

Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Διδακτορική Διατριβή με τίτλο:

**Μελέτη των συνθηκών ευστάθειας και
καθιζήσεων συστημάτων υπογείων έργων κάτω
από κατοικημένες περιοχές που
κατασκευάζονται με τη μέθοδο NATM**

Συγγραφέας:
Γεώργιος Σαράτσης

Δεκέμβριος 2014

**Μελέτη των συνθηκών ευστάθειας και καθιζήσεων
συστημάτων υπογείων έργων κάτω από κατοικημένες
περιοχές που κατασκευάζονται με τη μέθοδο NATM**

Υποψήφιος Διδάκτορας:
Σαράτσης Γεώργιος

Δεκέμβριος 2014

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:
Καθηγητής Γ. Εξαδάκτυλος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Ζ. Αγιουτάντης
Καθηγητής Ε. Παπαμίχος
Καθηγητής Σ. Μπαντής
Καθηγητής Γ. Σταυρουλάκης
Επ. Καθηγήτρια Μ. Σταυροπούλου
Επ. Καθηγητής Ε. Στειακάκης

Περιεχόμενα

1	Περί της μεθόδου NATM για την διάνοιξη και κατασκευή αβαθών ση- ράγγων	1
1.1	Εισαγωγή	1
1.2	Μέθοδος κατασκευής σηράγγων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (NATM)	6
1.3	Βασικές αρχές σχεδιασμού αβαθών σηράγγων	24
1.4	Σχηματισμός διατμητικών ζωνών σε εδάφη και πετρώματα	27
1.5	Το πρόβλημα του υποχωρούντος «θυροπετάσματος»	31
1.6	Το μοντέλο αντοχής Mohr-Coulomb και το μοντέλο κράτυνσης/χαλάρωσης των παραμέτρων αντοχής γεωλογικών υλικών	33
2	Οι συνθήκες κατάρρευσης του σταθμού Pinheiros	37
2.1	Θέση του περιστατικού κατάρρευσης	37
2.2	Γεωλογία της περιοχής	40
2.3	Δομικά γεωλογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος	42
2.4	Σχεδιασμός των προσωρινών μέτρων υποστήλωσης	42
2.5	Προηγούμενες ερευνητικές εργασίες διερεύνησης του φαινομένου κατάρρευσης του σταθμού Pinheiros	45
3	Ανάδρομη αναλυτική και αριθμητική ανάλυση του ανυποστήλωτου συ- στήματος φρέατος-θαλάμου	54
3.1	Αναλυτικό μοντέλο κατάρρευσης αβαθών σηράγγων	54
3.1.1	Εισαγωγή	54
3.1.2	Εντοπισμός της παραμόρφωσης εντός ζώνης διάτμησης (shear band)	55
3.1.3	Διασταλτικότητα των εδαφών και των πετρωμάτων	56
3.1.4	Το κρίσιμο βάθος ανυποστήρικτης αβαθούς σήραγγας σε έδαφος με συνοχή και τριβή	62
3.2	Ανάδρομη αριθμητική ανάλυση του ανυποστήλωτου συστήματος φρέατος-θαλάμου και αλληλεπίδραση πετρώματος – εδάφους	72
3.2.1	Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας	74
3.2.2	Αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης	76

4	Ανάδρομη αριθμητική ανάλυση του υποστυλωμένου συστήματος φρέατος-θαλάμου και αλληλεπίδραση πετρώματος - εδάφους	82
4.1	Περιγραφή του τριδιάστατου αριθμητικού μοντέλου	82
4.2	Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας	84
4.3	Τελικό μοντέλο και αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης	86
4.4	Προτεινόμενη διάταξη εκτασιομέτρων για την έγκαιρη πρόβλεψη της κατάρρευσης	92
5	Συμπεράσματα - Προτάσεις	95

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Τριδιάστατη απεικόνιση του σταθμού Pinheiros στο μετρό του Sao Paulo της Βραζιλίας (Barros et al., 2008)	2
1.2	Μέθοδος σταδιακής κατασκευής σιράγγων με τη μέθοδο NATM ή CTM (α) εκσκαφή του προπορευόμενου μετώπου κορυφής (top heading), (β) τοποθέτηση προσωρινών μέτρων υποστήλωσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια κ.λπ.) και εκσκαφή της ορθής βαθμίδας, και (γ) μόνιμα μέτρα υποστήλωσης, υδατοστεγάνωσης και τοποθέτηση της τελικής υποδομής της σιδηροδρομικής σήραγγας.	3
1.3	α) Διάδοση διατμητικών ζωνών από τη στέψη σήραγγας και σχηματισμός κινηματικά ασταθούς πυραμιδοειδούς όγκου και β) κατάρρευση του φρέατος στο Σαο Πάολο Βραζιλίας στις 12 Ιανουαρίου 2007 (Oliveira, 2008).	4
1.4	Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού αβαθών σιράγγων με τη μέθοδο NATM.	6
1.5	(α) Κορυφαίο μέτωπο (θόλος) με βαθμίδα, σε εγκάρσια (αριστερά) και διαμήκη τομή (δεξιά)(1. Calotte, 2. Βαθμίδα), (β) ισομετρική άποψη του κορυφαίου-προπορευόμενου μετώπου, της βαθμίδας (bench) αντίστροφου τοξωτού δαπέδου (Invert) (Kolymbas, 2005)	7
1.6	(α) Βελτιστοποίηση των συνθηκών σύγκλισης και ευστάθειας της σήραγγας κατά Müller & Fecker (1978), και (β) λεπτομέρειες υπολογισμού των τελικών φορτίων επί της υποστήλωσης και του εδάφους ανάλογα με την απόσταση τοποθέτησης της υποστήλωσης από το μέτωπο της σήραγγας.	8
1.7	Σκίτσο του καταρρεύσαντος συστήματος φρέατος-στοάς στο αεροδρόμιο του Heathrow (Oliver, 1994)	10
1.8	Μορφή των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους: (α) κατανομή της οριζόντιας μετατόπισης και παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια τομή στον άξονα της σήραγγας και η «σκάφη» της καθίζησης (settlement trough), (β) διαμήκες προφίλ της καθίζησης σε τομή παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας, και (γ) διαμήκες προφίλ της ακτινικής μετατόπισης στο σύνορο σήραγγας με επίδραση του λόγου του Poisson στην κανονικοποιημένη προ-παραμόρφωση (πάνω στο μέτωπο) κυκλικής σήραγγας σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (Unlu & Gercek, 2003).	11

1.9	Προ-καθίζηση (δ) και καθίζηση (μ), καθώς επίσης και εξόλκυση του μετώπου (ε) λόγω της εκτόνωσης των τάσεων γύρω από το μέτωπο σήραγγας (Lunardi & Bindi, 2004).	13
1.10	Τμηματική όρυξη της τελικής διατομής σήραγγας σε περισσότερα του ενός στάδια (κορυφαίο μέτωπο μορφής στοάς, ορθή βαθμίδα και αντίστροφο τόξο) με τη χρήση προσωρινής υποστήριξης μεγάλης ακαμψίας και γρήγορο κλείσιμο του δακτυλίου υποστήριξης για έλεγχο των καθιζήσεων.	14
1.11	Εμφάνιση επιφανειακού κρατήρα λόγω κατάρρευσης του μετώπου μίας σήραγγας κατά την φάση της εκσκαφής με τη μέθοδο NATM για τον υπόγειο του Μονάχου (27 Σεπτ. 1994).	15
1.12	Κυκλικά ίχνη συστοιχιών ρωγμών που παρουσιάζουν σημαντικό άνοιγμα (aperture) ίσο με 8 – 10 in (στο αριστερό τμήμα) και μικρότερο άνοιγμα στο δεξιό τμήμα Β πάνω από την οροφή κοιτάσματος άνθρακα στις Η.Π.Α. που εκμεταλλεύετο με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Οι ρωγμές αυτές μπορούν να φθάσουν έως την επιφάνεια αν το κοιτάσμα δεν βρίσκεται πολύ βαθιά (Peele, 1941).	15
1.13	Σχηματισμός θόλου στα αναλογικά πειράματα του Fayol (1885).	16
1.14	(α) Μοντέλο θυροπετάσματος με κωνικό μηχανισμό αστοχίας (Vardoulakis & Sulem, 1995) (β) Αδιάστατη πίεση επί της υποστύλωσης (θυροπετάσματος) συναρτήσει της αδιάστατης υποχώρησης του θυροπετάσματος (δεδομένα αναλογικού μοντέλου κιβωτίου άμμου)(Papamichos E. 2011, private communication).	25
1.15	Χρήση δοκών προπορείας κατά την κατασκευή του μετρό της Toulon (courtesy of Jean-Pierre Hamelin of Soletanche Bachy).	25
1.16	Επιφανειακή καθίζηση με τη μορφή Γκαουσιανής καμπύλης (trough) και ορισμός της «απώλειας όγκου» (Peck, 1969).	26
1.17	Καθίζηση του εδάφους με μορφή σκάφης (pothole) πάνω από μηχανισμό θυροπετάσματος σε κιβώτιο άμμου (Papamichos et al., 2001).	26
1.18	(α) Χαλάρωση της τάσης σε τριαξονική δοκιμή, και (β) σχηματισμός ζώνης διάτμησης με τη μορφή διατμητικής ασυνέχειας σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος.	28
1.19	Μοντέλο της διάδοσης της αιχμής της διατμητικής ζώνης: (α) διάδοση ρωγμής τύπου II ή ζώνης διάτμησης, (β) διανομή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής εντός της ζώνης διάτμησης, (γ) μεταβολή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής που υφίσταται το υλικό σημείο ξ_1 , και (δ) μεταβολή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής που υφίσταται το υλικό σημείο ξ_2 (Vardoulakis et al., 1985).	29
1.20	Ισοπαρामορφωσιακές καμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης (%) σε σήραγγα (Hansmire & Cording, 1985).	30
1.21	Πιθανός κινηματικός μηχανισμός πάνω από ρηχή σήραγγα (Akutagawa et al., 2008).	31

1.22	Σχεδιάγραμμα (α) και συσκευή (β) εκτέλεσης πειράματος υποχωρούντος θυροπετάσματος σε κιβώτιο άμμου. Φαίνονται οι συγκλίνομενες στην επιφάνεια επιφάνειες εντοπισμού της διάτμησης (Vardoulakis et al., 1981).	32
1.23	Προσομοίωμα διακριτών στοιχείων (Distinct Element Model, DEM) σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στο οποίο φαίνεται η διάδοση των συζυγών διατμητικών ζωνών και η λεκάνη της καθίζησης στην επιφάνεια (Vairaktaris & Stavropoulou, 2013).	32
1.24	Διάδοση διατμητικών ζωνών από τα σύνορα σήραγγας με εκτόνωση των τάσεων προς τους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες (Meguid et al., 2008).	33
1.25	Συνάρτηση μετάδοσης της καθίζησης από τη στέψη στην επιφάνεια: (α) προφίλ καθίζησης κατά την έννοια του κατακόρυφου άξονα για βαθειά εκσκαφή (Paramichos et al., 2001) και (β) μέγιστη καθίζηση επιφάνειας συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του θυροπετάσματος σε ρηχή εκσκαφή (Vardoulakis & Sulem, 1995).	34
1.26	α) Μοντέλο σκλήρυνσης της τριβής πριν την κατάσταση αιχμής (pre-peak) και μετά (post-peak) και σταθερής εφελκυστικής αντοχής πριν την κατάσταση αιχμής και χαλάρωσης μετά, και (β) απεικόνιση ισότροπης σκλήρυνσης της γωνίας τριβής από την αρχική κατάσταση (0) στην κατάσταση αιχμής (1) και εν συνεχεία του κινηματικού μηχανισμού μετά την κατάσταση αιχμής (post-peak) με σταθερή γωνία τριβής και απομειούμενη συνοχή στην (2) στο χώρο των αναλλοιώτων $p - T$	35
1.27	Αντιδιαμετρικές ζώνες αστοχίας ραμφοειδούς μορφής γύρω από βαθειά γεώτρηση σε υλικό με χαλάρωση της συνοχής και σκλήρυνση της γωνίας εσωτερικής τριβής (Barton & Pandey, 2011).	36
2.1	(α) Χάρτης των γραμμών του μετρό του Σάο Πάολο και η θέση του σταθμού Pinheiros και (β) σχέδιο του σταθμού πάνω στην αεροφωτογραφία της περιοχής.	38
2.2	Μακρινή άποψη (α) του φρέατος Capri πριν την κατάρρευση και (β) μετά την κατάρρευση με δημιουργία τοξωτών αστοχιών (“dog ears”) στην περιφέρεια του και η κατάρρευση του παρακείμενου Ανατολικού Σταθμού (θαλάμου) (Barton, 2009) και (γ) παράγοντες ρίσκου και αιτίες της κατάρρευσης (Barros et al., 2008).	39
2.3	(α) Γεωλογική μηκοτομή, και (β) γεωλογικοί σχηματισμοί (Barros et al., 2008).	41

2.4	Εγκάρσιες τομές και εμφάνιση του πυρήνα δειγματοληπτικής γεώτρησης του θαλάμου: (α) Εγκάρσια γεωλογική τομή: επιχωματώσεις (1), αλλουβιακές άργιλοι (2Ag), αλλουβιακές άμμοι (3Ar), γκρίζοι άργιλοι του τεταρτογενούς (4Ag1), υπολειμματικά εδάφη γνευσίου (5SR), σαπρολιτικός γνεύσιος (5S), γρανιτικός γνεύσιος ριγωτός (granite gneiss striped) (5R) (Kuwaitima & Rocha, 2005) (β) οι εγγύτερες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στο σταθμό είχαν κολάρο στα 723 με 724 m και συνάντησαν συμπαγές πέτρωμα (υπόβαθρο) στο απόλυτο υψόμετρο των 706-707 m στις περισσότερες των περιπτώσεων, και (γ) φωτογραφία του δείγματος της γεώτρησης 8704 που ανορύχθηκε κοντά στο κέντρο του θαλάμου του σταθμού (Barton, 2010).	43
2.5	Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της περιοχής που φαίνεται η θέση του σταθμού εντός της ζώνης Caucaia η οποία περιλαμβάνει έντονα ρηγματωμένους και αποσαθρωμένους γρανιτικούς και βιοτιτικούς γνευσίους και διεισδύσεις πηγματιτών (Assis, 2011).	44
2.6	Πολικό διάγραμμα που φαίνονται οι 4 οικογένειες ασυνεχειών.	45
2.7	(α) Παρα-κατακόρυφες ενστρώσεις γρανιτικού και βιοτιτικού γνευσίου με μεταβλητό πάχος και υπο-παράλληλων με τον άξονα της σήραγγας, και (β) μικροδομή του γνευσίου (Assis, 2011).	46
2.8	α,β) Απόψεις της βαριάς προσωρινής υποστύλωσης του θόλου του Ανατολικού Σταθμού με ραβδωτά πλαίσια σε αποστάσεις 0.85m c/c, εγκιβωτισμένων σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον 35cm και των προσωρινών μέτρων υποστύλωσης (Barton, 2009), (γ) διατομή του κορυφαίου μετώπου και της βαθμίδας όπου φαίνονται οι πλαϊνές υποσκαφές για τα elephant feet, και (δ) η αντίστοιχη μηκοτομή.	47
2.9	Μηκοτομές που δείχνουν την σταδιακή τοποθέτηση των ραβδωτών πλαισίων στους δύο θαλάμους και δεξιά οι διατομές σε δύο διαφορετικές θέσεις που φαίνεται ο πυρήνας κατηγορίας βραχόμαζας III που περιβάλλεται από πέτρωμα κατηγορίας IV.	48
2.10	α) Διαμήκης γεωλογική τομή όπου φαίνεται το πάχος της περιοχής κατάρρευσης και το σημείο όρυξης της γεώτρησης 8074, β) γειτονικές γεωτρήσεις, γ) απλοποιημένη αναπαράσταση της περιοχής κατάρρευσης όπου η ασυνέχεια F, οριοθετεί το ανατολικό όριο της αστοχίας, κάτω από τη Rua Capri (Barton, 2009).	49
2.11	Αεροφωτογραφία του φρέατος στο σταθμό του Pinheiros. Η αρχή της σήραγγας, η χιλιομετρική θέση 7080 και η ασυνέχεια (FF) που φαίνεται στο βάθος, στη χιλιομετρική θέση 7120, οριοθετούν την 40m περιοχή κατάρρευσης του σταθμού (Barton, 2009).	50

2.12	Διαχωρισμός της βραχόμαζας σε ιδεατά μέρη (blocks) έγινε με την εισαγωγή στο μοντέλο των ασυνεχειών και της διαστρωμάτωσης. Τα χρώματα αναπαριστούν περιοχές διαφορετικών μηχανικών παραμέτρων. Το πρώτο μοντέλο δεν κατέρρευσε, για να συμβεί αυτό ήταν απαραίτητη η εισαγωγή της σφήνας αποσαρθρωμένου υλικού που φαίνεται στην κάτω εικόνα με κόκκινο χρώμα. Το μοντέλο στο UDEC έγινε από τον Bandis (1993).	51
2.13	Αριθμητικό μοντέλο του $\frac{1}{4}$ του συστήματος φρέατος-θαλάμου-σήραγγας στην θέση του σταθμού Pinheiros (α) άποψη των συνόρων των υπογείων, και (β) άποψη των γεωλογικών στρωμάτων και της φάσης διάνοιξης της ορθής βαθμίδας του θαλάμου (Indraratna et al., 2010).	52
2.14	Πρόβλεψη της καθίζησης με την προχώρηση του θαλάμου στη διατομή του οργάνου G (27m μακριά από το φρέαρ)(Indraratna et al., 2010).	52
2.15	Διάγραμμα φέρουσας ικανότητας υποστύλωσης του μετώπου της σήραγγας (Indraratna et al., 2010).	53
3.1	Οι τρεις βασικοί τρόποι I, II, και III της παραμόρφωσης ρωγμής.	55
3.2	Αρνητικό ραδιογραφία όπου φαίνεται η ζώνη διατμήσεως σκιασμένη ως ζώνη έντονης αυξήσεως του πορώδους και από την οποία μπορεί να μετρηθεί το πάχος της ζώνης έντονης διατμήσεως κατά την αστοχία ενός αμμόδους εδάφους καταπονούμενου σε διαξονική θλίψη (Vardoulakis et al., 1985).	56
3.3	Εντοπισμός της παραμόρφωσης προκύπτει όταν μία ή περισσότερες συνιστώσες της τάσης σε μία περιοχή του πετρώματος μειώνεται με την αύξηση της πρώτης. (α) Χαρακτηριστική καμπύλη αξονικής τάσης – αξονικής τροπής κατά τη διάρκεια πειράματος τριαξονικής θλιπτικής δοκιμής σε πέτρωμα. (β) Η παραμόρφωση συγκεντρώνεται με όλο και περισσότερο αυξανόμενο ρυθμό σ' αυτές τις περιοχές και στο τέλος εκδηλώνεται με τη μορφή ρωγμής mode II.	56
3.4	(α) Σχηματική εικόνα διασταλτικής κατάστασης που οδηγεί από την κανονική πυκνή συσκευασία ομοειδών σφαιρών στην αντίστοιχη χαλαρή, και (β) διασταλτική συμπεριφορά ασυνεχών πετρωμάτων λόγω της τραχύτητας της ασυνέχειας, με T να συμβολίζει τη διατμητική τάση, u την οριζόντια μετατόπιση, v_n την κατακόρυφη μετατόπιση και σ_n την ορθή τάση (Bandis, 1993).	57
3.5	Στοιχειώδης όγκος κοκκώδους υλικού εντός ζώνης διάτμησης που εμφανίζει θετική διασταλτικότητα (αύξηση όγκου λόγω αύξησης του πορώδους ή αύξησης του κενού χώρου μεταξύ παρειών μιας ασυνέχειας) κατά την υποβολή του σε άμεση διάτμηση παράλληλα με τον οριζόντιο άξονα Ox . Ο στοιχειώδης όγκος της ζώνης διάτμησης έχει αναφερθεί στο Καρτεσιανό σύστημα Oxz . Ο άξονας Oy είναι κάθετος στο επίπεδο αυτό (Βαρδουλάκης, 2003).	58

3.6	Σχέση διατμητικής παραμόρφωσης με τη διατμητική τάση σε ένα μοντέλο ελαστοπλαστικού υλικού που υποβάλλεται σε απ' ευθείας διάτμηση (Βαρδουλάκης, 2003)	59
3.7	Γραφική παράσταση της συνθήκης διαρροής ενός γεωϋλικού με συνοχή και τριβή και του νόμου πλαστικής ροής στο επίπεδο των τάσεων.	61
3.8	Μηχανισμός καταρρεύσεως οροφής «αβαθούς» σήραγγας.	63
3.9	Κριτήριο M-C στο επίπεδο (σ, τ). Η σύμβαση προσήμου είναι ότι οι θλιπτικές τάσεις είναι θετικές ποσότητες	65
3.10	Προβολή της δύναμης αντίστασης στην ολίσθηση επί της επιφάνειας ολίσθησης.	66
3.11	Απευθείας διάτμηση κατά μήκος μίας από τις επίπεδες επιφάνειες αστοχίας.	66
3.12	α) ανακουφιστικό τόξο εντός θρυμματισμένου υλικού της κατακρημνιζόμενης οροφής πάνω από επιμήκες μέτωπο εκμετάλλευσης λιγνίτη (Fayol, 1885), και (β) λειτουργία ανακουφιστικού τόξου πάνω από κυκλική σήραγγα όπου η αξονική δύναμη F' μεταβιβάζεται στις πλευρές της σφήνας πετρώματος που τείνει να μετακινηθεί με τη βαρύτητα.	67
3.13	Πλευρική στήριξη του ανακουφιστικού τόξου από τις οριζόντιες γεωστατικές τάσεις.	68
3.14	Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων στο σώμα $\Delta' \Delta Z Z'$.	70
3.15	Απαιτούμενο ελάχιστο βάθος στέψης ανυποστύλωσης σήραγγας συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής για υπερκείμενο γεωϋλικό με συνοχή και χωρίς συνοχή και σταθερό συντελεστή πλευρικών τάσεων σε ηρεμία και γωνία κρίσιμης κατάστασης.	71
3.16	Καμπύλες ελάχιστου απαιτούμενου βάθους στέψης ανυποστύλωσης σήραγγας συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής για υπερκείμενο γεωϋλικό με συνοχή και γωνία διασταλτικότητας για δύο διαφορετικούς συντελεστές πλευρικών τάσεων σε ηρεμία.	72
3.17	Στάδια εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας.	74
3.18	Κατεύθυνση σταδιακής εκσκαφής του συστήματος φρέατος-θαλάμου.	74
3.19	(α) Το συνεχές μοντέλο παραμορφωσιακής χαλάρωσης παρουσιάζεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, και (β) ο κινηματικός μηχανισμός χαλάρωσης συνοχής – τριβής στο επίπεδο (σ, τ) για ένα πολύ διακλασμένο πέτρωμα.	75
3.20	Καμπύλη συσχέτισης της «ακεραιότητας» (integrity) της βραχώμαζας με το RMR (Exadaktylos & Stavropoulou, 2008).	76
3.21	Μοντέλα χαλάρωσης για την συνοχή (c) και την τριβή (ϕ).	77
3.22	Δημιουργία της πρώτης ζώνης διάτμησης μετά την εξόρυξη του φρέατος και του κορυφαίου μετώπου του θαλάμου.	77
3.23	Ζώνη διάτμησης μετά την εξόρυξη της τελευταίας βαθμίδας του θαλάμου πλησιάζοντας προς το φρέαρ	78

3.24	Πρισματικός όγκος υπερκείμενος της σήραγγας που σχηματίζεται από την συνένωση ζωνών έντονης διατμητικής παραμόρφωσης.	78
3.25	Περιοχή συνένωσης ζωνών διάτμησης και δημιουργία επιφάνειας μεγάλων μετατοπίσεων.	78
3.26	α) Κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στα δύο σημεία του εκτασιομέτρου πάνω από την στέψη της σήραγγας β) τα σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων και γ) πραγματικά δεδομένα κατακόρυφων μετατοπίσεων από την περιοχή.	79
3.27	α) Τελική μορφή της ζώνης διάτμησης γύρω από την περιοχή του φρέατος και της σήραγγας την στιγμή της κατάρρευσης και β) αεροφωτογραφία της περιοχής αστοχίας.	80
3.28	α) Προβλεφθείσα σφήνα κατάρρευσης από το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών και β) πραγματική περιοχή αστοχίας απο αεροφωτογραφία στο σταθμό του Pinheiros στο Sao Paulo.	81
4.1	Στάδια εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας – γεωμετρία εκσκαφής.	83
4.2	Κατεύθυνση εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας του μετρό στο Sao Paulo.	84
4.3	Μοντέλα χαλάρωσης για την συνοχή (c) και την τριβή (φ).	85
4.4	Ζώνες εντοπισμού της διατμητικής παραμόρφωσης μετά την διάνοιξη ολόκληρου του άνω μετώπου 45m περίπου από το φρέαρ.	86
4.5	Εμφάνιση της πρώτης ζώνης διάτμησης σε απόσταση 10m από το φρέαρ.	86
4.6	Εκδήλωση ζώνης διάτμησης μετά την εκσκαφή τμήματος της σήραγγας κοντά στο φρέαρ (10m πριν από αυτό).	87
4.7	Εκδήλωση ζώνης διάτμησης μετά την εξόρυξη τμήματος της σήραγγας κοντά στο φρέαρ (10m πριν από αυτό) στο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας επίπεδο.	88
4.8	Περιοχή συνένωσης ζωνών διάτμησης που έχει τη μορφή πρίσματος.	88
4.9	Σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων.	89
4.10	Κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στα σημεία παρακολούθησης πάνω από την στέψη του σταθμού μαζί με τα σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων και τα ακτινικά εκτασιόμετρα.	89
4.11	α) Τελική μορφή της ζώνης διάτμησης γύρω από την περιοχή του επενδεδυμένου φρέατος και της σήραγγας την στιγμή της κατάρρευσης και β) αεροφωτογραφία της περιοχής αστοχίας.	90
4.12	α) Προβλεφθείσα σφήνα κατάρρευσης από το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών και β) πραγματική περιοχή αστοχίας απο αεροφωτογραφία στο σταθμό του Pinheiros στο Sao Paulo.	91
4.13	Διάγραμμα M – N της υποσύτλωσης του άνω μετώπου μετά την εκδήλωση της αστοχίας (FS=Factor of Safety, Συντελεστής Ασφαλείας).	91

4.14	Στοιχεία της υποστύλωσης του άνω μετώπου που έχουν αστοχήσει α) μετά το τέλος της επίλυσης β) και γ) στην πραγματικότητα. . . .	92
4.15	Διάταξη ακτινικών εκτασιομέτρων πολλαπλών σημείων αγκύρωσης εκατέρωθεν της ζώνης διάτμησης.	93
4.16	Διάταξη ακτινικών εκτασιομέτρων πολλαπλών σημείων αγκύρωσης στην περιοχή του συστήματος φρέαρ - σήραγγα.	93
4.17	Απότομη μεταβολή (κατά 30%) των κατακόρυφων μετατοπίσεων κοντά στην περιοχή αστοχίας.	94

Κατάλογος πινάκων

1.1	Ταξινόμηση των βραχομαζών ανάλογα με το λόγο του Poisson. . .	12
1.2	Παραδείγματα καταρρεύσεων σπηραγγων που κατασκευάστηκαν με την NATM.	17
3.1	Μετρηθέν πάχος ζώνης διάτμησης (Vardoulakis & Sulem, 1995). .	55
3.2	Μηχανικές παράμετροι του αρρήκτου και του διακλασμένου πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ανυποστυλώτης σήραγγας.	76
4.1	Μηχανικές παράμετροι του αρρήκτου και του διακλασμένου πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο υποστυλωμένης σήραγγας.	85

Πρόλογος

Η Διδακτορική Διατριβή αυτή ασχολείται με τη διερεύνηση των συνθηκών αστάθειας και καθιζήσεων κατά την όρυξη ή διάνοιξη αβαθούς συστήματος φρέατος – θαλάμου – σήραγγας με τη μέθοδο NATM, κάτω από κατοικημένες περιοχές. Το πρόβλημα αυτό της κατάρρευσης ή κατακρήμνισης της οροφής υπογείων έργων αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα «Υποχωρούντος Θυροπετάσματος» με υπερκείμενο συνεχές υλικό σύμφωνα με τους Fayol-Terzaghi. Για την προσομοίωση του σχηματισμού και του τρόπου διάδοσης των διατμητικών ζωνών χρησιμοποιείται τριδιάστατος αριθμητικός κώδικας πεπερασμένων διαφορών και κατάλληλο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο γεωλογικών υλικών που επιδεικνύουν χαλάρωση των τάσεων λόγω αύξησης της διατμητικής παραμόρφωσης. Οι επιφάνειες των διατμητικών ζωνών εκκινούν από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης των τάσεων. Θεωρείται ότι δεν προϋπάρχουν ασυνέχειες που να διασχίζουν την εδαφοβραχώμαζα παρά μόνο αυτές που δημιουργούνται κατά την φάση της κατασκευής των υπογείων. Η αστοχία εκδηλώνεται λόγω τομής νέων επιφανειών διατμητικών ζωνών με σύνορα των υπόγειων έργων κατά τρόπο τέτοιο ώστε να σχηματίζονται όγκοι πετρώματος διαφόρων γεωμετριών οι οποίοι δυνητικά μπορούν να μετακινηθούν λόγω της βαρύτητας και εν τέλει να καταρρεύσουν.

Η Διατριβή εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγ. Εξαδάκτυλου Γεώργιου διευθυντή του εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων, στη Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για τη στήριξη και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια. Χωρίς την επιμονή και υπομονή που έδειξε στο σύνολο των δυσκολιών που ανέκυψαν, κατά την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής αυτής, η ολοκλήρωση της θα ήταν αδύνατη.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγ. Αγιουτάντη Ζαχαρία και Καθηγ. Παπαμίχο Ευριπίδη για την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη που μου έδειξαν σε όλα τα στάδια της έρευνας αυτής. Ευχαριστώ την Επ. Καθηγ. Σταυροπούλου Μαρία, η οποία παρείχε την πολύτιμη βοήθειά της οποιαδήποτε στιγμή και μέρα της ζητήθηκε, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της Επιτροπής για το χρόνο που αφιέρωσαν και τις συμβουλές που μου έδωσαν.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου, τους γονείς μου, Δημήτρη και Σοφία τον αδερφό μου και τη γυναίκα μου, κα Κωνσταντινοπούλου Μαρία για την υπομονή που έδειξε καθώς και για την στήριξη που μου είχα.

Περίληψη

Έως το έτος 2050, το 84% του παγκόσμιου πληθυσμού θα κατοικεί σε πόλεις και προάστια (αστικοποίηση) ως συνέπεια δημογραφικών αλλαγών, όπως λ.χ.: η μεταβολή του μέσου όρου ηλικίας διαβίωσης, που παρουσιάζει αύξηση στις μεγαλύτερες ηλικίες, η μετανάστευση, καθώς και οι εσωτερικές μετακινήσεις του πληθυσμού προς τα αστικά κέντρα. Αυτή η συνεχής αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις πρέπει να είναι προβλέψιμη, ώστε να αυξάνονται εν παραλλήλω οι οικονομικές, περιβαλλοντικές, ενεργειακές, συγκοινωνιακές κ.ά. υποδομές αυτών. Ταυτόχρονα, η διαρκώς μεγαλύτερη ολοκλήρωση των χωρών-κρατών σε ένα ενιαίο σύστημα παραγωγής και εμπορίου (παγκοσμιοποίηση) αναμένεται να αυξήσει τις ανάγκες για μεταφορές ανθρώπων και αγαθών. Ένα μεγάλο μέρος αυτών θα γίνεται μέσω σηράγγων, γιατί ο διαθέσιμος χώρος στην επιφάνεια ολοένα και μικραίνει (λ.χ. σήραγγες στις Άλπεις και αλλού).

Σε κατοικημένες περιοχές με ήπιο τοπογραφικό ανάγλυφο ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατασκευής συστήματος υπόγειου σταθμού και σήραγγας σε μετρό, είναι η όρυξη φρέατος, εν συνεχεία η διάνοιξη σήραγγας από τον πυθμένα του φρέατος και στο τέλος η διεύρυνση της τελευταίας έτσι ώστε κοντά στο φρέαρ να λάβει τη μορφή θαλάμου που θα χρησιμεύσει ως σταθμός (πλατφόρμα) του μετρό. Η τεχνική αυτή προσαρμόζεται καλύτερα στην Νέα Αυστριακή Μέθοδο Κατασκευής Σηράγγων NATM.

Για την πιο αξιόπιστη και ασφαλή εφαρμογή της μεθόδου NATM που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως CTM, η έρευνα σήμερα επικεντρώνεται στους ακόλουθους δύο στόχους:

1. Τη μείωση του «Παράγοντα Απώλειας Ογκού» (volume loss factor) από το επίπεδο του 4% που βρίσκεται σήμερα, στο επίπεδο του 0,5% έως 1% (σε εξαιρετικές περιπτώσεις) που είναι η αντίστοιχη τιμή της παραμέτρου αυτής κατά την εφαρμογή της ανταγωνιστικής μεθόδου κατασκευής σηράγγων με TBM .
2. Την εξάλειψη του κινδύνου (hazard) εκδήλωσης απρόσμενων εκτεταμένων αστοχιών του πετρώματος ή του εδάφους από τα υπόγεια μέχρι την επιφάνεια.

Για τον πρώτο στόχο ήτοι για την πρόβλεψη των παραμορφώσεων απαιτείται τριδιάστατος αριθμητικός κώδικας και κατάλληλο καταστατικό μοντέλο των γεωλογικών υλικών, για δε το δεύτερο στόχο είναι απαραίτητο ο αριθμητικός κώδικας

να μπορεί να προσομοιώσει μηχανισμούς αστοχίας που ενδεχομένως θα συναντηθούν στην πράξη. Το έναυσμα για την προτεινόμενη ερευνητική εργασία έδωσε η κατάρρευση υπόγειου συστήματος φρέατος – θαλάμου (σταθμού) κατά την φάση της κατασκευής του με τη μέθοδο NATM στο Sao Paulo, της Βραζιλίας το 2007. Η μη πρόβλεψη της κατάρρευσης αυτής οφείλετο κυρίως στους ακόλουθους παράγοντες:

- Στην φάση του σχεδιασμού έγινε διδιάστατη αριθμητική ανάλυση χωρίς να θεωρηθεί η επίδραση του φρέατος στη συμπεριφορά των παρακείμενων εδαφών και πετρωμάτων, και χρησιμοποιήθηκαν απλοποιημένα καταστατικά μοντέλα των πετρωμάτων (Oliveira, 2008).
- Στην φάση της γεωτεχνικής έρευνας έγινε περιορισμένος αριθμός γεωτρήσεων και αγνοήθηκε η ασυνεχής και ετερογενής – εξαιτίας της αποσάρθρωσης των γρανιτικών πετρωμάτων - φύση του περιβάλλοντος πετρώματος (Barton, 2009).
- Στη φάση της *σταδιακής* κατασκευής έγινε πλημμελής σχεδιασμός και ανάλυση των οργανομετρήσεων. Η υποστήριξη του θαλάμου και του φρέατος δεν έκλεισε γρήγορα αλλά παρέμεινε ανοικτή μέχρι την κατάρρευση με συνέπεια την συνεχή αύξηση των καθιζήσεων.

Στόχος της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) είναι η διερεύνηση των συνθηκών αστάθειας και καθιζήσεων κατά την όρυξη ή διάνοιξη αβαθούς συστήματος φρέατος – θαλάμου – σήραγγας με τη μέθοδο NATM, κάτω από κατοικημένες περιοχές όπως έγινε στο σταθμό Pinheiros. Το πρόβλημα αυτό της κατάρρευσης ή κατακρήμνισης της οροφής υπογείων έργων αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα του «Υποχωρούντος Θυροπετάσματος» με υπερκείμενο συνεχές υλικό σύμφωνα με τους Fayol-Terzaghi (Κεφ.1). Χρησιμοποιείται τριδιάστατος αριθμητικός κώδικας πεπερασμένων διαφορών με δυνατότητα προσομοίωσης του σχηματισμού διατμητικών ζωνών σε γεωλογικούς σχηματισμούς και κατάλληλο ελαστοπλαστικό καταστατικό μοντέλο γεωλογικών υλικών που επιδεικνύουν χαλάρωση των τάσεων λόγω αύξησης της διατμητικής παραμόρφωσης (παραμορφωσιακή χαλάρωση, strain softening). Η αστοχία με τη μορφή κατάρρευσης της οροφής θεωρείται ότι εκδηλώνεται λόγω τομής νέων επιφανειών διατμητικών ζωνών (shear bands) με σύνορα των υπόγειων έργων. Πριν την εκδήλωση της αστοχίας σχηματίζονται όγκοι πετρώματος διαφόρων γεωμετριών που δυνητικά μπορούν να μετακινηθούν λόγω της βαρύτητας και της μικρής πλευρικής υποστήριξης από τα παρακείμενα εδάφη, και εν τέλει να καταρρεύσουν. Οι επιφάνειες των διατμητικών ζωνών εκκινούν από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης των τάσεων, δηλαδή δεν θεωρούνται προϋπάρχουσες ασυνέχειες που διασχίζουν την εδαφοβραχώμαζα αλλά οι ασυνέχειες αυτές δημιουργούνται κατά την φάση της κατασκευής των υπογείων. Αυτό γενικά ισχύει σε πετρώματα που διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασυνεχειών έτσι ώστε το μέγεθος του μέσου ογκοτεμαχίου που απομονώνεται μεταξύ των ασυνεχειών να είναι πολύ μικρότερο από την κλίμακα των υπογείων.

Σύμφωνα με την θεωρία σχηματισμού διατμητικών ζωνών σε συνεχή μέσα (Vardoulakis & Sulem, 1995), το πέτρωμα ή το έδαφος θεωρείται ως συνεχές υλικό. Το υλικό αυτό, χάνει την συνέχεια του κατά την αποφόρτιση του σε περιοχές του συνόρου της σήραγγας που χαρακτηρίζονται από υψηλή συγκέντρωση των τάσεων, σύμφωνα με κάποιο μηχανισμό εντοπισμού της διατμητικής παραμόρφωσης σε ζώνες μικρού πάχους μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερης από την μέση διάμετρο του κόκκου του υλικού (Mühlhaus & Vardoulakis, 1987). Το έδαφος ή το πέτρωμα θεωρείται ότι υπακούει το κριτήριο αντοχής των Mohr-Coulomb και σε καταστατικό νόμο χαλάρωσης μιας ή περισσότερων παραμέτρων ελαστικότητας του ή της αντοχής του (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής) με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης (strain softening model) πάνω από μια κρίσιμη τιμή.

Μετά από την μελέτη της δημιουργίας διατμητικών ζωνών σε εδάφη ή πετρώματα που μπορούν να οδηγήσουν σε κατακρήμνιση της οροφής υπογείων έργων, η παρούσα έρευνα μπορεί να οδηγήσει σε συγκεκριμένες προδιαγραφές (specifications) ασφαλούς σχεδιασμού και κατασκευής συστημάτων υπογείων έργων που θα αφορούν: (α) τον εργαστηριακό χαρακτηρισμό των μηχανικών παραμέτρων των πετρωμάτων, (β) τον τρόπο σχεδιασμού υπόγειων έργων με βάση κατάλληλη υπολογιστική διαδικασία, (γ) τη γεωτεχνική έρευνα στη φάση του προσχεδιασμού του έργου, και (δ) την ενόργανη παρακολούθηση κατά την κατασκευή τέτοιων αβαθών υπόγειων έργων κάτω από κατοικημένες περιοχές.

Η πρωτοτυπία της Διδακτορικής Διατριβής μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

- Κατασκευή τριδιάστατου ισότροπου και ομοιογενούς αριθμητικού προτύπου (μοντέλου) συνενωμένου συστήματος φρέατος και θαλάμου το οποίο προβλέπει με ικανοποιητικά αποτελέσματα την εκδηλωθείσα κατάρρευση του υπογείου ανατολικού σταθμού Pinheiros στο Sao Paulo.
- Η αντιμετώπιση του φαινομένου της κατάρρευσης οροφής υπόγειου έργου ως πρόβλημα υποχωρούντος θυροπετάσματος και στα πλαίσια της θεωρίας Fayol-Terzaghi σε συνδυασμό με τις συνθήκες δημιουργίας διατμητικών ζωνών (shear bands) σε αρχικά ομοιογενή συνεχή μέσα.
- Ο νέος τρόπος καθορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων πολύ ρηγματωμένων βραχομαζών με βάση εργαστηριακά πειράματα, τη θεωρία φθοράς (Damage Theory) και επί τόπου οργανομετρήσεις. Επίσης η επιλογή και βαθμονόμηση ταυτόχρονης παραμορφωσιακής χαλάρωσης των παραμέτρων αντοχής της ρηγματωμένης βραχώμαζας ήτοι της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής.
- Κατασκευή διδιάστατου αναλυτικού προτύπου (μοντέλου) κατάρρευσης οροφής θαλάμου που δίνει συγκρίσιμα αποτελέσματα με το αριθμητικό μοντέλο και κυρίως καταδεικνύει τη σημασία του μικρού λόγου Poisson (συντελεστή του πλευρικής παραμόρφωσης) της βραχώμαζας στην ελλιπή δράση του «ανακουφιστικού τόξου» για την συγκράτηση της κατάρρευσης της οροφής.

- Διαπίστωση της έγκαιρης προειδοποίησης της εκδήλωσης του φαινομένου της κατάρρευσης από την καταλληλότερη (ακτινική στην προκείμενη περίπτωση) θέση εκτασιομέτρου (-ων) που να διαπερνά τη ζώνη (ζώνες) διάτμησης (shear band).
- Η παρούσα μελέτη είναι από τις λίγες που έχουν γίνει για τη διερεύνηση των πιθανών μηχανισμών αστοχίας σε υπόγεια έργα. Για την εξεταζόμενη περίπτωση του Sao Paulo έδωσε παρόμοια αποτελέσματα με την παραδοχή του συνεχούς με προηγούμενες σχετικές μελέτες που θεωρούσαν a priori την ύπαρξη επικρεμάμενης σφήνας γνευσίου στην οροφή του θαλάμου.

Abstract

Stability and subsidence of underground openings constructed with the NATM
method in urban areas

by

G. Saratsis

Submitted to the School of Mineral Resources Engineering
on December 2014

in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy

A major challenge of European cities is to control urban sprawl, which encourages car dependency and has a major impact on urban GHG production. The new model of sustainable city is a compact city growing within its current limits and irrigated by a dense public transport networks. Considering the current lack of surface space in European city centres, future trends call for more underground infrastructure to be built in a crowded urban context under severe environmental constraints: zero impact on surface structures.

Tunnelling is quite a difficult activity to plan and to manage, with several recent collapses and incidents demonstrating its potential for sudden and catastrophic events. In normal conditions, settlements at the surface are the main source of impact. Minor damages on surrounding structures are frequent, and can reveal costly in many ways: cost of repairs, additional delays, loss of public image. Sudden incidents can occur from unexpected ground or groundwater conditions, or from inappropriate construction management. They remain exceptional, but can have far-reaching consequences: fatal events, buildings damaged beyond repair, project interruptions, unpredictable economic losses, and loss of confidence from the public. Ultimately, they make underground works difficult to insure and delicate to include into urban planning schemes.

This thesis refers to the back – analysis of the conditions that have lead to the collapse of the shaft-cavern system in the densely populated Sao Paulo city of Brazil constructed with the Conventional Tunnelling Method (CTM) or New Austrian Tunnelling Method (NATM). More specifically the main aim is to propose a methodology for the prompt identification of weak points of underground constructions by the NATM method in urban areas. This methodology consists of mate-

rial modeling and data analysis, numerical modeling, simulation of the underground excavation process and monitoring guidelines.

This system lies close to the Pinheiros river, in the SW sector of the city, and is a part of the new Line 4 (Yellow Line) of the expanding São Paulo Metro. The Yellow line is 12.5 km long, linking the city center with the western suburbs by four interchange stations.

On the afternoon of Friday 12th January 2007, a dramatic accident occurred during the enlargement of the Eastern cavern (serving as a future metro station) with a bench advancing towards the shaft. Nearly the whole of the east cavern of the station of 40 m length suddenly collapsed, immediately followed by collapse of nearly half of the adjacent 40 m diameter and 35 m deep station shaft. This multiple accident occurred so fast that there was no time for warning to be given. The seven unfortunate victims died after falling from the surface and becoming deeply buried under the collapsed rock and soil.

According to extensive investigations after the occurrence of this incident it was concluded that the collapse happened due to poor characterization of the geomaterials, of the design and of the in situ monitoring system during construction. Poor design has led to the decision of open support system during the excavation of the top heading and the bench, that in turn have led to extensive deformations until final collapse. Previous back – analysis attempts were based on the assumption of undetected large rock wedge (key – block at the roof) that overloaded the support arch and led to the failure of the foundation rock mass and ultimately to the final collapse. In this study a different path is followed. Assuming a continuous rock mass with equivalent mechanical properties and a kinematic cohesion – friction Mohr – Coulomb softening model and using a 3D numerical code which can simulate shear band propagation, it was found that according to the applied cavern construction procedure a massive collapse may be generated that exhibits similar features with those found in the field. These features refer to the time of the incident, the newly formed shear band normal to the longitudinal axis of the cavern far from the shaft, the amount of deformation recorded by the multiple – borehole extensometers and the mode of failure of the open arched support system.

It was found that the failure is manifested with the evolution of shear bands starting from the corners of the top-heading of the cavern as this approaches the shaft, while retreating. The failure surface from the cavern extends upwards and forwards to connect with the shear band propagating from the shaft forming a rigid block of rock mass of weight of 20,000 t that finally caves in the tunnel and shaft; hence, the system behaves as a “trap-door mechanism.

The elastic and strength properties of the intact rock identified in lab were upscaled by using a special theory suited for discontinuous rocks based on the Damage Mechanics theory. For this rock mass model the two decreasing curves of cohesion and friction angle with the accumulation of plastic shear strain in the rock mass have been prescribed as an input into the FLAC3D code. Hence, the plastic shear strain is chosen as the softening (aging) parameter of the rock adjacent to the shaft – cavern construction as it is loaded during excavation. Based on the

strength of materials database StremaDB we have processed and finally specified the constitutive behaviour of the overlying rock material. Hence, we use this relational database together with the accompanying tools (like program for identification of material parameters etc) as an indispensable tool for such type of analyses.

History points have been specified in the model to store vertical displacements exactly on the actual locations of the vertical extensometers. Since these extensometers failed to give an early warning of the incipient collapse of the cavern's roof and based on the collapse mechanism manifested by the propagation of shear bands, there have been put additional history points in the model along radial lines passing through the anticipated path of the shear bands. These history points have been placed at the wall of the shaft and around the cavern at a short distance from the junction with the shaft which is a region of high stress concentration. One radial extensometer and its history point located inside the caved volume of the rock mass has captured promptly the incipient collapse phenomenon. At this particular history point inside the caved rock mass the vertical displacement has suddenly increased 30 between two sub-sequent steps. Also, the model are in accordance with recorded displacements before and during collapse at the Eastern station.

The axial force (N) – bending moment (M) interaction relations for the case of Factors of Safety (FS) equal to 1 and 2, respectively, were also assumed. The model's predictions of the axial forces and bending moments acting on the composite shell support elements at the phase of the incipient collapse have been superimposed with these diagrams demonstrating the failure of the temporary support at the sides and the crown of the cavern.

Sequential tunnelling with open front has its risks in stability and safety. Even in “difficult times” these issues are paramount since a collapse is more expensive than an appropriate design with a careful execution taking in account instrumentation and monitoring on the right place and measured at the right time. Recapitulating the main results may be listed as follows:

- In this particular case study the simultaneous softening of the strength parameters c and ϕ was necessary to capture the shear band propagation in the equivalent rock mass. Needless to say that proper identification of failure mechanism is of paramount importance to avoid disasters.
- Three-dimensional numerical modelling is an indispensable tool for predicting underground excavations behaviour in conjunction with monitoring data collected during underground excavations with the NATM.
- The installation of extensometers along radial lines passing through the anticipated shear bands could have promptly warned for incipient roof collapse provided that the mechanism of shear band driven collapse presented here has actually happened.
- The predicted shear bands configuration agreed with the actually observed fault surfaces transecting the cavern and the shaft (dog-ear formation) after

the collapse incident; the same remark is also valid for time and model of support collapse.

Thesis Supervisor: G. Exadaktylos

Title: Professor of Rock Mechanics and Mining Engineering

Acknowledgements

Financial support from the Desurbs project is gratefully appreciated. This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no 261652.

Κεφάλαιο 1

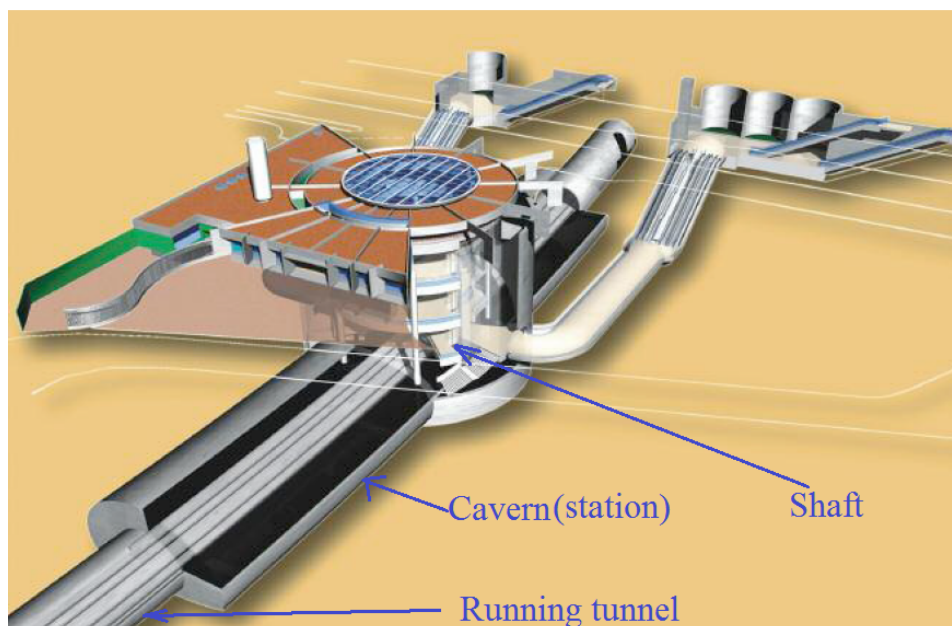
Περί της μεθόδου NATM για την διάνοιξη και κατασκευή αβαθών σιηράγγων

...Disasters in geotechnical do not occur from errors in assessing material properties, they occur when failure mechanism is not identified...(Peck, 1969)

1.1 Εισαγωγή

Σε κατοικημένες περιοχές με σχεδόν επίπεδο τοπογραφικό ανάγλυφο ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατασκευής συστήματος υπόγειου σταθμού/πλατφόρμας – σήραγγας σε μετρό είναι η όρυξη φρέατος, εν συνεχεία η διάνοιξη σήραγγας από τον πυθμένα του φρέατος και στο τέλος η διεύρυνση της τελευταίας έτσι ώστε κοντά στο φρέαρ να λάβει τη μορφή θαλάμου που θα χρησιμεύσει ως σταθμός-πλατφόρμα του μετρό (Σχήμα 1.1). Η μέθοδος αυτή προσαρμόζεται καλύτερα στην ευέλικτη Νέα Αυστριακή Μέθοδο Κατασκευής Σιηράγγων (NATM) που περιγράφεται στο Υπο-κεφάλαιο 1.2 και συνοπτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Αν αντί της NATM που περιλαμβάνει προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη, χρησιμοποιηθεί η ακριβότερη και λιγότερα ευέλικτη μέθοδος ολομέτωπης κοπής με TBM και με μόνιμη υποστήριξη, τότε η συναρμολόγηση του TBM γίνεται στο βάθος του φρέατος αφού προχωρήσει ικανό διάστημα η σήραγγα με συμβατικό τρόπο και εν συνεχεία διανοίγεται με συνεχή τρόπο και ολομέτωπη κοπή ο σταθμός και η σήραγγα που έχουν την ίδια διατομή. Σήμερα οι κεφαλές των TBM φθάνουν τα 15m διάμετρο (λ.χ. διάνοιξη του υπόγειου μετρό της Μαδρίτης) με τάση στο μέλλον να φθάσουν τα 20m.

Οι βασικές αρχές σχεδιασμού σιηράγγων παρουσιάζονται στο Υπο-κεφάλαιο 1.3. Για την πιο αξιόπιστη και ασφαλή εφαρμογή της μεθόδου NATM που αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως CTM, ο σχεδιασμός επικεντρώνεται στους ακόλουθους δύο στόχους:



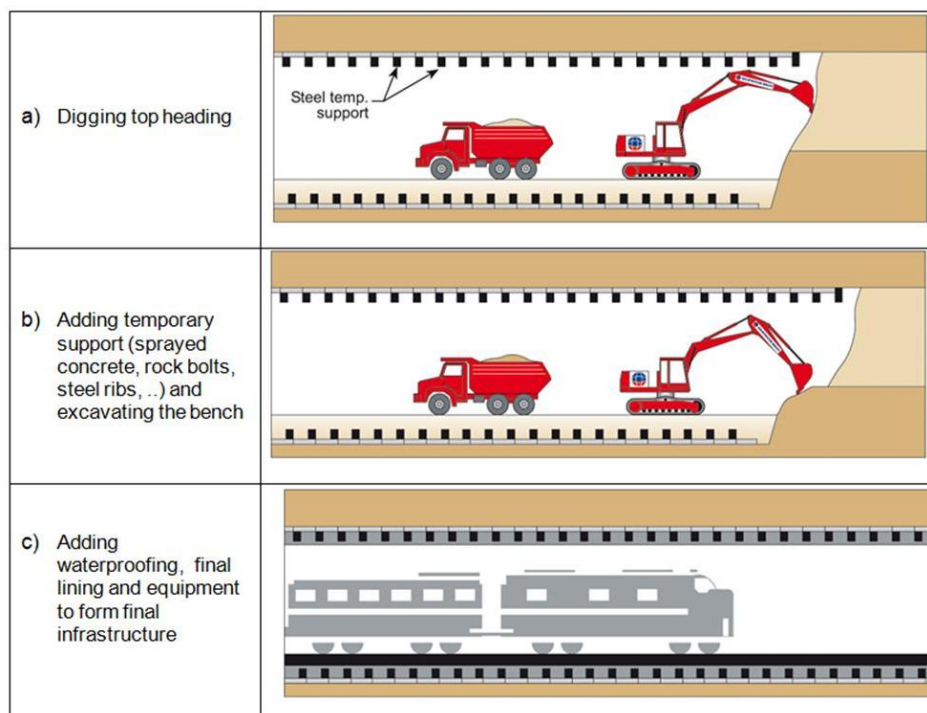
Σχήμα 1.1: Τριδιάστατη απεικόνιση του σταθμού Pinheiros στο μετρό του Sao Paulo της Βραζιλίας (Barros et al., 2008)

- Τη μείωση του Παράγοντα Απώλειας Όγκου (volume loss factor) από το επίπεδο 4% που βρίσκεται σήμερα, στο επίπεδο του 0,5% έως 1% (σε εξαιρετικές περιπτώσεις) που είναι η αντίστοιχη τιμή για τη μέθοδο TBM.
- Την μείωση έως εξάλειψη του κινδύνου (hazard) εκδήλωσης απρόσμενων εκτεταμένων αστοχιών του πετρώματος ή του εδάφους μέχρι την επιφάνεια.

Το έναυσμα για την προτεινόμενη ερευνητική εργασία έδωσε η κατάρρευση υπόγειου συστήματος φρέατος – θαλάμου κατά την φάση της κατασκευής του με τη μέθοδο NATM στο Σάο Πάολο, της Βραζιλίας το 2007. Σύμφωνα με τον Oliveira (Oliveira, 2008) τα βασικά σχεδιαστικά λάθη ήσαν τα εξής:

1. Η διδιάστατη αριθμητική ανάλυση στη φάση του σχεδιασμού χωρίς να θεωρηθεί η επίδραση του φρέατος στη συμπεριφορά των πετρωμάτων γύρω από το μέτωπο του προχωρούντος μετώπου μορφής σήραγγας,
2. Η χρήση απλοποιημένων καταστατικών μοντέλων των ασυνεχών πετρωμάτων σε στραγγιζόμενες συνθήκες, και
3. Η αγνόηση της ασυνεχούς και ετερογενούς - λόγω επιλεκτικής αποσάρθρωσης - φύσης του περιβάλλοντος πετρώματος (Barton, 2010).

Στόχος της παρούσης Διδακτορικής Διατριβής (ΔΔ) είναι η διερεύνηση των συνθηκών που οδήγησαν στην κατάρρευση κατά την όρυξη αβαθούς συστήματος

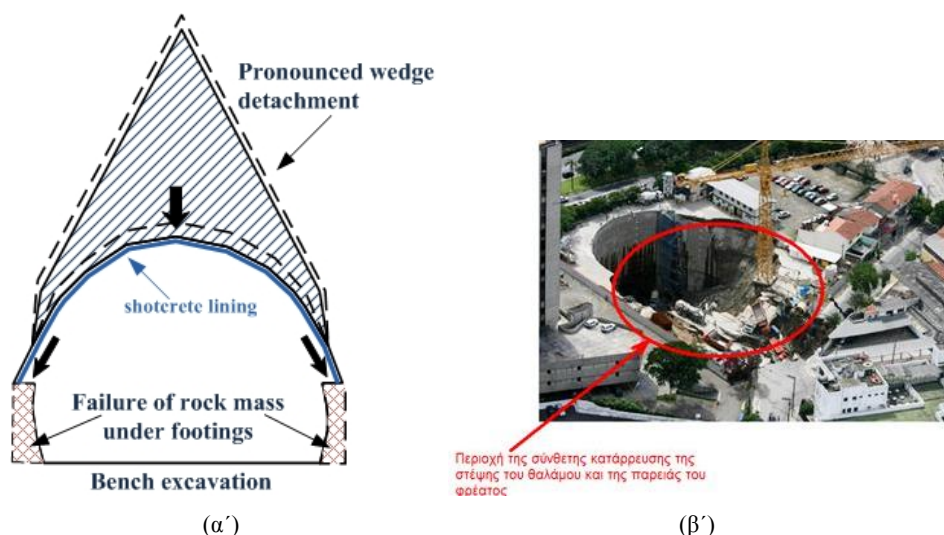


Σχήμα 1.2: Μέθοδος σταδιακής κατασκευής σιδηρόδρομων με τη μέθοδο NATM ή CTM (α) εκσκαφή του προπορευόμενου μετώπου κορυφής (top heading), (β) τοποθέτηση προσωρινών μέτρων υποστήλωσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια κ.λπ.) και εκσκαφή της ορθής βαθμίδας, και (γ) μόνιμα μέτρα υποστήλωσης, υδατοστεγάνωσης και τοποθέτηση της τελικής υποδομής της σιδηροδρομικής σήραγγας.

φρέατος – θαλάμου – σήραγγας με τη μέθοδο NATM, κάτω από κατοικημένη περιοχή.

Τα βασικά συστατικά της προτεινόμενης μεθόδου είναι: (α) η χρήση ενός αξιόπιστου κώδικα αριθμητικής ανάλυσης τριδιάστατων μηχανικών προβλημάτων εκσκαφών σε πορώδη μέσα με μη-γραμμική συμπεριφορά, με δυνατότητα προσομοίωσης της έναρξης και διάδοσης ζωνών διάτμησης, της τοποθέτησης δομικών στοιχείων προσωρινής και μόνιμης υποστήλωσης πίσω από το μέτωπο της σήραγγας, και (β) η εφαρμογή κατάλληλων ελαστοπλαστικών καταστατικών νόμων γεωϋλικών με δυνατότητα παραμορφωσιακής χαλάρωσης. Η μελέτη αυτή εκτός από την τριδιάστατη αριθμητική ανάλυση βασίζεται και στην παραμετρική ανάλυση ή ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) του συνολικού μηχανικού μοντέλου. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο κώδικας πεπερασμένων διαφορών FLAC3D (Itasca, 2012) που μπορεί να προσομοιώσει τον σχηματισμό διατμητικών ζωνών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου καταστατικού ελαστοπλαστικού νόμου συνεχών μέσων, ο οποίος περιγράφει ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά, γεωλογικών υλικών που επιδεικνύουν παραμορφωσιακή χαλάρωση. Η αστο-

χία θεωρείται ότι εκδηλώνεται με την μορφή τομής επιφανειών διατμητικών ζωνών (shear bands) με σύνορα των υπόγειων έργων έτσι ώστε να σχηματίζονται όγκοι πετρώματος διαφόρων γεωμετριών (λ.χ. σφήνας όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3(α')) που δυνητικά μπορούν να κατακρημνισθούν λόγω της βαρύτητας και να προκαλέσουν εν τέλει την κατάρρευση του έργου (Σχήμα 1.3(β')).



Σχήμα 1.3: α) Διάδοση διατμητικών ζωνών από τη στέψη σήραγγας και σχηματισμός κινηματικά ασταθούς πυραμιδοειδούς όγκου και β) κατάρρευση του φρέατος στο Σαο Πάολο Βραζιλίας στις 12 Ιανουαρίου 2007 (Oliveira, 2008).

Η περιγραφή της κατασκευής σηράγγων με την μέθοδο προσωρινών μέτρων υποστήριξης που είναι ευρέως γνωστή ως NATM γίνεται στο υπο - κεφάλαιο 1.2. Στη συνέχεια η θεωρία σχηματισμού διατμητικών ζωνών σε συνεχή μέσα και η αντίστοιχη μορφή της καθίζησης της επιφάνειας αναφέρονται με συνοπτικό τρόπο στο υπο - κεφάλαιο 1.4. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το ασυνεχές πέτρωμα θεωρείται ως συνεχές μέσο με κατάλληλα υποβαθμιζόμενες ιδιότητες συγκριτικά μ' αυτές του αρρήκτου πετρώματος. Το ισοδύναμο αυτό συνεχές υλικό χάνει την συνέχειά του κατά την αποφόρτιση ή φόρτιση του σύμφωνα με κάποιο μηχανισμό εντοπισμού της διατμητικής παραμόρφωσης σε ζώνες μικρού πάχους μιας τάξης μεγέθους μεγαλύτερη από την μέση διάμετρο του κόκκου του υλικού (Mühlhaus & Vardoulakis, 1987). Το έδαφος ή το πέτρωμα θεωρείται ότι υπακούει σε καταστατικό νόμο χαλάρωσης μιας ή περισσότερων παραμέτρων ελαστικότητας ή αντοχής (συνοχή και γωνία εσωτερικής τριβής) του με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης (strain softening model) πάνω από μια κρίσιμη τιμή. Για την ευκολότερη κατανόηση του μηχανισμού εντοπισμού της παραμόρφωσης πάνω σε ζώνες διάτμησης μικρού πάχους στη γειτονιά σηράγγων και της καθίζησης που λαμβάνει χώρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το πρόβλημα του υποχωρούντος θυροπετάσματος ή καταπακτής (trap-door) που παρουσιάζεται στο υπο - κεφάλαιο 1.5.

Η διερεύνηση αυτή δύναται να οδηγήσει σε συγκεκριμένες προδιαγραφές: (α) εργαστηριακού χαρακτηρισμού των μηχανικών παραμέτρων των πετρωμάτων, (β) του τρόπου σχεδιασμού υπόγειων έργων με βάση κατάλληλη αριθμητική μοντελοποίηση, (γ) της γεωτεχνικής έρευνας στη φάση του προσχεδιασμού, και (δ) της ενόργανης παρακολούθησης κατά την κατασκευή τέτοιων αβαθών υπόγειων έργων κάτω από κατοικημένες περιοχές. Ο Ευρωκώδικας 7 (EC7), που είναι ο κώδικας για το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δεν προδιαγράφει ποιο υπολογιστικό μοντέλο πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων με βάση την προσέγγιση της τελικής οριακής κατάστασης ULS (Ultimate Limit State) και της λειτουργικής οριακής κατάστασης, SLS (Serviceability Limit State). Αποτελεί συνήθη πρακτική σήμερα ο σχεδιασμός τύπου ULS να βασίζεται σε μεθόδους Οριακής Ισορροπίας (limit equilibrium) και οι συνθήκες φόρτισης να υπολογίζονται με τη βοήθεια αναλυτικών λύσεων για απλά προβλήματα (π.χ. καθιζήσεις θεμελιώσεων) ή αριθμητικών μεθόδων για πολύπλοκα προβλήματα όπως οι σήραγγες. Στην παρούσα ΔΔ θα γίνει ένα βήμα μπροστά για την ομογενοποίηση του σχεδιασμού αβαθών σιράγγων με βάση τον Eurocode7. Οι προδιαγραφές σχεδιασμού αβαθών σιράγγων (Design Documents) άπτονται μεταξύ άλλων και με τα ακόλουθα θέματα ή ερωτήματα:

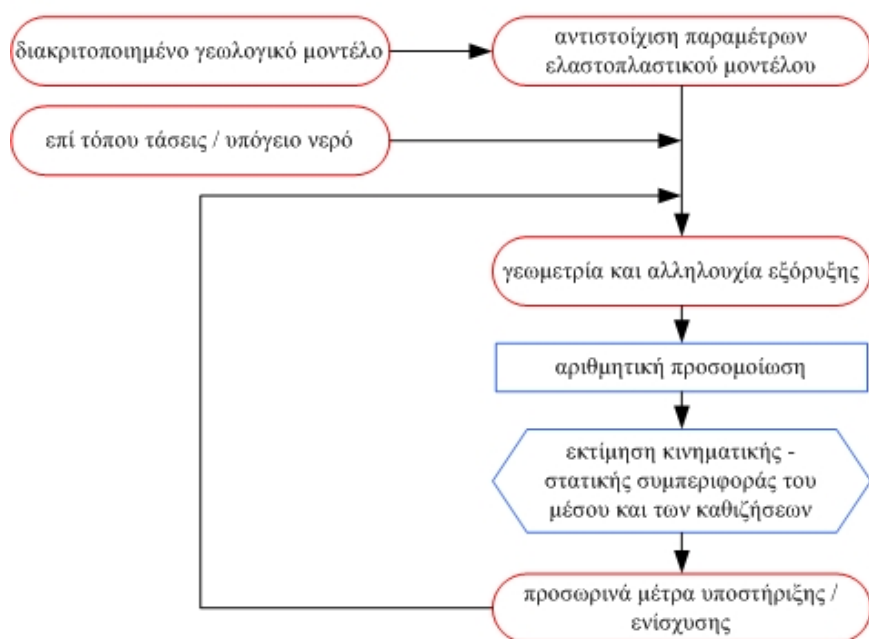
- Το Γεωμηχανικό μοντέλο (Geomechanical model, Ground model)
- Το στατικό μοντέλο της σήραγγας (Structural model of the tunnel)
- Παραδοχές, πληρότητα και τύπος υπολογισμών και προσομοιώσεων
- Θεώρηση του πετρώματος ως συνεχούς ή ασυνεχούς υλικού;
- Καταστατικοί νόμοι και παράμετροι αυτών
- Διδιάστατη ή τριδιάστατη ανάλυση;
- Παρακολούθηση με όργανα (Monitoring) και κρίσιμες τιμές των μετρούμενων μεγεθών threshold values.

Στο 2ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται περιληπτικά οι συνθήκες κατάρρευσης της σήραγγας του Σαο Πάολο και οι ανάδρομες αναλύσεις του φαινομένου αυτού από άλλους ερευνητές. Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου επίλυσης του ανυποστύλωτου συστήματος φρέατος – θαλάμου απλά με την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4, η μέθοδος που ακολουθείται στο υπόψιν κεφάλαιο αφορά καταρχήν την κατασκευή του διακριτοποιημένου γεωλογικού μοντέλου (geological model), την αντιστοίχιση των παραμέτρων του ελαστοπλαστικού μοντέλου στα στοιχεία του πλέγματος, την εισαγωγή των επί τόπου τάσεων και το υπόγειο νερό με σκοπό την κατασκευή του μηχανικού μοντέλου του πετρώματος (ground model). Στη συνέχεια, προσομοιώνεται η μέθοδος διάνοιξης των υπόγειων έργων χωρίς υποστήριξη (γεωμετρία και αλληλουχία) και η ανάλυση των αποτελεσμάτων όσον αφορά στη μορφή των καθιζήσεων της επιφάνειας και τον σχηματισμό διατμητικών

ζωνών, στη μάζα του πετρώματος που επηρεάζεται από τις εκσκαφές. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται με μικρή μεταβολή των δεδομένων εισαγωγής (επί τόπου τάσεις, παράμετροι του μηχανικού μοντέλου κλπ) για να αξιολογηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων από την μεταβολή αυτή. Ανάλογα με τα αριθμητικά αποτελέσματα προτείνονται τα προσωρινά μέτρα υποστήριξης/ενίσχυσης του μετώπου και των παρυφών των υπογείων έργων (τύπος και διαστάσεις) και τα τελικά μέτρα υποστήριξης καθώς και η μέθοδος ενόργανης παρακολούθησης σύμφωνα με τις αρχές της Παρατηρητικής μεθόδου (observational method).

Στο 4ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αλληλεπίδρασης της υποστύλωσης με το περιβάλλον πέτρωμα πριν και μετά την έναρξη της αστοχίας, καθώς και η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις μετρήσεις των εκτασιομέτρων και των καθιζήσεων της επιφάνειας.

Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού αβαθών σηράγγων



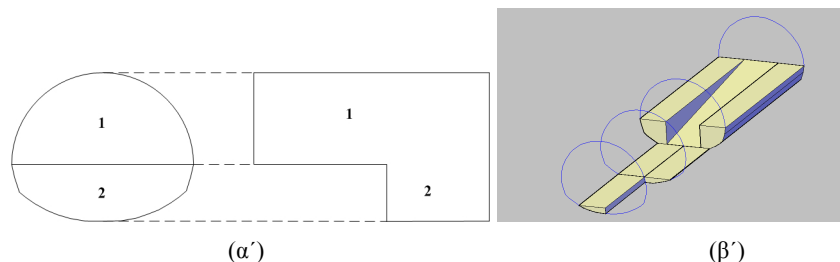
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού αβαθών σηράγγων με τη μέθοδο NATM.

1.2 Μέθοδος κατασκευής σηράγγων με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (NATM)

Ως κλασσική μέθοδος κατασκευής σηράγγων CTM ή όπως είναι ευρέως γνωστή ως NATM νοείται οποιαδήποτε μέθοδος διάνοιξης σήραγγας που χρησιμοποιεί

προσωρινή υποστύλωση (συνήθως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκύρια, αλλά και μεταλλικά πλαίσια κ.λπ.) πριν την εγκατάσταση της τελικής υποστύλωσης. Τα φορτία που εξασκούνται στην προσωρινή υποστύλωση δεν είναι ποτέ τα επί τόπου φορτία πριν την εκσκαφή. Ευτυχώς οι αρχικές επί τόπου τάσεις απομειώνονται κατά την παραμόρφωση του εδάφους κατά την διάνοιξη αλλά και αμέσως μετά την τοποθέτηση της υποστύλωσης. Αυτό το φαινόμενο λέγεται φαινόμενο «ανα-κουφιστικού τόξου (arching)». Εφόσον η παραμόρφωση του εδάφους εξαρτάται απ' την παραμόρφωση της υποστύλωσης τότε το φορτίο που εξασκείται στην υποστύλωση συνδέεται με κάποιο τρόπο με την ίδια την παραμόρφωση. Αυτή είναι έτσι κι αλλιώς η περίπτωση της αλληλεπίδρασης εδάφους - δομικής κατασκευής και αποτελεί εγγενή δυσκολία στο σχεδιασμό εφόσον το φορτίο δεν είναι ανεξάρτητη μεταβλητή του προβλήματος. Επομένως το πρόβλημα της σχέσης του φορτίου και της παραμόρφωσης είναι σημαντικό στο σχεδιασμό σιηράγγων.

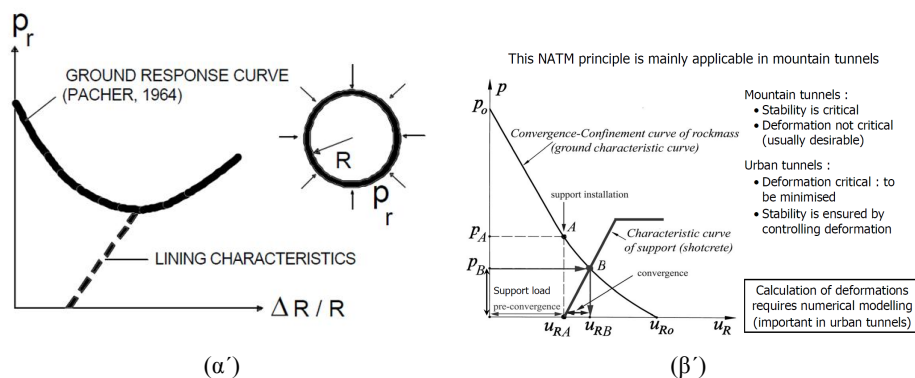
Όπως είναι αντιληπτό οι μεγάλες διατομές σιηράγγων είναι λιγότερο ευσταθείς από τις μικρότερες διατομές και όταν βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους προκαλούν μεγαλύτερες καθιζήσεις που είναι ανεπιθύμητες. Όταν η διατομή είναι μεγαλύτερη των $30\div 40\text{ m}^2$ σε μαλακές εδαφοβραχώμαζες τότε σύμφωνα με τη NATM - σε αντίθεση με τη μέθοδο TBM - η διάνοιξη γίνεται τμηματικά σύμφωνα με τις λεπτομέρειες στο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5: (α) Κορυφαίο μέτωπο (θόλος) με βαθμίδα, σε εγκάρσια (αριστερά) και διαμήκη τομή (δεξιά)(1. Calotte, 2. Βαθμίδα), (β) ισομετρική άποψη του κορυφαίου-προπορευόμενου μετώπου, της βαθμίδας (bench) αντίστροφου τοξωτού δαπέδου (Invert) (Kolymbas, 2005)

Η NATM συνοδεύεται πάντα από την παρακολούθηση των μεταβολών κινηματικών/στατικών μεγεθών (συνήθως κινηματικών) κατά την διάνοιξη της σήραγγας. Η σύγχρονη Παρατηρητική Μέθοδος (modern Observational Method) που χρησιμοποιείται ευρέως για τον σχεδιασμό του συστήματος υποστήριξης των σιηράγγων και της βελτίωσης του γεωλογικού και μηχανικού μοντέλου του εδάφους, συνδυάζει την παρακολούθηση των επιφανειακών παραμορφώσεων κατά την διάνοιξη της σήραγγας και την ανάδρομη ανάλυση με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών [(Terzaghi, 1943), (Terzaghi & Peck, 1948), (Peck, 1969) και (Panet, 1995)]. Η

ανάδρομη υπολογιστική ανάλυση (back-analysis) αποτελείται από δύο συστατικά στοιχεία, ήτοι την «προωθημένη» και την «οπισθοδρομική» ανάλυση. Η προωθημένη ανάλυση (forward analysis) αποτελεί μια αντιστοίχιση (mapping) μεταξύ, των παραμέτρων σχεδιασμού (όχι μόνο των εδαφικών αλλά και των κατασκευαστικών) και των υπολογιζόμενων αντιδράσεων (calculated responses) του εδάφους. Η οπισθοδρομική ανάλυση που εφαρμόζεται στη συνέχεια είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος ρυθμίζει τις παραμέτρους που αφορούν τον σχεδιασμό, κατά τρόπο τέτοιο που να ελαχιστοποιούνται οι διαφορές μεταξύ των μετρούμενων στο πεδίο μεγεθών και των αντιστοίχων που υπολογίζονται κατά το στάδιο της μελέτης από τα υπολογιστικά προγράμματα. Η μέθοδος ανάδρομης ανάλυσης, παραμένει ακόμα σήμερα ένα θέμα που χρήζει περαιτέρω μελέτης και για την αξιοπιστία του οποίου δεν υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στους ερευνητές που την προτείνουν και στους μηχανικούς. Εν πάσει περιπτώσει, οι δύο αυτοί τύποι ανάλυσης χρησιμοποιούνται επαναληπτικά, ώστε μετά την ανάδρομη ανάλυση να επιλέγονται οι κατάλληλες παράμετροι, είτε για την επαλήθευση, είτε για την διόρθωση του αρχικού σχεδιασμού του συστήματος υποστήριξης σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 1.6: (α) Βελτιστοποίηση των συνθηκών σύγκλισης και ευστάθειας της σήραγγας κατά Müller & Fecker (1978), και (β) λεπτομέρειες υπολογισμού των τελικών φορτίων επί της υποστύλωσης και του εδάφους ανάλογα με την απόσταση τοποθέτησης της υποστύλωσης από το μέτωπο της σήραγγας.

Η προωθημένη ανάλυση μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες:

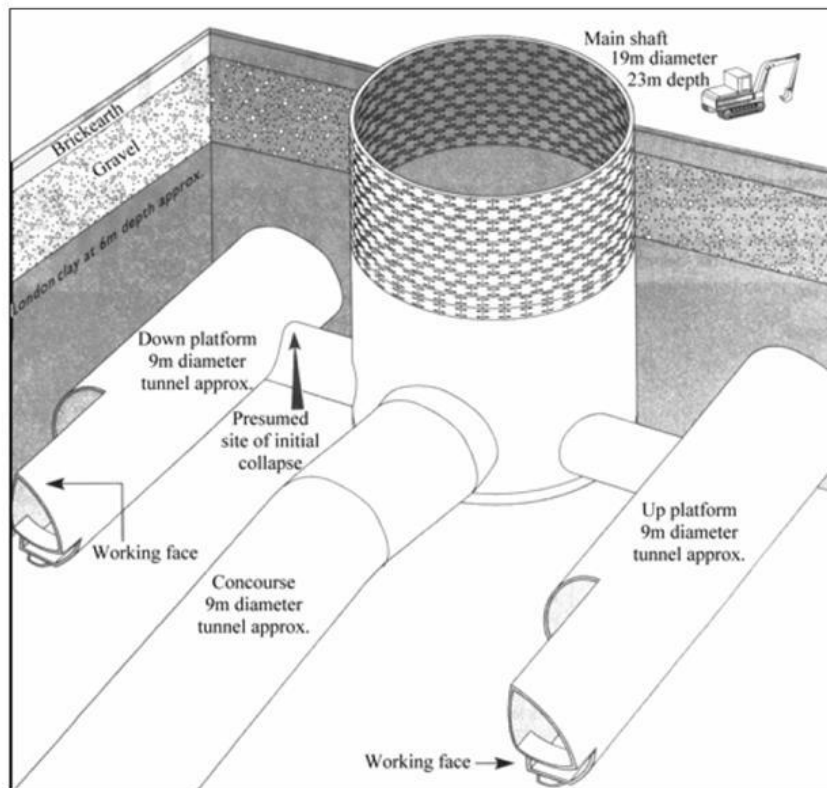
- A. Η πρώτη κατηγορία αφορά την εφαρμογή της αναλυτικής λύσης που βασίζεται στην κλασική μέθοδο σύγκλισης – αποτόνωσης (convergence-confinement) (Panet, 1995). Υπό την θεώρηση αξονικής συμμετρίας και συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain), η μέθοδος σύγκλισης – αποτόνωσης συσχετίζει απευθείας την παραμόρφωση του συνόρου της σήραγγας με την «φανταστική» (fictitious) εσωτερική πίεση στα σημεία σύγκλισης της σήραγγας που είναι ποσοστό της επί τόπου τάσης το οποίο απομειώνεται με κατάλληλο τρόπο όσο απομακρυνόμαστε από το μέτωπο (Σχήμα 1.6). Στο Σχήμα 1.6(α')

χρησιμοποιείται μια αναπαράσταση των Muller and Fecker. Η τετμημένη (άξονας X) είναι η σχετική ακτινική μετατόπιση $\Delta R/R$ και η τεταγμένη (άξονας Y) η πίεση επί του πετρώματος και τελικά επί της υποστύλωσης p_r . Στην εικόνα πρέπει να σημειωθεί η αξονική συμμετρία τόσο της γεωμετρίας όσο και των τάσεων (Müller & Fecker, 1978). Η μέθοδος συσχετίζει ποσοτικά τις πιέσεις που αναπτύσσονται στην υποστύλωση με τις μετατοπίσεις των τοιχωμάτων της σήραγγας για το σύνολο της συμπεριφοράς του εδάφους, ώστε να παρέχει ένα εργαλείο σχεδιασμού της υποστήριξης ή του ελέγχου των μετατοπίσεων του εδάφους (lining pressure or ground-displacement control) (Σχήμα 1.6(β')). Έχει το μειονέκτημα ότι δύσκολα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάδρομη ανάλυση, όταν οι συνοριακές συνθήκες δεν συμφωνούν με την αρχική θεώρηση, της επίπεδης παραμόρφωσης.

- B. Η δεύτερη κατηγορία είναι η διδιάστατη ή τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση των εκσκαφών και υποστυλώσεων, όπως τα πεπερασμένα στοιχεία, οι πεπερασμένες διαφορές, οι μέθοδοι διακριτών και συνοριακών στοιχείων (Zienkiewicz & Taylor, 2000). Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να λάβουν υπόψη σύνθετες συνοριακές συνθήκες και καταστατικούς νόμους και μπορούν θεωρητικά να συνδέσουν οποιεσδήποτε από τις σχεδιαστικές παραμέτρους με οποιεσδήποτε από αυτές που έχουν υπολογισθεί, όταν υπάρχουν τα αντίστοιχα δεδομένα οργανομετρήσεων. Έχουν το μειονέκτημα ότι έχουν μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις, ειδικότερα σε περιπτώσεις αργής σύγκλισης και είναι δύσκολη η εφαρμογή τους για ανάδρομες αναλύσεις.
- Γ. Η τρίτη κατηγορία βασίζεται σε μεθόδους «τεχνητής νοημοσύνης» σε συνδυασμό με στατιστικές μεθόδους εκμάθησης, όπως τα «νευρωνικά δίκτυα» κλπ. (Yu et al., 2007 και Jiang et al. 2011). Οι αλγόριθμοι αυτοί «εκπαιδεύονται» με πραγματικά δεδομένα, ή αριθμητικές προσομοιώσεις, ώστε να δημιουργηθεί μια σχέση μεταξύ κάποιων εκ των σχεδιαστικών παραμέτρων με τις αντίστοιχες μετρηθείσες ή υπολογισθείσες, με χρήση στατιστικών μεθόδων. Οι υπολογιστικές ανάγκες μειώνονται σε ικανοποιητικό ρυθμό, αλλά η εφαρμογή τους σε πραγματικές συνθήκες, δεν είναι πάντα ακριβείς και εξαρτώνται από την περιπλοκότητα του εκάστοτε προβλήματος, από τα παραδείγματα που χρησιμοποιούνται κατά το στάδιο της εκπαίδευσης και πολλούς ακόμα παράγοντες.

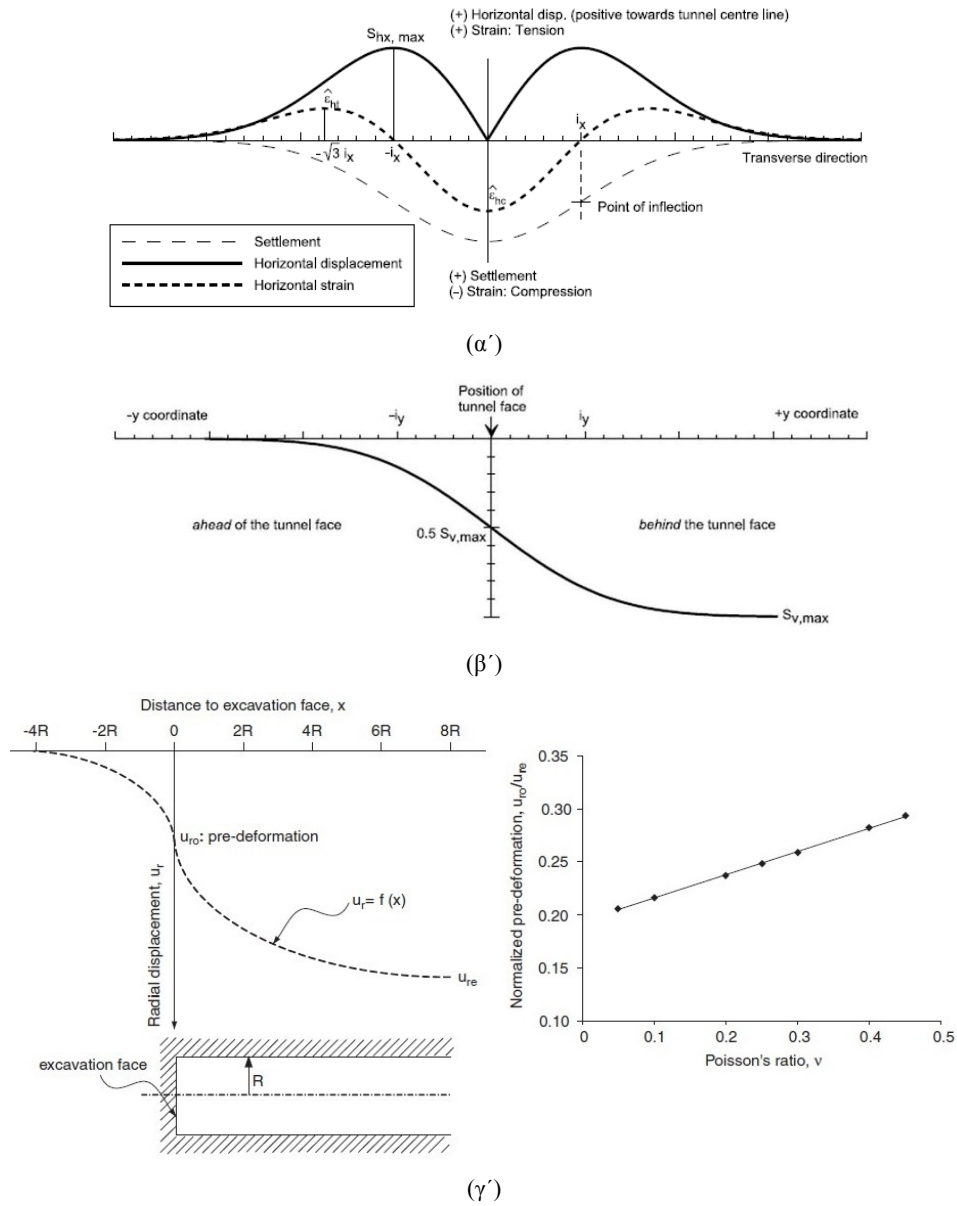
Η εφαρμογή της CTM εντάθηκε από τη δεκαετία του '80, αλλά ένας αρκετά μεγάλος αριθμός καταρρεύσεων υψηλού προφίλ σε κατοικημένες περιοχές – λ.χ. Μόναχο (1994), Heathrow (1994) σύμφωνα με τις λεπτομέρειες του Σχήματος 1.7 και Lane Cove, Australia (2005) και αρκετών άλλων όπως φαίνεται στον Πίν. 1.2 - οδήγησε στην ανάγκη για αναζήτηση βελτιωμένων προδιαγραφών μελέτης-κατασκευής, προτύπων και διαδικασιών ασφάλειας κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή αβαθών σηράγγων.

Υπό συνήθεις συνθήκες κατασκευής σηράγγων σε κατοικημένες περιοχές, οι πάσης φύσεως κατασκευές (λ.χ. κτίρια, υποδομές κ.λπ.) που βρίσκονται στην επι-



Σχήμα 1.7: Σκίτσο του καταρρεύσαντος συστήματος φρέατος-στοάς στο αεροδρόμιο του Heathrow (Oliver, 1994)

φάνεια ή πλησίον αυτής (λ.χ. σωληνώσεις δικτύων κοινής ωφέλειας) έχουν τις πιο άμεσες επιπτώσεις, εξαιτίας των καθιζήσεων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8(α'), οι οριζόντιες παραμορφώσεις γίνονται εφελκυστικές στο σημείο καμπής του προφίλ της καθίζησης, με συνέπεια να δημιουργούν στατικά προβλήματα στις υποδομές/κατασκευές κοντά στην επιφάνεια αλλά και στο έδαφος λόγω της σημαντικότερα χαμηλότερης αντοχής σε εφελκυσμό συγκριτικά με την αντοχή σε θλίψη των γεωλογικών υλικών και των ψαθυρών τεχνητών δομικών υλικών (τσιμέντο κ.λπ.). Η καμπύλη της διαμήκου κατανομής της καθίζησης φαίνεται στο Σχήμα 1.8(β'), και δείχνει ότι η καθίζηση της επιφάνειας επισυμβαίνει και μπροστά από το μέτωπο της σήραγγας («προ-καθίζηση»). Όταν η σήραγγα βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα η καθίζηση μπροστά από το μέτωπο μπορεί να οφείλεται στην ταπείνωση του τελευταίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αριθμητική ανάλυση έχει δείξει ότι ο λόγος του Poisson του πετρώματος που περιβάλλει μια σήραγγα επηρεάζει σημαντικά τις κανονικοποιημένες ελαστικές συγκλίσεις του συνόρου μιας κυκλικής σήραγγας σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (Unlu & Gercek, 2003). Αυτή η επίδραση πάνω στην κανονικοποιημένη προ-σύγκλιση του μετώπου σήραγγας ήτοι του λόγου της ακτινικής μετατόπισης του μετώπου προς την ακτινική μετατόπιση



Σχήμα 1.8: Μορφή των καθιζήσεων της επιφάνειας του εδάφους: (α) κατανομή της οριζόντιας μετατόπισης και παραμόρφωσης κατά την εγκάρσια τομή στον άξονα της σήραγγας και η «σκάφη» της καθίζησης (settlement trough), (β) διαμήκης προφίλ της καθίζησης σε τομή παράλληλα με τον άξονα της σήραγγας, και (γ) διαμήκης προφίλ της ακτινικής μετατόπισης στο σύνορο σήραγγας με επίδραση του λόγου του Poisson στην κανονικοποιημένη προ-παραμόρφωση (πάνω στο μέτωπο) κυκλικής σήραγγας σε υδροστατικό πεδίο τάσεων (Unlu & Gercek, 2003).

μακριά από τη σήραγγα, φαίνεται στο Σχήμα 1.8(γ'). Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό – αναφέρεται και στο υπο - κεφάλαιο 1.5 – οι συγκλίσεις της σήραγγας μεταδίδονται στην επιφάνεια όπου εκδηλούνται με την μορφή καθιζήσεων βάσει μιας ορισμένης «συνάρτησης μεταφοράς των καθιζήσεων του εδάφους» που εξαρτάται από το βάθος της σήραγγας και τις μηχανικές ιδιότητες των υπερκειμένων αυτής πετρωμάτων και εδαφών. Με την παρατήρηση αυτή γίνεται κατανοητό ότι ο λόγος του Poisson θα επηρεάζει και τις καθιζήσεις της επιφάνειας. Επειδή ο λόγος του Poisson επηρεάζει και τον λόγο της οριζόντιας προς την κατακόρυφη επί τόπου τάση, μια ταξινόμηση των πετρωμάτων ανάλογα με τον λόγο του Poisson θα είχε μεγάλη χρησιμότητα στον σχεδιασμό και την προσομοίωση της διάνοιξης αβαθών σηράγγων. Μια τέτοια ταξινόμηση που έχει προταθεί από τον Gercek (2007) παρουσιάζεται στον Πίν. 1.1.

Πίνακας 1.1: Ταξινόμηση των βραχομαζών ανάλογα με το λόγο του Poisson.

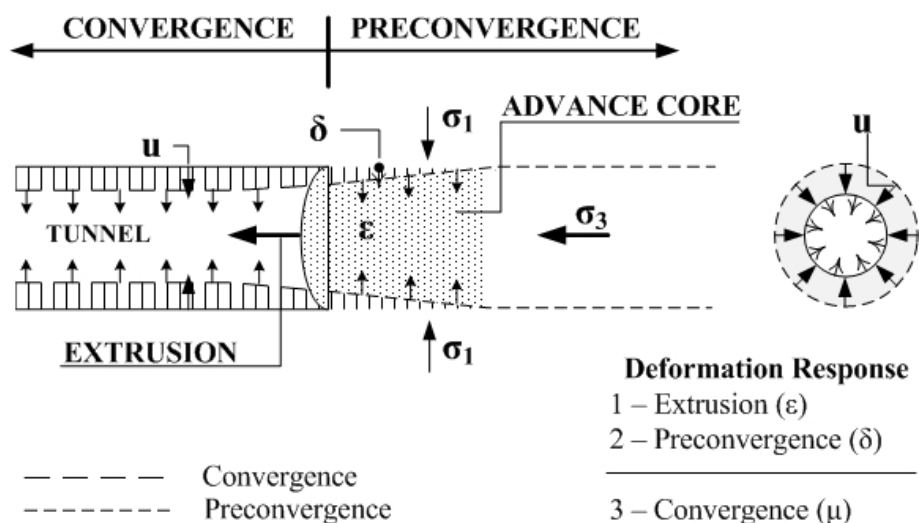
Κατηγορία	Λόγος του Poisson
Πολύ μικρός	$0.0 < \nu \leq 0.1$
Μικρός	$0.1 < \nu \leq 0.2$
Μέτριος	$0.2 < \nu \leq 0.3$
Μεγάλος	$0.3 < \nu \leq 0.4$
Πολύ μεγάλος	$0.4 < \nu \leq 0.5$

Επίσης εκτός των ανωτέρω δύο τύπων καθιζήσεων (καθίζηση και προ-καθίζηση υπερκειμένων), σε πολλές περιπτώσεις χαλαρού ή πολύ ψηλής ενδοτικότητας και χαμηλής αντοχής εδάφους εντός του οποίου γίνεται η διάνοιξη μιας σήραγγας, μπορεί να επισυμβεί και «εξόγκωση» (προς-τα-έξω-παραμόρφωση) του μετώπου της (Σχήμα 1.9).

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω για τον καλύτερο έλεγχο των προκαλουμένων καθιζήσεων κατά την φάση της διάνοιξης σηράγγων μεγάλης διατομής διενεργείται τμηματική όρυξη αυτών. Μια τέτοια τμηματική διάνοιξη της τελικής διατομής φαίνεται στο Σχ. 1.10. Επιπροσθέτως χρησιμοποιούνται μέτρα υποστήριξης μεγάλης ακαμψίας που τοποθετούνται σε μικρή απόσταση από το μέτωπο και γίνεται γρήγορο κλείσιμο του δακτυλίου της προσωρινής υποστήριξης.

Όταν οι καθιζήσεις δεν μπορούν να ελεγχθούν για οποιοδήποτε λόγο (είτε εξαιτίας των χαμηλών παραμέτρων ελαστικότητας και αντοχής του εδάφους που δεν έχουν προβλεφθεί σωστά σε συνδυασμό με μεγάλες υπόγειες εκσκαφές και πλημμελή υποστήριξη της οροφής, είτε λόγω ύπαρξης σημαντικών ποσοτήτων εδαφικού νερού, είτε λαθών κατά την κατασκευή) τότε επισυμβαίνουν καταρρεύσεις του εδάφους μεταξύ της σήραγγας και της ελεύθερης επιφάνειας (Σχήμα 1.11).

Οι καταρρεύσεις ή κατακρημνίσεις της οροφής, παρά το γεγονός ότι δεν συμβαίνουν συχνά, είναι πιθανό να έχουν καταστροφικές κοινωνικο-οικονομικές συνέπειες, διακοπές των έργων και απώλειες ανθρώπινων ζώων. Όλα τα παραπάνω καθιστούν τα υπόγεια έργα και ιδιαιτέρως αυτά που βρίσκονται πλησίον της επιφάνειας του εδάφους (λ.χ. βάθη ίσα με 1 έως 3 διαμέτρους της σήραγγας) επισφαλή

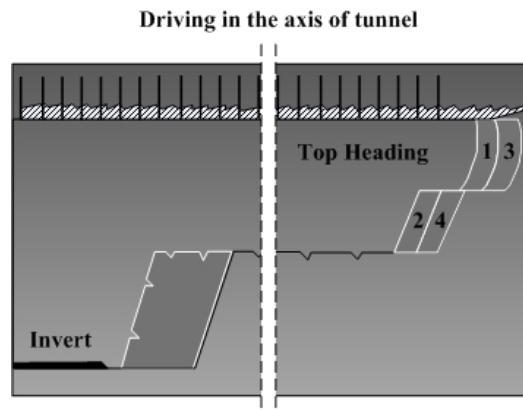


Σχήμα 1.9: Προ-καθίζηση (δ) και καθίζηση (μ), καθώς επίσης και εξόλκυση του μετώπου (ϵ) λόγω της εκτόνωσης των τάσεων γύρω από το μέτωπο σήραγγας (Lunardi & Bindi, 2004).

και πολύ απαιτητικά κατά την εφαρμογή τους σε κατοικημένες περιοχές.

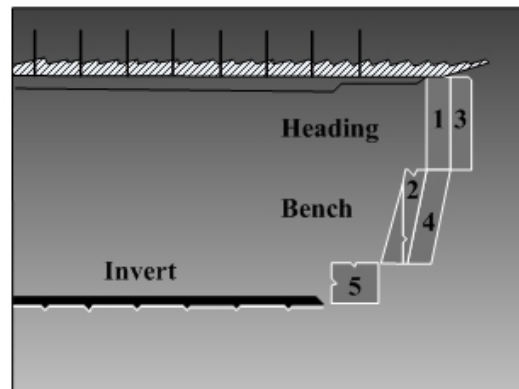
Πολύ πριν την εκδήλωση τέτοιων αστοχιών σε αβαθείς σήραγγες που μεταδίδονται έως την επιφάνεια, το φαινόμενο αυτό ήταν από πολύ παλαιά γνωστό στη Μεταλλευτική (δηλ. 1880 και πιο πριν) εξαιτίας καθιζήσεων και αστοχιών πάνω από υπόγειες εκμεταλλεύσεις μεταλλείων (Σχήμα 1.12).

Ήδη από το τελευταίο μισό του 19ου αιώνα είχαν διατυπωθεί θεωρίες καθίζησης και ενδεχόμενης κατακρήμνισης των υπερκειμένων λόγω υπογείων εκμεταλλεύσεων γαιανθράκων και λιγνιτών σε χώρες όπως το Βέλγιο, η Γαλλία και η Γερμανία. Η πιο διαδεδομένη θεωρία τότε ήταν αυτή του Fayol (1885) που βασίστηκε σε εργαστηριακά αναλογικά πειράματα σε κιβώτια με άμμο, γύψο και άργιλο. Το συμπέρασμα από αυτά τα πειράματα ήταν ότι οι ρηγματώσεις του εδάφους διαδίδονται σε ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες σχηματίζοντας θόλο πάνω από τα υπόγεια. Το ύψος του θόλου αυτού σχετίζεται με το πάχος του κοιτάσματος που έχει εξορυχθεί, ο δε αυξανόμενος όγκος του θρυμματισμένου πετρώματος πληρεί τα κενά των υπογείων. Ο Fayol συμπέρανε ότι σε ομοιογενές έδαφος ο θόλος της καθίζησης λαμβάνει τη μορφή μισού ελλειψοειδούς με τον μεγάλο ημιάξονα κατακόρυφο και το μικρό ίσο με την οριζόντια έκταση των υπογείων εκσκαφών όπως φαίνεται στο Σχ. 1.13. Όσο επεκτείνονται τα υπόγεια προς το βάθος ή οριζοντίως δημιουργούνται νέοι ελλειψοειδείς θόλοι ενώ οι επιφάνειες του παρουσιάζουν συνεχώς αυξανόμενες μετακινήσεις πάνω στις επιφάνειες των όσο η καθίζηση αυξάνει εντός αυτών και κάτω από αυτούς.

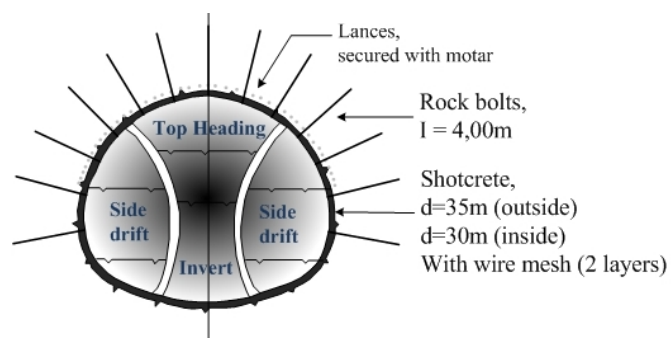


(α')

Driving in the axis of side drift



(β')

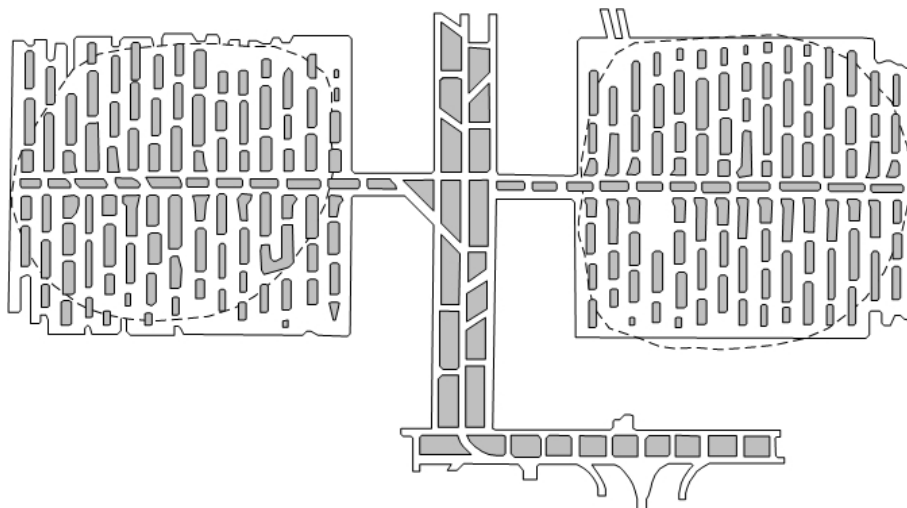


(γ')

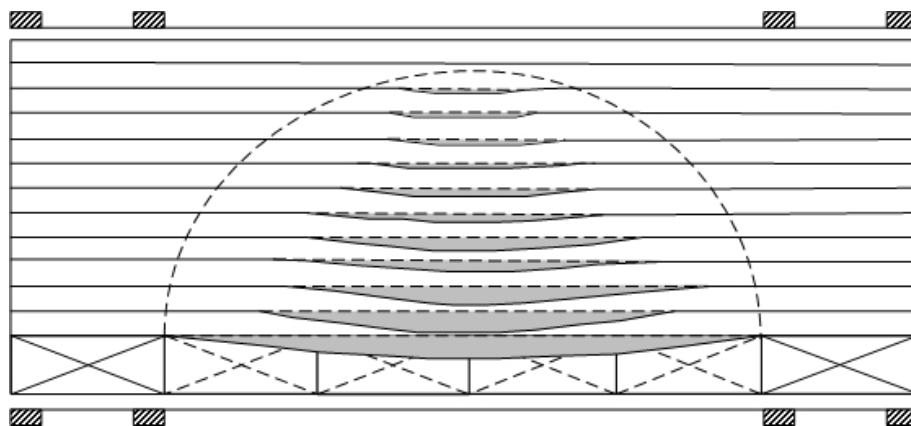
Σχήμα 1.10: Τμηματική όρυξη της τελικής διατομής σήραγγας σε περισσότερα του ενός στάδια (κορυφαίο μέτωπο μορφής στοάς, ορθή βαθμίδα και αντίστροφο τόξο) με τη χρήση προσωρινής υποστήριξης μεγάλης ακαμψίας και γρήγορο κλείσιμο του δακτυλίου υποστήριξης για έλεγχο των καθιζήσεων.



Σχήμα 1.11: Εμφάνιση επιφανειακού κρατήρα λόγω κατάρρευσης του μετώπου μίας σήραγγας κατά την φάση της εκσκαφής με τη μέθοδο NATM για τον υπόγειο του Μονάχου (27 Σεπτ. 1994).



Σχήμα 1.12: Κυκλικά ίχνη συστοιχιών ρωγμών που παρουσιάζουν σημαντικό άνοιγμα (aperture) ίσο με 8 – 10 in (στο αριστερό τμήμα) και μικρότερο άνοιγμα στο δεξιό τμήμα Β πάνω από την οροφή κοιτάσματος άνθρακα στις Η.Π.Α. που εκμεταλλεύετο με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Οι ρωγμές αυτές μπορούν να φθάσουν έως την επιφάνεια αν το κοιτάσμα δεν βρίσκεται πολύ βαθειά (Peele, 1941).



Σχήμα 1.13: Σχηματισμός θόλου στα αναλογικά πειράματα του Fayol (1885).

Πίνακας 1.2: Παραδείγματα καταρρεύσεων σηράγγων που κατασκευάστηκαν με την NATM.

DATE	LOCATION	CASE	TYPE OF FAILURE	CONSEQUENCES	EXCAVATION METHOD
Sep. 1994	Germany	Munich Underground	Water intrushes, ground materials inflow, large subsidence crater	Bus fell into the crater, three passengers killed, 30 passengers injured	NATM, Excavation by excavator
Oct. 1994	UK	Heathrow Express Tunnel	Serious distress in tunnel linings, 10m crater formed	Differential settlement induced at adjacent buildings, services Terminal 4 halted for one month, remedial measures caused chaos at Heathrow Airport, recovery cost £150M (3 times original contract sum)	NATM
Jan. 2005	Barcelona, Spain	Carmel Tunnel	30m wide and 32m deep crater formed	2 five-storey buildings and a smaller one demolished, more than 50 families made homeless	NATM
Feb. 2005	Switzerland	Lausanne M2 Metro	Collapse in area of soft ground (lake deposits), 50m ³ of material displaced into the tunnel at a depth of 12m, leading to a crater at the surface	People in two buildings, a supermarket and a food outlet in commercial district evacuated when their cellars collapsed, no injuries reported	Roadheader, NATM

Jan. 2007	Brazil	Sao Paulo metro station	Collapse of the station tunnel and partial damage to the access shaft. The rate of settlement at the tunnel crown increased rapidly and reached 15mm to 20mm two to three days before the failure	Several vehicles dropped into the 30m-deep hole, seven persons killed	NATM
Jan. 2008	China	Guangzhou Metro Line 5	Collapse of the cross passage tunnel	Cave-in at the road, about $100m^2$ on plan, no injury	cross-passage (between twin TBM tunnels) collapse
Nov. 2005	Australia	Lane Cove Tunnel, Australia, 2 Nov. 2005	Collapse occurred during breakout for a ventilation tunnel from the running tunnel A 10m by 10m, 25m deep crater formed in the ground between a 3-storey high residential building and a highway exit ramp	A 3-storey building partially collapsed and 47 residents evacuated, A water main burst, Citybound road closed	NATM
Mar. 1980	Germany	Munich Underground	Local variation in geology with reduction in marl cover to 1-1.5m and led to overstraining of the sprayed concrete temporary lining. 10m wide, 14m deep sinkhole	Delay to works	New Austrian Tunnelling Method (NATM) construction of twin 6m diameter tunnels

Nov. 1991	Korea	Seoul Metro, Line 5 - Phase 2	Thin weathered rock cover, Inflow of soil and groundwater, After blasting: daylight collapse up to ground surface, involving the embankment of a river, 20m x 15m and 4m deep crater at the ground surface, Water from river flowed into the tunnel	Roads collapse and gas mains fractured	Construction of Seoul Metro tunnel near Majang by drill and blast method (NATM)
--------------	-------	-------------------------------------	--	--	---

Nov. 1991	Korea	Seoul Metro, Line 5 - Phase 2	<p>Weathered granite at the face and high permeability soil, 27 November 1991, 10:40am: blasting, 4:00pm : rock falls at the tunnel face, 10:00pm: soil and groundwater inflow into the tunnel, 28 November 1991 3:20am: substantial daylight collapse up to ground surface forming a 25m diameter crater</p>	<p>Three buildings collapsed, Several water mains, gas pipes and sewerage were broken</p>	<p>Construction of Seoul Metro tunnel near Dongsan by drill and blast method (NATM). Lessons learnt, Insufficient ground investigation, Unexpected groundwater inflow, No tunnel face stability analysis, No consideration of blasting effects closed to weathered zone with shallow cover</p>
--------------	-------	-------------------------------------	---	---	--

Feb. 1992	Korea	Seoul Metro, Line 5 - Phase 2	Weathered granite at the tunnel face and high permeability soil, Significant inflow of groundwater, About 4.5 tonnes of soil flowed into tunnel	<ul style="list-style-type: none"> • 38m wide x 6m deep crater at the ground surface 	Construction of Seoul Metro tunnel near Youido by road header (NATM). Lessons learnt, Insufficient ground investigation, Unexpected groundwater inflow, No tunnel face stability analysis
Jan. 1993	Korea	Seoul Metro, Line 5 - Phase 2	The failure, Tunnel collapsed after removing spoil, Tunnel collapsed starting from the left side of the crown, Possible cause of failure, Weathered granite at the tunnel face, High groundwater pressure	900m ³ of loose material flowed into the tunnel and water inflow of up to 300 litres/min recorded	Construction of Seoul Metro tunnel near Yongdungpo by drill and blast method (NATM)

Feb. 1993	Korea	Seoul Metro, Line 5 - Phase 2	Daylight collapse when weathered granite found at the tunnel face, Groundwater flowed into the tunnel, 60m wide oval shaped area subsided, Possible cause of failure, Weathered granite and alluvium at the tunnel face, High groundwater pressure	-	Construction of Seoul Metro tunnel near Anyangcheon by roadheader (NATM), Lessons learnt, Insufficient ground investigation, Unexpected groundwater inflow, No tunnel face stability analysis
Sept. 1977	Hong-Kong	MTR Modified Initial System, Prince Edward Station, Nathan Road	A wall section of the running tunnel under Nathan Road, Possible causes of failure, Gap existed between the ground treatment above the station tunnel and that above the running tunnel allowing the soil to flow into the tunnel collapsed	Nathan Road between Argyle Street and Arran Street closed as a safety measure, Three buildings (Nos. 745, 745A and 745B Nathan Road) involving 100 people evacuated, Closure Order issued for nearby shops and a petrol station	NATM. A running tunnel (5m in diameter) being constructed from Prince Edward Station by the drill and blast method

Jan. 1983	Hong-Kong	MTR Island Line, 22 Hennessy Road	Water-bearing fill flowed into the tunnel, opening a hole at the road above, Possible cause of failure, Misinterpretation of the geology by the Contractor, Blasting went too far, resulting in the tunnel penetrating the rock into soft ground	1,500m ³ of material flowed into the tunnel creating a void of an area of 100m ² and 30m deep beneath the road surface, Consequences Cracks found in the granite masonry of the outside wall of a building at 22 Hennessy Road, At least 21 timber piles beneath an adjacent building of 22 Hennessy Road exposed, More than 150 people in 18-22 Hennessy Road evacuated, The building at 18-20 Hennessy Road reopened 3 hours after the incident and the building at 22 Hennessy Road 6 days later	Tunnelling from Admiralty to Causeway Bay for MTR Island Line using the drill and blast method
-----------	-----------	-----------------------------------	--	---	--

1.3 Βασικές αρχές σχεδιασμού αβαθών σήραγγων

Κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή αβαθών σήραγγων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι τρεις παράγοντες:

- I. ο τύπος της συμπεριφοράς (behavioral type) και οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας του υπερκείμενου των εκσκαφών εδάφους ή του πετρώματος. Εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως η ελαστικότητα και η αντοχή του υπερκείμενου εδάφους ή του πετρώματος, η ύπαρξη ασυνεχειών, ο λόγος των επί τόπου τάσεων ή συντελεστής πλευρικής ώθησης, η ενδοτικότητα και αντοχή της υποστήριξης (Wong & Kaiser, 1991), τα σύνορα των γεωλογικών στρωμάτων κ.λπ. Ένας τέτοιος μηχανισμός αστοχίας μη-συνεκτικού υλικού πάνω από καταπακτή που εκδηλώνεται με το σχηματισμό συζυγών ζωνών διάτμησης φαίνεται στο Σχ. 1.14(α')
- II. τα φορτία του εδάφους παραλαμβάνονται από τα διάφορα επί μέρους στοιχεία της υποστύλωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.14, π.χ. τα τμήματα της προσωρινής ή της μόνιμης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (sprayed concrete), αγκύρια, μεταλλικά πλαίσια (steel ribs), ραβδωτά πλαίσια (lattice girders), δοκοί προπορείας (Σχ. 1.15), προκατασκευασμένα τμήματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος (concrete segments) και reinforcement (bolts etc)). Το φαινόμενο του «ανακουφιστικού τόξου» δηλαδή η εξάρτηση (απομείωση) του φορτίου της υποστύλωσης με την υποχώρηση της καταπακτής φαίνεται στο Σχ. 1.14(β')
- III. ο μηχανισμός καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους πάνω από την σήραγγα. Η μορφή της καθίζησης σε εγκάρσια τομή ως προς τον άξονα της σήραγγας μπορεί να παρουσιάζει είτε τη μορφή Γκαουσιανής καμπύλης ή «λεκάνης» σύμφωνα με το μοντέλο του Peck (1969) που παρουσιάζεται στο Σχ. 1.16(α'), όπου το έδαφος δεν έχει ακόμα αστοχήσει.

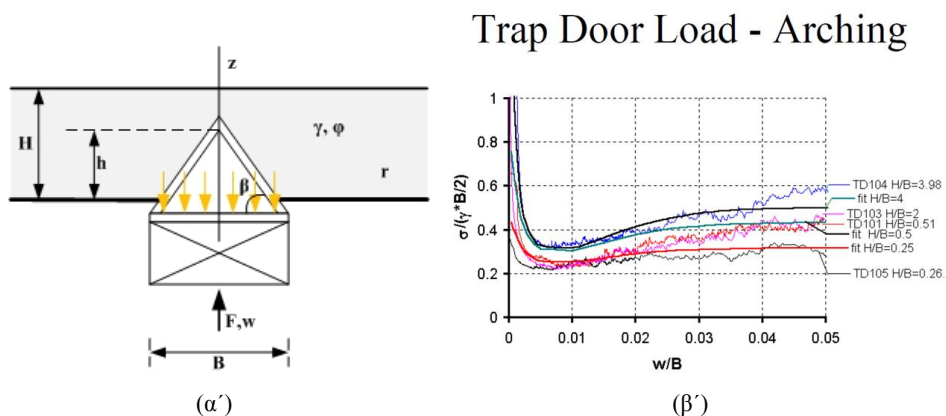
Ο Peck περιέγραψε το προφίλ της καθίζησης με την εξίσωση της κανονικής κατανομής πυκνότητας πιθανότητας

$$S = S_{max} \exp(-y^2/2i^2) \quad (1.1)$$

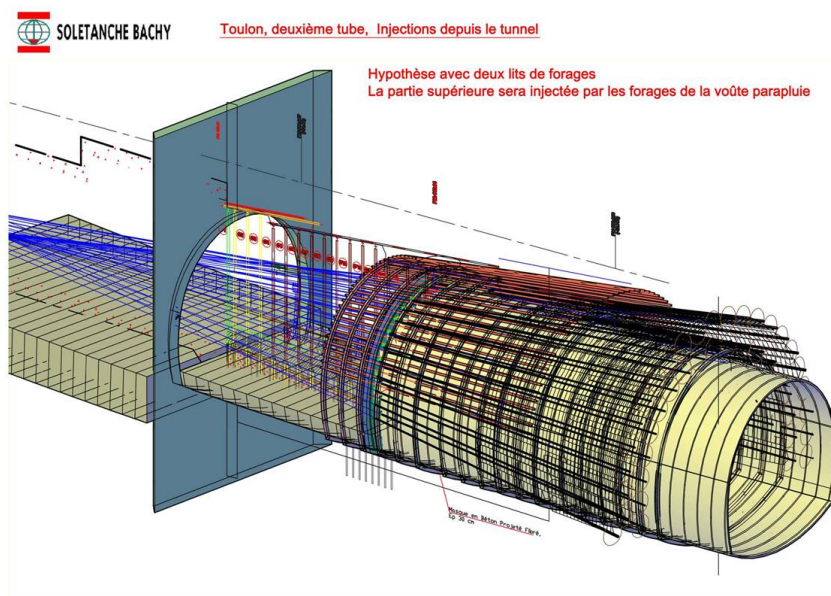
- S_{max} = μέγιστη καθίζηση
- S = καθίζηση σε απόσταση y από τον άξονα της σήραγγας
- i = απόσταση των σημείων αλλαγής της καμπυλότητας της γραμμής καθίζησης από τον άξονα της σήραγγας που χαρακτηρίζει το πλάτος της λεκάνης

Ο όγκος της λεκάνης καθίζησης ανά μέτρο προχώρησης της σήραγγας αποδίδεται ως εξής

$$V_s = \sqrt{2} S_{max} \quad (1.2)$$



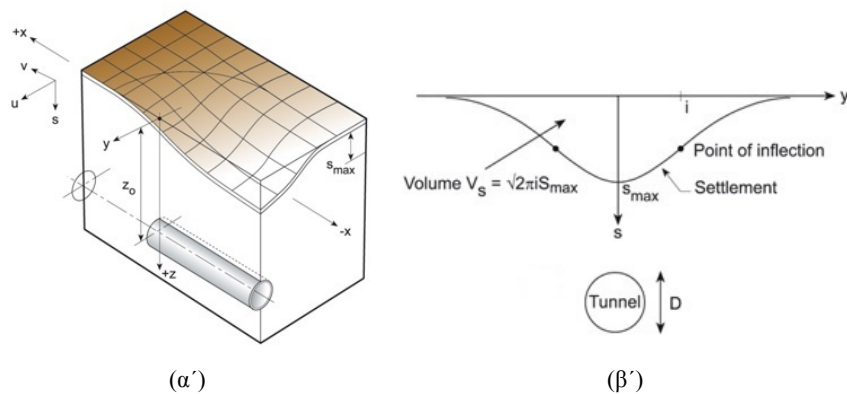
Σχήμα 1.14: (α) Μοντέλο θυροπετάσματος με κωνικό μηχανισμό αστοχίας (Vardoulakis & Sulem, 1995) (β) Αδιάστατη πίεση επί της υποστύλωσης (θυροπετάσματος) συναρτήσει της αδιάστατης υποχώρησης του θυροπετάσματος (δεδομένα αναλογικού μοντέλου κιβωτίου άμμου)(Paramichos E. 2011, private communication).



Σχήμα 1.15: Χρήση δοκών προπορείας κατά την κατασκευή του μετρό της Toulon (courtesy of Jean-Pierre Hamelin of Soletanche Bachy).

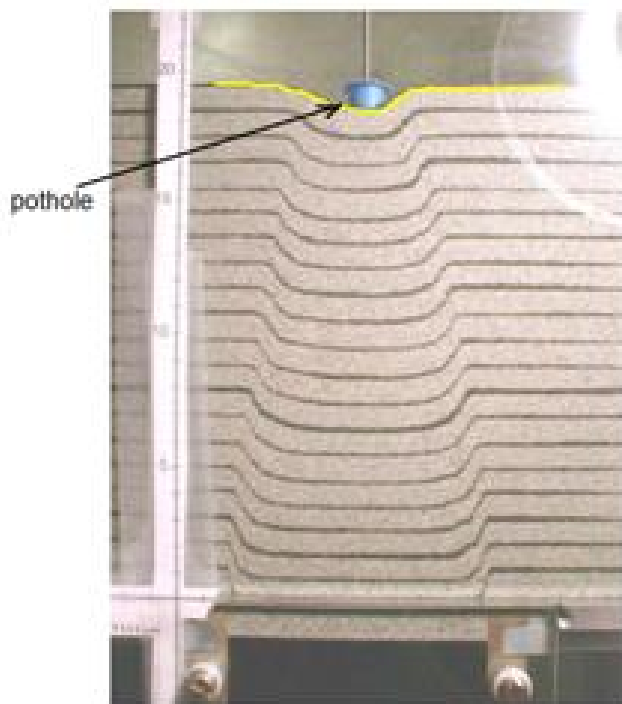
Ο παράγοντας απώλειας όγκου V_l για διατομή σήραγγας A μπορεί επίσης να βρεθεί ως εξής

$$V_l = \frac{\sqrt{2}S_{max}}{A} \quad (1.3)$$



Σχήμα 1.16: Επιφανειακή καθίζηση με τη μορφή Γκαουσιανής καμπύλης (trough) και ορισμός της «απώλειας όγκου» (Peck, 1969).

Όταν η αστοχία που εκδηλώνεται με τη διάδοση συζυγών διατμητικών ρηγμάτων έχει πλέον πλησιάσει την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, τότε η καθίζηση της επιφάνειας σε εγκάρσια κατακόρυφη τομή παίρνει «σκαφοειδή» μορφή (pothole) όπως δείχνουν τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχ. 1.17).



Σχήμα 1.17: Καθίζηση του εδάφους με μορφή σκάφης (pothole) πάνω από μηχανισμό θυροπετάσματος σε κιβώτιο άμμου (Paramichos et al., 2001).

Οι πρώτοι δύο παράγοντες (I,II) αναφέρονται στην «ασφάλεια των σηράγγων», ενώ ο τελευταίος (III) αναφέρεται στην «ασφάλεια των ανθρώπων και των υποδομών που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους». Στόχος της μεθόδου διάνοιξης σηράγγων με προσωρινή υποστήλωση είναι να μειωθεί ο παράγοντας απώλειας όγκου κατά 4 φορές έτσι ώστε να φθάσει τις τιμές που συναντώνται κατά την ολομέτωπη διάνοιξη σηράγγων με TBM's που είναι σε ορισμένες περιπτώσεις 0,5% (με τη χρήση της τελευταίας τεχνολογίας μηχανημάτων TBM EPB ή Slurry) και 1% σε εξαιρετικές περιπτώσεις μόνο (λ.χ. στο project CTRL (rail tunnel) στο Λονδίνο που η απώλεια όγκου έφθασε το 0.5%.

Από την άλλη, οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια μοντελοποίησης της μηχανικής συμπεριφοράς χαλαρών βράχων ή συνεκτικών εδαφών σε περιπτώσεις αβαθών σηράγγων, είναι οι εξής:

- η τασική διαδρομή (επιρροή από το επί τόπου τασικό πεδίο και της μεθόδου κατασκευής),
- ο καταστατικός νόμος μηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος σε τριαξονικές εντατικές συνθήκες δηλ. κάτω από την επίδραση και των τριών κυρίων τάσεων,
- η συμπεριφορά του εδάφους / βραχώμαζας σε μεγάλη κλίμακα,
- η χωρική ετερογένεια των μηχανικών και υδραυλικών ιδιοτήτων των γεωλογικών υλικών που βρίσκονται στην περιοχή επίδρασης της εκσκαφής (Stavropoulou et al., 2007)
- η ποσότητες του υπογείου νερού, η πίεση πόρων και οι συνθήκες στράγγισης.

1.4 Σχηματισμός διατμητικών ζωνών σε εδάφη και πετρώματα

Παρά το γεγονός ότι ο μηχανισμός συγκέντρωσης ή εντοπισμού της παραμόρφωσης αλλάζει ανάμεσα στα διάφορα υλικά, στους διαφορετικούς τρόπους φόρτισης και στις διαφορετικές γεωμετρίες, το φαινόμενο της παραμορφωσιακής χαλάρωσης (strain softening) - που είναι υπεύθυνο για τον εντοπισμό της παραμόρφωσης - παρατηρείται σε μεγάλο αριθμό γεωλογικών υλικών. Εντοπισμός της παραμόρφωσης προκύπτει όταν μία ή περισσότερες συνιστώσες της τάσης σε μία περιοχή μπορεί να απομειώνεται με την αύξηση της πρώτης. Σ' αυτή την περίπτωση, η μελλοντική παραμόρφωση έχει την τάση να συγκεντρώνεται με όλο και περισσότερο αυξανόμενο ρυθμό σ' αυτήν την περιοχή. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε καταστατικό νόμο παραμορφωσιακής χαλάρωσης του πετρώματος και φαίνεται στο Σχ. 1.18(α'). Ο εντοπισμός αυτός της παραμόρφωσης στο τέλος εκδηλώνεται με τη μορφή διατμητικής ρωγμής τύπου II όπως φαίνεται στο Σχ. 1.18(β').



Σχήμα 1.18: (α) Χαλάρωση της τάσης σε τριαξονική δοκιμή, και (β) σχηματισμός ζώνης διάτμησης με τη μορφή διατμητικής ασυνέχειας σε κυλινδρικό δοκίμιο πετρώματος.

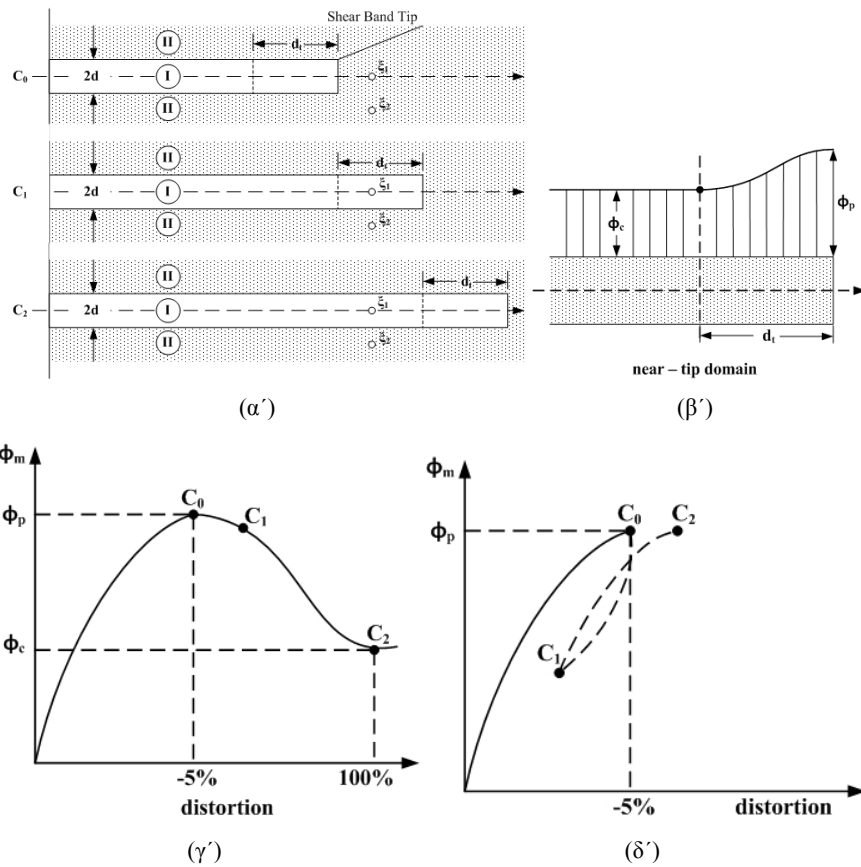
Η ζώνη διάτμησης (shear-band) αποτελεί μία λεπτή στρώση υλικού που υφίσταται χαλάρωση της παραμόρφωσης και βρίσκεται εντός ελαστικά αποφορτιζόμενων ημιχώρων. Στα πετρώματα οι ζώνες διάτμησης έχουν τη μορφή επίπεδων διατμητικών ασυνεχειών. Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό το υλικό εντός της ζώνης διάτμησης έχει μεγαλύτερο πορώδες ή φθορά (damage) από το υλικό που βρίσκεται εκτός αυτής. Συνεπώς τα σύνορα μιας ζώνης διάτμησης είναι γενικά επιφάνειες ασυνέχειας του πορώδους ή της φθοράς του υλικού.

Ένα πιθανό μοντέλο διάδοσης διατμητικής ζώνης εντός του εδάφους που προτάθηκε από τους Vardoulakis et al. (1985) φαίνεται στο Σχ. 1.19. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στην θεώρηση του υλικού σημείου ξ_1 που βρίσκεται μπροστά από την αιχμή της ζώνης διάτμησης στις καταστάσεις C_0 , C_1 και C_2 όπως φαίνεται στο Σχ. 1.19(α'). Το Σχ. 1.19(β') δείχνει την κατανομή της ενεργοποιημένης γωνίας εσωτερικής τριβής που συμβολίζεται ως ϕ_m εντός της ζώνης διάτμησης. Σε απόσταση dt πίσω από την αιχμή της ζώνης διάτμησης η τιμή της γωνίας αυτής πέφτει από την μέγιστη τιμή της που είναι η ϕ_p στην κρίσιμη τιμή της που συμβολίζεται με ϕ_c . Η απόσταση αυτή dt μπορεί να βρεθεί από κατάλληλα πειράματα σύμφωνα με τις λεπτομέρειες που αναφέρονται στο υπόψιν άρθρο. Η μεταβολή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής συναρτήσει της διατμητικής παραμόρφωσης πάνω στο υλικό σημείο ξ_1 σύμφωνα με το μοντέλο αυτό φαίνεται στο Σχ. 1.19 γ. Θεωρείται κατόπιν το υλικό σημείο ξ_2 που βρίσκεται εκτός του επιπέδου της ζώνης διάτμησης στις καταστάσεις C_0 , C_1 και C_2 όπως φαίνεται στο Σχ. 1.19(α'). Το υλικό σημείο ξ_2 πιθανώς υφίσταται καταρχήν αποφόρτιση ($C_0 \rightarrow C_1$) όπως φαίνεται στο Σχ. 1.19(δ') ενώ μετά επανακτά την προηγούμενη κατάσταση του ($C_1 \rightarrow C_2$) επομένως μπορεί να αιτιολογηθεί το γεγονός ότι $\phi_m > \phi_c$ έξω από τη ζώνη διάτμησης.

Η παραμορφωσιακή χαλάρωση που επίσης παρατηρείται συχνά σε ευαίσθητες μαλακές αργίλους είναι πιθανώς η αιτία της σταδιακής ανάπτυξης ζωνών διάτμησης σε αυτές. Το πάχος των ζωνών αυτών δύναται υπό την επίδραση έντονων δια-

τμητικών παραμορφώσεων να είναι αρκετά μικρό. Για το λόγο αυτό, πριν ακόμα την συνολική αστοχία, η διατμητική παραμόρφωση στις ζώνες αυτές μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη. Ένα ακόμα αποτέλεσμα της παραμορφωσιακής χαλάρωσης είναι η εμφάνιση αυξημένης πίεσης πόρων (excess pore pressure) εντός των ζωνών διάτμησης.

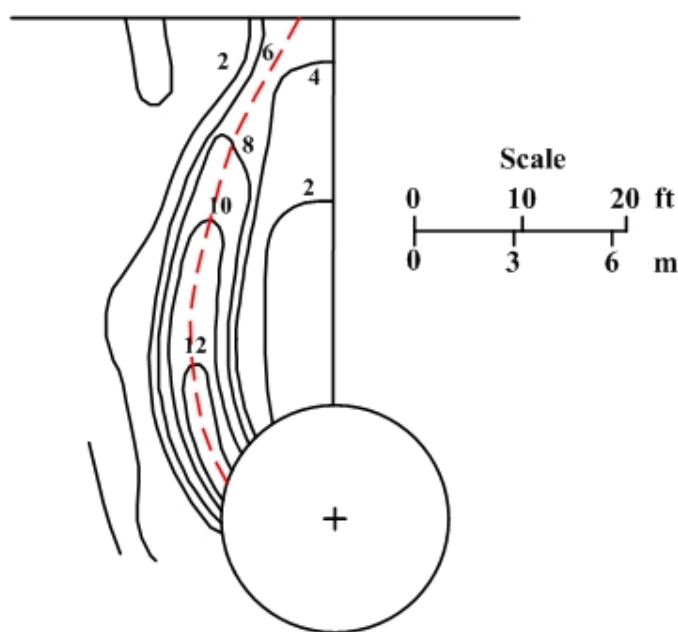
Σε άμμους και ιλύες, οι ζώνες διάτμησης δημιουργούνται κατά την διάρκεια τριαξονικών θλιπτικών δοκιμών και πειραμάτων επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Ένα σύνολο από γεωλογικά φαινόμενα, όπως για παράδειγμα τα ρήγματα (faults) αποτελούν απτά παραδείγματα της ύπαρξης τέτοιων συγκεντρώσεων της παραμόρφωσης, που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια κινήσεων του στερεού φλοιού της Γής λόγω σεισμικών δονήσεων. Οι κατολισθήσεις είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου αστοχίας.



Σχήμα 1.19: Μοντέλο της διάδοσης της αιχμής της διατμητικής ζώνης: (α) διάδοση ρωγμής τύπου II ή ζώνης διάτμησης, (β) διανομή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής εντός της ζώνης διάτμησης, (γ) μεταβολή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής που υφίσταται το υλικό σημείο ξ_1 , και (δ) μεταβολή της ενεργοποιημένης γωνίας τριβής που υφίσταται το υλικό σημείο ξ_2 (Vardoulakis et al., 1985).

Οι Rudnicki & Rice (1975) πρότειναν μια μαθηματική συνθήκη για την συγκέντρωση των παραμορφώσεων, που βασίζεται την θεωρία διακλαδώσεων (bifurcation analysis), ενώ οι Gudehus & Nübel (2004) παρουσίασαν ένα αναλυτικό μοντέλο για τον προσδιορισμό του πάχους των ζωνών βασισμένο στην θεωρία υλικών με μικροδομή Cosserat. Η θεωρία διακλάδωσης (bifurcation theory) παρουσιάζει μια εναλλακτική μαθηματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου που οδηγεί στον σχηματισμό ζωνών διάτμησης σε αρχικώς ομοιογενώς παραμορφούμενα στερεά υλικά. Το κρίσιμο φορτίο προκύπτει ως λύση προβλημάτων ιδιοτιμών από τον συνδυασμό των καταστατικών εξισώσεων, των εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων πάνω στις ζώνες διάτμησης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι λαμβάνει υπόψη την μη-γραμμική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών και παρέχει τιμές τόσο της διεύθυνσης όσο και του μέτρου της παραμόρφωσης των ζωνών διάτμησης. Μια αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων που βασίζονται στην παραπάνω θεωρία παρουσιάζεται από τους Vardoulakis & Sulem (1995).

Οι διατμητικές ζώνες εκκινούν πάντα από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων ή από περιοχές «αδυναμίας» του υλικού. Παράδειγμα τέτοιας ζώνης εντοπισμού της διατμητικής παραμόρφωσης πάνω από σήραγγα κυκλικής διατομής του μετρώ της Ουάσιγκτον (ΗΠΑ) που υπολογίσθηκε από την επεξεργασία ενόργανων μετρήσεων των μετατοπίσεων γύρω από τη σήραγγα, φαίνεται στο Σχ. 1.20.

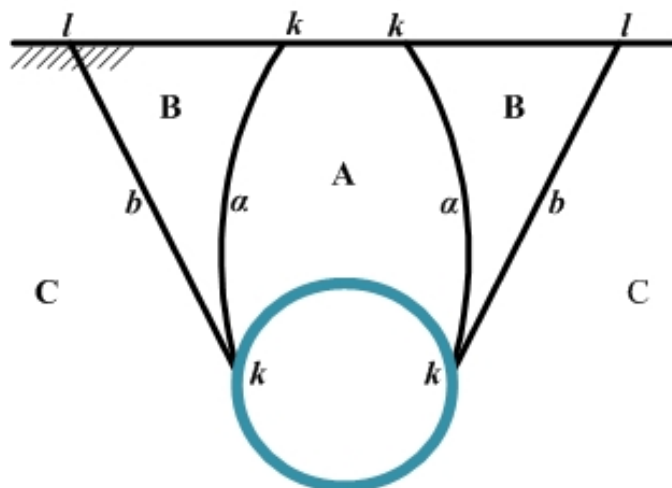


Σχήμα 1.20: Ισοπαραμορφωσιακές καμπύλες διατμητικής παραμόρφωσης (%) σε σήραγγα (Hansmire & Cording, 1985).

Ένα παράδειγμα μηχανισμού εντοπισμού της παραμόρφωσης πάνω από αβαθή σήραγγα που προτάθηκε από τους Akutagawa et al. (2008) φαίνεται στο Σχ. 1.21.

Σύμφωνα με αυτόν τον κινηματικό μηχανισμό, πρώτα δημιουργούνται οι διατμητικές ζώνες (kk) που δημιουργούν ασταθή κατάσταση στο άκαμπτο ογκοτεμάχιο πετρώματος (A) που περιβάλλουν. Εν συνεχεία δημιουργούνται οι ζώνες διάτμησης (kl) που δημιουργούν δύο ασταθή ογκοτεμάχια (B).

Ένα από τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζεται στην αριθμητική προσέγγιση του προβλήματος του σχηματισμού διατμητικών ζωνών σε συνεχή μέσα με τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων με διακριτοποίηση της υπό μελέτη περιοχής είναι η άμεση εξάρτηση του πάχους των ζωνών διάτμησης από τις διαστάσεις του πλέγματος διακριτοποίησης που επιλέγεται κάθε φορά καθώς και η εξάρτηση του προσανατολισμού αυτών από την μορφή του πλέγματος. Η χρήση καταστατικών μοντέλων ανωτέρας τάξης με την εισαγωγή χαρακτηριστικού μήκους στο καταστατικό μοντέλο ή η εισαγωγή διεπιφανειών στην περιοχή που αναμένεται η εμφάνιση των ζωνών διάτμησης λύνουν το πρόβλημα, αλλά στην πραγματικότητα προδιαγράφουν εμμέσως το πραγματικό πάχος των ζωνών αυτών.

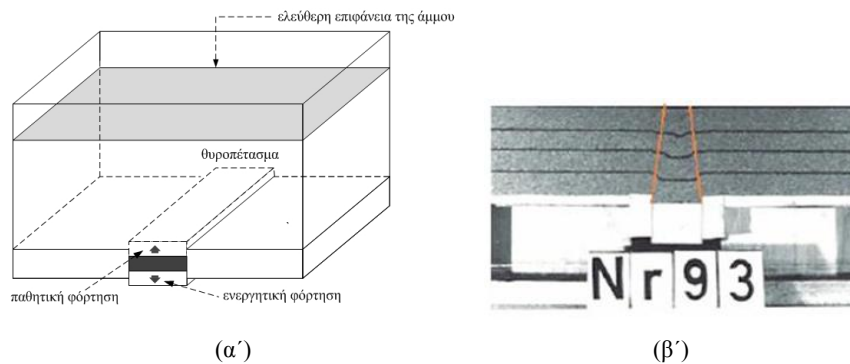


Σχήμα 1.21: Πιθανός κινηματικός μηχανισμός πάνω από ρηχή σήραγγα (Akutagawa et al., 2008).

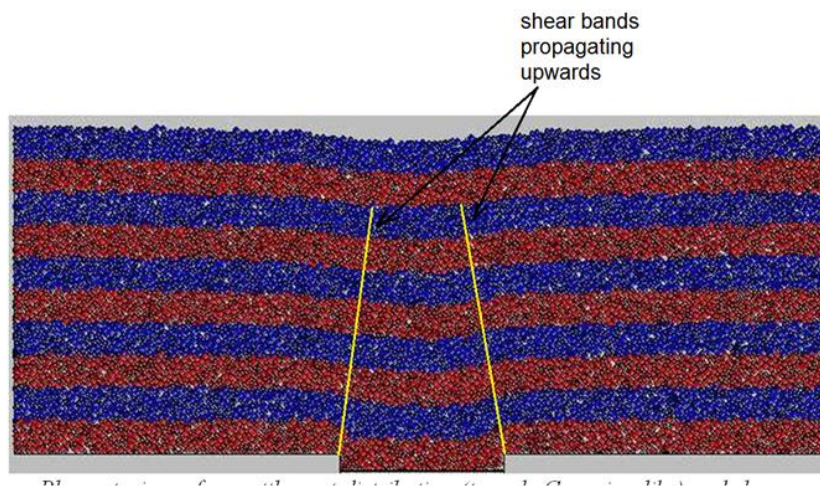
1.5 Το πρόβλημα του υποχωρούντος «θυροπετάσματος»

Η πειραματική προσέγγιση του προβλήματος της σταδιακής διάδοσης ζωνών διάτμησης πάνω από σήραγγες και της μορφής των καθιζήσεων του εδάφους μπορεί να γίνει με το μοντέλο του «υποχωρούντος θυροπετάσματος» (Σχ. 1.22 (α και β)), το οποίο πρότεινε ο Terzaghi (1943), και εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε από τους Ladanyi & Hoyaux (1969), Vardoulakis et al. (1981), Papamichos et al. (2001).

Ανάλογο υπολογιστικό μοντέλο διακριτών στοιχείων χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Vairaktaris & Stavropoulou (2011) για την μελέτη των καθιζήσεων πάνω από υπόγειες εκσκαφές διαφόρων γεωμετριών σε κάτοψη. Με τη βοήθεια υπολογι-



Σχήμα 1.22: Σχεδιάγραμμα (α) και συσκευή (β) εκτέλεσης πειράματος υποχωρού-
ντος θυροπετάσματος σε κιβώτιο άμμου. Φαίνονται οι συγκλίνουσες στην επιφά-
νεια επιφάνειες εντοπισμού της διάτμησης (Vardoulakis et al., 1981).

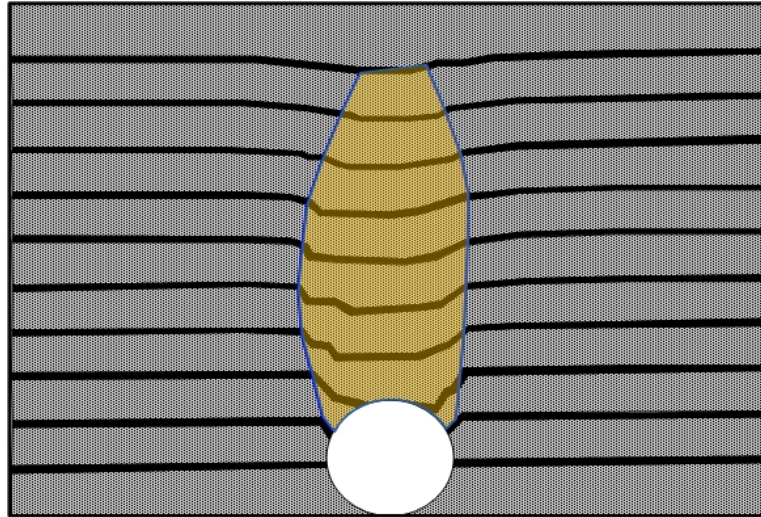


Σχήμα 1.23: Προσομοίωμα διακριτών στοιχείων (Distinct Element Model, DEM)
σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης στο οποίο φαίνεται η διάδοση των συζυ-
γών διατμητικών ζωνών και η λεκάνη της καθίζησης στην επιφάνεια (Vairaktaris
& Stavropoulou, 2013).

στικού προγράμματος διακριτών στοιχείων προσομοίωσαν το πρόβλημα του αβα-
θούς υποχωρούντος θυροπετάσματος και παρατήρησαν τον σχηματισμό συζυγών
διατμητικών ζωνών που εκκίνησαν από τις γωνίες του θυροπετάσματος που είναι
και περιοχές συγκέντρωσης της τάσης και διεδόθησαν προς τους ανώτερους στρω-
ματογραφικούς ορίζοντες (Σχ. 1.23).

Σε άρθρο επισκόπησης της βιβλιογραφίας για τις πειραματικές μεθόδους μελέ-
της της συμπεριφοράς σηράγγων σε μαλακά εδάφη οι Meguid et al. (2008) παρου-
σίασαν πειραματικά αποτελέσματα προσομοίωσης της εκσκαφής σήραγγας που

δείχνουν την διάδοση διατμητικών ζωνών από τα σύνορα της σήραγγας προς ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες (Σχ. 1.24).



Σχήμα 1.24: Διάδοση διατμητικών ζωνών από τα σύνορα σήραγγας με εκτόνωση των τάσεων προς τους ανώτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες (Meguid et al., 2008).

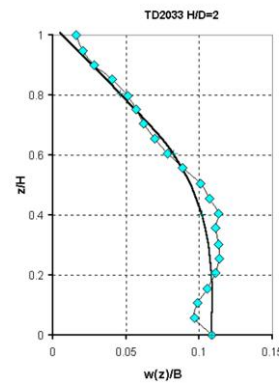
Εκτός από τον μηχανισμό διάδοσης διατμητικών ζωνών τα αναλογικά μοντέλα όπως τα παραπάνω δίνουν πληροφορίες και για τον τρόπο μετάδοσης των καθιζήσεων από την καταπακτή προς την ελεύθερη επιφάνεια. Π.χ. στα Σχ. 1.25 α, β φαίνεται ότι ο συντελεστής μεταφοράς των καθιζήσεων από την στέψη της εκσκαφής στην επιφάνεια είναι μικρότερος της μονάδας για βαθιές εκσκαφές ενώ σε αβαθές εκσκαφές είναι σχεδόν 1 προς 1.

Τέλος, με τέτοια αναλογικά ή υπολογιστικά μοντέλα μπορεί να μελετηθεί η φόρτιση της υποστύλωσης-θυροπετάσματος συναρτήσει της υποχώρησης του τελευταίου, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχ. 1.14.

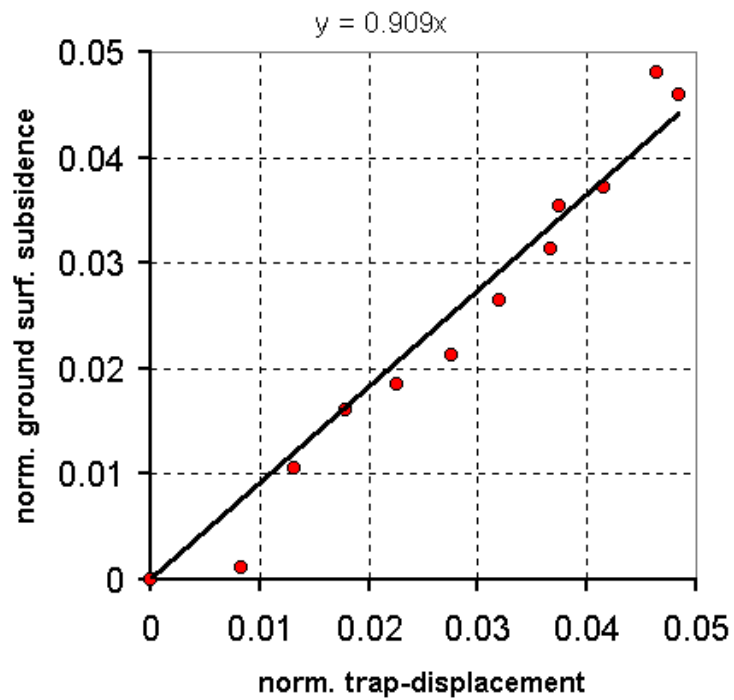
1.6 Το μοντέλο αντοχής Mohr-Coulomb και το μοντέλο κράτυνσης/χαλάρωσης των παραμέτρων αντοχής γεωλογικών υλικών

Σε συνθήκες χαμηλής υδροστατικής πίεσης μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή δεν εξαρτώνται από την υδροστατική πίεση. Έστω ότι σε συνθήκες συνεχούς πλαστικής φόρτισης του γεωυλικού οι παράμετροι της ενεργοποιημένης τριβής f_m στα σύνορα των κόκκων και μεταξύ των παρειών των μικρο-ρωγμών, και πάσης φύσεως ασυνεχειών, και της συνοχής c_m δίνονται ως εξής

$$f_m = \tan \phi_m, c_m = q_m f_m \quad (1.4)$$



(α')



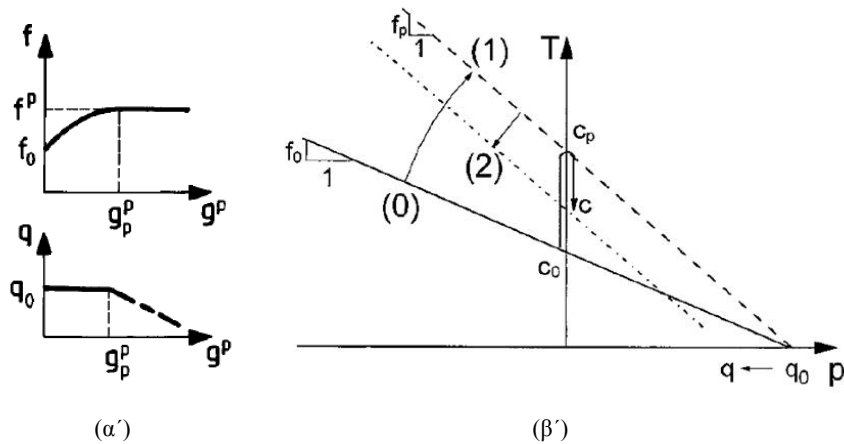
(β')

Σχήμα 1.25: Συνάρτηση μετάδοσης της καθίζησης από τη στέψη στην επιφάνεια: (α) προφίλ καθίζησης κατά την έννοια του κατακόρυφου άξονα για βαθειά εκσκαφή (Paramichos et al., 2001) και (β) μέγιστη καθίζηση επιφάνειας συναρτήσει της κατακόρυφης μετατόπισης του θυροπετάσματος σε ρηχή εκσκαφή (Vardoulakis & Sulem, 1995).

όπου q_m συμβολίζει την αντοχή του πετρώματος σε ισότροπο εφελκυσμό και σχετίζεται με την συνοχή του γεωυλικού. Βάσει των παραπάνω σχέσεων η επιφάνεια διαρροής F του υλικού Mohr-Coulomb στον εντατικό χώρο των αναλλοίωτων T (2^{η} αναλλοίωτος του αποκλίνοντος τανυστή των τάσεων) και p (μέση ορθή πίεση) δίνεται από τη σχέση

$$F = T - f_m(q - p) = 0 \quad (1.5)$$

Γενικά η γωνία εσωτερικής τριβής και η συνοχή είναι συναρτήσεις της «παραμέτρου πλαστικής κράτυνσης του υλικού (plastic hardening parameter)» η οποία στην περίπτωση των πετρωμάτων που περιβάλλουν ένα αβαθές υπόγειο έργο, μπορεί να ληφθεί ότι είναι η αναλλοίωτη της πλαστικής αποκλίνουσας (διατμητικής) παραμόρφωσης, g_p . Αυτό είναι λογικό γιατί η παράμετρος αυτή μπορεί ναδειχθεί ότι αποτελεί μέτρο των μικρο-ολισθήσεων που επισυμβαίνουν στα σύνορα των κόκκων και στις μικρορωγμές ή μακρορωγμές του πετρώματος (Vardoulakis & Sulem, 1995). Αν οι παράμετροι αντοχής f_m ή c_m είναι μονοτονικά αύξουσες συναρτήσεις της παραμέτρου κράτυνσης, τότε λαμβάνει χώρα κράτυνση της γωνίας τριβής και της συνοχής, ενώ σε διαφορετική περίπτωση χαλάρωση (softening).



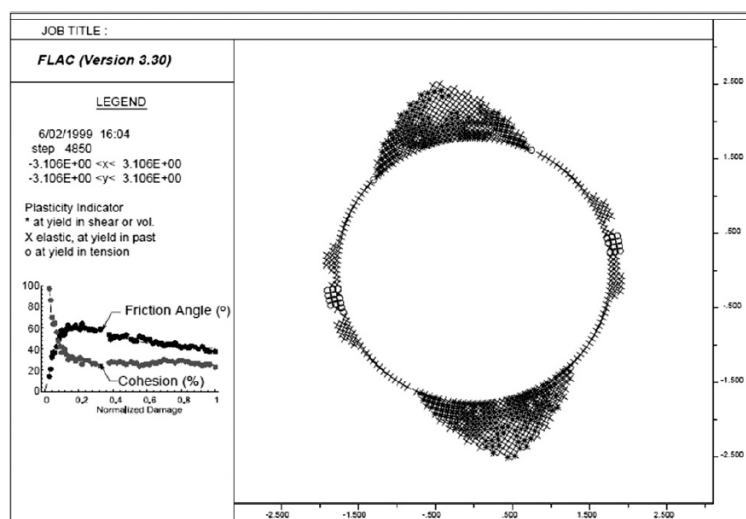
Σχήμα 1.26: α) Μοντέλο σκλήρυνσης της τριβής πριν την κατάσταση αιχμής (pre-peak) και μετά (post-peak) και σταθερής εφελκυστικής αντοχής πριν την κατάσταση αιχμής και χαλάρωσης μετά, και (β) απεικόνιση ισότροπης σκλήρυνσης της γωνίας τριβής από την αρχική κατάσταση (0) στην κατάσταση αιχμής (1) και εν συνεχεία του κινηματικού μηχανισμού μετά την κατάσταση αιχμής (post-peak) με σταθερή γωνία τριβής και απομειούμενη συνοχή στην (2) στο χώρο των αναλλοιώτων $p - T$.

Το παραπάνω μοντέλο κράτυνσης που φαίνεται στα Σχ. 1.26 α, β ενώ προβλέπει λογικά την κράτυνση της συνοχής μέχρι την κατάσταση αιχμής, εν τούτοις δεν αντανakλά την συμπεριφορά της τριβής των πετρωμάτων θεωρώντας σταθερή γωνία τριβής μετά την κατάσταση αιχμής. Από τη στιγμή που, σε δεδομένη φόρτιση,

δημιουργούνται νέες ρωγμές ή εμφανίζονται σημαντικές ολισθήσεις επί προϋπαρχουσών ασυνεχειών του πετρώματος μέχρι την κατάσταση αιχμής η τριβή μεταξύ των παρειών των ρωγμών πρέπει:

- είτε να αυξάνει (κράτυνσης της γωνίας τριβής) διότι αυξάνει η συμμετοχή της τριβής στην ενεργοποιημένη αντοχή του πετρώματος,
- είτε να απομειώνεται γιατί η γωνία της εσωτερικής τριβής πλησιάζει την υπολειμματική (residual) γωνία τριβής των ασυνεχειών (χαλάρωση της γωνίας τριβής).

Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στο παραπάνω μοντέλο που παρουσιάζει σταθερή γωνία τριβής. Το μοντέλο χαλάρωσης της συνοχής και κράτυνσης της γωνίας εσωτερικής τριβής χρησιμοποιήθηκε από τους Barton & Pandey (2011) για να προβλέψουν την δημιουργία των αντιδιαμετρικών ραμφοειδών ζωνών αστοχίας γύρω από βαθειά γεώτρηση όπως φαίνεται στο Σχ. 1.26 και τον σχηματισμό ζωνών διάτμησης σε βαθειά υπόγεια μεταλλεία.



Σχήμα 1.27: Αντιδιαμετρικές ζώνες αστοχίας ραμφοειδούς μορφής γύρω από βαθειά γεώτρηση σε υλικό με χαλάρωση της συνοχής και σκλήρυνση της γωνίας εσωτερικής τριβής (Barton & Pandey, 2011).

Κεφάλαιο 2

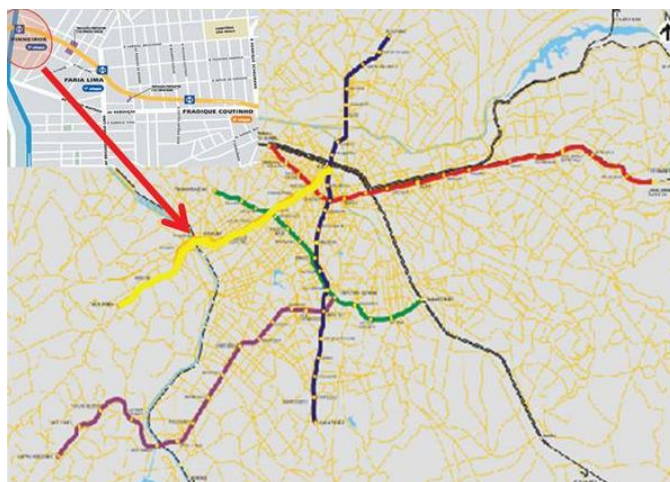
Οι συνθήκες κατάρρευσης του σταθμού Pinheiros

....The worst happening is not to have an accident, it is to learn nothing from it...

2.1 Θέση του περιστατικού κατάρρευσης

Η κίτρινη γραμμή Νο. 4 του μετρό του Σάο Πάολο έχει μήκος 12.5km και συνδέει το κέντρο της μεγαλύτερης πόλης της Βραζιλίας με τα δυτικά προάστια της με τέσσερεις σταθμούς (Σχ. 2.1(α')). Οι σταθμοί αυτοί, κατασκευάστηκαν είτε με την μέθοδο Κοπής και Επιχωμάτωσης (Cut and Cover), είτε με τη NATM. Ο Σταθμός Pinheiros που πήρε το όνομα του από το γειτονικό ποτάμι στο ΝΔ τομέα της πόλης άρχισε να κατασκευάζεται με την τμηματική μέθοδο διάνοιξης NATM και περιελάμβανε ένα φρέαρ διαμέτρου 40m και ύψους 36m στη θέση Capri (Capri shaft) όπως φαίνεται στις εικόνες των Σχ. 2.1(β') και 2.2(α'), δύο πλατφόρμες επιβίβασης μήκους 46m, ύψους 14.2m και πλάτους 18.6m σε αντιδιαμετρικές θέσεις του φρέατος, καθώς και δύο βοηθητικές σήραγγες (Oliveira, 2008).

Στις 12 Ιανουαρίου του 2007, κατέρρευσαν η οροφή του ενός θαλάμου-σταθμού με την μορφή σφήνας ύψους 40m και το μισό σχεδόν φρέαρ παράγοντας υλικό κατακρήμνισης βάρους μεγαλύτερου των 20,000t (Σχ. 2.2(β')). Αυτό το γεγονός συνέβη κατά το 2ο στάδιο της εκσκαφής της βαθμίδας στον Ανατολικό σταθμό. Η προχώρηση της ορθής βαθμίδας είχε φορά από την σήραγγα λειτουργίας (running tunnel) προς το φρέαρ και η κατάρρευση έλαβε χώρα πολύ κοντά στην ένωση (intersection) με το τελευταίο (Oliveira, 2008). Το ατύχημα έγινε πολύ γρήγορα και χωρίς καμία προειδοποίηση, με αποτέλεσμα εφτά άνθρωποι να χάσουν τη ζωή τους λόγω καθίζησης και να προκληθούν σημαντικές ζημιές στην επιφάνεια και στα υπόγεια. Το πολλαπλό ατύχημα που φαίνεται στην εικόνα του Σχ. 2.2(β') συνέβη τόσο γρήγορα που δεν υπήρχε χρόνος για την έγκαιρη προειδοποίηση. Τα επτά θύματα σκοτώθηκαν πέφτοντας από την επιφάνεια στο δημιουργηθέν κενό και θάφτηκαν βαθιά σε βάθος 15-20 m κάτω από τα χώματα. Χρειάστηκαν 12



(α')



(β')

Σχήμα 2.1: (α) Χάρτης των γραμμών του μετρό του Σάο Πάολο και η θέση του σταθμού Pinheiros και (β) σχέδιο του σταθμού πάνω στην αεροφωτογραφία της περιοχής.

μέρες για την αποκάλυψη όλων των θυμάτων από ομάδες διάσωσης. Πέντε από τα θύματα βρίσκονταν σε μινι-λεωφορείο που εκινείτο κατά μήκος της Rua Capri, η οποία διέσχιζε το βόρειο τμήμα του καταρρεύσαντος θαλάμου. Ένα άλλο θύμα ήταν ηλικιωμένος πεζοπόρος που εκινείτο στον ίδιο δρόμο. Το έβδομο θύμα ήταν οδηγός φορτηγού αυτοκινήτου.

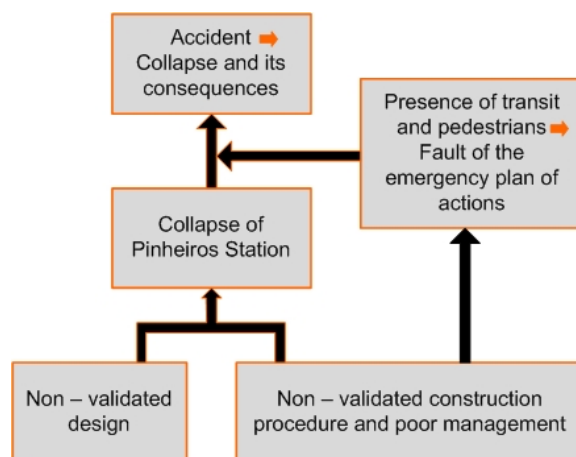
Η μόνιμη επένδυση του Ανατολικού και του Δυτικού σταθμού καθώς και του φρέατος προβλέπετο να είναι οπλισμένο σκυρόδεμα με ατσάλι. Όμως αυτό το στάδιο της κατασκευής δεν πραγματοποιήθηκε. Η πρώτη βαθμίδα ύψους 4m μέχρι το υψόμετρο των 693m εκσκάφτηκε πριν την επιταχυνόμενη παραμόρφωση τις τελευταίες τρεις μέρες πριν την κατάρρευση. Αυτή η επιταχυνόμενη παραμόρφωση των υπερκειμένων εδαφών επακολούθησε τις για μερικούς μήνες σταδιακά και με μικρό ρυθμό αυξανόμενες μετακινήσεις που έφθασαν τα 14mm με 24mm.



(α')



(β')



(γ')

Σχήμα 2.2: Μακρινή άποψη (α) του φρέατος Capri πριν την κατάρρευση και (β) μετά την κατάρρευση με δημιουργία τοξωτών αστοχιών (“dog ears”) στην περιφέρεια του και η κατάρρευση του παρακείμενου Ανατολικού Σταθμού (θαλάμου) (Barton, 2009) και (γ) παράγοντες ρίσκου και αιτίες της κατάρρευσης (Barros et al., 2008).

Το Ινστιτούτο που διερεύνησε αρχικά το περιστατικό επέρριψε τις ευθύνες στον ανάδοχο του έργου για πτωχό σχεδιασμό και κατασκευή αλλά και για διαχειριστικά λάθη. Σύμφωνα όμως με τον Barton (2007) το Ινστιτούτο είχε περιορισμένη εμπειρία στην κατασκευή σηράγγων αλλά και πτωχή εμπειρία στις εφαρμογές της Βραχομηχανικής στον σχεδιασμό και στην κατασκευή σηράγγων σε ασυνεχή πετρώματα. Η Επιτροπή που ορίστηκε για την διερεύνηση των αιτίων αυτού του περιστατικού εκτός των άλλων επεσήμανε ότι η «Ανάλυση και Διαχείριση του Ρίσκου» θα πρέπει να περιλαμβάνεται στις συμβάσεις μελέτης και κατασκευής των υπογείων έργων (Σχ. 2.2(γ')) και ότι ο κύριος του έργου θα πρέπει να έχει τον έλεγχο κατά την μελέτη και την κατασκευή αυτών ανεξαρτήτως του τύπου του συμβολαίου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γεωλογικά στοιχεία της περιοχής στην οποία συνέβη το συγκεκριμένο περιστατικό κατάρρευσης.

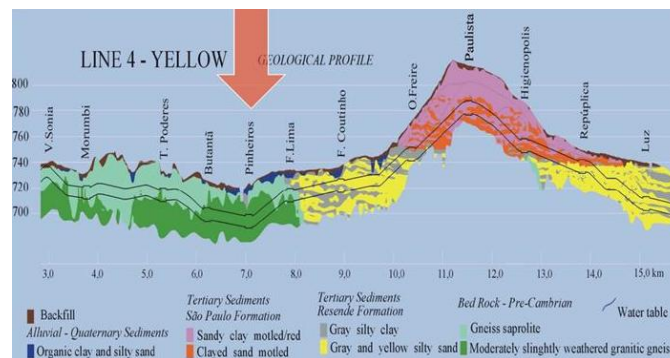
2.2 Γεωλογία της περιοχής

Η γεωλογία της περιοχής του Σαο Πάολο σχηματίζεται από τρεις κύριους γεωλογικούς σχηματισμούς, ήτοι:

1. Υπόβαθρο του Προκάμβριου,
2. Ιζήματα του Τριτογενούς, και
3. Ιζηματογενείς αποθέσεις του Τεταρτογενούς (quaternary sedimentary deposits).

Η κύρια μάζα που ανήκει στο Προκάμβριο, χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές ενότητες, ανάλογα με τα ορυκτολογικά, ιστολογικά και δομικά χαρακτηριστικά όπως: γρανιτικός, βιοιτιτικός και ζωνώδης γνεύσιος, με αρκετά διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης και ασυνεχειών. Οι τιμές του δείκτη ταξινόμησης Q του Barton κυμαίνονταν τοπικά από 0.1 έως 15. Το ιζηματογενές υπόβαθρο του Σάο Πάολο είναι μια λεκάνη (depression) που είναι πληρωμένη με κολλούβια, αλλούβια και ποτάμια ιζήματα. Οι αποθέσεις του Τεταρτογενούς βρίσκονται πάνω από το υπόβαθρο, που αποτελείται από τους ακόλουθους σχηματισμούς:

- Σχηματισμός του São Paulo – συναντάται κυρίως πάνω από το απόλυτο υψόμετρο των 760m στο κέντρο της πόλης. Αποτελείται κυρίως από αμμώδεις αργίλους, ιλυώδεις αργίλους, και αργιλώδεις άμμους (sandy clay, silty clay and clayey sand), μερικές φορές σε μορφή συσσωματωμένων κροκαλών (conglomerates).
- Σχηματισμός του Resende – αποτελείται από ενστρώσεις γκρίζων ιλυωδών αργίλων (intercalations of gray silty clay (Taguá)) και γκρίζες και κίτρινες ιλυώδεις άμμους, συνήθως με λίγη άργιλο (gray and yellow silty sands, usually little clayed). Απαντάται κυρίως κάτω από το απόλυτο υψόμετρο των 750m.
- Τα νεότερα ιζήματα του Τεταρτογενούς απαρτίζονται στο μεγαλύτερο μέρος τους από αλλουβιακές αποθέσεις και απαντώνται κατά μήκος της κοιλάδας



(α')

Alluvial – Quaternary Sediments	Tertiary Sediments São Paulo Formation	Tertiary Sediments Resende Formation	Bed Rock – Pre-Cambrian
Backfill	Sandy clay motled/red	Gray silty clay	Gneiss saprolite
Organic clay and silty sand	Clayed sand motled	Gray and yellow silty sand	Moderately/slightly weathered granitic gneiss

(β')

Σχήμα 2.3: (α) Γεωλογική μηκοτομή, και (β) γεωλογικοί σχηματισμοί (Barros et al., 2008).

του ποταμού Tietê και των παραποτάμων του. Αποτελούνται κυρίως από αργίλους (clays), χαλίκια και αποθέσεις άμμων κατά μήκος του σημερινού συστήματος ροής των ποταμών αυτών.

Μια απλοποιημένη γεωλογική μηκοτομή φαίνεται στο Σχ. 2.3(α'). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το υπόμνημα του Σχ. 2.3(β') ο σταθμός του Pinheiros βρίσκεται εντός ζώνης αποσαθρωμένου γρανιτικού γνευσίου. Πιο συγκεκριμένα, επίσης φαίνεται και στα Σχ. 2.3 α,β στο σημείο κατασκευής του σταθμού, υπάρχουν ιζήματα του Τεταρτογενούς σχετιζόμενα με τα αλλούβια του ποταμού Pinheiros. Υπάρχουν επίσης, ιζήματα Τεταρτογενούς που ανήκουν στον σχηματισμό Resende αποτελούμενα από γκρίζους άργιλους καθώς και το υπόβαθρο του Προκάμβριου που αποτελείται από υπολειμματικά εδάφη (residual soils) και σαπρόλιθους γρανιτικού και βιοτιτικού γνεύσιου με διαφορετικούς βαθμούς αποσάθρωσης (Ku wajima & Rocha, 2005).

Δύο χαρακτηριστικές εγκάρσιες τομές στην περιοχή του σταθμού αποδίδονται στα Σχ. 2.4(α') και 2.4(β'). Επίσης η εικόνα του Σχ. 2.4(γ') δείχνει την εμφάνιση του πυρήνα της γεωτρήσεως 8704 που ανορύχθηκε πλησίον του κέντρου του θαλάμου-σταθμού. Τα 18 πλαστικά δοχεία που έχουν τοποθετηθεί εντός του κιβωτίου περιέχουν την ελάχιστη απόληψη των εδαφών που υπέρκεινται του στερεού υποβάθρου, ήτοι του σαπρόλιθου, του εδάφους και της άμμου. Όπως προαναφέρ-

θηκε το βραχώδες υπόβαθρο που είναι αποσαθρωμένος γνεύσιος συναντήθηκε σε βάθος 18m, που αντιστοιχεί στο απόλυτο υψόμετρο των 706m. Η σχεδόν κατακόρυφη σχιστότητα (foliation) του γνευσίου δεν φαίνεται καθαρά στον πυρήνα πετρώματος. Το Σχ. 2.4(β') δείχνει τι θα αναμενόταν σε γενικές γραμμές στα υψόμετρα πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο όταν από όλη τη λεπτομερειακή γεωλογική έρευνα θα έβγαινε ένα τυπικό διάγραμμα της κατακόρυφης εγκάρσιας τομής.

2.3 Δομικά γεωλογικά χαρακτηριστικά του πετρώματος

Ο σταθμός βρίσκεται στην ονομαζόμενη Caucaia Shear Zone (Σχ. 2.5), που περιλαμβάνει ασυνεχή γνευσιακά πετρώματα που διασχίζονται από πυκνό δίκτυο ασυνεχειών που ανήκουν σε 4 οικογένειες. Οι δύο απ' αυτές είναι παρακατακόρυφες – ήτοι η σχιστότητα και μία κατακόρυφη οικογένεια κάθετη σ' αυτήν - και οι άλλες δύο κλίνουν προς τις παρειές του θαλάμου όπως φαίνεται στη στερεογραφική προβολή του Σχ. 2.6. Οι δύο παρακατοκόρυφες οικογένειες ασυνεχειών (1) και (4) εντός του γνευσίου ευνόησαν στο παρελθόν την διείσδυση της αποσάρθρωσης σε βάθος και κατά την παράταξη των.

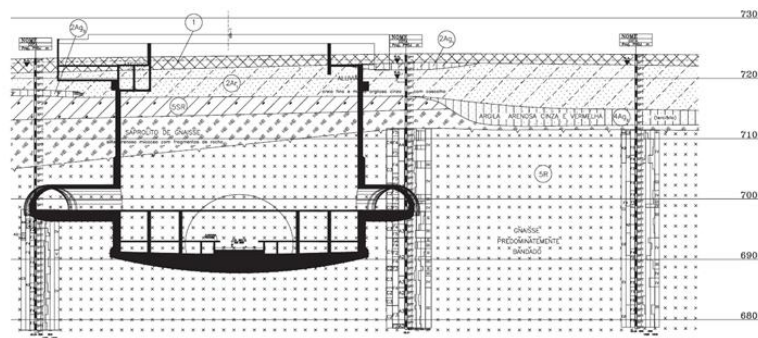
Οι κυριότερες λιθολογίες που παρατηρήθηκαν ήταν βιοτιτικός γνεύσιος, γρανιτικός γνεύσιος και διεισδύσεις πηγματιτών. Σύμφωνα με το γεωμηχανικό σύστημα ταξινόμησης των πετρωμάτων του Bieniawski παρατηρήθηκαν οι κλάσεις II,III,IV (μερικώς να αποδίδεται στον σαπρόλιθο), καθώς επίσης και η κλάση V που μερικώς αποδίδεται στα εδάφη που έχουν προέλθει από την αποσάρθρωση του γρανίτη. Επίσης όπως φαίνεται στο Σχ. 2.7(α') ο θάλαμος διασχίζεται από παράκατακόρυφες ενστρώσεις γρανιτικού και βιοτιτικού γνευσίου με μεταβλητό πάχος που είναι σχεδόν παράλληλες με τον άξονα της σήραγγας. Η βραχώμαζα του θαλάμου χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενής λόγω του μεταβλητού βαθμού αποσάρθρωσης του γρανίτη και του γνευσίου σε διαφορετικές περιοχές εντός αυτής.

2.4 Σχεδιασμός των προσωρινών μέτρων υποστύλωσης

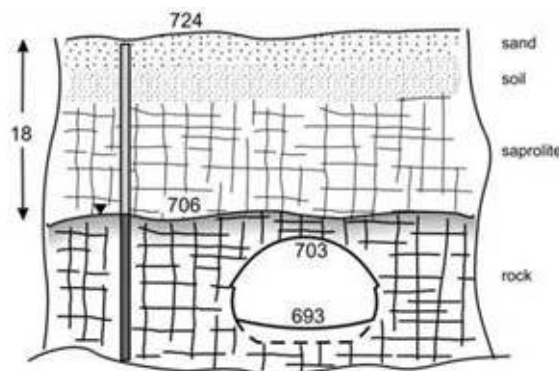
Τα κυριότερα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του σταθμού Pinheiros ήταν τα ακόλουθα:

- 1 φρέαρ διαμέτρου 40m, και ύψους $h=36m$ στη θέση Capri (Capri shaft).
- 2 σταθμούς μήκους = 46m, ύψους = 14.2m και πλάτους = 18.6m.
- 2 σιδηροδρομικές σήραγγες με διπλές σιδηροτροχιές διαμέτρου 9.6m
- Ύψος υπερκειμένων πάνω από τη στέψη των θαλάμων περίπου 20m.

Με βάση το υπεραπλουστευμένο γεωμηχανικό μοντέλο προτάθηκε «Ανοικτό Σύστημα Υποστύλωσης» με τοξοειδή υποστύλωση του μετώπου και πέδιλα (heading arch and footings). Τα ραβδωτά πλαίσια είχαν μικρή απόσταση (0.85m c/c) και



(α')

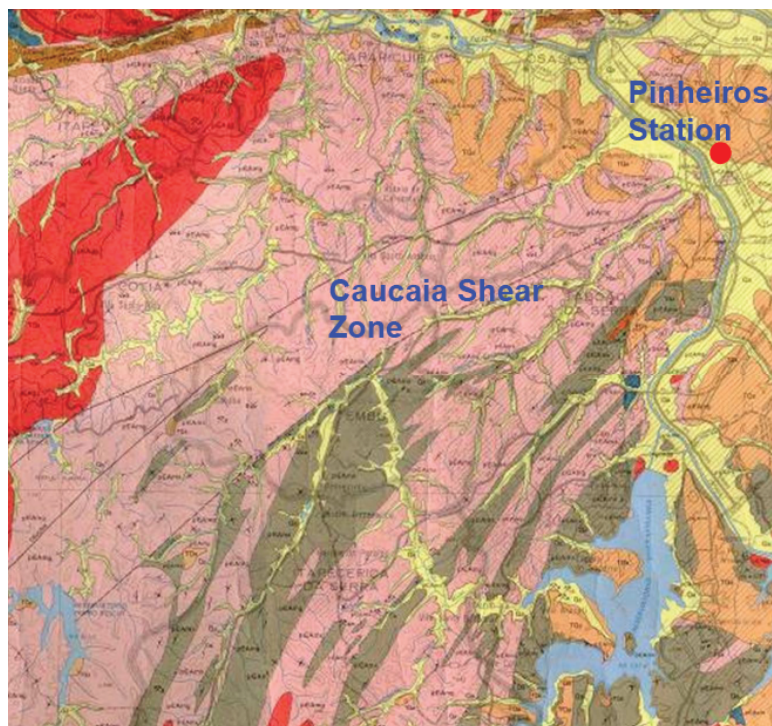


(β')



(γ')

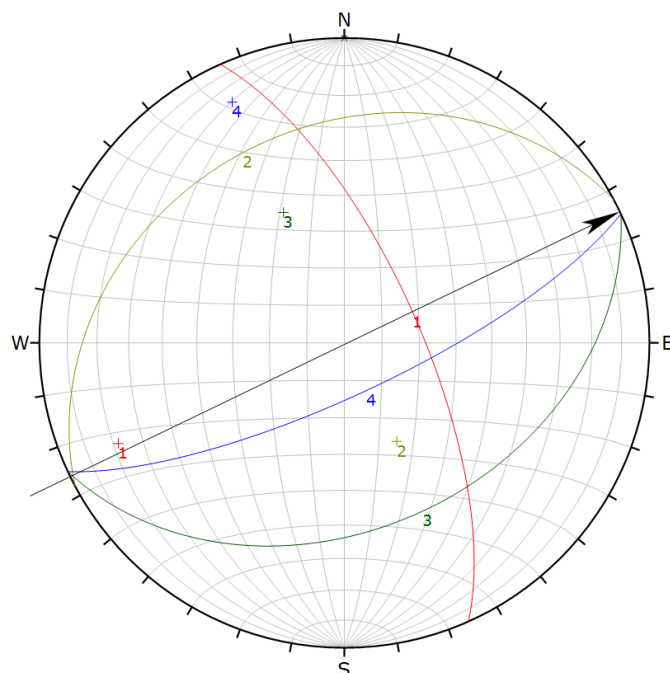
Σχήμα 2.4: Εγκάρσιες τομές και εμφάνιση του πυρήνα δειγματοληπτικής γεώτρησης του θαλάμου: (α) Εγκάρσια γεωλογική τομή: επιχωματώσεις (1), αλλουβιακές άργιλοι (2Ag), αλλουβιακές άμμοι (3Ar), γκρίζοι άργιλοι του τεταρτογενούς (4Ag1), υπολειμματικά εδάφη γνευσίου (5SR), σαπρολιτικός γνεύσιος (5S), γρανιτικός γνεύσιος ριγωτός (granite gneiss striped) (5R) (Ku wajima & Rocha, 2005) (β) οι εγγύτερες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στο σταθμό είχαν κολάρο στα 723 με 724 m και συνάντησαν συμπαγές πέτρωμα (υπόβαθρο) στο απόλυτο υψόμετρο των 706-707 m στις περισσότερες των περιπτώσεων, και (γ) φωτογραφία του δείγματος της γεώτρησης 8704 που ανορύχθηκε κοντά στο κέντρο του θαλάμου του σταθμού (Barton, 2010).



Σχήμα 2.5: Τμήμα του γεωλογικού χάρτη της περιοχής που φαίνεται η θέση του σταθμού εντός της ζώνης Caucaia η οποία περιλαμβάνει έντονα ρηγματωμένους και αποσαθρωμένους γρανιτικούς και βιοτιτικούς γνευσίους και διεισδύσεις πηγματιτών (Assis, 2011).

εγκιβωτιζόντουσαν σε ελάχιστο πάχος 35cm εκτοξευομένου σκυροδέματος ενισχυμένου με ατσάλινες ίνες (steel-fibre-reinforced sprayed concrete) όπως φαίνεται στο Σχ. 2.8(α'). Το πάχος του ενισχυμένου με ατσαλονήματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος της παρειάς της βαθμίδας ήταν 15cm. Όπου εκρίνετο απαραίτητο τοποθετούνταν και αγκύρια στην οροφή. Τα προσωρινά μέτρα υποστήλωσης φαίνονται στα διαγράμματα των Σχ. 2.8(β') 2.8(γ').

Κατά την κατασκευή του θαλάμου του Ανατολικού σταθμού οι γεωλόγοι κατέγραψαν τον σημαντικά μεγάλο όγκο του πετρώματος που ανήκε στην μέτρια κλάση III βραχώμαζας ($RMR = 44-48$, αναφέρεται στο σύστημα ταξινόμησης διαρρηγμένων βραχομαζών Rock Mass Rating (RMR) που προτάθηκε από τον Bieniawski και έχει επικρατήσει να εφαρμόζεται στην κατασκευή των περισσότερων υπόγειων έργων σε αντίθεση με άλλα συστήματα γεωμηχανικής ταξινόμησης (Bieniawski, 1976), (Bieniawski, 1989) στο κέντρο του θαλάμου κατά τη διεύθυνση της Rua Capri. Ο «πυρήνας» της Κλάσης III περιβαλλόταν και από τις δύο πλευρές από πέτρωμα ακόμα πτωχότερης κλάσης IV ($RMR = 34-36$) (βλ. δομή A/B/A στις διατομές του Σχ. 2.9). Εξαιτίας των ασθενέστερου πετρώματος στις δύο παρειές του θαλάμου, έγιναν συντηρητικές παραδοχές για την ενδοτικότητα και την αντοχή

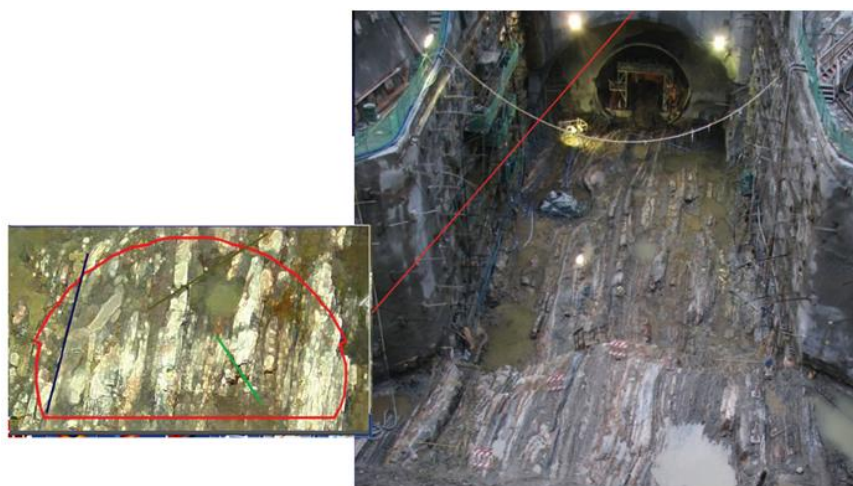


Σχήμα 2.6: Πολικό διάγραμμα που φαίνονται οι 4 οικογένειες ασυνεχειών.

του βράχου θεμελίωσης κάτω από τα πέλματα του τόξου των ραβδωτών πλαισίων που υποστήλωναν τον θόλο του θαλάμου. Οι θεμελιώσεις του δομικού τόξου υποστήλωσης του τύπου «elephant feet» τοποθετήθηκαν σε «ευρύχωρες» υποσκαφές εντός του πετρώματος και στις δύο παρειές του θαλάμου (Σχ. 2.9).

2.5 Προηγούμενες ερευνητικές εργασίας διερεύνησης του φαινομένου κατάρρευσης του σταθμού Pinheiros

Σύμφωνα με τον Barton (2009) η βασική αιτία κατάρρευσης του Ανατολικού Σταθμού ήταν οι ύψους 8 - 10 m υπερκείμενες ράχες λιγότερο αποσαρθρωμένης βραχώμαζας στο κέντρο του θαλάμου που αγνοήθηκαν από το Ινστιτούτο στη φάση της γεωτεχνικής έρευνας και του σχεδιασμού των μέτρων υποστήλωσης. Οι δύο αυτές ράχες λιγότερο αποσαρθρωμένου γνευσίου με κεκλιμένες παρειές – μορφής σφήνας - προδιέγραψαν την γεωμετρία της κατάρρευσης, δηλαδή της αψιδωτής σφήνας πετρώματος που κατέπεσε. Το σύνολο της βραχώμαζας που κατέρρευσε στο κέντρο του θαλάμου, είχε μέσο πάχος 10m, (από το υψόμετρο 714-717 έως 704-707). Η σφήνα αυτή δεν μπόρεσε να εντοπισθεί κατά το στάδιο της έρευνας λόγω της «λανθασμένης» τοποθεσίας που έγινε η γεώτρηση 8074 (Σχ. 2.10(α')), η οποία ορύχθηκε στην χιλιομετρική θέση 7100 και η οποία συνάντησε την βραχώμαζα σε βάθος 706m. Στο ίδιο βάθος περίπου, συνάντησαν τη βραχώμαζα και

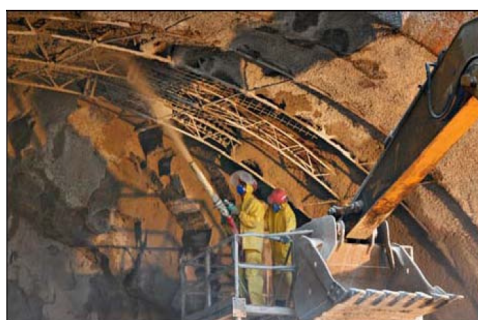


(α')



(β')

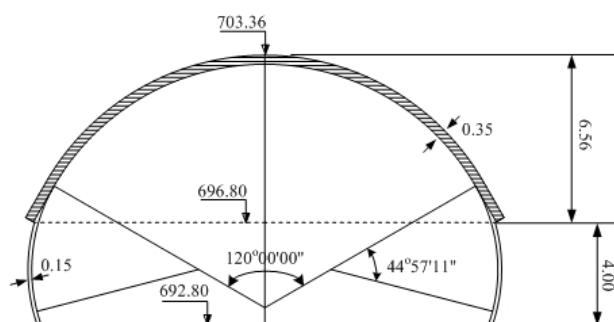
Σχήμα 2.7: (α) Παρα-κατακόρυφες ενστρώσεις γρανιτικού και βιοτιτικού γνευσίου με μεταβλητό πάχος και υπο-παράλληλων με τον άξονα της σήραγγας, και (β) μικροδομή του γνευσίου (Assis, 2011).



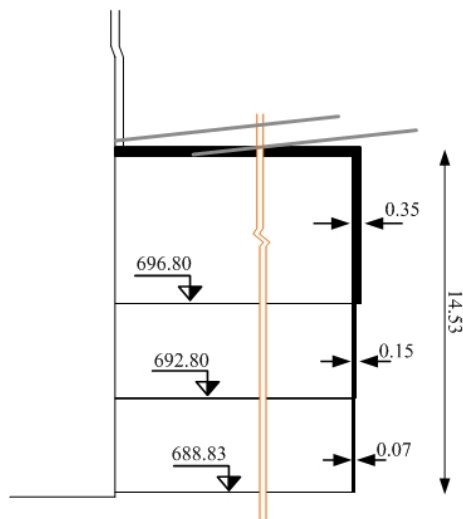
(α')



(β')

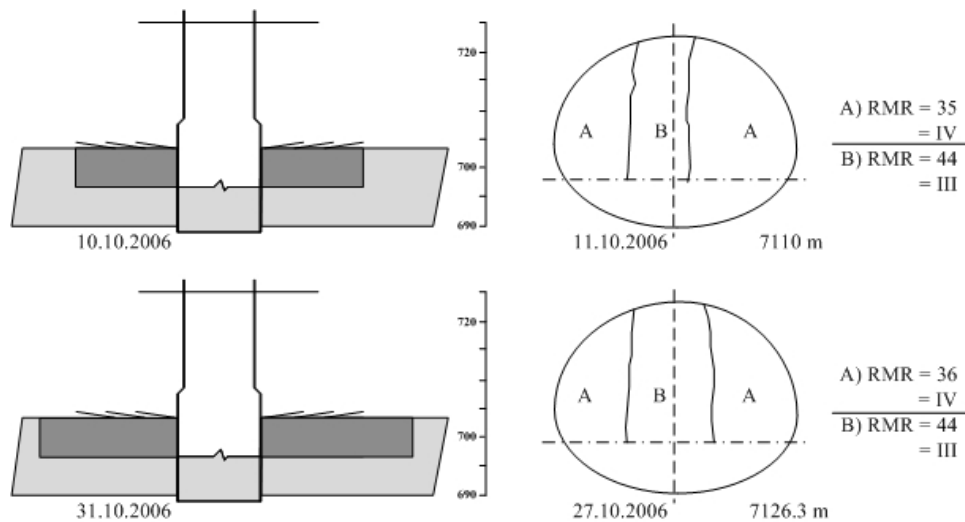


(γ')



(δ')

Σχήμα 2.8: α,β) Απόψεις της βαριάς προσωρινής υποστήλωσης του θόλου του Ανατολικού Σταθμού με ραβδωτά πλαίσια σε αποστάσεις 0.85m c/c, εγκιβωτισμένων σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους τουλάχιστον 35cm και των προσωρινών μέτρων υποστήλωσης (Barton, 2009), (γ) διατομή του κορυφαίου μετώπου και της βαθμίδας όπου φαίνονται οι πλαϊνές υποσκαφές για τα elephant feet, και (δ) η αντίστοιχη μηκοτομή.

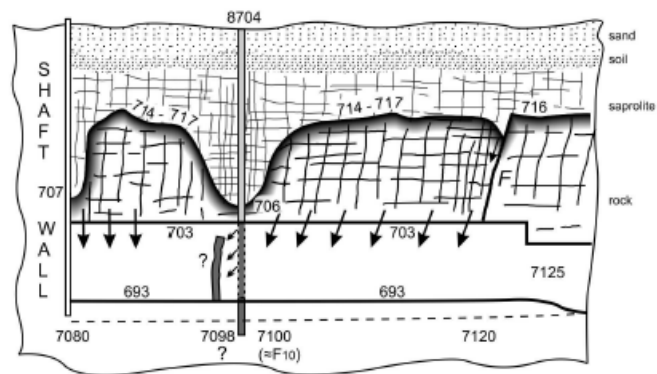


Σχήμα 2.9: Μηκοτομές που δείχνουν την σταδιακή τοποθέτηση των ραβδωτών πλαισίων στους δύο θαλάμους και δεξιά οι διατομές σε δύο διαφορετικές θέσεις που φαίνεται ο πυρήνας κατηγορίας βραχώμαζας III που περιβάλλεται από πέτρωμα κατηγορίας IV.

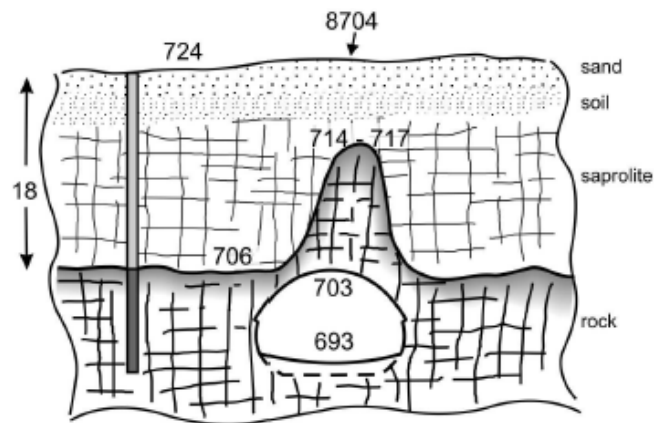
οι πέντε πιο κοντινές γεωτρήσεις (Σχ. 2.10(β')). Ο Barton εν τέλει πιστεύει ότι η τελική κατάρρευση προκλήθηκε από την πίεση του ύδατος και την χαλάρωση του αργιλικού υλικού πλήρωσης που προκλήθηκε από τη διαρροή ρηγματωμένης σωλήνος ύδατος που διέσχιζε μια κατακόρυφη ασυνέχεια κάθετη στον επιμήκη άξονα του θαλάμου και στο πίσω μέρος αυτού (Σχ. 2.10(γ')).

Ο μηχανισμός της κατάρρευσης της οροφής του θαλάμου λόγω βαρύτητας και της ύπαρξης της βραχώδους ράχης του γνευσίου βάρους 20,000t παρουσιάστηκε με τη βοήθεια διδιάστατου μοντέλου διακριτών στοιχείων σύμφωνα με τις λεπτομέρειες του Σχ. 2.12. Ο Barton με τους συνεργάτες του διερεύνησε αριθμητικά τον μηχανισμό κατάρρευσης της σφήνας με τη βοήθεια επίπεδων μοντέλων διακριτών στοιχείων και μοντέλων θραυστομηχανικής των υπερφορτισμένων "elephant footings". Τα μοντέλα αυτά κατέδειξαν την υπερφόρτιση του δομικού τόξου της υποστύλωσης καθώς και την έντονη ρηγμάτωση της θεμελίωσης αυτού με την φόρτιση των 20,000t της υπερκείμενης σφήνας και με ρεαλιστικές τιμές της βραχώμαζας και της θραυστικής στιβαρότητας του αρρήκτου πετρώματος.

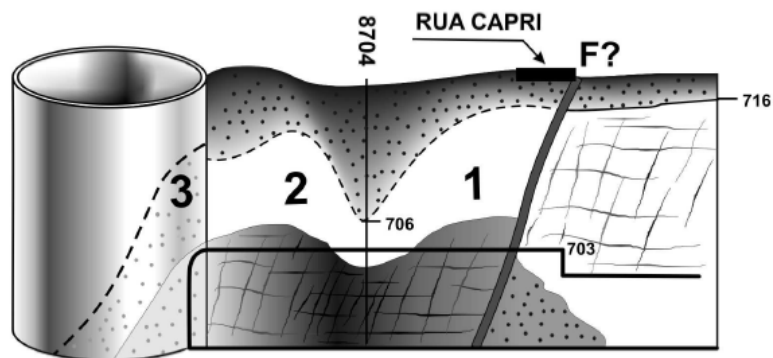
Η έρευνα που έγινε από το Ινστιτούτο, το οποίο διορίστηκε από την πολιτεία για την ανάδρομη ανάλυση της κατάρρευσης, ήταν από τις μεγαλύτερες στην ιστορία της Βραζιλιανής μηχανικής (Oliveira, 2008). Στην τελική του έκθεση το Ινστιτούτο συμπέρανε ότι για τον σχεδιασμό του έργου χρησιμοποιήθηκε υπεραπλουστευμένο γεωμηχανικό μοντέλο στο οποίο αγνοήθηκαν γεωλογικές δομές και ότι οι διαμορφούμενες σφήνες στη στέψη και τις παρειές του θαλάμου συνέβαλλαν καθοριστικά στην κινηματική της κατάρρευσης. Αυτές οι παραδοχές οδήγησαν στην εφαρμογή ανοικτής υποστύλωσης του θόλου και των παρειών που δεν εμπόδιζε



(α')



(β')



(γ')

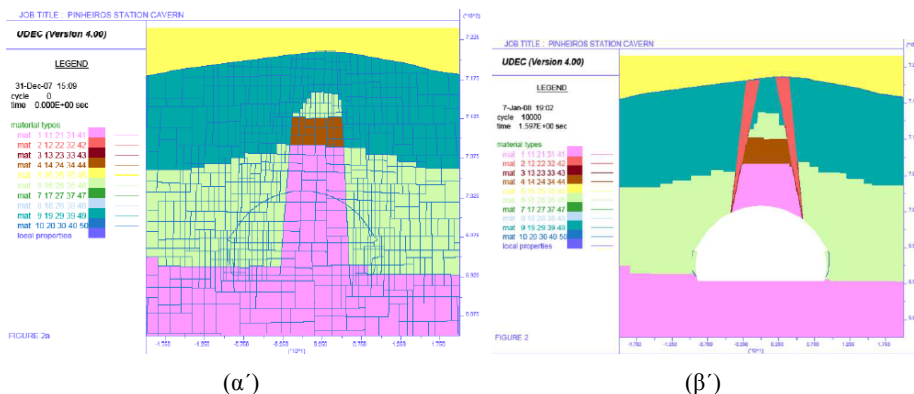
Σχήμα 2.10: α) Διαμήκης γεωλογική τομή όπου φαίνεται το πάχος της περιοχής κατάρρευσης και το σημείο όρυξης της γεωτρήσης 8074, β) γειτονικές γεωτρήσεις, γ) απλοποιημένη αναπαράσταση της περιοχής κατάρρευσης όπου η ασυνέχεια F, οριοθετεί το ανατολικό όριο της αστοχίας, κάτω από τη Rua Capri (Barton, 2009).



Σχήμα 2.11: Αεροφωτογραφία του φρέατος στο σταθμό του Pinheiros. Η αρχή της σήραγγας, η χιλιομετρική θέση 7080 και η ασυνέχεια (FF) που φαίνεται στο βάθος, στη χιλιομετρική θέση 7120, οριοθετούν την 40m περιοχή κατάρρευσης του σταθμού (Barton, 2009).

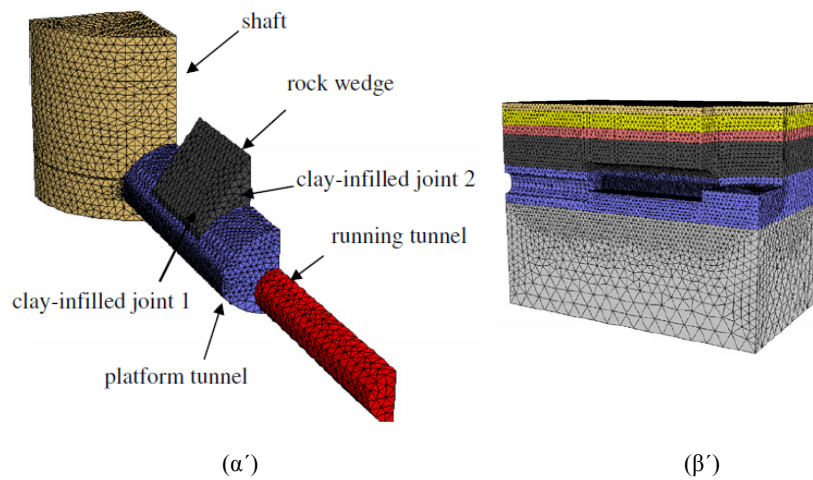
την αύξηση των καθιζήσεων σε όλη τη διάρκεια της κατασκευής του θαλάμου. Σ' αυτήν την μελέτη παρουσιάστηκε και αριθμητικό μοντέλο με το οποίο αναλύθηκε περαιτέρω η κινηματική της κατάρρευσης. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση των ασυνεχειών με αργιλικό υλικό πλήρωσης ήτοι το μοντέλο ασυνέχειας με ολίσθηση τύπου Coulomb (Coulomb slip joint model) και το μοντέλο ασυνέχειας με υλικό πλήρωσης (soil - infilled joint model).

Σε συνέχεια της μελέτης αυτής οι Indraratna et al. (2010) διερεύνησαν την κατάρρευση του σταθμού Pinheiros με τη χρήση ενός τριδιάστατου αριθμητικού μοντέλου (FLAC3D) της γεωλογίας και των φάσεων κατασκευής του θαλάμου και της σήραγγας. Το μοντέλο προσομοίαζε συνεχή γεωλογικά υλικά με τη διαφορά ότι είχαν προδιαγράψει την ύπαρξη πενταεδρικής σφήνας πετρώματος σε κάποια θέση πάνω από τη στέψη του θαλάμου. Η σφήνα αυτή περικλείεται από ασυνέχειες με αργιλικό υλικό πλήρωσης (προϊόν αποσάρθρωσης του πετρώματος). Οι πλευρές της σφήνας αυτής σχηματίζονται από δύο οικογένειες ασυνεχειών του γενεσίου – μια κάθετη (οικογένεια 1 στο Σχ. 2.6) και άλλες δύο κεκλιμένες με αντίθετη κλίση (οικογένειες 2 και 3 στο Σχ. 2.6) – και από την οροφή του θόλου του θαλά-



Σχήμα 2.12: Διαχωρισμός της βραχώμαζας σε ιδεατά μέρη (blocks) έγινε με την εισαγωγή στο μοντέλο των ασυνεχειών και της διαστρωμάτωσης. Τα χρώματα αναπαριστούν περιοχές διαφορετικών μηχανικών παραμέτρων. Το πρώτο μοντέλο δεν κατέρρευσε, για να συμβεί αυτό ήταν απαραίτητη η εισαγωγή της σφήνας αποσαθρωμένου υλικού που φαίνεται στην κάτω εικόνα με κόκκινο χρώμα. Το μοντέλο στο UDEC έγινε από τον Bandis (1993).

μου (δάπεδο της σφήνας) όπως δείχνει το Σχ. 2.13(α'). Το Σχ. 2.13(β') δείχνει την αλληλουχία των γεωλογικών στρωμάτων και την φάση διεύρυνσης του θαλάμου με την δημιουργία της ορθής βαθμίδας. Οι ίδιοι ερευνητές αφού πρώτα πρότειναν καταστατικό μοντέλο για ασυνέχειες με εδαφικό υλικό πλήρωσης εν συνεχεία το εισήγαγαν στο τριδιάστατο αριθμητικό κώδικα και προσομοίωσαν τις συνθήκες κατάρρευσης του θαλάμου. Στο Σχ. 2.14 φαίνεται η σύγκριση του αριθμητικού μοντέλου με την προτεινόμενη καταστατική συμπεριφορά των ασυνεχειών με υλικό πλήρωσης με τις μετρήσεις των οργάνων στη θέση G. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται και η σύγκριση του αριθμητικού μοντέλου με απλούστερο καταστατικό κώδικα ολίσθησης ασυνεχειών του τύπου Mohr-Coulomb.



Σχήμα 2.13: Αριθμητικό μοντέλο του $\frac{1}{4}$ του συστήματος φρέατος-θαλάμου-σήραγγας στην θέση του σταθμού Pinheiros (α) άποψη των συνόρων των υπογείων, και (β) άποψη των γεωλογικών στρωμάτων και της φάσης διάνοιξης της ορθής βαθμίδας του θαλάμου (Indraratna et al., 2010).

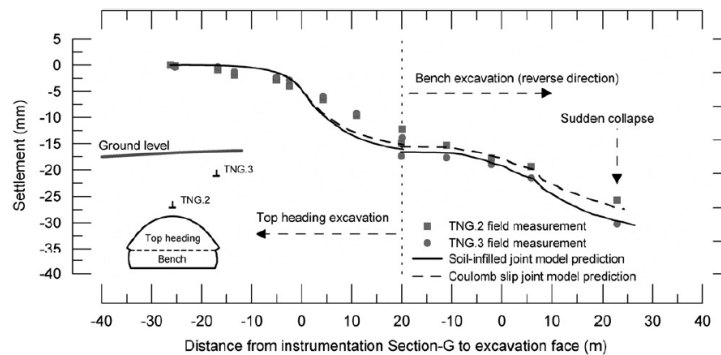
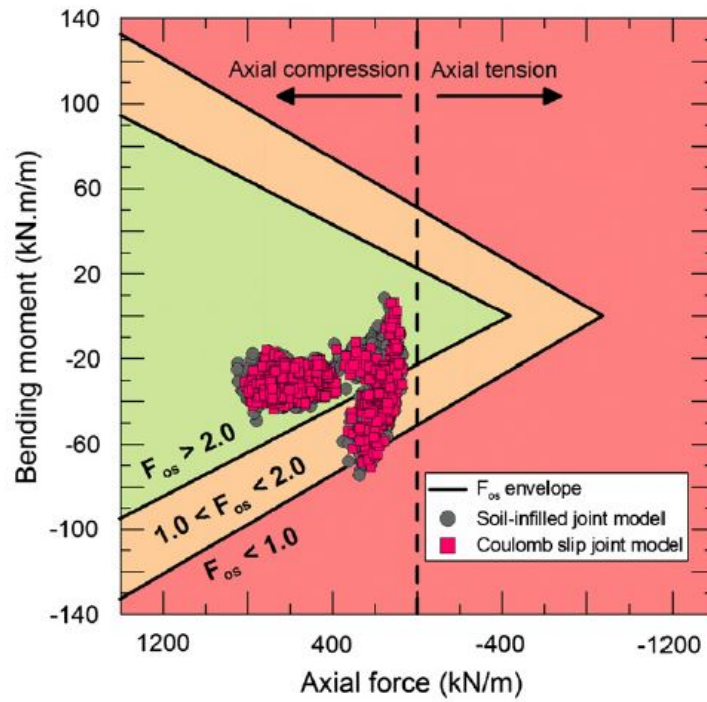


Fig. 17. Settlement predictions with tunnel advance at instrumentation section G (27 m away from shaft).

Σχήμα 2.14: Πρόβλεψη της καθίζησης με την προχώρηση του θαλάμου στη διατομή του οργάνου G (27m μακριά από το φρέαρ)(Indraratna et al., 2010).

Παρά την καλή συμφωνία των προβλεπομένων μετακινήσεων με τις μετρηθείσες που φαίνονται στο Σχ. 2.14, εντούτοις οι τελευταίες δεν δείχνουν καθαρά την αρχή και την εξέλιξη της κατάρρευσης των υπερκείμενων στρωμάτων. Για το λόγο αυτόν οι Indraratna et al. (2010) στην εργασία τους χρησιμοποίησαν το διάγραμμα φέρουσας ικανότητας της υποστύλωσης που εκφράζεται με τον οριακό «φάκελο» καμπτικής ροπής με την αξονική δύναμη $M - N$ όπως φαίνεται στο Σχ. 2.15. Τα ζεύγη τιμών $M - N$ του εκτοξευόμενου σκυροδέματος του κορυφαίου μετώπου που προβλέφθηκαν από τα δύο καταστατικά μοντέλα ασυνεχειών φαίνονται στο ίδιο

διάγραμμα. Οι τιμές $M - N$ και των δύο μοντέλων δείχνουν την τάση κατάρρευσης της υποστύλωσης όπως συνέβει στην πράξη.



Σχήμα 2.15: Διάγραμμα φέρουσας ικανότητας υποστύλωσης του μετώπου της σήραγγας (Indraratna et al., 2010).

Κεφάλαιο 3

Ανάδρομη αναλυτική και αριθμητική ανάλυση του ανυποστύλωτου συστήματος φρέατος-θαλάμου

3.1 Αναλυτικό μοντέλο κατάρρευσης αβαθών σηράγγων

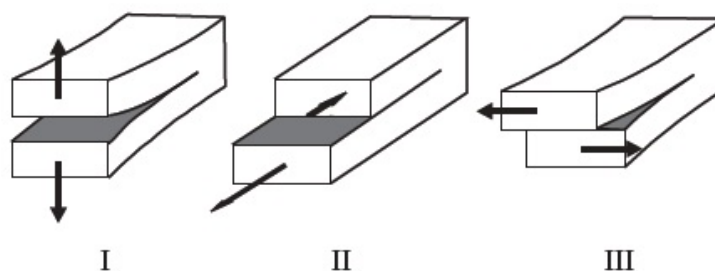
3.1.1 Εισαγωγή

Πριν την κατασκευή του υπολογιστικού μοντέλου και εφόσον έχει από προηγούμενως τεθεί προς διερεύνηση ο πιθανός μηχανισμός της υπό εξέταση κατάρρευσης, που είναι αυτός του «υποχωρούντος θυροπετάσματος», προτείνεται η προσεγγιστική αναλυτική επίλυση του προβλήματος της κατάρρευσης των υπερκείμενων γεωϋλικών εντός ανυποστήρικτης κυκλικής σήραγγας. Στα πλαίσια μιας ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis) ένα τέτοιο αναλυτικό μοντέλο θα καταδείξει την επίδραση των διαφόρων γεωμετρικών και φυσικών παραμέτρων του προβλήματος στην τελική κατάρρευση και επομένως θα δώσει χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη σημαντική μείωση του υπολογιστικού χρόνου των εν συνεχεία χρονοβόρων τριδιάστατων υπολογιστικών επιλύσεων. Οι ενότητες 3.1.2 και 3.1.3 που ακολουθούν αφορούν την σύντομη επισκόπηση κάποιων βασικών εννοιών και παραμέτρων της Θεωρίας Πλαστικότητας και εμπνεύστηκαν από τις σημειώσεις του Βαρδουλάκη (2003) με κάποιες νέες προσθήκες. Στην τελευταία ενότητα 3.1.4 επιλύεται το πρόβλημα της ανυποστήρικτης σήραγγας εντός γεωϋλικού με συνοχή και τριβή και διαπιστώνεται ότι ο ενεργός λόγος Poisson του γεωϋλικού, η συνοχή και η γωνιές εσωτερικής τριβής και διασταλτικότητας είναι οι σημαντικότερες μηχανικές παράμετροι που επηρεάζουν τη λύση του προβλήματος, ενώ από τις γεωμετρικές παραμέτρους η σημαντικότερη – όπως άλλωστε αναμενόταν - είναι ο αδιάστατος λόγος του βάθους προς τη διάμετρο της σήραγγας. Επιπροσθέτως από τις αναλυτικές επιλύσεις βρίσκονται τα όρια διακύμανσης των

ελεύθερων μηχανικών παραμέτρων του προβλήματος που είναι και πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν στην πράξη σε μια έντονα ρηγματωμένη και ανομοιογενή βραχώμαζα όπως είναι οι γνεύσιοι με χωρική μεταβλητότητα του βαθμού αποσάρθρωσης των.

3.1.2 Εντοπισμός της παραμόρφωσης εντός ζώνης διάτμησης (shear band)

Σχετικά με το τρόπο αστοχίας των εδαφών και των πετρωμάτων, στις περισσότερες περιπτώσεις – όπως και στην περίπτωση που διερευνάται σ’ αυτήν την εργασία - η αστοχία εντοπίζεται σε μία λεπτή ζώνη έντονης διατμήσεως του εδάφους. Η λεπτή αυτή διατμητική ζώνη μπορεί να θεωρηθεί και ως ρωγμή τύπου II (επίπεδη διάτμηση) ή τύπου III (αντι-επίπεδη διάτμηση) ή συνδυασμός των τριών τύπων I, II ή/και III (3.1) στα πλαίσια της Θραυστομηχανικής, ενώ οι παρακείμενες εδαφικές μάζες εκατέρωθεν της ”επιφάνειας” αστοχίας συμπεριφέρονται μάλλον ως απολύτως στερεά σώματα.

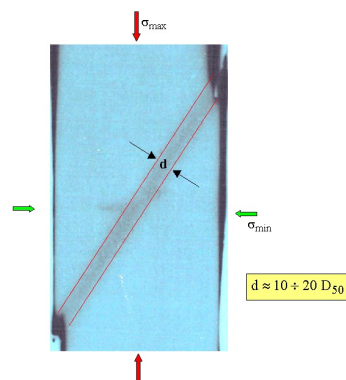


Σχήμα 3.1: Οι τρεις βασικοί τρόποι I, II, και III της παραμόρφωσης ρωγμής.

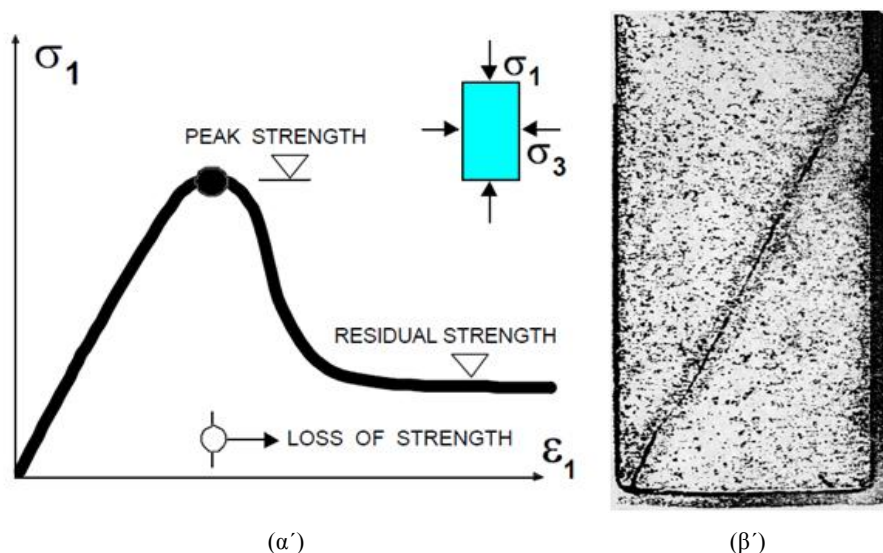
Επιπλέον, όπως δείχνουν οι παρατιθέμενες φωτογραφίες και ραδιογραφίες του Σχ. 3.2, τα πειραματικά δεδομένα ενισχύουν την υπόθεση του Roscoe (1970), ότι το πάχος της ζώνης εντοπισμού της διατμήσεως (της «επιφάνειας» αστοχίας) δεν εξαρτάται από τις εξωτερικές γεωμετρικές διαστάσεις του εκάστοτε προβλήματος (μακρο-διαστάσεις) αλλά από τη μικροδομή του υλικού και κυρίως από την διάσταση του μέσου κόκκου του υλικού (μικροδιαστάσεις) όπως σημειώνουν οι Mühlhaus & Vardoulakis (1987). Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και κατά το σχηματισμό διατμητικών ζωνών σε πετρώματα (Σχ.3.3). Μετρηθέντα πάχη ζωνών εντοπισμένης διάτμησης σε λεπτόκοκκη και μεσόκοκκη άμμο παρουσιάζονται στον Πίν.3.2.

Πίνακας 3.1: Μετρηθέν πάχος ζώνης διάτμησης (Vardoulakis & Sulem, 1995).

Άμμος	$d_{50\%}(\text{mm})$	$2d_E(\text{mm})$	$2d_E/d_{50\%}(-)$
Λεπτόκοκκη Άμμος (FS)	0.20	3.70	18.50
Μεσόκοκκη Άμμος (M)	0.33	4.30	13.00



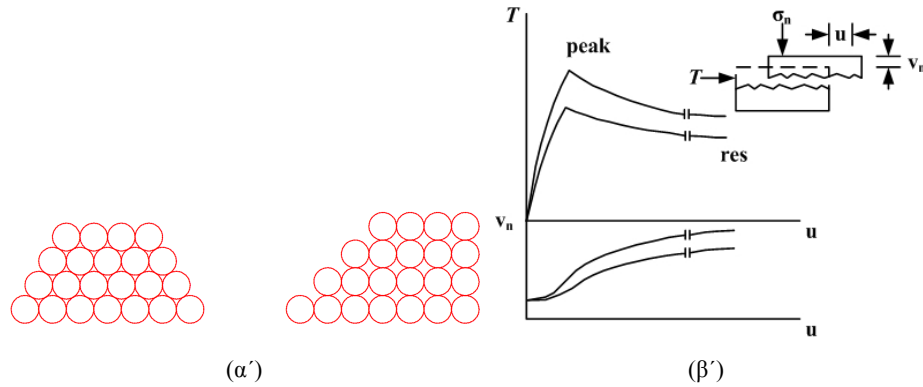
Σχήμα 3.2: Αρνητικό ραδιογραφίας όπου φαίνεται η ζώνη διατμήσεως σκια- σμένη ως ζώνη έντονης αύξησης του πορώδους και από την οποία μπορεί να μετρηθεί το πάχος της ζώνης έντονης διατμήσεως κατά την αστοχία ενός αμμώδους εδάφους καταπονούμενου σε διαξονική θλίψη (Vardoulakis et al., 1985).



Σχήμα 3.3: Εντοπισμός της παραμόρφωσης προκύπτει όταν μία ή περισσότερες συνιστώσες της τάσης σε μία περιοχή του πετρώματος μειώνεται με την αύξηση της πρώτης. (α) Χαρακτηριστική καμπύλη αξονικής τάσης – αξονικής τροπής κατά τη διάρκεια πειράματος τριαξονικής θλιπτικής δοκιμής σε πέτρωμα. (β) Η παραμόρφωση συγκεντρώνεται με όλο και περισσότερο αυξανόμενο ρυθμό σ' αυτές τις περιοχές και στο τέλος εκδηλώνεται με τη μορφή ρωγμής mode II.

3.1.3 Διασταλτικότητα των εδαφών και των πετρωμάτων

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι όταν ένα κοκκώδες υλικό υφίσταται διάτμηση, τότε αυτό εμφανίζει ταυτόχρονα και μεταβολές στον όγκο του. Το φαινόμενο αυτό που



Σχήμα 3.4: (α) Σχηματική εικόνα διασταλτικής κατάστασης που οδηγεί από την κανονική πυκνή συσκευασία ομοειδών σφαιρών στην αντίστοιχη χαλαρή, και (β) διασταλτική συμπεριφορά ασυνεχών πετρωμάτων λόγω της τραχύτητας της ασυνέχειας, με T να συμβολίζει τη διατμητική τάση, u την οριζόντια μετατόπιση, v_n την κατακόρυφη μετατόπιση και σ_n την ορθή τάση (Bandis, 1993).

φαίνεται στο Σχ. 3.4(α') καλείται διασταλτικότητα και η ανάδειξη του αποδίδεται στον Reynolds (1885). Στα κοκκώδη υλικά προκαλείται από την τριβή λόγω της συνύφανσης (interlocking) των κόκκων της κάτω επιφάνειας με τους κόκκους της άνω επιφάνειας διάτμησης. Ο άλλος τύπος τριβής οφείλεται στην επαφή των επιφανειών των κόκκων των δύο επιφανειών (επιφανειακή τριβή). Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και κατά την δοκιμή της άμεσης διάτμησης ασυνεχειών των πετρωμάτων (όπως επίπεδα στρώσης, σχιστότητας, διακλάσεων κ.λπ.) που προκαλείται εξαιτίας της τραχύτητας (roughness) των ασυνεχειών (λ.χ. Σχ.3.4(β')). Η βασική γωνία τριβής (basic friction angle) μπορεί να συσχετισθεί με την φύση της επαφής των δύο επιφανειών της ασυνέχειας ενώ η γωνία της τραχύτητας (roughness angle) με την τριβή συνύφανσης των δύο παρειών ασυνεχειών.

Η διασταλτικότητα – που προς το παρόν θα συμβολισθεί ως η εφαπτομένη μιας γωνίας ψ - ορίζεται γενικώς ως ο λόγος του ρυθμού μεταβολής του όγκου ενός σώματος $\dot{\epsilon}$ προς τον ρυθμό της διατμητικής παραμορφώσεως του $\dot{\gamma}$

$$\tan \psi = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\gamma}} \quad (3.1)$$

Μπορεί να καταδειχθεί ότι στο πείραμα της απ' ευθείας ή άμεσης διατμήσεως η γωνία ψ είναι η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα της ταχύτητας διατμήσεως με το επίπεδο διατμήσεως (επίπεδο xy στο Σχ. 3.5) και καλείται ενεργοποιημένη γωνία διασταλτικότητας (mobilized dilatancy angle) του υλικού. Πράγματι, αν γίνει η παραδοχή ότι η διάτμηση εντοπίζεται μέσα σε μία λεπτή ζώνη πάχους d και το πεδίο των ταχυτήτων είναι γραμμικό, δηλ.

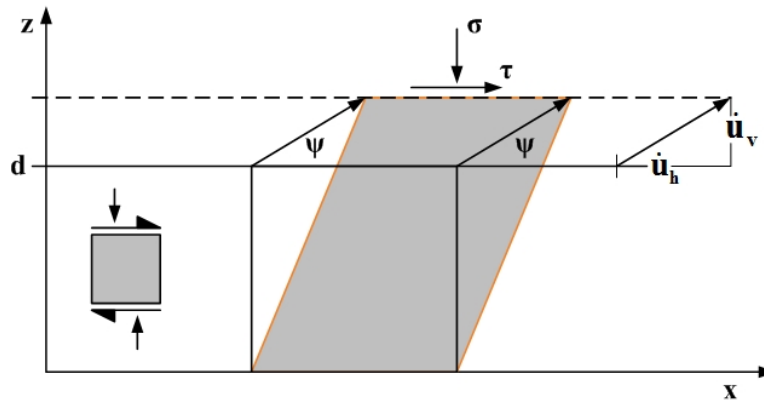
$$v_x = \frac{z}{d} \dot{u}_h, v_z = \frac{z}{d} \dot{u}_v \quad (3.2)$$

όπου το d συμβολίζει το αρχικό πλάτος της ζώνης διάτμησης, τότε ο ρυθμός μεταβολής του όγκου στην ζώνη διατμήσεως περιγράφεται από την ποσότητα,

$$\dot{\varepsilon} = \frac{dv_z}{dz} = \frac{\dot{u}_v}{d} \quad (3.3)$$

ενώ ο ρυθμός της διατμητικής παραμόρφωσης από την ποσότητα

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dz} = \frac{\dot{u}_h}{d} \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.5: Στοιχειώδης όγκος κοκκώδους υλικού εντός ζώνης διάτμησης που εμφανίζει θετική διασταλτικότητα (αύξηση όγκου λόγω αύξησης του πορώδους ή αύξησης του κενού χώρου μεταξύ παρειών μιας ασυνέχειας) κατά την υποβολή του σε άμεση διάτμηση παράλληλα με τον οριζόντιο άξονα Ox . Ο στοιχειώδης όγκος της ζώνης διάτμησης έχει αναφερθεί στο Καρτεσιανό σύστημα Oxz . Ο άξονας Oy είναι κάθετος στο επίπεδο αυτό (Βαρδουλάκης, 2003)

Συνεπώς με την προϋπόθεση ότι η παραμόρφωση μέσα στη ζώνη διατμήσεως είναι ομογενής (homogeneous strain) μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διασταλτικότητα του υλικού υπολογίζεται ανεξάρτητα από το πάχος της ζώνης διατμήσεως ως ο λόγος της μεταβολής της διατμήσεως προς την μεταβολή του ύψους του δοκιμίου,

$$\tan \psi = \frac{du_v}{du_h} \quad (3.5)$$

Αυτό σημαίνει ότι ο ενεργοποιημένος συντελεστής διασταλτικότητας

$$\tan \psi = \beta(u_h) \quad (3.6)$$

προκύπτει ως η κλίση της αντίστοιχης πειραματικής καμπύλης διασταλτικότητας, $u_v = u_v(u_h)$ που μετράται στο εργαστήριο. Εισάγοντας ως αδιάστατη παράμετρο την διατμητική παραμόρφωση,

$$\gamma = \frac{u_h}{d} \quad (3.7)$$

τότε τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να γραφούν υπό μορφή αντίστοιχων συναρτήσεων των συντελεστών ενεργοποιημένης εσωτερικής τριβής και διασταλτικότητας αντίστοιχα

$$\tan \phi = \mu(\gamma), \tan \psi = \beta(\gamma) \quad (3.8)$$

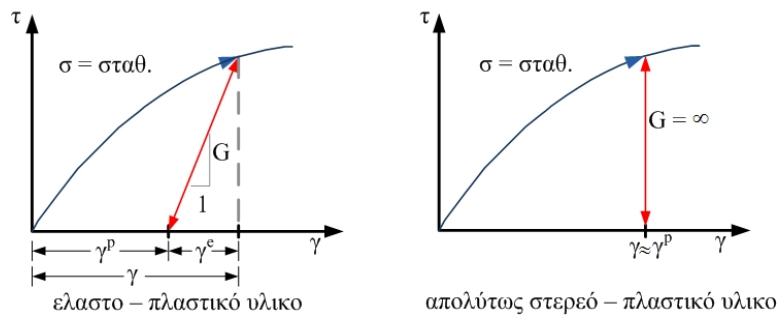
Οι παραπάνω πειραματικές παρατηρήσεις και κάποιοι επιπρόσθετοι ορισμοί μπορούν να οδηγήσουν στη διατύπωση μιας απλής καταστατικής θεωρίας για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των κοκκωδών υλικών σε απ' ευθείας διάτμηση. Γενικώς θα παρατηρήσουμε ότι κατά την παραμόρφωση ενός γεωυλικού η παραμόρφωση μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, ήτοι την ελαστική και την πλαστική συνιστώσα. Π.χ. η διατμητική παραμόρφωση θα αναλυθεί ως εξής (βλ. Σχ. 3.6),

$$\gamma = \gamma^e + \gamma^p \quad (3.9)$$

Η ελαστική συνιστώσα αντιστοιχεί στο αναστρέψιμο τμήμα της ολικής διατμητικής παραμόρφωσης,

$$\gamma^e = \frac{\tau}{G} \quad (3.10)$$

όπου G συμβολίζει το μέτρο διατμήσεως του εδάφους ή του πετρώματος. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.6 η συνιστώσα γ^p καλείται πλαστική διατμητική παραμόρφωση και αντιστοιχεί στην παραμένουσα (μη-αναστρέψιμη) παραμόρφωση αφού αφαιρεθεί πλήρως η διατμητική τάση (πλήρης αποφόρτιση). Ένα γραμμικό μαθη-



Σχήμα 3.6: Σχέση διατμητικής παραμόρφωσης με τη διατμητική τάση σε ένα μοντέλο ελαστοπλαστικού υλικού που υποβάλλεται σε απ' ευθείας διάτμηση (Βαρδουλάκης, 2003)

ματικό μοντέλο ενός κοκκώδους υλικού μπορεί να αποδοθεί με την λεγόμενη συνάρτηση διαρροής (yield function) μορφής Mohr-Coulomb

$$F = \tau - \sigma \mu(\gamma) - c \quad (3.11)$$

όπου c συμβολίζει τη συνοχή του υλικού και μ τον ενεργοποιημένο συντελεστή τριβής. Το φορτιζόμενο κοκκώδες υλικό παραμορφώνεται πλαστικά (ή «διαρρέει»),

όταν ισχύει η αντίστοιχη συνθήκη διαρροής (yield condition)

$$F = 0 \Leftrightarrow \tau = \sigma\mu(\gamma) + c \quad (3.12)$$

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η εξίσωση (3.5) μπορεί να γραφεί ως ένας κινηματικός περιορισμός μεταξύ απειροστικών μεταβολών της (πλαστικής) διατμητικής και της ογκομετρικής παραμόρφωσης,

$$\delta\varepsilon^p = \beta(\gamma)\delta\gamma \quad (3.13)$$

όπου το β συμβολίζει τον ενεργοποιημένο συντελεστή διασταλτικότητας του υλικού. Ένας τέτοιος κινηματικός περιορισμός καλείται και νόμος πλαστικής ροής (plastic flow rule) του υλικού. Ένας απλός τρόπος που επιτρέπει την εύρεση της συσχέτισης της ενεργοποιημένης γωνίας εσωτερικής τριβής ϕ με την ενεργοποιημένη γωνία διασταλτικότητας ψ ενός κοκκώδους υλικού είναι να θεωρηθεί αρχικά η έκφραση για το στοιχειώδες έργο παραμορφώσεως. Γενικώς, το έργο των εσωτερικών δυνάμεων ανά μονάδα μήκους της ζώνης διατμήσεως υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα καθ' ύψος της ζώνης του στοιχειώδους όγκου του Σχ. 3.5 του έργου των τάσεων επί των απειροστικών μεταβολών των συνιστωσών της παραμόρφωσης, δηλ.

$$\delta W = \int_0^d (\sigma_{xx}\delta\varepsilon_{xx} + \dots + \sigma_{xz}\delta\varepsilon_{xz} + \sigma_{zx}\delta\varepsilon_{zx} + \sigma_{zz}\delta\varepsilon_{zz}) dz \quad (3.14)$$

Στο Καρτεσιανό σύστημα που επιλέχθηκε οι τάσεις και οι μεταβολές των παραμορφώσεων αποδίδονται από τους παρακάτω πίνακες όπου ακολουθείται σύμβαση πρόσημου σύμφωνα με την οποία οι θλιπτικές τάσεις είναι αρνητικές ποσότητες

$$[\bar{\sigma}] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & \tau \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ \tau & 0 & -\sigma \end{bmatrix}, [\delta\bar{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \delta\gamma/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ \delta\gamma/2 & 0 & \delta\varepsilon \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Καταρχήν γίνεται η παραδοχή ότι οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι σταθερές μέσα στη ζώνη διατμήσεως. Σ' αυτήν την περίπτωση η απειροστική μεταβολή του έργου των εσωτερικών δυνάμεων αποδίδεται από την παρακάτω σχέση

$$\delta W = (\tau\delta\gamma - \sigma\delta\varepsilon)d \quad (3.16)$$

Από την έκφραση αυτή γίνεται φανερό ότι η διατμητική τάση τ είναι ενεργειακά συζυγής με την μεταβολή της διατμητικής παραμορφώσεως, $\delta\gamma = \delta u_h/d$, όπως επίσης και ότι η ορθή τάση σ είναι συζυγής με την μεταβολή της ογκικής παραμορφώσεως, $\delta\varepsilon = \delta u_h/d$. Αν οι ελαστικές παραμορφώσεις θεωρηθούν αμελητέες συγκρινόμενες με τις πλαστικές παραμορφώσεις τότε $\delta\gamma = \delta\gamma^p$ και $\delta\varepsilon = \delta\varepsilon^p$ και λαμβάνοντας υπόψιν τη συνθήκη διαρροής (3.12) και τον νόμο πλαστικής ροής (3.13) από την παραπάνω σχέση (3.16) προκύπτει η εξής έκφραση για απειροστική μεταβολή του έργου παραμορφώσεως

$$\delta W = \sigma(\tan\phi - \tan\psi)\delta u_h \quad (3.17)$$

Στη συνέχεια γίνεται η επιπρόσθετη υπόθεση ότι όλο το έργο των εσωτερικών δυνάμεων αναλύεται σε θερμότητα λόγω τριβής και σε θραύση εντός της ζώνης διάτμησης,

$$\delta W = \delta D \quad (3.18)$$

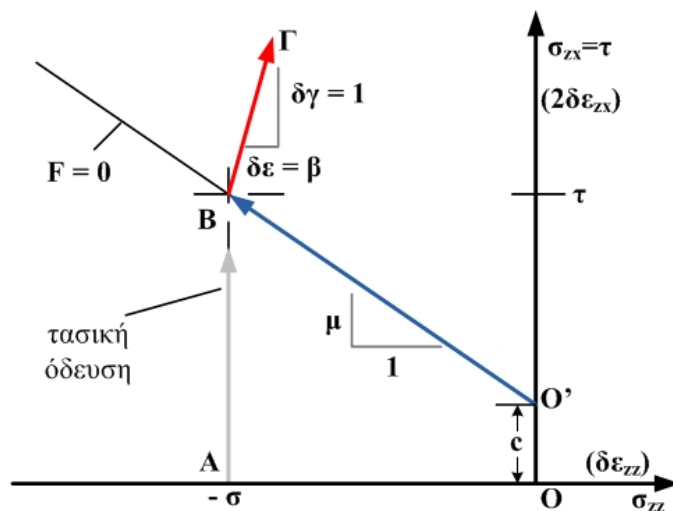
Τότε βάσει του 2^{ου} θερμοδυναμικού αξιώματος σημαίνει ότι η ειδική κατανάλωση πρέπει να είναι θετική, οπότε

$$\frac{\delta D}{\delta u_h} = \frac{\delta W}{\delta u_h} = \sigma(\tan \phi - \tan \psi) > 0 \quad (3.19)$$

Από την ανισότητα αυτή συνεπάγεται ότι σε κάθε κατάσταση του κοκκώδους υλικού η γωνία διασταλτικότητας δεν μπορεί να υπερβεί την τιμή της αντίστοιχης γωνίας τριβής

$$\psi < \phi \tag{3.20}$$

Στα πλαίσια της Θεωρίας της Πλαστικότητας η συνθήκη διαρροής (3.12) και ο νόμος πλαστικής ροής (3.13) μπορούν να παρασταθούν στο ίδιο διάγραμμα επί του επίπεδου των τάσεων (σ_{zz}, σ_{xz}) ή ισοδύναμα με το (τ, σ) , όπως φαίνεται στο Σχ. 3.7.



Σχήμα 3.7: Γραφική παράσταση της συνθήκης διαρροής ενός γεωϋλικού με συνοχή και τριβή και του νόμου πλαστικής ροής στο επίπεδο των τάσεων.

Από το σχετικό διάγραμμα του Σχ. 3.7 γίνονται οι εξής διαπιστώσεις:

- Κατά την υλοποίηση του πειράματος άμεσης διατμήσεως οι τάσεις ακολουθούν την αμιγώς διατμητική «τασική όδευση» (AB), αφού η ορθή τάση παραμένει σε προσέγγιση σταθερή.

- Η εκάστοτε εντατική κατάσταση στο επίπεδο αστοχίας παρίσταται στο διάγραμμα αυτό από το διάνυσμα $\vec{O'B}$, που έχει κλίση ίση προς την ενεργοποιημένη τριβή, $\mu = \tan \phi$ (άρα βρίσκεται πάνω στην αντίστοιχη επιφάνεια διαρροής, $F = 0$).
- Ο νόμος πλαστικής ροής παρίσταται γεωμετρικά με το διάνυσμα $\vec{B\Gamma}$, η αρχή του οποίου τοποθετείται στο εκάστοτε σημείο της τασικής οδεύσεως, δηλαδή στο συγκεκριμένο παράδειγμα στο σημείο B . Η αντίστροφη κλίση του διανύσματος του ρυθμού της πλαστικής παραμορφώσεως ισούται με την ενεργοποιημένη διασταλτικότητα σ' αυτό το σημείο, $\beta = \tan \psi$. Άρα οι συνιστώσες του διανύσματος αυτού στο εν λόγω σύστημα είναι ανάλογες προς τον ρυθμό πλαστικής παραμορφώσεως όγκου και σχήματος, αντιστοίχως.

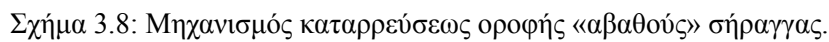
Εφόσον η ορθή τάση σ είναι συζυγής με την ογκική παραμόρφωση και η διατμητική τάση τ είναι ενεργειακά συζυγής με την διατμητική παραμόρφωση τότε το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος των τάσεων $\vec{O'B}$ με το διάνυσμα του ρυθμού πλαστικής παραμορφώσεως $\vec{B\Gamma}$ ισούται με την απειροστική μεταβολή του έργου της πλαστικής παραμορφώσεως, ήτοι

$$\vec{O'B} \cdot \vec{B\Gamma} = \tau \delta \gamma - \sigma \delta \varepsilon = \frac{1}{d} \delta D \quad (3.21)$$

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η παραπάνω καταστατική ανισότητα (3.20), μεταξύ γωνίας διασταλτικότητας και τριβής, σημαίνει γεωμετρικά ότι το διάνυσμα του ρυθμού της πλαστικής παραμορφώσεως $\vec{B\Gamma}$ δεν μπορεί να είναι κάθετο πάνω στην αντίστοιχη «επιφάνεια» διαρροής, $\vec{O'B}$. Στην οριακή περίπτωση που $\phi = \psi$ τότε το πλαστικό έργο είναι μηδέν σύμφωνα με την σχέση (3.21), τα δύο διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και ισχύουν τα δύο βασικά θεωρήματα (το Άνω και το Κάτω) της Οριακής Θεωρίας Πλαστικότητας που είναι σημαντικά για την αναλυτική ή υπολογιστική εκτίμηση των συνθηκών κατάρρευσης των κατασκευών. Στην περίπτωση αυτή ο νόμος πλαστικής ροής καλείται «συντηρημένος».

3.1.4 Το κρίσιμο βάθος ανυποστήρικτης αβαθούς σήραγγας σε έδαφος με συνοχή και τριβή

Για την εκτίμηση του κρίσιμου βάθους κάτω από το οποίο μια σήραγγα θα μπορούσε θεωρητικά να παραμείνει βραχυπροθέσμως χωρίς σημαντική υποστήριξη, θεωρείται ένας μηχανισμός καταρρεύσεως, όπως αυτός προκύπτει από παρατηρήσεις και αντίστοιχα αναλογικά πειράματα (υπό κλίμακα) στο εργαστήριο, όπως εκείνο του «υποχωρούντος θυροπετάσματος» (Vardoulakis et al., 1981) που φαίνεται στο Σχ. 1.22(β'). Στην βάση αυτών των παρατηρήσεων προτάθηκε ο μηχανισμός του παρακάτω Σχ. 3.8. Αυτός ο μηχανισμός καταρρεύσεως αποτελείται από μία κατακόρυφη σφήνα (1) = (ΑΓΓ'ΒΔ'ΔΑ) πάνω από την στέψη της σήραγγας, η οποία έχει την τάση να ολισθήσει προς τα κάτω υπό την επίδραση του βάρους της W . Η οποιαδήποτε παροδική υποστήριξη της σήραγγας θα θεωρηθεί στη φάση αυτή της αναλύσεως, χάριν απλότητας, αμελητέα.


$$\tan \phi_p = \tan \psi_p - \tan \phi_{cs} \quad (3.22)$$

63

στέψεως ως εξής,

$$\begin{aligned}
 W &= \gamma R^2 2(E_{O\Delta''\Delta'''B} - E_{O\Delta\Delta''} - E_{\Delta\Delta'''\Delta'} - E_{O\Delta A}), E = \text{area} \\
 W &= \gamma R^2 2 \left(\sin^2 \alpha \tan a - \alpha + \frac{1}{2} \cos \psi_p + \frac{H}{R} \tan \alpha - \frac{1}{2} \left(\frac{H}{R} \right)^2 \tan \psi_p \right) \\
 \alpha &= \frac{\pi}{4} - \frac{\psi_p}{2}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

ή σε αδιάστατη μορφή

$$W^* = -\alpha' H^{*2} + 2bH^* + c' \tag{3.24}$$

όπου

$$W^* = \frac{W}{\gamma R^2}, H^* = \frac{H}{R} \tag{3.25}$$

και

$$\alpha' = \tan \psi_p, b' = \tan \alpha, c' = 2(\sin^2 \alpha \tan \alpha - \alpha) + \cos \psi_p \tag{3.26}$$

Για μία δυνατή μετατόπιση του μηχανισμού καταρρεύσεως προς τα κάτω, το βάρος παράγει θετικό έργο, ίσο προς,

$$W^{(\varepsilon\xi)} = W_\nu \tag{3.27}$$

Σε κατάσταση οριακής ισορροπίας το έργο των εξωτερικών δυνάμεων ισούται με το έργο των εσωτερικών δυνάμεων

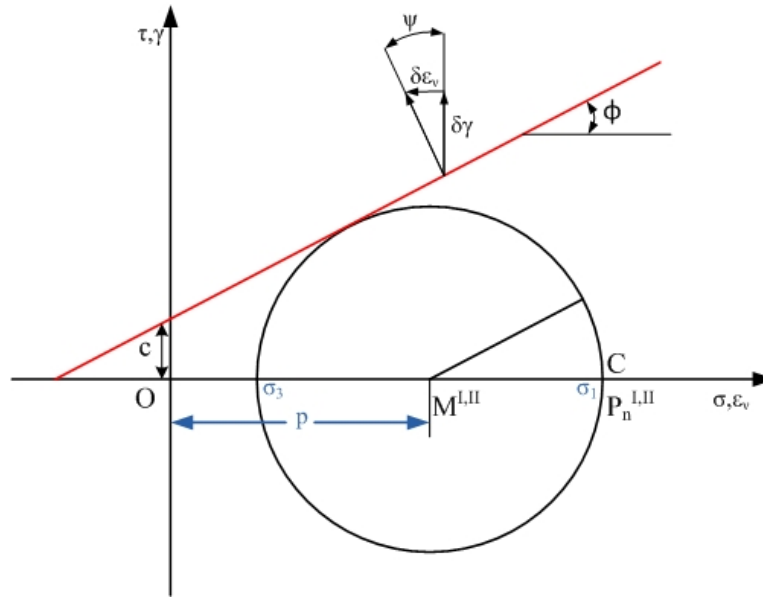
$$W^{(\varepsilon\xi)} = W^{(\varepsilon\sigma)} \tag{3.28}$$

Στην οριακή περίπτωση όπου η ελαστική (εσωτερική) ενέργεια του υλικού είναι αμελητέα, το έργο των εσωτερικών δυνάμεων αναλύσκεται πλήρως σε θερμότητα στις επιφάνειες ολισθήσεως, οπότε,

$$W^{(\varepsilon\sigma)} = Q \tag{3.29}$$

Άρα η κατανάλωση του μηχανικού έργου των εξωτερικών δυνάμεων σε θερμότητα υπολογίζεται από το συνολικό έργο των διατμητικών και ορθών τάσεων κατά μήκος των επιφανειών ολισθήσεως, που λόγω συμμετρίας δίδεται από το ολοκλήρωμα

$$Q = \int_{\Delta\Delta'} (\tau v_s - \sigma v_n) dS \tag{3.30}$$



Σχήμα 3.9: Κριτήριο M-C στο επίπεδο (σ, τ) . Η σύμβαση προσήμου είναι ότι οι θλιπτικές τάσεις είναι θετικές ποσότητες

Έστω N και T η ορθή και η διατμητική συνιστώσα των αντιδράσεων F' πάνω στην σφήνα στις επιφάνειας ολισθήσεως λόγω τριβής και συνοχής,

$$T = \int_{\Delta\Delta'} \tau \, dS, N = \int_{\Delta\Delta'} \sigma \, dS \quad (3.31)$$

Άρα

$$Q = 2(T \cdot v_s - N \cdot v_n) \quad (3.32)$$

Από την συνθήκη διαρροής Mohr-Coulomb (βλ. Σχ. 3.9)

$$\tau = c + \tan \phi_p \quad (3.33)$$

Έπεται όπως γραφικά φαίνεται και στο Σχ. 3.10,

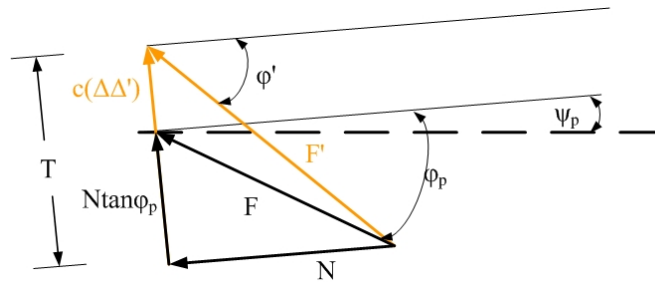
$$T = N \tan \phi_p + c(\Delta\Delta') \quad (3.34)$$

Από το νόμο πλαστικής ροής (flow rule) παίρνουμε (Σχ. 3.11),

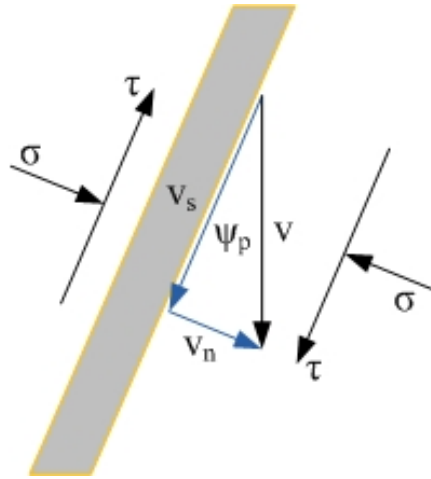
$$v_n = v_s \tan \psi_p \quad (3.35)$$

Άρα η κατανάλωση ενέργειας δίδεται από τη σχέση

$$Q = 2N(\tan \phi_p - \tan \psi_p)v_s + 2c(\Delta\Delta')v_s \quad (3.36)$$



Σχήμα 3.10: Προβολή της δύναμης αντίστασης στην ολίσθηση επί της επιφάνειας ολίσθησης.



Σχήμα 3.11: Απευθείας διάτμηση κατά μήκος μίας από τις επίπεδες επιφάνειες αστοχίας.

Με την παρατήρηση ότι ισχύει η συνθήκη του Taylor (3.22) και ότι

$$\nu_s = \cos \psi_p \quad (3.37)$$

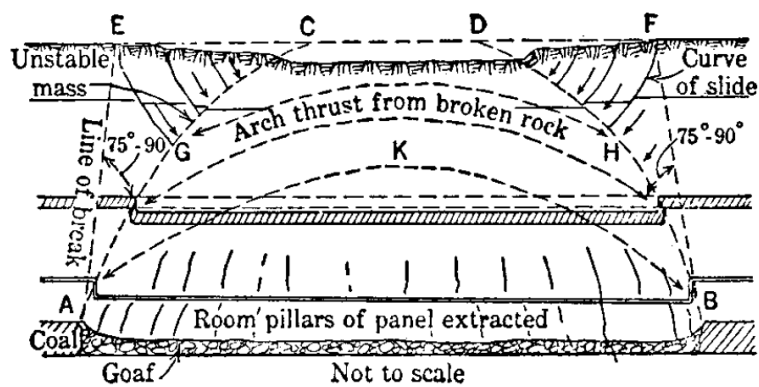
προκύπτει τελικά ότι,

$$Q = 2(N \tan \phi_{cs} \cos \psi_p + ch)\nu \quad (3.38)$$

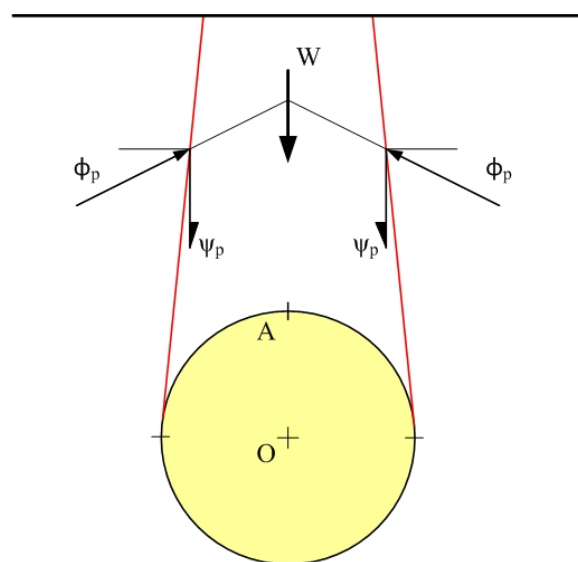
εφόσον

$$(\Delta\Delta') = \frac{h}{\cos \psi_p} \quad (3.39)$$

Σε μία Οριακή Κατάσταση Ισορροπίας το έργο των εξωτερικών δυνάμεων, δηλ. εν προκειμένω το έργο του βάρους μετατρέπεται πλήρως σε θερμότητα στις επιφάνειες



(α')



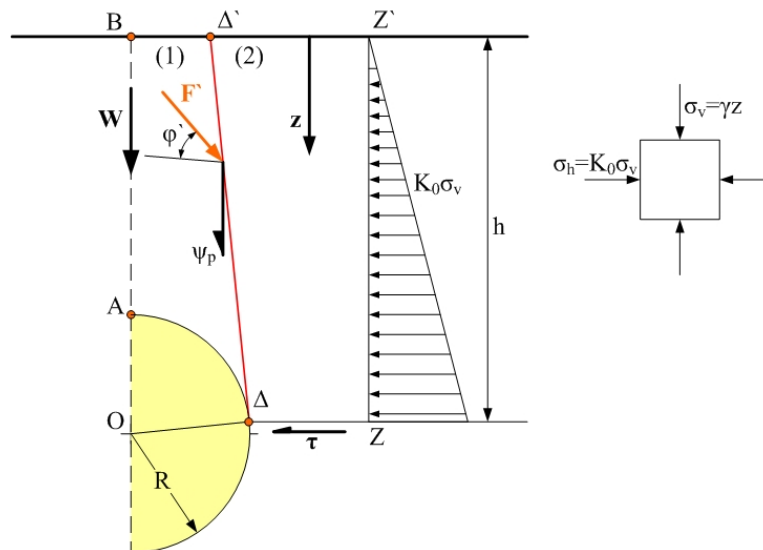
(β')

Σχήμα 3.12: α) ανακουφιστικό τόξο εντός θρυμματισμένου υλικού της κατακρημιζόμενης οροφής πάνω από επιμήκες μέτωπο εκμετάλλευσης λιγνίτη (Fayol, 1885), και (β) λειτουργία ανακουφιστικού τόξου πάνω από κυκλική σήραγγα όπου η αξονική δύναμη F' μεταβιβάζεται στις πλευρές της σφήνας πετρώματος που τείνει να μετακινηθεί με τη βαρύτητα.

νειες ολισθήσεως, συνεπώς από τις παραπάνω εξισώσεις 3.27, 3.28 και 3.38 προκύπτει ότι

$$N = \frac{1}{2} \frac{W - 2ch}{\tan \phi_{cs} \cos \psi_p} \quad (3.40)$$

Όπως είναι και εμπειρικά γνωστό από τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις (Σχ. 3.12(α')), μία σχέση ως την παραπάνω εξ. 3.40 θέτει μία απαίτηση για την δυνατότητα ασφα-
λούς «παραλαβής» από την ευρύτερη περιοχή εκατέρωθεν της σήραγγας της δρά-
σεως \vec{F}' που είναι αναγκαία ως αντίδραση πάνω στην σφήνα για την πλάγια εκτροπή
του βάρους \vec{W} με την λειτουργία του λεγόμενου ανακουφιστικού τόξου πάνω από
την σήραγγα (Σχ. 3.12(β')). Για το λόγο αυτό θεωρούνται δύο πρίσματα (2), συμ-
μετρικά εκατέρωθεν της σφήνας (1) (Σχ. 3.13), που λειτουργούν ως ερείσματα του
ανακουφιστικού τόξου. Στη συνέχεια υπολογίζεται η οριζόντια συνιστώσα της δρά-
σεως \vec{F}' της σφήνας πάνω στα εν λόγω πρίσματα που δρα στα επίπεδα ($\Delta\Delta'$) και
($\Gamma\Gamma'$).



Σχήμα 3.13: Πλευρική στήριξη του ανακουφιστικού τόξου από τις οριζόντιες γεωστατικές τάσεις.

Η οριζόντια συνιστώσα της αντίδρασης \vec{F}' βρίσκεται ως εξής:

$$H_{wedge} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tan \phi_{cs}} \frac{\cos(\phi_p - \psi_p)}{\cos \psi_p \cos \phi_p} (W - 2ch) + c(\Delta \Delta') \sin \psi_p \quad (3.41)$$

Λόγω τριγωνομετρικών ταυτοτήτων προκύπτει,

$$H_{wedge} = \frac{1}{2 \tan(\phi_p - \phi_v)} (W - 2ch) + ch \tan \psi_p \quad (3.42)$$

Εν συνεχεία απαιτείται αυτή η δύναμη H_{wedge} να εξισορροπείται από την οριζόντια συνιστώσα των τάσεων στο κατακόρυφο επίπεδο (ZZ') και το συμμετρικό του ως προς τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας στην εγγύς περιοχή εκατέρωθεν της σήραγγας.

Οι τάσεις σε κάποια απόσταση από την σήραγγα θεωρείται ότι είναι γεωστατικές και μεταβάλλονται γραμμικά με το βάθος (Σχ. 3.13)

$$\sigma_v = \gamma z, \sigma_h = K_0 \sigma_v \quad (3.43)$$

Από τη Θεωρία Γραμμικής Ελαστικότητας μπορεί να βρεθεί η κάτωθι έκφραση του λόγου οριζόντιας προς κατακόρυφη τάση των γεωλογικών στρωμάτων σε ισοροπία και ηρεμία

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (3.44)$$

όπου ν παριστά τον λόγο Poisson της εδαφοβραχώμαζας. Σημειώνεται ότι αν πριν την σήραγγα έχει εκσκαφεί στη γειτονιά της άλλο άνοιγμα (λ.χ. φρέαρ) τότε ο συντελεστής πλευρικής ώθησης K_0 είναι μικρότερος λόγω εκτόνωσης των οριζόντιων τάσεων στην περιοχή αυτή. Η συνολική οριζόντια αντίδραση της εδαφοβραχώμαζας στο επίπεδο (ZZ') δίδεται από την σχέση

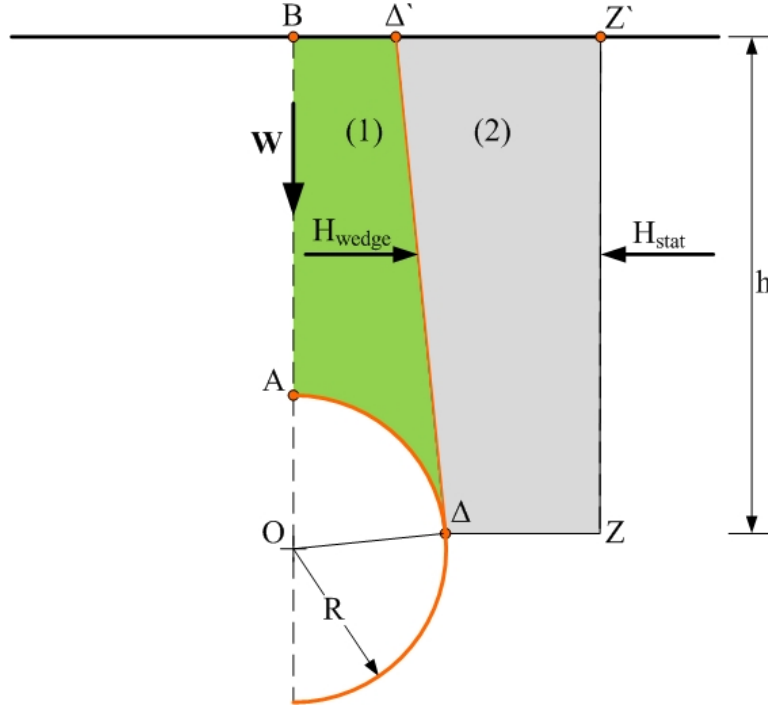
$$H_{stat} = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2, h = H + R(1 - \sin \psi_p) \quad (3.45)$$

Αφού θεωρηθούν αμελητέες τυχόν διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος της ΔZ (Σχ. 3.14, από την ισοροπία οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο σώμα (2), θεωρείται ότι η κατασκευή είναι ασφαλής όταν ισχύει

$$H_{wedge} = H_{stat}, T \approx 0 \quad (3.46)$$

Για την επίλυση της εξίσωσης αυτής (3.46), συνοψίζονται οι παρακάτω αναγκαίες σχέσεις

- $\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\psi_p}{2} \quad (3.24)_3$
- $W^* = -\alpha' H^{*2} + 2bH^* + c' \quad (3.24)$
- $W^* = \frac{W}{\gamma R^2}, H^* = \frac{H}{R} \quad (3.25)$
- $\alpha' = \tan \psi_p, b' = \tan \alpha, c' = 2(\sin^2 \alpha \tan \alpha - \alpha) + \cos \psi_p \quad (3.26)$
- $H_{wedge} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tan(\phi_p - \phi_p)} (W - 2ch) + ch \tan \psi_p \quad (3.42)$
- $H_{stat} = \frac{1}{2} K_0 \gamma h^2 \quad (3.45)_1$
- $h = H + R(1 - \sin \psi_p) \quad (3.45)_2$



Σχήμα 3.14: Ισορροπία οριζόντιων δυνάμεων στο σώμα $\Delta'\Delta ZZ'$.

από τις οποίες προκύπτει η

$$H_{wedge}^* = \frac{1}{2} \frac{1}{\tan(\phi_p - \psi_p)} \left[(-\alpha' H^{*2} + 2b' H^* + c') - \frac{2ch}{\gamma R^2} \right] + \frac{ch}{\gamma R^2} \tan \psi_p$$

και τελικά η ακόλουθη δευτεροβάθμια εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί,

$$\alpha'' H^{*2} + 2b'' H^* + c'' = 0 \quad (3.47)$$

με τους κάτωθι συμβολισμούς

$$\alpha'' = K_0 \tan(\phi_p - \psi_p) + \tan \psi_p \quad (3.48)$$

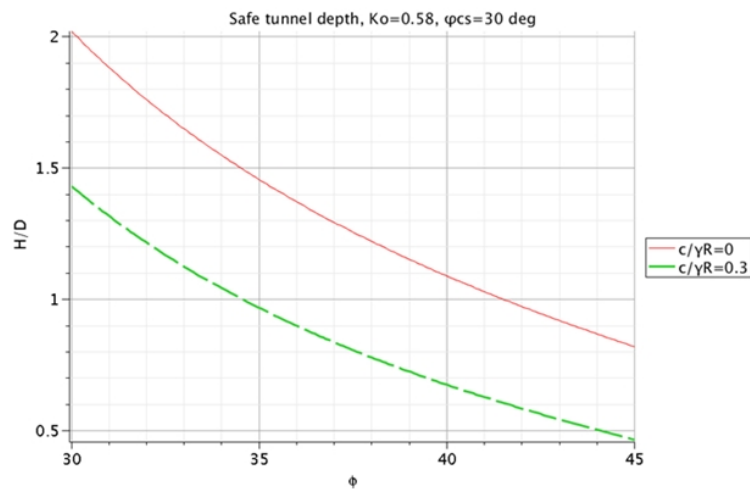
$$b'' = K_0 \tan(\phi_p - \psi_p)(1 - \sin \psi_p) + \frac{c}{\gamma R} - \tan \alpha \quad (3.49)$$

$$c'' = \left[K_0 \tan(\phi_p - \psi_p)(1 - \sin \psi_p) + \frac{c}{\gamma R} \right] (1 - \sin \psi_p) - 2(\sin^2 \alpha \tan \alpha - \alpha) - \cos \psi_p \quad (3.50)$$

Η ανωτέρω αναλυτική λύση δίνει τη δυνατότητα στη συνέχεια διενέργειας παραμετρικών αναλύσεων για να βρεθούν τα όρια κατά προσέγγιση των τιμών των διαφόρων παραμέτρων που υπεισέρχονται στο πρόβλημα και που στη συνέχεια θα

θεωρηθούν στην πιο πολύπλοκη τριδιάστατη αριθμητική επίλυση. Επιπροσθέτως μπορεί να γίνει ανάλυση ευαισθησίας της λύσης για να βρεθούν ποιες είναι εκείνες οι παράμετροι που την επηρεάζουν περισσότερο.

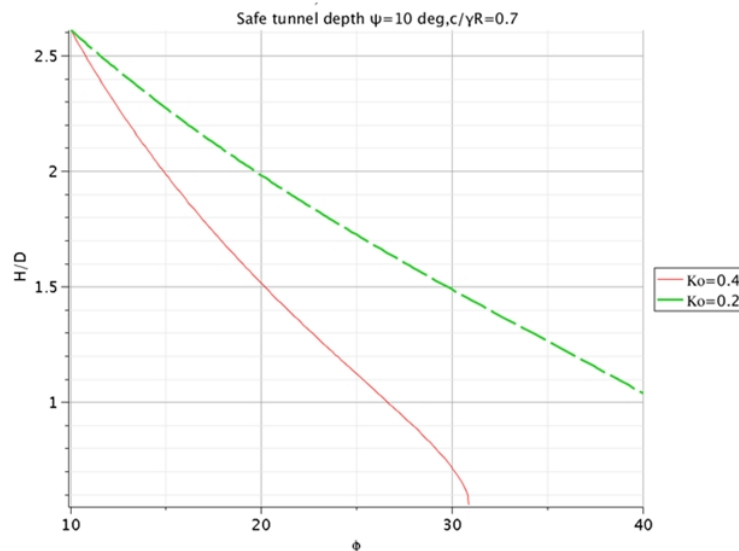
Στο Σχ. 3.15 φαίνεται η επίδραση της γωνίας εσωτερικής τριβής και της συνοχής των υπερκειμένων στο ελάχιστο βάθος όπου η ανυποστύλωτη κυκλική σήραγγα είναι οριακά ευσταθής. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η συνοχή του υπερκειμένου γεωυλικού επηρεάζει πολύ τη λύση όπως άλλωστε και η γωνία εσωτερικής τριβής.



Σχήμα 3.15: Απαιτούμενο ελάχιστο βάθος στέψης ανυποστύλωσης σήραγγας συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής για υπερκείμενο γεωυλικό με συνοχή και χωρίς συνοχή και σταθερό συντελεστή πλευρικών τάσεων σε ηρεμία και γωνία κρίσιμης κατάστασης.

Όταν στην περίπτωση της κατάρρευσης του σταθμού Pinheiros ο λόγος H/D είναι περίπου 1.4 τότε από το Σχ. 3.16 φαίνεται ότι για τους υπερκείμενους κατατεμαχισμένους και αποσαθρωμένους γνευσίους με γωνία διασταλτικότητας του ισοδύναμου συνεχούς μέσου περίπου 10° , για αδιάστατη συνοχή $\frac{c}{\gamma R} = 0.7$ (που για $R = 8\text{m}$ και $\gamma = 0.025\text{MPa/m}$ συνεπάγεται μια συνοχή του ισοδύναμου συνεχούς μέσου $c = 140\text{kPa}$) και μικρό συντελεστή πλευρικών τάσεων ($K_0 = 0.2$) λόγω μικρού λόγου Poisson των ασυνεχών και αποσαθρωμένων γνευσίων γύρω στο $\nu = 0.16$, η σήραγγα είναι οριακά ευσταθής για γωνία εσωτερικής τριβής περίπου ίση με 35° . Το αναλυτικό μοντέλο βοηθάει στο να γίνει κατανοητό ότι το ανακουφιστικό τόξο δεν λειτούργησε ως αυτοϋποστήριξη του θαλάμου εξαιτίας μικρού λόγου Poisson της βραχώμαζας. Βεβαίως στην πραγματικότητα ο θάλαμος του σταθμού Pinheiros ήταν υποστυλωμένος – αν και με ανοικτή υποστύλωση εφόσον δεν πρόλαβε αυτή να κλείσει – παρολαυτά η παρούσα αναλυτική λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετέπειτα αρχική τριδιάστατη αριθμητική επίλυση του μοντέλου του φρέατος-σταθμού για τον έλεγχο των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Επίσης σημειώνεται ότι η παρούσα αναλυτική λύση είναι απαισιόδοξη εφόσον θε-

ωρήθηκαν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ στην πραγματικότητα είναι και η πίσω πλευρά του πρίσματος των υπερκειμένων που κατέρρευσαν που σχηματίζει και άλλη ζώνη διατμήσεως με κατανάλωση πλαστικού έργου.



Σχήμα 3.16: Καμπύλες ελάχιστου απαιτούμενου βάθους στέψης ανυποστύλωσης σήραγγας συναρτήσει της γωνίας εσωτερικής τριβής για υπερκείμενο γεωϋλικό με συνοχή και γωνία διασταλτικότητα για δύο διαφορετικούς συντελεστές πλευρικών τάσεων σε ηρεμία.

3.2 Ανάδρομη αριθμητική ανάλυση του ανυποστύλωσης συστήματος φρέατος-θαλάμου και αλληλεπίδραση πετρώματος – εδάφους

Για την μελέτη και καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού κατέρρευσης, δημιουργήθηκε ένα τριδιάστατο μοντέλο του σταθμού στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$. Αν και πρόκειται για ένα πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών το $FLAC^{3D}$, μοιάζει με την κλασική μέθοδο μετατοπίσεων των πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τη μέθοδο αυτή οι συναρτήσεις σχήματος των στοιχείων χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ των σημειακών μετατοπίσεων και δυνάμεων στους κόμβους του πλέγματος. Παρόλα αυτά, στο $FLAC^{3D}$ το σύστημα αυτό των εξισώσεων λύνεται με την μέθοδο δυναμικής χαλάρωσης, στην οποία οι εξισώσεις κίνησης ολοκληρώνονται σε κάθε βήμα με μια άμεση (explicit) διαδικασία προχώρησης του χρόνου.

Ένα από τα μεγάλα προβλήματα του συγκεκριμένου προγράμματος πεπερασμένων διαφορών αποτελεί η ακρίβεια στην προσομοίωση περίπλοκων γεωμε-

τριών. Καθώς το $FLAC^{3D}$ έχει την δυνατότητα κατασκευής μόνο πολύ απλών γεωμετρικών σχημάτων (παραλληλεπίπεδα, κυλίνδρους, σφήνες κλπ.) ήταν εξ αρχής εμφανής η ανάγκη να προγραμματιστεί μια ρουτίνα που να συνδέει τους δύο «κυλίνδρους» (φρέαρ, σήραγγα) μεταξύ τους, χωρίς αυτοί να παραβιάζουν βασικούς κανόνες λειτουργίας του προγράμματος. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στα Σχ. 3.17 και 3.18.

Το συγκεκριμένο μοντέλο περιλαμβάνει όλα τα τμήματα του σταθμού όπως το φρέαρ και τον σταθμό επιβίβασης εκτός από την σήραγγα κυκλοφορίας του τρένου και την υποστύλωση.

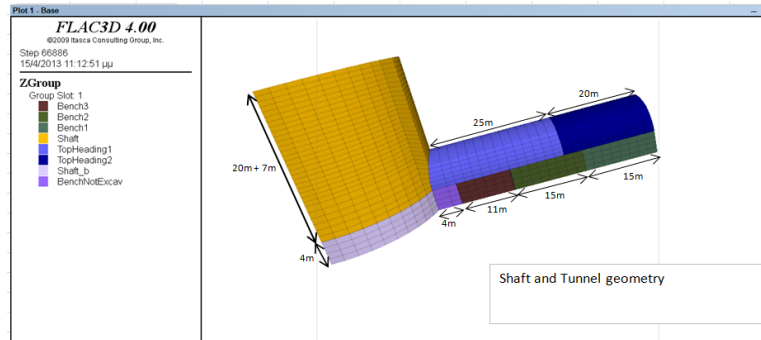
Η επίδραση της υποστύλωσης στις δυνάμεις που ασκούνται από το περιβάλλον πέτρωμα αντισταθμίστηκε από την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων του πετρώματος. Στο στάδιο αυτό γίνεται άλλωστε μια πρώτη διερεύνηση του μηχανισμού αστοχίας της βραχόμαζας στο χώρο γύρω από το φρέαρ και την σήραγγα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα δοθεί βάρος στην επιλογή του τύπου, στον τρόπο σχεδιασμού της υποστύλωσης αλλά και στην επίδραση της τελευταίας στις εδαφικές καθιζήσεις. Στο μοντέλο θεωρείται ότι επιδρούν μόνο βαρυτικές δυνάμεις ενώ ο λόγος K των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες τάσεις προσδιορίζεται από τον λόγο του Poisson, $K = \frac{\nu}{1 - \nu}$. Η μικρή τιμή του λόγου, που ισούται με 0.16 (το ασυνεχές πέτρωμα θεωρείται ότι εμπίπτει στην κλάση του μικρού λόγου Poisson 0 - 1/6) (Κεφ. 1.2 Πιν. 3.1) δίνει μικρή γωνία διαστολικότητας της βραχόμαζας που αιτιολογείται από το πυκνό δίκτυο ασυνεχειών που διασχίζουν τη βραχόμαζα. Η θεώρηση αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι δεν δημιουργούνται νέες ρωγμές αλλά παρουσιάζεται ολίσθηση στις ήδη υπάρχουσες ασυνέχειες στις οποίες η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής ισούται ή πλησιάζει την οριακή τιμή της υπολειμματικής γωνίας τριβής.

Η διαδικασία κατασκευής του σταθμού είναι η ακόλουθη (Σχ. 3.17):

1. Όρυξη του φρέατος έως το 1ο επίπεδο εργασίας.
2. Ταυτόχρονη εκσκαφή για δύο πλατφόρμες επιβίβασης σε αντίθετες κατευθύνσεις (συμμετρία).
3. Σταδιακή εκσκαφή της βαθμίδας (bench) (δεύτερο επίπεδο εργασίας) με φορά προς το φρέαρ.
4. Εκσκαφή του κοίλου δαπέδου (invert) για τις δύο πλατφόρμες επιβίβασης (δεν έγινε ποτέ λόγω κατάρρευσης).

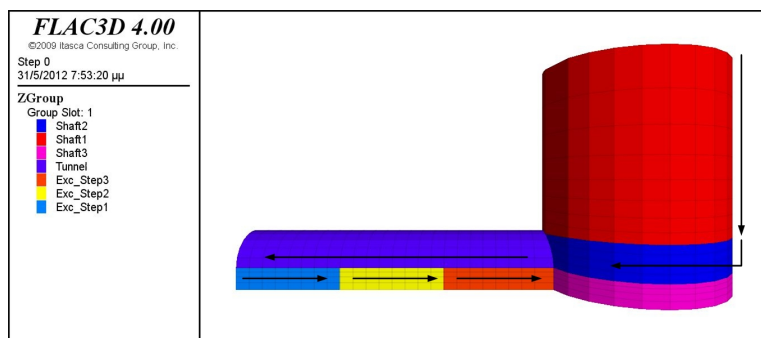
Κατά την κατασκευή τους, το ανώτερο ή κορυφαίο μέτωπο μορφής θόλου (top heading) του σταθμού προχώρησε σε βήματα των 1.6m (Oliveira, 2008) με κατεύθυνση από το φρέαρ προς τη σήραγγα κυκλοφορίας (running tunnel). Στις επιλύσεις που έγιναν, λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων του μοντέλου η εκσκαφή του φρέατος έγινε σε ένα στάδιο ύψους 27m. Η προσομοίωση της διάνοιξης του κορυφαίου μετώπου του θαλάμου στη συνέχεια έγινε σε τέσσερα στάδια, ένα 25m, ένα 10m και δύο των 5m, ενώ η βαθμίδα, αντί της πραγματικής προχώρησης εκσκαφής, που έγινε σε βήματα 2m, στο μοντέλο επιλέχθηκαν τέσσερα βήματα, δύο με μήκος

15m, ένα μήκους 11m και ένα μήκους 4m το οποίο όμως δεν ολοκληρώθηκε ποτέ διότι προηγήθηκε η κατάρρευση.



Σχήμα 3.17: Στάδια εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας.

Η κατεύθυνση εκσκαφής της σήραγγας ήταν ίδια με τις πραγματικές συνθήκες που ακολουθήθηκαν στο σταθμό του Sao Paulo και οι οποίες περιγράφησαν παραπάνω (Σχ. 3.18).

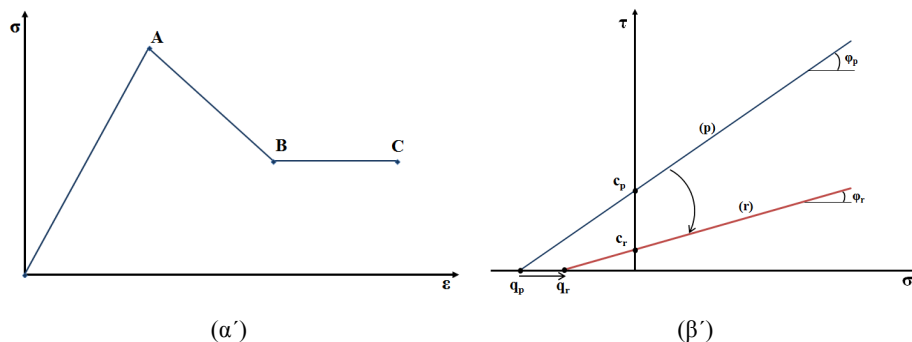


Σχήμα 3.18: Κατεύθυνση σταδιακής εκσκαφής του συστήματος φρέατος-θαλάμου.

3.2.1 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας

Κατα την επίλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών $FLAC^{3D}$ έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Αρχικά, το υλικό θεωρήθηκε ότι είναι ισότροπο και συνεχές. Οι δύο αυτές «καταστατικές παραδοχές» στηρίχθηκαν στο γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός οικογενειών ασυνεχειών διασχίζει τον γενεύσιο σχηματίζοντας ένα πυκνό δίκτυο προϋπαρχουσών ρηγματώσεων. Το πυκνό αυτό δίκτυο ασυνεχειών συντελεί στο κατά πολύ μικρότερο μέσο μέγεθος ογκοτεμαχίων πετρώματος που απομονώνονται μεταξύ των ασυνεχειών συγκριτικά με τη χαρακτηριστική διάσταση των εκσκαφών.



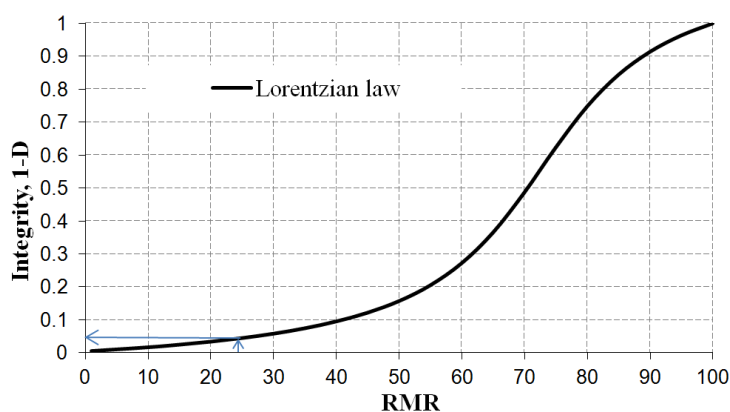
Σχήμα 3.19: (α) Το συνεχές μοντέλο παραμορφωσιακής χαλάρωσης παρουσιάζεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης, και (β) ο κινηματικός μηχανισμός χαλάρωσης συνοχής – τριβής στο επίπεδο (σ, τ) για ένα πολύ διακλασμένο πέτρωμα.

- Επιπλέον, θεωρείται ότι το πέτρωμα υπακούει το εμπειρικό μοντέλο αντοχής των Mohr-Coulomb, εμφανίζει δε ελαστική συμπεριφορά μέχρι το σημείο αιχμής (A) και ακολουθεί ένα τμήμα χαλάρωσης μέχρι το σημείο (B) καταλήγοντας τέλος στο τμήμα σταθερής υπολειμματικής αντοχής (BC), όπως φαίνεται στο Σχ.3.19(α'). Αυτό σημαίνει ότι μόλις το υλικό φτάσει την μέγιστη αντοχή του (peak strength) ακολουθεί τον κινηματικό μηχανισμό χαλάρωσης συνοχής – τριβής (cohesion-friction softening) που φαίνεται στο Σχ.3.19(β'). Τέλος, η γωνία διαστολικότητας επιλέχθηκε να έχει μικρή τιμή και να είναι σταθερή, δεν ακολουθεί δηλαδή κάποιο νόμο χαλάρωσης όπως οι άλλες δύο παράμετροι. Αυτή η παραδοχή βασίζεται στο ότι οι ασυνέχειες είναι σχετικά λείες.
- Επίσης δεν αναμένεται επιπλέον φθορά μέχρι το σημείο μέγιστης φόρτισης καθώς το υλικό θεωρείται ήδη αρκετά υποβαθμισμένο λόγω του μεγάλου αριθμού ασυνεχειών όπου προϋπάρχουν.

Οι ιδιότητες του γενεσίου υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τις ιδιότητες του αρρήκτου γενεσίου με την τιμή του παράγοντα «ακεραιότητας» (integrity) που προκύπτει από την καμπύλη του Σχ. 3.20 για τιμή ίση με $RMR=25$. Αν η μέση τιμή του RMR της βραχόμαζας πάνω από την σήραγγα έχει την τιμή 25 τότε μπορεί να βρεθεί ότι η υπολειμματική ακεραιότητα της βραχόμαζας $(1 - D)$, όπου το D συμβολίζει τη φθορά της βραχόμαζας και κυμαίνεται από 0 (πλήρως κατεστραμμένο υλικό) έως 1 (άρρηκτο πέτρωμα – intact rock) – είναι της τάξης του 0.05 ή 5 % (Σχ.3.22). Έτσι όλες οι ελαστικές παράμετροι (εκτός από τον λόγο Poisson) και οι παράμετροι αντοχής (εκτός από τις γωνίες εσωτερικής τριβής και διαστολικότητας) οι οποίες είναι απαραίτητες για το μοντέλο έχουν υπολογισθεί πολλαπλασιάζοντας τις τιμές που προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές με ένα σταθερό συντελεστή ίσο με 0.05 (Πιν. 3.1).

Πίνακας 3.2: Μηχανικές παράμετροι του αρρήκτου και του διακλασμένου πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο ανυποστύλωσης σήραγγας.

Μηχανικές Παράμετροι Πετρώματος [μονάδες]	Αρρηκτο [γνεύσιος]	Ρηγματωμένο [γνεύσιος]
Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	50	2.5
Λόγος Poisson	0.16	0.16
Μέγιστη Συνοχή [kPa]	8000	400
Μέγιστη Γωνία Εσ. Τριβής [deg]	34	34
Υπολειμματική Συνοχή [kPa]	-	30
Υπολειμματική Γωνία Εσ. Τριβής [deg]	20	20
Γωνία Διαστολικότητας [deg]	10	10



Σχήμα 3.20: Καμπύλη συσχέτισης της «ακεραιότητας» (integrity) της βραχώμαζας με το RMR (Exadaktylos & Stavropoulou, 2008).

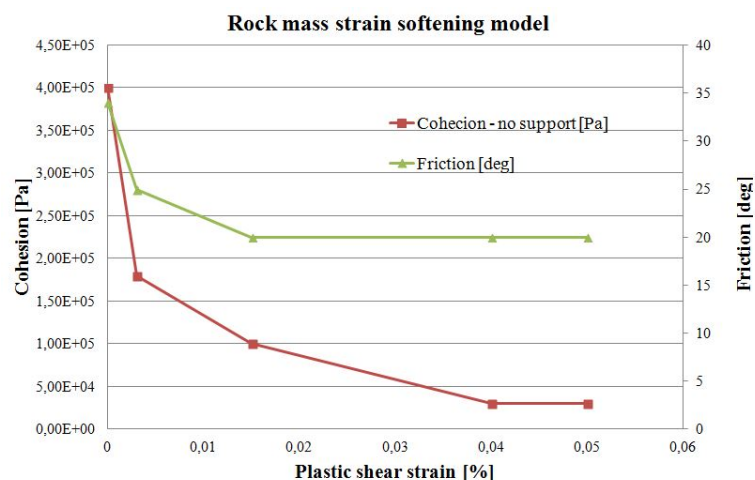
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση της αστοχίας στο μετρό του Sao Paulo περιγράφεται από τις δύο φθίνουσες καμπύλες συνοχής και τριβής συναρτήσει της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης που φαίνονται στο Σχ.3.21.

3.2.2 Αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης

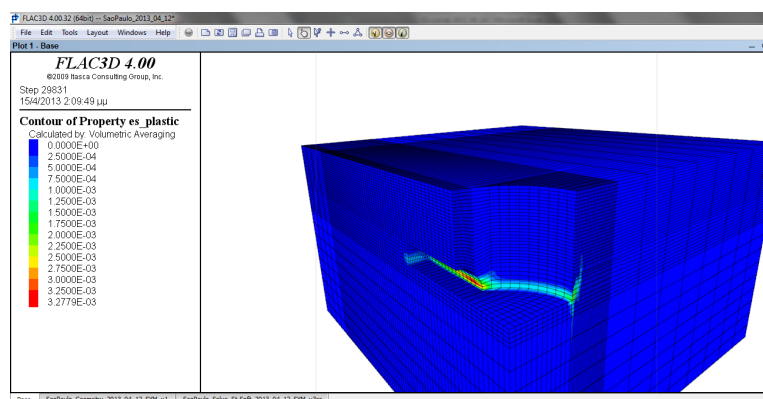
Μετά την εκσκαφή του φρέατος και του μετώπου της σήραγγας εμφανίζονται τα πρώτα σημεία παραμορφωσιακής χαλάρωσης στις παρειές του φρέατος, που είναι μια περιοχή με μεγάλη συγκέντρωση τάσεων, δημιουργώντας έτσι τη ζώνη διάτμησης που φαίνεται στο Σχ.3.22. Καθώς το μέτωπο απομακρύνεται από την περιοχή κοντά στο φρέαρ η ζώνη αυτή σταθεροποιείται φθάνοντας σε ύψος 12 περίπου μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Το φαινόμενο ενεργοποιείται ξανά μετά την εκσκαφή του τρίτου και τελευταίου τμήματος της βαθμίδας (4m πριν το φρέαρ, Σχ.3.23).

Η ζώνη διάτμησης πλησιάζει σταδιακά την επιφάνεια του εδάφους ενώ ταυτό-



Σχήμα 3.21: Μοντέλα χαλάρωσης για την συνοχή (c) και την τριβή (ϕ).

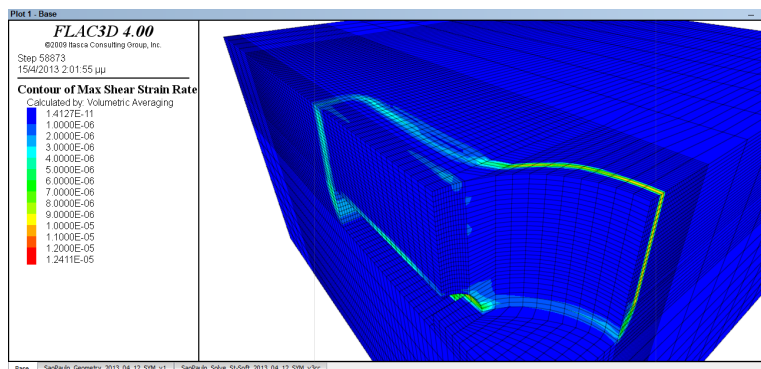


Σχήμα 3.22: Δημιουργία της πρώτης ζώνης διάτμησης μετά την εξόρυξη του φρέατος και του κορυφαίου μετώπου του θαλάμου.

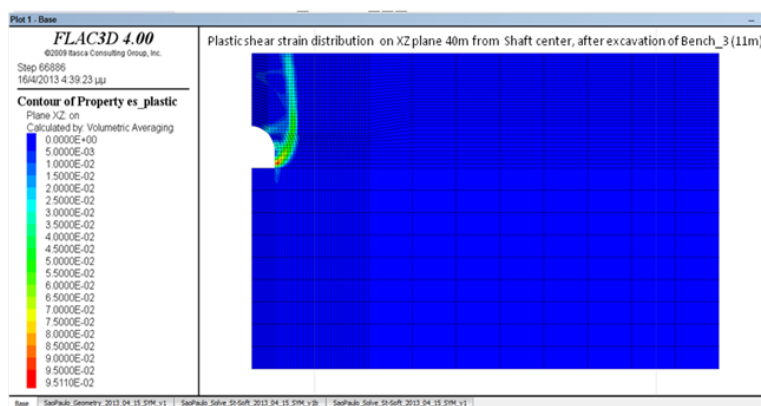
χρονα νέες ζώνες διάτμησης εκκινούν από τμήματα της σήραγγας (Σχ.3.24) πλησίον του φρέατος. Οι ζώνες αυτές ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας έτσι την επιφάνεια που φαίνεται στο Σχ.3.25.

Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης των εκσκαφών καταγράφηκαν οι μετατοπίσεις στα σημεία που φαίνονται στο Σχήμα 3.26, οι οποίες συγκρίθηκαν με πραγματικά βιβλιογραφικά δεδομένα (Assis, 2011). Η επίλυση τερματίστηκε όταν οι μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν στα εν λόγω σημεία - σταθμούς έγιναν λίγο μεγαλύτερες από αυτές που μετρήθηκαν στα αντίστοιχα εκτασιόμετρα στις 12 Ιανουαρίου 2007, λίγο πριν την κατάρρευση του σταθμού.

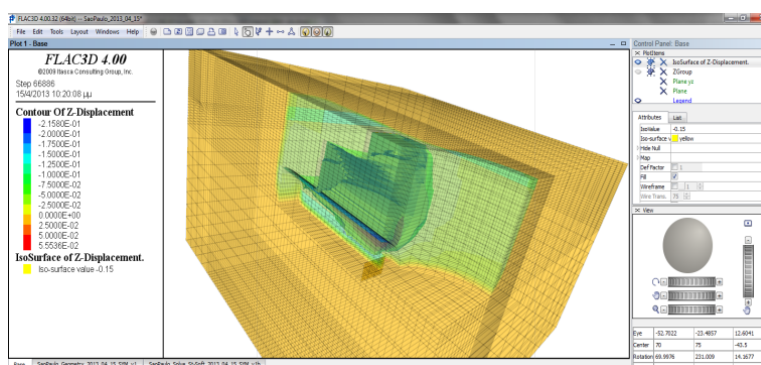
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από το μοντέλο με πραγματικές φωτογραφίες από την περιοχή υπάρχουν εμφανείς ομοιότητες, όπως λ.χ. είναι η περιοχή κατάρρευσης στο κολάρο του φρέατος (Σχ. 3.27 α και β), καθώς επίσης και η προβλε-



Σχήμα 3.23: Ζώνη διάτμησης μετά την εξόρυξη της τελευταίας βαθμίδας του θαλάμου πλησιάζοντας προς το φρέαρ

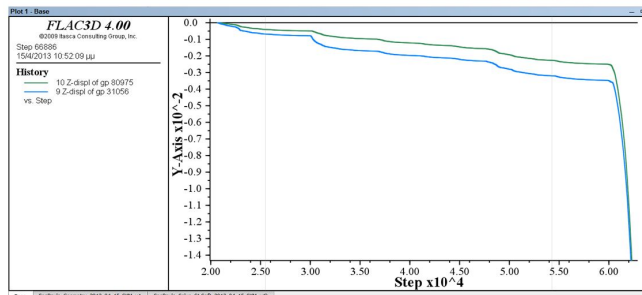


Σχήμα 3.24: Πρισματικός όγκος υπερκείμενος της σήραγγας που σχηματίζεται από την συνένωση ζωνών έντονης διατμητικής παραμόρφωσης.

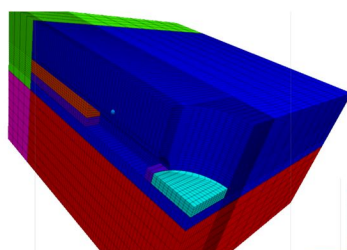


Σχήμα 3.25: Περιοχή συνένωσης ζωνών διάτμησης και δημιουργία επιφάνειας μεγάλων μετατοπίσεων.

History points: TN-G2 (blue line) hp id 31056 & TN-G3 (green line) hp 31056



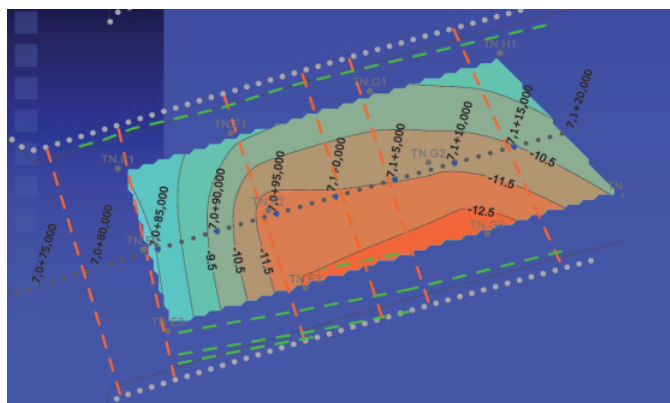
(α')



Location of TN.G2:
 $X = 0\text{m}$, $Y = 48\text{m}$, $Z = -16\text{m}$

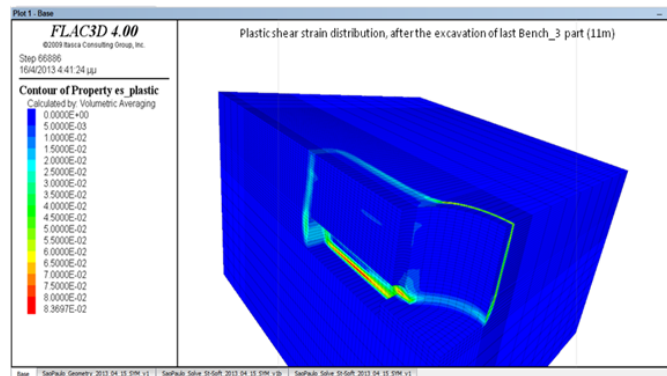
Location of TN.G3:
 $X = 7\text{m}$, $Y = 51\text{m}$, $Z = -7.3\text{m}$

(β')



(γ')

Σχήμα 3.26: α) Κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στα δύο σημεία του εκτασιομέτρου πάνω από την στέψη της σήραγγας β) τα σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων και γ) πραγματικά δεδομένα κατακόρυφων μετατοπίσεων από την περιοχή.



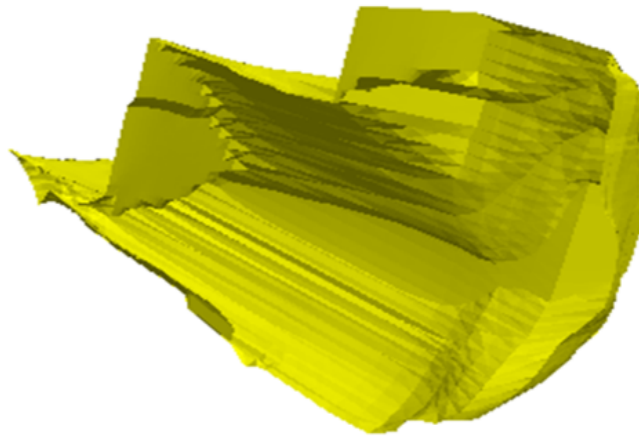
(α')



Περιοχή της σύνθετης κατάρρευσης της
στέψης του θαλάμου και της παρειάς του
φρέατος

(β')

Σχήμα 3.27: α) Τελική μορφή της ζώνης διάτμησης γύρω από την περιοχή του φρέατος και της σήραγγας την στιγμή της κατάρρευσης και β) αεροφωτογραφία της περιοχής αστοχίας.



(α')



(β')

Σχήμα 3.28: α) Προβλεφθείσα σφήνα κατάρρευσης από το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών και β) πραγματική περιοχή αστοχίας απο αεροφωτογραφία στο σταθμό του Pinheiros στο Sao Paulo.

φθείσα εγκάρσια στον διαμήκη άξονα του θαλάμου ζώνη διάτμησης Σχ. 3.28 α που εμφανίζεται σε απόσταση 45m από το φρέαρ με το ρήγμα του Σχ. 3.28 β. Η αρχή της σήραγγας, η χιλιομετρική θέση 7080 και η ασυνέχεια (FF) που φαίνεται στο βάθος, στη χιλιομετρική θέση 7120, οριοθετούν την 40m περιοχή κατάρρευσης του σταθμού (Barton, 2009)

Κεφάλαιο 4

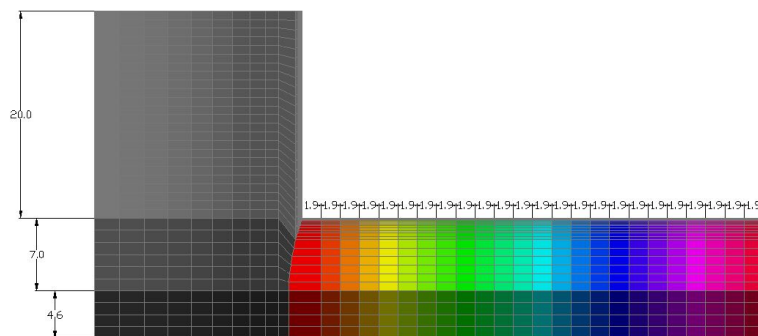
Ανάδρομη αριθμητική ανάλυση του υποστυλωμένου συστήματος φρέατος-θαλάμου και αλληλεπίδραση πετρώματος - εδάφους

4.1 Περιγραφή του τριδιάστατου αριθμητικού μοντέλου

Για την μελέτη της αλληλεπίδρασης του συστήματος υποστύλωσης – πετρώματος και της επίδρασης στις εδαφικές καθιζήσεις καθώς και της τελικής αστοχίας κατασκευάστηκε τριδιάστατο μοντέλο υποστυλωμένου συστήματος φρέατος – θαλάμου χρησιμοποιώντας τον ίδιο αριθμητικό κώδικα. Το νέο αυτό μοντέλο που κατασκευάστηκε περιλαμβάνει, όπως και το προηγούμενο όλα τα τμήματα του σταθμού όπως είναι το φρέαρ, και η πλατφόρμα επιβίβασης, εκτός από την σήραγγα κυκλοφορίας. Η τελευταία δεν σχεδιάστηκε για λόγους «οικονομίας» στην ταχύτητα επίλυσης ενός ήδη σύνθετου μοντέλου και επιπλέον επειδή ο μηχανισμός κατάρρευσης που μελετάται έλαβε χώρα μακριά από αυτήν. Ως σύστημα υποστύλωσης χρησιμοποιήθηκε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete lining), με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 20GPa και λόγο Poisson ίσο με 0.25. Η υποστύλωση της διατομής της σήραγγας που αποτέλεσε την πλατφόρμα επιβίβασης σχεδιάστηκε με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 350mm τόσο στο ανώτερο μέτωπο όσο και στην βαθμίδα. Μόνο το ένα τέταρτο του προβλήματος μοντελοποιήθηκε, λόγω της συμμετρίας. Όπως και στο ανυποστυλωτό μοντέλο έτσι και σε αυτό θεωρείται ότι επιδρούν μόνο βαρυτικές δυνάμεις ενώ ο λόγος K των οριζόντιων προς τις κατακόρυφες τάσεις προσδιορίζεται από τον λόγο του Poisson σύμφωνα με τη θεωρία Γραμμικής Ελαστικότητας [$K = \frac{\nu}{(1-\nu)}$]. Για την υιοθετούμενη μικρή τιμή του λόγου Poisson ισχύουν τα ίδια με τα αναφερθέντα στο 3ο Κεφάλαιο. Η διαδικασία προσομοίωσης

της κατασκευής του σταθμού είναι η ακόλουθη (Σχ. 4.1):

- Όρυξη του φρέατος έως το 1ο επίπεδο εργασίας
- Ταυτόχρονη εκσκαφή για δύο πλατφόρμες επιβίβασης σε αντίθετες κατευθύνσεις (συμμετρία)
- Σταδιακή εκσκαφή της βαθμίδας (bench) (δεύτερο επίπεδο εργασίας) με φορά προς το φρέαρ
- Εκσκαφή του κοίλου δαπέδου (invert) για τις δύο πλατφόρμες επιβίβασης



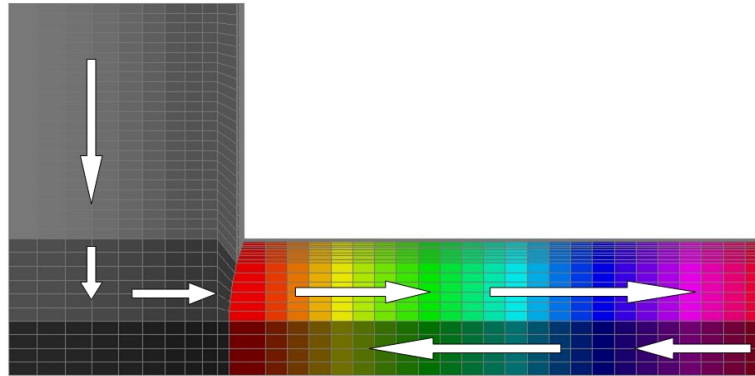
Σχήμα 4.1: Στάδια εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας – γεωμετρία εκσκαφής.

Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή του σταθμού Pinheiros χαρακτηρίζονται από ετερογένειες που οφείλονται κυρίως στα εμφανή επίπεδα ασυνεχειών (joints) και στην χωρική κατανομή του διαφορετικού βαθμού αποσάρθρωσης του γενεσίσιου. Τα πάχη των στρωμάτων των διαφόρων υλικών (εδάφη, αποσαθρωμένος βράχος, και συμπαγής βράχος) ποικίλλουν σημαντικά κατά μήκος της σήραγγας δυσχεραίνοντας τον ακριβή εντοπισμό των επαφών τους. Για τον λόγο αυτό και σε μια προσπάθεια απλούστευσης και «ομογενοποίησης» του αριθμητικού μοντέλου όπως έγινε και στο 3ο Κεφάλαιο, τα υπερκείμενα της σήραγγας πετρώματα θεωρήθηκαν ως ένας ενιαίος σχηματισμός με κοινές μηχανικές ιδιότητες που αντιπροσωπεύουν το σταθμικό μέσο όρο των αντίστοιχων ιδιοτήτων του κάθε στρώματος που υπεισέρχεται σ' αυτόν.

Η προχώρηση του ανώτερου μετώπου (top heading) του σταθμού έγινε σε βήματα των 1.9m (Σχ. 4.1) με κατεύθυνση από το φρέαρ προς τη σήραγγα κυκλοφορίας (running tunnel). Στις επιλύσεις που έγιναν, λόγω του μεγάλου αριθμού κόμβων του μοντέλου η μοντελοποίηση της εκσκαφής του φρέατος έγινε σε ένα και μοναδικό στάδιο ύψους 27m. Η προσομοίωση της διάνοιξης του ανώτερου μετώπου του θαλάμου στη συνέχεια έγινε σε βήματα των 2m ενώ η τοποθέτηση της υποστύλωσης γινόταν κατά την διάρκεια εξόρυξης του επόμενου βήματος. Η βαθμίδα, ακολούθησε τις διαστάσεις της πραγματικής προχώρησης εκσκαφής, που

έγινε σε βήματα 1.9m, ενώ η υποστύλωση της έγινε με τον ίδιο τρόπο που έγινε και αυτή του ανώτερου μετώπου. Τελικώς ο θάλαμος σταμάτησε σε απόσταση περίπου 6m από το φρέαρ.

Η κατεύθυνση εκσκαφής του θαλάμου ήταν ίδια με τις πραγματικές συνθήκες που ακολουθήθηκαν στο σταθμό και οι οποίες περιγράφησαν παραπάνω (Σχ. 4.2).



Σχήμα 4.2: Κατεύθυνση εξόρυξης συστήματος φρέατος σήραγγας του μετρό στο Sao Paulo.

4.2 Μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας

Κατά την επίλυση στο του μοντέλου με την υποστύλωση έγιναν αντίστοιχες παραδοχές με αυτές των ανυποστυλωτων εκσκαφών που εκτέθησαν ήδη στο Κεφάλαιο 3, ήτοι:

- Τα υπερκείμενα πετρώματα και εδάφη θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται ως ισότροπα και συνεχή υλικά, καθώς ο μεγάλος αριθμός οικογενειών ασυνεχειών και η πυκνότητα των που διασχίζουν τον γνεύσιο συντελούν αφενός μεν σε μικρό χαρακτηριστικό μέγεθος ογκοτεμαχίου που απομονώνεται από τις αλληλοτεμνόμενες ασυνέχειες αφετέρου σε «εξομάλυνση» της μεταβολής μιας μηχανικής ιδιότητας με τον προσανατολισμό στο χώρο.
- Το πέτρωμα θεωρείται ότι υπακούει το μοντέλο αστοχίας των Mohr-Coulomb, εμφανίζει δε ελαστική συμπεριφορά μέχρι την εντατική κατάσταση αιχμής και ακολουθεί ένα τμήμα χαλάρωσης καταλήγοντας τέλος στο τμήμα σταθερής υπολειμματικής αντοχής. Αυτό σημαίνει ότι μόλις το υλικό φτάσει την μέγιστη αντοχή του ακολουθεί τον κινηματικό μηχανισμό χαλάρωσης συνοχής – τριβής που υιοθετήθηκε επίσης στο 3ο Κεφάλαιο.
- Η γωνία διαστολικότητας επιλέχθηκε να έχει μικρή τιμή και να είναι σταθερή, χωρίς να ακολουθεί κάποιο νόμο χαλάρωσης όπως οι παραπάνω δύο

παράμετροι αντοχής (συνοχή και τριβή), μιας και οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι σχετικά λείες λόγω διάβρωσης ή προηγούμενων εντόνων ολισθήσεων επ' αυτών.

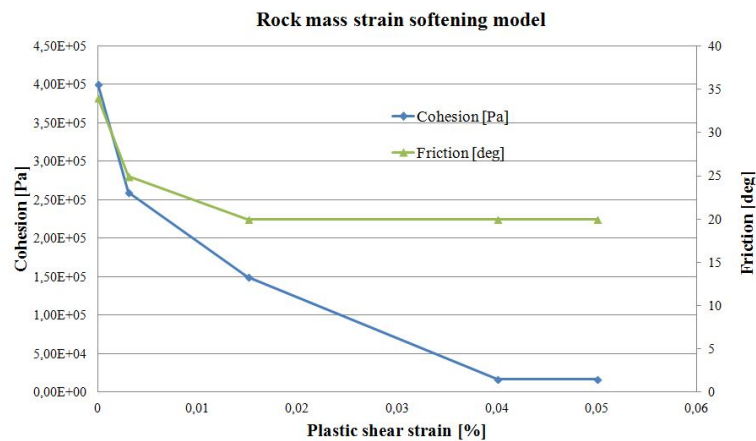
- Επίσης δεν αναμένεται επιπλέον φθορά (damage) μέχρι το σημείο μέγιστης φόρτισης καθώς το υλικό θεωρείται ήδη αρκετά υποβαθμισμένων μηχανικών ιδιοτήτων.

Οι τελικές τιμές των ιδιοτήτων της βραχώμαζας φαίνονται στον Πίν. 4.1.

Πίνακας 4.1: Μηχανικές παράμετροι του αρρήκτου και του διακλασμένου πετρώματος που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο υποστυλωμένης σήραγγας.

Μηχανικές Παράμετροι Πετρώματος [μονάδες]	Άρρηκτο [γνεύσιος]	Ρηγματωμένο [γνεύσιος]
Μέτρο Ελαστικότητας [GPa]	50	2.5
Λόγος Poisson	0.16	0.16
Μέγιστη Συνοχή [kPa]	16000	400
Μέγιστη Γωνία Εσ. Τριβής [deg]	34	34
Υπολειμματική Συνοχή [kPa]	-	20
Υπολειμματική Γωνία Εσ. Τριβής [deg]	20	20
Γωνία Διαστολικότητας [deg]	10	10

Όπως και στο «ανυποστύλωτο» μοντέλο έτσι και το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της αλληλεπίδρασης της υποστυλώσεως με το περιβάλλον πέτρωμα περιγράφεται από τις δύο φθίνουσες καμπύλες της συνοχής και της τριβής συναρτήσει της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης που φαίνονται στο Σχ.4.3.

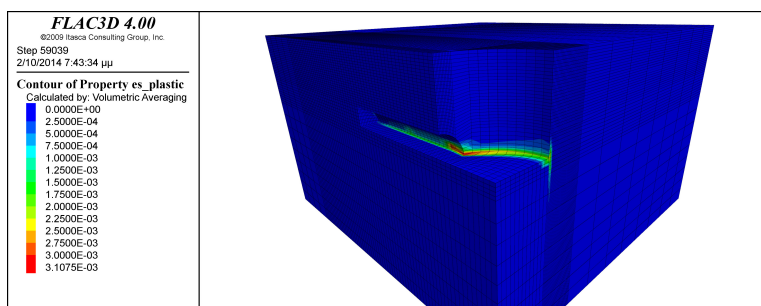


Σχήμα 4.3: Μοντέλα χαλάρωσης για την συνοχή (c) και την τριβή (φ).

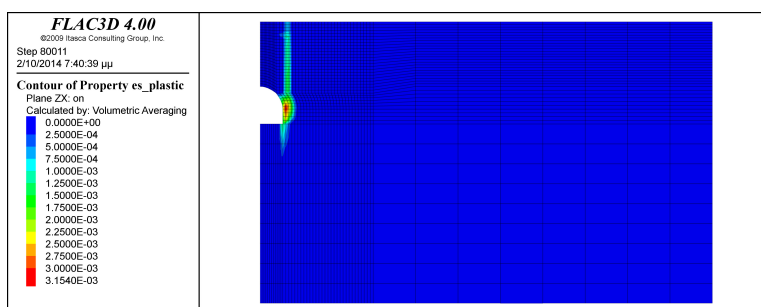
4.3 Τελικό μοντέλο και αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εξέλιξη του φαινομένου του εντοπισμού της πλαστικής διατμητικής παραμόρφωσης σε ζώνες γύρω από τις εκσκαφές κατά τα διάφορα στάδια διάνοιξης του σταθμού. Επιπλέον τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αποτελέσματα εργασιών που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.1.

Αρχικά μετά την όρυξη του φρέατος αλλά και του ανώτερου μετώπου της σήραγγας εμφανίζονται οι πρώτες ζώνες εντοπισμένης παραμόρφωσης στις παρειές του φρέατος αλλά και του σταθμού, όπως φαίνεται στο Σχ.4.4. Οι ζώνες διάτμησης εκκινούν από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης των τάσεων όπως είναι η περιοχή στην διασταύρωση φρέατος-σταθμού καθώς και τα δάπεδα του φρέατος και του σταθμού και κοντά στις γωνίες με τις κατακόρυφες παρειές των.

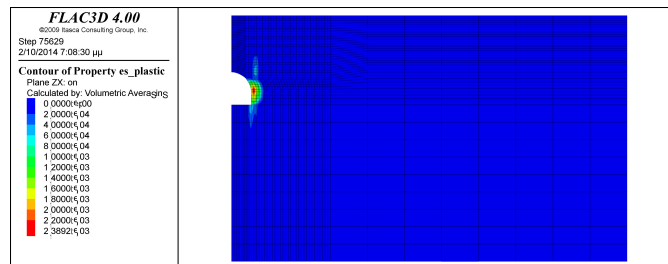


Σχήμα 4.4: Ζώνες εντοπισμού της διατμητικής παραμόρφωσης μετά την διάνοιξη ολόκληρου του άνω μετώπου 45m περίπου από το φρέαρ.

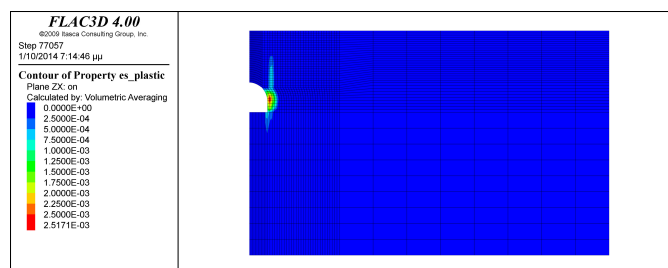


Σχήμα 4.5: Εμφάνιση της πρώτης ζώνης διάτμησης σε απόσταση 10m από το φρέαρ.

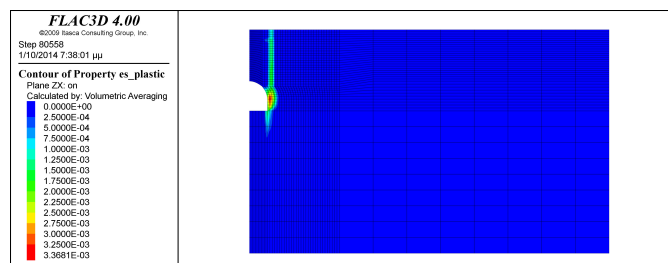
Μετά το πέρας της διάνοιξης του ανώτερου μετώπου αρχίζει η εκσκαφή της βαθμίδας με φορά προς το φρέαρ. Οι περιοχές όπου εμφανίζεται το φαινόμενο αρχίζουν να πληθαίνουν καθώς επιβαρύνονται για δεύτερη φορά σημεία ήδη «υποβαθμισμένα» όμως η πρώτη ζώνη διάτμησης που εμφανίζεται λίγο πριν, δέκα μέτρα περίπου, την προσέγγιση στο φρέαρ (Σχ. 4.5).



(α')



(β')

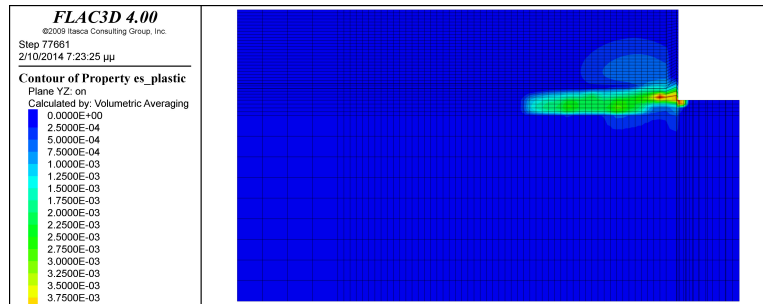


(γ')

Σχήμα 4.6: Εκδήλωση ζώνης διάτμησης μετά την εκσκαφή τμήματος της σήραγγας κοντά στο φρέαρ (10m πριν από αυτό).

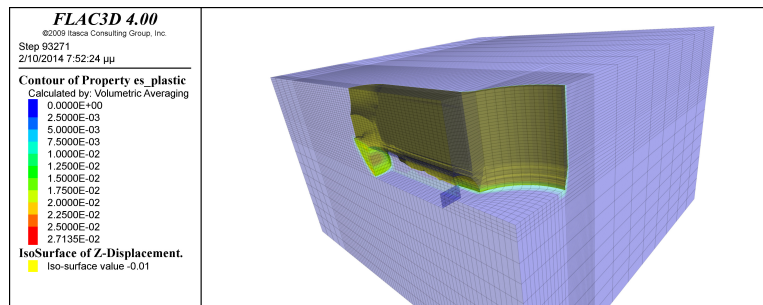
Στο σημείο αυτό, παρακολουθείται σε τομή κάθετη στον άξονα της σήραγγας ($Y=30$) η διάδοση της ζώνης διάτμησης (Σχ.4.6 α, β και γ) που ξεκινά χαμηλά, από τις παρειές αυτής και συνεχίζει προς την επιφάνεια του μοντέλου.

Αντίστοιχα, η ζώνη διάτμησης αρχίζει να εξαπλώνεται και στο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας επίπεδο (YZ), Σχ.4.7, επηρεάζοντας όλο και περισσότερες περιοχές γύρω από αυτή.



Σχήμα 4.7: Εκδήλωση ζώνης διάτμησης μετά την εξόρυξη τμήματος της σήραγγας κοντά στο φρέαρ (10m πριν από αυτό) στο παράλληλο με τον άξονα της σήραγγας επίπεδο.

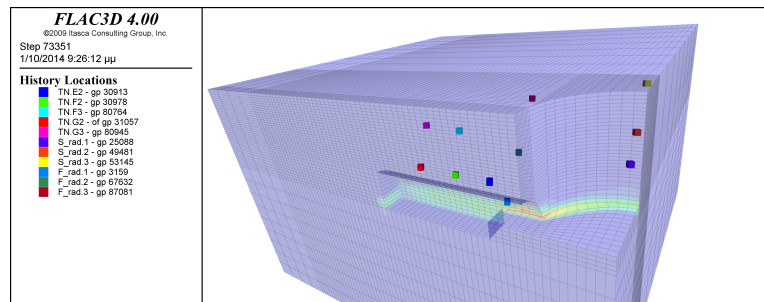
Οι περιοχές αυτές, που φαίνονται στις τομές (Σχ.4.6α, β, γ και Σχ.4.7) στο τριδιάστατο επίπεδο δημιουργούν ένα ογκοτεμάχιο – σφήνα (Σχ.4.8) που εκτείνεται από μερικά κυβικά μέτρα στην αρχή καλύπτοντας το σύνολο της περιοχής που κατάρρευσε στο τέλος



Σχήμα 4.8: Περιοχή συνένωσης ζωνών διάτμησης που έχει τη μορφή πρίσματος.

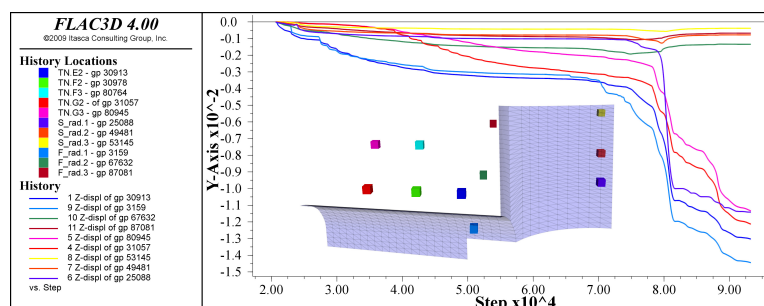
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αυτά που προέκυψαν από τις in situ οργανομετρήσεις που έγιναν, χρησιμοποιήθηκαν σημεία καταγραφής των κατακόρυφων μετατοπίσεων αντίστοιχα με εκείνα στα οποία είχαν τοποθετηθεί τα εκτασιόμετρα. Πέραν αυτών, έγιναν και καταγραφές σε σημεία (history points) τα οποία θεωρήθηκε ότι θα μπορούσαν να προβλέψουν την αρχή της εξάπλωσης των πρώτων ζωνών διάτμησης με σκοπό την έγκαιρη λήψη κατάλληλων για την αποτροπή της αστοχίας μέτρων. Τα σημεία σύγκρισης με τα πραγματικά δεδομένα, φαίνονται στο Σχ.4.9. Τα σημεία TN.E2, TN.F2, TN.F3, TN.G2 και TN.G3

αποτελούν σημεία σύγκρισης ενώ τα S_rad1 έως S_rad3 και F_rad1 έως F_rad3 αποτελούν δύο σειρές ακτινικών εκτασιομέτρων, μία στην περιοχή του φρέατος και μία στην περιοχή της σήραγγας κοντά όμως στο φρέαρ, ώστε να μπορέσουν να εντοπισθούν σημεία εκατέρωθεν της ζώνης διάτμησης.



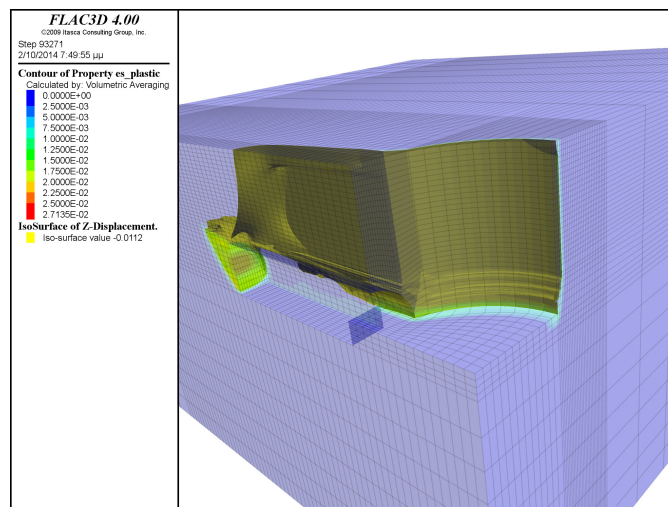
Σχήμα 4.9: Σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων.

Τα διαγράμματα που περιέχουν τις καταγραφές των κατακόρυφων μετατοπίσεων που φαίνονται στο Σχ.4.10, είναι σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πραγματικά δεδομένα, καθώς μετά το πέρας της εκσκαφής του ανώτερου μετώπου οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι ίδιες ή διαφέρουν ελάχιστα, 0.5 -1 mm από τις πραγματικές, ενώ μετά το τέλος της προσομοίωσης οι μέγιστες μετατοπίσεις στην περιοχή όπου ξεκίνησε η διάδοση της ζώνης διάτμησης φτάνουν τα 9mm κοντά στα 12mm που μετρήθηκαν στην πραγματικότητα.



Σχήμα 4.10: Κατακόρυφες μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στα σημεία παρακολούθησης πάνω από την στέψη του σταθμού μαζί με τα σημεία καταγραφής κατακόρυφων μετατοπίσεων και τα ακτινικά εκτασιόμετρα.

Επιπλέον, η στιγμή που λαμβάνει χώρα η αστοχία τοποθετείται χωρικά στα 10m πριν από το φρέαρ πολύ κοντά στην πραγματική που βρίσκεται στα 7m, ενώ και η σύγκριση με πραγματικές φωτογραφίες της περιοχής μετά την κατάρρευση δείχνει εμφανείς ομοιότητες, τόσο στην γύρω από το κολάρο του φρέατος περιοχή (Σχ.4.11α και β), όσο και στην απόσταση από το φρέαρ στην οποία εντοπίζεται προβλεφθείσα εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας ζώνη διάτμησης (εμφανίζεται σε απόσταση 45m από το φρέαρ Σχ.4.12α και β). Η αρχή της σήραγγας, η χιλιομετρική



(α')



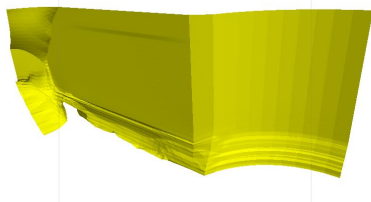
(β')

Σχήμα 4.11: α) Τελική μορφή της ζώνης διάτμησης γύρω από την περιοχή του επενδεδυμένου φρέατος και της σήραγγας την στιγμή της κατάρρευσης και β) αεροφωτογραφία της περιοχής αστοχίας.

θέση 7080 και η ασυνέχεια (FF) που φαίνεται στο βάθος, στη χιλιομετρική θέση 7120, οριοθετούν την 40m περιοχή κατάρρευσης του σταθμού (Barton, 2009)

Η συμφωνία των προβλεπόμενων μετατοπίσεων με τα δεδομένα των οργάνων, από μόνη της δεν καταδεικνύει την έναρξη της κατάρρευσης του συστήματος φρέατος – σήραγγας. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να ελεγχθεί η δομική απόκριση της υποστύλωσης για τις παρατηρηθείσες παραμορφώσεις.

Πιθανή αστοχία του συστήματος υποστήριξης μπορεί να βρεθεί από τα διαγράμματα μέγιστης φέρουσας ικανότητας M – N (structural capacity diagrams) της



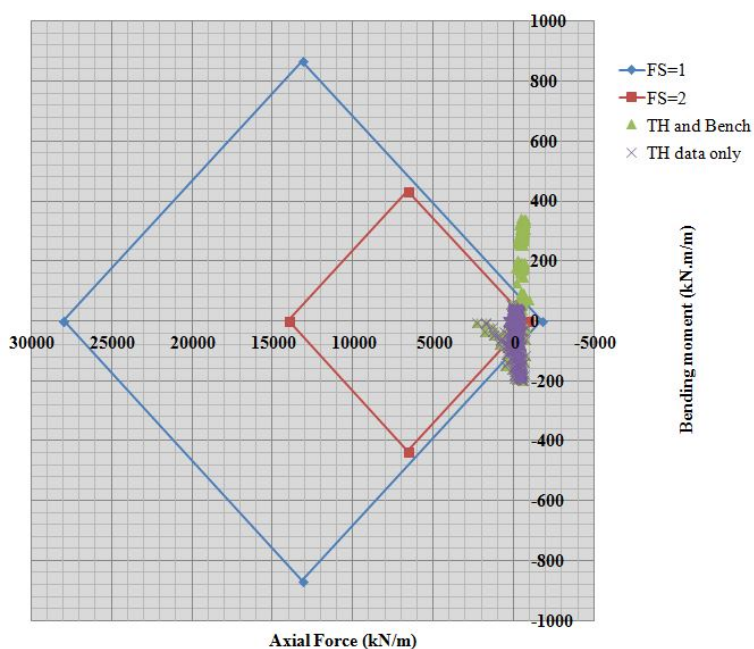
(α')



(β')

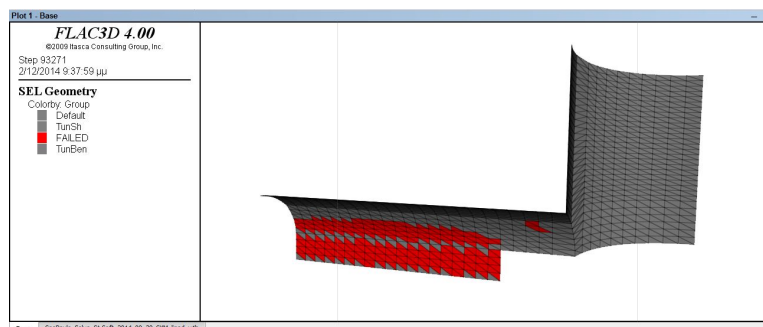
Σχήμα 4.12: α) Προβλεφθείσα σφήνα κατάρρευσης από το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών και β) πραγματική περιοχή αστοχίας απο αεροφωτογραφία στο σταθμό του Pinheiros στο Sao Paulo.

υποστύλωσης του άνω μετώπου. Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται τα φορτία και οι καμπτικές ροπές που μεταφέρονται από την βραχόμαζα στην υποστύλωση της σήραγγας. Τα σημεία που βρίσκονται εντός και αριστερά της μπλε και κόκκι-

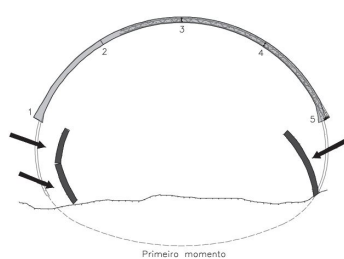


Σχήμα 4.13: Διάγραμμα M – N της υποστύλωσης του άνω μετώπου μετά την εκδήλωση της αστοχίας (FS=Factor of Safety, Συντελεστής Ασφαλείας).

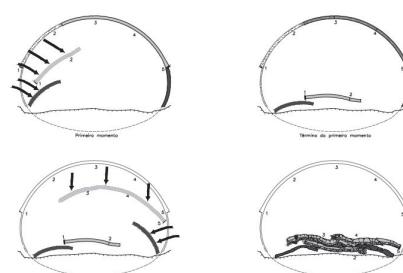
νης γραμμής αναπαριστούν τον μέγιστο συνδυασμό αξονικής δύναμης N και ροπής



(α')



(β')



(γ')

Σχήμα 4.14: Στοιχεία της υποστύλωσης του άνω μετώπου που έχουν αστοχήσει α) μετά το τέλος της επίλυσης β) και γ) στην πραγματικότητα.

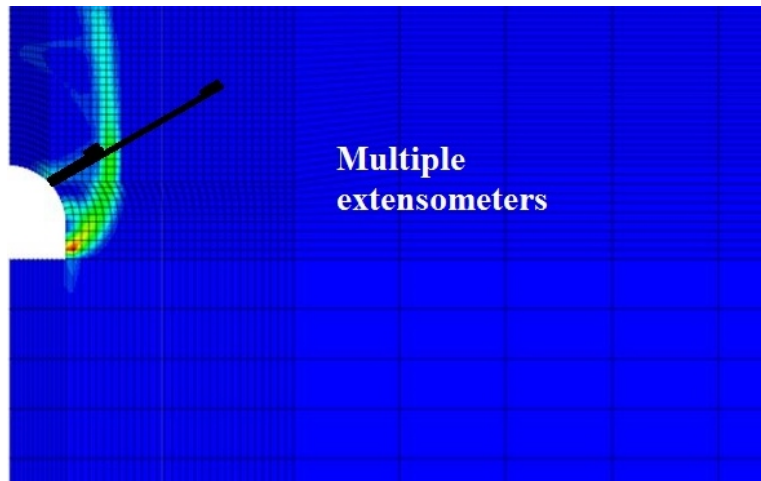
στρέψης M , τη στιγμή που αρχίζει η διάδοση των ζωνών διάτμησης για συντελεστές ασφαλείας $FS=1.0$ και 2.0 , αντίστοιχα. Τα διαγράμματα φέρουσας ικανότητας της προσωρινής υποστύλωσης που παρουσιάζονται στο Σχ.4.13 βασίζονται στους Hoek et al. (2008) και Carranza-Torres & Diederichs (2009).

Τα φορτία που φαίνονται στο Σχ.4.13 δείχνουν πιθανή αστοχία της υποστύλωσης στις παρειές του άνω μετώπου της σήραγγας. Στο Σχ.4.14(α') φαίνονται τα στοιχεία της υποστύλωσης που αστόχησαν από την στιγμή που ξεκίνησε η διάδοση των ζωνών διάτμησης μέχρι τότε που τελείωσε το φαινόμενο. Η θέση των σημείων αυτών έρχεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις που έγιναν μετά την κατάρρευση του σταθμού στην χιλιομετρική θέση 7087 (Σχ.4.14β και γ).

4.4 Προτεινόμενη διάταξη εκτασιομέτρων για την έγκαιρη πρόβλεψη της κατάρρευσης

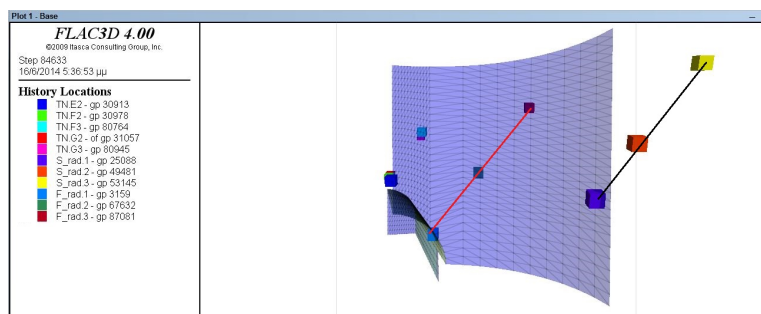
Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υπο - κεφάλαιο 4.3, για την έγκαιρη πρόβλεψη του μηχανισμού διάδοσης των ζωνών διάτμησης χρησιμοποιήθηκαν δύο σειρές ακτινικών εκτασιομέτρων, μία στην περιοχή του φρέατος και μία στην περιοχή της σήραγγας κοντά. Η αρχική ιδέα ήταν να τοποθετηθούν τα εκτασιόμετρα

της κάθε σειράς κατά διάταξη τέτοια, ώστε να βρίσκονται εκατέρωθεν της ζώνης και όσο το δυνατό πιο κοντά στο σημείο εκκίνησης αυτής (Σχ.4.15).



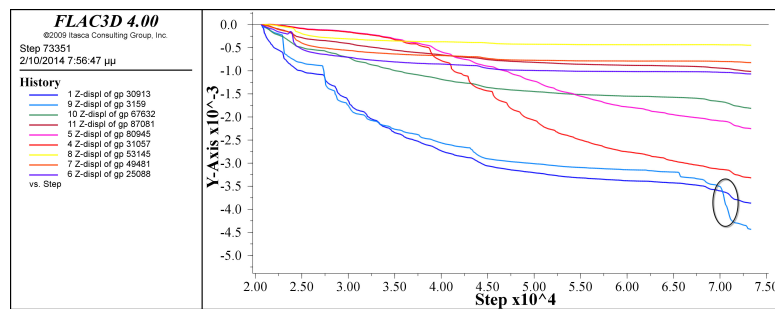
Σχήμα 4.15: Διάταξη ακτινικών εκτασιομέτρων πολλαπλών σημείων αγκύρωσης εκατέρωθεν της ζώνης διάτμησης.

Έτσι τοποθετήθηκαν οι δύο σειρές S_rad και F_rad (Σχ.4.16) η πρώτη μέσα στο φρέαρ και πιο συγκεκριμένα στο κέντρο αυτού, και η δεύτερη πολύ κοντά στην περιοχή που εκκίνησε η αστοχία.



Σχήμα 4.16: Διάταξη ακτινικών εκτασιομέτρων πολλαπλών σημείων αγκύρωσης στην περιοχή του συστήματος φρέαρ - σήραγγα.

Στο μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ, η πρώτη σειρά εκτασιομέτρων εντός του φρέατος, δεν μπόρεσε να δώσει αξιοποιήσιμα αποτελέσματα καθώς όταν η ζώνη διάτμησης άρχισε να αναπτύσσεται κοντά σε αυτή, το μεγαλύτερο μέρος του μοντέλου είχε ήδη αστοχήσει. Αντίθετα, όπως φαίνεται και από το Σχ.4.17 όπου απεικονίζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των εκτασιομέτρων αυτών λίγο πριν γίνει η εκσκαφή του τμήματος της βαθμίδας που ήταν υπεύθυνο για την εκκίνηση της ζώνης διάτμησης, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις αυξήθηκαν απότομα κατά 30% περίπου από 3.4mm που ήταν στο προηγούμενο βήμα σε 4.7mm.



Σχήμα 4.17: Απότομη μεταβολή (κατά 30%) των κατακόρυφων μετατοπίσεων κοντά στην περιοχή αστοχίας.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην ενότητα 1.1 αναφέρθηκε ως στόχος της διατριβής αυτής η διερεύνηση των συνθηκών αστάθειας και καθιζήσεων κατά την όρυξη αβαθούς συστήματος φρέατος – θαλάμου – σήραγγας στο Sao Paulo με τη μέθοδο NATM. Με βάση περυσυλλεχθέντα δεδομένα, δημοσιευμένες εκθέσεις και επιστημονικές δημοσιεύσεις η αστοχία αυτή αντιμετωπίστηκε στην παρούσα διατριβή ως πρόβλημα «Υποχωρούντος Θυροπετάσματος» των Fayol-Terzaghi αντί του μηχανισμού κατάρρευσης προϋπάρχουσας σφήνας στη στέψη του θαλάμου όπως προτάθηκε από σειρά δημοσιεύσεων του Barton ο οποίος είναι επίσης πιθανός.

Η υπερκείμενη βραχώμαζα θεωρήθηκε ως συνεχές υλικό. Η συνέχεια αυτή όμως χάνεται μετά από τον εντοπισμό των διατμητικών παραμορφώσεων σε ζώνες μικρού πάχους που εκκινούν από περιοχές του συνόρου της σήραγγας όπου παρατηρείται υψηλή συγκέντρωση των τάσεων. Ο εντοπισμός μεγάλων παραμορφώσεων σε ζώνες οφείλεται στην ανοικτή υποστύλωση του θαλάμου που επέτρεπε τις καθιζήσεις των υπερκειμένων καθόλη τη διάρκεια της διάνοιξης. Το υλικό θεωρήθηκε ότι υπακούει το κριτήριο αντοχής των Mohr-Coulomb και σε καταστατικό νόμο ταυτόχρονης χαλάρωσης της συνοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής όταν η διατμητική παραμόρφωση υπερβεί μια κρίσιμη τιμή.

Στα πλαίσια της παρούσης Διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν εκτενείς παραμετρικές αναλύσεις πεπερασμένων διαφορών σε τρεις διαστάσεις, όπου και έγινε προσομοίωση διάνοιξης συστήματος φρέατος - σήραγγας, χωρίς και με υποστύλωση.

Από τις προσομοιώσεις αυτές προέκυψε ότι η κατάρρευση της οροφής μπορεί να θεωρηθεί ότι εκδηλώθηκε λόγω της τομής επιφανειών διατμητικών ζωνών (shear bands) με σύνορα των υπόγειων έργων. Οι επιφάνειες αυτές πριν την εκδήλωση της αστοχίας σχηματίζουν όγκους ποικίλων γεωμετριών που μπορούν να μετακινηθούν λόγω της βαρύτητας και της μικρής πλευρικής υποστήριξης από τα παρακείμενα εδάφη, και εν τέλει να καταρρεύσουν.

Μετά από την μελέτη του μηχανισμού δημιουργίας και διάδοσης των διατμητικών ζωνών στην περίπτωση κατάρρευσης του συστήματος σήραγγας - φρέατος στον σταθμό Pinheiros του Sao Paulo προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση είναι απαραίτητη για την σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υπόγειων εκσκαφών και του μηχανισμού αστοχίας, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις περίπλοκων γεωμετριών και κατασκευαστικών βημάτων όπως το σύστημα σήραγγας - φρέατος στον σταθμό Pinheiros.
- Κατά την τριδιάστατη αριθμητική προσομοίωση είναι απαραίτητη η συνεχής αναβάθμιση των παραμέτρων του μοντέλου με δεδομένα που συλλέγονται κατά την διάνοιξη σιράγγων με την Νέα Αυστριακή Μέθοδο (NATM) από οργανομετρήσεις και επιτόπου γεωλογικές αποτυπώσεις.
- Η μέθοδος NATM με «ανοικτό μέτωπο» ή ανοικτή υποστύλωση ενέχει σημαντικά ρίσκα που σχετίζονται με την ευστάθεια και την ασφάλεια. Λ.χ. μια κατάρρευση είναι πολύ ακριβότερη από έναν κατάλληλο σχεδιασμό και προσεκτική κατασκευή με απαραίτητη παρακολούθηση από όργανα που είναι τοποθετημένα στις σωστές θέσεις και παρακολουθούνται στον σωστό χρόνο.
- Στην συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάται ήταν απαραίτητη η ταυτόχρονη απομείωση των μηχανικών παραμέτρων c και ϕ του μοντέλου ώστε να γίνει δυνατή η αποτύπωση του μηχανισμού διάδοσης των ζωνών διάτμησης σε μια ιδιαίτερα ρηγματωμένη και ανομοιογενή βραχώμαζα.
- Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που έγιναν καταρχήν για την περίπτωση του ανυποστυλώτου μοντέλου βρέθηκαν σε αρκετά καλή συμφωνία με τα πραγματικά δεδομένα που παρουσιάζονται σε σχετικές εργασίες Κεφ.3.2. Κατά την σύγκριση με φωτογραφίες και διαγράμματα υπάρχουν εμφανείς ομοιότητες, τόσο στην περιοχή κατάρρευσης στο κολάρο του φρέατος όσο στην πρόβλεψη της εγκάρσιας στον άξονα της σήραγγας ζώνη διάτμησης. Η ζώνη αυτή εμφανίζεται σε απόσταση 45m από το φρέαρ, απόσταση στην οποία είχε εντοπισθεί και το ρήγμα του Σχ. 3.28.
- Στη συνέχεια κατά τις προσομοιώσεις του υποστυλωμένου μοντέλου η έναρξη της πρώτης ζώνης διάτμησης αρχίζει κατά την εξόρυξη της βαθμίδως δέκα περίπου μέτρα πριν την επιστροφή της εκσκαφής στο φρέαρ. Μόλις η ζώνη πλησιάζει αρκετά κοντά στην επιφάνεια τότε αρχίζει να διαδίδεται σε όλο το μήκος της σήραγγας τόσο με φορά προς το φρέαρ όσο και αντίθετα από αυτό.
- Οι συγκρίσεις των μετρήσεων των σταθμών παρακολούθησης (history points) του υποστυλωμένου μοντέλου με τα δεδομένα από τις in situ οργανομετρήσεις που έγιναν, δείχνουν πολλές ομοιότητες, καθώς μετά το τέλος της εκσκαφής του άνω μετώπου (top heading) οι μέγιστες κατακόρυφες μετατοπίσεις διαφέρουν ελάχιστα μισό με ένα χιλιοστό ενώ μετά το τέλος της προσομοίωσης στην περιοχή όπου ξεκίνησε η διάδοση της ζώνης διάτμησης πλησιάζουν τα 9mm τιμή που βρίσκεται πολύ κοντά στα 12mm που μετρήθηκαν.

- Η περιοχή κατάρρευσης που οριοθετείται από τα σημεία τομής της ζώνης διάτμησης με τις ελεύθερες επιφάνειες του μοντέλου προσεγγίζει την πραγματική τόσο από πλευράς όγκου του υλικού που αστόχησε όσο και από γεωμετρικής πλευράς.
- Ο έλεγχος που έγινε για πιθανή αστοχία του συστήματος υποστήριξης μέσω διαγραμμάτων μέγιστης φέρουσας ικανότητας $M - N$ (structural capacity diagrams) δείχνουν ότι η υποστύλωση αστόχησε πρώτα στη βαθμίδα και στην συνέχεια κατέρρευσε αυτή του άνω μετώπου, ακολουθώντας την αλληλουχία αστοχίας της υποστήριξης που διαπιστώθηκε στην πραγματικότητα μετά από την επανεκσκαφή της σήραγγας όπως φαίνεται στο Σχ. 4.14.
- Η χρήση διάταξης εκτασιομέτρων ακτινικά τοποθετημένων σε σημεία εκατέρωθεν την περιοχής όπου αναμένεται η ανάπτυξη της ζώνης διάτμησης μπορεί να προειδοποιήσει εγκαίρως για την κατάρρευση της σήραγγας. Λίγο πριν την εκσκαφή του τελευταίου πριν την κατάρρευση τμήματος της βαθμίδος, οι κατακόρυφες μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν αυξήθηκαν κατά 30%.

Με βάση τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής και τις διαθέσιμες έρευνες από τη διεθνή βιβλιογραφία στο χώρο της διάνοιξης υπογείων συστημάτων φρέατος - σήραγγας που απαντώνται κατά την κατασκευή υπόγειων σταθμών μετρό, κρίνεται ως χρήσιμη και προτείνεται η συνέχιση της έρευνας στα ακόλουθα πεδία:

- Ο μηχανισμός που παρουσιάζεται στο υποκεφάλαιο 3.1 μπορεί να επεκταθεί σε τρεις διαστάσεις ώστε πέρα από το κρίσιμο βάθος ανυποστήρικτης αβαθούς σήραγγας να μπορεί να υπολογισθεί και το κρίσιμο μήκος προχώρησης αυτής.
- Πιο αναλυτική εισαγωγή της γεωλογίας της περιοχής στο τριδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Το μοντέλο αποτελείται από τους τέσσερις διαφορετικούς σχηματισμούς που περιγράφονται στο υποκεφάλαιο 2.3 αλλά λόγω της μεγάλης χωρικής ετερογένειας των γενεσίων η κατασκευή ενός ντετερμινιστικού γεωλογικού μοντέλου θα ήταν δύσκολο έργο.
- Επιλογή διαφορετικής ακολουθίας διάνοιξης του θαλάμου και προσομοίωση της. Μετά την εκσκαφή των πρώτων μέτρων του κορυφαίου μετώπου ακολουθεί η εκσκαφή της βαθμίδας, κατά την ίδια φορά και όχι κατά την αντίθετη που ακολουθήθηκε, «κλείνοντας» τον δακτύλιο της υποστύλωσης αμέσως μόλις αυτό είναι εφικτό.
- Εισαγωγή της ετερογένειας της περιοχής μέσω των δεδομένων γεωτρήσεων με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων (ημι - βαριόγραμμα και kriging) για την μεγαλύτερη ακριβέστερη μοντελοποίηση της γεωλογίας της περιοχής μελέτης (Stavropoulou et al., 2007).

- Επίσης, μελέτη της επίδρασης της ακαμψίας του φρέατος - στην περίπτωση που εξετάστηκε η κατασκευή του φρέατος ήταν σε ενδιαμέση φάση γιατί δεν είχε υποστυλωθεί ο πυθμένας του φρέατος.

Βιβλιογραφία

- Akutagawa, S., Lee, J., & Kitani, T. (2008). Numerical modeling of nonlinear deformation behavior of shallow tunnel by strain-softening analysis. *Journal-Society of Materials Science Japan*, 57(2), 191–198.
- Assis, A. (2011). Lessons learnt from accidents in urban tunnels. *EPFL Master on Advanced Tunnelling- ppt*, 1–63.
- Bandis, S. (1993). Engineering properties and characterization of rock discontinuities. *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice & Projects*, Pergamon Press, Oxford, 18–155.
- Barros, J., Iyomasa, W., & Azevedo, A. (2008). Lessons from brazil: pinheiros examined. *T & T international*, (NOV), 16–21.
- Barton, N. (2007). Key causes of the accident at pinheiros station, line 4, sao paulo. *NB&A Consulting Report to CVA*.
- Barton, N. (2009). Differential weathering and adverse discontinuities were the apparent causes of a tragic metro accident in brazil. *Proceedings of the International Conference on Rock Joints and Jointed Rock Masses*.
- Barton, N. (2010). Main causes of the pinheiros cavern collapse. *ITA - AITES World Tunnel Congress (WTC)*.
- Barton, N. & Pandey, S. (2011). Numerical modelling of two stoping methods in two indian mines using degradation of c and mobilization of φ based on q -parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(7), 1095–1112.
- Bieniawski, Z. T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. *Proc. of the Symp. in Exploration for Rock Engineering*, 97–106.
- Bieniawski, Z. T. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. *John Wiley & Sons*, 251.
- Βαρδουλάκης, Ι. (2003). Στοιχεία Γεωμηχανικής. *Σημειώσεις για το μάθημα «Γεωτεχνική Μηχανική»*, 191–198.

- Carranza-Torres, C. & Diederichs, M. (2009). Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. for example, liners consisting of shotcrete and steel sets. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 506 – 532.
- Exadaktylos, G. & Stavropoulou, M. (2008). A specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(7), 1102–1125.
- Fayol, M. (1885). Note sur les mouvements de terrain provoquée par l’exploitation des mines.
- Gercek, H. (2007). Poisson’s ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(1), 1–13.
- Gudehus, G. & Nübel, K. (2004). Evolution of shear bands in sand. *Geotechnique*, 54(3), 187–201.
- Hansmire, W. H. & Cording, E. J. (1985). Soil tunnel test section: case history summary. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(11), 1301–1320.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M., & Corkum, B. (2008). The 2008 kersten lecture integration of geotechnical and structural design in tunneling. *56th Annual Geotechnical Engineering Conference*, 1–53.
- Indraratna, B., Oliveira, D. A., Brown, E., & De Assis, A. P. (2010). Effect of soil–infilled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(5), 739–751.
- Kolymbas, D. (2005). Tunnelling and tunnel mechanics a rational approach to tunnelling. *Springer*.
- Kuwajima, F. M. & Rocha, H. C. (2005). 3d numerical simulation of the future pinheiros station–line 4-yellow of the são paulo subway. *Proceedings of the International World Tunnel Congress and the 31st ITA General Assembly*, 1195–1202.
- Ladanyi, B. & Hoyaoux, B. (1969). A study of the trap-door problem in a granular mass. *Canadian Geotechnical Journal*, 6(1), 1–14.
- Lunardi, P. & Bindi, R. (2004). The evolution of reinforcement of the advance core using fibre-glass elements. *Gluckauf Forschungshefte*, 91–100.
- Meguid, M., Saada, O., Nunes, M., & Mattar, J. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: a review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(2), 185–198.

- Mühlhaus, H. & Vardoulakis, I. (1987). The thickness of shear bands in granular materials. *Geotechnique*, 37(3), 271–283.
- Müller, L. & Fecker, E. (1978). Grundgedanken und grundsätze der «neuen österreichischen tunnelbauweise». *Felsmechanik Kolloquium Karlsruhe*.
- Oliveira, D. (2008). Back-analysis based on the pinheiros station collapse. *Australasian Tunnelling Society*, 1–16.
- Oliver, A. (1994). Heathrow trial runs under question. *New Civil Engineer*, 4–5.
- Panet, M. (1995). Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. *Presses ENPC*.
- Papamichos, E., Vardoulakis, I., & Heil, L. (2001). Overburden modeling above a compacting reservoir using a trap door apparatus. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(1), 69–74.
- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. *Proc. 7th Int. Conf. on SMFE*, 225–290.
- Peele, P. (1941). Mining engineers handbook. *John Wiley & Sons, Inc.*
- Reynolds, O. (1885). Lvii. on the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. with experimental illustrations. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 20(127), 469–481.
- Roscoe, K. H. (1970). The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique*, 20(2), 129–170.
- Rudnicki, J. W. & Rice, J. (1975). Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 23(6), 371–394.
- Stavropoulou, M., Exadaktylos, G., & Saratsis, G. (2007). A combined three-dimensional geological-geostatistical-numerical model of underground excavations in rock. *Rock mechanics and rock engineering*, 40(3), 213–243.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. *J. Wiley*.
- Terzaghi, K. & Peck, R. (1948). Soil mechanics in engineering practice. *Soil mechanics in engineering practice*.
- Unlu, T. & Gercek, H. (2003). Effect of poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel. *Tunnelling and underground space technology*, 18(5), 547–553.

- Vairaktaris, E. & Stavropoulou, M. (2013). Modeling of the three-dimensional subsidence diffusion–convection problem above a trapdoor. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(6), 551–576.
- Vardoulakis, I., Graf, B., & Gudehus, G. (1981). Trap-door problem with dry sand: A statical approach based upon model test kinematics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 5(1), 57–78.
- Vardoulakis, I., Graf, B., & Hettler, A. (1985). Shear-band formation in a fine-grained sand. *International conference on numerical methods in geomechanics*, 517–521.
- Vardoulakis, I. & Sulem, J. (1995). *Bifurcation analysis in geomechanics*. CRC Press.
- Wong, R. & Kaiser, P. (1991). Performance assessment of tunnels in cohesionless soils. *Journal of geotechnical engineering*, 117(12), 1880–1901.
- Zienkiewicz, O. C. & Taylor, R. L. (2000). *The finite element method: Solid mechanics*, volume 2. Butterworth-Heinemann.