηκε από τους Bernaud, Corbetta και Nguyen Minh. Αυτή η προσέγγιση συνίσταται στον καθορισμό της καμπύλης $UR = f(x)$ για ελαστοπλαστικές συνθήκες ως τροποποίηση της αντίστοιχης ελαστικής καμπύλης με κέντρο O και λόγο $1/\xi$. Η τελική ακτινική μετατόπιση της ανυποστήρικτης σήραγγας δίνεται από τη σχέση:

$$u_{\infty} = \frac{1}{\xi} \frac{\sigma_0 R}{2G}$$



Σχήμα 6.13: Τροποποίηση της καμπύλης $u(x)$ για ελαστοπλαστικές συνθήκες (Bernaud, Corbetta και Nguyen Minh)

Καθώς

$$a_d = 1 - \left[\frac{0,75R}{0,75R + \xi d} \right]^2$$

προκύπτει:

$$u_d = u_\infty \left[1 - 0,75 \left(\frac{0,75R}{0,75R + \xi d} \right)^2 \right]$$

β) Μέθοδοι που βασίζονται στη σύγκλιση σήραγγας με υποστήριξη

Αυτές οι μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι η δυσκαμψία της επένδυσης περιορίζει τη σύγκλιση μπροστά και πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής, ώστε ο συντελεστής λ_d , να έχει μικρότερη τιμή σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους. Οι Nguyen και Guo δυο παραμέτρους:

$$A = 1 - \frac{u_{\infty}}{u_{ns\infty}}$$

$$B = 1 - \frac{u_d}{u_{nsd}}$$

όπου $u_{ns\infty}$ και u_{nsd} είναι αντίστοιχα οι τιμές των u_{∞} και u_0 μιας ανυποστήρικτης σήραγγας. Έτσι προκύπτει η εξίσωση:

$$B = A [0,45 + 0,42A^2]$$

Οι παρακάτω πίνακες δίνουν διορθωτικούς συντελεστές για τις τιμές του k_d για ανυποστήρικτη σήραγγα σε ελαστικό έδαφος για διάφορες τιμές του λόγου d/R και του μέτρου δυσκαμψίας.

$$k_{sn} = \frac{K_{sn}}{2G}$$

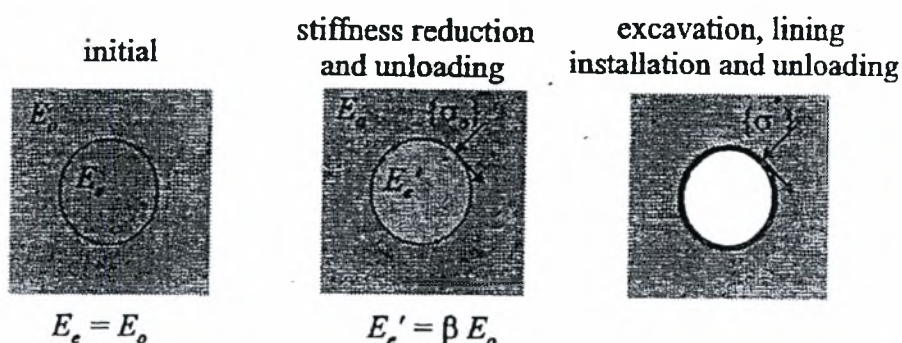
$k_{SN} \setminus d/R$	0.25	0.50	0.75	1.00	2.00
0.25	0.97	0.97	0.98	0.99	0.99
0.50	0.93	0.96	0.96	0.98	0.99
1.00	0.88	0.92	0.95	0.97	0.98
2.00	0.83	0.89	0.93	0.96	0.97
5.00	0.76	0.85	0.89	0.94	0.97
10.00	0.71	0.82	0.86	0.93	0.96
∞	0.69	0.81	0.85	0.92	0.96

Πίνακας 6.4

Για μη γραμμικό έδαφος πρέπει να χρησιμοποιηθούν επαναληπτικές μέθοδοι για τον καθορισμό του k_d με αφετηρία την τιμή που προκύπτει για ανυποστήρικτη σήραγγα.

6.2.1.3 Μέθοδος της προοδευτικής χαλάρωσης (Progressive Softening Method)

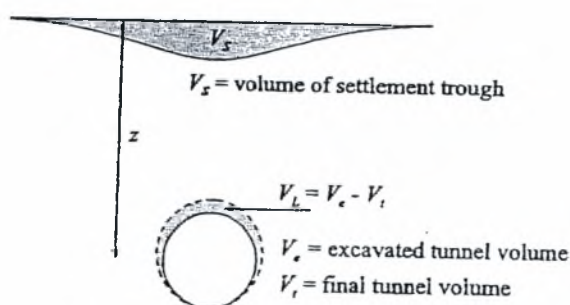
Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον Swoboda (1979) για την προσομοίωση της εκσκαφής σηράγγων με τη μέθοδο NATM και στηρίζεται στην προοδευτική μείωση της ακαμψίας του εδάφους που προκαλείται στην περιοχή εκσκαφής. Το μέτρο ελαστικότητας του Young μειώνεται κατά ένα συντελεστή εξασθένησης β , του οποίου η τιμή εξαρτάται από τη θέση του μετώπου εκσκαφής. Όπως και στη μέθοδο λ η επένδυση τοποθετείται πριν την ολοκλήρωση της προσομοίωσης της εκσκαφής.



Σχήμα 6.14: Μέθοδος progressive softening

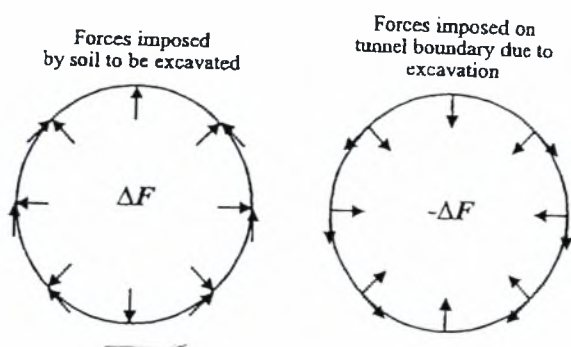
6.2.1.4 Μέθοδος ελέγχου της απώλειας όγκου (volume loss)

Η μέθοδος αυτή περιγράφηκε από τον Addenbrook και τους συνεργάτες του (1997). Η διαφορά της από τη μέθοδο λ έγκειται στο ότι ο μελετητής προκαθορίζει το μέγεθος της απώλειας όγκου σε σχέση με την εκσκαφή, δηλαδή πριν την τοποθέτηση της επένδυσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται για την πρόβλεψη των καθιζήσεων σε εδάφη που μπορεί να γίνει ασφαλής πρόβλεψη της τιμής της απώλειας όγκου.



Σχήμα 6.15: Μέθοδος volume loss

Στη μέθοδο λ η δύναμη που ασκείται στο όριο της σήραγγας μειώνεται σταδιακά με την πάροδο της εκσκαφής. Εναλλακτικά, το πρόγραμμα μπορεί να υπολογίζει την τιμή F_0 , δηλαδή την ισοδύναμη κομβική δύναμη που αναπαριστά την ασκούμενη πίεση στο όριο της σήραγγας από το προς εκσκαφή έδαφος. Η δύναμη αυτή είναι γραμμικά κατανεμημένη στα n βήματα της εκσκαφής ώστε $\Delta F = F_0/n$. Το ίσο και αντίθετο διάνυσμα $-\Delta F$ εφαρμόζεται στα όρια της εκσκαφής σε κάθε ένα από τα n βήματα. Η απώλεια όγκου που προκύπτει σε κάθε βήμα από τη φόρτιση στα όρια της σήραγγας παρακολουθείται και η επένδυση κατασκευάζεται σε εκείνο το βήμα στο οποίο επιτυγχάνεται η επιθυμητή απώλεια όγκου. Μετά την κατασκευή της επένδυσης η δύναμη $-\Delta F$ συνεχίζει να εφαρμόζεται εισάγοντας έτσι μια αρχική τάση στην επένδυση. Στη συνέχεια της διαδικασίας, περαιτέρω απώλεια όγκου μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλογα με τη δυσκαμψία της επένδυσης. Κρίνεται σκόπιμο η επένδυση να τοποθετηθεί για μικρότερη τιμή της απώλειας όγκου ώστε με το τέλος της εκσκαφής να επιτευχθεί η επιθυμητή απώλεια όγκου.



Σχήμα 6.16: Προσομοίωση της εκσκαφής εναλλακτικά της μεθόδου λ

6.2.1.5 Μέθοδος εγκάρσιας-διαμήκουσ ανάλυσης

Οι Finno και Clough (1985) διεξήγαγαν αναλύσεις επίπεδης παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση της σήραγγας προκειμένου να υπολογίσουν τις μεταβολές των τάσεων και τις εδαφικές μετακινήσεις μπροστά από το μέτωπο της εκσκαφής. Στην εγκάρσια διεύθυνση οι αλλαγές των τάσεων εφαρμόστηκαν πριν από την εκσκαφή της σήραγγας προκειμένου να προκύψουν εδαφικές μετακινήσεις όμοιες με αυτές της διαμήκουσ ανάλυσης. Στη συνέχεια η κατασκευή προσομοιώθηκε με τη μέθοδο Gar. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση στη διαμήκη διεύθυνση, η σήραγγα προσομοιώνεται με σπή απείρου μήκους σε κάποιο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Οι Rowe και Lee (1992) συνέκριναν τη μορφή των κατανομών των διαμήκων καθιζήσεων που προέκυψαν από μια τέτοια ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης με τα αποτελέσματα τριδιάστατης ανάλυσης και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος υπερεκτιμά σε μεγάλο βαθμό τις εδαφικές μετακινήσεις αλλά και την έκταση της πλαστικής ζώνης.

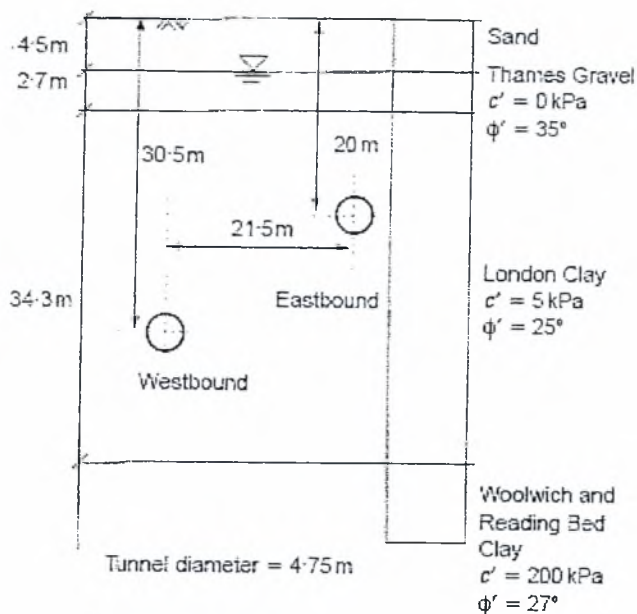
6.2.1.6 Συμπεράσματα από παλαιότερες μελέτες ερευνητών

Ο Addenbrooke και οι συνεργάτες του (1997) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελέγχου της απώλειας όγκου, εκτέλεσαν μια σειρά δισδιάστατων αναλύσεων διάνοιξης σηράγγων πάνω σε διαφορετικά εδαφικά ομοιώματα διαρροής. Τα ομοιώματα είναι τα εξής:

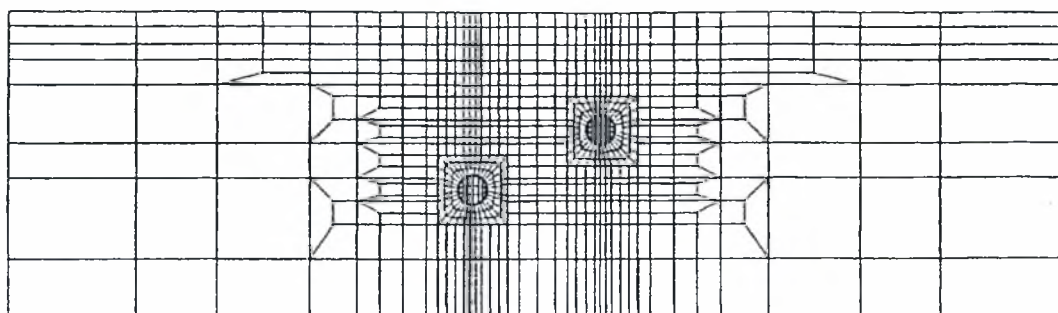
1. Ισότροπο γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό
2. Ανισότροπο γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό
3. Ισότροπο μη γραμμικό ελαστικό βασισμένο στη θεωρία του Jardine (1986). Το μέτρο διάτμησης μεταβάλλεται με την εκτροπική παραμόρφωση και τη μέση ενεργή τάση ενώ το μέτρο ελαστικότητας με την ογκομετρική παραμόρφωση και τη μέση ενεργή τάση (J4).
4. Ανισότροπο μη γραμμικό ελαστικό βασισμένο στη θεώρηση του Jardine. Το μέτρο διάτμησης μεταβάλλεται με την εκτροπική παραμόρφωση και τη μέση ενεργή τάση ενώ το μέτρο ελαστικότητας με την ογκομετρική παραμόρφωση και τη μέση ενεργή τάση (AJ4).
5. Ισότροπο μη γραμμικό ελαστικό με τα μέτρα δυσκαμψίας και ελαστικότητας να εξαρτώνται από την εκτροπική παραμόρφωση και τη μέση ενεργή τάση (L4).

Σε όλα τα ομοιώματα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mohr-Coulomb.

Ο Addenbrooke και οι συνεργάτες του (1997) προσομοίωσαν τη κατασκευή δύο σηράγγων επέκτασης της γραμμής Jubilee κάτω από το St James' Park του Λονδίνου όπου ισχύουν συνθήκες ελεύθερου πεδίου. Το έδαφος της περιοχής αποτελείται από άργιλο του Λονδίνου κάτω από ένα επιφανειακό στρώμα χαλικώδους εδάφους. Ο συντελεστής ωθήσεων ηρεμίας θεωρήθηκε $K_0 = 1.5$. Στοιχεία θα δοθούν μόνο για μία από τις δυο σήραγγες η οποία βρίσκεται σε βάθος $z = 30.5\text{m}$ (Westbound).

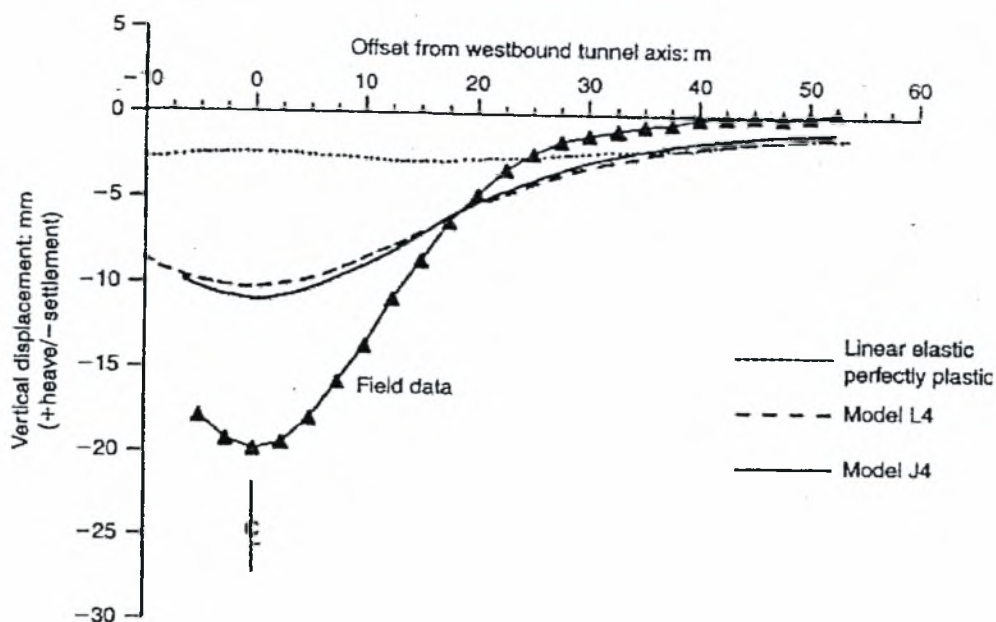


Σχήμα 6.17: Κατασκευή δύο σηράγγων για την επέκταση της γραμμής Jubilee κάτω από το St James' Park του Λονδίνου



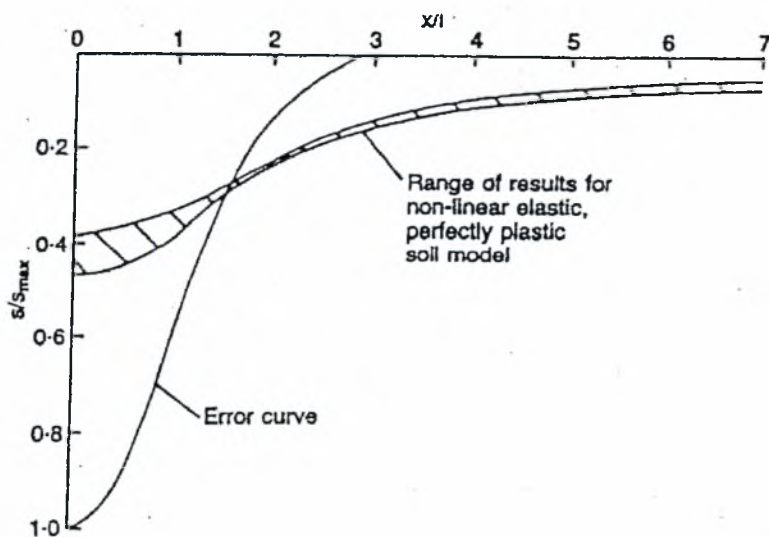
Σχήμα 6.18: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση των σηράγγων επέκτασης της γραμμής Jubilee κάτω από το St James' Park του Λονδίνου

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται οι καμπύλες των επιφανειακών καθιζήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις πεδίου και από τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Τα δυο μη γραμμικά ομοιώματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά, όμως προβλέπουν ευρύτερες κατανομές καθιζήσεων και μέγιστες τιμές μικρότερες από τις πραγματικές, κάτι που οφείλεται στη μέθοδο ελέγχου της απώλειας όγκου. Επιπλέον η μελέτη του Addenbrooke απέδειξε ότι το γραμμικό μοντέλο είναι ακατάλληλο για τη διεξαγωγή προβλέψεων.



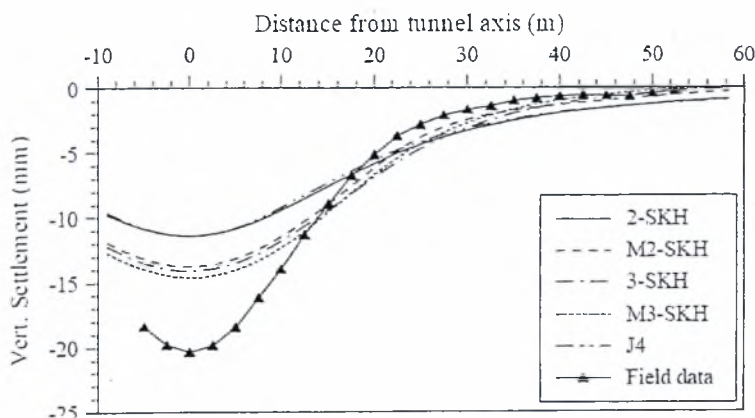
Σχήμα 6.19: Κατανομές των επιφανειακών καθιζήσεων με τη χρήση διαφορετικών ισότροπων εδαφικών μοντέλων (L4 και J4: Μη γραμμικά ελαστικά – τέλεια πλαστικά κατά Addenbrooke 1997)

Το γεγονός ότι οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων που προϋποθέτουν μεγάλες τιμές του K_0 , προβλέπουν ευρύτερες κατανομές καθιζήσεων, αναφέρεται στη βιβλιογραφία από πλήθος μελετητών. Ο Gunn (1993) εφάρμοσε μη γραμμικό μοντέλο διαρροής με $K_0=1$ κι αποδείχτηκε πως η κατανομή που προέβλεπε ήταν ευρύτερη από αυτή του Gauss.



Σχήμα 6.20: Κατανομές των επιφανειακών καθιζήσεων για μη γραμμικά ελαστικά – τέλεια πλαστικά μοντέλα (διαφορετικών αρχικών παραμέτρων) (Gunn, 1993)

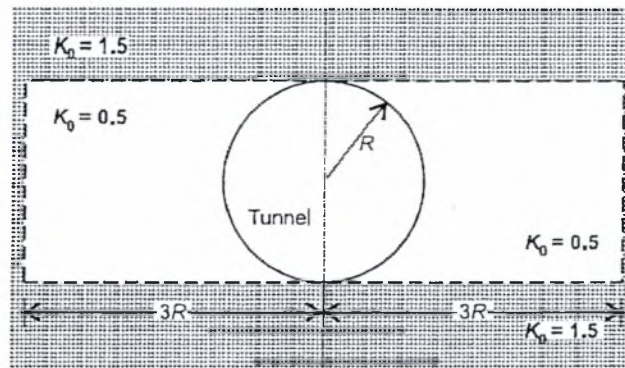
Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε και η Γραμματικοπούλου (2004) η οποία υιοθέτησε μοντέλα κινηματικών επιφανειών αστοχίας.



Σχήμα 6.21: Κατανομές των επιφανειακών καθιζήσεων με τη χρήση διαφορετικών κινηματικών επιφανειών αστοχίας (Γραμματικοπούλου, 2004)

Ο Gens (1995) υπογράμμισε τη σημασία της διακύμανσης του K_0 στην πρόβλεψη επιφανειακών καθιζήσεων που προκαλούνται από την κατασκευή σηράγγων. Ο Addenbrooke συνέκρινε αναλύσεις που έγιναν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για $1.5 \geq K_0 \geq 0.5$, με μετρήσεις πεδίου και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι κατανομές καθιζήσεων για μικρές τιμές του K_0 πλησιάζουν περισσότερο τη μορφή των καθιζήσεων που προκύπτει από τα στοιχεία πεδίου.

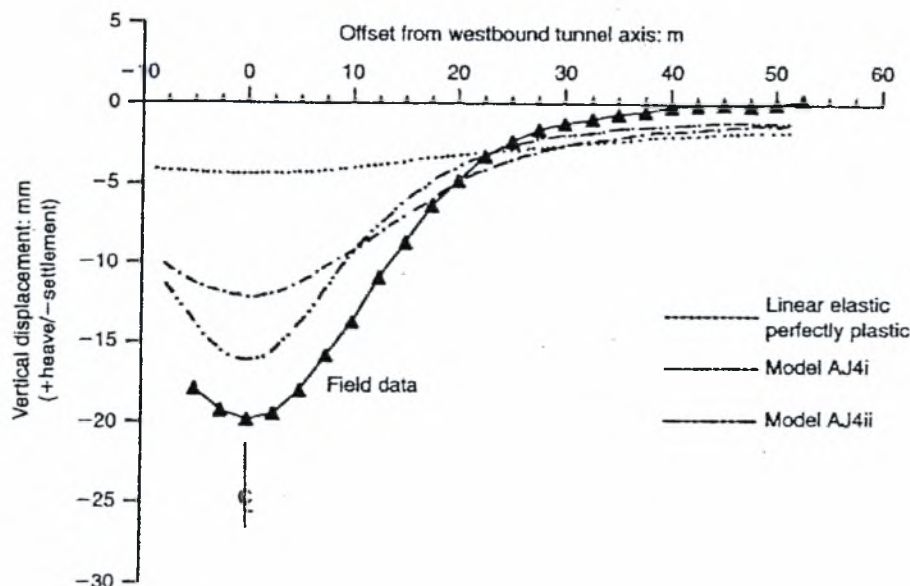
Ο Addenbrooke έκανε αξονοσυμμετρικές αναλύσεις προκειμένου να μελετήσει τις προκύπτουσες, από τη διάνοιξη, συνθήκες. Η έρευνα έδειξε ότι γύρω από τη σήραγγα παρατηρείται μείωση των ακτινικών τάσεων και αύξηση των εφαπτομενικών τάσεων. Σε ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης η μεταβολή των τάσεων απεικονίζεται με ζώνη μειωμένου K_0 γύρω από τη σήραγγα. Ένα ακόμα συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η πλευρική επέκταση της ζώνης δεν επηρεάζει τον υπολογισμό των επιφανειακών καθιζήσεων.



Σχήμα 6.22: Ζώνη μειωμένου K_0 γύρω από τη σήραγγα (Potts και Zdravković, 2001)

Με στόχο τη βελτίωση της πρόβλεψης των κατανομών των επιφανειακών καθιζήσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, πολλοί μελετητές όπως οι Lee και Rowe (1989) αλλά και ο Simpson (1996) εισήγαγαν ανισότροπα εδαφικά μοντέλα στις αναλύσεις τους.

Ο Addenbrooke συμπεριέλαβε την ανισοτροπία του εδάφους στο 2° και στο 4° από τα μοντέλα διαρροής που αναπτύχθηκαν παραπάνω και πραγματοποίησε δυο αναλύσεις. Η πρώτη υιοθέτησε ανισότροπους λόγους $E_v'/E_h' = 0.625$ και $G_{vh}'/E_v' = 0.44$, όπως παρατηρήθηκαν από μετρήσεις στο πεδίο ενώ η δεύτερη μείωσε το λόγο G_{vh}'/E_v' στο 0.20 κάνοντας την άργιλο πολύ ευαίσθητη σε διάτμηση.



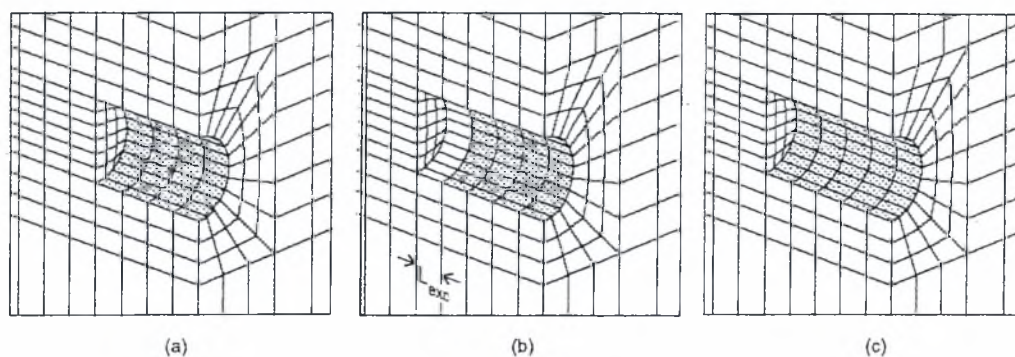
Σχήμα 6.23: Κατανομές των επιφανειακών καθιζήσεων με τη χρήση διαφορετικών ανισότροπων εδαφικών μοντέλων (AJ4i και AJ4ii: Ανισότροπα μη γραμμικά ελαστικά – τέλεια πλαστικά κατά Addenbrooke 1997)

Το παραπάνω γράφημα δίνει τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Μετά από σύγκριση με το σχήμα 7.19 φαίνεται ότι μόνο η δεύτερη ομάδα παραμέτρων που αναφέρεται ως AJ4ii βελτίωσε τη μορφή της κατανομής των καθιζήσεων κι έδωσε καμπύλη πλησιέστερη σε αυτή που προέκυψε από τις μετρήσεις του πεδίου. Όμως ο Addenbrooke τόνισε ότι η χαμηλή τιμή του G_{vh} δεν αντιπροσώπευε την άργιλο του Λονδίνου. Επομένως συμπέρανε ότι η βελτίωση της πρόβλεψης των καθιζήσεων που προέκυψε με ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης και για υψηλές τιμές του K_0 , επιτεύχθηκε με χρήση μη ρεαλιστικών τιμών για την δυσκαμψία του εδάφους.

6.2.2 Ανάλυση σε τρεις διαστάσεις

Αν και η δισδιάστατη προσέγγιση της μηχανικής συμπεριφοράς των σηράγγων αποτελεί την πλέον συνηθισμένη πρακτική, υπάρχουν κατασκευές, όπως οι συνδέσεις σηράγγων και τα στόμια, των οποίων η ανάλυση είναι απαραίτητο να γίνει στις τρεις διαστάσεις. Εκτός αυτών ακόμη και οι σήραγγες που κατά τη φάση λειτουργίας τους μπορούν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά με δισδιάστατα μοντέλα, κατά τη φάση κατασκευής τους απαιτούν τριδιάστατη προσέγγιση για μεγιστοποίηση της ακρίβειας των προβλεπόμενων αποτελεσμάτων.

Η ανάγκη ανάλυσης των παραπάνω κατασκευών ως τριδιάστατων έδωσε ώθηση για ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού που σε συνδυασμό με ταχύτερα υπολογιστικά συστήματα, δίνει τη δυνατότητα για άμεσο υπολογισμό της απόκρισης της σήραγγας κι επιτρέπει την εποπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων με σύγχρονες γραφικές μεθόδους. Μια από αυτές τις μεθόδους που εφαρμόζεται στην τρισδιάστατη ανάλυση είναι η προσέγγιση “βήμα προς βήμα” (“step by step”), που προτάθηκε από τους Katzenbach και Breth και λειτουργεί όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.24: Προσομοίωση της εκσκαφής σήραγγας με τη μέθοδο “step by step”.

- a) Η σήραγγα έχει ήδη διανοιχτεί σε μήκος τεσσάρων στοιχείων (στη διαμήκη διεύθυνση) και έχει τοποθετηθεί η επένδυση (στο ίδιο μήκος)
- b) Στο επόμενο βήμα ανασκάπτεται το επόμενο τμήμα (η σήραγγα δηλαδή προχωρά κατά ένα στοιχείο) το μήκος του οποίου στη συγκεκριμένη περίπτωση αντιστοιχεί με το μήκος εκσκαφής L_{exc}
- c) Κατόπιν τοποθετείται επένδυση και στο νέο αυτό ανασκαμμένο μήκος. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η σήραγγα προχωρήσει στην επιθυμητή θέση

Σε μια συγκεκριμένη απόσταση πίσω από το μέτωπο οι άμεσες καθιζήσεις δεν θα πρέπει να αυξάνουν με την περαιτέρω προώθηση της ασπίδας. Οι συνθήκες αυτές αναφέρονται ως “συνθήκες σταθερής κατάστασης” (“steady state”). Οι Katzenbach και Breth παρουσίασαν τα αποτελέσματα τρισδιάστατης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για τη διάνοιξη σήραγγας στην άργιλο της Φρανκφούρτης με τη μέθοδο NATM. Το έδαφος αναπαραστάθηκε με μη γραμμικό ελαστικό μοντέλο και η εκσκαφή προσομοιώθηκε με προσέγγιση «βήμα προς βήμα» και θεωρήθηκε $K_0=0.8$. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδωσαν πολύ σημαντικά στοιχεία για την τρισδιάστατη συμπεριφορά του εδάφους και διαπιστώθηκε η σημασία της άμεσης επένδυσης του δακτυλίου στην εξασφάλιση της σταθερότητας του μετώπου της εκσκαφής.

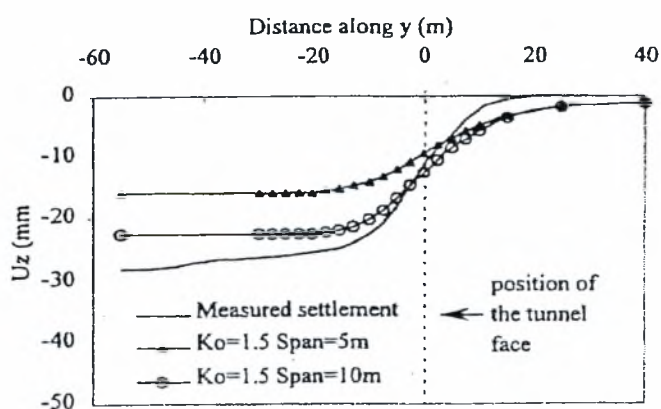
Author	Material	K_0	D [m]	z_0 [m]	Mesh or Grid width [m]	Mesh or Grid length [m]	Tunnel length [m]	Tunnel L_{exc} [m]	Program	referred on Page
Katzenbach & Breth (1981)	non-lin. elastic	0.8	6.7	15.2	35.0 5.2D	59.0 8.8D		varies*		49
Desai <i>et al.</i> (1996)	non-lin. el. perf. pl. (SDMCC)	1.0	8.0	25.0	40.0 5.0D	50.0 6.3D	40.0 5.0D	2.0*	CRISP	49
Tang <i>et al.</i> (2000)	elastic perf. pl. transv. anisotr.	1.5	8.6	25.0	80.0 9.5D	95.0 11.1D	67.5* 7.8D	5.0, 10.0	Abaqus	50
Vermeer <i>et al.</i> (2002)	elastic perf. pl.	0.66	8.0	2.0	55.0 6.9D	100.0 12.5D	80.0 10D	2.0	Flaxis	50, 236
Lee & Rowe (1991)	elastic perf. pl. transv. anisotr.	0.85	2.5	8	19.5 7.8D	37.0 15D	20.0 8D	N/A (gap)	FEM3D	52
Augarde <i>et al.</i> (1998), Burd <i>et al.</i> (2000)	non-lin. el. pl.	1.0	5.0	10.0	2×60.0 12.0D	60.0* 12.0D	60.0 12.0D	N/A (V _L)	OXFEM	52 70
Guedes & Santos Pereira (2000)	elastic	0.5, 1.0	6.0	9.0	60.0 10D	54.0 9.0D	28.0* 4.5D	2.0	Abaqus	53
Doležalová (2002)	lin. el. perf. pl./ non-lin el. perf. pl	0.5 - 1.5	3.76 ×2.75	15.7	22.0 6.7D	51.0 15.5D	36.0 10.9D	3.5	CRISP	53
Lee & Ng (2002)	elastic perf. pl.	0.5, 1.5	9.0	22.5	75.0 8.3D	101.25 11.25D	77.0* 5.5D	2.25	Abaqus	53
Komiya <i>et al.</i> (1999)	elastic perf. pl. anisotr.	0.55	3.7	33.0						54
Dias <i>et al.</i> (2000)	elastic perf. pl.	0.36-0.43	9.8	25.0			45.0 4.6D	0.75	Flac3D	54

*: Not specified in text of publication. Given value was determined from plots, graph etc.

Πίνακας 6.5: Πληροφορίες για τις τρισδιάστατες αναλύσεις που θα αναφερθούν σε αυτό το κεφάλαιο

Η προσέγγιση «βήμα προς βήμα» χρησιμοποιήθηκε από πολλούς ερευνητές για την προσομοίωση της εκσκαφής σηράγγων, κυρίως όταν γίνονται με τη μέθοδο NATM. Ο Dasari και οι συνεργάτες του (1996) προσομοίωσαν με τη μέθοδο αυτή, την εκσκαφή πιλοτικής σήραγγας στην περιοχή του Heathrow, η οποία διανοίχτηκε σε δυο φάσεις (πρώτα το επάνω τμήμα και στη συνέχεια το κάτω). Ωστόσο για μη γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό εδαφικό μοντέλο και $K_0=1$, η κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων που προέκυψε ήταν πολύ ευρύτερη από αυτή των μετρήσεων του πεδίου. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι ο Dasari παρουσίασε αποτελέσματα μόνο για την εγκάρσια, προς τον άξονα της σήραγγας, διεύθυνση, αν και ανέφεραν ότι οι «συνθήκες σταθερής κατάστασης» συναντήθηκαν σε απόσταση δυο διαμέτρων (2D) πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

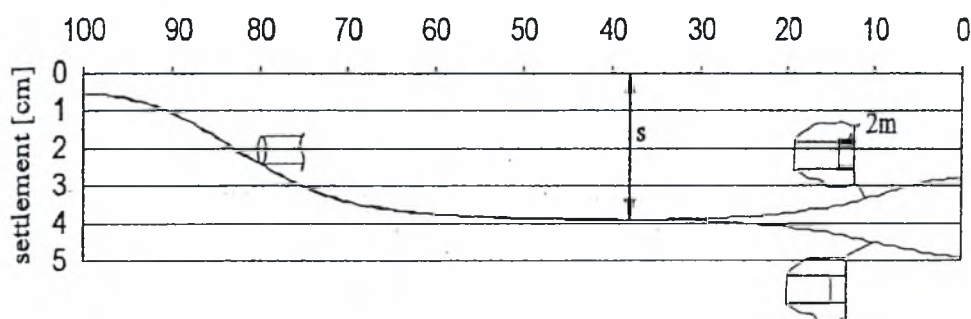
Ο Tang και οι συνεργάτες του (2000) μελέτησαν την επίδραση του μήκους L_{exc} στη μορφή της κατανομής των εγκάρσιων και διαμήκων καθιζήσεων. Στην ανάλυσή τους προσομοίωσαν σήραγγα όμοια με αυτή του Dasari με $K_0=1.5$ και για εγκάρσια ανισότροπο, γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο. Η ανάλυση έγινε για μήκη εκσκαφής $L_{exc}=5m$ και $L_{exc}=10m$, αλλά όπως και προηγουμένως, η κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων που προέκυψε, είχε πολύ μεγάλο εύρος. Οι κατανομές των διαμήκων καθιζήσεων δίνονται στο παρακάτω σχήμα. Από το γράφημα διαπιστώνουμε, ότι και για τα δυο μήκη εκσκαφής (span), η καμπύλη των διαμήκων καθιζήσεων γίνεται οριζόντια, δηλαδή σταθεροποιείται, σε ένα μήκος 20 μέτρων πίσω από το μέτωπο εκσκαφής, φανερώνοντας «συνθήκες σταθερής κατάστασης» σε αυτό το όριο.



Σχήμα 6.25: Κατανομές διαμήκων καθιζήσεων για διαφορετικά μήκη εκσκαφής L_{exc} (εδώ αναφέρονται ως “span” και οι καθιζήσεις ως u_z) (Tan και συνεργάτες, 2000)

Επισημαίνεται ότι ο Tang δεν δημοσίευσε περισσότερες πληροφορίες για την αρχική φάση κατασκευής της σήραγγας όπως αυτή προσομοιώθηκε στην ανάλυσή του.

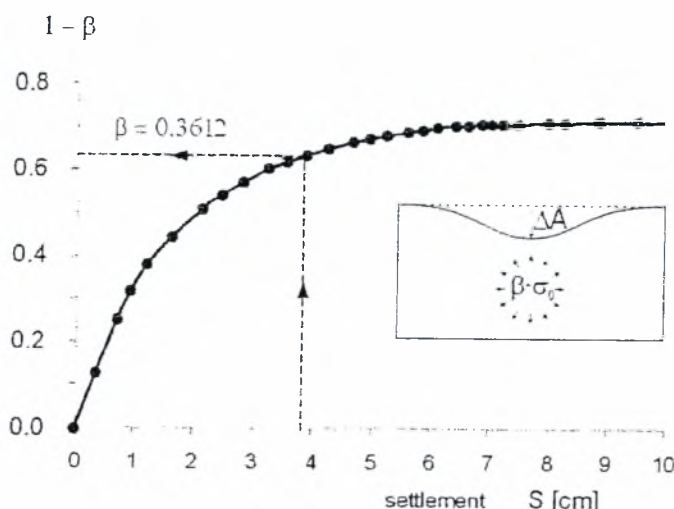
Ο Vermeer και οι συνεργάτες του (2002) προσομοίωσαν, με τη μέθοδο «βήμα προς βήμα», την εκσκαφή σήραγγας (με διάνοιξη ολικού και μερικού μετώπου) σε γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο εδάφους με $K_0=0.67$ και $L_{exc}=2m$, δίνοντας μεγάλη σημασία στο πρώτο βήμα της εκσκαφής. Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τη μορφή των διαμήκων καθιζήσεων που προέκυψαν από την ανάλυση του Vermeer και των συνεργατών του για εκσκαφή ολικού μετώπου κυκλικής σήραγγας διαμέτρου $D=8m$.



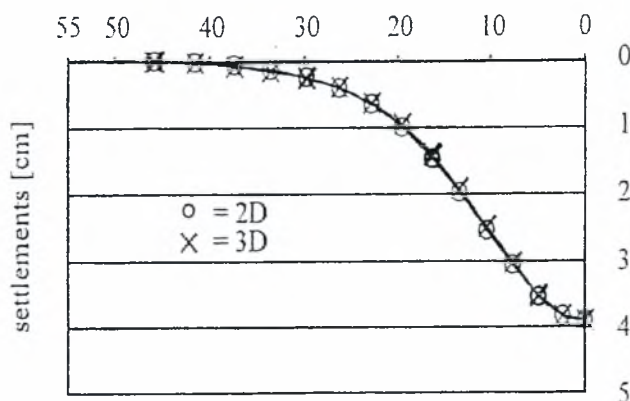
Σχήμα 6.26: Κατανομές διαμήκων καθιζήσεων για διαφορετικό πρώτο βήμα εκσκαφής (Vermeer και συνεργάτες 2002)

Οι δυο καμπύλες του γραφήματος αντιστοιχούν σε διαφορετικά αρχικά βήματα εκσκαφής. Η κατώτερη καμπύλη αναπαριστά ανάλυση στην οποία η σήραγγα θεωρήθηκε ανυποστήρικτη στην πρώτη φάση εκσκαφής ενώ η ανώτερη καμπύλη αφορά σήραγγα της οποίας η εκσκαφή υποστηρίζεται από την αρχή. Ο Vermeer κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η πρώτη φάση της εκσκαφής επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της ανάλυσης και ότι οι «συνθήκες σταθερής κατάστασης» εμφανίζονται σε συγκεκριμένη απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αναπτύχθηκαν σε απόσταση 40 μέτρων πίσω από το μέτωπο της σήραγγας.

Με σύγκριση των καμπύλων εγκάρσιων καθιζήσεων που προέκυψαν από την τρισδιάστατη ανάλυση και την ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης με τη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης που δίνεται στα παρακάτω σχήματα, ο Vermeer και οι συνεργάτες του κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι προκύπτουσες καμπύλες εγκάρσιων καθιζήσεων ήταν όμοιες.

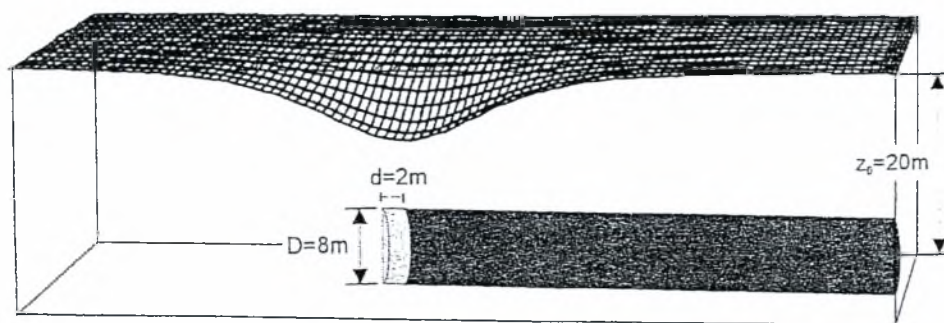


Σχήμα 6.27: Δισδιάστατη ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης με τη μέθοδο σύγκλισης αποτόνωσης



Σχήμα 6.28: Σύγκριση των καμπυλών εγκάρσιων καθιζήσεων που προέκυψαν από την τρισδιάστατη ανάλυση και τη δισδιάστατη ανάλυση επίπεδης παραμόρφωση

Με στόχο την αποφυγή χρονοβόρων υπολογισμών, οι μελετητές πρότειναν τη μέθοδο της γρήγορης ανάλυσης των καθιζήσεων (fast settlement analysis). Πλέον, η ανάλυση «βήμα προς βήμα» περιορίζεται σε δυο μόνο στάδια. Στην πρώτη φάση κατασκευάζεται η σήραγγα έως κάποιο συγκεκριμένο μήκος, στο οποίο είναι δυνατόν να αναπτυχθούν «συνθήκες σταθερής κατάστασης». Μετά την τοποθέτηση της επένδυσης οι μετατοπίσεις μηδενίζονται. Στη δεύτερη φάση σε ένα μόνο βήμα προσομοιώνεται η εκσκαφή μήκους L_{exc} χωρίς υποστήριξη, που έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία κρατήρα καθιζήσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



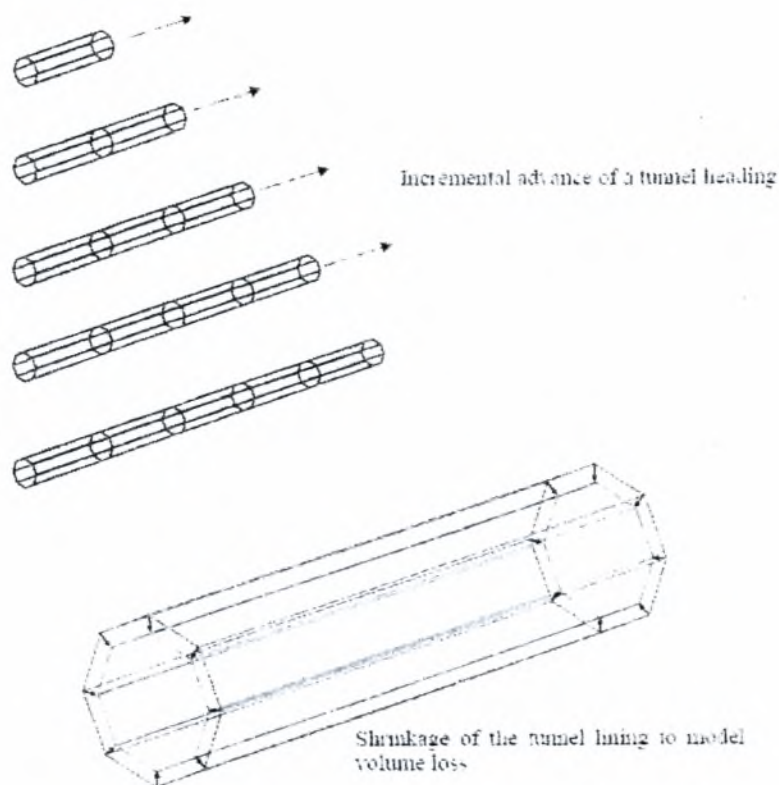
Σχήμα 6.29: Δημιουργία κρατήρα καθιζήσεων στη δεύτερη φάση της ανάλυσης

Ο όγκος του κρατήρα αντιστοιχεί στην απώλεια όγκου ενός βήματος εκσκαφής το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης με τη μέθοδο σύγκλισης-αποτόνωσης. Όπως φαίνεται η προαναφερθείσα προσέγγιση μειώνει κατά πολύ το χρόνο υπολογισμού σε σχέση με την τρισδιάστατη ανάλυση “βήμα προς βήμα”. Η προσέγγιση της γρήγορης ανάλυσης των καθιζήσεων μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (greenfield), όμως σε σύνθετες περιπτώσεις όπως η αλληλεπίδραση σήραγγας-υπερκείμενης κατασκευής η ικανότητά της αμφισβητείται.

Πολλοί ερευνητές πρότειναν τη χρήση μεθόδων που εφαρμόζονται στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των βημάτων της τριδιάστατης ανάλυσης. Οι Lee και Rowe (1981) παρουσίασαν τα αποτελέσματα της μελέτης τους σε αγωγό αποχέτευσης $D=2.5\text{m}$ στον κόλπο Thunder στο Ontario του Καναδά. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος gap, το έδαφος προσομοιώθηκε με εγκάρσια ανισότροπο γραμμικό ελαστικό-τέλεια πλαστικό μοντέλο και με $K_0=0.85$. Η ακτινική απώλεια όγκου καθορίστηκε από τη μηχανή διάνοιξης, ενώ η πιθανή απώλεια στο μέτωπο (face loss) εκτιμήθηκε από την τρισδιάστατη ανάλυση, αφού επιτράπηκε η πλήρης αποτόνωση των αξονικών τάσεων στο μέτωπο. Η σήραγγα διανοίχτηκε σε όλο το μήκος της και η επένδυση τοποθετήθηκε μετά το κλείσιμο του κενού. Στη διαμήκη διεύθυνση η κατανομή των καθιζήσεων που προέβλεψαν ήταν πολύ κοντά στις μετρήσεις πεδίου, ενώ η κατανομή των εγκάρσιων καθιζήσεων ήταν ελαφρώς ευρύτερη από αυτή που προέκυψε από τα δεδομένα του πεδίου με λόγο των αντίστοιχων ίσο με 1.1 έως 1.2.

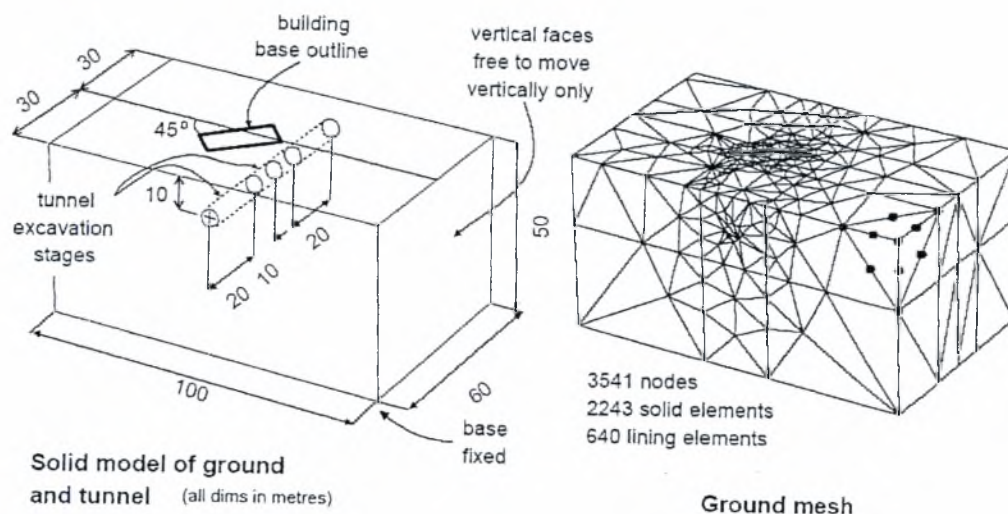
Ο Augarde και οι συνεργάτες του (1998) προχώρησαν σε μια ακόμα προσέγγιση της τρισδιάστατης προσομοίωσης εκσκαφής σήραγγας. Η σήραγγα διανοίγεται κατά στάδια και ταυτόχρονα τοποθετείται η επένδυση που απεικονίζεται

με κομμάτια κελύφους τα οποία ουσιαστικά δημιουργούν ένα δακτύλιο. Η επιθυμητή απώλεια όγκου επιτυγχάνεται με τη σταδιακή συστολή του δακτυλίου της επένδυσης. Το πλήθος των σταδίων κατασκευής που απαιτούνται καθορίζεται από τη φύση του υπό μελέτη προβλήματος.

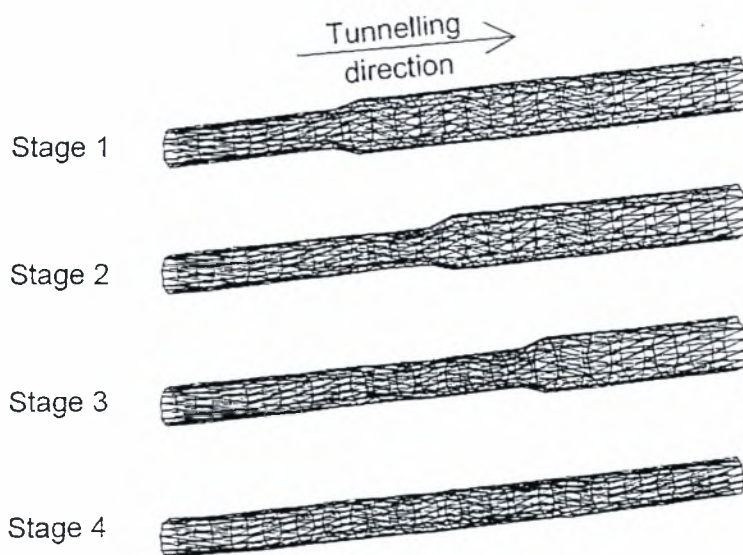


Σχήμα 6.30: Προσομοίωση της κατασκευής της σήραγγας

Ο Augarde πραγματοποίησε τέσσερα στάδια διάνοιξης της σήραγγας για να διερευνήσει την αλληλεπίδραση σήραγγας-υφιστάμενων κτιρίων. Στα παρακάτω σχήματα προσδιορίζεται το εδαφικό ομοίωμα και το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η συστολή της επένδυσης στα τέσσερα στάδια διάνοιξης που ακολουθήθηκαν.



Σχήμα 6.31: α) Ομοίωμα του εδάφους και της σήραγγας β) Εδαφικό πλέγμα (Augarde και συνεργάτες, 1998)



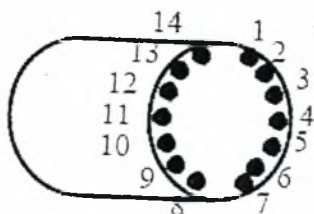
Σχήμα 6.32: Συστολή της επένδυσης για κάθε στάδιο της εκσκαφής

Ο Burd και οι συνεργάτες του (2000) παρουσίασαν αποτελέσματα αναλύσεων με χρήση της παραπάνω μεθόδου προσομοίωσης για την πρόβλεψη καθιζήσεων σε συνθήκες ελεύθερου πεδίου (greenfield). Από τα αποτελέσματα αυτά προέκυψε ότι η κατανομή των προβλεπόμενων εγκάρσιων καθιζήσεων ήταν πολύ ευρύτερη από την κατανομή Gauss και ότι η μέγιστη καθίζηση αντιστοιχούσε στο 70% της μέγιστης τιμής της κατανομής Gauss για την ίδια τιμή της απώλειας όγκου.

Κάποιοι μελετητές διερεύνησαν την επίδραση του συντελεστή ωθήσεων σε ηρεμία K_0 και της ανισοτροπίας του εδάφους στη βελτίωση της μορφής των κατανομών εγκάρσιων καθιζήσεων που προβλέπονται από τις τρισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Οι Guedes και Santos Pereira (2000) παρουσίασαν αποτελέσματα της μελέτης τους και συμπέραναν ότι η χρήση τρισδιάστατης προσομοίωσης δε μεταβάλλει την τάση διεύρυνσης των καθιζήσεων λόγω αύξησης του K_0 , όπως αυτή παρατηρήθηκε στην ανάλυση επίπεδης παραμόρφωσης. Οι Lee και Ng (2002), εκτός από το K_0 , συμπεριέλαβαν και το βαθμό ανισοτροπίας, που εκφράζεται από τη σχέση $n' = E_h/E_v$, στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων την οποία πραγματοποίησαν σε σήραγγα διαμέτρου $D=9\text{m}$ σε βάθος $z=22.5\text{m}$. Χρησιμοποίησαν $K_0=0.5$ και 1.5 και βαθμό ανισοτροπίας $n'=1.5$ ο οποίος συγκρίθηκε με τις ισότροπες συνθήκες όπου $n'=1.0$. Ο λόγος G_{vh}/E_v' θεωρήθηκε 0.44 .

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών προέκυψε ότι η καμπύλη των εγκάρσιων καθιζήσεων γίνεται βαθύτερη με τη μείωση του K_0 και την αύξηση του βαθμού ανισοτροπίας, κάτι που είναι σύμφωνο με τα συμπεράσματα του Addenbrooke (1997). Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των δυο μελετών φάνηκε ότι οι κατανομές που δίνονται από τις τρισδιάστατες αναλύσεις των Lee και Ng είναι πιο ευαίσθητες στις αλλαγές του n' σε σχέση με τις δισδιάστατες αναλύσεις.

Άλλοι μελετητές πρότειναν την ανάλυση της κατασκευαστικής διαδικασίας της σήραγγας μέσω της προσομοίωσης της μηχανής διάνοιξης. Μια τέτοια προσέγγιση παρουσιάστηκε από τον Komiyama και τους συνεργάτες του (1999) οι προσομοίωσαν μια μηχανή διάνοιξης τύπου EPB με σώμα υψηλής δυσκαμψίας. Το εδαφικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν μη γραμμικό, ανισότροπο ελαστοπλαστικό. Για την προώθηση της ασπίδας στη σήραγγα εφαρμόστηκαν, στο πίσω μέρος της, εξωτερικές δυνάμεις ισοδύναμες με τις δυνάμεις των υδραυλικών γρύλων που χρησιμοποιούνται στην πράξη. Με την εφαρμογή των δυνάμεων αυτών σε διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικούς συνδυασμούς, έγινε δυνατή η τρισδιάστατη προσομοίωση της κίνησης της μηχανής διάνοιξης.

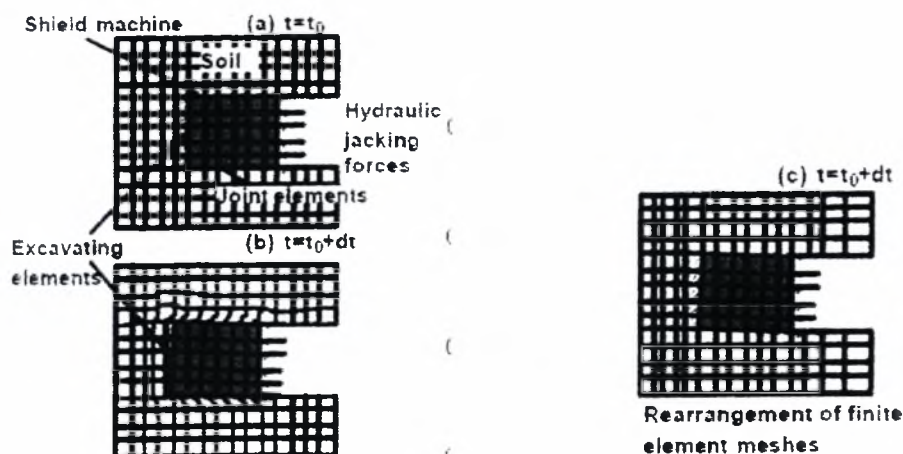


Σχήμα 6.33: Δυνάμεις που ασκούνται στην ασπίδα από τους υδραυλικούς γρύλους

0.000day	0.005	0.022	0.035	0.087	0.088	0.104	0.110	0.118	0.218	0.219	0.223	0.232	0.234	0.238	0.247
388kN	510	716	0	370	632	687	803	0	226	621	651	598	722	742	499
0.259day	0.264	0.405	0.411	0.412	0.417	0.418	0.419	0.421	0.423	0.426	0.429	0.431	0.432	0.434	0.436
839kN	0	386	749	673	782	704	810	649	786	675	739	754	0	595	643
0.438day	0.489	0.506	0.509	0.510	0.511	0.523	1.058	1.082	1.099	1.104	1.126	1.612	1.634	1.637	1.638
0kN	711	653	619	0	726	0	534	640	702	642	0	756	0	675	762

Σχήμα 6.34: Αρχεία των δυνάμεων των υδραυλικών γρύλων που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η προώθηση της ασπίδας είχε σαν αποτέλεσμα την παραμόρφωση των εδαφικών στοιχείων που βρίσκονται μπροστά από αυτή. Για τη διατήρηση της γεωμετρίας του εδαφικού πλέγματος σε όλα τα στάδια της εκσκαφής, ο Κομίγια πρότεινε τον επανασχεδιασμό του στην αρχή κάθε φάσης διάνοιξης όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 6.35: Επανασχηματισμός του πλέγματος του εδάφους στην αρχή κάθε φάσης διάνοιξης

Μετά από σύγκριση των εδαφικών μετακινήσεων που προβλέφθηκαν με την τρισδιάστατη μέθοδο, 1m πάνω από την οροφή της σήραγγας, και των μετακινήσεων του εδάφους όπως αυτές βρέθηκαν από δεδομένα πεδίου, ο Komiyama έδειξε ότι οι επιδράσεις της εκσκαφής της σήραγγας στο περιβάλλον έδαφος προσομοιώθηκε με λογική ακρίβεια εφόσον οι καθιζήσεις που προέκυψαν ήταν αμελητέες όπως κι αυτές που εμφανίστηκαν στο πεδίο.



Σχήμα 6.36: Προώθηση της ασπίδας και εξέλιξη των υπόγειων καθιζήσεων

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο Κομίγα υπολόγισε τόσο τις άμεσες όσο και τις χρόνιες καθιζήσεις.

Ο Dias και οι συνεργάτες του (2000) παρουσίασαν την τρισδιάστατη ανάλυση της κατασκευής της σήραγγας στο Κάιρο για αστράγγιστες συνθήκες και προσομοιώθηκε μηχανή διάνοιξης τύπου slurry shield με την εφαρμογή πίεσης στο μέτωπο και στο όριο της σήραγγας για να αναπαρασταθούν η πίεση του slurry και η έγχυση του κονιάματος αντίστοιχα. Επιπλέον προσομοιώθηκε το κωνικό σχήμα της ασπίδας και η υπερεκσκαφή του εδάφους. Τα αποτελέσματα των τρισδιάστατων αναλύσεων τους υπερεκτίμησαν κατά 100% τις επιφανειακές καθιζήσεις σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου, ενώ έδωσαν κατανομές μικρότερου εύρους σε σύγκριση με τις δισδιάστατες αναλύσεις.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι παρά τις αποκλίσεις που εμφανίζουν σε ορισμένες προβλέψεις οι αριθμητικές μέθοδοι σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου, εντούτοις δίνουν τη δυνατότητα ακριβούς επίλυσης πλήθους πολύπλοκων προβλημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7°

Παράδειγμα εφαρμογής αριθμητικών μεθόδων (Μ.Π.Σ)

7.1 Γενικά

Το εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται κατά τη διάνοιξη σηράγγων εξαρτάται κυρίως από τα γεωμετρικά δεδομένα της διατομής, την κατασκευαστική ακολουθία των εκτελούμενων εργασιών (φάσεις εκσκαφής, προσωρινά μέτρα κ.λπ.), τις γεωτεχνικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή κατασκευής (στρωματογραφία, μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών, στάθμη υπόγειου υδάτινου ορίζοντα κ.λπ.), καθώς και από την εκτίμηση του αρχικού πεδίου των τάσεων (τιμή συντελεστή K_0 , βάθος κατασκευής κ.λπ.).

Για την αξιόπιστη μελέτη του προβλήματος επιβάλλεται, όπως τεκμηριωμένα αιτιολογήθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, η τριδιάστατη θεώρησή του, έτσι ώστε να είναι εφικτή η προσομοίωση της συμπεριφοράς της διατομής τόσο κατά τον εγκάρσιο όσο (κυρίως) και κατά το διαμήκη άξονά της. Συχνά, όμως, ο αυξημένος βαθμός δυσκολίας που χαρακτηρίζει τις τριδιάστατες αναλύσεις οδηγεί, στην αντιμετώπιση του συγκεκριμένου σύνθετου προβλήματος με διδιάστατη προσέγγιση και θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης. Υπογραμμίζεται πως στην περίπτωση αυτή παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της σήραγγας μόνον κατά την εγκάρσια διεύθυνση (ή η δυνατότητα υπολογισμού των εντατικών μεγεθών μόνο κατά την εγκάρσια διεύθυνση της σήραγγας).

Για την καλύτερη αντιμετώπιση των ανωτέρω δυσκολιών έχουν αναπτυχθεί συγκεκριμένες μεθοδολογίες, οι οποίες έχουν ως βασικό στόχο την προσέγγιση της τριδιάστατης ανάλυσης με την εκτέλεση κατάλληλης ακολουθίας διδιάστατων επιλύσεων, λαμβάνοντας υπόψη τη μέθοδο διάνοιξης της σήραγγας. Ειδικότερα, το λογισμικό PLAXIS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων με τη λεγόμενη Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM) καθώς και με την χρήση ασπίδας (shield tunneling).

7.2 Μεθολογία διάνοιξης σηράγγων – Παραδοχές ανάλυσης

Για την προσομοίωση της διάνοιξης σηράγγων προτείνεται η κατάλληλη υπολογιστική θεώρηση της σταδιακής κατασκευής, η ενεργοποίηση της επένδυσης και η “απενεργοποίηση” του εδάφους εντός του tunnel (εκσκαφή), εφαρμόζοντας συγκεκριμένη μεθοδολογία ανάλογα του τρόπου κατασκευής της σήραγγας. Ειδικότερα αναφέρεται πως στην περίπτωση της μεθόδου της ασπίδας, η επιθυμητή απώλεια του όγκου του εδάφους (Volume Loss) στην περιοχή εκσκαφής της σήραγγας εισάγεται άμεσα ως ποσοστό του όγκου της διατομής. Τονίζεται, πως κατά τη

θεώρηση συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί ουσιαστικά σε ποσοστό ομοιόμορφης μείωσης του εμβαδού της διατομής της σήραγγας. Κατά την κατασκευή σηράγγων με τη μέθοδο NATM, εφαρμόζεται η μέθοδος-β (method-b), κατά την οποία το σύνολο των αρχικών τάσεων ρ_k , που αναπτύσσεται στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα: στο τμήμα $(1-\beta)\times\rho_k$ που ασκείται στην ανυποστήριχτη διατομή και στο αντίστοιχο $\beta\times\rho_k$ που εφαρμόζεται πλέον στην υποστηριζόμενη διατομή. Η παράμετρος β εκτιμάται εμπειρικά και συνδέεται με το βαθμό αποτόνωσης των εδαφικών τάσεων, λ , σύμφωνα με την σχέση $1-\beta=\lambda$.

7.3 Εδαφικά μοντέλα

Το εδαφικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στο σύνολο των επιλύσεων, είναι αυτό της ελαστικής - κρατυνόμενης - πλαστικής συμπεριφοράς (hardening model), καθώς παρέχει τη δυνατότητα ακριβέστερου υπολογισμού των διανυσμάτων των μετακινήσεων. Συγκεκριμένα, όπως επισημαίνεται και σε ανάλογες βιβλιογραφικές αναφορές (PLAXIS Bulletin No 13, pg 11), η χρήση του ελαστικού μέτρου αποφόρτισης (E_{ur}) στις καταστικές εξισώσεις υπολογισμού των εντατικών μεγεθών κατά τη φάση αποφόρτισης (στάδιο διάνοιξης σήραγγας), καθώς και η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από το καθεστώς των τάσεων επιτρέπει την αξιόπιστη εκτίμηση των μετακινήσεων. Αντίθετα, η χρήση μοντέλων ελαστικής - τελείως - πλαστικής συμπεριφοράς (π.χ. Mohr - Coulomb), εξαιτίας της αδυναμίας ρεαλιστικής προσομοίωσης των φάσεων αποφόρτισης (λόγω χρήσης ενιαίας τιμής του μέτρου ελαστικότητας κατά τα στάδια φόρτισης - αποφόρτισης και ανεξάρτητης των αναπτυσσόμενων τάσεων), οδηγεί σε αυξημένες τιμές μετακινήσεων και σε ορισμένες περιπτώσεις σε μη αποδεκτά αποτελέσματα (π.χ. ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους κατά τη διάνοιξη της σήραγγας).

Οι βασικές παράμετροι του εδαφικού μοντέλου HS είναι το τέμνον ελαστικό μέτρο αναφοράς (E_{50}^{ref}), τα αντίστοιχα μέτρα του οιδημέτρου (E_{oed}^{ref}) και της αποφόρτισης - επαναφόρτισης (E_{ur}^{ref}) καθώς και η εκθετική παράμετρος m .

Οι παραπάνω τιμές των μέτρων E αναφέρονται σε καθορισμένη τάση αναφοράς ($p^{ref}=100kPa$). Για την εκτίμηση των τιμών E_{50} , E_{ur} και E_{oed} στο βάθος κατασκευής της σήραγγας προτείνονται οι σχέσεις:

$$- E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \frac{\sigma_3'}{3} \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p_{ref} \sin\varphi} \right)^m$$

$$- E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \frac{\sigma_3'}{3} \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m$$

$$- E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma_1' \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m$$

Σε περίπτωση έλλειψης ανάλογων αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών για την εκτίμηση του μέτρου E_{ur}^{ref} , είναι δυνατή η χρήση κατάλληλων εμπειρικών σχέσεων. Στο λογισμικό για την εύρεση του E_{ur}^{ref} προτείνεται η σχέση:

$$E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref}$$

Επίσης, θεωρώντας πως κατά το στάδιο της αποφόρτισης - επαναφόρτισης ισχύει η θεωρία της ελαστικότητας (νόμος Hooke), για το μέτρο E_{ur} ισχύει:

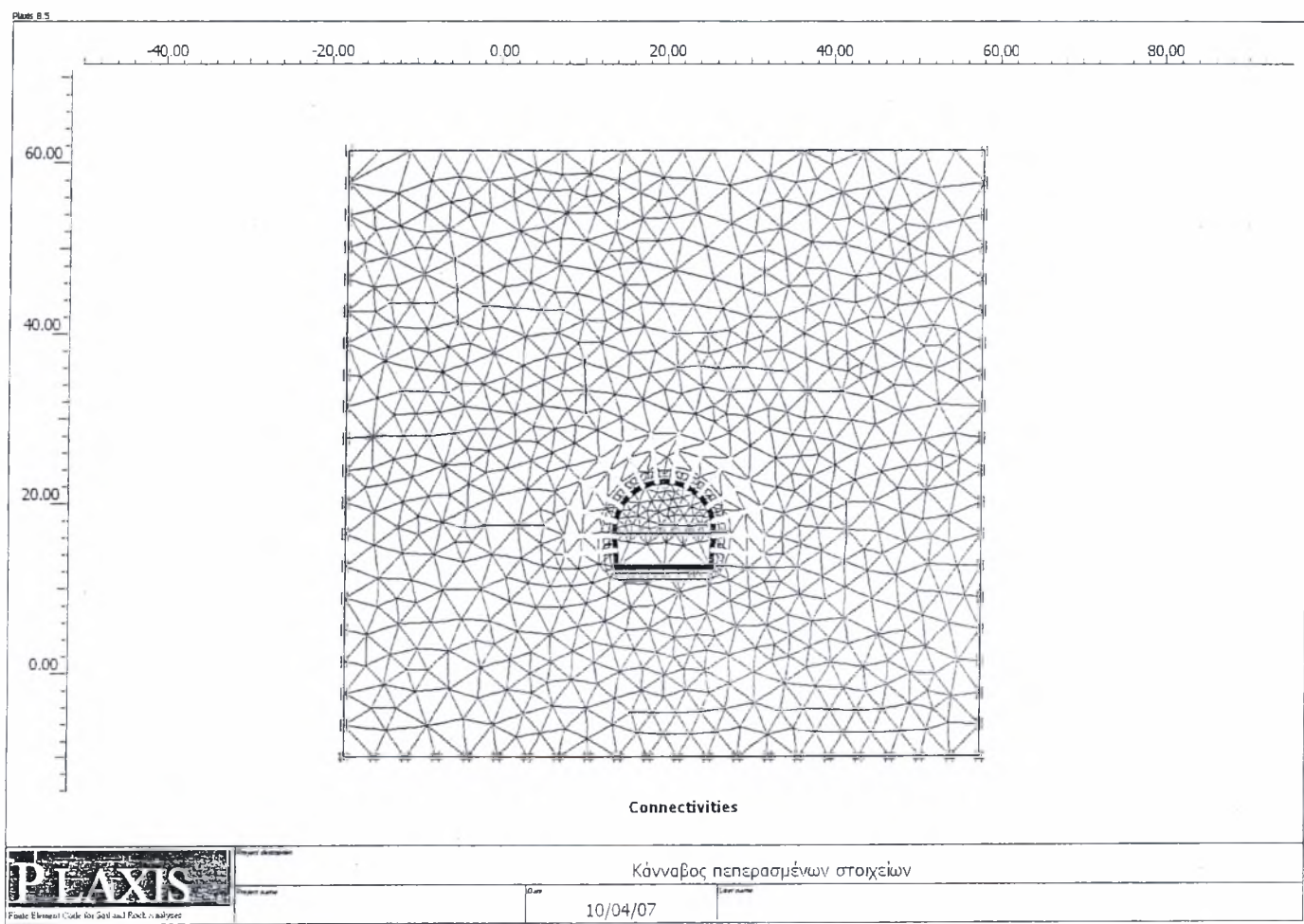
$$E_{ur} = 2(1+\nu)G_{ur}$$

όπου ν είναι ο λόγος Poisson και G_{ur} είναι το ελαστικό μέτρο διάτμησης.

Αντίθετα, για το τέμνον μέτρο E_{50} και στα πλαίσια των παραδοχών που εφαρμόζονται στο συγκεκριμένο λογισμικό, θεωρείται πως δεν ισχύει ο νόμος Hooke και συνεπώς δεν είναι δυνατή η άμεση σύνδεση του E_{50} με το αντίστοιχο μέτρο διάτμησης G_{50} .

7.4 Παράδειγμα εφαρμογής διάνοιξης σήραγγας με τη μέθοδο N.A.T.M

Οι διαστάσεις, οι συνοριακές συνθήκες και ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση του έργου δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Συνοπτικά αναφέρεται πως οι διαστάσεις του καννάβου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να αποφευχθεί - όσο το δυνατόν - η επιρροή των συνοριακών συνθηκών (ολίσθηση στα κατακόρυφα όρια, πάκτωση στο οριζόντιο) στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας. Το έδαφος προσομοιώθηκε με τριγωνικά πεπερασμένα σημεία 15 κόμβων και 12 σημείων ολοκλήρωσης (Gauss points), όπως απεικονίζεται στο επόμενο Σχήμα 7.1.

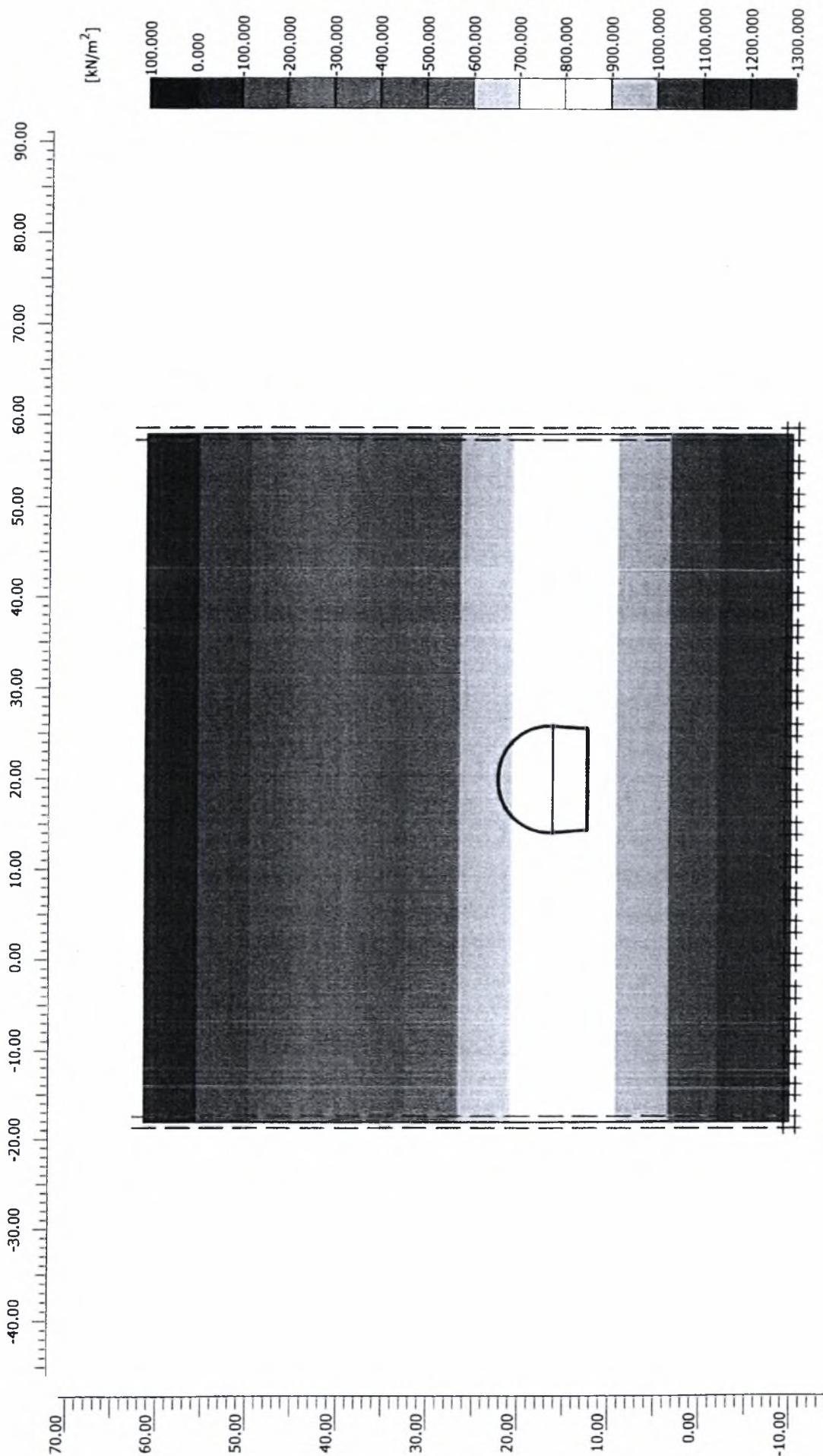


Σχήμα 7.1: Κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων

Η υπολογιστική διαδικασία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της κατασκευαστικής ακολουθίας του έργου με απώτερο σκοπό τον έλεγχο των προτεινόμενων μέτρων υποστήριξης, της ευστάθειας των δύο φάσεων εκσκαφής και των αναμενόμενων μετακινήσεων, συνίσταται από τα ακόλουθα στάδια:

- Στάδιο 0 :** Υπολογισμός αρχικού πεδίου τάσεων θεωρώντας επίπεδη την επιφάνεια του φυσικού εδάφους ($\sigma_v = \gamma \cdot z$, $\sigma_H = K_o \cdot \sigma_v$, $K_o = 0,50$).
- Στάδιο 1 :** Μηδενισμός μετακινήσεων και απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων στην περιοχή της Α' φάσης διάνοιξης της σήραγγας με χρήση συντελεστή χαλάρωσης ($\lambda = 0,50$).
- Στάδιο 2 :** Ενεργοποίηση των στοιχείων προσωρινής αντιστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα "αρχικής" αντοχής πάχους 20cm, μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια - lattice girders τύπου 3G-70/20/D26 ανά 1,75m, αγκύρια τύπου Swellex ανά 1,75m) και ολοκλήρωση ανακατανομής τάσεων.
- Στάδιο 3 :** Ενεργοποίηση των στοιχείων εκτοξευόμενου σκυροδέματος "τελικής" αντοχής.
- Στάδιο 4 :** Απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων στην περιοχή της Β' φάσης διάνοιξης με χρήση συντελεστή χαλάρωσης ($\lambda = 0,50$).
- Στάδιο 5 :** Ενεργοποίηση των στοιχείων προσωρινής αντιστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα "αρχικής" αντοχής, μεταλλικά δικτυωτά πλαίσια - lattice girders, αγκύρια τύπου Swellex) και ολοκλήρωση ανακατανομής τάσεων.
- Στάδιο 6 :** Ενεργοποίηση των στοιχείων εκτοξευόμενου σκυροδέματος "τελικής" αντοχής.

Τα ανωτέρω στάδια περιγράφονται αναλυτικά στα Σχήματα 7.2 έως 7.8



Σχήμα 7.2 Αρχικό πεδίο τάσεων

Project description

Project name

Step

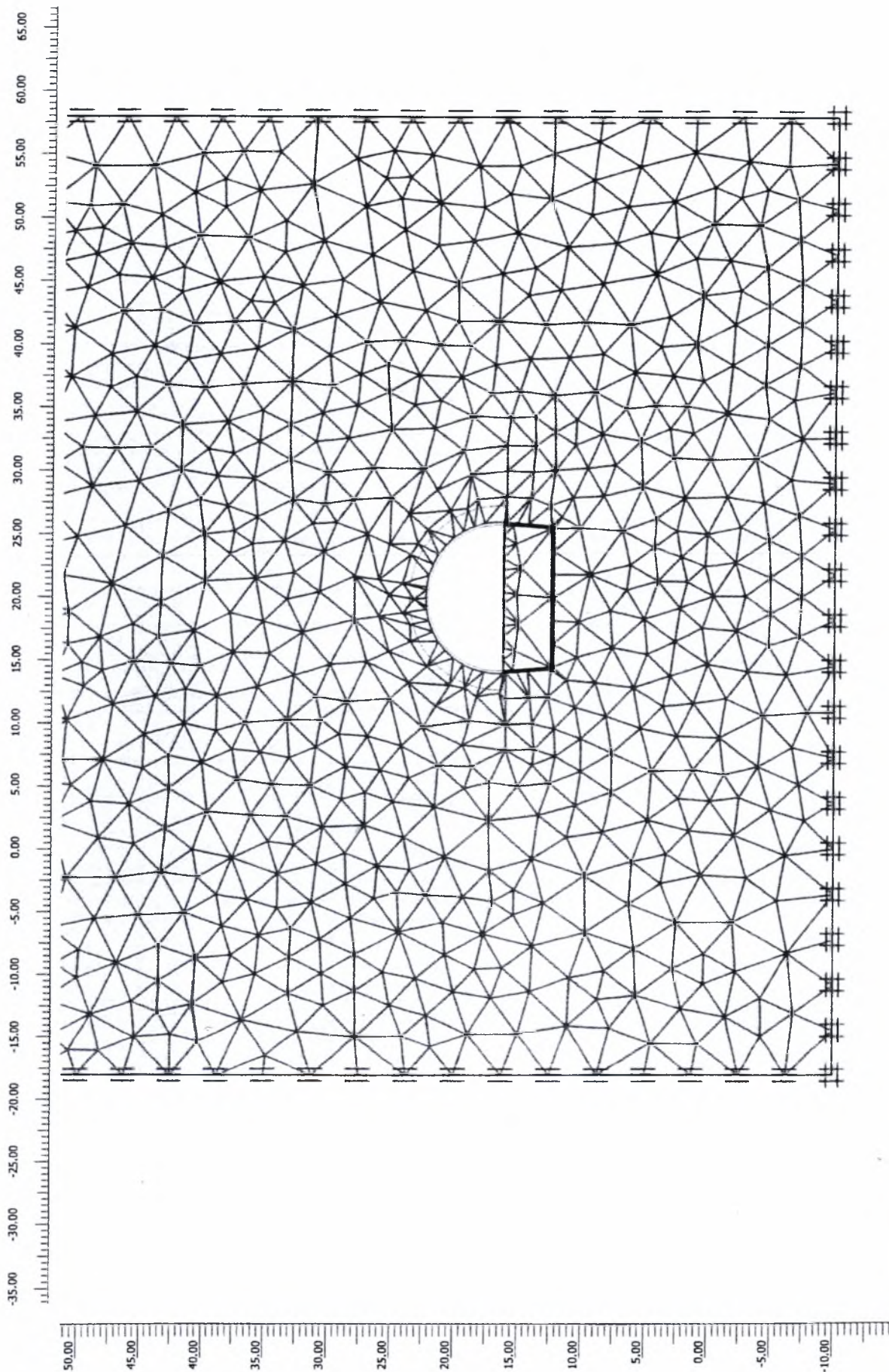
Date

CASE1

1

16/05/07





Project description

Σχήμα 7.3 Α' φάση εκσκαφής

Project name

CASE1

Step

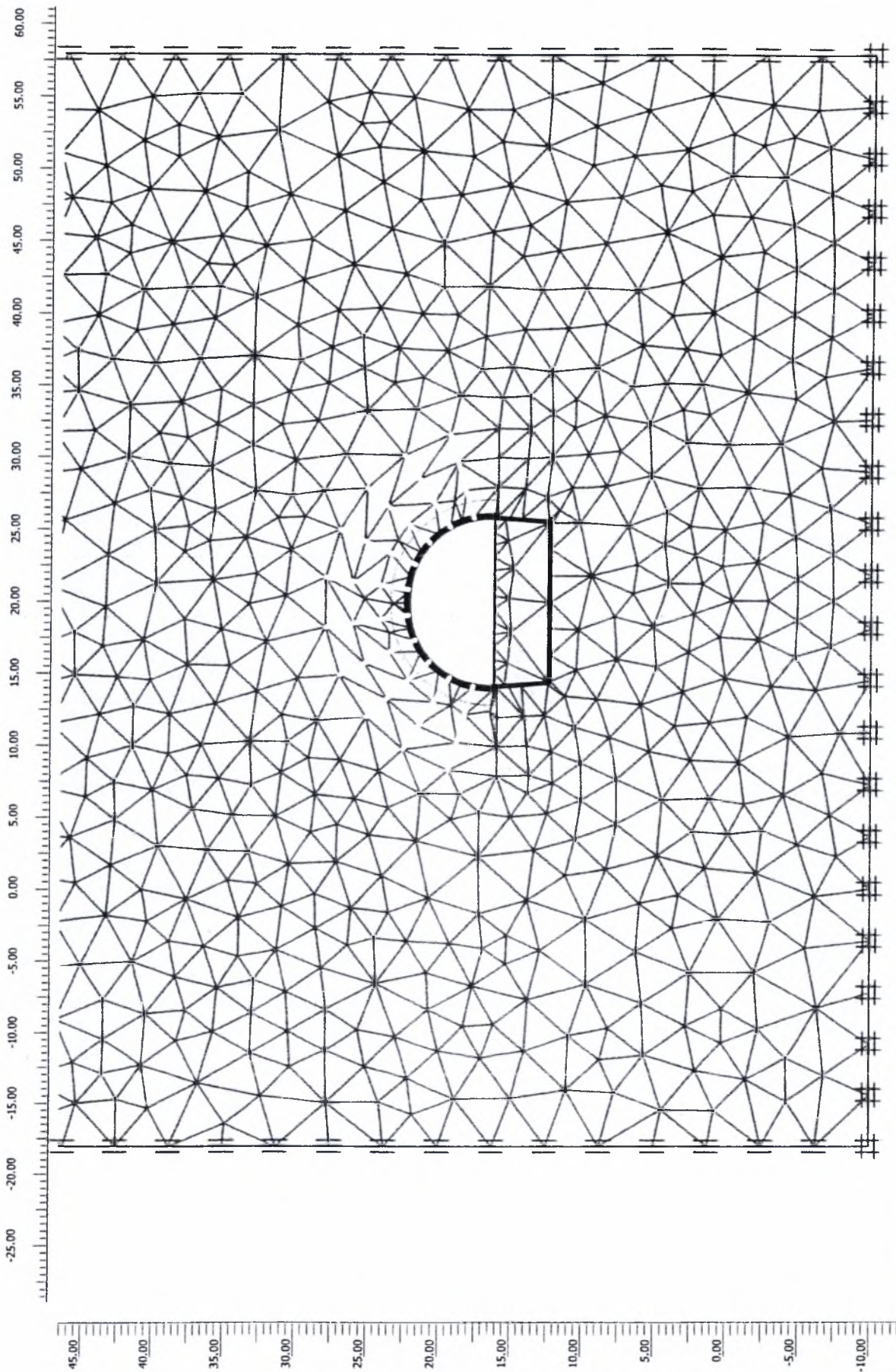
6

Date

16/05/07

PLAXIS

Finite Element Code for Soil and Rock Analyses



Project description

Σχήμα 7.4 Ενεργοποίηση στοιχείων προσωρινής επένδυσης

Project name

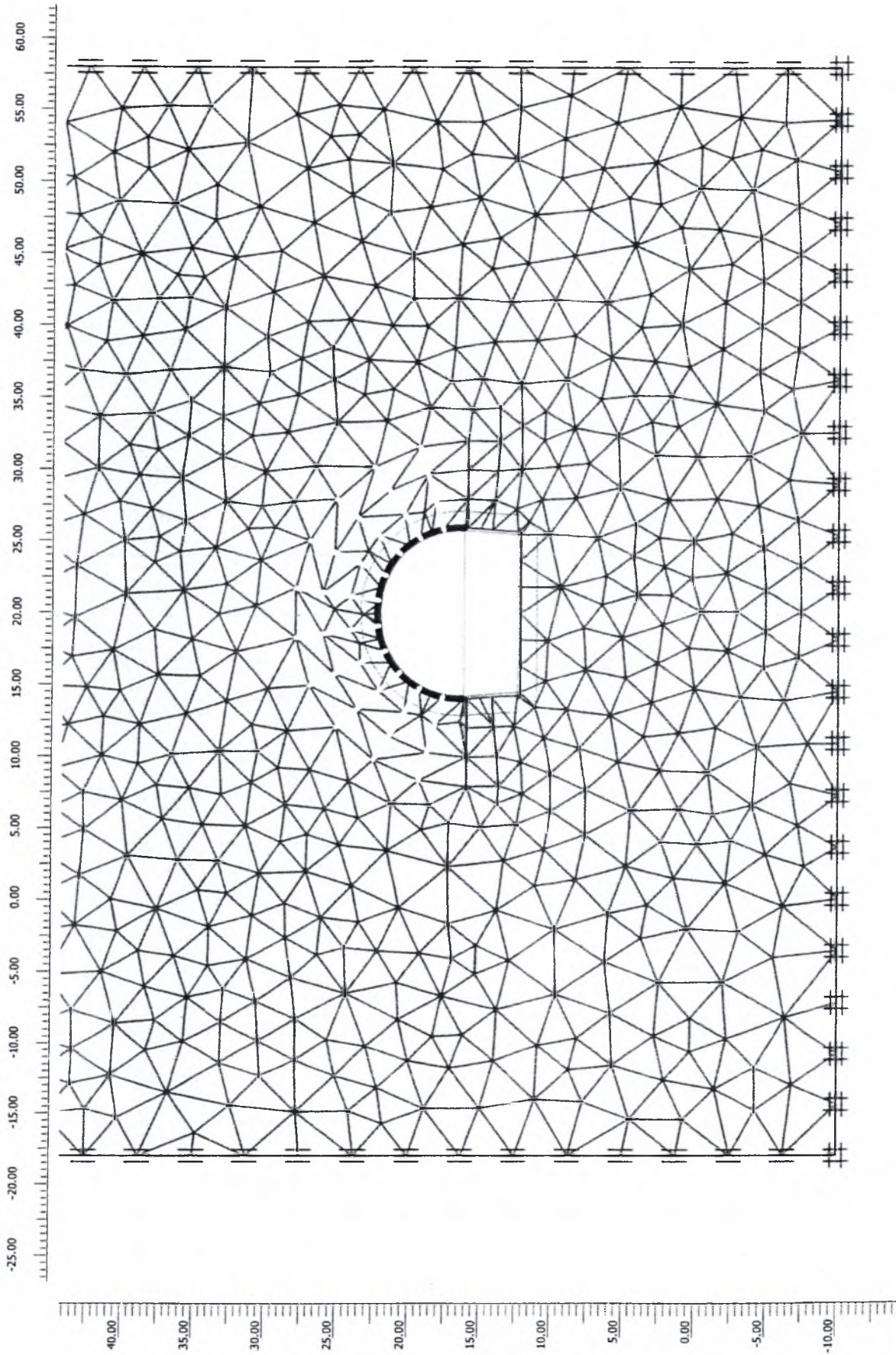
CASE1

Step

25

Date

16/05/07



Project description

Σχήμα 7.5 Β' φάση εκσκαφής

Date

16/05/07

Project name

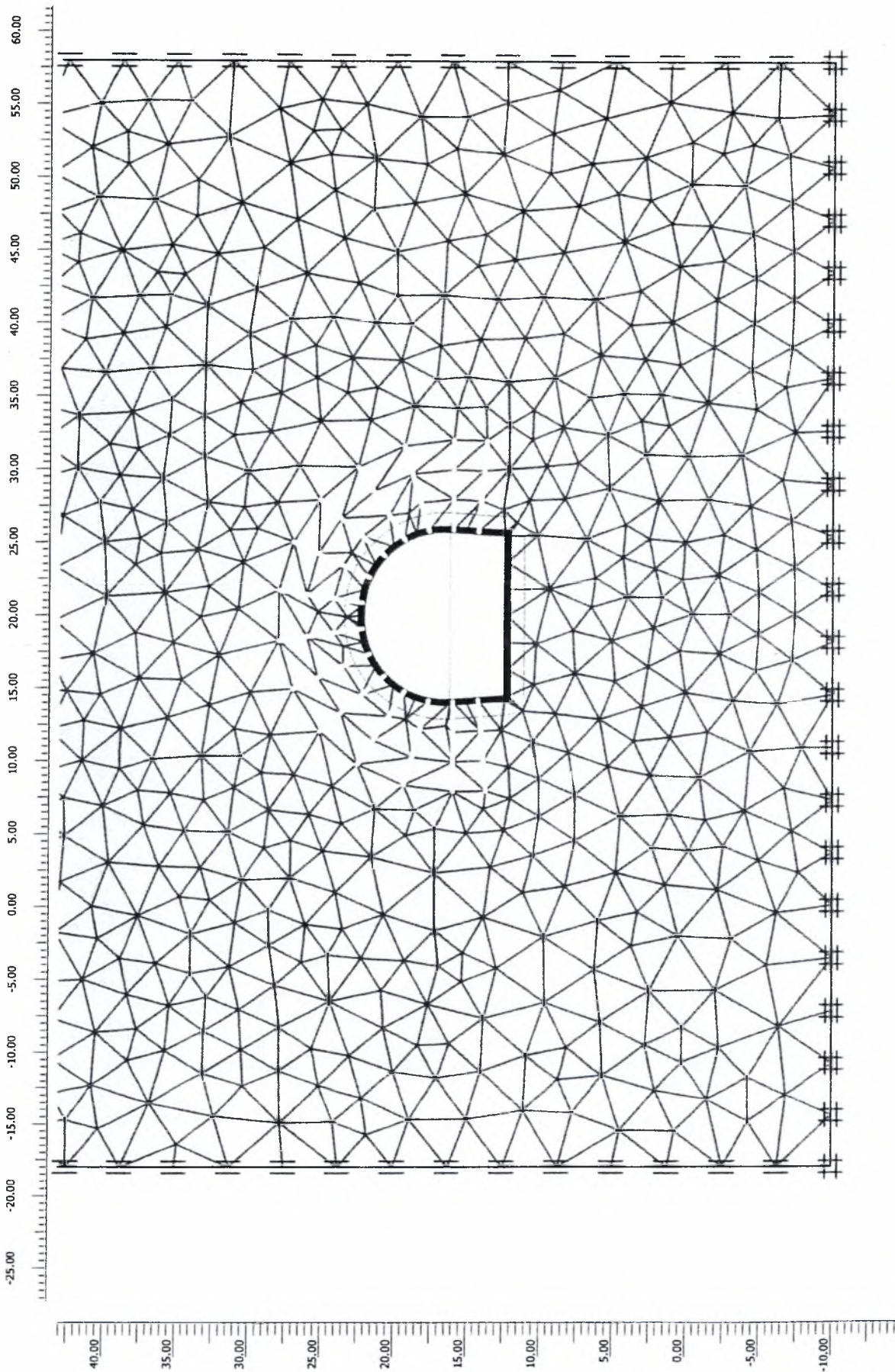
CASE1

Step

41

PLAXIS

Finite Element Code for Soil and Rock Analyses



Project description

Σχήμα 7.6 Ενεργοποίηση στοιχείων προσωρινής επένδυσης

Project name

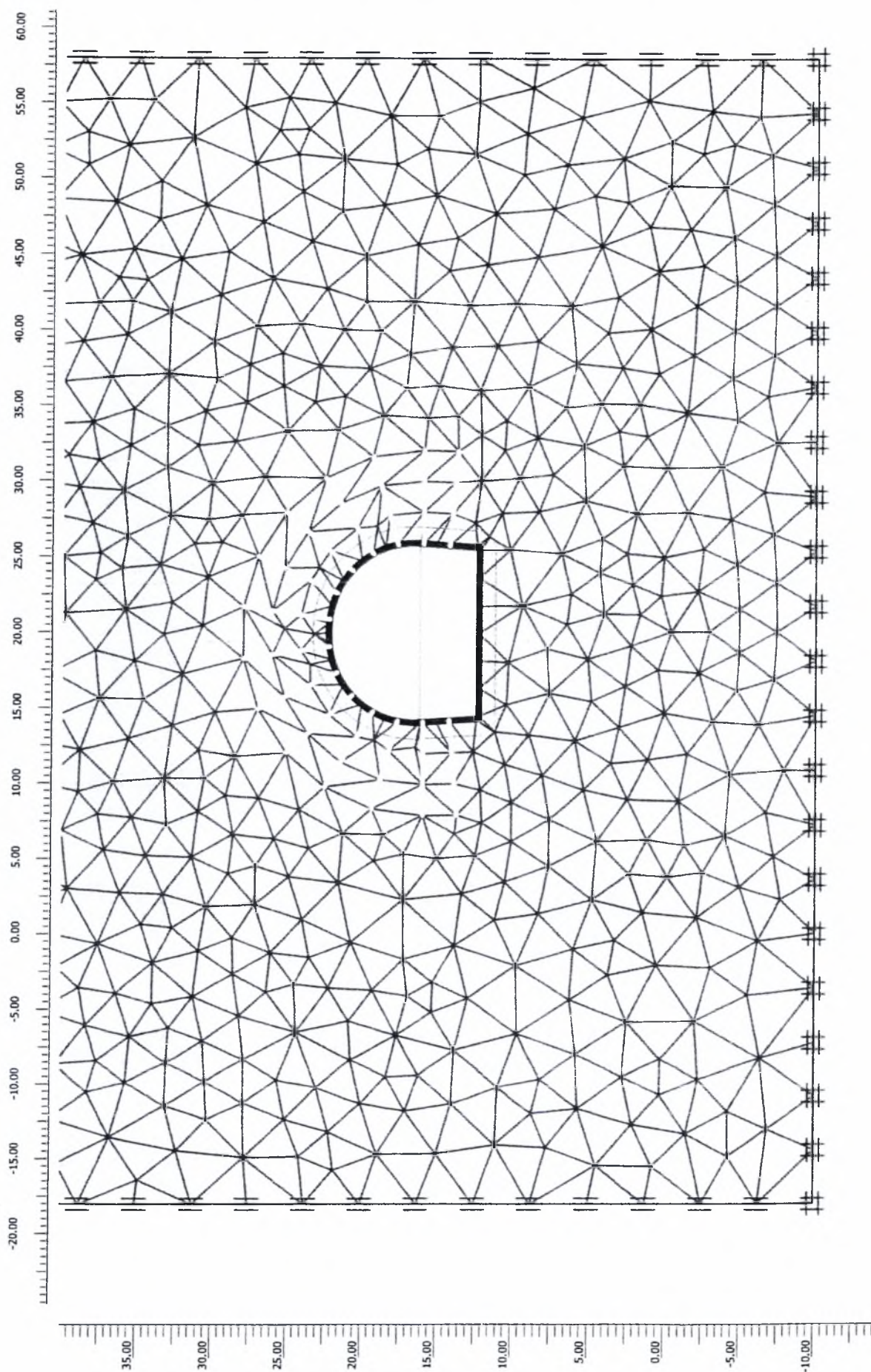
CASE1

Date

16/05/07

Step

54



Project description

Σχήμα 7.7 Ενεργοποίηση στοιχείων προσωρινής επένδυσης

Project name

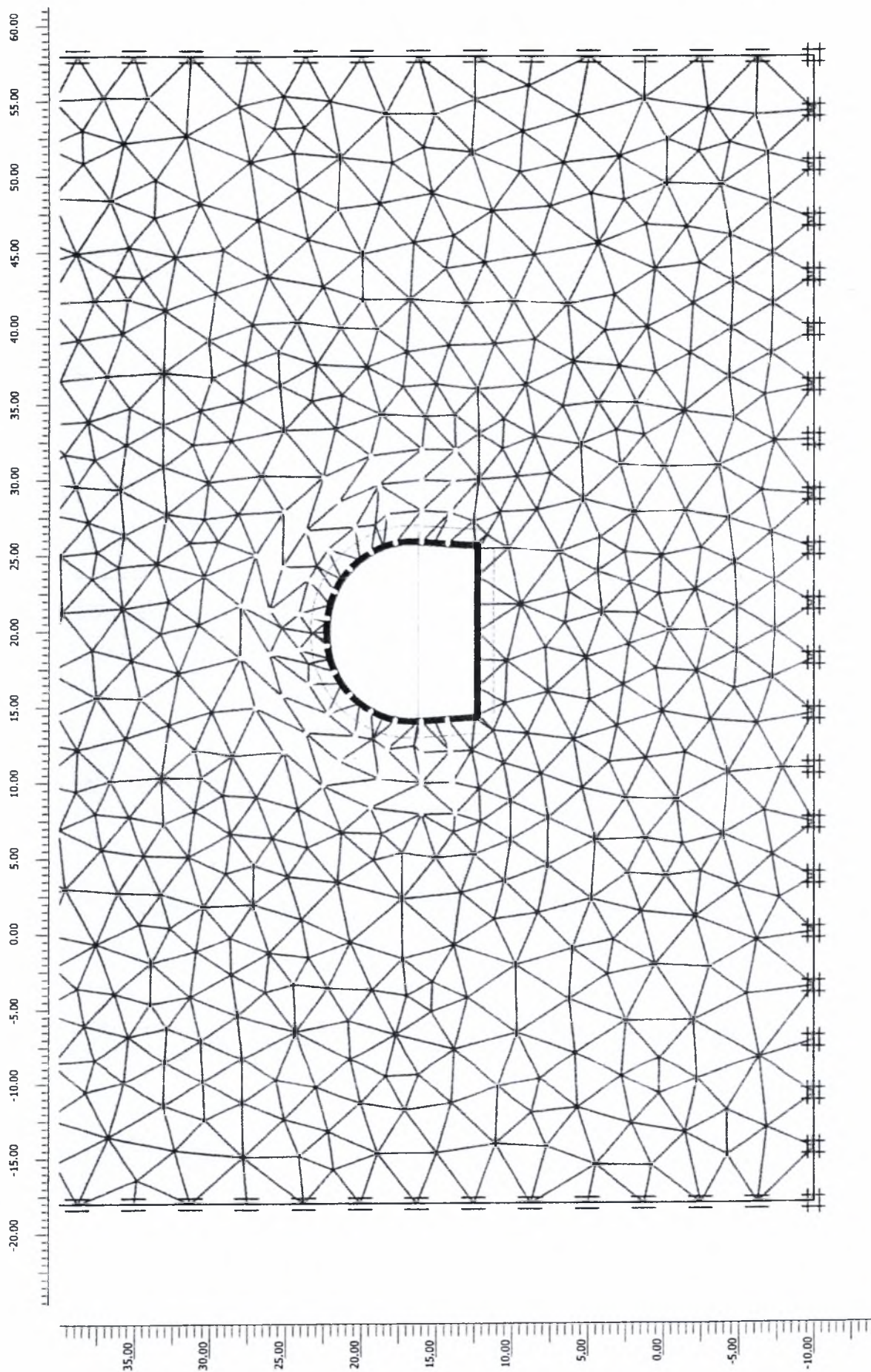
CASE1

Date

16/05/07

Step

60



Project description

Σχήμα 7.8 Ενεργοποίηση στοιχείων προσωρινής επένδυσης

Project name

CASE1

Step

60

Date

16/05/07

PLAXIS

Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Η προσομοίωση της στρώσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έγινε με τη χρήση τυπικών εδαφικών στοιχείων γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς και αντίστοιχου πάχους, βάσει της σχετικής επιλογής που παρέχεται από τον χρησιμοποιούμενο κώδικα.

Για την προσομοίωση των μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων και των αγκυρίων τύπου SWELLEX χρησιμοποιήθηκαν αντιστοίχως στοιχεία δοκού (beam elements) και ειδικά στοιχεία παραλαβής εφελκυστικών δυνάμεων (geotextiles).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων των μέτρων προσωρινής υποστήριξης (στοιχεία δοκού, τυπικά εδαφικά στοιχεία) γειτονικών τους εδαφικών λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση στοιχείων διεπιφάνειας μηδενικού πάχους.

Το σύνολο των τιμών των παραμέτρων που αναφέρονται στα ως άνω στοιχεία δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Οι έλεγχοι που διενεργούνται - βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων - εστιάζονται στη συμπεριφορά της περιβάλλουσας του έργου βραχόμαζας καθώς και στην επάρκεια των προτεινόμενων προσωρινών μέτρων υποστήριξης.

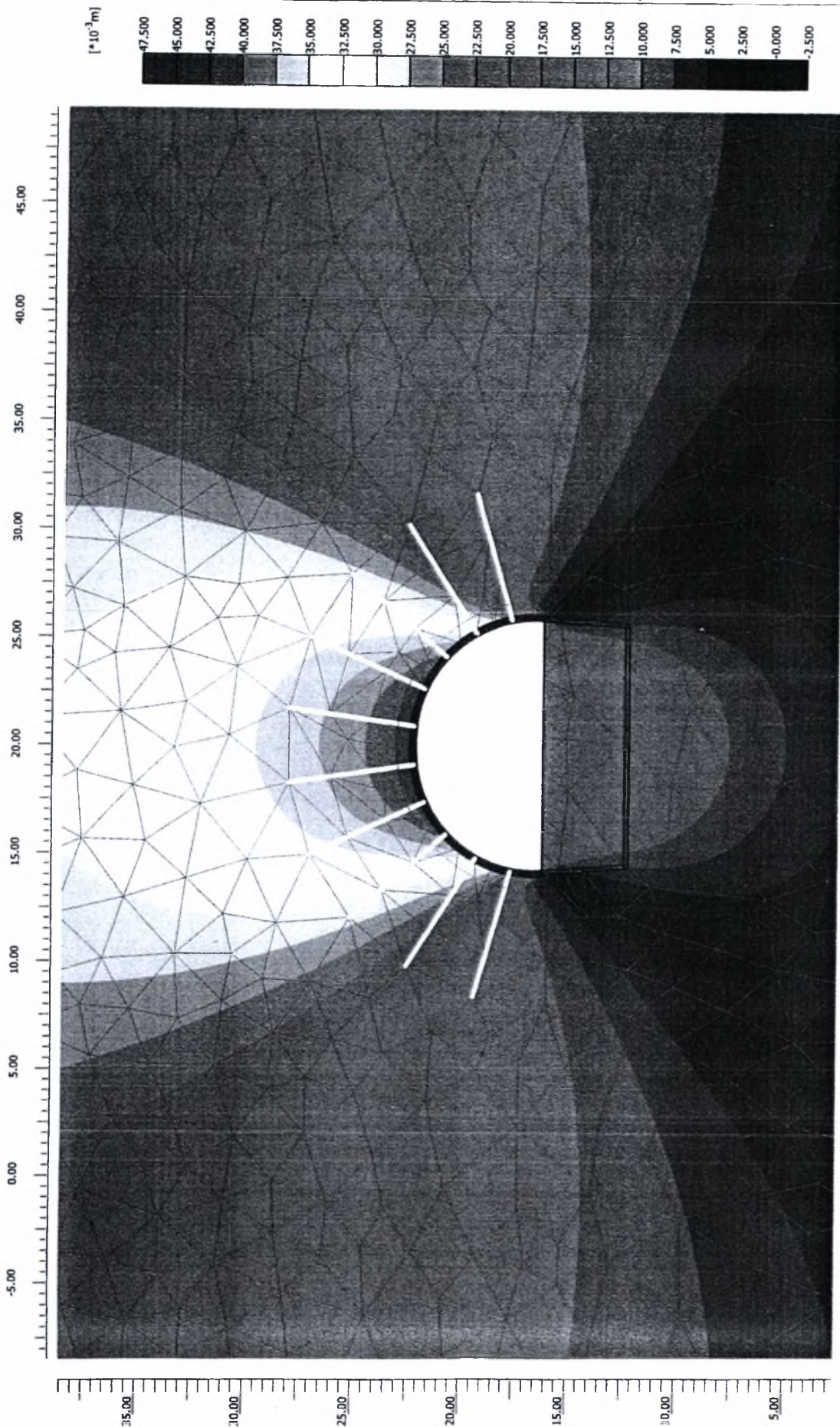
Ειδικότερα, η συμπεριφορά της βραχόμαζας διερευνήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την έκταση της πιθανούς ζώνης αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής, την τυχόν δημιουργία πλαστικών περιοχών καθώς και το μέγεθος των μετακινήσεων των υπό εξέταση διατομών (σύγκλιση).

Σχετικά με την επάρκεια των μέτρων υποστήριξης εξετάσθηκαν οι προκύπτουσες τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Συνοπτικά, στον ακόλουθο πίνακα 7.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και εν συνεχεία στα σχήματα 7.9 έως 7.22 τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης όπως παρέχονται από το χρησιμοποιούμενο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων.

Εντατικό μέγεθος	Α' Φάση εξσκαφής	Β' Φάση εξσκαφής
Μέγιστη ολική μετακίνηση «σήραγγας»	4,63 cm (Σχ.7.9β)	5,41 cm (Σχ.7.16β)
Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση «σήραγγας»	4,62 cm (Σχ.7.10)	5,41 cm (Σχ.7.17)
Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση «σήραγγας»	1,34 cm (Σχ.7.11)	2,71cm (Σχ.7.18)
Μέγιστη καμπτική ροπή μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων (lattice girders)	21,30kNm (Σχ.7.12)	35,93kNm (Σχ.7.19)
Μέγιστη διατμητική δύναμη μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων (lattice girders)	133kN (Σχ.7.13)	184kN (Σχ.7.20)
Μέγιστη αξονική δύναμη μεταλλικών δικτυωτών πλαισίων (lattice girders)	881kN (Σχ.7.14)	957kN (Σχ.7.21)
Μέγιστη εφελκυστική δύναμη αγκυρίων τύπου SWELLEX	300kN (Σχ.7.15)	365kN (Σχ.7.22)

Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης (APXEIO CASE1)

(Παράρτημα Α)



Total displacements (Utot)
Extreme Utot 46,45 * 10⁻³ m

Project description

Σχήμα 7.9α Ολικές μετακινήσεις

Project name

CASE1

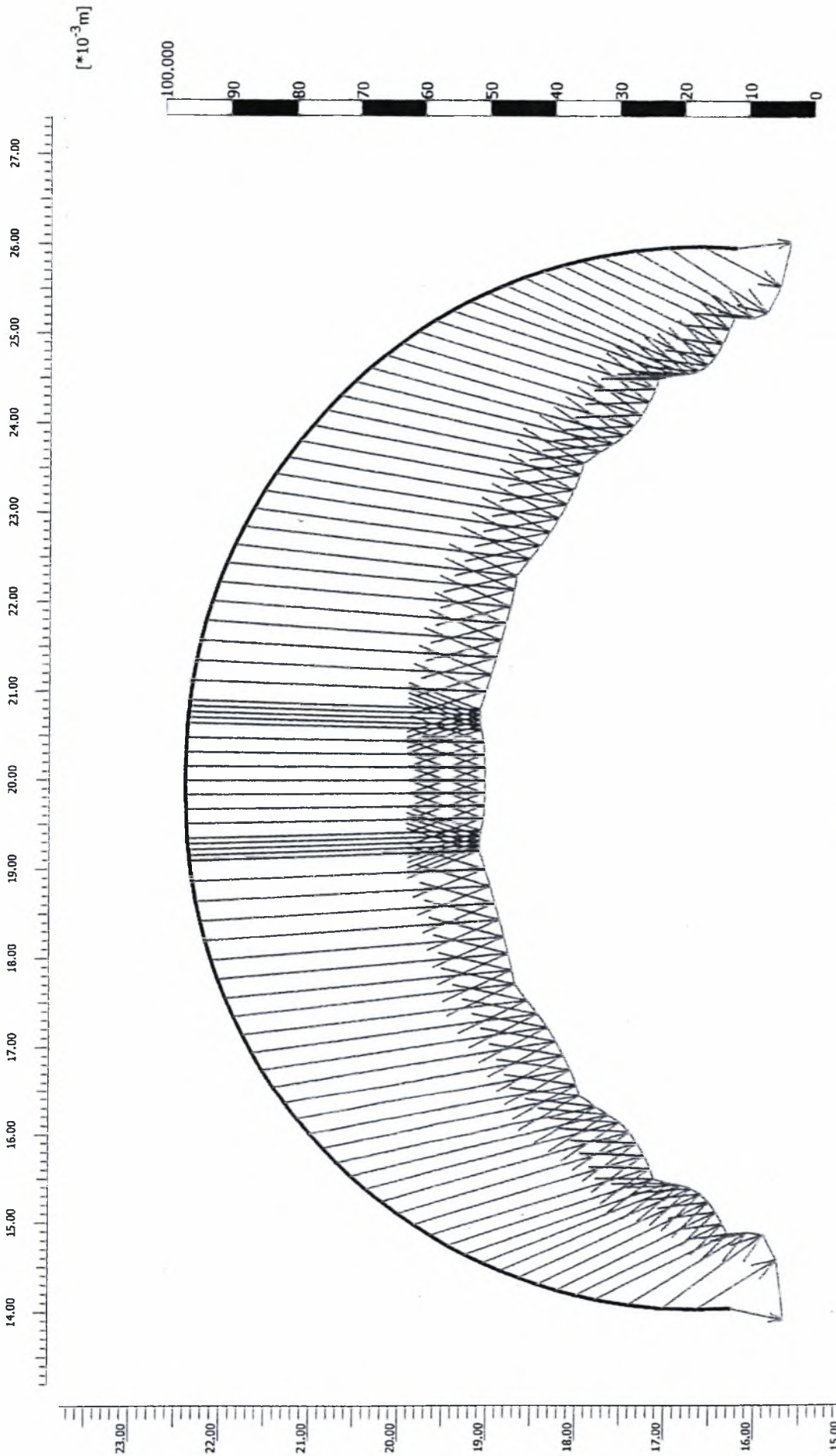
Step

31

Date

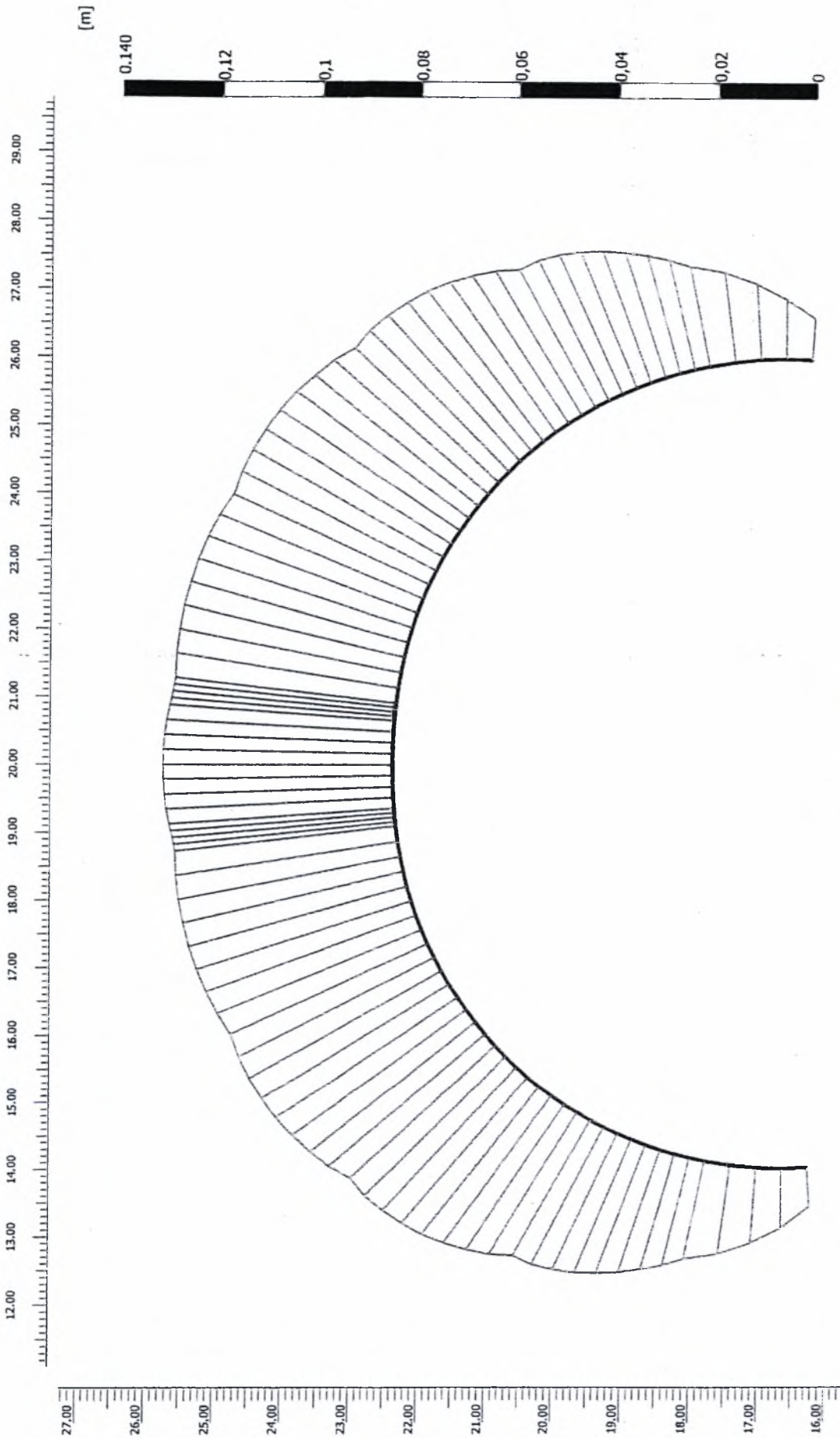
16/05/07

PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses




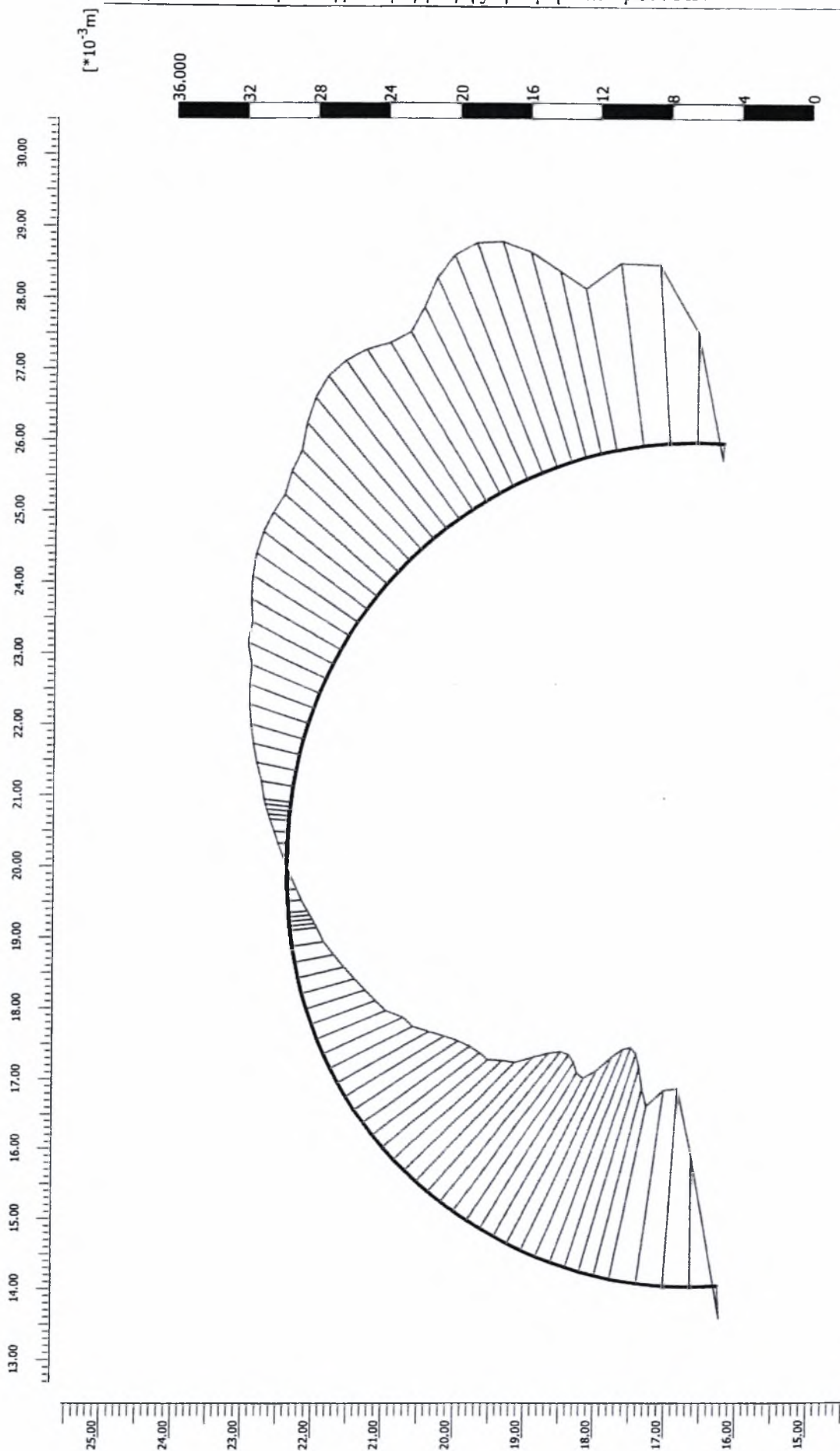
PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses	Project description	
	Project name	Date
CASE1	31	16/05/07

Σχήμα 7.9β Ολικές μετακινήσεις σήραγγας



Vertical displacements (Uy)
Extreme Uy -46,26*10⁻³ m

 Finite Element Code for Soil and Rock Analyses	Project description Σχήμα 7.10 Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας	
	Project name CASE1	Step 31



Project description

Σχήμα 7.11 Οριζόντιες μετακινήσεις σήραγγας

Project name

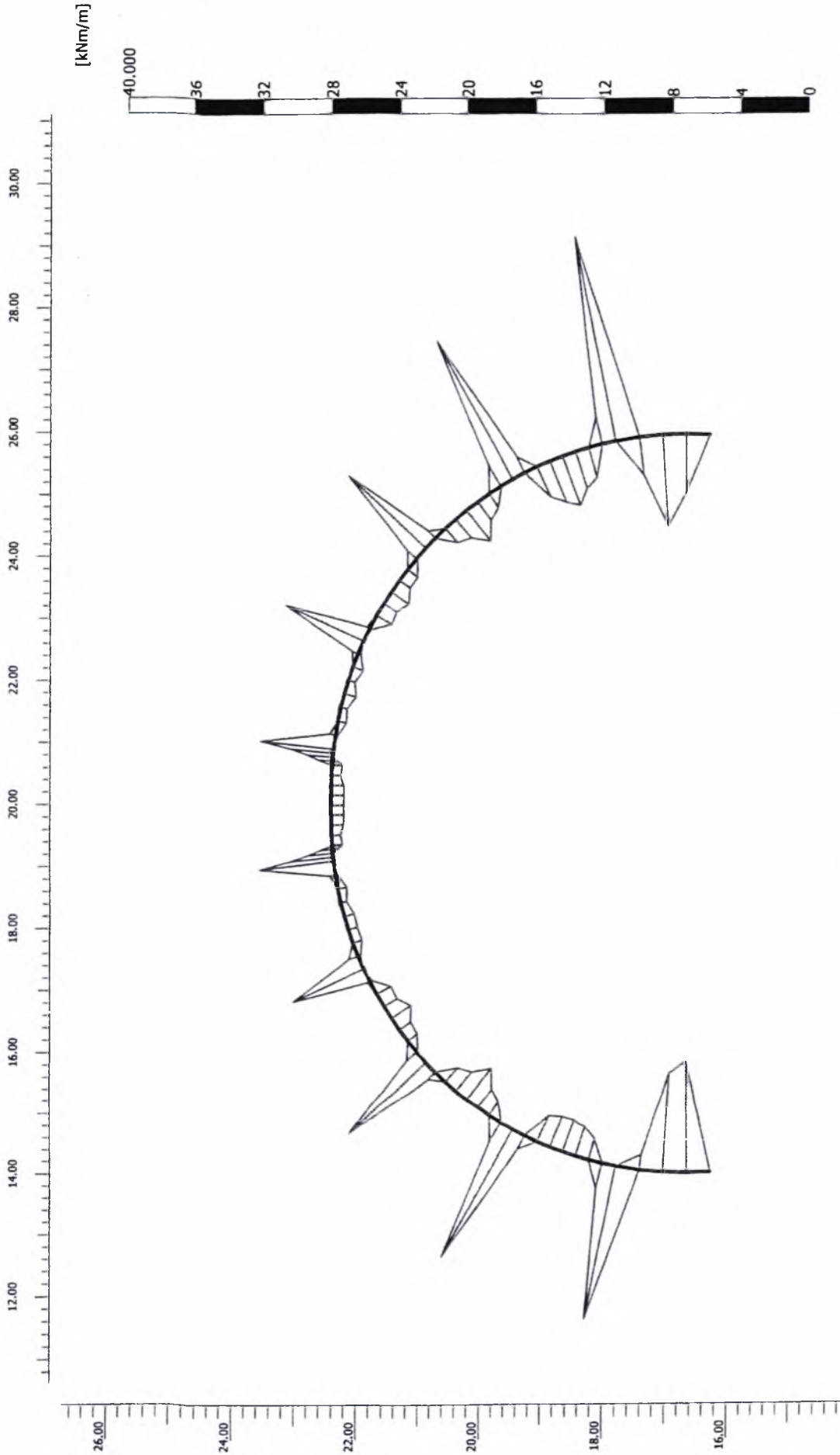
CASE1

Step

31

Date

16/05/07

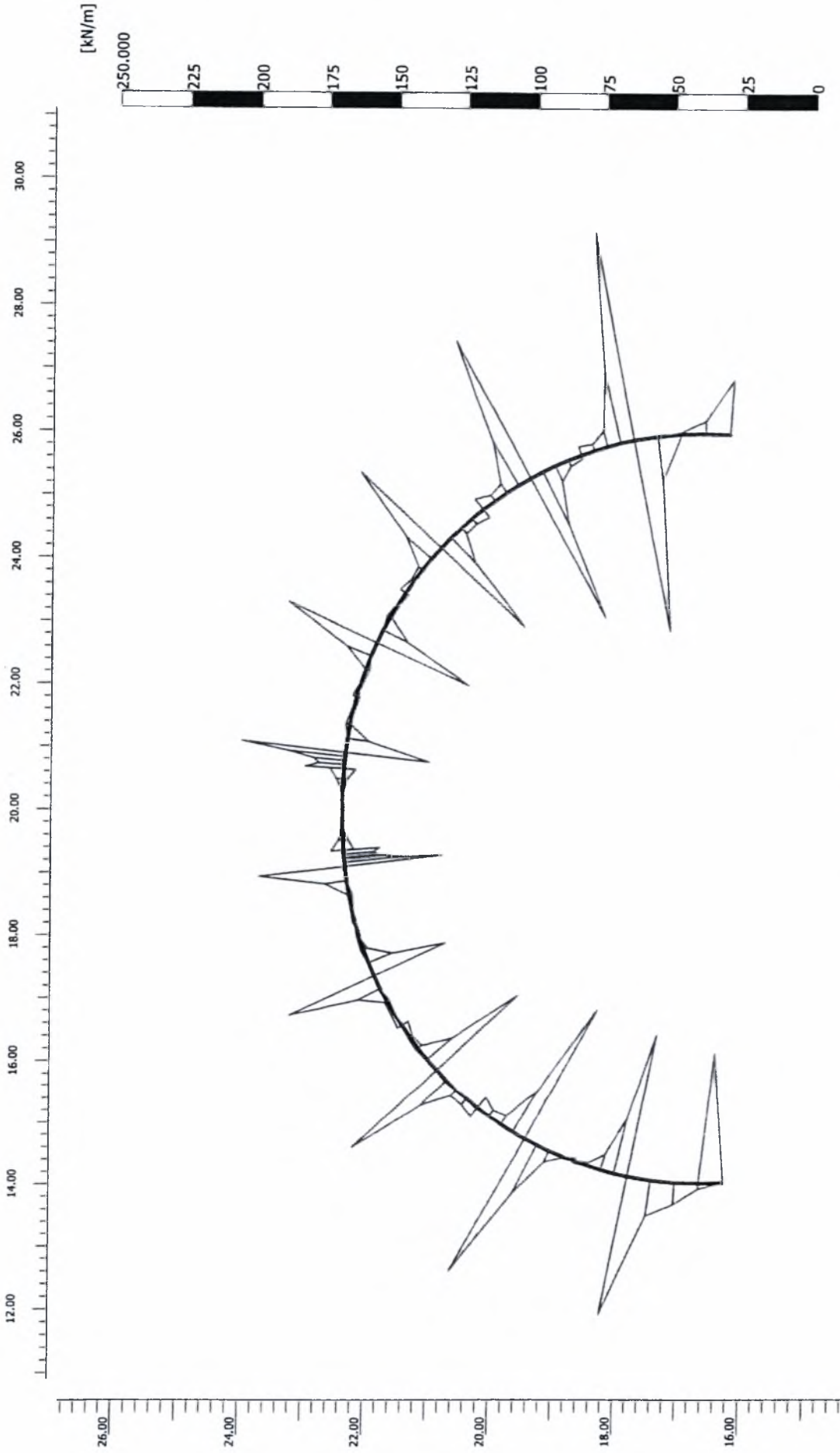


Σχήμα 7.12 Μέγιστη καμπτική ροπή πλαισίων σήραγγας

Project description

Project name	Step	Date
CASE1	31	16/05/07





Project description

Σχήμα 7.13 Μέγιστη διατμητική δύναμη πλαισίων σήραγγας

Project name

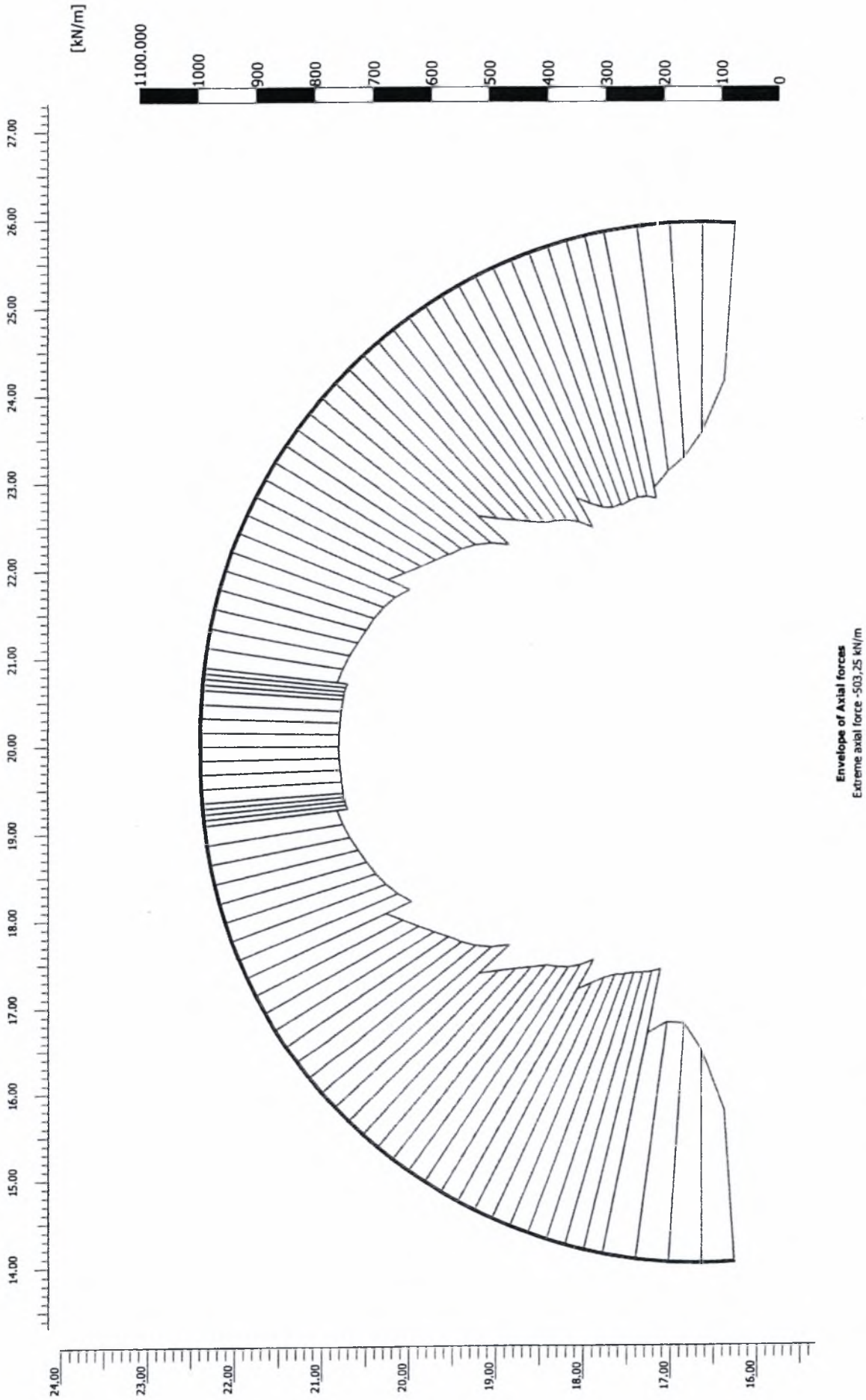
CASE1

Step

31

Date

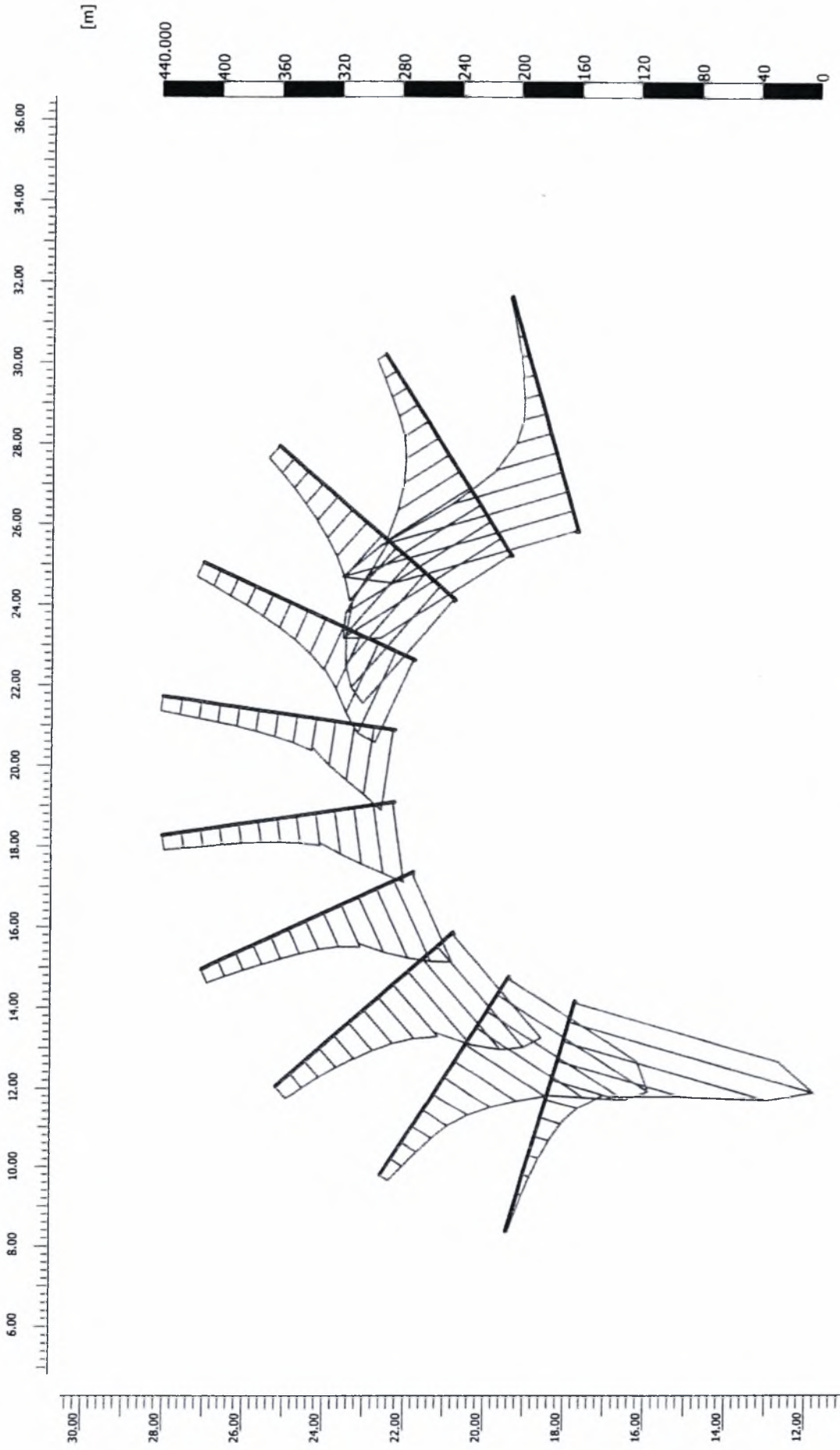
16/05/07



PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Project description: Σχήμα 7.14 Μέγιστη αξονική δύναμη πλαισίων σήραγγας

Project name	CASE1	Step	31	Date	16/05/07
--------------	-------	------	----	------	----------



Project description

Σχήμα 7.15 Μέγιστη δύναμη αγκυρίων πλαισίων σήραγγας

Project name

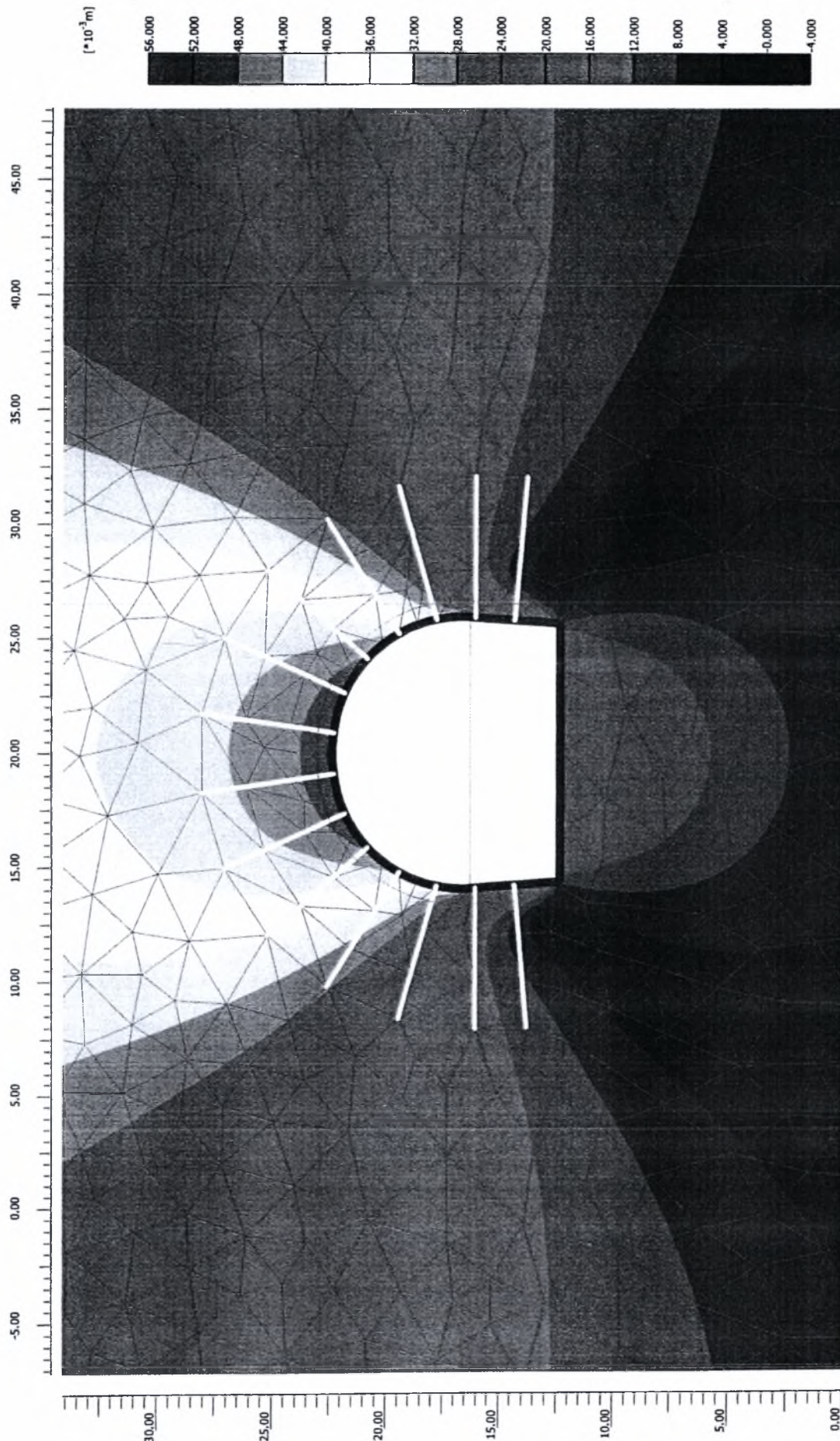
CASE1

Date

16/05/07

Step

31

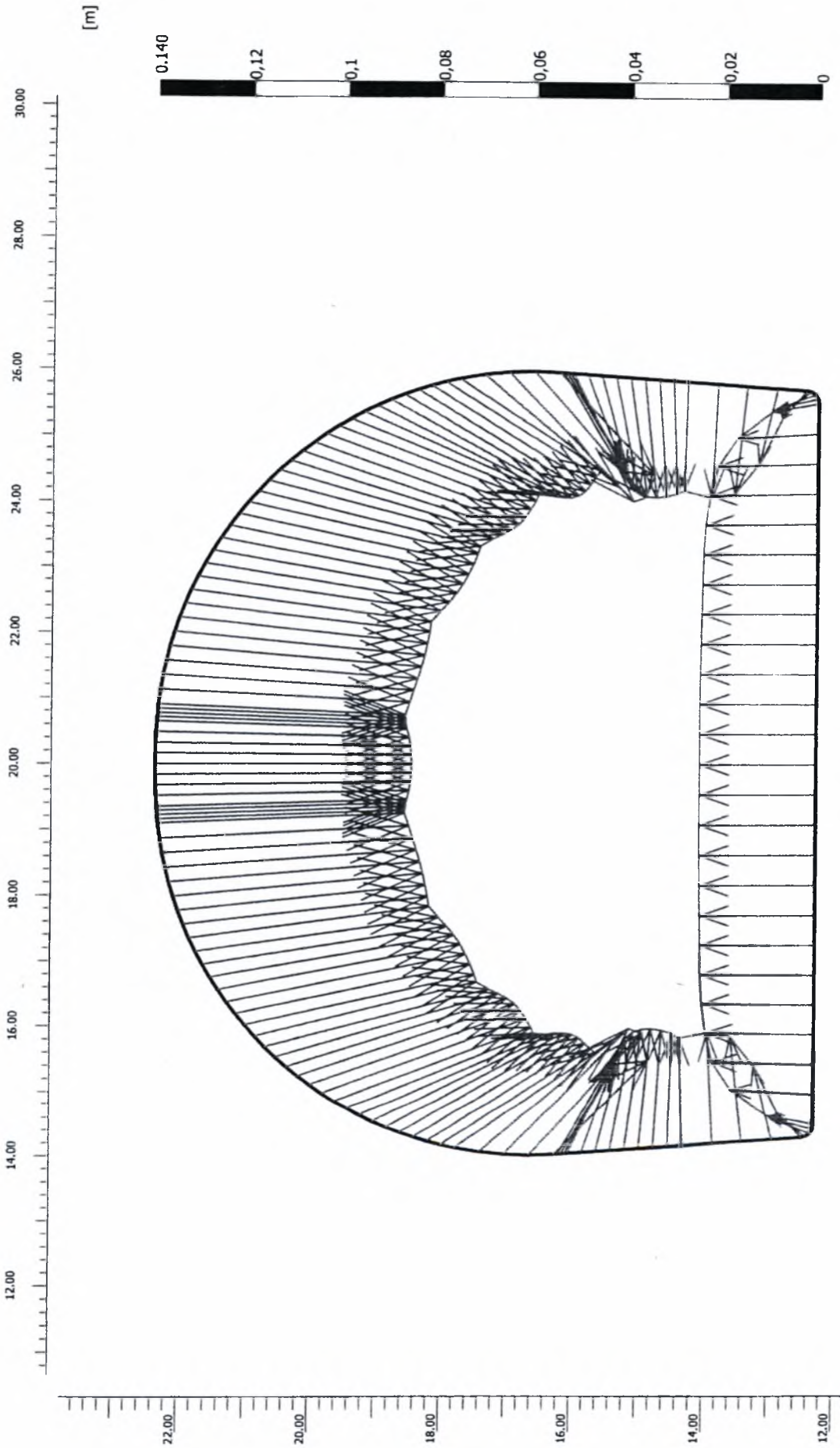


Total displacements (Utot)
Extreme Utot 54,32*10⁻³ m

PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses

Project description
Σχήμα 7.16α Ολικές μετακινήσεις

Project name CASE1	Step 60	Date 16/05/07
------------------------------	-------------------	-------------------------



Total displacements (Utot)
Extreme Utot 54,11*10⁻³ m

Project description

Σχήμα 7.16β Ολικές μετακινήσεις σήραγγας

Project name

CASE1

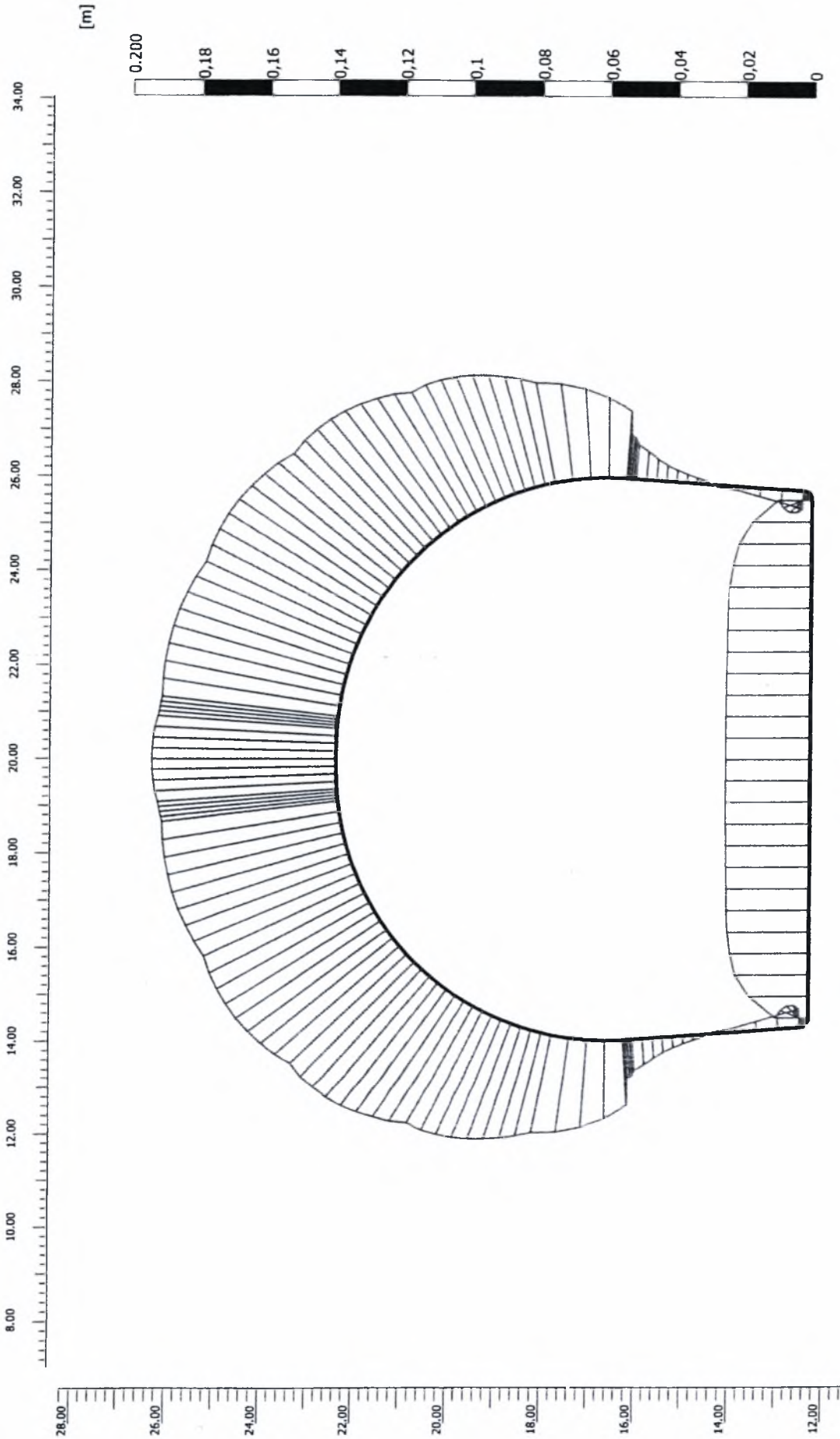
Step

60

Date

16/05/07

PLAXIS
Finite Element Code for Soil and Rock Analyses



Project description

Σχήμα 7.17 Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας

Project name

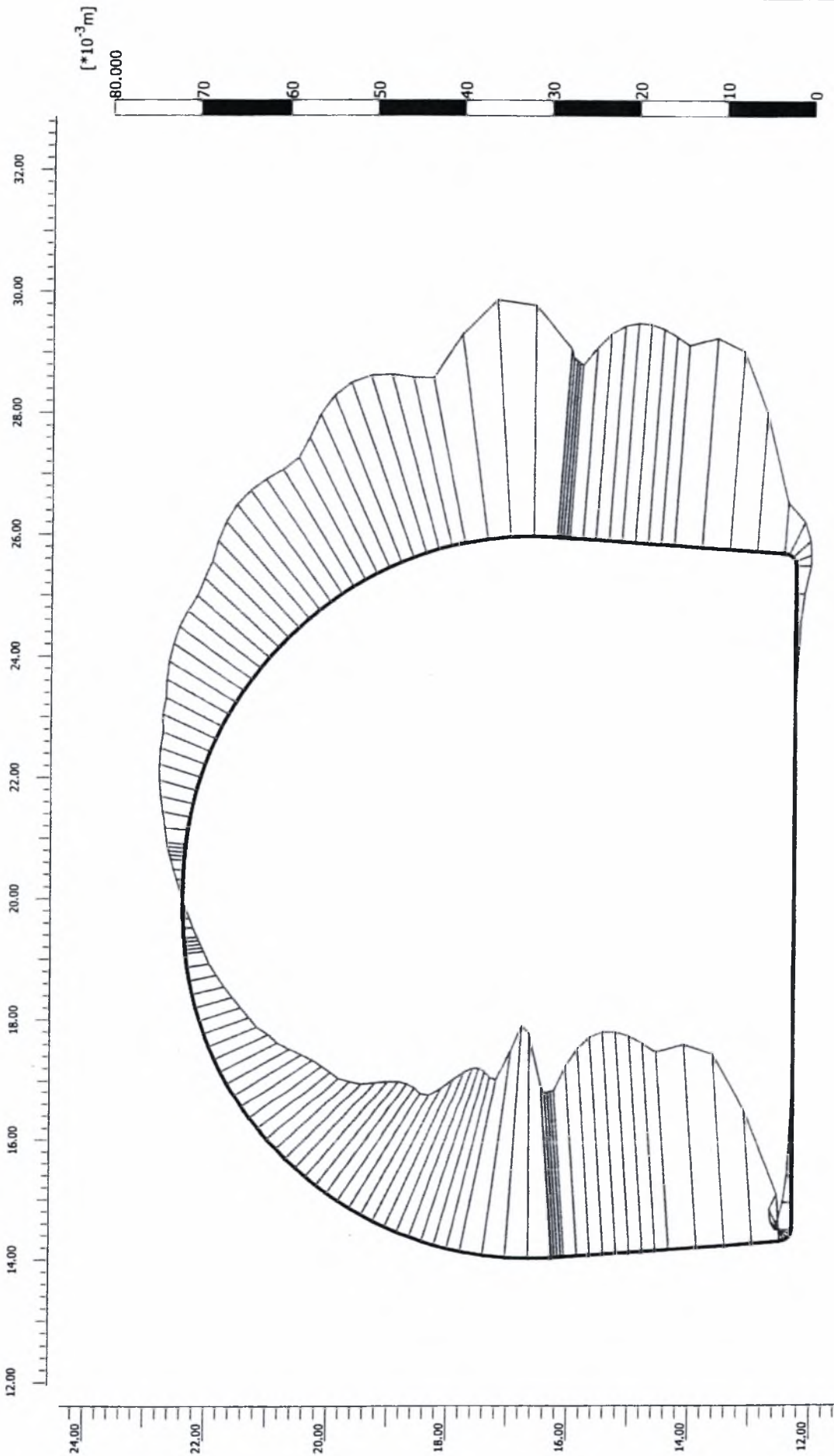
CASE1


Step

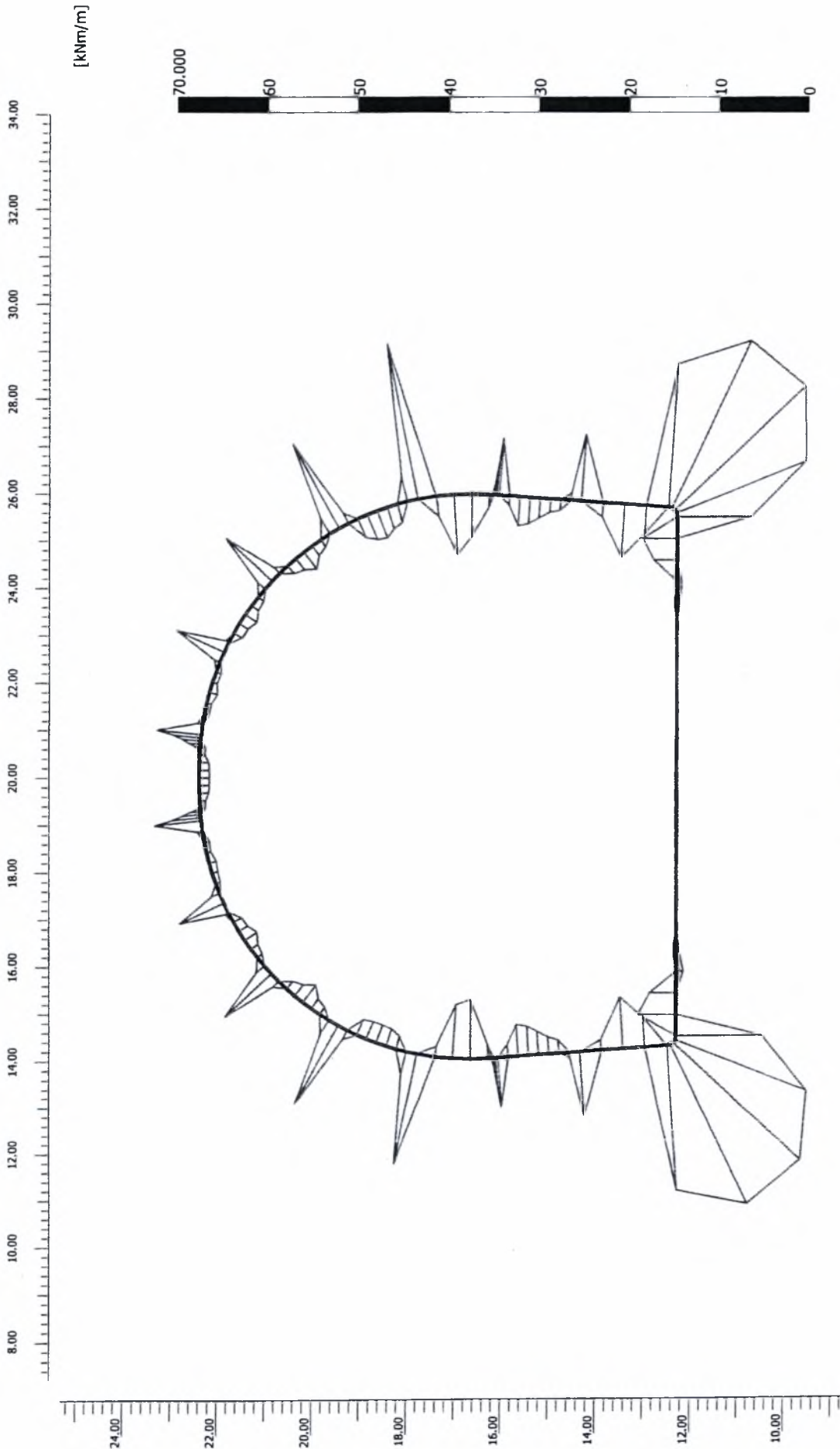
60

Date

16/05/07



 Finite Element Code for Soil and Rock Analyses	Project description Σχήμα 7.18 Οριζόντιες μετακινήσεις σήραγγας	
	Project name CASE1	Step 60



Project description

Σχήμα 7.19 Μέγιστη καμπτική ροπή πλαισίων σήραγγας

Project name

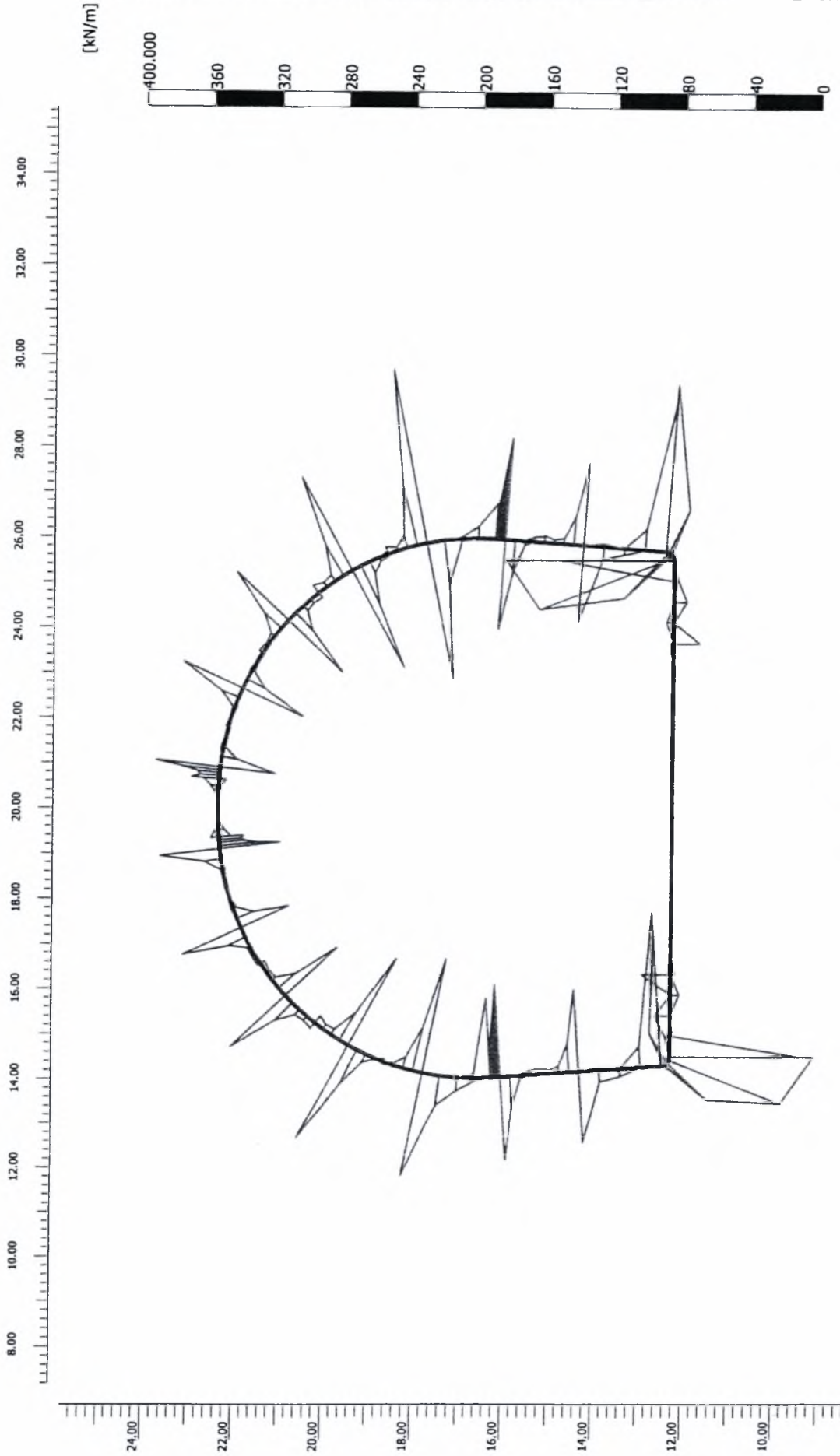
CASE1

Step

60

Date

16/05/07



Project description

Σχήμα 7.20 Μέγιστη διατμητική δύναμη πλαισίων σήραγγας

Project name

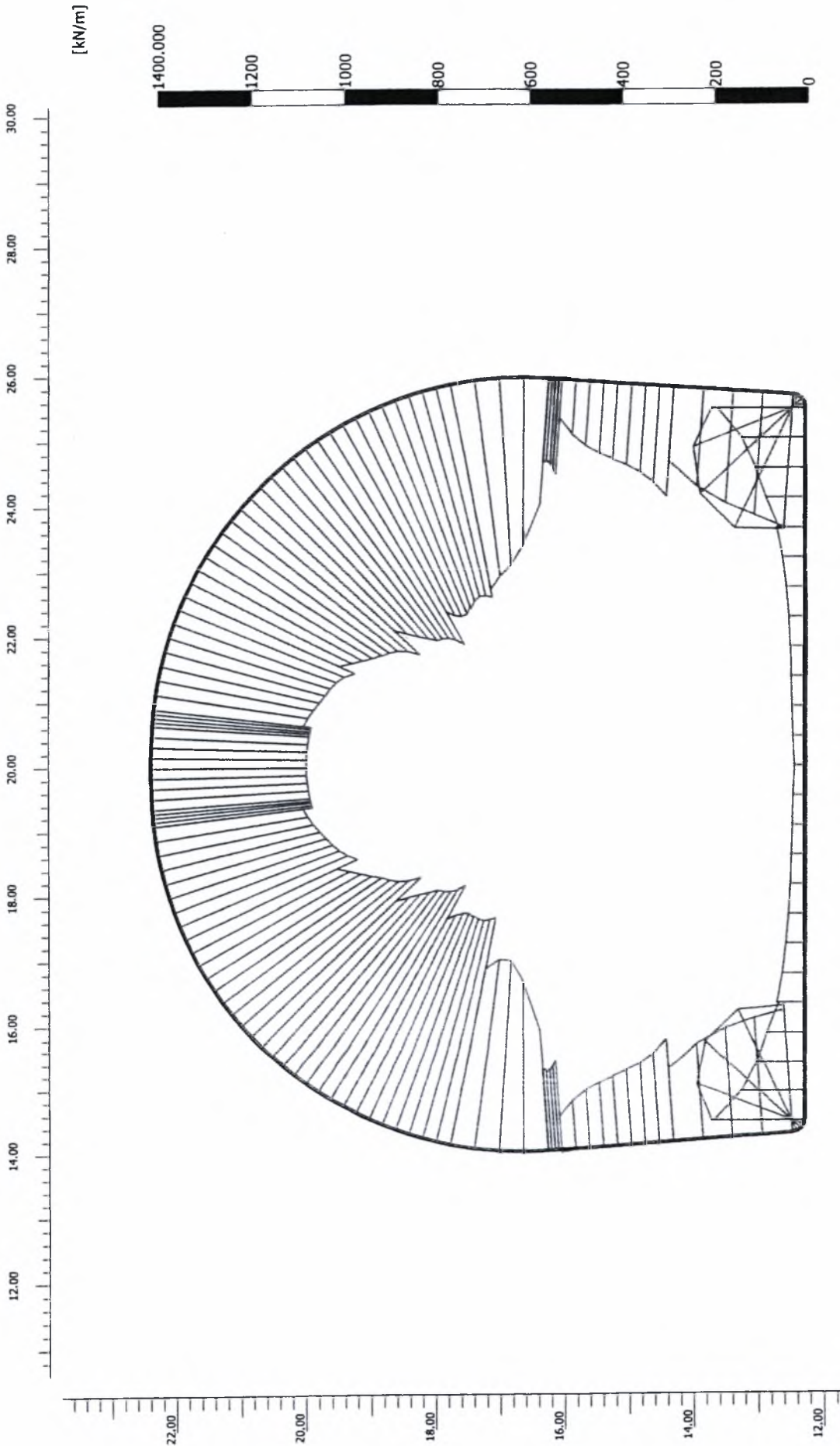
CASE1


Step

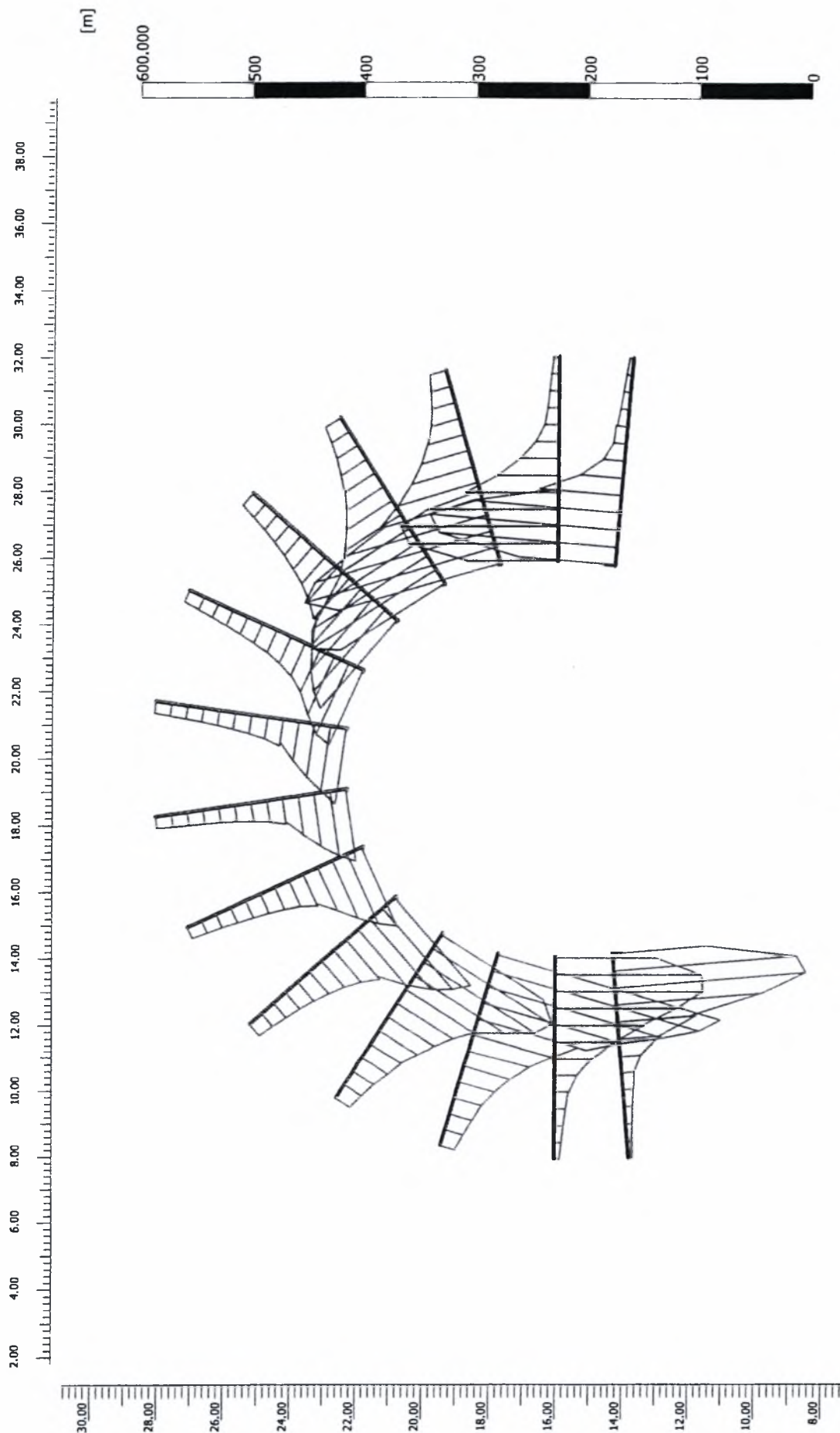
60

Date

16/05/07



 Finite Element Code for Soil and Rock Analyses	Project description Σχήμα 7.21 Μέγιστη αξονική δύναμη πλαισίων σήραγγας	
	Project name CASE1	Step 60



Project description

Σχήμα 7.22 Μέγιστη δύναμη αγκυρίων πλαισίων σήραγγας

Project name

CASE1

Step

60

Date

16/05/07

7.5 Παράδειγμα εφαρμογής διάνοιξης σήραγγας με τη χρήση ασπίδας (shield tunneling)

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής παρουσιάζεται η μεθοδολογία και οι παραδοχές που εφαρμόστηκαν κατά την προσομοίωση της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων με τη χρήση ασπίδας. Ειδικότερα και για την όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη προσομοίωση του προβλήματος, το επιθυμητό ποσοστό της απώλειας του εδαφικού όγκου (volume loss) αποδόθηκε χρησιμοποιώντας την ακόλουθη διαδικασία:

- i) Προσομοίωση της εκσκαφής στην περιοχή της σήραγγας με τη μέθοδο-β και χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές του λ .
- ii) Υπολογισμός των μετακινήσεων της διατομής της σήραγγας και εύρεση του ποσοστού μείωσης του εμβαδού της σε σχέση με τα αρχικά γεωμετρικά δεδομένα της. Υπογραμμίζεται πως το συγκεκριμένο ποσοστό μείωσης του εμβαδού ισοδυναμεί - λόγω θεώρησης συνθηκών επίπεδης παραμόρφωσης - σε αντίστοιχο ποσοστό μείωσης εδαφικού όγκου (volume loss).
- iii) Εκτίμηση της τιμής της παραμέτρου λ , η οποία οδηγεί στο επιθυμητό ποσοστό απώλειας εδαφικού όγκου.
- iv) Επίλυση του προβλήματος με την παραπάνω τιμή λ και αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων (π.χ. καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, εντοπισμός πλαστικών περιοχών κ.λπ.).

Τονίζεται πως η προαναφερθείσα μεθοδολογία εφαρμόστηκε αντί της άμεσης επιβολής του επιθυμητού ποσοστού μείωσης του όγκου, καθώς διαπιστώθηκε πως στην τελευταία περίπτωση επιβάλλεται ομοιόμορφη μείωση του όγκου (εμβαδού) της διατομής, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα (ή στις πραγματικές συνθήκες φόρτισης). Αντίθετα, με την μέθοδο που περιγράφεται παραπάνω το ποσοστό μείωσης του όγκου είναι το προεπιλεγέν, όμως το σχήμα της παραμόρφωσης είναι συμβατό με τον μηχανισμό μεταβολής της εντατικής κατάστασης, με συνέπεια τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης να κρίνονται πιο αξιόπιστα και περισσότερο ορθά και ακριβή.

Οι διαστάσεις, οι συνοριακές συνθήκες και ο κλίμακος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την αριθμητική προσομοίωση του έργου δίνονται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Συνοπτικά αναφέρεται πως οι διαστάσεις του

καννάβου επιλέχθησαν έτσι ώστε να αποφευχθεί - όσο το δυνατόν - η επιρροή των συντοριακών συνθηκών (ολίσθηση στα κατακόρυφα όρια, πάκτωση στο οριζόντιο) στην περιοχή κατασκευής της σήραγγας. Το έδαφος προσομοιώθηκε με τριγωνικά πεπερασμένα σημεία 15 κόμβων και 12 σημείων ολοκλήρωσης (Gauss points).

Τέλος, γίνεται η παραδοχή ότι η επιθυμητή τιμή της απώλειας όγκου είναι ίση με $V_L=1,50\%$.

Η υπολογιστική διαδικασία που εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της κατασκευαστικής ακολουθίας του έργου με απώτερο σκοπό τον έλεγχο των προτεινόμενων μέτρων υποστήριξης, της ευστάθειας των δύο φάσεων εκσκαφής και των αναμενόμενων μετακινήσεων, συνίσταται από τα ακόλουθα στάδια:

Στάδιο 0 : Υπολογισμός αρχικού πεδίου τάσεων θεωρώντας επίπεδη την επιφάνεια του φυσικού εδάφους ($\sigma_v=\gamma \cdot z$, $\sigma_H=K_0 \cdot \sigma_v$, $K_0=0,50$).

Στάδιο 1 : Μηδενισμός μετακινήσεων και απενεργοποίηση των εδαφικών στοιχείων στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας με χρήση συντελεστή χαλάρωσης ($\lambda=0,371$, τιμή που «ισοδυναμεί» στην επιθυμητή τιμή απώλειας όγκου $V_L=1,50\%$).

Στάδιο 2 : Ενεργοποίηση των στοιχείων μόνιμης αντιστήριξης (έγχυτο σκυρόδεμα πάχους 50cm).

Η προσομοίωση του έγχυτου σκυροδέματος έγινε με τη χρήση τυπικών εδαφικών στοιχείων γραμμικής ελαστικής συμπεριφοράς και αντίστοιχου πάχους, βάσει της σχετικής επιλογής που παρέχεται από τον χρησιμοποιούμενο κώδικα.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων της μόνιμης υποστήριξης και των γειτονικών τους εδαφικών λαμβάνεται υπόψη με τη χρήση στοιχείων διεπιφάνειας μηδενικού πάχους.

Το σύνολο των τιμών των παραμέτρων που αναφέρονται στα ως άνω στοιχεία δίνεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

Οι έλεγχοι που διενεργούνται - βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων - εστιάζονται στη συμπεριφορά της περιβάλλουσας του έργου βραχόμαζας καθώς και στην επάρκεια των προτεινόμενων μέτρων υποστήριξης.

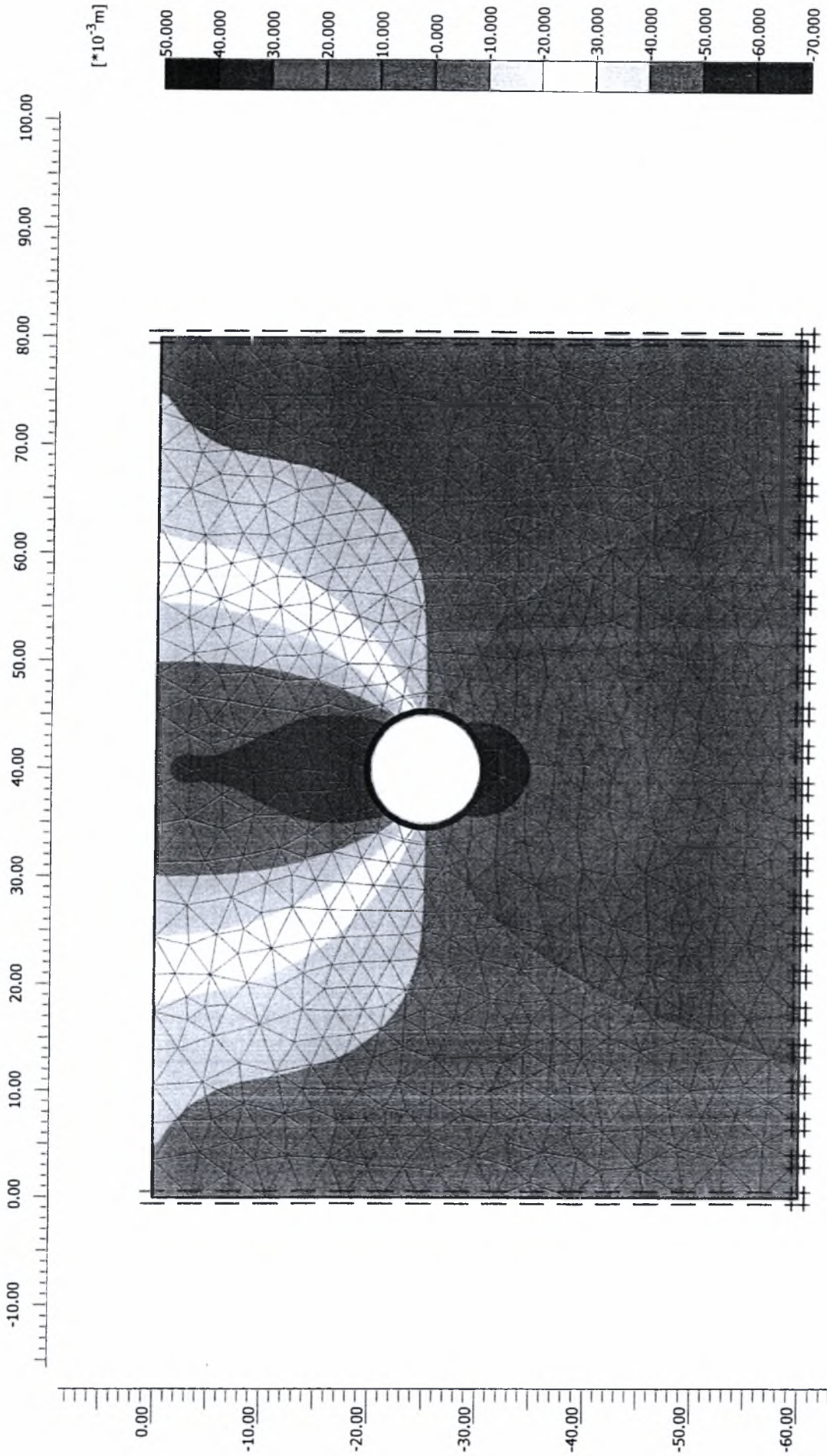
Ειδικότερα, η συμπεριφορά της βραχόμαζας διερευνήθηκε λαμβάνοντας υπόψη την έκταση της πιθανούς ζώνης αστοχίας περιμετρικά της εκσκαφής, την τυχόν δημιουργία πλαστικών περιοχών καθώς και το μέγεθος των μετακινήσεων των υπό εξέταση διατομών (σύγκλιση).

Σχετικά με την επάρκεια των μέτρων υποστήριξης εξετάσθηκαν οι προκύπτουσες τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών. Συνοπτικά, στον ακόλουθο πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και εν συνεχεία στα σχήματα 7.23 έως 7.29 ενδεικτικά αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης μετά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της σήραγγας.

Εντατικό μέγεθος	Ολοκλήρωση εκσκαφής
Μέγιστη καθίζηση στην επιφάνεια εδάφους	4,92cm (Σχ.7.23)
Μέγιστη ολική μετακίνηση «σήραγγας»	6,67cm (Σχ.7.24)
Μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση «σήραγγας»	6,67cm (Σχ.7.25)
Μέγιστη οριζόντια μετακίνηση «σήραγγας»	1,18cm (Σχ.7.26)
Μέγιστη καμπτική ροπή μόνιμης επένδυσης	9,0kNm (Σχ.7.27)
Μέγιστη διατμητική δύναμη μόνιμης επένδυσης	4,0kN (Σχ.7.28)
Μέγιστη αξονική δύναμη μόνιμης επένδυσης	731kN (Σχ.7.29)

Πίνακας 7.2: Αποτελέσματα αριθμητικής ανάλυσης (CASE2)

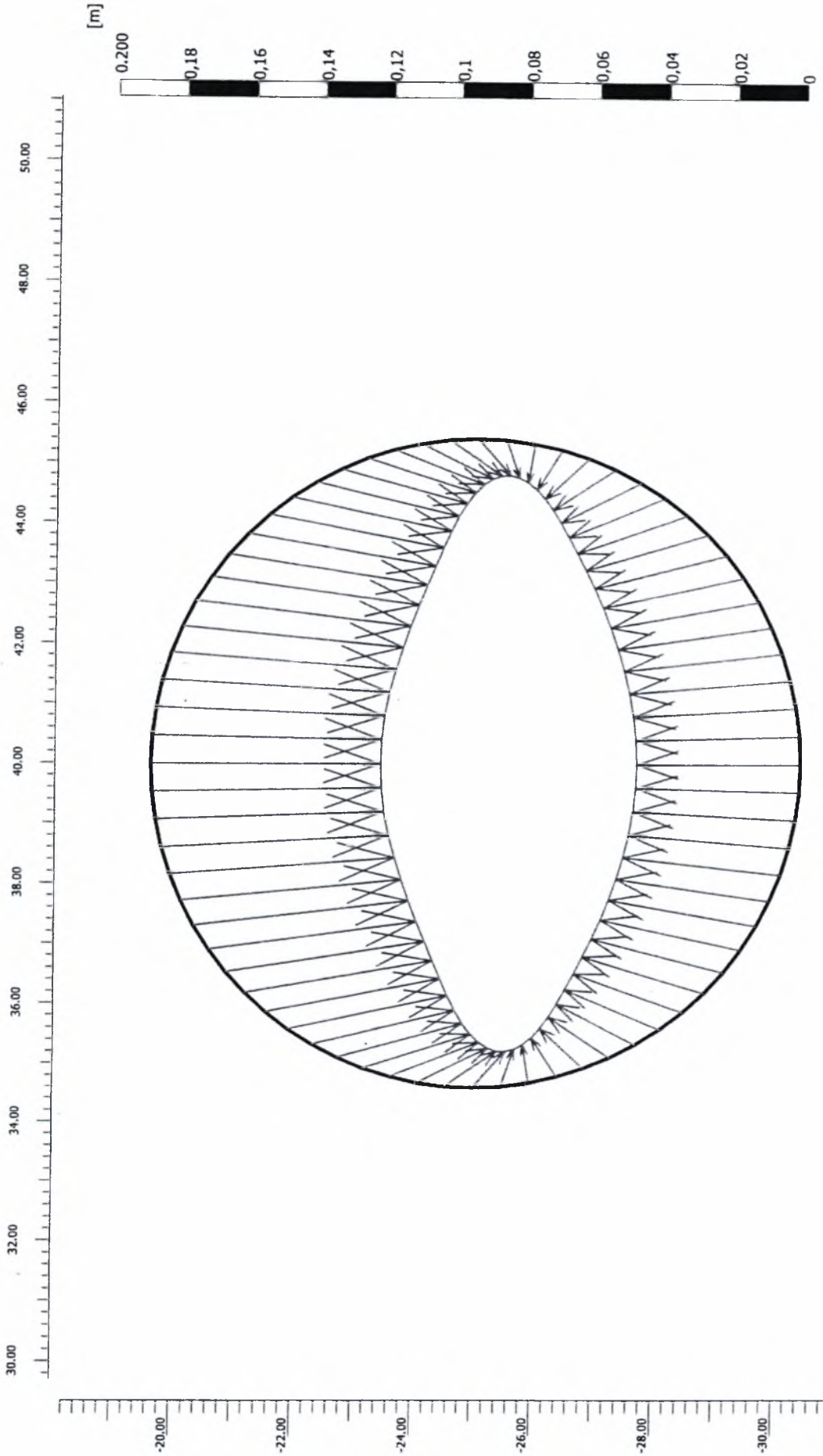
(Παράρτημα Β)



Project description

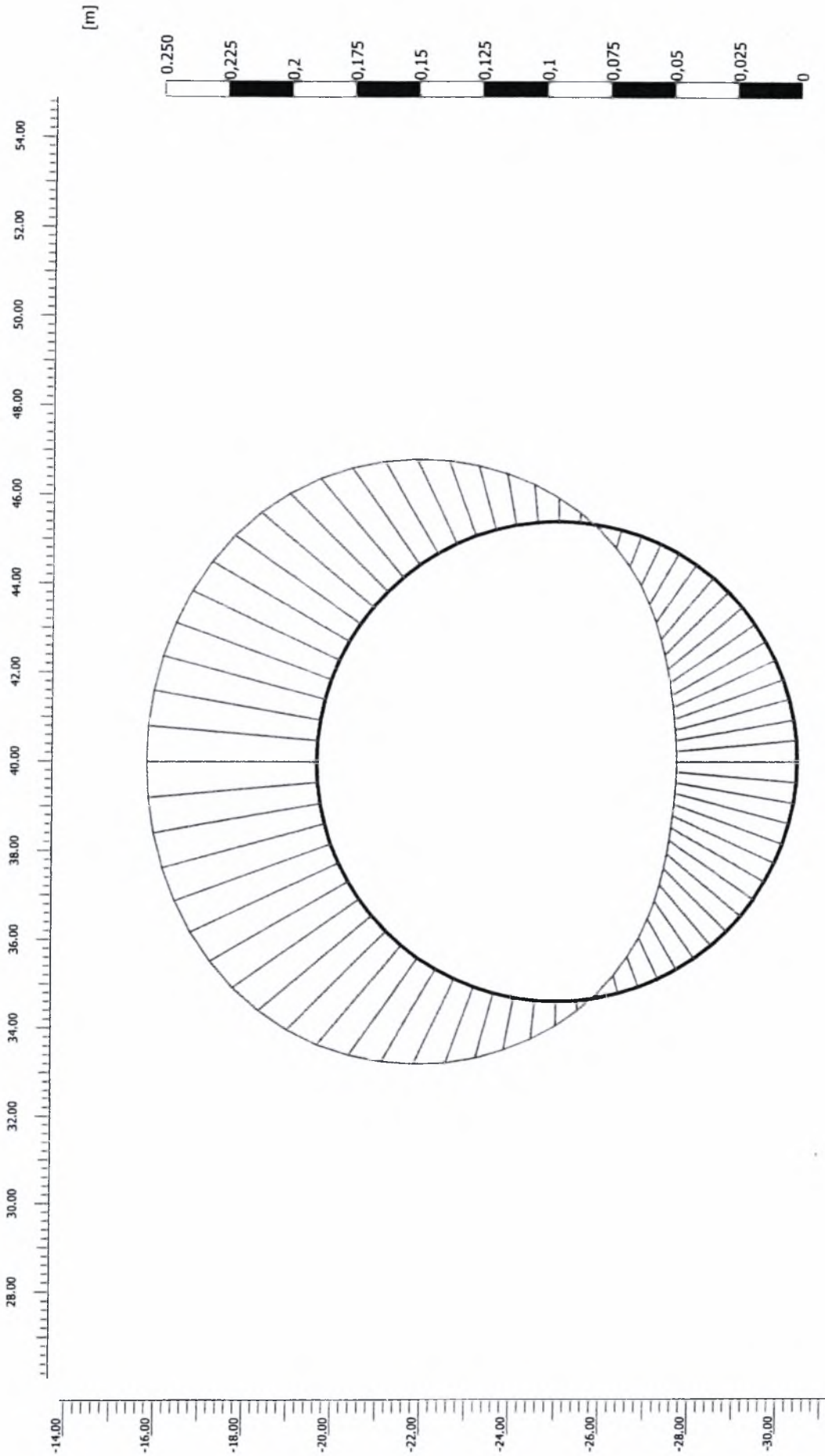
Σχήμα 7.23 Κατακόρυφες μετακινήσεις

Project name	case2	Step	9	Date	16/05/07
--------------	-------	------	---	------	----------



Total displacements (Utot)
 Extreme Utot $66,69 \cdot 10^{-3}$ m
 Realised contraction increment: 0,00% - Total realised contraction: 0,00%

PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses	Project description	
	Σχήμα 7.24 Ολικές μετακινήσεις σήραγγας	
Project name	Step	Date
case2	9	16/05/07



Project description

Σχήμα 7.25 Κατακόρυφες μετακινήσεις σήραγγας

Project name

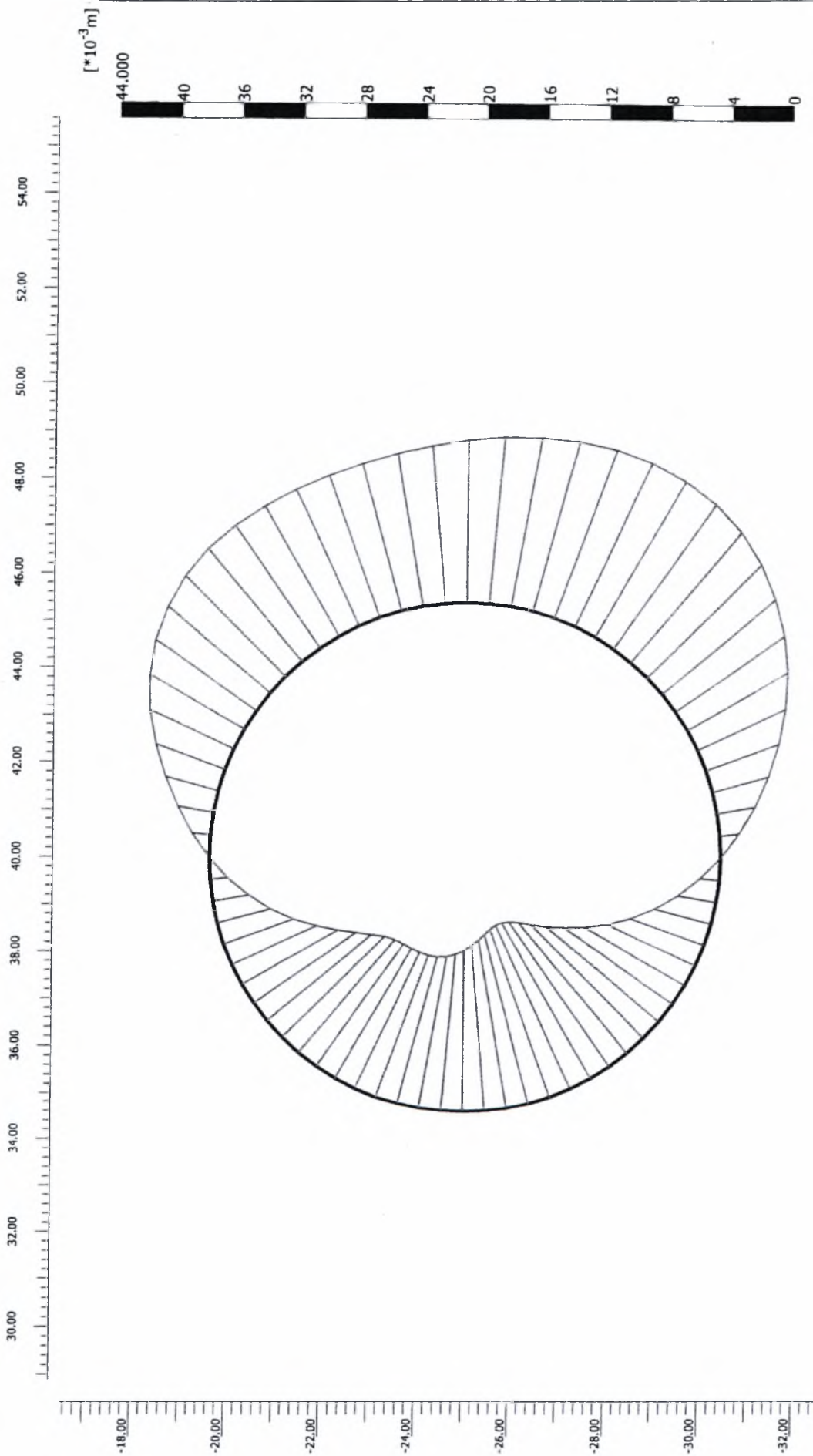
case2

Step

9

Date

16/05/07



Horizontal displacements (Ux)
 Extreme Ux 11.81*10⁻³ m
 Realised contraction increment: 0.00% - Total realised contraction: 0.00%

Project description

Σχήμα 7.26 Οριζόντιες μετακινήσεις σήραγγας

Project name

case2

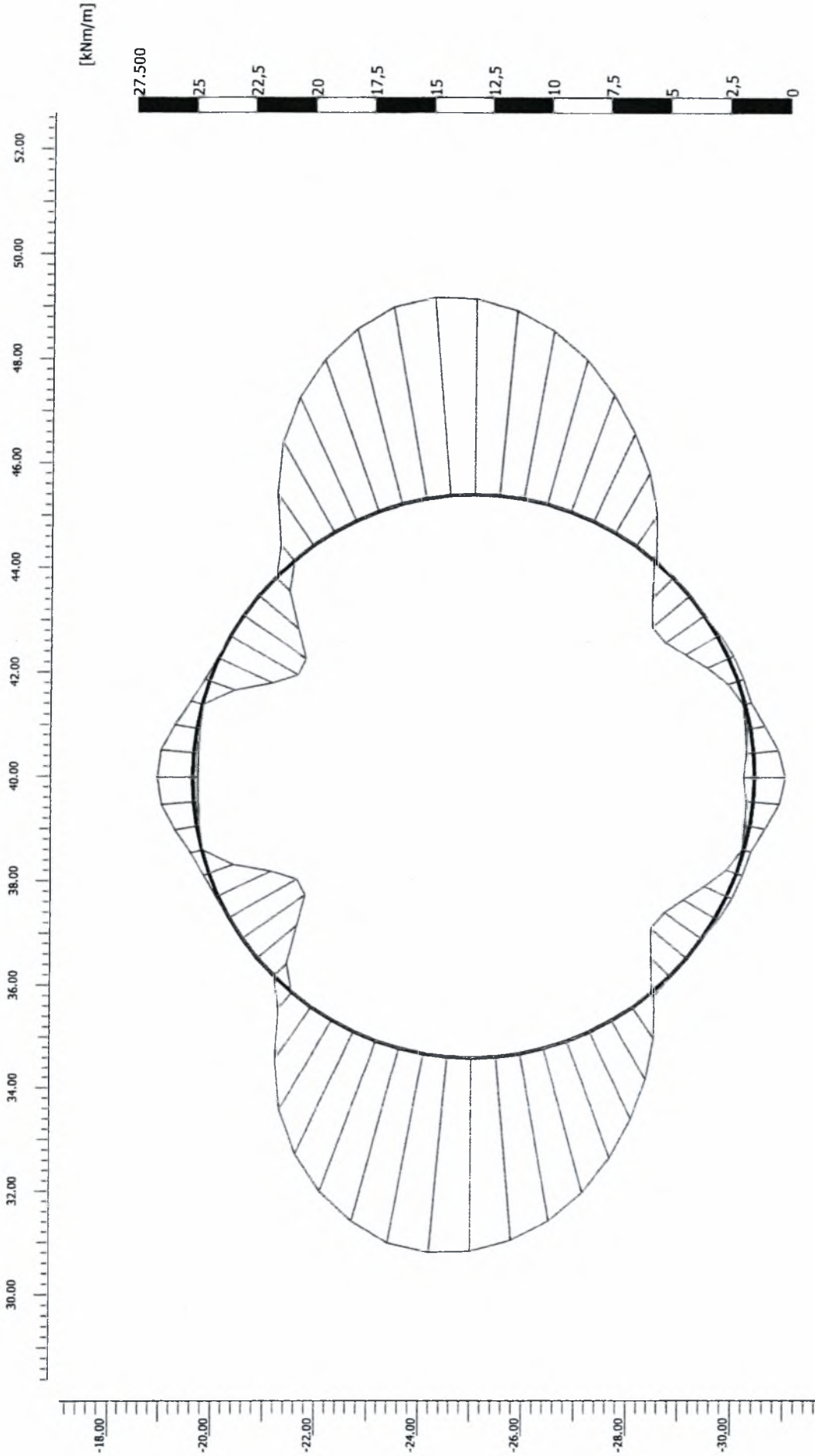
Step

9

Date

16/05/07





Project description

Σχήμα 7.27 Μέγιστη καμπτική ροπή μόνιμης επένδυσης σήραγγας

Project name

case2

Step

9

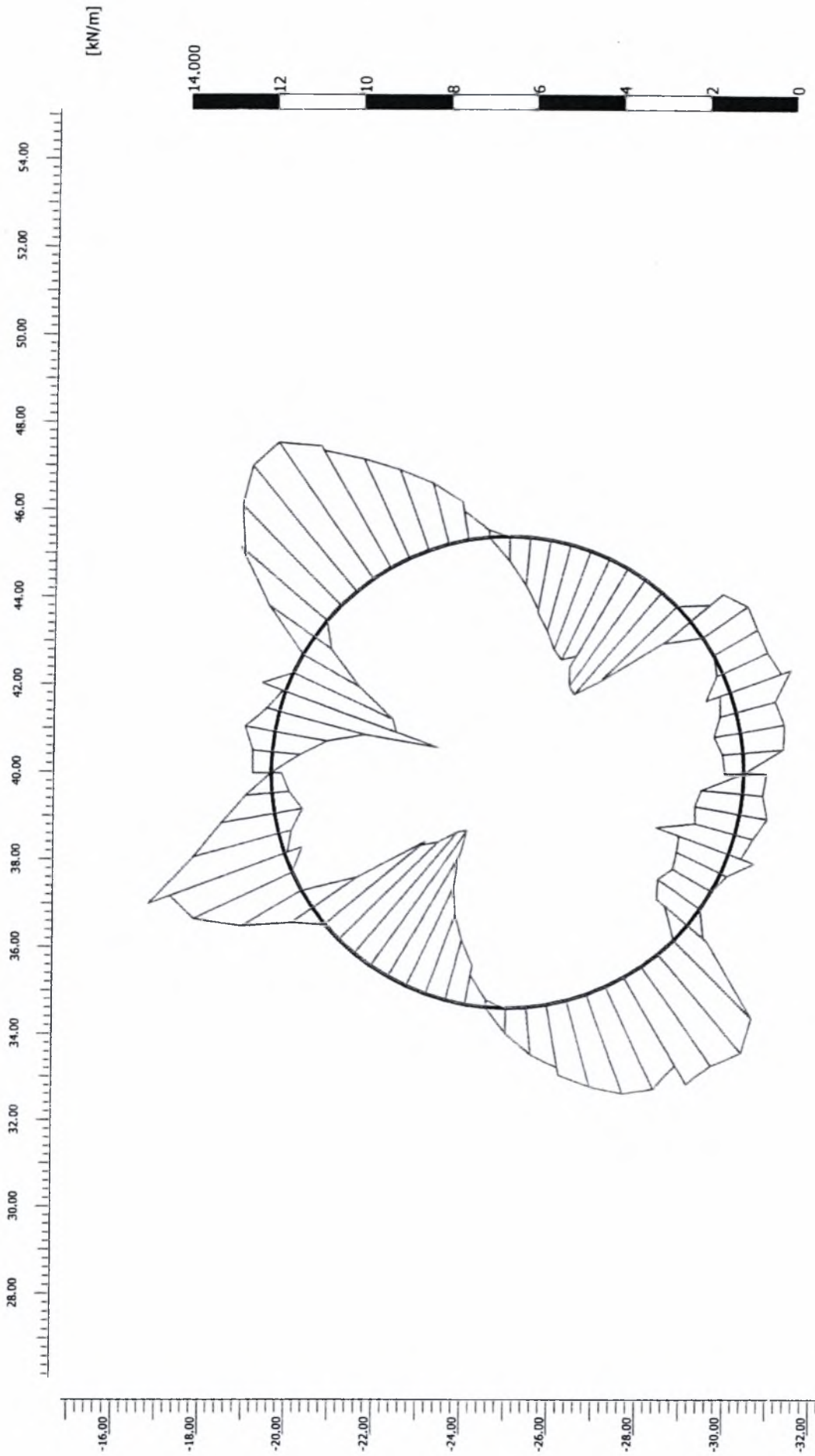
Date

16/05/07

Envelope of Bending moments

Extreme bending moment 6,38 kNm/m

Realised contraction increment: 0,00% - Total realised contraction: 0,00%



Project description

Σχήμα 7.28 Μέγιστη διατμητική δύναμη μόνιμης επένδυσης σήραγγας

Project name

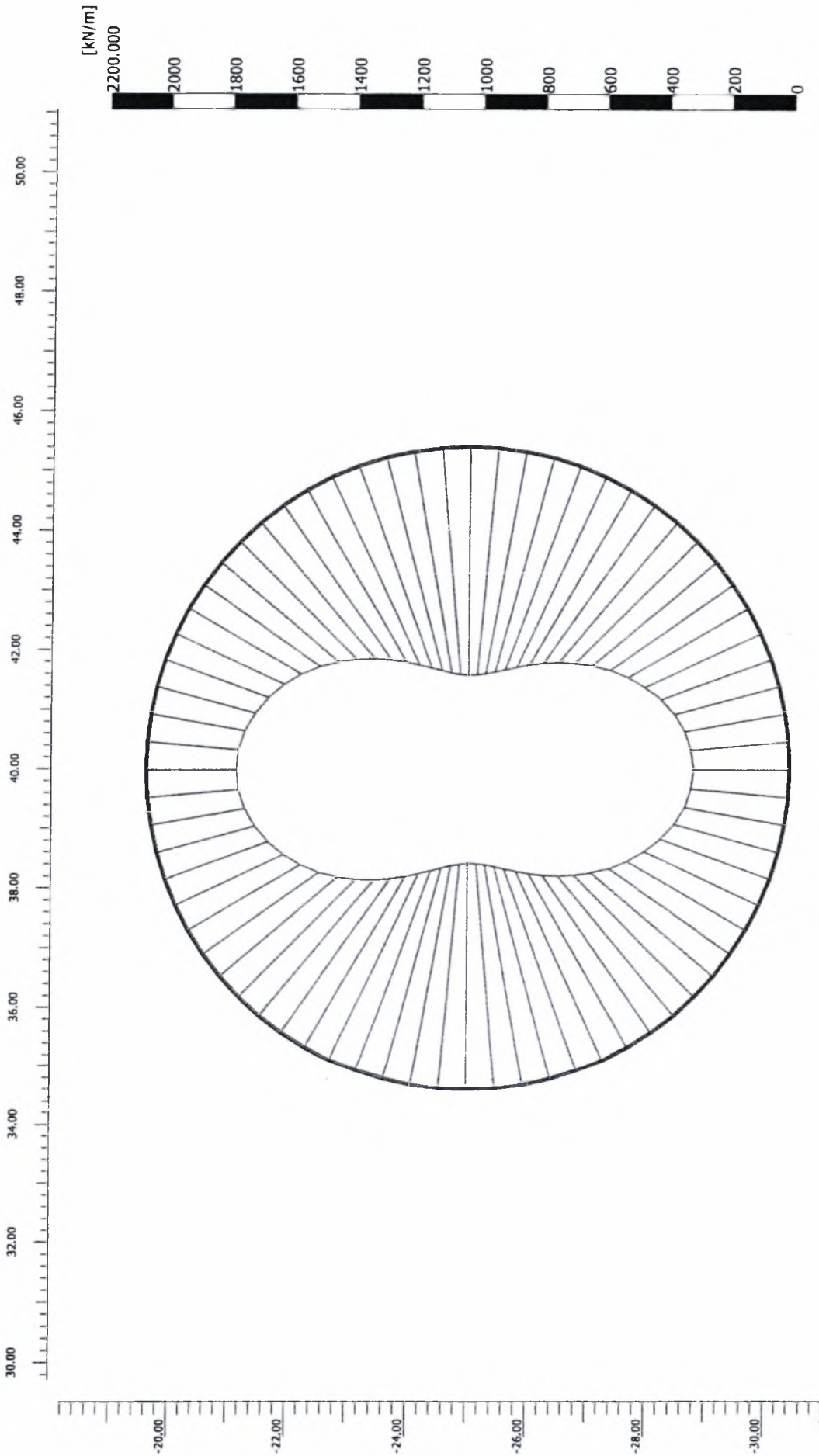
case2

Step

9

Date

16/05/07



Project description

Σχήμα 7.29 Μέγιστη αξονική δύναμη μόνιμης επένδυσης σήραγγας

Project name

case2

Step

9

Date

16/05/07

Βιβλιογραφία

1. Addenbrooke, T.I., Potts, D.M., Puzrin, A.M., 1997. “The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction”, *Géotechnique* 47 (3), 693-712.
2. Augarde, C.E., 1997. *Numerical Modelling of Tunnelling Processes for Assessment of Damage to Buildings*, ph.D. thesis, Oxford.
3. Augarde, C.E., Burd, H.J., Houlsby, G.T., 1998. “Some experience of modeling tunnelling in soft ground using three-dimensional finite elements”, *4th European conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, 603-612.
4. Bai, Y., Liu, Q.W., Zhao, J., 2000. “Deformation analysis based on shield tunnelling and soil conditions with case studies from Shanghai Metro tunnels”, *Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkeria, Rotterdam*, Mair & Taylor (eds), 527-534.
5. Benmebarek, S., Kastner, R., Ollier, C., 2000. “Reducing settlement caused by shield tunneling in alluvial soils”, *Proc. Of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkeria, Rotterdam*, Kusakabe, Fujita & Miyazaki (eds), 203-208.
6. Bloodworth, A.G., Augarde, C.E., Houlsby, C.T., 1999. “Transferring a non-linear Finite Element Code to the Oxford Supercomputer, Oscar”,

- Developments in Analysis and Design using Finite Element Methods*, Topping and Kumar (eds), 85-94.
7. Bloodworth, A.G., *Three-dimensional Analysis of Tunnelling Effects on Structures to Develop Design Methods*, ph. D. thesis, Oxford.
 8. Burd, H.J., Houlsby, G.T., Augarde, C.E., Liu, G., 2000. "Modelling Tunnelling-induced Settlement of Masonry Buildings", *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engineering* 143, 17-29.
 9. Chang, C.T., Wang, J.J., 2000. "Factors influencing the ground loss due to tunnels driven by EPB shield", *Proc. Of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkeria, Rotterdam*, Kusakabe, Fujita & Miyazaki (eds), 209-212.
 10. Chou Wei-I., Bobet A., 2002. "Predictions of Ground Deformations in Shallow Tunnels in Clay", *Tunnelling and Underground Space Technology* 17, 3-19.
 11. Chow, L., 1994. *The Prediction of Surface Settlements Due to Tunnelling in Soft Ground*, Thesis, Oxford.
 12. Clough, G.W., Schmidt, B., 1981. "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay", *Soft Clay Engineering, Elsevier*, 569-634.
 13. Dasari, G.,R., Rawlings, C.,G., Bolton, M.D., 1996. "Numerical Modelling of a NATM Tunnel Construction in London Clay", *Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkeria, Rotterdam*, Mair & Taylor (eds), 491-496.

14. Franzius, J.N., 2003. *Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence*, ph. D. thesis, London.
15. Γεωργιάδης, Κ., 2004. *Αριθμητικές Μέθοδοι στη Γεωτεχνική Μηχανική: Καταστατικοί Νόμοι Συμπεριφοράς Εδάφους*, Θεσσαλονίκη.
16. Grammatikopoulou, A., 2004. *Development, Implementation and Application of Kinematic Hardening Models for Overconsolidated Clays*, ph. D. thesis, London.
17. Guedon. P., 1999. "The Design, Sizing and Construction of Precast Concrete Segments installed at the Rear of a Tunnel Boring Machine (TBM)", *AFTES*, 1-34.
18. Καβαλάρη, Φ., 1999. "Μετρό της Αθήνας: Οι Μέθοδοι Κατασκευής του Έργου, τα Τεχνικά Προβλήματα και οι Τρόποι Αντιμετώπισής τους", *TEE* 2051.
19. Καββαδάς, Μ., 1999. *Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπόγειων Έργων*,
20. Καραουλάνης, Φ., 2001. *Καθιζήσεις λόγω Διάνοιξης Σηράγγων*, Θεσσαλονίκη.
21. Κουκουτάς, Σ., 2001. "Το Μετρό της Αθήνας: Μέθοδοι Κατασκευής και τα σχετικά Τεχνικά Προβλήματα", *TEE* 2156.
22. Leblais, Y., 1999. "Settlements induced by Tunnelling", *AFTES*, 129-150.

23. Liu, G., 1997. *Numerical Modelling of Damage to Masonry Buildings Due to Tunnelling*, ph.D. thesis, Oxford.
24. Longchamp, P., 1999. “Choosing Mechanized Tunnelling Techniques”, *AFTES*.
25. Mair, R.J., 2001. “Research on Tunnelling-induced Ground Movements and their Effects on Buildings-Lessons from the Jubilee Line Extension”, *Response of Buildings to Excavation-induced Ground Movements. Proceedings of the International Conference held at Imperial College, London, UK, 17-18 July 2001*, 4-22.
26. Μαραγκός, Χ. Ν., 1997. *Τεχνικά έργα υποδομής: κατασκευές στην επιφάνεια του βράχου, υπόγειες κατασκευές, φράγματα*, Θεσσαλονίκη.
27. Μαραγκουδάκη, Α., 2005. *Ευστάθεια Μετώπου Σηράγγας*, Θεσσαλονίκη.
28. Μαρίνος, Γ.Π., Μπενίση, Δ.Μ., Κορκάρης, Β.Κ., 2001. “Διερεύνηση επί των Συνθηκών που Προκαλούν Καθιζήσεις κατά τη Μηχανοποιημένη Διάνοιξη Σηράγγων σε Αστικό Περιβάλλον. Εμπειρίες από την Κατασκευή του Μετρό Αθηνών, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, 2001, 537-544.
29. Panet, M., 2001. “The Convergence- Confinement Method”, *AFTES*.
30. Pickhaver, J., 2004. *Numerical Modelling of Building Response to Tunnelling. Towards a New Damage Assessment Method*, University of Oxford.

31. Πρωτοψάλτης, Β., Σοφιανός, Α. Ι., Πάππου, Θ., Filus, M., 2001. “Ανάλυση Σηράγγων με Χρήση Τρισδιάστατων Προσομοιωμάτων Πεπερασμένων Στοιχείων”, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, 2001, 545-552.
32. Sharma, J.S., Bolton, M.D., 1995. “A New Technique for Simulation of Collapse of a Tunnel in a Drum Centrifuge”, *Technical Report No. CUED/D-Soils/TR286*.
33. Sharma, J.S., Bolton, M.D., Boyle, R.E., 2001. “A New Technique for Simulation of Tunnel Excavation in a Centrifuge”, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 24, No. 4, 343-349*.
34. Sugiyama Tadashi, Toshiyuki Hagiwara, Toshi Nomoto, Masaaki Nomoto, Yutaka Ano, R.J. Mair, M.D. Bolton, Kenichi Soga, 1999. “Observations of Ground Movements during Tunnel Construction by Slurry Shield Method at the Docklands Light Railway Lewishan Extension- East London”, *Soils and Foundation vol. 39, no.3, 99-112*.
35. Tan, W.L., Ranjith, P.G.,
36. Τόλης, Σ.Β., Ντουνιάς, Γ.Θ., 2001. “Ανάστροφη Ανάλυση Σηράγγων – Παραδείγματα από το Μετρό της Αθήνας”, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, 2001, 601-605.
37. Τσιαμπούση, Α., 2005. *Αριθμητική Προσομοίωση της Μελέτης Σηράγγων*, Θεσσαλονίκη.
38. Τσότσος, Σ. Προσωπικές σημειώσεις

39. Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., Moller, S.C., 2002. "On a Smart Use of 3D-FEM in Tunnelling",. *Proceedings of the 8th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics- NUMOG VIII*. Balkema, Rotterdam, 361-366.
40. Wongsaroj, J., Soga, K., Mair, R.J., Komiya, K., Three-dimensional Finite
41. Χατζηγώγος, Θ., 2002. Αριθμητικές Μέθοδοι στη Γεωτεχνική Μηχανική: Σημειώσεις Θεωρίας, Θεσσαλονίκη.
42. Zhang, D.M., Huang, H.W., Hicher, P.Y.,

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091278

