



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΑΘΗΝΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

**Επίδραση της Απόστασης των Κλάδων Δίδυμης Οδικής Σήραγγας
στην Μηχανική της Συμπεριφορά**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πανάγου Σωτήρης

Επιβλέπων: Λέκτορας Π.Νομικός

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΑΘΗΝΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

**Επίδραση της Απόστασης των Κλάδων Δίδυμης Οδικής Σήραγγας
στην Μηχανική της Συμπεριφορά**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πανάγου Σωτήρης

Επιβλέπων: Λέκτορας Π.Νομικός

Τριμελής επιτροπή

Νομικός Παύλος, Λέκτορας,

Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής,

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Λέκτορας

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί τον επίλογο των πέντε χρόνων σπουδών μου στην σχολή των Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Για τον λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ευχαριστώ το διδακτικό προσωπικό, το εργαστηριακό προσωπικό, καθώς επίσης το οικογενειακό και το φιλικό μου περιβάλλον που με βοήθησαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ακόμη ευχαριστώ τον κ.Π.Π.Νομικό για την συνεργασία μας στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην επιρροή που έχει η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου στον πρώτο σε μία δίδυμη σήραγγα, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η σήραγγα T2 στην υπό κατασκευή νέα Εθνική Οδό E65, στην περιοχή του Λιανοκλαδιού, κοντά στην Λαμία. Για να επιτευχθεί αυτό πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα Phase 2 των διατομών της σήραγγας για συγκεκριμένη κατηγορία βραχομάζας και υποστήριξης. Τα αποτελέσματα ελήφθησαν συσχετίζονται με τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και μας οδηγούν στα τελικά συμπεράσματα.

Αρχικά γίνεται μία συνοπτική περιγραφή της σήραγγας. Γίνεται αναφορά στην γεωλογία της περιοχής της σήραγγας, στην υδρογεωλογία για τυχόν ύπαρξη νερού, στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας. Δίνονται στοιχεία για την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος, την ταξινόμηση της βραχομάζας με βάση τα εμπειρικά συστήματα GSI και Q, καθώς και εξήγηση της χρησιμότητάς τους. Στην συνέχεια παρατίθεται λεπτομερής περιγραφή των κατηγοριών υποστήριξης και ακολουθούν περιγραφή της παρακολούθησης της διαδικασίας διάνοιξης της σήραγγας, του συστήματος ελέγχου και αποστράγγισης.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά το πρόγραμμα Phase2 με το οποίο έγινε η προσομοίωση.

Σε πρώτο στάδιο, δημιουργήθηκαν μοντέλα κυκλικής διατομής, τα οποία αποσκοπούσαν στο να δώσουν μια πρώτη εκτίμηση για την αλληλεπίδραση των δύο κλάδων της σήραγγας

Εν συνεχεία, έχουμε την δημιουργία των μοντέλων της δίδυμης σήραγγας, στα οποία βασίστηκε η διπλωματική εργασία. Περιγράφεται η κατασκευή τους, δηλαδή τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης, καθώς επίσης και ο προσδιορισμός των τιμών που εισάγονται στο πρόγραμμα, μέσω κειμένου και σειράς εικόνων.

Στο τελικό στάδιο έχουμε τα αποτελέσματα με διαγράμματα που αφορούν τις μετατοπίσεις, τις αξονικές δυνάμεις και τις ροπές κάμψης. Από αυτά αντλήθηκαν συμπεράσματα σχετικά με το πόσο επηρεάζεται ο αριστερός κλάδος της σήραγγας στις περιπτώσεις που είχαμε διαφορετικές αποστάσεις και διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης του σκυροδέματος.

ABSTRACT

The current thesis refers to the influence that the second part of a twin tunnel has to the first. More specifically the tunnel that the survey has taken place is T2, which is situated in the under construction National Highway E65 , in Lianokladi near Lamia. In order this to be achieved, the simulating programme Phase 2 was used, for specific categories of rock mass and support. The results have to do with the geotechnical features of the tunnel and lead to the draw of conclusions.

At first there is a brief tunnel's description. There is a reference to the area's geology, to the hydrology for possible presence of water, to the geotechnical characteristics of the rock mass. There is information about the resistance of the indissoluble rock, the classification of the rock mass according to the experimental systems GSI and Q, and furthermore about their usefulness and use. After that, there is a detailed description of the support types and added to these description of the monitoring system, the control system and the drainage system.

The next chapter contains details about the programme Phase 2.

In the first step, models with circular sections were made, in order to have an initial estimation of the influence between the two parts, of what are we going to expect later on.

Afterwards new models are built, on which the whole survey is based. It is described their construction, which includes the excavation and support stages, and also the way that the values are inserted in the programme and the way they were calculated, through series of texts and images.

In the last chapter, there are the final results. These have to do with diagrams referred to the displacements, the axial force and the bending moment in the tunnel in different places of the it. Based on them, final conclusions were drawn, related with how much the left section is influenced because of the excavation of the right one, in cases of different distances between the sections and different ways of concrete's simulation

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	σελ 1
1.1. Η σημασία της απόστασης μεταξύ δύο κλάδων δίδυμης σήραγγας.....	σελ 1
1.2. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	σελ 3
2. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΗΡΑΓΓΑ.....	σελ 4
2.1.Γενικές πληροφορίες.....	σελ 6
2.2.Γεωλογία.....	σελ 6
2.2.1. Γενικές θεωρήσεις.....	σελ 6
2.2.2. Σχιστοκερατόλιθοι.....	σελ 7
2.2.3. Δολερίτες, γάββροι, περιδοτίτες με βασάλτες, λάβες.....	σελ 9
2.2.4. Ενστρώσεις.....	σελ 9
2.3.Γεωλογικό – Γεωτεχνικό προφίλ.....	σελ 10
2.4.Υδρογεωλογία.....	σελ 12
2.5.Γεωτεχνικά.....	σελ 14
2.5.1. Εισαγωγή.....	σελ 14
2.5.2. Γενικές παρατηρήσεις.....	σελ 15
2.6.Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	σελ 16
2.6.1. Συντελεστής m_i	σελ 18
2.6.2. GSI.....	σελ 19
2.6.3. Προτεινόμενη υποστήριξη με βάση το Q.....	σελ 22
2.6.4. Διατομές για αριθμητική ανάλυση κατά την μελέτη.....	σελ 23
2.7.Τύποι υποστήριξης.....	σελ 24
2.8.Τεχνικές προδιαγραφές.....	σελ 42
2.9.Χρήση αποτελεσμάτων.....	σελ 43
2.9.1. Γενικά.....	σελ 43
2.9.2. Εφαρμογή.....	σελ 43
2.9.3. Πρόσθετα μέτρα υποστήριξης.....	σελ 47
2.10. Παρακολούθηση.....	σελ 52
2.11. Διατομές ελέγχου.....	σελ 53
2.12. Παρακολούθηση – Ενοργάνωση.....	σελ 55
2.13. Ελεγχος κατώτερων ορίων.....	σελ 55
2.14. Σύστημα αποστράγγισης.....	σελ 56

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ Phase 2.....σελ 57	
3.1.Γενικά για το Phase.....σελ 57	
3.2.Κατασκευή μοντέλου.....σελ 58	
3.2.1. Παραγωγή μοντέλου.....σελ 58	
3.2.2. Στάδια σχεδιασμού – υποστήριξης.....σελ 58	
3.2.3. Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης.....σελ 58	
3.3.Ιδιότητες υλικών μάζας.....σελ 59	
3.4.Τάσεις φόρτισης.....σελ 60	
4. ΔΙΔΥΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....σελ 61	
4.1. Εισαγωγή.....σελ 61	
4.2. Προετοιμασία.....σελ 62	
4.3. Αποτελέσματα.....σελ 64	
5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ.....σελ 69	
5.1. Σχεδιασμός της διατομής ενός κλάδου της σήραγγας.....σελ 69	
5.2. Περιβάλλον πέτρωμα–Υλικό της περιοχής διάνοιξης της σήραγγας..σελ71	
5.2.1. Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά.....σελ 71	
5.3. Στάδια διάνοιξης της εκσκαφήςγια ένα κλάδο.....σελ 72	
5.4. Προσδιορισμός – Υπολογισμός των συντελεστών αποτόνωσης.....σελ 81	
5.4.1. Θεωρητικό μέρος.....σελ 81	
5.4.2. Πειραματικό μέρος – Μοντέλα αποτόνωσης.....σελ 82	
5.5. Σχεδιασμός της διατομής της σήραγγας δύο κλάδων.....σελ 90	
5.5.1. Σήραγγα 38 μέτρων.....σελ 90	
5.5.2. Σήραγγα 19 μέτρων.....σελ 93	
5.5.3. Σήραγγα 28,5 μέτρων.....σελ 93	
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ 94	
6.1. Αποτελέσματα ενός κλάδου.....σελ 94	
6.1.1 Μετατοπίσεις.....σελ 94	
6.1.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ 97	
6.1.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ 100	
6.2. Αποτελέσματα δύο κλάδων (38 μέτρα).....σελ 103	
6.2.1 Μετατοπίσεις.....σελ 103	
6.2.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ 106	
6.2.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ 109	

6.3. Αποτελέσματα δύο κλάδων (28,5 μέτρα).....σελ	112
6.3.1 Μετατοπίσεις.....σελ	112
6.3.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ	115
6.3.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ	118
6.4. Αποτελέσματα δύο κλάδων (19 μέτρα).....σελ	121
6.4.1 Μετατοπίσεις.....σελ	121
6.4.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ	124
6.4.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ	127
6.5. Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση 38μέτρα).....σελ	130
6.5.1 Μετατοπίσεις.....σελ	130
6.5.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ	133
6.5.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ	136
6.6. Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση (28,5 μέτρα).....σελ	139
6.6.1 Μετατοπίσεις.....σελ	139
6.6.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ	142
6.6.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ	144
6.7. Αποτελέσματα Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση 19 μέτρα)....σελ	148
6.7.1 Μετατοπίσεις.....σελ	148
6.7.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα.....σελ	151
6.7.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα.....σελ	153
7. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ	157

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Η σημασία της απόστασης μεταξύ δύο κλάδων δίδυμης σήραγγας

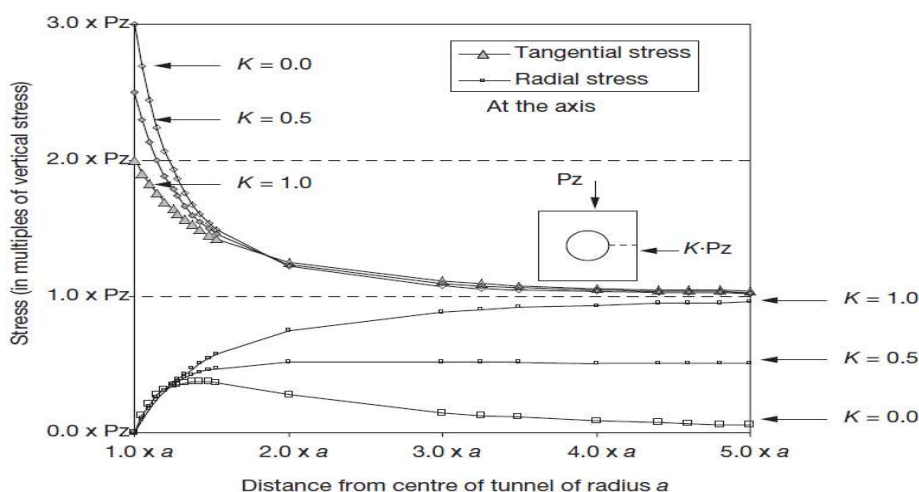
Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί το κατά πόσο επηρεάζει η απόσταση των δύο κλάδων σε μία δίδυμη σήραγγα. Η επιρροή αναφέρεται στις τάσεις γύρω από την εκσκαφή, τα φορτία που αναπτύσσονται στην επένδυση και στις μετατοπίσεις της βραχομάζας κατά την διάρκεια της κατασκευής αλλά και μετά το πέρας της. Τα παραπάνω συνδέονται άμεσα με την ευστάθεια και την ασφάλεια της σήραγγας.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα την ζώνη επιρροής εκσκαφής, θα θεωρήσουμε δύο κλάδους κυκλικής διατομής μέσα σε υδροστατικό απώτερο πεδίο τάσεων. Στον αρχικό κλάδο, σε απόσταση $5R$ από το κέντρο του η εφαπτομενική τάση $\sigma_{\theta\theta}$ και η ακτινική τάση σ_{rr} διαφέρουν από τις τάσεις του απώτερου πεδίου κατά 4%. Η διάνοιξη του δεύτερου κλάδου ανοίγεται σε απόσταση μεγαλύτερη από $5R$ και μπορεί να θεωρηθεί σαν μεμονωμένη εκσκαφή. Θεωρούμε το 5% στη διαφορά των τάσεων σαν συμβατικό όριο, μέσω του οποίου δύναται να υπολογίσουμε τον γεωμετρικό τόπο της ζώνης επιρροής σε μια εκσκαφή. Συμπερασματικά, όταν έχουμε δύο κυκλικές εκσκαφές μέσα σε υδροστατικό πεδίο και τα κέντρα τους έχουν απόσταση μεγαλύτερη από $6R$ τότε θεωρούνται μεμονωμένες εκσκαφές.

Σε παρόμοιο παράδειγμα όπου η διατομή του ενός κλάδου είναι μεγαλύτερη από του άλλου, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μεγάλης διαμέτρου επηρεάζει την μικρή, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει. Επίσης σε ελαστοπλαστικά και σε μη κυκλικά σχήματα δεν είναι εύκολος ο υπολογισμός της αλληλεπίδρασης.

Αναφορικά με την οριοθέτηση ζωνών επιρροής, αξίζει να σημειωθεί η διαφορά μεταξύ αστοχίας της κατασκευής και αστοχίας της βραχομάζας. Η πρώτη είναι άμεσα συνδεδεμένη με την κατασκευή, ενώ στην άλλη περίπτωση πιθανόν να μη δημιουργούνται προβλήματα στην διάνοιξη. Για την εκτίμηση της έκτασης της αστοχίας μπορούν να γίνουν τα εξής :

- Πρόγνωση της συμπεριφοράς του πετρώματος
- Τροποποίηση του σχεδιασμού
- Εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης



Διάγραμμα 1. Σχέση ανάμεσα στον συντελεστή k και της πίεσης

Με βάση τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν και θα περιγραφούν παρακάτω παρατηρείται σημαντική αλλαγή στην συμπεριφορά της σήραγγας. Η εκσκαφή του δεύτερου κλάδου επιφέρει μεταβολές και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή. Όπως είναι φυσικό, όσο μικρότερη είναι η απόσταση των κλάδων, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός επιρροής τους. Παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων που ασκούνται και των ροπών κάμψης στο σκυρόδεμα. Ακόμη παρατηρείται μία γενική αύξηση των αστοχούντων σημείων, τόσο στην σήραγγα όσο και στον οπλισμό της.

Για να αντιμετωπισθούν οι δυσκολίες αυτές, μια αποτελεσματική λύση είναι η διάνοιξη του ενός κλάδου να προηγείται του άλλου, έτσι ώστε να τοποθετηθεί όλη η υποστήριξη του ενός κλάδου πριν την διάνοιξη του δεύτερου. Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης των δυσκολιών είναι να έχει προβλεφθεί από την μελέτη, η διάνοιξη των κλάδων να γίνει σε ασφαλή μεταξύ τους απόσταση, ώστε να μην επηρεάζει ο δεύτερος τον πρώτο.

1.2. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε συνολικά έξι κεφάλαια, ανάλογα με το περιεχόμενο τους, ακολουθώντας την χρονολογική σειρά των εργασιών.

Στο κεφάλαιο 2 έχουμε πλήρη περιγραφή της σήραγγας T2. Περιλαμβάνονται γενικές πληροφορίες, περιγραφή της γεωλογίας της περιοχής, του γεωτεχνικού προφίλ, της υδρογεωλογίας, των τύπων υποστήριξης που υπάρχουν και θα εφαρμοσθούν, αναφορά στην παρακολούθηση και την αποστράγγιση, τα οποία βοηθούν να σχηματιστεί μια συνολική άποψη για τις υπάρχουσες συνθήκες της κατασκευής.

Στο κεφάλαιο 3 υπάρχει περιγραφή του προγράμματος Phase 2, με το οποίο δημιουργήθηκαν τα μοντέλα και πήραμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων, έτσι ώστε να εξάγουμε τα συμπεράσματα.

Στο επόμενο κεφάλαιο, ξεκινά ουσιαστικά η προσομοίωση της T2. Κατασκευάζονται μοντέλα δίδυμης σήραγγας, με τέσσερις διαφορετικές αποστάσεις των δύο κλάδων, κυκλικής διατομής, έτσι ώστε να έχουμε μια αρχική εκτίμηση της αλληλεπίδρασης των δύο κλάδων.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται περιγραφή για το πώς σχεδιάζεται η σήραγγα στο πρόγραμμα, ποιοι παράγοντες θα πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν, τα στάδια διάνοιξης, τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος πετρώματος και υπολογισμός των συντελεστών αποτόνωσης σε κάθε στάδιο εκσκαφής της σήραγγας. Με βάση όλα αυτά επιτυγχάνεται μια ολοκληρωμένη προσομοίωση της σήραγγας T2.

Στο κεφάλαιο 6, έχουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα μοντέλα, τα οποία οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την συγκεκριμένη περίπτωση. Περιλαμβάνονται επίσης διαγράμματα που αποτυπώνουν την μεταβολή των μετατοπίσεων, των αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης και εικόνες με τα σημεία αστοχίας των διατομών.

2. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΗΡΑΓΓΑ T2

2.1. Γενικές Πληροφορίες

Η σήραγγα TU026 (σήραγγα T2) βρίσκεται στην Κεντρική Ελλάδα στην υπό κατασκευή Εθνική Οδό E-65. Η σήραγγα TU026 είναι μια δίδυμη σήραγγα με μήκος 2957 m. Η παρούσα εργασία αναφέρεται στο πρώτο μισό με μήκος 1506 m που κατασκευάζεται από την εταιρεία DRAGADOS.

Η γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα πραγματοποιήθηκε αρχικά από την εταιρεία συμβούλων μηχανικών ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ, με την υπάρχουσα βραχομάζα να ταξινομείται με βάση τον δείκτη GSI

Τα στοιχεία που αναφέρονται εδώ ελήφθησαν από την έρευνα που έχει καταρτιστεί από την ισπανική εταιρεία συμβούλων INTESCA και αναφέρεται μόνο στο κομμάτι της σήραγγας που ορύσσεται από την DRAGADOS, σε συνεργασία με την FERROVIAL-AGROMAN, η οποία είναι υπεύθυνη για το υπόλοιπο μισό της σήραγγας. Οι εργασίες εστιάζονται κυρίως στο γεωλογικό και γεωτεχνικό προφίλ, για να γίνει η σωστή ταξινόμηση, κάτι όμως που παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες .

Οι έρευνες αυτές διαχωρίζονται σε

- Έρευνα προηγούμενων εγγράφων
- Γεωλογική περιγραφή της περιοχής
- Αναγνώριση των γεωτεχνικών ενοτήτων και των παραμέτρων σχεδιασμού
- Προτεινόμενη υποστήριξη με βάση εμπειρικές μεθόδους
- Κατηγορίες υποστήριξης ύστερα από αριθμητικές αναλύσεις

Η αναφορά γίνεται στις γεωλογικές και γεωτεχνικές συνθήκες που υπάρχουν στην σήραγγα T2, η οποία βασίζεται στα παρακάτω έγγραφα :

- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B20-2, B20-3, B20-5, B20-8 (1^η φάση Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B20-1, B20-4, B20-6, B20-7 (1^η φάση Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B2-1, B2-5 (1^η φάση), Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Σήραγγα TU.026 – βελτιστοποιημένη χάραξη. Γεωλογική και Γεωτεχνική ερμηνεία και αξιολόγηση. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Μάιος 2009
- Γεωτεχνική έρευνα για την φάση προσφορών του οδικού άξονα E-65 της Κεντρικής Ελλάδας. Γεωτεχνική Έρευνα. Hellenic Autoristas S.A, Απρίλιος 2006.
- Σήραγγα TU 026 (σήραγγα 2) Γεωλογική και Γεωτεχνική ερμηνεία και αξιολόγηση, ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Φεβρουάριος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (T2) – αρχικός σχεδιασμός. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Μάιος 2009
- Σήραγγα TU 026 (T2) – τελικός σχεδιασμός των εκσκαφών εισόδου και προσωρινή υποστήριξη .ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Ιούλιος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (σήραγγα 2) . Προτεινόμενη γεωτεχνική έρευνα κατα μήκος της σήραγγας και εκπόνηση βασικού σχεδίου .ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Ιούνιος 2009
- Γεωφυσική μελέτη. Διατρητική δοκιμή στο κομμάτι Λυγαριά – Περιβόλι του οδικού άξονα E65. Πολυτεχνείο Κρήτης. Αντώνης Βαφίδης . Χανιά Απρίλιος 2006.
- Τελικός σχεδιασμός αυτοκινητοδρόμου από CH. 26+810 μέχρι Ch. 28+500. ADT Omega S.A., Απρίλιος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (T2) . Ανάλυση ρίσκου για το αρχικό σχέδιο . HBI Haerter Ltd., Αύγουστος 2009.
- Γεωλογική έρευνα για τις συμπληρωματικές γεωτρήσεις για τη σήραγγα T2. Γεωτρήσεις CB-1, CB-2, CB-3, CB-4, CB-5, CB-6. Edafomechaniki S.A., Φεβρουάριος 2010

2.2. Γεωλογία της περιοχής

2.2.1. Γενικές Θεωρήσεις

Η περιοχή βρίσκεται στην κεντρική Ελλάδα, πιο συγκεκριμένα στο δυτικό τμήμα της οροσειράς “Παλιοβίγλα – Παλιοκάζαρμα - Κάμαζαρμα”, της οποίας οι πρόποδες ανήκουν στο βουνό Ορθυς.

Η γεωλογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την παρουσία βασικών και υπερβασικών πλουτωνίων και ηφαιστειακών υλικών , γνωστά σαν οφιόλιθους ή οφιολιθικά συμπλέγματα.

Οι οφιόλιθοι είναι εκχύσεις μάγματος μέσα σε σύκλινο και συνήθως μπλέκονται με τους ιζηματογενείς σχηματισμούς που αποτίθενται μέσα σε αυτό. Όταν είναι υγιή είναι πολύ υψηλών αντοχών και κατάλληλα για την θεμελίωση οποιουδήποτε τεχνικού έργου.

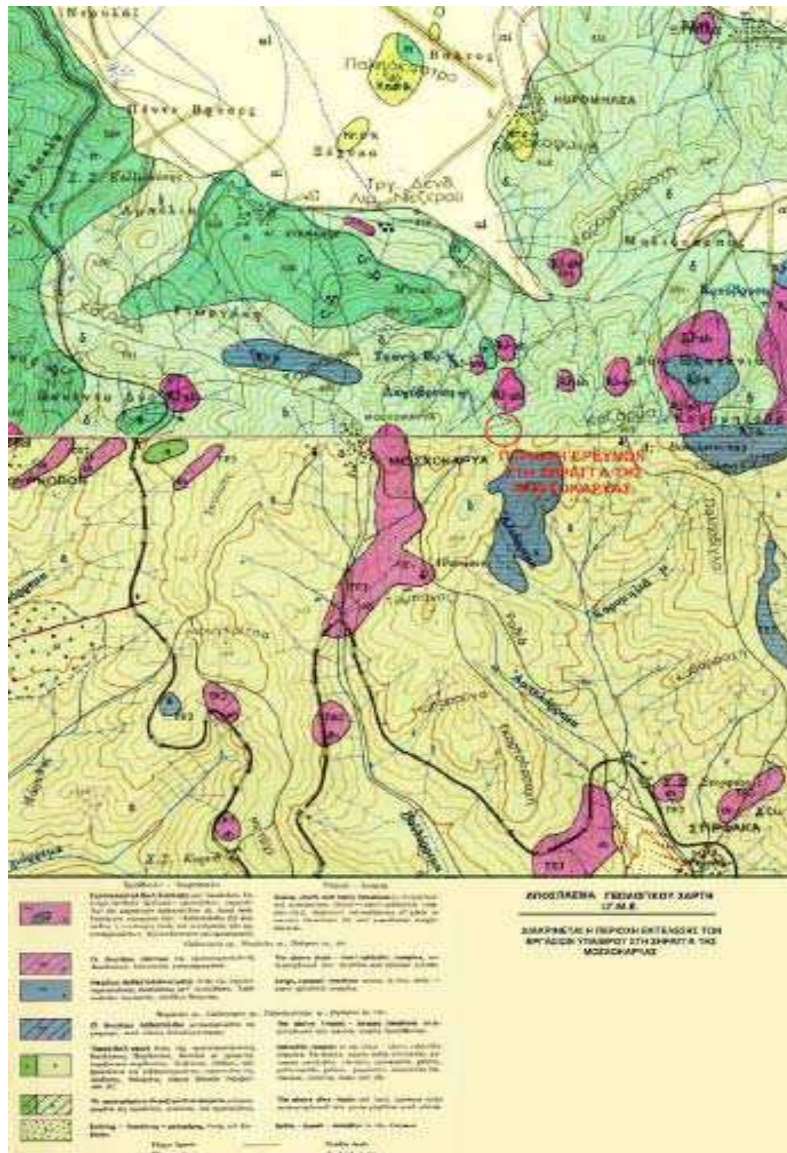
Ως οφιόλιθο ορίζουμε μια ευρύτερη κατηγορία πετρωμάτων μέσα στην οποία εντάσσονται οι γάββροι, οι περιδοτίτες, οι βασάλτες και ο διαβάσης.

Όλα αυτά τα υλικά έχουν υποστεί ισχυρή πτύχωση και ρηγματώσεις. Η κύρια διεύθυνση των τεκτονικών δυνάμεων είναι βορράς – νότος , κατά προτίμηση. Καθαρή απόδειξη αυτών των δυνατών πιέσεων είναι η εμφάνιση ρηγμάτων - επωθήσεων και σερπεντινιομένων υλικά. Σαν αποτέλεσμα αυτής της ισχυρής τεκτονικής δραστηριότητας, τα υλικά της περιοχής παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια, σχηματίζοντας ομάδες από διαφορετικά υλικά, τα οποία ποικίλουν χαοτικά , και οριζόντια και κατακόρυφα.

Το οφιολιθικό σύμπλεγμα ,που διαπερνάται από την σήραγγα TU-026, αποτελείται από δολερίτες με ασβεστιτικές φλέβες, βασάλτες, γάββρους, περιδοτίτες και pillow lavas.

Ακόμη, σχιστόλιθοι παρουσιάζονται σε αφθονία κατά μήκος της σήραγγας, κάποιες φορές σε στρώματα σημαντικού πάχους, κάποιες φορές σε λεπτές ενστρώσεις με οφιολιθικά υλικά και ανεμιγμένα.

Οι σχιστόλιθοι παρουσιάζουν ενστρώσεις από σχιστοκερατόλιθους όπως περιστασιακά από ψαμμίτες, δολερίτες και ασβεστολίθους.



Εικόνα 1. Γεωλογικοί σχηματισμοί στην περιοχή (Intesa – Inarsa)

2.2.2. Σχιστόκερατόλιθοι

Πρόκειται ουσιαστικά για κοκκινωπούς λουτίτες με κερατόλιθους, λεπτομερώς διαστρωμένους σε στρώσεις πάχους 1 έως 10 εκατοστών.

Αυτά τα υλικά παρουσιάζονται ισχυρά τεκτονισμένα και ρηγματωμένα. Οι αναμιγμένες δομές είναι συνηθισμένες σε αυτά τα στρώματα και συχνά εμφανίζονται στην δομή τους : ασβεστόλιθο , πολύμικτα λατυποπαγή και δολερίτες, βασάλτες και λάβες.

Στους πυρήνες των γεωτρήσεων, τα υλικά παρουσιάζονται αποσυντεθειμένα, παρόλο που οι θραύσεις είναι καθαρές, χωρίς πλήρωση και μικρή εξαλλοίωση των τοιχωμάτων τους,

κάτι που συνιστά ότι προκαλούνται θραύσεις κατά την διάτρηση ώστε ο σχηματισμός να εμφανίζεται ρωγμάτωση σε μεγαλύτερη έκταση από ότι στην φυσική του κατάσταση, μέσα στην βραχομάζα.

Η ύπαρξη αυτής της μηχανικής παραμόρφωσης στους σχιστόλιθους, που προκαλείται από τις γεωτρήσεις, ελήφθηκε υπ'όψιν , από τον μελετητή κατά την ταξινόμηση της βραχομάζας (GSI , Q).

Ο κερματισμός είναι πολύ υψηλός γι αυτή την ενότητα, με τιμές του RQD 0-25%, όπως προκύπτει από τις γεωτρήσεις.



Εικόνα 2. Σχιστοκερατόλιθοι

2.2.3. Δολερίτες , περιδοτίτες , γάββροι , βασάλτες , λάβες

Αυτά τα υλικά σχετίζονται με το οφιολιθικό σύμπλεγμα. Υπάρχουν δολερίτες, βασάλτες, περιδοτίτες, γάββροι και pillow lavas με παχιές στρώσεις από σχιστοκερατόλιθους κατά τόπους πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα.

Το υλικό είναι μια μίξη από βασικά και υπερβασικά πλουτώνια και ηφαιστειακά πετρώματα. Γενικά οι δολερίτες και περιδοτίτες με ασβεστιτικές φλέβες κυριαρχούν σε σχέση με τα υπόλοιπα. Γενικά το επίπεδο κερματισμού με βάση το RQD δεν είναι υψηλό (RQD = 50-100%), εκτός από μερικές περιοχές όπου ο βράχος παρουσιάζεται περισσότερο κερματισμένος.

2.2.4. Εναλλαγές - σχιστοκερατόλιθων με δολερίτες, βασσάλτες και λάβες

Οι δολερίτες, περιδοτίτες, βασσάλτες και οι λάβες εμφανίζονται σε συνεχείς ενστρώσεις με κόκκινους σχιστολίθους και σχιστοκερατόλιθους μέσα στη σήραγγα. Υπάρχουν περιοχές όπου ορισμένα υλικά υπερέχουν έναντι άλλων.

Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι οι ιδιότητες αυτής της ενότητας ποικίλουν σε σχέση με το ποσοστό του κάθε υλικού. Όταν το πυριγενές υλικό υπερέχει έναντι ιζηματογενών υλικών, οι ιδιότητες της ενότητας βελτιώνονται. Αντίθετα, όταν τα ιζηματογενή υπερέχουν, η ενότητα γίνεται περισσότερο ρωγματωμένη με ακόμη χειρότερες ιδιότητες. Έτσι, η μονάδα δείχνει ένα μεγάλο εύρος από γεωτεχνικές ιδιότητες, από φτωχά υλικά μέχρι και πολύ καλά υλικά, ανάλογα με την περιοχή.

2.3. Γεωλογικό – γεωτεχνικό προφίλ

Το γεωλογικό – γεωτεχνικό προφίλ προσπαθεί να ερμηνεύσει τη γεωλογία της περιοχής με ένα λογικό τρόπο, με δεδομένο ότι αντιστοιχεί σε μία ισχυρά τεκτονισμένη περιοχή, με ρήγματα και πτυχώσεις διεύθυνσης Βορράς-Νότος.

Προκειμένου να συμπληρωθεί αυτό το γεωλογικό κομμάτι, ελήφθησαν από τον μελετητή υπ'όψιν οι γεωτρήσεις πυρήνα που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή. Τα ρήγματα εντοπίστηκαν με αεροφωτογραφίες.

Τα γεωλογικά όρια και τα ρήγματα που αναπαριστώνται στα γεωλογικά -γεωτεχνικά προφίλ υπολογίστηκαν με βάση τα ευρήματα από τις γεωτρήσεις και από την στρωματογραφική δομή.

Είναι πιθανό κατά την διάρκεια της κατασκευής της σήραγγας, οι θέσεις των σχηματισμών να διαφοροποιούνται από την πρόβλεψη, εξαιτίας του χαοτικού γεωλογικού προφίλ. Το γεωλογικό και γεωτεχνικό προφίλ αποτελεί μόνο μια προσέγγιση από αυτά που αναμένεται να βρεθούν κατά τη διάρκεια της κατασκευής.

Στην τελευταία χρονικά φάση της μελέτης, εκτελέστηκαν έξι νέες γεωτρήσεις, οι οποίες έχουν ονομαστεί CB1, CB2, CB3, CB4, CB5 και CB6. Όλες αυτές έχουν συμπληρωθεί και περιλαμβάνονται στα γεωλογικά – γεωτεχνικά προφίλ του μελετητή. Σε κάποιες από αυτές (CB3, CB4, CB5, CB6) έχει γίνει και γεωφυσική έρευνα.

Αυτές οι δοκιμές δίνουν πληροφορίες σχετικά με τα ρήγματα και τον προσανατολισμό των διαβρωμένων ζωνών, προσανατολισμό των πυρήνων των γεωτρήσεων πυρήνα σε σχέση με τις διευθύνσεις βορράς, νότος, ανατολή, δύση και το χρόνο διάδοσης των ακουστικών κυμάτων, και τρισδιάστατες αναπαραστάσεις από τους πυρήνες των γεωτρήσεων.

Μέσω του γεωλογικού – γεωτεχνικού προφίλ 20 τμήματα προσδιορίστηκαν σε σχέση με τη λιθολογία και τα υπερκείμενα τους, όπως φαίνεται στον πίνακα.

Stretch	Lithology	Right branch			Left branch		
		Chainage	Length (m)	Maximum overburden (m)	Chainage	Length (m)	Maximum overburden (m)
0	Dolerites (at entrance portal)	26+822,5 – 26+834,5	12	-	26+832 – 26+844	12	-
1	Dolerites	26+834,5 - 27+027	192,5	50	26+844 – 27+018	174	58
2	Shales-cherts	27+027 - 27+100	73	64	27+018 – 27+072	54	71
3	Dolerites	27+100 - 27+200	100	68	27+072 – 27+180	108	86
4	Shales-cherts	27+200 - 27+265	65	84	27+180 – 27+256	76	98
5	Intercalations of dolerites with shales-cherts	27+265 - 27+293	28	85	27+256 – 27+285	29	102

Stretch	Lithology	Right branch			Left branch		
		Chainage	Length (m)	Maximum overburden (m)	Chainage	Length (m)	Maximum overburden (m)
6	Dolerites	27+293 - 27+427	134	108	27+285 – 27+438	153	120
7	Intercalations of dolerites with shales-cherts	27+427 - 27+467	40	118	27+438 – 27+522	84	150
8	Shales-cherts	27+467 - 27+565	98	138	27+522 – 27+571	49	157
9	Fault	27+565 - 27+583	18	139	27+571 – 27+588	17	155
10	Dolerites	27+583 - 27+723	140	142	27+588 – 27+730	142	157
11	Intercalations of dolerites with shales-cherts	27+723 - 27+738	15	142	-	-	-
12	Fault	27+738 - 27+748	10	144	27+730 – 27+738	8	160
13	Shales-cherts	27+748 - 27+774	26	148	27+738 – 27+773	35	163
14	Dolerites	27+774 - 27+924	150	204	27+773 – 27+921	148	196
15	Shales-cherts	27+924 - 27+992	68	218	27+921 – 27+995	74	227
16	Intercalations of dolerites with shales-cherts	27+992 – 28+020	28	222	27+995 – 28+037	42	227
17	Dolerites	28+020 – 28+224	204	262	28+037 – 28+231	194	257
18	Intercalations of dolerites with shales-cherts	28+224 – 28+254	30	265	28+231 – 28+267	36	262
19	Fault	28+254 – 28+282	28	270	28+267 – 28+293	26	263
20	Dolerites	28+282 – 28+327	45	277	28+293 – 28+363	70	264

Πίνακας 1. Σημαντικές διατομές σε σχέση με τη λιθολογία και τα υπερκείμενα

2.4. Υδρογεωλογία

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έχουν εκτιμηθεί από το επίπεδο του νερού στις γεωτρήσεις, όπως επίσης και από τις δοκιμές διαπερατότητας όπως Lugeon και Maag.

Στην νέα έρευνα των γεωτρήσεων τα επίπεδα της στάθμης του νερού που μετρήθηκαν το πρωί και το απόγευμα, ποικίλουν σε μικρή χρονική περίοδο.

Αυτό δείχνει καθαρά ότι επηρεάζονται από το νερό που χρησιμοποιείται κατά της διάτρηση. Έτσι δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν πραγματικά επίπεδα στάθμης.

Επίσης, τα επίπεδα νερού μέσα στις γεωτρήσεις ενδέχεται να εξαρτώνται από την εποχή ή από τις βροχοπτώσεις.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν στις πρώτες τρεις γεωτρήσεις, όπου βρέθηκε επίπεδο νερού.

Αυτές οι γεωτρήσεις βρίσκονται στο νότιο τμήμα (κομμάτι της DRAGADOS). Έτσι είναι πιθανόν να μην βρεθεί κάποιο πρόβλημα σχετιζόμενο με νερό μέσα στην βραχομάζα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας δείχνουν ότι οι εξεταζόμενες λιθολογίες εμφανίζουν πολύ μικρές τιμές διαπερατότητας. Παρόλαυτα, αυτές οι διαπερατότητες θα μπορούσα να είναι υψηλότερες όπου η βραχομάζα εμφανίζεται κερματισμένη σε ρωγματωμένες περιοχές.

Σε μια γεώτρηση εντοπίστηκε αρτεσιανή ροή που εκτιμήθηκε ότι οφείλεται σε ένα επίπεδο δολερίτη περιορισμένο ανάμεσα στους σχιστολίθους. Σε άλλες γεωτρήσεις εμφανίζεται νερό, πάντα σχετιζόμενο με τους δολερίτες ή εναλλαγές δολεριτών με σχιστόλιθους.

Επομένως, οι δολερίτες μπορεί να δείξουν μια δευτερογενή διαπερατότητα, σχετιζόμενη με το βαθμό κερματισμού, το οποίο σημαίνει ότι οι ασυνέχειες επιτρέπουν τη ροή του νερού στη βραχομάζα ενώ οι σχιστοκερατόλιθοι λόγω των περισσότερων αργιλικών, δείχνουν χαμηλή διαπερατότητα.

Η αντίθεση μεταξύ της διαπερατότητας του δολερίτη και του σχιστολίθου σε συνδιασμό με την πολύπλοκη γεωλογική δομή της βραχομάζας, θα μπορούσε να κάνει ευκολότερη την παρουσία του νερού σε διάφορους ορίζοντες.

Αυτοί οι ορίζοντες θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστάθειες στο μέτωπο της εκσκαφής. Προκειμένου να αποφευχθεί κάποια επείγουσα κατάσταση, προβλέπεται η όρυξη ερευνητικών διατρήσεων στο μέτωπο.

Οι περιοχές με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης νερού αντιστοιχούν στην επαφή μεταξύ δύο σχηματισμών, με διαφορετικές τιμές διαπερατότητας.

Όταν εντοπιστεί μια σημαντική ροή νερού, συνίσταται η πραγματοποίηση στραγγιστικών διατρήσεων στο μέτωπο.

Αυτό περιορίζει σημαντικά την ροή του νερού, δίχως να επηρεαστεί η ευστάθεια.

Η αυξανόμενη κλίση της σήραγγας προς το στόμιο, επιτρέπει ουσιαστικά την αποστράγγιση του νερού μέσω της βαρύτητας.

2.5. Γεωτεχνικά

2.5.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της περιοχής πραγματοποιήθηκαν ορισμένες έρευνες.

Αυτές ήταν :

- Η πρώτη έγινε από την ΚΑΣΤΟΡ , τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ και της GEOCONSULTANTS Ltd, όπου έγιναν οι γεωτρήσεις ΣΑ3 , Σ4 , ΝΣ4 , Σ5 και ΣΑ6.
- Η δεύτερη από την ΙΣΤΡΙΑ , όπου έγιναν οι γεωτρήσεις G1S2n και G2S2
- Η τρίτη από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ το 2008, με τις γεωτρήσεις B2-1, B2-2, B2-3, B2-4 και B2-5. Η συγκεκριμένη έρευνα βασίζεται στον σχεδιασμό της σήραγγας που είναι περίπου 200 μέτρα ανατολικά από την τωρινή θέση.
- Η τέταρτη πραγματοποιήθηκε και αυτή από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ το 2008, όπου και έγιναν οι γεωτρήσεις B2O-1, B2O-2, B2O-3, B2O-4, B2O-5, B2O-6, B2O-7 και B2O-8.
- Η πέμπτη έρευνα έγινε και αυτή από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ για λογαριασμό της DRAGADOS το 2009. Στη φάση αυτή έγιναν 6 γεωτρήσεις, με ονομασίες CB-1, CB-2, CB-3, CB-4 και CB-5.

2.5.2. Γενικές παρατηρήσεις

Σύμφωνα με τα λιθολογικά στοιχεία που βρέθηκαν από τη γεωλογική έρευνα , ο μελετητής (INTESCA) πρότεινε πέντε γεωτεχνικές ενότητες :

- 1) WM : μανδύας αποσάθρωσης
- 2) Sh : σχιστοκερατόλιθοι
- 3) Sch – Do : ενστρώσεις από δολερίτες και σχιστοκερατολίθους
- 4) Do : δολερίτες, περιδοτίτες, γάββροι, βασσάλτες και λάβες
- 5) F : ρήγματα. Παρόλο που δεν βρέθηκαν από τις γεωτρήσεις προβλέφθηκαν στην γεωτεχνική μελέτη.

Τα στοιχεία αυτά ουσιαστικά σχετίζονται άμεσα με την υποστήριξη που απαιτείται. Προκειμένου να αντιστοιχηθεί η υποστήριξη σε κάθε περίπτωση, είναι ουσιώδες να εξαχθούν οι υπολογιστικές παράμετροι. Έτσι , είναι απαραίτητο να χαρακτηριστούν τιμές όπως της μονοαξονικής θλίψης, η αντοχή της βραχομάζας, τα δεδομένα από το GSI, παράμετροι από το κριτήριο Hoek – Brown, δείκτη Q κλπ.

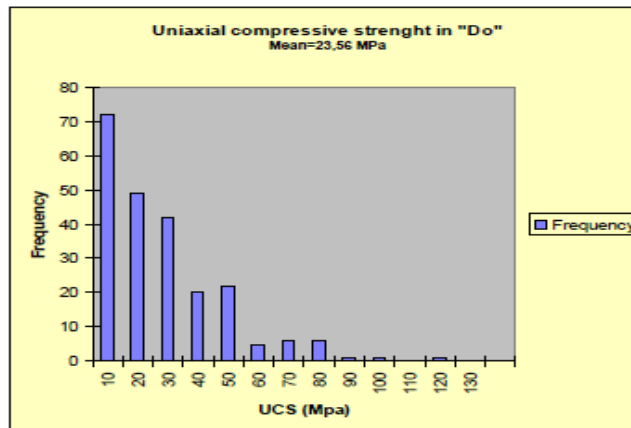
Το ότι παρουσιάζεται σύνθετη γεωλογία στην περιοχή, με πετρώματα χαοτικά ανεμιγμένα, τα οποία είναι ισχυρά τεκτονισμένα , σημαίνει ότι οι γεωτεχνικές ιδιότητες διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή.

2.6. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci})

Προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια που ελήφθησαν από τους πυρήνες γεωτρήσεων.

Do

225 δοκιμές UCS έγιναν σε δείγματα που αντιστοιχούν σε δολερίτες. Στο σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα σε ιστόγραμμα καθώς και η μέση τιμή τους.

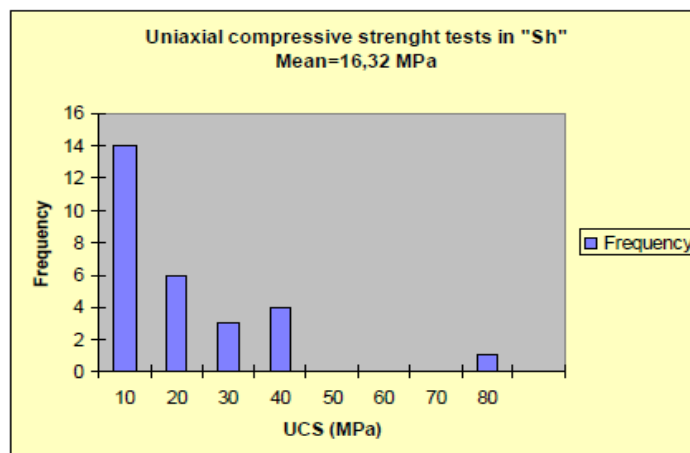


Διάγραμμα 1 . Ιστόγραμμα από δοκιμή UCS σε δολερίτη

Sh

28 δοκιμές UCS έγιναν σε δείγματα που αντιστοιχούν σε σχιστόλιθους. Τα αποτελέσματα έχουν ένα μεγάλο εύρος που κυμαίνεται από 1,4 MPa μέχρι 78,2 MPa.

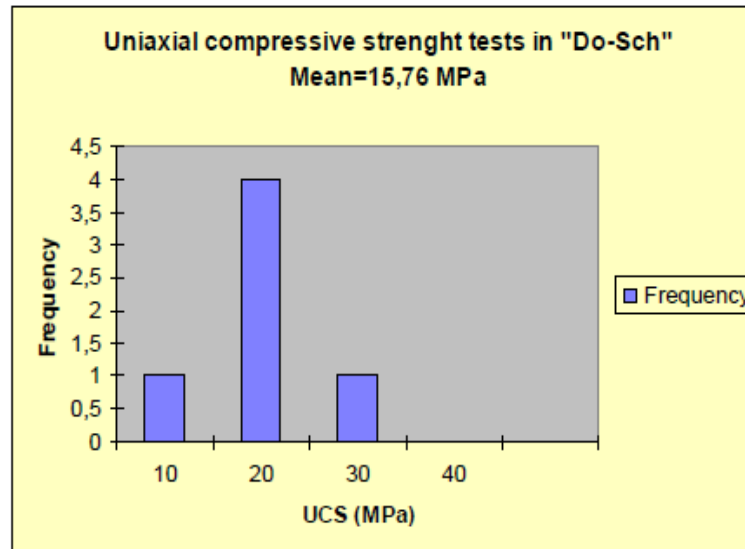
Σύμφωνα με το μελετητή τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές του σχιστολίθου θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν μια ενδιάμεση κατάσταση, ανάμεσα σε άρρηκτο πέτρωμα και βραχομάζα.



Διάγραμμα 2 . Ιστόγραμμα από δοκιμή UCS σε σχιστόλιθο

Sch-D

Μόνο 6 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έγιναν για τον προσδιορισμό της αντοχής των δολερίτων – σχιστοκερατολίθων



Διάγραμμα 3 . Ιστόγραμμα από δοκιμή UCS σε σχιστοκερατόλιθο

Συνοψίζοντας, οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη που εκτιμήθηκαν από τον μελετητή δίνονται στον πίνακα. Για την κατηγορία των ρηγμάτων εκτιμήθηκε $\sigma_{ci} = 10\text{MPa}$.

Geotechnical Unit	Lithology	Adopted Value σ_{ci} (MPa)
Sh	Shales-chert	15
Sch-Do	Alternation of shales-chert with dolerites	16
Do	Dolerites, basalts and lavas	24

Πίνακας 2. Τιμές από τη δοκιμή UCS

2.6.1. Υπολογισμός του m_i

Η συγκεκριμένη παράμετρος, βασική για το κριτήριο Hoek – Brown, προκύπτει εργαστηριακά από δοκιμές τριαξονικής θλίψης. Κατά το τελευταίο στάδιο των γεωτεχνικών ερευνών (CB-1 – CB-6) πραγματοποιήθηκαν τριαξονικές δοκιμές για να εκτιμηθεί το m_i . Αυτές περιλάμβαναν 20 δοκίμια δολερίτων και 5 δοκίμια σχιστοκερατολίθων.

Τα αποτελέσματα των δολερίτων δείχνουν υψηλή τιμή του m_i , μολονότι δεν μπορούμε να τα θεωρήσουμε πλήρως αξιόπιστα.

Αναφορικά με τις δοκιμές σε σχιστόλιθους, παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα κατά την ετοιμασία των δειγμάτων. Από τα 5 δοκίμια μόνο από το ένα μπόρεσε ο μελετητής να πάρει αποτελέσματα, σημειώνοντας ωστόσο ότι και πάλι δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα.

Οι τιμές που προτείνει ο μελετητής για το m_i των διαφόρων γεωτεχνικών ενοτήτων δίνονται στον πίνακα.

Geotechnical unit	Lithology	m_i bibliography	% estimate of each lithology	m_i estimate for the project
Sh	Shales	6±2	90	8
	Cherts	20±3	10	
Sch-Do	Shales	6±2	20	16
	Cherts	20±3	5	
	Dolerites	16±5	50	
	Basalts	25±5	10	
Geotechnical unit	Lithology	m_i bibliography	% estimate of each lithology	m_i estimate for the project
	Pillow lavas	25±5	5	
	Peridotites	25±5	10	
Do	Dolerites	16±5	75	18
	Basalts	25±5	10	
	Pillow lavas	25±5	5	
	Peridotites	25±5	10	

Πίνακας 3. Εκτίμηση του συντελεστή m_i

2.6.2. Προσδιορισμός GSI

Do

Στην ανάλυση περιλαμβάνεται σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών του GSI, κατά μήκος της κάθε γεώτρησης.

Από τις μετρήσεις αντλήθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Δεν έχουμε τιμή του GSI < 30 για δολερίτες
- Το 76,6% των δοκιμών έχουν GSI > 40

Μπορούμε να πούμε γενικά ότι οι δολερίτες παίρνουν τιμές GSI ανάμεσα στο 45 και το 55

Sch-Do

Στην συγκεκριμένη περίπτωση το GSI παίρνει τιμές από 20 έως 60. Στο 33% των περιπτώσεων η τιμή του GSI κυμάνθηκε από 20 ως 40 , ενώ το υπόλοιπο 67% ανάμεσα σε 40 και 60. Η μέση τιμή βρέθηκε περίπου στο 42,7.

Επομένως θεωρήθηκαν από τον μελετητή τιμή GSI μεταξύ του 40 και του 50.

Sh

Σύμφωνα με τις μετρήσεις οι περισσότερες τιμές του GSI , σε ποσοστό 58,5%, κυμάνθηκαν μεταξύ 20 και 40. Μόνο το 1,9% των δειγμάτων είχε χαμηλότερη τιμή GSI από 20 , ενώ το υπόλοιπο 39,6% είχε τιμή μεγαλύτερη από 40. Η μέση τιμή είναι 35,27. Συνεπώς θεωρούμε GSI μεταξύ 30 και 40.

Θα πρέπει να επισημανθεί πως οι προτεινόμενες τιμές του GSI παίζουν σημαντικό ρόλο για τον τρόπο και τη μέθοδο υποστήριξης.

Επίσης, κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενδέχεται οι παραπάνω τιμές να διαφοροποιηθούν.

Geotechnical unit	Estimated GSI
Sh	30-40
Sch-Do	40-50
Do	45-55
F	20-30

Πίνακας 4. τιμές GSI από τις γεωτρήσεις

Το σύστημα ταξινόμησης Q είναι γνωστό και σαν Ταξινόμηση του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI –Norwegian Geotechnical Institute). Αποτελεί σήμερα το

λεπτομερέστερο σε θεώρηση και πολυπληθέστερο σε πληροφορίες σύστημα ταξινόμησης της βραχομάζας. Βασίζεται σε παρατηρήσεις πεδίου που συγκεντρώθηκαν από μεγάλο αριθμό υπόγειων έργων που υλοποιήθηκαν σε διάφορους τύπους πετρωμάτων. Στα υπόγεια αυτά έργα περιλαμβάνονται σήραγγες διαφόρων διαμέτρων και μεγάλα υπόγεια ανοίγματα διαστάσεων 25-30m.

Οι αριθμητικές τιμές του δείκτη Q κυμαίνονται σε λογαριθμική κλίμακα από 0.001 έως 1000. Ο δείκτης Q αποτελεί συνάρτηση έξι παραμέτρων και προσδιορίζεται από την εξίσωση :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

Όπου

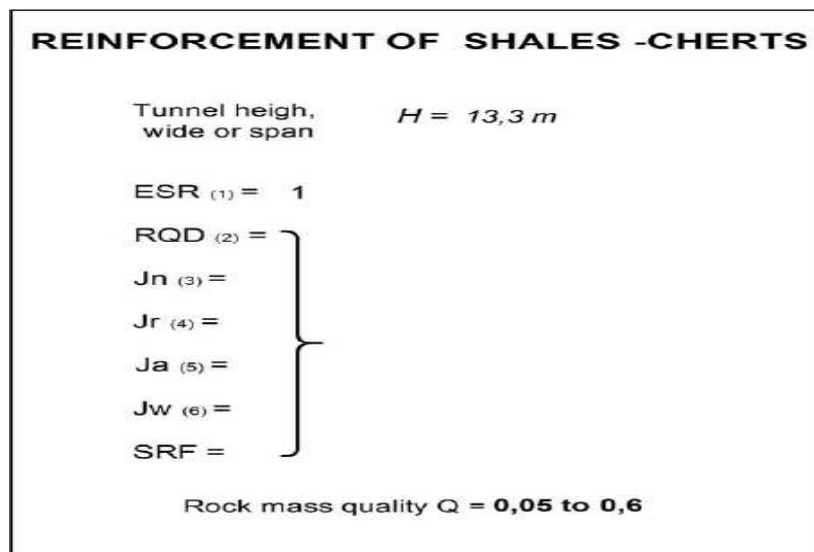
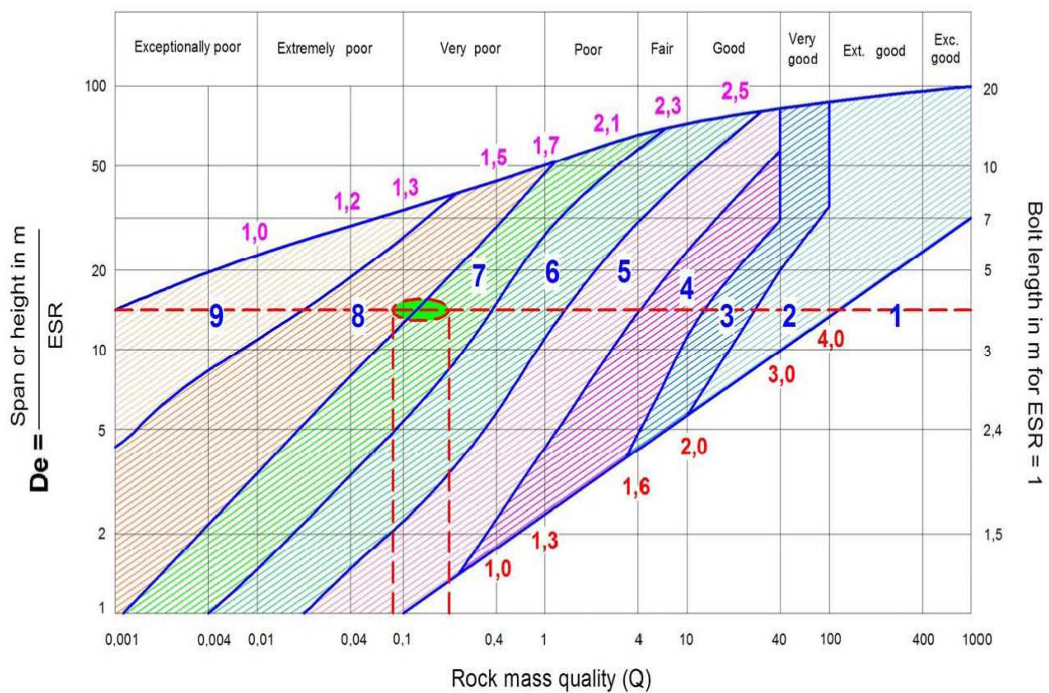
- RQD : δείκτης ποιότητας πετρώματος και ποιότητα βραχομάζας
- J_r , J_n : βαθμολογία της τραχύτητας και της εξαλλοίωσης των τοιχωμάτων των διακλάσεων
- J_w : βαθμολογία της εισροής – πίεσης νερού
- J_a : βαθμολογία για το πλήθος των διακλάσεων
- SRF : βαθμολογία της επίδρασης ρηξιγενών ζωνών

Για την ενίσχυση του UG-5 (ρήγματα) θεωρήσαμε $ESR = 1$, και αφού προσδιορίσαμε τα RQD, J_a , J_n , J_w , J_t και SRF πήραμε τιμή $Q = 0,07 - 0,02$.

Για να εξασφαλιστεί η κατάλληλη υποστήριξη θα πρέπει :

- Κάθε πέτρωμα να χαρακτηρίζεται από ένα D_e
- Κάθε πέτρωμα να έχει ένα εύρος τιμών Q και GSI
- Παίρνουμε το εύρος Q από τις γεωτρήσεις, το οποίο είναι ευρύτερο
- Φέρνοντας γραμμή από το Q και το D_e θα προσδιορίσουμε τον τύπο υποστήριξης

Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα σύμφωνα με το οποίο το πέτρωμα μας ανήκει στις κατηγορίες 7 και 8.



Διάγραμμα 4. Προσδιορισμός ης τιμής Q

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζουμε το Q και των υπόλοιπων σχηματισμών

- Οι σχιστόλιθοι εμφανίζουν $Q = 0,05-0,6$ και επομένως ανήκουν στην κατηγορία 6-8
- Ο σχηματισμός από σχιστόλιθους - δολερίτες εμφανίζει $Q = 0,1-3$ και ανήκουν στην κατηγορία 5-7
- Οι δολερίτες έχουν $Q = 0,2-10$, και ανήκουν στην κατηγορία 4-7

2.6.3. Προτεινόμενη υποστήριξη με βάση το Q

Σύμφωνα με τους GRIMSTADT and BARTON οι προτεινόμενοι τύποι υποστήριξης είναι οι εξής :

ΤΥΠΟΣ 1 : 5 εκατοστά εκτοξευόμενου σκυροδέματος (UCS=30MPa) με χαλύβδινες ίνες, αγκύρια \varnothing 25, 4,5 μέτρα μήκος σε κάρναβο διαστάσεων 2x2m και 10cm σκυρόδεμα (UCS=30MPa) με 30 Kg/m³ από χαλύβδινες ίνες.

ΤΥΠΟΣ 2 : 5 εκατοστά εκτοξευόμενου σκυροδέματος (UCS=30MPa) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, αγκύρια \varnothing 25, 4,5 μέτρα μήκος σε κάρναβο διαστάσεων 1,5x1,5m και 10cm σκυρόδεμα (UCS=30MPa) με 30 Kg/m³ από χαλύβδινες ίνες.

ΤΥΠΟΣ 3 : 5 εκατοστά εκτοξευόμενου σκυροδέματος (UCS=30MPa) με χαλύβδινες ίνες, αγκύρια \varnothing 25, 4,5 μέτρα μήκος σε κάρναβο διαστάσεων 1x1m και 10cm σκυρόδεμα (UCS=30MPa) με 30 Kg/m³ από χαλύβδινες ίνες.

ΤΥΠΟΣ 4 : 5 εκατοστά εκτοξευόμενου σκυροδέματος (UCS=30MPa) με χαλύβδινες ίνες, χαλύβδινες ράβδους ανά μέτρο και 25 cm σκυροδέματος (UCS=30MPa) με χαλύβδινες ίνες. Προσωρινό ανάστροφο τόξο στο δάπεδο της Α φάσης με πάχος 30 cm. Αν απαιτούνται προστίθενται μικροπάσσαλοι σαν υποστήριξη.

ΤΥΠΟΣ 4R : είναι ο ίδιος με τον τύπο 4 αλλά με διατηρητικά αγκύρια στην άνω ημιδιατομή και στην αναβαθμίδα. Αυτά τα μέτρα αποτελούν την αρχή της υποστήριξης που θα ακολουθήσει σύμφωνα με τα αποτελέσματα του FLAC_{3D}. Όπως φαίνεται βασίζονται στην αύξηση του πάχους του σκυροδέματος, προσθέτοντας αν είναι απαραίτητο αγκύρια ή πασσάλους.

2.6.4 Διατομές για αριθμητική ανάλυση κατά τη μελέτη

Πίνακας 5. Τεχνικά χαρακτηριστικά γεωλογικών σχηματισμών με ανάλυση FLAC

<i>ΤΜΗΜΑ</i>	<i>ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ</i>	<i>ΜΕΓΙΣΤΟ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΟ</i>	<i>GSI</i>	<i>ΥΠΕΡ ΚΕΙΜΕΝΟ</i>	<i>Em (MPa)</i>	<i>C (MPa)</i>	<i>Φ (ο)</i>	<i>ν</i>
0	Δολερίτες στην είσοδο	-	-	-	1075	0,174	53,7	0,3
1	Δολερίτες	50	50	50	2150	0,353	53,03	0,3
2	Σχιστοκερατόλιθοι	64	35	76	567	0,217	35,36	0,35
3	Δολερίτες	68	50	100	2150	0,526	48,09	0,3
4	Σχιστοκερατόλιθοι	84	35	140	567	0,314	30,71	0,35
5	Δολερίτες με σχιστοκερατόλιθους	85	45	118	1230	0,432	41,58	0,3
6	Δολερίτες	108	50	157	2150	0,704	44,99	0,3
7	Δολερίτες με σχιστοκερατόλιθους	118	45	118	1230	0,432	41,58	0,3
8	Σχιστοκερατόλιθοι	138	35	140	567	0,314	30,71	0,35
9	Ρήγμα	139	25	184	251	0,276	24,50	0,35
10	Δολερίτες	142	50	157	2150	0,704	44,99	0,3
11	Δολερίτες με σχιστοκερατόλιθους	142	45	154	1230	0,51	39,49	0,3
12	Ρήγμα	144	25	184	251	0,276	24,5	0,35
13	Σχιστοκερατόλιθοι	148	35	218	567	0,411	27,44	0,35
14	Δολερίτες	204	50	207	2150	0,822	42,53	0,3
15	Σχιστοκερατόλιθοι	218	35	218	567	0,411	27,44	0,35
16	Δολερίτες με σχιστοκερατόλιθους	222	45	265	1230	0,718	35,2	0,3
17	Δολερίτες	262	50	207	2150	0,986	40,24	0,3
18	Δολερίτες με σχιστοκερατόλιθους	265	45	265	1230	0,718	35,2	0,3
19	Ρήγμα	270	25	270	251	0,349	21,99	0,35
20	δολερίτες	277	50	277	2150	0,986	40,24	0,3

2.7. Τύποι υποστήριξης της σήραγγας

Εκτιμήθηκαν πέντε τύποι υποστήριξης από το δείκτη Q και τροποποιήθηκαν με βάση τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι κάποιος από αυτούς προέρχονται από προηγούμενους τύπους σε μια προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι μετακινήσεις και οι τάσεις.

1) Υποστήριξη ST-1

Μέθοδος Εκσκαφής

Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με εκρηκτικά μέσα, αποφεύγοντας όσο γίνεται τη διατάραξη του περιβάλλοντος πετρώματος. Η διατομή χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής :

Άνω ημιδιατομή (μέχρι +1,73 μέτρο από την ερυθρά). Η εκσκαφή της βαθμίδας συνήθως χωρίζεται σε δύο φάσεις : Φάση 1 και Φάση 2. Οι δύο φάσεις έχουν 16 μέτρα μήκος η απόσταση άνω ημιδιατομής και βαθμίδας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 50 μέτρα. Μια άλλη περίπτωση είναι να εκσκαφθεί πρώτα όλη η άνω ημιδιατομή σε όλο το μήκος της σήραγγας και στη συνέχεια η βαθμίδα.

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- 5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +αγκύρια πλήρους πάκτωσης (Ø=25 mm,σε κάνναβο 3 mT x 2 mL και 4.5 m μήκος).

Βήματα Εκσκαφής

Άνω ημιδιατομή : 2 μέτρα προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (με ίνες) και συστηματική τοποθέτηση αγκυριών
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (με ίνες)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (χωρίς ίνες)
- Εφαρμογή των στοιχείων υποστήριξης στο μέτωπο
- Συστηματική διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών, σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού
- Μη συστηματική διάνοιξη αποστραγγιστικών οπών στην περιφέρεια της σήραγγας, σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού στο κέλυφος του εκτοξευόμενου

Βαθμίδα : 4 μέτρα προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή των δύο φάσεων σε απόσταση 16 μέτρων μεταξύ τους
- Ίδια υποστήριξη με το άνω τμήμα

Εφαρμογή των στοιχείων υποστήριξης στο μπροστινό μέρος. Τοποθέτηση σκυροδέματος στον πυθμένα : 1 βήμα προχώρησης από την βαθμίδα (4 μέτρα), ολοκληρώνεται ανά 5 βήματα προχώρησης.

2) Υποστήριξη ST-2

Μέθοδος Εκσκαφής

Στην περίπτωση των δολεριτών ή των δολεριτών αναμειγμένους με σχιστοκερατόλιθους η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με εκρηκτικά, αποφεύγοντας όσο γίνεται τη διατάραξη του περιβάλλοντος πετρώματος.

Στην περίπτωση των σχιστοκερατόλιθων η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής:

- 1) Άνω ημιδιατομή (μέχρι και +1,73 πάνω από την ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα (- 1,79 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες απέχουν 15 μέτρα. Η απόσταση της άνω ημιδιατομής από την βαθμίδα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 28,5 μέτρα. Σύμφωνα με τις αναλύσεις του

μελετητή η απόσταση αντιπροσωπεύει το ελάχιστο για την σταθεροποίηση των συγκλίσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής του άνω τμήματος

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- 5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +αγκύρια πλήρους πάκτωσης (Ø=25 mm, κάρναβος 1.5 mT x 1.5 mL και 4.5 m μήκος).

Βήματα Εκσκαφής

Άνω ημιδιατομή : 1,5 μέτρο ανά βήμα προχώρησης

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (με ίνες) και συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 10 cm (με ίνες)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (χωρίς ίνες)
- Εφαρμογή των στοιχείων υποστήριξης στο μπροστινό μέρος
- Συστηματική τοποθέτηση αποστραγγιστικών οπών, σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού
- Τοποθέτηση οπών για αποχέτευση, σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού στο κέλυφος του εκτοξευόμενου

Βαθμίδα : 3 μέτρα προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή των δύο φάσεων σε απόσταση 15 μέτρων μεταξύ τους
- Ίδια υποστήριξη με το άνω τμήμα

Εφαρμογή των στοιχείων υποστήριξης στο μπροστινό μέρος. Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στον πυθμένα: 2 βήματα προχώρησης από την βαθμίδα (6 μέτρα), ολοκλήρωση ανά 5 βήματα προχώρησης.

3) Υποστήριξη ST-3

Μέθοδος Εκσκαφής

Στην περίπτωση των δολεριτών ή των δοεριτών αναμειγμένους με σχιστοκερατόλιθους η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με εκρηκτικά μέσα, αποφεύγοντας όσο γίνεται τη διατάραξη του περιβάλλοντος πετρώματος.

Στην περίπτωση των σχιστοκερατολίθων η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής :

- 1) Άνω ημιδιατομή (μέχρι και +1,73 πάνω από ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα (-1,79 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες απέχουν 16 μέτρα. Η απόσταση της άνω ημιδιατομής με την βαθμίδα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 25 μέτρα. Σύμφωνα με την ανάλυση από FLAC_{3D} η απόσταση αντιπροσωπεύει το ελάχιστο για την σταθεροποίηση των συγκλίσεων κατά τη διάρκεια εκσκαφής του άνω τμήματος.

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- 5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37 με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37 χωρίς χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +αγκύρια (Ø=25 mm, πλέγμα 1.5 mT x 1.5 mL and 4.5 m μήκος).
- + Elephant foot και χαλύβδινα πλαίσια HEB120 (1/m)
- +ζευγάρι αγγυρίων , χαλύβδινες ράβδοι Ø=25 mm and 4.5 m μήκος

Βήματα Εκσκαφής

Άνω ημιδιατομή : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 5 cm (με ίνες) πίσω από το μπροστινό μέρος της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων (χαλύβδινες ράβδοι $\varnothing=25$ mm και 4.5 m μήκος) + Elephant foot , ένα σε κάθε πλευρά, και χαλύβδινα πλαίσια HEB120 (ένα ανά βήμα).
- Συστηματική τοποθέτηση ζεύγους αγκυρίων για στερέωση των χαλύβδινων πλαισίων. Σε κάθε μεριά 2 βήματα εκσκαφής από το μέτωπο.
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος σκυροδέματος, πάχους 10 cm (με ίνες) 3 βήματα προχώρησης από μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος σκυροδέματος, πάχους 5 cm (με ίνες) 4 βήματα προχώρησης από μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος σκυροδέματος, πάχους 5 cm (με ίνες) 5 βήματα προχώρησης από μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική εγκατάσταση οπών αποστράγγισης, σε περίπτωση έντονης παρουσίας νερού
- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών, σε περίπτωση έντονης παρουσίας νερού στο στρώμα του σκυροδέματος

Βαθμίδα : 2 μέτρα προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή των δύο φάσεων σε απόσταση 16 μέτρων μεταξύ τους
- Στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 20 cm (C30/37 με 30kg/m^3 χαλύβδινες ίνες) και στρώμα σκυροδέματος πάχους 5 cm (C30/37 χωρίς χαλύβδινες ίνες) και αγκύρια (χαλύβδινες ράβδοι διαμέτρου 25cm και 4,5 μέτρων μήκους) και χαλύβδινα πλαίσια HEB 120 (2 ανά βήμα). Στοιχεία υποστήριξης στο μπροστινό τμήμα
- Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος στον πυθμένα : 2 βήματα προχώρησης από το τέλος της βαθμίδας, ολοκληρώνονται ανά 5 μέτρα (άοπλο εκτοξευόμενο τύπου C16/20).

4) Υποστήριξη της ST-3bis (τροποποίηση της ST-3)

Μέθοδος Εκσκαφής

Στην περίπτωση των δολεριτών ανεμιγμένων με σχιστοκερατόλιθους, η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με μέθοδο ανατίναξης, αποφεύγοντας όσο το δυνατόν γίνεται τη διατάραξη του περιβάλλοντος πετρώματος.

Στην περίπτωση των σχιστοκερατόλιθων η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με βαριά μηχανικά μέσα, σε συνδυασμό με ανατίναξη αν χρειαστεί.

Η εγκάρσια διατομή χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής :

- 1) Άνω ημιδιατομή (μέχρι +1,73 μέτρα πάνω από την ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα : “φάση 1” και “φάση 2”. Το άνω τμήμα εκσκάπτεται και υποστηρίζεται ανεξάρτητα από το κάτω. Οι δυο φάσεις απέχουν μεταξύ τους 10 μέτρα μήκους. Η απόσταση άνω ημιδιατομής – βαθμίδας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 24 μέτρα. Προκειμένου να μειωθούν οι αστάθειες του μετώπου απαιτείται πυρήνας, ο οποίος αφαιρείται μερικά μέτρα πίσω.

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- 10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς χαλύβδινες ίνες, 4^η στρώση
- +αγκύρια στερέωσης πλαισίων Ø=25 mm και 4,5 μέτρα μήκος
- + Elephant foot και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (1/m)
- +εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 30cm στο δάπεδο, επίπεδη πλάκα πάνω από το δάπεδο του άνω τμήματος (C30/37) με 35kg³ χαλύβδινες ίνες).
- Προσωρινό δάπεδο, πάχους 30cm, επίπεδο δάπεδο πάνω στον πυθμένα της άνω ημιδιατομής

Βήματα εκσκαφής

Άνω τμήμα : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους 10 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής

Συστηματική τοποθέτηση από διατρητικά αγκύρια, με διάμετρο 51mm σε κάρναβο 1mTx1mL και 6 μέτρα μήκος. Ακόμη χρησιμοποιείται elephant foot (ένα σε κάθε πλευρά) και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (ένα ανά γύρο), 2 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση ζεύγους στερεωτικών αγκυρίων για τα χαλύβδινα πλαίσια (χαλύβδινες ράβδοι, διαμέτρου 25mm και 4,5 μέτρων) 2 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm με ίνες : 3 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm με ίνες 4 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής.

- Συστηματική τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm χωρίς ίνες 5 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής.

- Συστηματική τοποθέτηση προσωρινού στρώματος εκτοξευόμενου, πάχους 30cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) 3 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής, ολοκληρώνεται ανά 3 βήματα.

- Συστηματική εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο της σήραγγας, σε περίπτωση που παρατηρηθεί έντονη παρουσία νερού

- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο της σήραγγας, τοποθετημένες εκεί όπου εμφανίζεται νερό στο κέλυφος του εκτοξευόμενου. Κάτω τμήμα : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής.

A) Εναλλαγή 2 φάσεων με 10 μέτρα μήκος έκαστη

B) Στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους 25cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) και στρώμα σκυροδέματος πάχους 5 cm (C30/37 με 35kg/m³ χωρίς χαλύβδινες ίνες), διατρητικά αγκύρια με διάμετρο 51mm, κάρναβο 0,6mTx1mL και 6 μέτρα μήκος) και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (ένα ανά βήμα προχώρησης)

- Στοιχεία υποστήριξης τοποθετημένα στο μπροστινό τμήμα. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο δάπεδο : 4 βήματα προχώρησης από το τέλος της βαθμίδας

(C30/37 χωρίς χαλύβδινες ίνες), επίπεδο πάχους 25cm. Χαλύβδινες ράβδοι τοποθετούνται ανάμεσα στα πλαίσια HEB-180, ράβδοι με διάμετρο 20mm και 1,2m μήκος, κάμπτονται στα άκρα (1/1,5m)

5) Υποστήριξη ST-4

Μέθοδος Εκσκαφής

Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής:

- 1) Άνω ημιδιατομή (+ 1,73 από την ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα (-1,79 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες απέχουν 10 μέτρα μήκος. Η εκσκαφή και η υποστήριξη του κάτω τμήματος ξεκινά, μόλις τελειώσει το άνω τμήμα. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αστάθειες στο μέτωπο, απαιτείται πυρήνας πετρώματος που αφαιρείται.

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- 10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 4^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς χαλύβδινες ίνες, 5^η στρώση
- +διατηρητικά αγκύρια (Ø=30 mm, κάρναβος 2mT x 1 mL και 5 m μήκος , άνω τμήμα - κάρναβος 1mTx1mL και 6m μήκος) + υποστηρικτικοί μικροπάσσαλοι στη βάση των χαλύβδινων πλαισίων (Øexc=150 mm, Øext=114.3 mm, πυκνότητα=6.8 mm και 6m μήκος).
- + Elephant foot και στερέωση χαλύβδινων πλαισίων HEB180 (1/m)
- +ζεύγος αγκυρίων , χαλύβδινες ράβδοι Ø=25 mm και 4.5 m μήκος
- Προσωρινό δάπεδο με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες)

Βήματα εκσκαφής

Άνω ημιδιατομή : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου , πάχους 10 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (1^η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου , πάχους 5 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (2η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση διατρητικών αγκυρίων ($\varnothing=38$ mm, κάρναβος 2 mT x 1 mL και 5 m μήκος). Μικροπάσσαλοι ($\varnothing=114,3$ mm and 6m Ιμήκος - 1 ζεύγος ανά βήμα) + χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (1 ανά βήμα) + Elephant foot (1 σε κάθε πλευρά). 1 βήμα προχώρησης από το μέτωπο
- Συστηματική τοποθέτηση ζεύγους αγκυρίων, συγκράτησης πλαισίων σε κάθε πλευρά ένα βήμα προχώρησης στο μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm (με ίνες) : 4 βήματα προχώρησης από το μέτωπο
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου πάχους 10 cm (με ίνες) : 5 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου πάχους 5 cm (χωρίς ίνες) : 6 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική προσωρινή τοποθέτηση σκυροδέματος πάχους 30 cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες), 4 βήματα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής, που ολοκληρώνεται κάθε 3 βήματα προχώρησης
- Συστηματική εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο της σήραγγας αν παρατηρηθεί αυξημένη παρουσία νερού
- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο της σήραγγας, στα σημεία όπου εμφανίζεται νερό στην κυψέλη του σκυροδέματος

Βαθμίδα : 2 μέτρα προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή των δύο φάσεων , με μήκος 10 μέτρα
- Στρώμα από εκτοξευόμενο πάχους 25 cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) και στρώμα σκυροδέματος πάχους 5 cm (C30/37 χωρίς χαλύβδινες ίνες), διατρητικά αγκύρια διαμέτρου 38mm, κάρναβος 1mTx1mL και 6 μέτρα μήκος και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (2 ανά γύρο) . Στοιχεία υποστήριξης τοποθετημένα

μπροστά : 2 βήματα προχώρησης τοποθετημένα στο τέλος της βαθμίδας, ολοκληρώνονται ανά 5 μέτρα.

- Στοιχεία υποστήριξης στο μέτωπο. Χαλύβδινες ράβδοι ανάμεσα στα πλαίσια HEB180 , διαμέτρου 20 mm και μήκους 1,2 μέτρων

6) Υποστήριξη ST-4bis

Μέθοδος Εκσκαφής

Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής:

- 1) Άνω ημιδιατομή (+ 1,73 πάνω από την ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα (- 2,39 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες έχουν απόσταση 10 μέτρα μήκος. Η εκσκαφή και η υποστήριξη του κάτω τμήματος ξεκινά , μόλις τελειώσει το άνω τμήμα. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αστάθειες στο μέτωπο, χρειάζεται δημιουργία προσωρινού πυρήνα

Προσωρινά μέτρα υποστήριξης

- 10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 4^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς χαλύβδινες ίνες, 5^η στρώση
- +διατηρητικά αγκύρια (Ø=30 mm, κάνναβος 2mT x 1 mL και 5 m μήκος , άνω ημιδιατομή - κάνναβος 0,6mTx1mL και 6m μήκος) με υποστηρικτικούς

μικροπασσάλους στη βάση των χαλύβδινων πλαισίων ($\varnothing_{exc}=150$ mm, $\varnothing_{ext}=114.3$ mm, πυκνότητα=6.8 mm και 6 m μήκος)

- + Elephant foot και στερέωση χαλύβδινων πλαισίων HEB180 (1/m)
- +ζευγάρι αγκυρίων , χαλύβδινες ράβδοι $\varnothing=25$ mm και 4.5 m μήκος
- Προσωρινό δάπεδο με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες)

Βήματα εκσκαφής

Άνω ημιδιατομή: 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου , πάχους 10 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (1^η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου , πάχους 5 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (2^η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση διατηρητικών αγκυρίων ($\varnothing=38$ mm, κάρναβος 2 mT x 1 mL και 5 m μήκος). Μικροπάσσαλοι ($\varnothing=114,3$ mm και 6m μήκος - 1 ζεύγος ανά βήμα προχώρησης) + χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (1 ανά βήμα) + Elephant foot (1 σε κάθε πλευρά). 1 βήμα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση ζεύγους αγκυρίων, στερέωση πλαισίων, ένα βήμα προχώρησης από το μέτωπο της εκσκαφής. Συστηματική τοποθέτηση στρώσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm (με ίνες) : 4 βήματα προχώρησης από την εκσκαφή
- Συστηματική τοποθέτηση στρώσης εκτοξευόμενου πάχους 10 cm (με ίνες) : 5 βήματα από την εκσκαφή
- Συστηματική τοποθέτηση στρώσης εκτοξευόμενου πάχους 5 cm (χωρίς ίνες) : 6 βήματα από την εκσκαφή
- Συστηματική τοποθέτηση προσωρινού δάπεδου σκυροδέμα πάχους 30 cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες), 4 βήματα από το μέτωπο της εκσκαφής, που ολοκληρώνεται κάθε 3 βήματα προχώρησης
- Συστηματική εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο της σήραγγας αν παρατηρηθεί αυξημένη παρουσία νερού
- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο της σήραγγας, στα σημεία όπου εμφανίζεται νερό στην κυψέλη του σκυροδέματος

Βαθμίδα : 2 μέτρα προχώρησης ανα βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή των δύο φάσεων , με μήκος 10 μέτρα
- Στρώμα από εκτοξευόμενο πάχους 25 cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) και στρώμα σκυροδέματος πάχους 5 cm (C30/37 χωρίς χαλύβδινες ίνες), διατηρητικά αγκύρια διαμέτρου 38mm, κάνναβος 0,6mTx1mL και 6 μέτρα μήκος και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (ένα ανά βήμα εκσκαφής). Στοιχεία υποστήριξης τοποθετημένα μπροστά
- Στοιχεία υποστήριξης στο μπροστινό τμήμα. χαλύβδινες ράβδοι ανάμεσα στα πλαίσια HEB180 , διαμέτρου 20 mm και μήκους 1,2 μέτρων

7) Υποστήριξη ST-5

Προκύπτει από την ST-4bis όταν υπάρχουν υψηλότερα υπερκείμενα ή χειρότερες συνθήκες εκσκαφής. Αυτός ο τύπος υποστήριξης δεν αντιστοιχεί σε κάποιο τμήμα της σήραγγας, απλώς αναφέρεται σε περίπτωση που χρειαστεί. Εφαρμόζεται :

- Αν οι τύποι υποστήριξης ST-3bis, ST-4bis ή ST-4 παρουσιάσουν μεγάλες εξωθήσεις , που σημαίνει ότι οι οριζόντιες μετατοπίσεις θα ξεπερνούν το 2,5% της ακτίνας.
- Αν το μέγιστο υπερκείμενο ή οι συνθήκες εκσκαφής σε ζώνες ρηγμάτων γίνουν χειρότερα από ότι αναμενόταν. Θα μπορούσε να χρειαστεί σε ζώνες ρηγμάτων που δεν έχουν προσδιοριστεί από τις γεωτρήσεις.

Μέθοδος Εκσκαφής

Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής :

- 1) Άνω ημιδιατομή (μέχρι και +1,73 πάνω από την ερυθρά)
- 2) Βαθμίδα (- 2,39 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες απέχουν κατά 10 μέτρα μήκος. Η εκσκαφή και η υποστήριξη του κάτω τμήματος ξεκινά ,μόλις τελειώσει το άνω τμήμα..

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

- Σωλήνες προπορείας
- 10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 1^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 2^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 3^η στρώση
- +10 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες, 4^η στρώση
- +5 cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος (C30/37) χωρίς χαλύβδινες ίνες, 5^η στρώση
- +αγκύρια (Ø=38 mm, κάρναβος 2mT x 1 mL και 5 m μήκος , άνω τμήμα - κάρναβος 0,6mT x 1 mL και 6m μήκος στη βαθμίδα) με υποστηρικτικούς μικροπασσάλους στη βάση των χαλύβδινες πλαισίων (Øexc=150 mm, Øext=114.3 mm, πυκνότητα=6.8 mm and 6 m μήκος)
- + Elephant foot και χαλύβδινα πλαίσια HEB180 (1/m)
- +ζευγάρι αγγυρίων , στερέωση χαλύβδινων πλαισίων, ράβδοι Ø=25 mm και 4.5 m μήκος
- Προσωρινό δάπεδο με στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) +ανάστροφο τόξο

Βήματα εκσκαφής

Συστηματική τοποθέτηση σωλήνων προπορείας 12 μέτρων μήκους κάθε 10 βήματα προχώρησης, επικάλυψη 2m.

Άνω ημιδιατομή : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (1^η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5 cm (με ίνες). Πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (2^η στρώση)
- Συστηματική τοποθέτηση αγκυρίων, μικροπασσάλων και χαλύβδινων πλαισίων HEB180 όπως επίσης και elephant foot, ένα σε κάθε μεριά
- Συστηματική τοποθέτηση ζεύγους στερεωτικών αγκυρίων για τα πλαίσια

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου πάχους 10 cm (με ίνες), 4 βήματα από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου πάχους 10 cm (με ίνες), 5 βήματα από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος εκτοξευόμενου πάχους 5 cm (με ίνες), 6 βήματα από το μέτωπο της εκσκαφής
- Συστηματική τοποθέτηση προσωρινού δαπέδου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30 cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες), 4 βήματα από την εκσκαφή, ολοκληρώνονται ανά τρία βήματα.
- Συστηματική εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στο μέτωπο της σήραγγας, σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού.
- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο της σήραγγας, σε σημεία όπου εμφανίζεται νερό στην κυψέλη του εκτοξευόμενου.

Βαθμίδα : ένα μέτρο προχώρησης ανα βήμα εκσκαφής

- Εναλλαγή 2 φάσεων με 10 μέτρα μήκος
- Στρώμα από εκτοξευόμενο πάχους 25cm (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) και στρώση εκτοξευόμενου πάχους 5cm (C30/37 χωρίς ίνες) ,αγκύρια και χαλύβδινα πλαίσια.
- Στοιχεία υποστήριξης στο μπροστινό μέρος. Δάπεδο σκυροδέματος στον πυθμένα : 4 βήματα από την βαθμίδα, ανά 5 βήματα (C30/37 με 35kg/m³ χαλύβδινες ίνες) επίπεδο στρώμα πάχους 30cm. Χαλύβδινες ράβδοι τοποθετούνται ανάμεσα στα πλαίσια HEB180.

Δεν υπάρχουν εσοχές στις θέσης εφαρμογής της ST-5

Η εγκατάσταση αψίδας μικροπασσάλων θα πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά 10 βήματα προχώρησης, αν το απαιτούν οι συνθήκες. Γι αυτό το λόγο θα πρέπει να διανοίγονται 3 οριζόντιες διατρήσεις , 8 μέτρα μήκος, 2 μέτρα πριν την εγκατάσταση της αψίδας.

8) Υποστήριξη ST-EP (ρωματωμένοι δολερίτες στην είσοδο)

Μέθοδος Εκσκαφής

Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί με τεχνικές ανατίναξης, αποφεύγοντας όσο το δυνατόν πιο πολύ την διατάραξη του περιβάλλοντος πετρώματος. Η εκσκαφή θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας βαριά μηχανικά μέσα σε συνδυασμό με τεχνικές ανατίναξης, αν απαιτείται.

Το εγκάρσιο τμήμα χωρίζεται σε τρία στάδια εκσκαφής :

- 1) Άνω τμήμα (μέχρι και 1,73 πάνω από ερυθρά)
- 2) Κάτω τμήμα (κάτω από τα 1,79 μέτρα από την ερυθρά) που περιλαμβάνει τις φάσεις 1 και 2 οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 10 μέτρα μήκος. Η εκσκαφή και η υποστήριξη του κάτω τμήματος ξεκινά, μόλις τελειώσει το άνω τμήμα.

Μέτρα προσωρινής υποστήριξης

Πριν ξεκινήσει η εκσκαφή της σήραγγας τοποθετούνται δοκοί προπορείας για την προστασία των πρώτων μέτρων αποτελούμενο από χαλύβδινους μικροπασσάλους μήκους 14 μέτρων, με διάμετρο 150mm με χαλύβδινους σωλήνες εξ.διαμέτρου 114,3mm , εξ.διαμέτρου 100,7mm και πάχος 6,8mm, καλύπτοντας μια γωνία 120°. Τα κέντρα των σωλήνων είναι στα 0,4m και η γωνία με το οριζόντιο επίπεδο είναι 5°. Οι κεφαλές των σωλήνων είναι συγκολλημένες εξωτερικά της αψίδας, κάτι που υποστηρίζει το όλο σύστημα σωλήνων.

Στοιχεία υποστήριξης :

- 5cm εκτοξευόμενου (C30/37 με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες) 1η στρώση
- 10cm εκτοξευόμενου (C30/37 με 30kg/m³ χαλύβδινες ίνες) 2^η στρώση
- 5cm εκτοξευόμενου (C30/37 χωρίς ίνες) 3η στρώση
- Διατηρητικά αγκύρια (Ø=25 mm, κάνναβος 3 mT x 2 mL και 4.5 m μήκος)
- Χαλύβδινα πλαίσια HEB-140 ανά 1 μέτρο

Βήματα εκσκαφής

Συστηματική τοποθέτηση δοκών προπορείας από χαλύβδινους μικροπασσάλους διαμέτρου 114,3mm και μήκους 14 μέτρων.

Άνω ημιδιατομή : 1 μέτρο προχώρησης ανά βήμα εκσκαφής

- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος από εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 5 cm με ίνες και τοποθέτηση αγκυρίων καθώς επίσης και τοποθέτηση χαλύβδινων πλαισίων HEB140
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος σκυροδέματος πάχους 10cm (με ίνες)
- Συστηματική τοποθέτηση στρώματος σκυροδέματος πάχους 5cm (χωρίς ίνες)
- Εφαρμογή στοιχείων υποστήριξης στο μέτωπο
- Εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών στην περίμετρο της σήραγγας, τοποθετημένες στα σημεία όπου εμφανίζεται νερό στο κέλυφος του σκυροδέματος

Βαθμίδα : 2 μέτρα εκσκαφής ανά βήμα προχώρησης

- Εναλλαγή των 2 φάσεων , απόσταση 4 μέτρων
- Ίδια υποστήριξη με το άνω τμήμα
- Εφαρμογή της υποστήριξης στο μέτωπο

Τοποθέτηση δαπέδου σκυροδέματος στον πυθμένα : όταν ολοκληρωθούν η εκσκαφή και η υποστήριξη (ανυποστήρικτο σκυροδέμα C16/20, επίπεδη πλάκα πάχους 10cm.

Οι χαλύβδινες ράβδοι τοποθετούνται μεταξύ των πλαισίων HEB140, χαλύβδινες ράβδοι διαμέτρου 20mm και 1,2 μέτρων μήκος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η υποστήριξη ST-EP είναι όμοια με την ST-1, προσαρμοσμένη σε αποσυμπιεζόμενη ζώνη, όπου οι δολερίτες είναι συμπαγείς. Έτσι προστίθενται χαλύβδινα πλαίσια HEB140 ανά μέτρο και δεύτερο στρώμα σκυροδέματος παχύτερο κατά 5cm. Τα στοιχεία υποστήριξης τοποθετούνται κάτω από τους δοκούς προπορείας, από χαλύβδινους μικροπασσάλους. Εκεί το εγκάρσιο τμήμα ακολουθεί μια γωνία 5° .

Η πυκνότητα του σκυροδέματος παραμένει αμετάβλητη. Δεν απαιτείται εγκατάσταση αποχετευτικών οπών. Τα θραυσμένα πετρώματα επιτρέπουν τη διέλευση του νερού. Για τον συγκεκριμένο τύπο υποστήριξης δεν υπάρχουν κόγχες.

Overburden (m)	GSI			
	>50 (1)	45-49 (2)	35-44 (3)	25-34 (4)
5	ST-1 (<157m)	ST-1 (<118m)	ST-2 (<76m)	ST-4 (<184m)
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
85				
90	ST-3 (<140m)			
95				
100				
105				
110				
115	ST-2 (<154m)			
120				
125				
130				
135				
140				
145				
150				
155	ST-3bis (<218m)			
160				
165				
170				
175				
180	ST-4bis (>218m)			
185				
190				
195				
200				
205				
210				
215				
220				
225				
230				
235				
240				
245				
250				
255				
260				
265				
270				
275				
280	ST-4bis (<270m)			
>280				
5	ST-2 (<277m)	ST-3 (<265m)	ST-3bis (<218m)	ST-4bis (>218m)
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
85				
90	ST-3 (>277m)			
95				
100				
105				
110				
115	ST-3bis (>265m)			
120				
125				
130				
135				
140				
145				
150				
155	ST-3bis (>265m)			
160				
165				
170				
175				
180	ST-4bis (>218m)			
185				
190				
195				
200				
205				
210				
215				
220				
225				
230				
235				
240				
245				
250				
255				
260				
265				
270				
275				
280	ST-4bis (<270m)			
>280				
5	ST-3 (>277m)	ST-3bis (>265m)	ST-3bis (<218m)	ST-4bis (>218m)
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
85				
90	ST-3 (>277m)			
95				
100				
105				
110				
115	ST-3bis (>265m)			
120				
125				
130				
135				
140				
145				
150				
155	ST-3bis (>265m)			
160				
165				
170				
175				
180	ST-4bis (>218m)			
185				
190				
195				
200				
205				
210				
215				
220				
225				
230				
235				
240				
245				
250				
255				
260				
265				
270				
275				
280	ST-4bis (<270m)			
>280				
5	ST-3 (>277m)	ST-3bis (>265m)	ST-3bis (<218m)	ST-4bis (>218m)
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				
55				
60				
65				
70				
75				
80				
85				
90	ST-3 (>277m)			
95				
100				
105				
110				
115	ST-3bis (>265m)			
120				
125				
130				
135				
140				
145				
150				
155	ST-3bis (>265m)			
160				
165				
170				
175				
180	ST-4bis (>218m)			
185				
190				
195				
200				
205				
210				
215				
220				
225				
230				
235				
240				
245				
250				
255				
260				
265				
270				
275				
280	ST-4bis (<270m)			
>280				

Πίνακας 6. κριτήρια εφαρμογής τύπων υποστήριξης

Τα κριτήρια εφαρμογής συσχετίζονται με το μέγεθος των υπερκειμένων και την τιμή GSI της βραχομάζας. Για παράδειγμα για GSI = 40 και έχοντας υπερκείμενα 170 μέτρα ο καταλληλότερος τύπος υποστήριξης είναι ο ST-3bis.

2.8. Τεχνικές προδιαγραφές υλικού και διαδικασία υποστήριξης

- Χαλύβδινες ράβδοι διαμέτρου 20mm : ποιότητα χάλυβα B500c, χαρακτηριστική αντοχή διαρροής 500MPa ,αξονική δύναμη διαρροής 160KN. Αξονική δύναμη αστοχίας 192KN. Οι κύριες ιδιότητες αυτού του τύπου είναι :
 - 1) Χαρακτηριστική αντοχή διαρροής 500MPa
 - 2) Λόγος εφελκυστικής αντοχής προς τάση διαρροής 1,15 – 1,35
 - 3) Το μέτρο ελαστικότητας για το χάλυβα θεωρείται ίσο με 210.000MPa
- Χαλύβδινες ράβδοι διαμέτρου 25mm : ποιότητα χάλυβα B500c, χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη 500MPa, αξονικής δύναμης διαρροής 250KN. Αξονική δύναμη αστοχίας 300KN. . Οι κύριες ιδιότητες αυτού του τύπου είναι :
 - 1) Χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη 500MPa
 - 2) Λόγος εφελκυστικής αντοχής προς τάση διαρροής 1,15 – 1,35
 - 3) Το μέτρο ελαστικότητας για το χάλυβα είναι 210.000MPa
- Χαλύβδινα πλαίσια : διατομής HEB. Θερμής έλασης χαλύβδινο τμήμα, από δομικό χάλυβα S355J0. Χαρακτηριστική τάση διαρροής 355MPa. Υπολογιστική τάση διαρροής στα 309MPa. Σε συμφωνία με το DIN 17100, ποιότητα χάλυβα St 52-3.

Όσον αφορά τον συντελεστή ασφαλείας που υιοθετήθηκε για την μείωση της χαρακτηριστικής αντοχή αυτός ισούται με 1,15 για μόνιμες δράσεις (1 για τυχηματικές δράσεις)

Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 210.000MPa

- Κέλυφος εκτοξευόμενου : σκυρόδεμα τύπου C30/37. Το πάχος ανά στρώση περιορίζεται στα 10 cm. Όρια αντοχής :

$$f_{ck} \text{ (Uniaxial Characteristic Compressive Strength)} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{ct,k} \text{ (Uniaxial Characteristic Tensile Strength)} = 2,0 \text{ MPa}$$

Το μέτρο ελαστικότητας για το σκυρόδεμα C30/37 είναι $E_C = 32000\text{MPa}$ (28 μέρες)

- Σκυρόδεμα τύπου C16/20 χρησιμοποιείται σε μερικές περιπτώσεις (ST-EP, ST-1, ST-2, ST-3 and ST-LAYBY) σαν επίπεδο δάπεδο στον πυθμένα. Όρια αντοχής :

$$f_{ck} \text{ (Uniaxial Characteristic Compressive Strength)} = 16 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk} \text{ (Uniaxial Characteristic Tensile Strength)} = 1,3 \text{ MPa}$$

- Να σημειωθεί ότι στα τελευταία 5 cm σκυροδέματος, σε επαφή με την μεμβράνη στεγάνωσης, δεν επιτρέπεται η χρήση χαλύβδινων ινών για την αποφυγή καταστροφής της μεμβράνης.
- Το εκτοξευόμενο με ίνες θεωρείται σαν οπλισμένο σκυρόδεμα και ως συντελεστής ασφαλείας για προσωρινά φορτία λαμβάνεται $SF = 1,5$. Για το άοπλο σκυρόδεμα λαμβάνεται συντελεστής ασφαλείας $SF = 1,8$
- Χαλύβδινες ίνες. Χαλαρά γαντζωμένα άκρα με ίνες διαμέτρου 0,6mm και μήκους 30mm. Η αναλογία μήκους / διαμέτρου είναι 50. κατασκευασμένο από χάλυβα LHO 50/30 NB
- Αγκύρια fiberglass σε εσοχές : διάμετρος ράβδου 25mm. Πλήρως ενεματωμένη. Το φορτίο λειτουργίας είναι 250 KN. Η έσχατη αντοχή σε εφελκυσμό είναι 510KN. Το ονομαστικό βάρος είναι 1,02 kg/m και η επιμήκυνση κατά τη θραύση 2,3%.

Διατηρητικά αγκύρια με διάμετρο 38mm. Η αξονική δύναμη διαρροής είναι 400KN. 5 μέτρα μήκος στο άνω τμήμα και 6 μέτρα στο κάτω τμήμα (για τύπο υποστήριξης T-4, ST-4bis και ST-5)

- Τα αγκύρια χρησιμοποιούνται εξαιτίας της υψηλότερης φέρουσας ικανότητας, της μεθόδου διάτησης και της συνεχούς ενεματώσης, που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα των αγκυρίων, με διάμετρο 51mm. Το φορτίο που μπορεί να αντέξει είναι 630KN. 6 μέτρα μήκος (ST-3bis).
- Υποστηρικτικοί Μικροπάσσαλοι: χάλυβας με υψηλή θλιπτική αντοχή. Χαρακτηριστική τιμή της τάσης διαρροής είναι 550MPa, ενώ η υπολογιστική τάση διαρροής είναι 479MPa. Η εξωτερική διάμετρος είναι 150mm και η εσωτερική 114,3, το πάχος 6,8mm και το μήκος 6 μέτρα. Είναι για τους τύπους υποστήριξης ST-4, ST-4bis και ST-5.
- Μικροπάσσαλοι προπορείας: χάλυβας με υψηλή αντοχή διαρροής.

Υπολογιστική τάση διαρροής 479MPa (θεωρούμε συντελεστή ασφαλείας 1,15). Εξωτερική διάμετρος 150mm, εσωτερική διάμετρος 114,3mm, πάχος 6,8mm. Με τύπο υποστήριξης ST-EP 14 μέτρα μήκος. Με τύπο υποστήριξης ST-5, μήκος 12 μέτρα.

- Σε περίπτωση που έχουμε αυξημένη παρουσία νερού, τότε εγκαθίστανται αποστραγγιστικές οπές. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μια κυκλική διατομή (Φ 75mm) και στη συνέχεια εισάγονται διάτρητοι σωλήνες PVC Φ 50mm, μήκους 12 μέτρων κάθε 8 μέτρα.

- Όταν έχουμε έντονη παρουσία νερού στο κέλυφος του σκυροδέματος, τότε έχουμε και πάλι εγκατάσταση αποστραγγιστικών οπών, με σωλήνα PVC διαμέτρου 50mm, με διάμετρο εκσκαφής 75mm και μήκος 4 μέτρα.

2.9. Χρήση των αριθμητικών αποτελεσμάτων κατά την διάρκεια των εργασιών

2.9.1. Γενικά

Οι αριθμητικοί υπολογισμοί με κώδικα H/Y είναι πολύ χρήσιμοι όταν χρησιμοποιούμε τρισδιάστατο μοντέλο για τον καλύτερο έλεγχο των εργασιών.

Ο έλεγχος των συγκλίσεων είναι βασικός για την μέθοδο της NATM. Ανάμεσα στα διάφορα αποτελέσματα, οι υπολογισμοί των μετατοπίσεων είναι αυτοί που έχουν φυσική σημασία. Τα υπόλοιπα, φορτία, τάσεις είναι δύσκολο να ερμηνευθούν. Γι αυτό το λόγο επιλέχθηκε από τον μελετητή ο έλεγχος των συγκλίσεων.

2.9.2. Εφαρμογή στη σήραγγα TU.026 (Σήραγγα 2)

Σε αυτήν την περίπτωση, η πρόθεση ήταν να ελεγχθεί να ελέγξουμε την συμπεριφορά της σήραγγας με βάση τους υπολογισμούς, κάνοντας παρεμβάσεις σε σχέση με την υποστήριξη της. Σίγουρα θα χρειαστούν διάφορες τιμές για τον σωστό προσδιορισμό των παραμέτρων. Ουσιαστικά οι μετακινήσεις μπροστά από το μέτωπο μπορούν να φτάσουν και το 25-30% των συνολικών μετατοπίσεων, κάτι που σημαίνει ότι όλη η υπολογιζόμενη μετατόπιση δεν μπορεί να μετρηθεί κατά την διάρκεια των έργων.

Γι αυτό θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψιν μας δύο είδη μετατοπίσεων : αυτές που συμβαίνουν στην βραχομάζα και αυτές που αφορούν το σκυρόδεμα.

Οι πρώτες ξεκινάνε δύο με τρεις διαμέτρους πριν την εκσκαφή. Επομένως θα πρέπει να δίνεται προσοχή στις μετακινήσεις που συμβαίνουν στο θόλο, ελεγχόμενες με τοπογραφικές μεθόδους, στις συγκλίσεις και στην μεταβολή της διαμέτρου στις παρειές.

Όσον αφορά τις συνήθεις τιμές σύγκλισης οι περισσότερες προτάσεις βασίζονται πάνω σε εμπειρικές τεχνικές, κάτι που έχει να κάνει με τις διαφορετικές συμπεριφορές του εδάφους.

Τα αργιλικά υλικά εμφανίζουν πλαστική συμπεριφορά, επιτρέποντας μεγάλες παραμορφώσεις, ενώ άλλοι τύποι όπως οι γρανίτες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Στην περίπτωση της TU.026 (σήραγγα 2) ισχύουν οι εξής κανόνες :

- Η εγκατάσταση των συσκευών μέτρησης θα πρέπει να γίνεται το συντομότερο δυνατόν.
- Οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται τουλάχιστον 2-3 φορές τη μέρα, μέχρι να επιτευχθεί σταθεροποίηση. Ακόμη και αν η κίνηση τείνει να μηδενιστεί, οι μετρήσεις θα πρέπει να γίνονται τουλάχιστον μια φορά την εβδομάδα, λόγω της πιθανότητας εμφάνισης σύνθλιψης που προκαλεί μεγαλύτερα φορτία.
- Τα μέτρα θα πρέπει να αναπαρίστανται αμέσως σε διάγραμμα χρόνος – μετατόπιση για να προσδιοριστεί η εξέλιξη των μετατοπίσεων.
- Να σημειωθεί ότι η τάση εξέλιξης των μετατοπίσεων μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές, μεγαλύτερες από μερικά mm τη μέρα.
- Παρόλα αυτά η εξέλιξη των μετατοπίσεων θα πρέπει να τείνει να σταθεροποιηθεί 2-3 διαμέτρους πίσω από το μέτωπο.
- Αναφορικά με τις τιμές, είναι γενικώς αποδεκτό ότι το 1% της διαμέτρου θα πρέπει να θεωρείται σαν ανώτερο όριο. Να σημειωθεί επίσης ότι αυτή η τιμή δεν έχει τεχνική εξήγηση και θα μπορούσε να είναι υψηλότερη όπως για παράδειγμα για αργιλικά ή πλαστικά υλικά. Όπως παρατηρείται μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται σε ασθενέστερα πετρώματα, όπου και έχουμε υποστήριξη ST-3bis , ST-4, ST-4bis, ST-5, με μεγαλύτερη τιμή τα 5,94cm.

Σχετικά με τις αποφάσεις που θα πρέπει να παρθούν υπάρχουν δυο πιθανότητες :

A) να ληφθούν υπ' όψιν οι επιτρεπόμενες τιμές $10^{-2} \times D$, ελέγχοντας τα όρια της οριζόντιας σύγκλισης :

- a) σύγκλιση $> 0,5D/100$ όριο προσοχής
- b) σύγκλιση $> 0,75D/100$ όριο συναγερμού
- c) σύγκλιση $> D/100$ όριο κινδύνου
- d) σύγκλιση $> 1,25D/100$ τοποθέτηση πρόσθετων μέτρων υποστήριξης

Τα επιπρόσθετα μέτρα υποστήριξης που θα τοποθετηθούν στις τελευταίες περιπτώσεις, αυξάνονται όταν οι τιμές μετακίνησης γίνονται μεγαλύτερες από τα όρια, τα οποία βασίζονται στην εμπειρία. Να σημειωθεί ότι τα όρια, που αναφέρονται στην διάμετρο θα πρέπει να συγκριθούν με τις μετρούμενες συγκλίσεις.

Την περίπτωση όπου έχουμε διαφορετικές λιθολογίες και μέγιστα υπερκείμενα σε ένα τμήμα, ενώ το κριτήριο που προαναφέρθηκε σε σχέση με τη διάμετρο δεν μπορεί να εφαρμοσθεί διότι παρόμοιων διαστάσεων σήραγγα, δίνει σε όλες τις περιπτώσεις ίδια όρια είτε για ελαφρύτερη είτε για βαρύτερη υποστήριξη.

Β) Γι αυτό προτείνεται από τον μελετητή να γίνουν οι εκτιμήσεις με βάση τα παρακάτω όρια :

- a) $0,75 \times \max$ (μέγιστη υπολογιζόμενη τιμή) επίπεδο προσοχής
- b) $1 \times \max$ επίπεδο συναγεμμού
- c) $1,5 \times \max$ επίπεδο κινδύνου
- d) $2 \times \max$ μέτρα υποστήριξης

Αυτά τα όρια προτείνονται, από τον μελετητή με εξαίρεση την υποστήριξη ST-1 και ST-2. Σε αυτές τις περιπτώσεις όπου το FLAC_{3D} υπολογίζει μεγάλες μετατοπίσεις όσον αφορά το σκυρόδεμα. Έτσι για την στοά ο μελετητής προτείνει :

- $0,5 \times \max$ επίπεδο προσοχής
- $0,75 \times \max$ επίπεδο συναγεμμού
- $1 \times \max$ επίπεδο κινδύνου
- $1,5 \times \max$ μέτρα υποστήριξης

Αυτός ο τρόπος είναι σύμφωνα με τον μελετητή αρκετά συντηρητικός. Ακολούθως κατά την διάρκεια των εργασιών οι τιμές μπορεί να προσαρμοστούν προκειμένου να αποτυπωθεί καλύτερα η πραγματική συμπεριφορά του εδάφους.

Να σημειωθεί ότι :

- Τα όρια αυτά θα πρέπει να συγκριθούν με τα αντίστοιχα των συγκλίσεων στις παρειές και της κατακόρυφης μετακίνησης στους θόλους.
- Γενικότερα το 1% της διαμέτρου θεωρείται σαν όριο σύγκλισης
- Στην περίπτωση της ST-EP η μετρούμενη μετατόπιση είναι αρκετά μικρή. Γι αυτό ορίστηκε όριο τοποθέτησης πρόσθετων μέτρων υποστήριξης στα 0,3cm.

- Επιπρόσθετα μέτρα υποστήριξης θα πρέπει να παρθούν όταν οι τιμές μετατόπισης υπερβούν τα επιτρεπτά όρια. Βασιζόμενοι στην εμπειρία και σύμφωνα με τους υπολογισμούς, μπορούμε να πούμε ότι αυτό παρατηρείται στο χαμηλότερο τμήμα των παρειών, σε βαρύτερη υποστήριξη.
- Σύμφωνα με το FLAC_{3D} η κατακόρυφη μετατόπιση του τύπου ST-4bis στην βαθμίδα είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη στην άνω ημιδιατομή. Στην συνέχεια τα όρια για την κατακόρυφη μετατόπιση στο θόλο είναι μικρότερα σε σχέση με αυτά της άνω βαθμίδας. Συνεπώς τα όρια αυξάνονται κατά 0,4cm.

2.9.3. Πρόσθετα μέτρα υποστήριξης

1) ST-EP

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές σύγκλισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές της κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, 6.0 m Ιμήκος, σε κάναβο 1x1 m

2) ST-1

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές σύγκλισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, 6.0 m Ιμήκος, grid 1x1 m

3) ST-2

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές σύγκλισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές της κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, 6.0 m Ιμήκος, grid 1x1 m

4) ST-3

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές της κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, 6.0 m Ιμήκος, grid 1x1 m

Αν οι οριζόντιες συγκλίσεις κατά της εκσκαφή της άνω διατομής αυξηθούν μέχρι $0,50 \cdot D/100 = 5,90 \text{ cm}$: προσωρινό στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος C30/37, πάχους 20cm με χαλύβδινες ίνες 30kg/m^3 .

5) ST-3bis

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι \varnothing 51mm, φορτίο 630KN και μήκος 8 μέτρων, με κάναβο 1x1m.

6) ST-4bis

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι \varnothing 38mm, φορτίο 400KN και μήκος 8 μέτρων, με κάναβο 1x1m.

7) ST-5

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι \varnothing 38mm, φορτίο 400KN και μήκος 8 μέτρων, με κάναβο 1x1m.

8) ST-PCP1

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι συγκλίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι \varnothing 25mm, μήκος 4,5 μέτρα και μήκος με κάμμα 1x1m.

9) ST-VCP1

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι \varnothing 25mm, μήκος 6 μέτρα και μήκος με πλέγμα 1x1m.

10) ST-PCP2

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια

- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, μήκος 4,5 μέτρα και μήκος με πλέγμα 1x1m.

11) ST-VCP2

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, μήκος 6 μέτρα και μήκος με πλέγμα 1x1m.

12) ST-LAYBY

Επίπεδο προσοχής : αύξηση της συχνότητας των μετρήσεων

Επίπεδο συναγερμού : έλεγχος του σκυροδέματος

Επίπεδο κινδύνου : μέτρα υποστήριξης

Τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης :

- Προσθήκη αγκυρίων στις παρειές, αν οι τιμές κατακόρυφης μετατόπισης ξεπεράσουν τα όρια
- Προσθήκη αγκυρίων στο θόλο, αν οι μετατοπίσεις ξεπεράσουν τα όρια
- Πλήρως ενεματωμένες χαλύβδινες ράβδοι Ø 25mm, μήκος 6 μέτρα και μήκος με πλέγμα 1x1m.

Σε σχέση με την ευστάθεια του μετώπου της σήραγγας , οι τύποι υποστήριξης ST-3bis , ST-4 και ST-4bis θα πρέπει να εξασφαλίζουν σταθερότητα, μειώνοντας τις οριζόντιες

μετακινήσεις. Τα μέτρα υποστήριξης περιλαμβάνουν πυρήνα πετρώματος που αφαιρείται μερικά μέτρα πίσω.

Σε περίπτωση που οι οριζόντιες μετακινήσεις δεν σταματήσουν, δηλαδή αν έχουμε μεγάλη εξώθηση απαιτείται περαιτέρω υποστήριξη :

- Αγκύρια με υαλονήματα : διάμετρος ράβδου 25mm, φορτίο 250KN, ονομαστικό βάρος 1,02kg/m, επιμήκυνση 2,3%, πλήρως ενεματωμένα, μήκος 10 μέτρα, ανά 8 μέτρα προχώρησης και γωνία με το οριζόντιο επίπεδο 4°.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα θα πρέπει να ελέγξουμε τις οριζόντιες μετατοπίσεις :

- Ημισύγκλιση . $0,5 \cdot R / 100$ όριο προσοχής
- Ημικόκλιε . $0,75 \cdot R / 100$ όριο συναγεμίου
- Ημικόκλιε . $1 \cdot R / 100$ όριο κινδύνου
- Ημικόκλιε . $1,25 \cdot R / 100$ τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης

Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η ακτίνα της σήραγγας είναι 6 μέτρα, τα επιπρόσθετα μέτρα υποστήριξης που αναφέρθηκαν όταν οι τιμές των μετατοπίσεων είναι υψηλότερες από τα επιτρεπτά όρια, δηλαδή οι ημισυγκλίσεις να είναι μεγαλύτερες από 7,5 μέτρα.

Όταν η μεγάλη εξώθηση δεν σταματήσει και οι μετατοπίσεις γύρω από τον πυρήνα υπερβούν το 2,5% της ακτίνας (15cm) θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο τύπος υποστήριξης ST-5.

Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του FLAC_{3D} οι οριζόντιες μετακινήσεις της σήραγγας τύπου ST-5 μπορεί να αυξηθούν μέχρι και 9,16cm. Παρόλα αυτά υποθέτουμε ότι οι οριζόντιες μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες από 7,5cm για καλύτερη ασφάλεια, τοποθετώντας εν τέλει αγκύρια με υαλοίνες.

2.10. Παρακολούθηση

Πέρα από τον έλεγχο των συγκλίσεων η ενοργάνωση της σήραγγας θα πρέπει να συμπληρωθεί με πρόσθετες μετρήσεις για να εξεταστεί η πραγματική συμπεριφορά της βραζομάζας.

Τα συστήματα παρακολούθησης και ενοργάνωσης θα πρέπει να ερμηνεύονται εύκολα και θα πρέπει να επιτρέπουν τον έλεγχο των μοντέλων υπολογισμού αλλά και της αρχικής υπόθεσης του σχεδιασμού. Αυτό το τμήμα περιγράφει την ενοργάνωση της σήραγγας, την παρακολούθηση και τα όρια ελεγχου.

Τα στοιχεία ενοργάνωσης επιτρέπουν την απόκτηση πληροφοριών κατά την κατασκευή, εκτός τις συγκλίσεις :

- Παραμορφώσεις από εξτενσιόμετρο (ράβδος) : επιτρέπουν την μέτρηση των μετατοπίσεων μέσα στην βραχομάζα, κάτι που συνδέεται με την εξέλιξη της ακτίνας πλαστικοποίησης.
- Κυψέλες πίεσης ή μηκυνσιόμετρα : υποδεικνύουν το επίπεδο θλίψης στο οποίο καταπονείται το σκυρόδεμα, τα αγκύρια και οι χαλύβδινες ράβδοι
- Πιεζόμετρα : με αυτά προσδιορίζεται η πίεση του νερού που ασκεί στην υποστήριξη αλλά και η εξέλιξη της.

Για τον έλεγχο των ενεργειών θα υπάρχει τεχνική ομάδα που εστιάζεται σε :

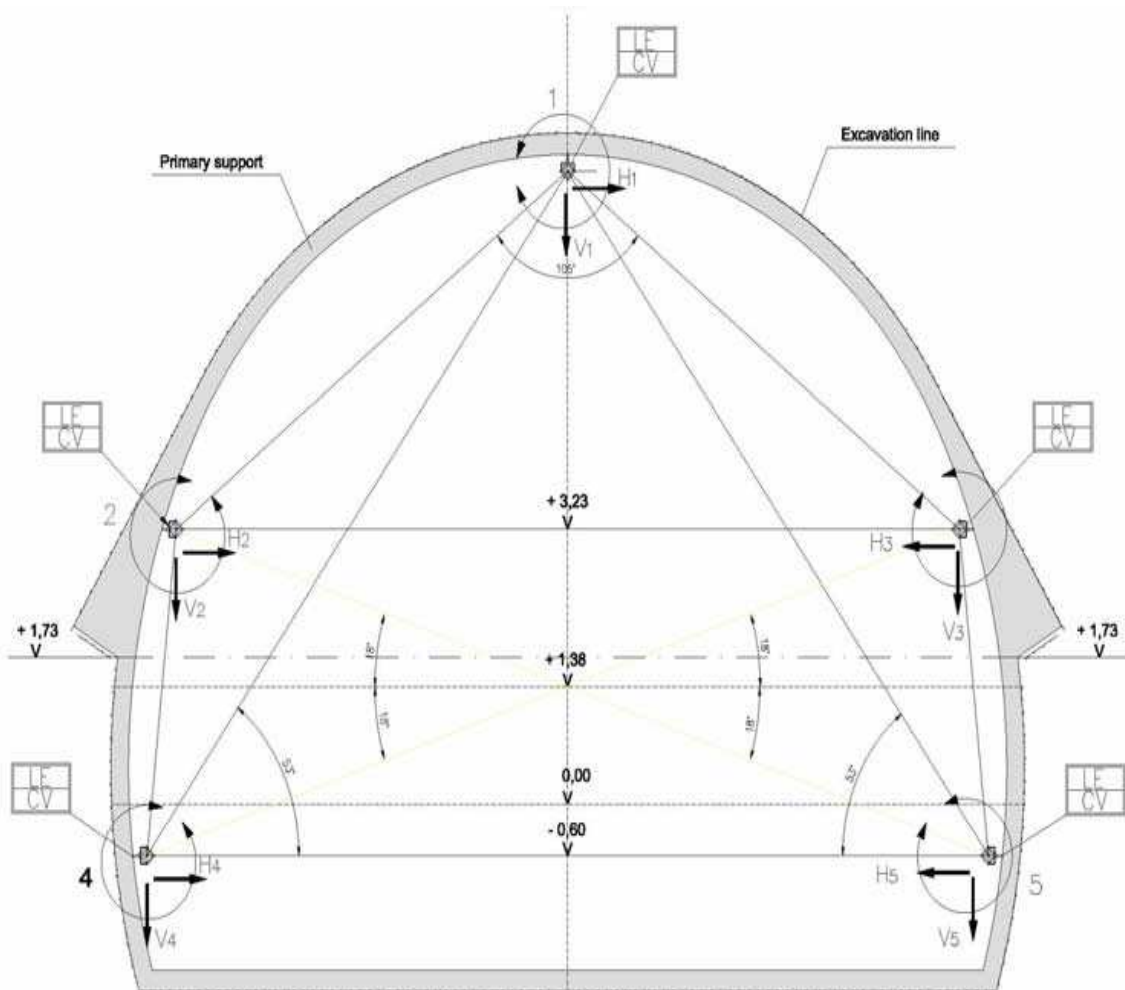
- Προσδιορισμός των επιπέδων συναγερμού
- Σχεδιασμό του προγράμματος παρακολούθησης
- Σχεδιασμός και παρουσίαση της εργασίας πεδίου
- Ετοιμασία περιοδικών αναφορών που περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με την ενοργάνωση

2.11. Διατομές Ελέγχου

Η ενοργάνωση που περιγράφηκε νωρίτερα έχει να κάνει με τον έλεγχο των παραμορφώσεων στην υποστήριξη όπως και με την αντίδραση του με το έδαφος, επιτρέποντας την ανάλυση των πληροφοριών.

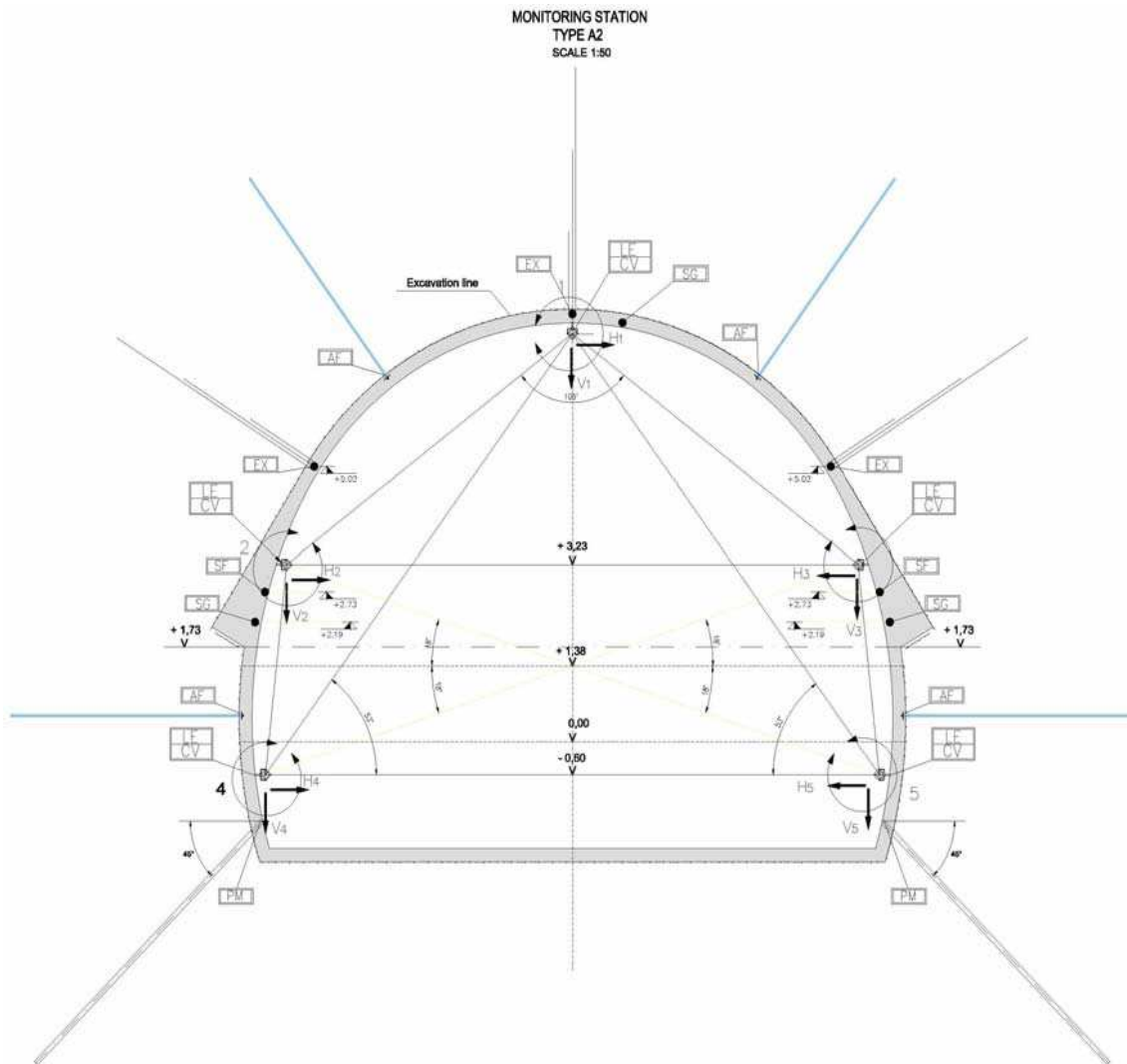
Η ενοργάνωση χωρίζεται σε :

- Σταθμό παρακολούθησης Τύπου A1. Αυτοί τοποθετούνται κάθε 20 μέτρα, με εξαίρεση τα ρήγματα όπου τοποθετούνται ανά 10 μέτρα.



Εικόνα 3. Σταθμός παρακολούθησης τύπου A1

- Σταθμός παρακολούθησης Τύπου A2. Πλήρες τμήμα ενοργάνωσης, με εξτενσιόμετρο, κυψέλες πίεσης, πιεσόμετρα, δονούμενα πιεζόμετρα ράβδους και στόχους για την μέτρηση της σύγκλισης.



Εικόνα 4. Σταθμός παρακολούθησης τύπου A2

Η σήραγγα θα έχει ένα ολοκληρωμένο τμήμα παρακολούθησης (A2) σε κάθε γεωτεχνική μονάδα, σε απόσταση μικρότερη από 50 μέτρα. Επίσης τμήμα παρακολούθησης A1 θα τοποθετηθεί στο κέντρο κάθε διασταύρωσης.

2.12. Εξοπλισμός ενοργάνωσης

Ο παρακάτω εξοπλισμός θα χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ενοργάνωσης κατά την κατασκευή

- Αναγνώστης ενδείξεων με δόνηση για τον έλεγχο των μετρητών πίεσης και των εξτενσιομέτρων
- Έλεγχος των μετρητών πίεσης : η ερμηνεία γίνεται σε καθημερινή βάση από την εγκατάσταση μέχρι την σταθεροποίηση. Όταν το μέτωπο της εκσκαφής είναι το λιγότερο 10 μέτρα από το μπροστινό μέρος, έχουμε καθημερινή ερμηνεία. Όταν το μέτωπο είναι μακρύτερα από 40 μέτρα, έχουμε ερμηνεία των μετρήσεων 2 φορές την εβδομάδα. Μετά από ένα μήνα πραγματοποιείται περεταίρω ερμηνεία.
- Εξτενσιόμετρα ράβδοι που επιτρέπουν τον έλεγχο της αποφόρτισης της ζώνης γύρω από τη σήραγγα. Οι μετρήσεις παραμόρφωσης γίνονται καθημερινά μεταξύ τοποθέτησης και τριών επαναλήψεων ερμηνείας. Η συχνότητα των ερμηνειών είναι περίπου 1 φορά ανά 2 εβδομάδες.
- Δονούμενα πιεζόμετρα ράβδοι : επιτρέπουν τον έλεγχο των αλλαγών της πίεσης του νερού. Έχουμε ερμηνεία πριν την εγκατάσταση , ενώ πραγματοποιούνται άλλες τρεις μέχρι την σταθεροποίηση. Ακολουθεί ερμηνεία ανά μήνα. Όλα αυτά τα δεδομένα καταγράφονται σε βάσεις δεδομένων και αναπαρίστανται γραφικά για περεταίρω εξήγηση.

2.13. Όρια ελέγχου

Ο σκοπός της ενοργάνωσης είναι να ελεγχθεί το κατά πόσο ήταν επιτυχείς οι υποθέσεις στον υπολογισμό και να παρθούν τα απαραίτητα μέτρα σε περίπτωση που η πραγματική συμπεριφορά αποκλίνει από τα εξαγόμενα συμπεράσματα. Όλο αυτό γίνεται συγκρίνοντας τις μετρούμενες παραμέτρους που έχουμε με τα όρια ελέγχου.

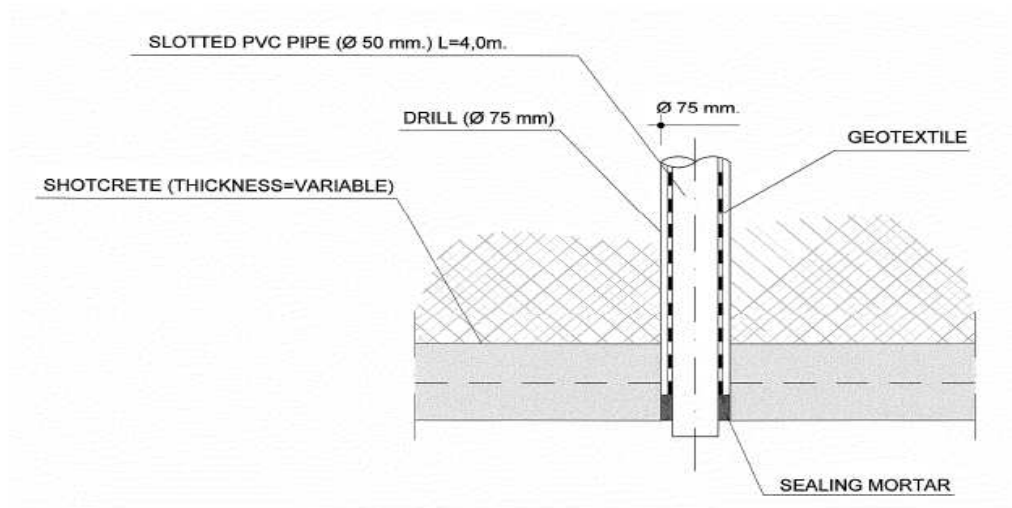
2.14. Σύστημα αποστράγγισης

Παρακάτω περιγράφεται το σύστημα αποστράγγισης στις διάφορες φάσεις :

- Πριν την εκσκαφή του βήματος προχώρησης, αποστραγγιστικές οπές θα πρέπει να υπάρχουν στο μπροστινό τμήμα, όπου απαιτείται, όταν εμφανιστεί υγρασία. Επίσης όταν αναμένεται λιθολογική επαφή, ειδικά όταν μετακινούμαστε από διαπερατούς σχηματισμούς σε αδιαπερατούς. Ακόμη σε περίπτωση που αναμένεται παρουσία ρήγματος. Αυτές οι οπές έχουν μήκος 12 μέτρα και διάμετρο 75mm. Αν οι υδρογεωλογικές συνθήκες εξακολουθούν να υφίστανται στο μπροστινό τμήμα, οι γεωτρήσεις επαναλαμβάνονται ανά 8 μέτρα. Προτιμάται να χρησιμοποιείται σωλήνας από PVC στις αποστραγγιστικές οπές. Απαιτούνται 5 οπές, σε περίπτωση που η διήθηση του νερού είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα της, τότε χρειάζονται πιο πολλές οπές. Να σημειωθεί ότι στις εγκάρσιες οπές το μήκος είναι 6 μέτρα και η διάμετρος 75mm. Αν οι υδρογεωλογικές συνθήκες εξακολουθούν να υφίστανται στο μπροστινό τμήμα, θα πραγματοποιείται γεώτρηση κάθε 4 μέτρα.

Φάση υποστήριξης :

- Αφού εγκατασταθεί η υποστήριξη και πριν την τοποθέτηση της τελικής επένδυσης, στις περιοχές που εμφανίζεται υγρασία, γίνονται ακτινωτές γεωτρήσεις. Μέσα σε αυτές τις οπές τοποθετείται ένας αυλακωμένος σωλήνας PVC. Οι σωλήνες αυτοί έχουν μήκος 4 μέτρα.



Εικόνα 5. Σύστημα αποστράγγισης της σήραγγας

3. Περιγραφή του προγράμματος Phase 2

3.1. Γενικά για το πρόγραμμα Phase

Το πρόγραμμα H/Y *Phase*² είναι ένας δισδιάστατος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες (ή επιφανειακές εκσκαφές) με δυνατότητα προσομοίωσης της πλαστικής συμπεριφοράς της γεωμάζας που περιβάλλει την υπόγεια εκσκαφή. Τα προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν με το πρόγραμμα Phase2, περιλαμβάνουν:

- Προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης ή αξονοσυμμετρικά προβλήματα
- Ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά υλικών
- Διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις (έως 50 φάσεις)
- Υλικά με διαφορετικές ιδιότητες στη διατομή της ανάλυσης
- Επίδραση στοιχείων υποστήριξης (π.χ. αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, κλπ.)
- Σταθερές τάσεις πεδίου ή μεταβαλλόμενες καθ ύψος της διατομής λόγω βαρύτητας
- Προβλήματα παρουσίας ασυνεχειών στη γεωμάζα
- Προβλήματα παρουσίας υπόγειου νερού (με δυνατότητα ανάλυσης της πίεσης πόρων)

Η επίλυση του εκάστοτε μοντέλου στο *Phase*² γίνεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με τις δύο κύριες τάσεις στο επίπεδο της διατομής ανάλυσης και μία κύρια τάση κάθετα προς αυτό. Επίσης η διατομή θεωρείται σταθερή κατά μήκος του άξονα της ενώ η εκσκαφή θεωρείται ότι έχει άπειρο μήκος κάθετα προς το επίπεδο της ανάλυσης.

3.2.1. Παραγωγή μοντέλου

Η παραγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα *Phase*² πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής.. Η γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD.

Η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αυτόματα μέσω ενσωματωμένης γεννήτριας, ικανής να χειριστεί πολύπλοκες και σύνθετες εκσκαφές. Τα στοιχεία του πλέγματος μπορεί να είναι τριγωνικά τριών ή έξη κόμβων ή τετραπλευρικά τεσσάρων ή οκτώ κόμβων. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη το ίδιο βάρος των στοιχείων, οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα.

3.2.2. Στάδια σχεδιασμού και υποστήριξης

Τα στάδια εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας προσομοιώνονται στο *Phase*² μέσω σταδίων προσομοίωσης στα οποία είναι δυνατή η αφαίρεση στοιχείων της γεωμάζας, η αλλαγή των ιδιοτήτων τους και της αρχικής τους φόρτισης, η προσθήκη ή αφαίρεση των στοιχείων της υποστήριξης και η αλλαγή των ιδιοτήτων τους. Επίσης είναι δυνατή η προσθήκη ή αφαίρεση εξωτερικής φόρτισης σε κάθε στάδιο προσομοίωσης

3.2.3 Προσομοίωση στοιχείων υποστήριξης

Το πρόγραμμα είναι προορισμένο για το σχεδιασμό υπογείων εκσκαφών και παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των στοιχείων της υποστήριξης μίας σήραγγας. Η προσομοίωση των αγκυρίων γίνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία. Το *Phase* παρέχει τέσσερα είδη στοιχείου αγκυρίων: σημειακής αγκύρωσης, πλήρους πάκτωσης, αγκύρια συρματόσκοινου, και swellex ή split-set. Τα αγκύρια μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Στη δεύτερη περίπτωση μπορεί να ορισθεί η μέγιστη και παραμένουσα φέρουσα ικανότητα του αγκυρίου.

Ο δακτύλιος του εκτοξευομένου σκυροδέματος προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού, ακολουθώντας τη θεωρία δοκών κατά Bernoulli ή Timoshenko. Τα στοιχεία δοκού μπορούν επίσης να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά, ενώ είναι δυνατό να ορισθούν διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε στάδιο της ανάλυσης.

3.3 Ιδιότητες υλικών γεωμάζας

Τα στοιχεία που προσομοιώνουν το υλικό της γεωμάζας μπορεί να έχουν ελαστική ή πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό μπορεί να είναι ισότροπο, εγκάρσιως ισότροπο ή ορθότροπο.

Προκειμένου για πλαστική συμπεριφορά υλικών διατίθενται τρία κριτήρια αστοχίας: Mohr-Coulomb, Hoek-Brown και Drucker-Prager. Υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης δύο ειδών πλαστικής συμπεριφοράς:

- ελαστικά-τελείως πλαστικά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής ισούνται με τις αρχικές,
- ψαθυρά υλικά: οι παραμένουσες παράμετροι αντοχής είναι μικρότερες των αρχικών.

Οι ιδιότητες των υλικών της γεωμάζας μπορούν να διαφοροποιούνται μεταξύ των διαδοχικών σταδίων της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η ελάττωση της δυσκαμψίας του υλικού μέσα στη σήραγγα ώστε να προσομοιωθεί η διάνοιξη της εκσκαφής σε στάδια.

3.4 Τάσεις πεδίων Φορτίσεις

Στο Phase2 οι τάσεις πεδίου καθορίζονται να έχουν σταθερές τιμές στις περιπτώσεις εκσκαφών σε μεγάλα βάθη, όταν η επίδραση της βαρύτητας στη μεταβολή της εντατικής κατάστασης είναι αμελητέα συγκρινόμενη με το μέγεθος των επί τόπου τάσεων.

Προκειμένου για εκσκαφές σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μπορεί να ορισθεί ένα εντατικό πεδίο λόγω υπερκειμένων γαιών λαμβάνοντας υπόψη της επίδραση του πεδίου βαρύτητας. Η κατακόρυφη τάση υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma_v = \gamma \cdot h$, όπου γ είναι το ίδιο βάρος των γαιωλικών και h το βάθος από την επιφάνεια. Η οριζόντια κύρια τάση, στην περίπτωση που δεν υπάρχουν κλειδωμένες τάσεις υπολογίζεται από τη σχέση $\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v$, όπου K_0 ο συντελεστής πλευρικής ώθησης.

Οι συνθήκες φόρτισης μπορούν να ορισθούν διαφορετικές στα στρώματα γεωυλικών της διατομής ανάλυσης, όταν αυτό απαιτείται, όπως στην περίπτωση διαφορετικού συντελεστή πλευρικής ώθησης.

Παράλληλα με τις τάσεις πεδίου, μπορούν να ορισθούν δυνάμεις κάθετα ή παράλληλα προς κάποιο εξωτερικό ή εσωτερικό σύνορο του μοντέλου, όπως και επικόμβιες δυνάμεις στους κόμβους των στοιχείων του μοντέλου κατά την κατακόρυφη και οριζόντια διεύθυνση. Η εφαρμογή τέτοιων δυνάμεων είναι απαραίτητη στην περίπτωση αβαθών εκσκαφών όπου υπεισέρχονται στους υπολογισμούς επιφανειακά φορτία, λόγω βάρους υφιστάμενων κτιρίων ή φορτία κυκλοφορίας υπερκείμενης οδού.

4. ΔΙΔΥΜΗ ΣΗΡΑΓΓΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

4.1. Εισαγωγή

Σε πρώτο στάδιο η μελέτη της επιρροής που ασκεί η απόσταση των δύο κλάδων σε μια δίδυμη σήραγγα γίνεται για την περίπτωση όπου έχουμε πλήρως κυκλική διατομή.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να έχουμε μια πρώτη εκτίμηση για το τι μπορούμε να αναμένουμε στη συνέχεια , σε διατομές που ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματική κατασκευή της T2.

Τα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή, απλώς μας δίνουν μια πρώτη εντύπωση.

Οι αποστάσεις μεταξύ των εσωτερικών σημείων των κλάδων (παρειά από παρειά) θα είναι $D/2$, D , $2D$, $3D$, δηλαδή 6 , 12 , 24 και 36 μέτρα.

4.2. Προετοιμασία αριθμητικών

Τα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κλάδων είναι πανομοιότυπα με τα όσα θα περιγραφούν αργότερα στις άλλες διατομές.

Η διάμετρος της σήραγγας είναι στα 12 μέτρα. Το υλικό που υπάρχει στην περιοχή είναι σχιστοκερατόλιθος, με Young modulus 567MPa, και λόγο Poisson 0,35.

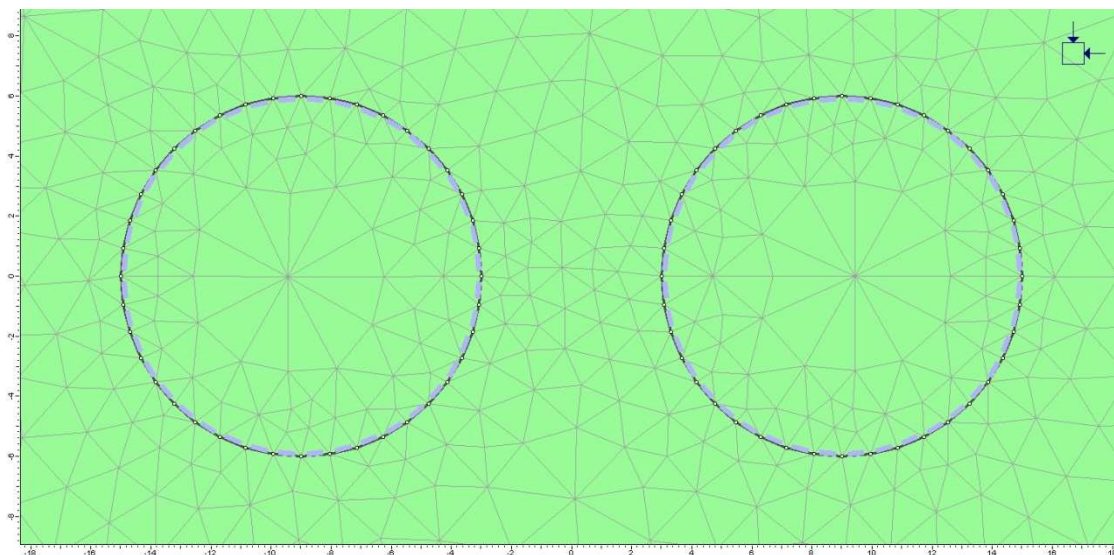
Στο πεδίο των τάσεων, θεωρώντας $k = 1$ δίνουμε $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 5,59\text{MPa}$, και γωνία της σ_1 από το οριζόντιο επίπεδο 0° .

Όσον αφορά την υποστήριξη της σήραγγας, θα χρησιμοποιηθεί μόνο σκυρόδεμα. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος είναι: μέτρο ελαστικότητας = 15.000MPa, λόγος Poisson = 0,2 και πάχος 35cm, όσο είναι δηλαδή στον θόλο των διατομών της T2.

Η προσομοίωση γίνεται σε τρία στάδια:

1) ΑΡΧΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

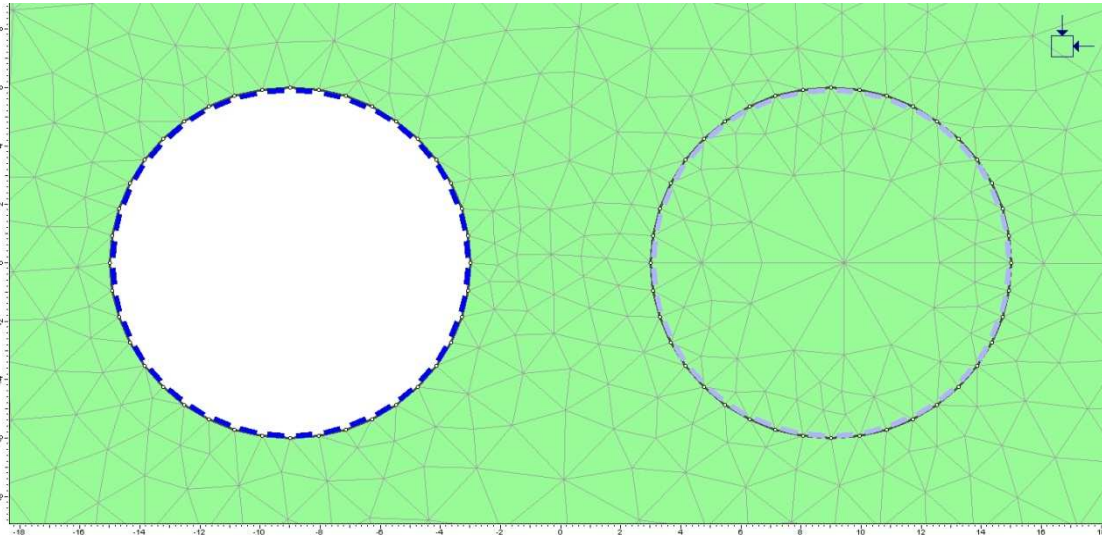
Στο πρώτο στάδιο υπάρχει η αρχική ισορροπία υπό το φυσικό πεδίο και επομένως δεν χρειάζεται να υπάρχει υποστήριξη, χωρίς να υπάρχει εκσκαφή



Εικόνα 6. Πρώτο στάδιο προσομοίωσης – Αρχική ισορροπία

2) ΕΚΣΚΑΦΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟΥ ΚΛΑΔΟΥ – ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

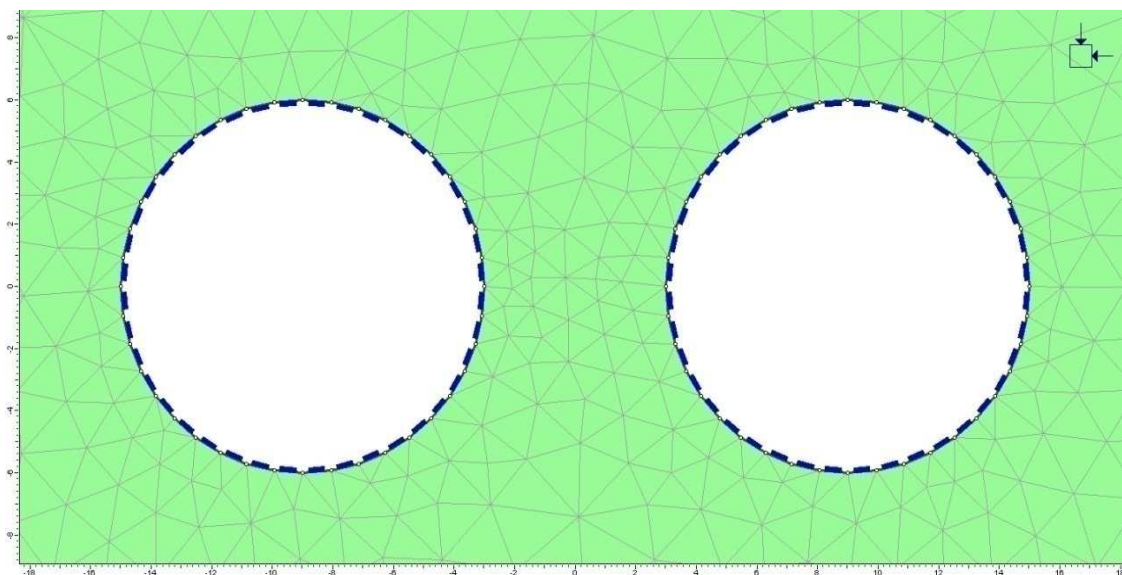
Στο στάδιο αυτό γίνεται ολομέτωπη εκσκαφή του αριστερού κλάδου της σήραγγας. Η υποστήριξη όπως αναφέρθηκε περιλαμβάνει εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 35cm, το οποίο προστίθεται αμέσως μετά την εκσκαφή.



Εικόνα 7. Δεύτερο στάδιο προσομοίωσης – Εκσκαφή - Υποστήριξη

3) ΕΚΣΚΑΦΗ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ – ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο πραγματοποιείται και η εκσκαφή του δεξιού κλάδου και ακολουθεί προσθήκη σκυροδέματος με ιδιότητες ίδιες με του προηγούμενου σταδίου.



Εικόνα 8. Τρίτο στάδιο εκσκαφής – Εκσκαφή – Υποστήριξη

4.3. Αποτελέσματα

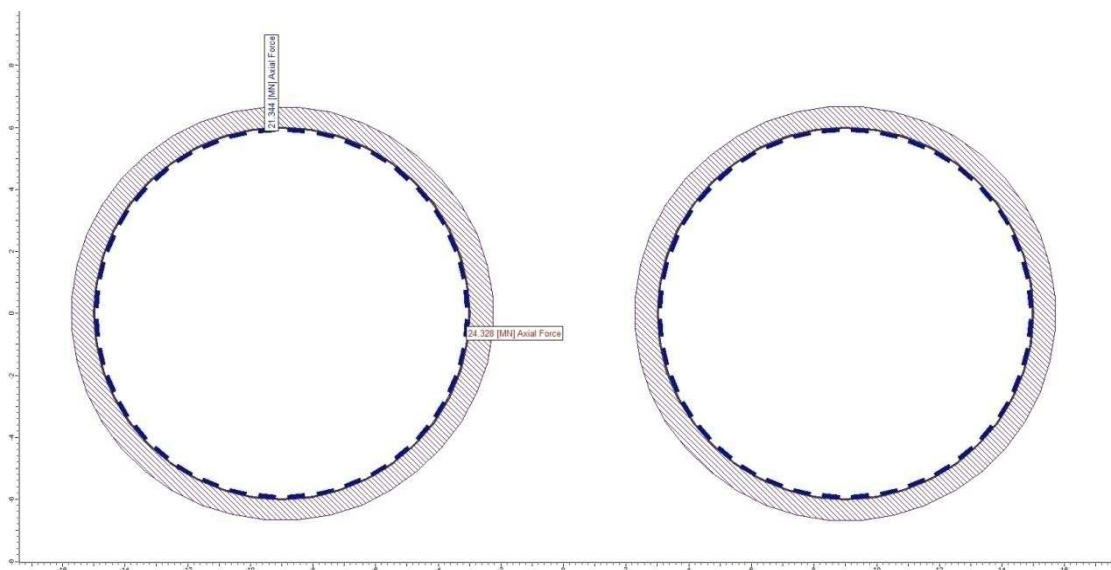
Απόσταση κλάδων 6 μέτρα

	CIRCULAR 6	
Στάδια	Ακτινική μετατόπιση αριστερού κλάδου (m)	Αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα του αριστερού κλάδου (MN)
1	0	0
2	0.025	22,752
3	0.03	24,328

Πίνακας 7. αποτελέσματα μετατοπίσεων – αξονικών δυνάμεων για d=6m

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, θα υπολογίσουμε την επί τις εκατό μεταβολή των τιμών από το 2^ο στάδιο με την εκσκαφή του πρώτου κλάδου, μέχρι το 3^ο στάδιο όπου έχουμε εκσκαφή και του δεύτερου κλάδου. Έτσι έχουμε :

- Μετατοπίσεις : $(0,03 - 0,025) / 0,025 = 20\%$
- Αξονική δύναμη : $(24,328 - 22,752) / 22,706 = 7\%$



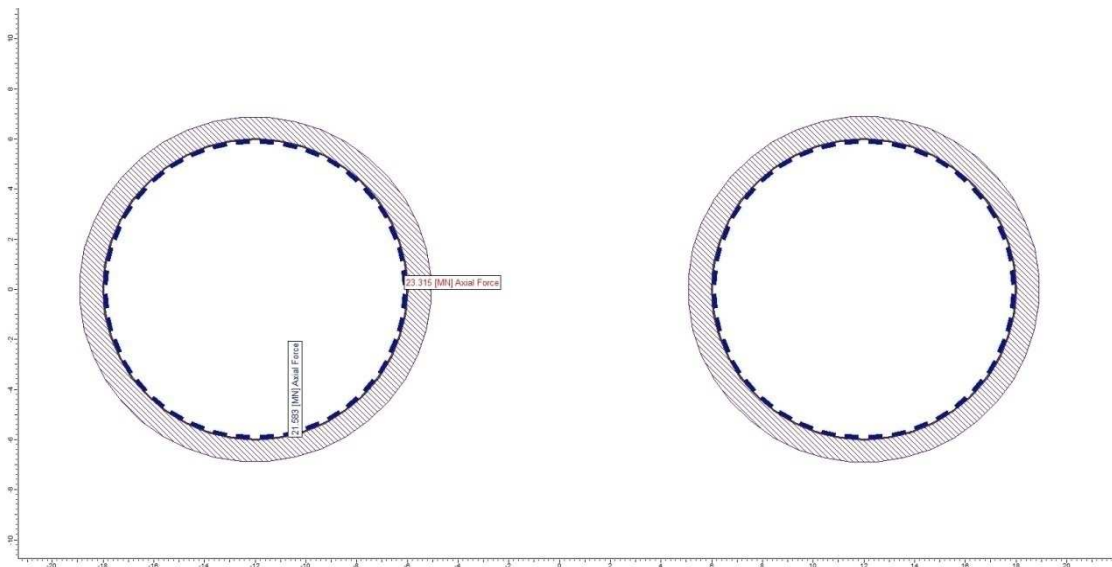
Εικόνα 9. κατανομή αξονικής δύναμης για απόσταση κλάδων ίση με 6 μέτρα

Απόσταση κλάδων 12 μέτρα

	CIRCULAR 12	
Στάδια	Ακτινική μετατόπιση αριστερού κλάδου (m)	Αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα του αριστερού κλάδου (MN)
1	0	0
2	0.025	22,706
3	0.028	23,315

Πίνακας 8. αποτελέσματα μετατοπίσεων – αξονικών δυνάμεων για d=12m

- Μετατοπίσεις : $(0,028 - 0,025) / 0,025 = 12\%$
- Αξονική δύναμη : $(23,315 - 22,706) / 22,706 = 0,7\%$



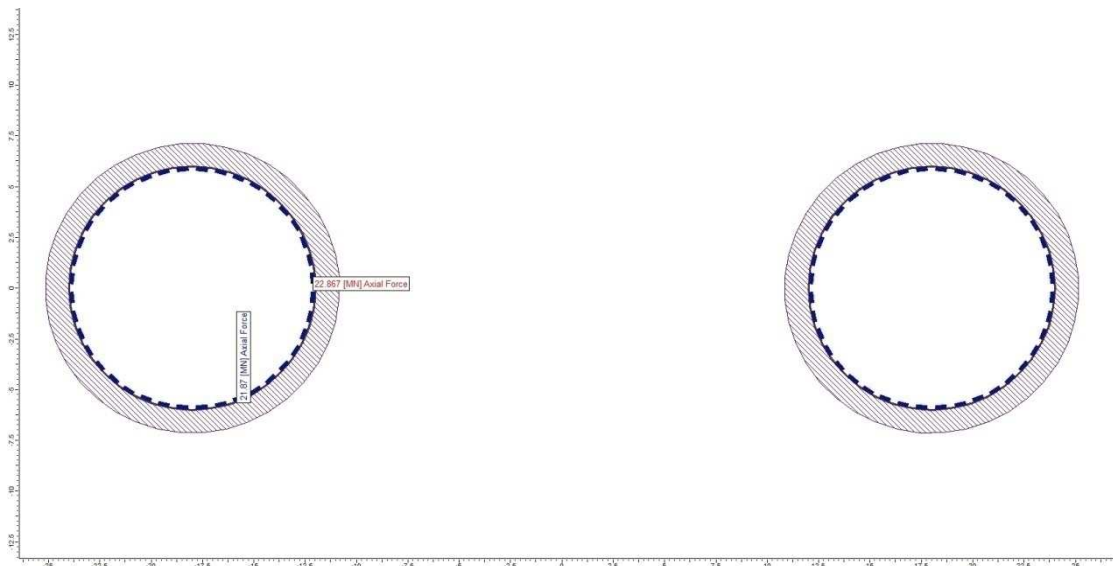
Εικόνα 10. κατανομή αξονικής δύναμης για απόσταση κλάδων ίση με 12 μέτρα

Απόσταση κλάδων 24 μέτρα

	CIRCULAR 24	
Στάδια	Ακτινική μετατόπιση αριστερού κλάδου (m)	Αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα του αριστερού κλάδου (MN)
1	0	0
2	0.025	22,7
3	0.027	22,7

Πίνακας 9. αποτελέσματα μετατοπίσεων – αξονικών δυνάμεων για d=24m

- Μετατοπίσεις : $(0,027 - 0,025) / 0,025 = 8\%$
- Αξονική δύναμη : $(22,7 - 22,7) / 22,704 = 0\%$



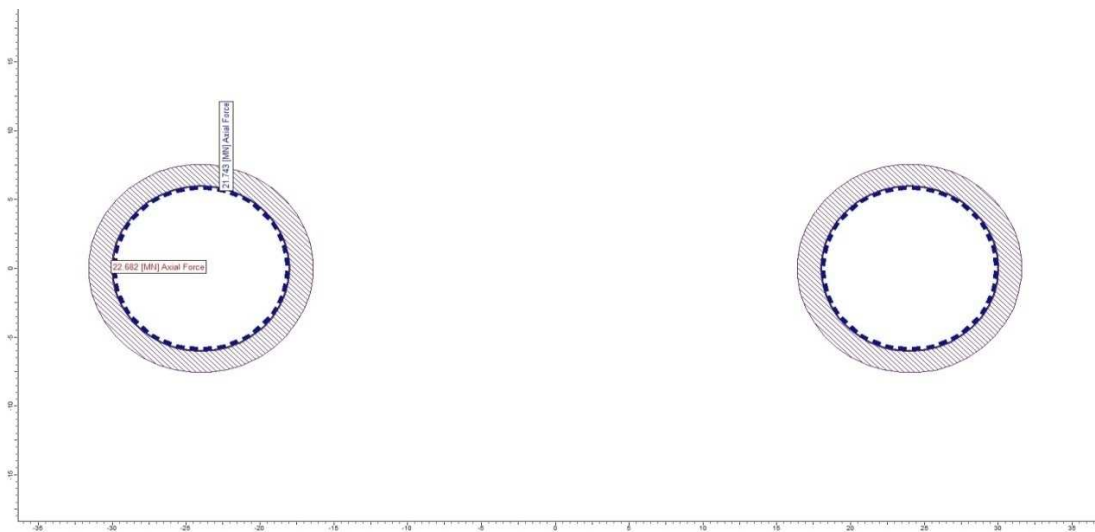
Εικόνα 11. κατανομή αξονικής δύναμης για απόσταση κλάδων ίση με 24 μέτρα

Απόσταση κλάδων 36 μέτρα

	CIRCULAR 36	
Στάδια	Ακτινική μετατόπιση αριστερού κλάδου (m)	Αξονική δύναμη στο σκυρόδεμα του αριστερού κλάδου (MN)
1	0	0
2	0.026	22,7
3	0.026	22,7

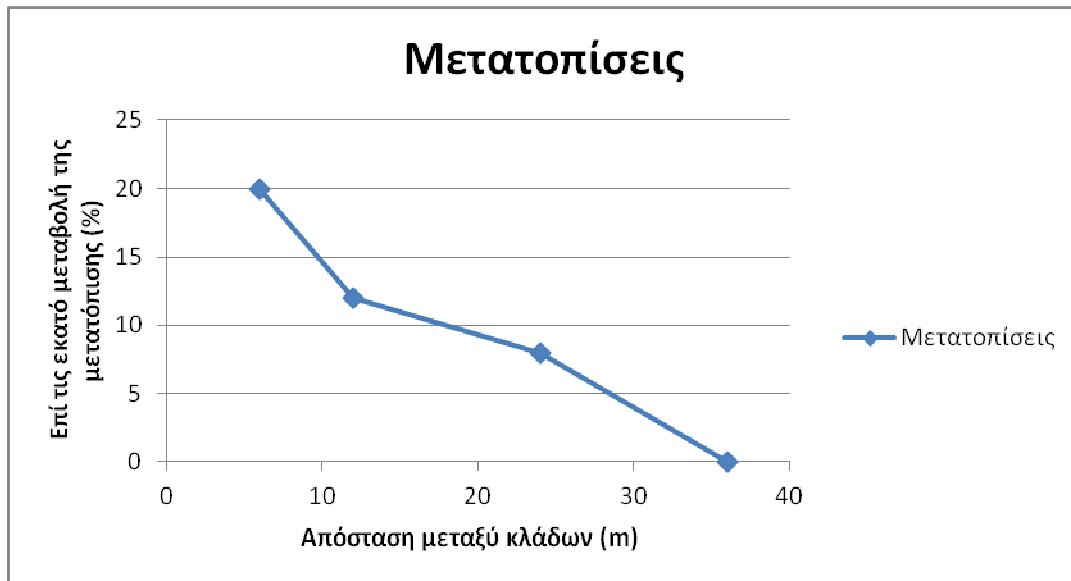
Πίνακας 10. αποτελέσματα μετατοπίσεων – αξονικών δυνάμεων για d=36m

- Μετατοπίσεις : $(0,026 - 0,026) / 0,025 = 0\%$
- Αξονική δύναμη : $(22,7 - 22,7) / 22,7 = 0\%$

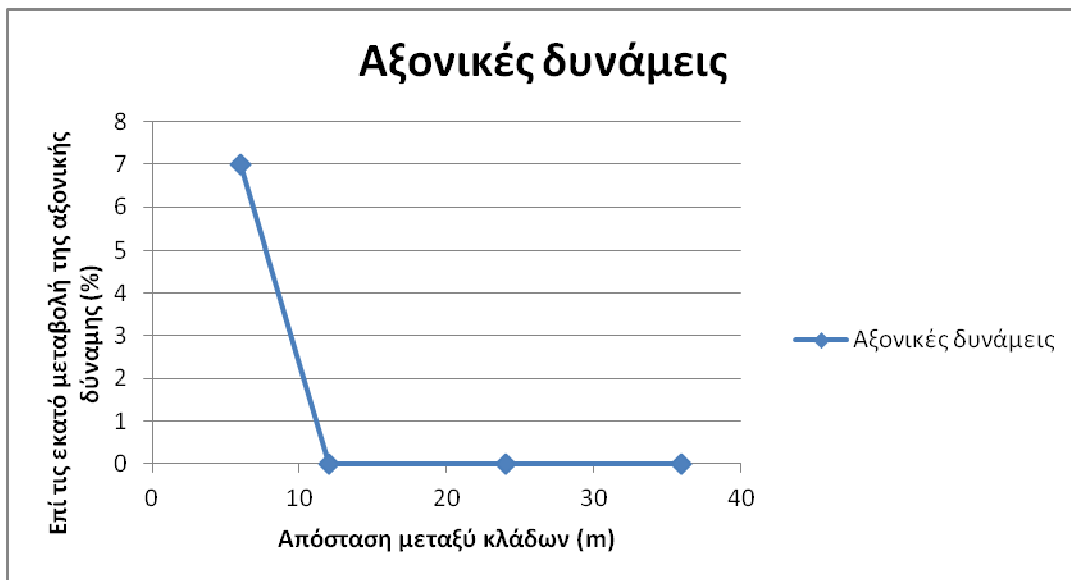


Εικόνα 12. κατανομή αξονικής δύναμης για απόσταση κλάδων ίση με 36 μέτρα

Αξίζει να αναφερθεί ότι η απουσία ροπών κάμψης στις παραπάνω περιπτώσεις, λόγω της κυκλικής διατομής. Επίσης δεν έχουμε και εμφάνιση αστοχούντων σημείων, καθώς λόγω της γεωμετρίας της διατομής και της άμεσης τοποθέτησης του σκυροδέματος, το σκυρόδεμα απορροφά όλες τις ασκούμενες τάσεις.



Διάγραμμα 6. Μεταβολή μετατοπίσεων συναρτήσει της απόστασης των κλάδων



Διάγραμμα 7. Μεταβολή αξονικών δυνάμεων συναρτήσει της απόστασης των κλάδων

Αναφορικά με τις μετατοπίσεις παρατηρούμε εύκολα ότι η απόσταση των κλάδων είναι αντιστρόφως ανάλογη με την μεταβολή της μετατόπισης από το 2^ο στο 3^ο στάδιο. Στην περίπτωση των κλάδων με απόσταση 6 μέτρα, η μεταβολή είναι πολύ σημαντική, της τάξεως του 20%, ενώ αντίθετα στην απόσταση των 36 μέτρων έχουμε μηδενική μεταβολή.

Στις αξονικές δυνάμεις υπάρχει μεταβολή 7% στους κλάδους με απόσταση 6 μέτρα, και στην συνέχεια είναι αμελητέα, παίρνοντας τιμές κοντά στο 0.

Από το σχέδιο παρατηρούμε ότι η διατομή αποτελείται ουσιαστικά από τρία τόξα με διαφορετικά κέντρα.

Το κέντρο του πάνω τόξου, το οποίο καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα της διατομής έχει κέντρο 1,73 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Η ακτίνα του είναι 6 μέτρα και η γωνία που σχηματίζεται 120° .

Τα άλλα δύο τόξα σχεδιάζονται με κέντρα που απέχουν 2,25 μέτρα σε πλάτος και 1,30 μέτρα σε ύψος από το κέντρο του προηγούμενου τόξου, εκατέρωθεν του. Οι ακτίνες τους είναι 8,6 μέτρα και οι σχεδιαζόμενες γωνίες 46° .

Ο σχεδιασμός των γωνιών γίνεται με την εντολή "arc" όπου συμπληρώνεται το άνοιγμα (σε μοίρες) και το μήκος της ακτίνας (σε μέτρα).

Στη συνέχεια σχεδιάζεται μια οριζόντια γραμμή από το σημείο 1,37 παράλληλη προς το δάπεδο, η οποία και αποτελεί τον πυθμένα, και ουσιαστικά χωρίζει την διατομή σε άνω ημιδιατομή και βαθμίδα.

Το μήκος του δαπέδου της διατομής προκύπτει 12,6 μέτρα ενώ το ύψος 10,3 μέτρα.

Το ύψος της άνω ημιδιατομής προκύπτει 6,4 ενώ το αντίστοιχο της βαθμίδας είναι 3,9 μέτρα.

Γύρω από την διατομή σχεδιάζεται το περιβάλλον πέτρωμα σε σχήμα τετραγώνου :
Boundaries → Add External → 5box. Αυτό σημαίνει ότι θεωρούμε πως η γύρω περιοχή απέχει 5 φορές το μέγεθος της διατομής από την διατομή

5.2. Περιβάλλον πέτρωμα –υλικό στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας

5.2.1. Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά

Δίνουμε στο πρόγραμμα τις ιδιότητες του βασικού υλικού που υπάρχει , που στην προκειμένη περίπτωση είναι σχιστοκερατόλιθος : Properties → Define Material Properties :

Initial element loading : isotropic

Elastic type : isotropic

Young modulus : 567 MPa

Poisson's ratio : 0,35

Failure Criterion : Mohr Coulomb , με tensile strength = 0 MPa , fric angle (peak) = 27,44 , cohesion (peak) = 0,41 MPa

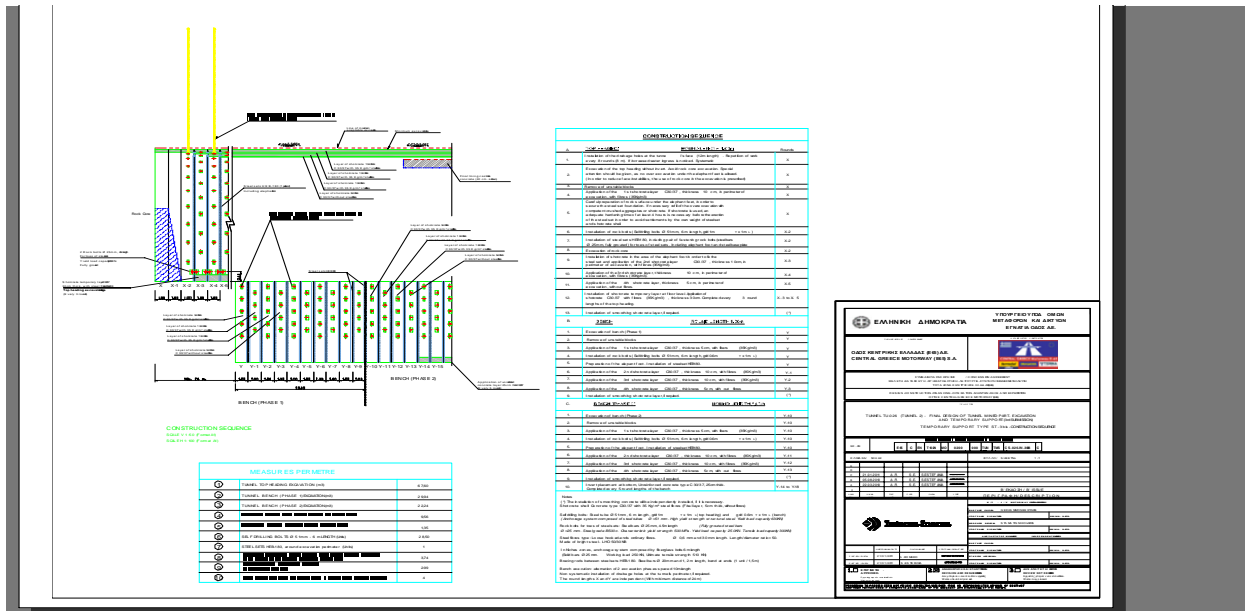
Material type : plastic , με dialation angle = 0 , fric angle (resid) = 27,44 , cohesion (resid) = 0,41 MPa.

Με βάση το σχέδιο γίνεται πλήρης προσδιορισμός της σήραγγας, όσον αφορά τα στάδια εκσκαφής της και την απαιτούμενη υποστήριξη.

Να τονιστεί ότι με βάση τα υπερκείμενα που είναι 215m και τον δείκτη GSI που για τους σχιστοκερατόλιθους είναι 35 και έτσι επιλέγεται η υποστήριξη τύπου ST-3bis.

5.3. Στάδια διάνοιξης της εκσκαφής για ένα κλάδο

Η διάνοιξη θα γίνει σε 13 στάδια :



Εικόνα 14. Κατά μήκος υποστήριξη της σήραγγας

1) ΑΡΧΙΚΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

Στην αρχική ισορροπία γίνεται η εισαγωγή των δεδομένων που έχουμε.

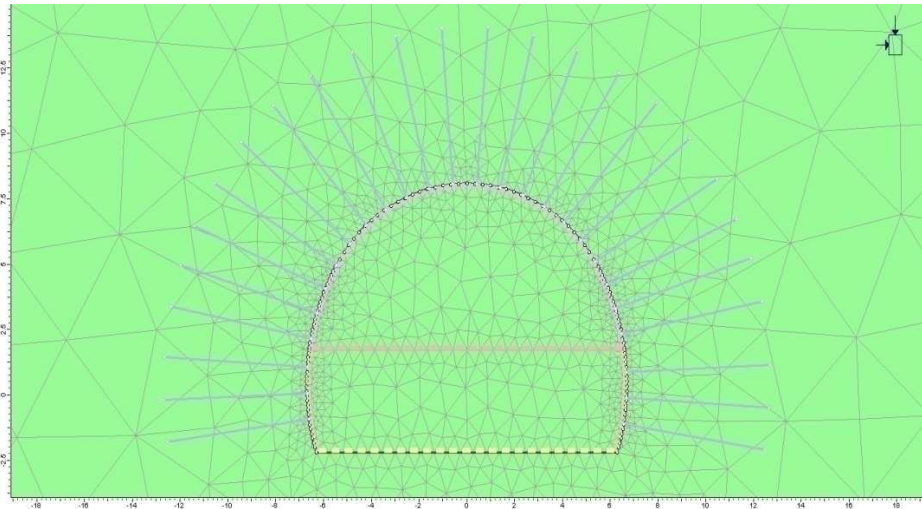
Επιλέγουμε Loading → Field Stress → Field Stress Properties

Field Stress Type : Constant

Για την σ_1 πολλαπλασιάζουμε το βάθος της σήραγγας με το μοναδιαίο βάρος του σχιστοκερατόλιθου : $\sigma_1 = 215m * 0,026 \text{ g/cm}^3 = 5,59\text{MPa}$

Για την $\sigma_2 = \sigma_3$ πολλαπλασιάζουμε την σ_1 επί τον συντελεστή $k = 0,75$,
 οπότε $\sigma_2 = \sigma_3 = 0,75 * 5,59 = 4,19\text{MPa}$

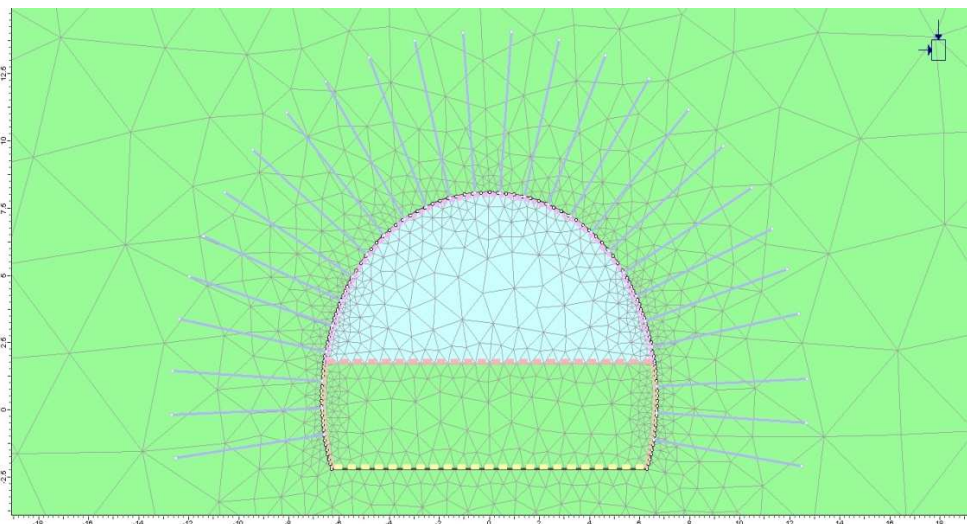
Επιλέγουμε γωνία 90° (γωνία της σ_1 από την οριζόντιο)



Εικόνα 15. Πρώτο στάδιο εκσκαφής – Αρχική ισορροπία

2) ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ ΑΝΩ ΗΜΙΔΙΑΤΟΜΗΣ

Σε αυτό το στάδιο ξεκινά ουσιαστικά η αποτόνωση που απαιτείται να γίνει πριν από την τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης. Πιο συγκεκριμένα αρχίζει η σταδιακή αποφόρτιση του πεδίου των τάσεων. Ο βασικός τρόπος με τον οποίο το πετυχαίνουμε είναι η μείωση του μέτρου ελαστικότητας, αφήνοντας τις υπόλοιπες ιδιότητες του υλικού ανεπηρέαστες. Αυτό γίνεται σε όλα τα επακόλουθα στάδια. Ο προσδιορισμός του συντελεστή αποτόνωσης περιγράφεται αργότερα. Στο συγκεκριμένο στάδιο ο λόγος E/E_0 είναι 0,35



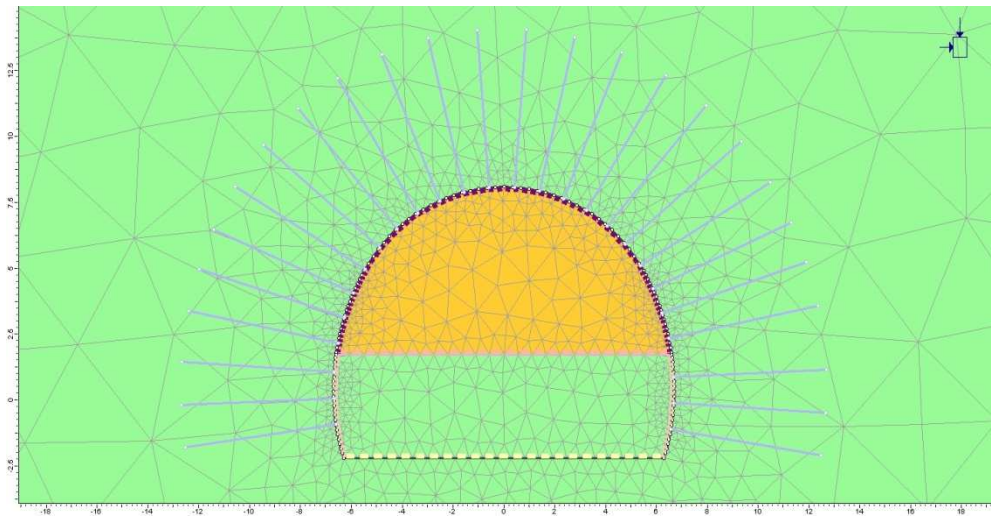
Εικόνα 16. Δεύτερο στάδιο εκσκαφής – Αποτόνωση άνω ημιδιατομής

3) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο 3^ο στάδιο τοποθετείται το πρώτο στρώμα εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 10cm. Συνεχίζεται η αποτόνωση του υλικού. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος είναι :

Μέτρο ελαστικότητας : 15.000 MPa , Λόγος Poisson : 0,2

Στο συγκεκριμένο στάδιο ο λόγος E/E_0 είναι 0,2



Εικόνα 17. Τρίτο στάδιο εκσκαφής – Υποστήριξη θόλου

4) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Σε αυτό το στάδιο έχουμε προσθήκη αγκυρίων και πλαισίων. Επιλέγουμε Properties → Define Bolts → Define Bolt Properties :

Bolt type : fully bonded

Bolt diameter : 51mm

Bolt modulus : 200.000 MPa

Tensile capacity : 0,63MPa

Residual Tensile Capacity : 0MPa

Out of plane Spacing : 1 m

Η προσθήκη αγκυρίων γίνεται περιμετρικά της άνω ημιδιατομής, περιλαμβάνοντας 20 διατρητικά αγκύρια συνολικά.

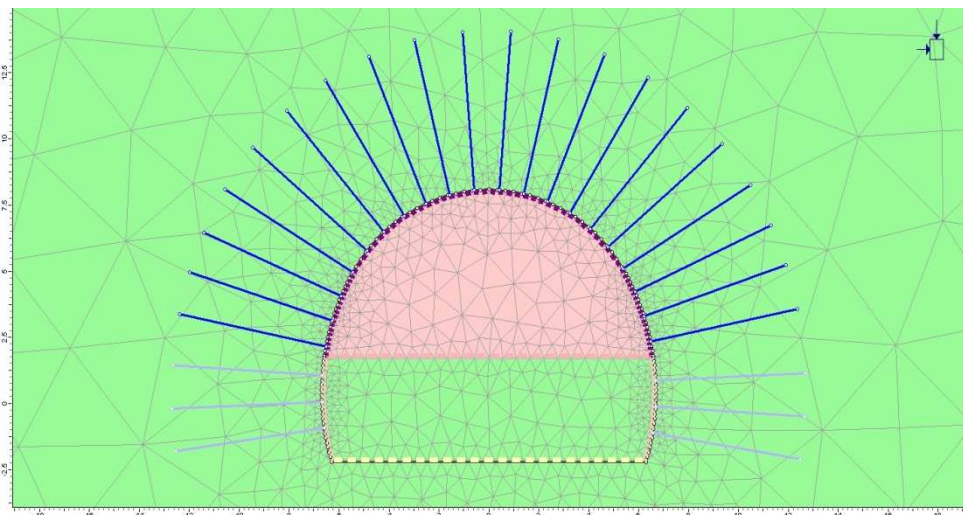
Τα πλαίσια τα θεωρούμε ως “liner” έχοντας ωστόσο διαφορετικές ιδιότητες από το σκυρόδεμα :

Μέτρο ελαστικότητας : 210.000 MPa

Λόγος Poisson : 0,2

Επιφάνεια : 0,00653 m²

Να σημειωθεί ότι όταν έχουμε πάνω από ένα είδος υποστήριξης σε ένα στάδιο ή κάποιο είδος υποστήριξης επαναλαμβάνεται και σε μετέπειτα στάδιο χρησιμοποιείται το “composite liner” του Phase, που είναι συνδιασμός των δύο “liner”. Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,07$.

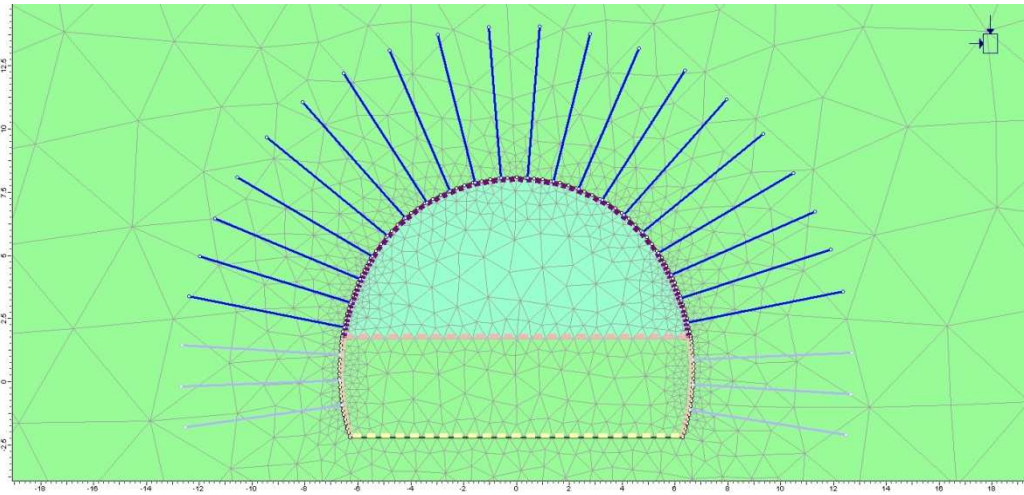


Εικόνα 18. Τέταρτο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη του θόλου

5) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΣΤΟ ΘΟΛΟ + ΠΡΟΣΩΡΙΝΟΣ ΠΥΘΜΕΝΑΣ

Στο 5^ο στάδιο έχουμε προσθήκη σκυροδέματος 10cm στο θόλο με ιδιότητες που έχουν περιγραφεί παραπάνω. Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,06$.

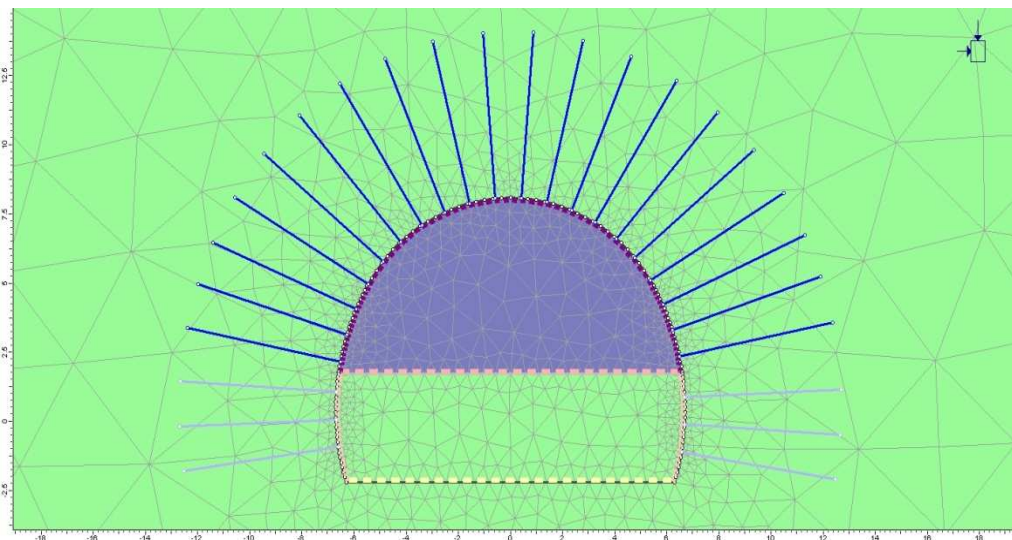
Επίσης έχουμε δημιουργία ενός προσωρινού πυθμένα.



Εικόνα 19. Πέμπτο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη θόλου – κατασκευή προσωρινού πυθμένα

6) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο σημείο αυτό έχουμε προσθήκη σκυροδέματος πάχους 10cm. Στο πρόγραμμα του Phase η προσθήκη των liners έχει γίνει με την εντολή Define Factor, όπου και το πάχος του σκυροδέματος υπάρχει σαν λόγος του έως τώρα πάχους προς το συνολικό. Έτσι στο 6^ο στάδιο θα είναι $(10+10+10)\text{cm} / 35\text{cm} = 0,86$. Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,45$.



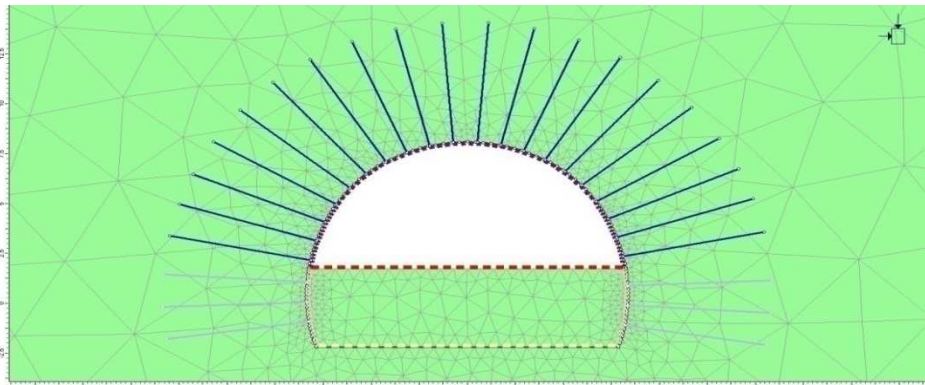
Εικόνα 20. Έκτο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη θόλου

7) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ – ΕΚΣΚΑΦΗ

Έχουμε ακόμη μια προσθήκη σκυροδέματος , πάχους 5 cm. Ακολουθεί προσθήκη σκυροδέματος στον πυθμένα , πάχους 30cm και ιδιοτήτων.

Young Modulus : 15.000 MPa, Poisson's ratio : 0,2

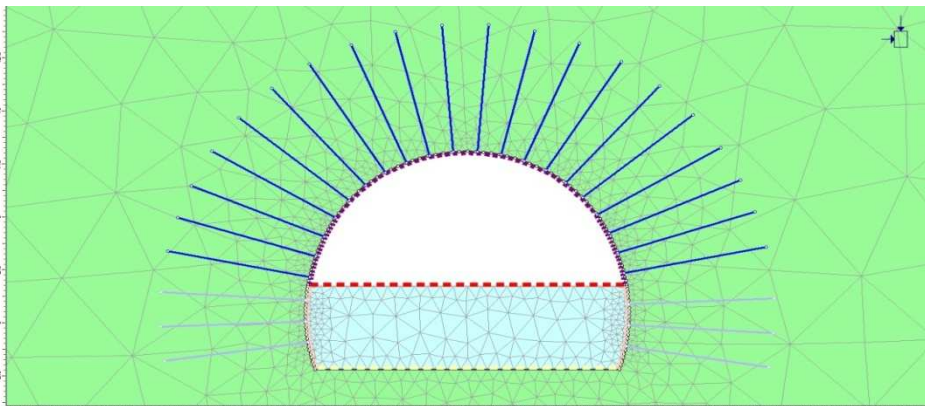
Στην συνέχεια πραγματοποιείται η εκσκαφή της άνω ημιδιατομής. Στο πρόγραμμα αυτό επιτυγχάνεται αλλάζοντας το υλικό σε "excavate", δημιουργώντας έτσι κενό στην διατομή.



Εικόνα 21. Έβδομο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη - εκσκαφή θόλου

8) ΑΠΟΤΟΝΩΣΗ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Σε αυτό το στάδιο ξεκινάει η αποτόνωση της βαθμίδας. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στις φάσεις 8 – 13 είναι τα αντίστοιχα που χρησιμοποιήθηκαν στις φάσεις 1 – 7. Έτσι έχουμε και πάλι σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. Στο συγκεκριμένο στάδιο ο λόγος E/E_0 είναι 0,35.

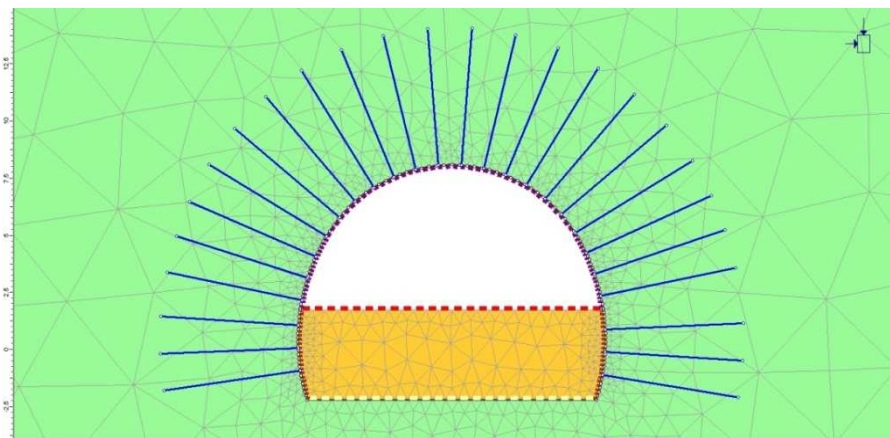


Εικόνα 22. Όγδοο στάδιο εκσκαφής - Αποτόνωση βαθμίδας

9) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Γίνεται προσθήκη στρώματος εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 5cm. Χρησιμοποιείται το ίδιο σκυρόδεμα, όσον αφορά τις ιδιότητες, είναι ωστόσο μειωμένο στο συνολικό πάχος κατά 5cm.

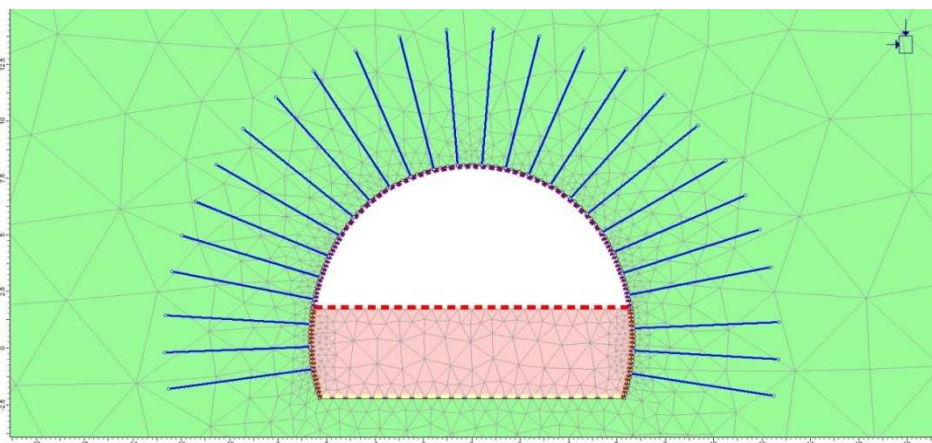
Στο ίδιο βήμα της εκσκαφής έχουμε προσθήκη διατρητικών αγκυρίων, όμοιων με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την άνω ημιδιατομή. Τοποθετήθηκαν τρία αγκύρια από την κάθε μεριά, δηλαδή 6 συνολικά. Η μεταξύ τους απόσταση παραμένει 1m. Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,2$.



Εικόνα 23. Ένατο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη βαθμίδας

10) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

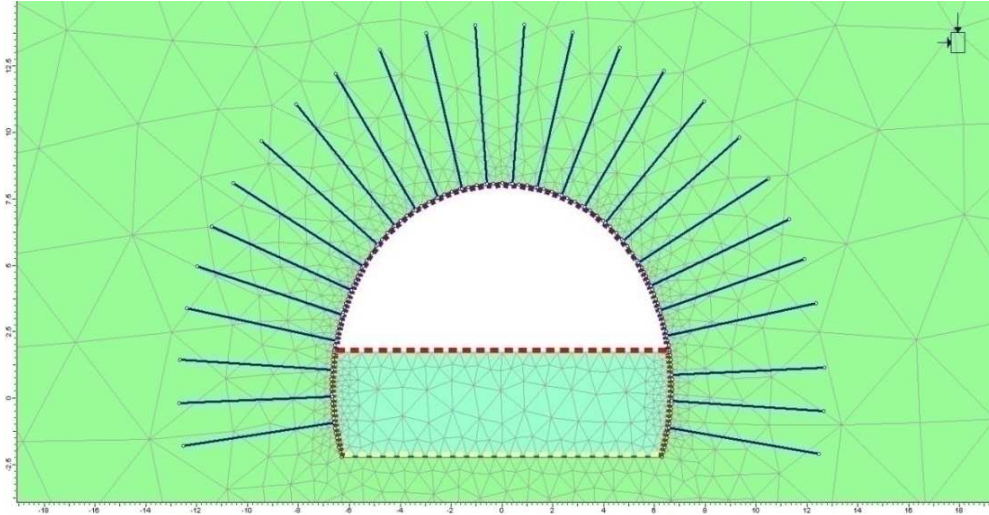
Η υποστήριξη αυξάνεται με στρώμα σκυροδέματος πάχους 10cm. Ακόμη γίνεται χρήση χαλύβδινων πλαισίων, ίδιου τύπου με αυτά της άνω ημιδιατομής. Στο πρόγραμμα “phase” όπως προαναφέρθηκε, γίνεται με “composite liner” αντί για “liner” καθώς έχουμε πάνω από δύο είδη στήριξης σε ένα στάδιο. Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,07$.



Εικόνα 24. Δέκατο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη βαθμίδας

11) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

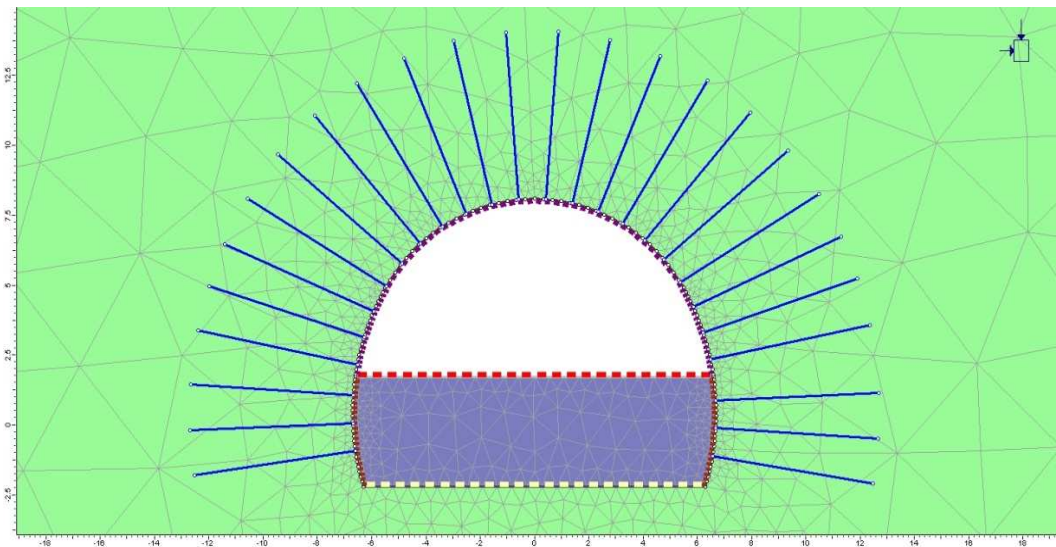
Ακολουθεί επιπρόσθετο στρώμα σκυροδέματος με πάχος 10cm ($10+10+5\text{cm}/30\text{cm}= 0,83$ για το συγκεκριμένο στάδιο). Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,06$.



Εικόνα 25. Ενδέκατο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη βαθμίδας

12) ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ

Στο στάδιο αυτό έχουμε την τελευταία στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους 5cm . Η αποτόνωση συνεχίζεται στο υλικό, έχοντας στο στάδιο αυτό λόγο $E/E_0 = 0,045$.



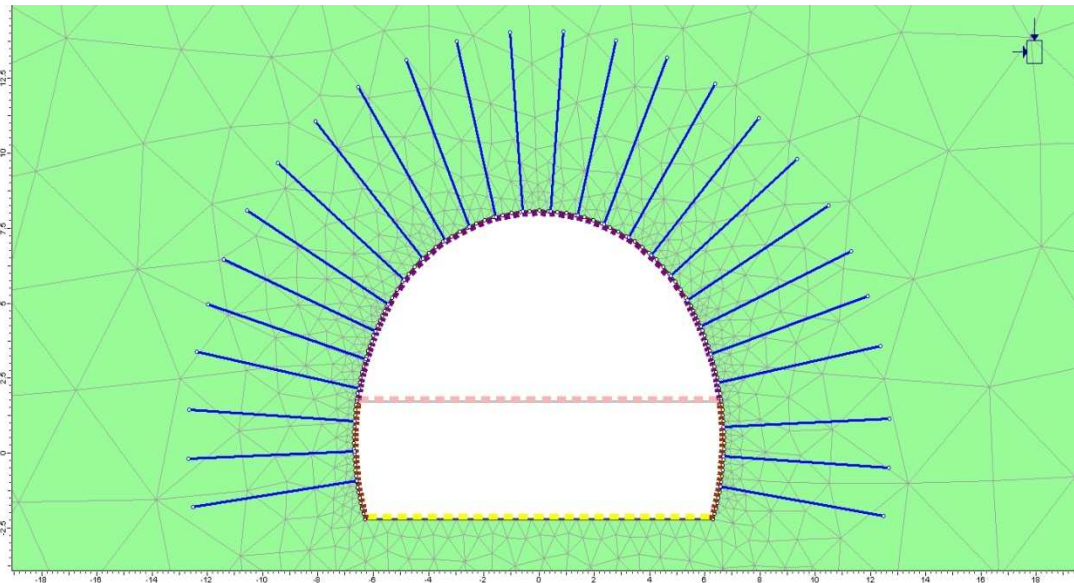
Εικόνα 26. Δωδέκατο στάδιο εκσκαφής - Υποστήριξη βαθμίδας

13) ΤΕΛΙΚΟ ΔΑΠΕΔΟ

Το τελικό δάπεδο αποτελείται από σκυρόδεμα με ιδιότητες ίδιες με το δάπεδο της άνω ημιδιατομής.

Young Modulus : 15.000 MPa , Poisson's ratio : 0,2, έχοντας ωστόσο μικρότερο πάχος, 25 cm.

Στο τελικό στάδιο πραγματοποιείται και η εκσκαφή της βαθμίδας και κατά αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η εκσκαφή όλης της διατομής της σήραγγας.



Εικόνα 27. Δέκατο-τρίτο στάδιο εκσκαφής – Τελικό δάπεδο

5.4. Προσδιορισμός – υπολογισμός των συντελεστών αποτόνωσης

5.4.1. Θεωρητικό μέρος

Διάδραση πετρώματος – στήριξης

Η μετατόπιση των παρειών της σήραγγας συναρτήσεται της απόστασης του σημείου μέτρησης από το σημείο εκσκαφής ακολουθεί σιγμοειδή καμπύλη. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις είναι 25-30% των τελικών. Επίσης, οι καμπύλες προσαρμογής πραγματοποιούνται μεταξύ μιας σταθερής τιμής μετατόπισης και μιας μέγιστης μετατόπισης, δηλαδή αυτήν του ανυποστήρικτου ανοίγματος.

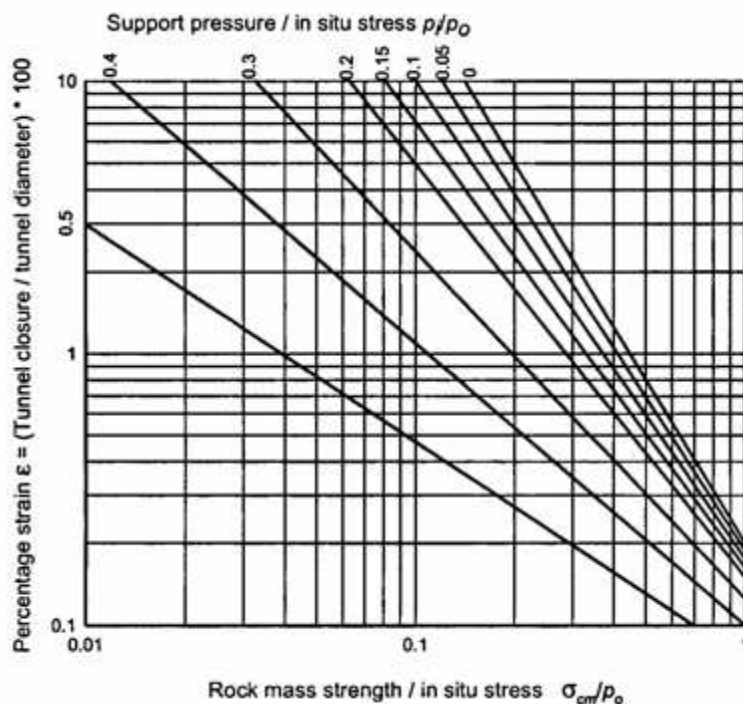
Θεωρώντας x την απόσταση μεταξύ του μετώπου και μιας διατομής σήραγγας, τότε $x < 0$ πριν την εκσκαφή της σήραγγας και $x > 0$ μετά την εκσκαφή της διατομής. Από τους διάφορους μελετητές που προσπάθησαν να δημιουργήσουν καμπύλες μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής του λόγου x/R αυτή του Chern είναι εκείνη η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο, χωρίς η σχέση αυτή να εξαρτάται από το αν η συμπεριφορά του πετρώματος είναι ελαστική ή πλαστική :

$$\delta_i(x) / \delta_{i00} = [1 + \exp(-0,91 * x/R)]^{-1,7}$$

Αντίθετα ο Panet δίνει καμπύλες μετατόπισης κατά μήκος της σήραγγας, οι οποίες εξαρτώνται από τον βαθμό πλαστικότητας του πετρώματος ξ :

$$\delta_i(x) / \delta_{i00} = 0,25 + 0,75 * [1 - (1/1 + \xi * x/0,75 * R)^2]$$

όπου $\xi = \delta_{i00}^{\text{elastic}} / \delta_{i00}^{\text{plastic}} = p_0 * R / 2 * G * \delta_{i00}$, με $x/R \geq 0$

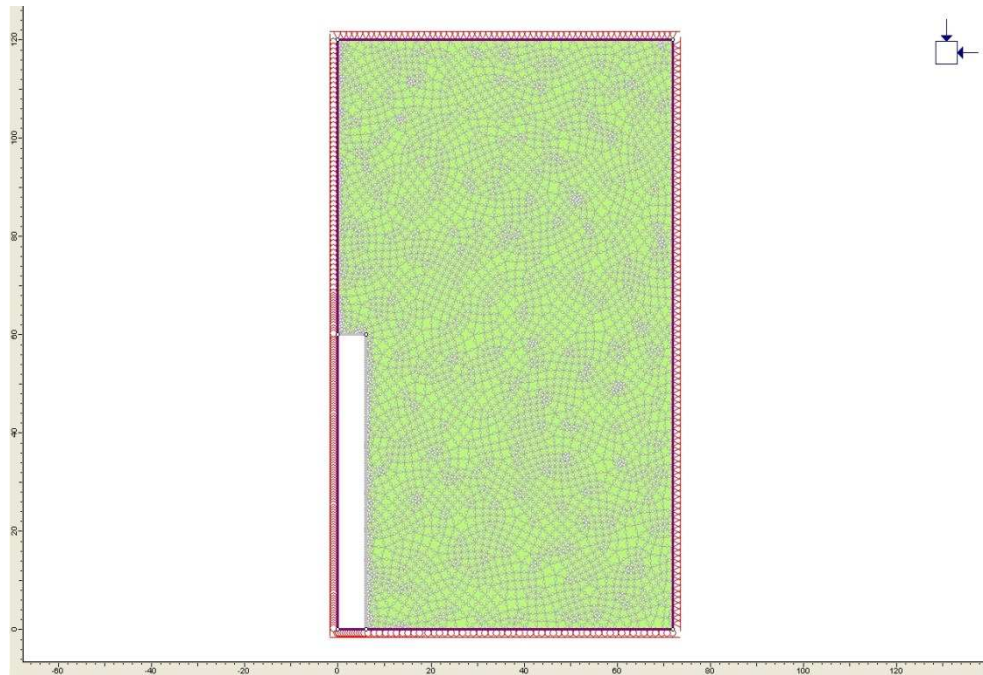


Διάγραμμα 8. Σχέση μέτρου ελαστικότητας E, λόγου ρ/ρ_0 και σ/ρ_0

Κατά τους Brady και Brown η ζώνη επιρροής του μετώπου ισούται με $2,25R$, καθώς από εκεί και μετά οι παραμορφώσεις δεν ξεπερνούν το 5%.

5.4.2 Πειραματικό μέρος - Μοντέλα Αποτόνωσης

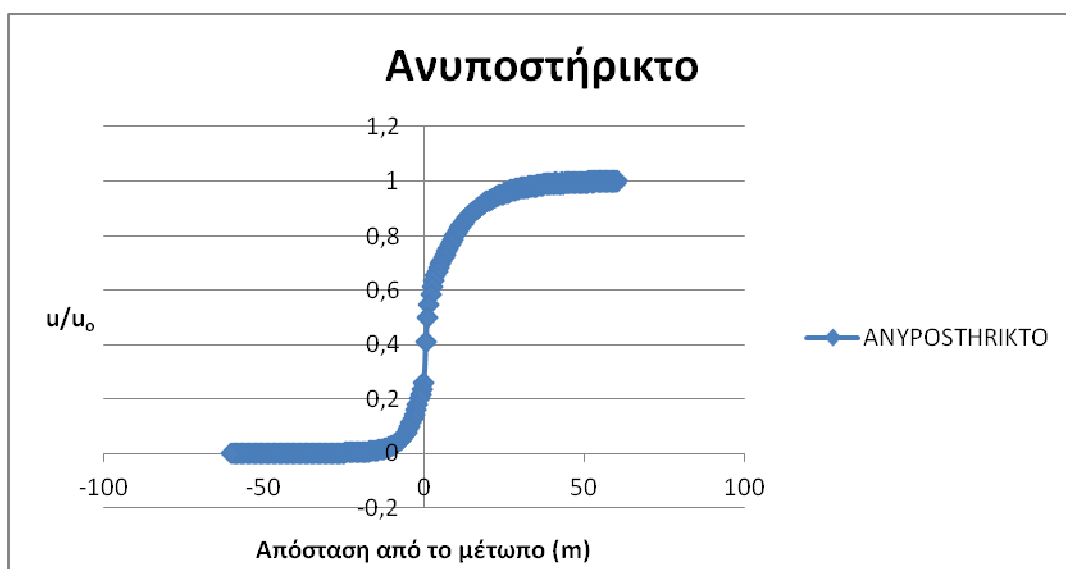
Προκειμένου να προσδιοριστούν οι συντελεστές αποτόνωσης του υλικού της σήραγγας σε κάθε φάση της διάνοιξης ακολουθούμε ορισμένα μοντέλα, με διαφορετική προσέγγιση το καθένα, για καλύτερα αποτελέσματα. Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν ονομάζονται “αξισυμμετρικά”. Από το πρόγραμμα Phase επιλέγουμε κατά σειρά : Analysis → Project Settings → General → Analysis Type → Axisymmetric . Στη συνέχεια επιλέγουμε Boundaries → Add External και κατόπιν επιλέγουμε τις συντεταγμένες της διατομής. Με βάση τις πρότυπες συνθήκες που ισχύουν σε παρόμοιες περιπτώσεις θεωρήσαμε το ύψος της διατομής $20R = 120m$ και το πλάτος $12R = 72m$. Το τμήμα της εκσκαφής έχει ύψος $10R$ και πλάτος R . Οι ιδιότητες του υλικού συμπληρώνονται ομοίως με βάση τα όσα έχουν προαναφερθεί.



Εικόνα 28. Αξισυμετρικό μοντέλο (ανυποστήρικτο)

1) Ανυποστήρικτο

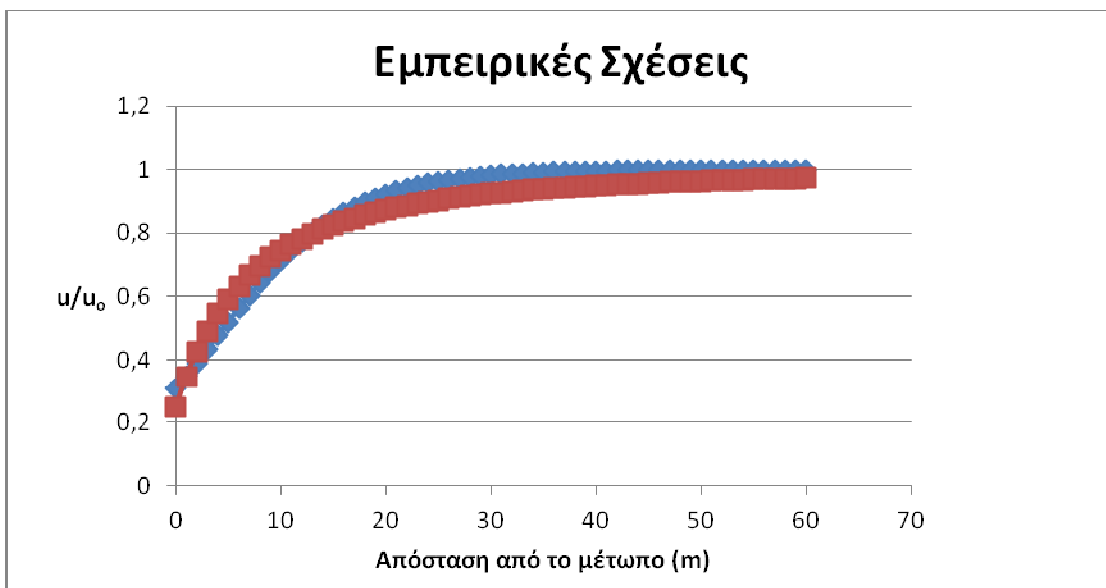
Στην περίπτωση του ανυποστήρικτου δεν υπάρχει κανένα είδος υποστήριξης. Η διάνοιξη της σήραγγας γίνεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη είναι σε αρχική ισορροπία ενώ στην δεύτερη πραγματοποιείται η εκσκαφή. Ο κάρναβος που έχει επιλεγθεί για το συγκεκριμένο μοντέλο είναι 8 noded quadrilaterals και ο αριθμός των mesh elements 1500. Οι μετρήσεις γίνονται για τα 0-60 μέτρα , ανά μέτρο προχώρησης.



Διάγραμμα 9. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u/u_0 και την απόσταση από το μέτωπο στην περίπτωση του ανυποστήρικτου πετρώματος

2) Εμπειρικές Σχέσεις

Ένας άλλος τρόπος για τον υπολογισμό των συντελεστών αποτόνωσης είναι μέσω των εμπειρικών σχέσεων των Panet και Chern . Το τασικό πεδίο p_0 ισούται με 5,59MPa , μέτρο ελαστικότητας $E = 500$, ο λόγος poisson $\nu = 0,35$, η γωνία $\varphi = 27,44$, $R = 6$ μέτρα, θεωρώντας $x = 1 - 60$ για κάθε μέτρο προχώρησης κατά μήκος της εκσκαφής.



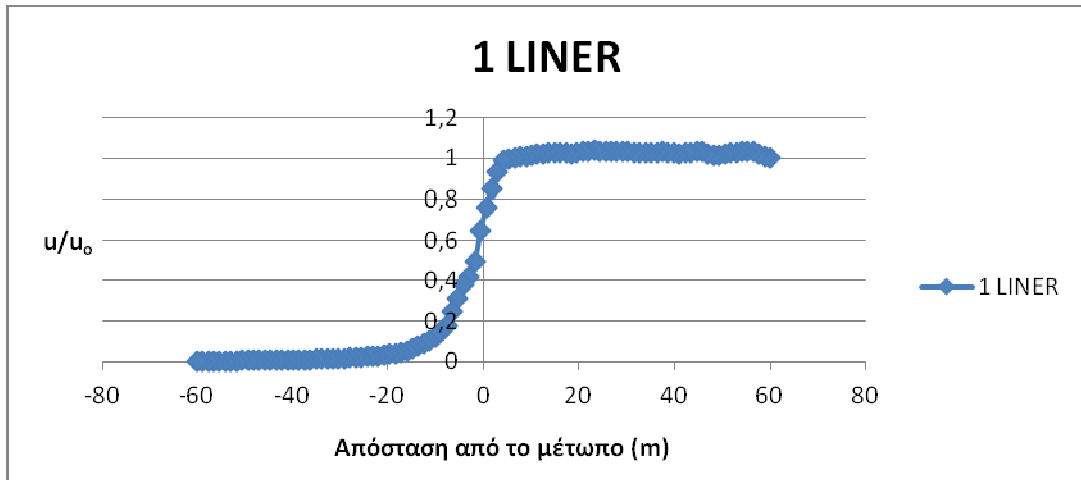
Διάγραμμα 10. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u/u_0 και την απόσταση από το μέτωπο με βάση τις εμπειρικές σχέσεις του Chern(μπλε) και του Panet(κόκκινο).

3) Με προσθήκη εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Στην περίπτωση αυτή ακολουθείται το ίδιο μοντέλο με το ανυποστήρικτο μοντέλο όσον αφορά τη διατομή, έχοντας όμως υποστήριξη από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην φάση της εκσκαφής. Χρησιμοποιείται ο ίδιος τύπος σκυροδέματος σε όλο το μήκος με ιδιότητες Young Modulus : 15.000 MPa

Poisson's ratio : 0,2 - Πάχος : 35cm

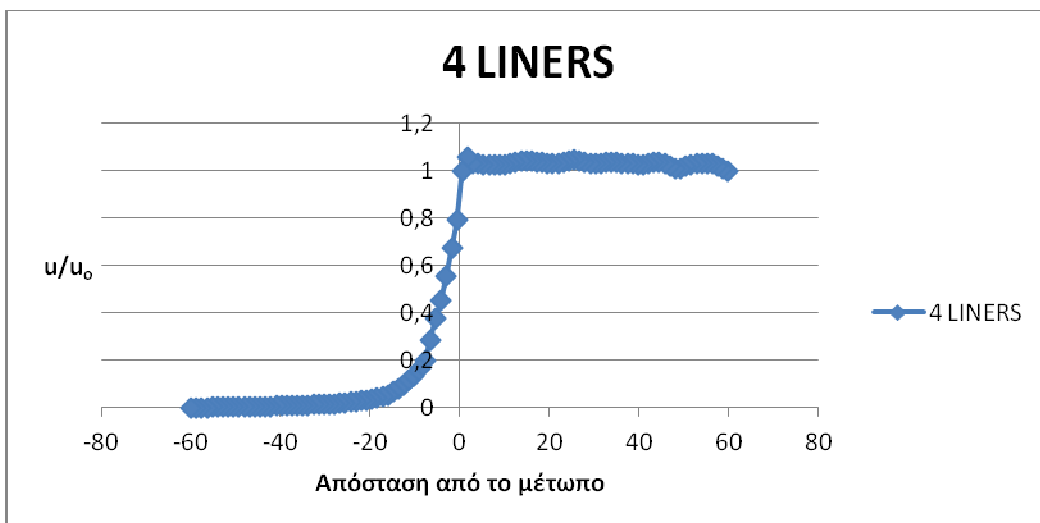
Επίσης υπάρχει διαφοροποίηση στον κάνναβο έχοντας επιλέξει 3 nooded triangles και 100 σε αριθμό, όσον αφορά την πυκνότητα του καννάβου.



Διάγραμμα 11. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u/u_0 και την απόσταση από το μέτωπο στην περίπτωση υποστήριξης με ενός είδους σκυρόδεμα

4) Με προσθήκη εκτοξευόμενου σκυροδέματος, 4 στρώσεων

Έχοντας την ίδια διατομή και τον ίδιο κάνναβο, σε αυτό το μοντέλο το σκυρόδεμα που προστίθεται έχει πάχος 35cm για τα πρώτα 57 μέτρα. Στη συνέχεια έχουμε ελάττωση του πάχους ανά μέτρο προχώρησης με 30cm, 20cm και 10cm αντίστοιχα, διατηρώντας τις ίδιες ιδιότητες.



Διάγραμμα 12. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u/u_0 και την απόσταση από το μέτωπο στην περίπτωση υποστήριξης με τεσσάρων ειδών σκυροδέματος

5) Άλλες μέθοδοι

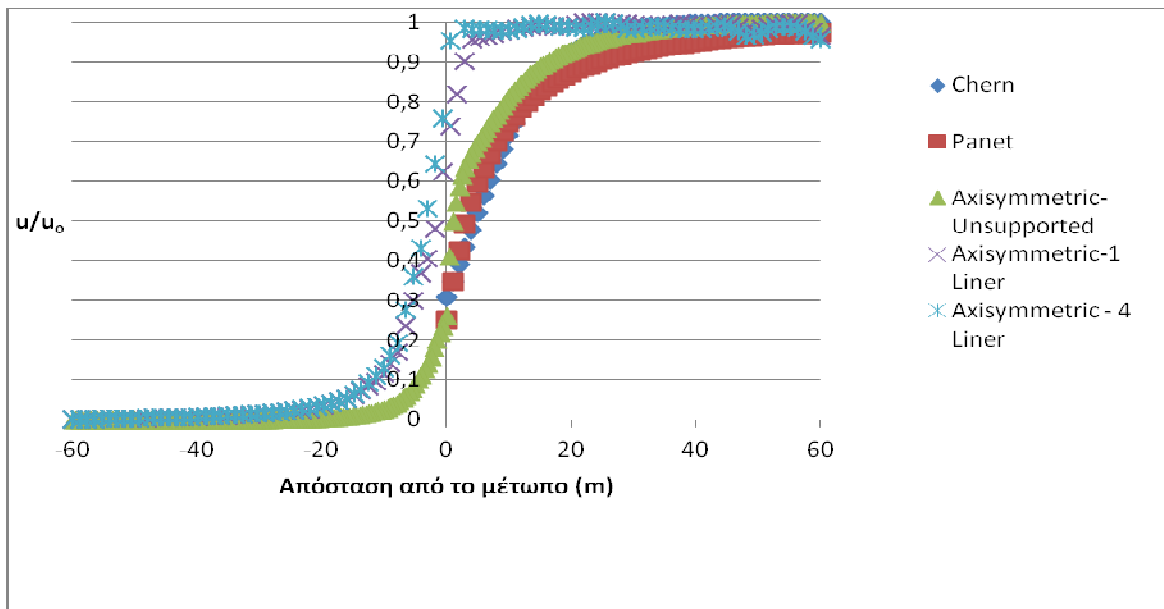
Εκτός των παραπάνω μεθόδων, δοκιμάστηκαν ακόμη δύο μοντέλα για τον καλύτερο προσδιορισμό των συντελεστών αποτόνωσης.

Το ένα περιλαμβάνει διάνοιξη σε 60 διαφορετικά στάδια, δηλαδή ανά ένα μέτρο προχώρησης.

Το δεύτερο αποτελείται από διάνοιξη σε 20 στάδια.

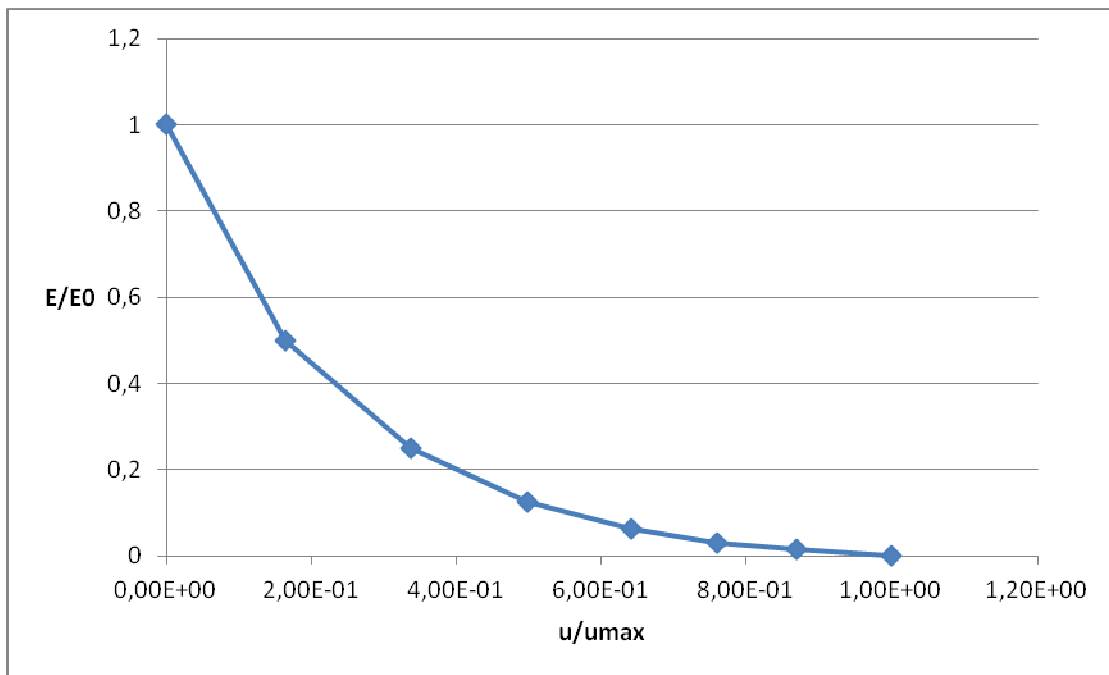
Ωστόσο από τα μοντέλα αυτά δεν προέκυψαν αποτελέσματα που θα βοηθούσαν στο να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι συντελεστές αποτόνωσης.

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση του λόγου u/u_0 στις 4 πρώτες περιπτώσεις.



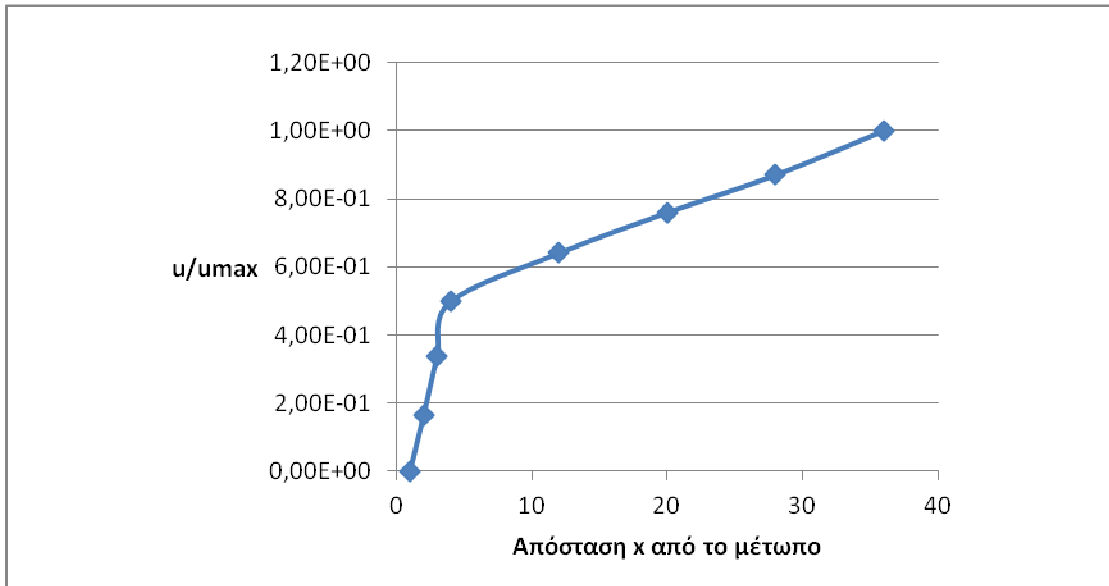
Διάγραμμα 13. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u/u_0 και την απόσταση από το μέτωπο στις τέσσερις προηγούμενες περιπτώσεις συνολικά.

Με την βοήθεια των δύο παρακάτω διαγραμμάτων γίνεται ο προσδιορισμός των λόγων E/E_0 και u/u_{max} , παίρνοντας τις τιμές από το αξισυμμετρικό μοντέλου της περίπτωσης του ανυποστήρικτου πετρώματος. Το μοντέο σύμφωνα με το οποίο προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα αποτελείται από 8 στάδια, χωρίς να υπάρχει υποστήριξη. Στο κάθε στάδιο υπάρχει αποτόνωση με μείωση του μέτρου ελαστικότητας του υλικού. Στη συνέχεια καταγράφεται η μέγιστη μετατόπιση που υπάρχει στην διατομή της σήραγγας, η οποία βρίσκεται στην οροφή και διαιρείται με την μέγιστη που παρατηρείται στο 8^ο στάδιο, η οποία είναι 15cm. Ο λόγος αυτός αντιστοιχίζεται με τον εκάστοτε λόγο E/E_0 στο κάθε στάδιο.



Διάγραμμα 14. Σχέση ανάμεσα στο λόγο E/E_0 και τον λόγο u / u_{max}

Το επόμενο διάγραμμα προκύπτει αντιστοιχίζοντας τους λόγους u/u_{max} με την απόσταση από το μέτωπο. Λήφθηκε υπ'όψιν περιβάλλον πέτρωμα σε απόσταση $6R = 36m$. Έτσι πήραμε με βήμα προχώρησης 1 μέτρο : 1, 2, 3 και 4 μέτρα απόσταση για τα πρώτα 4 στάδια. Μετέπειτα το βήμα προχώρησης αυξήθηκε στα 8 μέτρα, παίρνοντας τις τιμές 12, 20, 28 και 36 μέτρα απόσταση από το μέτωπο.



Διάγραμμα 15. Σχέση ανάμεσα στο λόγο u / u_{\max} και την απόσταση από το μέτωπο

Θεωρήσαμε το “ανυποστήρικτο” ως το πιο αξιόπιστο μοντέλο για να γίνει ο προσδιορισμός των συντελεστών αποτόνωσης και έτσι παίρνουμε τις τιμές :

Φάση	Απόσταση από το μέτωπο (m)	u / u_{\max}	E / E_0
1			
2	0	0,26	0,35
3	0,5	0,41	0,2
4	2,5	0,61	0,07
5	3,5	0,65	0,06
6	4,5	0,68	0,045
7			
8	0	0,26	0,35
9	0,5	0,41	0,2
10	2,5	0,61	0,07
11	3,5	0,65	0,06
12	4,5	0,68	0,045
13			

Πίνακας 11. Οι μεταβολές των u/u_{\max} , E/E_0 συναρτήσει της απόστασης κατά την διάρκεια των 13 σταδίων.

Καταυτόν τον τρόπο το μέτρο ελαστικότητας το οποίο αποτελεί τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει τους συντελεστές αποτόνωσης θα είναι κατά την διάρκεια διάνοιξης των φάσεων

Στάδιο	1	567 MPa
	2	198,5 MPa
	3	113,4 MPa
	4	39,7 MPa
	5	34 MPa
	6	25,5 MPa
	7	(εκσκαφή)
	8	567 MPa
	9	198,5 MPa
	10	113,4 MPa
	11	39,7 MPa
	12	34 MPa
	13	(εκσκαφή)

Πίνακας 12. Οι συντελεστές αποτόνωσης των 13 σταδίων

5.5 Σχεδιασμός της διατομής της σήραγγας δύο κλάδων

5.5.1. Απόσταση κλάδω 38m

Για την κατασκευή δύο κλάδων στο πρόγραμμα Phase δημιουργούμε έναν δεύτερο κλάδο , όμοιο με τον αρχικό και τον τοποθετούμε σε απόσταση 38 μέτρων από τα κέντρα. Η προσθήκη οπλισμού , σκυροδέματος , αγκυρίων και πλαισίων ακολουθεί ακριβώς την ίδια σειρά και τον ίδιο τρόπο εγκατάστασης με τον πρώτο κλάδο. Ο συνολικός αριθμός σταδίων πραγματοποίησης της εκσκαφής γίνεται 25 (13 στον πρώτο και 12 στον δεύτερο), καθώς η αρχική ισορροπία συναντάται μόνο στην αρχή.

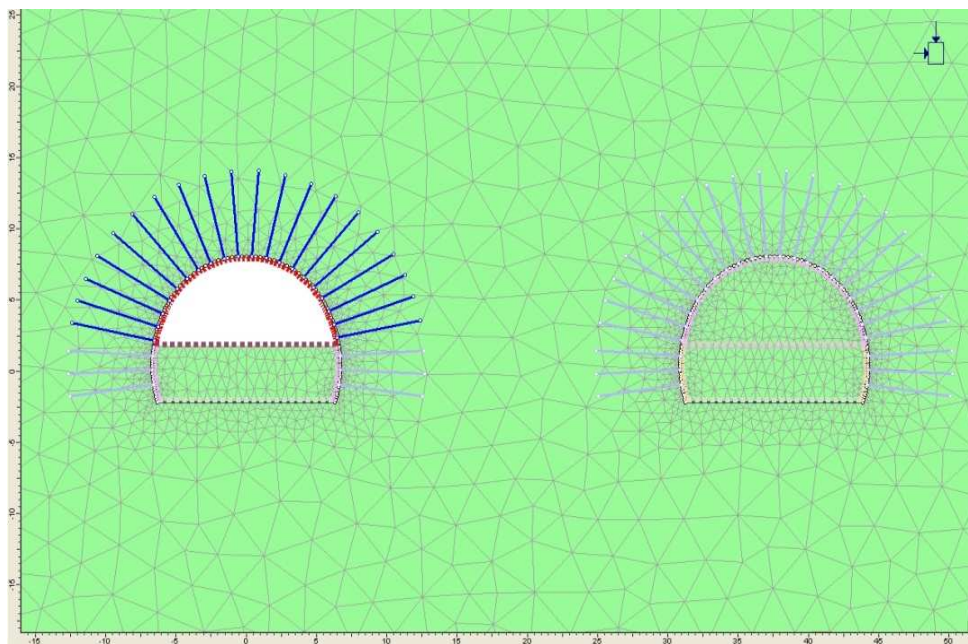
Οι συντελεστές αποτόνωσης που εφαρμόστηκαν στον ένα κλάδο εφαρμόζονται αντίστοιχα και στον δεύτερο κι έτσι έχουμε :

Στάδιο	E/E ₀
1	567 MPa
2	198,5 MPa
3	113,4 MPa
4	39,7 MPa
5	34 MPa
6	25,5 MPa
7	(εκσκαφή)
8	567 MPa
9	198,5 MPa
10	113,4 MPa
11	39,7 MPa
12	34 MPa
13	(εκσκαφή)
14	567 MPa
15	198,5 MPa

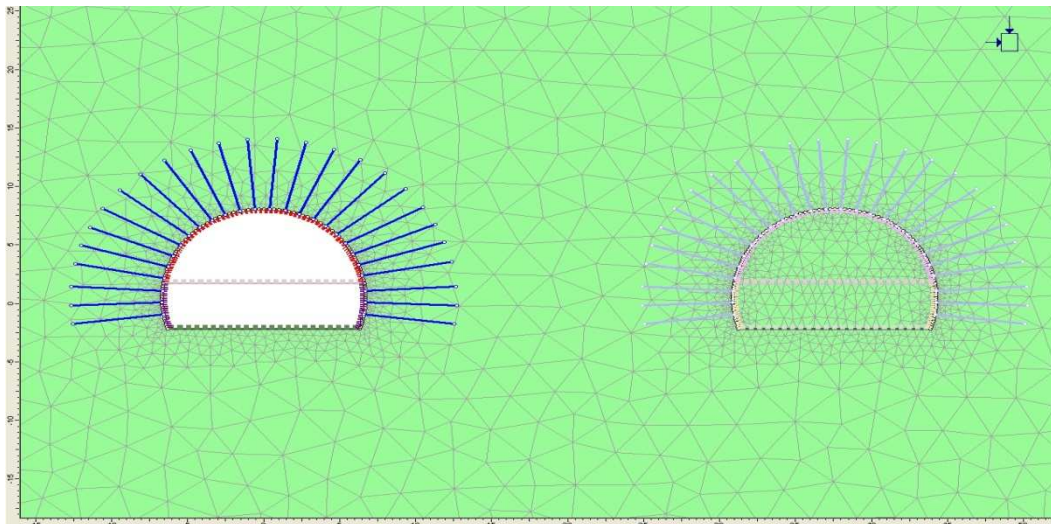
16	113,4 MPa
17	39,7 MPa
18	34 MPa
19	(εκσκαφή)
20	567 MPa
21	198,5 MPa
22	113,4 MPa
23	39,7 MPa
24	34 MPa
25	(εκσκαφή)

Πίνακας 13. Οι συντελεστές αποτόνωσης των 25 σταδίων

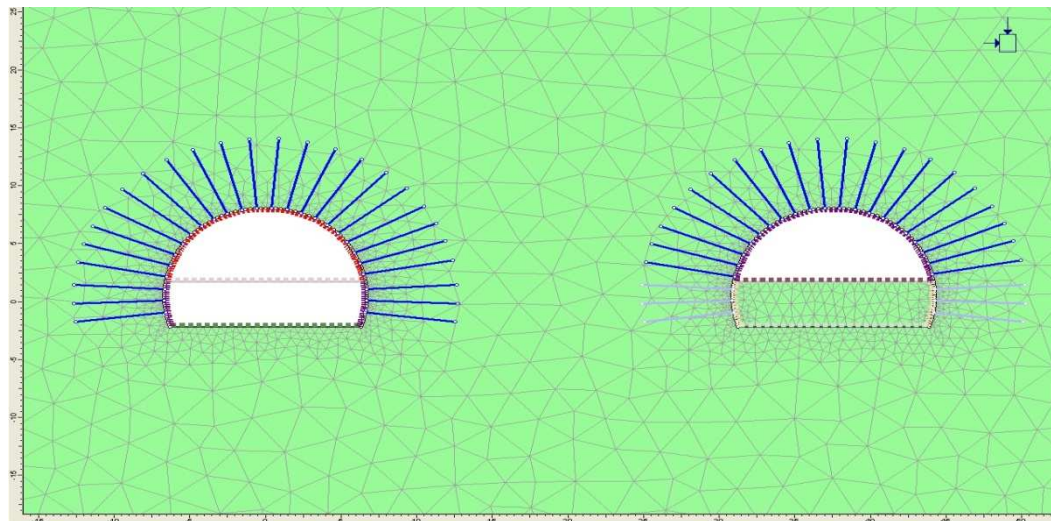
Επειδή όπως αναφέρθηκε τα στάδια μετά το 13^ο επαναλαμβάνονται γίνεται απλή αναφορά των σημαντικότερων σταδίων όσον αφορά τους δύο κλάδους.



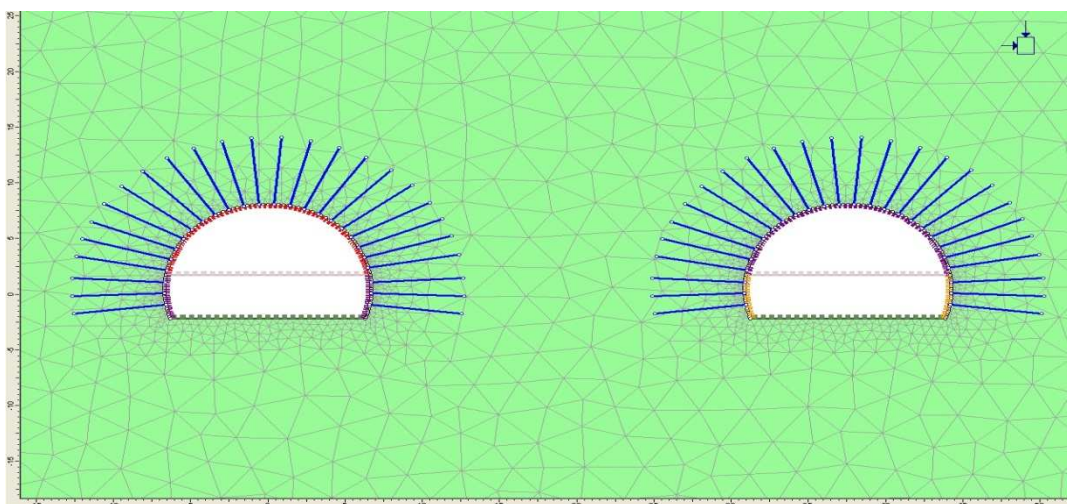
Εικόνα 29 . Στάδιο 7 της εκσκαφής – Διάνοιξη της άνω ημιδιατομής του αριστερού κλάδου



Εικόνα 30. Στάδιο 13 της εκσκαφής – Διάνοξη της βαθμίδας του αριστερού κλάδου



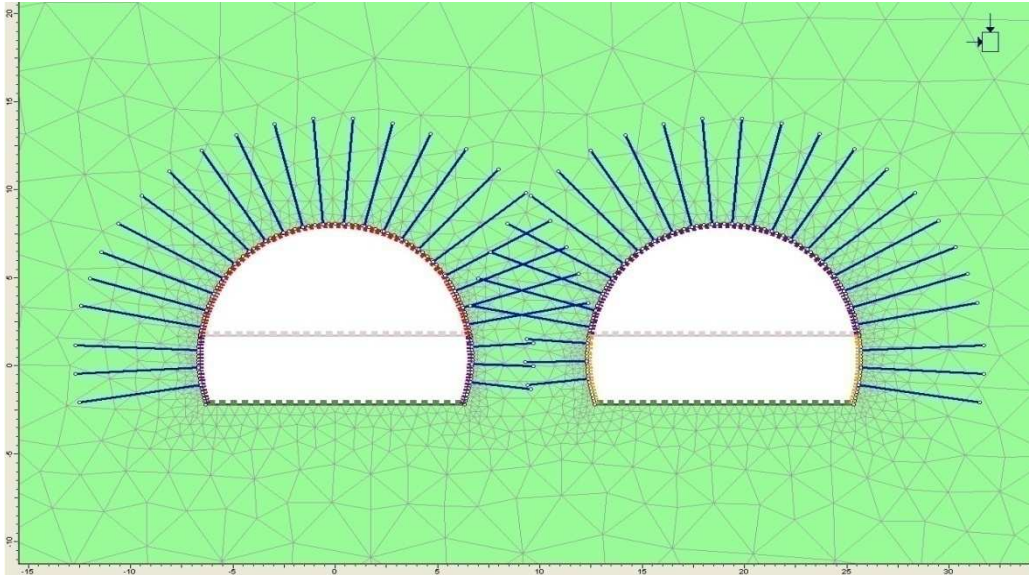
Εικόνα 31. Στάδιο 19 της εκσκαφής – Διάνοξη της άνω ημιδιατομής του δεξιού κλάδου



Εικόνα 32. Στάδιο 25 της εκσκαφής – Διάνοξη της βαθμίδας του δεξιού κλάδου

5.5.2. Απόσταση κλάδων 19m

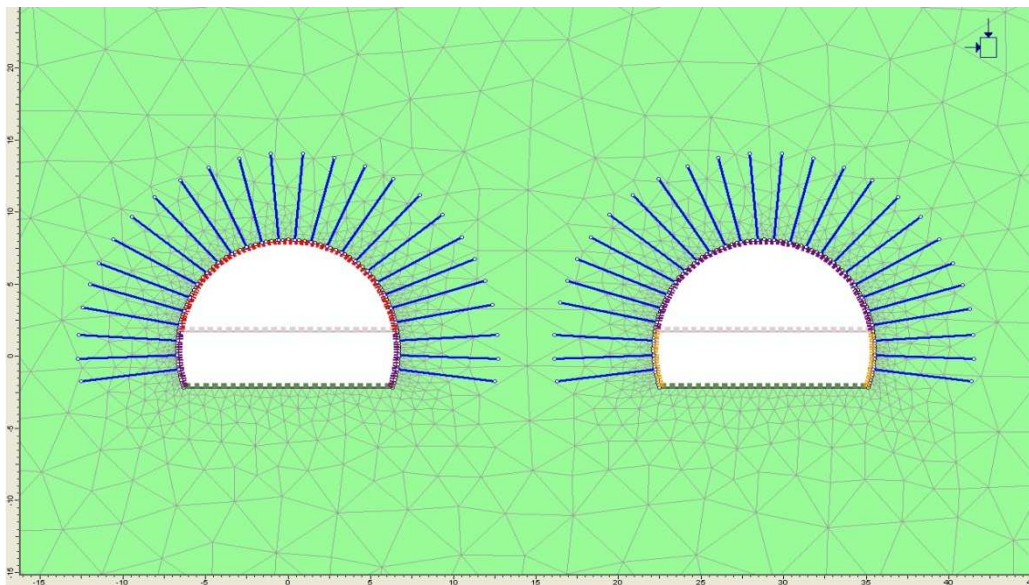
Κατά τον ίδιο τρόπο κατασκευάζουμε το ίδιο μοντέλο , μεταβάλλοντας την ενδιάμεση απόσταση των δυο κλάδων στα 19 μέτρα (50% του αρχικού μήκους).



Εικόνα 33. Στάδιο 25 της εκσκαφής – Διάνοιξη της βαθμίδας του δεξιού κλάδου (19m)

5.5.3. Απόσταση κλάδων 28,5m

Αντίστοιχα δημιουργούμε ένα μοντέλο , του οποίου η απόσταση μεταξύ των κλάδων είναι 28,5 μέτρα (75% του αρχικού μήκους).



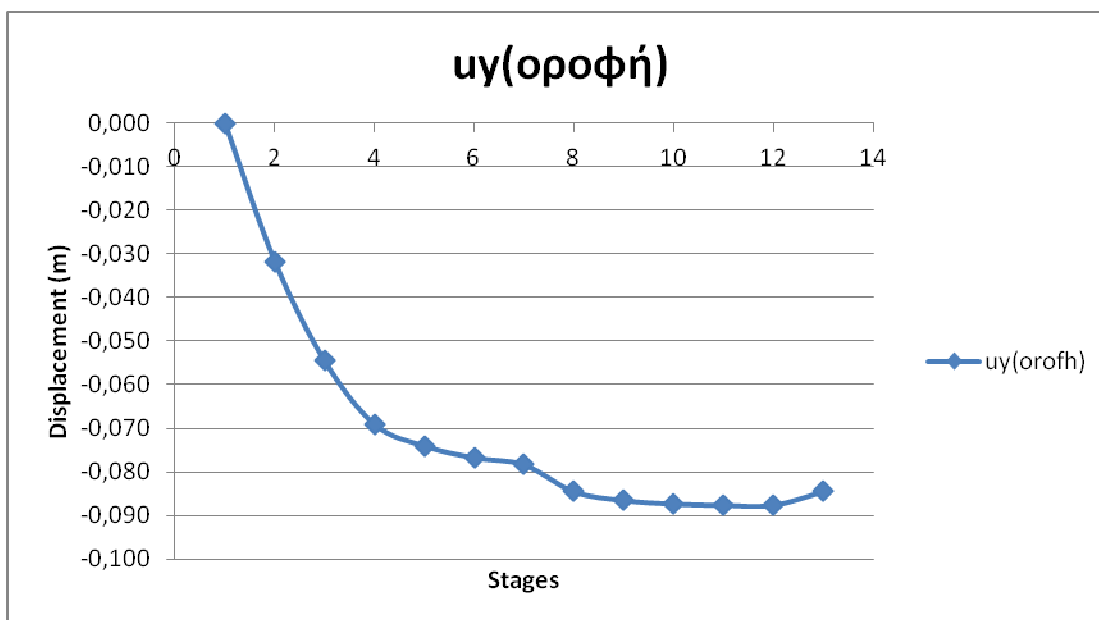
Εικόνα 34. Στάδιο 25 της εκσκαφής – Διάνοιξη της βαθμίδας του δεξιού κλάδου (28,5m)

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

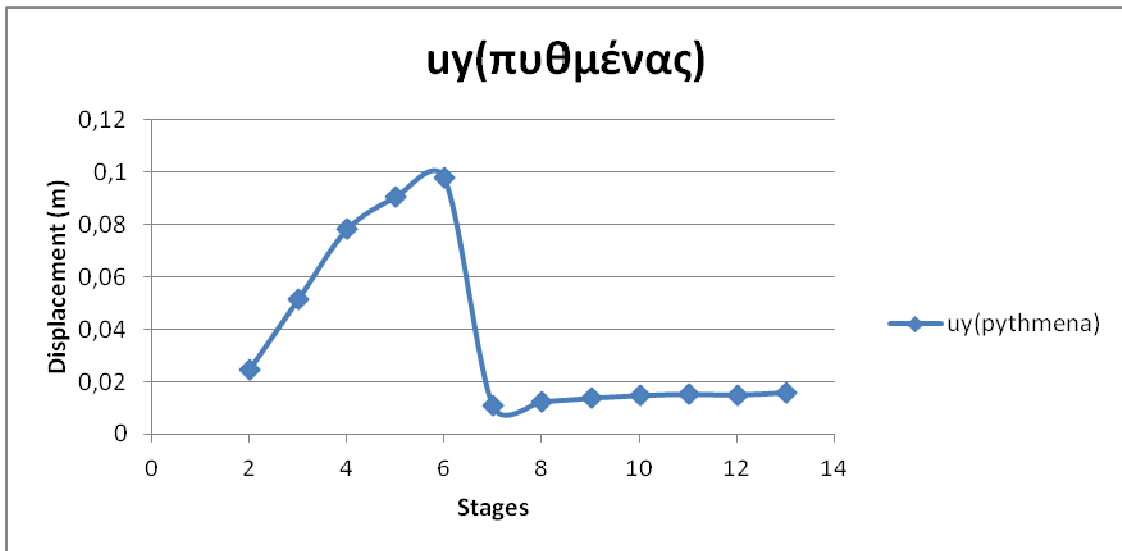
6.1. Αποτελέσματα ενός κλάδου

Από την επίλυση του μοντέλου για τον ένα κλάδο της σήραγγας στο πρόγραμμα Phase II παίρνουμε αποτελέσματα σχετικά με τις κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις (displacements), την αξονική δύναμη (axial force) και τη ροπή κάμψης (bending moment) στην επένδυση. Τα στοιχεία αυτά αποσκοπούν στην καλύτερη ερμηνεία της συμπεριφοράς της σήραγγας. Επίσης περιλαμβάνονται εικόνες της αξονικής δύναμης, της ροπής κάμψης καθώς και των αστοχούντων σημείων στο τελευταίο στάδιο.

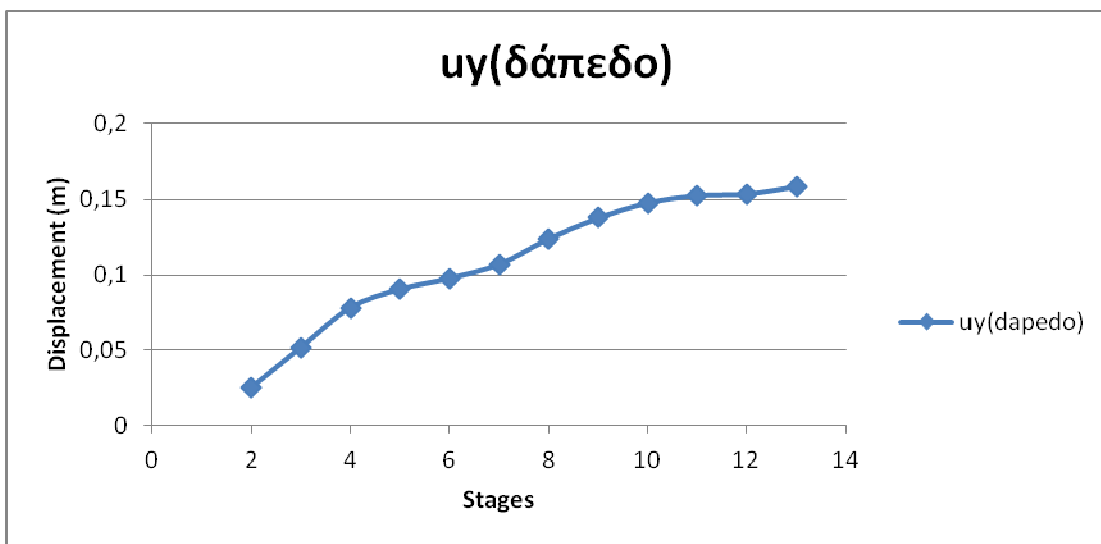
6.1.1. Μετατοπίσεις



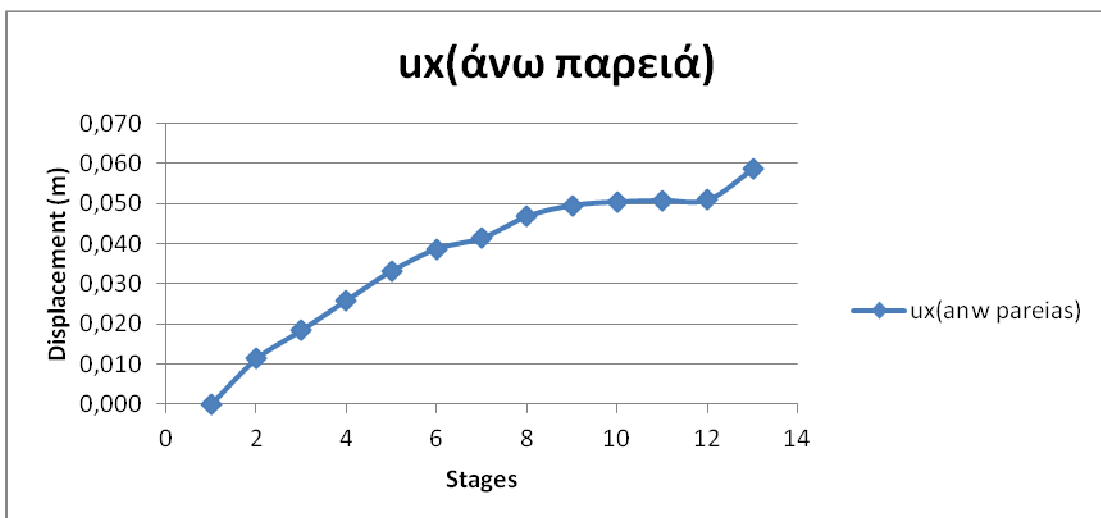
Διάγραμμα 16. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



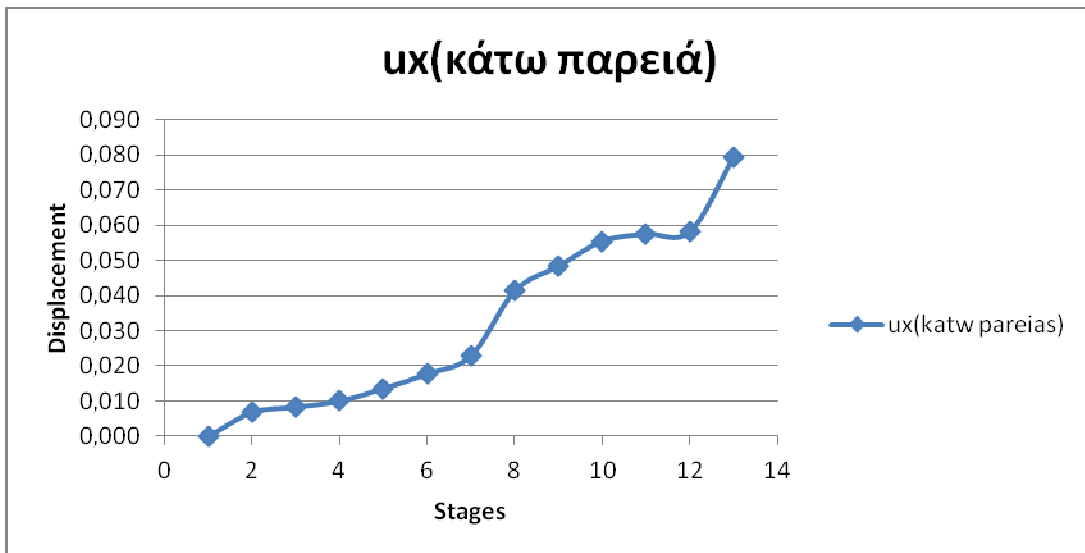
Διάγραμμα 17. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



Διάγραμμα 18. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



Διάγραμμα 19. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω παρειά

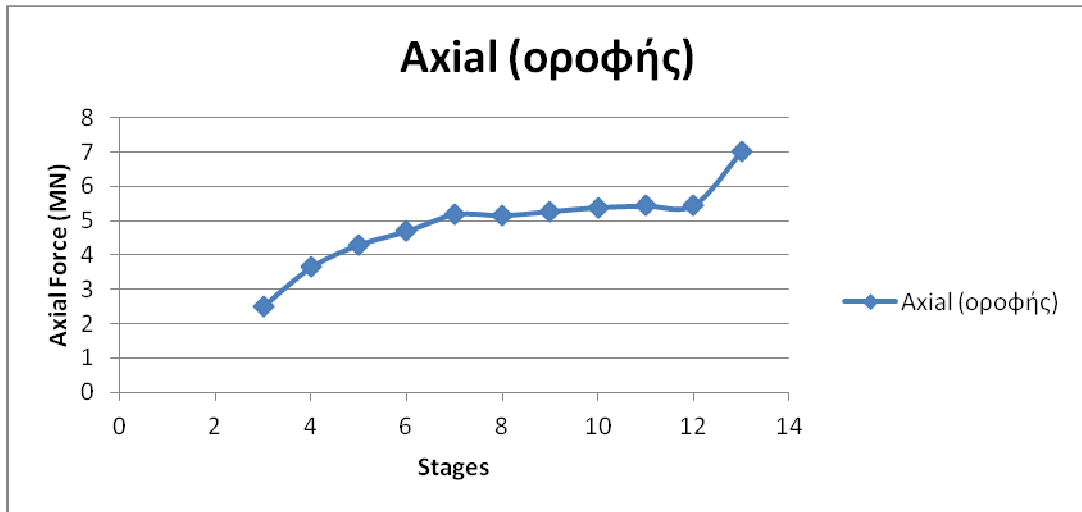


Διάγραμμα 20. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω παρειά

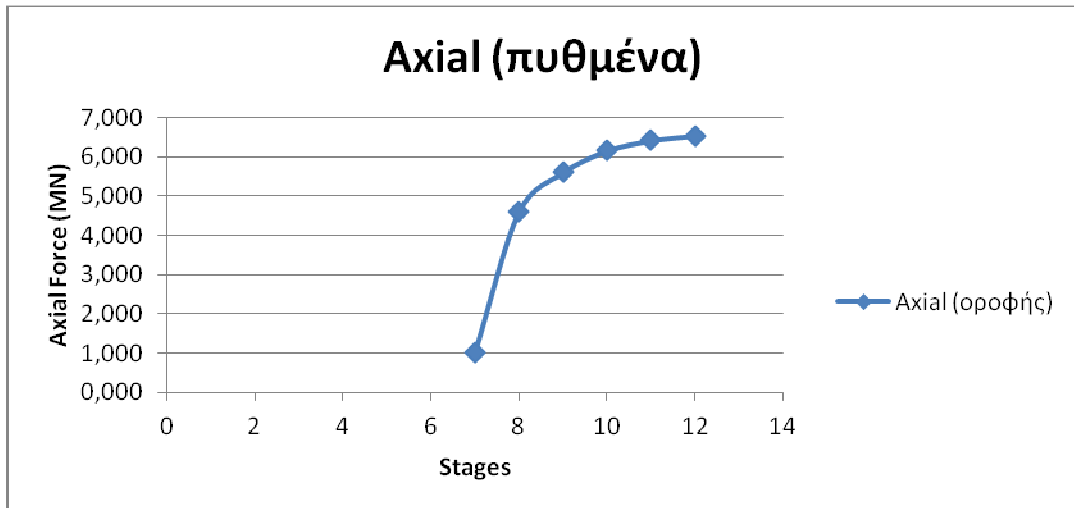
Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι :

- Η κατακόρυφη μετατόπιση στο σημείο που βρίσκεται στο μέσο του θόλου παρατηρούμε ότι μειώνεται όσο προχωράει η εκσκαφή, ωστόσο η μεταβολή αυτή μετριέται κατά απόλυτη τιμή και έτσι υπάρχει αύξηση των μετατοπίσεων.
- Αντίθετα, στο δάπεδο της Α' φάσης που χωρίζει ουσιαστικά την άνω διατομή από την βαθμίδα, παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων , μέχρι το στάδιο της εκσκαφής την άνω ημιδιατομής, όπου και υπάρχει σημαντική μείωση τους και στη συνέχεια σταθεροποίηση τους.
- Όσον αφορά το δάπεδο, εκεί έχουμε σταδιακή αύξηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων που φτάνει μέχρι και τα 16 εκατοστά στο στάδιο της πλήρους εκσκαφής.
- Σταδιακή αύξηση των οριζόντιων αυτή τη φορά μετατοπίσεων έχουμε και στις παρειές , τόσο στο άνω τμήμα όσο και στο κάτω. Επειδή δεν έχουμε άλλο κλάδο οι τιμές είναι σχεδόν ίδιες για την αριστερή και την δεξιά πλευρά.

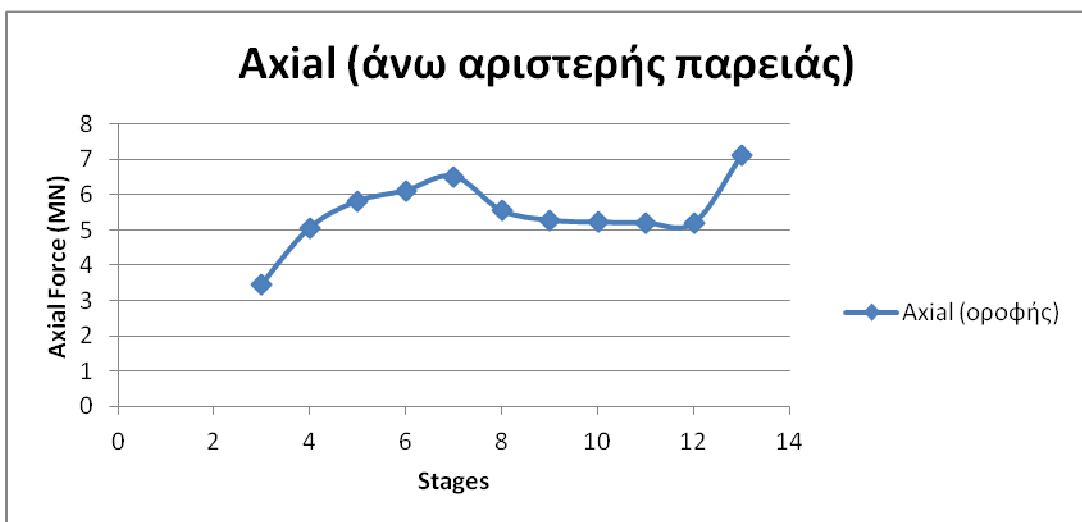
6.1.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



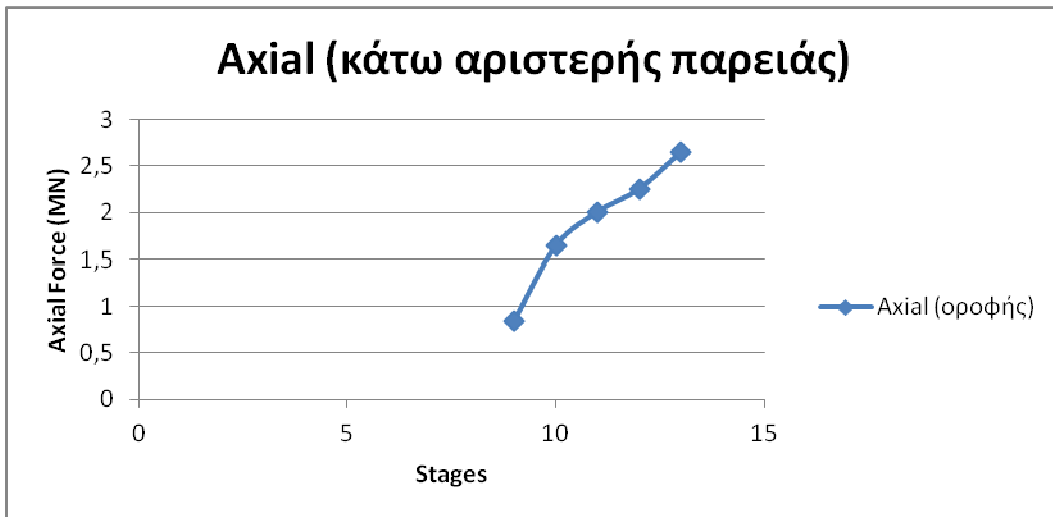
Διάγραμμα 21. Αξονική δύναμη στην οροφή



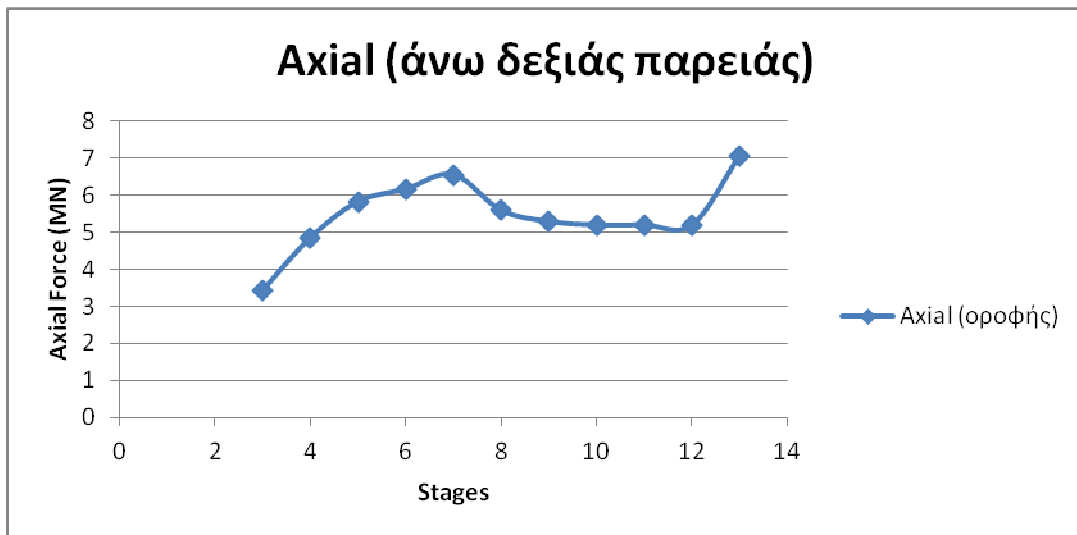
Διάγραμμα 22. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



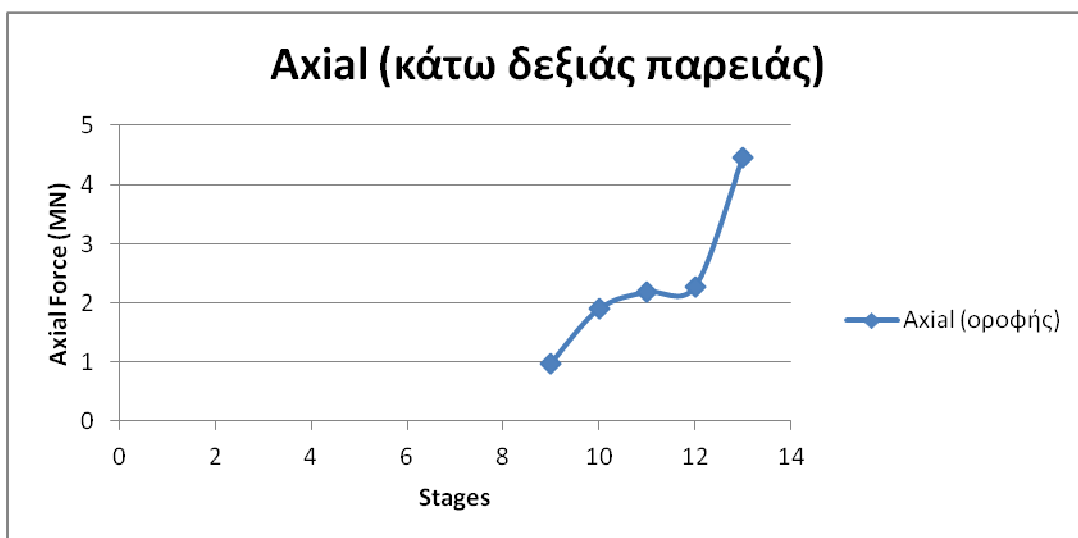
Διάγραμμα 23. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



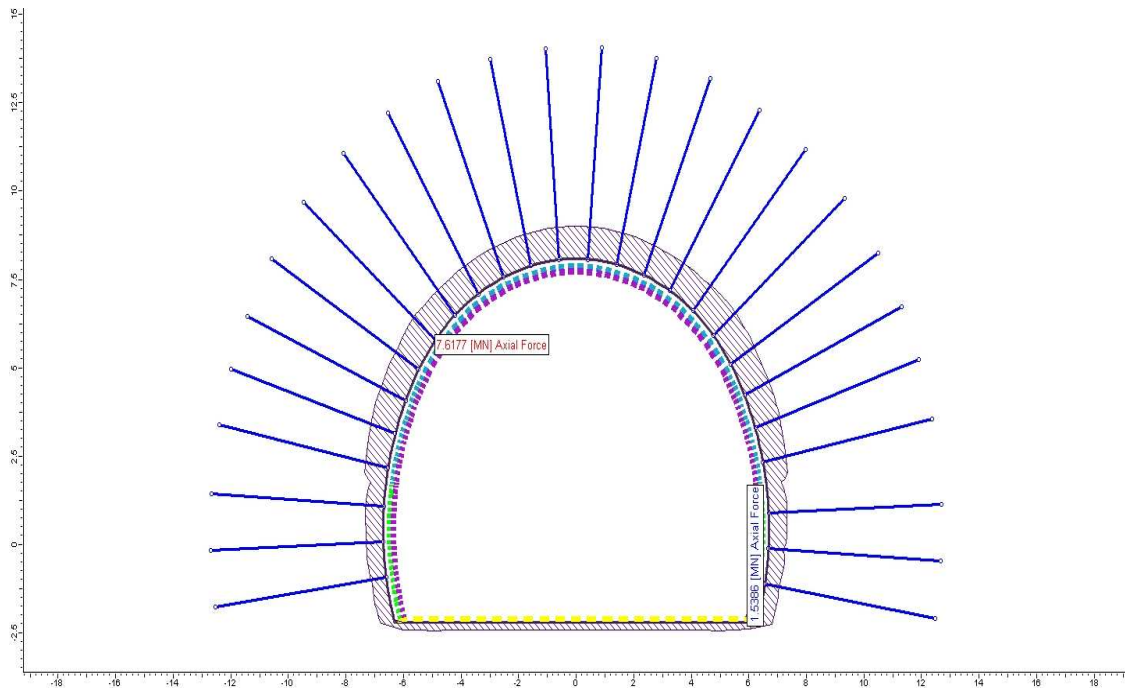
Διάγραμμα 24. Αξονική δύναμη κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 25. Αξονική δύναμη άνω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 26. Αξονική δύναμη κάτω δεξιά παρειά

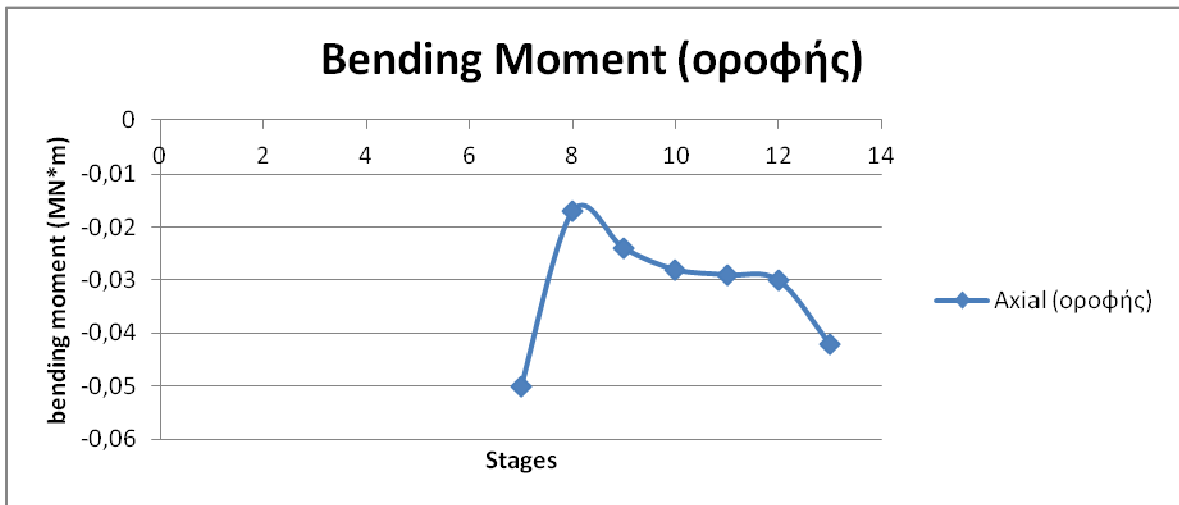


Εικόνα 35. Κατανομή αξονικών δυνάμεων στην διατομή στο τελευταίο στάδιο

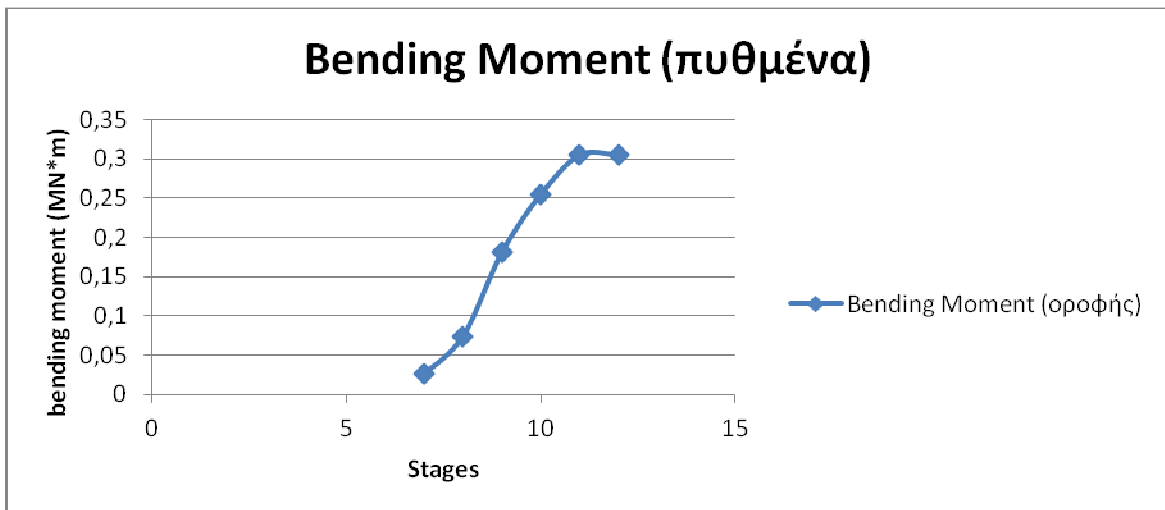
Από τα προηγούμενα διαγράμματα προκύπτει ότι :

- Στην οροφή , η αξονική δύναμη αυξάνεται σταδιακά, αποκτώντας την μέγιστη τιμή της στο 13^ο στάδιο, όπου γίνεται η εκσκαφή και της βαθμίδας.
- Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και τα σημεία πάνω στον πυθμένα.
- Οι αξονικές δυνάμεις στην παρειά της άνω ημιδιατομή παρουσιάζουν αύξηση μέχρι το 7^ο στάδιο και τη εκσκαφή του τμήματος, ενώ στη συνέχεια υπάρχει μια μικρή αποτόνωση, με μείωση των δυνάμεων, καταλήγοντας στην μέγιστη τιμή τους στο τελευταίο στάδιο.
- Στα σημεία της κάτω παρειάς, η αύξηση των αξονικών δυνάμεων γίνεται ομαλά όπως στην περίπτωση της οροφής.

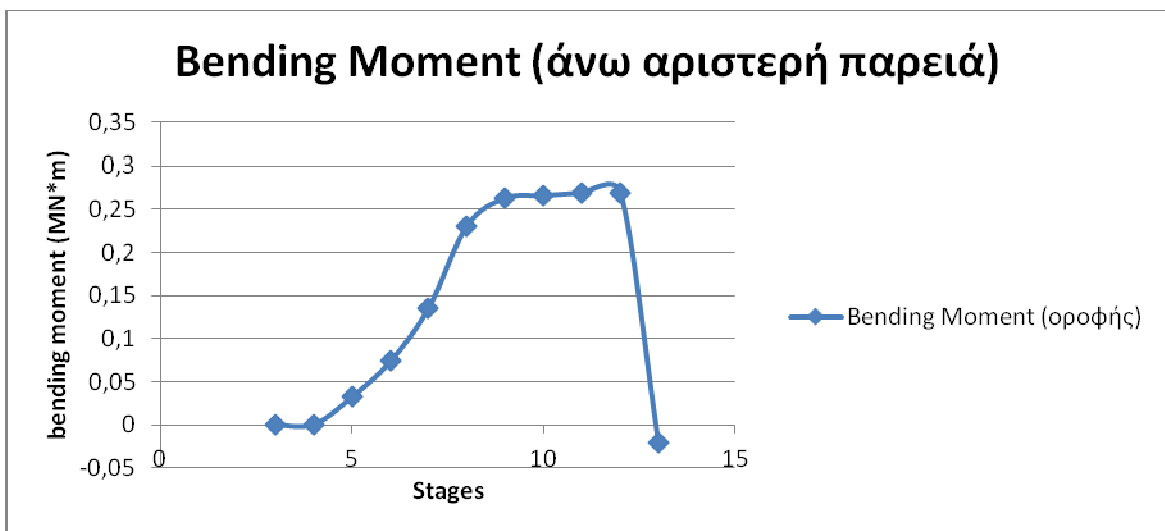
6.1.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



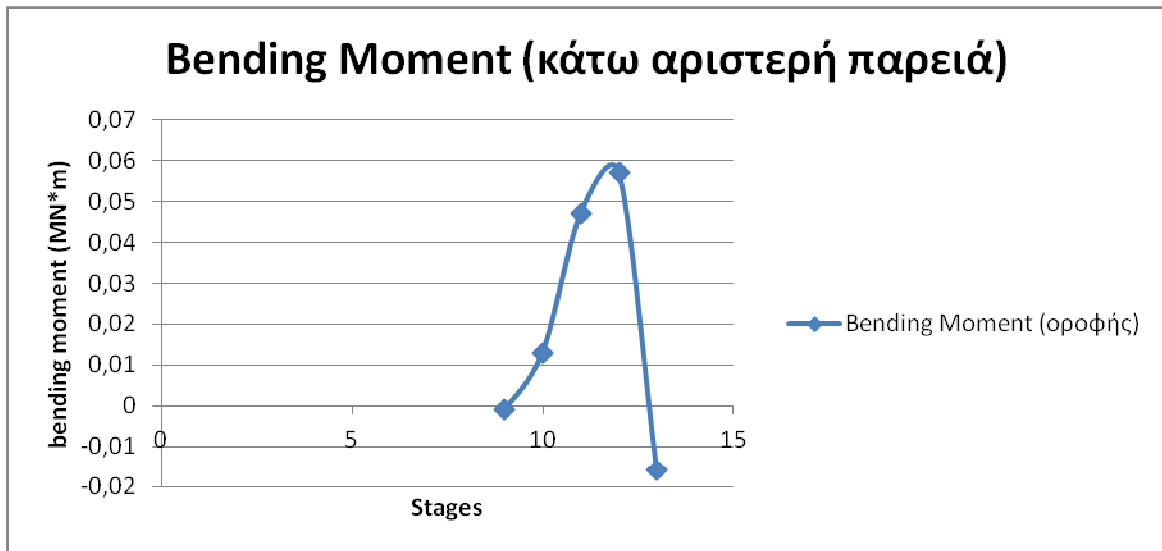
Διάγραμμα 27. Ροπή κάμψης στην οροφή



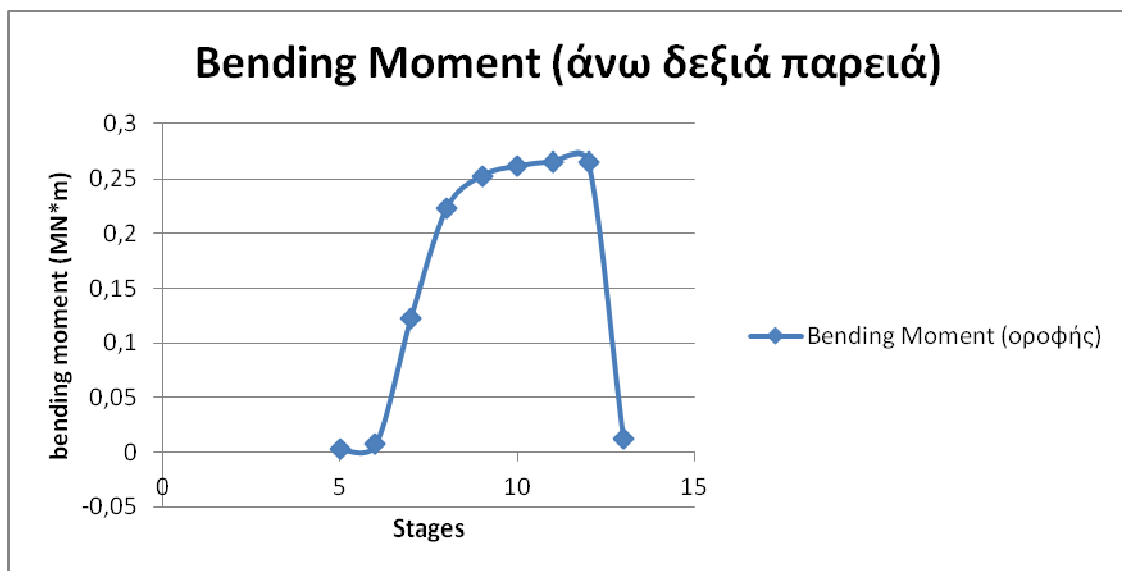
Διάγραμμα 28. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



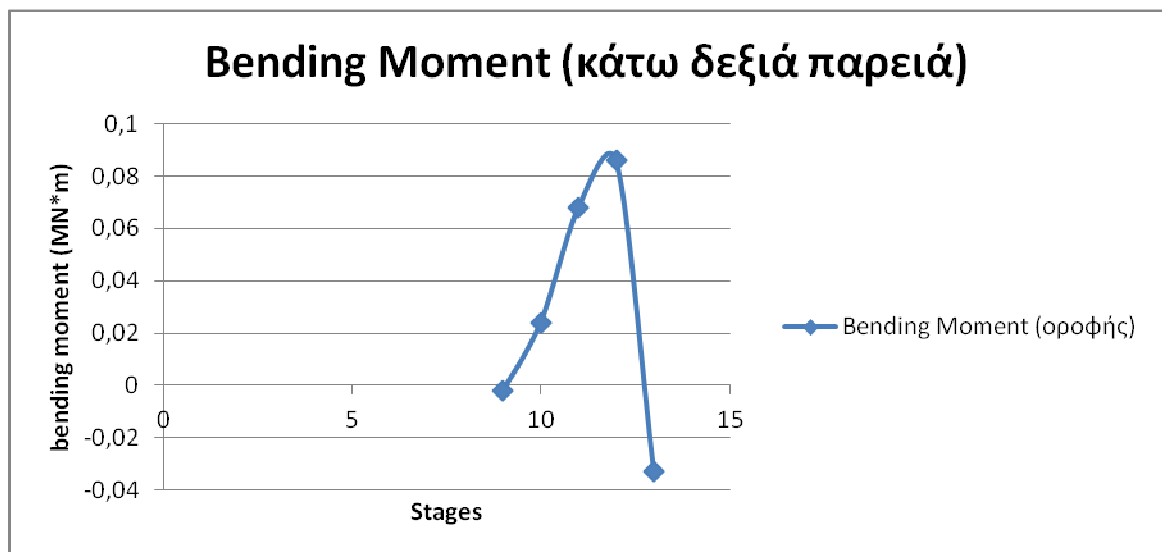
Διάγραμμα 29. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



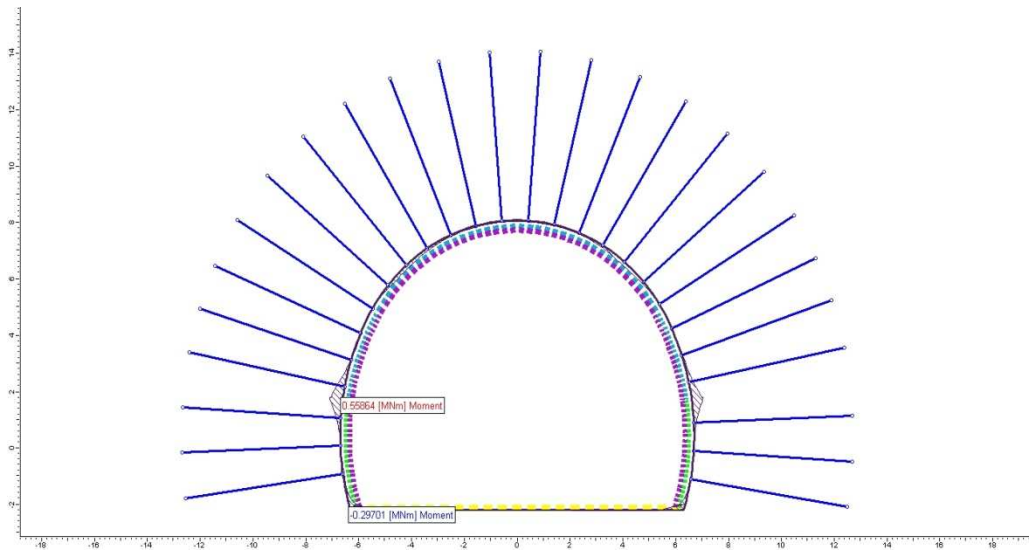
Διάγραμμα 30. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 31. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά



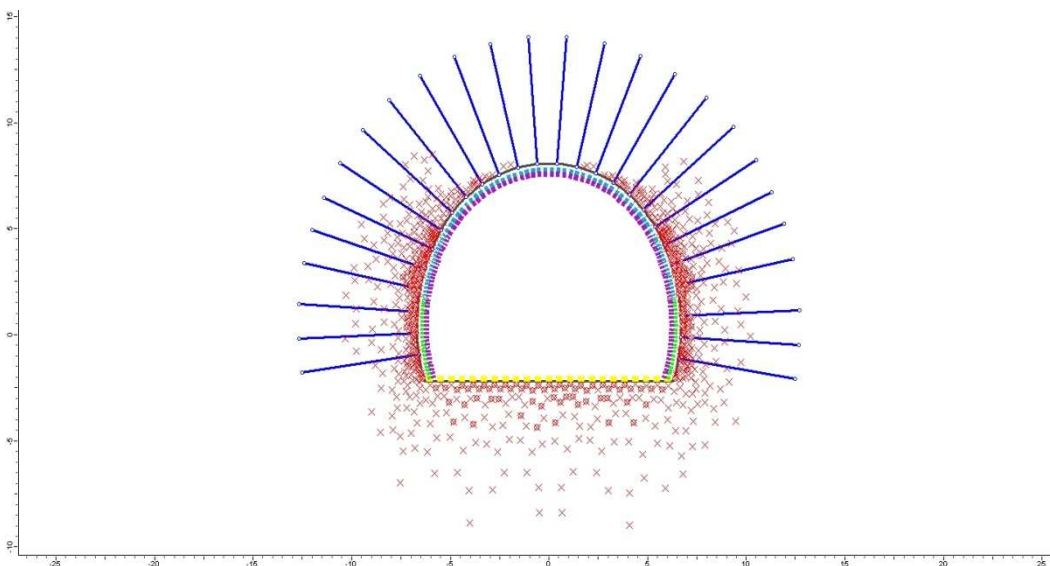
Διάγραμμα 32. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά



Εικόνα 36. Κατανομή ροπών κάμψης στην διατομή

Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι :

- Η ροπή κάμψης στην οροφή παραμένει αμετάβλητη μέχρι το στάδιο 7 όπου γίνεται η εκσκαφή και φτάνει την τιμή 0,05 MNm.
- Στον πυθμένα η ροπή κάμψης αυξάνεται με σταθερό βαθμό
- Στις παρειές , όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις η ροπή κάμψης εμφανίζεται στο 7^ο στάδιο και αυξάνεται μέχρι το 12^ο , αφού κατά την εκσκαφή και της βαθμίδας σημειώνεται μηδενισμός της.

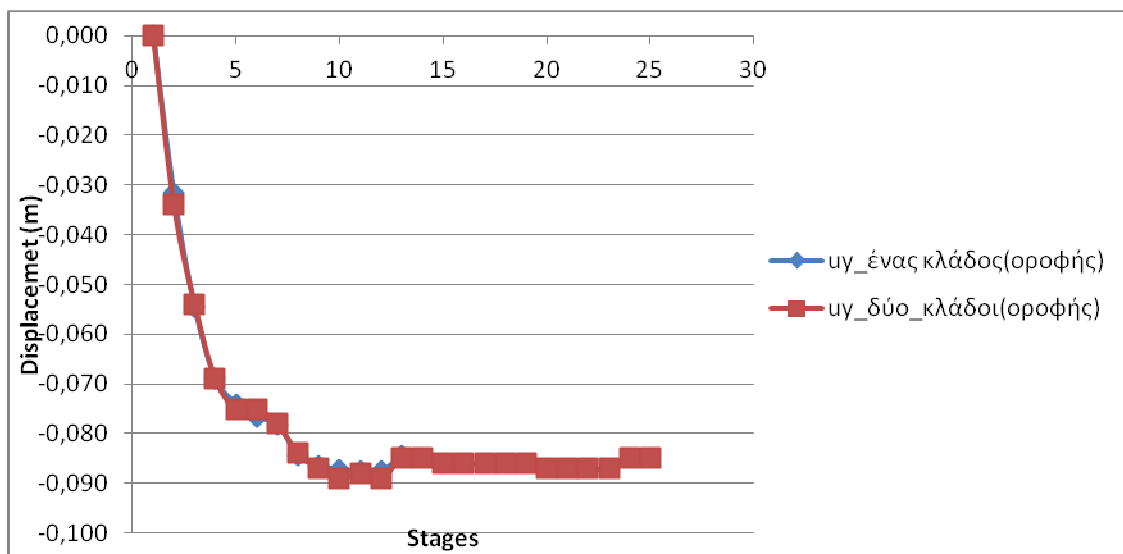


Εικόνα 37. Κατανομή αστοχούντων σημείων στην διατομή

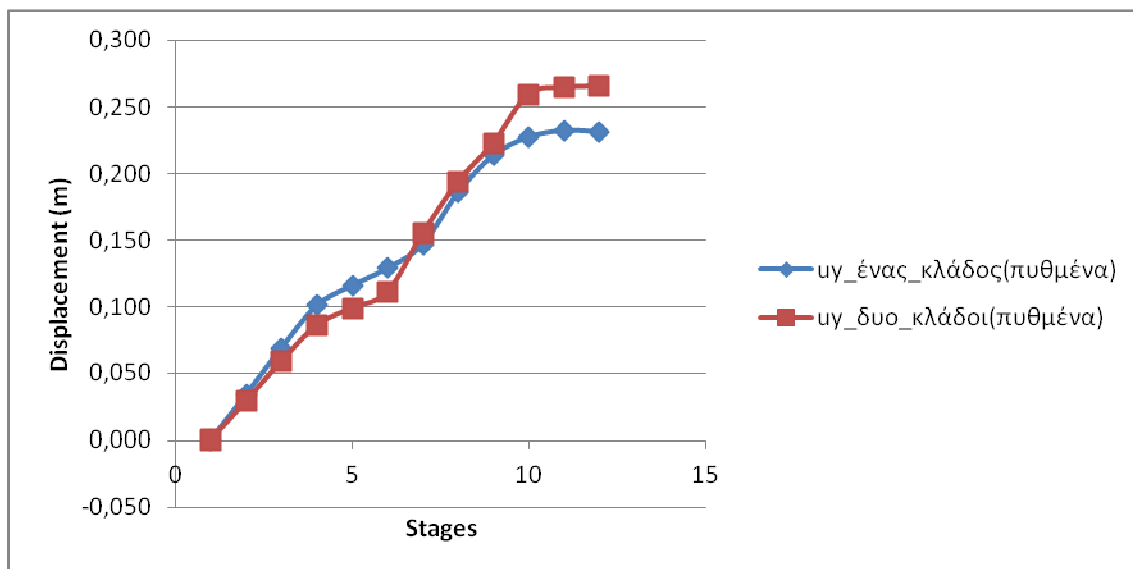
6.2. Αποτελέσματα δύο κλάδων (απόσταση 38 μέτρα)

Προηγήθηκαν τα αποτελέσματα του μονού κλάδου. Τα παρακάτω αποτελέσματα αναφέρονται στις μεταβολές που υπέστη ο αριστερός κλάδος της σήραγγας, εξαιτίας της διάνοιξης και του δεύτερου δεξιού κλάδου, παραθέτοντας σύγκριση μεταξύ τους. Η μελέτη επικεντρώνεται στα ίδια στοιχεία με αυτά του μονού κλάδου.

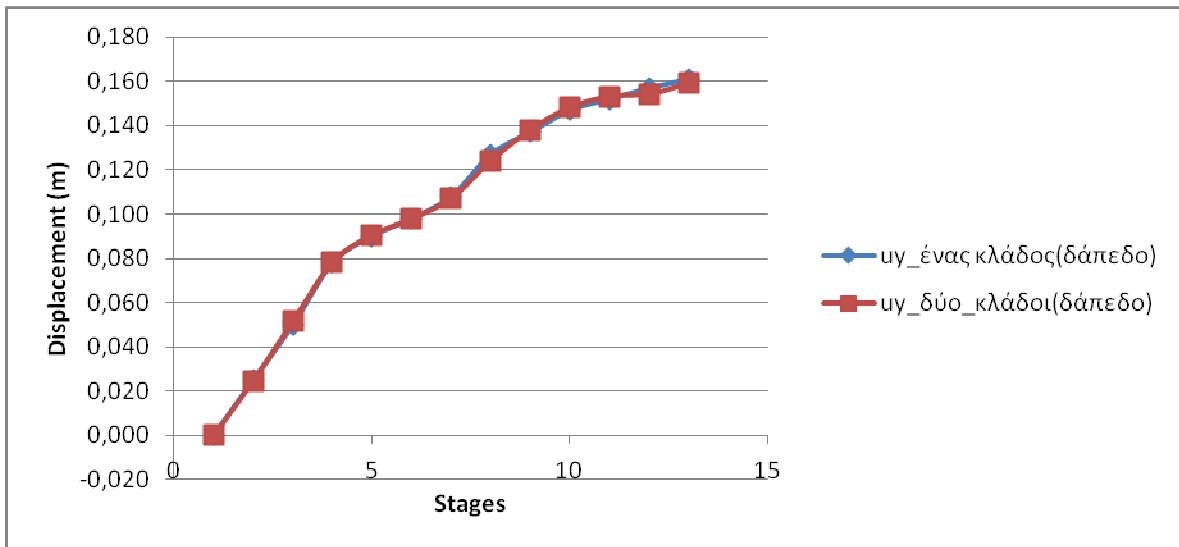
6.2.1. Μετατοπίσεις



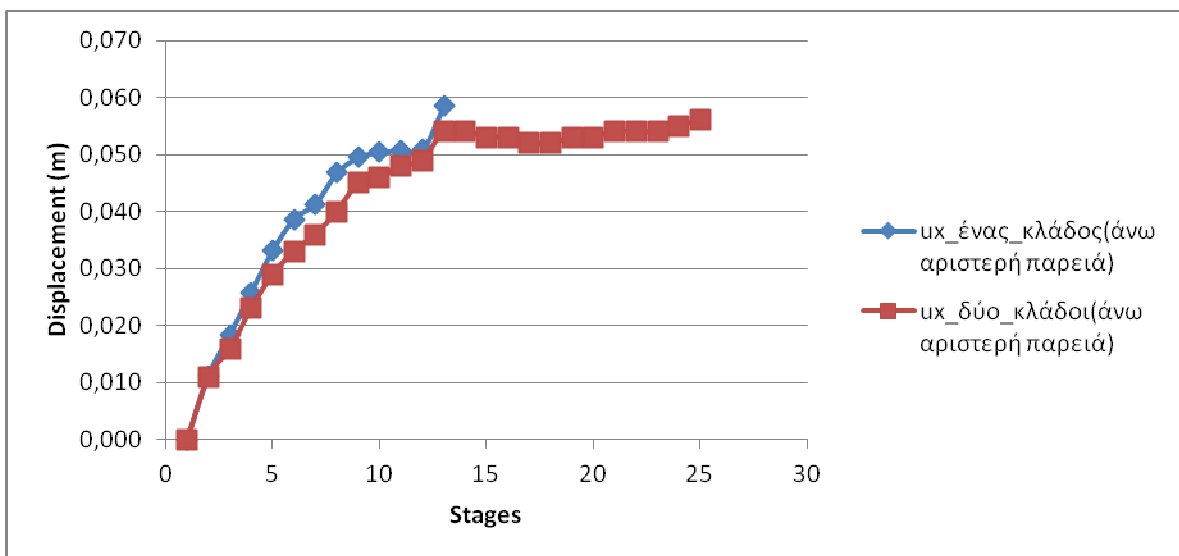
Διάγραμμα 33. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



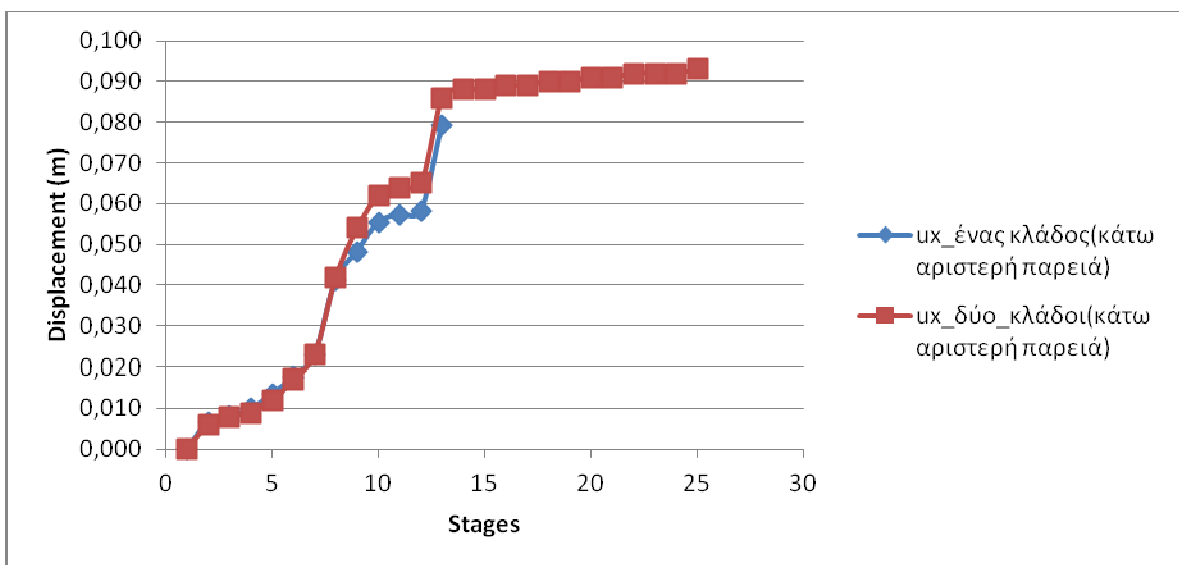
Διάγραμμα 34. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



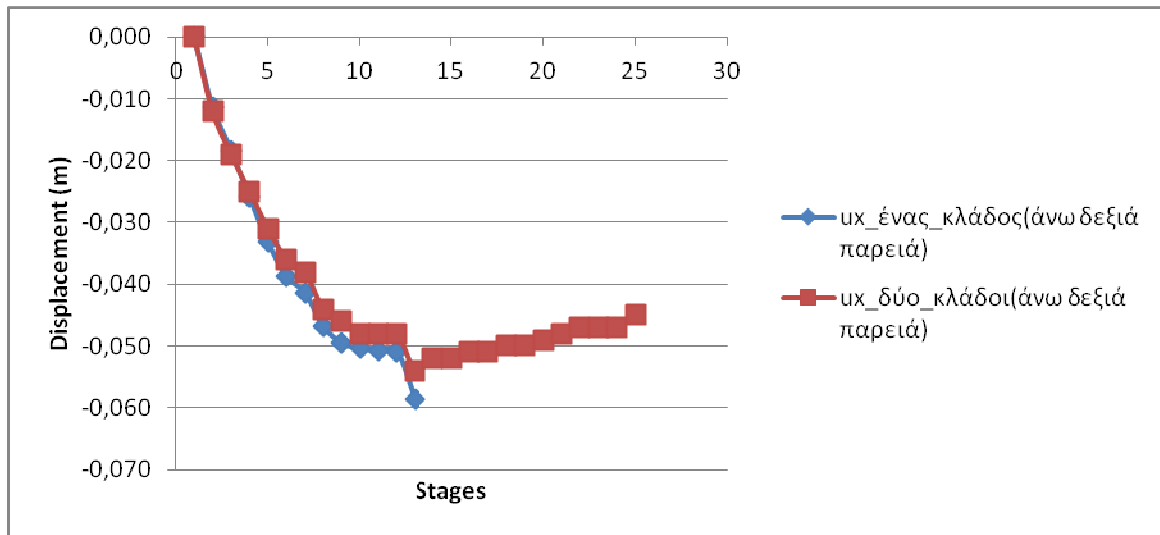
Διάγραμμα 35. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



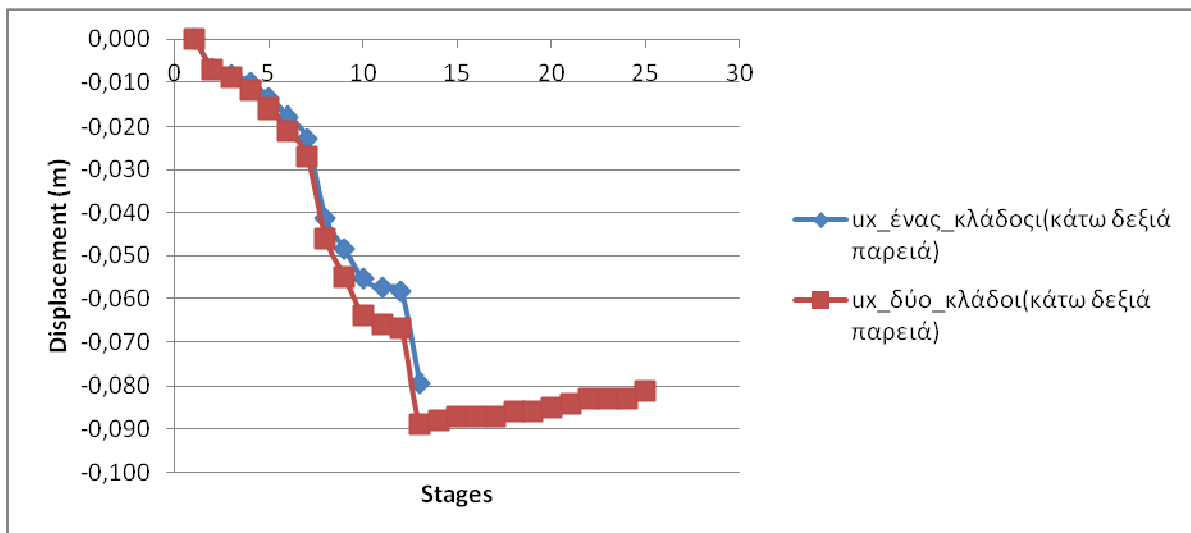
Διάγραμμα 36. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 37. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 38. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά

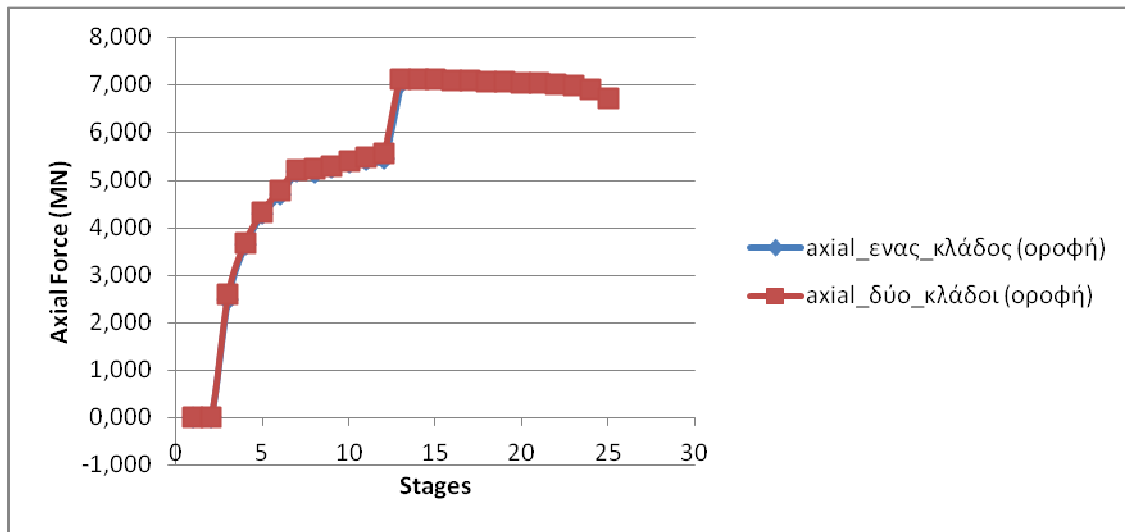


Διάγραμμα 39. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

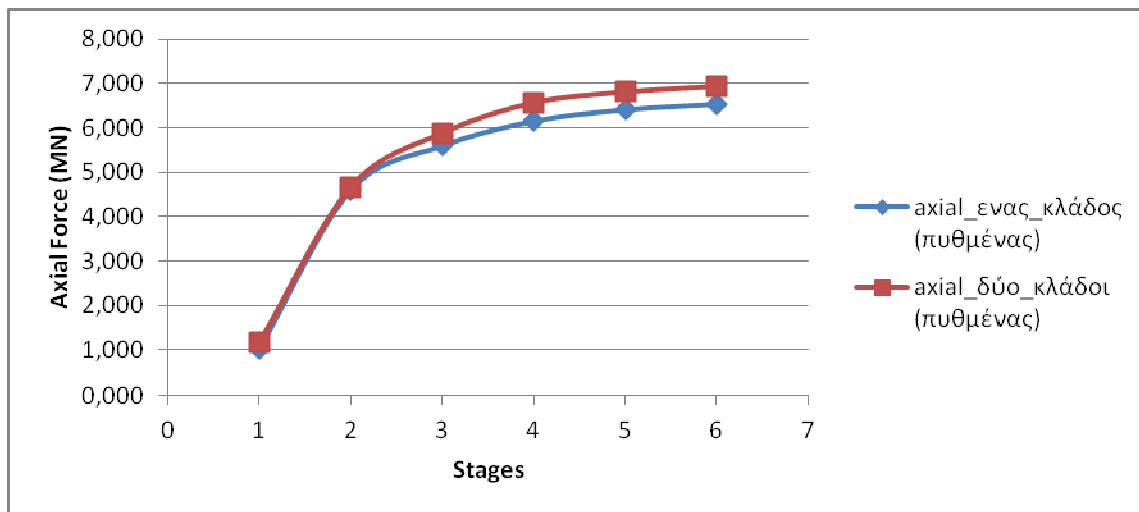
Στη σύγκριση των μετατοπίσεων μεταξύ αριστερού κλάδου (ένας κλάδος) και αριστερού (δύο κλάδοι) παρατηρούμε ότι δεν έχουμε σημαντικές διαφορές στα πρώτα 13 στάδια όπου η διάνοιξη είναι η ίδια και οι όποιες μεταβολές οφείλονται στην διαφορετικότητα του καννάβου.

Από κει και πέρα, οι οριζόντιες μετατοπίσεις που παρατηρούνται στις παρειές, άνω και κάτω, ακολουθούν τον ίδιο ρυθμό αύξησης, σταθεροποιημένες από κάποιο σημείο και μετά. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μέγιστη μετατόπιση παρατηρείται στην κάτω αριστερή παρειά και φτάνει τα 9,5cm. Οι κατακόρυφες δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαίτερη μεταβολή

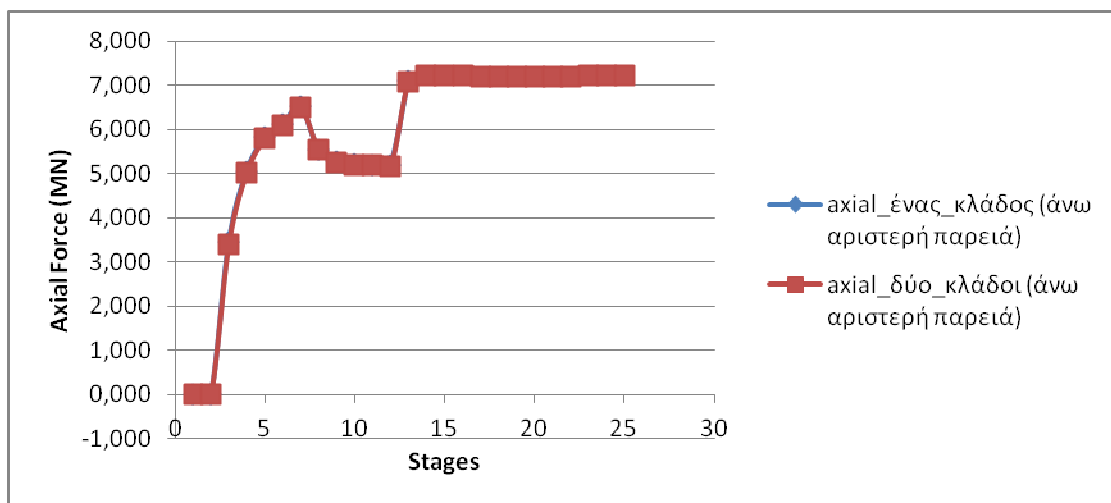
6.2.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



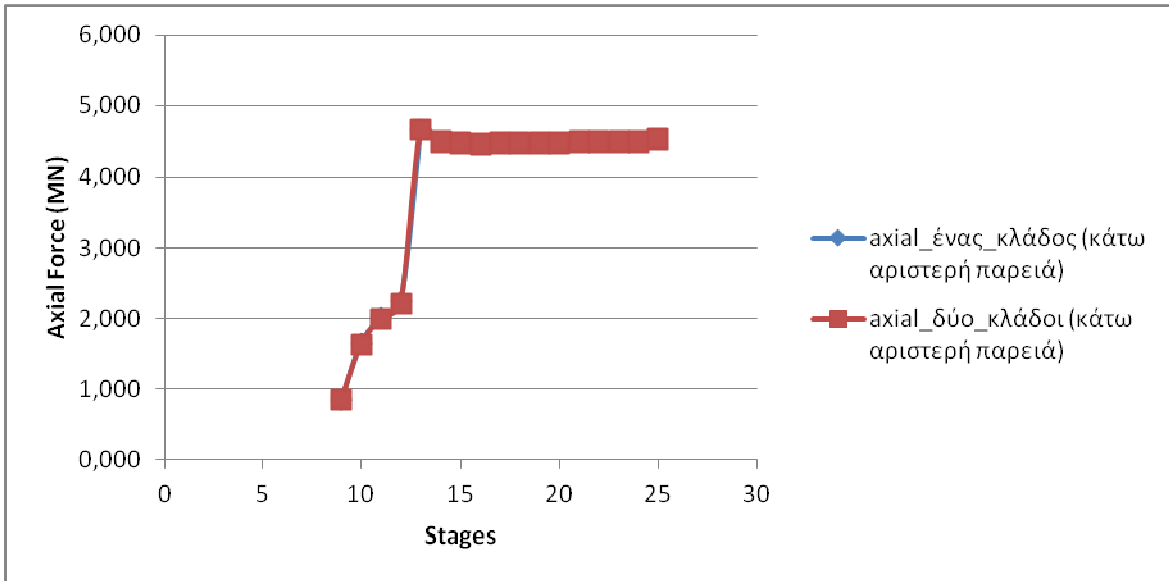
Διάγραμμα 40. Αξονική δύναμη στην οροφή



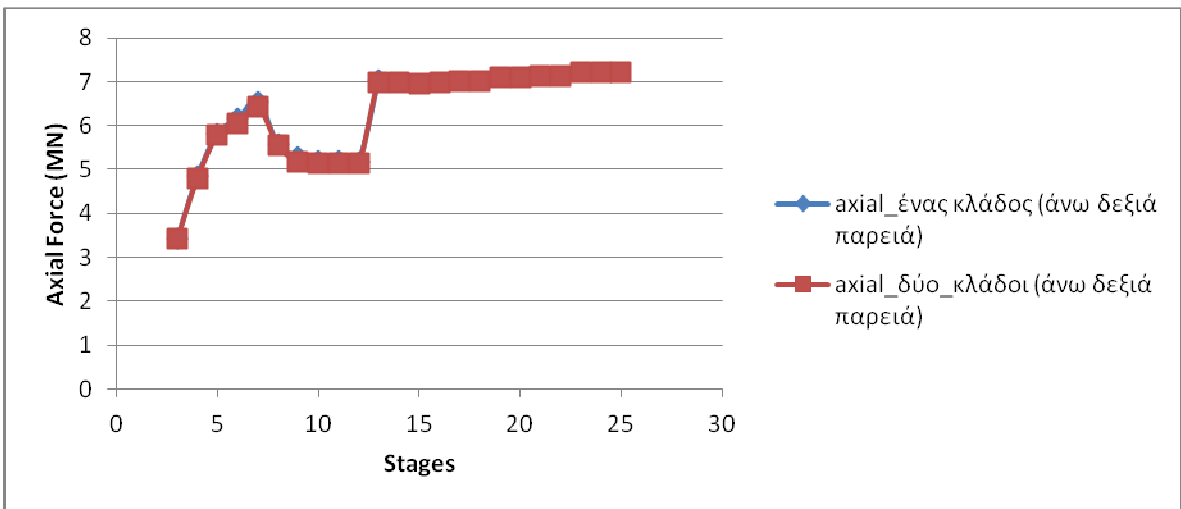
Διάγραμμα 41. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



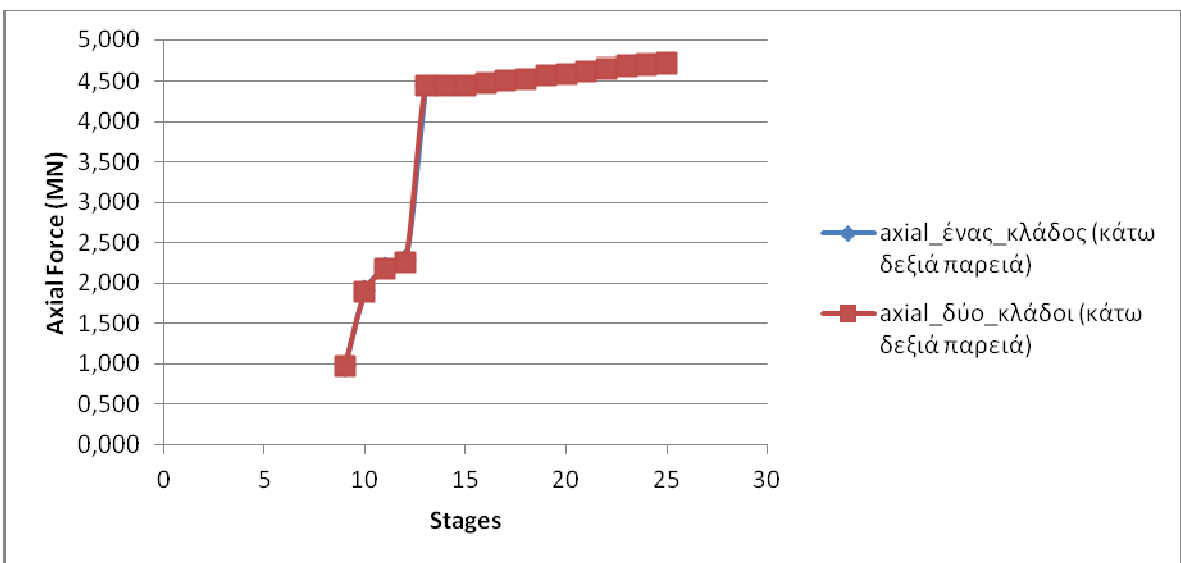
Διάγραμμα 42. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



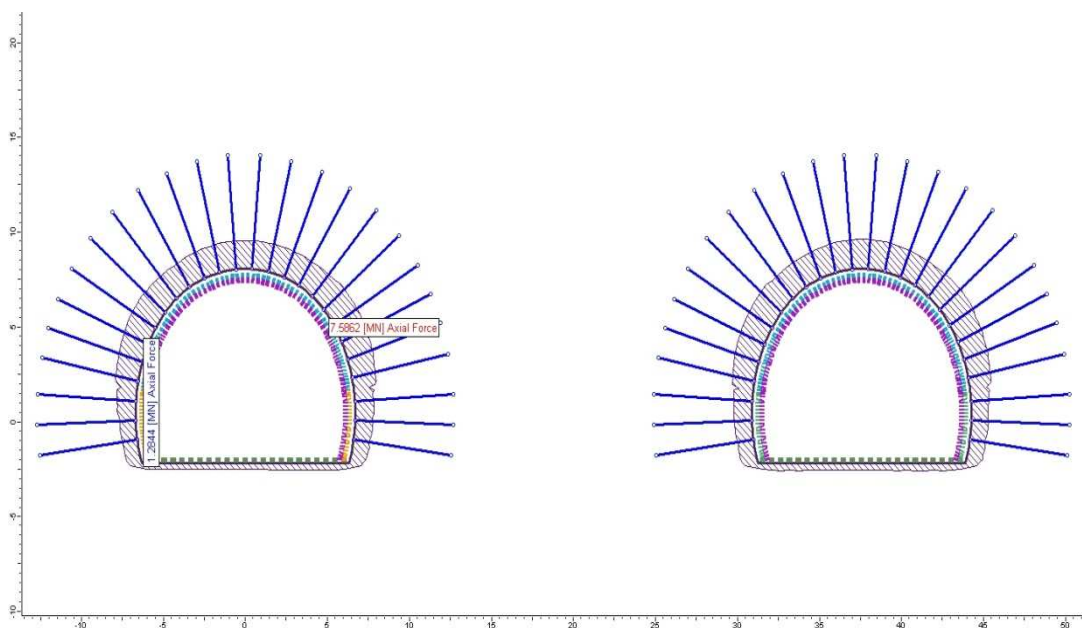
Διάγραμμα 43. Αξονική δύναμη στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 44. Αξονική δύναμη στην κάτω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 45. Αξονική δύναμη στην άνω δεξιά παρειά



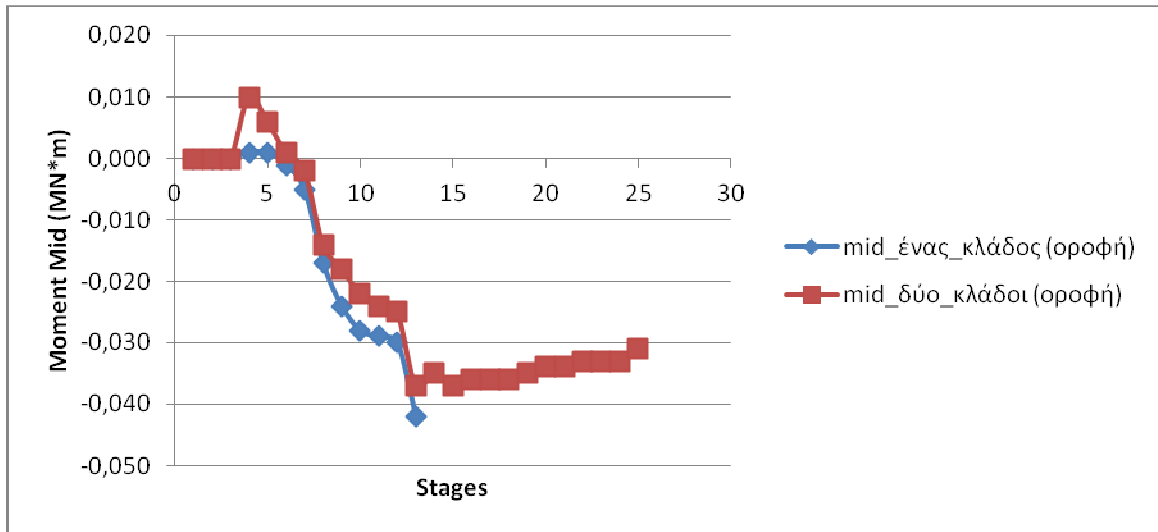
Εικόνα 38. Κατανομή αξονικών δυνάμεων στις διατομές

Στην περίπτωση των αξονικών δυνάμεων βλέπουμε σχεδόν πλήρη ταύτιση των τιμών στις δύο περιπτώσεις. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί, ως ότι η απόσταση των 38 μέτρων μεταξύ των δύο κλάδων δεν είναι αρκετή για να μας δώσει σημαντικά διαφορετικές ροπές.

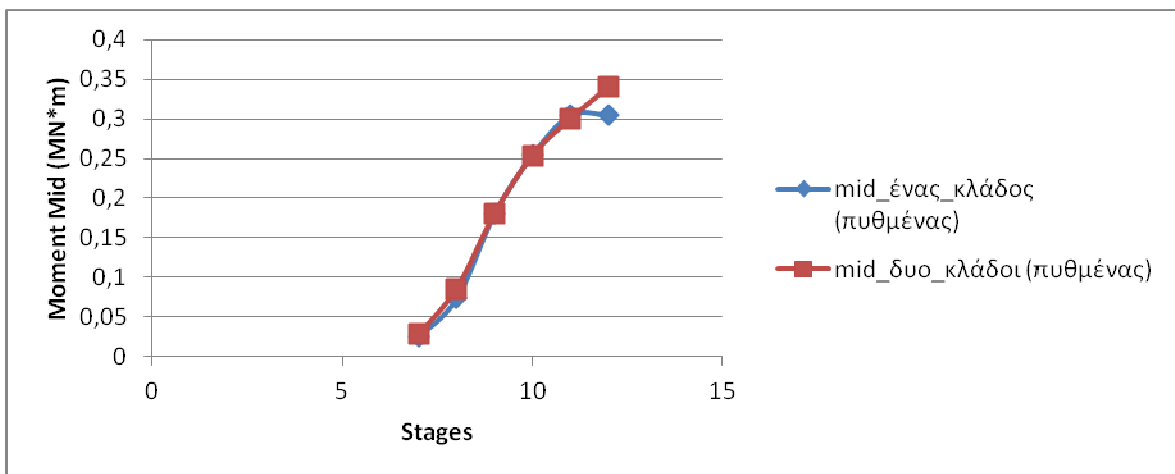
Παρόλαυτα παρατηρούμε ότι μετά το στάδιο 13, όπου ολοκληρώνεται η εκσκαφή του πρώτου κλάδου παρατηρείται μεγάλη αύξηση των αξονικών. Στην οροφή και τις άνω παρειές από 5,5MN η αξονική φτάνει περίπου τα 7MN, δηλαδή έχει επέλθει αύξηση κατά 27%, ενώ στις κάτω παρειές έχουμε αύξηση 100% από τα 2,2MN στα 4,4MN.

Να σημειωθεί επίσης, ότι μετά το 13^ο στάδιο, οι τιμές ομαλοποιούνται και σταθεροποιούνται, κάτι που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ευστάθεια και την σωστή λειτουργία της σήραγγας.

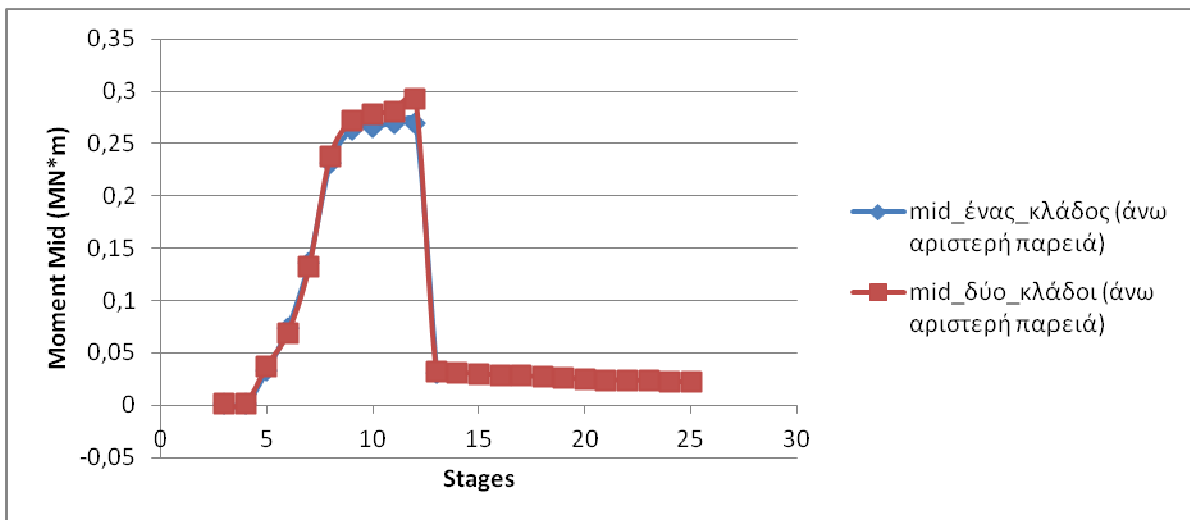
6.2.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



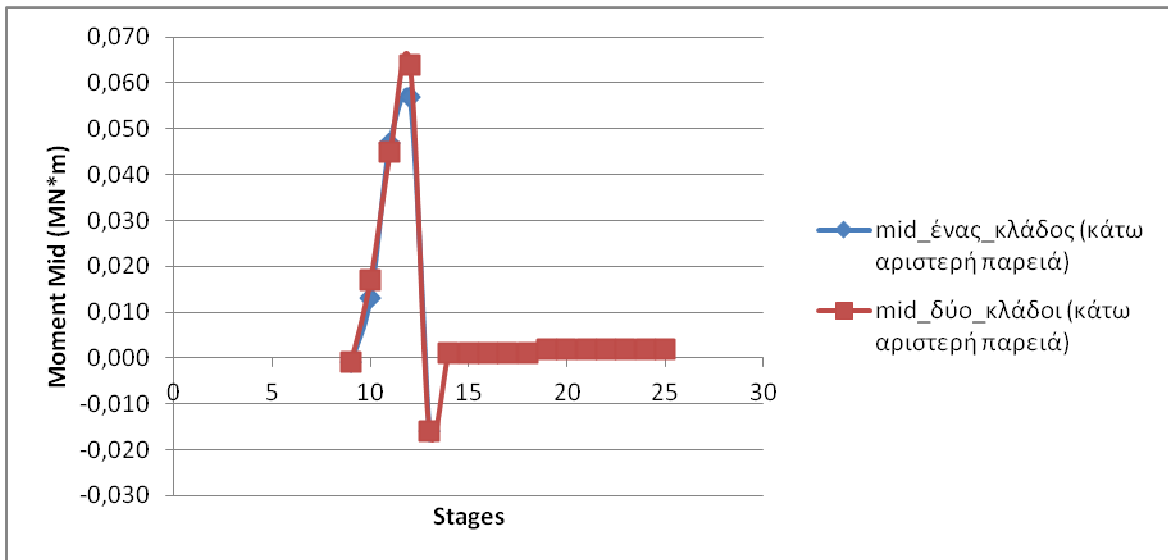
Διάγραμμα 46. Ροπή κάμψης στην οροφή



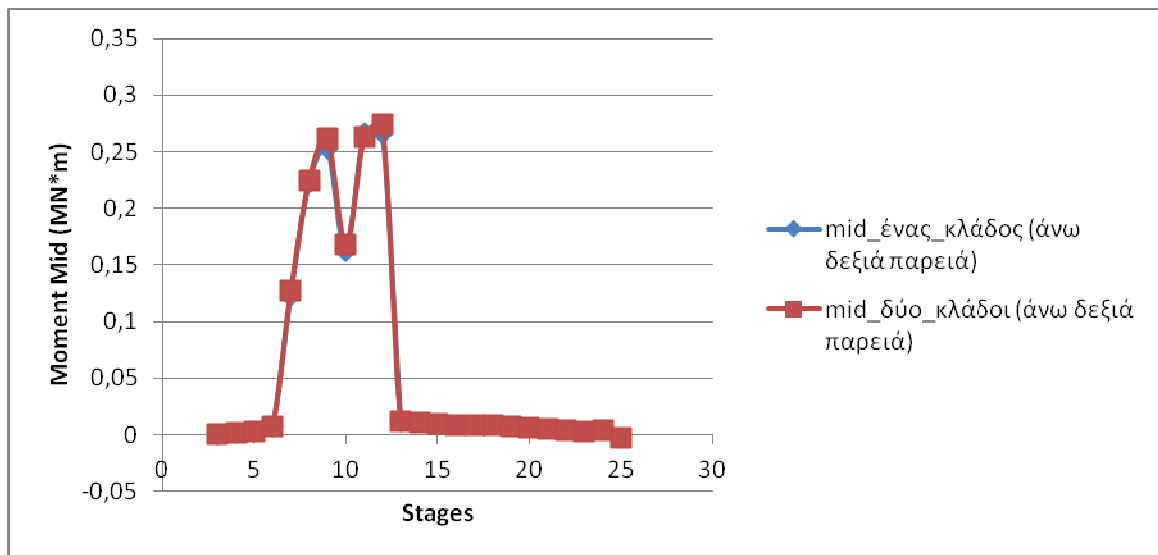
Διάγραμμα 47. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



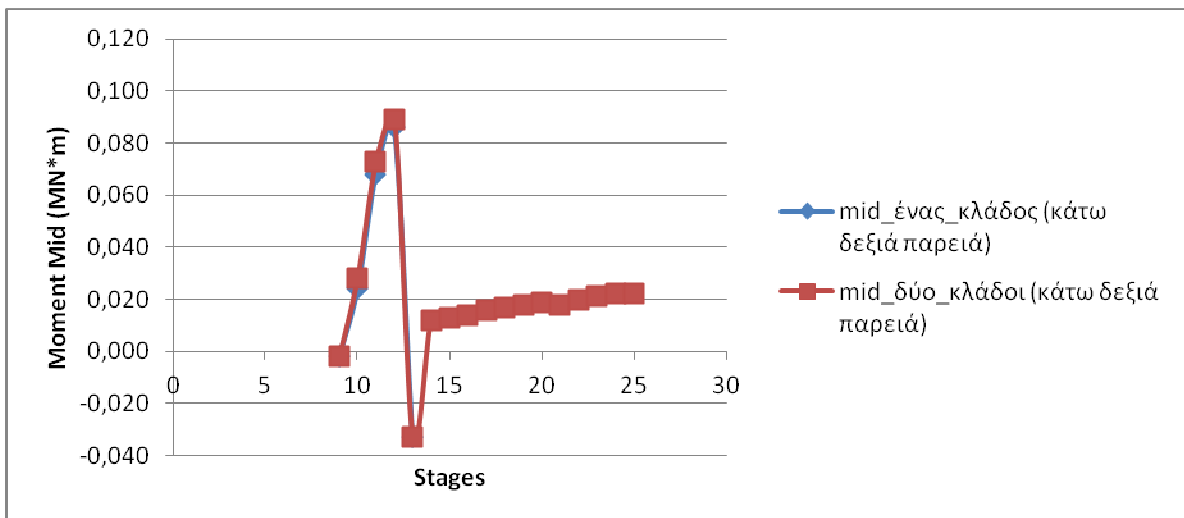
Διάγραμμα 48. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



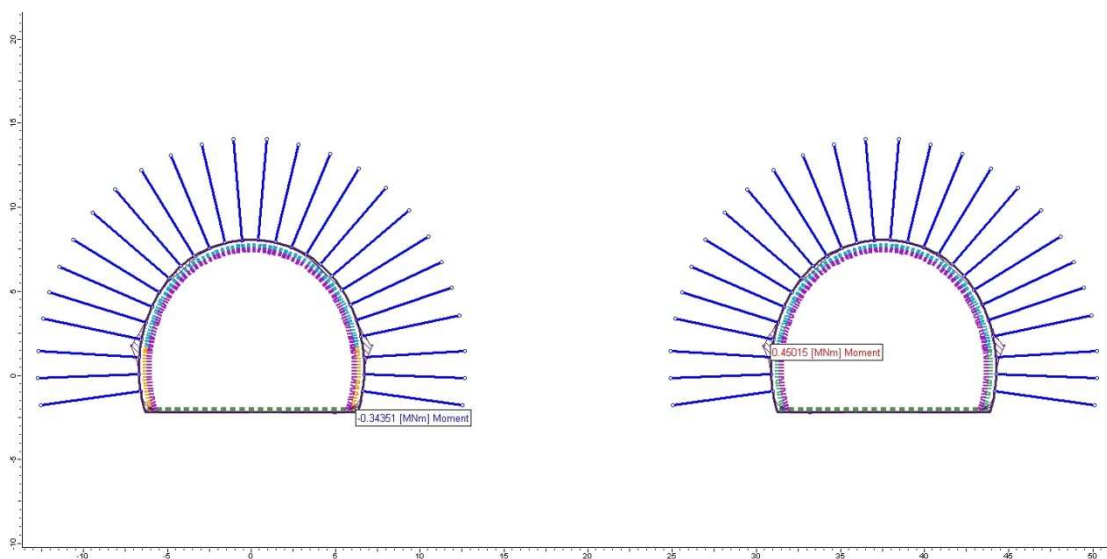
Διάγραμμα 49. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 50. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 51. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά

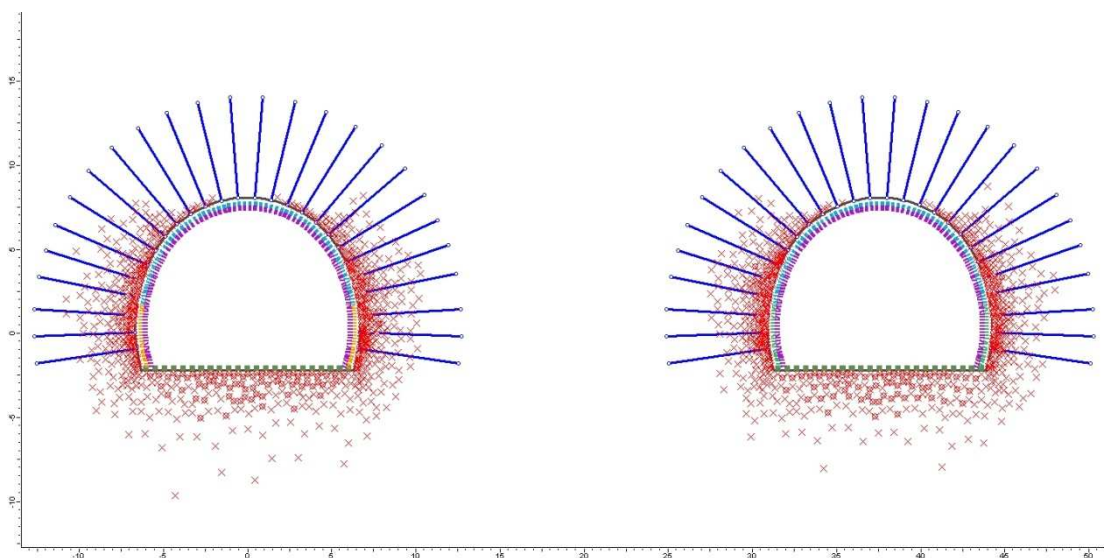


Εικόνα 38. Κατανομή ροπών κάμψης στις διατομές

Όπως και στην περίπτωση των αξονικών ροπών, έτσι και στις ροπές κάμψεις οι τιμές είναι όμοιες στα πρώτα 13 στάδια, με εξαίρεση την οροφή, η οποία επηρεάστηκε περισσότερο από την διαφοροποίηση του καννάβου.

Μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι στο 13^ο στάδιο έχουμε απότομη μεγάλη πτώση των ροπών κάμψης σε όλα τα σημεία της σήραγγας.

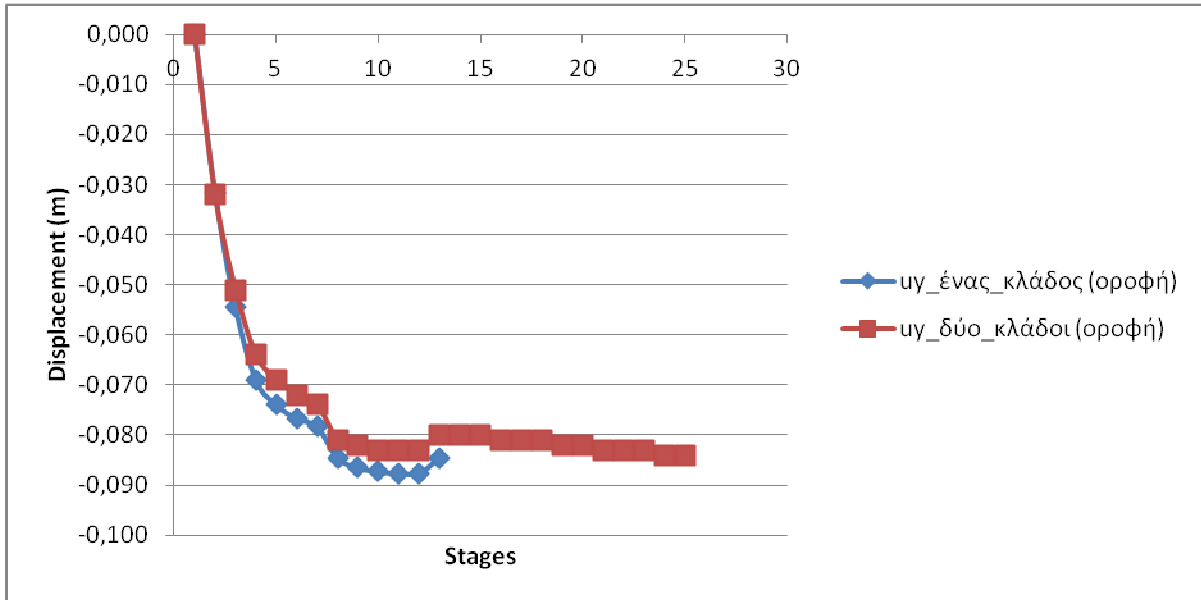
Από κει και πέρα ακολουθεί σταθερή μείωση στην άνω παρειά και σταθερή αύξηση στην κάτω παρειά, χωρίς ωστόσο να υπάρχει ιδιαίτερη απόκλιση.



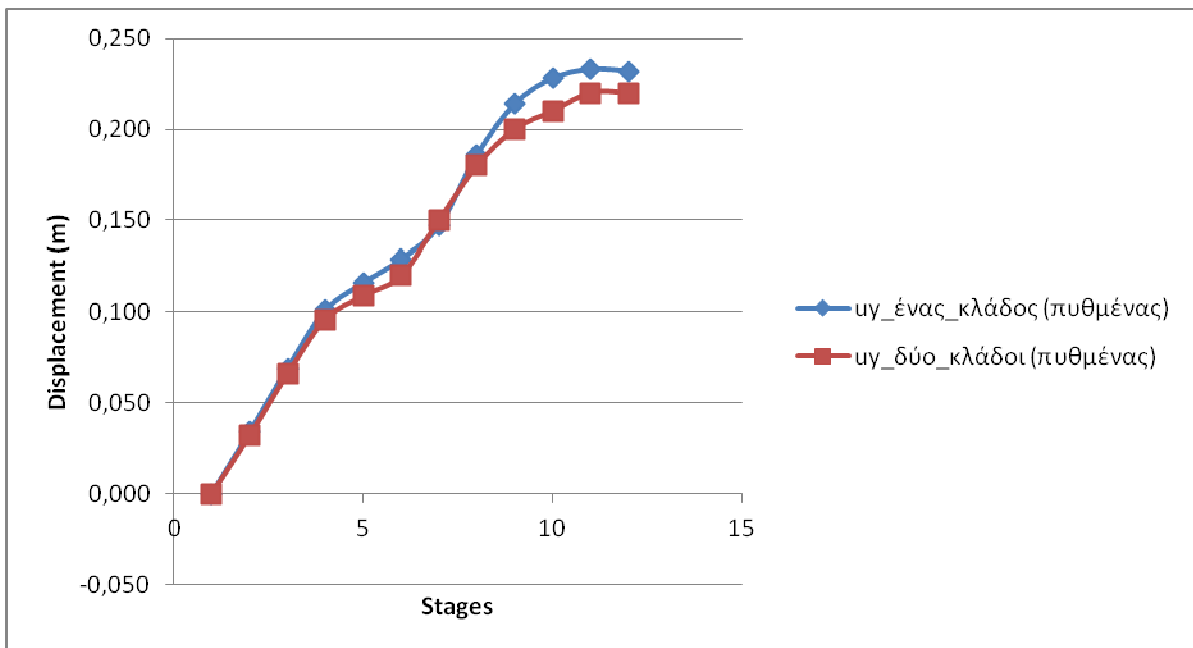
Εικόνα 39. Κατανομή αστοχούντων σημείων στις διατομές

6.3. Αποτελέσματα δύο κλάδων (απόσταση 28,5 μέτρα)

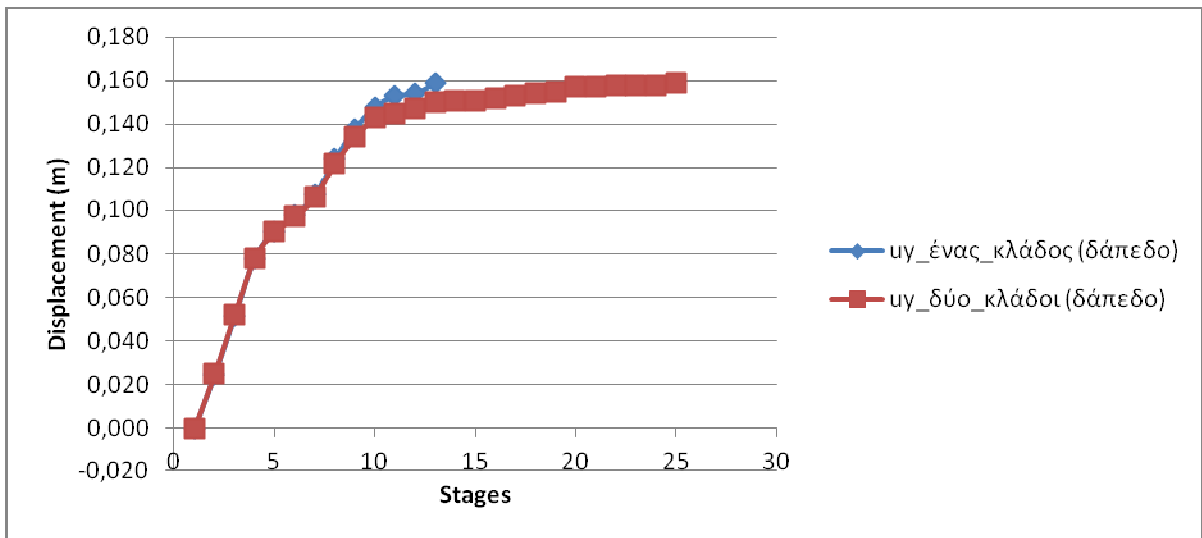
6.3.1 Μετατοπίσεις



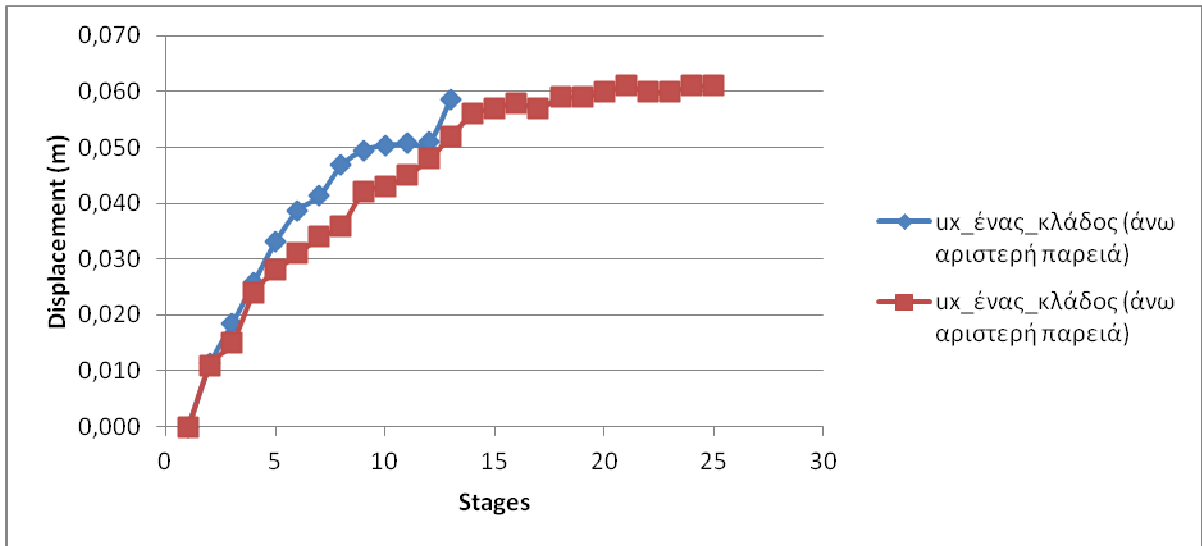
Διάγραμμα 52. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



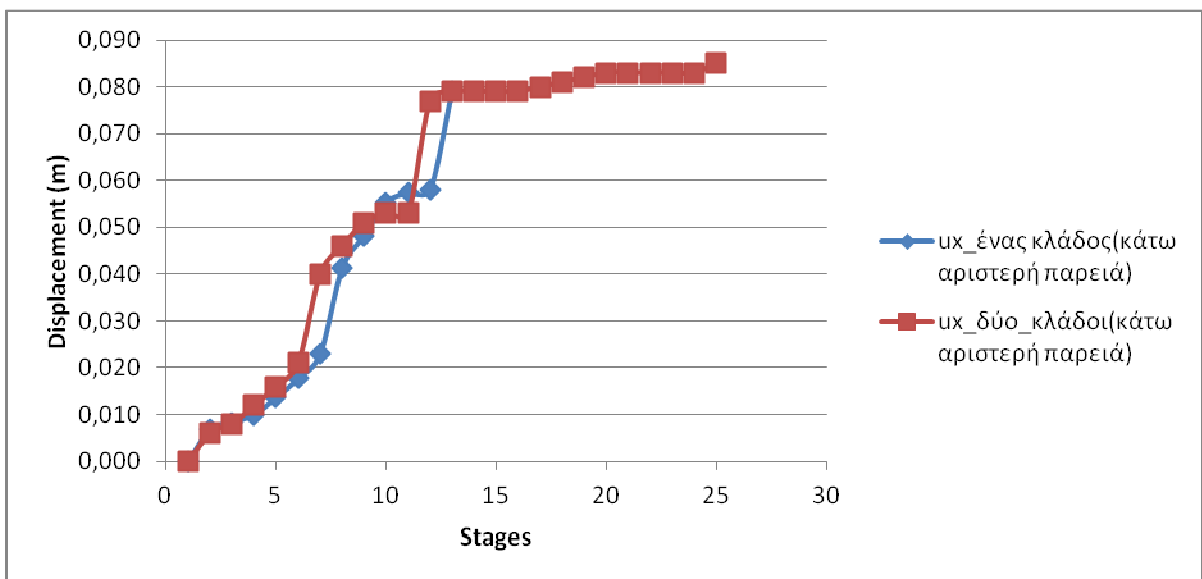
Διάγραμμα 53. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



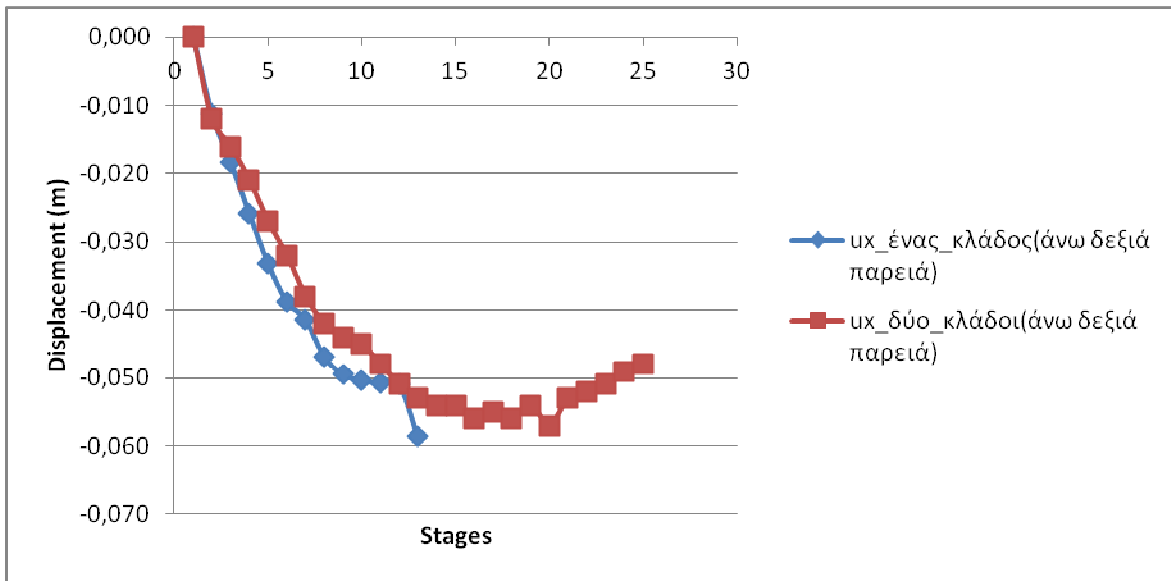
Διάγραμμα 54. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



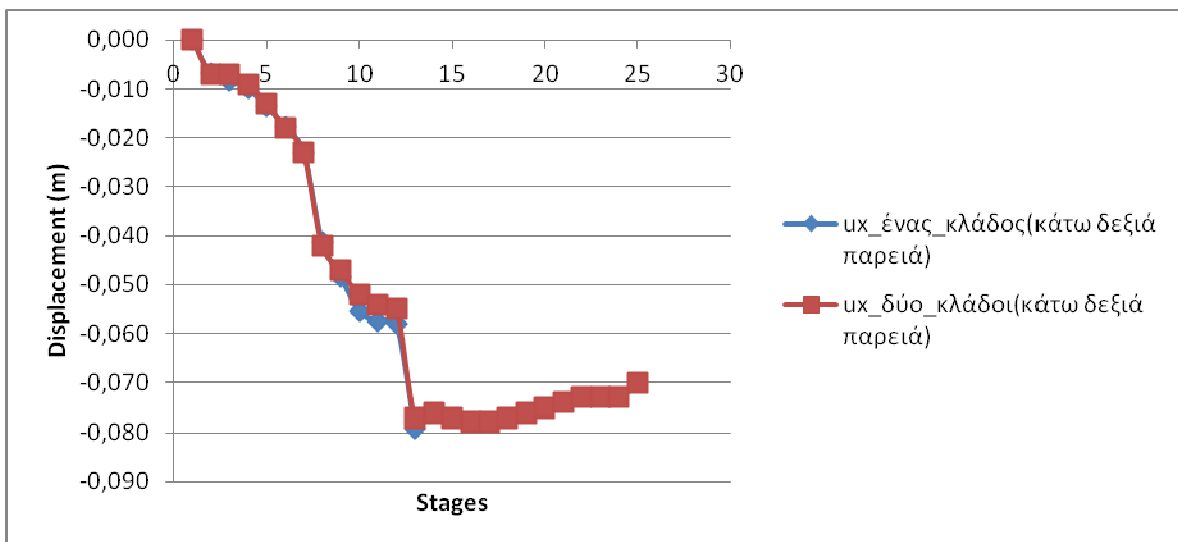
Διάγραμμα 55. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 56. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 57. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 58. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

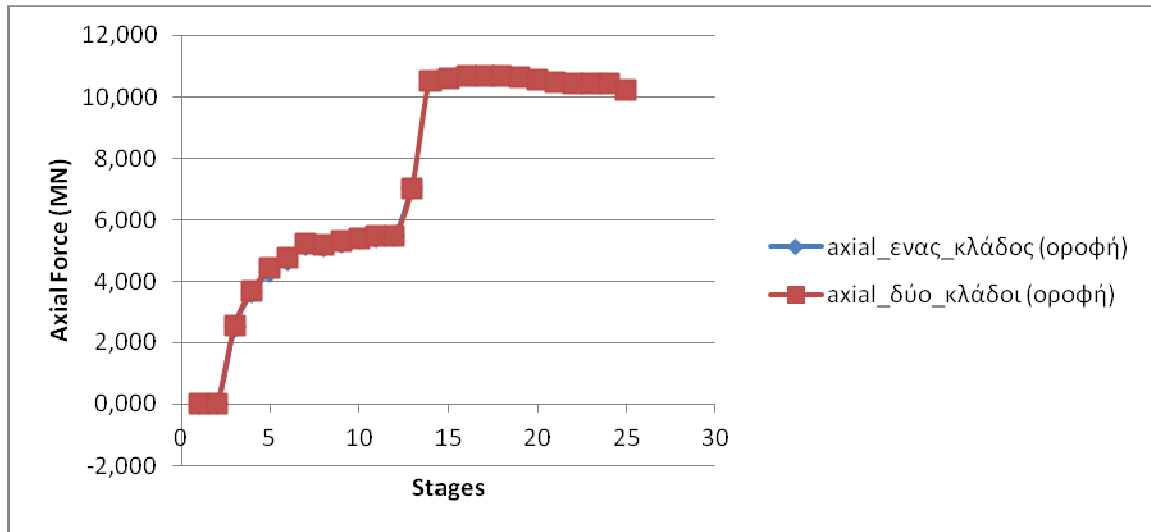
Η απόσταση μεταξύ των κλάδων έχει μειωθεί στο 25% και αυτό έχει σαν συνέπεια να υπάρχουν μεγαλύτερες αλλαγές στις μετατοπίσεις.

Περισσότερο φαίνεται να έχει επηρεαστεί η αριστερή παρειά του αριστερού κλάδου, χωρίς αυτό να έχει κάποια ιδιαίτερη αξία.

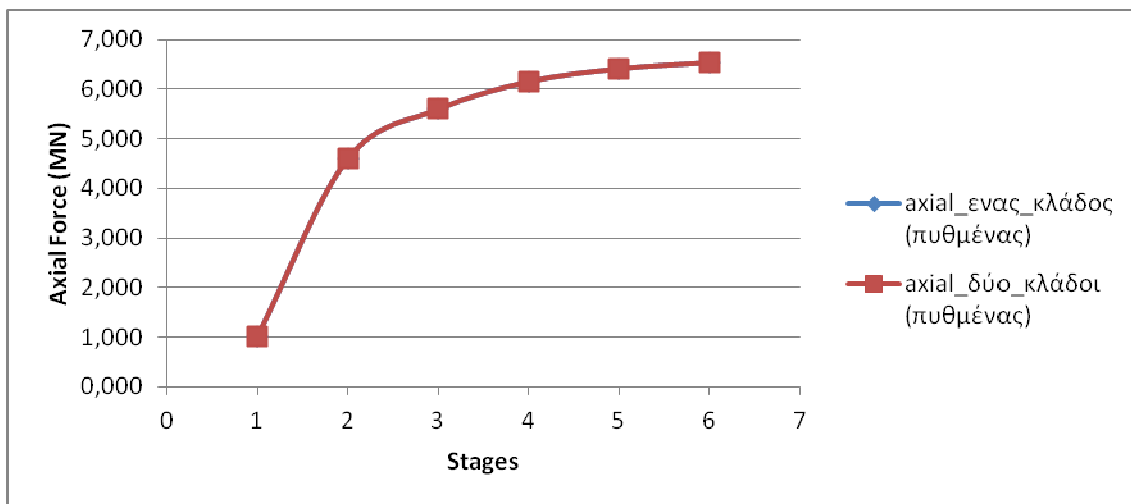
Μετά το 13^ο στάδιο, όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις, οι τιμές των κατακόρυφων και οριζόντιων μετατοπίσεων σταθεροποιούνται, αυξανόμενες σε μικρό βαθμό.

Παρατηρείται ότι ο πυθμένας μετακινείται κατά 23cm, ωστόσο δεν επηρεάζει τόσο πολύ την ευστάθεια της κατασκευής. Στις άνω παρειές η μετατόπιση φτάνει τα 7-9cm.

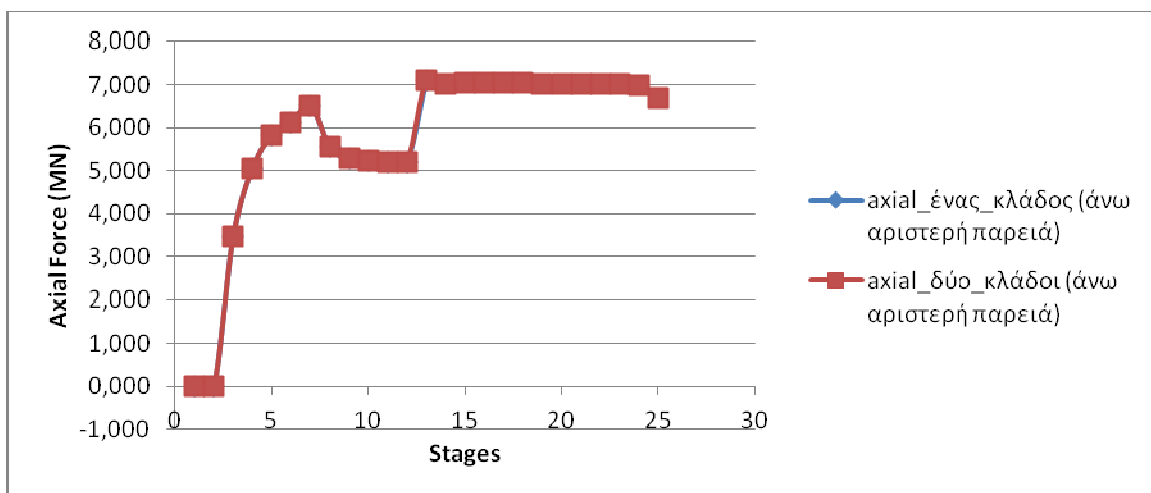
6.3.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



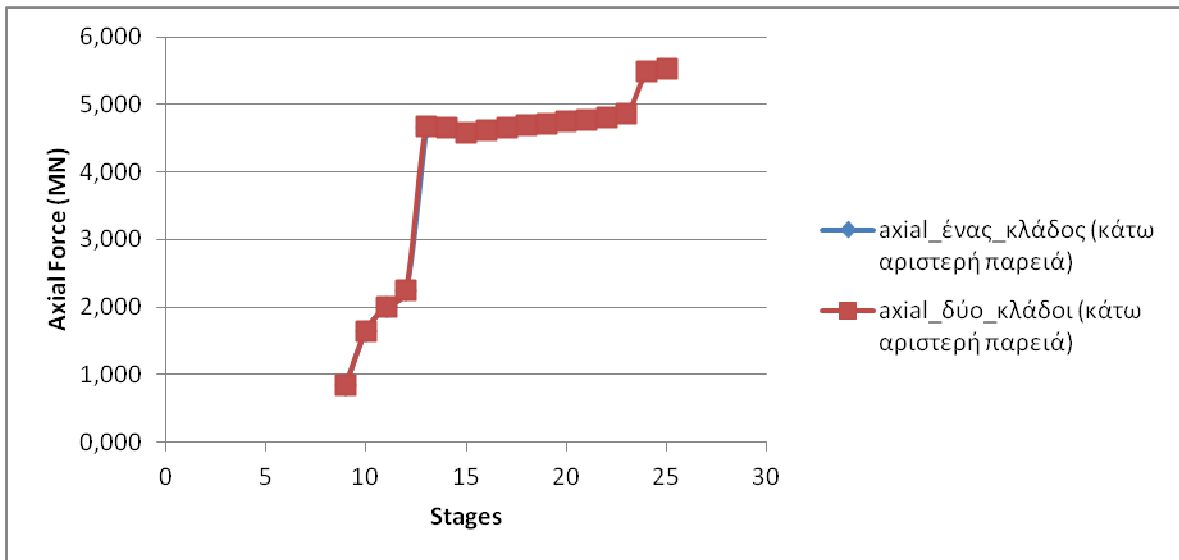
Διάγραμμα 59. Αξονική δύναμη οροφής



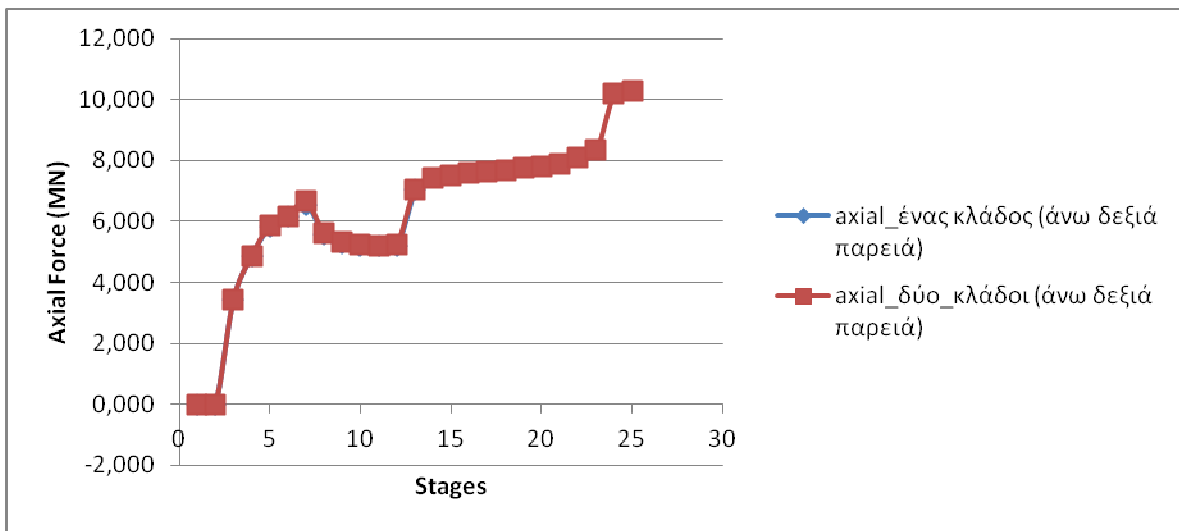
Διάγραμμα 60. Αξονική δύναμη πυθμένα



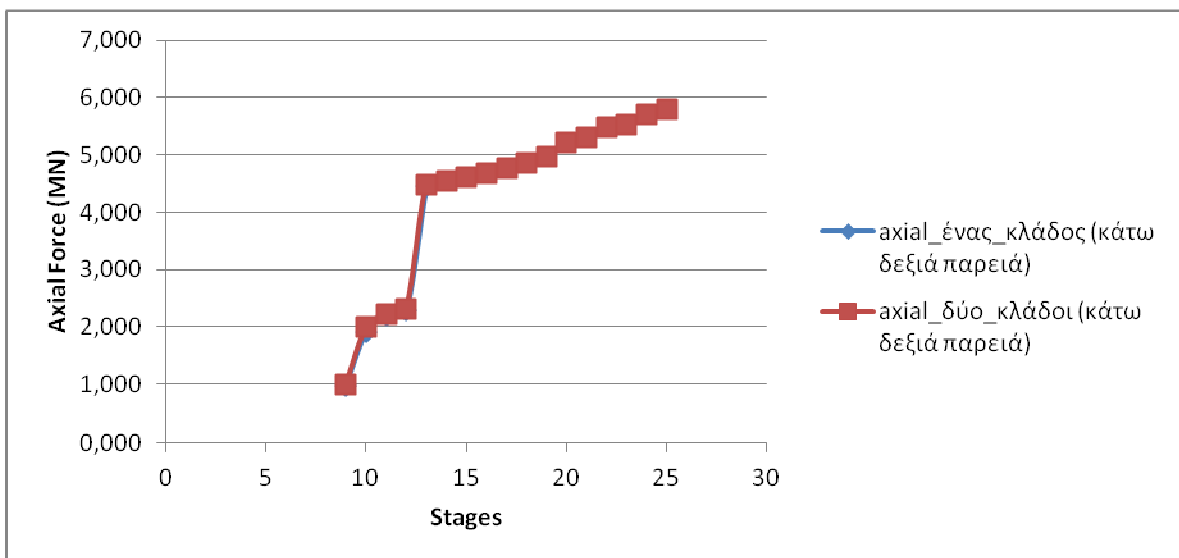
Διάγραμμα 61. Αξονική δύναμη άνω αριστερής παρειάς



Διάγραμμα 62. Αξονική δύναμη κάτω αριστερής παρειάς



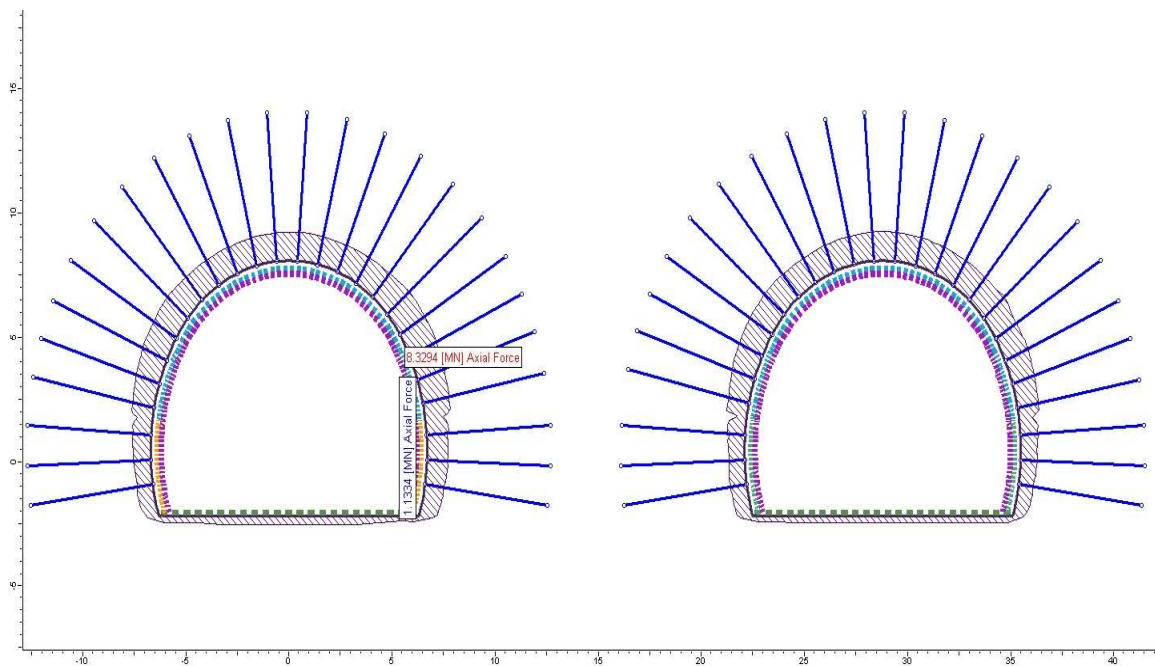
Διάγραμμα 63. Αξονική δύναμη άνω δεξιάς παρειάς



Διάγραμμα 64. Αξονική δύναμη κάτω δεξιάς παρειάς

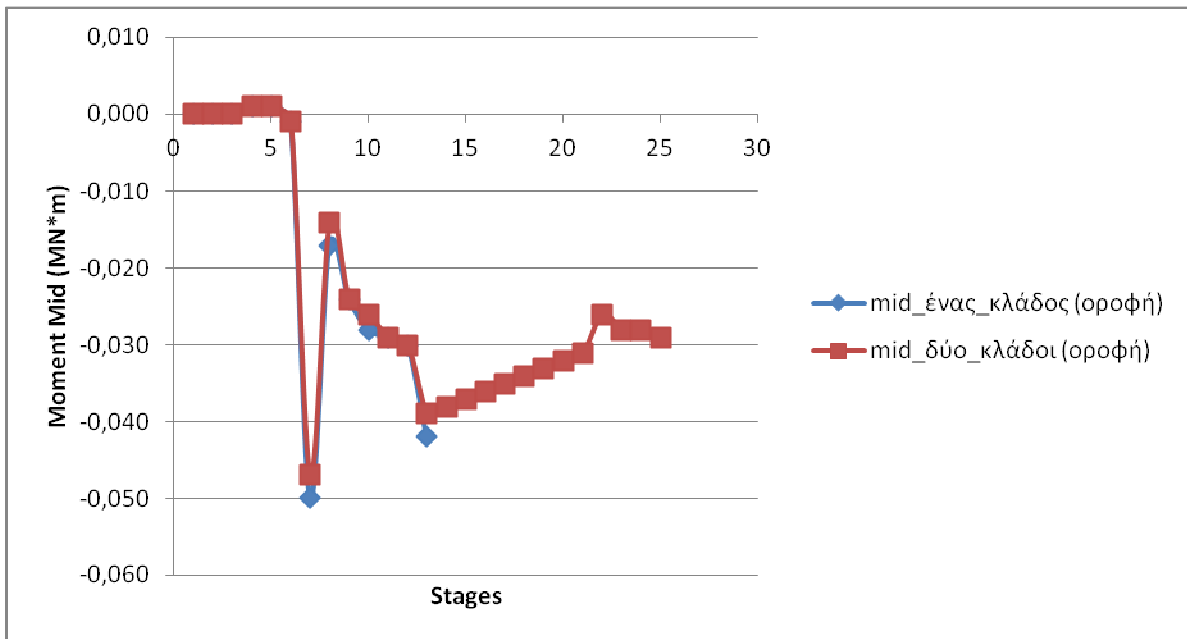
Οι τιμές των αξονικών δυνάμεων δεν παρουσιάζουν σχεδόν καμία διαφοροποίηση στα πρώτα 13 στάδια, κάτι που φαίνεται από τις καμπύλες οι οποίες ταυτίζονται.

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι η μεγάλη επιρροή που έχει η διάνοιξη του δεξιού κλάδου στην δεξιά παρειά του αριστερού. Στο άνω τμήμα της αριστερής παρειάς η αξονική δύναμη πλησιάζει τα 7MN και στο κάτω τμήμα τα 5,5MN. Αντίθετα στο άνω τμήμα της δεξιάς παρειάς παίρνουμε την τιμή 10,2MN και στο κάτω 6MN. Οι τιμές αυτές είναι εντός ορίων και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν άμεσα ανησυχητικές.

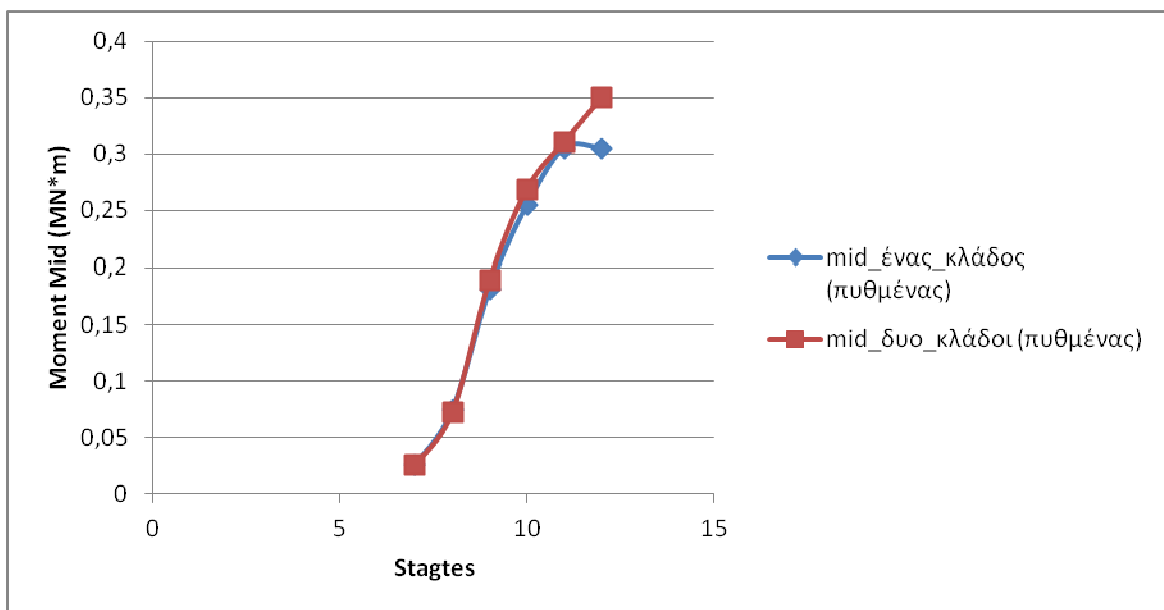


Εικόνα 40. Κατανομή αξονικών δυνάμεων

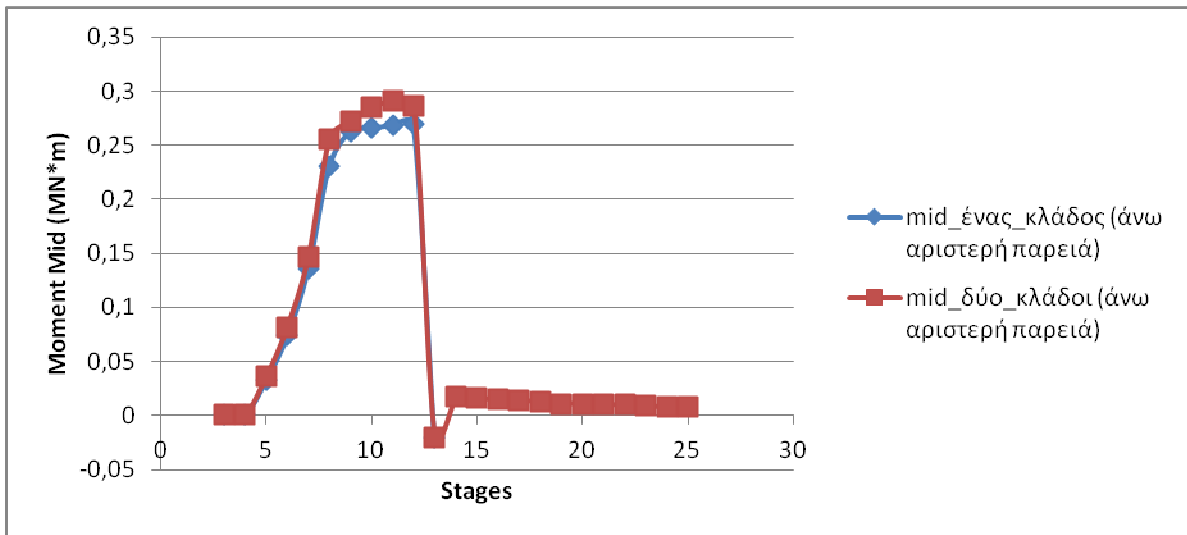
6.3.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



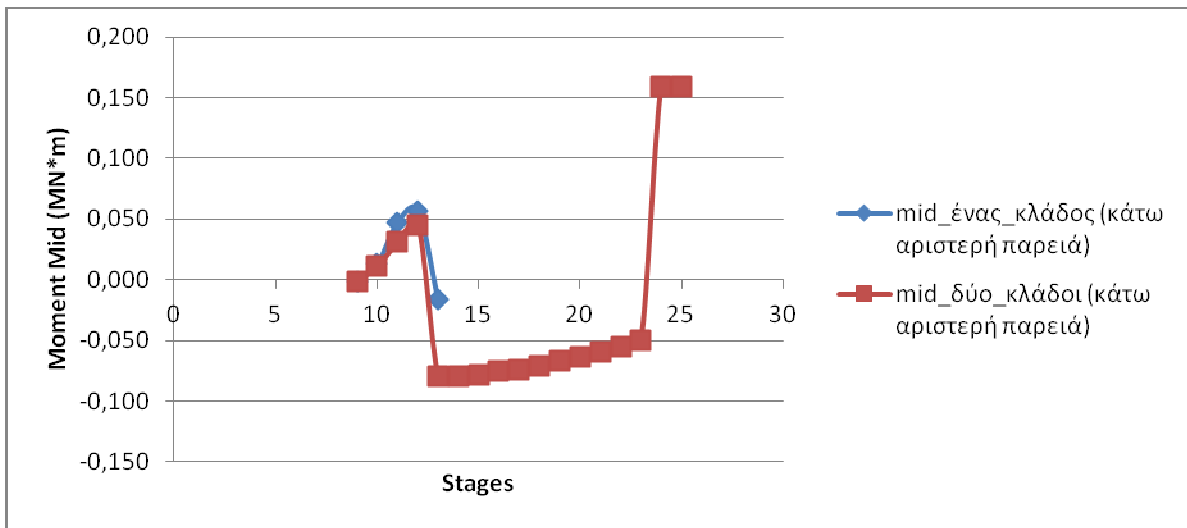
Διάγραμμα 65. Ροπή κάμψης οροφής



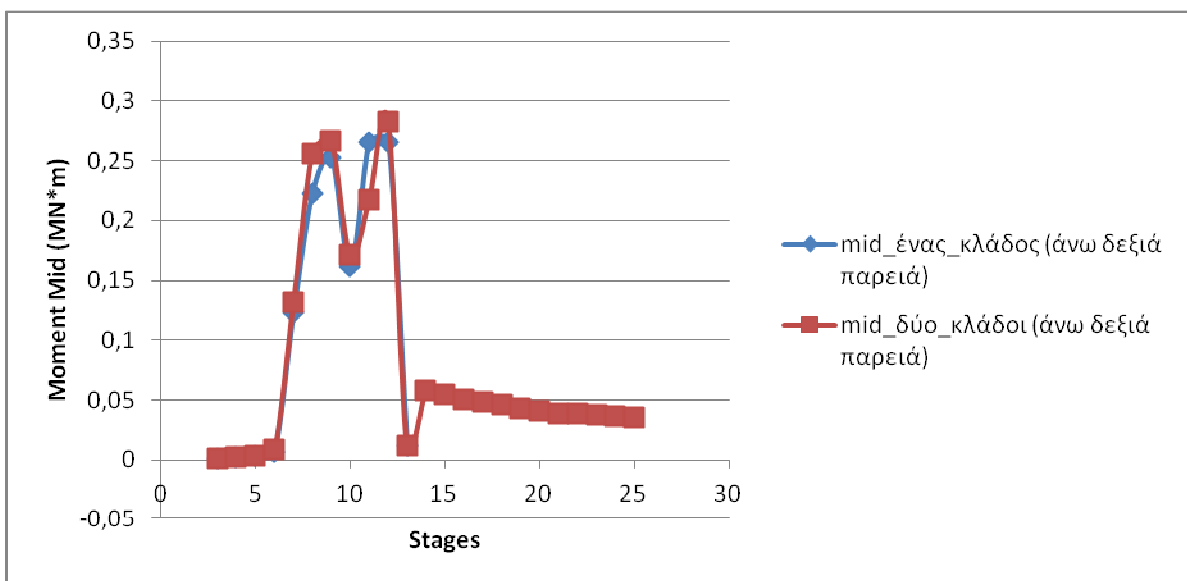
Διάγραμμα 66. Ροπή κάμψης πυθμένα



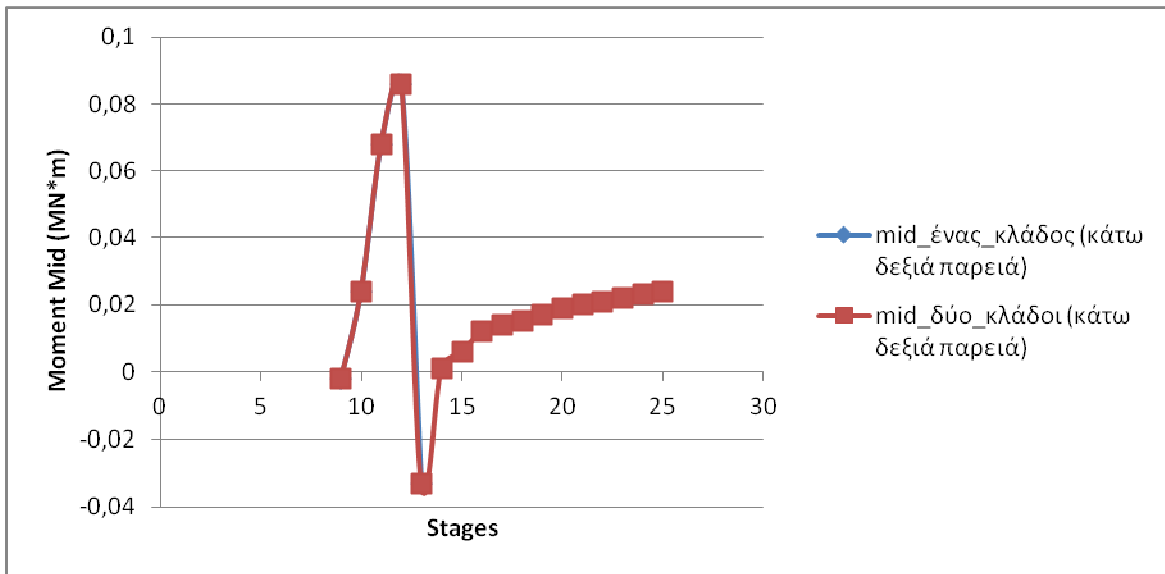
Διάγραμμα 67. Ροπή κάμψης άνω αριστερής παρειάς



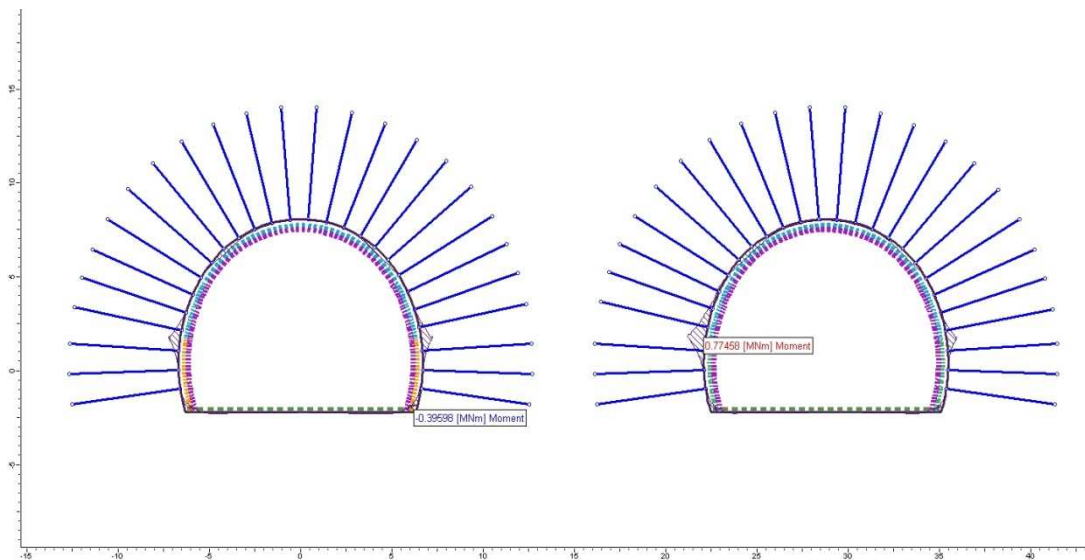
Διάγραμμα 68. Ροπή κάμψης κάτω αριστερής παρειάς



Διάγραμμα 69. Ροπή κάμψης άνω δεξιάς παρειάς

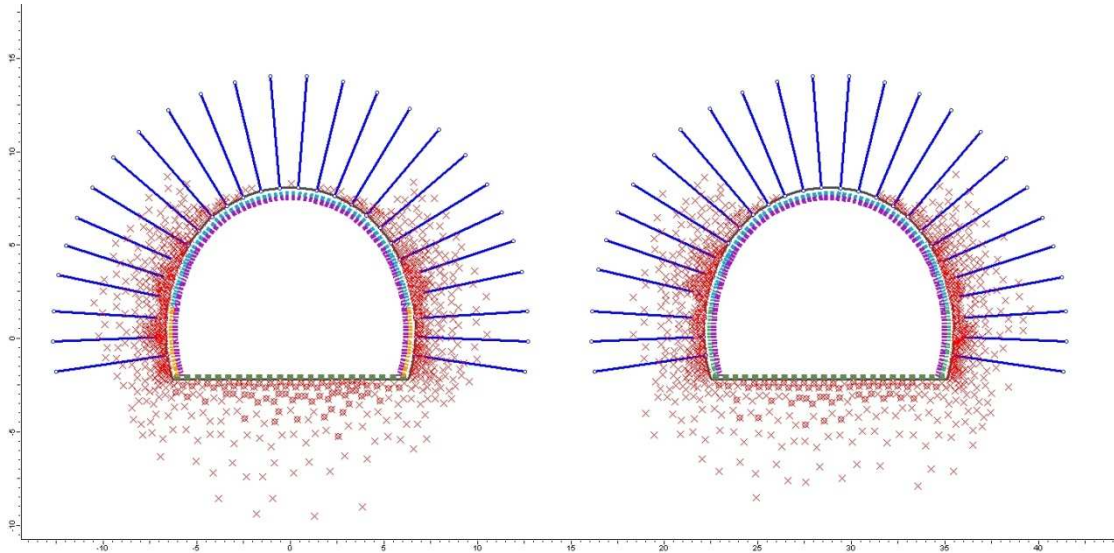


Διάγραμμα 70. Ροπή κάμψης κάτω δεξιάς παρειάς



Εικόνα 40. Κατανομή ροπών κάμψης στις διατομές

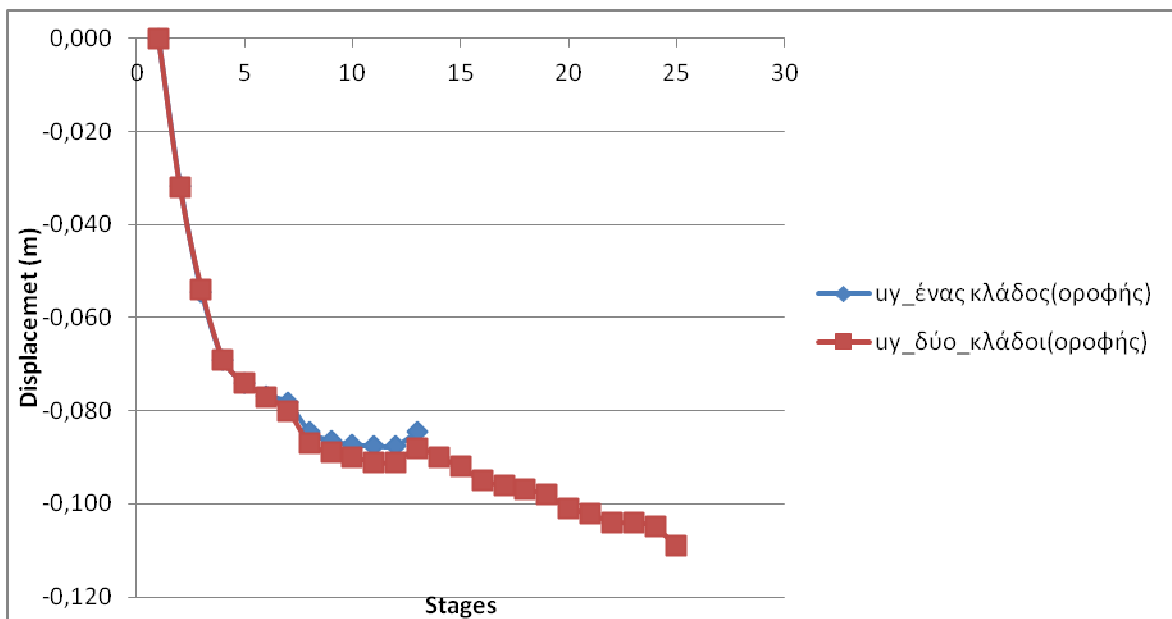
Οι τιμές των ροπών δεν διαφοροποιούνται σημαντικά στις δύο περιπτώσεις. Μπορούμε να κάνουμε ως γενική παρατήρηση ότι μετά το 13^ο στάδιο και της εκσκαφής του 1^{ου} κλάδου οι αξονικές ροπές τείνουν να σταθεροποιηθούν, αυξανόμενες με μικρό σταθερό ρυθμό.



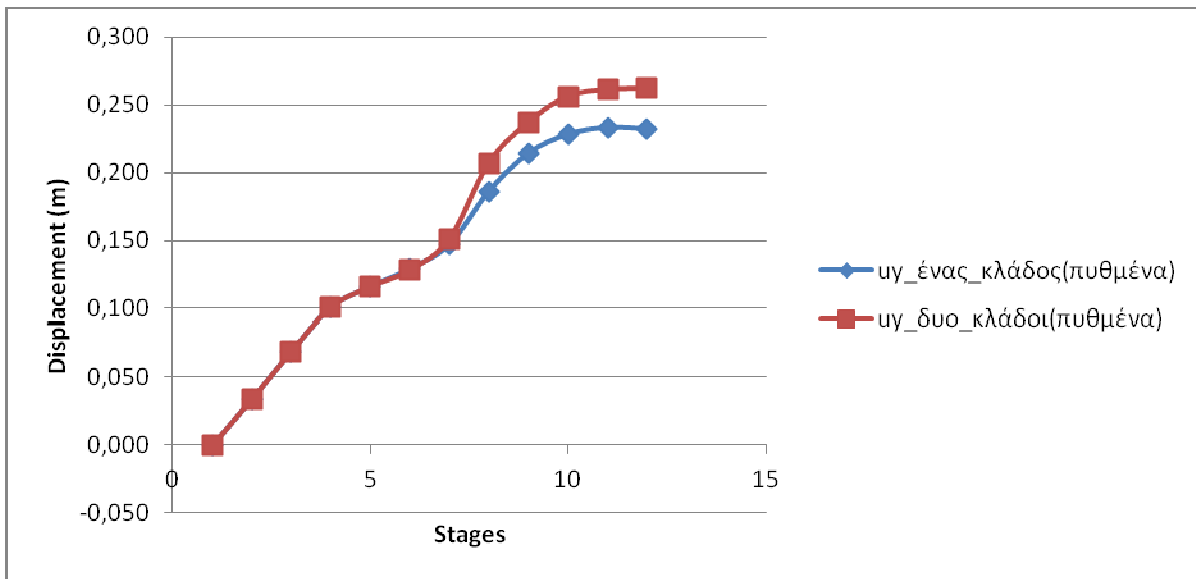
Εικόνα 41. Κατανομή αστοχούντων σημείων στις διατομές

6.4. Αποτελέσματα δύο κλάδων (απόσταση 19 μέτρα)

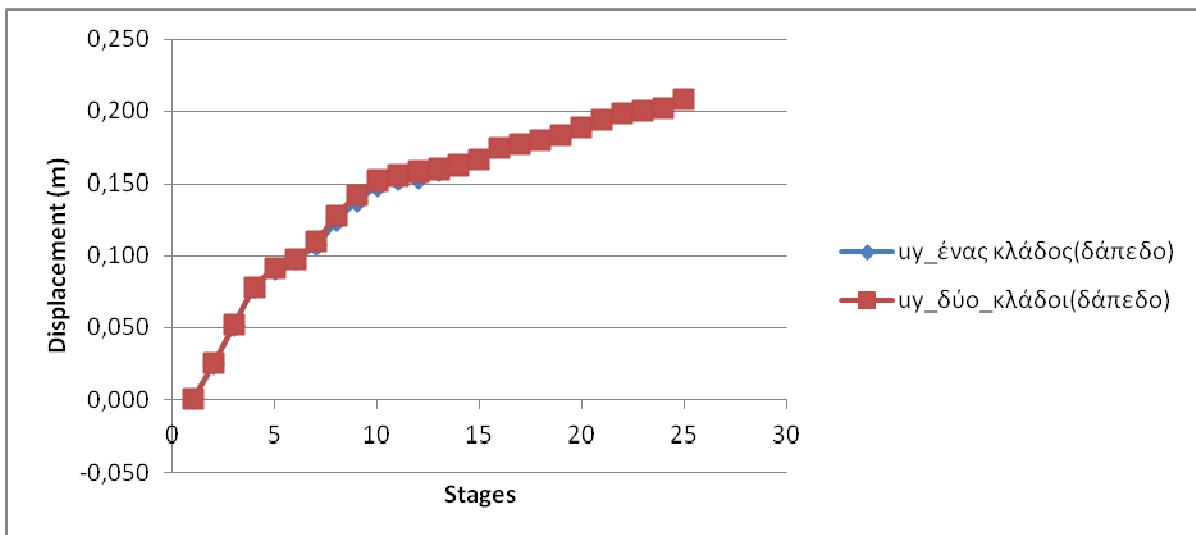
6.4.1 Μετατοπίσεις



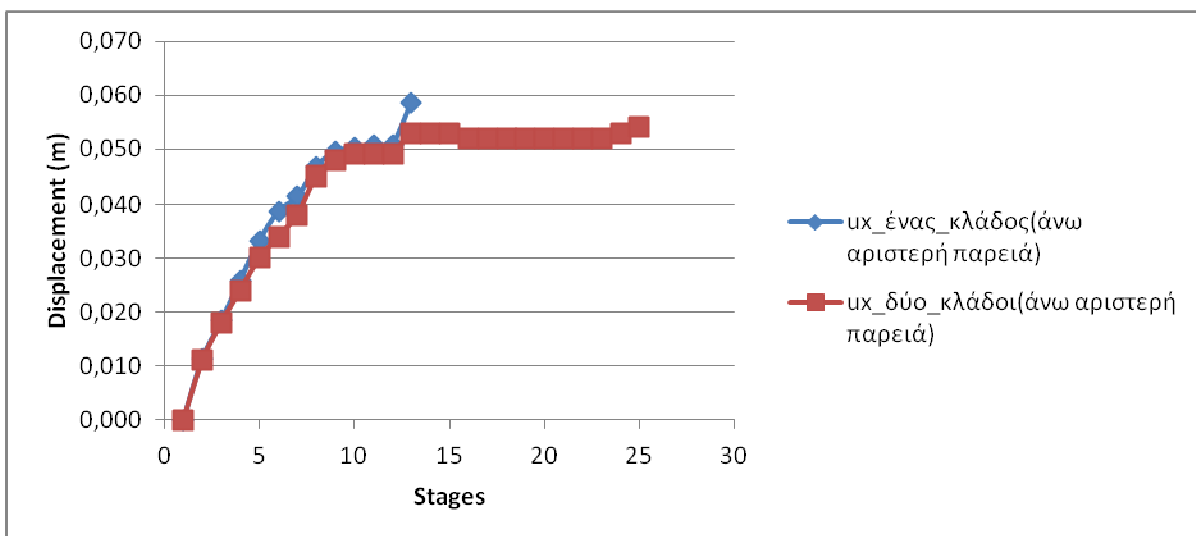
Διάγραμμα 71. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



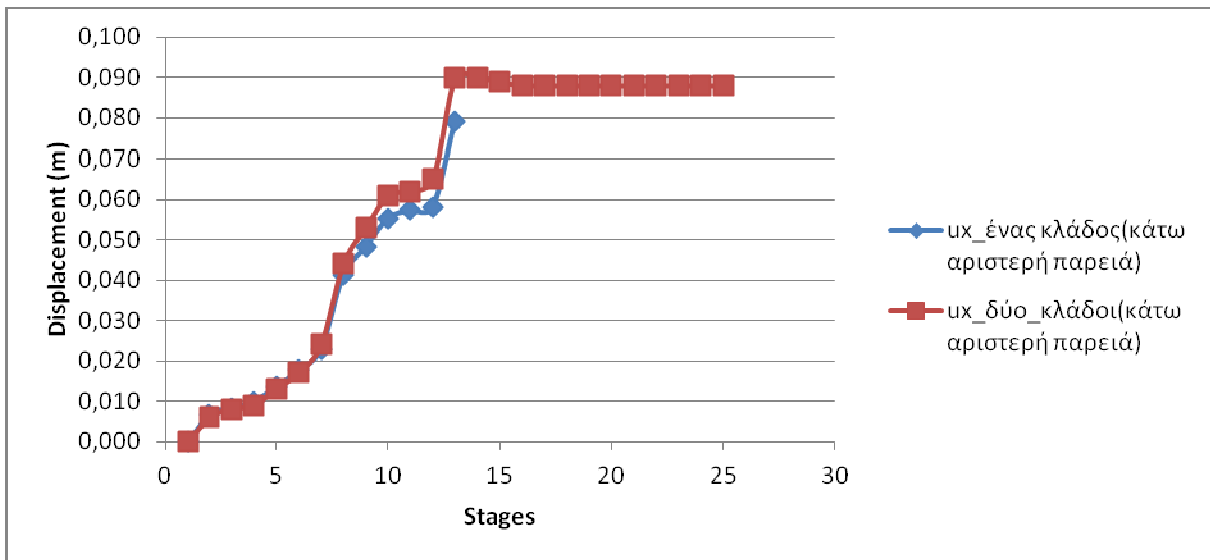
Διάγραμμα 72. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



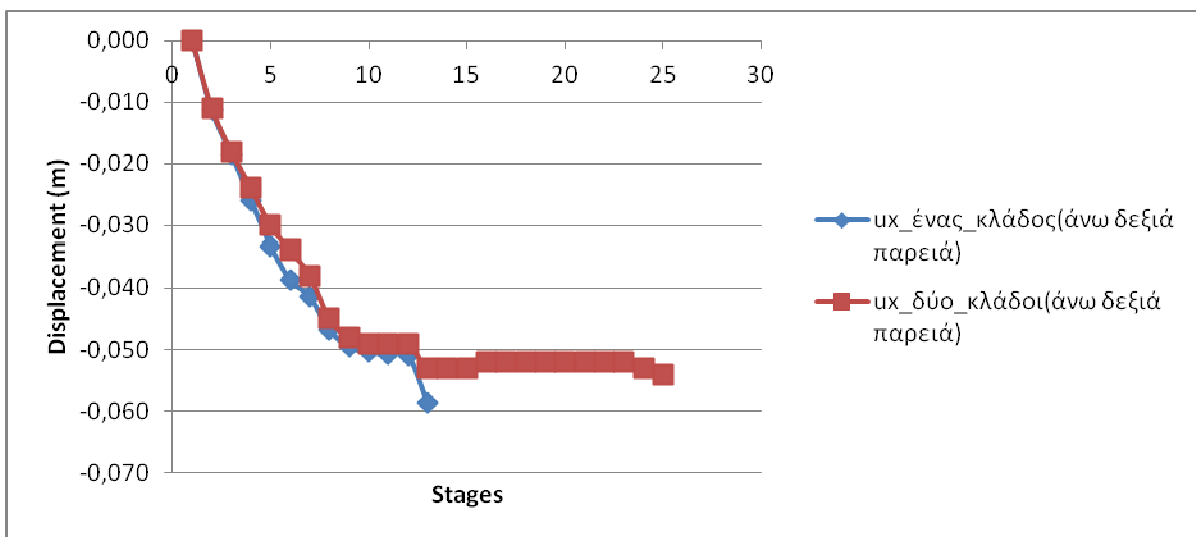
Διάγραμμα 73. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



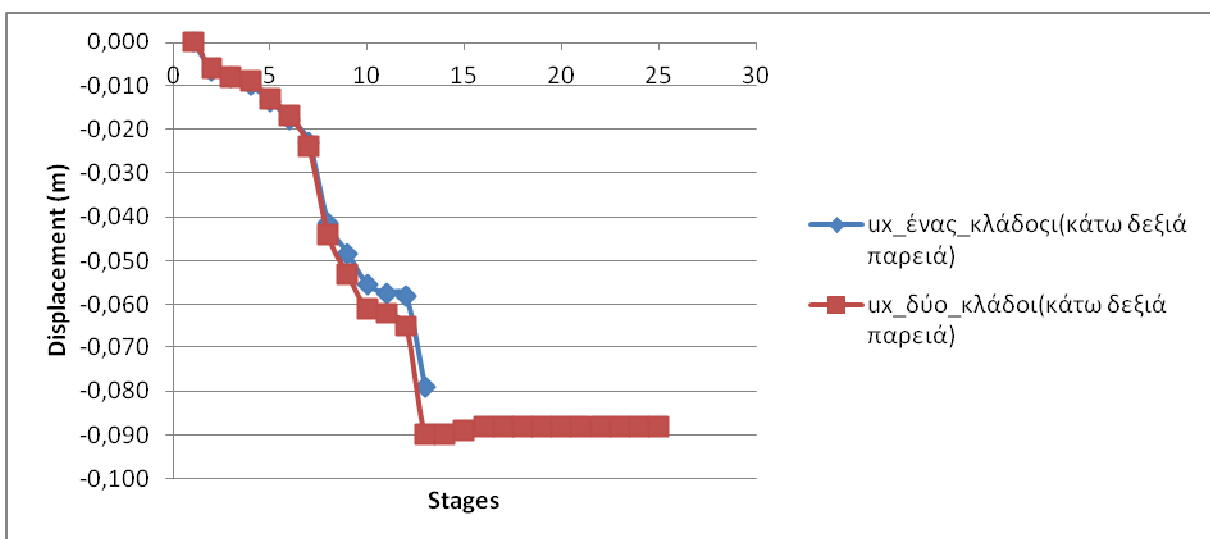
Διάγραμμα 74. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 75. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 76. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά

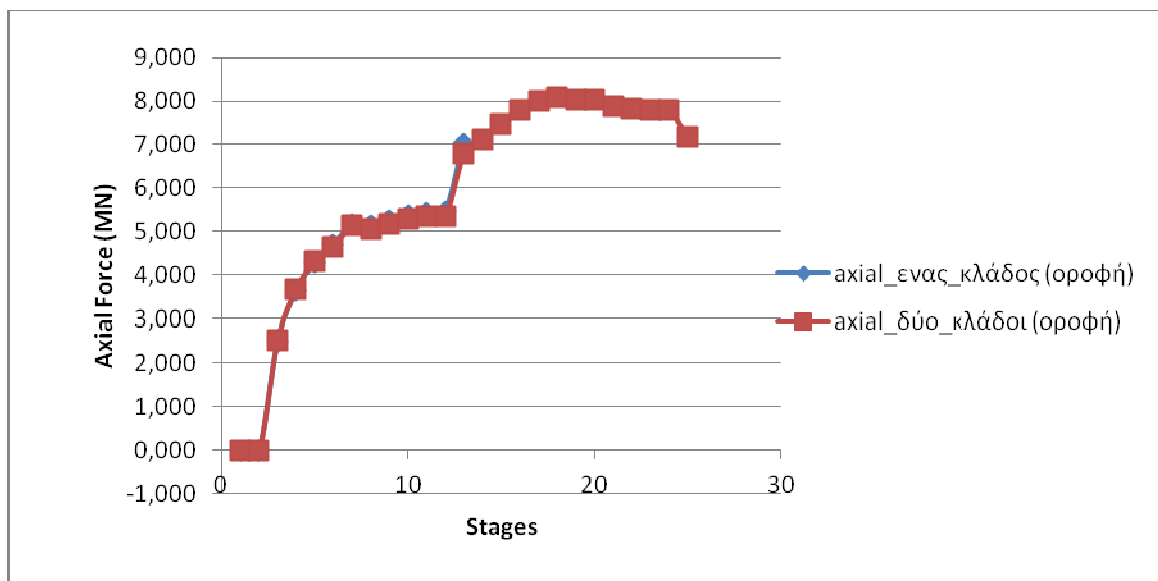


Διάγραμμα 77. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

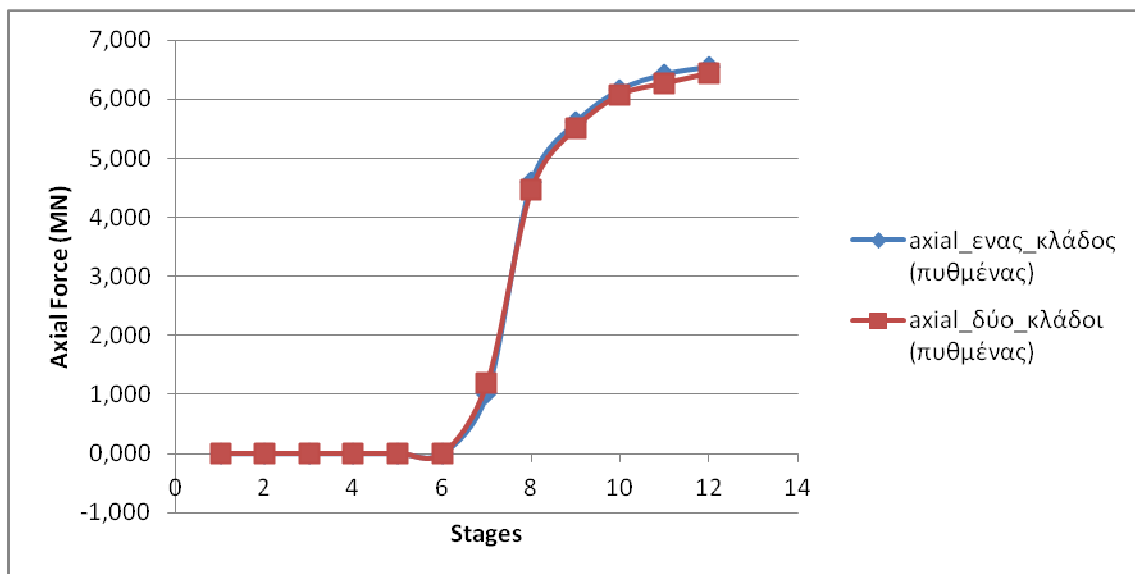
Οι μετατοπίσεις που συμβαίνουν στην σήραγγα του ενός κλάδου δεν έχουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με τον αριστερό των δύο κλάδων.

Μικρή αύξηση των μετακινήσεων παρατηρούνται στις παρειές και την οροφή, της τάξεως των 10cm, ενώ στην συνέχεια ακολουθούν σταθερή πορεία.

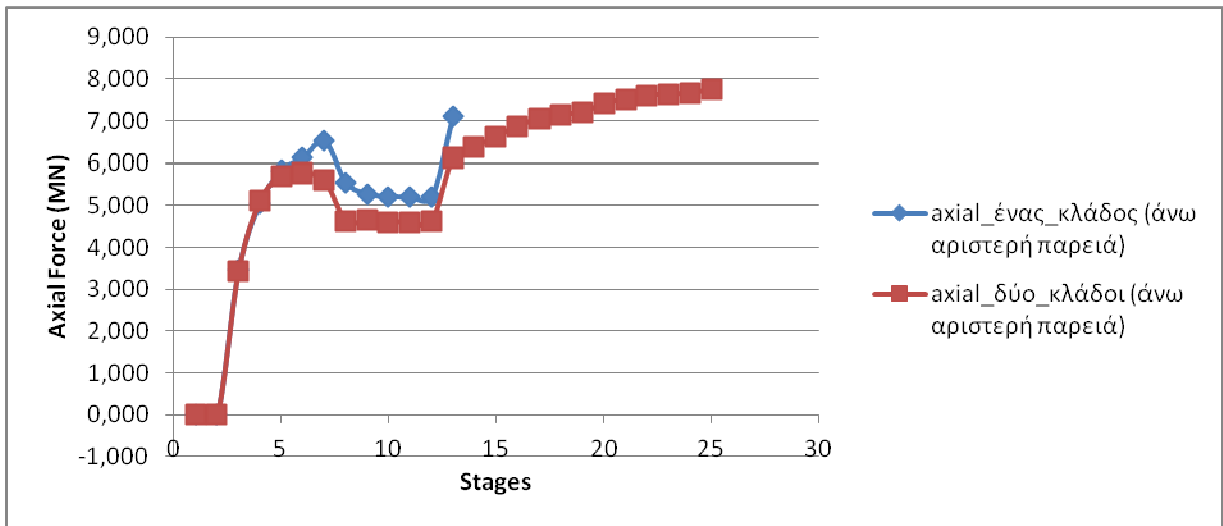
6.4.2 Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



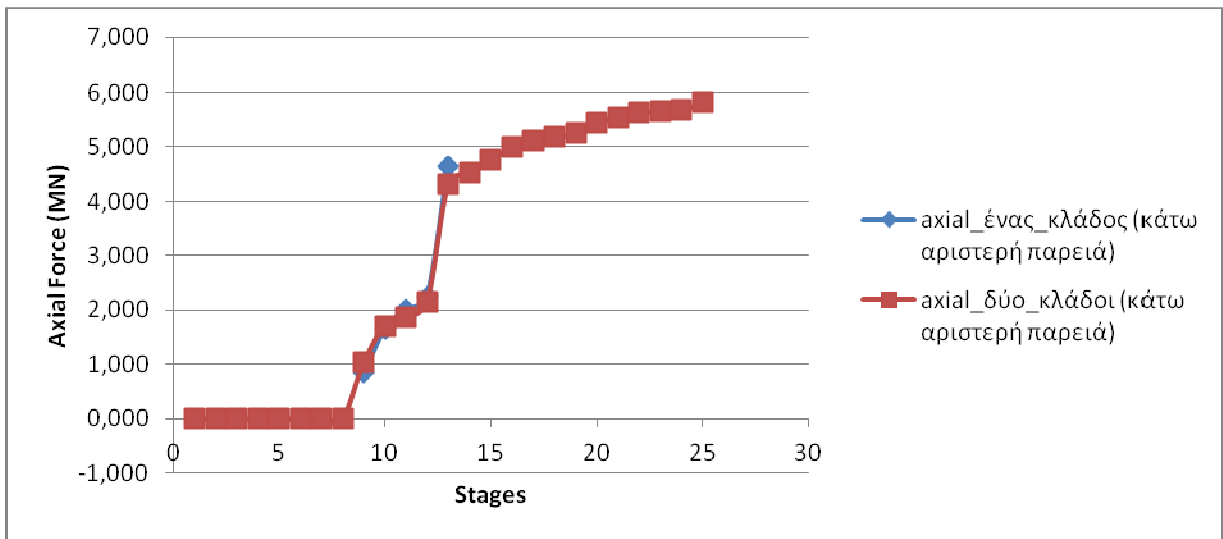
Διάγραμμα 78. Αξονική δύναμη στην οροφή



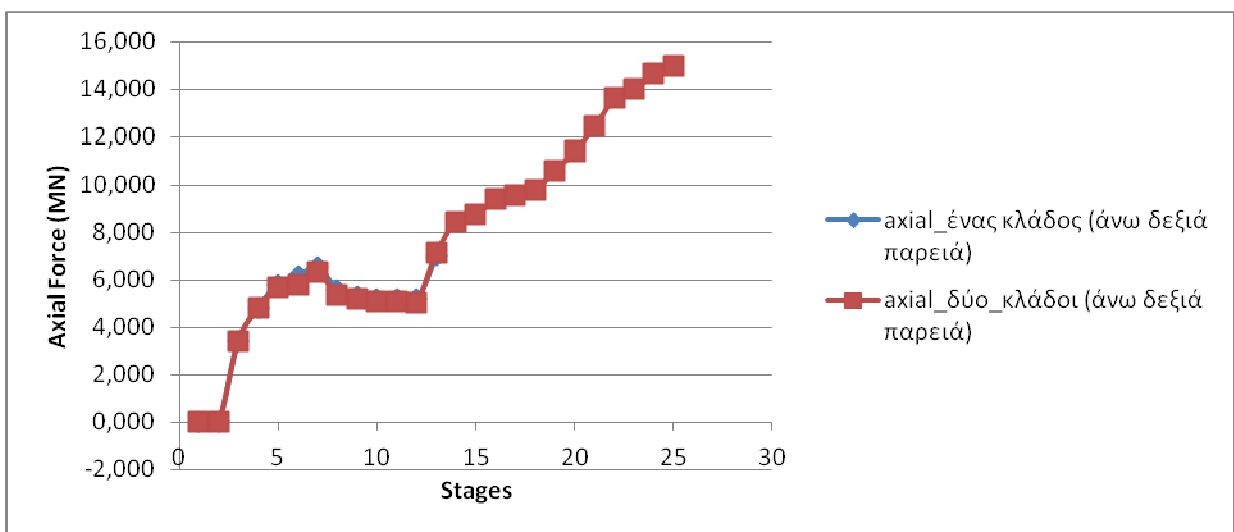
Διάγραμμα 79. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



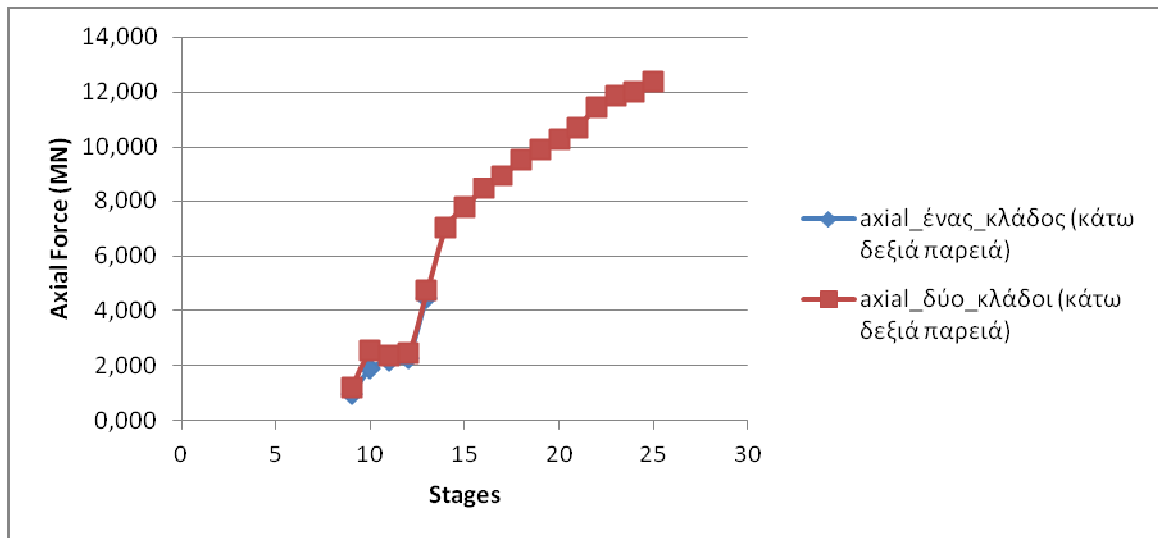
Διάγραμμα 80. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



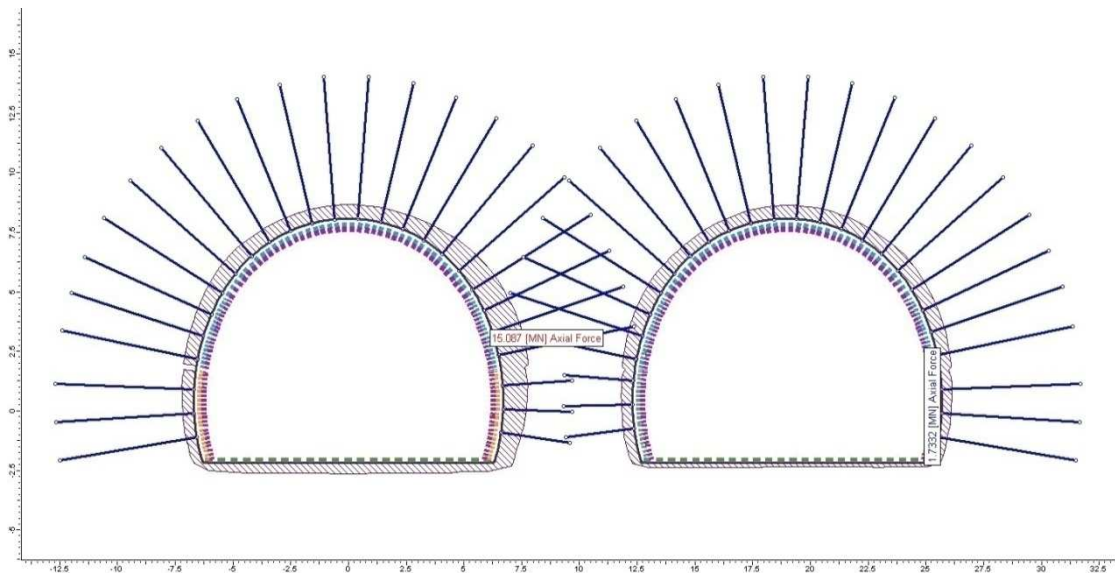
Διάγραμμα 81. Αξονική δύναμη στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 82. Αξονική δύναμη στην άνω δεξιά παρειά



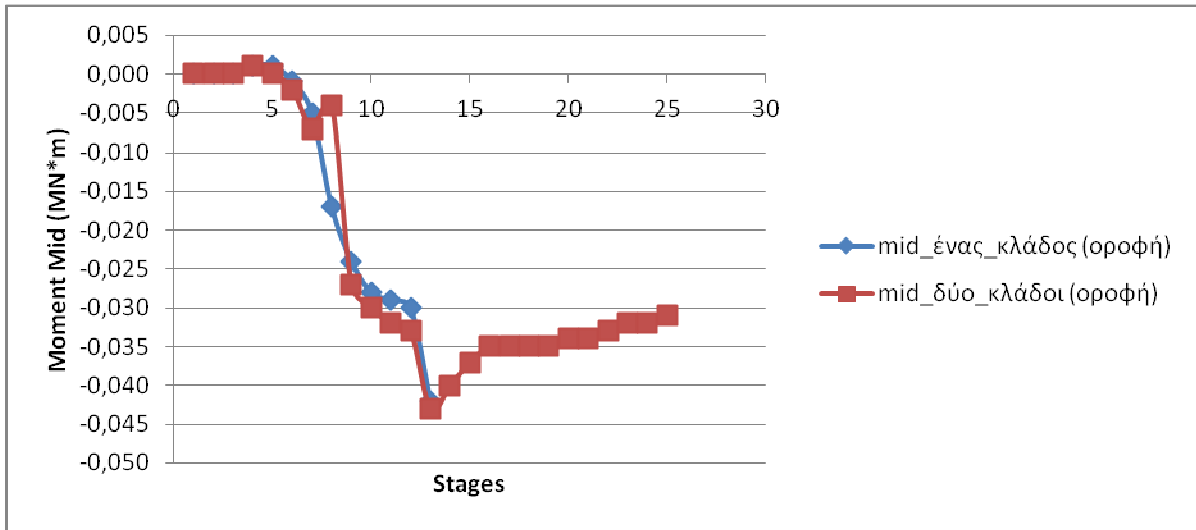
Διάγραμμα 83. Αξονική δύναμη στην κάτω δεξιά παρειά



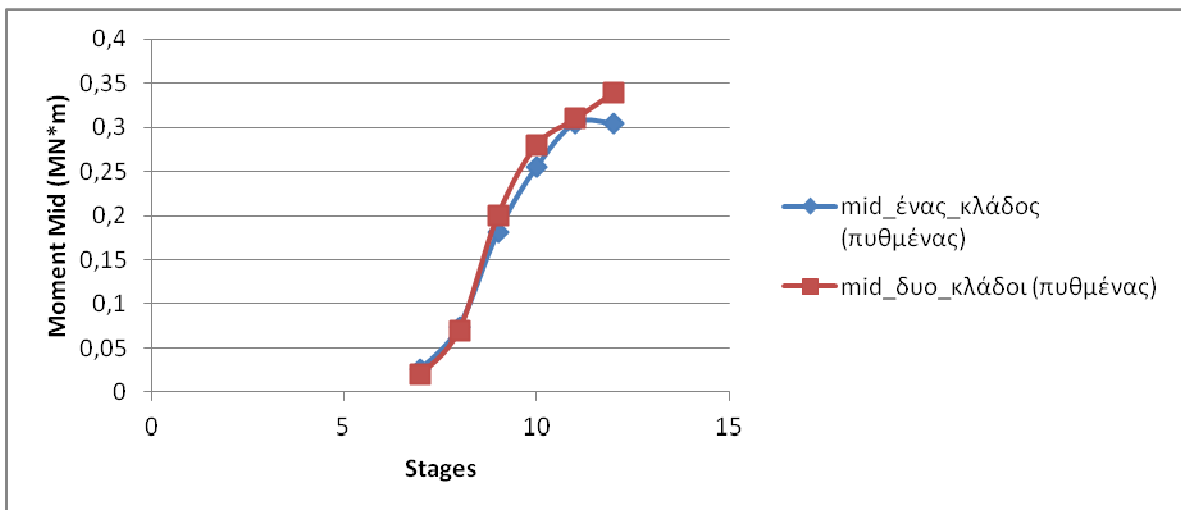
Εικόνα 42. Κατανομή αξονικών δυνάμεων στις διατομές

- Στην οροφή και τον πυθμένα οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται δεν υφίστανται ιδιαίτερες αλλαγές.
- Η αριστερή παρειά , άνω και κάτω , εμφανίζουν αύξηση των δυνάμεων κατά 1MN μετά και την διάνοιξη του δεύτερου κλάδου.
- Σημαντική μεταβολή της τιμής των δυνάμεων έχουμε στην δεξιά παρειά, όπου παρατηρείται αύξηση των τιμών κατά 10MN. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μικρή απόσταση που έχει η δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου με την αριστερή παρειά του δεξιού κλάδου, και έτσι είναι φυσικό να έχουμε πολύ μεγαλύτερη αύξηση της αξονική δύναμης σε αυτά τα σημεία.

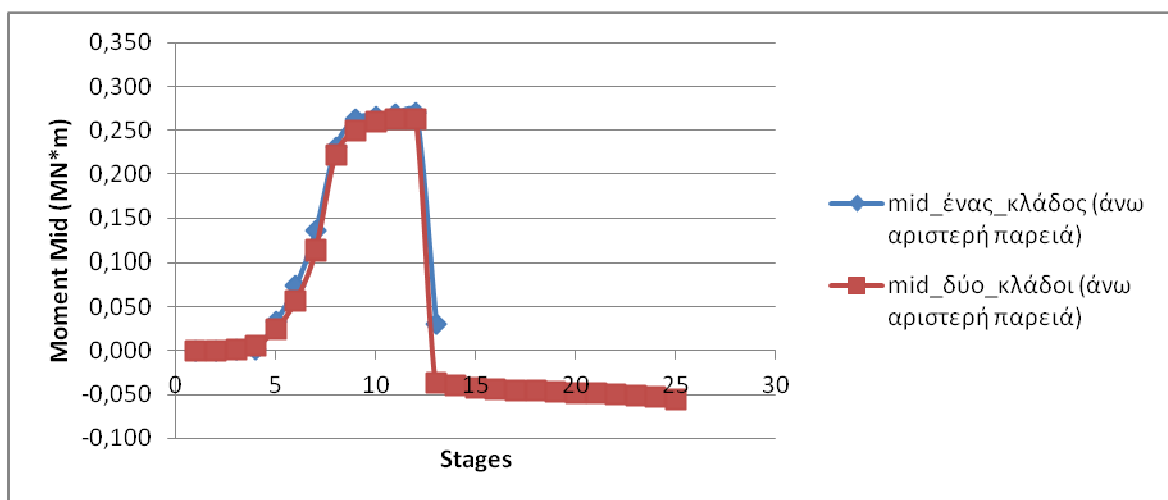
6.4.3 Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



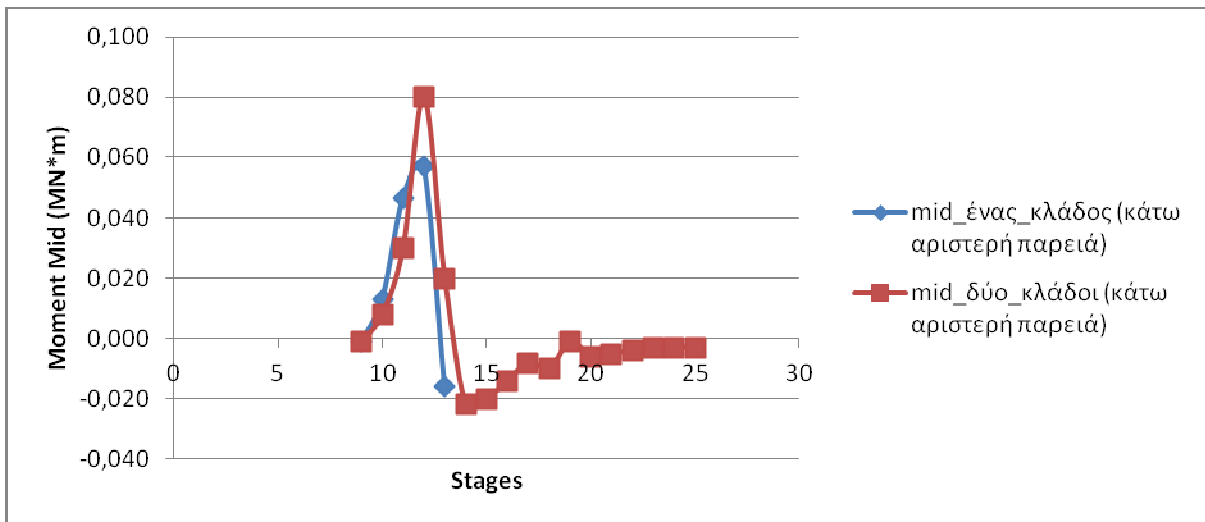
Διάγραμμα 84. Ροπή κάμψης στην οροφή



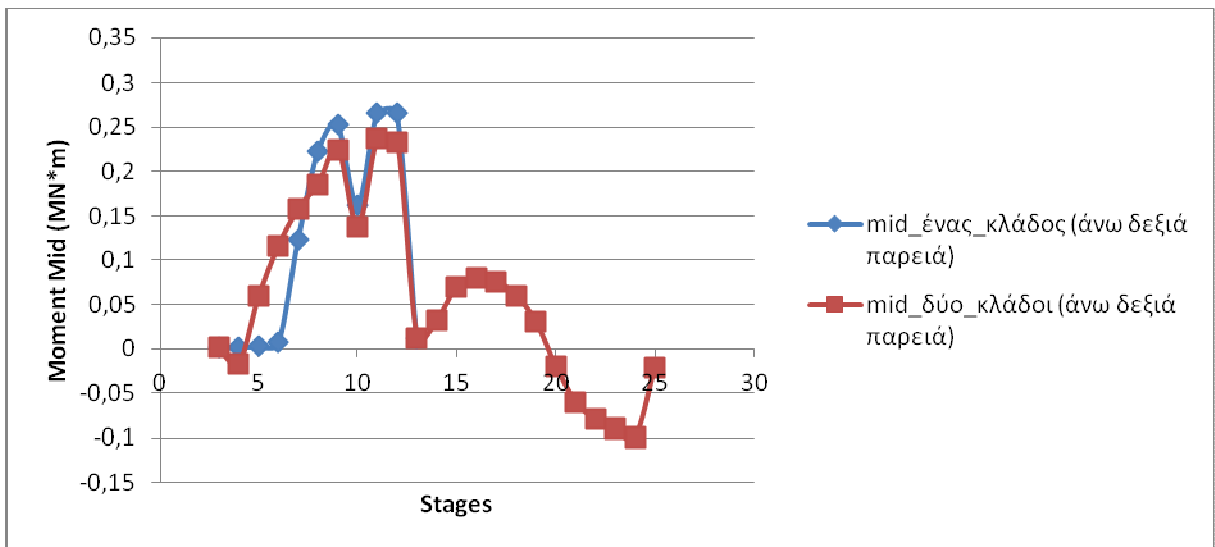
Διάγραμμα 85. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



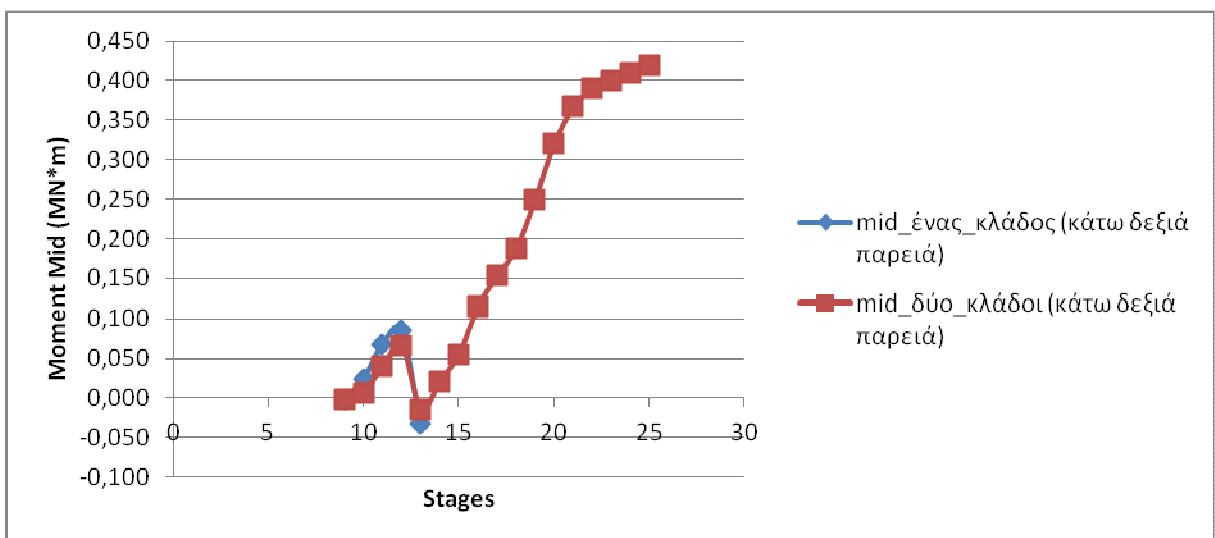
Διάγραμμα 86. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



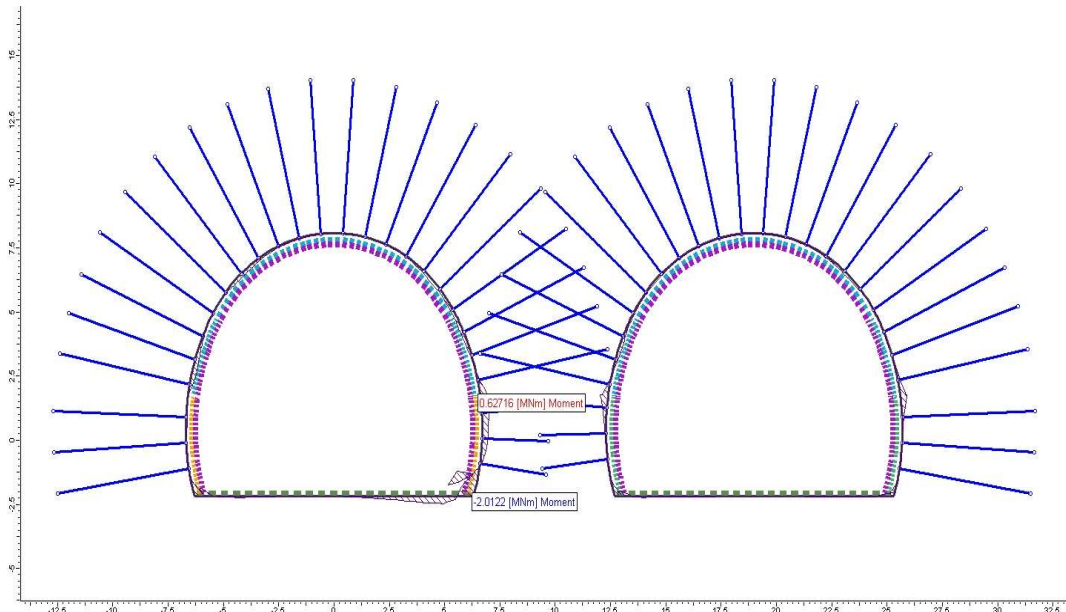
Διάγραμμα 87. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 88. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά



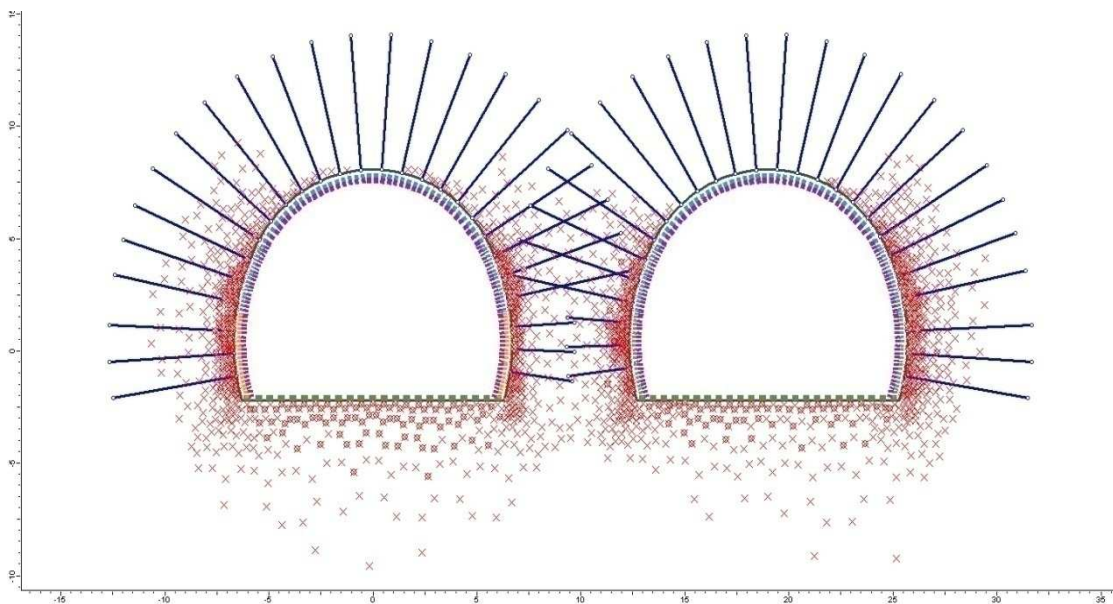
Διάγραμμα 89. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά



Εικόνα 43. Κατανομή ροπών κάμψης στις διατομές

Όπως και στις αξονικές δυνάμεις, έτσι και οι ροπές κάμψης μεταβάλλονται σημαντικά στην δεξιά παρειά του αριστερού κλάδου. Υπάρχει αύξηση που αγγίζει το 250% σε σχέση με πριν, πράγμα που θα μπορούσε να δημιουργήσει πρόβλημα στην κατασκευή.

Στα υπόλοιπα σημεία του τούνελ, η αύξηση δεν είναι αξιοσημείωτη.



Εικόνα 44. Κατανομή αστοχόντων σημείων στις διατομές

6.5. Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση 38 μέτρα)

Για τον καλύτερο προσδιορισμό των τιμών των γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της σήραγγας κατασκευάζουμε τρία ακόμη μοντέλα με πανομοιότυπες ιδιότητες, γεωμετρία και χαρακτηριστικά σε σχέση με τα προηγούμενα, αλλάζοντας μόνο τον τύπο του σκυροδέματος. Το πάχος του σκυροδέματος στην οροφή είναι 35cm και στην βαθμίδα 30cm, δίχως να μεταβάλλονται ανά στάδιο.

Στην περίπτωση αυτή το σκυρόδεμα προσομοιώνεται ως **οπλισμένο σκυρόδεμα με πλαίσιο τύπου HEB180**. Οι ιδιότητες είναι :

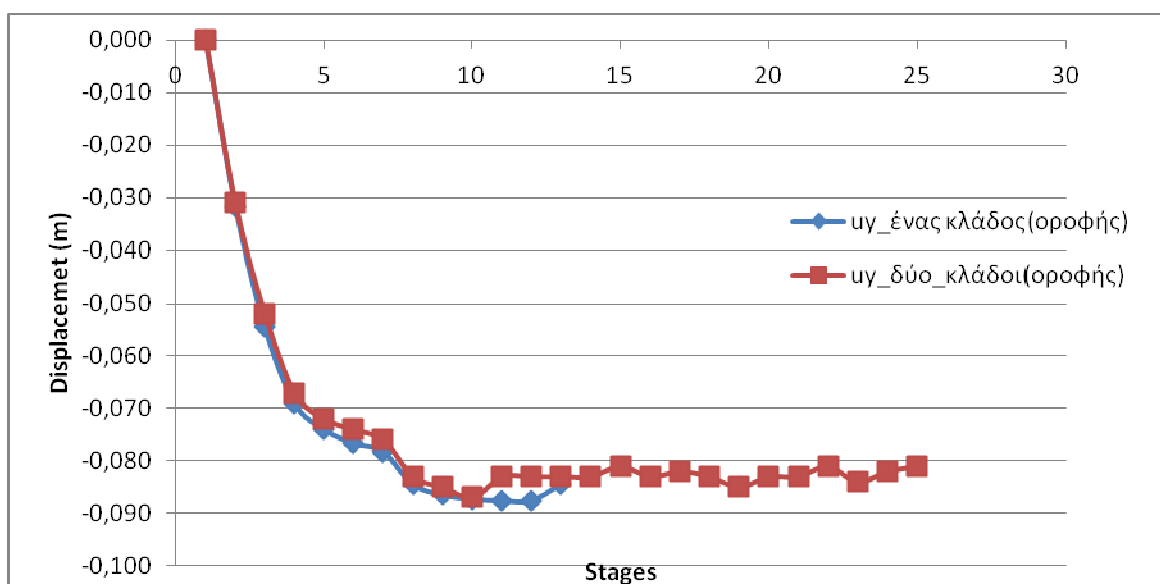
Young Modulus : 15.000MPa

Poisson's ratio : 0,2

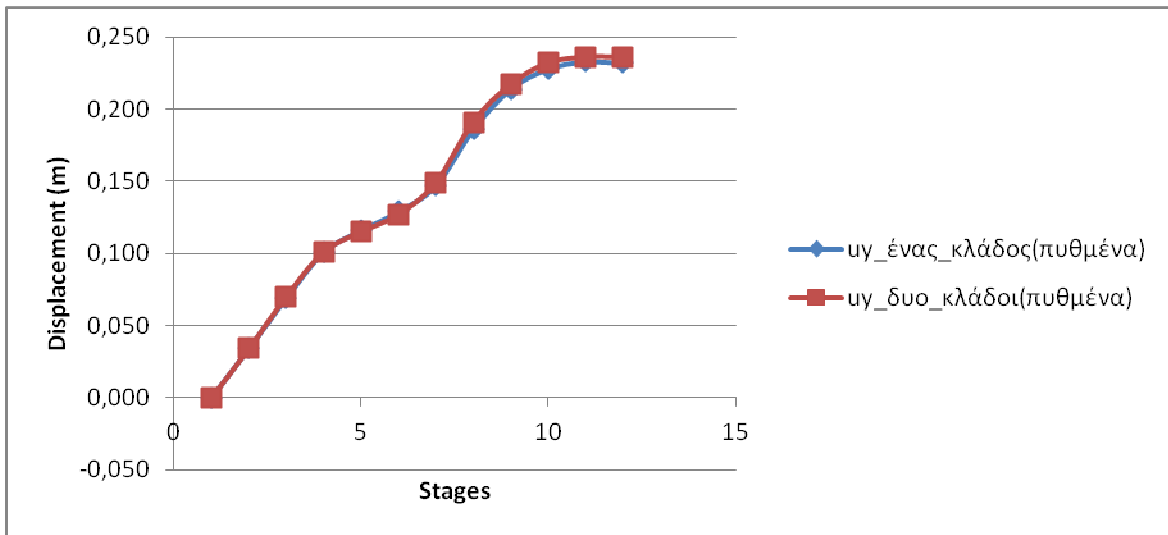
Compressive strength : 20Mpa

Tensile strength : 1,33MPa

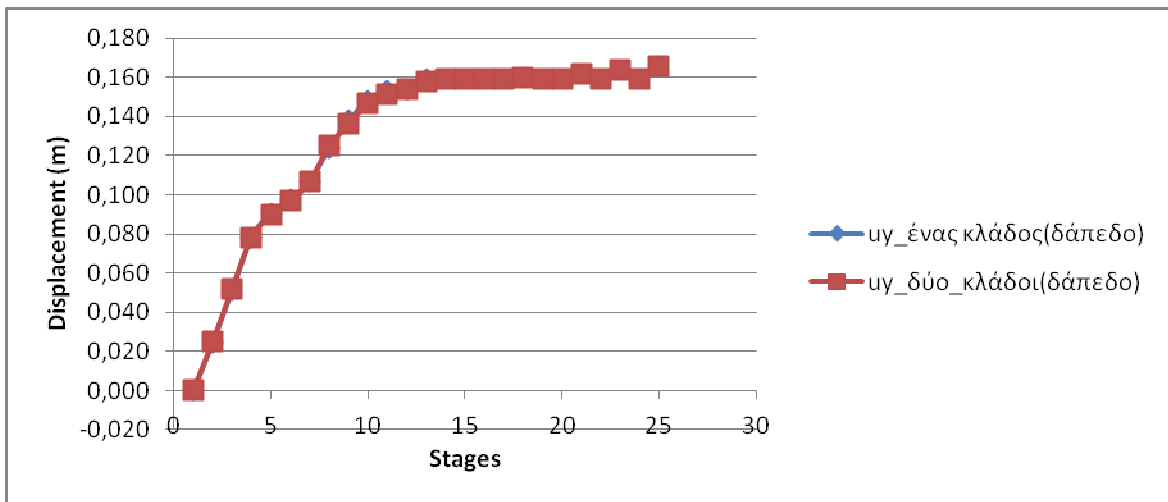
6.5.1. Μετατοπίσεις



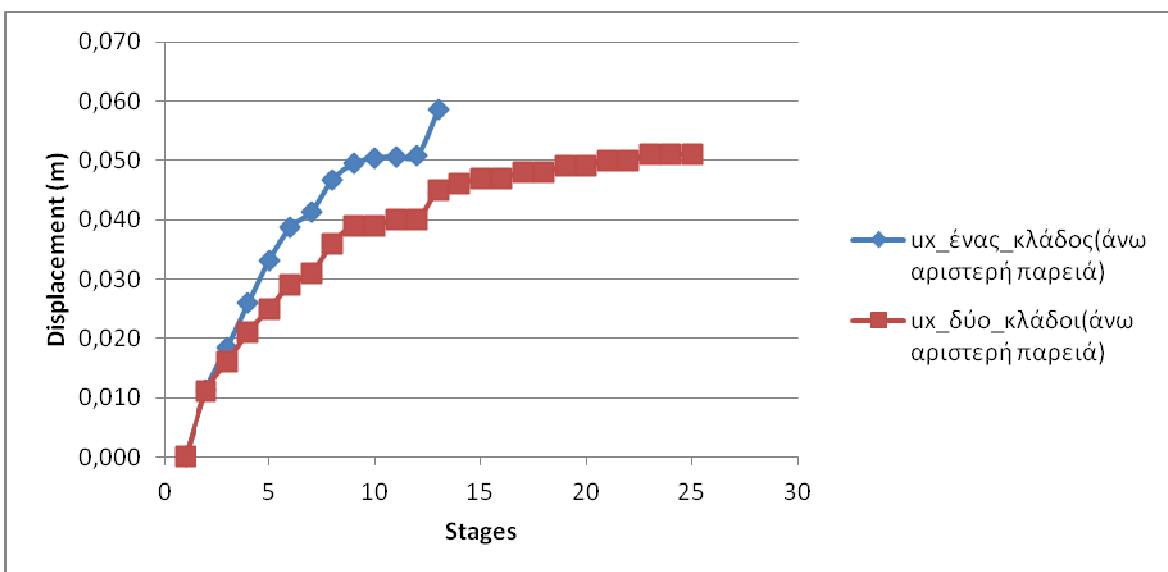
Διάγραμμα 90. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



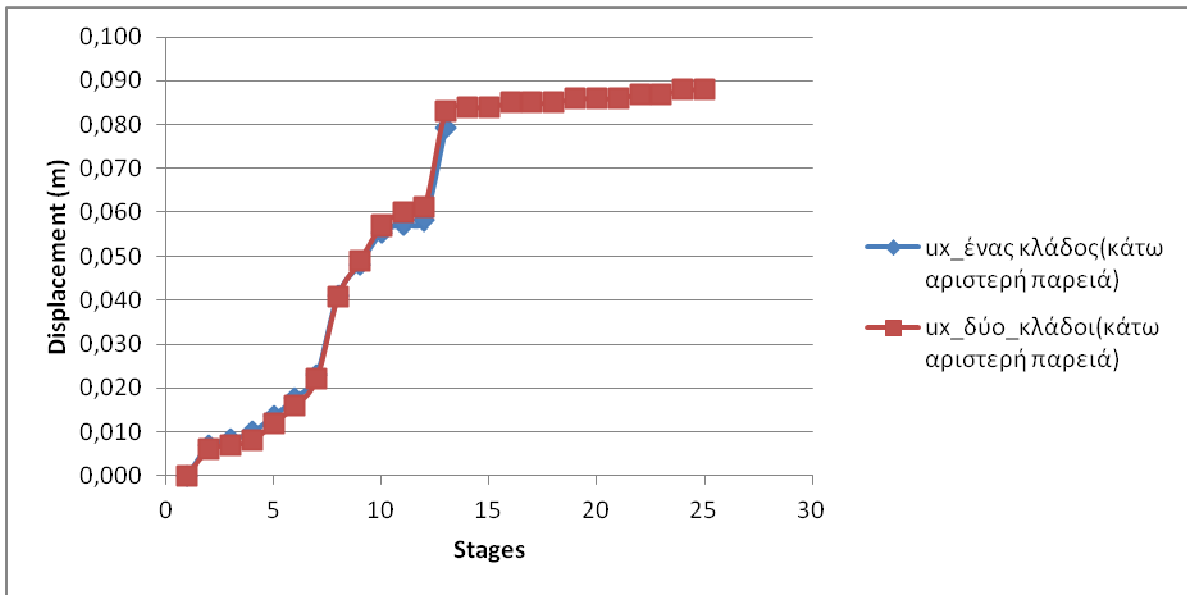
Διάγραμμα 91. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



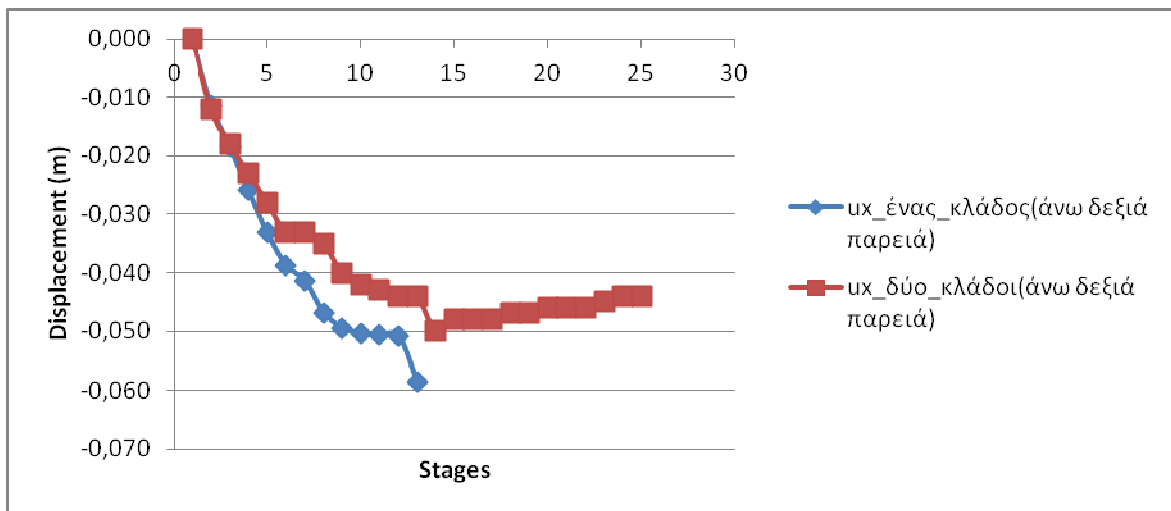
Διάγραμμα 92. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



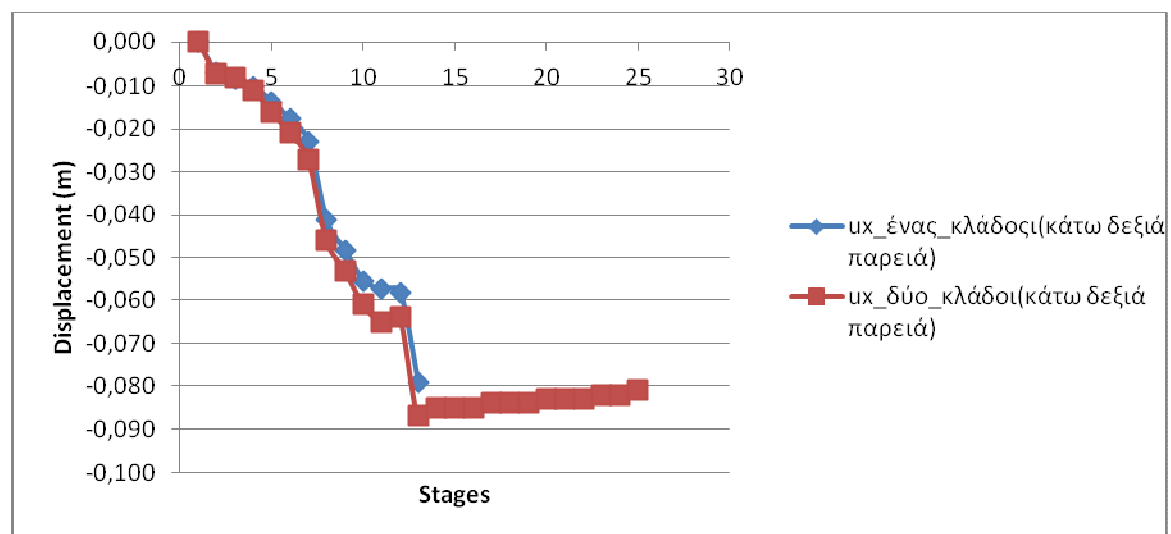
Διάγραμμα 93. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 94. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



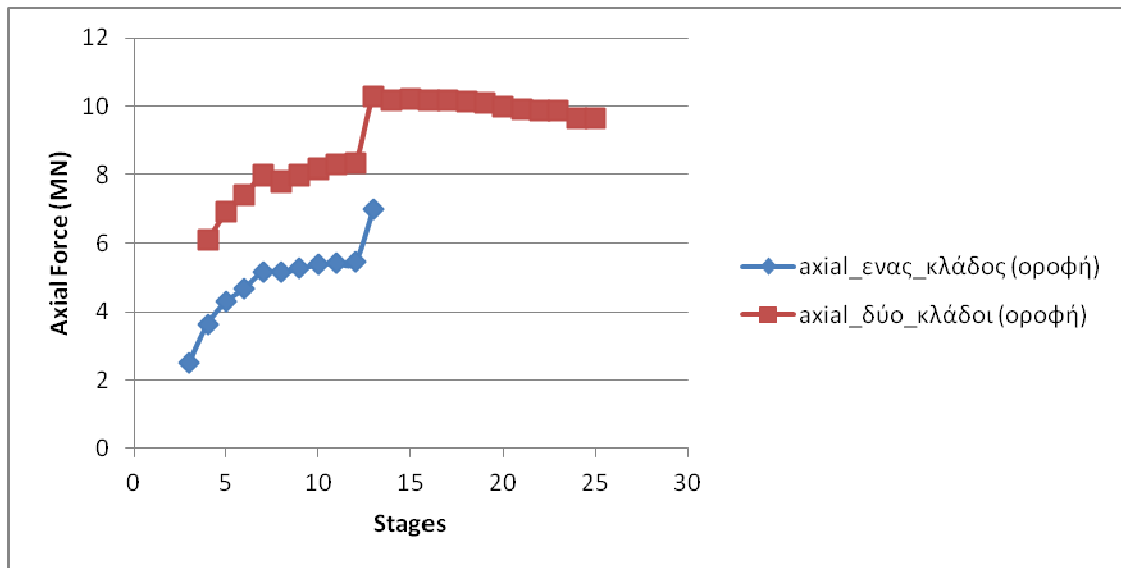
Διάγραμμα 95. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά



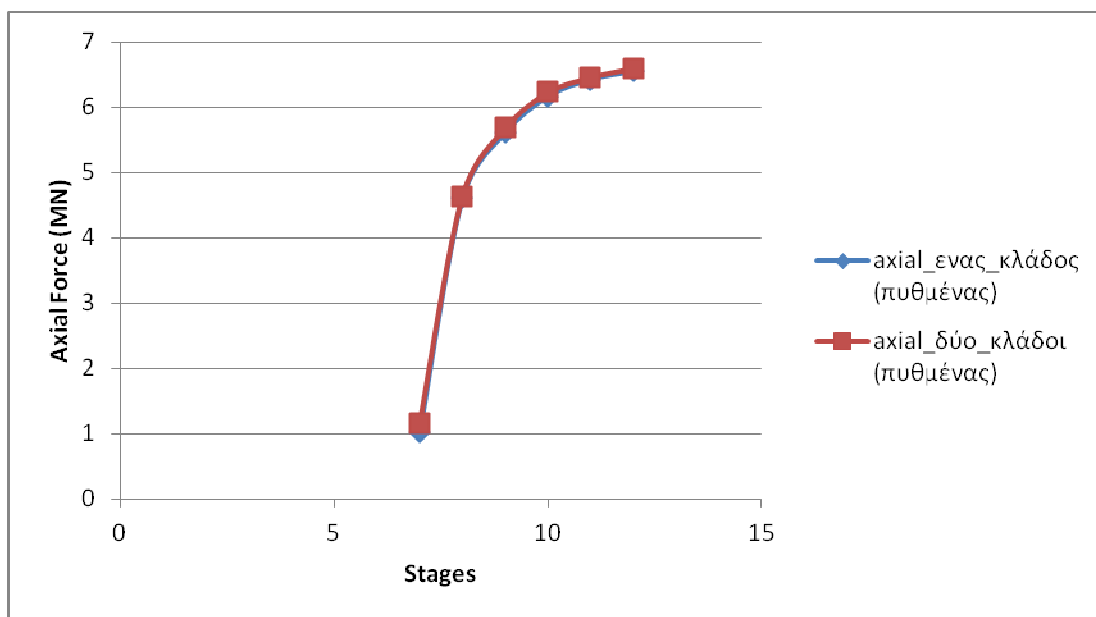
Διάγραμμα 96. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

Με την προσομοίωση του σκυροδέματος ως οπλισμένο παρατηρούμε αλλαγές στις μετακινήσεις της άνω αριστερής και δεξιάς παρειάς, ωστόσο αυτό συμβαίνει και λόγω αλλαγής του καννάβου. Στα χαμηλότερα σημεία δεν έχουμε κάποια μεταβολή.

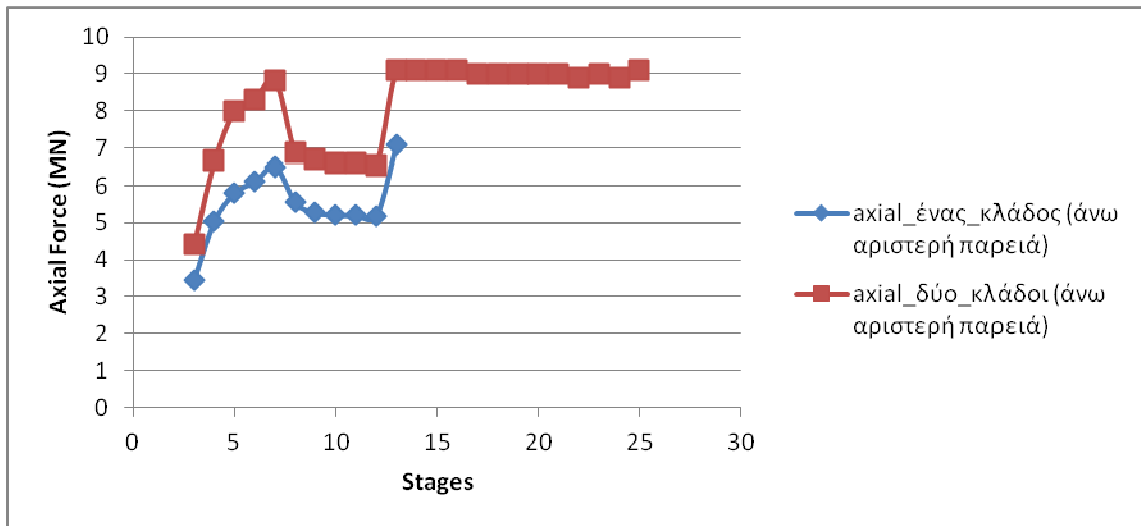
6.5.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



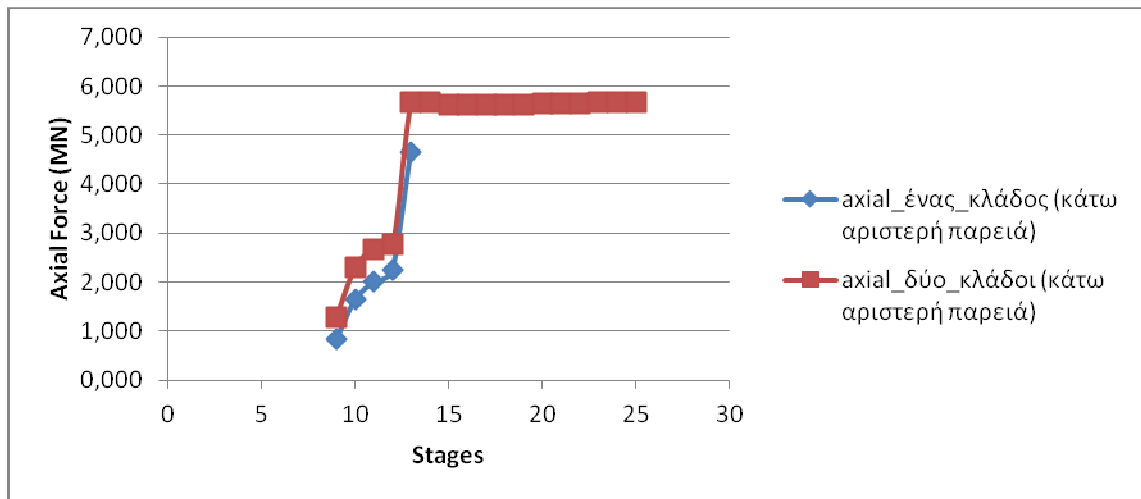
Διάγραμμα 97. Αξονική δύναμη στην οροφή



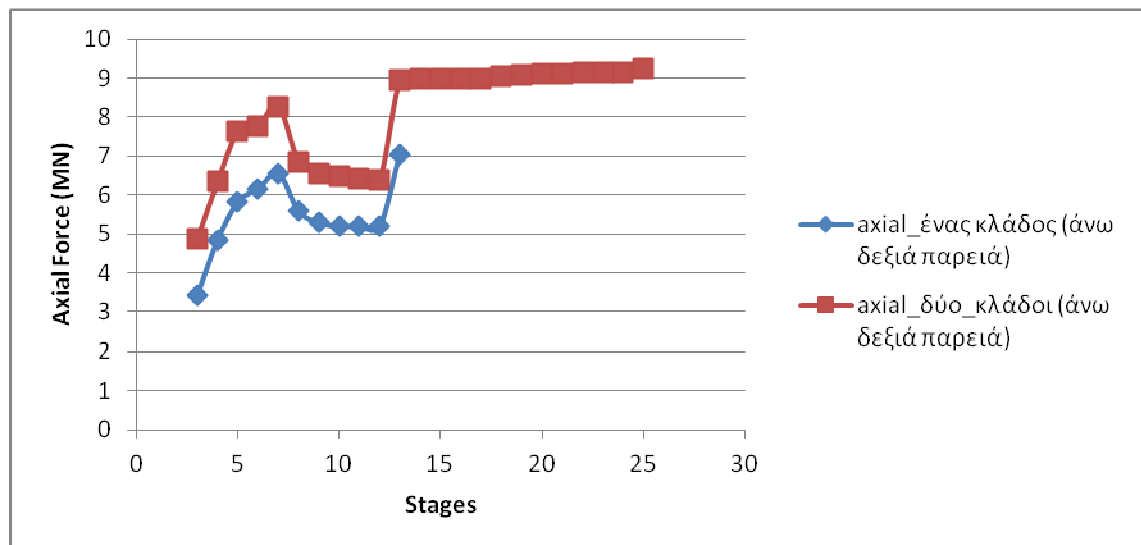
Διάγραμμα 98. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



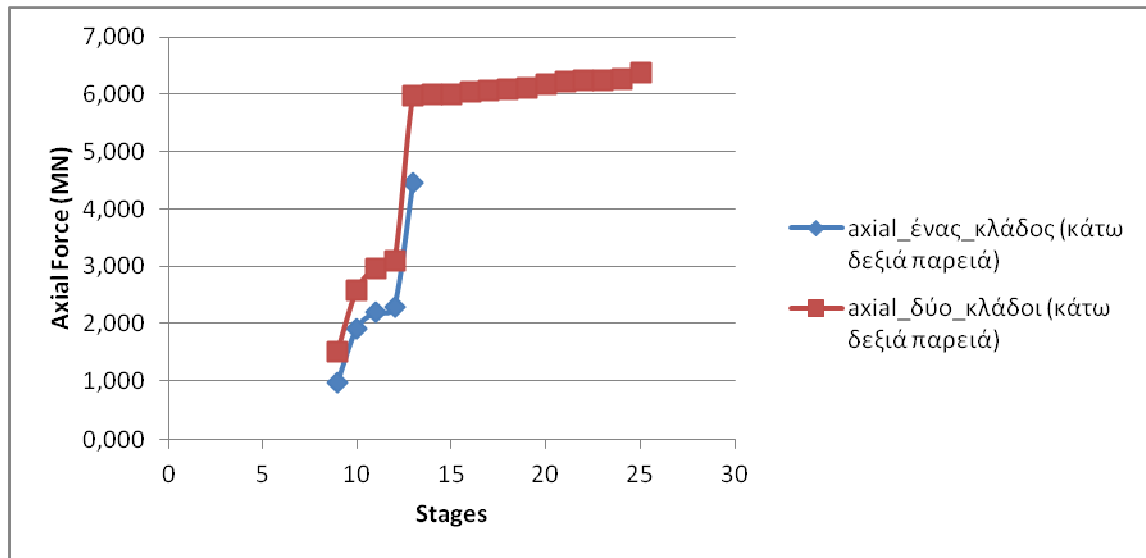
Διάγραμμα 99. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



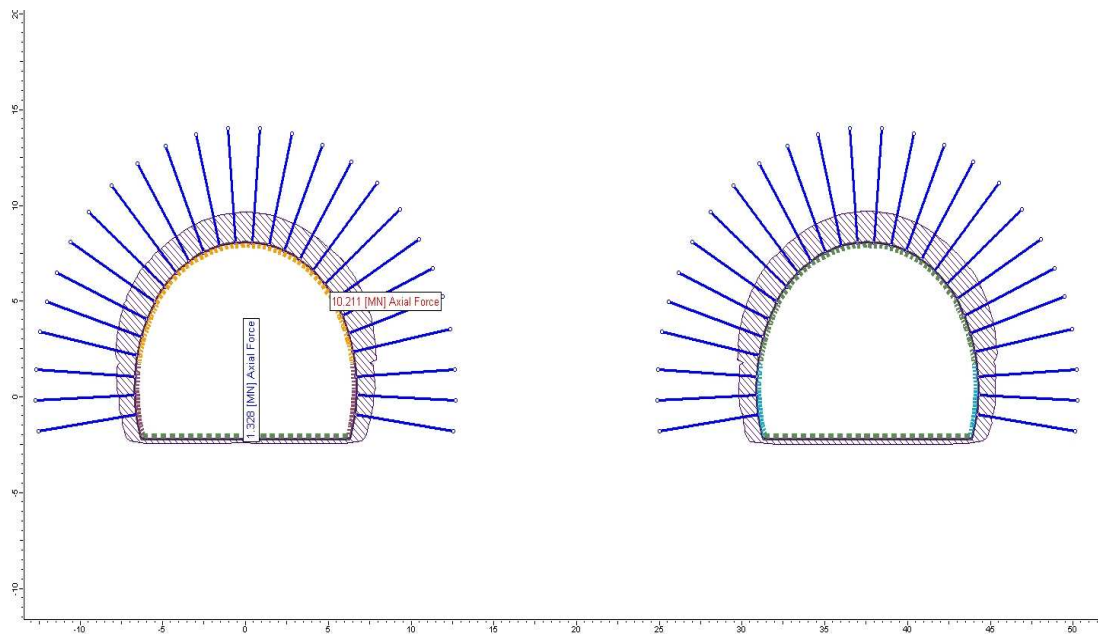
Διάγραμμα 100. Αξονική δύναμη στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 101. Αξονική δύναμη στην άνω δεξιά παρειά



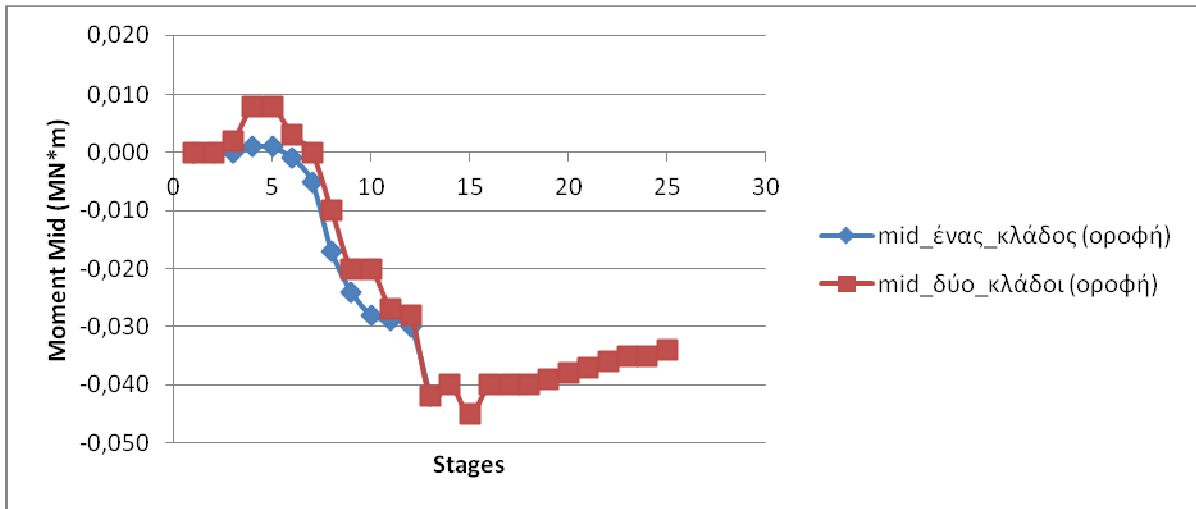
Διάγραμμα 102. Αξονική δύναμη στην κάτω δεξιά παρειά



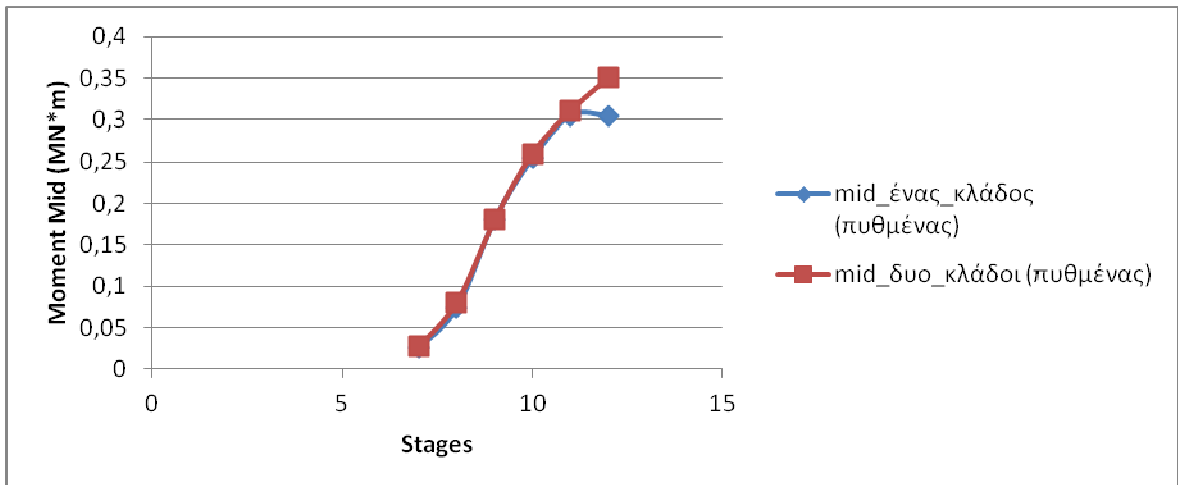
Εικόνα 45. Κατανομή αξονικής δύναμης στις διατομές

- Ο πυθμένας είναι ο μόνος που κατά τα πρώτα 13 στάδια δεν διαφοροποιείται
- Η αξονική δύναμη στην οροφή αυξάνεται από τα 7 στα 10MN, δηλαδή κατά 43%.
- Η αύξηση στην αριστερή παρειά φθάνει το 30% , ενώ στην δεξιά κινείται στα ίδια περίπου επίπεδα παίρνοντας ελαφρώς υψηλότερες τιμές σε σχέση με τα αριστερά.

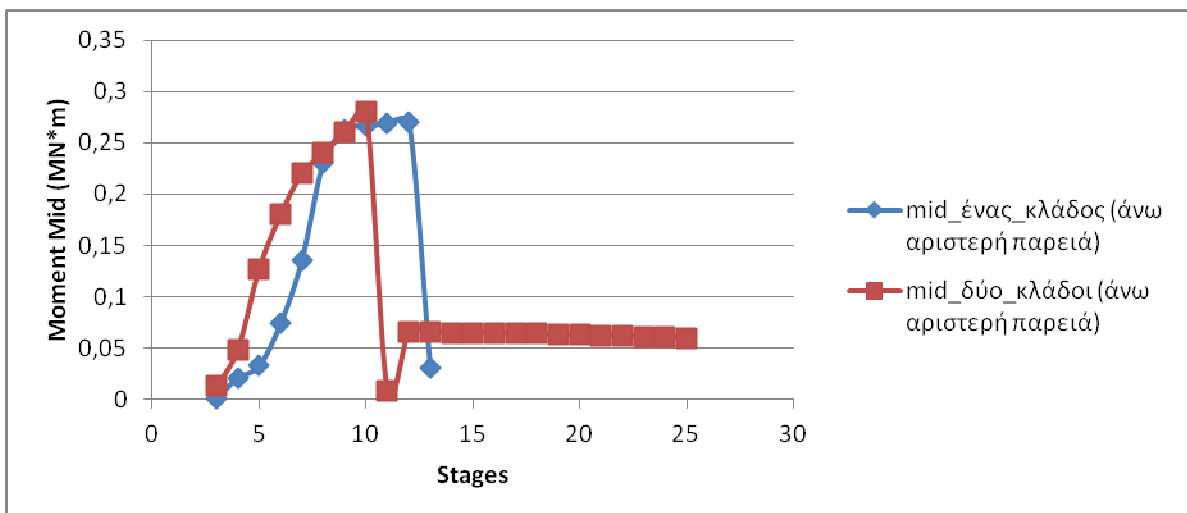
6.5.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



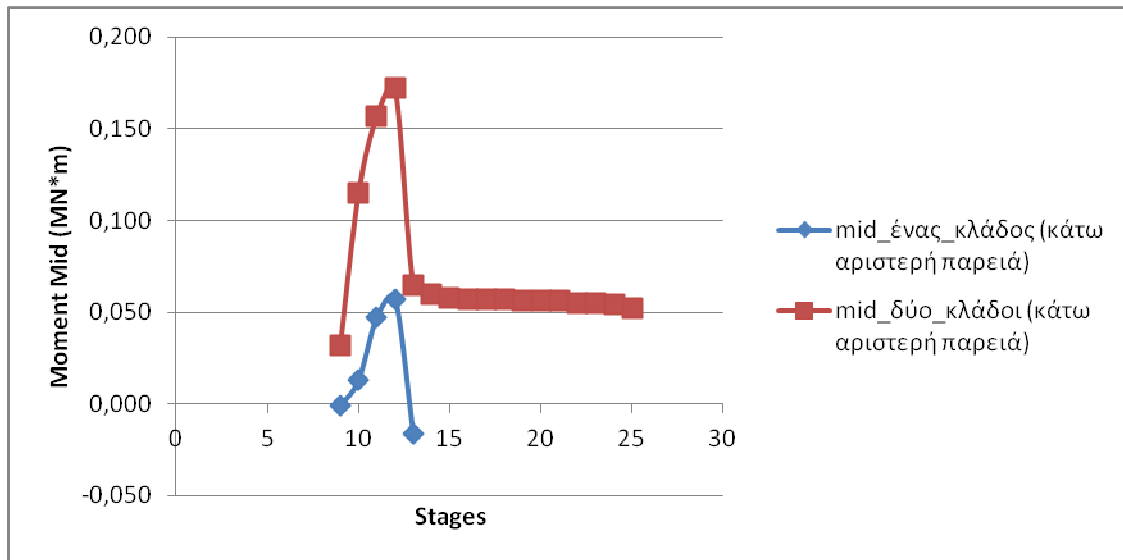
Διάγραμμα 103. Ροπή κάμψης στην οροφή



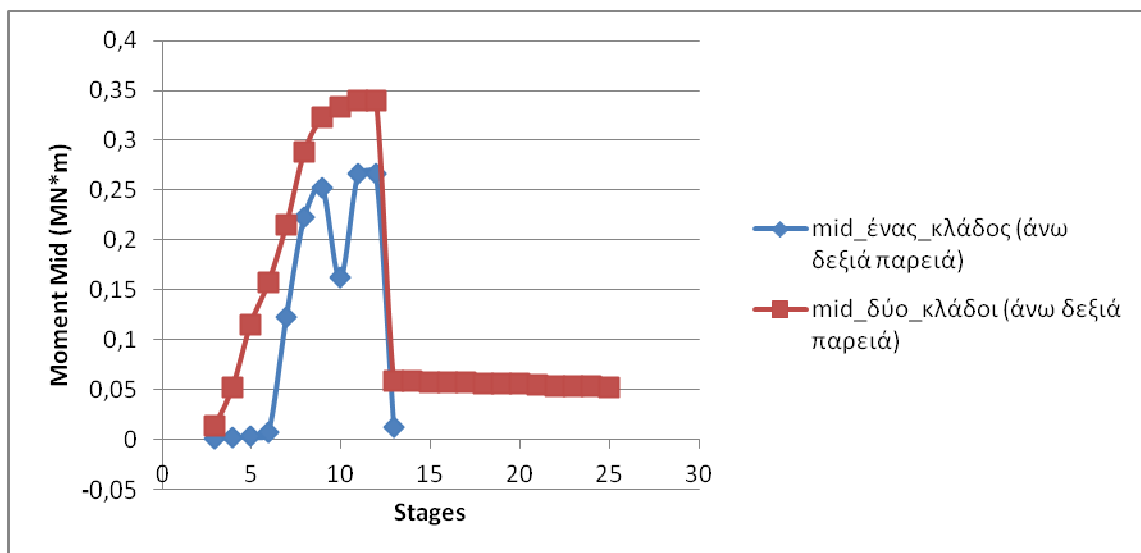
Διάγραμμα 104. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



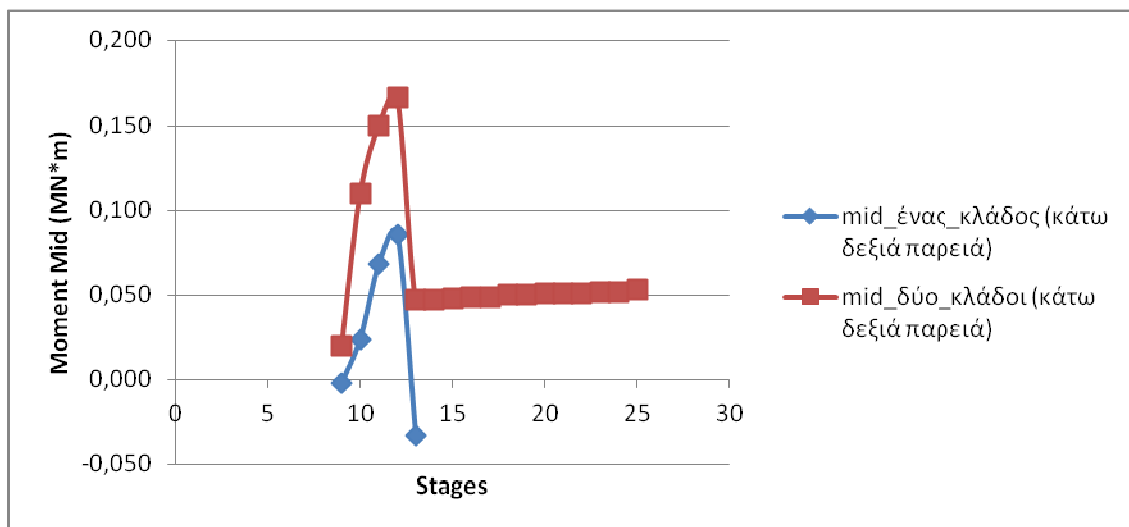
Διάγραμμα 105. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



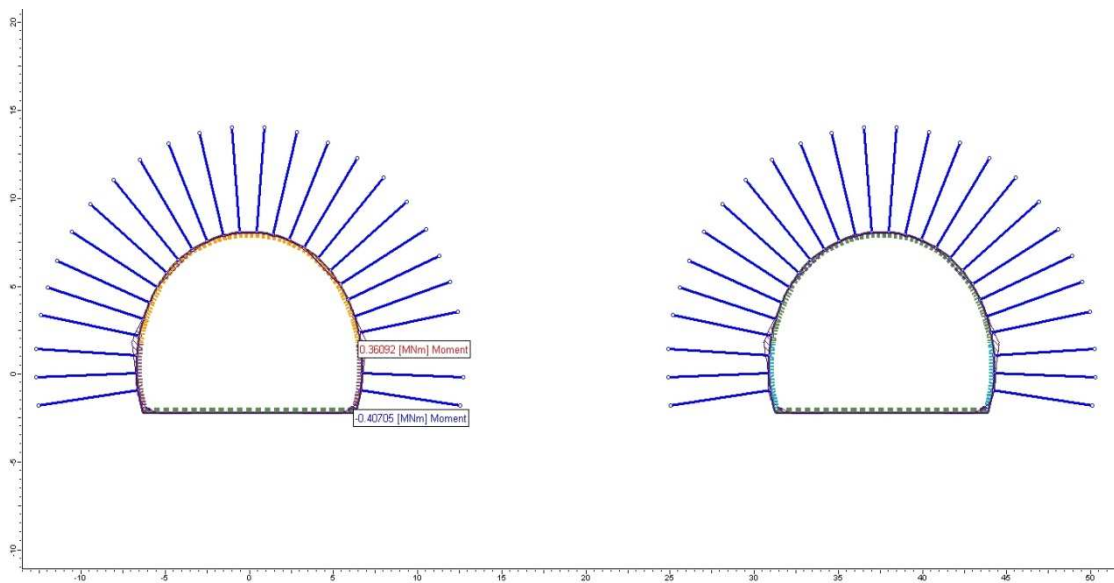
Διάγραμμα 106. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 107. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 108. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά

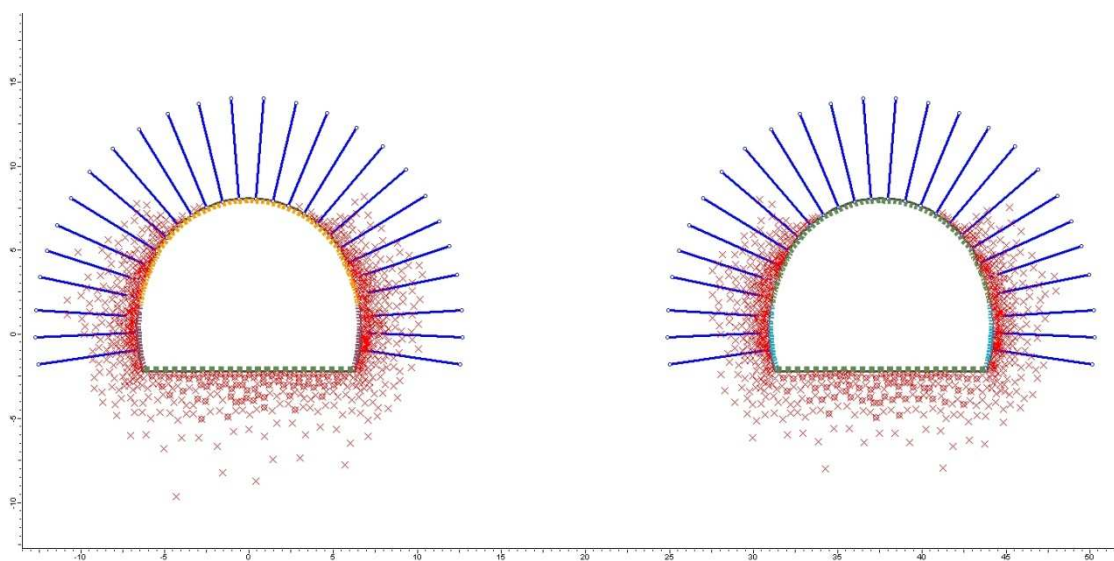


Εικόνα 46. Κατανομή ροπής κάμψης στις διατομές

Πολύ μεγάλη μεταβολή έχουμε στις ροπές κάμψης. Στην οροφή και τον πυθμένα οι αλλαγές στις τιμές δεν είναι μεγάλες.

Στην αριστερή παρειά οι ροπές κάμψης φτάνουν ακόμη και στο τριπλάσιο τις τιμές που είχαμε μέχρι το 13^ο στάδιο, ενώ στην δεξιά φτάνουν περίπου το διπλάσιο.

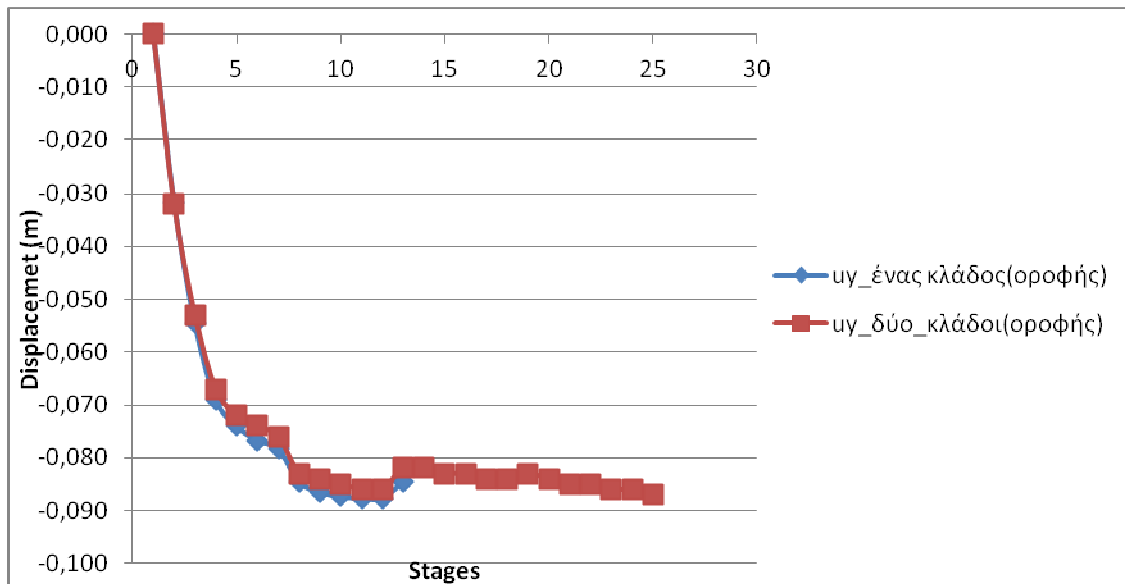
Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι στα κάτω τμήματα παρατηρούνται πιο απότομες μεταβολές σε σχέση με τα ανώτερα.



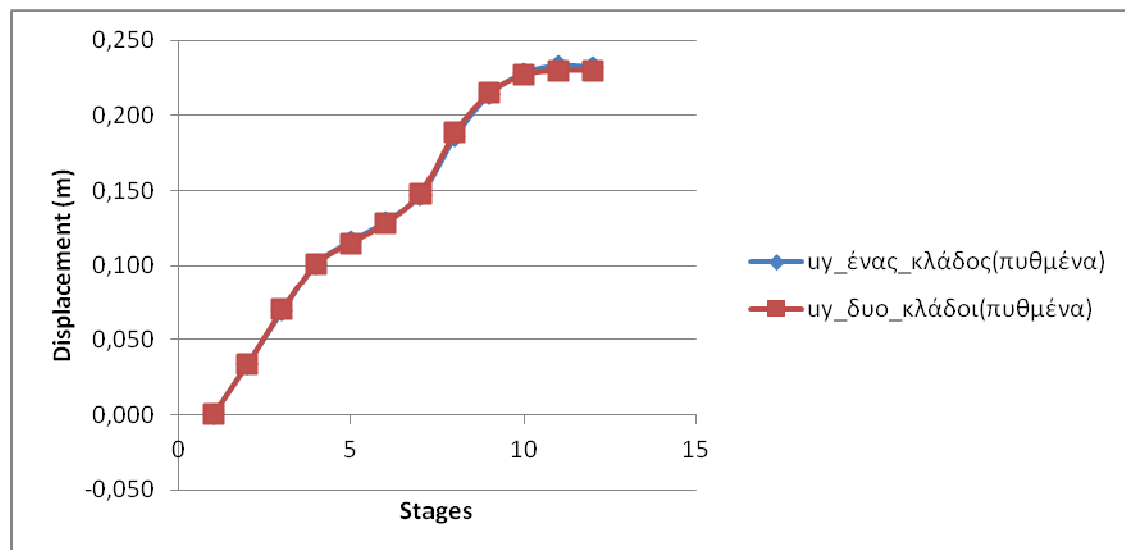
Εικόνα 47. Κατανομή αστοχούντων σημείων στις διατομές

6.6. Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση 28,5 μέτρα)

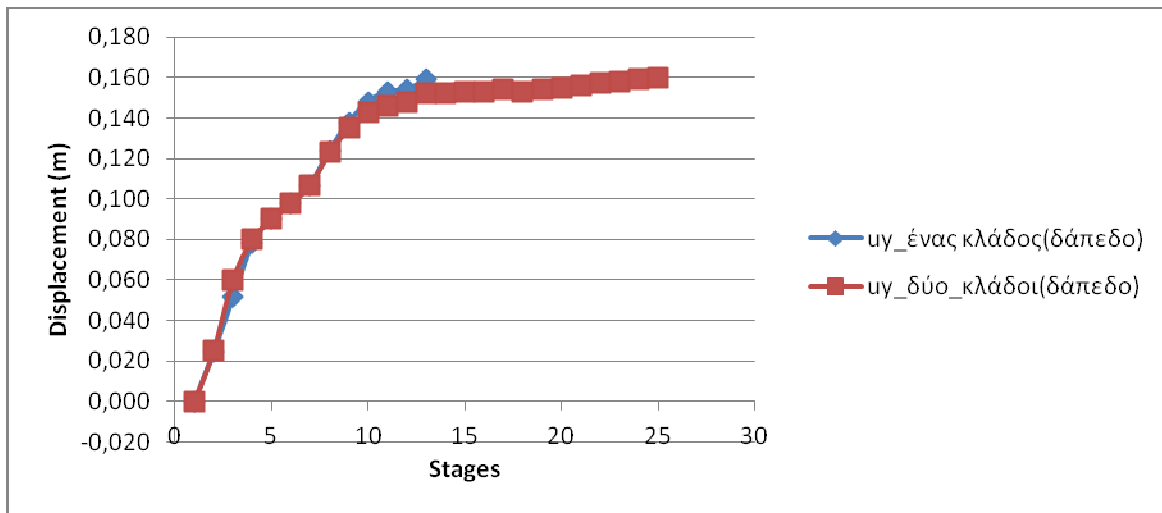
6.6.1. Μετατοπίσεις



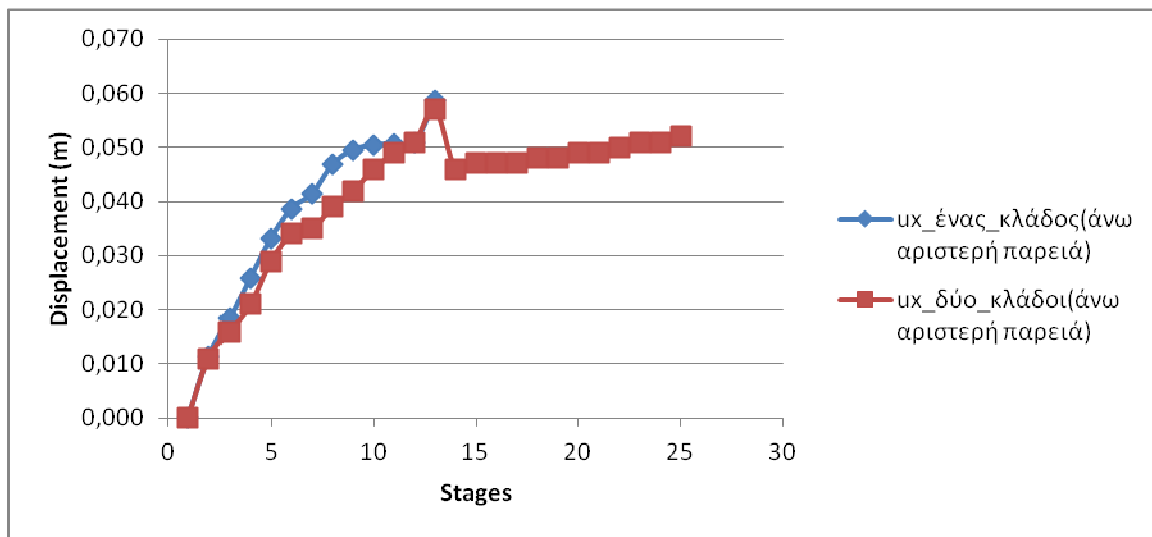
Διάγραμμα 109. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



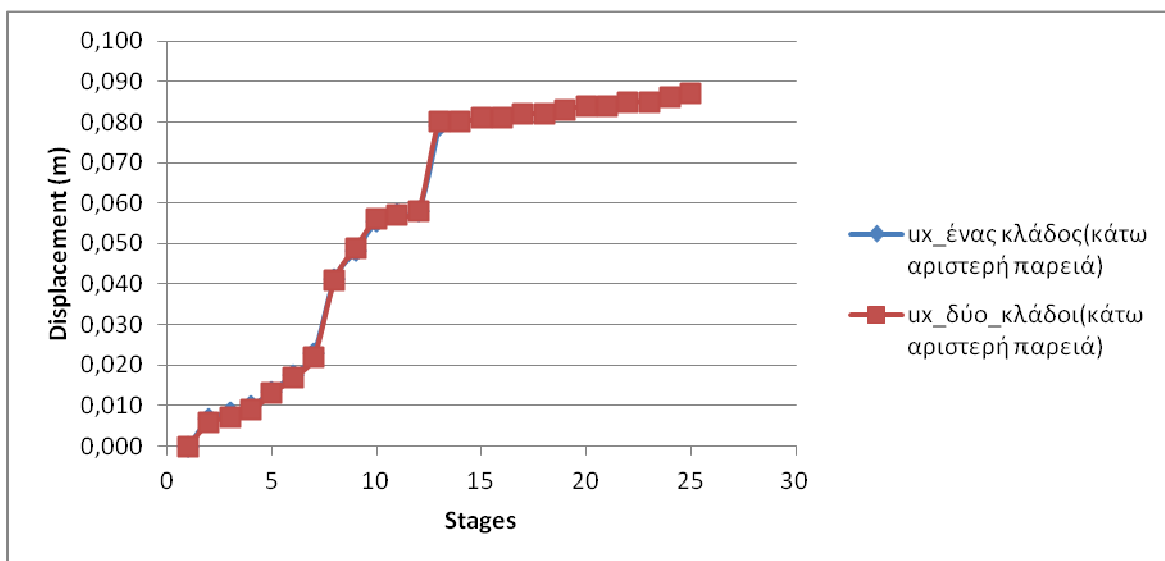
Διάγραμμα 110. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



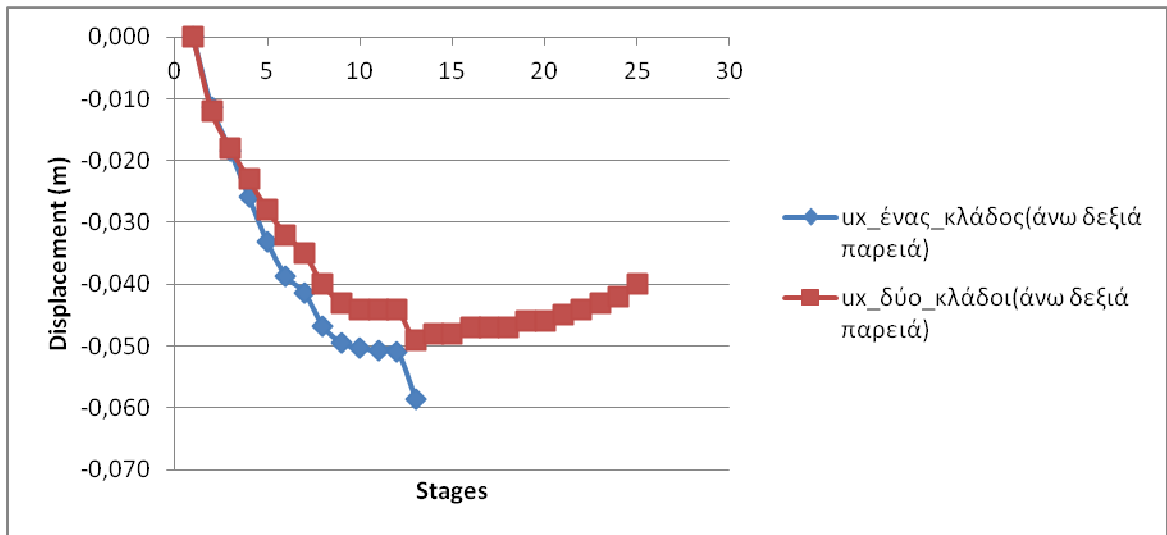
Διάγραμμα 111. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



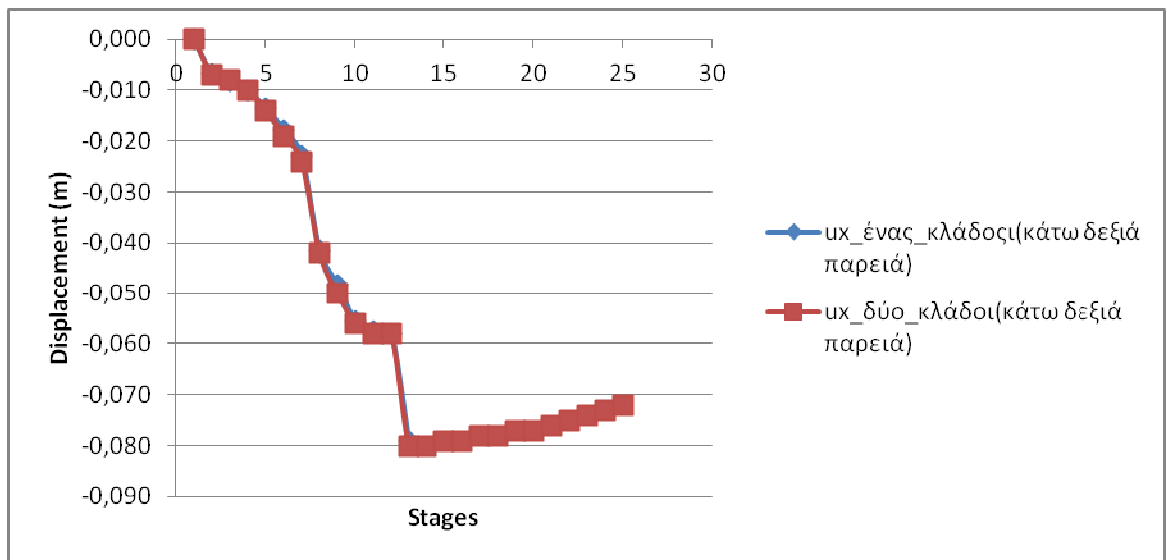
Διάγραμμα 112. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 113. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



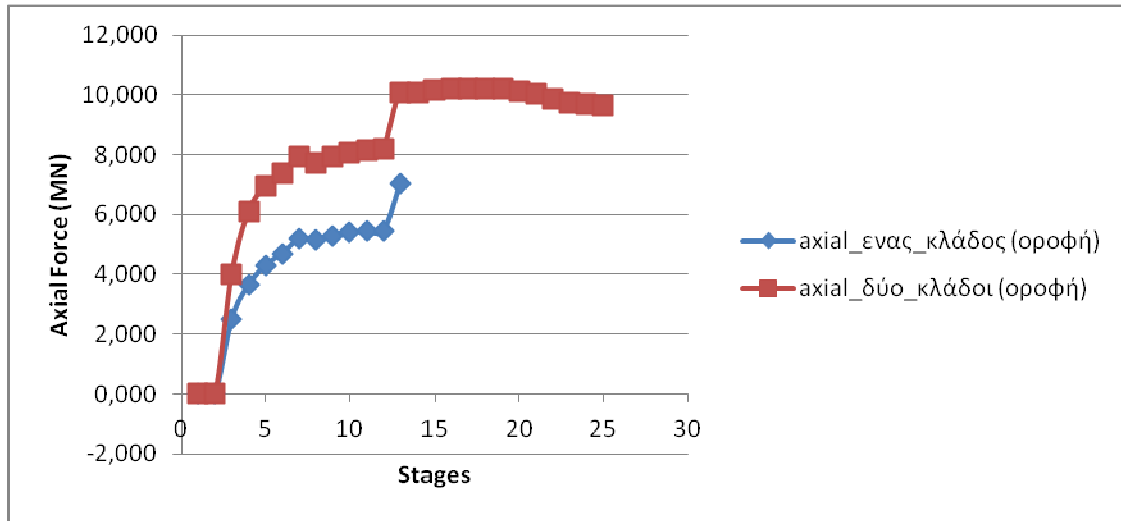
Διάγραμμα 114. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά



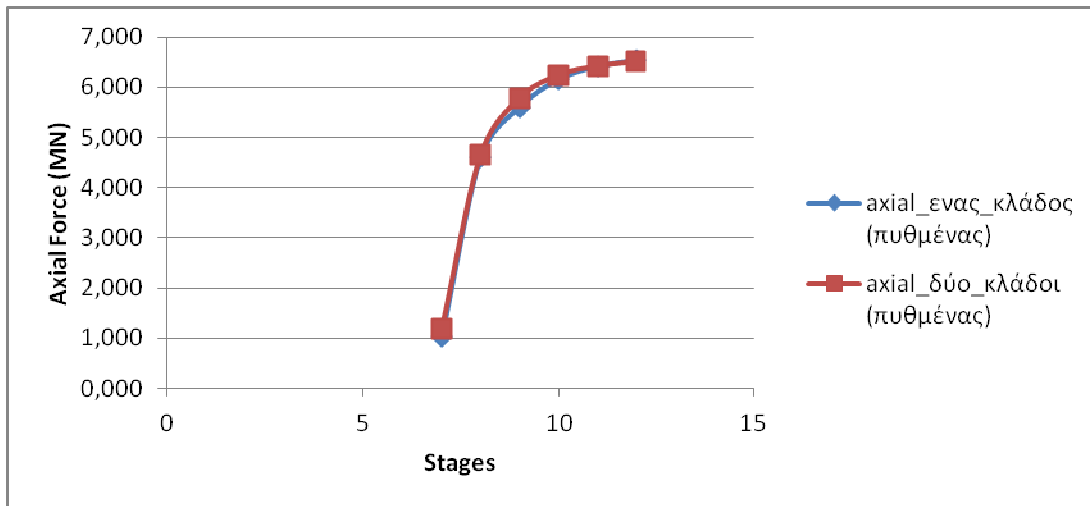
Διάγραμμα 115. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

Οι μετατοπίσεις δεν παρουσιάζουν κάποια αισθητή μεταβολή. Αυξάνονται σε μικρό βαθμό, της τάξης του 10-15%.

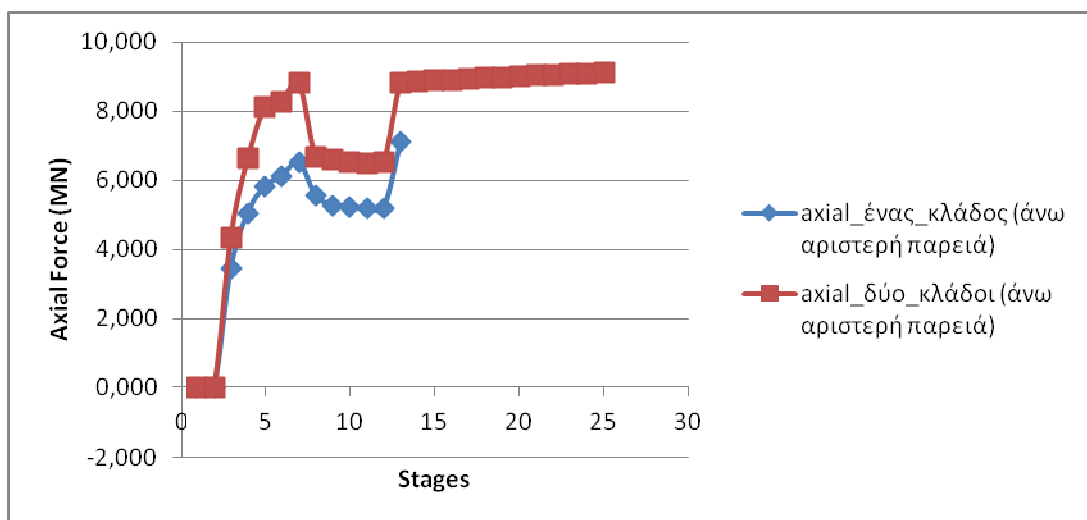
6.6.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



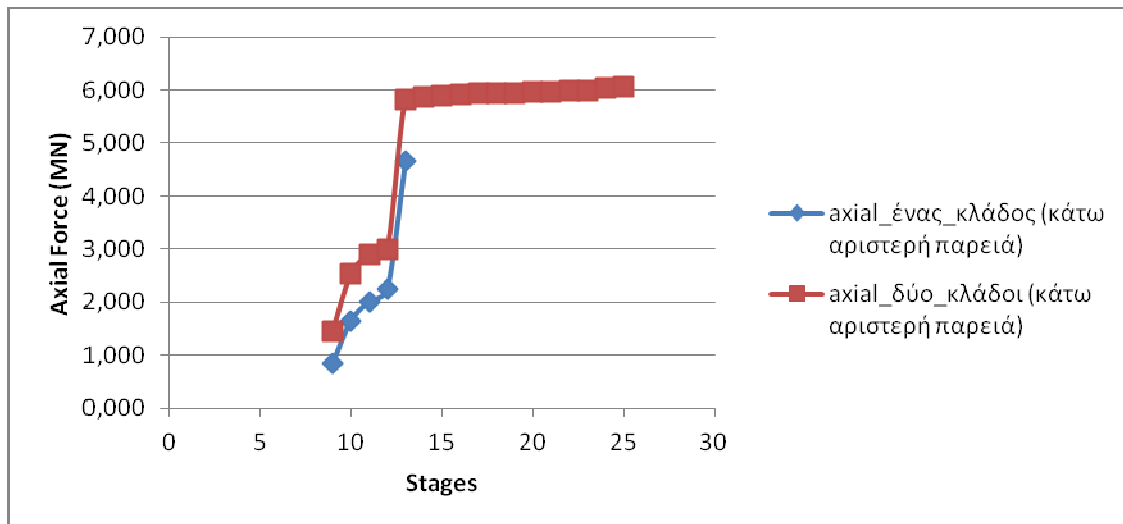
Διάγραμμα 116. Αξονική δύναμη στην οροφή



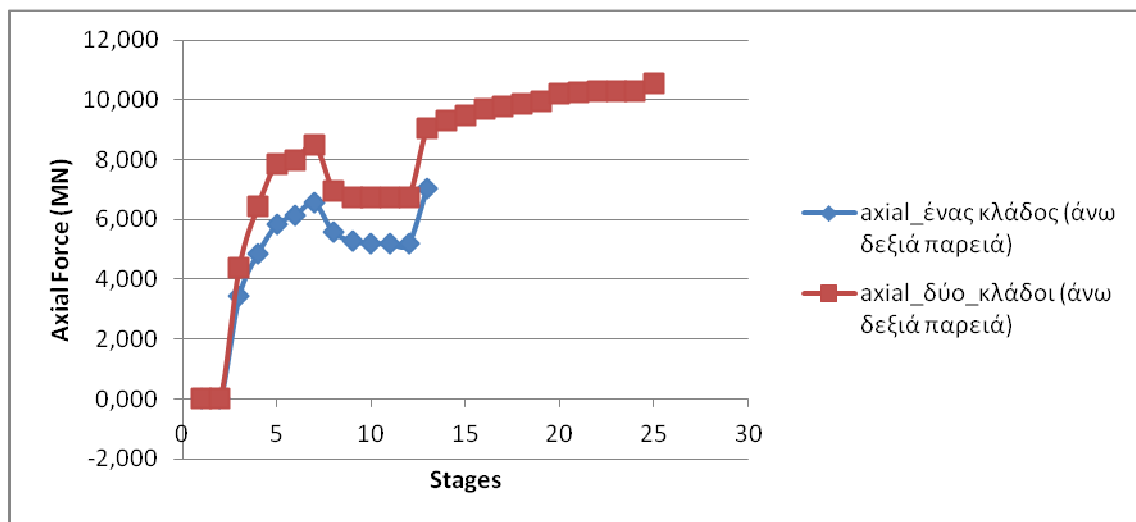
Διάγραμμα 117. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



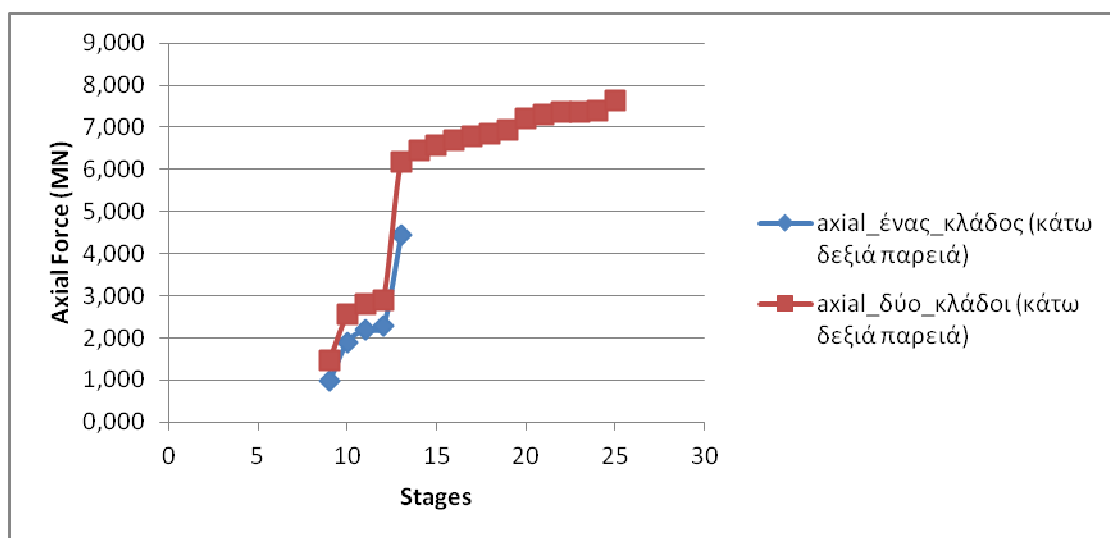
Διάγραμμα 118. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 119. Αξονική δύναμη στην κάτω αριστερή παρειά



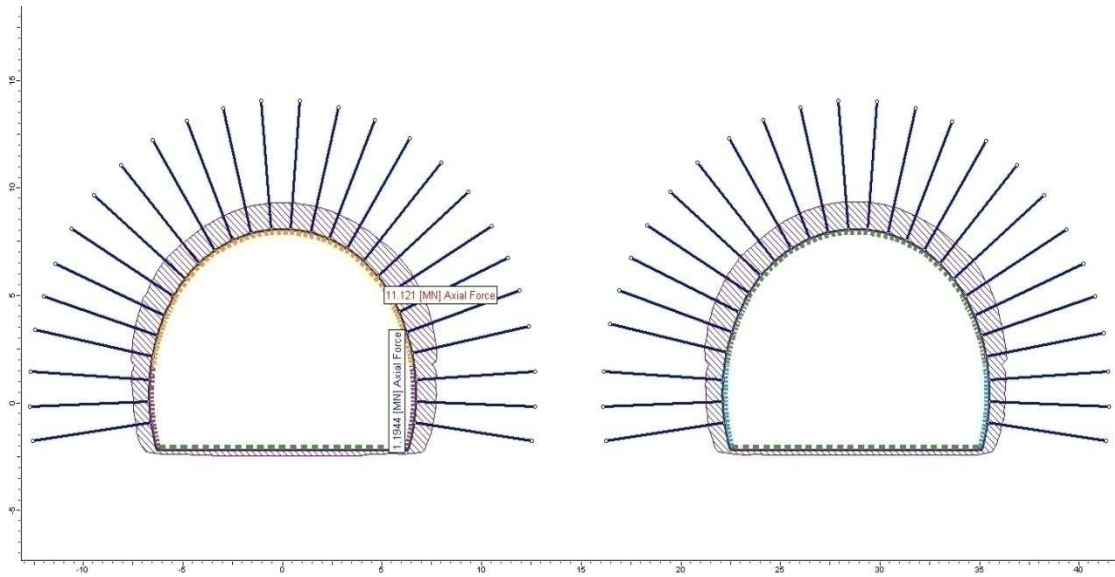
Διάγραμμα 120. Αξονική δύναμη στην άνω δεξιά παρειά



Διάγραμμα 121. Αξονική δύναμη στην κάτω δεξιά παρειά

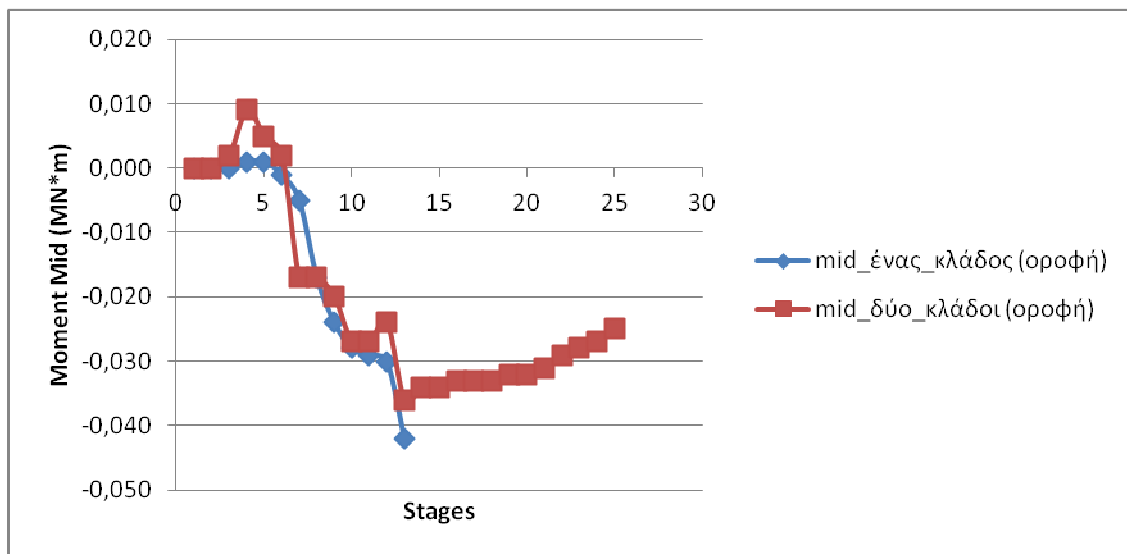
Όπως και στην περίπτωση των 38 μέτρων , έτσι και εδώ με εξαίρεση την οροφή και τον προσωρινό πυθμένα,, οι αξονικές δυνάμεις αυξάνονται αρκετά.

Στην αριστερή παρειά η αύξηση ανέρχεται στο 1MN ενώ στην δεξιά αγγίζει τα 3MN.

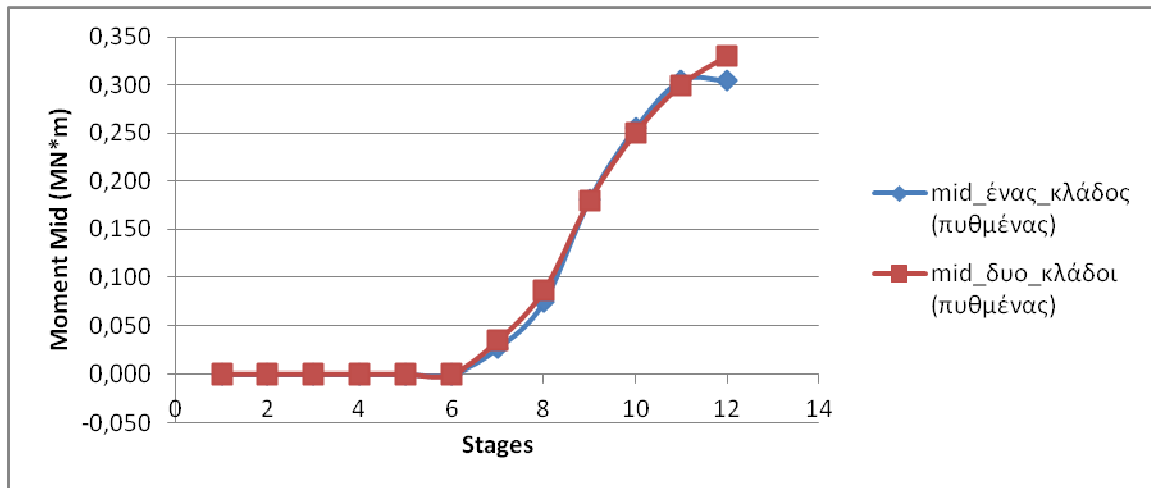


Εικόνα 48. Κατανομή αξονικών δυνάμεων στις διατομές

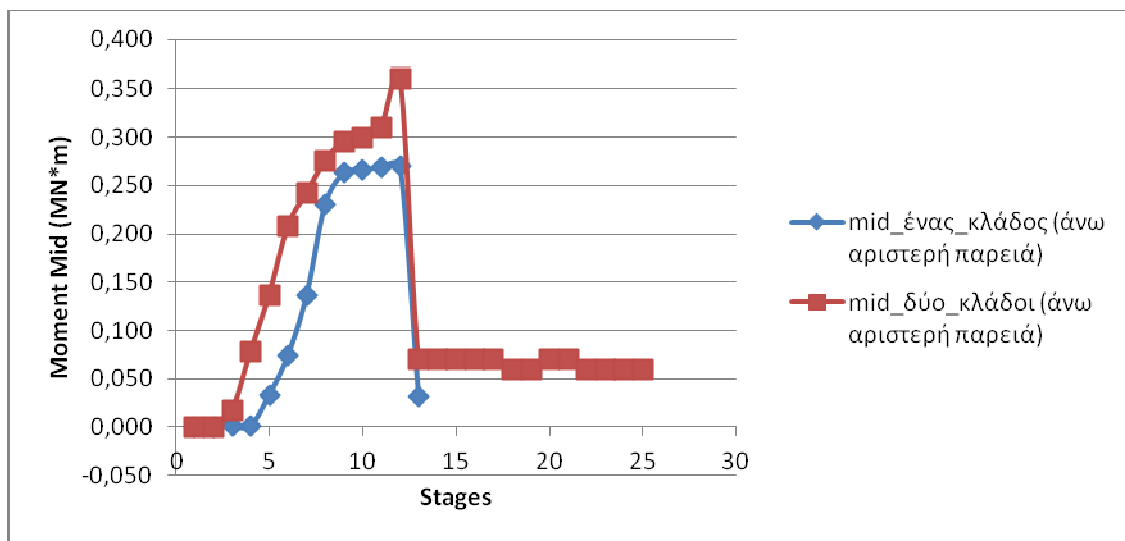
6.6.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



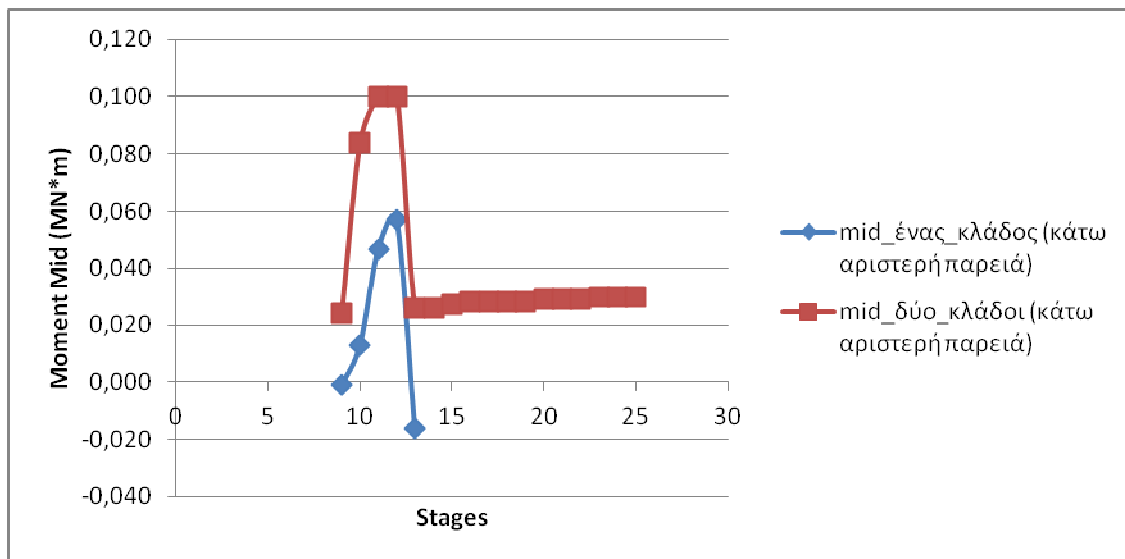
Διάγραμμα 122. Ροπή κάμψης στην οροφή



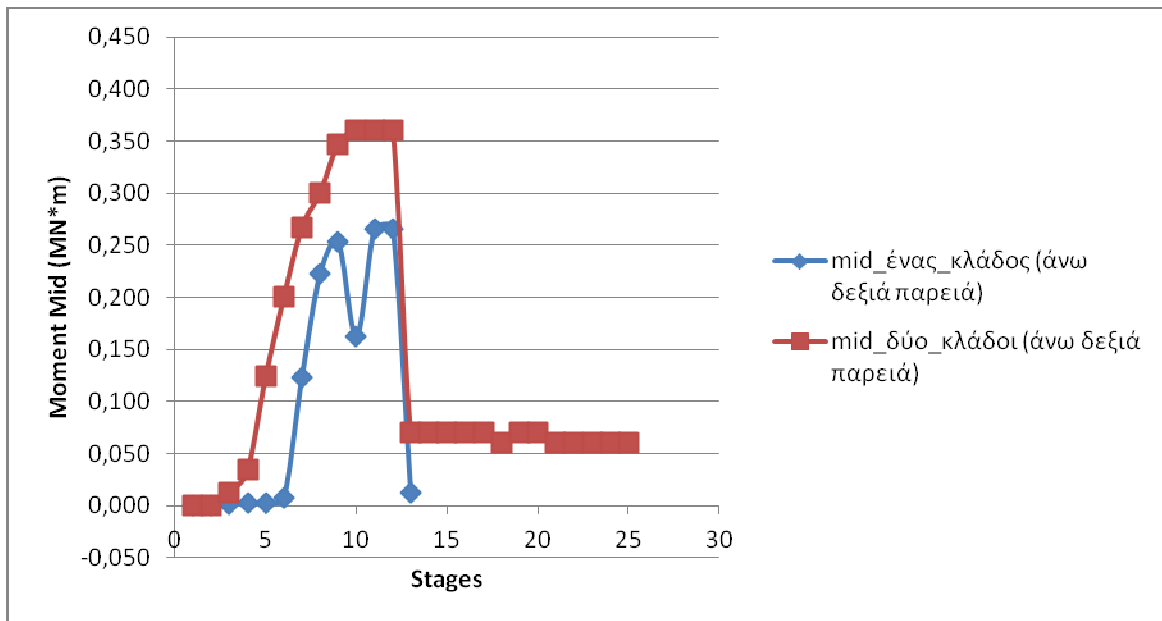
Διάγραμμα 123. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



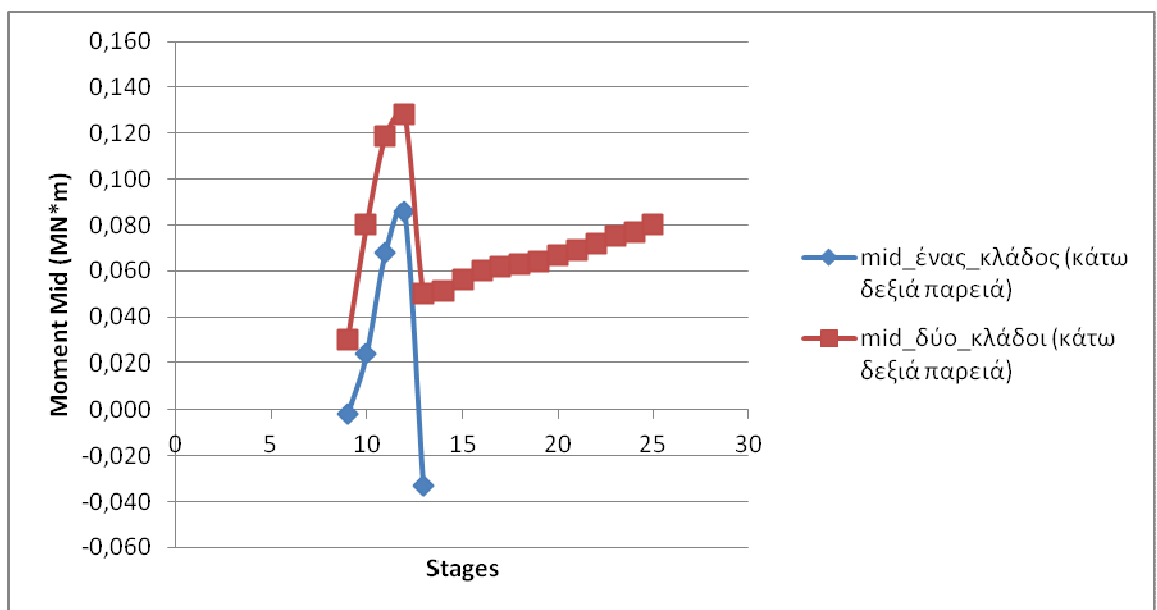
Διάγραμμα 124. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



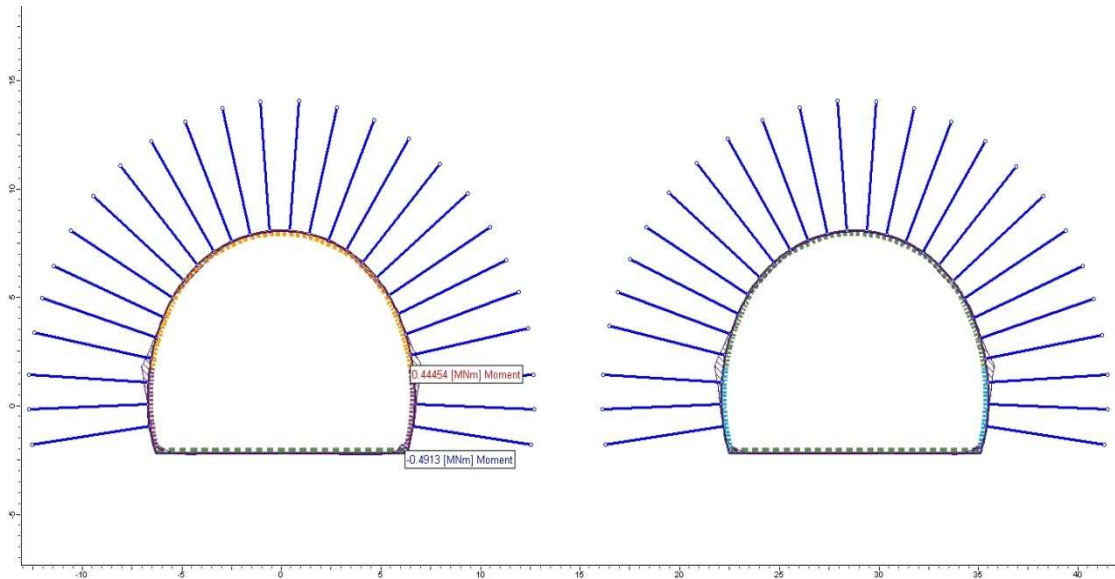
Διάγραμμα 125. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 126. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά

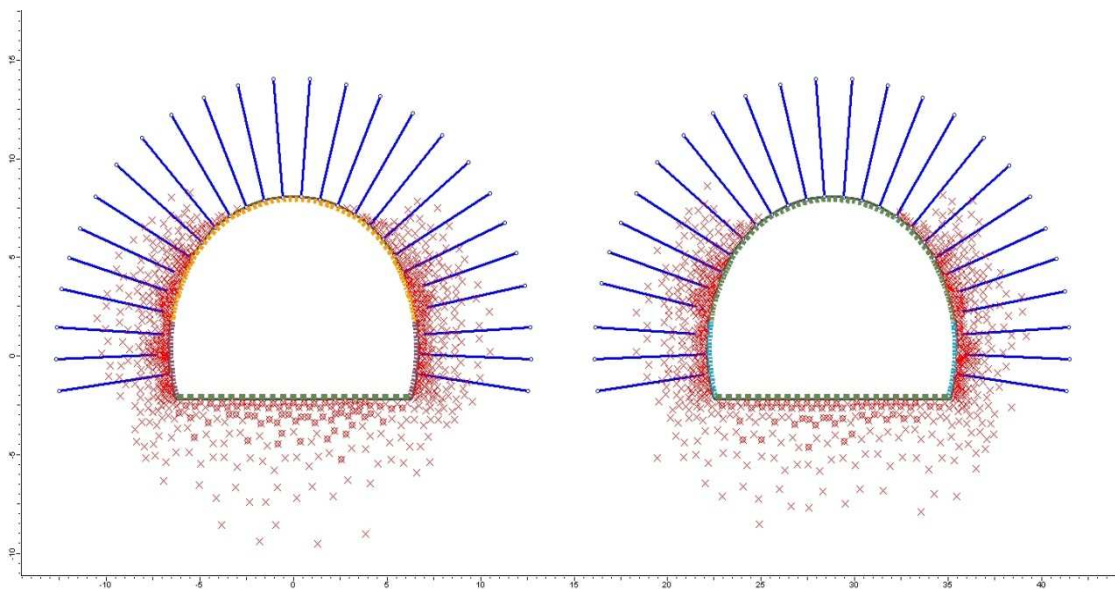


Διάγραμμα 127. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά



Εικόνα 49. Κατανομή ροπών κάμψης στις διατομές

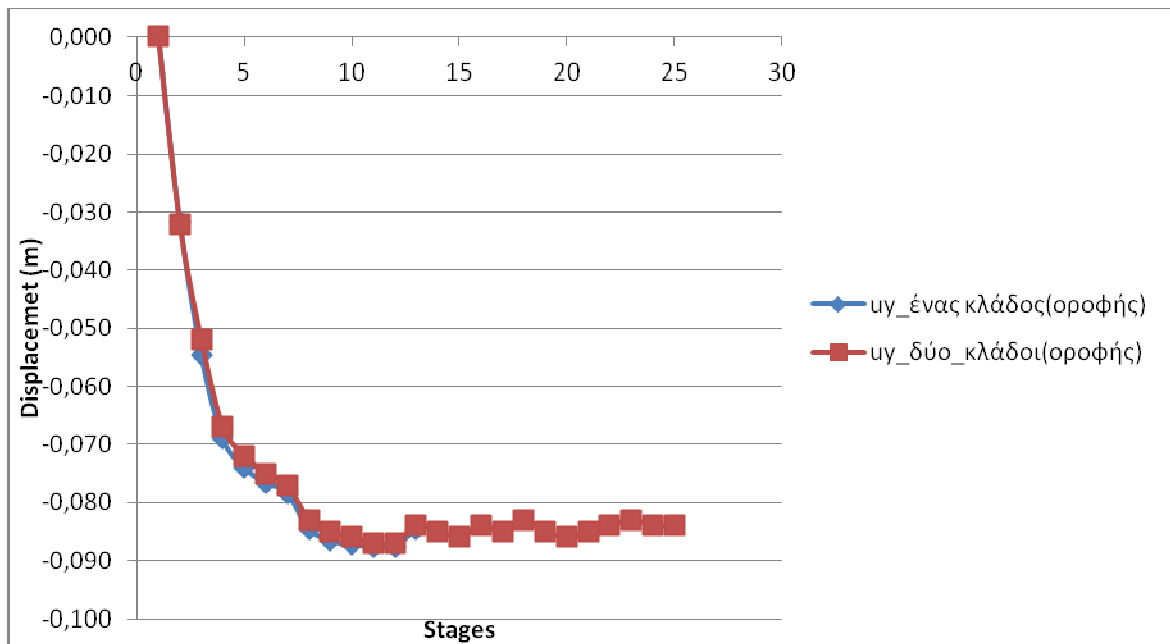
Και οι ροπές κάμψης στην συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζουν αισθητά μεγάλη αύξηση. Στα άνω τμήματα αυξάνονται κατά $0,2\text{MN}\cdot\text{m}$ ενώ στα χαμηλότερα ακόμη και $0,7\text{MN}\cdot\text{m}$.



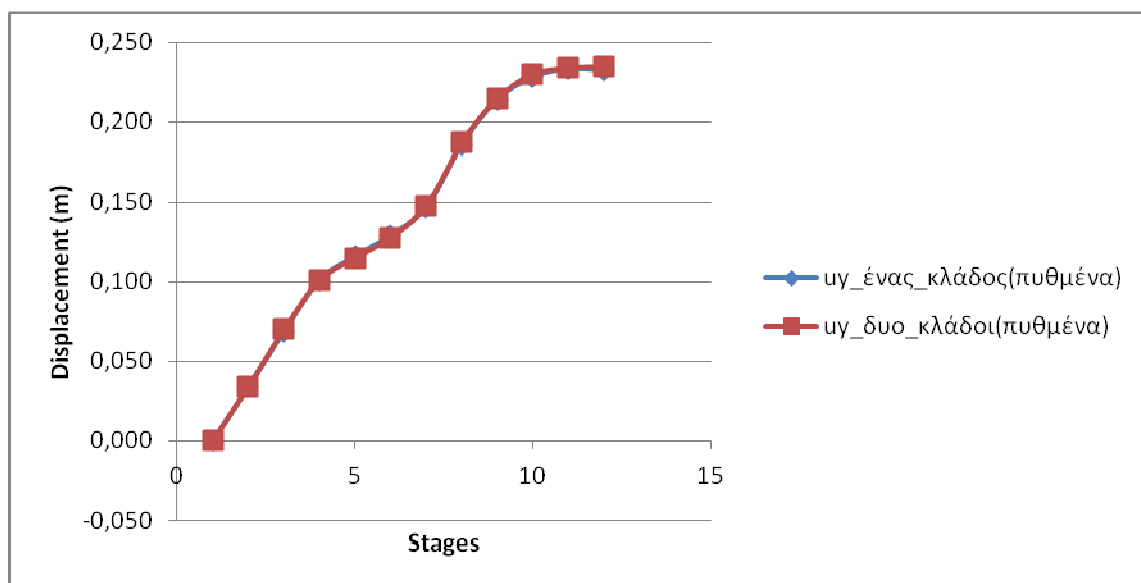
Εικόνα 50. Κατανομή αστοχούντων σημείων στις διατομές

6.7. Αποτελέσματα δύο κλάδων με προσομοίωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως οπλισμένο (απόσταση 19 μέτρα)

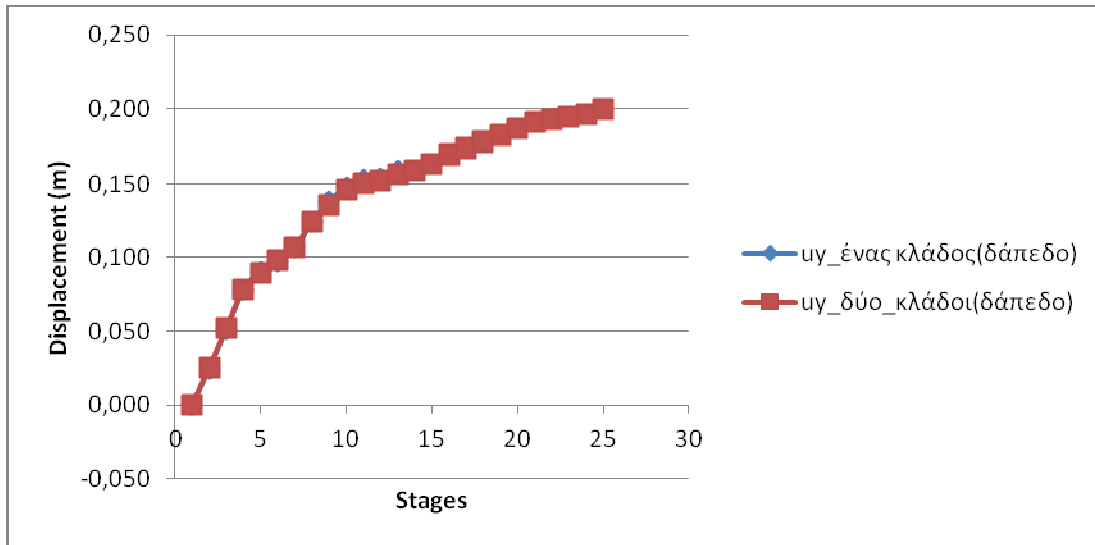
6.7.1. Μετατοπίσεις



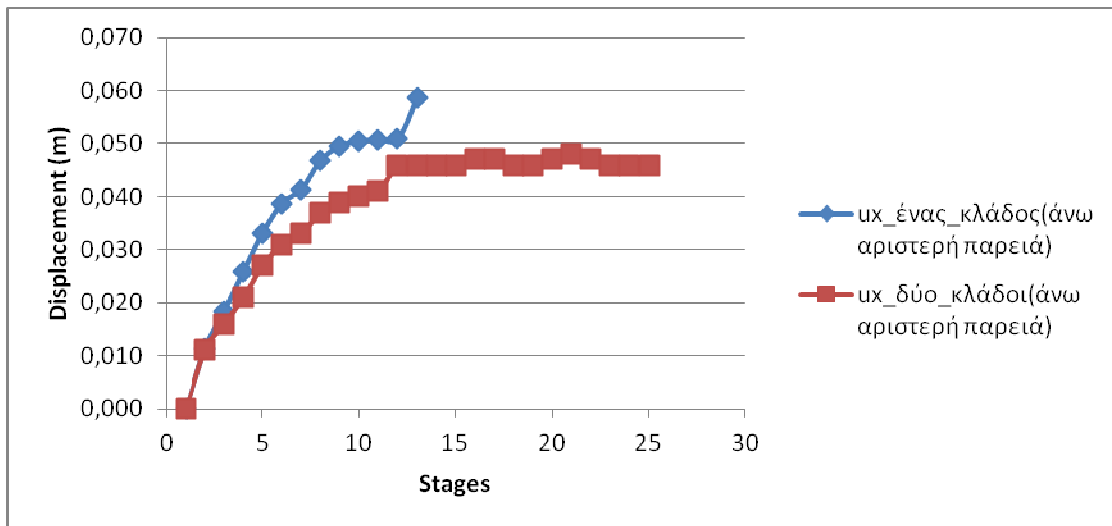
Διάγραμμα 128. Κατακόρυφη μετατόπιση στην οροφή



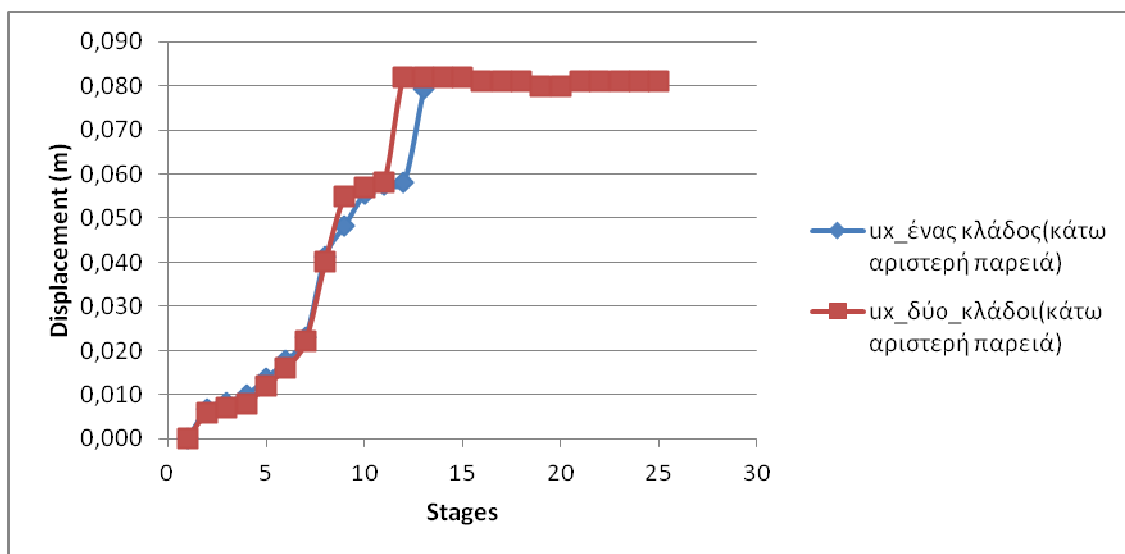
Διάγραμμα 129. Κατακόρυφη μετατόπιση στον πυθμένα



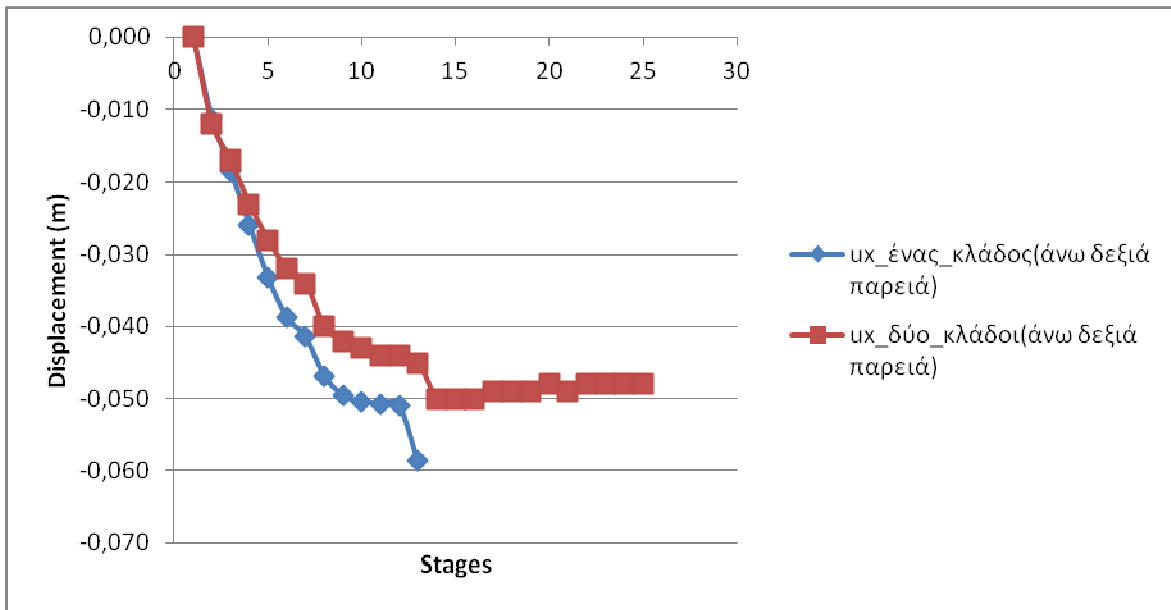
Διάγραμμα 130. Κατακόρυφη μετατόπιση στο δάπεδο



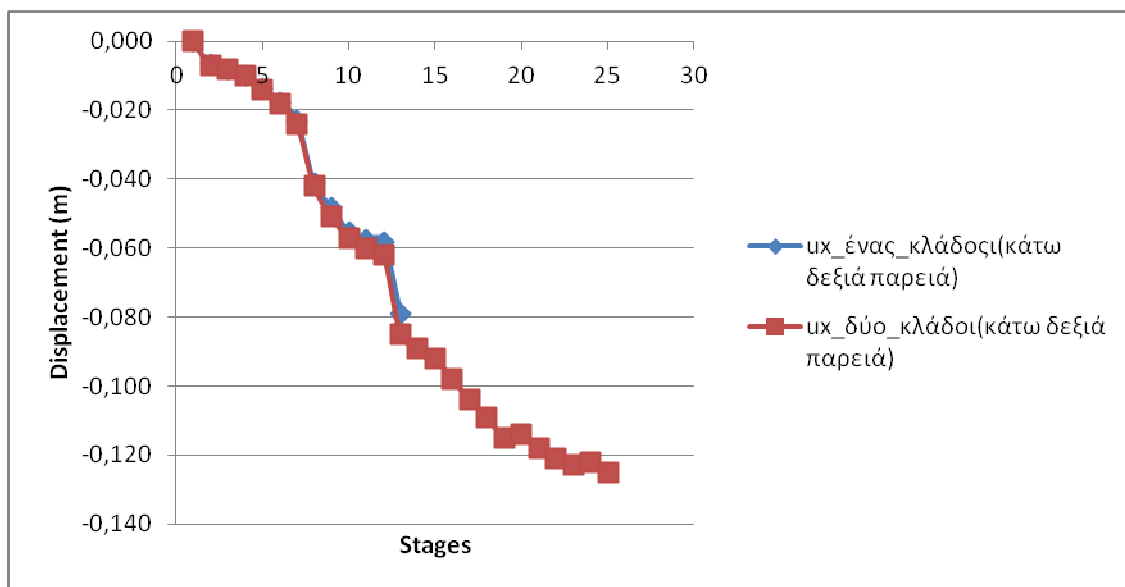
Διάγραμμα 131. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 132. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω αριστερή παρειά



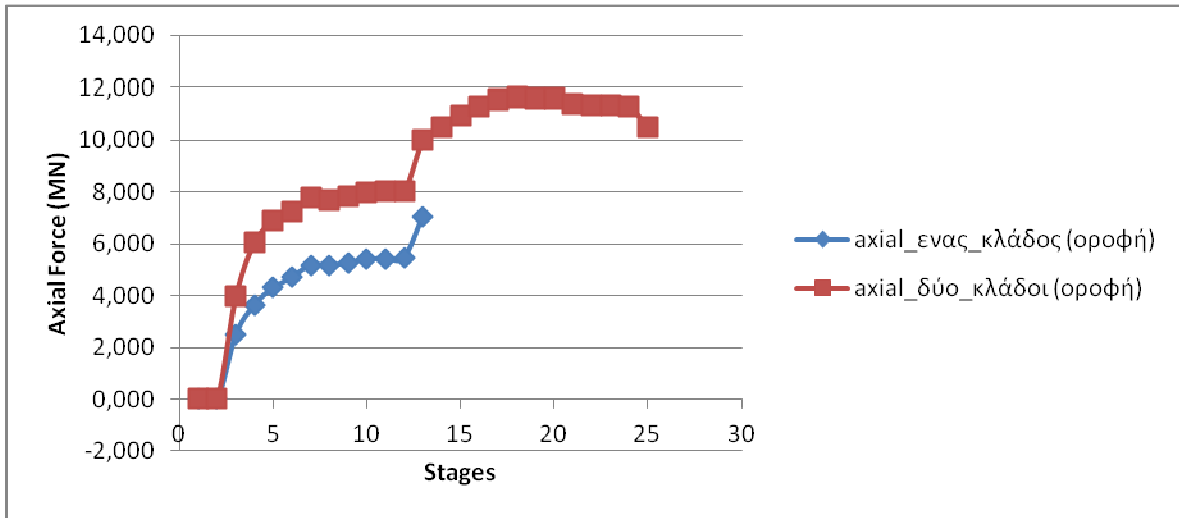
Διάγραμμα 133. Οριζόντια μετατόπιση στην άνω δεξιά παρειά



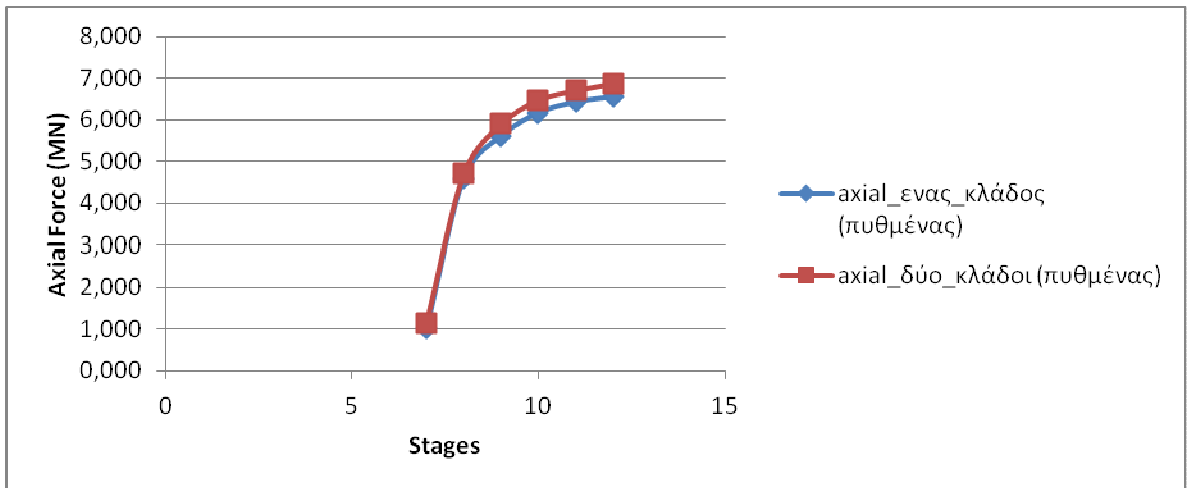
Διάγραμμα 134. Οριζόντια μετατόπιση στην κάτω δεξιά παρειά

Εξαιτίας της μικρής ενδιάμεσης απόστασης των δύο κλάδων έχουμε μεταβολή των τιμών των μετακινήσεων κυρίως στην δεξιά παρειά. Αυτή έγκειται στα 15-40cm, γεγονός που καθιστά τον συγκεκριμένο σχεδιασμό άκρως επικίνδυνο για να ολοκληρωθεί η κατασκευή.

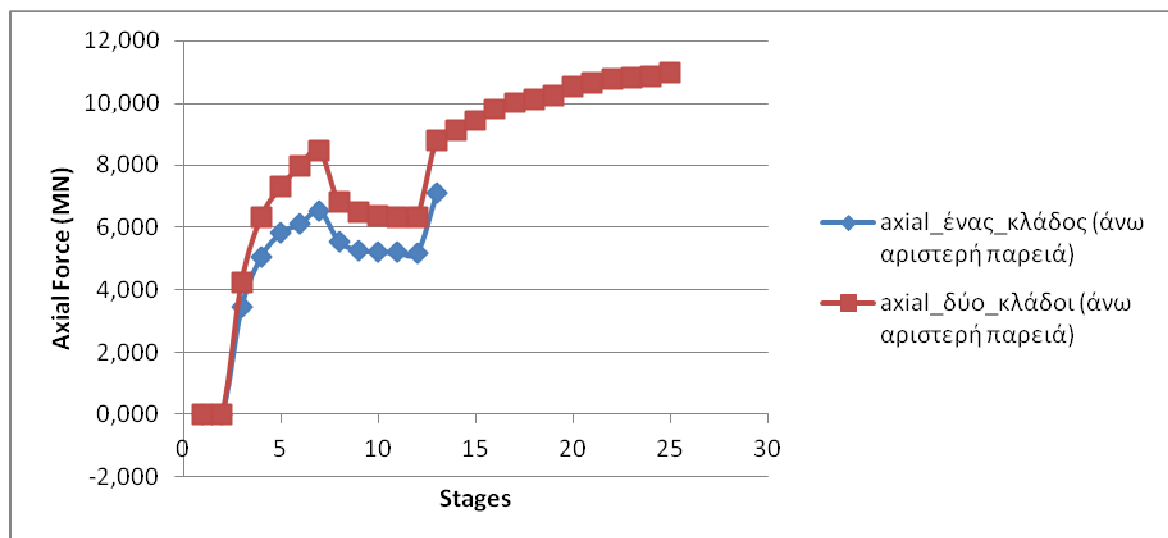
6.7.2. Αξονικές δυνάμεις στο σκυρόδεμα



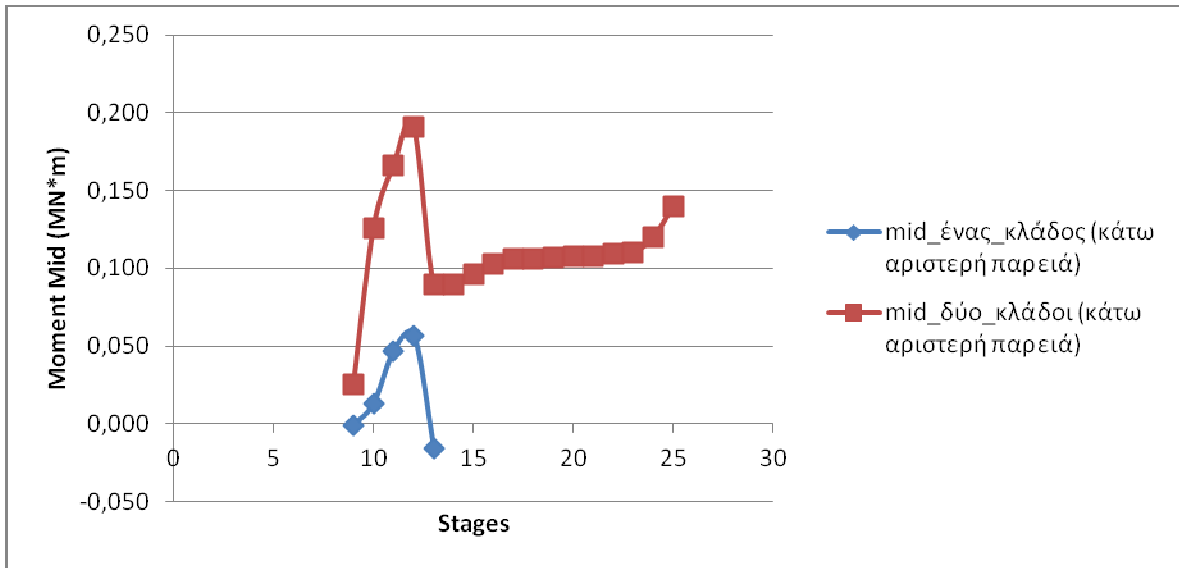
Διάγραμμα 135. Αξονική δύναμη στην οροφή



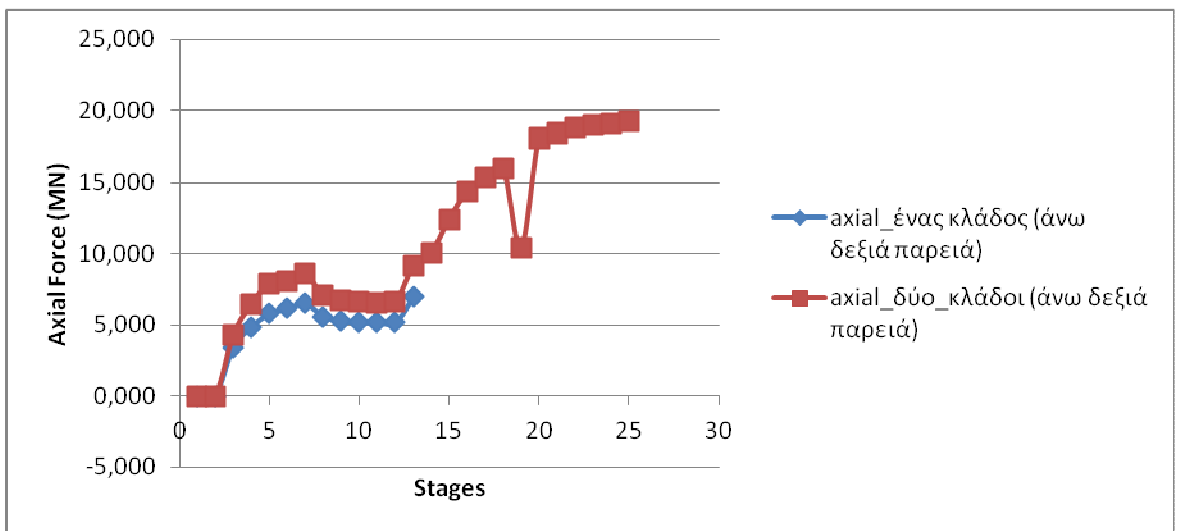
Διάγραμμα 136. Αξονική δύναμη στον πυθμένα



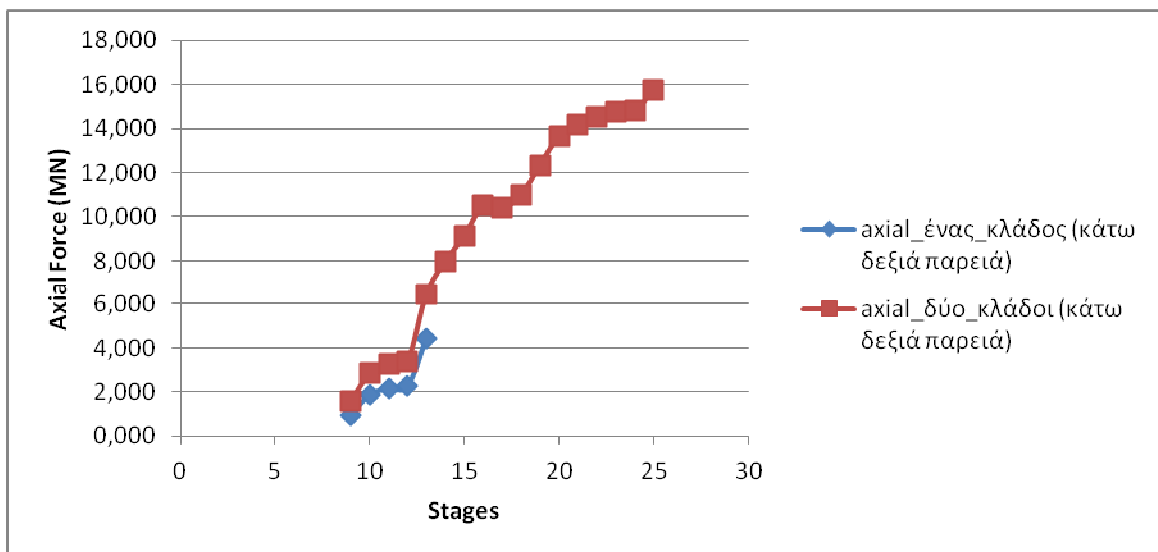
Διάγραμμα 137. Αξονική δύναμη στην άνω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 138. Αξονική δύναμη στην κάτω αριστερή παρειά

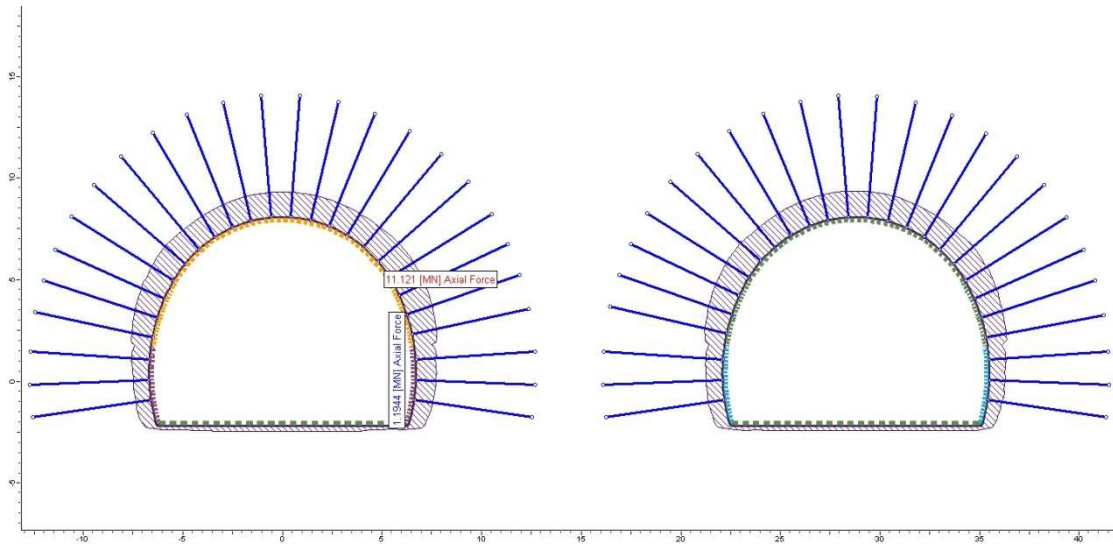


Διάγραμμα 139. Αξονική δύναμη στην άνω δεξιά παρειά



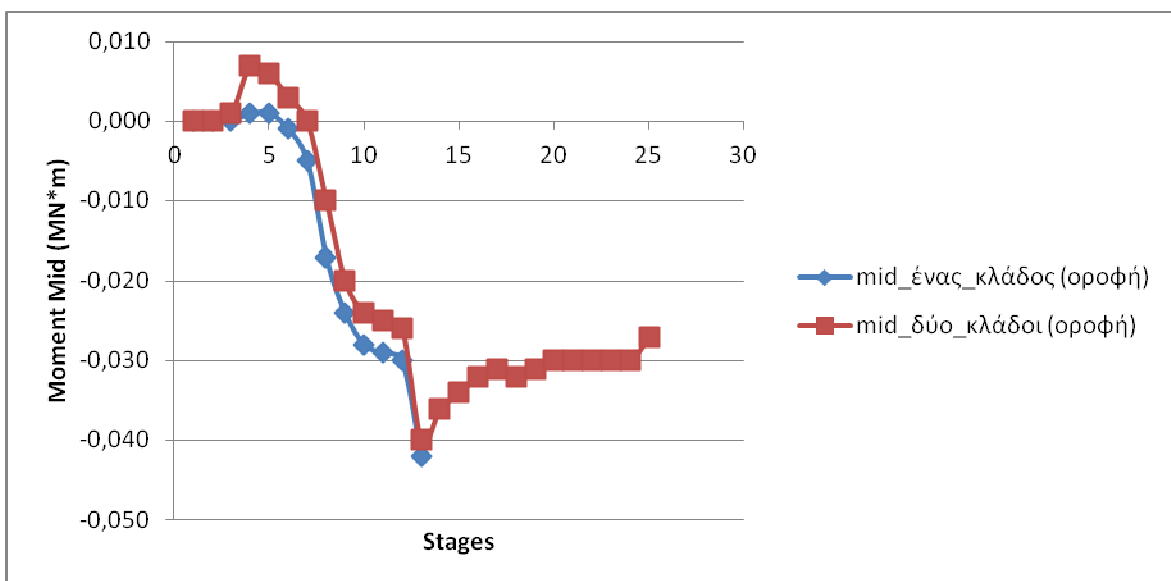
Διάγραμμα 140. Αξονική δύναμη στην κάτω δεξιά παρειά

- Στην οροφή η αξονική δύναμη αυξάνεται κατά 4,5MN, αρκετά υψηλή τιμή σε σχέση με τα όσα έχουμε δει στο συγκεκριμένο σημείο της σήραγγας.
- Της παρειάς η τιμή των αξονικών δυνάμεων τριπλασιάζεται σε όλα τα σημεία και δημιουργεί αναμφισβήτητο πρόβλημα στην ευστάθεια της σήραγγας.

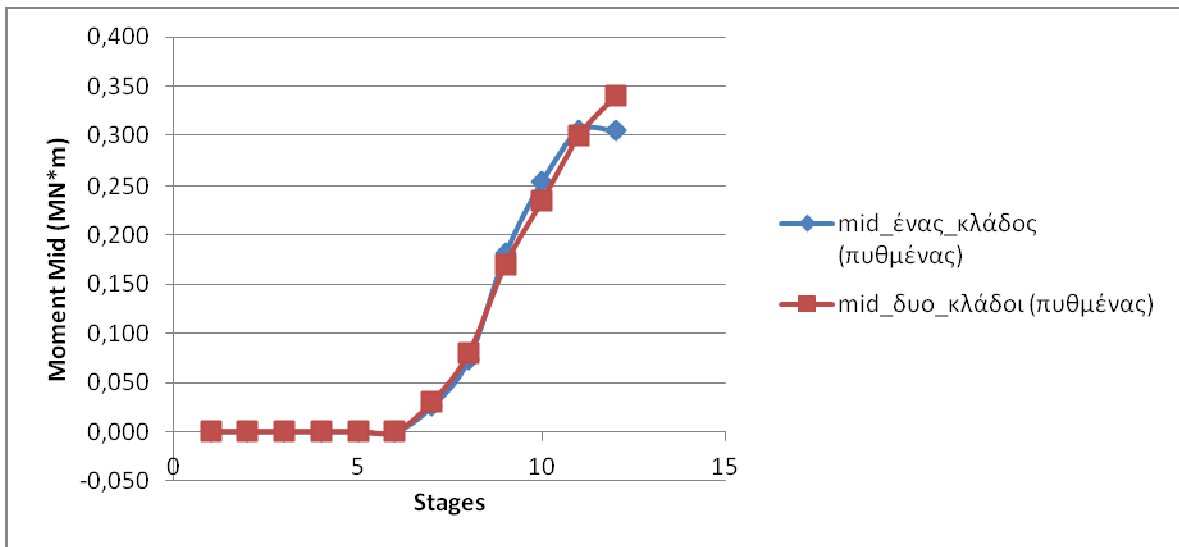


Εικόνα 51. Κατανομή των αξονικών δυνάμεων στις διατομές

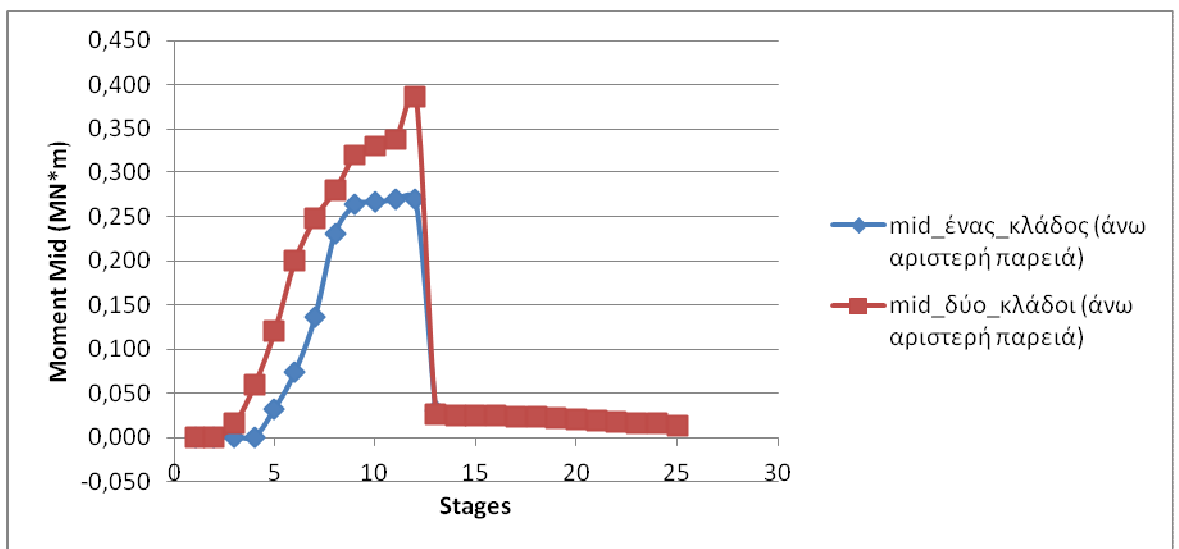
6.7.3. Ροπές κάμψης στο σκυρόδεμα



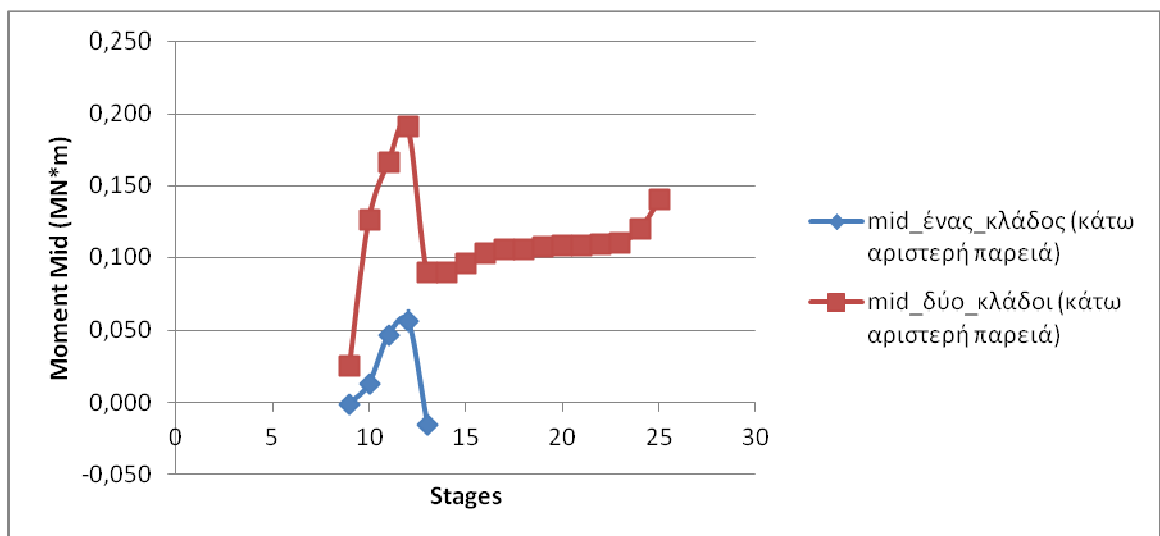
Διάγραμμα 141. Ροπή κάμψης στην οροφή



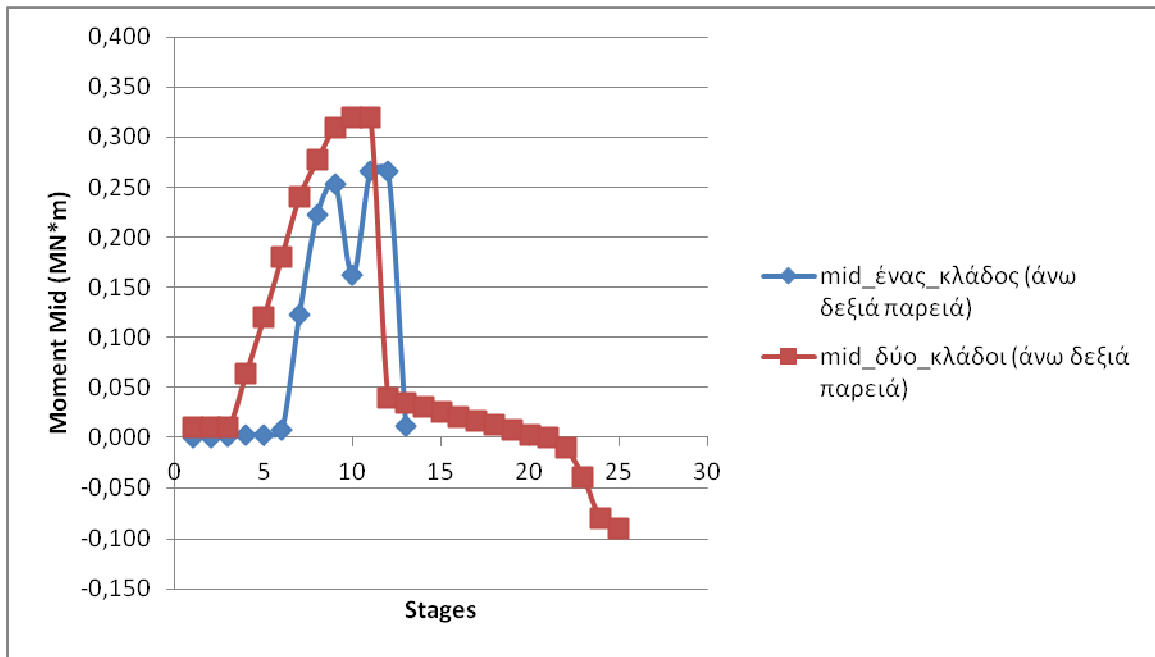
Διάγραμμα 142. Ροπή κάμψης στον πυθμένα



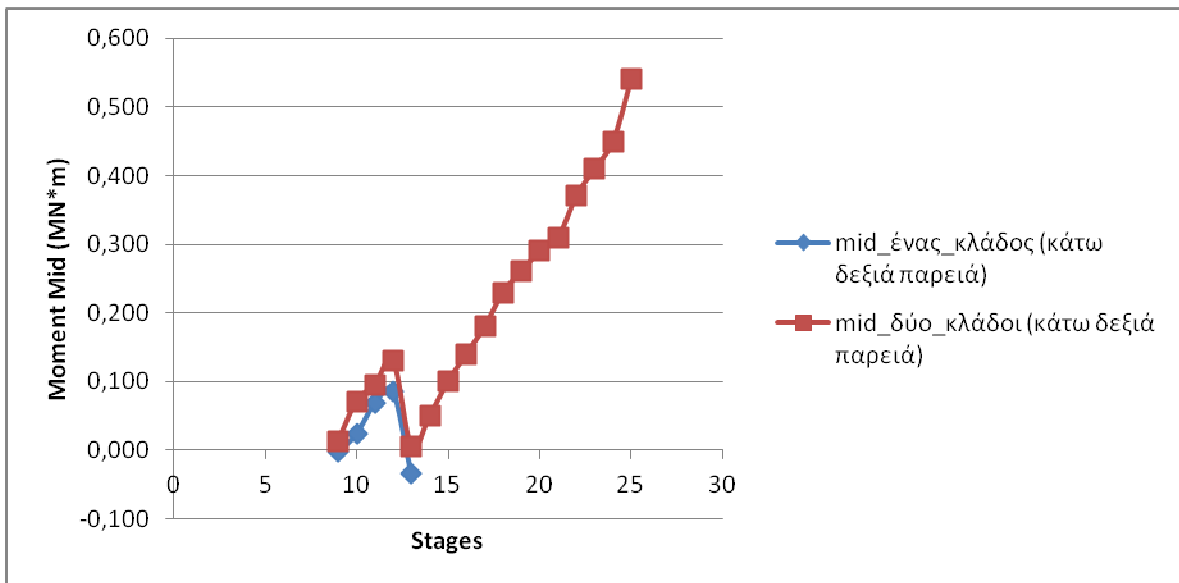
Διάγραμμα 143. Ροπή κάμψης στην άνω αριστερή παρειά



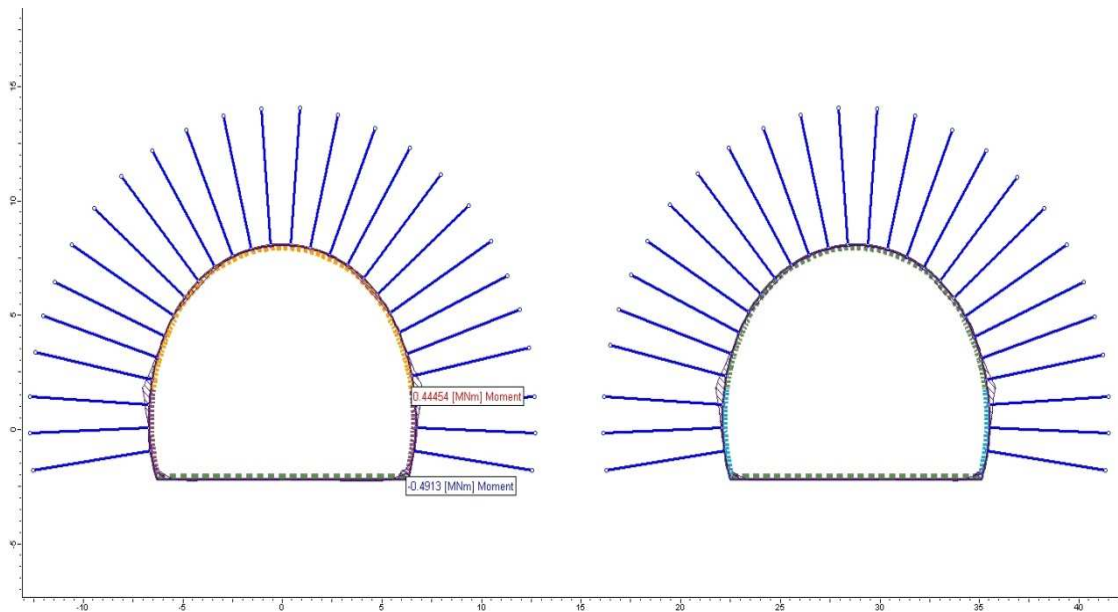
Διάγραμμα 144. Ροπή κάμψης στην κάτω αριστερή παρειά



Διάγραμμα 145. Ροπή κάμψης στην άνω δεξιά παρειά

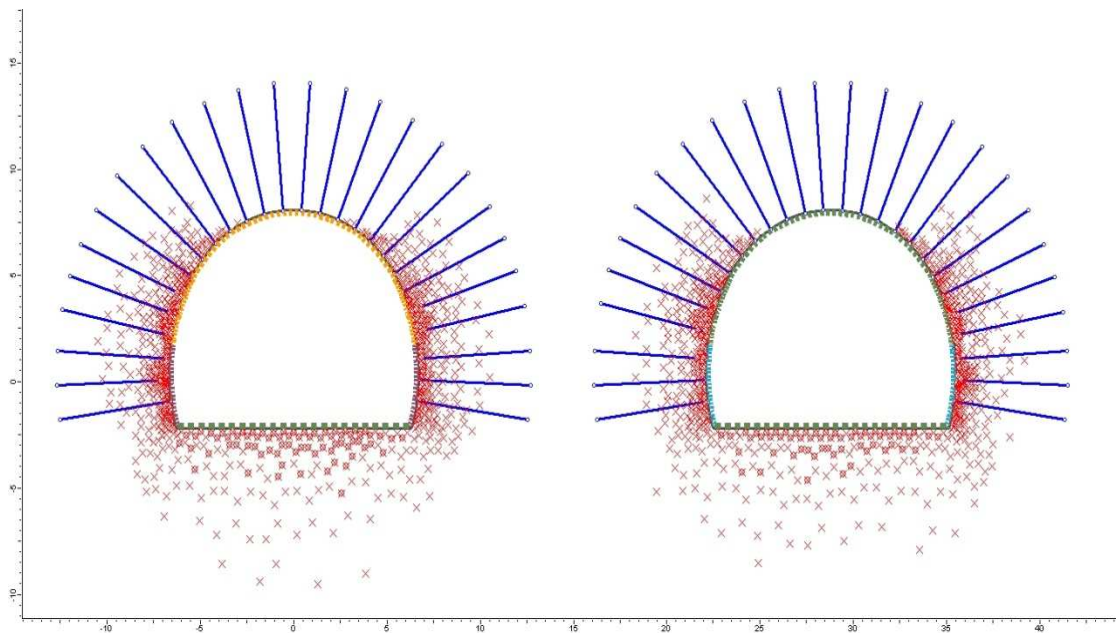


Διάγραμμα 146. Ροπή κάμψης στην κάτω δεξιά παρειά



Εικόνα 52. Κατανομή ροπών κάμψης στις διατομές

- Η οροφή και ο πυθμένας δεν επηρεάζονται σημαντικά από την αλλαγή του σκυροδέματος.
- Ωστόσο στις παρειές, η αύξηση των ροπών κάμψης φθάνει ακόμη και τα $0,5\text{MN}\cdot\text{m}$, αποτέλεσμα μη επιθυμητό για την συνοχή της κατασκευής.



Εικόνα 53. Κατανομή αστοχούντων σημείων στις διατομές

7. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Όσον αφορά την διάνοιξη μονού κλάδου, παρατηρείται αύξηση των μετατοπίσεων κατά 45-50% από το 7^ο στάδιο, όπου γίνεται εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, μέχρι το 13^ο, όπου ολοκληρώνεται και η εκσκαφή της βαθμίδας. Εξίσου ομαλή αλλά μικρότερη αύξηση υπάρχει στις αξονικές δυνάμεις και τις ροπές κάμψης, της τάξεως του 10-25%.
- Εξετάζοντας τις τιμές των μετατοπίσεων στα μοντέλα των δίδυμων σηράγγων, με ενδιάμεση απόσταση κλάδων 38, 28.5 και 19 μέτρα παρατηρείται αύξηση τους στην οροφή κατά 5%, 5% και 8% αντίστοιχα. Έτσι με απλή αναλογία θα μπορούσαμε να πούμε ότι για κάθε μέτρο που πλησιάζουν οι δύο κλάδοι, η μετατόπιση αυξάνεται κατά 0,31%. Αυτό σημαίνει ότι στην οροφή έχουμε περίπου 3mm αύξηση της μετατόπισης για κάθε μέτρο που πλησιάζουν οι κλάδοι. Να σημειωθεί ωστόσο ότι η σχέση απόστασης-μετατόπισης δεν είναι γραμμική, με αποτέλεσμα σε μικρότερες αποστάσεις των 19 μέτρων η αύξηση να είναι πιθανώς ακόμη μεγαλύτερη. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται ότι στο δάπεδο για κάθε μέτρο που μειώνεται η απόσταση των δύο κλάδων η μετατόπιση αυξάνεται κατά 4mm, ενώ στις παρειές η αύξηση ανά μέτρο είναι 0,5-1mm.
- Αναφορικά με τις αξονικές δυνάμεις, στην οροφή, με τον τρόπο που περιγράφηκε νωρίτερα, υπολογίζεται ότι στην οροφή για κάθε μέτρο που είναι πιο κοντά οι κλάδοι της σήραγγας T2 ασκείται 0,9-1MN περισσότερο στην κατασκευή. Οι τιμές αυτές είναι 0,3-0,5MN στο δάπεδο, ενώ στις παρειές υπάρχει διαφοροποίηση στην αριστερή πλευρά σε σύγκριση με την δεξιά του αριστερού κλάδου της σήραγγας. Στην αριστερή παρειά η αύξηση της αξονικής δύναμης είναι αμελητέα 0,18MN για κάθε μέτρο, σε αντίθεση με την δεξιά παρειά όπου η αύξηση ανέρχεται στα 0,8MN.
- Στις ροπές κάμψης τα συμπεράσματα είναι πιο δυσδιάκριτα, καθώς υπάρχουν διαφοροποιήσεις. Στην οροφή, το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων δείχνει ότι η ροπή μειώνεται όσο μικραίνει η απόσταση των δύο κλάδων, κάτι το οποίο δεν ήταν αναμενόμενο. Επειδή οι τιμές της ροπής είναι μικρές, ενδέχεται αυτή η μείωση να οφείλεται στην αριθμητική ακρίβεια του μοντέλου. Ομοίως, στις παρειές δεν μπορεί να αντληθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα καθώς ανάλογα με το σημείο υπάρχει είτε αύξηση είτε μείωση των ροπών κάμψης. Οι παραπάνω

δυσκολίες στον υπολογισμό των ροπών συσχετίζονται και με την συμπεριφορά των στοιχείων δοκού που προσομοιώνουν το σκυροδέμα και με την προσομοίωση της αποτόνωσης της εκσκαφής.

- Με την προσομοίωση του σκυροδέματος ως οπλισμένο στην σήραγγα έχουμε σημαντική αύξηση των μετατοπίσεων. Στην οροφή η αύξηση από το 13^ο στάδιο μέχρι και το 25^ο φτάνει το 25% στην περίπτωση της απόστασης των 19 μέτρων, ενώ στα 28,5 και 38 το 10-15%. Οι παραμορφώσεις στο δάπεδο και τις παρειές είναι κι αυτές αυξημένες κατά 3-8%.
- Οι μεταβολές των αξονικών δυνάμεων είναι επίσης αισθητές στην περίπτωση προσομοίωσης του σκυροδέματος ως του οπλισμένου. Στην οροφή η αύξηση ανάμεσα σε 13^ο και 25^ο στάδιο φτάνει και το 30%, ενώ με την χρήση του ελαστικού σκυροδέματος ήταν 8-10%. Αξίζει να σημειωθεί η πολύ σημαντική αύξηση των δυνάμεων στην δεξιά παρεία του αριστερού κλάδου, όπου οι τιμές σχεδόν τριπλασιάστηκαν, αγγίζοντας τα 15MN.
- Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να αντληθούν και για τις ροπές κάμψης. Εδώ υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα στα σημεία της άνω και κάτω παρειάς. Στα ψηλότερα σημεία έχουμε σταδιακή πτώση των ροπών, σε αντίθεση με τα κατώτερα όπου η αύξηση φτάνει και το 80% στην περίπτωση της απόστασης των 19 μέτρων φτάνοντας τα 0,4MN*m, που είναι η υψηλότερη τιμή ροπής κάμψης από όλες τις περιπτώσεις.
- Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι:
 - η χρήση του μοντέλου οπλισμένου σκυροδέματος του Phase παρουσιάζει μεγαλύτερη αστάθεια στις μεταβολές των τιμών.
 - Επίσης σε περίπτωση που δεν ήταν διαθέσιμη μια ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των κλάδων στα 38 μέτρα, οι μεταβολές των μετατοπίσεων και των δυνάμεων δεν είναι ιδιαίτερα μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες των 28,5 μέτρων. Επομένως και μια απόσταση κοντά στα 30 μέτρα θα μπορούσε να θεωρηθεί ασφαλής ως κατασκευή. Παρόλα αυτά εξαιτίας απρόβλεπτων παραγόντων που ενδέχεται να παρουσιαστούν η απόσταση των 38 m σίγουρα θεωρείται ιδανική επιλογή εφόσον είναι δυνατή.

BIBΛIOPAPΦIA

- Υποστήριξη Υπογείων Έργων (κ.Αι.Σοφινός , Αθήνα 2010)
- Τεχνική Γεωλογία Ι (κ.Δ.Ρόζος, Αθήνα 2007)
- Μηχανική των πετρωμάτων (κ.Π.Νομικός, Αθήνα 2011)
- Το manual του προγράμματος Phase 2
- Τεχνική μελέτη από την ΚΑΣΤΟΡ , τη ΓΕΩΓΝΩΣΗ και της GEOCONSULTANTS Ltd, όπου έγιναν οι γεωτρήσεις ΣΑ3 , Σ4 , ΝΣ4 , Σ5 και ΣΑ6.
- Τεχνική μελέτη από την ΙΣΤΡΙΑ , όπου έγιναν οι γεωτρήσεις G1S2n και G2S2
- Τεχνική μελέτη από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ το 2008, με τις γεωτρήσεις B2-1, B2-2, B2-3, B2-4 και B2-5. Η συγκεκριμένη έρευνα βασίζεται στον σχεδιασμό της σήραγγας που είναι περίπου 200 μέτρα ανατολικά από την τωρινή θέση.
- Τεχνική μελέτη από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ το 2008, όπου και έγιναν οι γεωτρήσεις B2O-1, B2O-2, B2O-3, B2O-4, B2O-5, B2O-6, B2O-7, B2O-8.
- Τεχνική μελέτη από την ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ για λογαριασμό της DRAGADOS το 2009. Στη φάση αυτή έγιναν 6 γεωτρήσεις, με ονομασίες CB-1, CB-2, CB-3, CB-4 και CB-5.
- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B2O-2, B2O-3, B2O-5, B2O-8 (1^η φάση Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B2O-1, B2O-4, B2O-6, B2O-7 (1^η φάση Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Γεωτεχνική έρευνα για τη σήραγγα T2 από CH.26+915.40 μέχρι CH. 30+204.30 (δεξιός κλάδος) , αποτελέσματα γεωτρήσεων B2-1, B2-5 (1^η φάση), Edafomechaniki S.A., Δεκέμβριος 2008.
- Σήραγγα TU.026 – βελτιστοποιημένη χάραξη. Γεωλογική και Γεωτεχνική ερμηνεία και αξιολόγηση. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Μάιος 2009
Γεωτεχνική έρευνα για την φάση προσφορών του οδικού άξονα E-65 της Κεντρικής Ελλάδας. Γεωτεχνική Έρευνα. Hellenic Autopistas S.A, Απρίλιος 2006.
- Σήραγγα TU 026 (σήραγγα 2) Γεωλογική και Γεωτεχνική ερμηνεία και αξιολόγηση, ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Φεβρουάριος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (T2) – αρχικός σχεδιασμός. ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Μάιος 2009

- Σήραγγα TU 026 (T2) – τελικός σχεδιασμός των εκσκαφών εισόδου και προσωρινή υποστήριξη .ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Ιούλιος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (σήραγγα 2) . Προτεινόμενη γεωτεχνική έρευνα κατα μήκος της σήραγγας και εκπόνηση βασικού σχεδίου .ΟΜΙΚΡΟΝ ΚΑΠΑ Ιούνιος 2009
- Γεωφυσική μελέτη. Διατρητική δοκιμή στο κομμάτι Λυγαριά – Περιβόλι του οδικού άξονα Ε65. Πολυτεχνείο Κρήτης. Αντώνης Βαφίδης . Χανιά Απρίλιος 2006.
- Τελικός σχεδιασμός αυτοκινητοδρόμου από CH. 26+810 μέχρι Ch. 28+500. ADT Omega S.A., Απρίλιος 2009.
- Σήραγγα TU 026 (T2) . Ανάλυση ρίσκου για το αρχικό σχέδιο . HBI Haerter Ltd., Αύγουστος 2009.
- Γεωλογική έρευνα για τις συμπληρωματικές γεωτρήσεις για τη σήραγγα T2. Γεωτρήσεις CB-1, CB-2, CB-3, CB-4, CB-5, CB-6. Edafomechaniki S.A., Φεβρουάριος 2010