



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

επίβλεψη: ΚΑΒΒΑΔΑΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***Επιρροή του ερπυσμού του γεωυλικού
στις συγκλίσεις κατά τη διάνοιξη
σηράγγων.***

εκπόνηση: ΛΕΚΚΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ



ΑΘΗΝΑ 2008

Η φωτογραφία στο εξώφυλλο προέρχεται από επίσκεψη της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών στις
υπό κατασκευή σήραγγες του Αγ. Κωνσταντίνου (παράκαμψη Μαλιακού), Μάιος 2006.

Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας χρειάστηκε μία προσωπική ενασχόληση τους τελευταίους 5 μήνες. Πέραν αυτού, οφείλω να αναγνωρίσω τη συμβολή των παρακάτω προσώπων και την έμπρακτη βοήθειά τους, χωρίς την οποία το αποτέλεσμα δε θα ήταν το ίδιο. Και συγκεκριμένα:

Τον καθηγητή μου κ. Καββαδά για την εμπιστοσύνη που έδειξε στις δυνατότητές μου, την ελευθερία που μου παρείχε στην επιλογή θέματος και την καθοδήγησή του κατά την εκπόνηση της εργασίας. Η διδασκαλία του στα θέματα της Εδαφομηχανικής και των Θεμελιώσεων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στο να επιλέξω την κατεύθυνση της Γεωτεχνικής ως ειδίκευση στο πτυχίο μου.

Τον υποψήφιο διδάκτωρα Πέτρο Φορτσάκη, η συνεργασία με τον οποίο υπήρξε διαδικασία άκρως εκπαιδευτική (ελπίζω κι από μέρους του, σε ότι αφορά τα «κομπιουτερικά» θέματα) και ίσως πολυτιμότερη από πολλά εξαμηνιαία μαθήματα της σχολής. Κατά τις συναντήσεις μας (2 ή και περισσότερες φορές την εβδομάδα) δεν αρκείτο απλώς στη λύση των διάφορων προβλημάτων που ενέκυπταν σχετικά με την εργασία, αλλά φρόντιζε να γίνουν κατανοητές και οι πιο εξειδικευμένες γνώσεις που δεν είχαμε διδαχθεί σε προπτυχιακό επίπεδο.

Τους καθηγητές μου, το έμψυχο δυναμικό που αποτελεί το σημαντικότερο κεφάλαιο της σχολής και έχει προσδώσει στο Πολυτεχνείο ευρεία αναγνώριση παρά τις όποιες ελλείψεις που έχει σε μέσα και εγκαταστάσεις. Τους ευχαριστώ, γιατί στην πορεία αυτών των 5 ετών, ο καθένας στο αντικείμενό του, μου παρείχαν τα εφόδια για την επιστημονική μου ολοκλήρωση.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ στην οικογένειά μου, η οποία παρότι μικρή αριθμητικά, με έχει περιβάλλει με τόση αγάπη και υποστήριξη ώστε να την αισθάνομαι στο πλευρό μου σε κάθε βήμα της ζωής μου μέχρι σήμερα.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη συμβολή του ερπυσμού στις συγκλίσεις που σημειώνονται κατά την εκσκαφή μιας σήραγγας. Με δεδομένη την πρόταση που έχει διατυπωθεί από πολλούς ερευνητές τις τελευταίες δεκαετίες ότι οι συγκλίσεις αυτές μπορούν να διαχωριστούν σε μία χωρική (αντιπροσωπεύει την προώθηση του μετώπου) και μία χρονική συνιστώσα (αντιπροσωπεύει τη ρεολογική συμπεριφορά), επιχειρείται η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό των ερπυστικών παραμορφώσεων. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας επελέγη η περίπτωση της σήραγγας του Ανθοχωρίου, όπου από τα τοπογραφικά δεδομένα των συγκλίσεων είναι φανερό η εκδήλωση ερπυστικών φαινομένων ήδη από το στάδιο της προσωρινής υποστήριξης.

Αρχικά προσαρμόζεται στα τοπογραφικά δεδομένα 37 διατομών ελέγχου μία σχέση της μορφής $d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right]$ που κατά Sulem et al, 1985, μπορεί να περιγράψει την εξέλιξη των συγκλίσεων μιας συγκεκριμένης διατομής της σήραγγας. Για κάθε διατομή προέκυψαν οι παράμετροι dx^* , X , dt^* , T , καθώς και ο λόγος $m = \frac{dt^*}{dx^*}$ των ερπυστικών προς τις χωρικές παραμορφώσεις.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας απομονώθηκε μία διατομή, για την οποία έγινε όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων τόσο της γεωμετρίας εκσκαφής και του τρόπου υποστήριξης όσο και των ιδιοτήτων της περιβάλλουσας βραχώμαζας και της διαδικασίας εκσκαφής ώστε να υπολογισθούν για τις διάφορες θέσεις του μετώπου εκσκαφής, άρα για τις διάφορες αποτονώσεις της βραχώμαζας (22 στάδια ανάλυσης), οι αντίστοιχες παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές οφείλονται αμιγώς στον χωρικό παράγοντα (δεν έχει εισαχθεί πουθενά ο ερπυσμός στο προσομοίωμα), συνεπώς με αφαίρεση αυτών από τις συνολικές παραμορφώσεις που λαμβάνονται από τα τοπογραφικά στοιχεία προκύπτουν οι παραμορφώσεις λόγω των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν συνοψίζονται σε δύο σημεία: πρώτον, αποδεικνύεται ότι ένας γενικευμένος νόμος όπως αυτός που αναφέρθηκε προηγουμένως δεν είναι ικανός να περιγράψει την εξέλιξη των συγκλίσεων και μάλιστα ο παράγοντας που

αναφέρεται στην χωρική σύγκλιση $d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right]$ είναι που υστερεί. Αναφορικά

με τη μεμονωμένη διατομή που εξετάστηκε, προκύπτει ότι ενώ σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης, η εξέλιξή τους ως προς το χρόνο δε φαίνεται να σταθεροποιείται, συνεπώς αναμένεται περαιτέρω εκδήλωση αυτών με τη μορφή πίεσης επί της τελικής επένδυσης.

Abstract

The present thesis deals with the contribution of creep to the observed wall displacements during the excavation of a tunnel. Given the assumption that has been discussed by many recent writers that those observed deformations can be expressed as the sum of a time-independent (representing the face advance effect) and a time-dependent (representing the rheological behaviour) component, we attempt to form a methodology for the estimation of the deformations due to creep. The Anthochori tunnel was selected for the application of the aforementioned methodology because the geodetic data proved it exhibited intense time-dependent behaviour since the very early stages of the excavation. The computational part of the project is further divided into two sections.

Firstly, a general convergence law is defined by curve-fitting the function $d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right]$ to the geodetic data. Sulem et al, 1985 proposed that such a function can be used to describe the convergence of a certain control section. Hence, the values of the parameters dx^* , X , dt^* , T as well as the ratio $m = \frac{dt^*}{dx^*}$ were computed for each section (37 total).

Secondly, data concerning the properties of the surrounding rockmass, the geometry and support of the excavation, and the excavation process were collected in order to set up an accurate finite-element model for a specific control section. The analysis was run for 22 stages, representing the gradual confinement of the rockmass and the corresponding wall displacements were recorded for each stage. Those deformations represent solely the time-independent component as the rheological behaviour of the rockmass was not considered in this model. Therefore, by subtracting them from the total (measured) displacements we get the creep-induced deformations.

Conclusions were drawn regarding the effect of creep deformations upon total convergence for the Anthochori tunnel. It seems that a generalized convergence law like the one mentioned above can't adequately describe the tunnel's behaviour, in fact the finite element analysis has shown that it is the time-independent section of this function

$d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right]$ that presents weaknesses. Regarding the one section that was analyzed in the second part of this thesis, although creep deformations have large values, the curve representing their propagation in time doesn't seem to stabilise, hence we expect large values of creep pressure on the tunnel's fixed lining.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
2. Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΠΗ	16
2.1 Παραδοχές.....	16
2.2 Επίλυση του μοντέλου	17
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	21
3.1 Διαστασιολόγηση της προσωρινής υποστήριξης.....	21
3.2 Μέθοδος διάνοιξης NATM	22
3.3 Μέτρα και τεχνολογίες υποστήριξης της βραχόμαζας	23
3.3.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.....	23
3.3.2 Αγκύρια και ηλώσεις βράχου.....	25
3.3.3 Μεικτή λειτουργία εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων	27
3.3.4 Μεταλλικά πλαίσια	29
3.3.5 Δοκοί προπορείας και αγκύρια προΐσχυροποίησης μετώπου.....	30
4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ	32
4.1 Ειδικό βάρος – λόγος Poisson	32
4.2 Η έννοια της ισотροπίας	32
4.3 Συστήματα κατατάξεως / βαθμονομήσεως της βραχόμαζας.....	33
4.4 Κριτήρια αστοχίας της βραχόμαζας.....	35
4.4.1 Mohr – Coulomb.....	35
4.4.2 Hoek – Brown.....	36
4.4.3 Drucker – Prager.....	39
4.5 Ο ερπυσμός στις βραχόμαζες	41
4.5.1 Αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης του ερπυσμού	42
4.5.2 Πειραματικοί νόμοι.....	50
5. ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ	52
5.1 Προσομοίωση με βάση μετρήσεις συγκλίσεων (αριθμητικές λύσεις)	52
5.1.1 Η απόσταση επιρροής του μετώπου.....	55
5.2 Προσομοίωση με αναλυτικά μοντέλα (κλειστές λύσεις).....	55

5.2.1	Ακτινικές μετατοπίσεις σε ανυποστήρικτο τοίχωμα	57
6.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ	62
6.1	Η σήραγγα του Ανθοχωρίου.....	62
6.2	Κατάστρωση του προσομοιώματος.....	69
6.2.1	Εξορθολογισμός των δεδομένων	76
6.2.2	Διερεύνηση των παραμέτρων.....	79
6.3	Αποτελέσματα της ανάλυσης.....	84
7.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ	91
7.1	Παρουσίαση της μεθοδολογίας.....	91
7.1.1	Ποιότητα της βραχόμαζας – επί τόπου συνθήκες.....	91
7.1.2	Δημιουργία καμπυλών σύγκλισης – αποτόνωσης και Cern.....	93
7.1.3	Σύνδεση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα της επίλυσης.....	98
7.2	Κατάστρωση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων 100	
7.2.1	Ποιότητα της βραχόμαζας – επί τόπου συνθήκες.....	100
7.2.2	Ένταξη της γεωμετρίας του προβλήματος.....	104
7.2.3	Ένταξη των ιδιοτήτων των υλικών.....	105
7.2.4	Ένταξη της διαδικασίας εκσκαφής με τη μέθοδο της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχόμαζας.....	110
7.3	Αποτελέσματα της ανάλυσης.....	119
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	134
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	138
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	140

Ευρετήριο εικόνων & διαγραμμάτων

Εικόνα 3.1 – Εκσκαφή σε περισσότερες από μία φάσεις.	23
Εικόνα 3.2 – Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέσο προσωρινής υποστήριξης.....	24
Εικόνα 3.3 – Διάφοροι τύποι αγκυρίων βράχου.....	26
Εικόνα 3.4 – Διατομή δικτυωτού πλαισίου τριών ράβδων.	29
Εικόνα 3.5 – Λεπτομέρεια της διατομής. Διακρίνεται το elephant foot και οι μικροπάσσαλοι.	30
Εικόνα 3.6 – Εφαρμογή forepoling.....	31
Εικόνα 4.1 – Πίνακας βαθμονόμησης GSI.....	33
Εικόνα 4.2 – Τυπικές μορφές εμπειρικών ερπυστικών νόμων.	50
Εικόνα 5.1 – Διαρροή της βραχώμαζας γύρω από τη σήραγγα.	59
Εικόνα 6.1 – Εκσκαφή με συμβατικά μέσα.	62
Εικόνα 6.2 – Τυπική διατομή της ενισχυμένης προσωρινής υποστήριξης.	64
Εικόνα 6.3 – Διατομή πεταλοειδούς μορφής και ακίδες ελέγχου.	69
Εικόνα 6.4 – Τυποποίηση της αριθμητικής ανάλυσης σε φύλλο Excel.....	76
Εικόνα 7.1 – Η τυπική διατομή N3. Διακρίνονται η γεωμετρία και τα μέτρα υποστήριξης.	92
Εικόνα 7.2 – Μέτρα υποστήριξης του μετώπου, αγκύρια fiberglass και δοκοί forepoling	93
Εικόνα 7.3 – Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας κατά Marinou, Fortsakis, Proutzopoulos (2006).....	102
Εικόνα 7.4 – Η τυπική διατομή E5, περιμετρική υποστήριξη.....	102
Εικόνα 7.5 – Η τυπική διατομή E5, υποστήριξη μετώπου.	103
Εικόνα 7.6 – Η τυπική διατομή N3, υποστήριξη άνω ημιδιατομής (top heading).	103
Εικόνα 7.7 – Η τυπική διατομή N3, υποστήριξη κάτω ημιδιατομής (bench).	104
Εικόνα 7.8 – Μόνο η άνω ημιδιατομή της N3 υποστηρίχθηκε στο μέτωπο.	104
Εικόνα 7.9 – Μοντελοποίηση της γεωμετρίας του προβλήματος.....	105
Εικόνα 7.10 – Λεπτομέρεια μικροπασσάλου, αρχική και ισοδύναμη διατομή.	108
Εικόνα 7.11 – Σχηματική απεικόνιση των αρχικών και ισοδύναμων διατομών υποστήριξης.	110
Εικόνα 7.12 – 1 ^ο στάδιο, γεωστατική κατάσταση.....	117
Εικόνα 7.13 – 2 ^ο στάδιο, αποτόνωση άνω ημιδιατομής δεξιού κλάδου.....	117
Εικόνα 7.14 – 3 ^ο στάδιο, ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης και περαιτέρω αποτόνωση.	118
Εικόνα 7.15 – 6 ^ο στάδιο, εκσκαφή.	118
Εικόνα 7.16 – 7 ^ο στάδιο, ξεκινά η αποτόνωση της άνω ημιδιατομής του αριστερού κλάδου.	118
Εικόνα 7.17 – 17 ^ο στάδιο, αποτόνωση της κάτω ημιδιατομής του δεξιού κλάδου.....	118
Εικόνα 7.18 – Τελικό στάδιο, η κάτω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου έχει αποτονωθεί, αλλά δεν έχει προλάβει να εκσκαφθεί.....	118
Εικόνα 7.19 – Η έκταση της πλαστικής ζώνης στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης.	119
Εικόνα 7.20 – Κατανομή της εκτροπικής τάσης στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης.	120
Εικόνα 7.21 – Τοποθέτηση των ακίδων ελέγχου στη διατομή.	122

Διάγραμμα 2.1 – Αποτόνωση των πιέσεων με την προχώρηση του μετώπου εκσκαφής.....	17
Διάγραμμα 2.2 – Εξέλιξη των τάσεων συναρτήσει της απόστασης.....	19
Διάγραμμα 2.3 – Η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης.	20
Διάγραμμα 3.1 – Καμπύλες Panet για ανυποστήρικτη σήραγγα.....	21
Διάγραμμα 3.2 – Η συμβολή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην ανάληψη φορτίων.	25
Διάγραμμα 3.3 – Η συμβολή των αγκυρίων βράχου στην ενίσχυση της βραχώμαζας.	27
Διάγραμμα 3.4 – Συνδυασμός αγκυρίων βράχου και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.	27
Διάγραμμα 3.5 – Βέλτιστος χρόνος τοποθέτησης των μέσων υποστήριξης.	28
Διάγραμμα 4.1 – Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb.	35
Διάγραμμα 4.2 – Η περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown όπως εξάγεται από το RocLab.....	37
Διάγραμμα 4.3 – Α' τρόπος σύνδεσης των δύο κριτηρίων.	38
Διάγραμμα 4.4 – Β' τρόπος σύνδεσης των δύο κριτηρίων.	39
Διάγραμμα 4.5 – Περιβάλλουσες Drucker-Prager.	40
Διάγραμμα 4.6 – Τυπική καμπύλη ερπυσμού βραχώμαζας.....	41
Διάγραμμα 4.7 – Στοιχείο ελατηρίου (Hooke).	43
Διάγραμμα 4.8 – Στοιχείο αποσβεστήρα (Newton).....	43
Διάγραμμα 4.9 – Ο βρόχος υστερήσεως αντιπροσωπεύει την απώλεια ενέργειας.....	44
Διάγραμμα 4.10 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Maxwell.	45
Διάγραμμα 4.11 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Kelvin.	46
Διάγραμμα 4.12 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Burgers.	47
Διάγραμμα 4.13 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Poyting-Thomson.	48
Διάγραμμα 4.14 – Παράδειγμα ιξωδοελαστοπλαστικού στοιχείου (Bingham).	49
Διάγραμμα 4.15 – Εξέλιξη της τάσης συναρτήσει του χρόνου σε ένα στοιχείο Bingham.....	49
Διάγραμμα 5.1 – Η επίδραση της παύσης της εκσκαφής σε 3 διαφορετικές διατομές ελέγχου.	54
Διάγραμμα 5.2 – Σύγκλιση προς χρόνο και προς την απόσταση από το μέτωπο.	55
Διάγραμμα 6.1 – Οριζοντιογραφία της σήραγγας του Ανθοχωρίου. Διακρίνονται τα μήκη εφαρμογής των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν.	68
Διάγραμμα 6.2 – Φύλλο τοπογραφικών μετρήσεων διατομής 27, οριζόντια μετακίνηση.	69
Διάγραμμα 6.3 – Φύλλο τοπογραφικών μετρήσεων διατομής 27, κατακόρυφη μετακίνηση.	70
Διάγραμμα 6.4 – Εξέλιξη των συγκλίσεων συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο.	71
Διάγραμμα 6.5 – Εξέλιξη των συγκλίσεων συναρτήσει του χρόνου.	72
Διάγραμμα 6.6 – Ο ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής συναρτήσει του χρόνου θεωρείται με ικανοποιητική προσέγγιση σταθερός.	79
Διάγραμμα 6.7 – Εξιδανικευμένο διάγραμμα συγκλίσεως.	80
Διάγραμμα 6.8 – Η συνάρτηση f που εκφράζει τη χωρική συνιστώσα.	81
Διάγραμμα 6.9 – Η συνάρτηση g που εκφράζει τη χρονική συνιστώσα.	83
Διάγραμμα 6.10 – Μετρηθείσες συγκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για κάθε διατομή.	84
Διάγραμμα 6.11 – Μετρηθείσες συγκλίσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.....	85

Διάγραμμα 6.12 – Η συνάρτηση προσαρμογής για διάφορες τιμές παραμέτρων.....	86
Διάγραμμα 6.13 – Υπολογισθείσες συγκλίσεις συναρτήσεως του χρόνου.....	87
Διάγραμμα 6.14 – Υπολογισθείσες συγκλίσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	88
Διάγραμμα 6.15 – Το σφάλμα που προέκυψε για κάθε διατομή.....	88
Διάγραμμα 6.16 – Παρουσίαση των σχέσεων που εξήχθησαν αναφορικά με τις μετρηθείσες τιμές των συγκλίσεων.....	90
Διάγραμμα 7.1 – Καμπύλη Chern.....	95
Διάγραμμα 7.2 – Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης.....	95
Διάγραμμα 7.3 – Το υλικό μπροστά από το μέτωπο θεωρείται ένα τέμαχος βραχόμαζας που υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη.....	96
Διάγραμμα 7.4 – Η επιρροή της υποστήριξης στο μέτωπο.....	97
Διάγραμμα 7.5 – Ισορροπία της σήραγγας μετά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης.....	98
Διάγραμμα 7.6 – Καμπύλη Chern της ανυποστηρίκτης και της υποστηριζόμενης διατομής.....	99
Διάγραμμα 7.7 – Υπολογισθείσες μετατοπίσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	100
Διάγραμμα 7.8 – Περιοχή ενδιαφέροντος της οριζοντιογραφίας της σήραγγας.....	101
Διάγραμμα 7.9 – Λεπτομέρεια της μηκοτομής του δεξιού κλάδου της σήραγγας.....	101
Διάγραμμα 7.10 – Καμπύλη Chern της άνω ημιδιατομής E5.....	112
Διάγραμμα 7.11 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της άνω ημιδιατομής E5.....	112
Διάγραμμα 7.12 – Καμπύλη Chern της άνω ημιδιατομής N3.....	113
Διάγραμμα 7.13 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της άνω ημιδιατομής N3.....	113
Διάγραμμα 7.14 – Καμπύλη Chern της κάτω ημιδιατομής E5.....	114
Διάγραμμα 7.15 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της κάτω ημιδιατομής E5.....	114
Διάγραμμα 7.16 – Καμπύλη Chern της κάτω ημιδιατομής N3.....	115
Διάγραμμα 7.17 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της κάτω ημιδιατομής N3.....	115
Διάγραμμα 7.18 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	123
Διάγραμμα 7.19 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως του χρόνου.....	124
Διάγραμμα 7.20 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	124
Διάγραμμα 7.21 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως του χρόνου.....	125
Διάγραμμα 7.22 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	125
Διάγραμμα 7.23 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσεως του χρόνου.....	126
Διάγραμμα 7.24 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	126
Διάγραμμα 7.25 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	127
Διάγραμμα 7.26 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως του χρόνου.....	127
Διάγραμμα 7.27 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως του χρόνου.....	128
Διάγραμμα 7.28 – Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	128
Διάγραμμα 7.29 – Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσεως του χρόνου.....	129
Διάγραμμα 7.30 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.....	129

Διάγραμμα 7.31 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει του χρόνου.	130
Διάγραμμα 7.32 – Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.	130
Διάγραμμα 7.33 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει του χρόνου.	131
Διάγραμμα 7.34 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χρονικής συνιστώσας της σύγκλισης.	132
Διάγραμμα 7.35 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χρονικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς x	132
Διάγραμμα 7.36 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χωρικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς x	133
Διάγραμμα 7.37 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χωρικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς t	133
Διάγραμμα 8.1 – Η χρονική συνιστώσα της μετακίνησης όπως προέκυψε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.	136
Διάγραμμα 8.2 – Η χρονική συνιστώσα της μετακίνησης όπως προέκυψε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.	136

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από την αρχαιότητα (Ευπαλίνειο όρυγμα, 1km, 6^{ος} αι. π.Χ., Σάμος) μέχρι τις μέρες μας (σήραγγα βάσης Gotthard, 57km, Ελβετία), η κατασκευή των σηράγγων είναι μία πρόκληση για το μηχανικό ο οποίος καλείται με την εμπειρία και την κρίση του να καλύψει τις μεγάλες αβεβαιότητες που άλλωστε χαρακτηρίζουν όλα τα έργα που σχετίζονται με τη γη.

Ο ρόλος του γεωτεχνικού μηχανικού είναι ασφαλώς πρωταρχικός. Είναι αυτός που θα προσδιορίσει τα βραχυχρόνια και μακροχρόνια φορτία που θα επιβαρύνουν την επένδυση της σήραγγας κι ως εκ τούτου η γεωτεχνική μελέτη κρύβεται πίσω από την οικομία και την ασφάλεια του έργου. Κι επειδή οι σήραγγες είναι γραμμικές κατασκευές μεγάλης κλίμακας, μικρές αλλαγές στη μελέτη ισοδυναμούν με μεγάλες μεταβολές στο κόστος. Για να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα ο μηχανικός έχει στη διάθεσή του διάφορα εργαλεία στο πεδίο (γεωτρήσεις, εργαστηριακές μετρήσεις αντοχής, ελαστικότητας, περατότητας κλπ.) και στο γραφείο (αναλυτικές λύσεις, γραφικές, ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία κλπ.), τα οποία πρέπει να χρησιμοποιήσει καταλλήλως για να καταλήξει στη βέλτιστη λύση.

Η φιλοσοφία του σχεδιασμού μέχρι σήμερα διέπεται από την αρχή ότι η συμβολή των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων (διόγκωση, στερεοποίηση αλλά κυρίως ερπυσμός) αγνοείται κατά τη διαδικασία διάνοιξης και προσωρινής υποστήριξης και συνυπολογίζεται για κάποιο βάθος χρόνου (π.χ. 50 έτη) ως μακροχρόνια φόρτιση επί της τελικής επένδυσης. Μία τέτοια θεώρηση ισχύει για την πλειονότητα των σηράγγων, εντούτοις υπάρχουν περιπτώσεις σηράγγων που διανοίχθηκαν σε πτωχά υλικά με έντονο ερπυστικό χαρακτήρα, στις οποίες υπήρξε εκδήλωση συγκλίσεων με ακίνητο το μέτωπο εκσκαφής πολύ πριν τοποθετηθεί η μόνιμη επένδυση που δεν μπορεί παρά να είναι χρονικά εξαρτημένες.

Για να καλυφθεί αυτό το κενό, πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει εμπειρικά και αναλυτικά μοντέλα στα οποία συνυπολογίζεται η επίδραση του χωρικού (δηλ. η προώθηση του μετώπου) και του χρονικού παράγοντα με τα οποία έχουν επιτύχει να εξηγήσουν διάφορες περιπτώσεις αστοχίας της προσωρινής επένδυσης. Στην παρούσα εργασία γίνεται η προσπάθεια να αφενός να εφαρμοσθεί ένα τέτοιο εμπειρικό μοντέλο σε μία σήραγγα του

ελλαδικού χώρου και αφετέρου να προσδιοριστεί ο ερπυστικός χαρακτήρας της διαχωρίζοντας τις χρονικά εξαρτημένες από τις συνολικές συγκλίσεις. Η δομή της εργασίας σε κεφάλαια έχει ως εξής:

Στα κεφάλαια 2 έως 5 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο, μία σύνοψη μαθηματικών σχέσεων και στοιχείων γνωστών από τη βιβλιογραφία στα οποία βασίζονται οι όποιες προτάσεις και μέθοδοι επίλυσης παρουσιάζονται στη συνέχεια. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 αναπτύσσεται ένα αναλυτικό μοντέλο για την κατανομή της έντασης γύρω από τη σήραγγα και οι απλοποιητικές παραδοχές στο οποίο στηρίζεται. Ορισμένες από τις βασικές του ποιοτικές προτάσεις σχετικά με την απόσταση επιρροής του μετώπου αποδεικνύονται χρήσιμες. Στο κεφάλαιο 3 αναπτύσσονται οι καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης και Panet και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται για να προσομοιάσουν τη διαδικασία εκσκαφής. Επιπλέον παρουσιάζονται οι σύγχρονες τεχνολογίες διάνοιξης και υποστήριξης των σηράγγων που συναντήθηκαν στην πορεία της εργασίας. Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει στοιχεία που αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά της βραχώμαζας, τα συστήματα κατατάξεως, τα κριτήρια αστοχίας και την ποσοτικοποίηση της ερπυστικής συμπεριφοράς. Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται κάποιες σκέψεις ερευνητών για τη δυνατότητα διαχωρισμού της χωρικής από τη χρονική συνιστώσα της σύγκλισης.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται στατιστική επεξεργασία των δεδομένων συγκλίσεων κατά τη φάση κατασκευής για 37 διατομές της σήραγγας Ανθοχωρίου και προσπάθεια προσαρμογής ενός εμπειρικού νόμου στα δεδομένα αυτά.

Στο κεφάλαιο 7 απομονώνεται μία συγκεκριμένη διατομή της σήραγγας, εκτιμώνται τα μηχανικά της χαρακτηριστικά και με γνωστή την ακριβή γεωμετρία της εκσκαφής και τα μέτρα υποστήριξης, προσομοιώνεται η διαδικασία της εκσκαφής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Οι συγκλίσεις που υπολογίζονται θα είναι ίσες με τις συγκλίσεις λόγω προώθησης του μετώπου, άρα αν αφαιρεθούν από τις συνολικές συγκλίσεις που μετρήθηκαν θα προκύψουν οι συγκλίσεις που οφείλονται αμιγώς στο χρονικό παράγοντα. Κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίζεται η ερπυστική συμπεριφορά της υποστηριζόμενης διατομής.

2. Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΠΗ

Για να διαμορφώσουμε μία εικόνα για την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων γύρω από τη σήραγγα, χρησιμοποιούμε το παρακάτω αναλυτικό μοντέλο οι παραδοχές του οποίου μπορεί να μην ισχύουν απολύτως σε ένα πραγματικό πρόβλημα και κατ' επέκταση η αριθμητική εφαρμογή του να μη δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την – ακριβέστερη – ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, πάντως μας προϊδεάζει για την εικόνα που θα πάρουμε από την ανάλυση και εξηγεί πώς προκύπτουν οι καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό των μέτρων υποστήριξης των σηράγγων.

2.1 Παραδοχές

- Σήραγγα κυκλικής διατομής.
- Η σήραγγα βρίσκεται εντός ισότροπου γεωστατικού πεδίου.

Η συνθήκη αυτή εξασφαλίζεται όταν α) η σήραγγα βρίσκεται σε μεγάλο βάθος σε σχέση με την ακτίνα της έτσι ώστε να μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατακόρυφη τάση στην κλείδα ισούται με την κατακόρυφη τάση στον πόδα και β) όταν ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης της βραχόμαζας ισούται με τη μονάδα έτσι ώστε σε κάθε σημείο του πεδίου $\sigma_{v0} = \sigma_{h0} = p_0$

- Μηχανική συμπεριφορά: Έδαφος ελαστικό – απολύτως πλαστικό.

Η βραχόμαζα γενικά διέπεται από τη θεωρία Ελαστικότητας. Σε περίπτωση που η αντοχή της βραχόμαζας υπερβληθεί, αναπτύσσεται βαθμιαία γύρω από τη σήραγγα μία περιοχή (πλαστική περιοχή – broken zone) όπου ικανοποιείται το εκάστοτε επιλεγόμενο κριτήριο αστοχίας, π.χ. Mohr-Coulomb:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \sqrt{N_\phi} + 2c\sqrt{N_\phi}, \text{ όπου } N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.1)$$

(Σημειώνεται ότι για συγκεκριμένη περιοχή τάσεων, οι παράμετροι c , ϕ του κριτηρίου Mohr – Coulomb μπορούν να εξαχθούν από το κριτήριο Hoek – Brown σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην εργασία των Hoek et al, 2002)

- Παραμόρφωση υπό σταθερό όγκο μετά την αστοχία

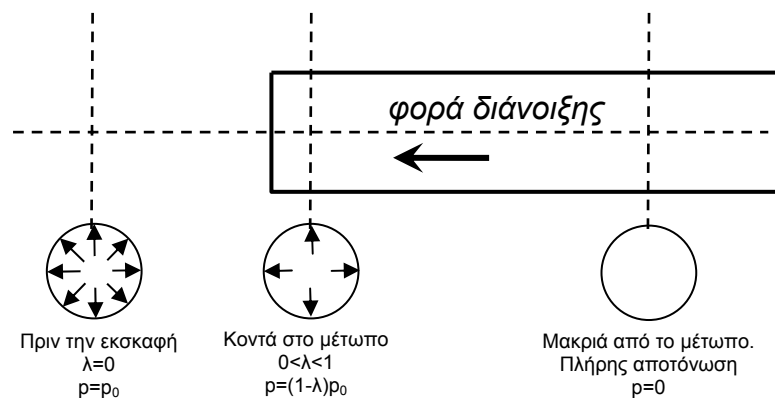
$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_\theta = 0 \quad (2.2)$$

- Κατά τον άξονα της σήραγγας έχουμε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης.

Αυτό δεν ισχύει σε περιοχές κοντά στο μέτωπο της σήραγγας, όπου η ανάλυση της κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων είναι πρόβλημα τρισδιάστατο. Η μετατροπή αυτού του σε όρους δύο διαστάσεων γίνεται εφαρμόζοντας μία «ισοδύναμη εσωτερική πίεση», η οποία έχει τιμή ίση με την ένταση του πεδίου p_0 πριν το μέτωπο διέλθει από την υπό εξέταση διατομή, μειώνεται σε p καθώς το μέτωπο προχωράει και τελικά μηδενίζεται όταν το μέτωπο έχει απομακρυνθεί πολύ από τη διατομή. Αυτή η υποθετική προσωρινή υποστήριξη που ασκείται στη διατομή από την εσωτερική πίεση (p) δίνεται από τη σχέση

$$p = (1 - \lambda)p_0 \quad (2.3)$$

λ ονομάζεται ο **βαθμός αποτόνωσης** που λαμβάνει τιμές 0 έως 1.



Διάγραμμα 2.1 – Αποτόνωση των πιέσεων με την προχώρηση του μετώπου εκσκαφής.

2.2 Επίλυση του μοντέλου

Σύμφωνα με τις ανωτέρω παραδοχές και με δεδομένα τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας (c , ϕ , E , ν) και την ακτίνα της σήραγγας (R) γίνεται η μαθηματική επίλυση του μοντέλου, η οποία καταλήγει σε σχέσεις για τον προσδιορισμό της ακτινικής και εφαπτομενικής τάσης σε οποιοδήποτε σημείο γύρω από τη σήραγγα και για οιονδήποτε βαθμό αποτόνωσης καθώς και για τον προσδιορισμό της ακτίνας της πλαστικής ζώνης (r_p). Επίσης υπολογίζονται οι μετακινήσεις της βραχώμαζας και ειδικότερα οι μετακινήσεις στο όριο της σήραγγας που μας ενδιαφέρουν, καθώς από αυτές θα φορτιστεί η επένδυση. Ενδεικτικά δίνονται:

Στην πλαστική περιοχή, για $\phi \neq 0$

$$\sigma_r = \left[p + \frac{2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \right] \left(\frac{r}{R} \right)^{N_\phi - 1} - \left(\frac{2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \right) \quad (2.4)$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_r N_{\phi} + 2c\sqrt{N_{\phi}} \quad (2.5)$$

$$\left(\frac{r_p}{R}\right)^{N_{\phi}-1} = \left(\frac{2}{N_{\phi}+1}\right) \frac{\left(p_0 + \frac{2c\sqrt{N_{\phi}}}{N_{\phi}-1}\right)}{\left(p + \frac{2c\sqrt{N_{\phi}}}{N_{\phi}-1}\right)} \quad (2.6)$$

Στην ελαστική περιοχή, για $\phi \neq 0$

$$\sigma_r = p_0 - c_2 D(1 - K_0) \frac{1}{r^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{\theta} = p_0 + c_2 D(1 - K_0) \frac{1}{r^2} \quad (2.8)$$

$$\frac{c_2}{r^2 p} = \frac{(1 + \nu)}{(N_{\phi} + 1)} \cdot \frac{p_0(N_{\phi} - 1) + 2c\sqrt{N_{\phi}}}{E} \quad (2.9)$$

Παρατήρηση: ο παράγων

$$N_s = \frac{p_0}{c\sqrt{N_{\phi}}} = \frac{2p_0}{\sigma_{cm}} \quad (2.10)$$

ονομάζεται **συντελεστής υπερφόρτισης** και αποτελεί χρήσιμο μέτρο της αντοχής της βραχόμαζας σε σχέση με την ένταση του πεδίου. Όταν $N_s \geq 1$ έχουμε ανάπτυξη πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα, διαφορετικά $r_p=0$.

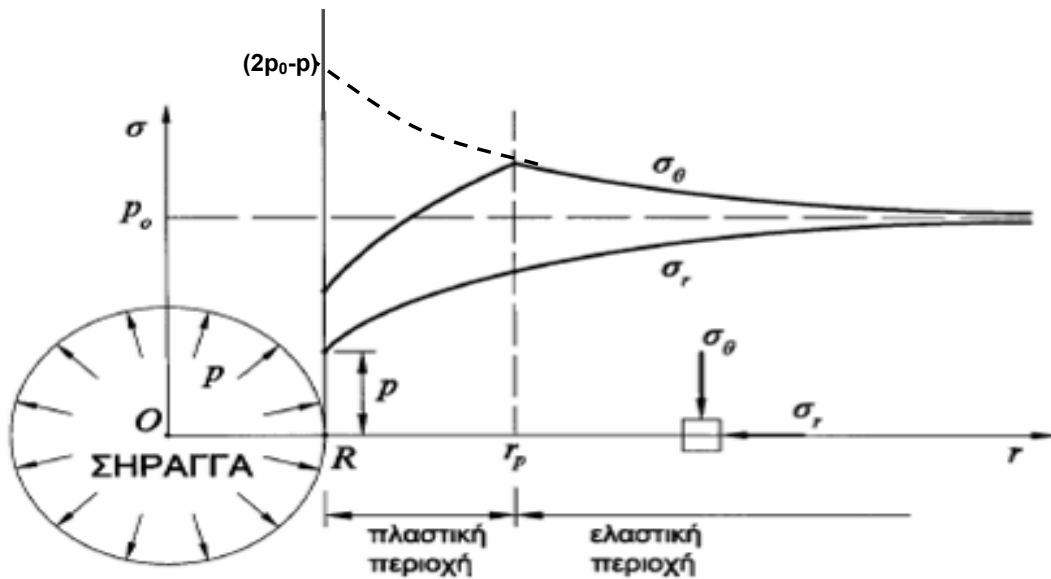
Από το ν. Mohr – Coulomb για $\sigma_3=0$ δίνεται η αντοχή της βραχόμαζας σε μονοαξονική θλίψη,

$$\sigma_{cm} = \sigma_1 = \sigma_3 \sqrt{N_{\phi}} + 2c\sqrt{N_{\phi}} = 2c\sqrt{N_{\phi}} \quad (2.11)$$

Χρήσιμη είναι επίσης η σχέση που εξάγεται για την εύρεση της εσωτερικής πίεσης (p_e) για την οποία αρχίζει να αναπτύσσεται πλαστική περιοχή γύρω από τη σήραγγα:

$$p_e = \frac{2p_0 - 2c\sqrt{N_{\phi}}}{N_{\phi} + 1} \quad (2.12)$$

Τα παραπάνω συνοψίζονται στο ακόλουθο διαγράμμα.



Διάγραμμα 2.2 – Εξέλιξη των τάσεων συναρτήσει της απόστασης.

Σχετικά με τις εδαφικές μετακινήσεις, ενδεικτικά αναφέρουμε για την περίπτωση που δεν έχουμε ανάπτυξη πλαστικής περιοχής, στο τοίχωμα:

$$u_R = R(1 + \nu) \left(\frac{p_0 - p}{E} \right) \quad (2.13)$$

Ενώ όταν η βραχώμαζα έχει διαρρεύσει, στο όριο της πλαστικής περιοχής, η μετακίνηση δίνεται από τη σχέση

$$u_p = r_p \left(\frac{1 + \nu}{N_\phi + 1} \right) \frac{p_0 (N_\phi - 1) + 2c\sqrt{N_\phi}}{E} \quad (2.14)$$

Και στο τοίχωμα της σήραγγας, η μετακίνηση δίνεται από τη σχέση

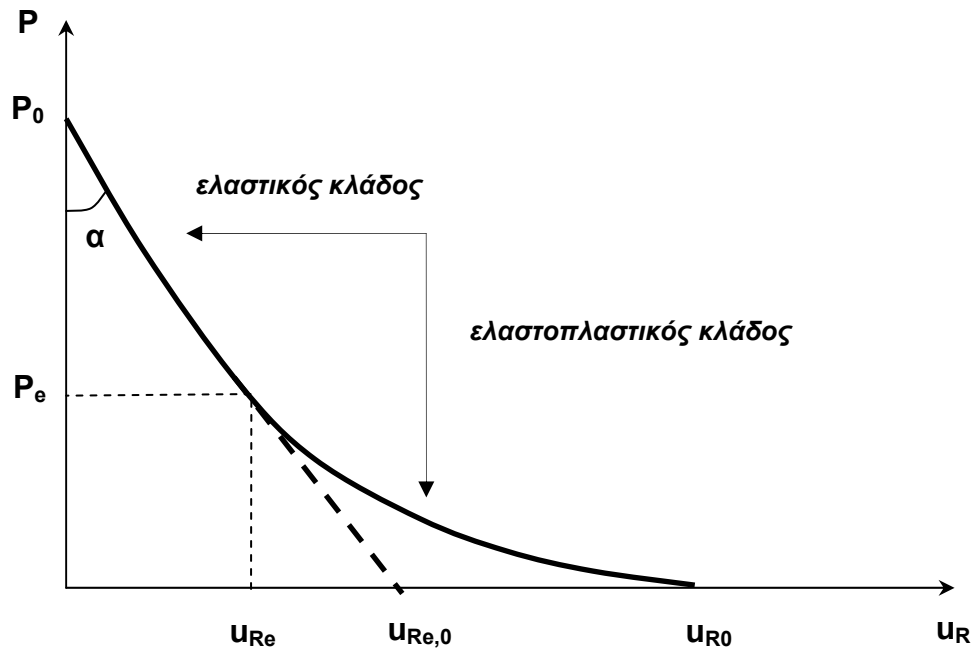
$$u_R = R - \sqrt{R^2 - u_p(2r_p - u_p)} \quad (2.15)$$

Η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης

Με βάση τις ως άνω σχέσεις μπορεί να υπολογισθεί η μετακίνηση του τοιχώματος της σήραγγας καθώς η εσωτερική πίεση μειώνεται από p_0 σε p_e (η εσωτερική πίεση για την οποία αρχίζει η ανάπτυξη της πλαστικής περιοχής) και τελικά μηδενίζεται. Η καμπύλη που προκύπτει (Διάγραμμα 2.3) αποτελείται από 2 κλάδους: ο πρώτος αντιστοιχεί στην ελαστική κατάσταση όπου οι μετακινήσεις εξελίσσονται με σταθερό ρυθμό

$$\tan \alpha = \frac{(1+\nu)R}{E} \quad (2.16)$$

ως προς τη μείωση της εσωτερικής πίεσης. Ο δεύτερος κλάδος αντιστοιχεί στην ελαστοπλαστική κατάσταση, όπου παρατηρείται αύξηση του ρυθμού των μετακινήσεων οι οποίες καταλήγουν σε μία μέγιστη τιμή (u_{R0}) η οποία προκύπτει για μηδενισμό της εσωτερικής πίεσης.



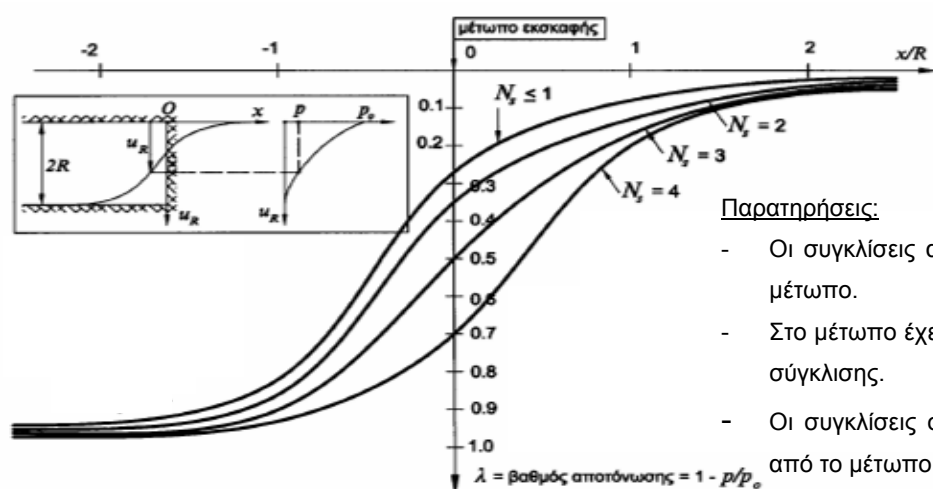
Διάγραμμα 2.3 – Η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΔΙΑΝΟΙΞΗ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της θεωρίας στο σχεδιασμό των μέτρων προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας καθώς και η διαδικασία διάνοιξης και τοποθέτησης της υποστήριξης, με έμφαση στη **μέθοδο NATM** σε 2 φάσεις, καθώς αυτή η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στην υπό μελέτη σήραγγα που εξετάζεται στο δεύτερο μέρος της εργασίας.

3.1 Διαστασιολόγηση της προσωρινής υποστήριξης

Για να διαστασιολογήσουμε τα μέτρα υποστήριξης της σήραγγας, πρέπει να γνωρίζουμε την πίεση που θα δεχθούν από τα τοιχώματα της σήραγγας. Στο προηγούμενο κεφάλαιο (Διάγραμμα 2.1, Διάγραμμα 2.3) είδαμε, ότι σε μία δεδομένη διατομή της σήραγγας, καθώς το μέτωπο εκσκαφής προχωράει, η εσωτερική πίεση μειώνεται και ταυτόχρονα αυτή η μείωση εκδηλώνεται σε σύγκλιση του τοιχώματος. Εάν δηλαδή παρεμποδίσουμε τη σύγκλιση με εφαρμογή μέτρων υποστήριξης, θα έχουμε σαν αποτέλεσμα τη φόρτισή τους από την περιβάλλουσα βραχώμαζα. Για να ποσοτικοποιήσουν αυτή τη φόρτιση οι Panet, 1995 και Chern, 1998 παρήγαγαν κάποια διαγράμματα που συνδέουν την απόσταση από το μέτωπο (x) με το βαθμό αποτόνωσης (λ). Ενδεικτικά παρατίθενται οι καμπύλες Panet για ανυποστήρικτη σήραγγα για διάφορες τιμές του συντελεστή υπερφόρτισης N_s (Διάγραμμα 3.1)



Διάγραμμα 3.1 – Καμπύλες Panet για ανυποστήρικτη σήραγγα

Και η αντίστοιχη μαθηματική σχέση

$$u_R(x) = u_R(0) + [u_{R\infty} - u_R(0)] \left\{ 1 - \left[\frac{m}{m + \xi \left(\frac{-x}{R} \right)} \right]^2 \right\} \quad (3.1)$$

όπου $u_{R\infty}$ η τελική σύγκλιση του τοιχώματος, για βαθμό αποτόνωσης $\lambda=1$

$$\xi = u_{R\infty}^e / u_{R\infty}$$

$u_{R\infty}^e$ η ελαστική τελική σύγκλιση

$u_R(0)$ η σύγκλιση στο μέτωπο εκσκαφής και

m συντελεστής που εξαρτάται από το βαθμό υπερφόρτισης της βραχώμαζας. Οι δύο τελευταίες παράμετροι λαμβάνονται από πίνακες.

Ενώ για την επίσης διαδεδομένη σχέση του Chern ισχύει:

$$\frac{x}{R} = 1.1 \cdot \ln \left[\left(\frac{u_R}{u_{R\infty}} \right)^{-0.588} - 1 \right] \quad (3.2)$$

Παρατηρούμε ότι στο μέτωπο ήδη έχει πραγματοποιηθεί σημαντικό ποσοστό αποτόνωσης, της τάξης του 40%, δηλαδή ακόμα και αν τοποθετηθεί ακριβώς στη θέση $x=0$ η προσωρινή υποστήριξη και είναι τελείως άκαμπτη, θα έχει να αναλάβει μόνον το 60% της αρχικής γεωστατικής τάσης. Αυτό το γεγονός μας δίνει τη δυνατότητα να τοποθετούμε τα μέτρα άμεσης υποστήριξης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια κτλ.) πολύ κοντά στο μέτωπο ($x=1-2m$) ώστε να αποφεύγουμε ενδεχόμενη χαλάρωση της βραχώμαζας και κατάρρευση της οροφής της σήραγγας σε περιπτώσεις γεωϋλικών πτωχών μηχανικών χαρακτηριστικών.

3.2 Μέθοδος διάνοιξης NATM

Η μέθοδος NATM περιλαμβάνει τη διάνοιξη σήραγγων με εκτεθειμένο το μέτωπο εκσκαφής η δε άμεση υποστήριξη της διατομής γίνεται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή/και αγκύρια (σε αντιδιαστολή με τη μέθοδο διάνοιξης TBM, όπου μπορεί να έχουμε υποστήριξη του μετώπου δια του εκσκαφθέντος υλικού (EPB – Earth Pressure Balance, εξυγίανση με παροχή

νερού και BS – Betonite Slurry, εξυγίανση με μείγμα μπετονίτη), ενώ η άμεση υποστήριξη μπορεί να γίνει είτε με συμβατικά μέσα (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια) είτε με μονή είτε με διπλή προστατευτική ασπίδα). Η εκσκαφή της σήραγγας γίνεται σε μία ή περισσότερες φάσεις (η σήραγγα που έχουμε μελετήσει στην παρούσα εργασία έχει εκσκαφθεί σε 2 φάσεις – top heading and bench), παράμετρος που υποδεικνύεται από τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής μελέτης σχετικά με την ποιότητα της βραχόμαζας. Το πλεονέκτημα της σταδιακής εκσκαφής είναι ότι μετά από την διάνοιξη κάθε φάσης δίνεται χρόνος στην περιβάλλουσα βραχόμαζα να σταθεροποιηθεί και να ενεργοποιήσει την αντοχή της κι έτσι τελικά όταν ολοκληρωθεί το μέτωπο οι συνολικές συγκλίσεις να είναι μικρότερες από αυτές που θα είχαμε αν η εκσκαφή γινόταν σε ένα στάδιο.



Εικόνα 3.1 – Εκσκαφή σε περισσότερες από μία φάσεις.

3.3 Μέτρα και τεχνολογίες υποστήριξης της βραχόμαζας

Παρουσιάζονται εν συντομία τα μέτρα άμεσης υποστήριξης που συναντήθηκαν κατά τη μελέτη της σήραγγας του Ανθοχωρίου.

3.3.1 Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Εικόνα 3.2) αποτελεί εξαιρετική λύση για την άμεση υποστήριξη της εκσκαφής τόσο στο μέτωπο όσο και περιμετρικά, καθώς βρίσκεται σε απόλυτη επαφή με την περιβάλλουσα βραχόμαζα και συνεπώς η παραμικρή σύγκλιση του τοιχώματος μετατρέπεται σε φόρτισή του. Αυτό το στοιχείο το κάνει να πλεονεκτεί και έναντι ερπυστικών παραμορφώσεων σε σχέση με άλλες μεθόδους προσωρινής υποστήριξης. Το πάχος του κυμαίνεται

από 15 έως 30 cm και η αντοχή του από 20 έως 30 MPa ενώ αυτή μπορεί να αυξηθεί εάν απαιτείται με χαλύβδινες νευρώσεις ή ίνες, στοιχεία που του προσδίδουν επιπλέον ελαστικότητα (E) και εφελκυστική αντοχή. Η επίδραση του δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη σύγκλιση της σήραγγας και η κατ' επέκταση φόρτισή του μπορεί να γίνει κατανοητή με τη βοήθεια της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης.



Εικόνα 3.2 – Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ως μέσο προσωρινής υποστήριξης.

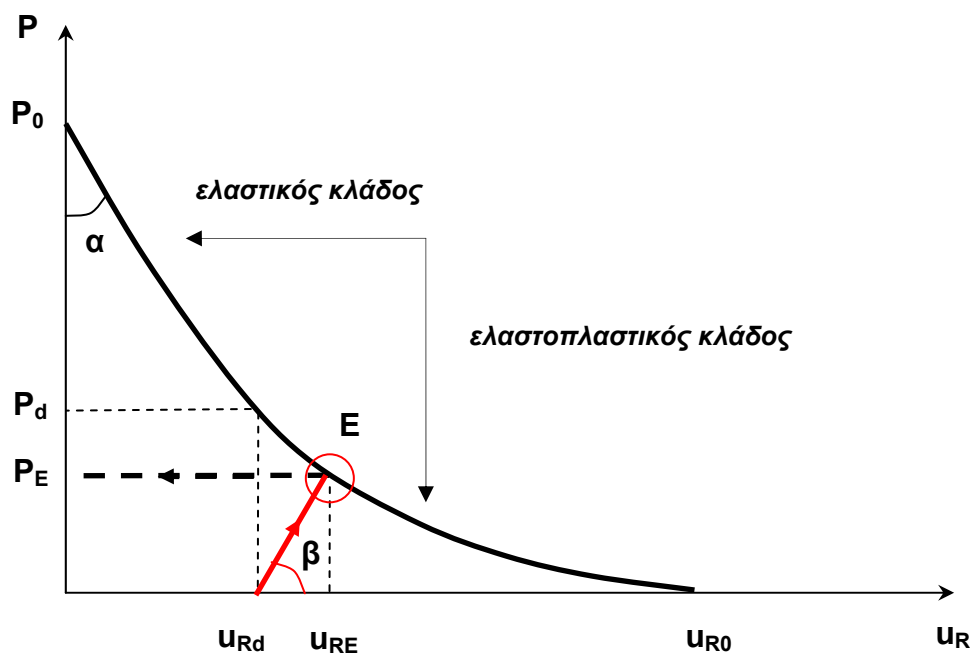
Αφού καθορίσουμε την απόσταση από το μέτωπο στην οποία θα τοποθετηθεί η άμεση υποστήριξη (x_d), βρίσκουμε μέσω της καμπύλης Panet (Διάγραμμα 3.1) το βαθμό αποτόνωσης στον οποίον αντιστοιχεί. Κατόπιν, με δεδομένο το γεωστατικό πεδίο (p_0), μπορούμε να βρούμε την εσωτερική πίεση στη διατομή τη στιγμή τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης (Εξίσωση 2.3) και τη σύγκλιση του τοιχώματος που αντιστοιχεί σε αυτή την πίεση (u_{Rd}) από την καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης (Διάγραμμα 2.3). Στο σημείο αυτό τοποθετείται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, το οποίο αρχικά είναι αφόρτιστο, αλλά με την περαιτέρω προώθηση του μετώπου θα κληθεί αναλάβει πίεση, μέρος της οποίας θα φορτίσει το σκυρόδεμα και το υπόλοιπο θα αναληφθεί ως σύγκλιση

του ίδιου του δακτυλίου σκυροδέματος, ανάλογα με την ακαμψία του, σύμφωνα με τον τύπο

$$\tan \beta = \frac{p}{u_R} = \frac{E}{R(1+\nu) \left[(1-\nu) \frac{R}{t} - 0.5\nu \right]} \quad (3.3)$$

Όπου t το πάχος του δακτυλίου.

Τελικά ο δακτύλιος θα ισορροπήσει στη θέση E , η οποία καταδεικνύει την πίεση επί του δακτυλίου (p_E) και την τελική σύγκλιση της διατομής (u_{RE}).

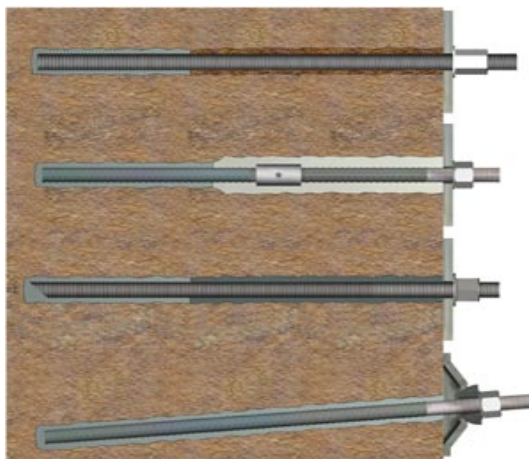
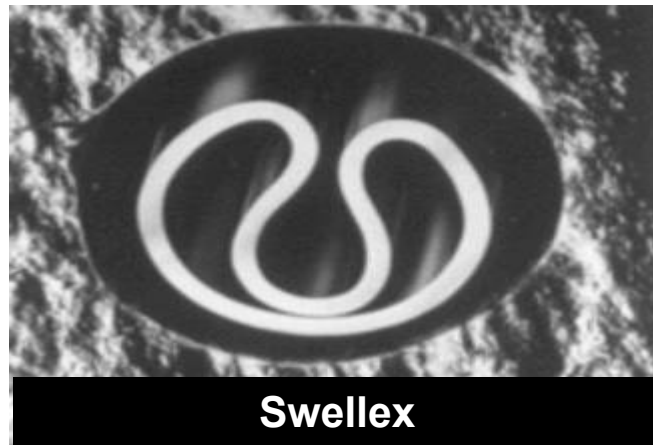


Διάγραμμα 3.2 – Η συμβολή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην ανάληψη φορτίων.

3.3.2 Αγκύρια και ηλώσεις βράχου

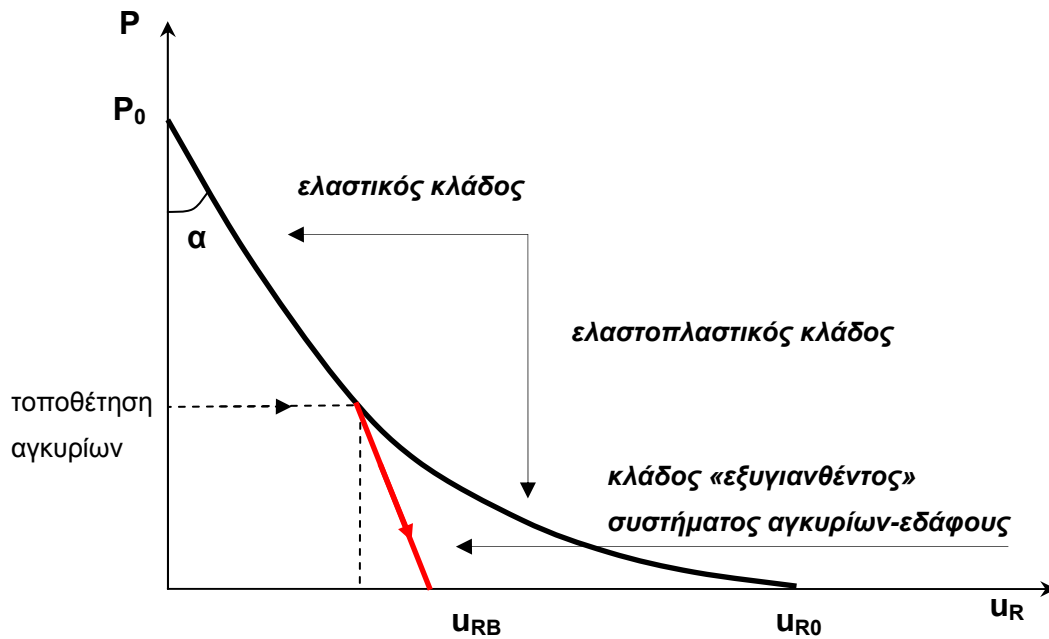
Ένας κάρναβος από αγκύρια βράχου οπλίζει την περιβάλλουσα βραχόμαζα και συντελεί στην καλύτερη ανάπτυξη της λειτουργίας τόξου. (Καββαδάς, Σχεδιασμός Υπογείων Έργων). Το μήκος τους διαστασιολογείται έτσι ώστε η κεφαλή να πακτώνεται στην ισχυρή βραχόμαζα της ελαστικής ζώνης κι έτσι η διατμητική αντοχή της βραχόμαζας μεταξύ κεφαλής του αγκυρίου και σήραγγας αυξάνεται δια της επιβολής ορθών τάσεων λόγω του ο εφελκυσμού του αγκυρίου. Στη σήραγγα του Ανθοχωρίου έχουν ευρεία εφαρμογή τα αγκύρια διαστελλόμενης κεφαλής (Swellex) τα οποία πλεονεκτούν ως προς την άμεση

ανάληψη φορτίων, όπως επίσης και τα αυτοδιατρύμενα (Self-drilling). Τέλος τα αγκύρια βράχου (Εικόνα 3.3) μπορεί να είναι παθητικά ή προεντεταμένα και όπως είναι εμφανές από τη λειτουργία τους μειονεκτούν σε βάθος χρόνου έναντι ερπυστικών παραμορφώσεων.



Εικόνα 3.3 – Διάφοροι τύποι αγκυρίων βράχου.

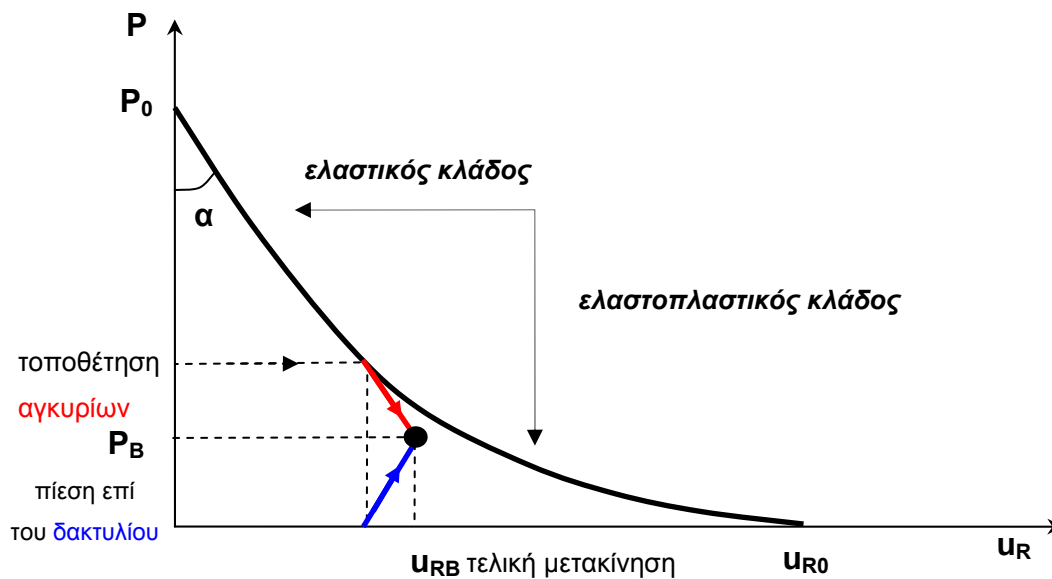
Στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης, η προαναφερθείσα ευνοϊκή λειτουργία των αγκυρίων στην ενίσχυση της βραχόμαζας είναι εμφανής αφού εκτρέπουν τον κλάδο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του εδάφους (Διάγραμμα 3.3) και τον φέρουν πιο κοντά στην ελαστική συμπεριφορά, με αποτέλεσμα τη μείωση της τελικής σύγκλισης των τοιχωμάτων. Ο υπολογισμός αυτής της τελικής σύγκλισης με υποστήριξη από αγκύρια (u_{RB}) γίνεται με εμπειρικές μεθόδους ή ανάλυση από πεπερασμένα στοιχεία.



Διάγραμμα 3.3 – Η συμβολή των αγκυρίων βράχου στην ενίσχυση της βραχώμαζας.

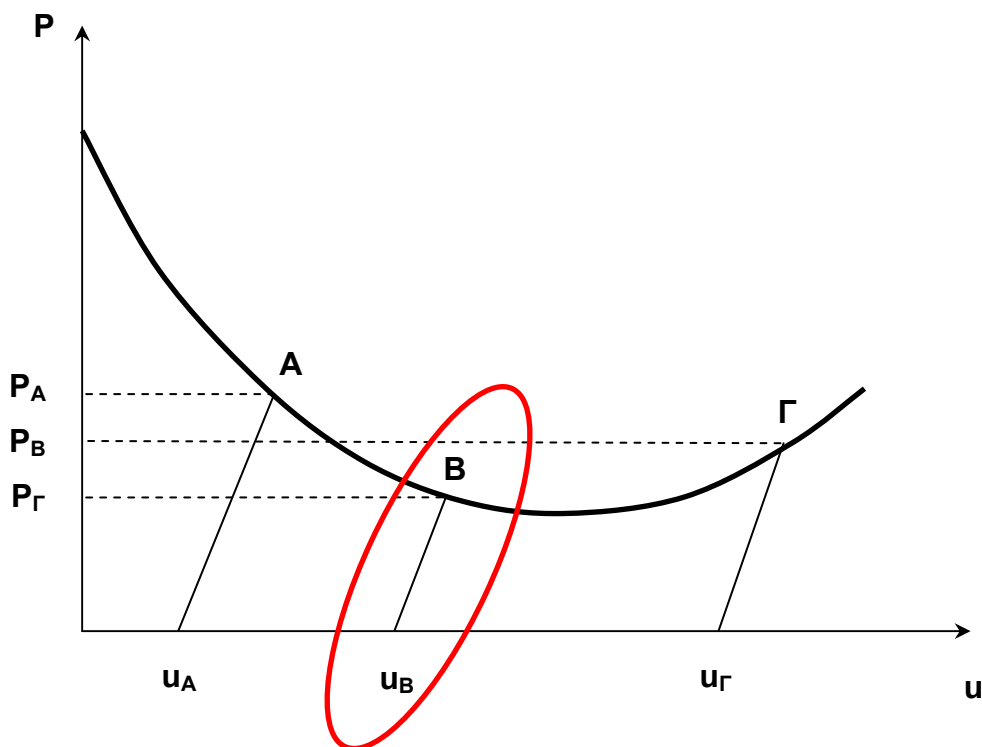
3.3.3 Μεικτή λειτουργία εκτοξευόμενου σκυροδέματος και αγκυρίων

Στην καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για υποστήριξη με συνδυασμό αγκυρίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Διάγραμμα 3.4) βλέπουμε ότι η βραχώμαζα έχει εξυγιανθεί από την εφαρμογή των αγκυρίων κι έτσι η πίεση που καλείται να αναλάβει ο δακτύλιος σκυροδέματος είναι πολύ μικρότερη.



Διάγραμμα 3.4 – Συνδυασμός αγκυρίων βράχου και εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι το ζητούμενο στο σχεδιασμό και την τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης είναι η ελεγχόμενη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε ικανό βαθμό ώστε να μειωθούν οι πιέσεις επί της υποστήριξης, αλλά όχι τόσο ώστε να προκληθεί αποδιοργάνωση της βραχώμαζας και κατάρρευση της οροφής (ειδικά σε περιπτώσεις εδαφών με ασταθή συμπεριφορά τύπου χαλάρωσης όπως στο Διάγραμμα 3.5)



Διάγραμμα 3.5 – Βέλτιστος χρόνος τοποθέτησης των μέσων υποστήριξης.

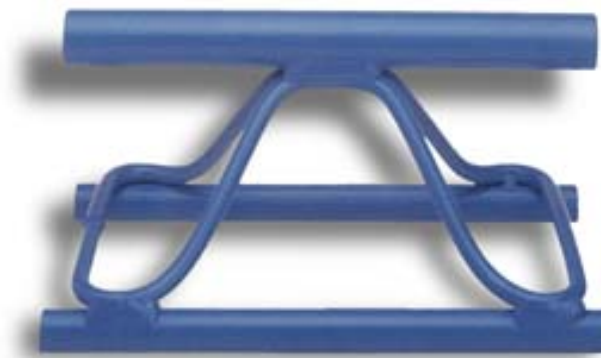
A: Οι πιέσεις δεν έχουν εκτονωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό κι έτσι η προσωρινή υποστήριξη θα κληθεί να αναλάβει μεγάλο φορτίο από την προχώρηση του μετώπου. Άρα θα πρέπει να διαστασιολογηθεί βαριά, άρα αντι-οικονομική.

B: Οι πιέσεις έχουν εκτονωθεί αρκετά και μόνο μικρό μέρος αυτών (για να υπάρχει και κάποιο περιθώριο ασφαλείας) θα πρέπει να αναλάβει μία πιο ελαφρά υποστήριξη

Γ: Η υποστήριξη τοποθετείται πολύ αργά κι έτσι έχουμε κατάρρευση της οροφής της σήραγγας λόγω της φύσης της βραχώμαζας (τύπου χαλάρωσης)

3.3.4 Μεταλλικά πλαίσια

Το πλεονέκτημά τους είναι ότι προσφέρουν άμεση υποστήριξη στη διατομή σε αντίθεση με μία υποστήριξη που αποτελείται αμιγώς από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και χρειάζεται χρόνο ωρίμανσης. Μπορεί να είναι από πλατύπελμη διατομή (π.χ. IPB) ή δικτυωτά (lattice girders) τα οποία στη συνέχεια καλύπτονται από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και προκύπτει μία σύμμικτη διατομή αυξημένης ελαστικότητας και αντοχής, ενώ σημαντική είναι και η εφελκυστική αντοχή που προσδίδεται στο σύστημα.



Εικόνα 3.4 – Διατομή δικτυωτού πλαισίου τριών ράβδων.

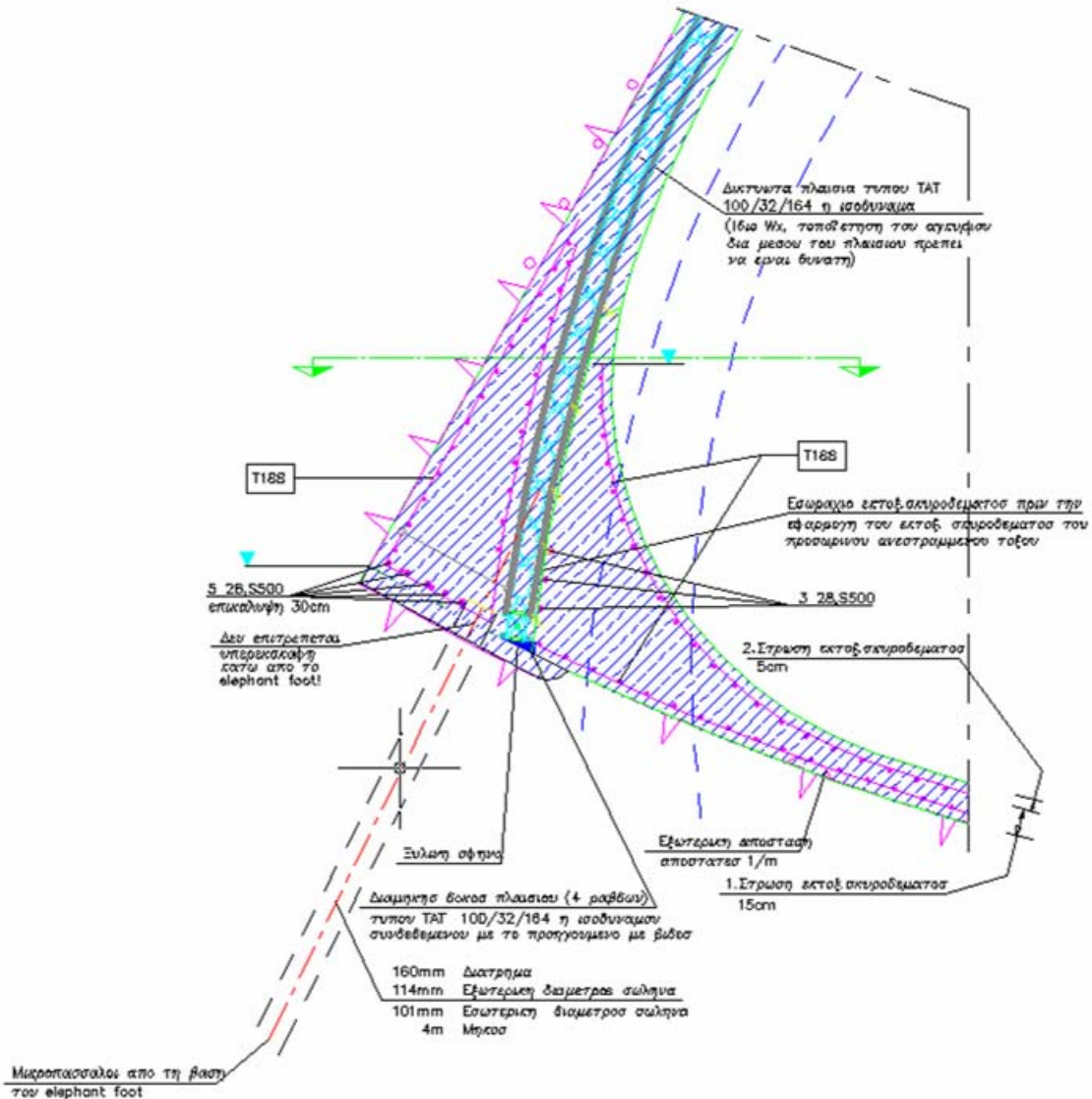
Στις αναλύσεις προσομοιώνονται ως στοιχεία δοκού με ισοδύναμες ιδιότητες (E, A, I) σύμφωνα με τις σχέσεις

$$(EA)_{equal} = E_c A_c + E_s A_s \quad (3.4)$$

$$(EI)_{equal} = E_c I_c + E_s I_s \quad (3.5)$$

$$F_{αντοχής} = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s \quad (3.6)$$

Για να ανακουφιστεί η θεμελίωση της σήραγγας στον πόδα από τέτοιες βαριές διατάξεις υποστήριξης, γίνεται διεύρυνση της διατομής στο όριο μεταξύ των δύο φάσεων εκσκαφής, γνωστή με τον όρο **elephant foot**. Εκεί θεμελιώνονται τα μέτρα υποστήριξης της άνω διατομής και μάλιστα σε περιπτώσεις ασθενούς βραχόμαζας μπορεί από το elephant foot να ξεκινούν μεμονωμένοι ή και ζεύγος πασσάλων (γνωστοί ως **μικροπάσσαλοι**) ώστε μέσω τριβής να βελτιώσουν περαιτέρω τις συνθήκες θεμελίωσης.

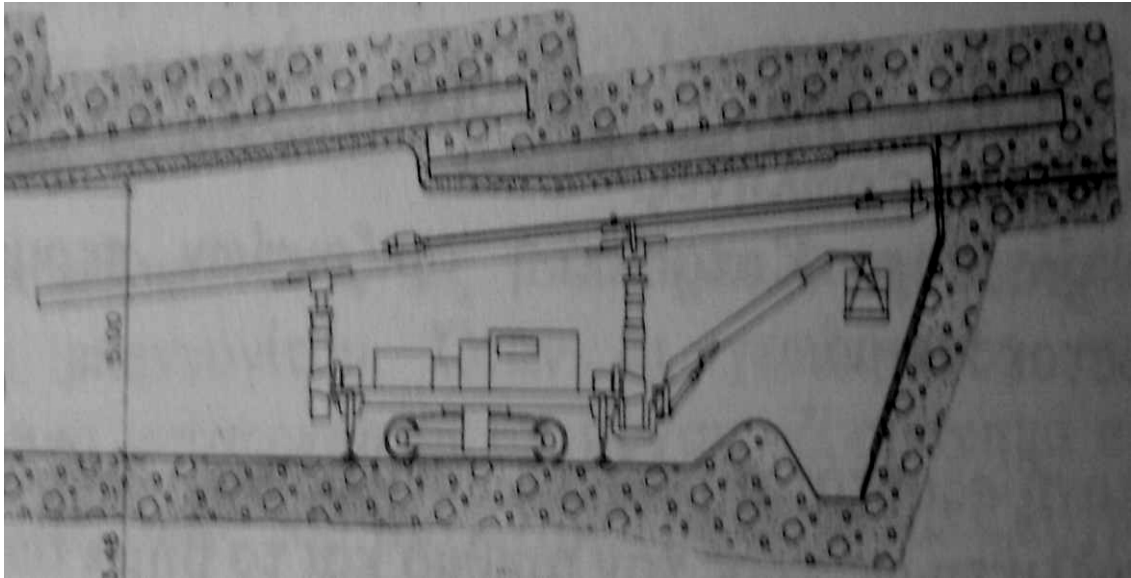


Εικόνα 3.5 – Λεπτομέρεια της διατομής. Διακρίνεται το elephant foot και οι μικροπασσαλοί.

3.3.5 Δοκοί προτορείας και αγκύρια προΐσχυροποίησης μετώπου

Σε ασθενείς βραχώμαζες που κρίνεται απαραίτητη για την ανεμπόδιστη εξέλιξη των εργασιών υποστήριξης κοντά στο μέτωπο η σταθεροποίησή αυτού, εκτός από τη «θυσιαζόμενη» στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, υπάρχει και η δυνατότητα περιμετρικής τοποθέτησης «ομπρέλας» ραβδών μεγάλης διαμέτρου που έχουν ως στόχο τη συγκράτηση της βραχώμαζας πριν ακόμη γίνει η εκσκαφή. Έτσι συμβάλλουν στη ευστάθεια του μετώπου αφού παρεμποδίζουν εν μέρει τις παραμορφώσεις εμπρός από το μέτωπο. Για να μη διακόπτεται η συνέχεια, τοποθετούνται υπό γωνία (περίπου 5°) έτσι ώστε να έρθει να τοποθετηθεί η επόμενη σειρά δοκών χωρίς τη σταδιακή μείωση της επιφάνειας εκσκαφής. Ανάλογη είναι και η λειτουργία των αγκυρίων ή ηλώσεων

προϊσχυροποίησης μετώπου (γνωστά και ως αγκύρια fiberglass από το υλικό κατασκευής τους) τα οποία τοποθετούνται σε κάνναβο αμέσως μετά την προχώρηση του μετώπου κατά ένα βήμα εκσκαφής και η διάρκεια ζωής τους είναι μέχρι να ολοκληρωθούν οι εργασίες εφαρμογής της προσωρινής υποστήριξης.



Εικόνα 3.6 – Εφαρμογή forepoling.

4. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι μέθοδοι προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του γεωυλικού και οι νόμοι που διέπουν τη συμπεριφορά του όταν αυτό υπόκειται στις διάφορες φορτίσεις που του επιβάλλει η διάνοιξη μιας σήραγγας. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση του χρονικού παράγοντα στην αλλαγή της εσωτερικής κατάστασης του υλικού μέσω του φαινομένου του ερπυσμού.

4.1 Ειδικό βάρος – λόγος Poisson

Όπως στα εδάφη, έτσι και για τις βραχώμαζες μπορούμε με σιγουριά να έχουμε μία συγκεκριμένη τιμή, $\gamma=23\text{-}26\text{KN/m}^3$. Άλλωστε η διακύμανση της τιμής αυτής είναι τόσο μικρή σε σχέση με τις λοιπές αβεβαιότητες της προσομοίωσης και με τις διακυμάνσεις των υπολοίπων μεγεθών που πολλές φορές – σε επίπεδο προμελέτης – δε γίνεται καν εργαστηριακή δοκιμή για τον προσδιορισμό της και λαμβάνεται αυθαίρετα, π.χ. $\gamma=25\text{KN/m}^3$. Το ίδιο ισχύει και για το λόγο Poisson, $\nu=0.3$.

4.2 Η έννοια της ισοτροπίας

Ισότροπο χαρακτηρίζεται ένα πέτρωμα ή μία βραχώμαζα ή ένα οποιοδήποτε υλικό που έχει τις ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις του. Όταν οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή) αλλάζουν όταν μεταβάλλουμε την διεύθυνση επιβολής των εξωτερικών τάσεων, το πέτρωμα καλείται ανισότροπο. Αυτό δε θα πρέπει να συγχέεται με την έννοια της ισοτροπίας του πεδίου, καθώς μπορεί να έχουμε ένα πεδίο αποτελούμενο από ισότροπες βραχώμαζες που να συμπεριφέρεται ανισότροπα. Το μέγεθος που μας πληροφορεί εν μέρει για το βαθμό ισοτροπίας του πεδίου (μακροσκοπικά) είναι ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης, K . Όταν $K = 1$ το υλικό είναι ισότροπο και η προσομοίωσή μας είναι ακριβής. Αλλά ακόμα και αν $K = 0.7 - 1.3$ έχουμε πολύ καλή προσέγγιση και μπορούμε με διάφορα τεχνάσματα να εντάξουμε αυτή τη διαφοροποίηση στο μοντέλο. Υπάρχουν όμως – σπάνιες για τον ελλαδικό χώρο – περιπτώσεις βραχώμαζας με έντονη επιρροή από τεκτονικές πιέσεις όπου ο συντελεστής λαμβάνει πολύ μικρότερες (έντονο εφελκυστικό

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

τεκτονικό καθεστώς) ή πολύ μεγαλύτερες (έντονο θλιπτικό τεκτονικό καθεστώς) τιμές και η βραχώμαζα είναι ανισότροπη. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής K είναι ο πιο κρίσιμος κατά τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης στοιχείων γύρω από υπόγειο άνοιγμα (μεταβολές στην τιμή του αλλάζουν άρδην τα αποτελέσματα) και συγχρόνως εκείνη η παράμετρος για την οποία έχουμε τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα, διότι ο προσδιορισμός της είναι πολύ δύσκολος και μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά μεταξύ γειτονικών θέσεων!

4.3 Συστήματα κατάταξης / βαθμονόμησης της βραχώμαζας

Μία από τις μεγαλύτερες δυσχέρειες στα υπόγεια έργα είναι η μεταπήδηση από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στις συνθήκες του έργου, καθώς αντιμετωπίζουμε αφενός τη μεγάλη ανομοιογένεια στα δοκίμια βράχου και αφετέρου προβλήματα κλίμακος (scale effects). Αυτό αντιμετωπίζεται με το να γίνονται οι εργαστηριακές δοκιμές και να προσδιορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες (E_i , σ_{ci}) σε δείγματα άρρηκτου βράχου (δίχως ασυνέχειες) και κατόπιν μέσω των συστημάτων κατάταξης, τα οποία δέχονται κατά βάση μία περιγραφή των επί τόπου συνθηκών (ασυνέχειες, κατακερματισμός της βραχώμαζας, τραχύτητα, παρουσία νερού κτλ), να κατατάσσουμε τη βραχώμαζα ανάλογα με τη βαθμολογία που συγκέντρωσε.

Rock Type: General	SURFACE CONDITIONS				
GSI Selection: 50 OK	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE	DECREASING SURFACE QUALITY →				
 INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	60	50
 BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	40	30	20	10	N/A
 VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
 BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
 DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
 LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Εικόνα 4.1 – Πίνακας βαθμονόμησης GSI.

Τέλος, οι μηχανικές παράμετροι της βραχώμαζας (E_m , σ_{cm}) εξάγονται βάσει εμπειρικών σχέσεων που λαμβάνουν υπόψη αυτή τη βαθμολογία. Τα τρία βασικότερα συστήματα βαθμονομήσεως της βραχώμαζας είναι το σύστημα Q του Νορβηγικού Ινστιτούτου Γεωτεχνικής, το σύστημα RMR, Bieniawski et al. και το σύστημα GSI, Hoek & Marinos, 2000 (Εικόνα 4.1). Παραδείγματος χάριν, έχοντας βαθμονομήσει τη βραχώμαζα, το μέτρο ελαστικότητας μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με τις διαδεδομένες σχέσεις:

– *Hoek, Carranza-Torres, Corkum, 2002*

$$E_{rm} (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}, \text{ για } \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$E_{rm} (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}, \text{ για } \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

– *Hoek & Diederichs, 2006*

$$E_{rm} (MPa) = 100000 \cdot \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{75+25D-GSI}{11}}} \right), \text{ απλουστευμένο} \quad (4.3)$$

$$E_{rm} (MPa) = MR \cdot \sigma_{ci} \cdot \left(\frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{75+25D-GSI}{11}}} \right) \quad (4.4)$$

όπου D ένας συντελεστής που εκφράζει τη διατάραξη της βραχώμαζας και λαμβάνεται από σχετικό πίνακα ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εκσκαφή. Ο παράγοντας MR (modulus ratio), με $MR = \frac{E_i}{\sigma_{ci}}$, έχει προταθεί από τον Deere, 1968, η τιμή του οποίου επίσης λαμβάνεται από σχετικό πίνακα ανάλογα με την κατηγορία του πετρώματος.

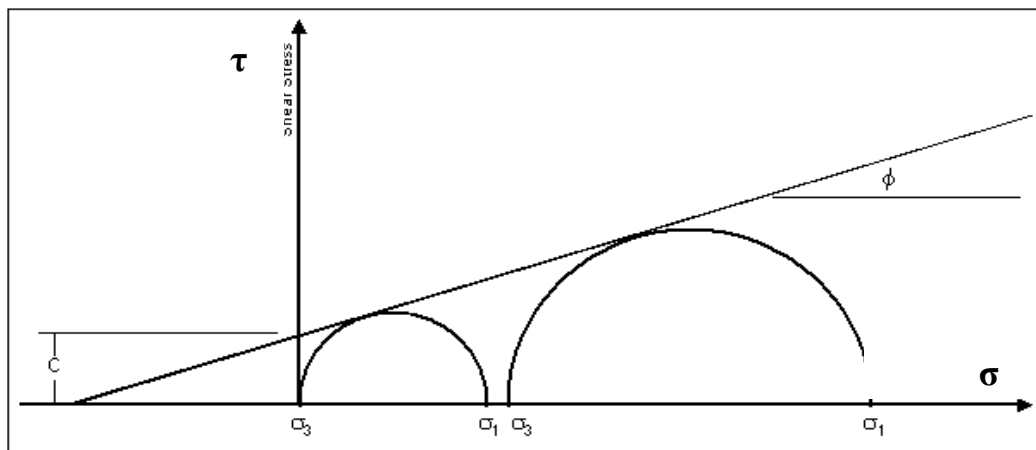
4.4 Κριτήρια αστοχίας της βραχώμαζας

4.4.1 Mohr – Coulomb

Το κριτήριο Mohr - Coulomb έχει καλή εφαρμογή σε υλικά με σχετική ισοτροπία και γι' αυτό το χρησιμοποιούμε ευρέως στην εδαφομηχανική, αλλά και στη βραχομηχανική όταν το γεωυλικό είναι κατακερματισμένο ή απολύτως συμπαγές, δεν υπάρχουν δηλαδή διακριτές ομάδες ασυνεχειών. Το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού στην κατάσταση αστοχίας προήλθε από το συνδυασμό του νόμου τριβής του Coulomb (1773) και του κύκλου του Mohr (1900), μία γραφική αναπαράσταση της επίπεδης εντατικής κατάστασης, και συνοψίζεται στην παρακάτω σχέση

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (4.5)$$

Σύμφωνα λοιπόν με το κριτήριο αυτό, το υλικό χαρακτηρίζεται από 2 παραμέτρους, τη γωνία εσωτερικής τριβής (ϕ) και τη συνοχή (c). Η ευθεία που περιγράφεται από την Εξίσωση 4.5 ονομάζεται περιβάλλουσα αστοχίας. Από πειράματα τριαξονικής θλίψης σε εδαφικά και βραχώδη υλικά στα οποία ισχύει το κριτήριο Mohr - Coulomb επαληθεύεται ότι η περιβάλλουσα είναι περίπου ευθεία.



Διάγραμμα 4.1 – Η περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb.

Η σχέση μπορεί να γραφεί και σε όρους κυρίων τάσεων ως εξής:

$$\sigma_1 = \sigma_3 \sqrt{N_\phi} + 2c \sqrt{N_\phi}, \text{ όπου } N_\phi = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4.6)$$

4.4.2 Hoek – Brown

Υπάρχουν όμως και υλικά, όπως ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις για το βράχο, που δεν υπακούουν στο ν. Mohr - Coulomb, δεν έχουν δηλαδή ευθεία περιβάλλουσα αστοχίας διότι στα υλικά αυτά η αστοχία υποδεικνύεται από τις ασυνέχειες κι όχι από τις εσωτερικές τους παραμέτρους (c, φ). Έτσι οι Hoek, Brown(1980) διατύπωσαν αρχικά τον ακόλουθο εμπειρικό νόμο, ο οποίος ισχύει για άθικτο βράχο:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5} \quad (4.7)$$

Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, η βραχώμαζα χαρακτηρίζεται από τις εξής παραμέτρους:

- την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του άρρηκτου (i=intact) πετρώματος, σ_{ci} , η οποία προσδιορίζεται είτε εργαστηριακά, είτε από τον πίνακα ISRM, είτε από σχέσεις της βιβλιογραφίας
- την αδιάστατη σταθερά m_i , η τιμή της οποίας μπορεί επίσης να προσδιοριστεί εργαστηριακά (συνίσταται) ή να εκτιμηθεί από πίνακα (Hoek and Marinos, 2000)

Αργότερα το κριτήριο τροποποιήθηκε για την εφαρμογή του σε ρηγματωμένες βραχώμαζες και προέκυψε το παρακάτω γενικευμένο κριτήριο (ver. 2002)

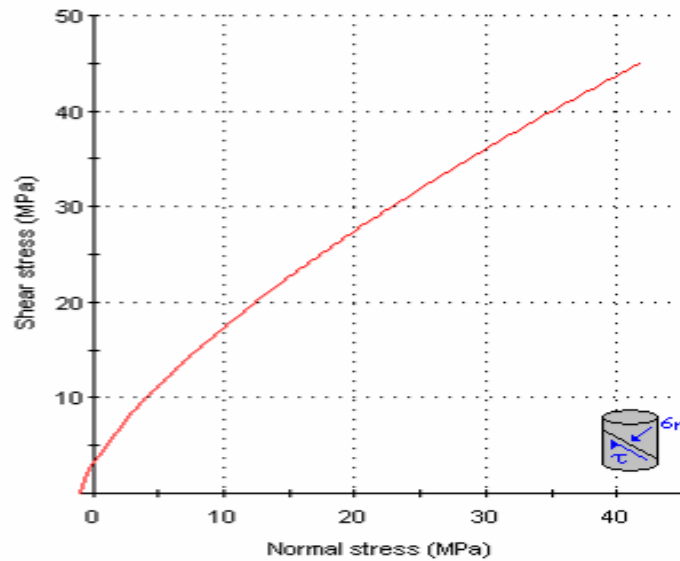
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4.8)$$

Οι σταθερές m_b , s , a εξαρτώνται από πλήθος παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να εκφραστούν βάσει των τιμών RMR ή GSI των αντίστοιχων συστημάτων βαθμονόμησης ως εξής:

$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (4.9)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (4.10)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4.11)$$



Διάγραμμα 4.2 – Η περιβάλλουσα αστοχίας Hoek-Brown όπως εξάγεται από το RocLab.

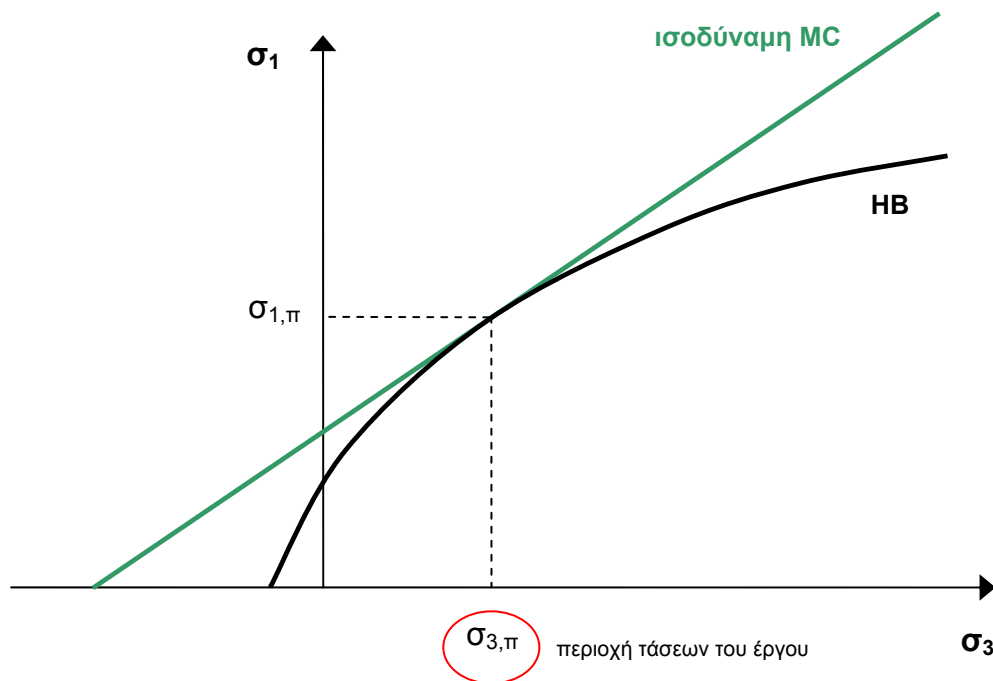
Η σύνδεση του κριτηρίου Hoek - Brown με το Mohr - Coulomb είναι πολύ χρήσιμη, καθώς σε πολλές εφαρμογές χρειαζόμαστε τις παραμέτρους c , ϕ της βραχώμαζας ακόμη κι αν δεν ισχύει ο νόμος Mohr - Coulomb για το εν λόγω υλικό. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται με 2 τρόπους:

α) Εξάγοντας τις παραμέτρους c , ϕ για τη συγκεκριμένη περιοχή τάσεων ($\sigma_{3,\pi}$) του έργου ορίζοντας την ισοδύναμη ευθεία περιβάλλουσα M-C που θα εφάπτεται στην καμπύλη H-B. Αν δίνεται λοιπόν το $\sigma_{3,\pi}$, υπολογίζουμε μέσω της 4.8 το $\sigma_{1,\pi}$. Άρα στο σημείο επαφής $\frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = \tan \omega$ και με παραγωγή της 4.8

ως προς σ_3 προκύπτει η γωνία ω . Γνωρίζοντας λοιπόν ένα σημείο και την κλίση της ευθείας μπορούμε να προσδιορίσουμε την εξίσωσή της σε όρους κυρίων τάσεων και ακολουθώντας σε όρους σ-τ. Τελικά έχουμε

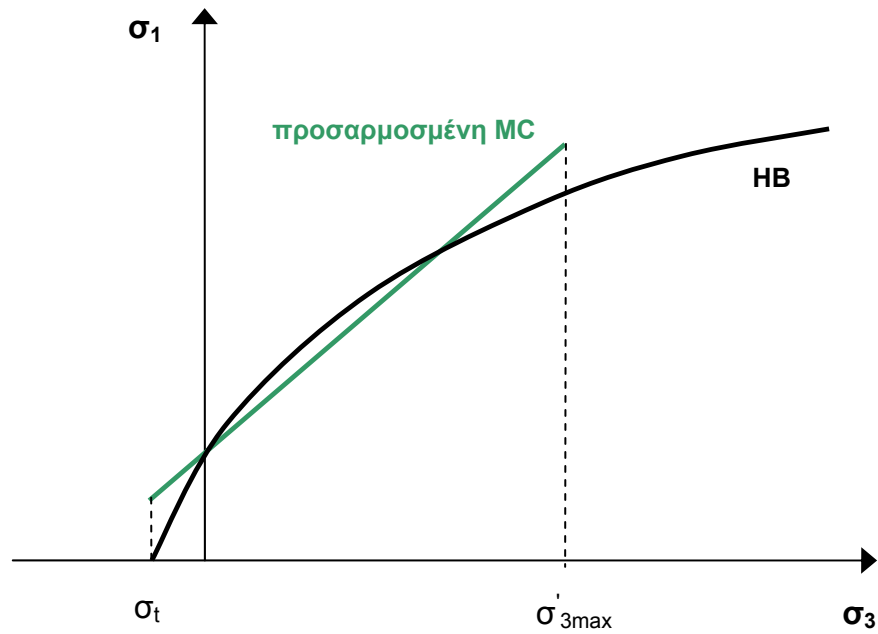
$$\phi = 2 \tan^{-1}(\sqrt{\tan \omega}) - 90^\circ \quad (4.12)$$

$$c = \frac{\sigma_1 \sqrt{\tan \omega} - \sigma_3 \sqrt{\tan \omega} - \sigma_1 \tan \phi - \sigma_3 \tan \phi \tan \omega}{1 + \tan \omega} \quad (4.13)$$



Διάγραμμα 4.3 – Α' τρόπος σύνδεσης των δύο κριτηρίων.

β) Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην εργασία των Hoek et al, 2002, προσαρμόζουμε με γραμμική παλινδρόμηση μία ευθεία στην καμπύλη του κριτηρίου Hoek - Brown από την εξίσωση της οποίας θα προκύψουν οι ζητούμενες παράμετροι. Για να προσαρμόσουμε όμως ευθεία σε καμπύλη πρέπει να ορίσουμε το διάστημα που μας ενδιαφέρει. Το κάτω όριο θα είναι ασφαλώς η εφελκυστική αντοχή σ_t ενώ το άνω όριο (σ'_{3max}) πρέπει να το επιλέξουμε ανάλογα με το που πιστεύουμε ότι θα κυμανθούν οι επί τόπου τάσεις του έργου.



Διάγραμμα 4.4 – Β' τρόπος σύνδεσης των δύο κριτηρίων.

Συγκεκριμένα για τις σήραγγες έχει προταθεί

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94} \quad (4.14)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν για την καμπύλη προσαρμογής θα ισχύει

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (4.15)$$

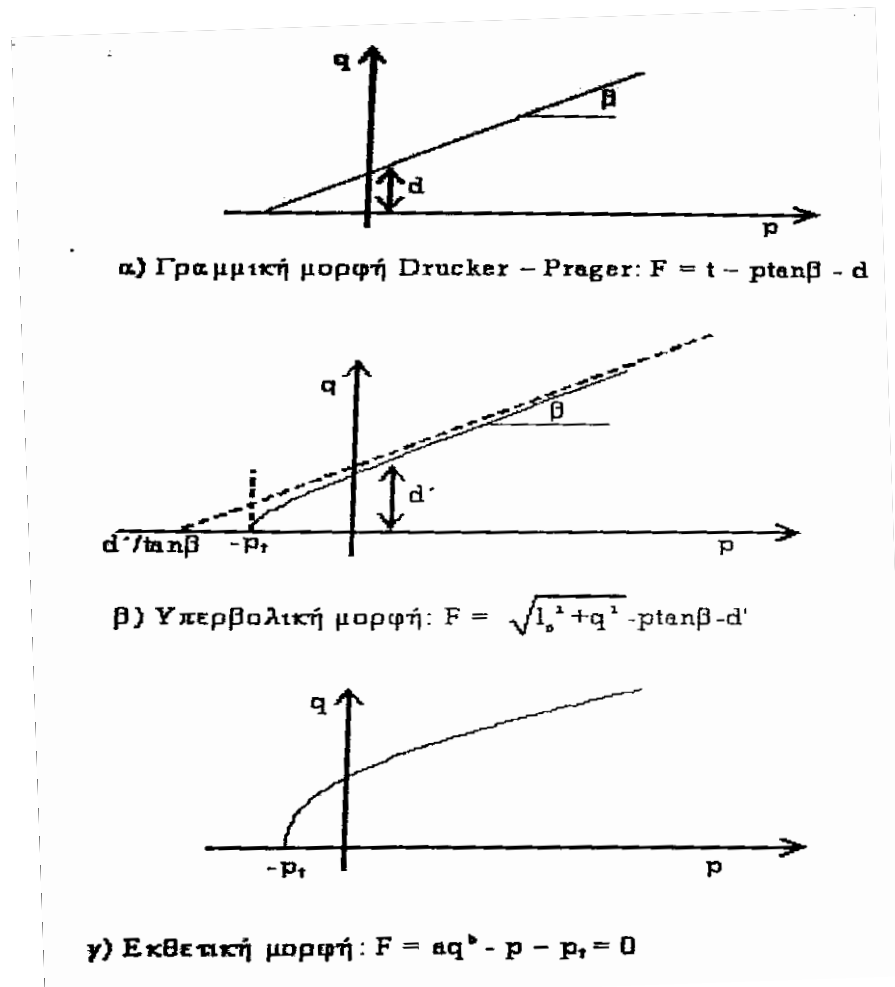
$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \quad (4.16)$$

με $\sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci}$

4.4.3 Drucker – Prager

Το κριτήριο αυτό εφαρμόζεται σπάνια τόσο στην εδαφομηχανική όσο και στη βραχομηχανική, παρόλα αυτά θα γίνει μία αναφορά σε αυτό διότι χρησιμοποιείται σε αρκετά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για να

εισάγει ερπυσμό στην προσομοίωση. Οι ακόλουθες μορφές επιφανειών αστοχίας (περιβάλλουσες) μπορούν να χρησιμοποιηθούν



Διάγραμμα 4.5 – Περιβάλλουσες Drucker-Prager.

Οι παράμετροι αντοχής που υπεισέρχονται είναι η συνοχή (d) και η γωνία τριβής (β) στο επίπεδο p - q (ορθών-διατμητικών τάσεων) οι οποίες συναρτήσκει των αντίστοιχων μεγεθών του κριτηρίου Mohr - Coulomb δίνονται από τις σχέσεις

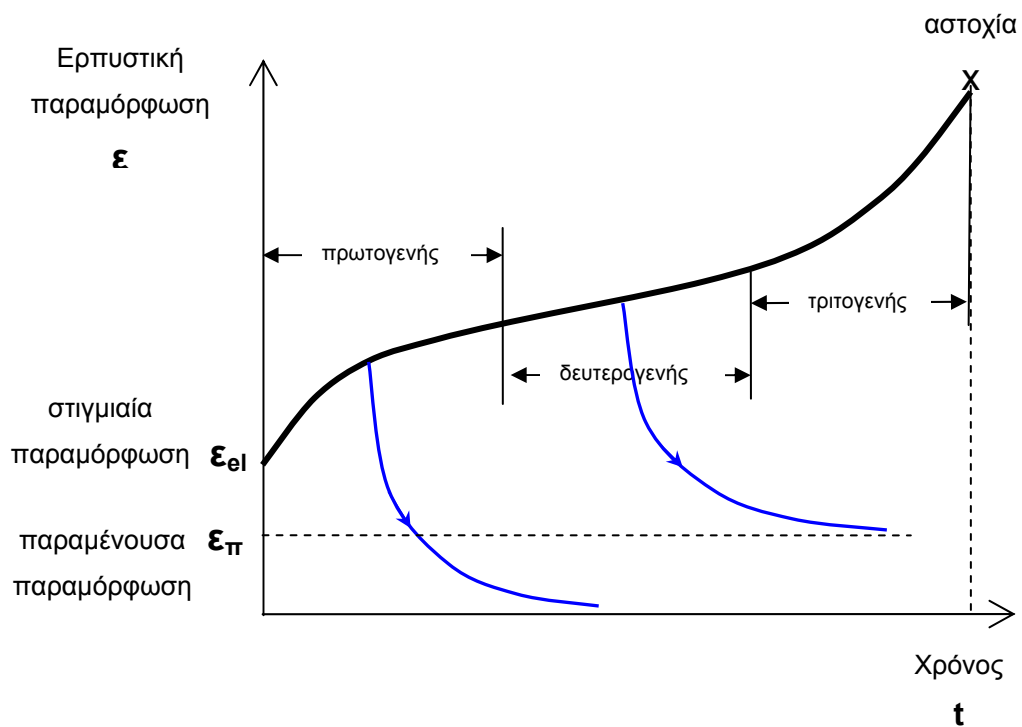
$$\tan \beta = \sqrt{3} \cdot \sin \phi \quad (4.17)$$

$$d = c \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \phi \quad (4.18)$$

κι έτσι γίνεται η σύνδεση μεταξύ του κριτηρίου Drucker-Prager με το Mohr-Coulomb.

4.5 Ο ερπυσμός στις βραχώμαζες

Ερπυσμός καλείται η συνεχής αύξηση της παραμόρφωσης ενός υλικού με την πάροδο του χρόνου, υπό σταθερό φορτίο. Σε μία σήραγγα, όταν αυτή η παραμόρφωση παρεμποδίζεται από έργα υποστήριξης, προκαλεί επιπλέον φόρτισή τους. Αυτή την περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η οποία δεν προβλέπεται από την κλασσική θεώρηση για τις συγκλίσεις της σήραγγας που έχουμε κάνει έως τώρα καλούμαστε να υπολογίσουμε και να την εντάξουμε στο πλαίσιο σχεδιασμού των μέτρων υποστήριξης. Ήδη έχουν γίνει προσπάθειες για πρόβλεψη της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της βραχώμαζας μέσω νόμων που προέκυψαν από πειράματα, αλλά και αναλυτικές θεωρήσεις. Κατόπιν των παραπάνω, έχει προκύψει η χαρακτηριστική καμπύλη ερπυσμού (Διάγραμμα 4.6) η οποία ισχύει με κάποιες διαφοροποιήσεις στα περισσότερα υλικά.



Διάγραμμα 4.6 – Τυπική καμπύλη ερπυσμού βραχώμαζας.

Αρχικά, ταυτόχρονα με την επιβολή του φορτίου έχουμε ανάπτυξη στιγμιαίας ελαστικής παραμόρφωσης. Κατόπιν το δοκίμιο εισέρχεται στο στάδιο του πρωτογενούς ερπυσμού, όπου οι παραμορφώσεις πραγματοποιούνται με φθίνοντα ρυθμό συναρτήσει του χρόνου. Το επόμενο στάδιο είναι αυτό του

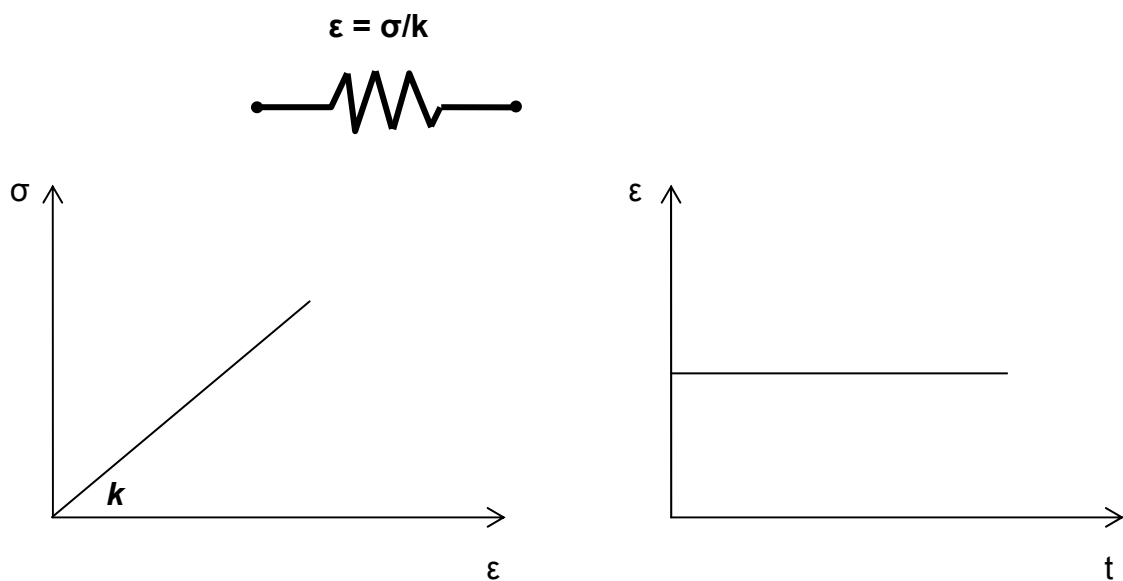
δευτερογενούς ερπυσμού, όπου ο ρυθμός αύξησης των παραμορφώσεων είναι σταθερός και τέλος έχουμε τον τριτογενή ερπυσμό, κατά τον οποίον ο ρυθμός των παραμορφώσεων είναι αύξων μέχρι την αστοχία. Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται επίσης ότι σε περίπτωση **αποφόρτισης** του δοκιμίου όσο αυτό βρίσκεται στο στάδιο πρωτογενούς ερπυσμού δεν έχουμε παραμένουσες παραμορφώσεις. Αντίθετα στο στάδιο του δευτερογενούς ερπυσμού η αποφόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση παραμένουσας παραμόρφωσης.

Οι ερπυστικές παραμορφώσεις επηρεάζονται από παράγοντες όπως το τασικό πεδίο, οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος, η υγρασία κλπ. κι έτσι η γενική μορφή της καμπύλης (Διάγραμμα 4.6) λαμβάνει ειδική μορφή όπου μπορεί κάποιο από τα στάδια που είδαμε παραπάνω έχει πιο έντονη παρουσία ή να απουσιάζει εντελώς. Αυτήν ακριβώς την καμπύλη ερπυσμού για τις εκάστοτε συνθήκες του έργου καλούμαστε να προσεγγίσουμε με προσομοιώματα σαν αυτά που παρουσιάζονται παρακάτω ώστε τελικά να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την εξέλιξη της πίεσης επί της σήραγγας στη διάρκεια ζωής της.

4.5.1 Αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης του ερπυσμού

Κατά καιρούς έχουν εισαχθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα προκειμένου να περιγραφεί το φαινόμενο του ερπυσμού. Αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τα ιξωδοελαστικά και τα ιξωδοελαστοπλαστικά. Στηρίζονται σε απλούστερα μηχανικά στοιχεία όπως το ελατήριο (η έννοια της ελαστικότητας - Διάγραμμα 4.7) και ο αποσβεστήρας (η έννοια του ιξώδους - Διάγραμμα 4.8) των οποίων ο συνδυασμός περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού με την πάροδο του χρόνου.

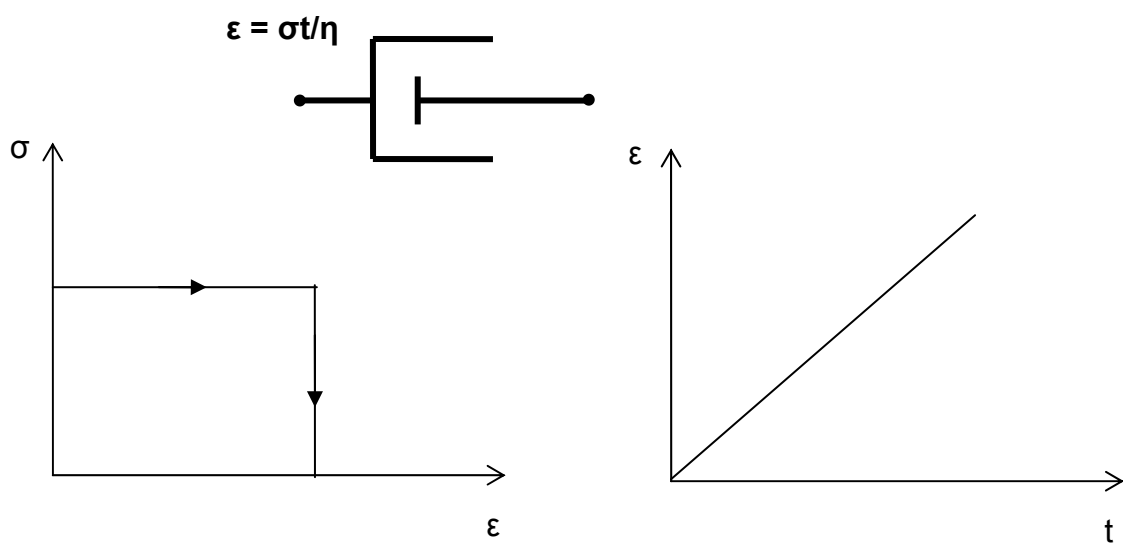
ΕΛΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ



Διάγραμμα 4.7 – Στοιχείο ελατηρίου (Hooke).

Παραμόρφωση ανάλογη **μόνο** της ασκούμενης τάσης, ανεξάρτητη του χρόνου. Όταν το φορτίο παύει να ασκείται το ελατήριο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, έχουμε δηλαδή μηδενική αποθήκευση ενέργειας.

ΙΞΩΔΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

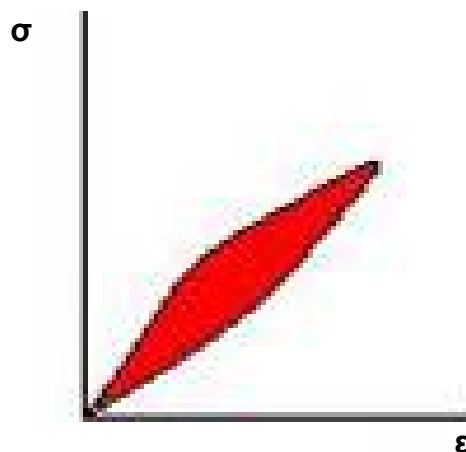


Διάγραμμα 4.8 – Στοιχείο αποσβεστήρα (Newton).

Παραμόρφωση ανάλογη της ασκούμενης τάσης **και** του χρόνου. Υπό σταθερή τάση, η παραμόρφωση αυξάνεται με σταθερό ρυθμό σε σχέση με το χρόνο. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα παραμόρφωσης – χρόνου που προκύπτουν από τα δύο μοντέλα (ελαστικό και ιξώδες) με το που αντιπροσωπεύει το πραγματικό διάγραμμα ερπυσμού βλέπουμε ότι από μόνα τους δεν αρκούν για να περιγράψουν επαρκώς το φαινόμενο. Το ιξώδες μοντέλο εισάγει το σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης που είναι χαρακτηριστικό του δευτερογενούς ερπυσμού, αλλά υστερεί ως προς το ότι δεν εμφανίζεται η αρχική ελαστική παραμόρφωση, στοιχείο που φαίνεται στο διάγραμμα του ελαστικού μοντέλου. Είναι λοιπόν εμφανές ότι χρειάζεται συνδυασμός των παραπάνω πρωταρχικών μοντέλων για να προσεγγίσουμε επαρκώς το φαινόμενο.

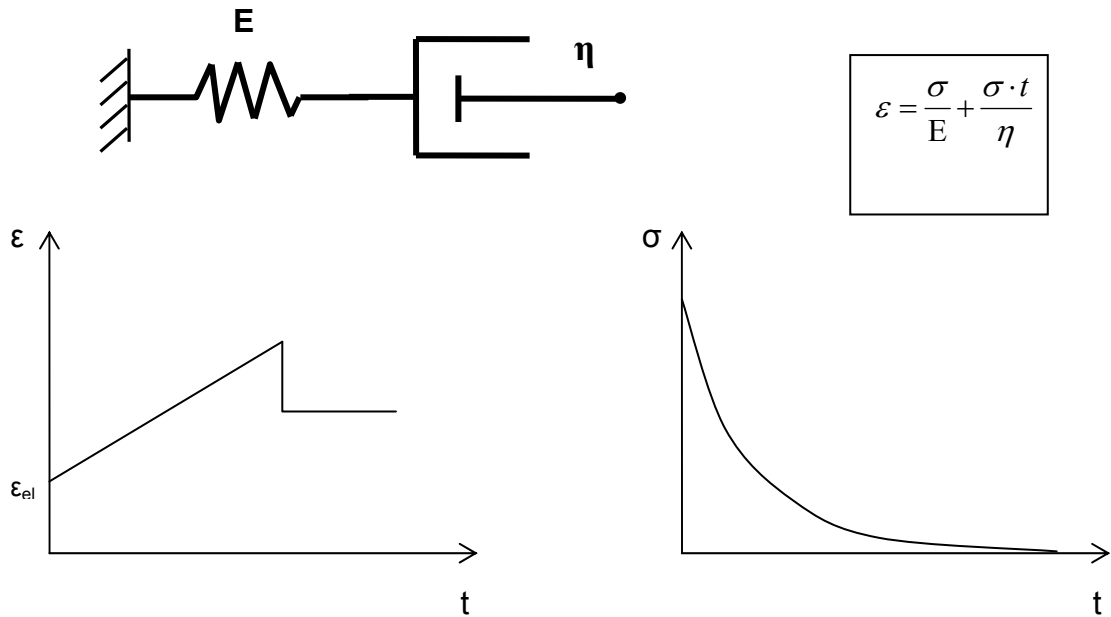
4.5.1.1 Ιξωδοελαστικά μοντέλα

Πρόκειται για απλά ρεολογικά μοντέλα που συνδυάζουν το μηχανισμό του ελατηρίου και του αποσβεστήρα για να προσομοιάσουν την ερπυστική συμπεριφορά. Χαρακτηριστικό τους είναι ότι το διάγραμμα επιβαλόμενης τάσης – παραμόρφωσης παρουσιάζει βρόχο υστέρησης ο οποίος αντιπροσωπεύει την απώλεια ενέργειας ανά κύκλο φορτίσεως (Διάγραμμα 4.9).



Διάγραμμα 4.9 – Ο βρόχος υστέρησης αντιπροσωπεύει την απώλεια ενέργειας.

ΜΟΝΤΕΛΟ MAXWELL

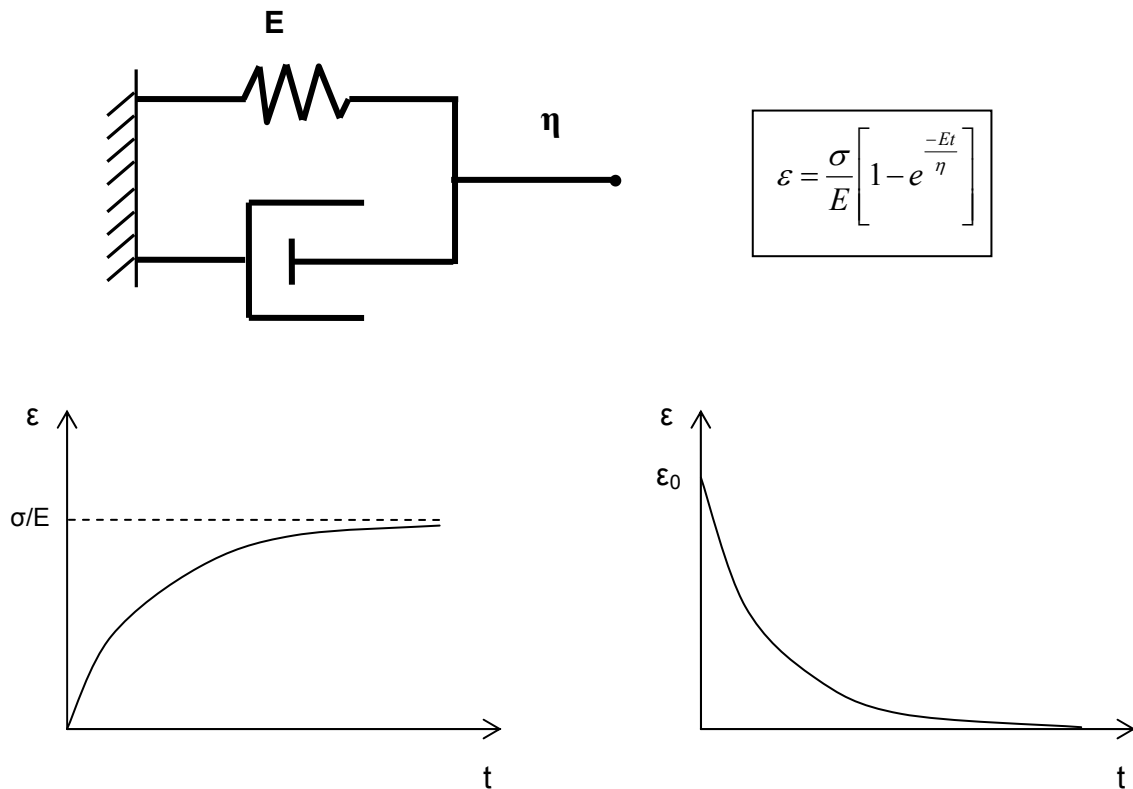


Διάγραμμα 4.10 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Maxwell.

Αποτελείται από ένα ελαστικό και ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα εν σειρά. Όταν στο στοιχείο εφαρμοστεί τάση σ , αυτό θα αναλάβει αυτόματα ελαστική παραμόρφωση $\varepsilon_{el} = \sigma/E$ και στη συνέχεια θα αυξάνει με σταθερό ρυθμό. Μετά την αφαίρεση του φορτίου η ελαστική παραμόρφωση χάνεται, ενώ παραμένει η παραμόρφωση του ιξώδους στοιχείου. Εάν τη χρονική στιγμή $t=0$ εφαρμόσουμε μία αρχική παραμόρφωση $\varepsilon=\varepsilon_0$ στο στοιχείο θα αναπτυχθεί μία τάση $E \cdot \varepsilon_0$ η οποία με το πέρασμα του χρόνου μειώνεται εκθετικά (φαινόμενο χαλάρωσης) σύμφωνα με τον τύπο

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 \cdot e^{\frac{-tE}{\eta}} \quad (4.19)$$

MONTELO KELVIN



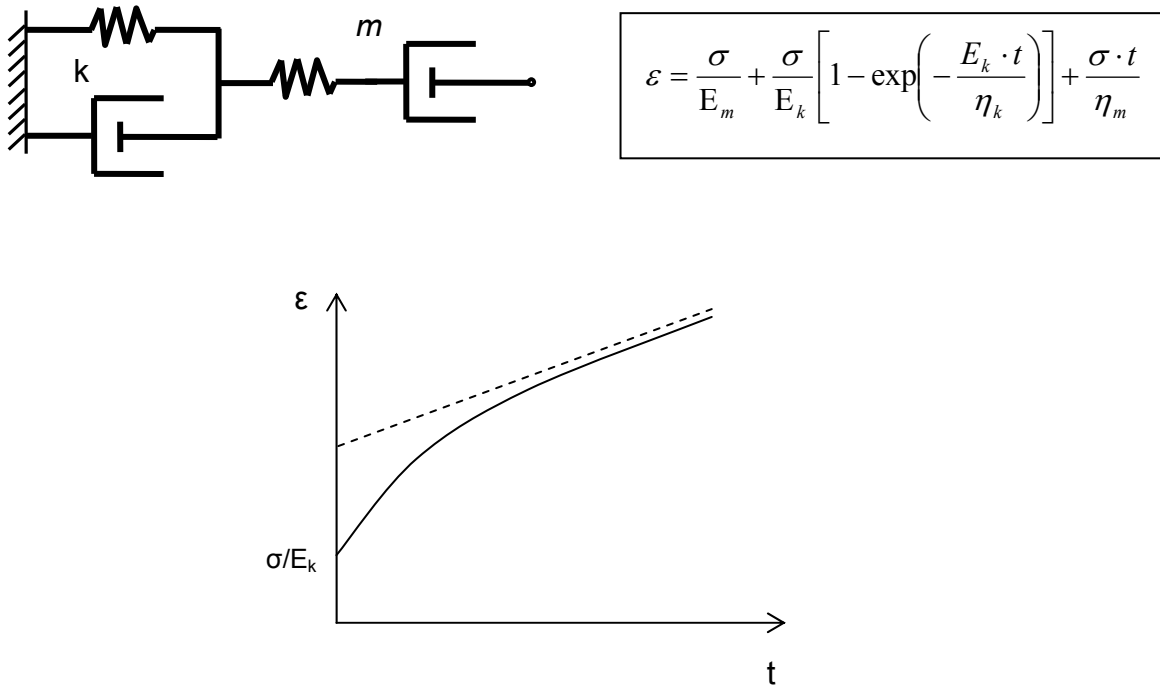
Διάγραμμα 4.11 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Kelvin.

Αποτελείται από ένα ελαστικό κι ένα ιξώδες στοιχείο συνδεδεμένα εν παραλλήλω. Λόγω της συνδεσμολογίας των δύο στοιχείων, θα έχουν κοινή παραμόρφωση, άρα η αρχική ελαστική παραμόρφωση που θέλει στιγμιαία να πάρει το ελαστικό στοιχείο θα παρεμποδιστεί από το ιξώδες. Αυτό φαίνεται και στο διάγραμμα ε - t που ξεκινάει από το 0. Αρχικά λοιπόν ο ρυθμός παραμόρφωσης καθορίζεται από το ιξώδες στοιχείο, όμως όσο αυξάνει το t η παραμόρφωση υποδεικνύεται από το ελαστικό στοιχείο και τελικά τείνει να προσεγγίσει την ελαστική παραμόρφωση σ/E . Εάν τη χρονική στιγμή $t=0$ απομακρύνουμε την επιβαλλόμενη τάση (η οποία έχει προκαλέσει παραμόρφωση ε_0), τότε η εξίσωση θα πάρει τη μορφή

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{\frac{-tE}{\eta}} \quad (4.20)$$

Η μορφή αυτής της σχέσης φαίνεται στο δεύτερο Διάγραμμα 4.11 το οποίο είναι ουσιαστικά μία καμπύλη αποφόρτισης. Παρατηρούμε ότι για $t \rightarrow \infty$, $\varepsilon \rightarrow 0$, δεν υπάρχει δηλαδή παραμένουσα παραμόρφωση.

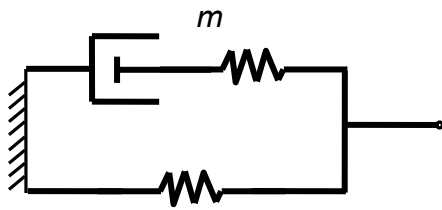
ΜΟΝΤΕΛΟ BURGERS



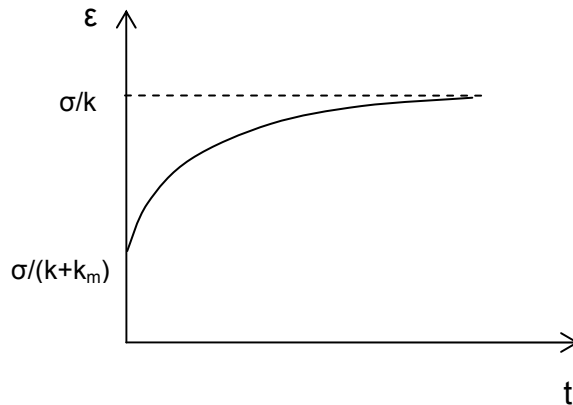
Διάγραμμα 4.12 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Burgers.

Αποτελείται από ένα στοιχείο Maxwell κι ένα στοιχείο Kelvin συνδεδεμένα εν σειρά. Η μορφή του διαγράμματος ε - t που προκύπτει περιγράφει πολύ καλά τον πρωτεύοντα και δευτερεύοντα ερπυσμό, καθώς αποτελείται από τους 2 κλάδους, έναν με φθίνοντα ρυθμό παραμόρφωσης και έναν με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης. Επίσης, υπάρχει και το στοιχείο της στιγμιαίας ελαστικής παραμόρφωσης γεγονός που κάνει το μοντέλο Burgers ίσως το πληρέστερο από τα τρία που εξετάσαμε.

MONTELO ROYTING-THOMSON



$$\varepsilon = \sigma \left[\frac{1}{k} \left(1 - e^{\frac{-tkk_m}{\eta_m(k_2+k)}} \right) + \frac{1}{k_m + k} e^{\frac{-tkk_m}{\eta_m(k_m+k)}} \right]$$



Διάγραμμα 4.13 – Συμβολισμός και διαγράμματα συμπεριφοράς του στοιχείου Poyting-Thomson.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, το μοντέλο αποτελείται από ένα στοιχείο Maxwell κι ένα ελατήριο συνδεδεμένα εν παραλλήλω. Όταν ασκήσουμε τάση σ , θα αντισταθούν τα δύο ελατήρια δίνοντας μία αρχική στιγμιαία παραμόρφωση $\sigma/(k+k_m)$. Με την πάροδο του χρόνου όμως το ελατήριο Maxwell μεταβιβάζει μέρος της τάσης στον αποσβεστήρα κι έτσι το σύστημα λαμβάνει και μία μόνιμη παραμόρφωση η οποία θα εμφανιστεί σε περίπτωση αποφόρτισης. Τελικά η παραμόρφωση τείνει προς την ελαστική παραμόρφωση του απλού ελατηρίου (σ/k) καθώς αυτό είναι το κρίσιμο διότι το ελατήριο Maxwell μεταβιβάζει την όποια πρόσθετη φόρτιση στον αποσβεστήρα. Συγκρίνοντας το διάγραμμα παραμόρφωσης – χρόνου που προκύπτει για το στοιχείο Poyting-Thomson με την πρότυπη καμπύλη ερπυσμού (Διάγραμμα 4.6) παρατηρούμε ότι τα δύο πρώτα στάδια αυτού περιγράφονται ικανοποιητικά από το εν λόγω μοντέλο.

4.5.1.2 Ιξωδοελαστοπλαστικά μοντέλα

Τα μοντέλα αυτά επεκτείνουν τη γραμμική ιξωδοελαστικότητα για να καλύψουν περιπτώσεις όπου το τασικό πεδίο είναι υψηλό και το γεωυλικό πλησιάζει το

ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ

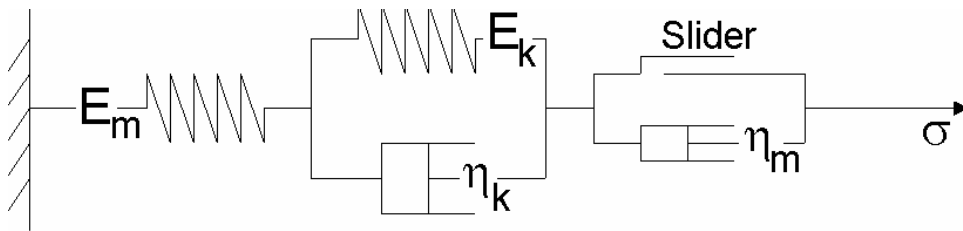
όριο διαρροής. Ένα τυπικό τέτοιο μοντέλο αποτελείται από ένα στοιχείο Kelvin σε σειρά με ένα στοιχείο Bingham. Αν η εφαρμοζόμενη τάση δεν έχει ξεπεράσει το όριο διαρροής του υλικού, η ερπυστική συμπεριφορά είναι ίδια με αυτή ενός στοιχείου Kelvin. Αν όμως το υλικό έχει διαρρεύσει, κινητοποιείται η μη γραμμική, ελαστοπλαστική συμπεριφορά, που εκφράζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

Για $\sigma < \sigma_y$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k t}{3\eta_k}\right) \right] \quad (4.21)$$

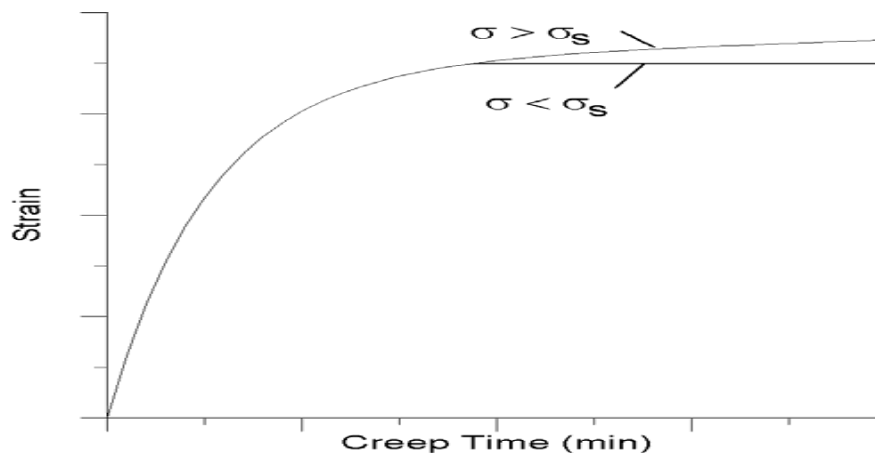
Για $\sigma > \sigma_y$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_m} + \frac{\sigma}{E_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_k t}{3\eta_k}\right) \right] + \frac{(\sigma - \sigma_y)t}{3\eta_m} \quad (4.22)$$



Διάγραμμα 4.14 – Παράδειγμα ιξωδοελαστοπλαστικού στοιχείου (Bingham).

Τα ιξωδοελαστοπλαστικά μοντέλα χρησιμοποιούν εκτός των βασικών στοιχείων Hooke (ελαστικό) και Newton (ιξώδες) και το στοιχείο St. Venant (επαφή τριβής) που εισάγει τη μη γραμμικότητα στο συνολικό μοντέλο.



Διάγραμμα 4.15 – Εξέλιξη της τάσης συναρτήσει του χρόνου σε ένα στοιχείο Bingham.

4.5.2 Πειραματικοί νόμοι

Ένας εναλλακτικός τρόπος να περιγραφεί το φαινόμενο του ερπυσμού είναι η προσαρμογή κάποιας μορφής καμπύλης σε πειραματικά δεδομένα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή εμπειρικών σχέσεων, το βασικό μειονέκτημα των οποίων είναι ότι οι παράμετροι που υπεισέρχονται στις εξισώσεις δεν έχουν φυσικό νόημα κι έτσι ένας μεγάλος αριθμός σχέσεων μπορούν να προταθούν και να ταιριάζουν ικανοποιητικά στα πειραματικά δεδομένα (Εικόνα 4.2).

1	$\varepsilon = At^m$
2	$\varepsilon = A + Bt^m$
3	$\varepsilon = A + Bt + Ct^n$
4	$\varepsilon = A + Bt^m + Ct^n + Dt^p$
5	$\varepsilon = At^m + Bt^n + Ct^p + Dt^q + \dots$
6	$\varepsilon = A \log t$
7	$\varepsilon = A + B \log t$
8	$\varepsilon = A \log(B + t)$
9	$\varepsilon = A \log(B + Ct)$
10	$\varepsilon = A + B \log(C + t)$
11	$\varepsilon = A + B \log(t + Dt)$
12	$\varepsilon = At/(1 + Bt)$
13	$\varepsilon = A + B \sinh(Ct^n)$
14	$\varepsilon = A + Bt - C \exp(-Dt)$
15	$\varepsilon = At + B[1 - \exp(-Ct)]$
16	$\varepsilon = A[1 - \exp(-Bt)] + C[1 - \exp(-Dt)]$
17	$\varepsilon = A + B \log t + Ct^n$
18	$\varepsilon = A + Bt^n + Ct$
19	$\varepsilon = A + B \log t + Ct$
20	$\varepsilon = \log t + Bt^n + Ct$
21	$\varepsilon = A \log[1 + (t/B)]$
22	$\varepsilon = A[1 - \exp(B - Ct^n)]$
23	$\varepsilon = A[1 - \exp(-Bt)]$
24	$\varepsilon = A \exp(Bt)$

Εικόνα 4.2 – Τυπικές μορφές εμπειρικών ερπυστικών νόμων.

Στο Διάγραμμα 4.6 διακρίνουμε τους τρεις κλάδους του ερπυσμού. Μαθηματικά αυτό θα μπορούσε να περιγραφεί από μία σχέση όπως η παρακάτω:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t) \quad (4.23)$$

όπου ε_e η αρχική (ελαστική) παραμόρφωση που είναι σταθερή και εξαρτάται από τις παραμέτρους της βραχύμαζας, $\varepsilon_1(t)$ ο πρωτεύων ερπυσμός, δηλαδή μία συνάρτηση με φθίνοντα ρυθμό αύξησης ως προς το χρόνο, $\varepsilon_2(t)$ ο δευτερεύων ερπυσμός, μία συνάρτηση με σταθερό ρυθμό αύξησης ως προς το χρόνο και $\varepsilon_3(t)$, μία συνάρτηση με αύξοντα ρυθμό αύξησης ως προς το χρόνο. Στα υπόγεια έργα προσπαθούμε να αποφύγουμε το πέτρωμα να εισέλθει στο στάδιο του τριτογενούς ερπυσμού, ως εκ τούτου δεν τον εξετάζουμε στις

προσομοιώσεις. Για τον πρωτεύοντα ερπυσμό χρησιμοποιούνται ευρέως οι εξής νόμοι

ο Power-law

$$\varepsilon_1 = \frac{A}{1+m} q^n t^{m+1} \quad (4.24)$$

ο λογαριθμικός νόμος

$$\varepsilon_1 = Aq \ln t \quad (4.25)$$

Ο νόμος του Lomnitz

$$\varepsilon_1 = Aq \ln(1 + at) \quad (4.26)$$

Για το δευτερογενή ερπυσμό, η συνάρτηση είναι της μορφής $\varepsilon = Vt$, αφού όπως προαναφέρθηκε $\varepsilon' = \text{σταθ}$. Για τον προσδιορισμό της σταθεράς V έχουν προταθεί επίσης διάφορες σχέσεις, ενδεικτικά αναφέρονται οι παρακάτω

$$V = V_0 e^{\frac{\sigma}{\sigma_0}} \quad (4.27)$$

$$V = V_0 \sinh\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (4.28)$$

$$V = V_0 \sigma^n \quad (4.29)$$

5. ΧΡΟΝΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΕΝΗ ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Η κλασσική, αναλυτική θεώρηση για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων στο τοίχωμα μιας σήραγγας – όπως την είδαμε στο Κεφάλαιο 2 – δε λαμβάνει υπόψη της τον χρονικό παράγοντα, αλλά μόνο τον χωρικό. Δηλαδή εξετάζει μόνο τις συγκλίσεις που οφείλονται στην εκσκαφή και προχώρηση του μετώπου μέσω των καμπυλών Panet και της καμπύλης σύγκλισης – αποτόνωσης (Διάγραμμα 3.1, Διάγραμμα 2.3) και αγνοεί τις συγκλίσεις λόγω των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων, με βασικότερο τον ερπυσμό. Πράγματι, για τη διαστασιολόγηση της προσωρινής υποστήριξης συνήθως αγνοείται η επίδρασή του ή εντάσσεται με τη μορφή αυξημένων συντελεστών ασφαλείας, καθώς το διάστημα που μεσολαβεί μέχρι την τοποθέτηση της μόνιμης υποστήριξης είναι πολύ μικρό για να εκδηλωθούν φαινόμενα ερπυσμού τα οποία συνήθως χρειάζονται μήνες ή και χρόνια για να δώσουν υπολογίσιμες μετακινήσεις. Έτσι μέχρι και σήμερα ο ερπυσμός αντιμετωπίζεται χωριστά, επιλέγοντας ένα μοντέλο (θεωρητικό ή εμπειρικό, βλ. Κεφάλαια 4.5.1, 4.5.2), κάνοντας αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία και καταλήγοντας σε μία προστιθέμενη φόρτιση της μόνιμης επένδυσης για ένα επιλεγμένο βάθος χρόνου (π.χ. 50 έτη). Για να αντιμετωπιστούν, όμως, περιπτώσεις όπου η περιβάλλουσα βραχύμαζα είναι πολύ πτωχή και ως εκ τούτου εμφανίζει σεβαστές μετακινήσεις λόγω ερπυσμού από νωρίς, αλλά και για να εντάξουν τα ερπυστικά φαινόμενα σε μία ενοποιημένη θεωρία σύγκλισης των σηράγγων, πολλοί ερευνητές έχουν αποπειραθεί να επαναδιατυπώσουν τη θεωρία των καμπυλών σύγκλισης αποτόνωσης ώστε να περιλαμβάνει και το χρονικό παράγοντα (Sulem et al, 1987; Pan and Dong, 1991). Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από τις μεθοδολογίες που έχουν προταθεί.

5.1 Προσομοίωση με βάση μετρήσεις συγκλίσεων (αριθμητικές λύσεις)

Σε αυτό τον τρόπο προσέγγισης του προβλήματος, ο ερευνητής έχει στη διάθεσή του από τις γεωδαιτικές μετρήσεις και για κάθε διατομή τη σύγκλιση (d), την απόσταση της διατομής από το μέτωπο (x) και το χρονικό διάστημα που έχει περάσει από την εγκατάσταση των μετρητικών σταθμών, το οποίο

σχεδόν συμπίπτει με το χρόνο διάνοιξης της διατομής. Έχει επίσης στη διάθεσή του από τη βιβλιογραφία διάφορα μοντέλα που έχουν προταθεί, εξισώσεις που δίνουν τη μορφή του διαγράμματος σύγκλισης - χρόνου ή σύγκλισης - απόστασης από το μέτωπο. Αρχικά λοιπόν καλείται να επιλέξει κάποιο από αυτά ανάλογα με το πιο προσαρμόζεται καλύτερα στις συνθήκες του εκάστοτε προβλήματος (Ιξώδες, Kelvin, Ιξωδοπλαστικό κλπ.) και κατόπιν – μέσω αριθμητικών αναλύσεων – να προσδιορίσει τις παραμέτρους των εξισώσεων. Βασική αρχή αυτής της θεώρησης είναι ότι στις σχέσεις που έχουν προταθεί για να περιγράψουν την εξέλιξη των μετακινήσεων μίας σήραγγας διαχωρίζεται σαφώς ο χωρικός παράγοντας (δηλ. οι μετακινήσεις που οφείλονται στην προχώρηση του μετώπου – advancing face effect) από το χρονικό (δηλ. οι μετακινήσεις που οφείλονται στα χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα – time-dependent behavior effect), με αποτέλεσμα να έχουν τη μορφή

$$d(x,t) = f(x) + g(t) \text{ ή } d(x,t) = f(x) \cdot g(t) \text{ κλπ.} \quad (5.1)$$

Επισημαίνεται ότι το γεγονός ότι οι δύο συνιστώσες της συγκλίσεως θεωρούνται ανεξάρτητες μεταξύ τους δεν είναι απόλυτα ακριβές αλλά εξαιτίας της πολυπλοκότητας του φαινομένου αποτελεί μία εύλογη παραδοχή.

Οι συναρτήσεις f , g λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία κατά βούληση, ανάλογα με το ποια μορφή ταιριάζει περισσότερο στα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι για τη συνάρτηση f θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η σχέση του Panet (1995), βλ. Εξίσωση 3.1 ή για ελαστικό υλικό η

$$d(x) = dx^* \left(1 - e^{-\frac{x}{X}} \right) \quad (5.2)$$

ενώ για ελαστοπλαστικό υλικό η

$$d(x) = dx^* \left(1 - \left(\frac{X}{x+X} \right)^2 \right) \quad (5.3)$$

όπου X , dx^* παράμετροι προς προσδιορισμό. Στις συναρτήσεις αυτές βέβαια θα πρέπει $\lim_{x \rightarrow \infty} d(x) = dx^*$ άρα γίνεται κατανοητό ότι το dx^* είναι η τελική τιμή της σύγκλισης της χωρικής συνιστώσας για μηδενική εσωτερική πίεση ($\lambda=1$).

Για τη συνάρτηση g έχουν προταθεί οι σχέσεις

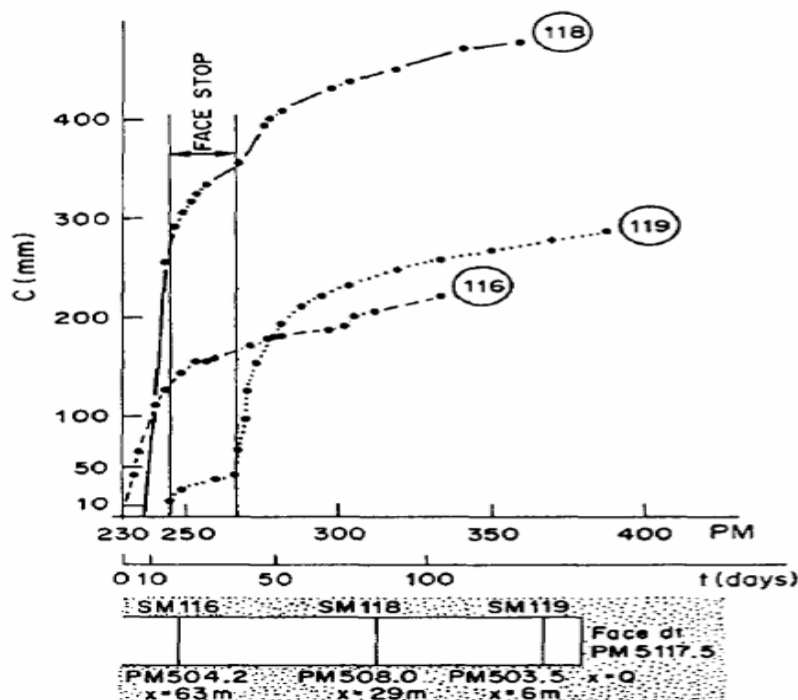
$$d(t) = A \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (5.4)$$

που ισχύει για υλικό με ιξωδοελαστική συμπεριφορά Kelvin, αλλά και η

$$d(t) = A \cdot \log \left(1 + \frac{t}{T} \right) \quad (5.5)$$

όπου A , T παράμετροι προς προσδιορισμό.

Όταν το μέτωπο βρίσκεται πλησίον της υπό εξέταση διατομής, καθοριστικός παράγοντας είναι ο χωρικός, δηλαδή η απόσταση από το μέτωπο (x), ενώ όταν το μέτωπο βρίσκεται μακριά ($x > 2D$ κατά την κλασσική θεώρηση), οι συγκλίσεις λόγω προχώρησης του μετώπου έχουν ολοκληρωθεί και οποιαδήποτε περαιτέρω σύγκλιση θα οφείλεται αποκλειστικά στο χρονικό παράγοντα. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Διάγραμμα 5.1.



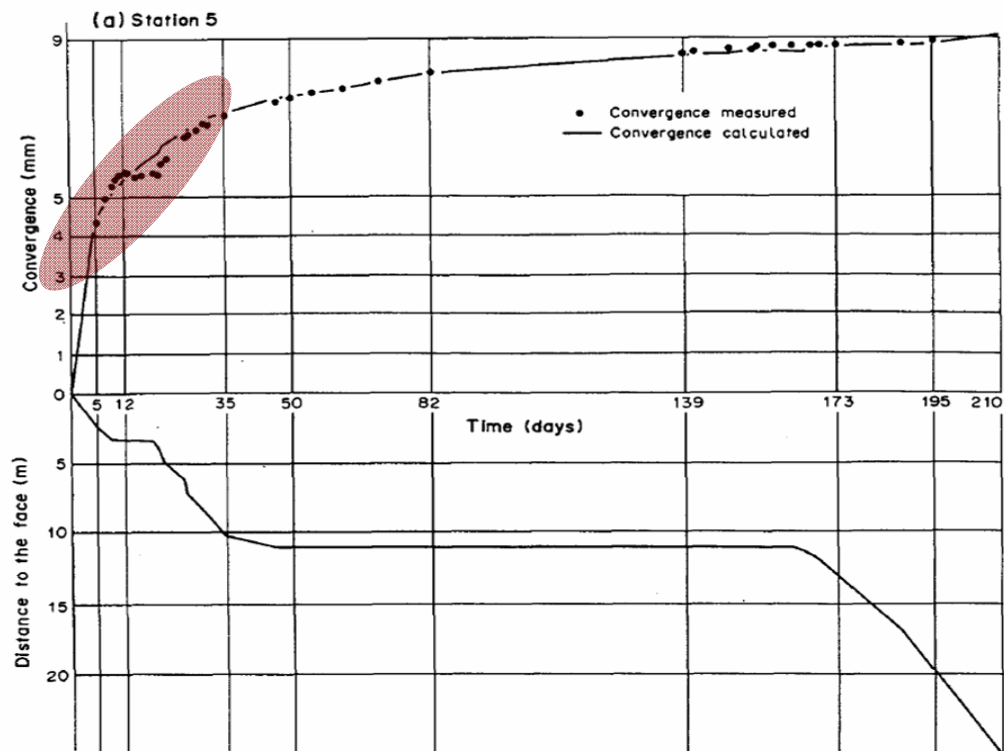
Διάγραμμα 5.1 – Η επίδραση της παύσης της εκσκαφής σε 3 διαφορετικές διατομές ελέγχου.

Παρατηρούμε ότι στη διατομή 116 που απέχει πολύ από το μέτωπο η παύση της εκσκαφής δεν είχε σχεδόν καμία επίδραση, καθώς οι παραμορφώσεις ούτως ή άλλως οφείλονταν στον ερπυσμό και συνέχισαν να εξελίσσονται

κανονικά. Αντίθετα στη διατομή 119 που βρίσκεται πολύ κοντά στο μέτωπο υπήρξε έντονη αυξομείωση (σκαλοπάτι) στο ρυθμό των παραμορφώσεων, διότι κατά την εκσκαφή αυτές καθορίζονταν από την προχώρηση του μετώπου με έντονο ρυθμό, ενώ κατά την παύση της καθορίζονταν από τον ερπυσμό, που ο ρυθμός του είναι πολύ πιο ήπιος.

5.1.1 Η απόσταση επιρροής του μετώπου

Όταν μία διατομή βρίσκεται εντός του πεδίου επιρροής του μετώπου ($0 < x < 4D$, βλ. Κεφάλαιο 3.1) η περιβάλλουσα βραχόμαζα δεν έχει αναλάβει πλήρη φορτία ($\lambda < 1$, βλ. Διάγραμμα 2.1) κι έτσι η συμβολή του ερπυσμού, ο οποίος εξαρτάται από την επιβαλλόμενη τάση, είναι μικρή. Έτσι από τα πρώτα σημεία του διαγράμματος (Διάγραμμα 5.2) μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους της συνάρτησης $f(x)$, γεγονός που θα επιταχύνει την προσομοίωση καθώς δε θα χρειαστεί να προσδιορίσουμε με την ανάλυση και τις παραμέτρους του χρόνου (A, T) και του χώρου (dx^*, X) μαζί.



Διάγραμμα 5.2 – Σύγκλιση προς χρόνο και προς την απόσταση από το μέτωπο.

5.2 Προσομοίωση με αναλυτικά μοντέλα (κλειστές λύσεις)

Ένας άλλος τρόπος να προσεγγιστεί το πρόβλημα της χρονικά εξαρτημένης σύγκλισης σήραγγων είναι με επέκταση της «κλασσικής» θεωρίας που συναντήσαμε στο Κεφάλαιο 1, ώστε να περιλαμβάνει και τα ερπυστικά φαινόμενα. Μία τέτοια λύση έχουν δώσει οι Sulem et al, 1985, η οποία παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια.

Αρχικά θεωρούμε ότι η προχώρηση του μετώπου οδηγεί σε μία σταδιακή ακτινική φόρτιση του τοιχώματος της σήραγγας σύμφωνα με τη σχέση

$$\sigma_r = (\lambda - 1)\sigma^0 \quad (5.6)$$

Δηλαδή ο συντελεστής αποτόνωσης των τάσεων παίρνει τιμές από μηδέν έως 1 καθώς προχωράει το μέτωπο, έχουμε

$$\lambda = \lambda(x) \quad (5.7)$$

και θεωρούμε σταθερό ρυθμό προχώρησης του μετώπου

$$x(t) = v \cdot t \quad (5.8)$$

Σχετικά με τη ρεολογική συμπεριφορά της βραχώμαζας, οι συγγραφείς επέλεξαν να την προσομοιώσουν μία σχέση της μορφής

$$\varepsilon^c = g(\sigma) \cdot f(t) \quad (5.9)$$

$$g(\sigma) = \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G_f} \right)^n \quad (5.10)$$

Όπου G_f το ερπυστικό μέτρο διάτμησης. Είναι ένα απομειωμένο μέτρο διάτμησης και εκφράζει την αντίσταση στην ερπυστική παραμόρφωση.

Για λόγους απλοποίησης, έχει ληφθεί στην επίλυση $n=1$ δηλαδή γραμμικός νόμος αύξησης των παραμορφώσεων ως προς την εκτροπική τάση ($\sigma_\theta - \sigma_r$).

Άρα για τις ακτινικές και εφαπτομενικές ερπυστικές παραμορφώσεις θα ισχύει

$$\varepsilon_r^c = -\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G_f} f(t) \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{\theta}^c = \frac{\sigma_{\theta} - \sigma_r}{4G_f} f(t) \quad (5.12)$$

$f(t)$ μία αύξουσα συνάρτηση του χρόνου που υπακούει στις συνοριακές συνθήκες $f(0)=0$ και $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t)=1$

Με την παραπάνω θεώρηση, η ερπυστική παραμόρφωση εξαρτάται μόνο από την επιβαλλόμενη τάση στον εξεταζόμενο χρόνο κι όχι στη χρονοϊστορία της φόρτισης, το γεωϋλικό δεν έχει μνήμη.

Για λόγους απλοποίησης, έχει ληφθεί στην επίλυση $n=1$ δηλαδή γραμμικός νόμος μείωσης των τάσεων με την πάροδο του χρόνου.

Έτσι για τη συνολική παραμόρφωση θα ισχύει

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c \quad (5.13)$$

όπου ε^e η ελαστική παραμόρφωση, ε^p η πλαστική και ε^c η ερπυστική. Επίσης ισχύει η παραδοχή της συνόγκου παραμόρφωσης που συναντήσαμε στο πρώτο κεφάλαιο, δηλαδή

$$\dot{\varepsilon}_r + \dot{\varepsilon}_{\theta} = 0 \quad (5.14)$$

Τέλος το υλικό διαρρέει σύμφωνα με το νόμο Mohr-Coulomb

$$\sigma_{\theta} = \sigma_c + k_p \cdot \sigma_r \quad (5.15)$$

$$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

5.2.1 Ακτινικές μετατοπίσεις σε ανυποστήρικτο τοίχωμα

Όταν $\lambda = \lambda_e$, η βραχόμαζα στο για $r=a$ έχει διαρρεύσει, άρα οι ελαστικές τάσεις στο τοίχωμα πρέπει επίσης να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις παρακάτω σχέσεις

$$\sigma_r = \sigma^0 (1 - \lambda_e) \quad (5.16)$$

$$\sigma_r = \sigma^0 (1 - \lambda_e)$$

και την Εξίσωση 5.15

Αυτό συνεπάγεται ότι ο βαθμός αποτόνωσης όταν η βραχόμαζα αρχίζει να διαρρέει στο τοίχωμα ισούται με

$$\lambda_e = \frac{1}{k_p + 1} \left(k_p - 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma^0} \right) \quad (5.17)$$

▪ Για $\lambda < \lambda_e$

Δεν έχουμε ανάπτυξη πλαστικής ζώνης, άρα $\varepsilon^p = 0 \rightarrow \varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c$

Από το νόμο του Hooke, έχουμε για τις ελαστικές παραμορφώσεις

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r^e &= \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_r - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_\theta \\ \varepsilon_\theta^e &= \frac{-\nu(1+\nu)}{E} \sigma_r + \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_\theta \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

Άρα η συνολική παραμόρφωση θα είναι

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_r - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \sigma_\theta - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G_f} f(t) \\ \varepsilon_\theta &= \frac{-\nu(1+\nu)}{E} \sigma_r + \frac{1-\nu^2}{E} \sigma_\theta + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{4G_f} f(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

Τέλος έχουμε την εξίσωση του συμβιβαστού των παραμορφώσεων

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \quad (5.20)$$

Και την εξίσωση ισορροπίας

$$\frac{d\sigma_\theta}{dr} = \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} \quad (5.21)$$

Οι παραπάνω σχέσεις οδηγούν στην

$$\left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{f(t)}{4G_f} \right) \left[\frac{\delta}{\delta r} (\sigma_\theta - \sigma_r) + \frac{2(\sigma_\theta - \sigma_r)}{r} \right] = 0 \quad (5.22)$$

Η οποία υπακούοντας στις κάτωθι συνοριακές συνθήκες

$$\sigma_r(r, t) = \{1 - \lambda[x(t)]\} \sigma^0 \quad (5.23)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sigma_r(r, t) = 0 \quad (5.24)$$

Οδηγεί στον τανυστή των τάσεων

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma^0 \left\{ 1 - \lambda [x(t)] \frac{a^2}{r^2} \right\} \\ \sigma_\theta &= \sigma^0 \left\{ 1 + \lambda [x(t)] \frac{a^2}{r^2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5.25)$$

Παρατηρούμε ότι η εξέλιξη των τάσεων συναρτήσει της απόστασης και του χρόνου είναι ανεξάρτητη των μηχανικών (ελαστικών, ρεολογικών) ιδιοτήτων της βραχόμαζας (Αυτό βέβαια δεν ισχύει για τις παραμορφώσεις). Σε περίπτωση όμως που $n > 1$, δηλαδή η συνάρτηση $\varepsilon^c = g(\sigma) \cdot f(t)$ δεν ήταν γραμμική, το μέτρο ελαστικότητας και η συνάρτηση $f(t)$ θα περιέχονταν στην έκφραση του τανυστή των τάσεων. Από τις Εξισώσεις 5.19 και 5.25 προκύπτουν οι παραμορφώσεις στη βραχόμαζα λόγω της επιβαλλόμενης τάσης σ_0 :

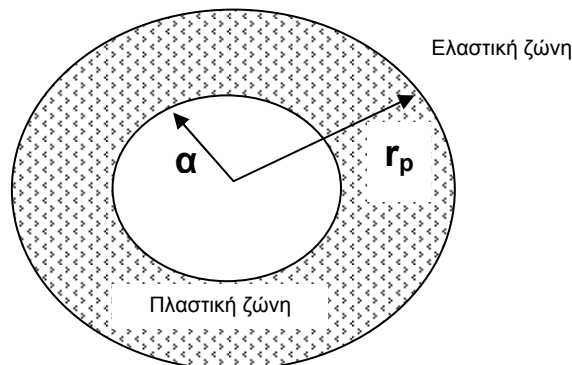
$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= -\lambda \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_0 a^2} - \lambda \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_f a^2} f(t) \\ \varepsilon_\theta &= \lambda \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_0 a^2} + \lambda \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_f a^2} f(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.26)$$

Ομοίως, για τη μετακίνηση στο τοίχωμα

$$\boxed{\frac{u_r}{a} = \underbrace{\frac{\lambda(x(t))\sigma^0}{2G_0}}_{\text{προχώρηση μετώπου}} \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{G_0}{G_f} f(t)\right)}_{\text{χρονικός παράγων}}} \quad (5.27)$$

- Για $\lambda \geq \lambda_e$

Θα αναπτυχθεί γύρω από τη σήραγγα πλαστική ζώνη ακτίνας r_p (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1 – Διαρροή της βραχόμαζας γύρω από τη σήραγγα.

Εντός της πλαστικής ζώνης η εξίσωση ισορροπίας (5.21) ικανοποιείται εφαρμόζοντας το ν. Mohr-Coulomb (5.15) ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες

$$\sigma_r(r, t) = [1 - \lambda(t)]\sigma^0 \quad (5.28)$$

$$\sigma_r[r_p(t), t] = (1 - \lambda_e)\sigma^0 \quad (5.29)$$

Κι έτσι προκύπτουν οι τάσεις εντός της πλαστικής ζώνης

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_c}{k_p - 1} \left[\left(\frac{r}{a} \right)^{k_p - 1} - 1 \right] + [1 - \lambda(t)]\sigma_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{k_p - 1} \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_c}{k_p - 1} \left[k_p \left(\frac{r}{a} \right)^{k_p - 1} - 1 \right] + k_p [1 - \lambda(t)]\sigma_0 \left(\frac{r}{a} \right)^{k_p - 1} \end{aligned} \right\} \quad (5.30)$$

Η ακτίνα της πλαστικής ζώνης προκύπτει εξισώνοντας τις ακτινικές τάσεις στο όριο, δηλαδή αυτές που προέρχονται από τη θ. Ελαστικότητας (5.25) με αυτές της σχέσης 5.30.

$$\frac{r_p[x(t)]}{a} = \left[\frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{\sigma^0(k_p - 1) + \sigma_c}{(k_p - 1)\{1 - \lambda[x(t)]\sigma^0 + \sigma_c\}} \right]^{\frac{1}{k_p - 1}} \quad (5.31)$$

Σχετικά με τις παραμορφώσεις, στην ελαστική ζώνη θα έχουμε

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= -\lambda_e \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_0 a^2} - \lambda_e \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_f a^2} f(t) \\ \varepsilon_\theta &= \lambda_e \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_0 r^2} + \lambda_e \frac{\sigma^0 r_p^2}{2G_f r^2} f(t) \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

Στην πλαστικοποιημένη ζώνη, θα ισχύει για τις παραμορφώσεις η Εξίσωση 5.13 όπου τώρα υπάρχει παράγοντας e^p καθώς και η Εξίσωση 5.14. Επίσης, σύμφωνα με τη σχέση 5.26, πριν αστοχήσει το υλικό έχουμε ότι $\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0$. Το ίδιο ισχύει και εντός της πλαστικοποιημένης ζώνης, καθώς με ολοκλήρωση της σχέσης 5.14 έχουμε

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta = 0 \quad (5.33)$$

Η ολοκλήρωση της σχέσης συμβιβαστού των παραμορφώσεων (5.20), η σχέση 5.33 και η εξίσωση των παραμορφώσεων στο όριο πλαστικής – ελαστικής ζώνης οδηγούν στον τανυστή των παραμορφώσεων για την πλαστική ζώνη

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= -\lambda_e \sigma^0 \frac{r_p^2}{r^2} \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2G_f} f(t) \right] \\ \varepsilon_\theta &= \lambda_e \sigma^0 \frac{r_p^2}{r^2} \left[\frac{1}{2G_0} + \frac{1}{2G_f} f(t) \right] \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

Ομοίως, για τη μετακίνηση στο τοίχωμα

$$\boxed{\frac{u_r}{a} = \lambda_e \frac{\sigma^0}{2G_0} \frac{r_p^2}{a^2} \left[1 + \frac{G_0}{G_f} f(t) \right]} \quad (5.35)$$

προχώρηση
μετώπου

χρονικός
παράγων

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι επιρροή της προχώρησης του μετώπου (που εκφράζεται με το βαθμό αποτόνωσης λ) μπορεί και θεωρητικά να διαχωριστεί από την επιρροή των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων (που εκφράζονται μέσω της συνάρτησης f).

6. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΗΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΑΣ ΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αποπειραθούμε να εξάγουμε ένα νόμο για τη σύγκλιση μιας σήραγγας του ελλαδικού χώρου, στηριζόμενοι αποκλειστικά σε δεδομένα από μετρήσεις που έγιναν κατά τη φάση κατασκευής της.

6.1 Η σήραγγα του Ανθοχωρίου

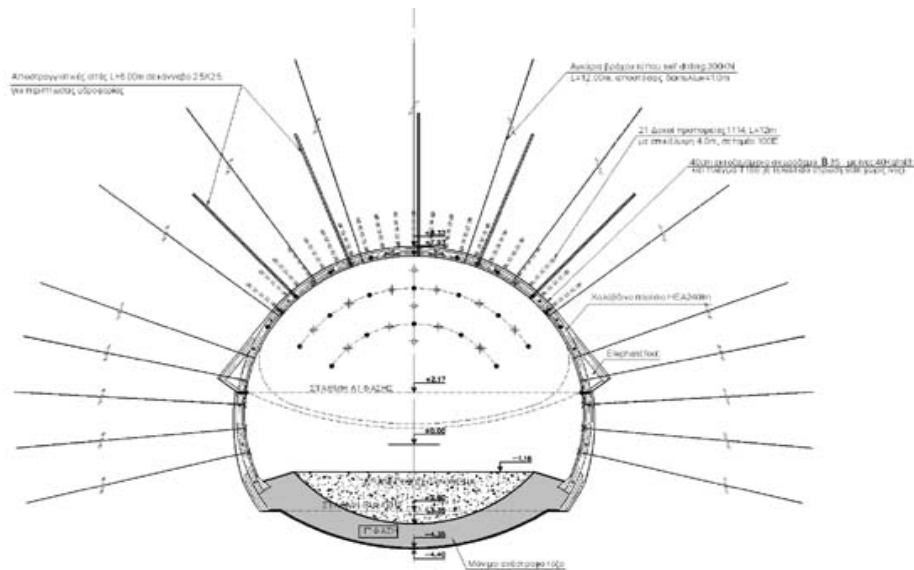
Μέρος των τεχνικών έργων της Εγνατίας Οδού, η σήραγγα βρίσκεται στην περιοχή μεταξύ των χωριών Βοτονοσίου και Ανθοχωρίου στην περιοχή της Ηπείρου και απέχει περίπου 10 km δυτικά από το Μέτσοβο. Είναι δίδυμη σήραγγα ενός κλάδου ανά κατεύθυνση με μήκος 706m και 717m για τον αριστερό και το δεξιό κλάδο αντίστοιχα. Το μέγιστο ύψος των υπερκειμένων εντοπίζεται στο μέσο περίπου της διαδρομής και είναι της τάξεως των 90m. Η διάνοιξη της σήραγγας έγινε σε 2 φάσεις (top heading και bench) με συμβατικά μέσα.



Εικόνα 6.1 – Εκσκαφή με συμβατικά μέσα.

Η γεωλογική ιστορία της περιοχής αναφέρει επώθηση της Πινδικής ενότητας επάνω στην Ιονία ενότητα. Η χάραξη της σήραγγας βρίσκεται ακριβώς επάνω στην επιφάνεια της επώθησης γι' αυτό κι από την προμελέτη ήδη είχε διαφανεί η κακής ποιότητας βραχώμαζα στην οποία αυτή επρόκειτο να διανοιχθεί. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 20 γεωτρήσεις οι οποίες μας πληροφόρησαν για τη στρωματογραφία και την ποιότητα των πετρωμάτων της περιοχής, αλλά όχι επαρκώς καθώς οι συνθήκες που συναντήθηκαν ήταν σαφώς χειρότερες. Προβλέπονταν στρώματα ασθενούς ερυθροπηλίτη, λεπτοστρωματώδεις εναλλαγές ψαμμίτη και ιλυολίθων, σχηματισμούς παχυστρωματωδών ψαμμιτών και σχηματισμούς υλικών επώθησης χαοτικής δομής από κατακερματισμένους ασβεστολίθους, ψαμμίτες αργιλικούς ιλυολίθους με τιμές RMR από 15 έως 45 (τελικά RMR = $15 \div 25$ στο κεντρικό κομμάτι το οποίο τελικά χρειάστηκε να επανεπιχωθεί). Ο κύριος λόγος που η γεωτεχνική μελέτη απέτυχε να προβλέψει τις συνθήκες που συναντήθηκαν είναι διότι αυτό που από τις γεωτρήσεις μεταφράστηκε ως στρώματα ψαμμιτών ήταν στην πραγματικότητα μεγάλων διαστάσεων τεμάχια ψαμμίτη που αντί να βελτίωσουν την αντοχή του υλικού αναλαμβάνοντας φορτία, την επιδείνωναν δια τοπικού φορτίου που επέβαλε το βάρος τους. Λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων που καταγράφηκαν στο ανατολικό τμήμα της κατασκευής (καθιζήσεις της τάξεως των 30cm και οριζόντιες συγκλίσεις 15-20cm στο κέλυφος της προσωρινής υποστήριξης με αποτέλεσμα να μην επαρκεί ο διαθέσιμος χώρος για τη σκυροδέτηση της μόνιμης επένδυσης) έγινε νέα μελέτη και χρειάστηκε να εφαρμοστεί βαρύτερη προσωρινή και μόνιμη υποστήριξη (Εικόνα 6.2). Σύμφωνα με την ιστοσελίδα της μελετητικής εταιρίας:

- Προτάθηκε η εφαρμογή ενός δύσκαμπτου κελύφους υψηλής φέρουσας ικανότητας. Η επιλογή αυτή υλοποιείται ειδικότερα ως εξής:
- Τροποποίηση της γεωμετρίας της διατομής εκσκαφής στις παρειές
- Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος υψηλότερης ποιότητας και μεγαλύτερου πάχους (40 cm)
- Κλείσιμο του δακτυλίου στο πυθμένα με μόνιμο ανάστροφο τόξο με μέγιστη απόσταση από το μέτωπο της Α' Φάσης ίση με 25m.
- Η προσωρινή αντιστήριξη της διατομής περιλαμβάνει επίσης μεταλλικά πλαίσια από μορφοχάλυβα, οπλισμούς και αγκύρια.



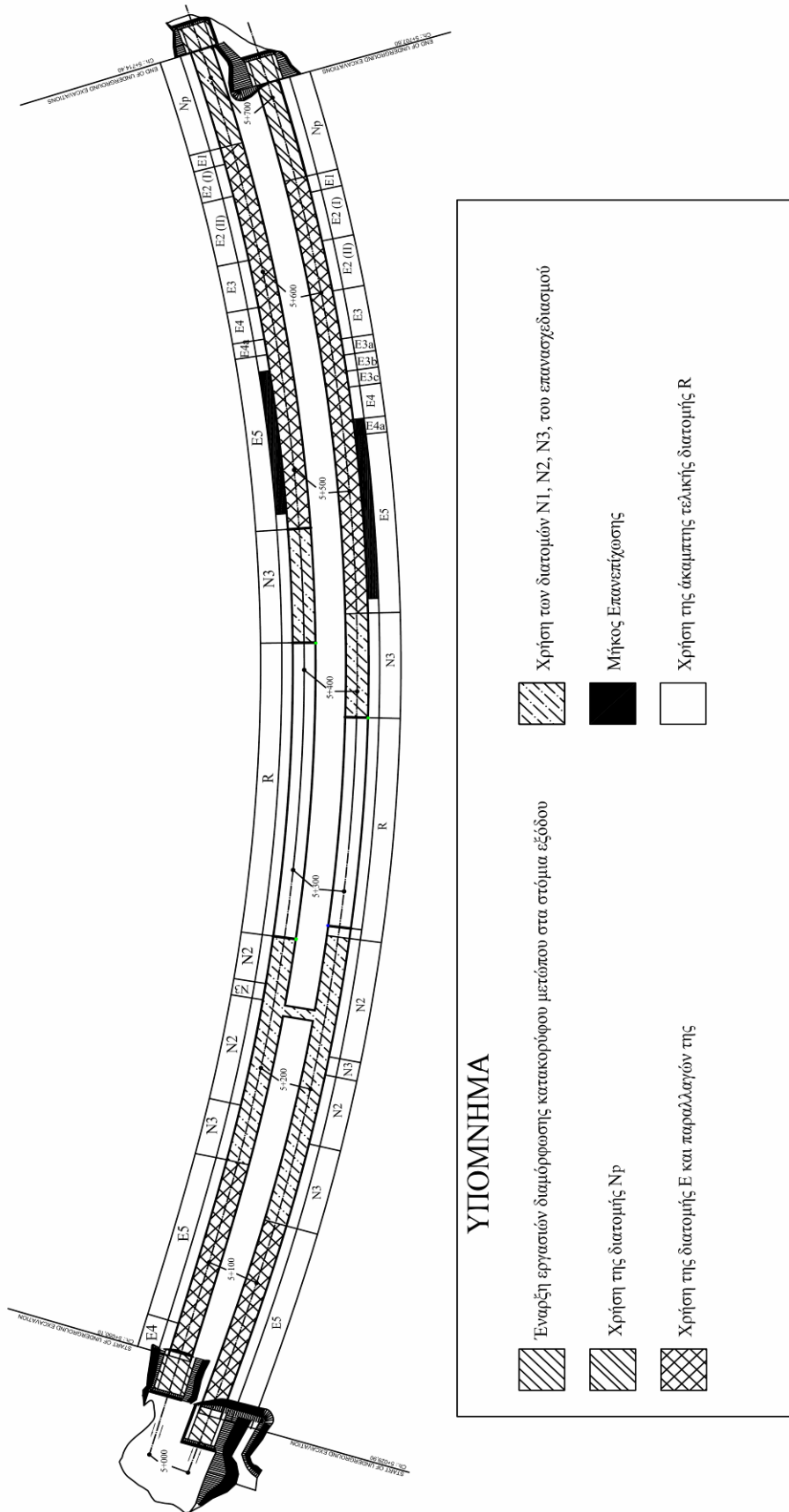
Εικόνα 6.2 – Τυπική διατομή της ενισχυμένης προσωρινής υποστήριξης.

Από άποψη αναλύσεως η σήραγγα παρουσιάζει δυσχέρειες καθώς η χρονοϊστορία κατασκευής της περιείχε σε πολλές περιπτώσεις διακοπή της εκσκαφής, αλλαγές των τυπικών διατομών προσωρινής υποστήριξης (και κυρίως συχνές αλλαγές στη γεωμετρία της εκσκαφής, εξού και το πλήθος των παραλλαγών της τυπικής διατομής π.χ. Ε3α, Ε3β, Ε3γ κλπ.) και κυρίως επανεπίχωση κι επανεκσκαφή τμήματος 80m περίπου λόγω φόβων επικείμενης κατάρρευσης. Παρόλα αυτά, ενώ οι εξετασθείσες διατομές περιλαμβάνουν έντονες γεωλογικές ανομοιογένειες (βραχώμαζες με εντελώς διαφορετική πετρογραφική σύσταση), από μηχανικής άποψης το υλικό είναι ομοιογενές διότι έχει παντού πτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά άρα θα μπορούσε να ενταχθεί σε ένα προσομοίωμα (ειδικά στο κεντρικό τμήμα). Στο Διάγραμμα 6.1 φαίνεται η τελική οριζοντιογραφία της σήραγγας και οι τυπικές διατομές άμεσης υποστήριξης που τελικώς χρησιμοποιήθηκαν καθώς και πίνακας με τα χαρακτηριστικά τους ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί κατόπιν για την προσομοίωση των συγκλίσεων.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
N2	Δικτυωτά μεταλλικά πλαίσια, κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30 cm, πυκνός κάνναβος δοκίδων προπορείας μήκους 6 m, σημαντική ενίσχυση της θεμελίωσης της Α'φάσης εκσκαφής
N3	Όπως N2 με μικρότερο βήμα, πυκνότερο forepolling, πλαίσια, μικροπάσσαλοι για τη θεμελίωση της Α' φάσης εκσκαφής
R	<u>Άνω ημιδιατομή</u> Τοποθέτηση 21 δοκών προπορείας στο μέτωπο εκσκαφής. Οι δοκοί είναι τύπου Φ 114, μήκους 12 m, με μήκος αλληλεπικάλυψης 4 m σε τόξο γωνίας 100°. Τοποθέτηση 21 αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής, μήκους 12 m, με μήκος αλληλεπικάλυψης 4 m. Εκσκαφή της άνω ημιδιατομή με βήμα προχώρησης 1 m. Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στο μέτωπο εκσκαφής, πάχους 5 cm. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 8 cm. Εφαρμογή μεταλλικού πλαισίου τύπου HEA 240 και ελεφαντοπόδων στην περιοχή θεμελίωσης. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 23 cm. Εφαρμογή 7 αυτοδιατρούμενων αγκυρίων, στον θόλο, φέρουσας ικανότητας 300 kN, και απο 2 σε κάθε περιοχή θεμελίωσης των ελεφαντοπόδων. Τοποθέτηση 5 αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο, μήκους 6 m. Μεταλλικό πλέγμα τύπου T188 στις παρειές και στον θόλο. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 9 cm. <u>Κάτω ημιδιατομή</u> Εκσκαφή κάτω ημιδιατομής με βήμα προχώρησης 2 m. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στις παρειές, πάχους 8 cm. Εφαρμογή μεταλλικού πλαισίου τύπου HEA 240 στην περίμετρο.

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
R (συνέχεια)	Εφαρμογή 2^{ης} στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στις παρειές, πάχους 23 cm. Εφαρμογή 3 αυτοδιατρώμενων αγκυρίων, σε κάθε παρειά, μήκους 12 m και φέρουσας ικανότητας 300 kN. Εφαρμογή στρώσης άοπλου εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 9 cm και εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξομάλυνσης όπου απαιτηθεί.
E1 – E4	<u>Άνω ημιδιατομή</u> Τοποθέτηση 26 δοκών προπορείας στο μέτωπο εκσκαφής. Οι δοκοί είναι τύπου Φ 114, μήκους 12 m, με μήκος αλληλεπικάλυψης 4 m σε τόξο γωνίας 120° και γωνία τοποθέτησης 5°. Τοποθέτηση 49 αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής, μήκους 12 m, με μήκος αλληλεπικάλυψης 4 m και φέρουσα ικανότητα 170 kN. Εκσκαφή της άνω ημιδιατομή με βήμα προχώρησης 0,8 m. Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στο μέτωπο εκσκαφής, πάχους 5 cm. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 8 cm. Εφαρμογή μεταλλικού πλαισίου τύπου HEB180 σε όλη την διατομή, ανά 0,80 m. Τοποθέτηση 4 συνολικά αγκυρίων στήριξης πλαισίων, στις παρειές της άνω ημιδιατομής, διαμέτρου 25 mm και φέρουσας ικανότητας 300 kN. Εφαρμογή 6 με 7 αυτοδιατρώμενων αγκυρίων, σε κάθε παρειά, ανά 0,80 m μηκοτομικής απόστασης και φέρουσας ικανότητας 300 kN. Τοποθέτηση δοκών στήριξης μεταλλικών πλαισίων C80 από μορφοχάλυβα. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 10 cm. Εφαρμογή 2^{ης} στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 7 cm. <u>Κάτω ημιδιατομή</u> Τοποθέτηση 23 αγκυρίων fiberglass στο μέτωπο εκσκαφής,

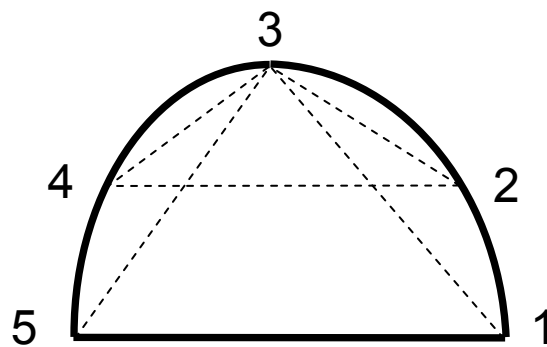
ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
E1-E4 (συνέχεια)	μήκους 12 m, με μήκος αλληλεπικάλυψης 4 m και φέρουσα ικανότητα 170 kN. Εκσκαφή της κάτω ημιδιατομή με βήμα προχώρησης 0,8 m. Μηχανική απόσπαση επισφαλών όγκων. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στο μέτωπο εκσκαφής, πάχους 5 cm. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 8 cm. Εφαρμογή μεταλλικού πλαισίου τύπου HEB180, ανά 0,80 m και τοποθέτηση ελεφαντοπόδων στην περιοχή θεμελίωσης. Τοποθέτηση 4 συνολικά αγκυρίων στήριξης πλαισίων, στις παρειές της κάτω ημιδιατομής, διαμέτρου 25 mm και φέρουσας ικανότητας 300 kN. Εφαρμογή 4 αυτοδιατρούμενων αγκυρίων, σε κάθε παρειές φέρουσας ικανότητας 300 kN. Τοποθέτηση δοκών στήριξης μεταλλικών πλαισίων C80, στις παρειές, από μορφοχάλυβα. Μεταλλικό πλέγμα τύπου T188 στην περιοχή θεμελίωσης του ελεφαντοπόδου, με 9 ράβδους οπλισμού διαμέτρου 20 mm. Εφαρμογή στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 10 cm. Εφαρμογή 2^{ης} στρώσης εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, στην περίμετρο εκσκαφής, πάχους 7 cm.



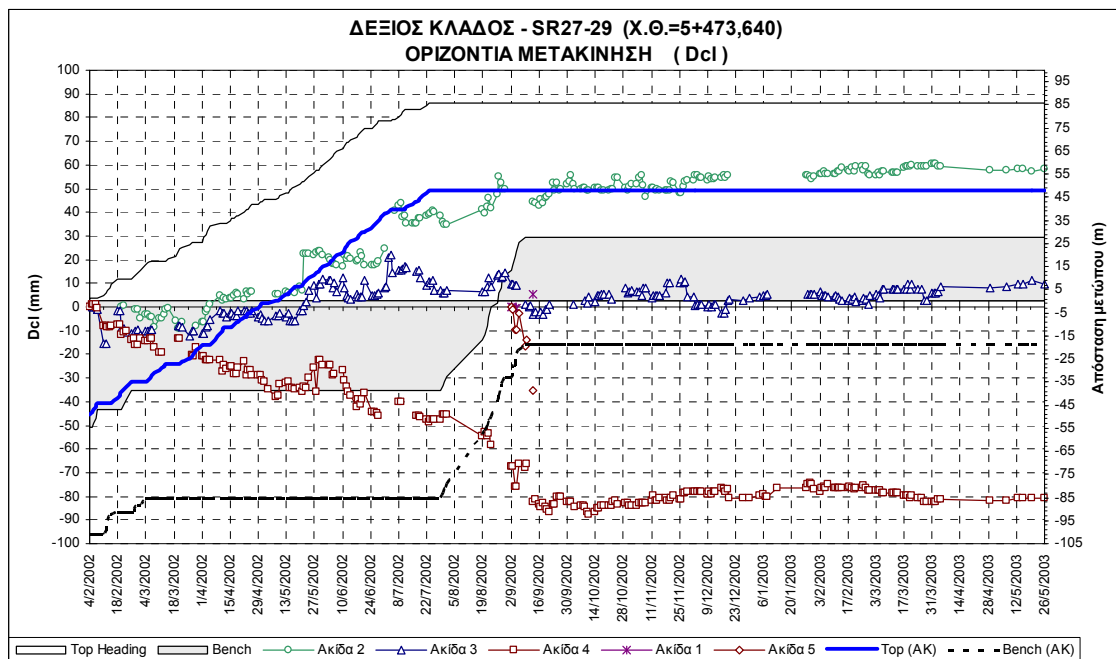
Διάγραμμα 6.1 – Οριζοντιογραφία της σήραγγας του Ανθοχωρίου. Διακρίνονται τα μήκη εφαρμογής των διατομών που χρησιμοποιήθηκαν.

6.2 Κατάστρωση του προσομοιώματος

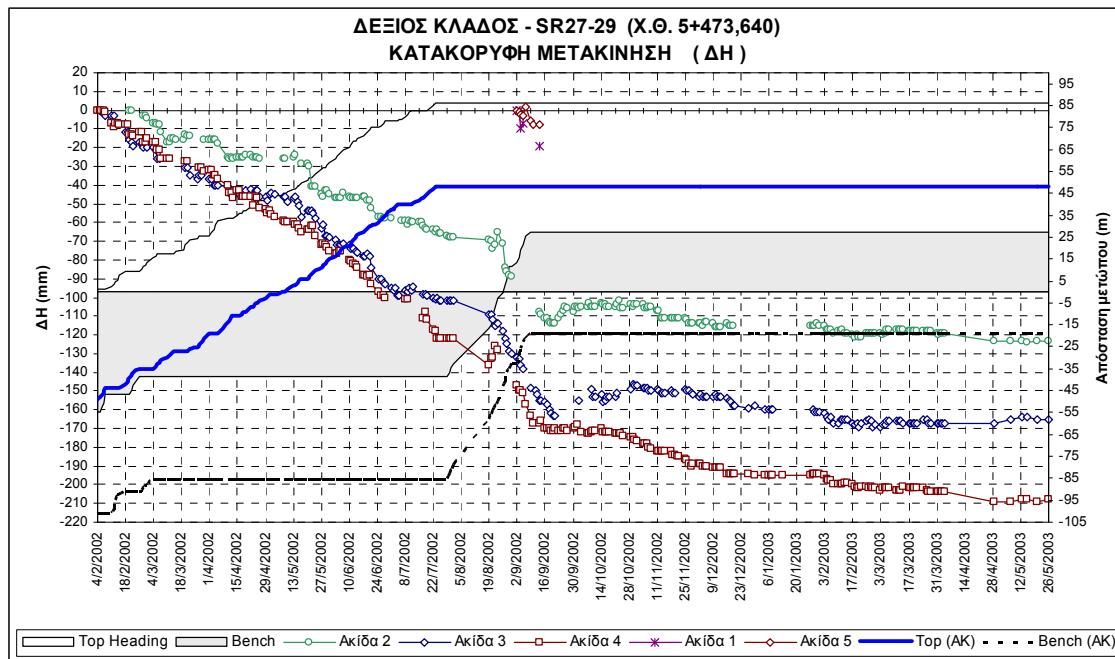
Στη διάθεσή μας έχουμε, από τις κατασκευάστριες εταιρίες, τα αποτελέσματα συγκλίσεων από τους μετρητικούς σταθμούς που τοποθετήθηκαν σε κάθε διατομή. Συνολικά, εξετάστηκαν 37 διατομές, 24 στον δεξιό κλάδο – ο οποίος εκσκάφθηκε πρώτος – και 13 στον αριστερό. Σε κάθε διατομή – πεταλοειδούς μορφής – τοποθετήθηκαν 5 μετρητικοί σταθμοί (Εικόνα 6.3) οι οποίοι έδιναν για κάθε σημείο την οριζόντια (Dcl) και κατακόρυφη (ΔΗ) μετακίνηση. Έτσι για κάθε διατομή έχουμε δεδομένα όπως στο Διάγραμμα 6.2, Διάγραμμα 6.3



Εικόνα 6.3 – Διατομή πεταλοειδούς μορφής και ακίδες ελέγχου.



Διάγραμμα 6.2 – Φύλλο τοπογραφικών μετρήσεων διατομής 27, οριζόντια μετακίνηση.



Διάγραμμα 6.3 – Φύλλο τοπογραφικών μετρήσεων διατομής 27, κατακόρυφη μετακίνηση.

Η εμφάνιση ερπυσμού από πολύ νωρίς λόγω κακής ποιότητας του πετρώματος είναι διακριτή στα παραπάνω διαγράμματα αφού οι μετακινήσεις εξελίσσονται ακόμα και όταν το μέτωπο σταμάτησε να προχωράει στις 20/7/2002.

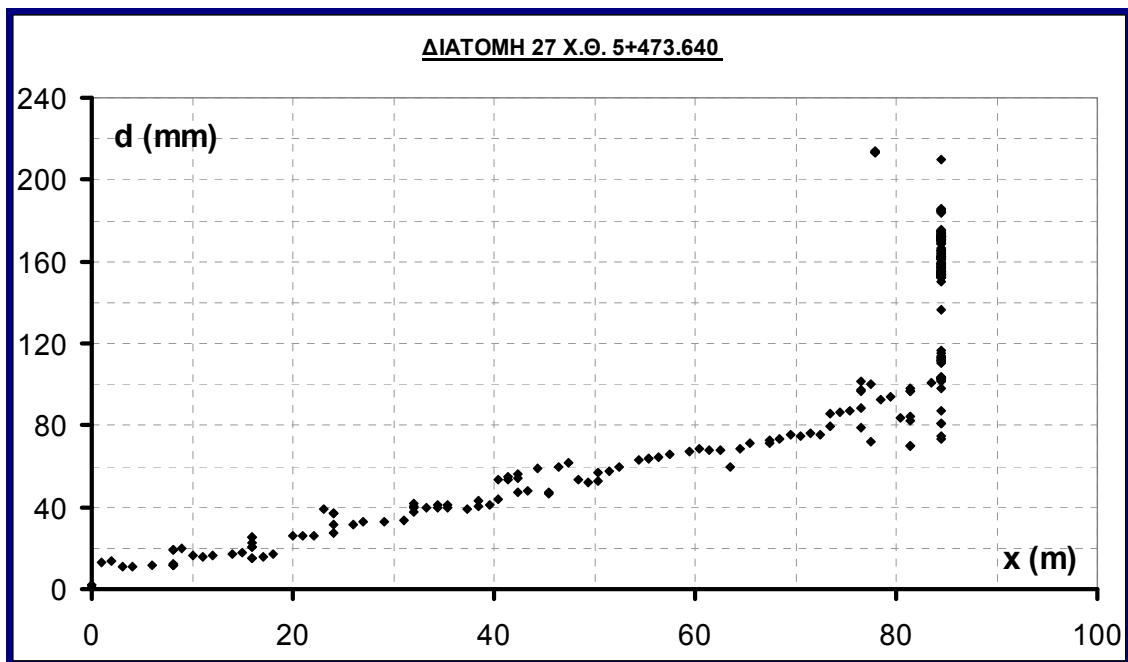
Αρχικά λοιπόν, έχουμε για κάθε διατομή ένα φύλλο Excel όπως φαίνεται στο Παράρτημα, από το οποίο μας ενδιαφέρουν σε πρώτη φάση οι παρακάτω στήλες πληροφοριών, όπου u , v η οριζόντια και κατακόρυφη μετακίνηση αντίστοιχα.

Ημερομηνία	Απόσταση από μέτωπο	Ακίδα 1		Ακίδα 2		Ακίδα 3		Ακίδα 4		Ακίδα 5	
		u	v	u	v	u	v	u	v	u	v

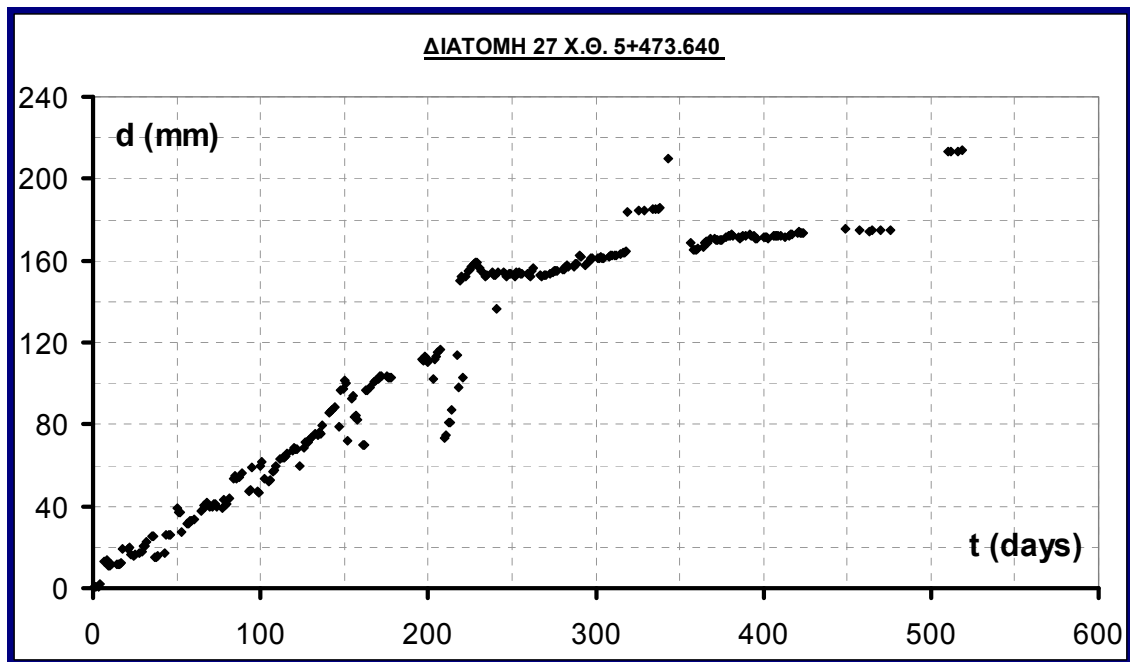
Στις σχέσεις που χρησιμοποιούμε αναφερόμαστε σε συγκλίσεις, δηλαδή μείωση της διαμέτρου από D_0 σε D_i . Σύγκλιση καλείται η διαφορά $d_i = D_0 - D_i$. Στην ανάλυση θεωρήθηκε ότι αυτό αντιπροσωπεύεται από τη μέση τιμή των διανυσμάτων των μετατοπίσεων, δηλαδή

$$d_i = \frac{\sum_{k=1}^5 \sqrt{u_i^2 + v_i^2}}{5} \quad (6.1)$$

Η πρώτη σειρά είναι η λεγόμενη μέτρηση αναφοράς, η ημερομηνία κατά την οποία εγκαταστάθηκαν οι μετρητικοί σταθμοί συνεπώς $t=0$. Στην αμέσως επόμενη γραμμή έχουμε $t_1=1$ ημέρα, $x_1=0$ μέτρα, d_1 το υπολογισθέν από τον παραπάνω τύπο, $t_2=2$ ημέρες κ.ο.κ. Έτσι έχουν μορφωθεί για κάθε διατομή τις τρεις στήλες δεδομένων που μας ενδιαφέρουν, d_i , x_i , t_i και μπορούμε να παράγουμε τα διαγράμματα $d-x$ (Διάγραμμα 6.4) και $d-t$ (Διάγραμμα 6.5) που θα δώσουν μία εικόνα για την εξέλιξη των συγκλίσεων καθώς προχωράει το μέτωπο και με την πάροδο του χρόνου.



Διάγραμμα 6.4 – Εξέλιξη των συγκλίσεων συναρτήσει της απόστασης από το μέτωπο.



Διάγραμμα 6.5 – Εξέλιξη των συγκλίσεων συναρτήσει του χρόνου.

Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν ενδεικτικά τη διατομή υπ' αριθμόν 28. Ένα πρώτο ενθαρρυντικό στοιχείο για την περαιτέρω μελέτη της εν λόγω σήραγγας είναι ότι σε όλες τις διατομές τα διαγράμματα αυτά είχαν την ίδια μορφή και βλέπουμε επίσης ότι είναι δυνατόν τα αποτελέσματα να αντιπροσωπευθούν από μία συνεχή συνάρτηση – δεν υπάρχουν έντονα σκαλοπάτια ή πλήθος τιμών που να ξεφεύγει από την ευθεία που προσαρμόζουμε «με το μάτι». Επίσης τα διαγράμματα $d-t$ ομοιάζουν ιδιαίτερα με τα εξιδανικευμένο διάγραμμα $d-t$ (Διάγραμμα 6.7), δηλαδή το προτεινόμενο μοντέλο όπως περιγράφεται παρακάτω είναι αντιπροσωπευτικό του καθεστώτος συγκλίσεων.

Όπως προαναφέρθηκε (Κεφάλαιο 5.1) η συνολική σύγκλιση μιας σήραγγας (d_i) μπορεί να διαχωριστεί σε 2 επιμέρους τμήματα:

- α) Τη σύγκλιση λόγω της προώθησης του μετώπου (face advance effect) - d_{xi} που οφείλεται στην αλλαγή της εντατικής κατάστασης της διατομής λόγω της περαιτέρω εκσκαφής
- β) Τη σύγκλιση λόγω της παρόδου του χρόνου (time-dependent effect) - d_{ti} που οφείλεται σε χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα και κυρίως αυτό του ερπυσμού.

$$d_i = dx_i + dt_i \quad (6.2)$$

Το ζητούμενο δηλαδή είναι ο προσδιορισμός της συνεισφοράς του κάθε παράγοντα στη διαμόρφωση της τελικής συγκλίσεως. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση σχέσεων από τη βιβλιογραφία, π.χ. για τον χωρικό παράγοντα έχουμε από Sulem et al. (1987)

$$d_{xi} = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] \quad (6.3)$$

όπου dx^* η τελική μετακίνηση (θεωρητικά για $x \rightarrow \infty$, στην πράξη για $x > 4D$) λόγω προώθησης του μετώπου και X μία παράμετρος που αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό μήκος.

Για τον χρονικό παράγοντα και με θεώρηση ότι η ερπυστική παραμόρφωση της βραχώμαζας προσομοιάζεται με το ιξωδοελαστικό μοντέλο Kelvin, ο Panet, (1995) πρότεινε τη σχέση

$$dt_i = dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right] \quad (6.4)$$

όπου dt^* η τελική μετακίνηση (θεωρητικά για $t \rightarrow \infty$) λόγω ερπυσμού και T μία αντίστοιχη παράμετρος που αντιπροσωπεύει έναν χαρακτηριστικό χρόνο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, για τη συνολική μετακίνηση θα ισχύει

$$d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right] \quad (6.5)$$

Οι παράμετροι X , T είναι στις ίδιες μονάδες μέτρησης με τα x , t αντίστοιχα, έτσι ώστε τελικά οι ποσότητες εντός παρενθέσεως να προκύπτουν αδιάστατοι αριθμοί. Για κάθε διατομή διαθέτουμε n τριάδες τιμών (d_i , x_i , t_i) άρα δημιουργείται ένα σύστημα n εξισώσεων με 4 αγνώστους (dx^* , dt^* , X , T) το οποίο μπορεί να γραμμικοποιηθεί με μαθηματικές μεθόδους από τη βιβλιογραφία και με τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων να υπολογισθούν οι 4 άγνωστοι. Ιδιαίτερα μας ενδιαφέρει ο λόγος της τελικής σύγκλισης λόγω του χωρικού παράγοντα προς την τελική σύγκλιση λόγω του χρονικού παράγοντα,

$$m = \frac{dt^*}{dx^*} \quad (6.6)$$

Εάν η διαδικασία αυτή επαναληφθεί για όλες τις διατομές ελέγχου της σήραγγας και διαπιστωθεί ότι ο λόγος m που εξάγεται βρίσκεται εντός ανεκτού εύρους, τότε θα μπορούσαμε να προβλέψουμε την τελική συνολική σύγκλιση λαμβανομένου υπόψη και του χρονικού παράγοντα, γνωρίζοντας την τελική σύγκλιση από την κλασσική θεώρηση με τις καμπύλες σύγκλισης αποτόνωσης και πολλαπλασιάζοντας αυτή με την τιμή m .

Η προσαρμογή της καμπύλης στα αριθμητικά δεδομένα έγινε με 2 τρόπους, με τη χρήση του προγράμματος Solver του Excel και με τη συγγραφή της παρακάτω ρουτίνας στη γλώσσα προγραμματισμού VBA .

```
Sub calculations(sn As Integer)
```

```
Dim d() As Single 'Δήλωση μεταβλητών
```

```
Dim x() As Single 'Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος
```

```
Dim t() As Single 'εκτέλεσης του προγράμματος τα δεδομένα που
```

```
Dim dx As Single 'βρίσκονται σε στήλες Excel θα καταχωρηθούν
```

```
Dim dt As Single 'σε 3 μονοδιάστατους πίνακες.
```

```
Dim parX As Single
```

```
Dim parT As Single
```

```
Dim dx_final As Single
```

```
Dim dt_final As Single
```

```
Dim parX_final As Single
```

```
Dim parT_final As Single
```

```
Dim i As Integer
```

```
Dim p As Integer
```

```
Dim arr_count As Integer
```

```
Dim sum As Single
```

```
Dim sumfinal As Single
```

```
sum = 0
```

```
sumfinal = 1000000000
```

```
arr_count = Sheets(sn).Cells(1, 1)
```

```
ReDim d(arr_count) 'Διαστασιολόγηση πινάκων ανάλογα με
```

```
ReDim x(arr_count) ' το πλήθος των μετρήσεων
```

```

ReDim t(arr_count)

For i = 1 To arr_count 'Καταχώρηση των δεδομένων στους
    d(i) = Sheets(sn).Cells(i + 2, 1) 'πίνακες
    x(i) = Sheets(sn).Cells(i + 2, 2)
    t(i) = Sheets(sn).Cells(i + 2, 3)
Next i

For dx = 1 To 200 Step 1 'Ο βασικός βρόχος του
    For dt = 1 To 800 Step 1 'αλγόριθμος που διατρέχει
        For parX = 1 To 40 Step 1 'τις 4 παραμέτρους
            For parT = 1 To 2500 Step 5 'προς προσδιορισμό
                For p = 1 To arr_count
                    sum = sum + (d(p) - (dx * (1 - (parX / (parX
+ x(p))) ^ 2) + dt * (1 - Exp(-(t(p) / parT)))) ^ 2
                Next p
                If sum < sumfinal Then
                    sumfinal = sum
                    dx_final = dx
                    dt_final = dt
                    parX_final = parX
                    parT_final = parT
                End If 'και καταλήγει σε αυτές που
                sum = 0 'ελαχιστοποιούν το σφάλμα.
            Next parT
        Next parX
    Next dt
Next dx

Sheets(sn).Cells(12, 10).Value = dx_final 'Εκτύπωση στο Excel
Sheets(sn).Cells(12, 11).Value = dt_final 'των παραμέτρων στις
Sheets(sn).Cells(12, 12).Value = parX_final 'οποίες κατέληξε ο
Sheets(sn).Cells(12, 13).Value = parT_final 'αλγόριθμος.

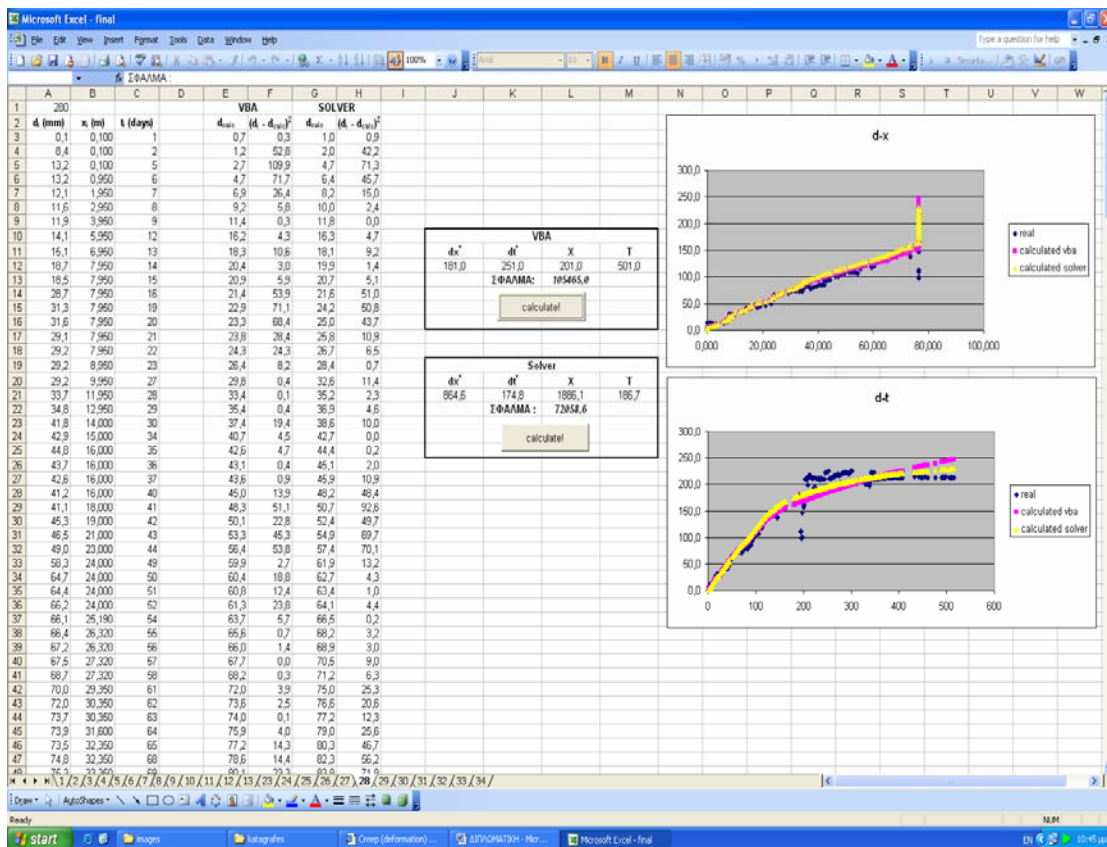
End Sub

```

Και οι δύο μέθοδοι έχουν σκοπό να ελαχιστοποιήσουν το σφάλμα το οποίο προκύπτει από το άθροισμα του τετραγώνου των διαφορών μεταξύ υπολογισθέντος $d_{i,real}$ και πραγματικού $d_{i,calc}$ (Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων).

$$Error = \sum_{i=1}^n (d_{i,real} - d_{i,calc})^2 \quad (6.7)$$

Έτσι π.χ. για τη διατομή 28 προκύπτει το παρακάτω φύλλο αποτελεσμάτων



Εικόνα 6.4 – Τυποποίηση της αριθμητικής ανάλυσης σε φύλλο Excel.

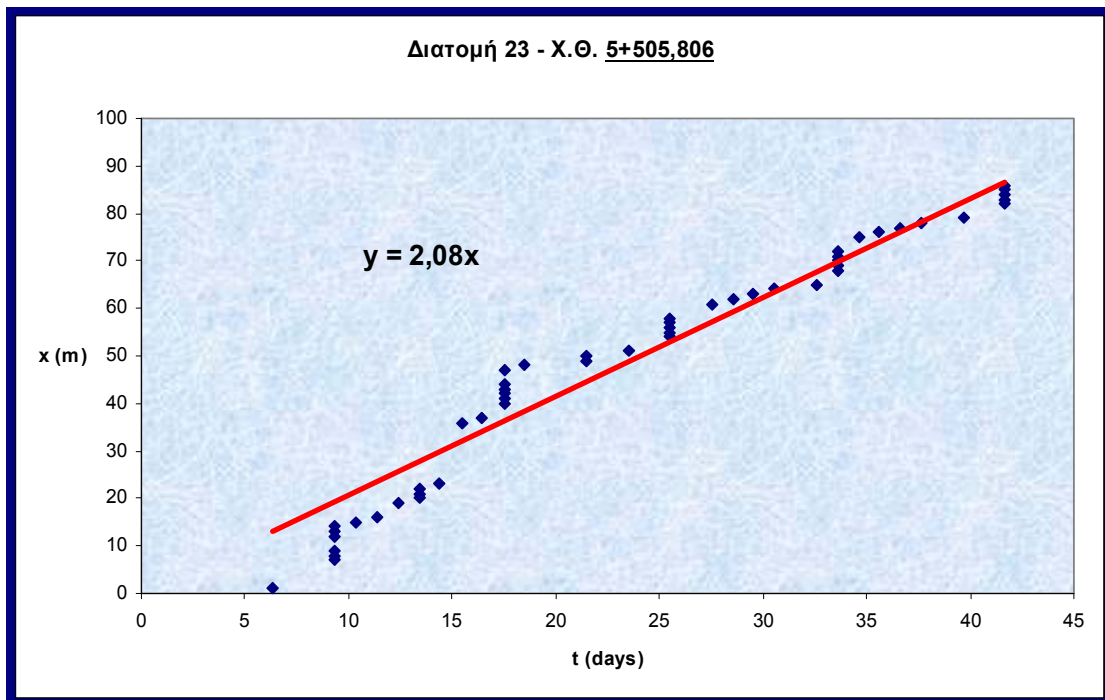
6.2.1 Εξορθολογισμός των δεδομένων

Πριν εκτελεστούν οι αναλύσεις, αποκλείστηκαν ορισμένες ομάδες δεδομένων που μπορεί να επηρεάζουν τα τελικά αποτελέσματα κι έτσι ενώ η στατιστική ακρίβεια μειώνεται αφού μειώνεται ο πληθυσμός, έχουμε καλύτερη φυσική ορθότητα των αποτελεσμάτων καθώς το δείγμα μας υπακούει στις προϋποθέσεις του προσομοιώματος. Συγκεκριμένα:

- Δεν ελήφθησαν υπόψη οι μετρήσεις των 13 σταθμών του αριστερού κλάδου (1-13), ο οποίος εκσκάφθηκε μετά τον δεξιό και ως εκ τούτου δεν εξασφαλίζονται οι προϋποθέσεις του αδιατάρακτου πεδίου.
- Για τον ίδιο λόγο αποκλείστηκαν από κάθε διατομή ελέγχου οι μετρήσεις που έγιναν όταν η δεύτερη φάση εκσκαφής (bench) πλησίασε σε απόσταση μικρότερη των 10m (από τη θεωρία - Διάγραμμα 3.1 - έχουμε ότι οι συγκλίσεις αρχίζουν $1.5R = 7.5 \text{ m} \approx 10\text{m}$ εμπρός από το μέτωπο)
- Ομοίως, αποκλείστηκαν οι μετρήσεις που έγιναν όταν ο αριστερός κλάδος (top heading) πλησίασε περισσότερο των 10m.
- Αποκλείστηκαν διατομές κοντά στα στόμια εισόδου και εξόδου (από τη θεωρία - Διάγραμμα 3.1 - έχουμε ότι οι συγκλίσεις εκτείνονται σε απόσταση 1-2D πίσω από το μέτωπο άρα αποκλείονται οι διατομές που απέχουν λιγότερο των 20 μέτρων από κάποιο στόμιο).
- Σε ορισμένες διατομές λόγω ενδείξεων για επικείμενη κατάρρευση της οροφής έγινε επανεπίχωση (διατομές δεξιού κλάδου 20-30, Χ.Θ = 5+450 έως 5+530). Αποκλείστηκαν οι μετρήσεις μετά την επανεπίχωση (9/9/2002).
- Η διατομή 36 του δεξιού κλάδου εξαιρέθηκε διότι μετά την εκκαθάριση των μετρήσεων με τα κριτήρια που περιγράφησαν παραπάνω απέμεινε με ανεπαρκή αριθμό μετρήσεων.
- Τέλος διεγράφησαν μεμονωμένες μετρήσεις που διέκοπταν τη συνέχεια των διαγραμμάτων και ήταν φανερά εκτός στατιστικού δείγματος (outliers).

Αξίζει να σημειωθεί ότι μία τελευταία βασική παραδοχή του προσομοιώματος στην οποία θα πρέπει να υπακούν τα δεδομένα μας είναι ο σταθερός ρυθμός προχώρησης του μετώπου, δηλαδή $x = V \cdot t$. Αφού έγινε το «φιλτράρισμα» των δεδομένων με τα κριτήρια που περιγράφηκαν παραπάνω, παρήχθησαν για κάθε διατομή τα διαγράμματα x-t (Διάγραμμα 6.6) ώστε να διαπιστωθεί αν πράγματι ισχύει αυτή η προϋπόθεση και καταλήξαμε στον ακόλουθο πίνακα:

α/α Διατομής	Ρυθμός προχώρησης μετώπου (m/day)
13	0.4
14	0.4
15	0.3
16	0.3
17	0.3
18	0.4
19	0.5
20	0.5
21	0.4
22	0.4
23	0.5
24	0.5
25	0.5
26	0.4
27	0.5
28	0.5
29	0.5
30	0.6
31	0.6
32	0.5
33	0.6
34	0.4
35	0.4
Μέση Τιμή	0.5



Διάγραμμα 6.6 – Ο ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής συναρτήσει του χρόνου θεωρείται με ικανοποιητική προσέγγιση σταθερός.

6.2.2 Διερεύνηση των παραμέτρων

Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 5.1, η σχέση που χρησιμοποιούμε για να εξάγουμε το νόμο σύγκλισης είναι η

$$d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right]$$

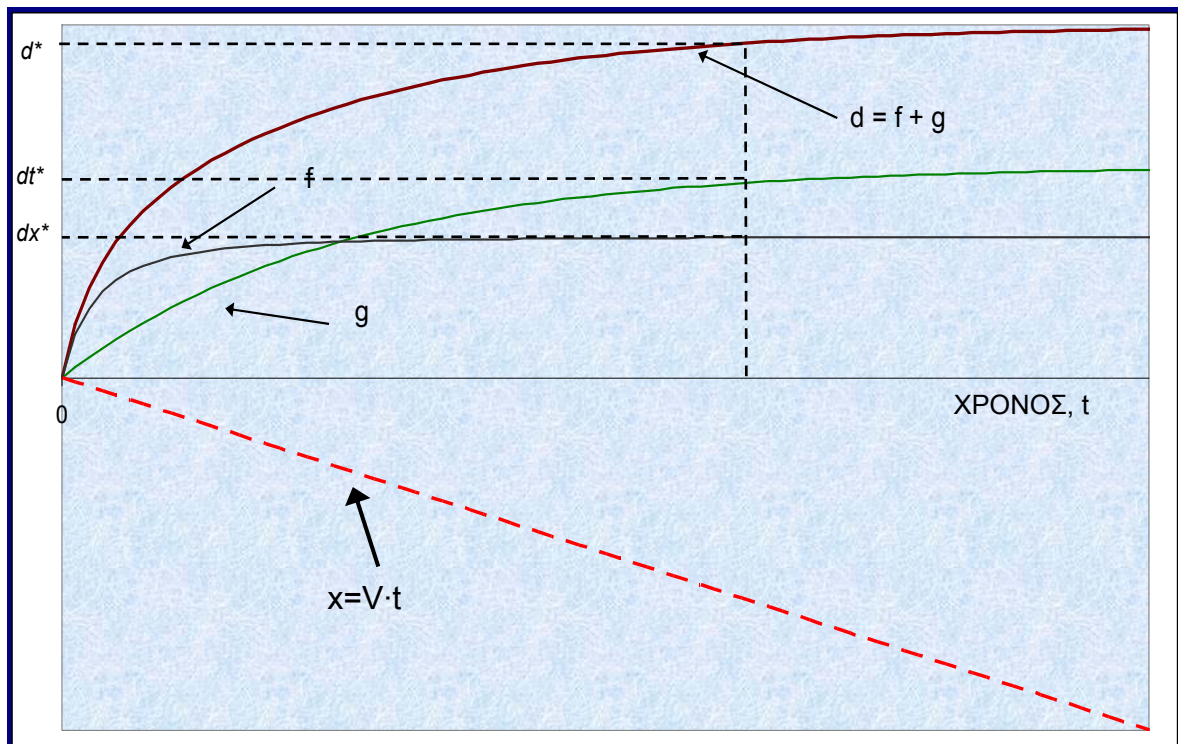
και καλούμαστε να προσδιορίσουμε τις άγνωστες παραμέτρους dx^* , dt^* , X , T . Επειδή, όμως, από την ανάλυση προκύπτει πλήθος τέτοιων τετράδων που ικανοποιούν τη σχέση και ταιριάζουν ικανοποιητικά στα αποτελέσματα των μετρήσεων – αλλά και για να επιταχυνθεί ο αλγόριθμος – πρέπει να αποκλείσουμε εκείνες τις τιμές που δεν έχουν φυσικό νόημα και να προσδιορίσουμε το εύρος στο οποίο θα πρέπει να κινηθούν οι 4 παράμετροι:

▪ Παράμετρος dx^*

Εκφράζει την τελική μετακίνηση λόγω της προχώρησης του μετώπου, συνεπώς το κάτω όριό της είναι 0 ενώ το άνω όριο είναι σίγουρα μικρότερο από τη μέγιστη σύγκλιση που μετρήθηκε για τη δεδομένη διατομή, δηλαδή $dx^* < d_{\text{final}}$.

Στην υποθετική ακραία περίπτωση μηδενικού ερπυσμού θα είχαμε οριακά $dx^*=d_{\text{final}}$.

Παρακάτω παρουσιάζεται το εξιδανικευμένο διάγραμμα συγκλίσεως για μία δεδομένη διατομή.



Διάγραμμα 6.7 – Εξιδανικευμένο διάγραμμα συγκλίσεως.

▪ Παράμετρος dt^*

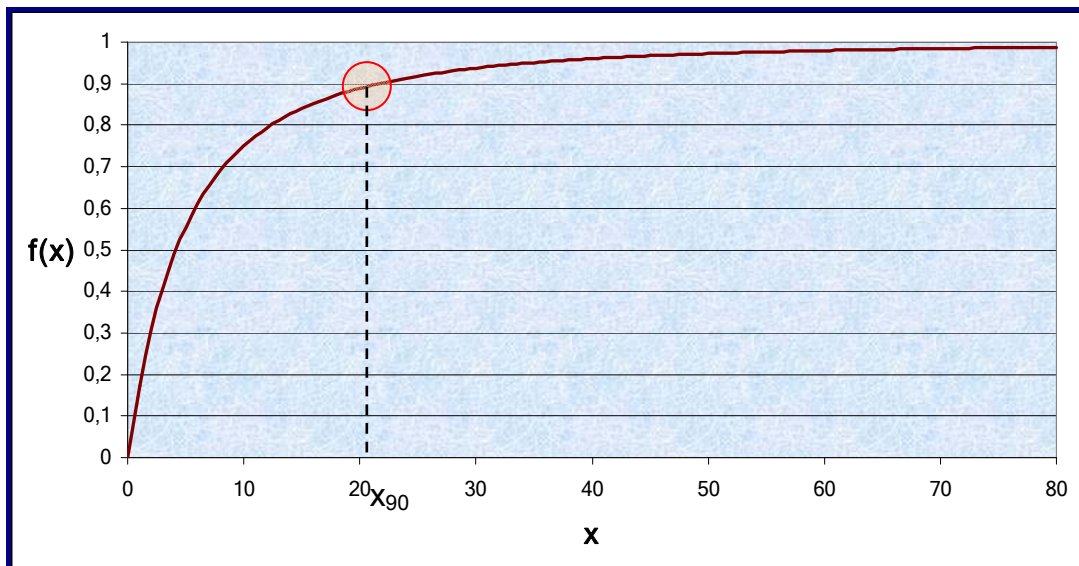
Εκφράζει την τελική μετακίνηση λόγω του χρονικού παράγοντα άρα μπορούμε να αποφανθούμε μόνο για το κάτω όριο το οποίο θα πρέπει να είναι 0. Σχετικά με το άνω όριο, σε περίπτωση που η βραχόμαζα παρόλη την υποστήριξη εισέρχεται σε βάθος χρόνου σε τριτογενή ερπυσμό, θα είχαμε $dt^*=\infty$ (πράγμα απίθανο). Πάντως δε θα πρέπει να αναμένουμε τελική ερπυστική παραμόρφωση μεγαλύτερη από 10 φορές την παραμόρφωση λόγω προχώρησης μετώπου δηλαδή $dt^*<10 \cdot dx^* \rightarrow dt^*<10d_{\text{final}}$, εντούτοις στις αναλύσεις δε θέσαμε κάποιο άνω όριο σχετικά με την παράμετρο αυτή. Επίσης για τις παραμέτρους dx^* και dt^* θα πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $dx^*+dt^*>d_{\text{final}}$. Στην υποθετική ακραία περίπτωση μηδενικού ερπυσμού θα είχαμε οριακά $dx^*=d_{\text{final}}$, $dt^*=0$.

▪ Παράμετρος X

Κι αυτή η παράμετρος θα πρέπει να είναι μη αρνητική αφού αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό μήκος που εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες της βραχόμαζας. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το ρόλο και το φυσικό νόημα της

παραμέτρου X , θα εστιάσουμε στον παράγοντα $f(x) = \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right]$ ο οποίος

είναι φανερό ότι παίρνει τιμές από 0 έως 1, είναι δηλαδή ένας απομειωτικός συντελεστής της συνολικής σύγκλισης λόγω προχώρησης του μετώπου, dx^* . Παρακάτω έχουμε σχεδιάσει τη συνάρτηση f για $X=10$, όπου πράγματι παρατηρούμε ότι αρχίζει από το 0 και τείνει ασυμπτωτικά προς τη μονάδα.



Διάγραμμα 6.8 – Η συνάρτηση f που εκφράζει τη χωρική συνιστώσα.

Κατόπιν, θα προσδιορίσουμε την τιμή της μεταβλητής x για την οποία έχουν ολοκληρωθεί (δηλαδή $f(x)=90\%$) οι συγκλίσεις λόγω προχώρησης του μετώπου.

$$\begin{aligned}
 f(x_{90}) &= 0.9 \Rightarrow \\
 \left[1 - \left(\frac{X}{x_{90} + X} \right)^2 \right] &= 0.9 \Rightarrow \\
 \frac{X}{x_{90} + X} &= 0.32 \Rightarrow \\
 x_{90} &= 2.13X
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

Πράγματι αυτό επαληθεύεται και στο διάγραμμα όπου για $X=10$ έχουμε ότι $f(x_{90}) = 0.90$ για $x = 2.13 \cdot X = 21.3$. Η παράμετρος X λοιπόν αντιπροσωπεύει το μήκος που πρέπει να εκσκαφθεί ώστε να ολοκληρωθεί το 90% των συγκλίσεων σε μία διατομή (Για την ακρίβεια είναι το υπο-2.13-πλάσιο του μήκους αυτού). Κι επειδή από τη θεωρία (Διάγραμμα 3.1) γνωρίζουμε ότι το μήκος αυτό ισούται με 4 φορές τη διάμετρο της σήραγγας, μπορούμε να πούμε ότι το X θα πρέπει περίπου να ισούται με $40/2.13 \approx 20\text{m}$. Στις αναλύσεις θεωρήσαμε $0 \leq X \leq 40$ λαμβάνοντας υπόψιν κι έναν συντελεστή ασφαλείας $FS=2$. Τέλος, σημειώνεται ότι για την παράμετρο X έχει προταθεί από Sulem et al., 1987

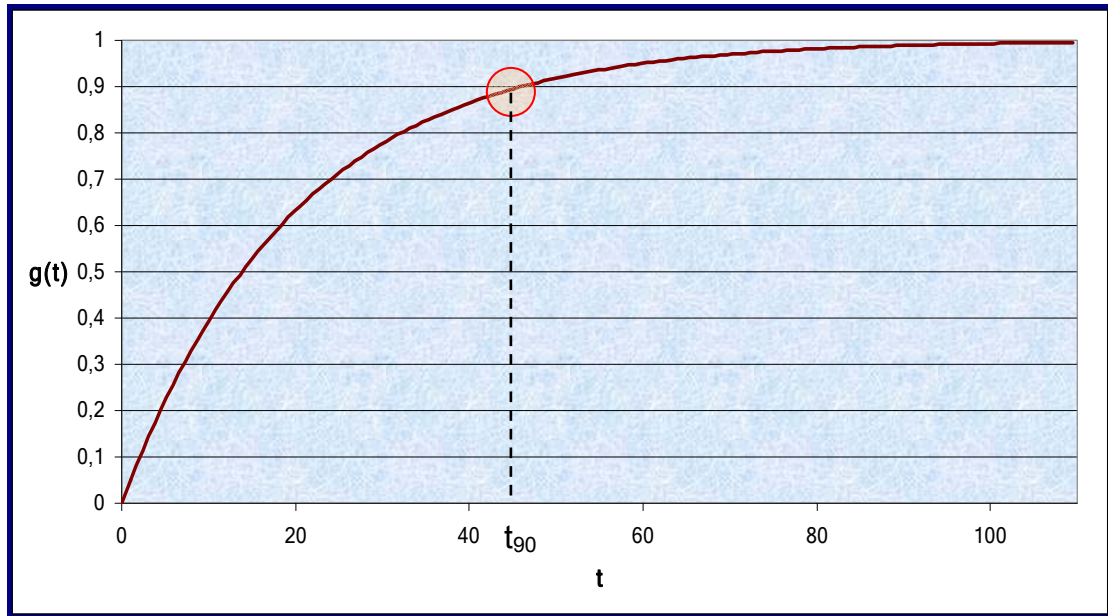
$$X = a \cdot r_p, \text{ όπου } a = 0.84 \tag{6.9}$$

▪ Παράμετρος T

Κι αυτή η παράμετρος θα πρέπει να είναι μη αρνητική αφού αντιπροσωπεύει ένα χαρακτηριστικό χρόνο που εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες της βραχώμαζας. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το ρόλο και το φυσικό νόημα της

παραμέτρου T, θα εστιάσουμε στον παράγοντα $g(t) = \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right]$ ο οποίος είναι

φανερό ότι παίρνει τιμές από 0 έως 1, είναι δηλαδή ένας απομειωτικός συντελεστής της συνολικής σύγκλισης λόγω χρονικά εξαρτημένων φαινομένων, dt^* . Παρακάτω έχουμε σχεδιάσει τη συνάρτηση g για $T = 20$, όπου πράγματι παρατηρούμε ότι αρχίζει από το 0 και τείνει ασυμπτωτικά προς τη μονάδα.



Διάγραμμα 6.9 – Η συνάρτηση g που εκφράζει τη χρονική συνιστώσα.

Ομοίως, θα προσδιορίσουμε την τιμή της μεταβλητής t για την οποία έχουν ολοκληρωθεί (δηλαδή $g(t) = 90\%$) οι συγκλίσεις λόγω ερπυσμού.

$$\begin{aligned}
 g(t_{90}) &= 0.9 \Rightarrow \\
 \left[1 - e^{\left(\frac{-t_{90}}{T}\right)} \right] &= 0.9 \Rightarrow \\
 \frac{1}{e^{\left(\frac{t_{90}}{T}\right)}} &= 0.1 \Rightarrow \\
 \frac{t_{90}}{T} &= \ln 10 \Rightarrow \\
 t_{90} &= 2.30T
 \end{aligned}
 \tag{6.10}$$

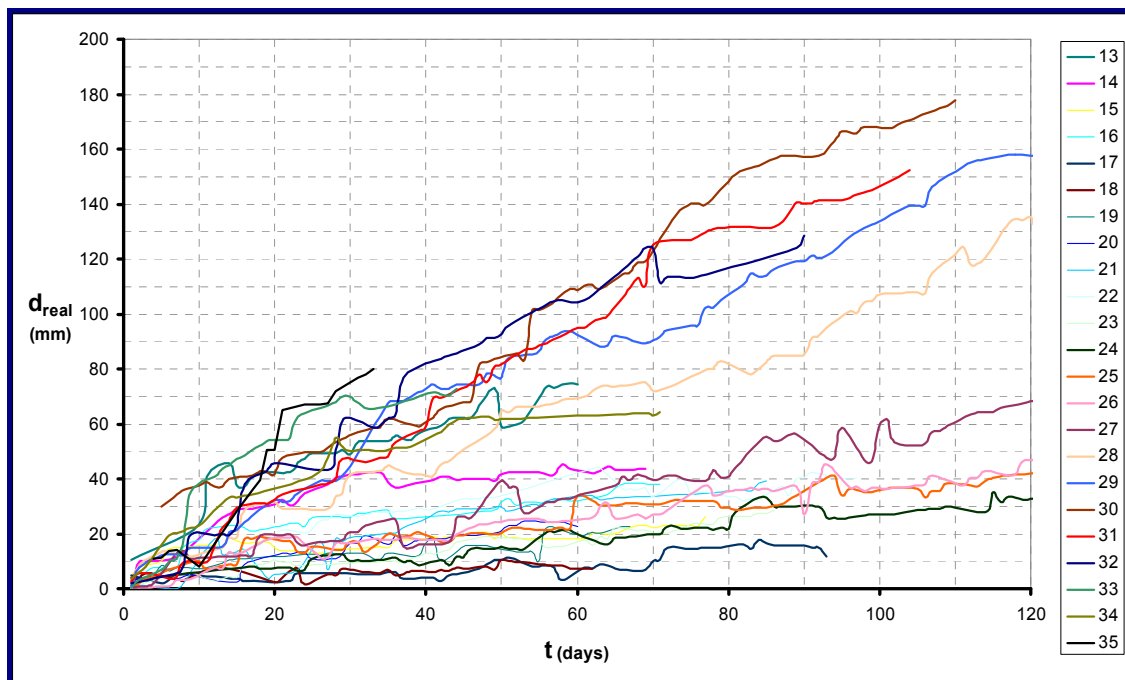
Πράγματι αυτό επαληθεύεται και στο διάγραμμα όπου για $T = 20$ έχουμε ότι $g(t_{90}) = 0.90$ για $t = 2.30T = 4.60$. Η παράμετρος T λοιπόν αντιπροσωπεύει το χρόνο που πρέπει να παρέλθει ώστε να ολοκληρωθεί το 90% των συγκλίσεων λόγω ερπυστικών φαινομένων σε μία διατομή (για την ακρίβεια είναι το υπο-2.30-πλάσιο του μήκους αυτού). Αντίθετα με τα όσα ελέχθησαν για την παράμετρο X , τώρα δεν έχουμε κάποιο σημείο αναφοράς για να προσδιορίσουμε την τάξη μεγέθους της παραμέτρου T . Ο χρόνος μέχρι να ολοκληρωθεί το 90% των ερπυστικών παραμορφώσεων εξαρτάται από την

καμπύλη ερπυστικής παραμόρφωσης για το συγκεκριμένο υλικό (Διάγραμμα 4.6) η οποία μας είναι άγνωστη. Θα μπορούσε να προσδιοριστεί από μετρήσεις μακριά από τη διατομή (πέρα από την απόσταση επιρροής του μετώπου) όπου η συμβολή της προώθησης του μετώπου είναι μηδαμινή και οποιαδήποτε περαιτέρω σύγκλιση οφείλεται στο χρονικό παράγοντα. Στις αναλύσεις πάντως λάβαμε $T \geq 0$.

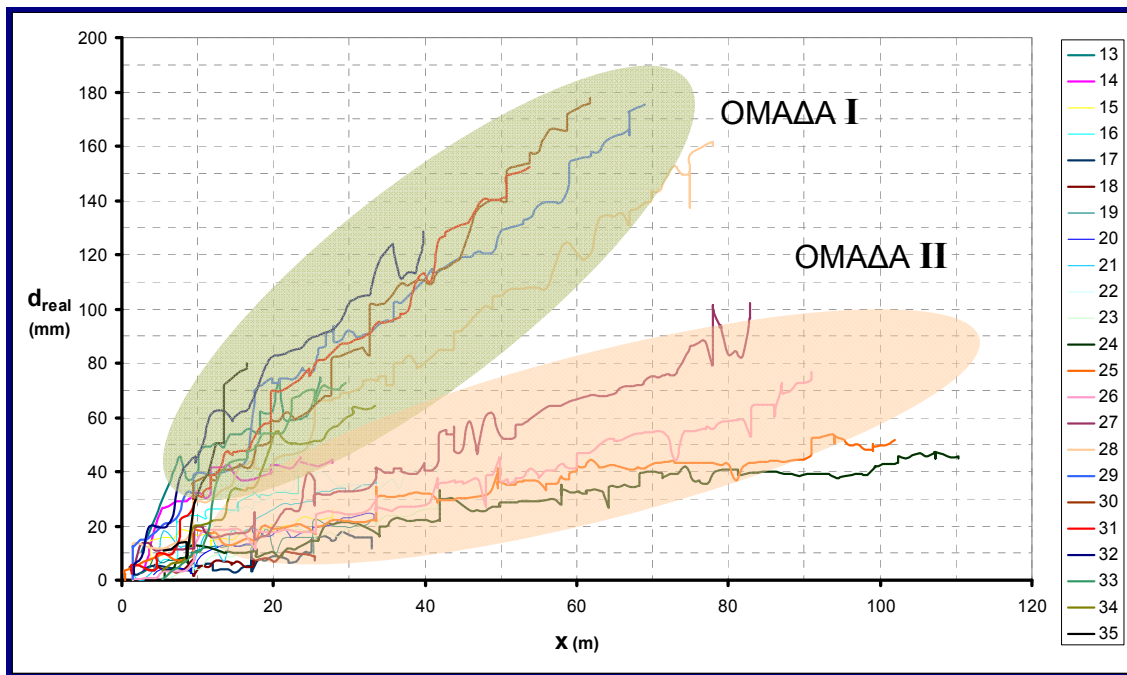
6.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης

Η ανάλυση που ακολουθεί αναφέρεται στις διατομές και τις μετρήσεις αυτών που απέμειναν μετά την εκκαθάριση που πραγματοποιήθηκε (και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.2.1) ώστε να εξασφαλισθούν οι προϋποθέσεις του μοντέλου για αδιατάρακτο πεδίο. Πρόκειται για τις διατομές 13 έως 35 του δεξιού κλάδου, Χ.Θ. 5+578,538 έως 5+404,238.

Αρχικά σχεδιάσαμε σε ενιαίο διάγραμμα τις μετρηθείσες μετατοπίσεις για κάθε διατομή ώστε να διαπιστώσουμε αν αυτές κινούνται εντός ανεκτού εύρους, γεγονός που θα μας επέτρεπε να εξάγουμε κάποιον κοινό νόμο σύγκλισης σαν κι αυτόν της σχέσης .



Διάγραμμα 6.10 – Μετρηθείσες συγκλίσεις συναρτήσει του χρόνου για κάθε διατομή.

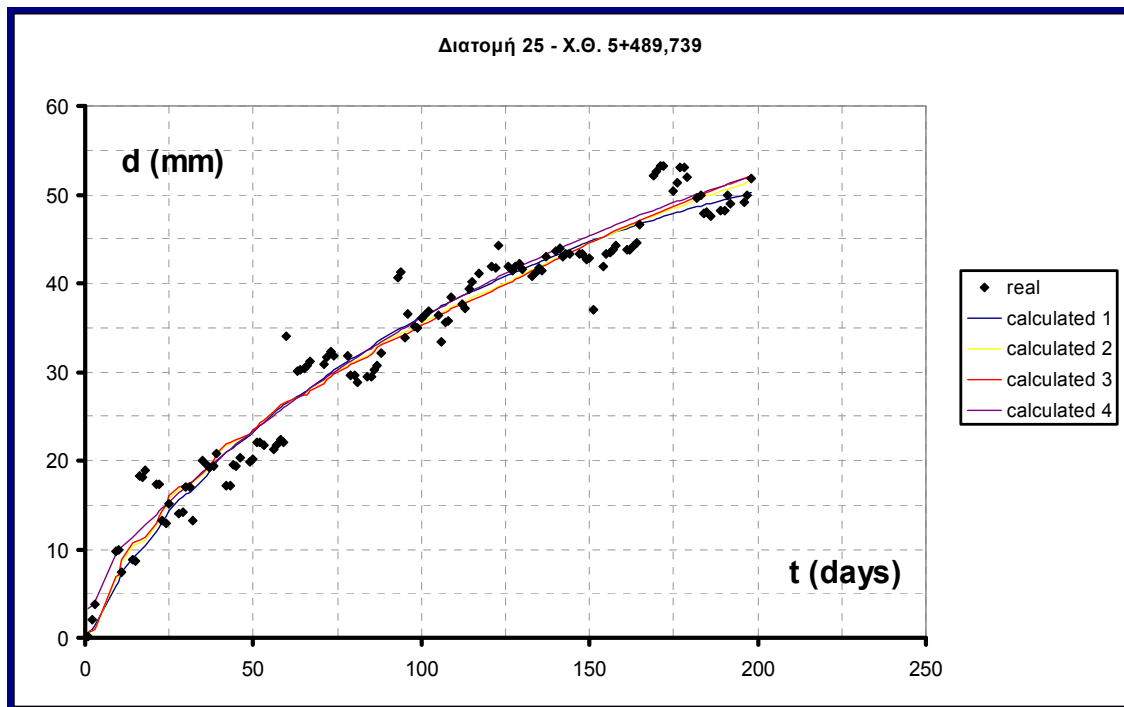


Διάγραμμα 6.11 – Μετρηθείσες συγκλίσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.

Παρατηρούμε ότι υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στο μέγεθος και τον ρυθμό εξέλιξης των συγκλίσεων. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να χωρίσουμε τις διατομές σε 2 ομάδες **I**-[13,14, 28-35] και **II**-[15-27] όπως έχουν σημειωθεί στο Διάγραμμα 6.10 και να αναμένονται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρόμοιες τιμές για τις παραμέτρους.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάστηκε είναι ότι κατά την εκτέλεση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την εύρεση των 4 παραμέτρων της καμπύλης προσαρμογής παρατηρήθηκε πως πολλές διαφορετικές τετράδες παραμέτρων ταιριάζουν ικανοποιητικά, δίνουν δηλαδή μικρό σφάλμα, π.χ. για τη διατομή 25

ΔΙΑΤΟΜΗ 25			Χ.Θ. 5+489,739	
dx* (mm)	dt* (mm)	X (m)	T (days)	ΣΦΑΛΜΑ (mm)
11,2	52,1	39	136,7	2,89239
22,8	87,8	41,2	460	2,87834
24,2	242	39,9	1503,7	2,89867
6	65	1	161	2,75832



Διάγραμμα 6.12 – Η συνάρτηση προσαρμογής για διάφορες τιμές παραμέτρων.

Αυτό οφείλεται στο πλήθος των παραμέτρων προς προσδιορισμό, η καμπύλη έχει μεγάλη ευελιξία να προσαρμοστεί για διάφορες τετράδες παραμέτρων καθώς η γραμμή που ενώνει τις πραγματικές (μετρηθείσες) τιμές του d είναι απλής μορφής και θα μπορούσε να προσομοιωθεί και με μία πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού. Έτσι λοιπόν με μία καθαρά μαθηματική προσέγγιση δε βγαίνει κάποιο συμπέρασμα και θα πρέπει να τεθούν περιορισμοί που να συνάδουν με τη γεωτεχνική λογική ώστε να προκύψει μία συνάρτηση που και να ομοιάζει αρκετά με τη γραμμή που ενώνει τις μετρηθείσες τιμές, αλλά και οι παράμετροί της να έχουν φυσικό νόημα. Ακολούθως παρατίθενται οι περιορισμοί που εισήχθησαν για να επιτευχθεί το «κλείσιμο» του φάσματος των πιθανών λύσεων:

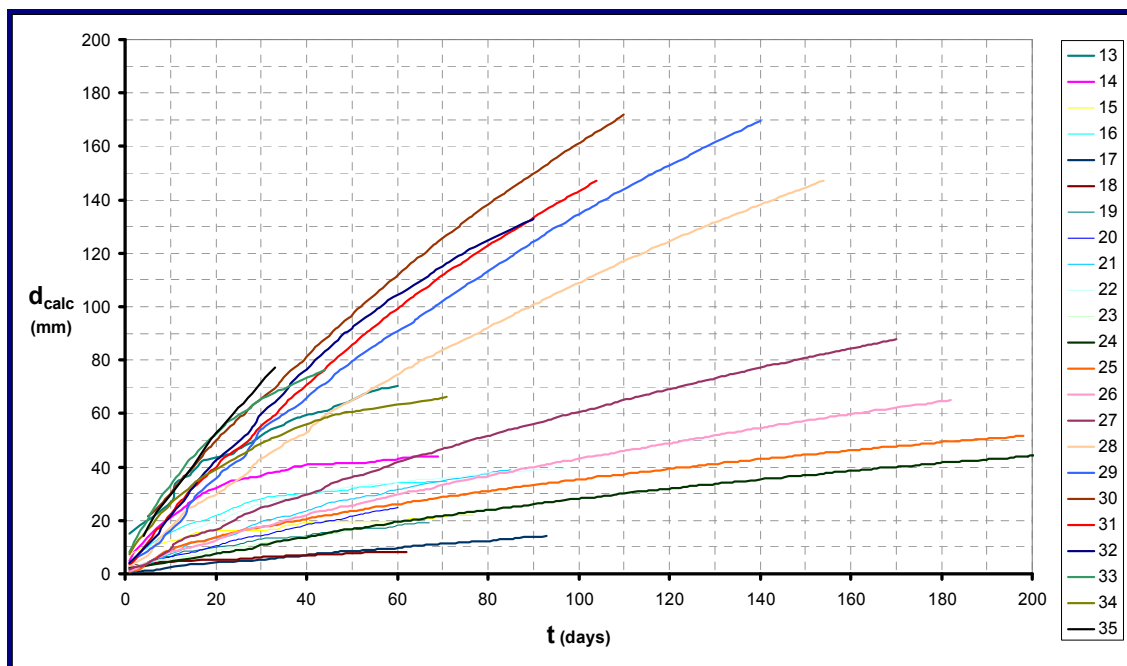
- $0 \leq X \leq 40$
- $T \geq 0$
- $0 \leq dx^* \leq d_{real, final}$
- $dx^* + dt^* \geq d_{real, final}$



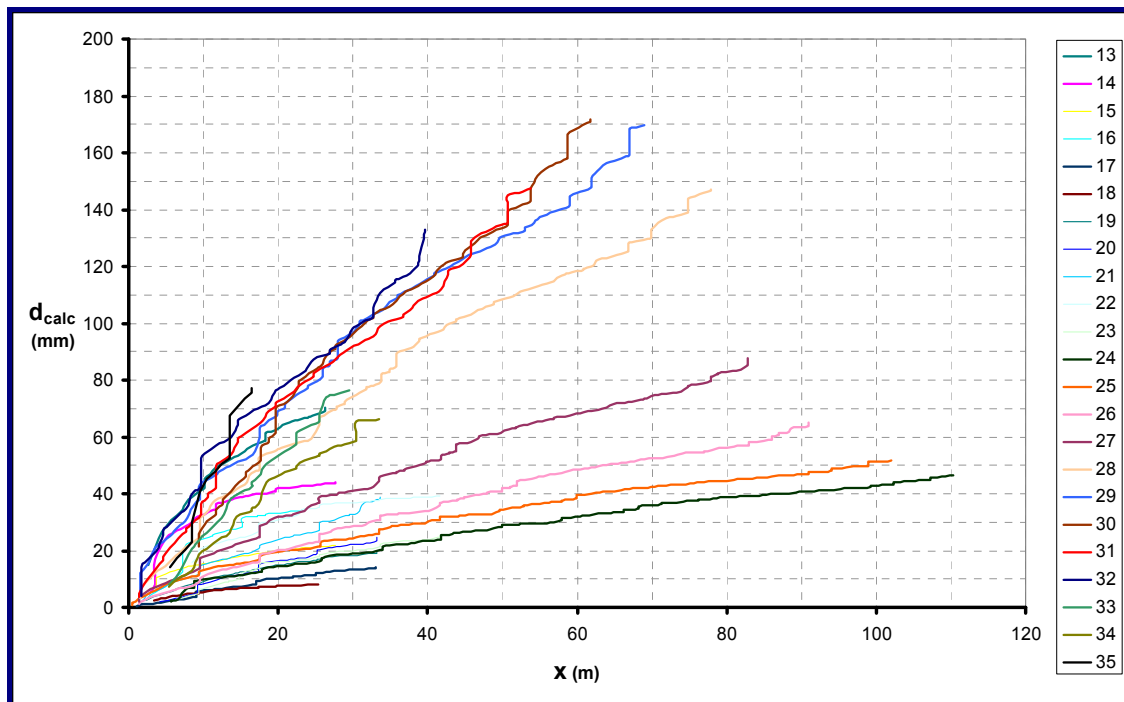
Όπως εξηγούνται στο
Κεφάλαιο 6.2.2

- $0 \leq dt^* \leq 10 \cdot dx^*$. Ήδη τιμές του συντελεστή $m = \frac{dt^*}{dx^*}$ μεγαλύτερες του 5 θεωρούνται μεγάλες, επομένως είναι μία συντηρητική παραδοχή να θεωρήσουμε τιμές του m μικρότερες του 10.
- $dx^* \geq \frac{d_{real}(x=20m)}{2}$. Εφόσον η θεωρία αναφέρει ότι σε απόσταση 2D από το μέτωπο έχουμε ανάπτυξη 100% της ακτινικής παραμόρφωσης λόγω προχώρησης του μετώπου, είναι μία συντηρητική παραδοχή να θεωρήσουμε ότι ο παράγοντας dx^* , που είναι το 100% της ακτινικής παραμόρφωσης σίγουρα θα είναι μεγαλύτερος από το μισό της μετρηθείσας τιμής στην απόσταση $x=20m$.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται παρακάτω:

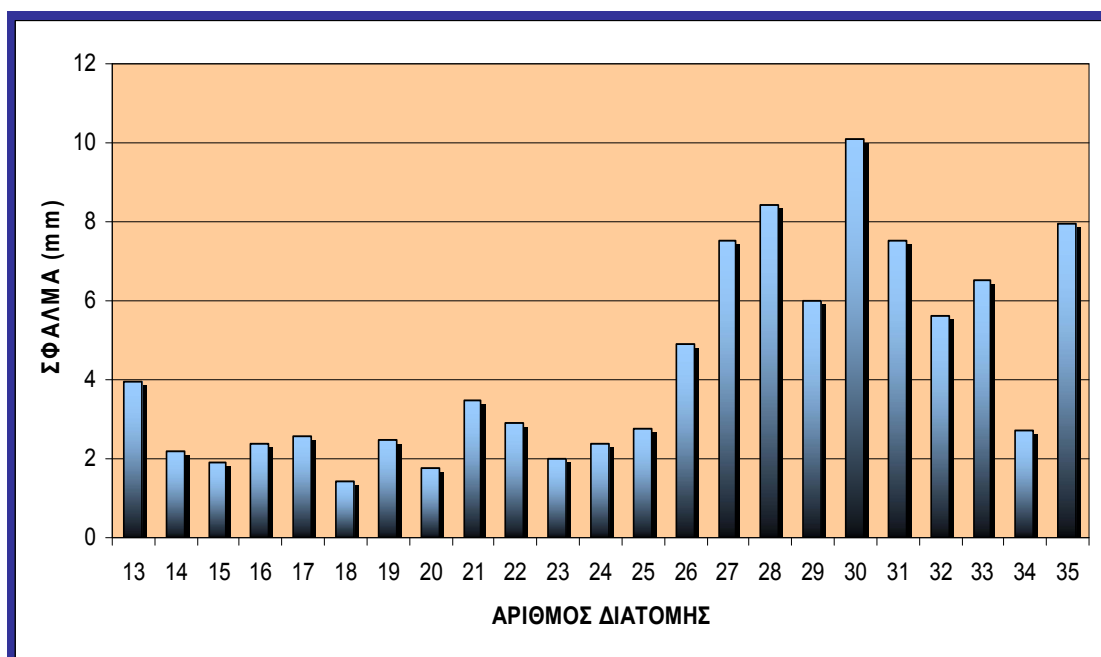


Διάγραμμα 6.13 – Υπολογισθείσες συγκλίσεις συναρτήσεων του χρόνου.



Διάγραμμα 6.14 – Υπολογισθείσες συγκλίσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.

Στα διαγράμματα με τις προσαρμοσμένες καμπύλες έχουμε την ίδια εικόνα με τα Διάγραμμα 6.10, Διάγραμμα 6.11 που αναφέρονται στις πραγματικές τιμές της σύγκλισης. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς τα σφάλματα είναι πολύ μικρά (max 10mm).



Διάγραμμα 6.15 – Το σφάλμα που προέκυψε για κάθε διατομή.

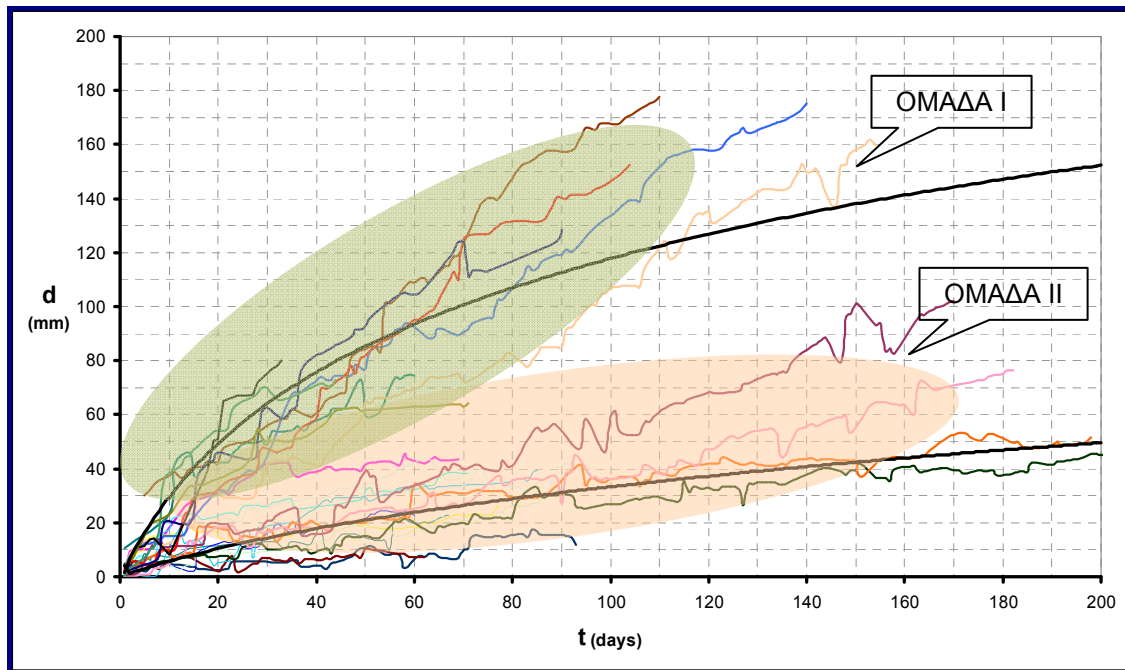
ΔΙΑΤΟΜΗ	dx^* (mm)	dt^* (mm)	X (m)	T (days)	m	ΣΦΑΛΜΑ (mm)
13	51	81	14	157	1,6	4,0
14	20	31	40	12	1,5	2,2
28	33	333	40	353	10,0	8,4
29	42	418	40	364	10,0	6,0
30	41	406	40	266	10,0	10,1
31	35	355	40	257	10,0	7,5
32	40	188	59	107	4,7	5,6
33	25	74	40	27	3,0	6,5
34	25	54	40	30	2,1	2,7
35	21	211	40	87	10,0	8,0
15	22	8	40	2	0,3	1,9
16	16	26	40	18	1,6	2,4
17	5	51	40	397	10,0	2,6
18	7	8	15	234	1,1	1,5
19	23	23	38	463	1,0	2,5
20	8	65	40	173	8,1	1,7
21	20	100	40	299	5,0	3,5
22	15	29	40	29	1,9	2,9
23	10	100	40	443	10,0	2,0
24	7	69	40	255	10,0	2,4
25	10	71	11	222	7,1	2,8
26	14	140	40	390	10,0	4,9
27	19	192	40	372	10,0	7,5
ΟΜΑΔΑ I	33	215	39	166	6,3	6,1
ΟΜΑΔΑ II	14	68	36	254	5,9	3,0

Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν σχετικά με την ανομοιογένεια των μέτρων υποστήριξης σε κάθε διατομή, τις γεωτεχνικές αβεβαιότητες και κυρίως το γεγονός ότι για να εξασφαλιστούν οι προϋποθέσεις του αδιατάρακτου πεδίου αποκλείστηκαν δεδομένα μακριά από το μέτωπο (όπου δεσπάζει ο ερπυσμός) είναι εμφανή στα αποτελέσματα της ανάλυσης. Το εύρος και η διακύμανση των τιμών των παραμέτρων ακόμη και μετά το χωρισμό τους σε 2 ομάδες είναι μεγάλα και το γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις που οι παράμετροι αγγίζουν το άνω όριο που θέσαμε αποδεικνύουν ακριβώς αυτό. Με αυτές τις

επιφυλάξεις λοιπόν, εξάγουμε για την εξέλιξη των συγκλίσεων στο μήκος της σήραγγας που εξετάσαμε την παρακάτω σχέση:

Χ.Θ. 5+465,650 έως 5+404,238	$d = 33 \cdot \left[1 - \left(\frac{39}{x+39} \right)^2 \right] + 215 \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{166} \right)} \right]$
Χ.Θ. 5+473,640 έως 5+564,040	$d = 14 \cdot \left[1 - \left(\frac{36}{x+36} \right)^2 \right] + 68 \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{254} \right)} \right]$

Όπου το d δίνεται σε mm και τα x, t σε m και ημέρες αντίστοιχα.



Διάγραμμα 6.16 – Παρουσίαση των σχέσεων που εξήχθησαν αναφορικά με τις μετρηθείσες τιμές των συγκλίσεων.

7. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΡΠΥΣΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΧΩΡΙΚΗ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσονται σκέψεις για τον διαχωρισμό της χρονικής από τη χωρική συνιστώσα της ακτινικής παραμόρφωσης. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχώμαζας (GSI , σ_{ci} , m_i) και τα όσα ισχύουν στην ανάλυση της διάνοιξης και υποστήριξης των σπηραγγών με καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης θεωρούνται δεδομένα, εκτιμούνται μέσω ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία οι τιμές των παραμορφώσεων που οφείλονται αμιγώς στην προχώρηση του μετώπου και αφαιρούνται από τις μετρηθείσες συνολικές παραμορφώσεις. Αυτό που απομένει δεν είναι παρά η καμπύλη ερπυστικής συμπεριφοράς, από την οποία μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και να διαπιστωθεί εάν η υπόθεση που είχε γίνει ότι στη συγκεκριμένη σήραγγα οι ερπυστικές παραμορφώσεις ήταν έντονες από πολύ νωρίς.

7.1 Παρουσίαση της μεθοδολογίας

7.1.1 Ποιότητα της βραχώμαζας – επί τόπου συνθήκες

Στην παρούσα φάση θεωρούμε την άνω ημιδιατομή N3, για την οποία έχουμε στοιχεία και τις Χ.Θ. 5+550 έως 5+650. Ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 6.2.1 σχετικά με εξασφάλιση του αδιατάρακτου πεδίου γι' αυτό εξαιρείται ο αριστερός κλάδος που εκσκάφθηκε αργότερα. Από τον παρακάτω πίνακα λαμβάνονται τιμές $GSI=20$, $\sigma_{ci}=8\text{MPa}$ και $m_i=6$. Ο πίνακας αναφέρεται σε δεδομένα γεωτρήσεων, δηλαδή πριν την κατασκευή όπου και είναι γνωστό ότι οι συνθήκες ήταν χειρότερες, γι' αυτό ελήφθησαν τα κάτω όρια.

Χ.Θ.		GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i
5+104	5+236	38-48	25-34	16
5+236	5+250	39-45	9	9
5+250	5+259	39-45	9	9
5+259	5+304	45-55	25-34	16
5+304	5+442	15-25	8-12	6-8
5+442	5+551	41-50	17-25	16
5+551	5+665	15-25	8-12	6-8
5+665	5+709,5	40-46	39-69	16

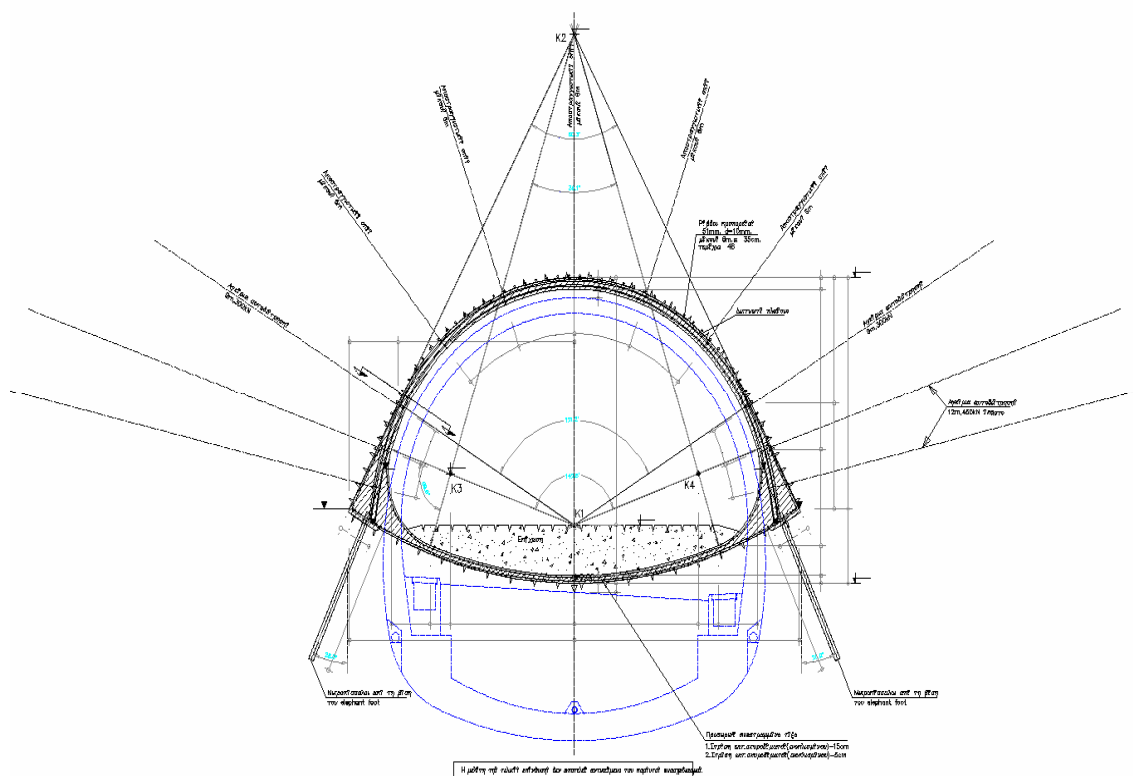
Το υπερκείμενο στο σημείο αυτό (μέσο της χάραξης περίπου) ήταν περί τα 100m και ο συντελεστής ουδέτερης ώθησης $K=0.8$. Άρα το τασικό πεδίο

$$p_0 = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v + 0.8\sigma_v}{2} = 0.9 \times \gamma \times H = 2.25 \text{ MPa} \quad (7.1)$$

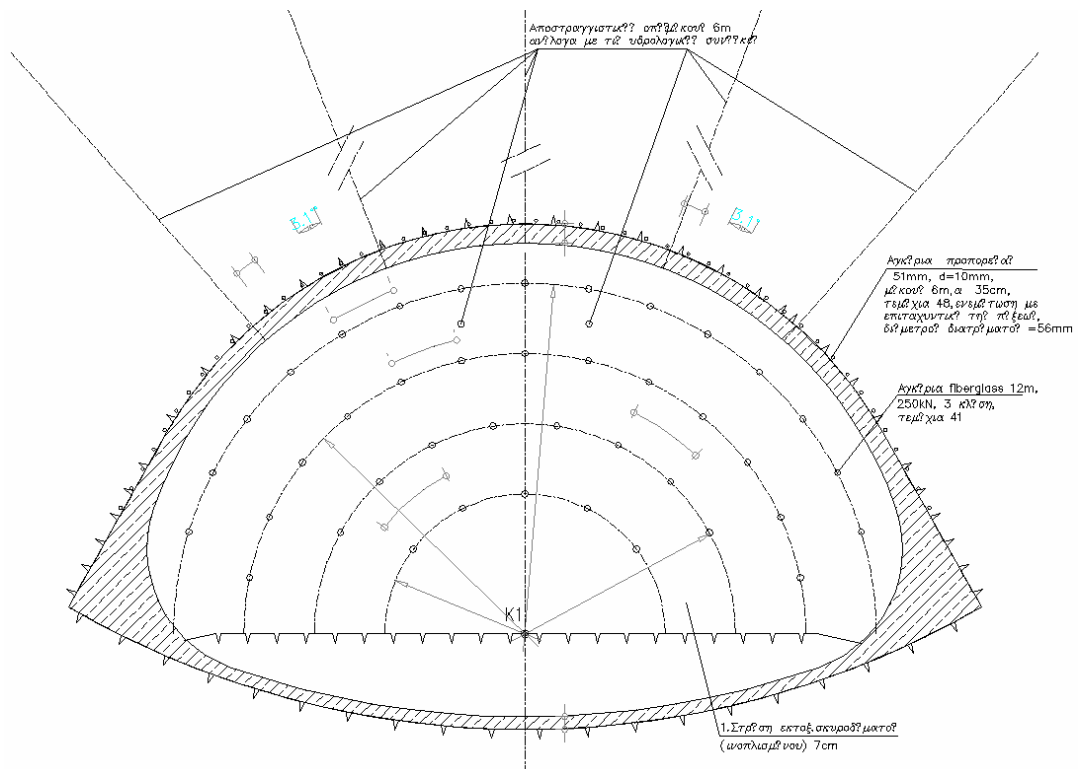
Επειδή η διατομή που εκσκάφθηκε δεν ήταν ακριβώς κύκλος (Εικόνα 7.1), θα πρέπει να αναχθεί σε κύκλο μέσω μίας ισοδύναμης ακτίνας που θα χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς. Μέσω του προγράμματος Autocad υπολογίζεται το εμβαδό εκσκαφής A και τότε η ισοδύναμη ακτίνα θα ισούται με

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{80m^2}{3.14}} = 5.05m \approx 5m \quad (7.2)$$

Επιπλέον, από το σχέδιο της διατομής N3 (Εικόνα 7.1, Εικόνα 7.2) προκύπτουν τα μέτρα υποστήριξης του περιμετρικού τοιχώματος (2 ακύρια 9m 300kN, 4 ακύρια 12m 450 kN, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm, δικτυωτό πλαίσιο), αλλά και του μετώπου (41 ακύρια fiberglass 12m 250kN).



Εικόνα 7.1 – Η τυπική διατομή N3. Διακρίνονται η γεωμετρία και τα μέτρα υποστήριξης.



Εικόνα 7.2 – Μέτρα υποστήριξης του μετώπου, αγκύρια fiberglass και δοκοί forepoling

7.1.2 Δημιουργία καμπυλών σύγκλισης – αποτόνωσης και Cern

Εν συνεχεία, υπολογίζονται οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας σύμφωνα με το τυπολόγιο που αναπτύχθηκε στο θεωρητικό μέρος της εργασίας και παρατίθενται ακολούθως.

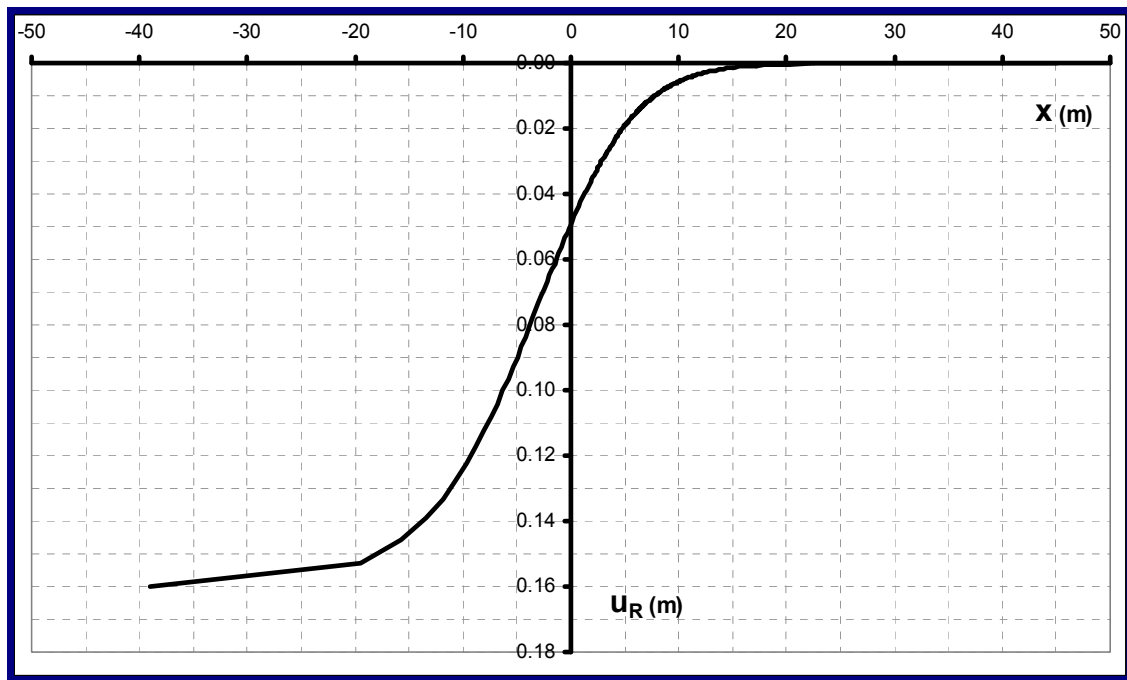
Γεωμετρικά Δεδομένα	Ακτίνα Σήραγγας R (m)	5
	Υπερκείμενο H (m)	100
Γεωλογικά - Γεωτεχνικά Χαρακτηριστικά	Δείκτης Γεωλογικής Αντοχής GSI	20
	Σταθερά Άρρηκτου Υλικού m_i	6
	Αντοχή Άρρηκτου Βράχου σ_{ci} (MPa)	8,00
	Σταθερά Βραχώμαζας m_b	0,3446
	Σταθερά Βραχώμαζας s	0,0001
	Σταθερά Βραχώμαζας a	0,5437
	Συντελεστής Διαταραχής D	0
	Ειδικό Βάρος γ (MN/m ³)	0,025
	Συντελεστής Γεωστατικών Ωθήσεων K_0	0,8
	Λόγος Poisson ν	0,3

Παράμετροι αντοχής και ελαστικότητας	$\sigma^3_{\max}$ (MPa)	1,07
	σ^3_n (MPa)	0,13
	Ισοδύναμη Γωνία Τριβής φ ($^\circ$)	22
	Συνοχή (MPa)	0,12
	Αντοχή Βραχόμαζας σ_{cm} (MPa)	0,49
	Μέτρο Ελαστικότητας E (MPa)	503
	Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	193
	Γωνία Διαστολικότητας δ ($^\circ$)	3,60
Βοηθητικές παράμετροι	Αρχική Πίεση p_0 (MPa)	2,25
	Συντελεστής Υπερφόρτισης N_s	9,120
	Συντελεστής Διαστολικότητας k	1,134
	N_φ	2,166
	λ_{cr}	0,438

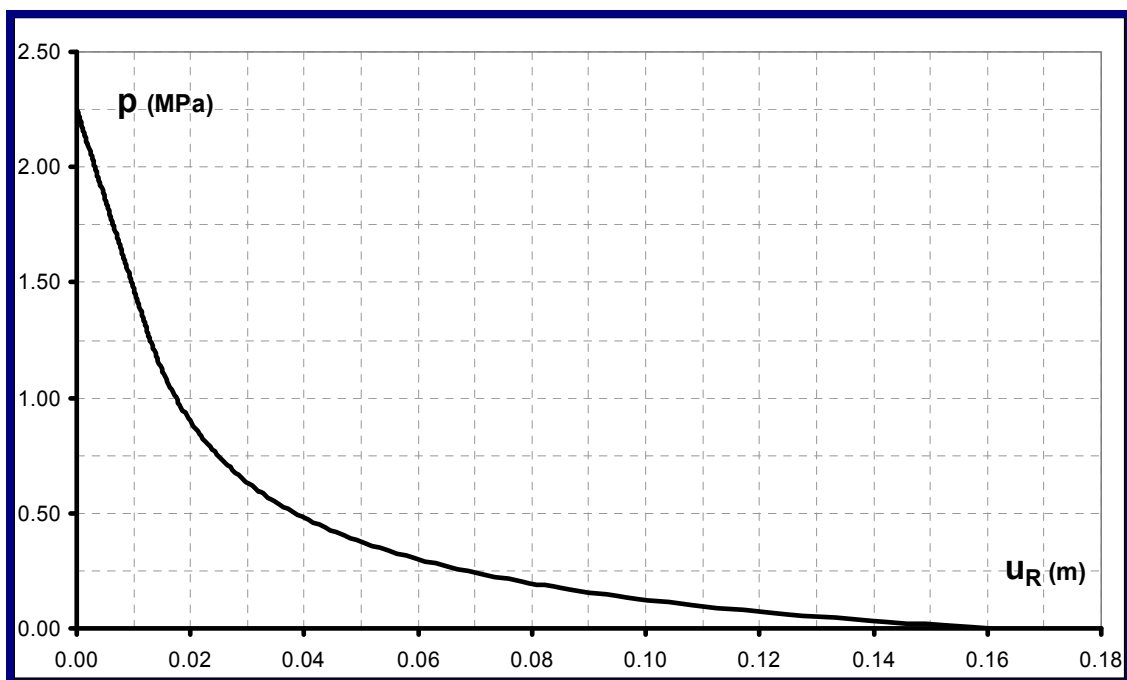
Χρησιμοποιώντας τη σχέση του Chern (3.2) και τις σχέσεις (2.6, 2.13, 2.14, 2.15) και για τις διάφορες τιμές του συντελεστή αποτόνωσης δημιουργούμε το παρακάτω φύλλο Excel, από τα αποτελέσματα του οποίου εξάγονται τα διαγράμματα $x-u_R$ (Cern) και η καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης $p-u_R$. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν από το πρόγραμμα RocSupport.

p (MPa)	p/p_0	λ	r_p (m)	u_R (m)	$u_R/u_{R\infty}$	Chern x (m)
2,250	1	0	5,000	0,0000000	0,0000000	44,2
2,239	0,995	0,005	5,000	0,0001454	0,0010509	22,1
2,228	0,990	0,01	5,000	0,0002908	0,0021018	19,8
2,216	0,985	0,015	5,000	0,0004362	0,0031527	18,4
2,205	0,980	0,02	5,000	0,0005815	0,0042036	17,5
2,194	0,975	0,025	5,000	0,0007269	0,0052545	16,7
2,183	0,970	0,03	5,000	0,0008723	0,0063055	16,1
K.O.K.						
0,045	0,020	0,98	15,023	0,1160643	0,8389641	-12,2
0,034	0,015	0,985	15,340	0,1210701	0,8751479	-13,8
0,023	0,010	0,99	15,671	0,1264277	0,9138750	-16,0
0,011	0,005	0,995	16,019	0,1321720	0,9553975	-19,8
0,000	0,000	1	16,383	0,1383424	1,0000000	-39,7

$u_{R\infty}$



Διάγραμμα 7.1 – Καμπύλη Chern.

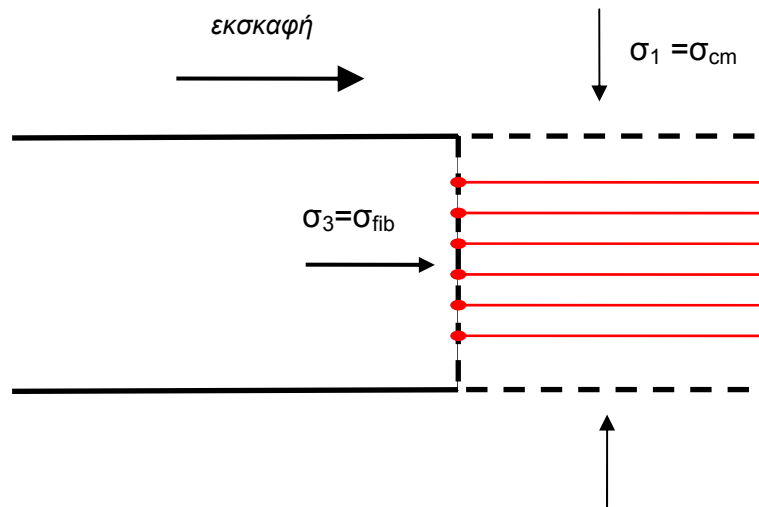


Διάγραμμα 7.2 – Καμπύλη σύγκλισης αποτόνωσης.

7.1.2.1 Ένταξη της υποστήριξης του μετώπου στις καμπύλες

Ένας παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην επίλυση είναι το γεγονός ότι στη σήραγγα του Ανθοχωρίου το μέτωπο εξυγιάνθηκε με αγκύρια προΐσχυροποίησης μετώπου fiberglass. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι το

γεωυλικό εμπρός από το μέτωπο είναι ένα τέμαχος διαστάσεων 8 m (ύψος εκσκαφής από σχέδιο) x 12 m (μήκος αγκυρίων) όπως στο Διάγραμμα 7.3.



Διάγραμμα 7.3 – Το υλικό μπροστά από το μέτωπο θεωρείται ένα τέμαχος βραχόμαζας που υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη.

Το τέμαχος αυτό βρίσκεται σε καθεστώς μονοαξονικής θλίψης με μέγιστη κύρια τάση $\sigma_1 = \sigma_{cm}$ (λίγο πριν την αστοχία) και ελάχιστη κύρια τάση $\sigma_3 = 0$ (ανεμπόδιστη πλευρική παραμόρφωση). Με την τοποθέτηση των αγκυρίων ισχύει πλασματικά καθεστώς τριαξονικής θλίψης με μέγιστη κύρια τάση σ'_1 και ελάχιστη κύρια τάση

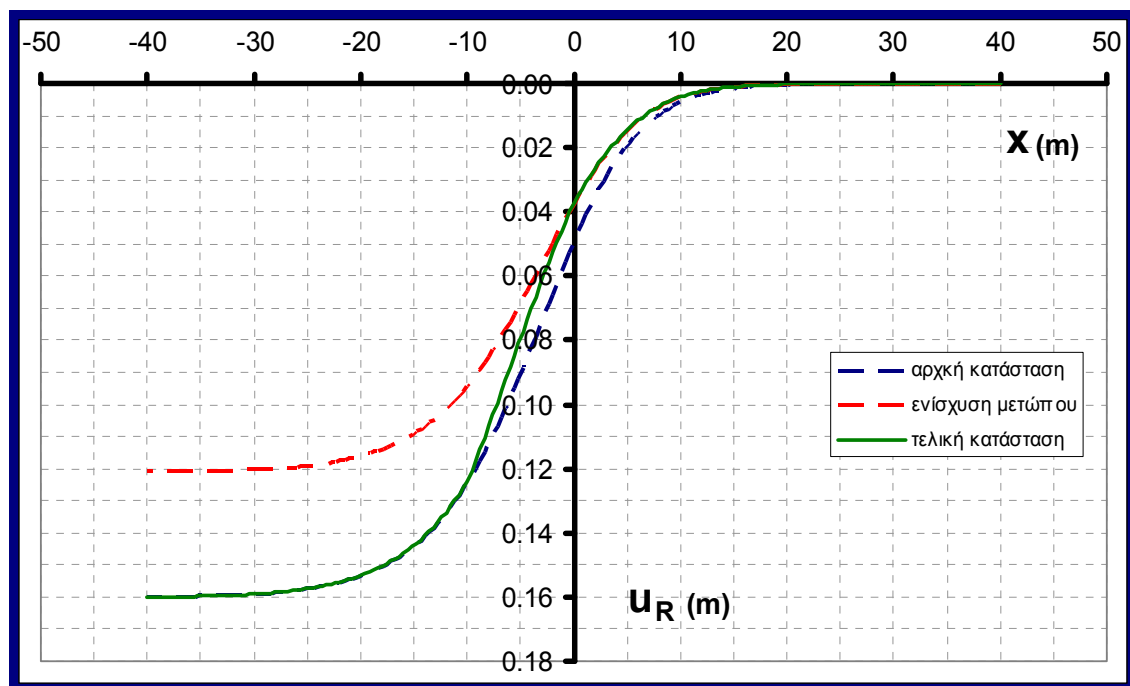
$$\sigma'_3 = \sigma_{fiberglass} = N \frac{F_{\phi\epsilon\rho\upsilon\sigma\sigma\alpha}}{A_{\epsilon\kappa\sigma\kappa\alpha\phi\acute{\eta}\varsigma}} = 42 \times \frac{250kN}{80m^2} = 0.13MPa \quad (7.3)$$

(τα αγκύρια fiberglass κινητοποιούν το μέγιστο της αντοχής τους ακόμη και για πολύ μικρές εξωθήσεις του μετώπου). Μέσω του νόμου Hoek-Brown (4.8) υπολογίζουμε τη νέα τιμή της μέγιστης κύριας τάσης

$$\sigma'_1 = 0.13 + 8 \cdot \left(0.3446 \frac{0.13}{8} + 0.0001 \right)^{0.5437} = 0.61MPa$$

η οποία ισούται με την πλασματική βελτιωμένη αντοχή της βραχόμαζας σ'_{cm} . Παρατηρείται λοιπόν αύξηση στην αντοχή της βραχόμαζας περίπου 25%. Αυτό συνεπάγεται μείωση του συντελεστή υπερφόρτισης δηλαδή μείωση των παραμορφώσεων και μετατόπιση της καμπύλης Chern προς τα πάνω. Αυτή η μετατοπισμένη καμπύλη βέβαια ακυρώνεται μετά την τοποθέτηση των μέτρων

υποστήριξης του τοιχώματος και την προχώρηση της εκσκαφής, διότι όπως προαναφέρθηκε η αύξηση της αντοχής είναι πλασματική κι όχι εγγενής στη βραχώμαζα. Άρα αν θεωρήσουμε ότι η αυτή η εξυγίανση του μετώπου δεν σταματάει απότομα με την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης, αλλά προσαρμόζεται σταδιακά στην αρχική καμπύλη μέσα σε ένα εύρος προσαρμογής x_e (ο προσδιορισμός του οποίου θα μπορούσε να γίνει με τριδιάστατη ανάλυση ευστάθειας του μετώπου, εδώ θεωρήσαμε $x_e=1\cdot D$), τότε το υλικό θα κινηθεί επί της «βελτιωμένης» καμπύλης για $x<0$, για $0<x<x_e$ επί της καμπύλης συναρμογής και για $x>0$ επί της αρχικής καμπύλης Chern (Διάγραμμα 7.4). Με τον τρόπο αυτό εισήχθη στο μοντέλο η επιρροή της εξυγίανσης του μετώπου με αγκύρια fiberglass.



Διάγραμμα 7.4 – Η επιρροή της υποστήριξης στο μέτωπο.

7.1.2.2 Ένταξη της περιμετρικής υποστήριξης στις καμπύλες

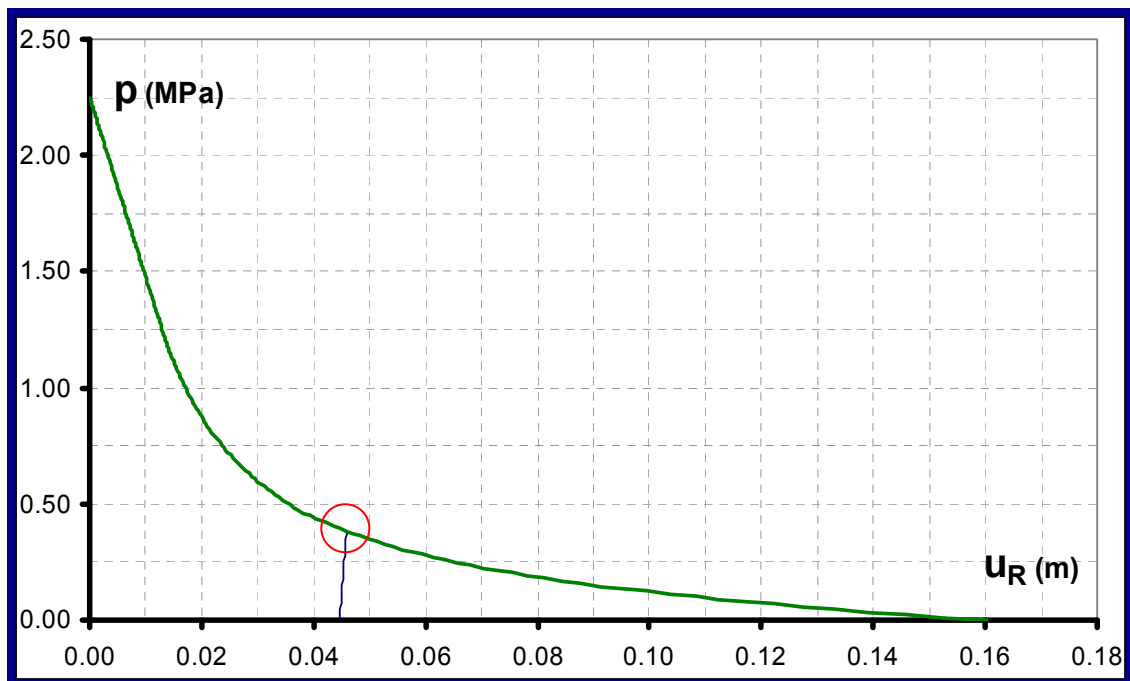
Έπειτα, για $x_d=1$ m λαμβάνεται από το Διάγραμμα 7.4 η μετακίνηση που έχει πραγματοποιηθεί τη στιγμή τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης. Παρατηρούμε ότι χωρίς θεώρηση της επιρροής των αγκυρίων fiberglass η μετακίνηση θα ήταν $u_{Rd}=0,057134$ m ενώ η πραγματική είναι $u_{Rd}=0,0446135$ m, δηλαδή η βραχώμαζα τελικά έχει μικρότερη αποτόνωση από εκείνη που θα

λαμβάνονταν χωρίς τη θεώρηση υποστήριξης του μετώπου, γεγονός που θα οδηγούσε σε υποδιαστασιολόγηση της υποστήριξης.

Στο Κεφάλαιο 7.1.1 αναφέρθηκε ότι η υποστήριξη περιλαμβάνει εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 30 cm, αγκύρια και μεταλλικό πλαίσιο. Εφόσον σε αυτό το στάδιο δεν εξετάζεται η ακριβής λύση αλλά η παρουσίαση της μεθοδολογίας, αντικαθίστανται χονδροειδώς τα αγκύρια και το πλαίσιο με μία επιπλέον στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5 cm, δηλαδή συνολικά 35 cm σκυρόδεμα. Υπολογίζεται η ακαμψία του δακτυλίου από τη σχέση 3.3

$$K = \frac{20000}{5 \cdot (1 + 0.2) \left[(1 - 0.2) \frac{5}{0.35} - 0.5 \cdot 0.2 \right]} = 294 \frac{MPa}{m}$$

και από την καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης (Διάγραμμα 7.5) εκτιμάται η τελική μετακίνηση της υποστηριζόμενης πλέον διατομής, $u_{R\infty}=0,045888$ m, η οποία συμβαίνει για $p=0,375$ MPa ή $\lambda=0,8$.

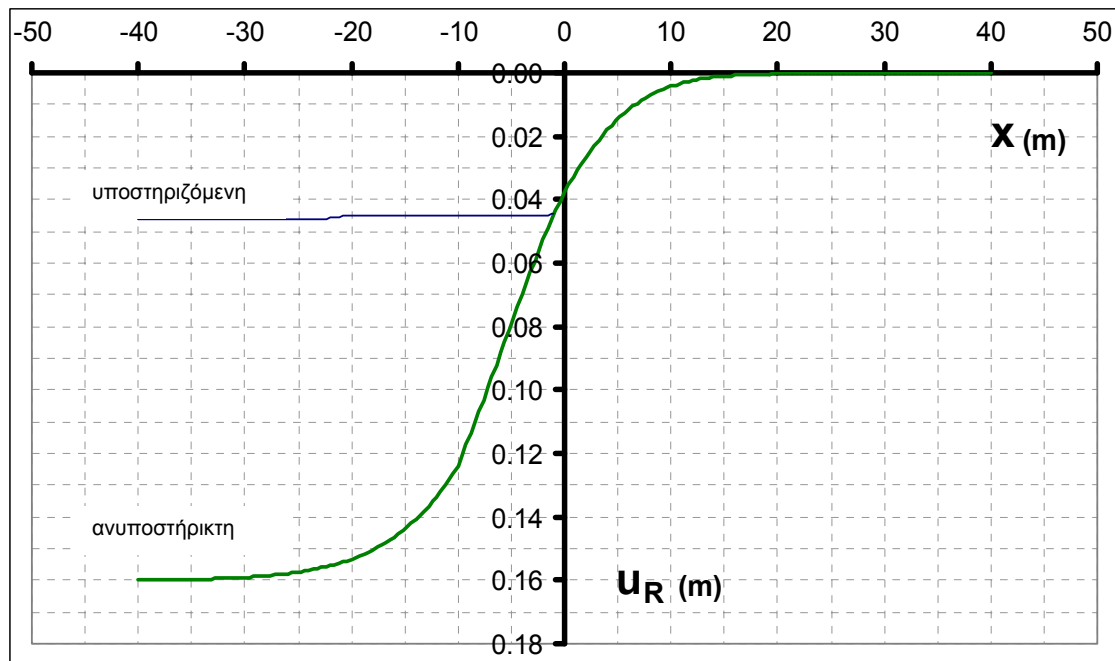


Διάγραμμα 7.5 – Ισορροπία της σήραγγας μετά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης.

7.1.3 Σύνδεση των μετρήσεων με τα αποτελέσματα της επίλυσης

Πλέον, γνωρίζουμε την αρχή και το πέρας της καμπύλης Cern της υποστηριζόμενης διατομής, (x_d, u_{Rd}) και $(x_{\infty} \approx 2D, u_{R\infty})$ και μεταξύ αυτών των

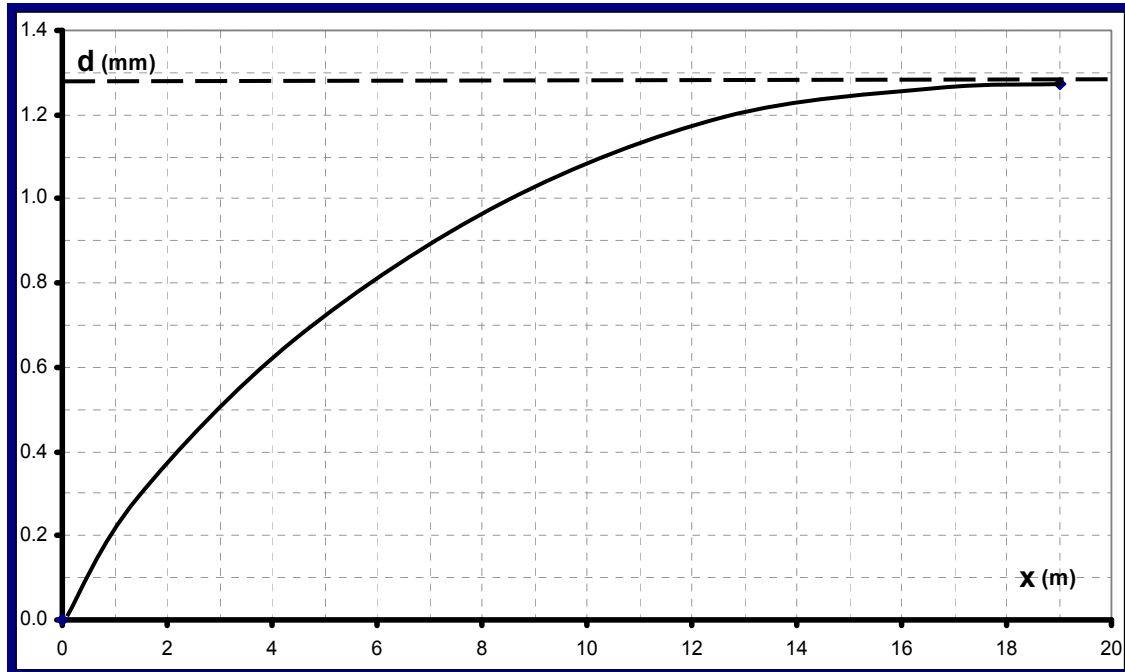
σημείων μπορεί να σχεδιαστεί μία καμπύλη προσαρμογής που να έχει παρόμοια μορφή με την αντίστοιχη καμπύλη της ανυποστήρικτης διατομής.



Διάγραμμα 7.6 – Καμπύλη Cern της ανυποστήρικτης και της υποστηριζόμενης διατομής.

Επειδή οι τοπογραφικές ακίδες τοποθετήθηκαν στις διατομές αμέσως μετά την τοποθέτηση και της προσωρινής υποστήριξης, τα δεδομένα των μετρήσεων που έχουμε στη διαθεσή μας (όπως στα Διάγραμμα 6.2, Διάγραμμα 6.3) αφορούν θέσεις για $x < x_d$, δηλαδή η παραμόρφωση της βραχόμαζας πίσω από το μέτωπο δεν έχει καταγραφεί. Προκειμένου λοιπόν να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της επίλυσης με τα δεδομένα των μετρήσεων, θα πρέπει να μεταφέρουμε τους άξονες της καμπύλης Cern, ήτοι να αφαιρέσουμε από όλες τις μετακινήσεις την τιμή u_{Rd} , από όλα τα x την τιμή x_d και να αναστρέψουμε τον άξονα των μετακινήσεων. Τελικά προκύπτει η καμπύλη που φαίνεται στο Διάγραμμα 7.7 που είναι στην ίδια μορφή (άρα άμεσα συγκρίσιμη) με τις καμπύλες $d-x$ που προέρχονται από τα δεδομένα των μετρήσεων. Λόγω της μεγάλης ακαμψίας της προσωρινής υποστήριξης που προέκυψε με αυτή την απλοϊκή προσομοίωση, παρατηρούνται πολύ μικρές μετακινήσεις οι οποίες είναι αδύνατο να συγκριθούν με τις πραγματικές μετρήσεις που ήταν της τάξης των δεκάδων mm. Κατόπιν αυτού, με την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία που ακολουθεί θα γίνει δυνατή αφενός η καλύτερη προσομοίωση της ακαμψίας

της υποστήριξης και αφετέρου η προσομοίωση της αποτόνωσης σε περισσότερα του ενός στάδια κι έτσι θα έχουμε στη διάθεσή μας τιμές των μετακινήσεων σε όλο το εύρος $\lambda=0\div 1$ κι όχι μόνο για $\lambda=\lambda_d$ και $\lambda=0.8$.



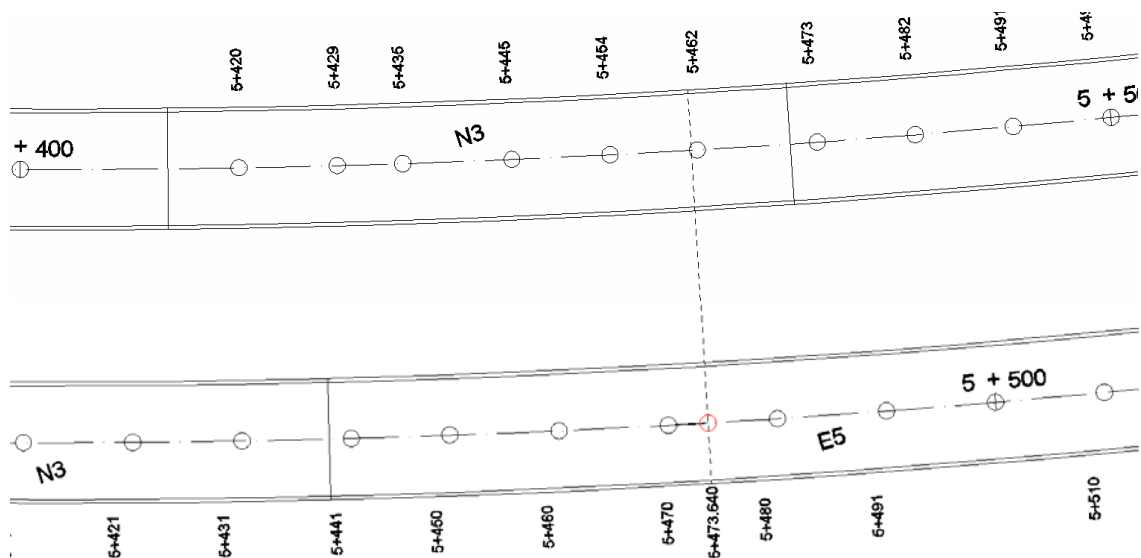
Διάγραμμα 7.7 – Υπολογισθείσες μετατοπίσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.

7.2 Κατάστρωση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφηκε προηγουμένως, προσομοιώνοντας ακριβέστερα τη σύγκλιση της σήραγγας με την προχώρηση της εκσκαφής. Το αποτέλεσμα αυτής της ανάλυσης είναι η εξαγωγή διαγραμμάτων $d-x$ και $d-t$ τα οποία κατόπιν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα διαγράμματα με τις μετρηθείσες συγκλίσεις (όπως τα συναντήσαμε στο Κεφάλαιο 5) και τελικά εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τη συνεισφορά των χρονικά εξαρτημένων φαινομένων.

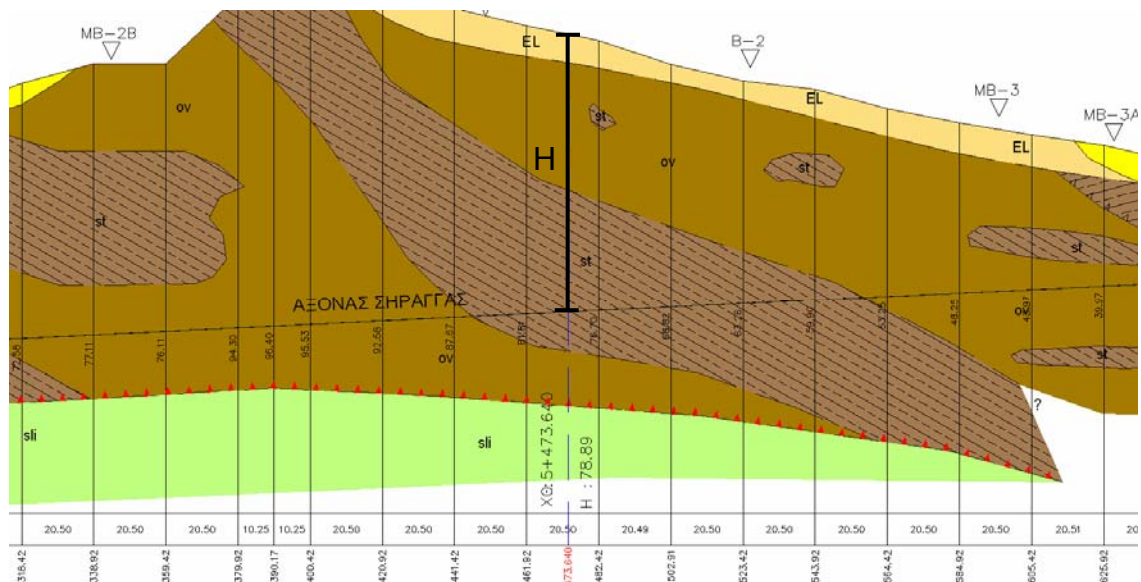
7.2.1 Ποιότητα της βραχώμαζας – επί τόπου συνθήκες

Επελέχθη να εξεταστεί η διατομή 27 (Χ.Θ. 5+473.640) του δεξιού κλάδου. Από την οριζοντιογραφία της σήραγγας (Διάγραμμα 7.8) φαίνεται ότι στη θέση αυτή χρησιμοποιήθηκε η τυπική διατομή E5, ενώ για τον αριστερό κλάδο η N3. Η απόσταση των αξόνων των 2 κλάδων μετράται 25 m.



Διάγραμμα 7.8 – Περιοχή ενδιαφέροντος της οριζοντιογραφίας της σήραγγας.

Από τη μηκοτομή του δεξιού κλάδου της σήραγγας (Διάγραμμα 7.9) βλέπουμε ότι για την αυτή Χ.Θ. τα υπερκείμενα είναι 79 m, ενώ αντίστοιχα τα υπερκείμενα του αριστερού κλάδου είναι 77 m, στο μοντέλο λοιπόν τίθεται $H = 80$ m.



Διάγραμμα 7.9 – Λεπτομέρεια της μηκοτομής του δεξιού κλάδου της σήραγγας.

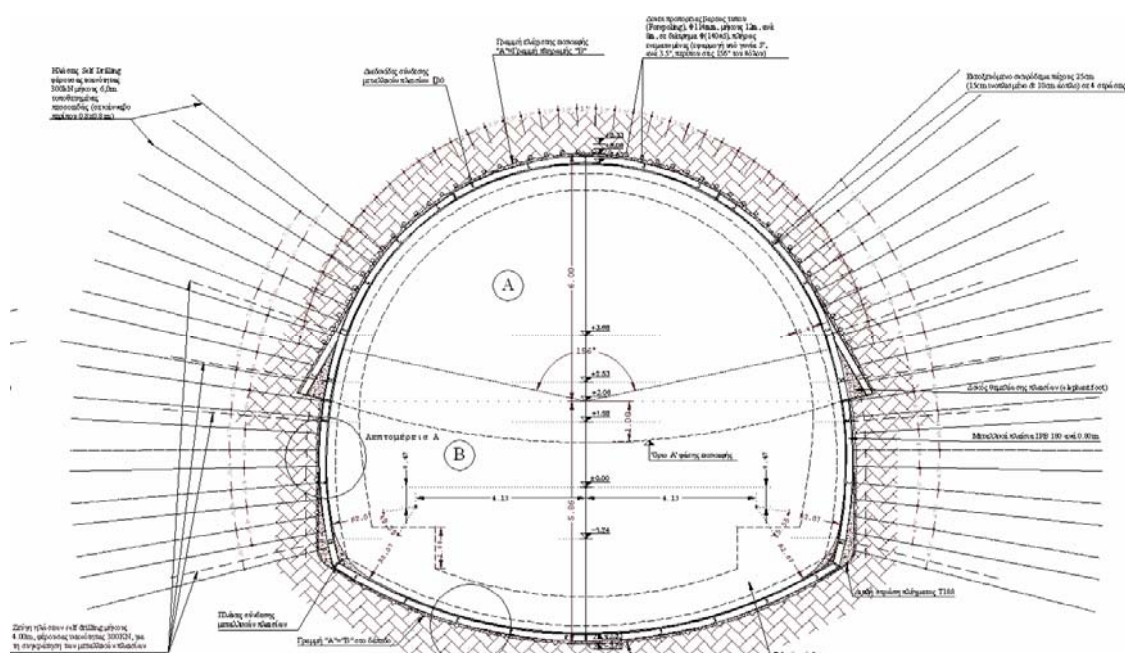
Επειδή, όπως έχει προαναφερθεί, απεδείχθη ότι οι παράμετροι αντοχής και παραμορφωσιμότητας της βραχώδους είχαν υπερτιμηθεί κατά τη μελέτη της εν λόγω σήραγγας, οι τιμές GSI , σ_{ci} και m_i ελήφθησαν συνεκτιμώντας την εργασία

των Marinos, Fortsakis, Prountzopoulos (2006) στην οποία οι εν λόγω τιμές έχουν προσδιοριστεί μέσω ανάστροφων αναλύσεων (Εικόνα 7.3) και τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής γεωτεχνικής μελέτης που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7.1.1 και καταλήγουμε στις τιμές **GSI = 17, $\sigma_{ci} = 6 \text{ MPa}$, $m_i = 6$.**

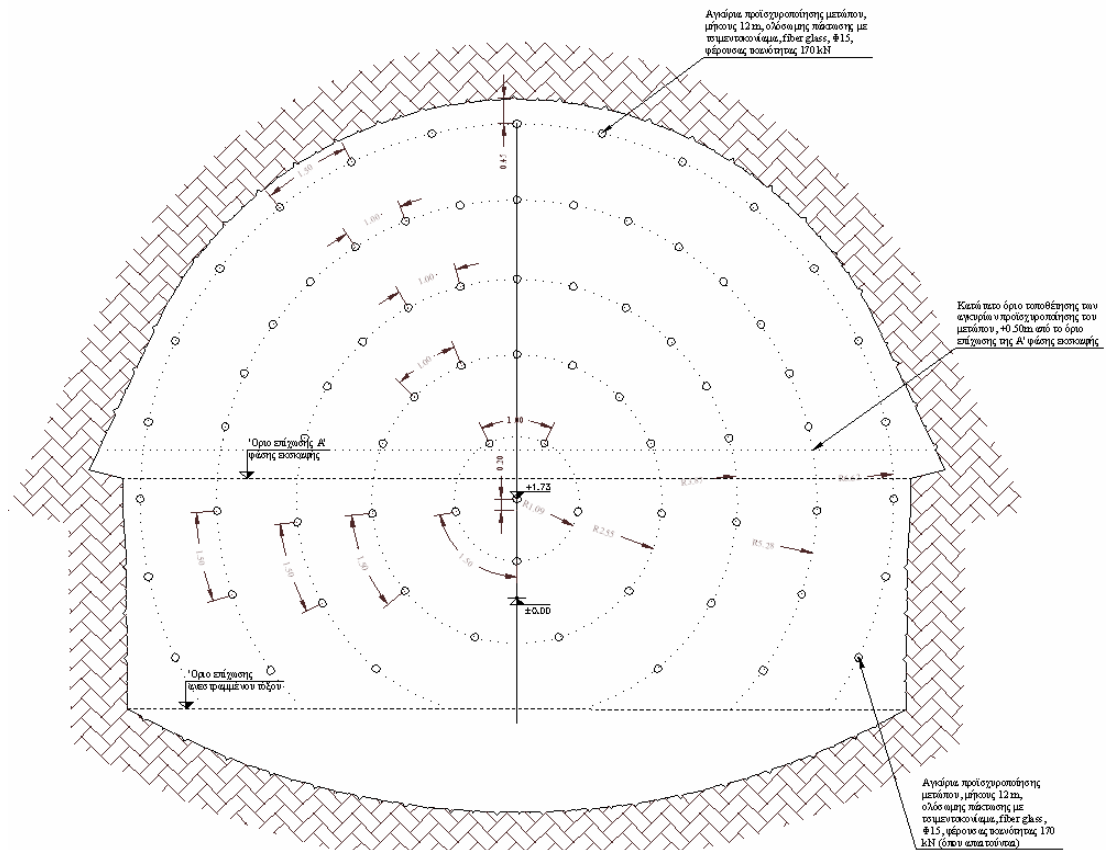
	GSI	σ_a (MPa)	m_i
case study 1*	12-15	3-5	5
case study 2†	15-17	5-6	5-6
Sheared Flysch‡	13-17	4-5	5-6

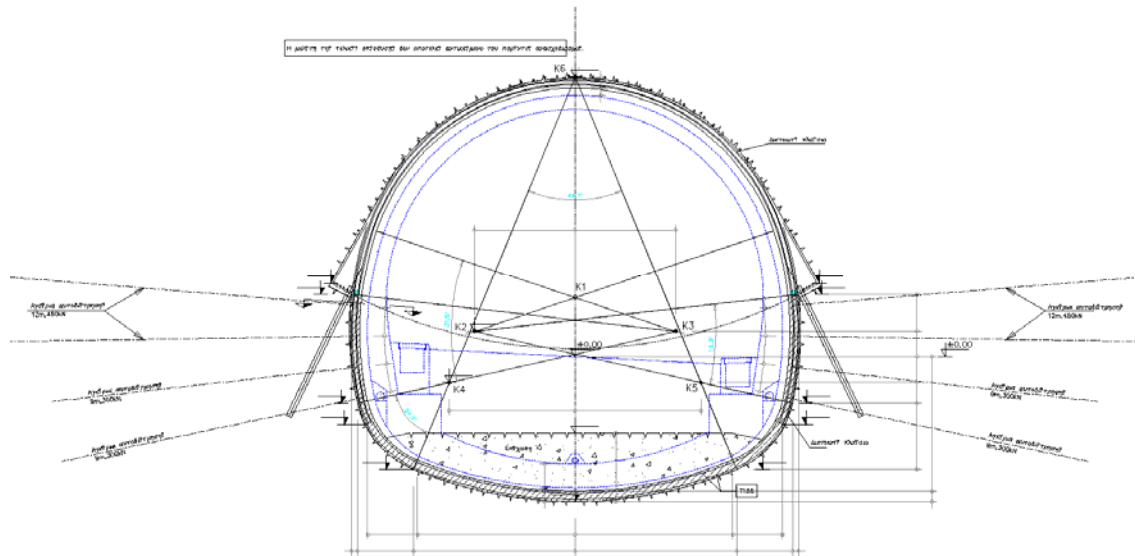
Εικόνα 7.3 – Οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων της βραχώμαζας κατά Marinos, Fortsakis, Prountzopoulos (2006).

Σε ότι αφορά την προσωρινή υποστήριξη, έχουμε πλήρη εικόνα αυτής από τα σχέδια των μελετητικών εταιριών για τις διατομές N3 (αριστερός κλάδος) και E5 (δεξιός κλάδος) τα οποία για λόγους πληρότητας παρατίθενται ακολούθως. Για τη διατομή N3 μάλιστα πολλά στοιχεία (διάμετροι αγκυρίων και μικροπασσάλων, εμβαδά διατομής και ροπές αδράνειας σύμμικτων διατομών κλπ.) ελήφθησαν κι από την τεχνική έκθεση που συνόδευε τη διατομή.

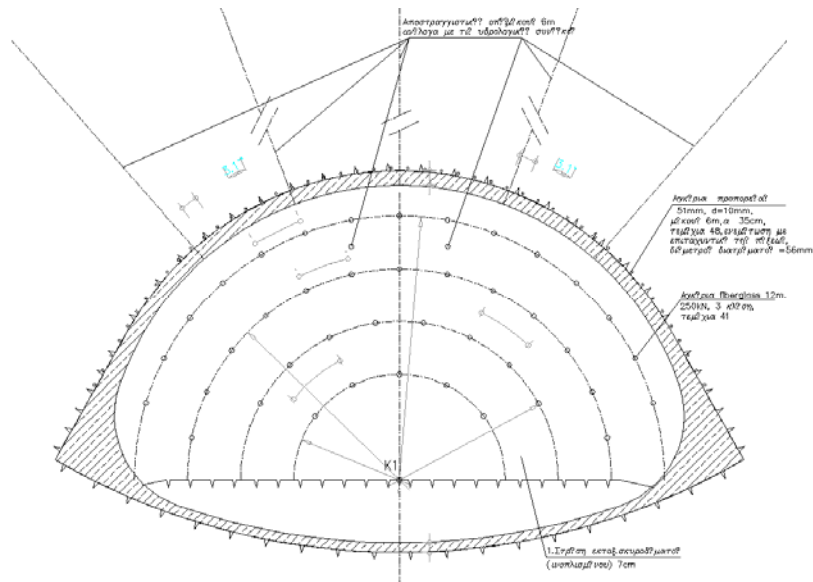


Εικόνα 7.4 – Η τυπική διατομή Ε5, περιμετρική υποστήριξη.





Εικόνα 7.7 – Η τυπική διατομή N3, υποστήριξη κάτω ημιδιατομής (bench).

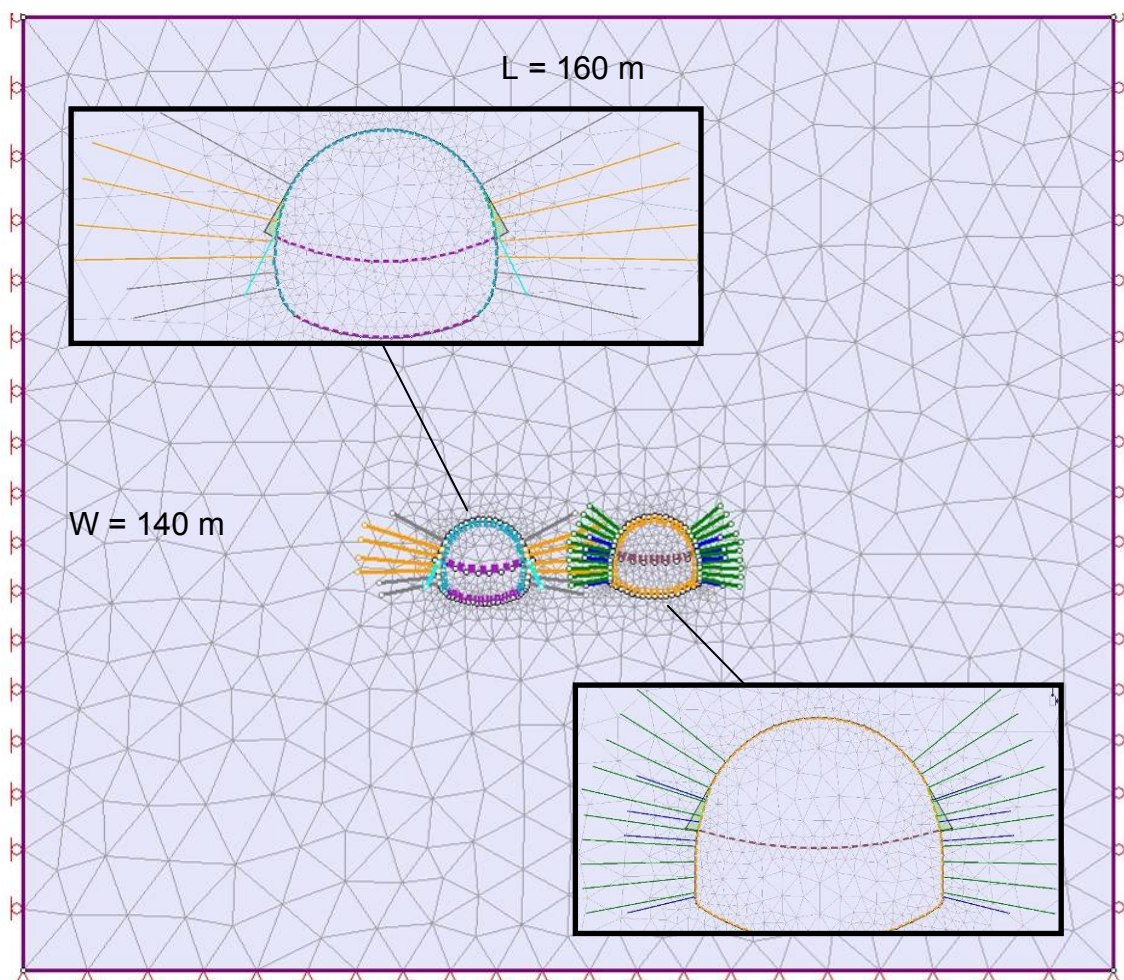


Εικόνα 7.8 – Μόνο η άνω ημιδιατομή της N3 υποστηρίχθηκε στο μέτωπο.

7.2.2 Ένταξη της γεωμετρίας του προβλήματος

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Phase2 ver. 6 της εταιρίας Rocscience Inc.. Για να οριστεί ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων, θεωρείται περιοχή επιρροής της σήραγγας ίση με $6D = 60$ m αριστερά, δεξιά και κάτω από τις σήραγγες και 80 m επάνω, όσο δηλαδή τα υπερκείμενα για να μη χρειαστεί να επιβληθεί επιπλέον φορτίο. Έπειτα ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες, για τις οποίες ισχύουν τα εξής: Απαγορεύση της οριζόντιας και κατακόρυφης μετακίνησης στο

κάτω όριο (άρθρωση), ενώ στα πλαϊνά όρια απαγορεύση μόνο της οριζόντιας μετακίνησης (κύλιση). Το ακριβές σχήμα των 2 ανοιγμάτων, τα όρια των φάσεων εκσκαφής, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα αγκύρια, οι μικροπιάσσαλοι και τα elephant feet εισήχθησαν απ' ευθείας από το πρόγραμμα Autocad κι έτσι δε χρειάστηκε να γίνουν χονδροειδείς παραδοχές σχετικά με αυτές τη γεωμετρία αυτών. Τέλος, γίνεται η διακριτοποίηση του καννάβου σε τρικομβικά τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, διαβαθμισμένα έτσι ώστε να έχουμε πυκνότερο κάνναβο (δηλαδή μικρότερων διαστάσεων πεπερασμένα στοιχεία) στην περιοχή ενδιαφέροντος, που είναι μέσα και γύρω από τα ανοίγματα. Το αποτέλεσμα αυτών των ενεργειών παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.9.



Εικόνα 7.9 – Μοντελοποίηση της γεωμετρίας του προβλήματος.

7.2.3 Ένταξη των ιδιοτήτων των υλικών

Για να προσδιοριστεί το πεδίο των τάσεων πρέπει να εισαχθεί η τιμή του συντελεστή ουδέτερης ώθησης. Με βάση τα στοιχεία της γεωτεχνικής προμελέτης, $K = 0.7$ τόσο στο επίπεδο όσο και εκτός επιπέδου, κατά τη

διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Έπειτα, γνωρίζοντας τις τιμές GSI , σ_{ci} , m_i της βραχόμαζας υπολογίζουμε το μέτρο Ελαστικότητας και τις παραμέτρους m_b , s , a του γενικευμένου κριτηρίου Hoek-Brown (αυτό καθορίσαμε σαν νόμο αστοχίας) όπως στο Κεφάλαιο 7.1.2 Το υλικό πρέπει να αστοχεί με συμπεριφορά ελαστική-απολύτως πλαστική άρα τίθενται παραμένουσες τιμές αντοχής ίδιες με τις αρχικές και παράμετρο διαστολής $\psi = \frac{m_b}{6}$, σύμφωνα με τη σύσταση στο εγχειρίδιο του Phase. Είναι γνωστό ότι μετά τη θεμελίωση των πλαισίων στο elephant foot, αυτό γεμίζει με σκυρόδεμα, επομένως για την προσομοίωση μπορεί να θεωρηθεί ένας άκαμπτος όγκος σκυροδέματος που έχει ελαστική συμπεριφορά και δεν αστοχεί. Θέτουμε νόμο αστοχίας Mohr-Coulomb και υπολογίζονται τα αντίστοιχα c, ϕ γνωρίζοντας ότι $\sigma_c = 20 \text{ MPa}$ και $\sigma_t = 0.1\sigma_c$. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Υλικό	E (MPa)	γ (kN/m ³)	ν	Κριτήριο αστοχίας	
Βραχόμαζα	367000	25	0.3	HB	$\sigma_{ci}=6\text{MPa}$, $m_b=0.31$, $s=0$, $a=0.55$, $\psi=0.05$
Elephant foot	250000	25	0.2	MC	$\sigma_t=2\text{MPa}$, $\phi=78.58^\circ$, $c=1\text{MPa}$

Σχετικά με τα αγκύρια, όπως φαίνεται στις Εικόνα 7.4, Εικόνα 7.6, Εικόνα 7.7 έχουμε τα διάφορα είδη που παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα. Να σημειωθεί ότι για τους υπολογισμούς ελήφθησαν υπόψη οι ακόλουθες τιμές για τις παραμέτρους αντοχής και παραμορφωσιμότητας του χάλυβα και του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή:

- Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος: **20 MPa**
- Παραμένουσα θλιπτική αντοχή σκυροδέματος: **5 MPa**
- Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος: **2 MPa**
- Παραμένουσα εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος: **0 MPa**
- Θλιπτική αντοχή χάλυβα: **275 MPa**
- Παραμένουσα θλιπτική αντοχή χάλυβα: **275 MPa**
- Εφελκυστική αντοχή χάλυβα: **275 MPa**
- Παραμένουσα εφελκυστική αντοχή χάλυβα: **0 MPa**

Τύπος	Μήκος (m)	(Ισοδύναμη) διάμετρος (mm)	E (GPa)	Φέρουσα Δύναμη (kN)	Απόσταση εκτός επιπέδου (m)	ΥΠΟΜΝΗΜΑ (Εικόνα 7.9)
Αυτοδιατρυόμενα	4	50	210	600	0.8	
Αυτοδιατρυόμενα	6	25	210	300	0.8	
Αυτοδιατρυόμενα	9	27.9	210	300	1.0	
Αυτοδιατρυόμενα	12	31.5	210	450	1.0	
Μικροπάσσαλοι	4	320	45.25	1925	1.0	

Η απόσταση εκτός επιπέδου ισούται με το βήμα εκσκαφής το οποίο για τη διατομή E5 του δεξιού κλάδου είναι 0.8 m και για τη διατομή N3 του αριστερού κλάδου 1 m. Σημειώνεται επίσης ότι τα αγκύρια 4 m της διατομής E5 τοποθετούνται σε ζεύγη, γι' αυτό και στο πρόγραμμα τα προσομοιώσαμε με ένα αγκύριο διπλάσιας διαμέτρου και φέρουσας ικανότητας. Σημειώνεται ότι τα αυτοδιατρυόμενα αγκύρια ισοδυναμούν στο Phase με αγκύρια πλήρους πάκτωσης (fully bonded). Οι μικροπάσσαλοι τοποθετούνται επίσης σε ζεύγη, γνωρίζοντας λοιπόν τη μορφή τους, μπορούμε να υπολογίσουμε με τη βοήθεια των σχέσεων 3.4, 3.5, 3.6 τα χαρακτηριστικά μεγέθη της ισοδύναμης διατομής (Εικόνα 7.10):

$$A_s = \pi \left(\frac{0.114}{2} \right)^2 - \pi \left(\frac{0.101}{2} \right)^2 = 2.2 \times 10^{-3} m^2$$

$$A_c = \pi \left(\frac{0.160}{2} \right)^2 - A_s = 17.9 \times 10^{-3} m^2$$

$$I_s = \frac{\pi \cdot 0.114^4}{64} - \frac{\pi \cdot 0.101^4}{64} = 0.003181 \times 10^{-3} m^4$$

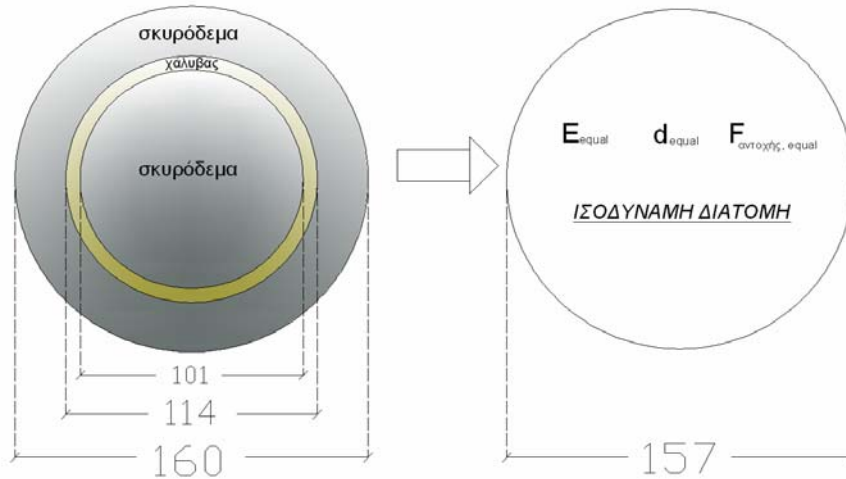
$$I_c = \frac{\pi \cdot 0.160^4}{64} - 0.003181 \times 10^{-3} = 0.028973 \times 10^{-3} m^4$$

$$(EA)_{eq} = E_{eq} \times \frac{\pi d_{eq}^2}{4} = 25 \times 17.9 + 210 \times 2.2 = 909.5 MPa \times m^2$$

$$(EI)_{eq} = E_{eq} \times \frac{\pi d_{eq}^4}{64} = 25 \times 0.028973 + 210 \times 0.003181 = 1.392 MPa \times m^2$$

Συνεπάγεται ότι $d_{eq} = 0.157m$, $E_{eq} = 47000MPa$

$$F_{αντοχής} = 20 \times 17.9 + 275 \times 2.2 = 963kN$$



Εικόνα 7.10 – Λεπτομέρεια μικροπασσάλου, αρχική και ισοδύναμη διατομή.

Το ζεύγος των μικροπασσάλων θα προσομοιωθεί επίσης ως αγκύριο το οποίο λειτουργεί θλιπτικά με διπλάσια φέρουσα ικανότητα και διάμετρο από εκείνη του μεμονωμένου μικροπάσσαλου ($F = 2 \times F_{αντοχής} = 1926 \text{ kN}$ και $d = 2 \times d_{eq} = 314 \text{ mm}$). Η εσωτερική υποστήριξη διακρίνεται σε 4 κατηγορίες: οι δύο αφορούν τη σύμμικτη διατομή εκτοξευόμενου σκυροδέματος και πλαισίων που χρησιμοποιείται για την στήριξη του θόλου και των παρειών του ανοίγματος και οι άλλες δύο την επένδυση του δαπέδου από σκέτο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ώστε να κλείσει ο δακτύλιος, να ενισχυθεί η θλιπτική του λειτουργία και να περιοριστούν τα φαινόμενα ανύψωσης.

Τύπος	E (GPa)	(Ισοδύναμο) πάχος (mm)	Θλιπτική αντοχή		Εφελκυστική αντοχή		ΥΠΟΜΝΗΜΑ (Εικόνα 7.9)
			αρχική (MPa)	παραμένουσα (MPa)	αρχική (MPa)	παραμένουσα (MPa)	
Σκυρόδεμα + δικτυωτό	27.34	29	23.02	7.98	4.98	0	
Σκυρόδ. N3	25.00	30	20	5	2	0	
Σκυρόδεμα + IPB	21.83	28	24.83	12.1	9.54	0	
Σκυρόδ. E5	25.00	25	20	5	2	0	

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα για τις ισοδύναμες διατομές προέκυψαν ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, δηλαδή για την πρώτη περίπτωση σκυροδέματος + δικτυωτού πλαισίου:

$$A_s = 3.215 \times 10^{-3} m^2, A_c = 0.297 m^2, I_s = 0.0138 \times 10^{-3} m^4, I_c = 2.25 \times 10^{-3} m^4$$

$$\left. \begin{aligned} (EI)_{eq} &= E_{eq} \times \frac{1m \times h_{eq}^3}{12} = 59.24 MPa \times m^2 \\ (EA)_{eq} &= E_{eq} \times 1m \times h_{eq} = 8100 MPa \times m^2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} h_{eq} &= 0.2963m \\ E_{eq} &= 27337 MPa \end{aligned}$$

$$\sigma_{\theta\lambda} = \frac{0.297 \times 20 + 3.2 \times 10^{-3} \times 275}{0.2963} = 23.02 MPa$$

$$\sigma_{\theta\lambda, \pi\alpha\rho} = \frac{0.297 \times 5 + 3.2 \times 10^{-3} \times 275}{0.2963} = 7.98 MPa$$

$$\sigma_{\varepsilon\phi} = \frac{0.297 \times 2 + 3.2 \times 10^{-3} \times 275}{0.2963} = 4.98 MPa$$

$$\sigma_{\varepsilon\phi, \pi\alpha\rho} = \frac{0.297 \times 0 + 3.2 \times 10^{-3} \times 0}{0.2963} = 0 MPa$$

Ενώ για τη δεύτερη περίπτωση σκυροδέματος + πλαισίου IPB*:

$$A_s = 8.16 \times 10^{-3} m^2, A_c = 0.243 m^2, I_s = 0.04789 \times 10^{-3} m^4, I_c = 1.303 \times 10^{-3} m^4$$

$$\left. \begin{aligned} (EI)_{eq} &= E_{eq} \times \frac{1m \times h_{eq}^3}{12} = 42.63 MPa \times m^2 \\ (EA)_{eq} &= E_{eq} \times 1m \times h_{eq} = 6246 MPa \times m^2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} h_{eq} &= 0.2861m \\ E_{eq} &= 21825 MPa \end{aligned}$$

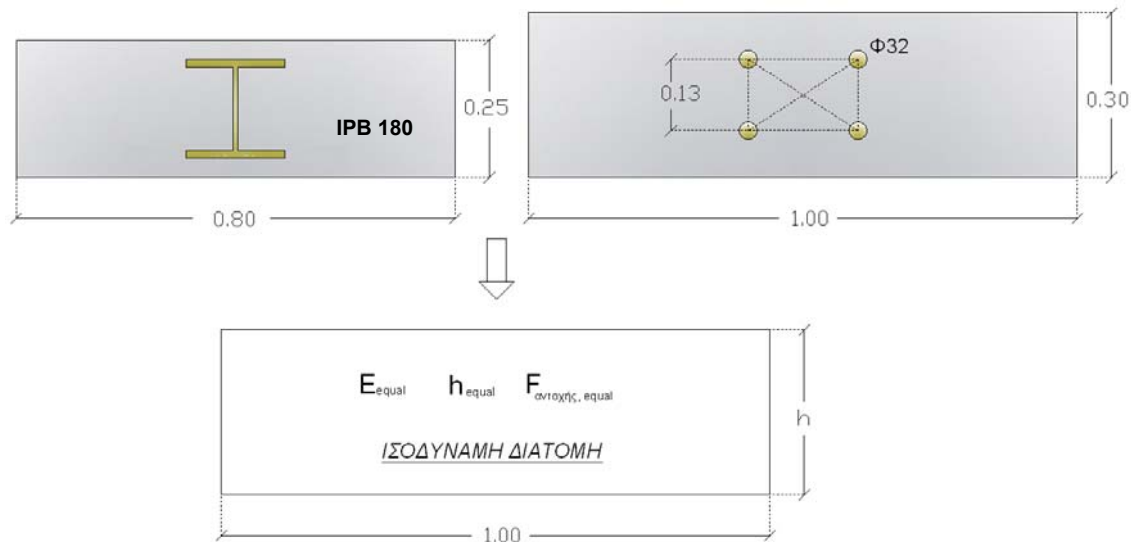
$$\sigma_{\theta\lambda} = \frac{0.243 \times 20 + 8.16 \times 10^{-3} \times 275}{0.2861} = 24.83 MPa$$

$$\sigma_{\theta\lambda, \pi\alpha\rho} = \frac{0.243 \times 5 + 8.16 \times 10^{-3} \times 275}{0.2861} = 12.1 MPa$$

$$\sigma_{\varepsilon\phi} = \frac{0.243 \times 2 + 8.16 \times 10^{-3} \times 275}{0.2861} = 9.54 MPa$$

$$\sigma_{\varepsilon\phi, \pi\alpha\rho} = \frac{0.243 \times 0 + 8.16 \times 10^{-3} \times 0}{0.2861} = 0 MPa$$

* οι τιμές A, I είναι
ανηγμένες σε τρέχον μέτρο



Εικόνα 7.11 – Σχηματική απεικόνιση των αρχικών και ισοδύναμων διατομών υποστήριξης.

7.2.4 Ένταξη της διαδικασίας εκσκαφής με τη μέθοδο της ισοδύναμης χαλάρωσης της βραχύμαζας

Η συνήθης πρακτική κατά το σχεδιασμό μιας σήραγγας που εκσκάπτεται σε 1 φάση είναι η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία να γίνεται σε 3 στάδια: Στο πρώτο στάδιο («ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΟ») η σήραγγα και τα μέτρα υποστήριξης έχουν σχεδιαστεί αλλά δεν έχουν εκσκαφθεί / ενεργοποιηθεί και το πεδίο είναι γεωστατικό. Εδώ μπορεί να γίνει ο έλεγχος ότι η μεταβολή των τάσεων σε σχέση με το βάθος είναι γραμμική και οι μετακινήσεις μηδενικές, διαφορετικά έχει γίνει κάποιο λάθος στην κατάστρωση του μοντέλου. Στο δεύτερο στάδιο («ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ») η βραχύμαζα εντός του ορίου της σήραγγας αντικαθίσταται με ένα νέο υλικό, την αποτονωμένη βραχύμαζα η οποία έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με την αρχική, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας που είναι μειωμένο και δίνεται από τη σχέση

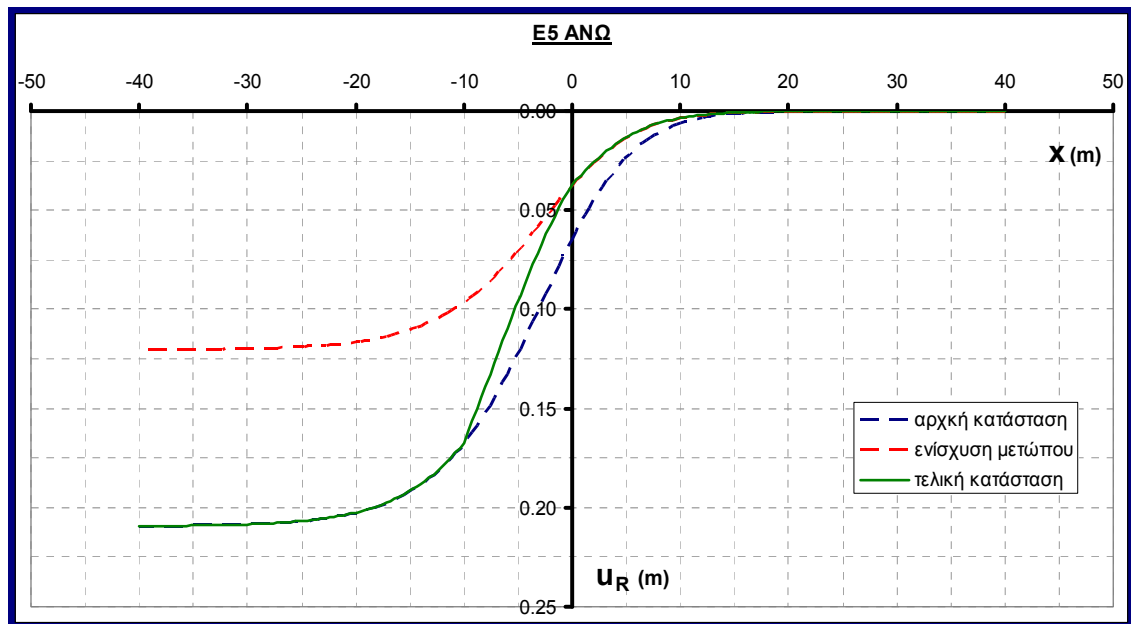
$$E_{\alpha\pi} = E_0 \frac{(1-2\nu)(1-\lambda)}{1-2\nu+\lambda} \quad (7.4)$$

όπου E_0 το μέτρο ελαστικότητας της αρχικής, περιβάλλουσας πλέον, βραχύμαζας και λ ο συντελεστής αποτόνωσης που λαμβάνεται από την καμπύλη Panet ή Cern για τη θέση τοποθέτησης των μέτρων υποστήριξης, $x=x_d$. Με αυτό τον τρόπο εισάγεται με στο διδιάστατο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων ένα τριδιάστατο φαινόμενο όπως αυτό της προχώρησης του μετώπου. Στο τέλος αυτού του σταδίου η εικόνα που έχουμε

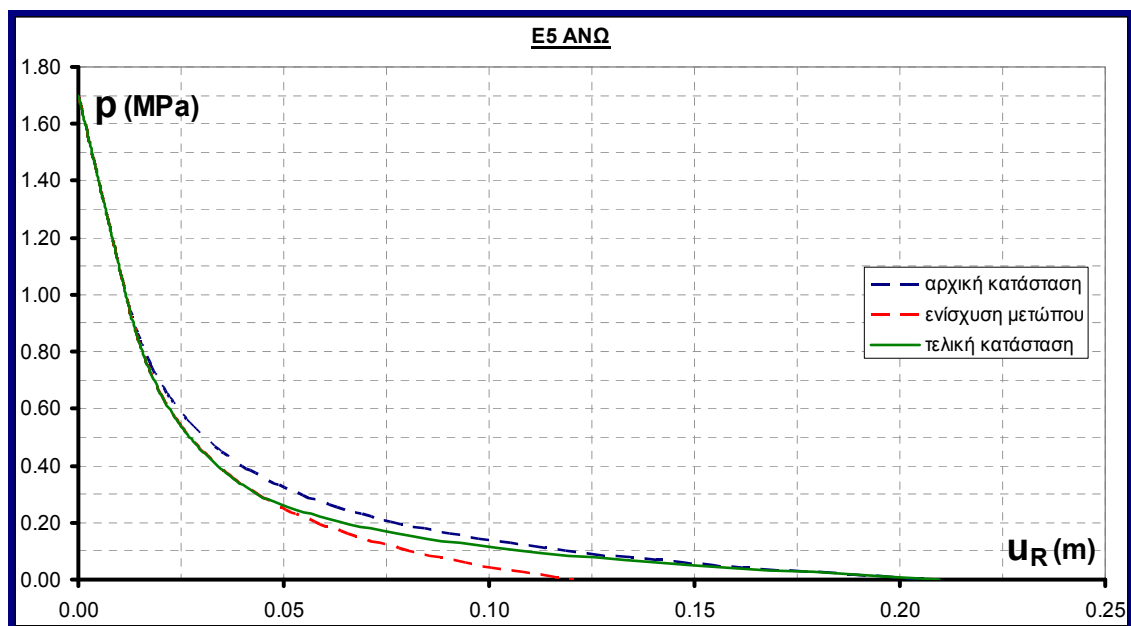
είναι μία μείωση των τάσεων γύρω από το όριο της σήραγγας που συνοδεύεται από μία εκδήλωση των πρώτων μετακινήσεων. Στο τρίτο στάδιο («ΕΚΣΚΑΦΗ & ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ») αφαιρείται το υλικό από το εσωτερικό της σήραγγας και ενεργοποιούνται τα μέτρα υποστήριξης και η εικόνα που έχουμε είναι μία περαιτέρω μείωση των τάσεων γύρω από τη σήραγγα και αντίστοιχα μία αύξηση των μετακινήσεων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν και την τελική σύγκλιση της σήραγγας. Κατ' αυτόν τον τρόπο όμως έχουν εντοπιστεί μόνο δύο σημεία του διαγράμματος $d-x$ (ή $d-t$), ένα σε κάθε στάδιο, το σημείο (x_d, u_{xd}) και η ευθεία στην οποία τείνει ασυμπτωτικά η καμπύλη των παραμορφώσεων $u=u_\infty$, ή έστω το σημείο $(2D, u_\infty)$ αν θεωρήσουμε ότι οι παραμορφώσεις έχουν ολοκληρωθεί για $x=2D$. Γι' αυτό το λόγο θα καταστρωθούν περισσότερες από μία αποτονώσεις της βραχόμαζας (αντίστοιχα στάδια), κάθε φορά αντικαθιστώντας το υλικό με ένα πτωχότερο ($E_{\text{απ}}$) για τις διάφορες τιμές του συντελεστή λ . Ακόμη και μετά την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης, το υλικό εντός της σήραγγας δεν εκσκάπτεται αλλά συνεχίζει να αποτονώνεται έως ότου λάβει πολύ χαμηλές τιμές, εν ολίγοις προσδιορίζεται η **καμπύλη Cern της υποστηριζόμενης διατομής**. Στα επόμενα γίνεται αντιληπτό πώς τα όσα περιγράφησαν για 1 φάση και 1 κλάδο εφαρμόζονται για 2 φάσεις και δίδυμη σήραγγα 2 κλάδων.

7.2.4.1 Εφαρμογή στο προσομοίωμα

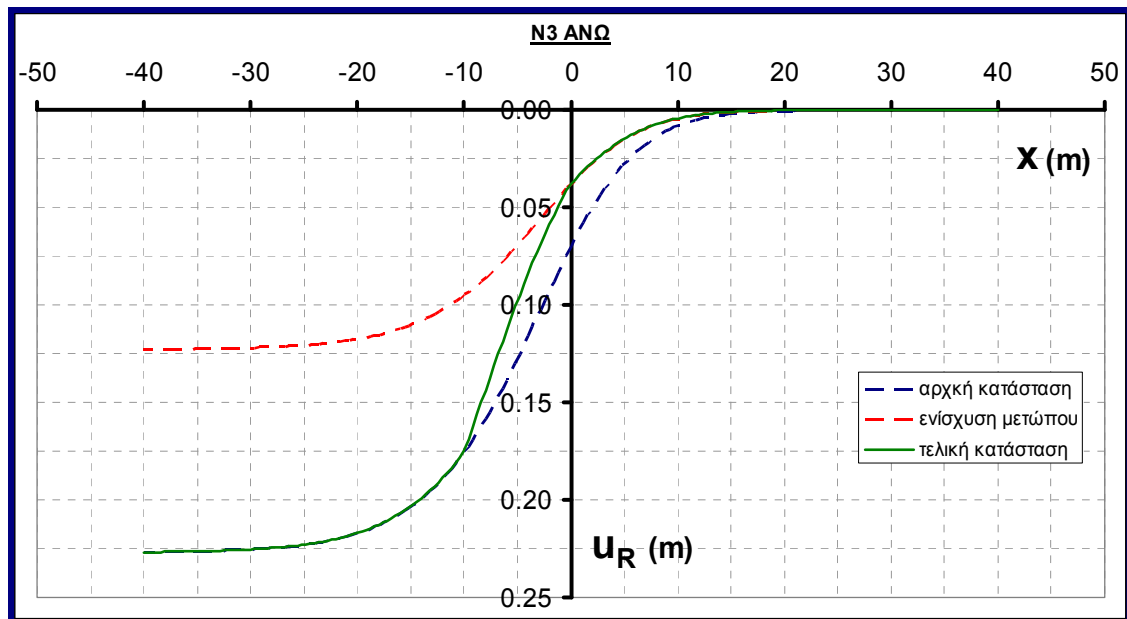
Αρχικά κατασκευάζονται οι καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης και Cern για την κάθε ημιδιατομή σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 7.1.2. Η άνω & κάτω ημιδιατομή E5 καθώς και η άνω ημιδιατομή N3 έχουν και μετωπική υποστήριξη με αγκύρια fiberglass, επομένως γίνεται η ανάλογη τροποποίηση. Η διαδικασία εκσκαφής είχε ως εξής: Πρώτα εκσκάπτεται η άνω ημιδιατομή του δεξιού κλάδου (E5 άνω), ακολουθεί η άνω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου (N3 άνω), κατόπιν η κάτω ημιδιατομή του δεξιού κλάδου (E5 κάτω) και τελευταία έρχεται η κάτω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου (N3 κάτω). Η θέση στην οποία βρίσκεται το μέτωπο εκσκαφής της κάθε φάσης σε σχέση με τη θέση του μετώπου εκσκαφής της E5 άνω μπορεί να βρεθεί από το φύλλο μετρήσεων και είναι ένα χρήσιμο στοιχείο για τη συνέχεια.



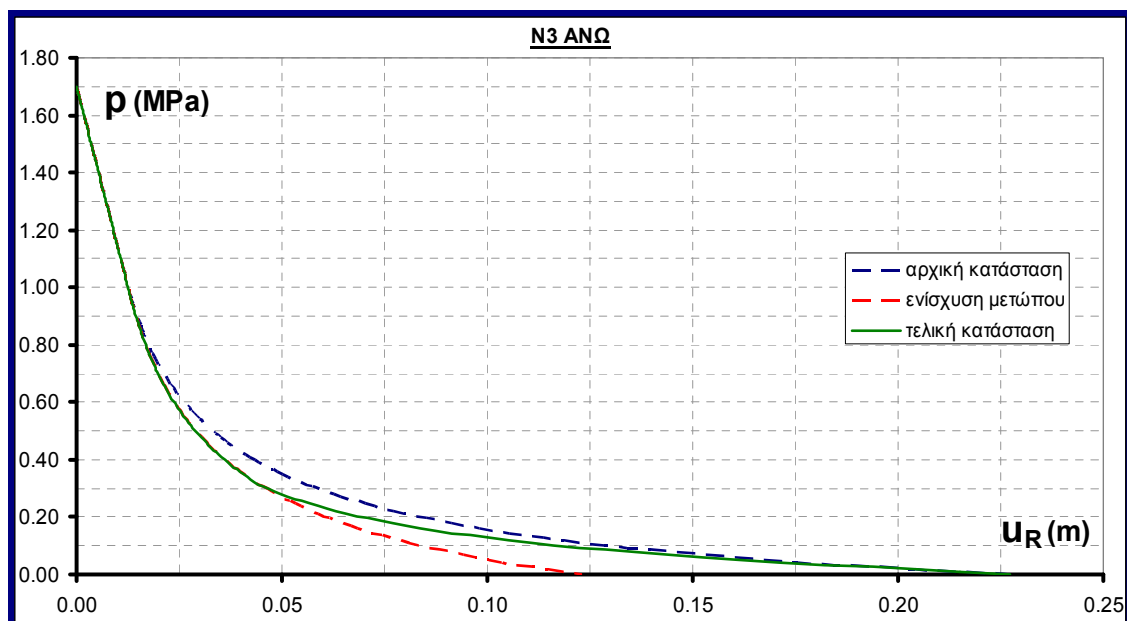
Διάγραμμα 7.10 – Καμπύλη Cern της άνω ημιδιατομής E5.



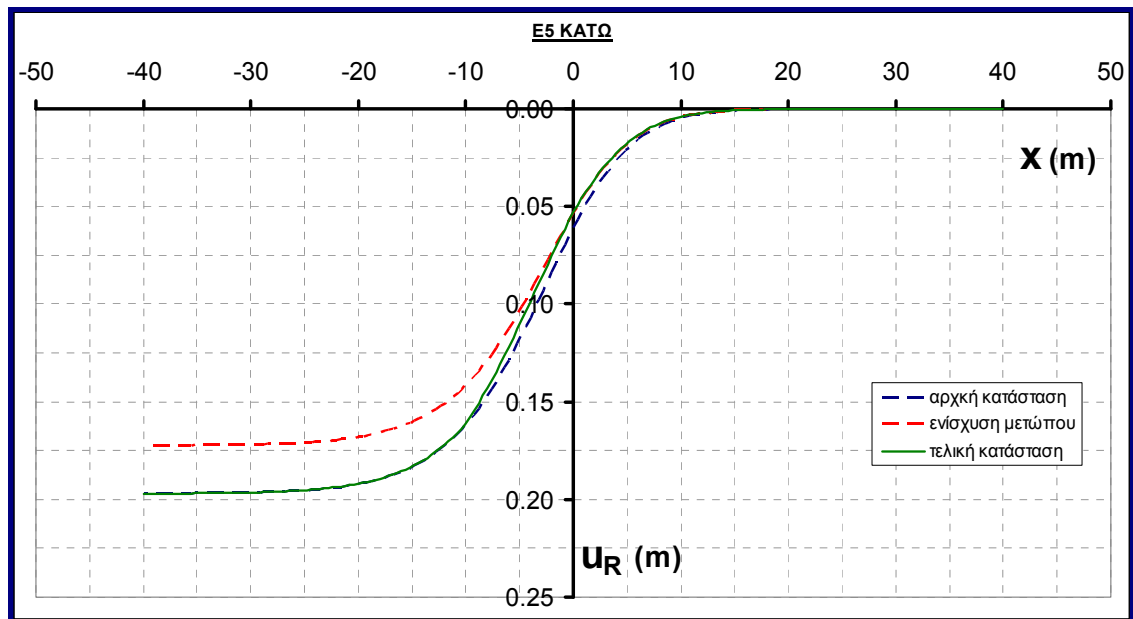
Διάγραμμα 7.11 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της άνω ημιδιατομής E5.



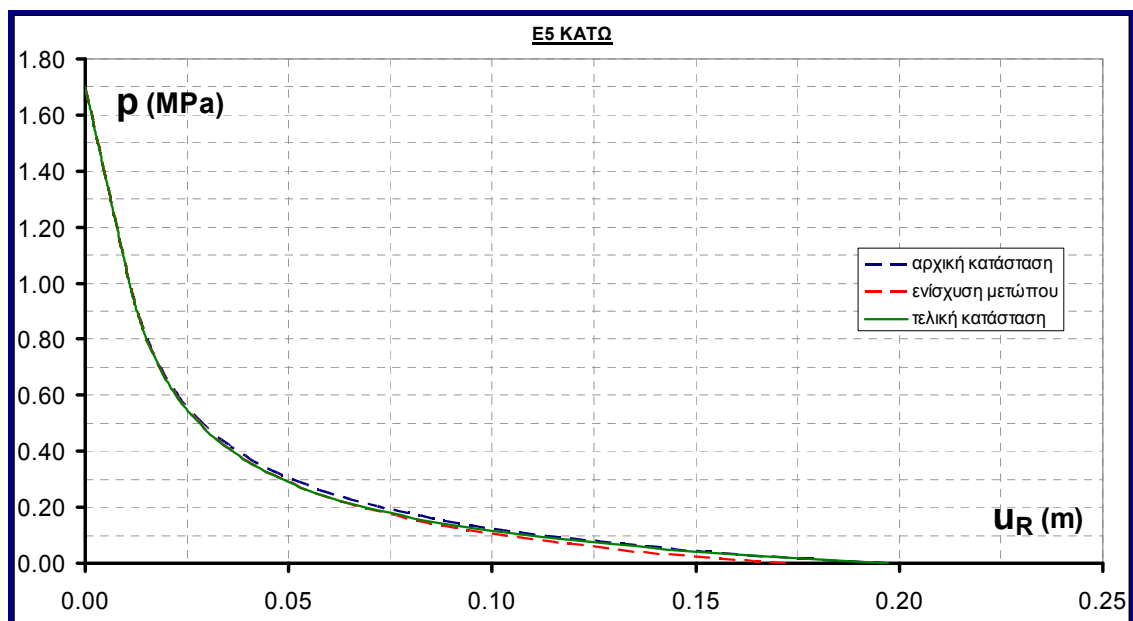
Διάγραμμα 7.12 – Καμπύλη Cern της άνω ημιδιατομής N3.



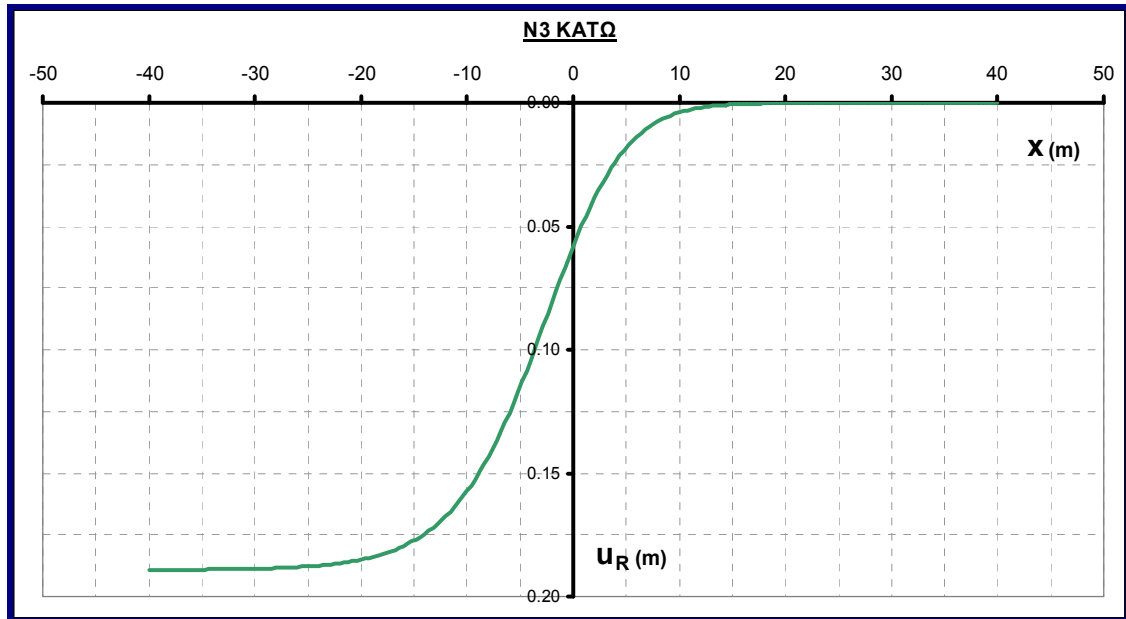
Διάγραμμα 7.13 – Καμπύλη σύγκλισης -αποτόνωσης της άνω ημιδιατομής N3.



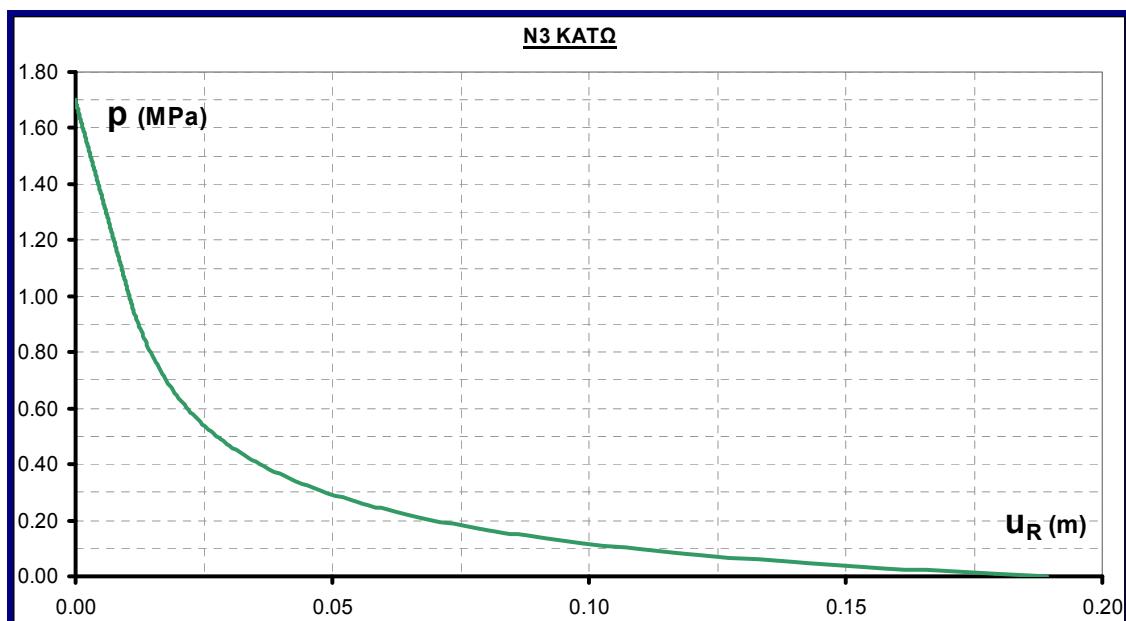
Διάγραμμα 7.14 – Καμπύλη Cern της κάτω ημιδιατομής E5.



Διάγραμμα 7.15 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της κάτω ημιδιατομής E5.



Διάγραμμα 7.16 – Καμπύλη Cern της κάτω ημιδιατομής N3.



Διάγραμμα 7.17 – Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της κάτω ημιδιατομής N3.

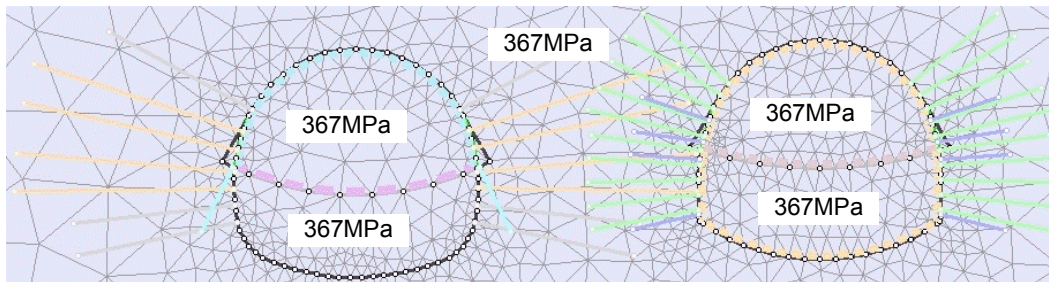
Στο επόμενο βήμα προσδιορίζεται ο βαθμός αποτόνωσης του γεωϋλικού σε κάθε ημιδιατομή ανάλογα με το πού βρίσκεται το μέτωπο εκσκαφής. Δηλαδή μέσω των καμπυλών Cern και σύγκλισης-αποτόνωσης της εκάστοτε ημιδιατομής που εξετάζεται, λαμβάνεται για τα διάφορα x ο συντελεστής αποτόνωσης (λ) ο οποίος μέσω της σχέσης 7.4 οδηγεί στο απομειωμένο μέτρο ελαστικότητας ($E_{\alpha\pi}$) που έχει η πλασματική βραχόμαζα εντός της σήραγγας. Γενικά λαμβάνονται τιμές ανά 5 μέτρα, αλλά και στις θέσεις τοποθέτησης της

προσωρινής υποστήριξης ώστε να γνωρίζουμε ακριβώς ποια ήταν η σύγκλιση πριν την τοποθέτηση της υποστήριξης. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα.

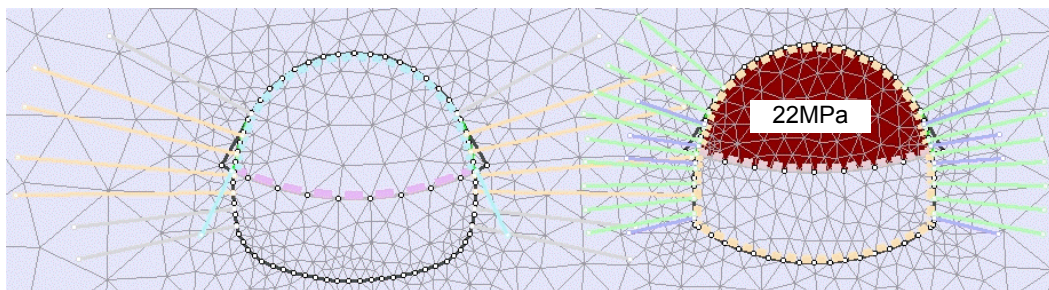
ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ									
α/α	Ε5 ΑΝΩ		Ν3 ΑΝΩ		Ε5 ΚΑΤΩ		Ν3 ΚΑΤΩ		
	x (m)	E _{απ} (MPa)	x (m)	E _{απ} (MPa)	x (m)	E _{απ} (MPa)	x (m)	E _{απ} (MPa)	
1	∞	367	∞	367	∞	367	∞	367	
2	-0.8	22					367		
3	-1.4	16							
4	-5.5	6.5							
5	-10.4	2							
6		0		21		361		0	
7			19	352					
8			11	256					
9			5	85					
10			-1	22					
11			-5	8.8					
12			-10	2.5					
13				0	16.7	344			
14					10.7	242			
15					6.7	102			
16					-0.8	15			
17					-3.3	9			
18						0	23	362	
19									
20									
21			-86	-48	-28	19	357		

Το πρώτο στάδιο περιγράφει τη γεωστατική κατάσταση, όπου τα μέτωπα εκσκαφής είναι ακόμη πολύ μακριά (θεωρητικά $x \rightarrow \infty$) για να επηρεάσουν την ένταση στην περιοχή της διατομής ελέγχου άρα κι εντός των ημιδιατομών το υλικό έχει το ίδιο μέτρο ελαστικότητας με το αρχικό υλικό (367MPa). Στο δεύτερο στάδιο το μέτωπο φτάνει την άνω ημιδιατομή Ε5 και την προσπερνά κατά 0.8 m (βήμα εκσκαφής της Ε5). Εκεί ενδιαφέρει να προσδιοριστεί η αποτόνωση της βραχόμαζας που βρίσκεται στο εσωτερικό της διατομής ώστε να την εντάξουμε στο μοντέλο και να υπολογιστούν οι μετατοπίσεις πριν την

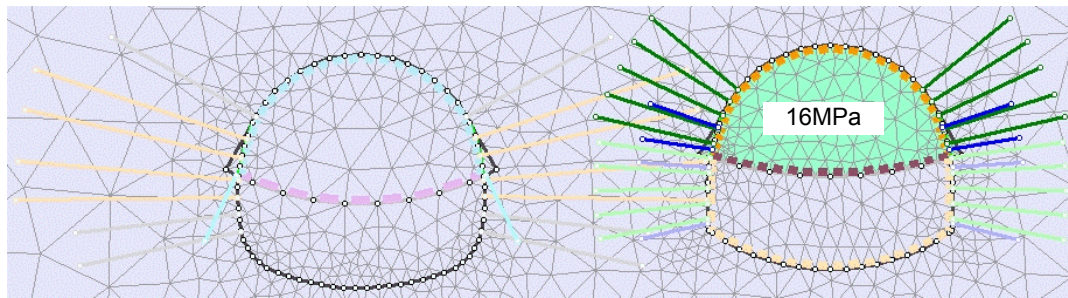
τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης (για $x < 0$ δεν έχει νόημα να εξεταστούν οι αποτονώσεις της βραχόμαζας, καθώς δεν υπάρχουν μετρήσεις προς σύγκριση). Στο τρίτο στάδιο τοποθετούνται τα μέτρα υποστήριξης, το μέτωπο προχωρά και η βραχόμαζα εντός της ημιδιατομής αποτονώνεται περαιτέρω. Στο τέταρτο και πέμπτο στάδιο το μέτωπο προχωρά κι άλλο πάλι με ταυτόχρονη αποτόνωση (που μεταφράζεται σε μείωση μέτρου ελαστικότητας) της βραχόμαζας. Στο έκτο στάδιο πλέον η βραχόμαζα λαμβάνει πολύ μικρές τιμές του μέτρου ελαστικότητας και γίνεται εκσκαφή της. Στο έβδομο στάδιο συμβαίνει η πρώτη αποτόνωση του μέτρου ελαστικότητας της βραχόμαζας που βρίσκεται εντός της άνω ημιδιατομής του αριστερού κλάδου (N3 άνω), γεγονός που συνεχίζεται μέχρι και το ενδέκατο στάδιο, λαμβάνοντας πάντα τα αντίστοιχα απομειωμένα μέτρα ελαστικότητας. Στο δωδέκατο στάδιο ενεργοποιούνται τα μέτρα υποστήριξής της, το μέτωπο προχωράει και η βραχόμαζα εντός αποτονώνεται περαιτέρω. Έτσι και στο δέκατο-τρίτο στάδιο, ενώ στο δέκατο-τέταρτο στάδιο γίνεται εκσκαφή της αφού πλέον έχει λάβει πολύ μικρές τιμές. Η ίδια διαδικασία (γίνεται εμφανής στις παρακάτω εικόνες) συνεχίζεται με βάση τον παραπάνω πίνακα μέχρι το στάδιο 22.



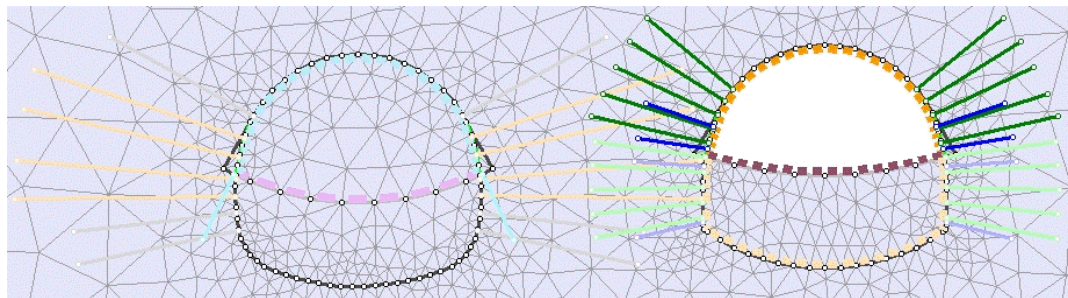
Εικόνα 7.12 – 1^ο στάδιο, γεωστατική κατάσταση.



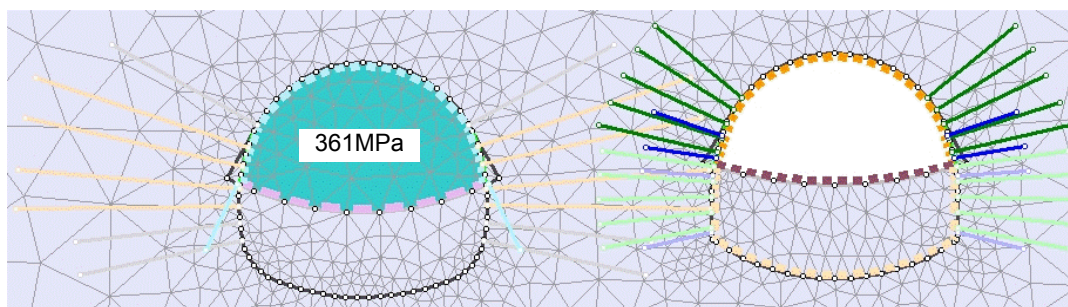
Εικόνα 7.13 – 2^ο στάδιο, αποτόνωση άνω ημιδιατομής δεξιού κλάδου.



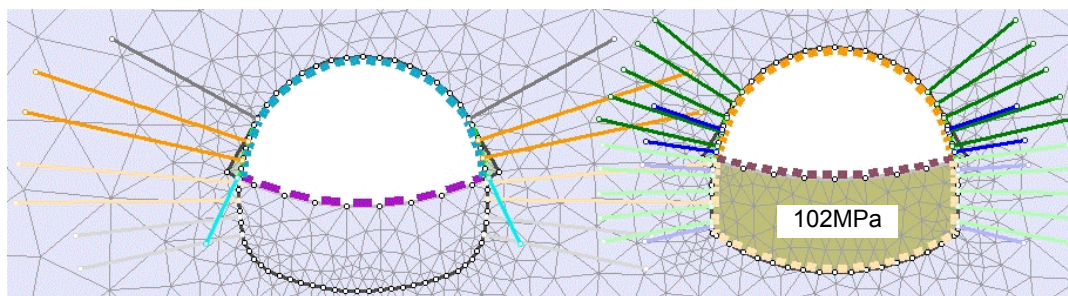
Εικόνα 7.14 – 3^ο στάδιο, ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης και περαιτέρω αποτόνωση.



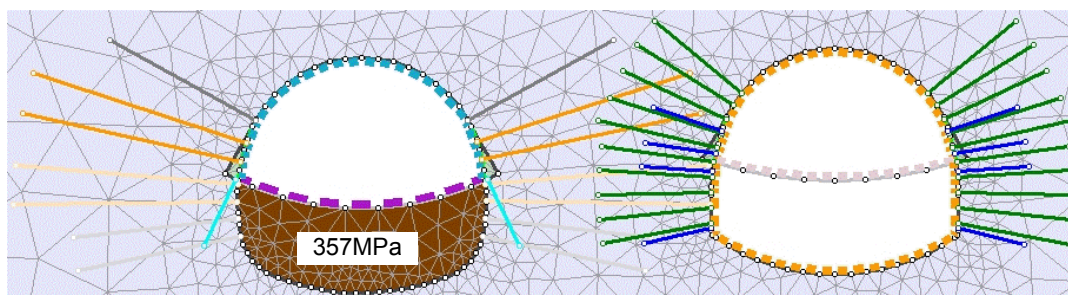
Εικόνα 7.15 – 6^ο στάδιο, εκσκαφή.



Εικόνα 7.16 – 7^ο στάδιο, ξεκινά η αποτόνωση της άνω ημιδιατομής του αριστερού κλάδου.



Εικόνα 7.17 – 17^ο στάδιο, αποτόνωση της κάτω ημιδιατομής του δεξιού κλάδου.

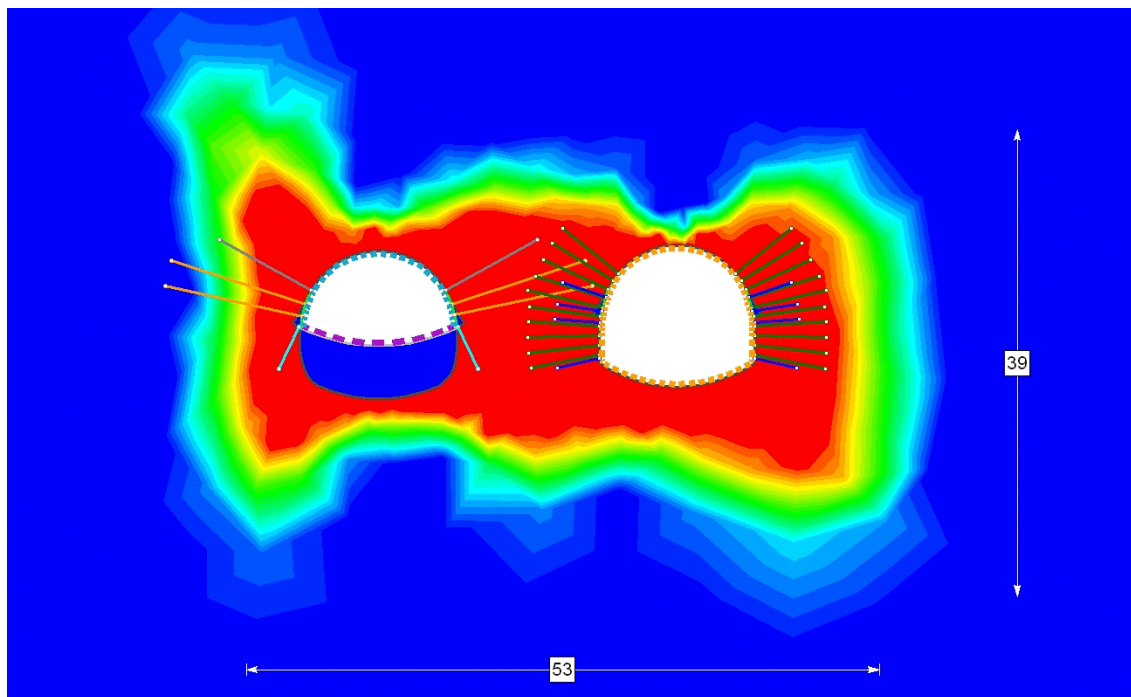


Εικόνα 7.18 – Τελικό στάδιο, η κάτω ημιδιατομή του αριστερού κλάδου έχει αποτονωθεί, αλλά δεν έχει προλάβει να εκσκαφθεί.

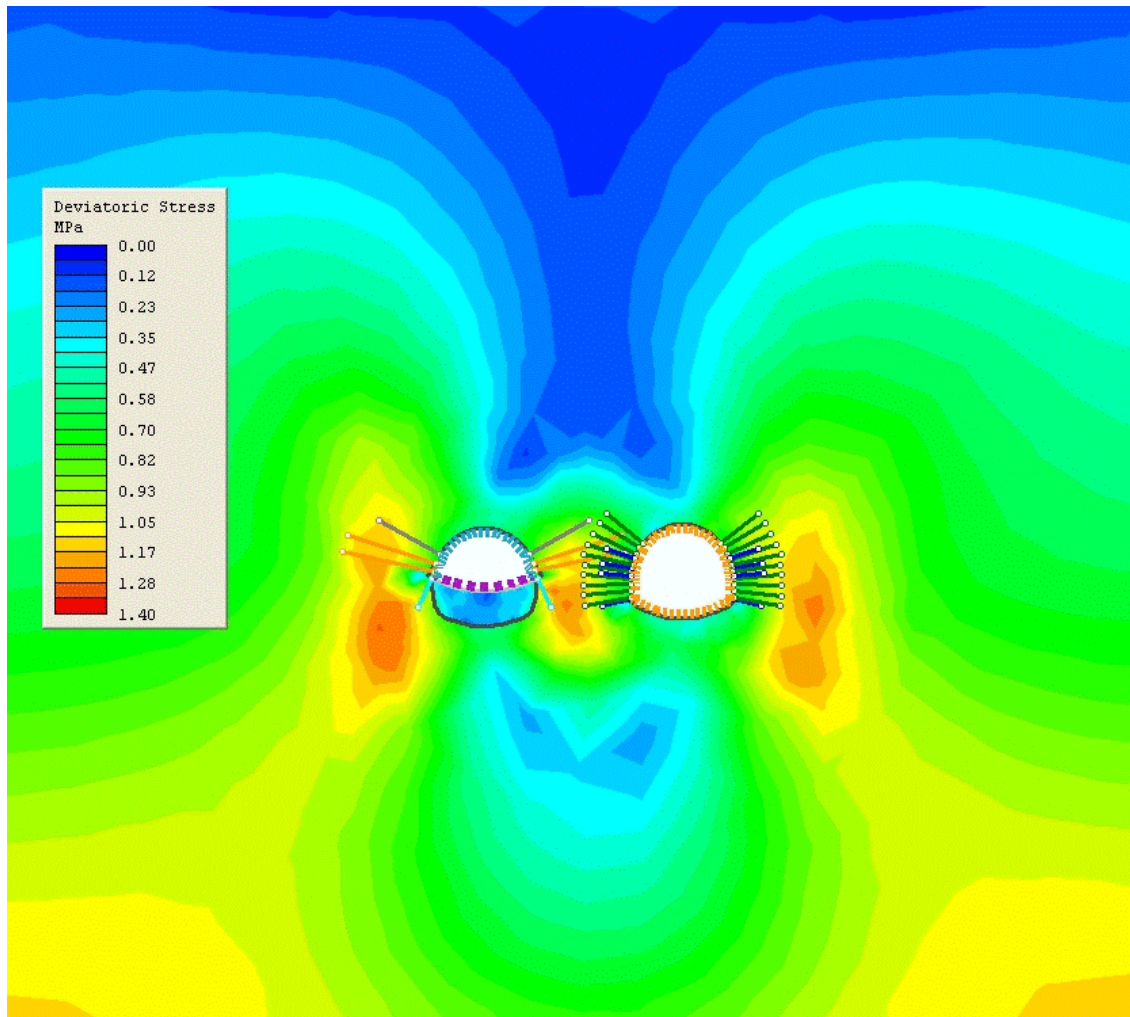
Έτσι εκτός από την αρχική βραχόμαζα, ορίζουμε άλλες 21, πανομοιότυπες βραχόμαζες, που διαφέρουν μόνο ως προς το μέτρο ελαστικότητας το οποίο κυμαίνεται από 0 έως 367. Βέβαια η αρχική βραχόμαζα έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά με κριτήριο αστοχίας το γενικευμένο Hoek – Brown όπως προαναφέρθηκε, ενώ οι υπόλοιπες έχουν ελαστική συμπεριφορά (δεν αστοχούν) αφού είναι πλασματικές και έχουν εισαχθεί στο μοντέλο μόνο για να παραλάβει η διατομή της ισοδύναμες μετακινήσεις. Σε κάθε στάδιο η βραχόμαζα στο εσωτερικό κάποιας ημιδιατομής αντικαθίσταται για να προσομοιώσει την προχώρηση του μετώπου.

7.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης

Μία επίλυση με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων παρέχει στο μελετητή πληθώρα πληροφοριών σχετικά με την εξέλιξη των χαρακτηριστικών μεγεθών γύρω από τη σήραγγα.



Εικόνα 7.19 – Η έκταση της πλαστικής ζώνης στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης.

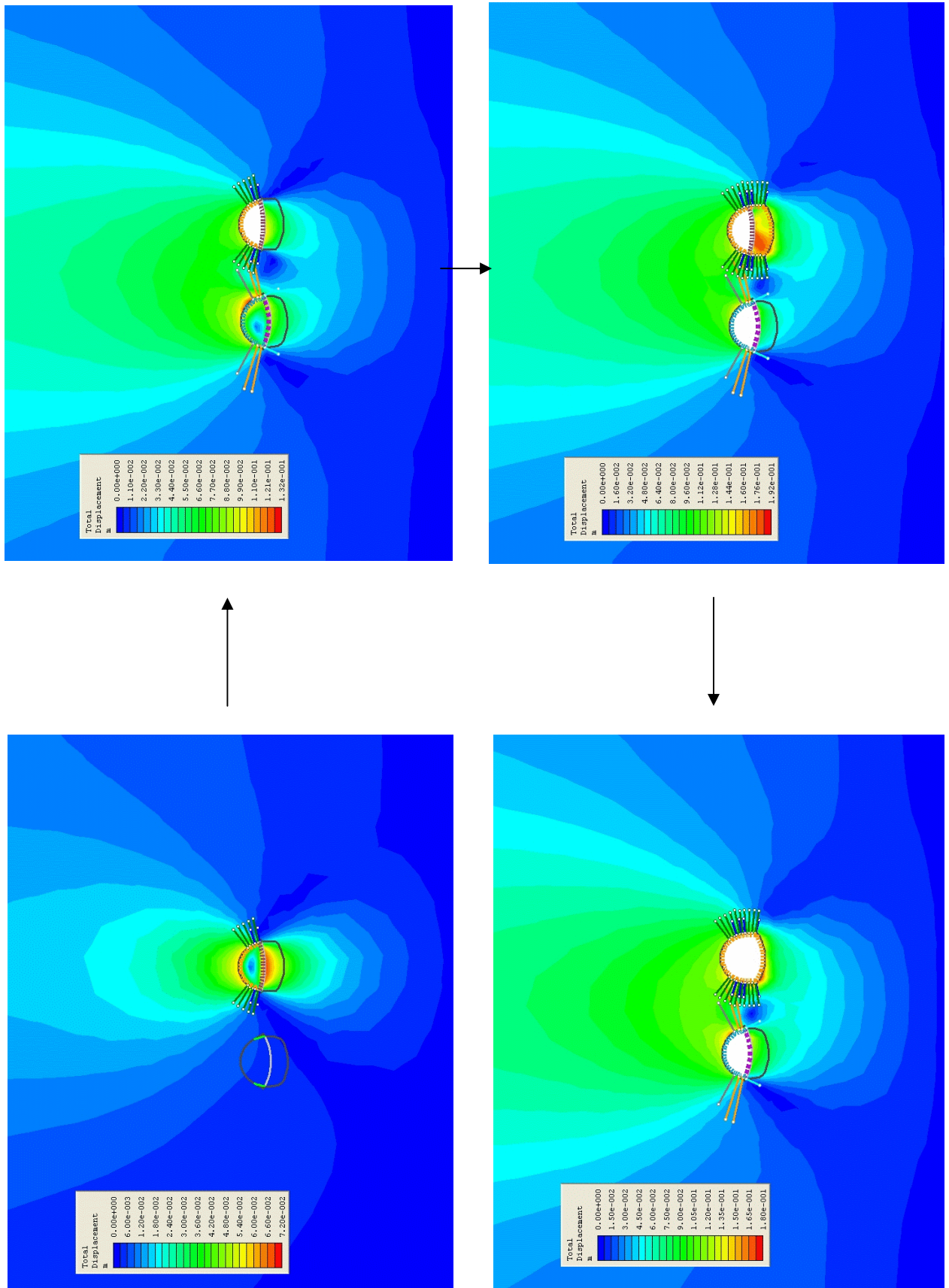


Εικόνα 7.20 – Κατανομή της εκτροπικής τάσης στο τελευταίο στάδιο της προσομοίωσης.

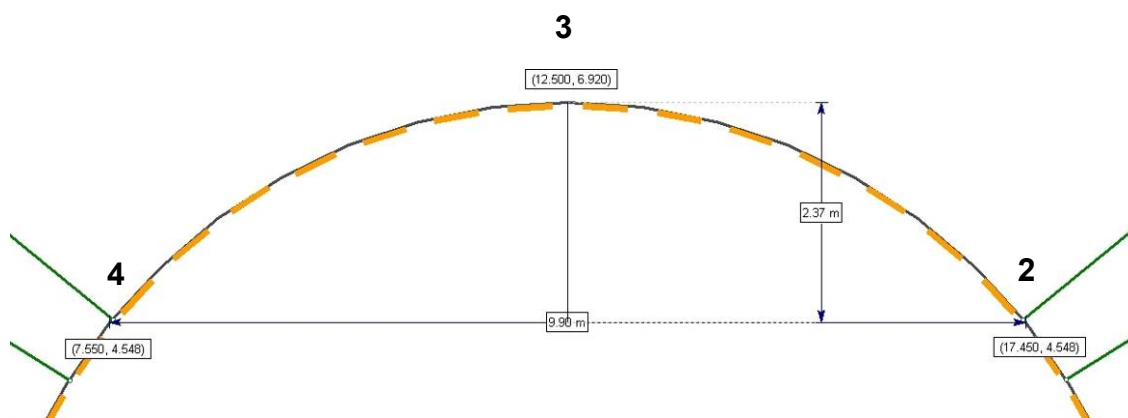
Οι μεγαλύτερες τιμές της εκτροπικής τάσης παρατηρούνται στις παρειές της σήραγγας. Σύμφωνα με πολλούς ερπυστικούς νόμους, π.χ. τον Power – law,

$$\varepsilon_{cr} = \frac{A}{1+m} q^n t^{m+1} \quad (7.5)$$

η ερπυστική παραμόρφωση εξαρτάται από την εκτροπική τάση, άρα αναμένουμε από τις ακίδες που βρίσκονται στις παρειές (2 και 4) μεγαλύτερες τιμές χρονικά εξαρτημένης σύγκλισης.

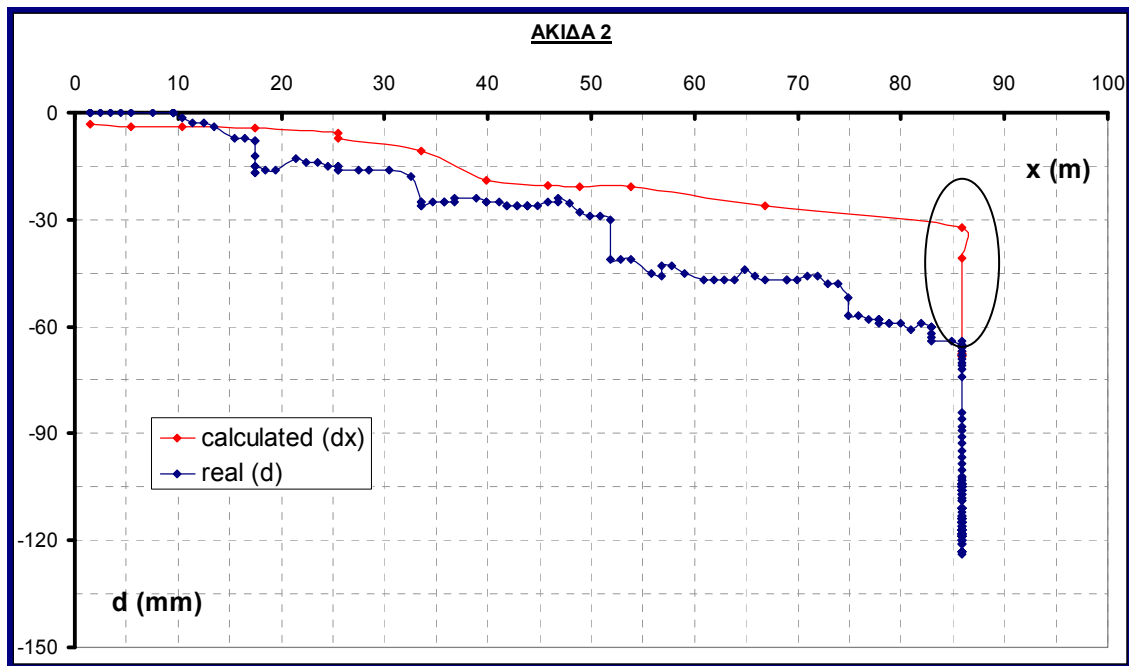
ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΣΚΑΦΗ

Στο παρόν πρόβλημα βέβαια ενδιαφέρει η εξέλιξη των μετακινήσεων του τοιχώματος της διατομής και μάλιστα σε εκείνα τα σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί οι ακίδες ελέγχου από τους τοπογράφους. Οι ακίδες 1 και 5 αγνοούνται καθώς περιέχουν ελάχιστες μετρήσεις, η ακίδα 3 τοποθετείται στην κορυφή της καμπύλης ενώ για τις ακίδες 2 και 4 δεν υπάρχουν διαθέσιμες οι ακριβείς τους συντεταγμένες, γι' αυτό τις τοποθετούμε διαισθητικά - έχοντας υπόψιν και την Εικόνα 6.3 - στις θέσεις που διακρίνονται παρακάτω.



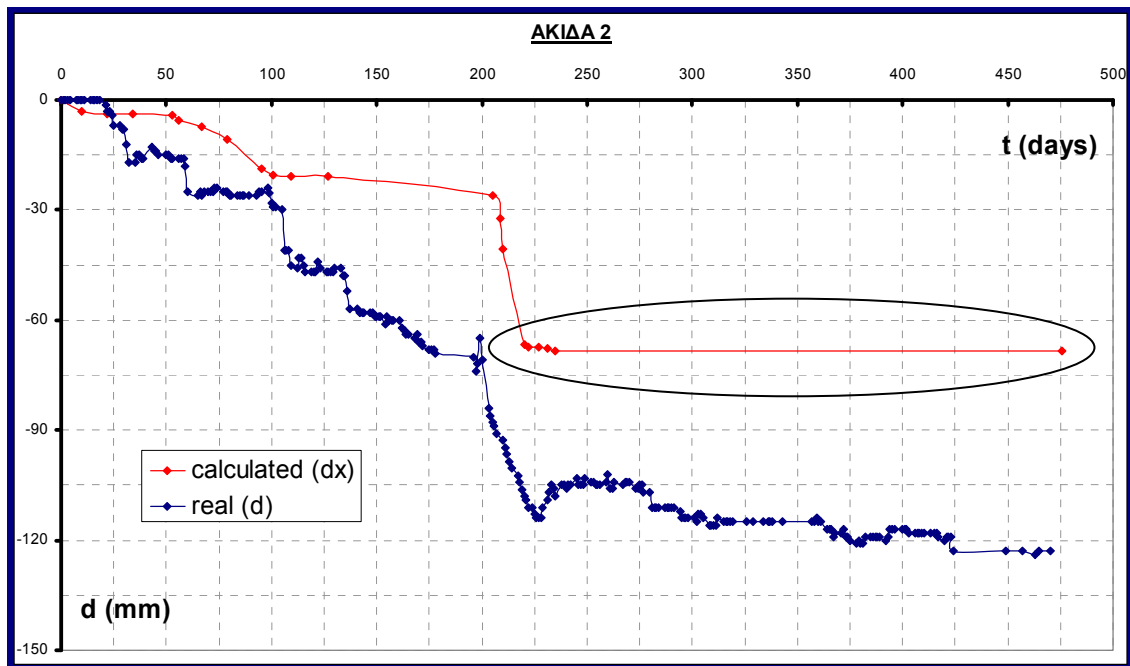
Εικόνα 7.21 – Τοποθέτηση των ακίδων ελέγχου στη διατομή.

Έτσι έχουμε στη διάθεσή μας τις οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις για κάθε ακίδα και για κάθε στάδιο προσομοίωσης. Κάθε στάδιο προσομοίωσης αντιστοιχεί σε κάποιο χρόνο, t και σε κάποια απόσταση από το μέτωπο της άνω ημιδιατομής δεξιού κλάδου, x . Αυτή η αντιστοίχιση γίνεται με τη βοήθεια του πίνακα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και του φύλλου μετρήσεων. Επομένως υπάρχουν οι υπολογισθείσες και οι μετρηθείσες τριάδες τιμών d , x , t και απομένει η στατιστική τους επεξεργασία. Υπενθυμίζεται ότι οποιαδήποτε μετακίνηση πριν τοποθετηθούν οι ακίδες ελέγχου όπως είναι φυσικό δεν καταγράφεται, συνεπώς θα αγνοηθούν οι μετακινήσεις στα στάδια 1, 2 και 3 ενώ οι υπόλοιπες μετακινήσεις θα αναφέρονται ως προς το στάδιο 3, δηλαδή θα πρέπει να αφαιρεθεί από τις υπόλοιπες τιμές η μετακίνηση αυτού του σταδίου. Στα επόμενα παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα για την κατακόρυφη συνιστώσα. Σύμφωνα με το πρότυπο Διάγραμμα 6.7, η μετρηθείσα καμπύλη αντιστοιχεί στην ολική σύγκλιση (d) και η υπολογισθείσα καμπύλη στη σύγκλιση λόγω χωρικού παράγοντα (d_x).

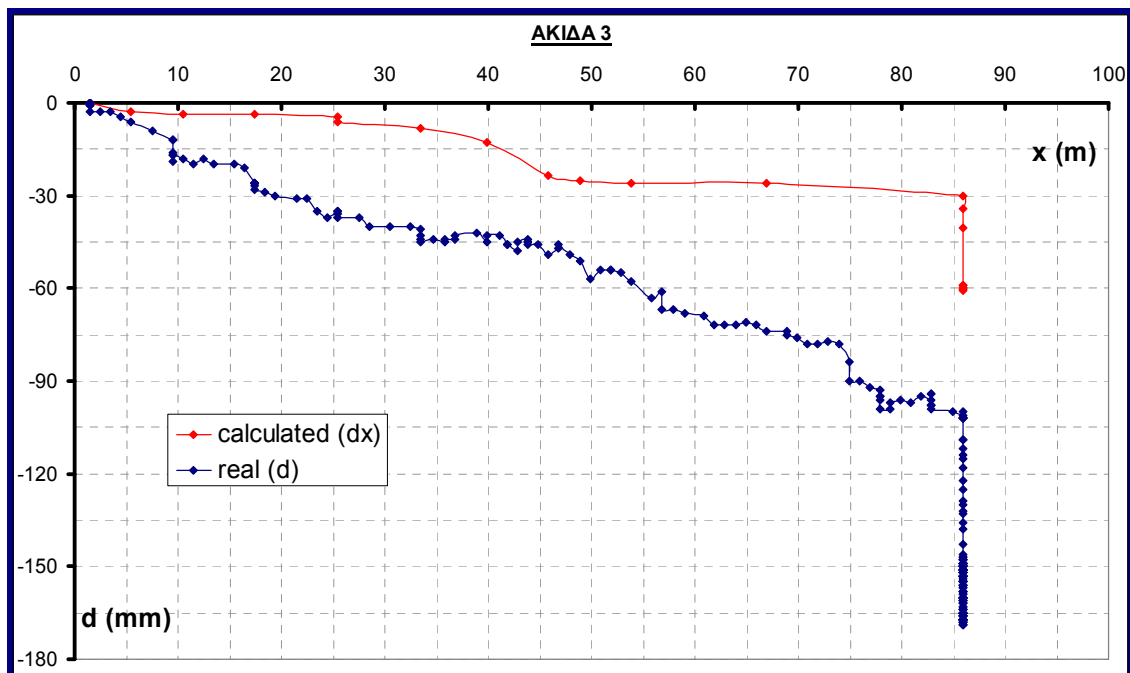


Διάγραμμα 7.18 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.

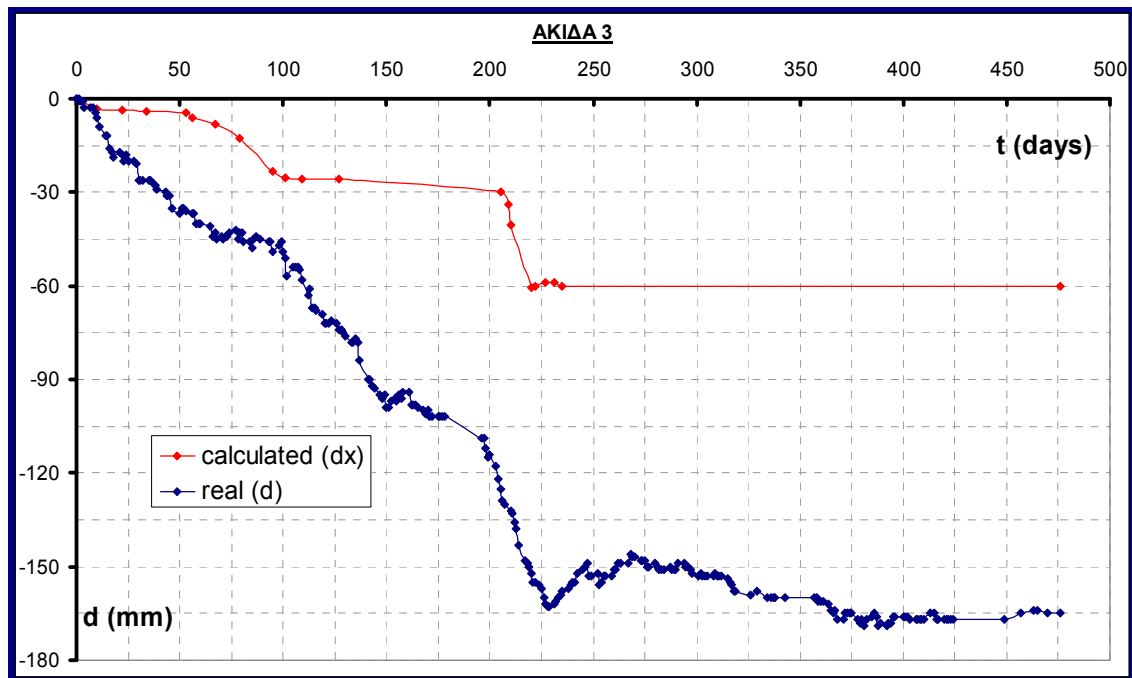
Στα διαγράμματα ως προς x παρατηρείται μία αύξηση των μετατοπίσεων στην καμπύλη d_x για σταθερό x στο τέλος της καμπύλης. Αυτό ασφαλώς δεν οφείλεται σε χρονικά εξαρτημένα φαινόμενα, αφού η καμπύλη d_x εκφράζει τις χωρικές μόνο μετατοπίσεις, αλλά οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ το μέτωπο της άνω ημιδιατομής του δεξιού κλάδου έχει τερματίσει (περί τα 89 m), τα μέτωπα των υπόλοιπων ημιδιατομών (άνω αριστερού κλάδου, κάτω δεξιού, κάτω αριστερού κλάδου) συνεχίζουν να προχωρούν και να αποτονώνουν περαιτέρω τις γειτονικές βραχώμαζες με αποτέλεσμα την εκδήλωση κάποιων παραμορφώσεων και στην άνω ημιδιατομή του δεξιού κλάδου στην οποία έχουν τοποθετηθεί οι ακίδες. Στα διαγράμματα ως προς t οι παραμορφώσεις σταθεροποιούνται στην τελευταία τιμή, αφού όπως προαναφέρθηκε οφείλονται αποκλειστικά στον χωρικό παράγοντα κι όταν σταματάει η προώθηση του μετώπου παύουν να εξελίσσονται, δεν εξαρτώνται από το χρόνο. Επομένως η τελευταία παραμόρφωση που υπολογίστηκε από τα πεπερασμένα στοιχεία θα είναι και η τελική.



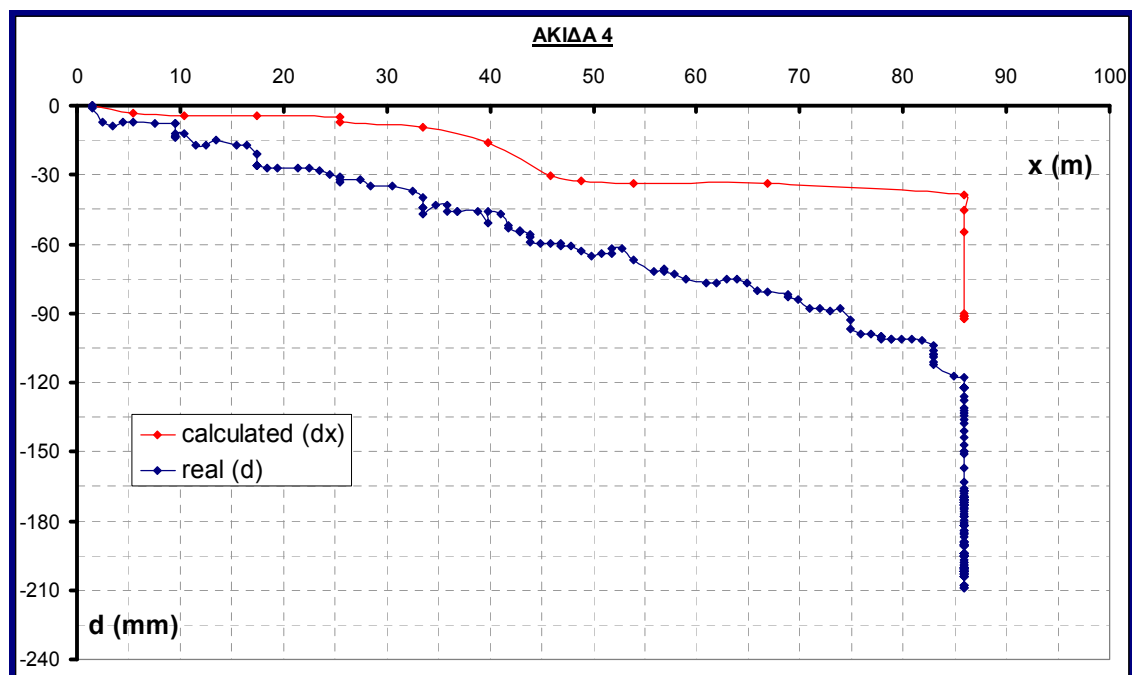
Διάγραμμα 7.19 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει του χρόνου.



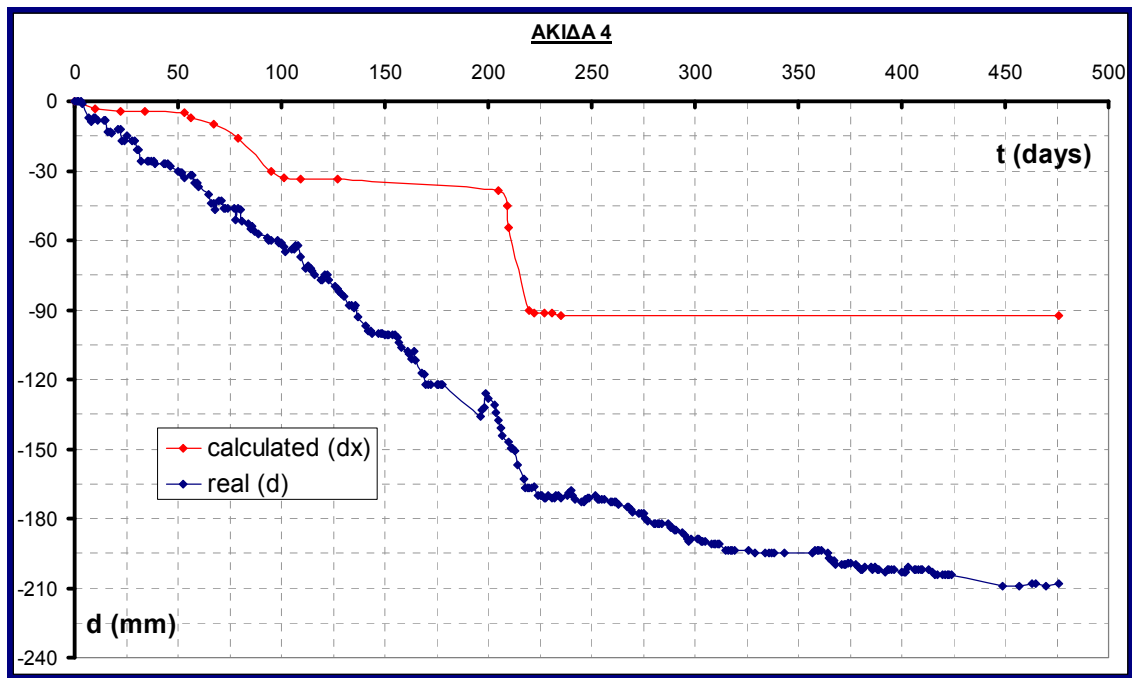
Διάγραμμα 7.20 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.



Διάγραμμα 7.21 - Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει του χρόνου.

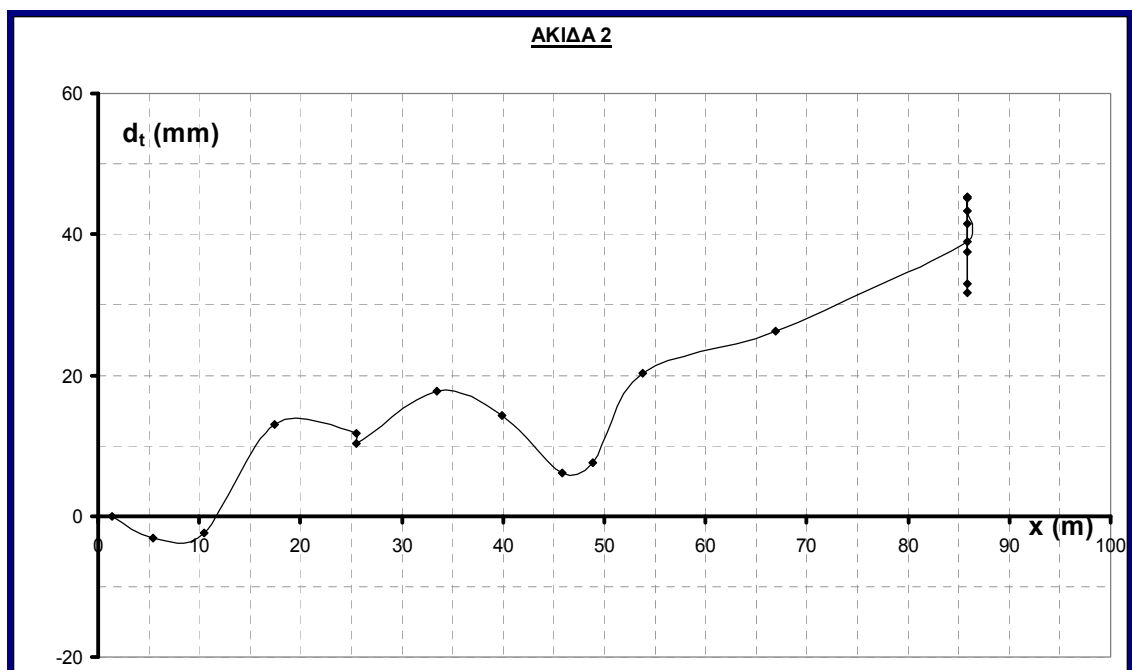


Διάγραμμα 7.22 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.

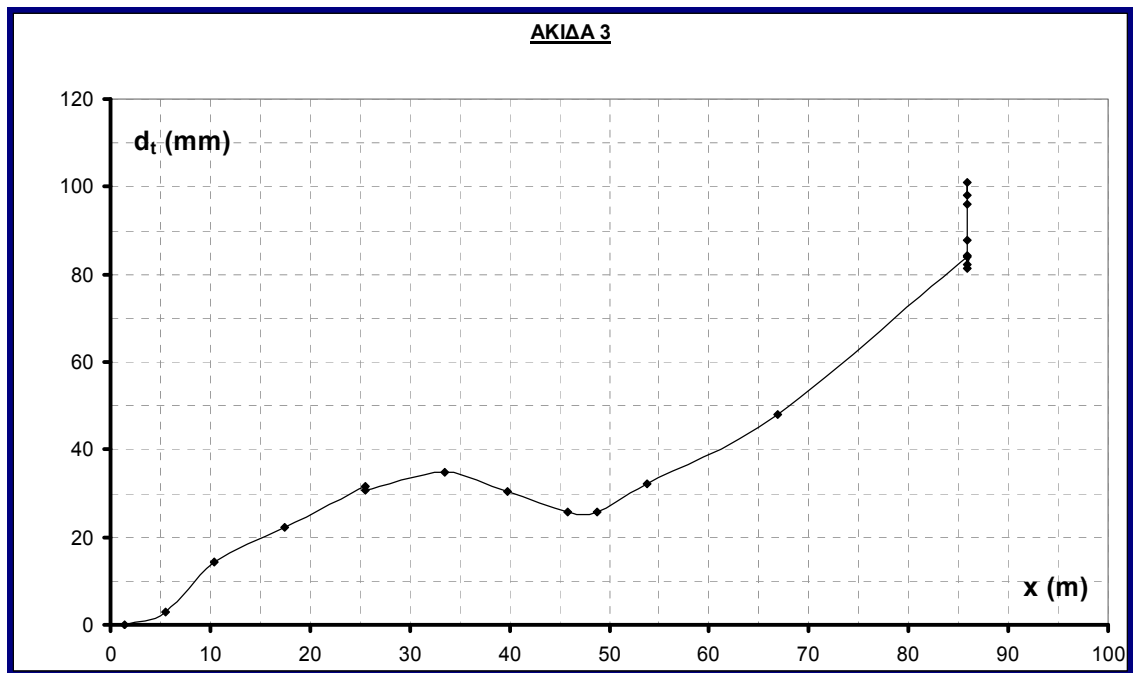


Διάγραμμα 7.23 – Κατακόρυφες μετακινήσεις συναρτήσει του χρόνου.

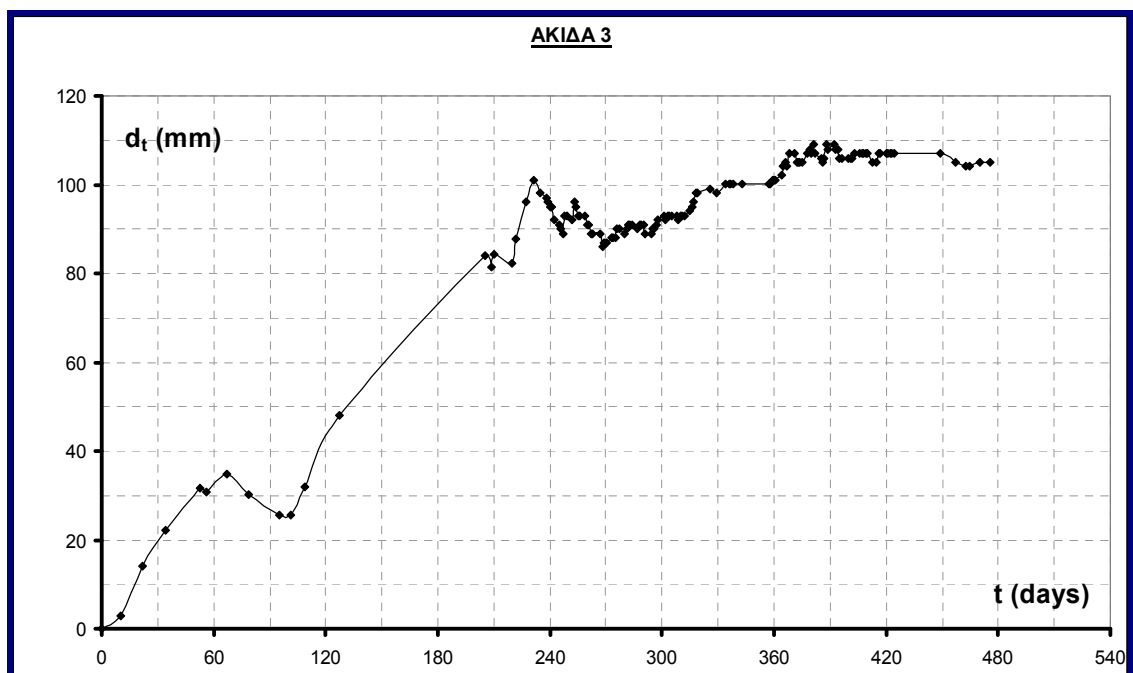
Η μετακίνηση λόγω χρονικού παράγοντα (d_t) ισούται με τη διαφορά των δύο καμπυλών $d-d_x$ και παρουσιάζεται στα επόμενα διαγράμματα (κατ' απόλυτο τιμή). Υπενθυμίζεται ότι αφορούν την κατακόρυφη συνιστώσα.



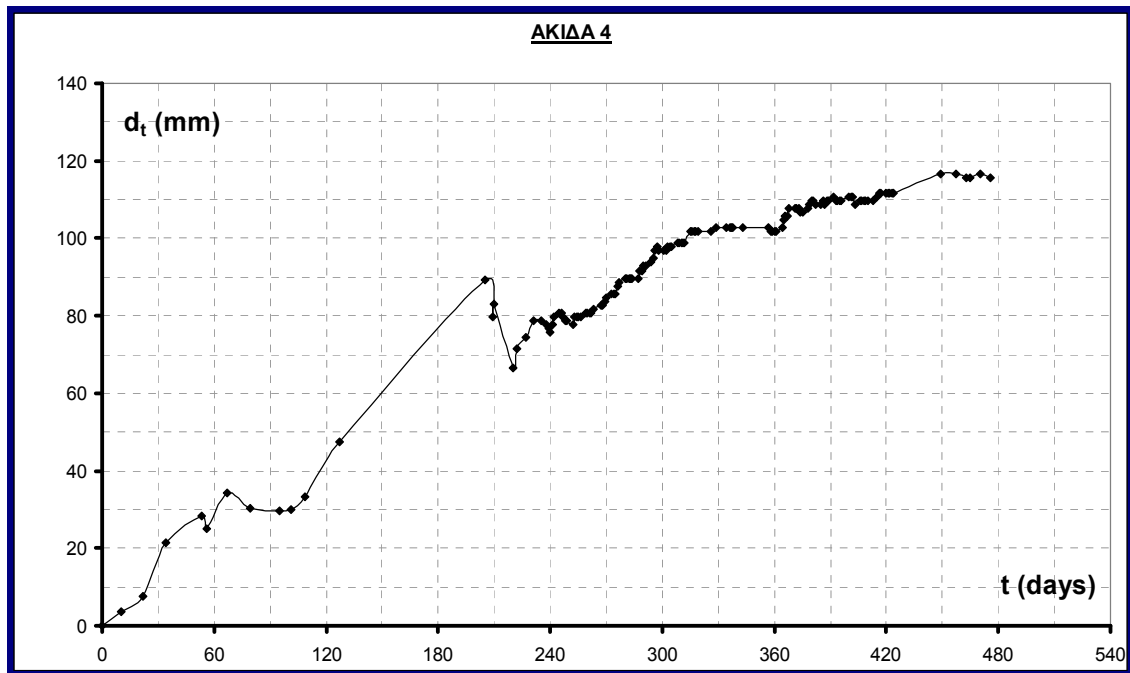
Διάγραμμα 7.24 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.



Διάγραμμα 7.25 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.

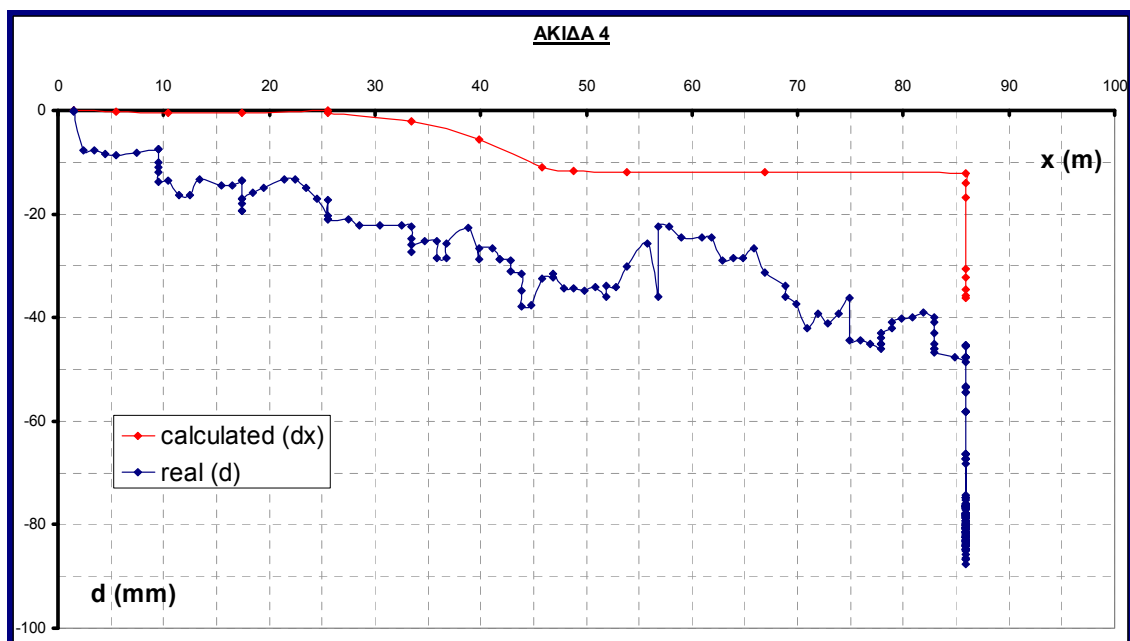


Διάγραμμα 7.26 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει του χρόνου.

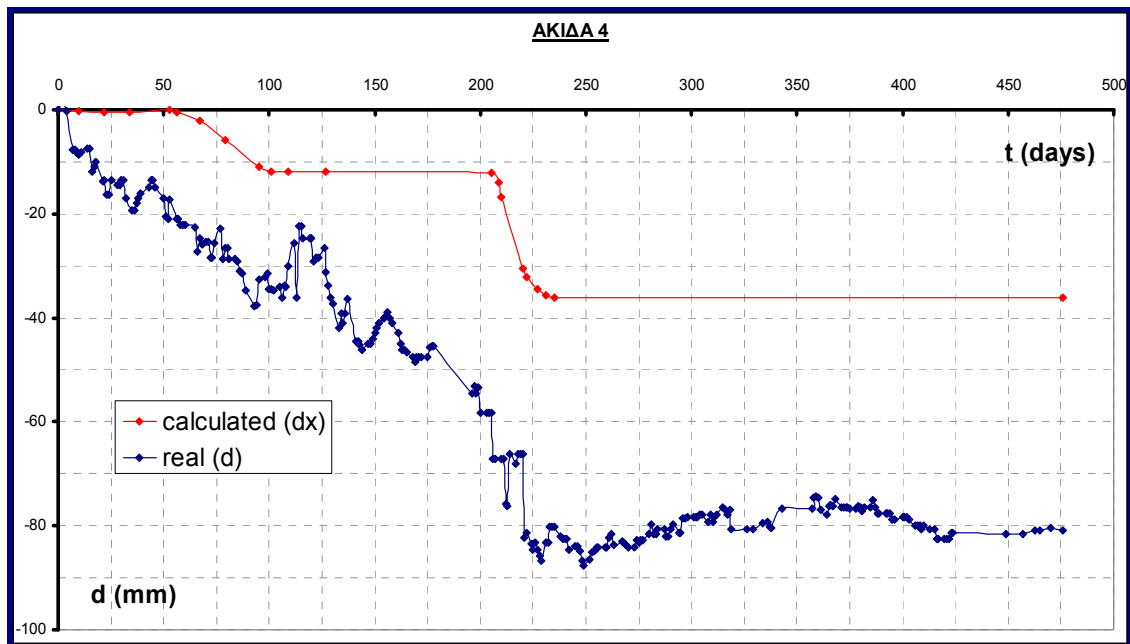


Διάγραμμα 7.27 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσεως του χρόνου.

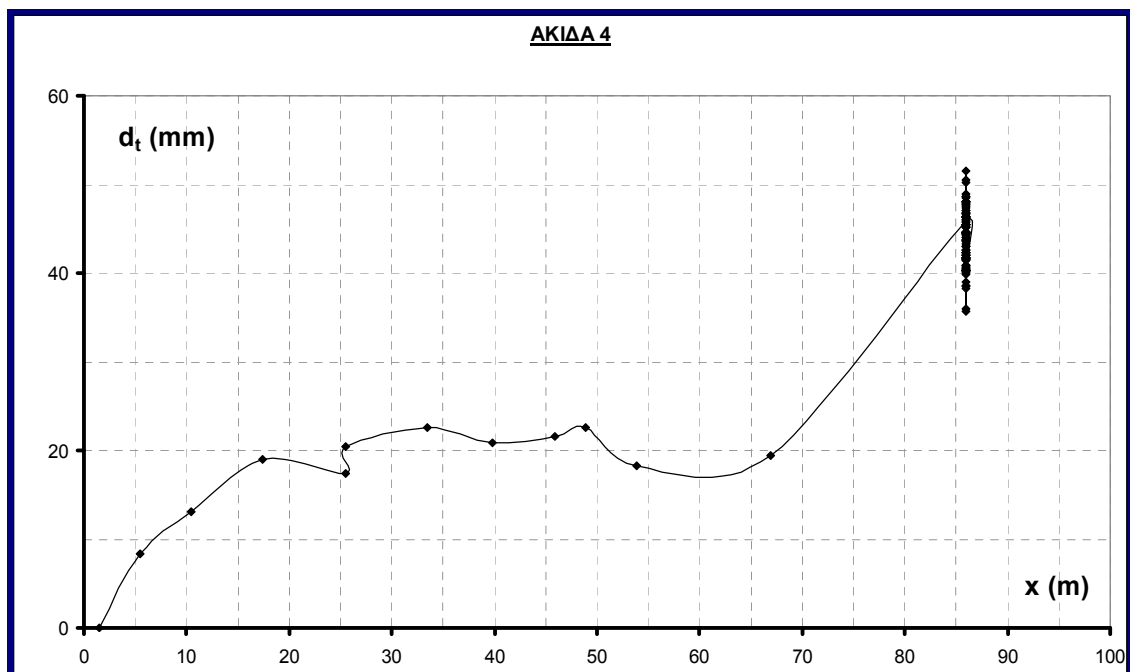
Τα ίδια ισχύουν και για την οριζόντια συνιστώσα της μετακίνησης αν και οι μετακινήσεις στην οριζόντια διεύθυνση είναι μικρότερες. Τα διαγράμματα της ακίδας 3 που βρίσκεται στην κεφαλή παρουσιάζουν αδυναμίες σε ότι αφορά την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη χρονικά εξαρτημένη σύγκλιση στην οριζόντια συνιστώσα, διότι εκεί οι μετακινήσεις είναι πολύ μικρές και έχουμε συχνή αλλαγή διεύθυνσης της μετακίνησης (αλλαγή προσήμου).



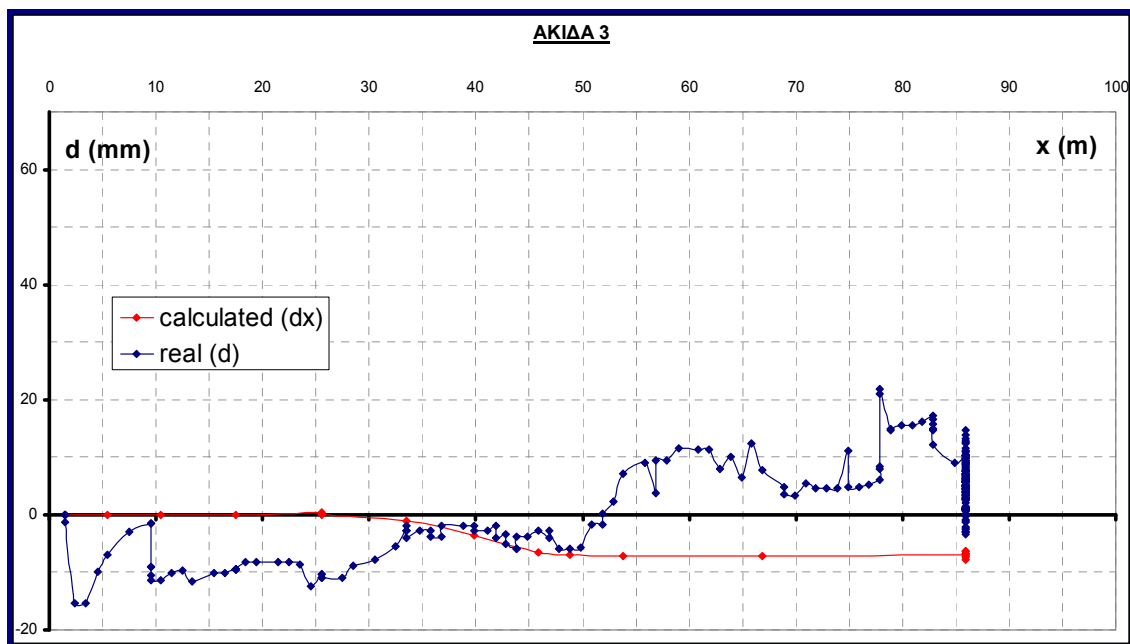
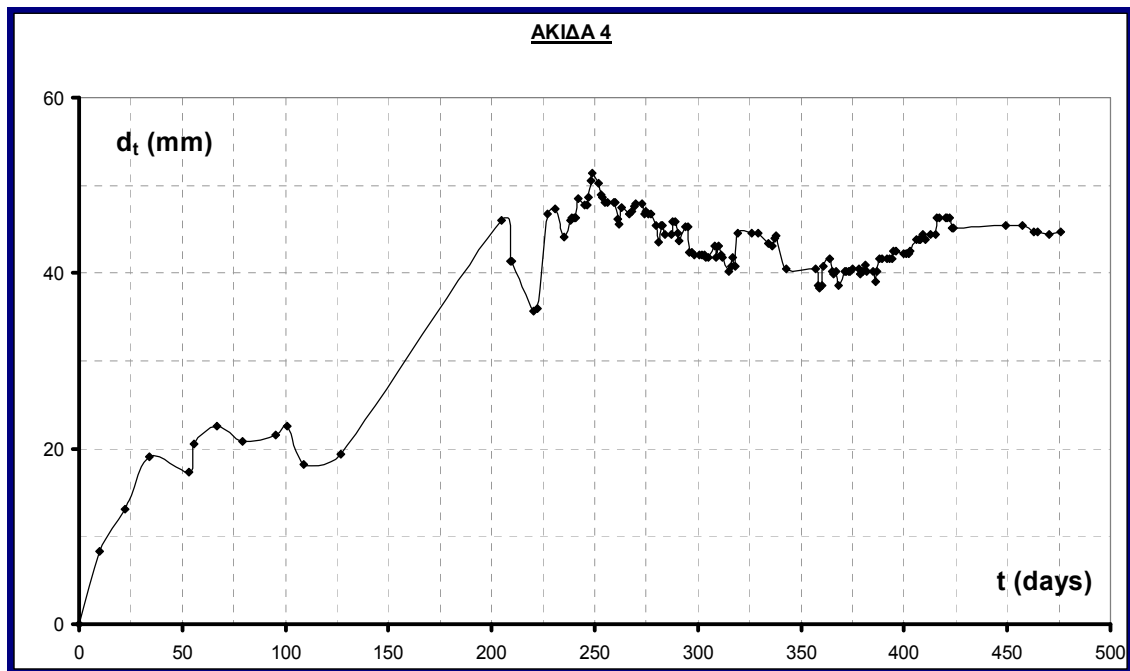
Διάγραμμα 7.28 – Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσεως της προχώρησης του μετώπου.

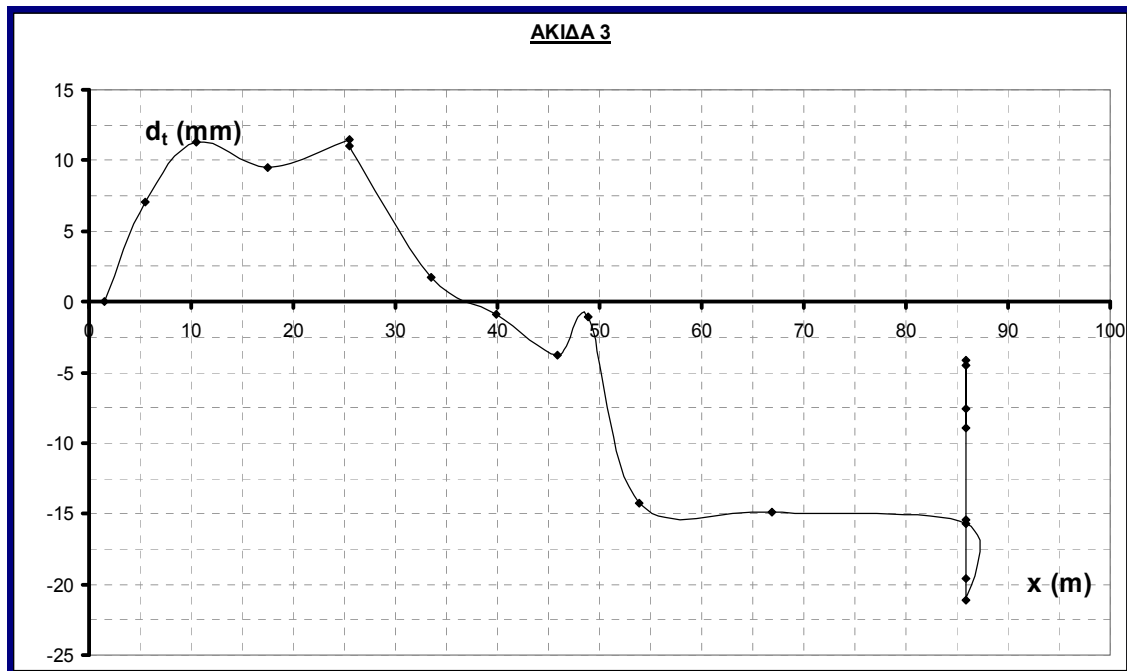


Διάγραμμα 7.29 – Οριζόντιες μετακινήσεις συναρτήσει του χρόνου.



Διάγραμμα 7.30 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει της προχώρησης του μετώπου.



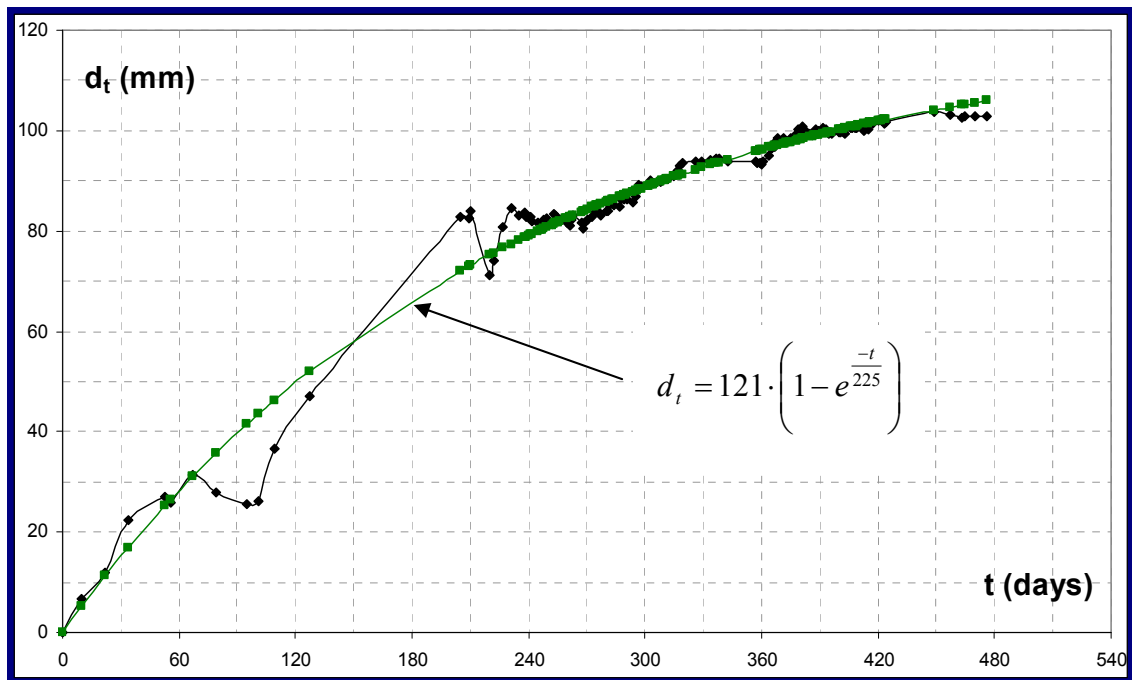


Διάγραμμα 7.33 – Η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης συναρτήσει του χρόνου.

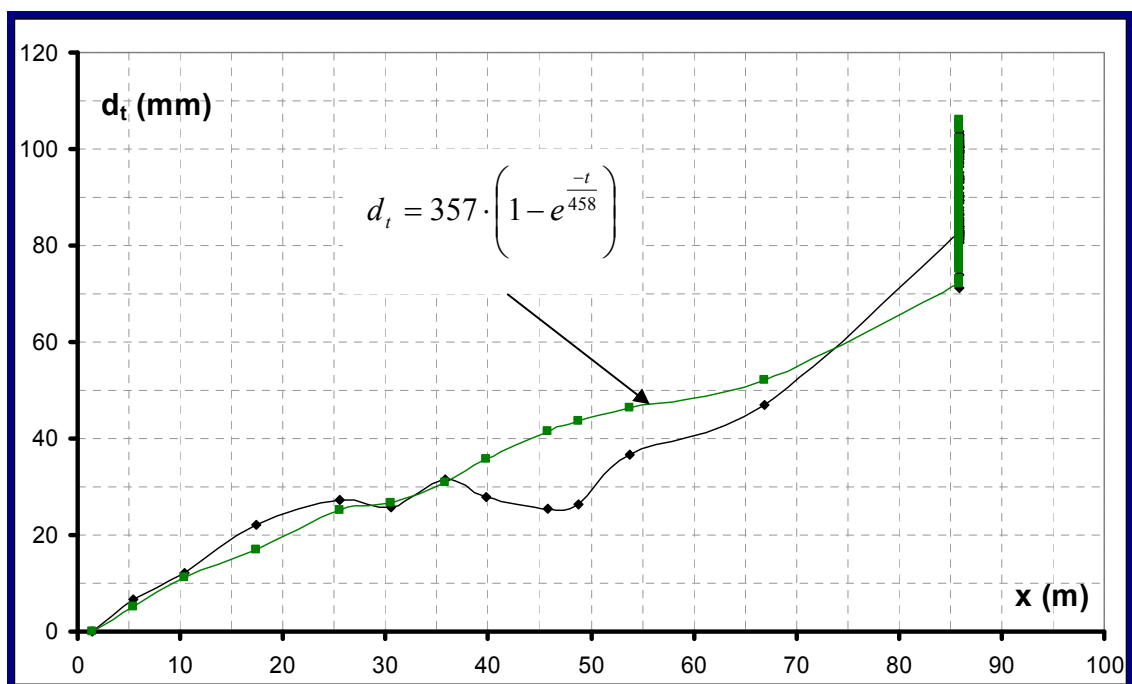
Τα διαγράμματα $d_t - x$ και $d_t - t$ είναι ουσιαστικά οι καμπύλες ερπυσμού της υποστηριζόμενης διατομής, στις οποίες μπορούν να προσαρμοστούν και να εξαχθούν οι παράμετροι για τις διάφορες (εμπειρικές και αναλυτικές) σχέσεις όπως αυτές στην Εικόνα 4.2. Προκειμένου να γίνει σύγκριση με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 6, θα χρησιμοποιηθεί η ίδια σχέση

$$d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right]$$

Οι παράμετροι T , dt^* θα εξαχθούν από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις καμπύλες ερπυσμού. Επιπλέον για να υπάρχει συνέπεια με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στο Κεφάλαιο 6, οι οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες θα ενοποιηθούν σε μία συνισταμένη και εν συνεχεία οι τρεις ακίδες θα ενοποιηθούν σε μία συνολική σύγκλιση η οποία θα είναι ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των τριών ακίδων όπως στη σχέση 6.1. Η διαδικασία που ακολουθείται για την εύρεση των παραμέτρων είναι επίσης αυτή που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.



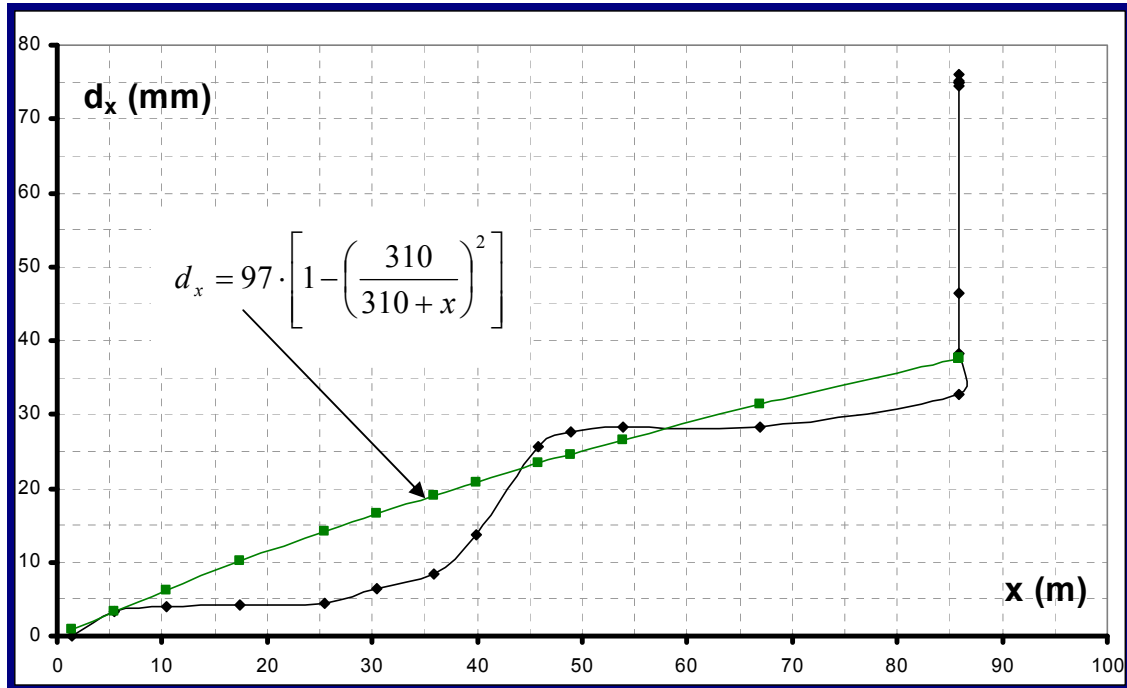
Διάγραμμα 7.34 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χρονικής συνιστώσας της σύγκλισης.



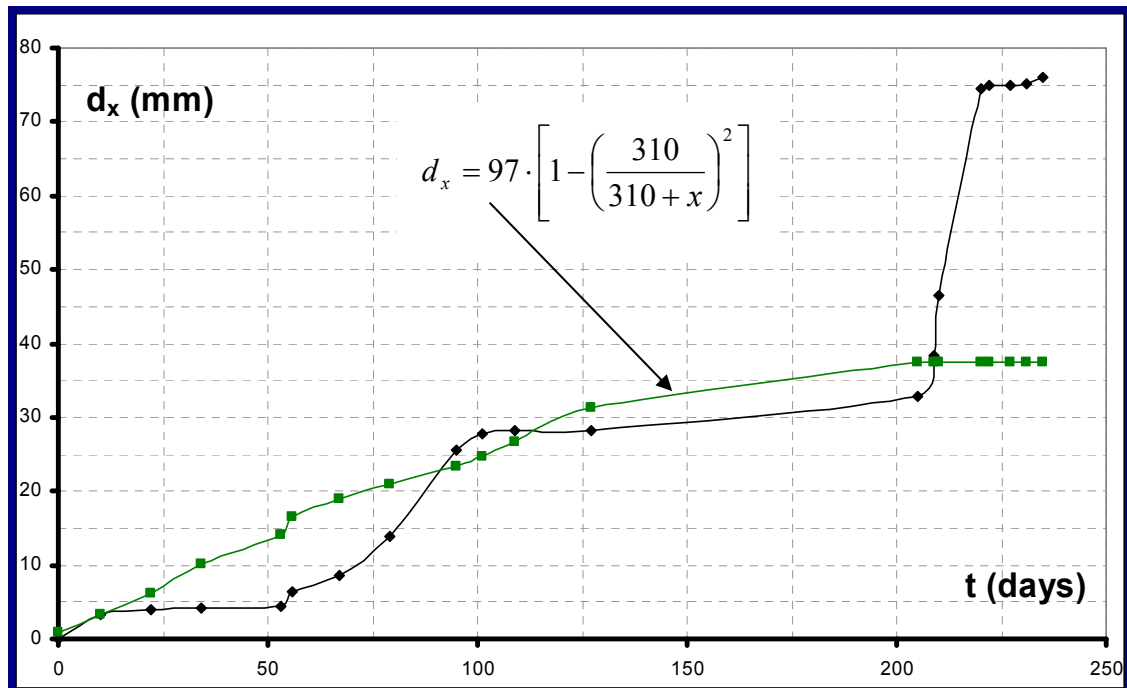
Διάγραμμα 7.35 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χρονικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς x .

Ομοίως η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί για να βρεθούν οι παράμετροι d_x^* , X που αντιστοιχούν στις συγκλίσεις που υπολογίσαμε με την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, προκειμένου να γίνει σύγκριση με τις τιμές που υπολογίσθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Βέβαια για να υπάρχει συνέπεια

με τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στα προηγούμενα, η καμπύλη προσαρμογής πρέπει να αναφέρεται μόνο στις μετρήσεις για $x < 82.89\text{m}$ και $t < 170$ ημέρες ώστε να εξασφαλίζονται οι προϋποθέσεις αδιατάρακτου πεδίου.



Διάγραμμα 7.36 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χωρικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς x .



Διάγραμμα 7.37 – Προσδιορισμός των συντελεστών της χωρικής συνιστώσας της σύγκλισης, διάγραμμα ως προς t .

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

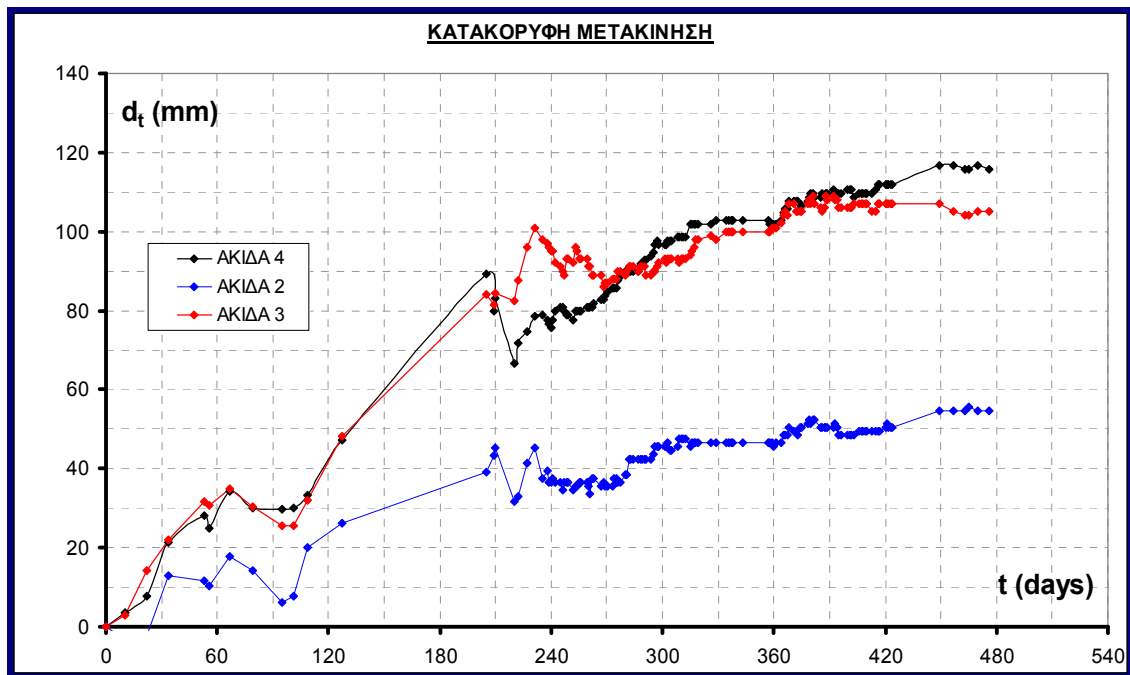
Το υπολογιστικό μέρος της εργασίας αποτελείται από 2 επιμέρους τμήματα. Στο πρώτο επιχειρήθηκε να περιγραφεί η συνολική σύγκλιση της σήραγγας από μία σχέση της μορφής
$$d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right] + dt^* \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t_i}{T} \right)} \right].$$

Για να γίνει αυτό, ελήφθησαν τα δεδομένα συγκλίσεων κατά τη φάση κατασκευής από 33 διατομές ελέγχου, έγινε μία εκκαθάριση αυτών σύμφωνα με τις παραδοχές για αδιατάρακτο πεδίο και διατυπώθηκαν κάποιες οριακές τιμές (max, min) για τις παραμέτρους dx^* , dt^* , X και T . Κατόπιν προσαρμόστηκε η παραπάνω καμπύλη (calculated) στις μετρήσεις (real) για κάθε διατομή και διαπιστώθηκαν σημαντικές μεταβολές στις τιμές των παραμέτρων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το Διάγραμμα 6.10 στο οποίο έχουν σχεδιαστεί τα αποτελέσματα των μετρητικών δεδομένων (real) από όλες τις διατομές συγκεντρωτικά. Παρατηρούνται έντονες διαφοροποιήσεις στην κλίση των καμπυλών που οφείλονται στη συχνή αλλαγή της γεωμετρίας εκσκαφής, τρόπου υποστήριξης και γεωτεχνικών συνθηκών, άρα είναι λογικό και οι προσαρμοσμένες καμπύλες (calculated) που σχεδόν συμπίπτουν με τις πραγματικές να έχουν διαφορές μεταξύ τους. Το επόμενο βήμα ήταν να χωριστούν οι διατομές σε 2 ομάδες με παρόμοια συμπεριφορά ως προς τη σύγκλιση (Διάγραμμα 6.11). Οι δύο ομάδες περιλαμβάνουν διατομές σε γειτονικές Χ.Θ., άρα ένας τέτοιος διαχωρισμός έχει και φυσική εξήγηση· ενδεχομένως η διαφορά στις συγκλίσεις να οφείλεται σε μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού μετά από κάποια Χ.Θ. Στη συνέχεια εξήχθησαν οι μέσες τιμές των παραμέτρων για κάθε ομάδα διατομών και σχεδιάστηκαν οι καμπύλες που αντιπροσωπεύονται για αυτές τις τιμές των παραμέτρων. Διαπιστώθηκε ότι οι 2 υπολογισθείσες καμπύλες αντιπροσωπεύουν ικανοποιητικά τις 2 ομάδες δεδομένων, συνεπώς διατυπώνονται οι ακόλουθες σχέσεις όσον αφορά τη σύγκλιση του τμήματος της σήραγγας που εξετάστηκε, με τις επιφυλάξεις που εκφράστηκαν προηγουμένως όσον αφορά τις διαφοροποιήσεις στον τρόπο υποστήριξης, τη γεωμετρία της εκσκαφής και τη μεταβολή στις γεωτεχνικές συνθήκες:

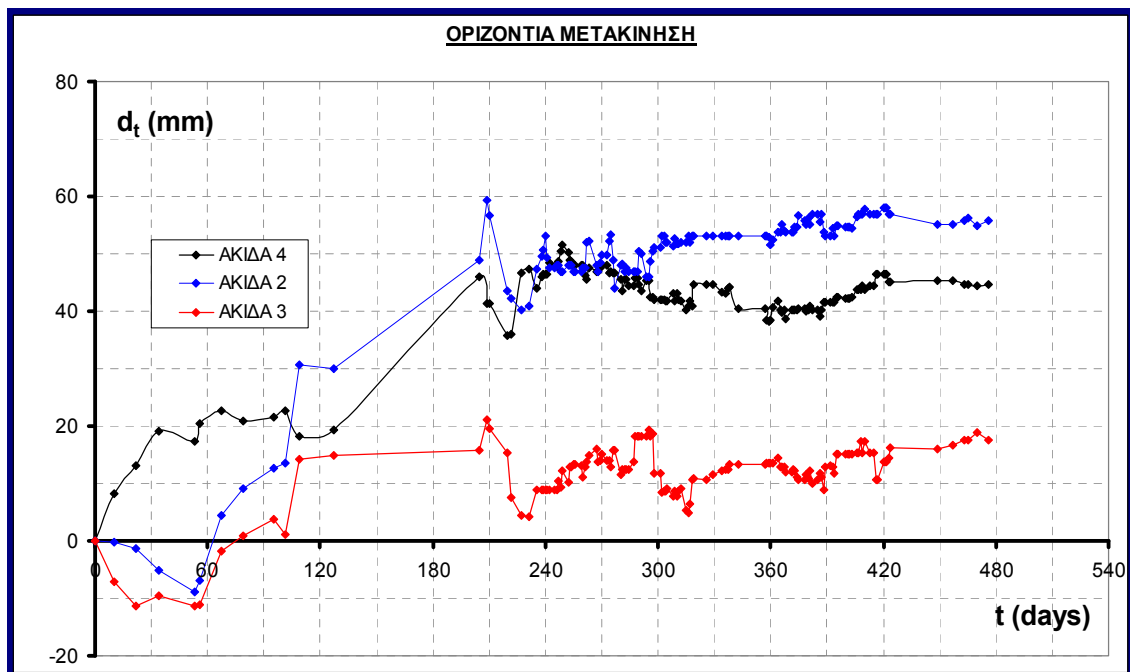
Χ.Θ. 5+465,650 έως 5+404,238	$d = 33 \cdot \left[1 - \left(\frac{39}{x+39} \right)^2 \right] + 215 \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{166} \right)} \right]$
Χ.Θ. 5+473,640 έως 5+564,040	$d = 14 \cdot \left[1 - \left(\frac{36}{x+36} \right)^2 \right] + 68 \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{254} \right)} \right]$

Η πολυπλοκότητα του φαινομένου ίσως δεν είναι δυνατό να περιγραφεί από τέτοιους απλούς νόμους. Όπως φαίνεται και στον αντίστοιχο πίνακα του κεφαλαίου 6.3, πολλές τιμές παραμέτρων (ιδίως για την παράμετρο X) αγγίζουν το άνω όριο που ετέθη, που σημαίνει ότι αν δεν υπήρχε ο περιορισμός για $X < 40$ ο αλγόριθμος θα συνέκλινε για διαφορετικές τιμές. Όμως τιμές $X > 40$ δεν έχουν φυσικό νόημα όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 6.2.2 επομένως το μοντέλο έχει κάποιες αδυναμίες.

Στο δεύτερο τμήμα επικεντρώθηκε η προσοχή σε μία συγκεκριμένη διατομή. Συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν πλήθος στοιχείων σχετικά με τη γεωμετρία της εκσκαφής, την υποστήριξη, τις γεωτεχνικές συνθήκες και την εξέλιξη της εκσκαφής. Έτσι προσομοιώθηκε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια η διαδικασία της εκσκαφής σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων σε 22 στάδια, με στόχο να προσδιοριστούν οι παραμορφώσεις που οφείλονται αμιγώς στην προώθηση του μετώπου. Αφαιρώντας τις από τις συνολικές παραμορφώσεις που μετρήθηκαν προκύπτει η χρονικά εξαρτημένη συνιστώσα της σύγκλισης. Στα παρακάτω διαγράμματα συνοψίζονται τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 8.1 – Η χρονική συνιστώσα της μετακίνησης όπως προέκυψε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.



Διάγραμμα 8.2 – Η χρονική συνιστώσα της μετακίνησης όπως προέκυψε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Χάριν συγκρίσεως μεταξύ των δύο μεθόδων προσαρμόστηκαν καμπύλες της μορφής που είδαμε παραπάνω ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία και καταλήξαμε στις τιμές των 4 παραμέτρων, οι οποίες προκύπτει ότι είναι

συγκρίσιμες και ίδιας τάξης μεγέθους με εκείνες που είχαμε βρει για τη διατομή 27 και την ομάδα 2 (στην οποία ανήκει η διατομή 27):

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	2 ^η ΜΕΘΟΔΟΣ	1 ^η ΜΕΘΟΔΟΣ	
		ΔΙΑΤΟΜΗ 27	ΟΜΑΔΑ II
d_x^*	97	19	14
d_t^*	121	192	68
X	310	40	36
T	225	372	254
m	1.24	10	4.8

Από τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα καταλήγει κανείς στο ότι παρόλο που οι τιμές των 4 παραμέτρων που προκύπτουν από την ανάλυση είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους και ικανής τάξης μεγέθους ώστε να έχουν φυσικό νόημα, ένας γενικευμένος νόμος όπως αυτός που αναφέρθηκε προηγουμένως δεν είναι ικανός να περιγράψει την εξέλιξη των συγκλίσεων και μάλιστα ο

παράγοντας που αναφέρεται στην χωρική σύγκλιση $d_i = dx^* \cdot \left[1 - \left(\frac{X}{x_i + X} \right)^2 \right]$

είναι που υστερεί (Διάγραμμα 7.36, Διάγραμμα 7.37). Αναφορικά με τη μεμονωμένη διατομή που εξετάστηκε, προκύπτει ότι ενώ σημαντικές ερπυστικές παραμορφώσεις έλαβαν χώρα (έως 120mm) κατά τη διάρκεια εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης, η εξέλιξή τους ως προς το χρόνο δε φαίνεται να σταθεροποιείται (Διάγραμμα 8.1), συνεπώς αναμένεται περαιτέρω εκδήλωση αυτών με τη μορφή πίεσης επί της τελικής επένδυσης.

Βιβλιογραφία

1. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Μ. (2005), Σημειώσεις Σχεδιασμού Υπογείων Έργων, εκδ. Ε.Μ.Π.
2. ΜΑΡΙΝΟΣ, Π. (1998), Κεφάλαια Τεχνικής Γεωλογίας Μηχανικού, εκδ. Ε.Μ.Π.
3. ΜΗΤΣΗ, Α. (2006), Μελέτη της επίδρασης της ερπυστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού στην ένταση της τελικής επένδυσης σήραγγων μέσω παραμετρικών αναλύσεων, Διπλωματική εργασία.
4. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Β. (2004), Στοιχεία του μαθήματος «Βραχομηχανική – Σήραγγες», εκδ. Ε.Μ.Π.
5. ΠΡΟΥΝΤΖΟΠΟΥΛΟΣ, Γ., ΜΑΡΙΝΟΣ, Β. (2008), Συστάσεις για την τοποθέτηση και τεχνικογεωλογικές συνθήκες εφαρμογής μέτρων προσωρινής υποστήριξης.
6. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ (2006), «Έρευνα επί της συμπεριφοράς των γεωυλικών κατά την κατασκευή των σήραγγων της Εγνατίας οδού και επί των παραγόντων διαμόρφωσης του τελικού κόστους κατασκευής.»
7. Οριστική μελέτη επανασχεδιασμού σήραγγας Ανθοχωρίου – Τεχνική έκθεση & σχέδια, Ingenieurburo EDR GmbH.
8. Φύλλα τοπογραφικών μετρήσεων των διατομών ελέγχου της σήραγγας Ανθοχωρίου, Κ/Ξ ΜΗΧΑΝΙΚΗ – ΜΟΧΛΟΣ – ΑΘΗΝΑ – ΑΒΑΞ.
9. CHI-WEN, Y. (1998), Determination of creep characteristics of soft rock and development of non-linear creep analysis code for squeezing tunnel problem, University of Bradford.

10. FARMER, I. (1983), Engineering Behaviour of Rocks, Chapman & Hall.
11. HOEK, E., DIEDERICHS, M.S. (2005), Empirical estimation of rock mass modulus, Intl. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
12. HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., CORKUM, B. (2002), Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition, Roclab Documentation.
13. HUDSON, J.A., HARRISON, J.P. (1997), Engineering Rock Mechanics: an Introduction to the Principles, Pergamon Press.
14. KONTOGIANNI, V., PSIMOULIS, P., STIROS, S. (2005), What is the contribution of time-dependent deformation in tunnel convergence, Engineering Geology.
15. MARINOS, V., FORTSAKIS, P., PROUNTZOPOULOS, G. (2006), Estimation of rock mass properties of heavily sheared flysch using data from tunnelling construction, IAEG 2006
16. PAN, Y.W., DONG, J.J. (1991), Time-dependent tunnel convergence – I. Formulation of the model, Intl. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
17. PAN, Y.W., DONG, J.J. (1991), Time-dependent tunnel convergence – II. Advance rate and tunnel-support interaction, Intl. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
18. SULEM, J., PANET, M., GUENOT, A. (1987), Closure analysis in deep tunnels, Intl. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.
19. SULEM, J., PANET, M., GUENOT, A. (1987), An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel, Intl. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

Παράρτημα

Τα τοπογραφικά δεδομένα και οι πίνακες υπολογισμού από τους οποίους προέκυψαν τα αποτελέσματα των κεφαλαίων 5 και 6 είναι στη διάθεση του αναγνώστη σε ηλεκτρονική μορφή και έχουν παραδοθεί μαζί με τη διπλωματική εργασία. Λόγω μεγάλης έκτασης δεν τυπώθηκαν μαζί με την εργασία.