



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

Διπλωματική εργασία  
**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΚΤΙΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΤΗΣ  
ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ**



Εκπονητής: **ΣΕΡΑΦΗΣ ΑΝΤΡΕΑΣ**  
Επιβλέπων: **ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**      **Επ.Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

ΑΘΗΝΑ 2011



*Στην οικογένεια μου...*

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Βασίλειο Παπαδόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το χρόνο που αφιέρωσε για την ολοκλήρωση της εργασίας, τη διάθεσή του να μου δώσει τα φώτα της πολύτιμης πείρας του και το γενικότερο ενδιαφέρον του από τη στιγμή της ανάθεσης της εργασίας έως και τη περάτωσή της.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σήραγγα Ανθοχωρίου εντάσσεται στο τμήμα 3.2 της Εγνατίας Οδού, βρίσκεται μεταξύ των χωριών Βοτονοσίου και Ανθοχωρίου στην περιοχή της Ηπείρου και απέχει περίπου 10km οδικώς από το Μέτσοβο, προς τα δυτικά. Πρόκειται για μια διπλή οδική σήραγγα η οποία σε συγκεκριμένες χιλιομετρικές θέσεις (με ύψος υπερκειμένων γύρω στα 90 m και βραχόμαζα με «φτωχά» μηχανικά χαρακτηριστικά) εμφάνισε κατά τη προώθηση της αυξημένες συγκλίσεις με αποτέλεσμα να γίνει επανασχεδιασμός του τρόπου διάνοιξης και υποστήριξης και να καθυστερήσει η ολοκλήρωση του έργου.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η κατά το δυνατόν πιο πίστη προσομοίωση των μεθόδων διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου, η εξαγωγή αποτελεσμάτων (τάσεων, παραμορφώσεων και σημείων αστοχίας γύρω από τη σήραγγα) με τη βοήθεια προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών με τη βοήθεια και της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και τέλος η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τα πραγματικά μετρημένα μεγέθη.

Για την προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας πραγματοποιήθηκε διδιάστατη ανάλυση με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis V8.2 2D που αποτελεί μια πρώτη εικόνα των εργασιών σε κάθε φάση προσομοίωσης και στόχο έχει την κατανόηση της σημαντικής επίδρασης του βαθμού αποτόνωσης  $\lambda=1-r_i/r_0$  στην τελική τιμή των παραμορφώσεων.

Στην προσπάθεια λεπτομερέστερης προσέγγισης των παραμέτρων της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας Ανθοχωρίου πραγματοποιήθηκε και τρισδιάστατη ανάλυση του προσομοιώματος με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D Tunnel, με το οποίο κατέστη δυνατή η επιλογή βήματος προώθησης, η προσομοίωση της «σκλήρυνσης» του εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά την προώθηση του μετώπου, η επιλογή της αρχικής θέσης για την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης και η απόσταση μεταξύ του μετώπου και της θέσης έναρξης εκσκαφής και υποστήριξης της βαθμίδας.

Στη συνέχεια υπολογίζονται και σχολιάζονται οι μέγιστες παραμορφώσεις για κάθε φάση προσομοίωσης. Τέλος, κατασκευάζονται τα διαγράμματα κατακόρυφων μετατοπίσεων της κλείδας της οροφής για δυο διαφορετικές διατομές. Στόχος είναι η μελέτη της συμπεριφοράς τους και η ερμηνεία τους τόσο με τη βοήθεια των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης όσο και των καμπυλών Chern και Panet.

Στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων συγκρίνονται οι μετατοπίσεις των αναλύσεων με τις πραγματικές μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στην ακίδα 3 της στέψης της διατομής, σε μια προσπάθεια διευκρίνησης του τρόπου λειτουργίας του προσομοιώματος και της αβεβαιότητας στην ορθή επιλογή των μηχανικών χαρακτηριστικών της βραχόμαζας.

# ABSTRACT

Anthochori tunnel is part of the 3.2 section of Egnatia Highway and is located in Epirus area, 10km west of Metsovo village. The tunnel has shown significant convergences in specific cross sections. This fact has led to an alternative design proposal of the simulation model resulting in the delay of project completion.

The primary task of this thesis is to produce a valid computer simulation of the methods used in the excavation and support of Anthochori tunnel via Finite element programs. The assessment of the produced results as well as their correlation with existing experimental data is provided.

Plaxis V8.2 2D finite element computer program was used for simulating two dimensional analyses of the tunnel. The target of these analyses is to understand how deconfinement ratio ( $\lambda=1-p_i/p_0$ ) affects deformation values

For a more detailed description of the excavation and support parameters we used a three dimensional simulation analysis. The 3D analysis was carried out by Plaxis 3D Tunnel finite element computer program.

In the next step, maximum deformations for each phase of the simulation process are demonstrated and discussed. Finally, the vertical displacement diagrams of the upper point of the internal arch were plotted for two different cross-sections. We studied the reaction of the former cross-sections by using the load-displacement curves as well as the Chern and Panet curves.

To conclude we compared the computer simulation-derived displacement values of the upper point of the internal arch with the real ones in order to clarify how the simulation model operates and assess the uncertainty in the correct selection of the rockmass mechanical characteristics.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## **1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ.**

1.1 Γενικά.....	2
1.2 Εκτίμηση ακτινικών παραμορφώσεων με τύπους Panet και Chern.....	3
1.3 Βασικά χαρακτηριστικά χάραξης της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης.....	4
1.4 Εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης για την εκτίμηση πιέσεων επί της άμεσης υποστήριξης.....	8

## **2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ.**

2.1 Γενικά.....	15
2.2 Συγκλίσεις κατά την προώθηση της σήραγγας.....	17
2.3 Εκτίμηση αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας.....	19
2.4 Κρίσιμη παραμόρφωση.....	21

## **3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ**

3.1 Γενικά στοιχεία.....	29
3.2 Γεωτεχνικά-γεωλογικά χαρακτηριστικά .....	31
3.3 Περιγραφή γεωλογικών σχηματισμών.....	33
3.4 Γεωτεχνικές παράμετροι.....	36
3.5 Κατηγορίες βραχώμαζας.....	37
3.6 Σύντομο ιστορικό των παραμορφώσεων.....	41



**4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ  
ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ  
PLAXIS V8.2 2D.**

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του PLAXIS v.8.2.....	48
4.2 Ιδιότητες προσομοιώματος.....	48
4.3 Υποκατάσταση του υπερκείμενου εδάφους με νέο έδαφος μικρότερου πάχους αλλά ισοδύναμο με το αρχικό.....	50
4.4 Μέθοδοι υποστήριξης της διατομής N3 και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά ακαμψίας.....	51

**5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ  
ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ  
PLAXIS V 8.2 2D.**

5.1 Γενικά.....	62
5.2 Περιγραφή των φάσεων προσομοίωσης.....	62
5.2.1 Πρώτο στάδιο προσομοίωσης.....	63
5.2.2 Δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.....	65
5.2.3 Τρίτο στάδιο προσομοίωσης.....	69
5.2.4 Τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.....	73
5.2.5 Πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.....	77
5.3 Υπολογισμός πραγματικού βαθμού αποτόνωσης.....	81
5.4 Αποτελέσματα αναλύσεων τυπικής διατομής N3 για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=74\%$ .....	85

**6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ  
ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ  
PLAXIS 3D TUNNEL.**

6.1 Γενικά.....	99
6.2 Ιδιότητες του προσομοιώματος.....	99
6.3 Φάσεις προσομοίωσης.....	100
6.4 Έλεγχος των κατακόρυφων μετατοπίσεων.....	137

**7<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....140**

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....145**



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ**

### **1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ.**

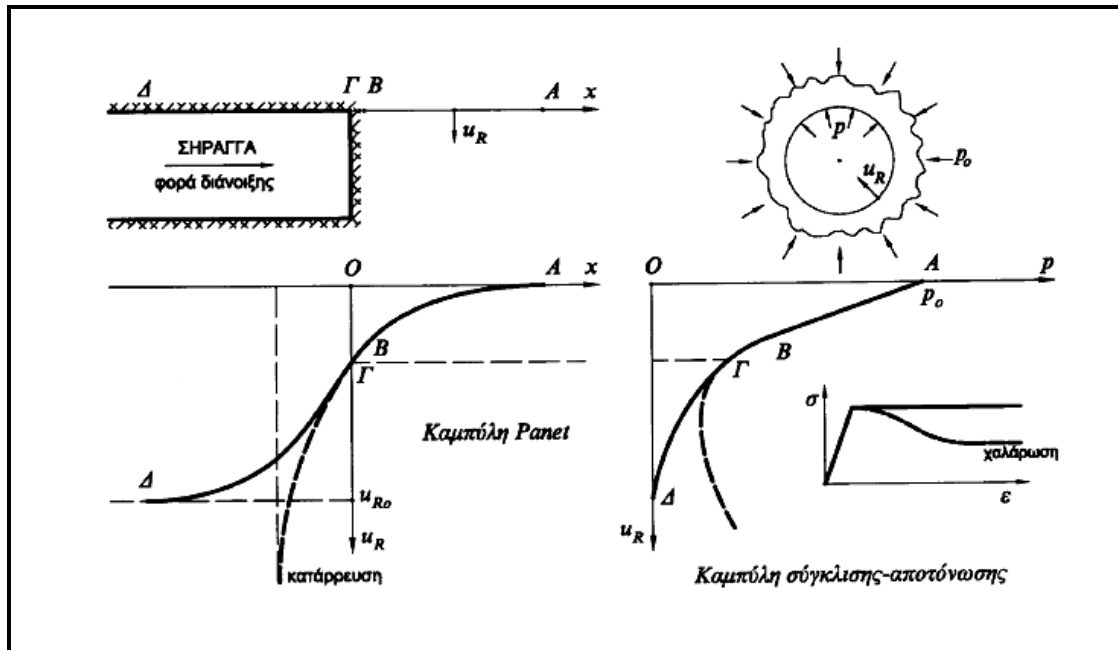
## ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ-ΑΠΟΤΟΝΩΣΗΣ

### 1.1 Γενικά.

Σκοπός της χάραξης των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης είναι η εκτίμηση των πιέσεων που ασκεί η περιβάλλουσα βραχόμαζα (γύρω από κυκλική σήραγγα) στην εκάστοτε εφαρμόζουσα υποστήριξη. Ο συνδυασμός των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης και των καμπυλών Panet έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης σε κάθε διατομή πίσω από το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας.

Κατά την διάνοιξη σηράγγων οι μετακινήσεις του εδάφους αρχίζουν σε θέσεις αρκετά εμπρός από το μέτωπο διάνοιξης, δηλαδή πριν το μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας φθάσει σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι συγκλίσεις της αντυνας της σήραγγας να φτάνουν το 30% περίπου, ήδη στο μέτωπο της εκσκαφής. Αυτή η σύγκλιση της βραχόμαζας πριν την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης συντελεί στην αποτόνωση της βραχόμαζας και τη μείωση των πιέσεων που θα ασκηθούν επί των μέτρων υποστήριξης. Σημειώνεται ότι εάν η συμπεριφορά του εδάφους παρουσιάζει χαρακτηριστικά έντονης χαλάρωσης (δηλαδή μείωση της αντοχής με παρατεταμένη παραμόρφωση) τότε η διατομή δεν ισορροπεί, η σύγκλιση της οροφής αυξάνει απεριόριστα και η διατομή καταρρέει.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη Panet και η αντίστοιχη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για δυο διαφορετικές περιπτώσεις βραχομαζας οι οποίες συμπεριφέρονται ελαστικά-ιδεατώς πλαστικά. Είναι προφανές ότι η βραχόμαζα με την έντονη χαλάρωση, στην περίπτωση που μείνει ανυποστήρικτη, καταρρέει σε αρκετά μικρή απόσταση από το μέτωπο διάνοιξης.



Εικόνα 1.1: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και καμπύλη Panet για δυο είδη βραχώμαζας.

## 1.2 Εκτίμηση ακτινικών παραμορφώσεων με τύπους Panet και Chern.

Η σύγκλιση  $u_R(x)$  του τοιχώματος ανυποστήρικτης σήραγγας σε απόσταση ( $x < 0$ ) πίσω από το μέτωπο της εκσκαφής (που βρίσκεται στη θέση  $x=0$ ) δίνεται από την προσεγγιστική σχέση (Panet, 1995):

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

όπου:  $U_R \infty$  = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής.

$R$  = η ακτίνα της σήραγγας.

$\xi = UeR \infty / U_R \infty$ : συντελεστής που ισούται με το λόγο της ελαστικής προς την ελαστοπλαστική τελική σύγκλιση.

Για ισότροπη βραχώμαζα ( $K=1$ ) η ελαστική τελική σύγκλιση δίνεται από τη σχέση:

$$u_{R\infty}^e = \frac{P_o}{2G} R$$

$U_R(0)$  = σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας ( $x=0$ ).

$m$  = συντελεστής.

Ο αντίστοιχος τύπος του **Chern** (Chern et al, 1998) είναι:

$$U_R(x) = U_{R\infty} [1 + \exp(0.91x/R)]^{-1.7}$$

**όπου:**  $U_{R\infty}$  = η τελική σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας σε μεγάλη απόσταση πίσω από το μέτωπο εκσκαφής. Συνήθως εκτιμάται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ανάλυση ανυποστήρικτης διατομής).

$R$  = η ακτίνα της σήραγγας.

$U_R(0) = 0,308 U_{R\infty}$ : η σύγκλιση του τοιχώματος στο μέτωπο εκσκαφής ( $x=0$ ).

### 1.3 Βασικά χαρακτηριστικά χάραξης της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης.

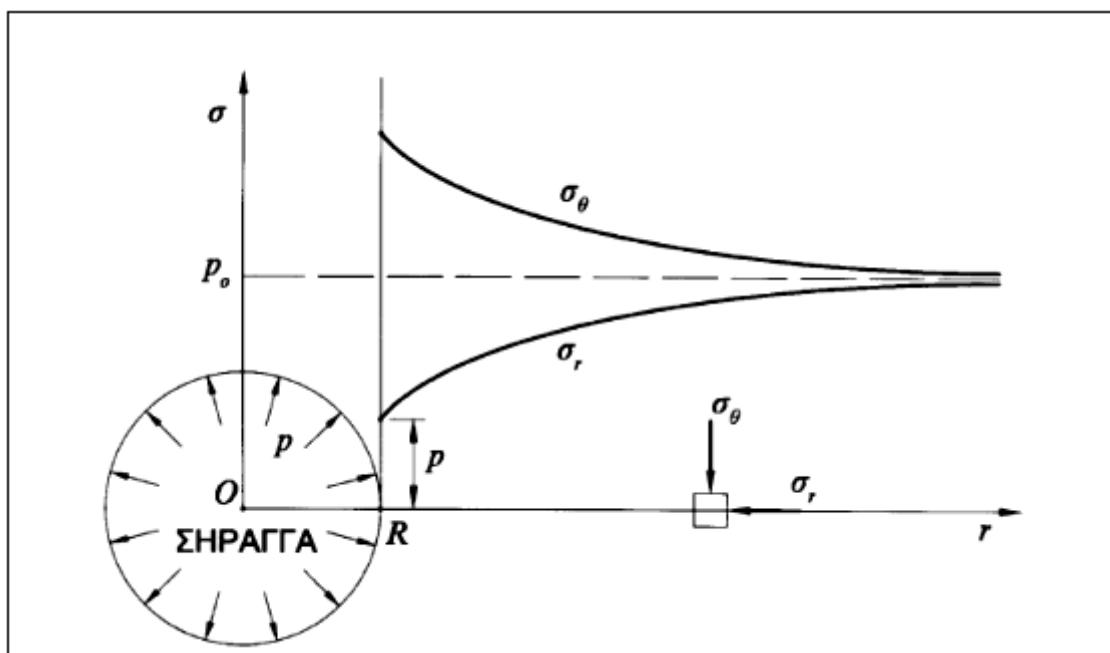
Η χρήση των καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης επιτρέπεται μόνο κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Οι βασικές παραδοχές είναι οι εξής:

- Σήραγγα κυκλικής διατομής (ακτίνα  $R$ ).
- Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (κατά τον άξονα της σήραγγας  $z$ )
- Ισότροπη γεωστατική ένταση ( $\sigma_{v0} = \sigma_{h0} = p_0$ ) πριν τη διάνοιξη της σήραγγας
- Έδαφος ελαστικό-απολύτως πλαστικό. Αστοχία κατά **Mohr-Coulomb** με παραμέτρους αντοχής  $c$ ,  $\phi$ :

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + 2 c N_\varphi^{0.5} \quad , \quad \text{όπου } N_\varphi = \tan^2 (45 + \varphi/2)$$

- Παραμόρφωση υπό σταθερό όγκο μετά την αστοχία.
- Η αρχική εσωτερική πίεση ( $p_0$ ) μειώνεται βαθμιαία σε ( $p$ ) και τελικώς μηδενίζεται.

Κάθε καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης αποτελείται από έναν ελαστικό και ενδεχομένως από έναν ελαστοπλαστικό κλάδο. Αυτό εξαρτάται από τον συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  ο οποίος ισούται με το λόγο της εφαπτομενικής τάσης στην αντυγα της σήραγγας προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη της βραχύμαζας. Στο παρακάτω σχήμα έχει σχεδιαστεί η κατανομή των τάσεων γύρω από κυκλική διατομή, με τις ακτινικές τάσεις να είναι ίσες με τις εσωτερικές πιέσεις (για ανυποστήρικτη σήραγγα οι τάσεις αυτές είναι μηδέν) και τις εφαπτομενικές τάσεις να είναι δυο φορές μεγαλύτερες από τις γεωστατικές πιέσεις οι οποίες υπολογίζονται στην περιφέρεια της διατομής (και πιο συγκεκριμένα σε ένα βάθος μισής διαμέτρου). Επομένως τα εδαφικά στοιχεία στο σύνορο της διατομής υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη με τον συντελεστή υπερφόρτισης να αποτελεί ένα μέτρο σύγκρισης των εξ ανακατανομής τάσεων σε σύστημα πολικών συντεταγμένων  $\sigma_\theta$ , με την  $\sigma_{cm}$ .



**Εικόνα 1.2:** Κατανομές ακτινικών και εφαπτομενικών τάσεων γύρω από κυκλική διατομή.



Στην περίπτωση που  $N_s < 1$  τότε η περιβάλλουσα βραχόμαζα συμπεριφέρεται ελαστικά για οποιαδήποτε απόσταση της συγκεκριμένης διατομής της σήραγγας από το μέτωπο διάνοιξης και η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης αποτελείται μόνο από τον ελαστικό κλάδο.

Στην περίπτωση που  $N_s > 1$  τότε η περιβάλλουσα βραχόμαζα συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά, με ελαστική συμπεριφορά κοντά στο μέτωπο εκσκαφής και πλαστική συμπεριφορά αρκετά πίσω από το μέτωπο. Δηλαδή κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή της εσωτερικής πίεσης,  $p_e$ , αρχίζει να δημιουργείται πλαστική περιοχή, δηλαδή για τα εδαφικά στοιχεία εντός αυτής της περιοχής ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb ενώ τα υπόλοιπα εδαφικά στοιχεία τα οποία δεν ανήκουν σε αυτή την περιοχή (που απλοποιητικά θεωρείται ότι έχει μια ακτίνα  $R < r < r_p$ , όπου  $r_p$  είναι η ακτίνα της πλαστικής περιοχής) δεν αστοχούν και συμπεριφέρονται ελαστικά.

Γενικότερα, η συνθήκη μη-ανάπτυξης πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα (δηλαδή  $r_p = R$ ) για κάποια τιμή της εσωτερικής πίεσης ( $p$ ) είναι:

$$N_i \equiv \frac{p_e}{c \sqrt{N_\phi}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{p}{p_e} \right) (N_\phi + 1)}$$

Οι καμπύλες **Panet** και **Chern** υπολογίζουν τον λόγο της ακτινικής μετατόπισης της στέψης της σήραγγας (σε οποιαδήποτε τυχούσα διατομή) σε σχέση με την σύγκλιση της στέψης αρκετά μακριά από το μέτωπο εκσκαφής (όπου η σύγκλιση έχει πάρει την τελική μέγιστη τιμή της). Ο υπολογισμός λοιπόν των συγκλίσεων των διατομών απαιτεί τον υπολογισμό της  $U_{R^\infty}$ , η οποία εξαρτάται από το ενδεχόμενο εμφάνισης πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα.

Για μετακίνηση στην ελαστική περιοχή και ειδικώς στο όριο της άντυνας ( $r=R$ ) και χωρίς να υπάρχει πλαστική περιοχή:

$$u_R = R(1 + \nu) \left( \frac{P_o - P}{E} \right)$$

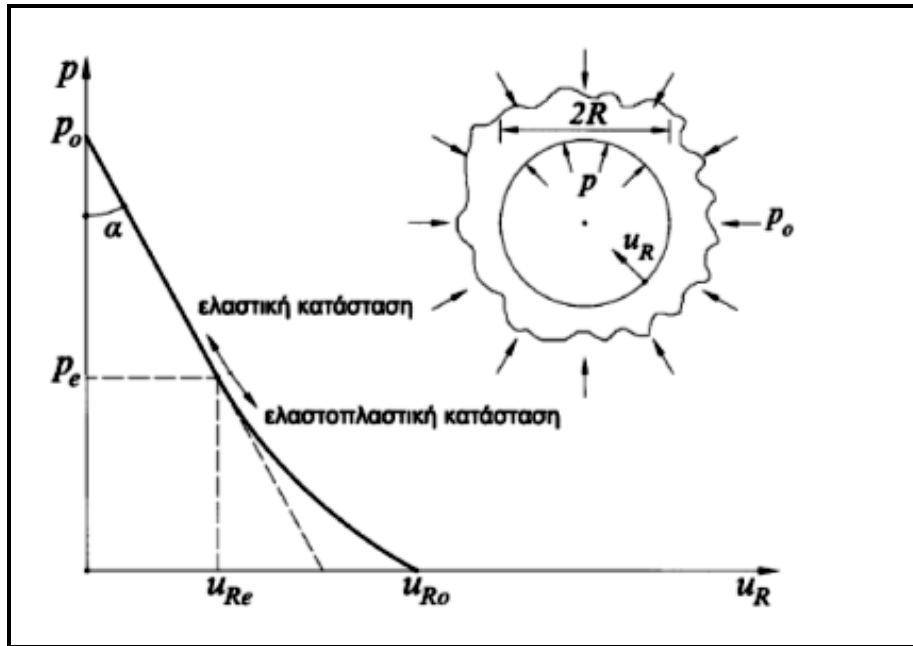
Για μετακίνηση στο όριο της πλαστικής περιοχής ( $r=r_p$ ), δηλαδή μακριά από την αντυνα της σήραγγας:

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

Για την περίπτωση ανάπτυξης πλαστικής περιοχής γύρω από τη σήραγγα, η μετακίνηση στο τοίχωμα της σήραγγας ( $r=R$ ) δίνεται από τη σχέση:

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

Το παρακάτω σχήμα αποτελεί μια αντιπροσωπευτική απεικόνιση μιας καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης η οποία αντιστοιχεί σε βραχόμαζα με συμπεριφορά ελαστική-απολύτως πλαστική.

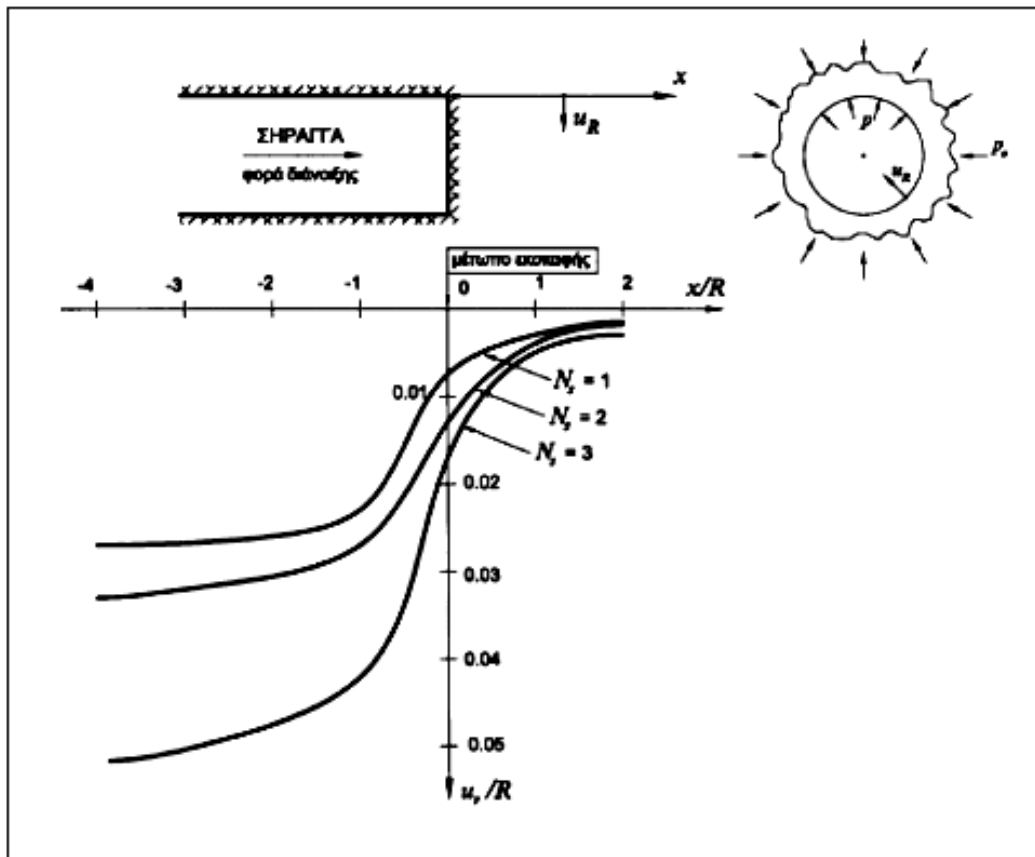


*Εικόνα 1.3: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης βραχόμαζας με ανάπτυξη πλαστικής ζώνης γύρω από τη διατομή της σήραγγας.*

#### 1.4 Εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης-αποτόνωσης για την εκτίμηση πιέσεων επί της άμεσης υποστήριξης.

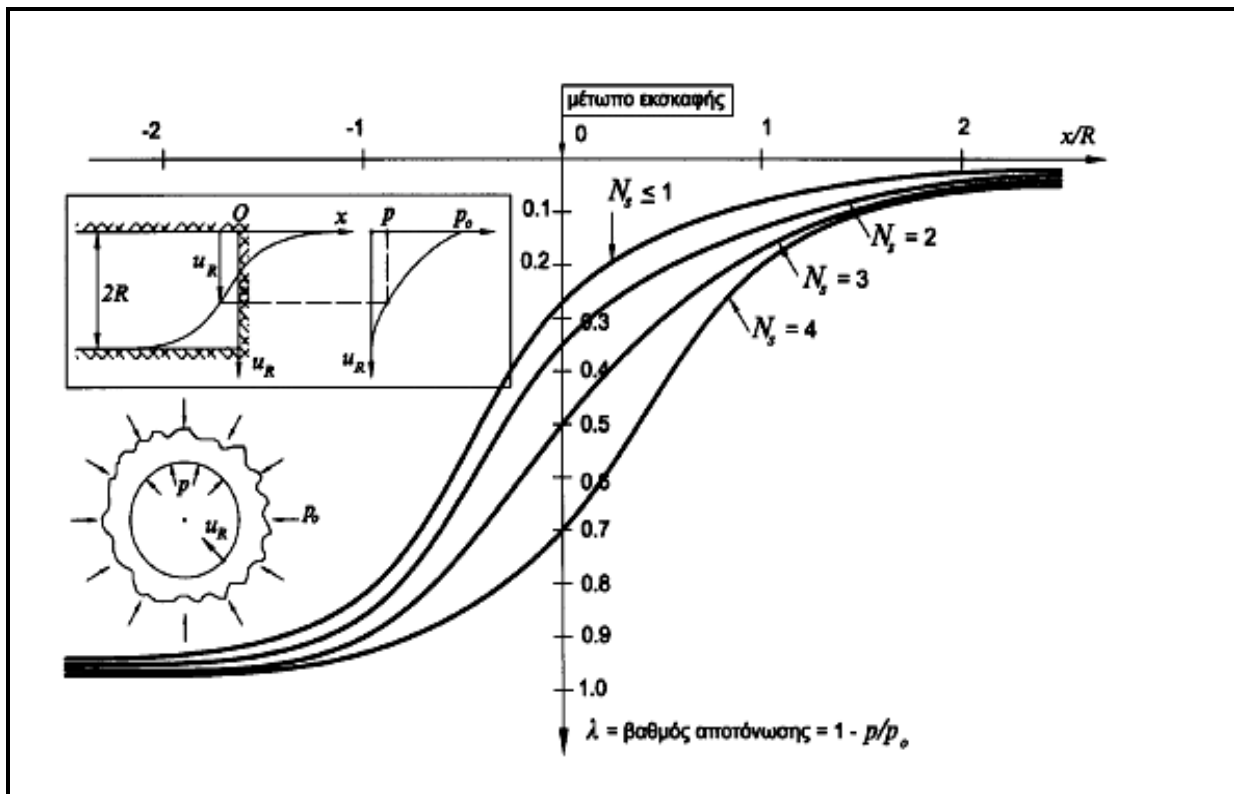
Ο συνδυασμός των καμπυλών **Panet** και της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής επιτρέπει την εκτίμηση της σύγκλισης του τοιχώματος σε κάθε θέση (x) του άξονα της σήραγγας. Η διαδικασία σε διαδοχικά βήματα είναι η εξής:

1. Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης  $N_s$  και στη συνέχεια επιλέγεται η αντίστοιχη καμπύλη **Panet**. Στο παρακάτω σχήμα είναι χαρακτηριστική η έντονη αύξηση της σύγκλισης κοντά στο μέτωπο διάνοιξης, με ανάλογη αύξηση του συντελεστή υπερφόρτισης αλλά και η αρκετά μεγαλύτερη σύγκλιση της διατομής μακριά από το μέτωπο για  $N_s=3$  συγκριτικά με εκείνη για  $N_s=1$ . Αυτό συμβαίνει γιατί ο ελαστοπλαστικός κλάδος της βραχομαζας με  $N_s=3$  ξεκινάει για πολύ μικρές ακτινικές παραμορφώσεις ( $U_R$ ) με αποτέλεσμα κατά την προώθηση του μετώπου οι συγκλίσεις να αυξάνουν με πολύ ταχύτερο ρυθμό.



*Εικόνα 1.4: Εξάρτηση των συγκλίσεων της άντυνας της σήραγγας από τον συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$  και την απόσταση από το μέτωπο διάνοιξης.*

2. Από τη συγκεκριμένη καμπύλη Panet και τη συγκεκριμένη τιμή ( $x$ ) υπολογίζεται ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ). Από το παρακάτω σχήμα είναι φανερό ότι ο βαθμός αποτόνωσης δεν επηρεάζεται αισθητά για διατομές αρκετά πίσω από το μέτωπο, όπου για όλες τις βραχομαζες προσεγγίζει την τιμή  $\lambda=1$  (για ανυποστήρικτη σήραγγα), ενώ αντιθέτως λαμβάνει πολύ διαφορετικές τιμές κοντά στο μέτωπο διάνοιξης. Στη συνέχεια η ισοδύναμη εσωτερική πίεση ισούται με  $\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 (1-\lambda)$ .



*Εικόνα 1.5:* Η εξάρτηση του βαθμού αποτόνωσης  $\lambda$  από τον συντελεστή υπερφόρτισης  $N_s$ , κοντά στο μέτωπο διάνοιξης.

3. Υπολογίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης με βάση τις ελαστικές παραμέτρους ( $\mathbf{E}, \nu$ ) και τις παραμέτρους αντοχής ( $\mathbf{c}, \phi$ ) του εδάφους.

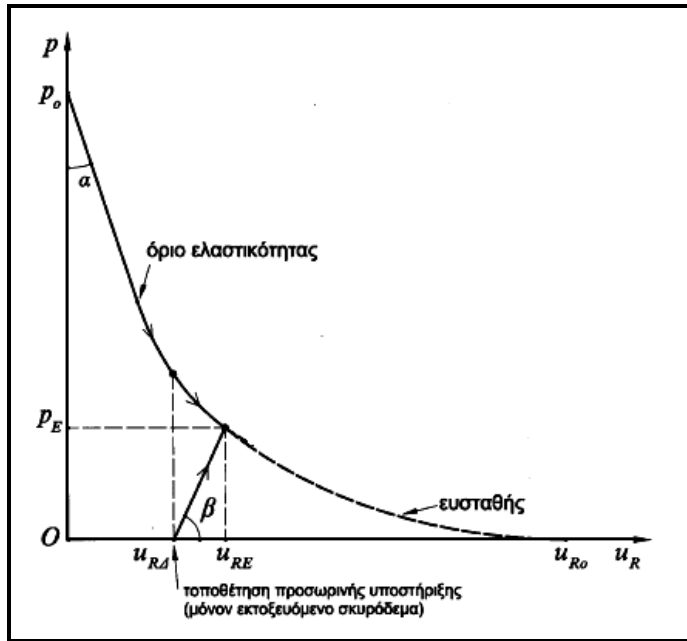
4. Από τη καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και για την τιμή της πίεσης ( $\mathbf{p}$ ) που υπολογίστηκε παραπάνω, υπολογίζεται η σύγκλιση της διατομής ( $\mathbf{U}_R$ ).

Ο βαθμός αποτόνωσης ( $\lambda$ ), δηλαδή η μείωση της εσωτερικής πίεσης από την αρχική της τιμή ( $\mathbf{p}_0$ ) σε μικρότερη τιμή ( $\mathbf{p}$ ) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της χρονικής υστέρησης στην τοποθέτηση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης σήραγγων. Πράγματι, μέσω των καμπύλων Panet, μπορεί να υπολογισθεί η εσωτερική πίεση ( $\mathbf{p}$ ), που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση ( $\mathbf{x}$ ) τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης ως προς το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας. Στη συνέχεια, η προσομοίωση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας γίνεται σε δυο φάσεις ως εξής:

(α) Η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p<sub>0</sub>) σε (p). Η σύγκλιση της διατομής που προκύπτει αντιστοιχεί στη μετακίνηση του τοιχώματος πριν από την τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης.

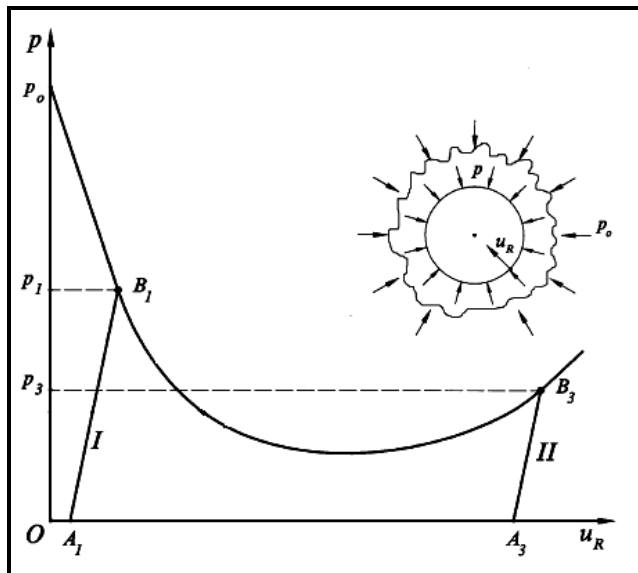
(β) Τοποθετούνται τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ) και στη συνέχεια η εσωτερική πίεση μειώνεται από (p) στο μηδέν.

Αυτή η μείωση της εσωτερικής πίεσης προκαλεί κάποια περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος και φόρτιση των μέτρων προσωρινής υποστήριξης. Αρχικά, κατά την τοποθέτηση τους, τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης είναι αφόρτιστα αφού η βραχόμαζα έχει ισορροπήσει. Κατά την προώθηση του μετώπου όμως η βραχόμαζα δέχεται περαιτέρω συγκλίσεις και αρχίζει να φορτίζει την υποστήριξη, η οποία λόγω πεπερασμένης και όχι άπειρης δυσκαμψίας αναπτύσσει ακτινικές μετατοπίσεις. Τελικά το σύστημα περιβάλλουσα βραχόμαζα-άμεση υποστήριξη ισορροπεί όταν οι μεταξύ τους πιέσεις εξισωθούν. Χαρακτηριστική είναι η παρακάτω καμπύλη η οποία αντιπροσωπεύει μια διατομή σήραγγας με περιβάλλουσα βραχόμαζα η οποία έχει και ελαστοπλαστικό κλάδο αλλά στην περίπτωση που μείνει ανυποστηρίκτη δεν καταρρέει. Είναι ευδιάκριτο ότι η τοποθέτηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αφού προηγουμένως έχει σχηματιστεί πλαστική ζώνη γύρω από τη σήραγγα, είναι αρκετά οικονομική λύση αφού οι πιέσεις με τις οποίες θα καταπονηθεί θα είναι πολύ μικρότερες συγκριτικά με την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης στον ελαστικό κλάδο. Τυπικά, όσο πιο γρήγορα τοποθετείται η άμεση υποστήριξη και όσο πιο ανένδοτη είναι, τόσο μεγαλύτερα φορτία αναλαμβάνει. Αντιθέτως, όσο περισσότερο ενδόσιμη είναι η άμεση υποστήριξη και όσο αργότερα τοποθετείται τόσο μικρότερα φορτία αναλαμβάνει υπό την προϋπόθεση ότι η καθυστέρηση στην τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης δεν θα προκαλέσει υπερβολική χαλάρωση και αποδιοργάνωση της βραχόμαζας (οπότε θα αυξηθούν σημαντικά τα φορτία της άμεσης υποστήριξης).



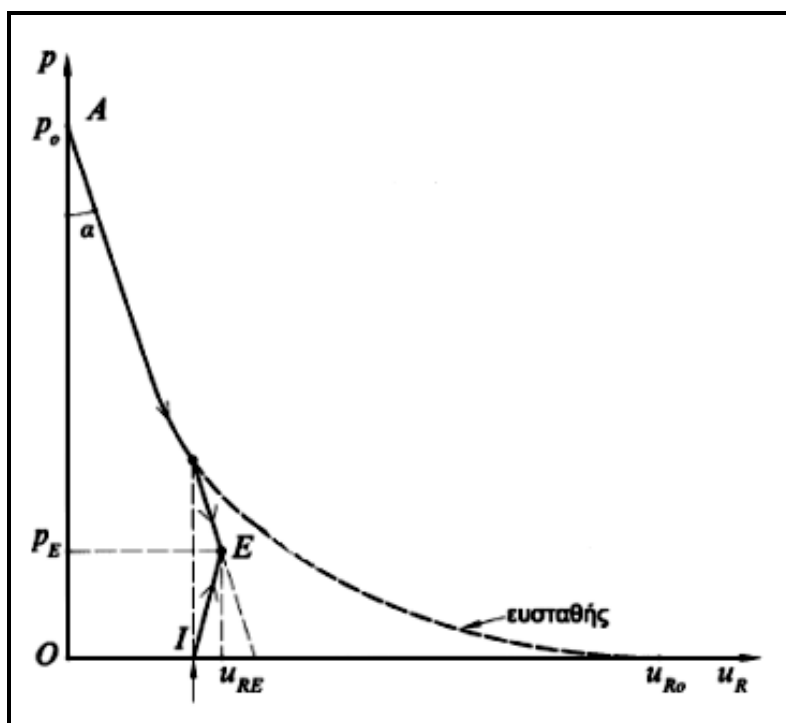
*Εικόνα 1.6: Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τελικώς ευστάθεια συστήματος βραχόμαζας-προσωρινής υποστήριξης.*

Το διάγραμμα που ακολουθεί περιγράφει την ανάληψη μεγαλύτερων φορτίων από την βέλτιστη-οικονομική τιμή, είτε λόγω πρόωρης υποστήριξης (δηλαδή πολύ κοντά στο μέτωπο διάνοιξης) είτε λόγω πολύ καθυστερημένης υποστήριξης (δηλαδή οι συγκλίσεις της βραχομαζας είναι κοντά στο σημείο της κατάρρευσης της διατομής).



*Εικόνα 1.7 : Επιρροή του χρόνου τοποθέτησης των μέτρων προσωρινής υποστήριξης στην πίεση της βραχόμαζας επί της υποστήριξης της σήραγγας.  
**I: πολύ νωρίς.** Η πίεση στην άμεση υποστήριξη ( $p_1$ ) είναι πολύ μεγάλη.  
**II: πολύ αργά.** Η πίεση ( $p_3$ ) έχει αυξηθεί λόγω αποδιοργάνωσης (χαλάρωσης της βραχόμαζας, με συνέπεια τον κίνδυνο κατάρρευσης).*

Εκτός από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, στην άμεση υποστήριξη σήραγγων χρησιμοποιούνται και αγκυρια τα οποία βελτιώνουν τη συμπεριφορά της βραχομαζας με αποτέλεσμα οι συγκλίσεις κατά την προώθηση του μετώπου να είναι μικρότερες. Στο σχήμα που ακολουθεί, το σκυρόδεμα και τα αγκυρια τοποθετούνται ταυτόχρονα στην ίδια διατομή πίσω από τη σήραγγα με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αρχικά να είναι αφόρτιστο και τα αγκύρια να μην μεταβάλλουν της ιδιότητες της βραχομαζας. Στη συνέχεια όμως η παραμόρφωση των εδαφικών στοιχείων προκαλεί ένταση στα αγκύρια τα οποία θλίβουν τη βραχομαζα η οποία συμπεριφέρεται ελαστικά (με την προϋπόθεση ότι τα αγκύρια είναι καλά αγκυρομένα έξω από την πλαστική περιοχή).



*Εικόνα 1.8 : Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σε σήραγγα με προσωρινή υποστήριξη από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.*





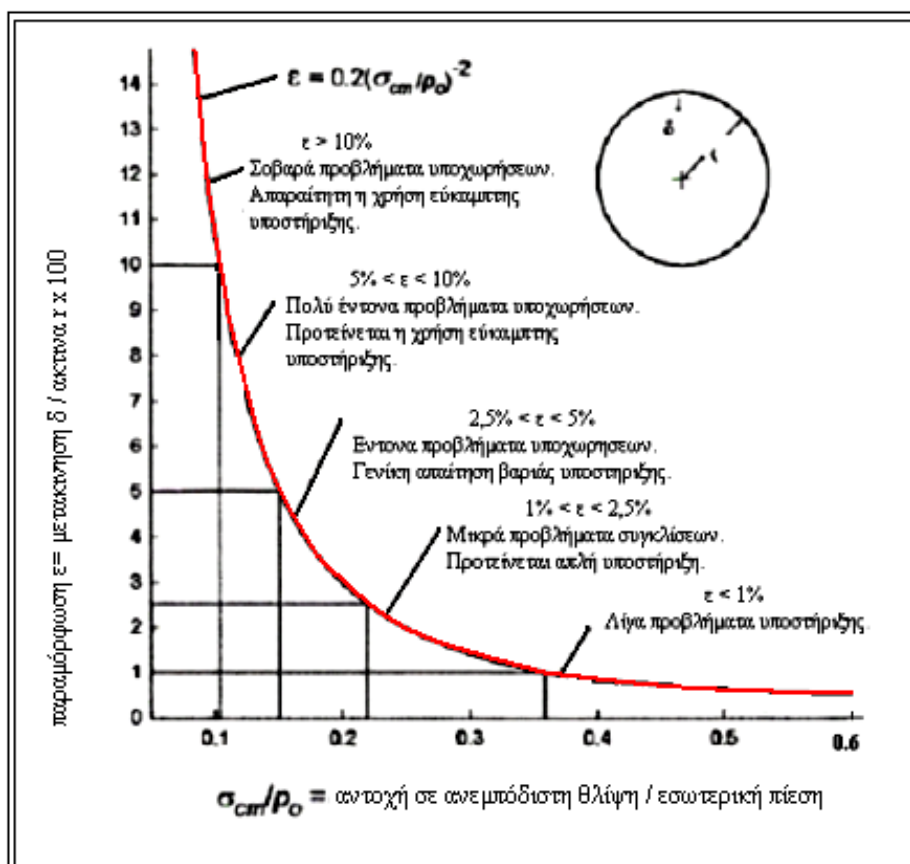
## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ**

### **2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΒΡΑΧΟΜΑΖΕΣ**

## 2.1 Γενικά.

Με τον όρο βραχόμαζα χαρακτηρίζεται ο συνδυασμός του άρρηκτου πετρώματος και των ασυνεχειών. Η παρουσία ασυνεχειών στην βραχόμαζα που περιβάλλει μια σήραγγα ενδέχεται να προκαλέσει διατμητική αστοχία κατά μήκος αυτών των ασυνεχειών. Αυτό εξαρτάται από τον αριθμό, τον προσανατολισμό και την κλίση κάθε ασυνέχειας καθώς επίσης και από την διατμητική αντοχή των διεπιφανειών και το μέτρο ελαστικότητας του άρρηκτου βράχου.

Η σταθερότητα των σηράγγων σε ασθενή βραχόμαζα ελέγχεται από τον λόγο της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη της βραχόμαζας ( $\sigma_{cm}$ ) προς την πίεση των υπερκειμένων ( $p_0$ ). Ο λόγος αυτός αποτελεί έναν οδηγό για μια πρώτη εκτίμηση των πιέσεων τις οποίες καλείται να παραλάβει η υποστήριξη έτσι ώστε να περιοριστούν οι παραμορφώσεις των συνόρων της σήραγγας σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Χαρακτηριστικό είναι το παρακάτω διάγραμμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη εκτίμηση των παραμορφώσεων που ενδέχεται να εμφανιστούν κατά την διάνοιξη της σήραγγας.



**Εικόνα 2.1 :** Διάγραμμα εκτίμησης παραμορφώσεων με βάση τον λόγο  $\sigma_{cm} / p_0$ .

	Παραμόρφωση $\varepsilon$ %	Γεωτεχνικές Λεπτομέρειες	Τρόποι Υποστήριξης
<b>A</b>	$\varepsilon < 1\%$	Λίγα προβλήματα σταθερότητας και εφαρμογή πολύ απλών μεθόδων υποστήριξης της σήραγγας. Τα συστήματα κατάταξης βραχομαζας αποτελούν έναν επαρκή παράγοντα σχεδιασμού της υποστήριξης.	Αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
<b>B</b>	$1\% < \varepsilon < 2,5\%$	Γίνεται χρήση καμπυλών σύγκλισης-αποτόνωσης για την εκτίμηση του εύρους της πλαστικής ζώνης της βραχομαζας που περιβάλλει τη σήραγγα και της αλληλεπίδρασης μεταξύ της προοδευτικής ανάπτυξης της ζώνης αυτής και των διαφόρων τύπων υποστήριξης.	Λίγα προβλήματα υποχωρήσεων τα οποία γενικά αντιμετωπίζονται με αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ορισμένες φορές ενδέχεται να προστεθούν ελαφρά ατσάλινα πλαίσια ή δικτυωτά πλαίσια για επιπλέον ασφάλεια).
<b>Γ</b>	$2,5\% < \varepsilon < 5\%$	Δισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, με συνδυασμό φορέων υποστήριξης και φάσεων εκσκαφής, χρησιμοποιείται για τέτοιου είδους προβλήματα. Η σταθερότητα του μετώπου δεν αποτελεί γενικά το κύριο πρόβλημα.	Έντονα προβλήματα μετακινήσεων που απαιτούν την έγκαιρη-άμεση τοποθέτηση της προσωρινής υποστήριξης. Γενική απαίτηση για βαριά ατσάλινα πλαίσια εμπηγμένα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
<b>Δ</b>	$5\% < \varepsilon < 10\%$	Ο σχεδιασμός της σήραγγας εξαρτάται από τη σταθερότητα του μετώπου, ενώ πραγματοποιούνται και δισδιάστατες αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης απαιτούνται ορισμένες εκτιμήσεις της επίδρασης της ενισχυμένης ζώνης των δοκών προπορείας και των μεθόδων ενίσχυσης του μετώπου διάνοιξης.	Πολύ έντονα προβλήματα ακτινικών μετατοπίσεων και σταθερότητας του μετώπου. Γενικά απαιτείται η χρήση δοκών προπορείας και ενίσχυση του μετώπου, καθώς και μεταλλικών πλαισίων εμπηγμένα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.
<b>E</b>	$\varepsilon > 10\%$	Έντονη αστάθεια του μετώπου η οποία απαιτεί τρισδιάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Ως και σήμερα οι περισσότερες λύσεις βασίζονται στην εμπειρία.	Σοβαρά προβλήματα υποχωρήσεων. Η χρήση δοκών προπορείας και μεθόδων ενίσχυσης του μετώπου τίθενται συνήθως σε εφαρμογή και σε ειδικές περιπτώσεις ενδέχεται να υπάρχει η ανάγκη για τοποθέτηση εύκαμπτης υποστήριξης

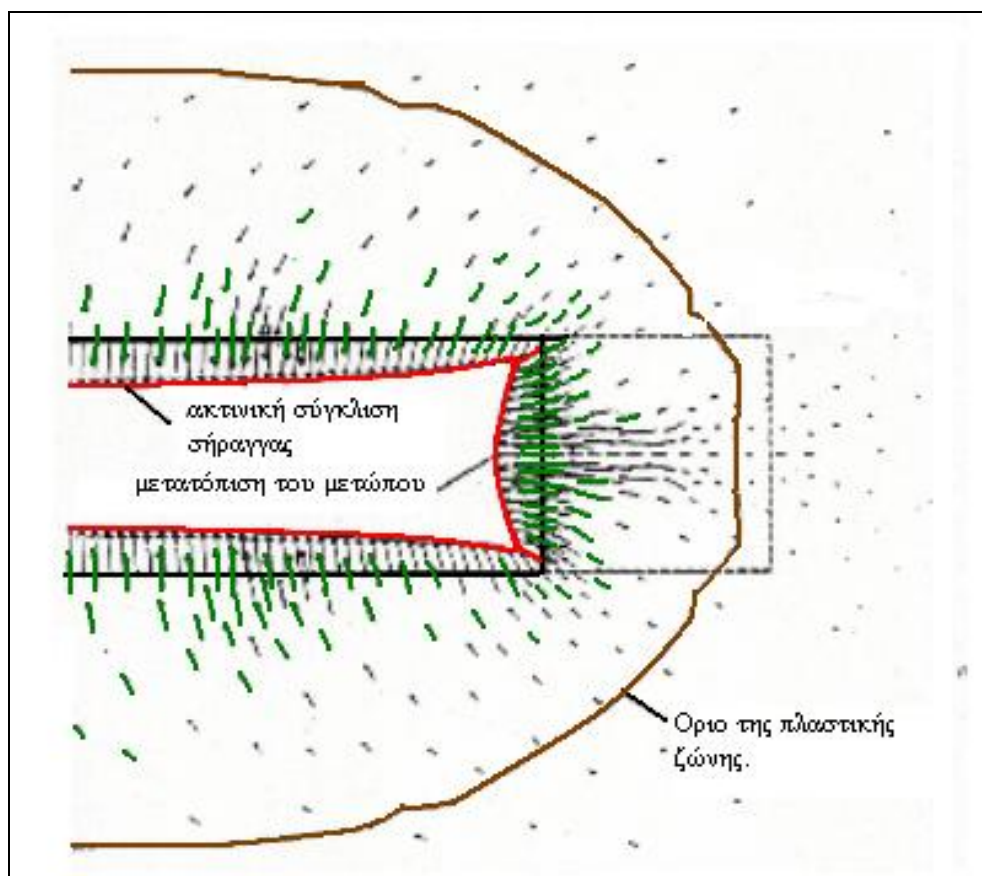
**Πίνακας 2.1:** Κατάταξη μεθόδων υποστήριξης ανάλογα με το ποσοστό παραμόρφωσης.

Για επίπεδα παραμορφώσεων της τάξης του **1%** η διεθνής εμπειρία προτείνει ότι υπάρχουν λίγα προβλήματα σταθερότητας. Αυτά τα επίπεδα παραμορφώσεων εμφανίζονται γενικά σε βραχόμαζες με μεγάλες τιμές του GSI και σε σχετικά μικρά βάθη από την επιφάνεια. Η υποστήριξη για τέτοιου είδους συνθήκες συχνά σχεδιάζεται με κριτήριο την ασφάλεια του εργατικού προσωπικού και αποτελείται συνήθως από αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή εναλλακτικά από ελαφριά μεταλλικά πλαίσια. Αντίθετα, για επίπεδα παραμορφώσεων της τάξης του **10%** η υποστήριξη πρέπει να είναι ικανή να διατηρήσει το προφίλ της διατομής και αυτό επιτυγχάνεται επιπλέον με χρήση δοκών προπορείας αλλά και με διάφορες μεθόδους ενίσχυσης του μετώπου διάνοιξης, όπως περιγράφεται χαρακτηριστικά στον παραπάνω πίνακα.

Η διάνοιξη σηράγγων σε ασθενή βραχομαζα παρουσιάζει κάποιες ειδικές προκλήσεις στον γεωτεχνικό μηχανικό, κακές εκτιμήσεις κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων υποστήριξης μπορούν να οδηγήσουν σε κατάρρευση της σήραγγας ενώ υπερβολικά συντηρητικές εκτιμήσεις έχουν ως αποτέλεσμα το υψηλό κόστος. Για να γίνουν κατανοητοί οι τομείς που εμπλέκονται στην διαδικασία του σχεδιασμού της υποστήριξης σηράγγων με ασθενή περιβάλλουσα βραχόμαζα, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε μερικές βασικές έννοιες για το πώς η περιβάλλουσα βραχόμαζα παραμορφώνεται και πώς τα συστήματα υποστήριξης περιορίζουν τις παραμορφώσεις αυτές.

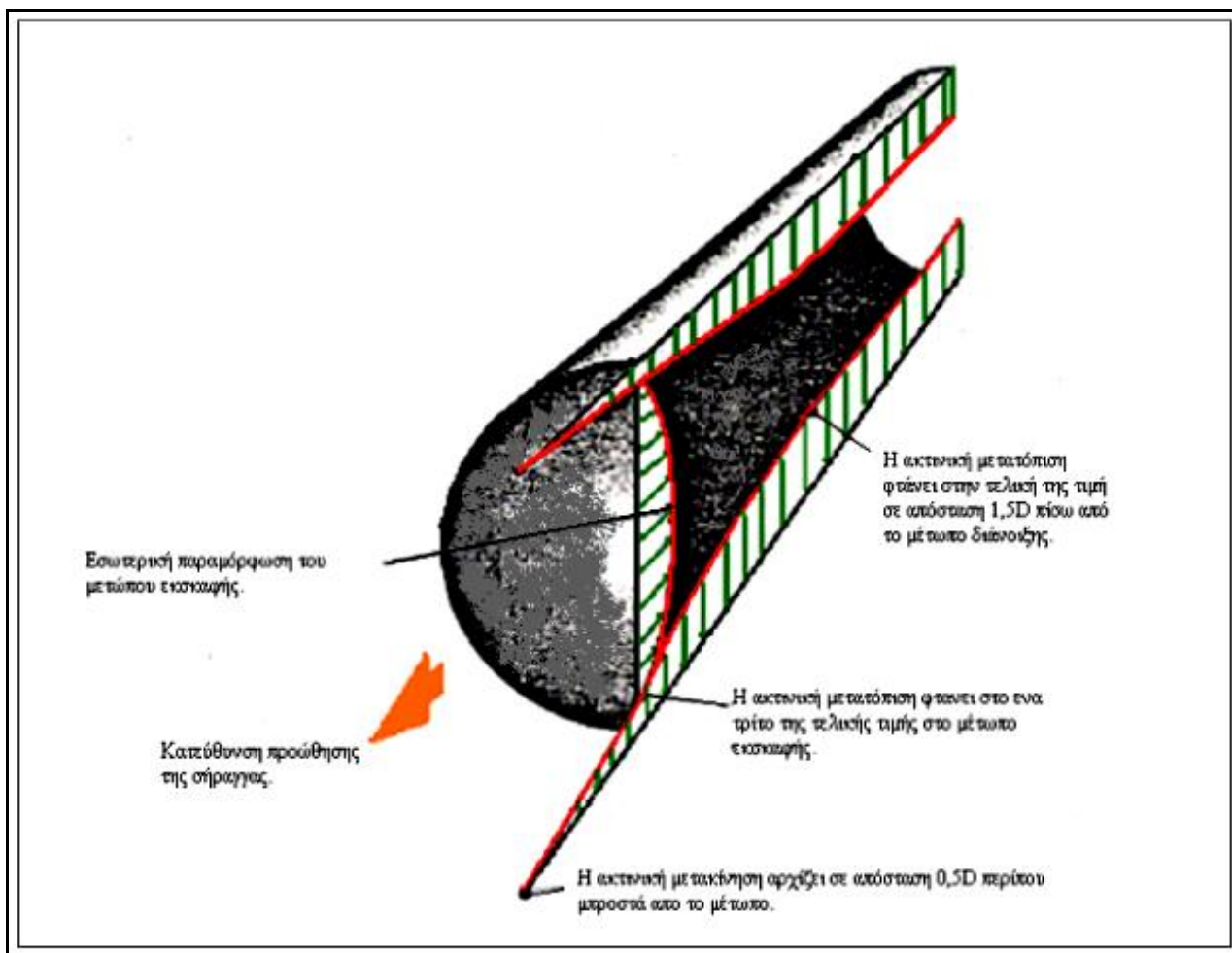
## **2.2 Συγκλίσεις κατά την προώθηση της σήραγγας.**

Το σχήμα 2 αποτελεί μια 3-διάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζει την παραμόρφωση της βραχόμαζας που περιβάλλει κυκλική σήραγγα η οποία προωθείται κατά μήκος βραχόμαζας κακής ποιότητας και με τον συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων να είναι ίσος με ένα ( $K_0=1$ ). Στην εικόνα επίσης φαίνεται η κατεύθυνση των διανυσμάτων των μετατοπίσεων αλλά και το σχήμα της παραμορφωμένης σήραγγας. Το σχήμα 3 είναι ένα απλοποιημένο γράφημα των πιο σπουδαίων χαρακτηριστικών αυτής της ανάλυσης.



*Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της μετατόπισης της βραχόμαζας (που περιβάλλει κυκλική σήραγγα) ως διανύσματα, έπειτα από 3-διάστατη ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.*

Η σύγκλιση της βραχόμαζας ξεκινά σε μια απόσταση μισής ακτίνας περίπου μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης της σήραγγας και φτάνει στη μέγιστη τιμή της σε μια απόσταση **1,5D** πίσω από το μέτωπο διάνοιξης. Στη θέση του μετώπου έχει ήδη πραγματοποιηθεί μια ακτινική μετατόπιση της τάξης του **30%** της συνολικής μετατόπισης (η οποία πραγματοποιείται σε απόσταση **D** ή **1,5D** από το μέτωπο) και το μέτωπο παραμορφώνεται προς το εσωτερικό όπως περιγράφεται στα σχήματα 2 και 3..









*Εικόνα 2.3: Απεικόνιση ακτινικών μετατοπίσεων κατά την προώθηση της σήραγγας.*

### 2.3 Εκτίμηση αντοχής της περιβάλλουσας βραχώμαζας.

Οι παράμετροι της βραχώμαζας που χρησιμοποιούνται για την παραπάνω ανάλυση μπορούν να εκτιμηθούν από το κριτήριο αστοχίας **Hoek-Brown**. Οι παράμετροι είναι η γωνία εσωτερικής τριβής ( $\phi$ ), η συνοχή( $c$ ), το μέτρο ελαστικότητας( $E$ ) και η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ( $\sigma_{cm}$ ) η οποία υπολογίζεται μέσω του συστήματος ταξινόμησης βραχομαζας **GSI**. Η τιμή του GSI μπορεί να εκτιμηθεί από τις επιτόπου περιγραφές της βραχώμαζας, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Η προσεγγιστική σχέση υπολογισμού της  $\sigma_{cm}$  με χρήση της τιμής GSI και της αντοχής του άρρηκτου βράχου( $\sigma_{ci}$ ) είναι η εξής:

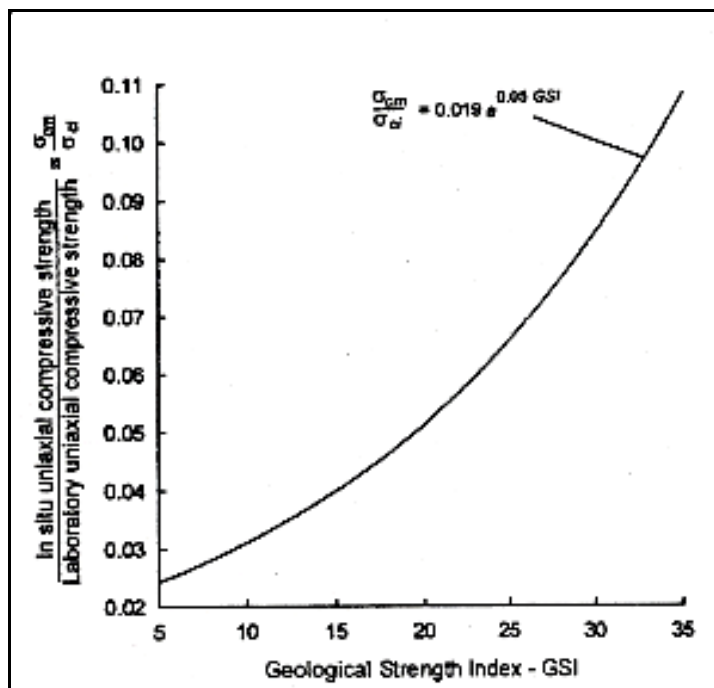
$$\sigma_{cm} = 0.019 \sigma_{ci} e^{0.05GSI}$$

<p><b>ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΒΡΑΧΟΥΣ</b> (Hoek and Marinos, 2000) Βασίζόμενοι στην εμφάνιση της βραχώμαζας (περιγραφή δομής και κατάσταση επιφάνειας ασυνεχειών) εκτιμήστε τη μέση τιμή του GSI, χωρίς υποχρεωτικά μεγάλη ακρίβεια. Το να επιλέξετε ένα εύρος τιμών από 33 ως 37 είναι πιο ρεαλιστικό από το να δηλώσετε ότι GSI=35. Σημειώνεται ότι ο Πίνακας δεν εφαρμόζεται σε κινηματικά ελεγχόμενες αστάθειες. Στην περίπτωση που οι ασθενείς επίπεδες επιφάνειες έχουν μη ευνοϊκό προσανατολισμό σε σχέση με το πρηνές εκσκαφής, τότε αυτές καθορίζουν την συμπεριφορά της βραχώμαζας. Η διατμητική αντοχή επιφανειών σε βράχους που υπόκεινται σε εξασθένηση λόγω διακώμησης της περιεκτικότητας σε υγρασία, είναι περαιτέρω μειωμένη όταν υπάρχει νερό. Όταν, οι βραχώμαζες ανήκουν στις μέτριες έως πτωχές κατηγορίες και υπάρχει νερό τότε μετακινούμαστε προς τα δεξιά. Η υδροστατική πίεση λαμβάνεται υπόψη με την ανάλυση ενεργών τάσεων.</p>	<p><b>ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ</b></p> <p><b>ΠΟΛΥ ΚΑΛΗ</b> Πολύ τραχείες, μη αποσθρωμμένες επιφάνειες</p> <p><b>ΚΑΛΗ</b> Τραχείες, ελαφρά αποσθρωμμένες και οξείδωμένες επιφάνειες</p> <p><b>ΜΕΤΡΙΑ</b> Λείες, μετρίως αποσθρωμμένες και εξολισωμένες επιφάνειες</p> <p><b>ΠΤΩΧΗ</b> Επιφάνειες ολισθητές, πολύ αποσθρωμμένες με συμπαγή επιφλοιώματα ή υλικό πλήρωσης με γωνιώδη βράχια</p> <p><b>ΠΟΛΥ ΠΤΩΧΗ</b> Επιφάνειες ολισθητές πολύ αποσθρωμμένες με μαλακό αργιλικό υλικό πλήρωσης</p>				
<p><b>ΔΟΜΗ</b></p>	<p><b>ΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΣΥΝΕΧΕΙΩΝ</b> →</p>				
 <p><b>INTACT OR MASSIVE</b> - Άρρηκτα βραχώδη τεμάχια ή αστρωτός βράχος με λίγες ασυνέχειες σε μεγάλη απόσταση</p>	<p>90</p>			<p>N/A</p>	<p>N/A</p>
 <p><b>BLOCKY</b> - Αδιατάρακτη βραχώμαζα με πολύ καλό αλληλοκλείδωμα που αποτελείται από κυβικά τεμάχια οριζόμενα από τρεις ορθογώνια τεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών</p>	<p>80</p>	<p>70</p>			
 <p><b>VERY BLOCKY</b>- Μερικώς διαταραγμένη βραχώμαζα με πολύπλευρα γωνιώδη τεμάχια (blocks) που σχηματίζονται από τέσσερις ή περισσότερες οικογένειες ασυνεχειών</p>	<p>60</p>	<p>50</p>			
 <p><b>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY</b> Πτυχωμένη με γωνιώδη τεμάχια που σχηματίζονται από πολλές αλληλοτεμνόμενες οικογένειες ασυνεχειών. Εμμονή στρώσης ή σχιστότητας</p>	<p>40</p>	<p>30</p>			
 <p><b>DISINTEGRATED</b> - Ισχυρά κερματισμένη βραχώμαζα με πτωχό αλληλοκλείδωμα και με ταυτόχρονη παρουσία γωνιωδών και αποστρωγυλωμένων τεμαχίων</p>	<p>20</p>				
 <p><b>LAMINATED/SHEARED</b> - Φυλλώδης ή σχιστοποιημένη και τεκτονικώς διατμημένη ασθενής βραχώμαζα. Η σχιστότητα επικρατεί έναντι οποιασδήποτε άλλης οικογένειας ασυνεχειών εμποδίζοντας την δημιουργία γωνιωδών τεμαχίων</p>	<p>N/A</p>	<p>N/A</p>		<p>10</p>	

**Πίνακας 2.2:** Εκτίμηση του δείκτη GSI ανάλογα με την ποιότητα της βραχώμαζας και την κατάσταση των ασυνεχειών.



Το εύρος τιμών στο GSI το οποίο είναι μεγαλύτερου ενδιαφέροντος, όσον αφορά ασθενείς βραχώμαζες, είναι από 5-35. Για αυτό το εύρος, μια προσεγγιστική σχέση μεταξύ του GSI και του συντελεστή  $\sigma_{cm}/\sigma_{ci}$  έχει μελετηθεί και το αντίστοιχο διάγραμμα της φαίνεται στο σχήμα 4.

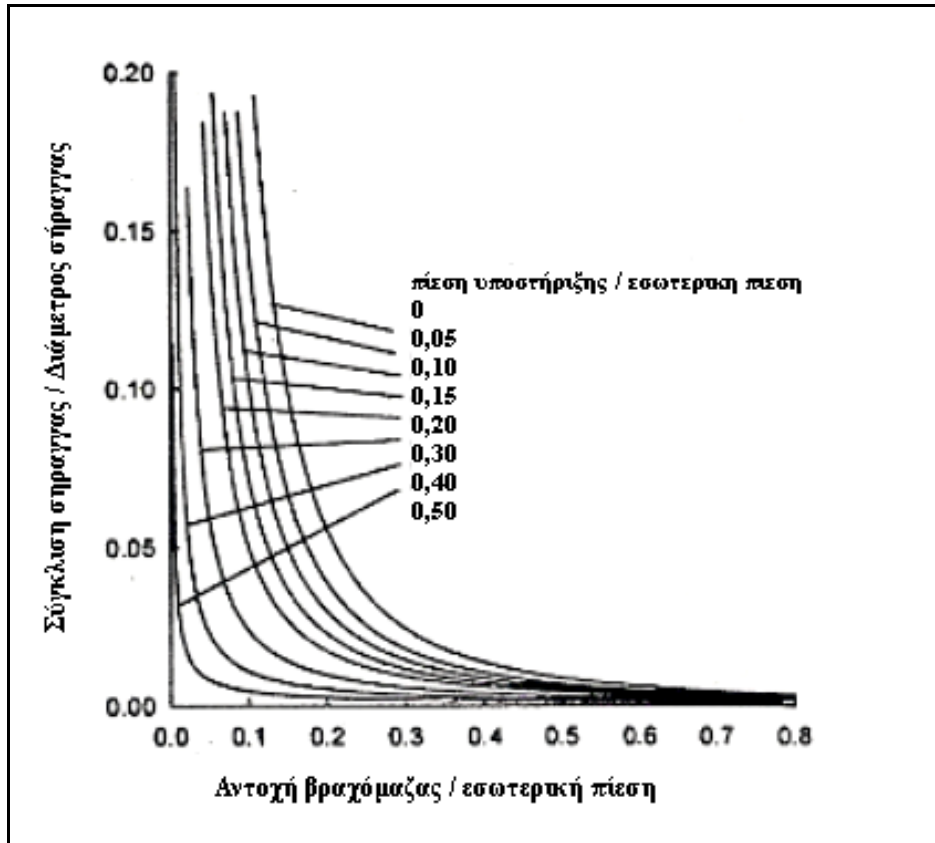


*Εικόνα 2.4: Εκτίμηση της αντοχής βραχώμαζας σε ανεμπόδιση θλίψη  $\sigma_{cm}$  με βάση την τιμή GSI.*

#### 2.4 Κρίσιμη παραμόρφωση.

Ο **Sakurai** έχει προτείνει η σταθερότητα των σηράγγων να εκτιμάται με βάση την παραμόρφωση της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Η μέγιστη παραμόρφωση υπολογίζεται από τον λόγο της σύγκλισης της σήραγγας ( $\delta_i$ ) προς την αντίστοιχη διάμετρο ( $d_0$ ). Η σύγκλιση υπολογίζεται με τον παρακάτω προσεγγιστικό τύπο ανάλογα με την τιμή της πίεσης υποστήριξης και το σχήμα 5 είναι το αντίστοιχο διάγραμμα.

$$\frac{\delta_i}{d_0} = \left( 0.002 - 0.0025 \frac{p_i}{p_0} \right) \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \left( \frac{2.4 \frac{p_i}{p_0} - 2}{\frac{p_i}{p_0}} \right)$$

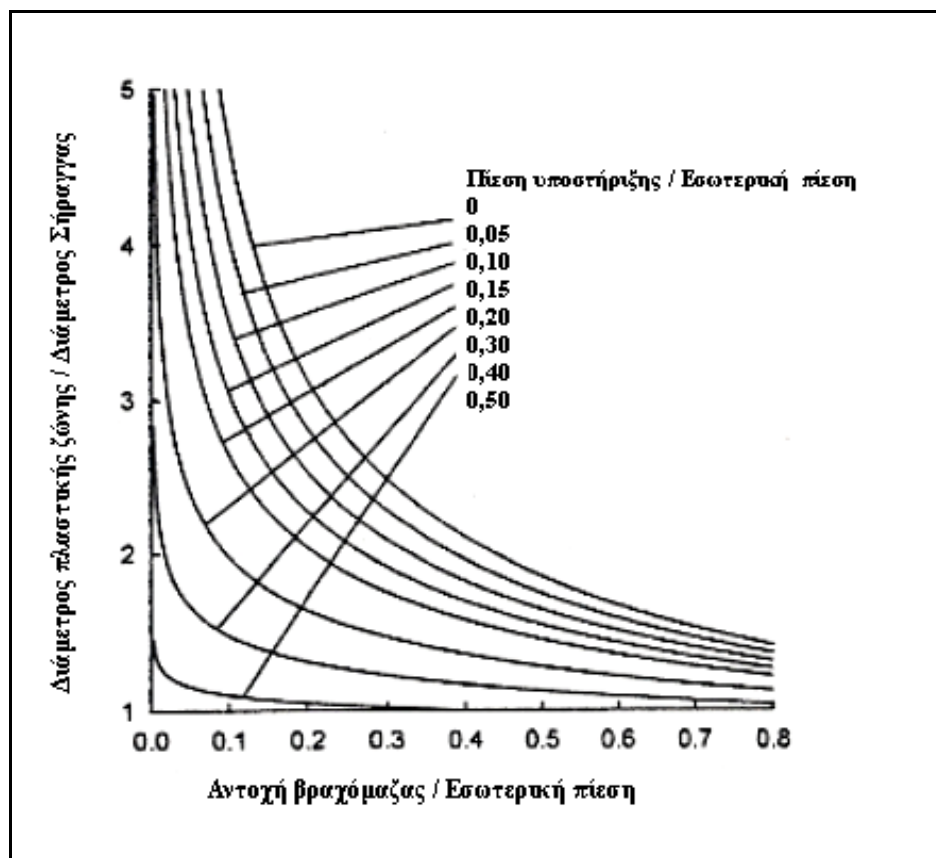


*Εικόνα 2.5 : Εκτίμηση σύγκλισης σήραγγας εξαρτώμενη από τον τύπο υποστήριξης και τον λόγο  $\sigma_{cm} / p_0$ .*

Η παραπάνω προσεγγιστική σχέση έχει προκύψει με θεώρηση κυκλικής σήραγγας και υδροστατικό πεδίο τάσεων. Όταν η ισοδύναμη εσωτερική πίεση γίνει μικρότερη από μια κρίσιμη τιμή της πίεσης τότε δημιουργείται μια πλαστική ζώνη, τα σημεία της οποίας επαληθεύουν το κριτήριο Mohr-Coulomb. Η διάμετρος της πλαστικής ζώνης υπολογίζεται από την σχέση:

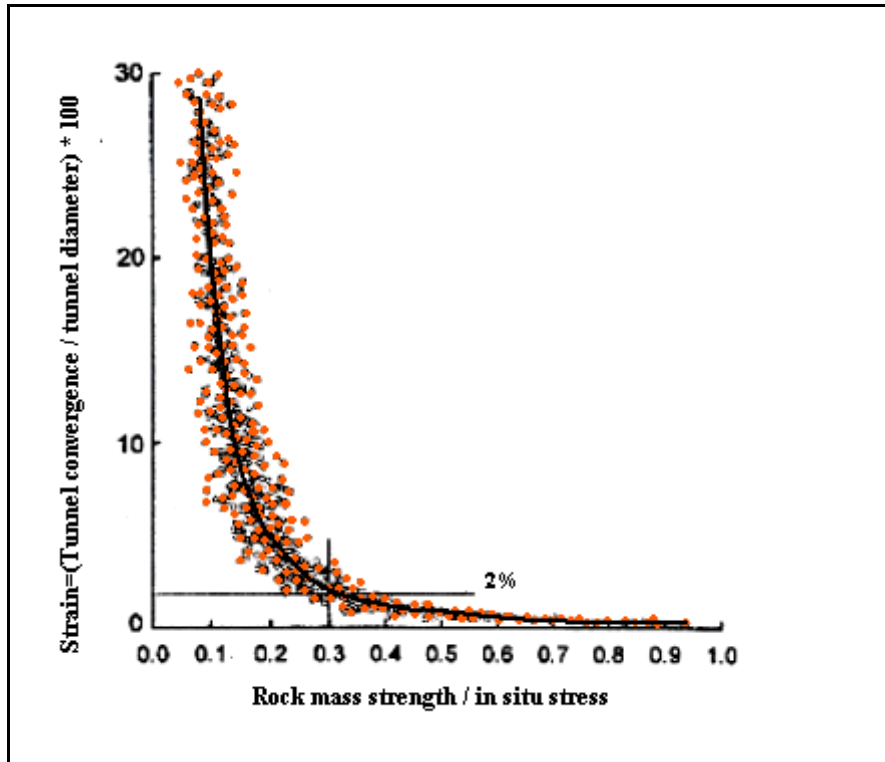
$$\frac{d_p}{d_0} = \left( 1.25 - 0.625 \frac{p_i}{p_0} \right) \frac{\sigma_{cm}}{p_0} \left( \frac{p_i}{p_0} \right)^{0.57}$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει και το διάγραμμα του σχήματος 6 με το οποίο είναι δυνατός ο υπολογισμός του εύρους της πλαστικής ζώνης για διάφορες τιμές της πίεσης υποστήριξης.



*Εικόνα 2.6: Εκτίμηση διαμέτρου πλαστικής ζώνης εξαρτώμενη από τον τύπο υποστήριξης και τον λόγο  $\sigma_{cm}/p_0$ .*

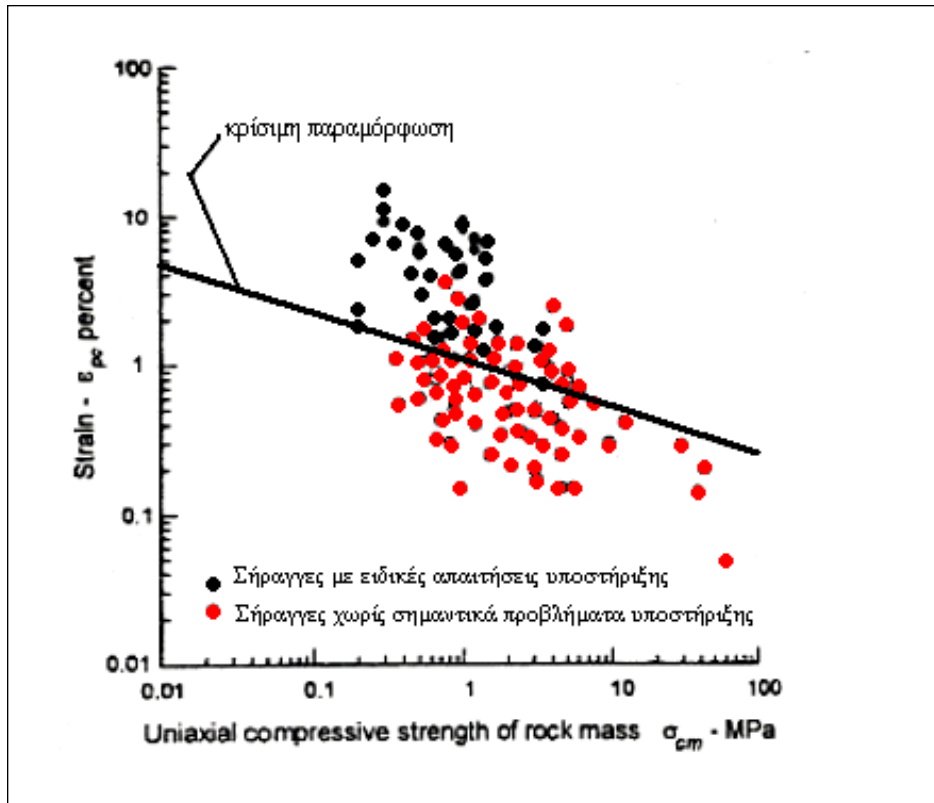
Πιο συγκεκριμένα, μια βραχόμαζα θεωρείται ασθενής όταν η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη είναι μικρότερη από το 1/3 της πίεσης των υπερκείμενων γαιών. Πράγματι, όπως παρατηρείται στην σχήμα 7, η σύγκλιση της σήραγγας αυξάνεται δραματικά για τιμές του λόγου  $\sigma_{cm}/p_0 < 0.3$ . Το διάγραμμα προκύπτει για ανυποστήρικτη κυκλική σήραγγα με υδροστατικό πεδίο τάσεων με εύρος από **2Mpa** μέχρι **20Mpa** που αντιστοιχούν σε βάθη από 75m έως 750m αντίστοιχα και διαμέτρους σηράγγων από **4m** ως **16m**.



**Εικόνα 2.7:** Εκτίμηση παραμόρφωσης ανυποστήρικτης διατομής ανάλογα με την τιμή του λόγου  $\sigma_{cm} / p_0$ .

Η έννοια της κρίσιμης παραμόρφωσης προέκυψε κατά την διάρκεια της κατασκευής σιράγγων στην Taiwan. Στο σχήμα 8 είναι χαρακτηριστική η ευθεία γραμμή η οποία διαχωρίζει τις σήραγγες με προβλήματα υποστήριξης από τις σήραγγες που δεν εμφάνισαν σημαντικά προβλήματα συγκλίσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι σήραγγες οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στο σχήμα 8 κατασκευάστηκαν επιτυχώς, ακόμη και εκείνες που ανέπτυξαν παραμορφώσεις της τάξης του 10%. Σε μερικές από αυτές τις περιπτώσεις οι σήραγγες έπρεπε να εκσκαφθούν ξανά αφού η διατομή που προέκυπτε, λόγω των παραμορφώσεων, δεν εξυπηρετούσε τους σκοπούς για τους οποίους κατασκευάστηκε. Η κρίσιμη παραμόρφωση μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από το τύπο:

$$\epsilon_{pc} = 1.073 \sigma_{cm}^{-0.318}$$

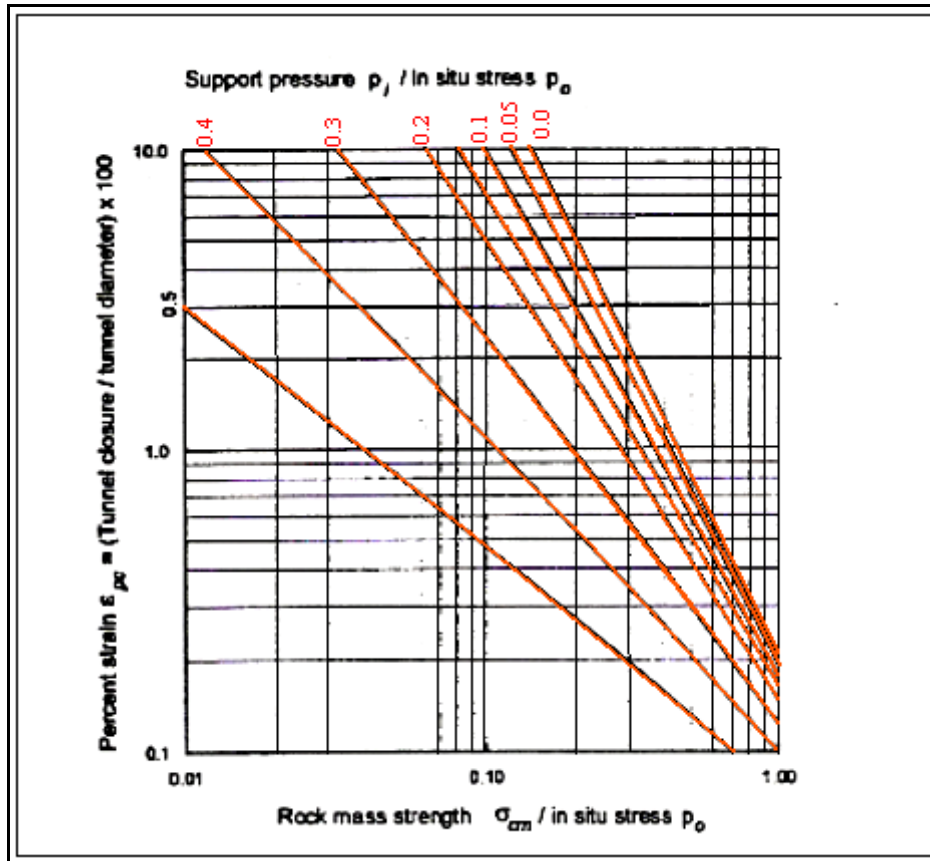


*Εικόνα 2.8: Εξάρτηση της κρίσιμης παραμόρφωσης από την αντοχή της βραχώμαζας σε ανεμπόδιστη θλίψη με βάση τον προσεγγιστικό τύπο του Sakurai.*

Το επόμενο βήμα, μετά την χρήση της παραμόρφωσης σαν βάση για τον σχεδιασμό σηράγγων, είναι η εκτίμηση της απαραίτητης υποστήριξης για τον περιορισμό των παραμορφώσεων σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Οι πιέσεις υποστήριξης μπορούν να εκτιμηθούν από την σχέση:

$$\frac{\delta_j}{d_\sigma} = \left( 0.002 - 0.0025 \frac{p_j}{p_\sigma} \right) \frac{\sigma_{cm}}{p_\sigma} \left( \frac{2.4 \frac{p_j}{p_\sigma} - 2}{p_\sigma} \right)$$

για την περίπτωση κυκλικής σήραγγας, με το σχήμα 9 να αποτελεί ένα διάγραμμα αντίστοιχο με το σχήμα 6 αλλά πιο εύχρηστο για τον σχεδιασμό σηράγγων. Παρόλο που το παρακάτω διάγραμμα έχει εφαρμογή σε κυκλική σήραγγα, με περιβάλλουσα βραχώμαζα η οποία υπόκειται σε υδροστατικό πεδίο τάσεων ( $K_0=1$ ), μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μια προσεγγιστική πρώτη εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης υποστήριξης.



*Εικόνα 2.9 : Επιλογή κατάλληλης πίεσης υποστήριξης ανάλογα με την τιμή της κρίσιμης παραμόρφωσης ( η οποία εξαρτάται από το  $\sigma_{cm}$ ).*



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ**

### **3. ΣΗΡΑΓΓΑ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ**



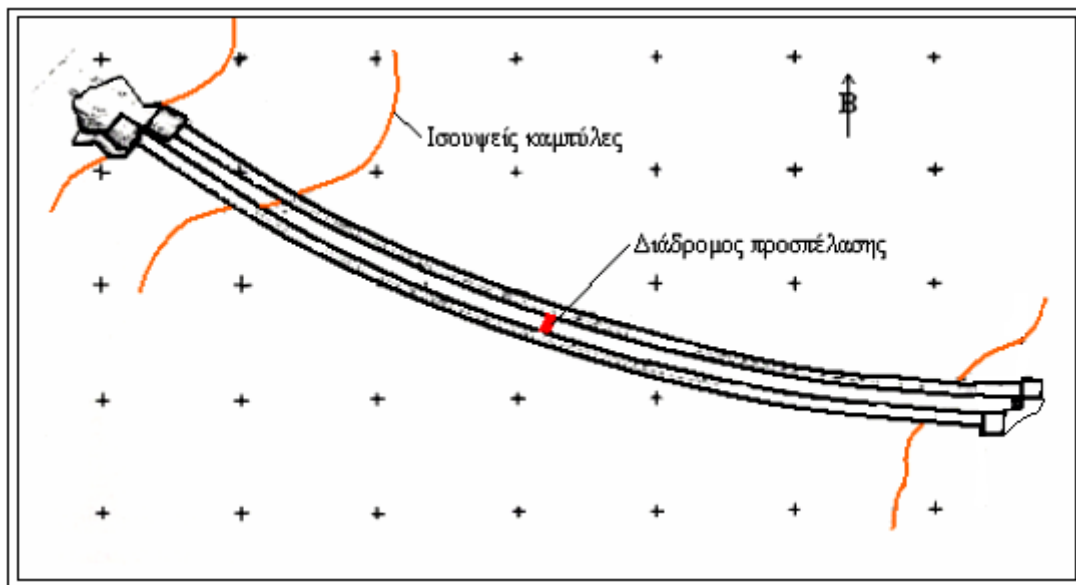
### 3.1 Γενικά στοιχεία.

Η σήραγγα Ανθοχωρίου εντάσσεται στο τμήμα 3.2 της Εγνατίας Οδού, βρίσκεται μεταξύ των χωριών Βοτονοσίου και Ανθοχωρίου στην περιοχή της Ηπείρου και απέχει 10km οδικώς από το Μέτσοβο, προς τα δυτικά. Πρόκειται για μια σήραγγα διπλής κατεύθυνσεως, συνιστάμενη από δύο κλάδους, ένα ανά κατεύθυνση, οι οποίοι απέχουν κατάλληλη μεταξύ τους απόσταση ώστε να παρεμβάλλεται ενδιάμεσως στύλος βραχόμαζας πάχους **13m** περίπου. Τα μήκη του αριστερού και του δεξιού κλάδου της σήραγγας ανέρχονται σε **706,0 m** και **717,0 m** αντίστοιχα, το δε μέγιστο ύψος υπερκειμένων εντοπίζεται περί το μέσο της διαδρομής και είναι της τάξης των **90m** περίπου. Οι άξονες των σηράγγων έχουν γενική διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ και αναπτύσσονται οριζοντιογραφικά σε καμπύλα τμήματα. Οι κατά μήκος κλίσεις της ερυθράς είναι της τάξεως του **5%**. Η διατομή των σηράγγων είναι πεταλοειδής και το κατάστρωμα αυτών μονοκλινές με εγκάρσια κλίση κυμαινόμενη μεταξύ **4,42%** και **5%** προς τα αριστερά στις εισόδους και στις εξόδους των σηράγγων. Στο μέσο περίπου των δυο κλάδων κατασκευάστηκε εγκάρσιος συνδετήριος διάδρομος προσπέλασης προσωπικού, μήκους **16m**.



*Εικόνα 3.1.Τυπική διάτομη σήραγγας Ανθοχωρίου πεταλοειδούς μορφής και με μονοκλινές κατάστρωμα.*

Η διάνοιξη της σήραγγας Ανθοχωρίου ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2000 από τον αριστερό κλάδο του μετώπου εξόδου και τον Μάιο του 2000 άρχισε η διάνοιξη του δεξιού κλάδου πάντα από το ίδιο μέτωπο. Η διάνοιξη από το μέτωπο εισόδου άρχισε τον Σεπτέμβριο του 2001 και για τους δύο κλάδους.



*Εικόνα 3.2 : Υποτυπώδες τοπογραφικό σκαρίφημα της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου.*

Γενικά ο σχεδιασμός ενός υπόγειου έργου βασίζεται στις γεωλογικές-τεχνικογεωλογικές συνθήκες της περιοχής στην οποία φιλοξενείται, για τη διερεύνηση των οποίων απαιτείται λεπτομερής γεωλογική και γεωτεχνική έρευνα, που περιλαμβάνει χαρτογραφήσεις, γεωτρήσεις, εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές, ανάλυση και αξιολόγηση όλων των στοιχείων και σύνταξη των αντίστοιχων μοντέλων για την περιοχή. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ολοκληρωμένη υπόγεια διερεύνηση μέσω ερευνητικών γεωτρήσεων, πριν την αρχική διάνοιξη της σήραγγας. Πραγματοποιήθηκαν 14 ερευνητικές γεωτρήσεις σε βάθη που κυμαίνονται από **20m** έως **123 m**. Στα εδαφικά δείγματα που λήφθηκαν από όλες τις γεωτρήσεις έγιναν εργαστηριακές δόκιμες και προσδιορίστηκε η περιεχόμενη εδαφική υγρασία, η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, η αντοχή σε εφελκυσμό, η αντοχή σε σημειακή φόρτιση και η αντοχή σε διάτμηση.



*Εικόνα 3.3.Στόμια εξόδου της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου.*

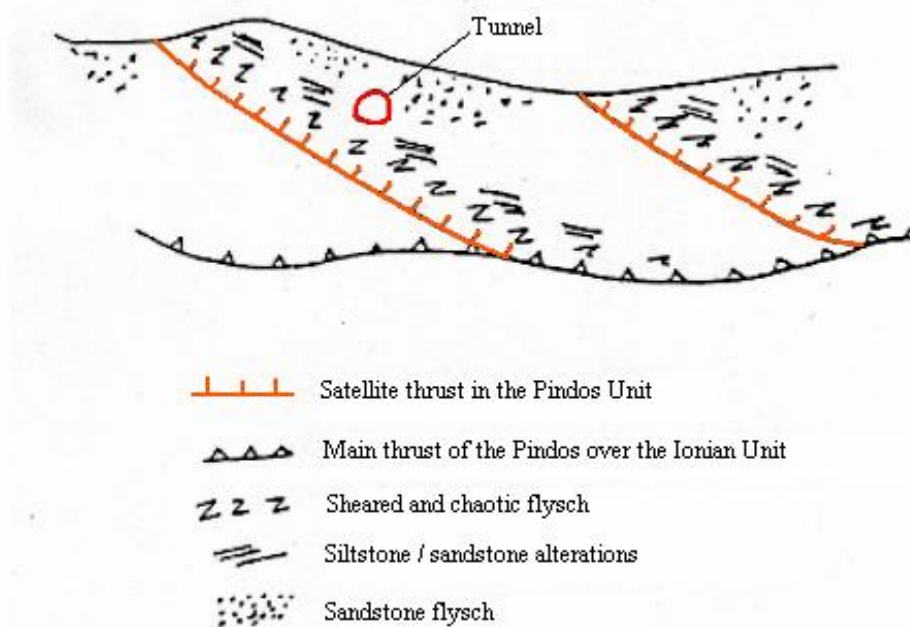


*Εικόνα 3.4.Στόμια εισόδου της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου.*

### **3.2 Γεωτεχνικά-γεωλογικά χαρακτηριστικά.**

Η ευρύτερη περιοχή της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου δομείται γεωλογικά από τον Πινδικό φλύσχη. Ο φλύσχος αποτελείται, από κάτω προς τα πάνω, από μια ερυθρή πηλιτική ζώνη πάχους 60m περίπου. Ακολουθεί μια ζώνη εναλλαγών ψαμμιτικών και ιλυολιθικών στρωμάτων πάχους 50m και στη συνέχεια η στρωματογραφική κολώνα της περιοχής κλείνει με μια ζώνη παχυστρωματωδών ψαμμιτών με πάχος μεγαλύτερο από 200m. Λόγω της έντονης λεπίωσης του Πινδικού φλύσχη, η παραπάνω στρωματογραφική σειρά επαναλαμβάνεται σε αλληπάλληλα λέπια μεταβλητού πάχους και με γενική διεύθυνση μετώπων ΒΒΔ-ΝΝΑ, δημιουργώντας μια πολύπλοκη στρωματογραφική δομή στην περιοχή. Συχνά παρατηρούνται εκτός από λεπίωσεις και επιπευτικά ανάστροφα

ρήγματα ακόμη και εντός του σχηματισμού των παχυστρωματωδών ψαμμιτών, τα οποία δεν είναι πάντοτε σαφή. Ο φλύσχη της ενότητας της Πίνδου είναι επώθημένος πάνω στο φλύσχη της Ιόνιας ενότητας. Η επώθηση είναι αποτέλεσμα ενός μεγάλου συμπιεστικού γεγονότος του Τριτογενούς, κατά το οποίο μετακινήθηκε ο Πινδικός φλύσχη τεκτονικά από ΑΒΑ προς ΔΝΔ και τοποθετήθηκε πάνω στα ιζήματα των ενότητων Γαβρόβου και εσωτερικής Ιονίου. Ο σχηματισμός των υλικών της επώθησης λόγω του έντονου τεκτονισμού του παρουσιάζει δομική και λιθολογική ανομοιογένεια, χαρακτηρίζεται από τη συχνή παρουσία επιφανειών διάτμησης, μυλονιτίωσης και σχιστότητας ενώ παρουσιάζει τα πτωχότερα μηχανικά χαρακτηριστικά συγκριτικά με τους υπόλοιπους σχηματισμούς που δομούν την περιοχή ενδιαφέροντος. Οι σχηματισμοί του Πινδικού φλύσχη παρουσιάζουν ασθενή αποσάθρωση, μέτριο ως έντονο τεκτονισμό και χαρακτηριστικές ζώνες διάτμησης σε διάφορα βάθη. Αξιοσημείωτη είναι η δυσμενής παρουσία ιλυολιθικών ενδιστρώσεων μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων αναφορικά με την αντοχή της βραχώμαζας σε καθεστώς διάτμησης. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται ενδεικτικά (χωρίς κλίμακα) η θέση της σήραγγας και οι γεωλογικές συνθήκες της ευρύτερης περιοχής.



**Εικόνα 3.5.:** Ενδεικτική γεωλογική τομή στο ανατολικό τμήμα της σήραγγας Ανθοχωρίου (χωρίς κλίμακα).

### 3.3 Περιγραφή γεωλογικών σχηματισμών.

Η δίδυμη σήραγγα Ανθοχωρίου διανοίχτηκε εν μέρει στα υλικά της βάσης της επώθησης του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο φλύσχη και εν μέρει στους σχηματισμούς των ερυθροπηλιτών, των εναλλαγών και των παχυστρωματωδών ψαμμιτών του Πινδικού φλύσχη. Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά των υπόψη σχηματισμών έχουν ως ακολούθως:

- Οι ψαμμίτες είναι γκρίζοι, λεπτόκοκκοι έως μεσόκοκκοι, παχυστρωματώδεις, υγιείς ως ελαφρά αποσαθρωμένοι στο επίπεδο διέλευσης της ερυθράς και μέτρια ως έντονα αποσαθρωμένοι κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους. Ο τεκτονισμός τους είναι μέτριος ως έντονος, με τραχείες επιφάνειες διακλάσεων και χαρακτηριστικές ζώνες διάτμησης σε διάφορα βάθη που συνήθως σχετίζονται με την παρουσία των ασθενέστερων μηχανικά, ιλυολιθικών ενδιαστρώσεων μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων. Οι διακλάσεις παρουσιάζονται σπανιότερα πληρωμένες με ασβεστίτικο υλικό. Τόσο στην περιοχή της εισόδου όσο και στην περιοχή της εξόδου η στρώση των παχυστρωματωδών ψαμμιτών παρουσιάζει διεύθυνση μέγιστης κλίσης σχετικώς αντίρροπη προς τα φυσικά πρηνή, με μέσες τιμές μέγιστης κλίσης ίσες προς  $49^\circ$  και  $47^\circ$ , αντίστοιχα και παρουσιάζει μεγάλη εμμονή στο χώρο, με επαναλαμβανόμενες επιφάνειες έως 2m. Η ψαμμιτική βραχόμαζα διατέμενεται και από τρία συστήματα διακλάσεων με στοιχεία J1: $72^\circ/138^\circ$ , J2: $85^\circ/202^\circ$ , J3: $73^\circ/251^\circ$  για την περιοχή της εξόδου. Τα εν λόγω συστήματα περιλαμβάνουν ασυνέχειες μικρής γενικά εμμονής, με επαναλαμβανόμενες επιφάνειες έως 1m, κλειστές, τραχείς και ελαφρά αποσαθρωμένες, χωρίς υλικό πλήρωσης.

Αναφορικά με την αντοχή της βραχόμαζας σε καθεστώς διάτμησης, τονίζεται ιδιαίτερος η δυσμενής παρουσία ιλυολιθικών ενδιαστρώσεων πάχους λίγων χιλιοστών έως μερικών εκατοστών, μεταξύ των ψαμμιτικών στρωμάτων. Επίσης, στην περιοχή εξόδου του υπογείου έργου η παράταξη των παχυστρωματωδών ψαμμιτών καθώς και των εναλλαγών ψαμμιτών και ιλυολίθων του Πινδικού φλύσχη, τέμνει με μικρή γωνία τον άξονα της δίδυμης σήραγγας γεγονός το οποίο ενδεχόμενα

να οδηγούσε σε ανεπιθύμητες υπερεκσκαφές στην περίπτωση εφαρμογής της συμβατικής μεθόδου των ανατινάξεων.

- Οι εναλλαγές συνίστανται από τεφρούς λεπτόκοκκους, λεπτό έως μεσοστρωματώδεις ψαμμίτες και τεφρούς ιλυόλιθους. Επικρατεί η ιλυολιθική φάση. Ο τεκτονισμός του σχηματισμού είναι μέτριος έως έντονος και ο βαθμός αποσάθρωσης ασθενής.
- Οι ερυθροπηλίτες συνίστανται από ερυθρούς και τεφρούς ιλυόλιθους, έντονα τεκτονισμένους και με ασθενή αποσάθρωση. Σποραδικά εντός του σχηματισμού παρεμβάλλονται λεπτές ψαμμιτικές στρώσεις. Οι επιφάνειες των ασυνεχειών είναι λείες έως ελαφρά τραχείες, ενίοτε στιλπνές και τοπικά με ασβεστικό υλικό πλήρωσης. Ο εν λόγω σχηματισμός παρουσιάζει χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Ενδεικτικά, από μια δοκιμή μονοαξονικής φόρτισης η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη βρέθηκε ίση με **9.82 Mpa** υποδεικνύοντας σχηματισμό μέτρια ασθενή. Η μέση τιμή του δείκτη σημειακής φόρτισης προσδιορίστηκε ίση προς **0.28 Mpa**. Η αντοχή σε εφελκυσμό παρουσίασε μέση τιμή ίση προς **0.82 Mpa**.
- Τα υλικά επώθησης είναι χαοτικής δομής και συνίστανται από γκριζοπράσινους ή ερυθρούς κατακερματισμένους ιλυόλιθους και τεμάχια ψαμμιτών, ασβεστόλιθων, αργιλικών σχιστόλιθων διαφόρων διαστάσεων εντός ιλυολιθικής κύριας μάζας. Τα ψαμμιτικά και ασβεστολιθικά βραχώδη τεμάχια προέρχονται από μετακινήσεις μεγαλύτερων τεμαχίων στη φάση της επώθησης του Πινδικού φλύσχη πάνω στον Ιόνιο. Η έντονη τεκτονική καταπόνηση του υπόψη σχηματισμού είναι έκδηλη με τη συχνή παρουσία στιλπνών επιφανειών διάτμησης και μυλωνιτώσης. Κατά θέσεις και εξαιτίας της τεκτονικής καταπόνησης τα ορυκτολογικά συστατικά του σχηματισμού εμφανίζουν σαφή τάση προσανατολισμού με ενδείξεις σχιστότητας κυρίως σε θέσεις επικράτησης φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτης, ιλίτης). Γενικά δίνει την εικόνα ενός στερεοποιημένου χαλαρού σχηματισμού που κατά τη διάτρηση του παρουσιάζει υψηλές τιμές RQD.

- Τα υλικά κατολισθήσεων που προσδιορίστηκαν στα πλαίσια των γεωλογικών αποτυπώσεων περιορίζονται σε μικρό βάθος και δεν θα συναντηθούν κατά τη διάνοιξη της δίδυμης σήραγγας.
- Ο μανδύας αποσάθρωσης συνίσταται από καστανοπράσινα αμμοιλωδή υλικά με ψαμμιτικά και ιλυολιθικά τεμάχη. Λόγω του μικρού πάχους του είναι άνευ σημασίας για το έργο.
- Κορηματικά υλικά συνιστάμενα από τεμάχη αποσαθρωμένου ψαμμίτη και ιλυολίθου με αργίλοαμμώδες υλικό αποτυπώθηκαν στην περιοχή του μετώπου εισόδου. Το πάχος τους δεν ξεπερνά τα 5m. Τοπικά εντός του σχηματισμού εμφανίζονται επιφανειακοί ερυσμοί και εδαφικές θραύσεις μικρής έκτασης.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα μήκη διάτρησης ανά γεωλογικό σχηματισμό και τα αντίστοιχα ποσοστά επί του συνολικού μήκους της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου.

ΛΙΘΟΛΟΓΙΑ		ΠΙΝΔΙΚΟΣ ΦΛΥΣΧΗΣ			ΥΛΙΚΑ ΕΠΩΘΗΣΗΣ (ον)
		Ψαμμίτες (st)	Ερυθροπηλίτες (sl)	Εναλλαγές (fl)	
Αριστερός κλάδος	Μήκος (m)	369.2	15.0	21.3	257.0
	Ποσοστό (%)	55.7	2.3	3.2	38.8
Δεξιός κλάδος	Μήκος (m)	332.9	57.5	31.0	252.0
	Ποσοστό (%)	49.4	8.6	4.5	37.4

*Πίνακας 3.1: Λιθολογικά χαρακτηριστικά της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου.*

Εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας των γεωλογικών σχηματισμών του υψώματος, το επίπεδο του υπογείου νερού είναι σε μεγάλο ύψος, γεγονός που επηρεάζει τη γεωτεχνική συμπεριφορά της ασθενούς αδιαπέρατης βραχώμαζας αλλά δεν σχετίζεται με εισροές στην υπό κατασκευή σήραγγα.

### 3.4 Γεωτεχνικές παράμετροι.

Πραγματοποιήθηκαν ταξινομήσεις βραχόμαζας κατά **Bieniawski** (1989) και κατά **Barton et al.** (1974) για τον προσδιορισμό της κύμανσης των τιμών των δεικτών RMR και Q αντίστοιχα, στο επίπεδο διέλευσης του υπογείου έργου. Για τον προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών παραμέτρων και το εύρος των υφιστάμενων τεχνικογεωλογικών συνθηκών καθώς επίσης και για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των κριτηρίων αστοχίας Hoek-Brown και Mohr-Coulomb, υπολογίστηκε ο δείκτης GSI βάσει της τιμής RMR. Για τις προσδιορισθείσες τιμές του δείκτη GSI διενεργήθηκαν αναλυτικοί υπολογισμοί των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής της βραχόμαζας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κύμανση των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων και των δεικτών RMR, Q και GSI κατά μήκος της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου.

Σχηματισμοί	Αριστερή σήραγγα				Δεξιά σήραγγα			
	ov	st	ov	st	ov	st	ov	sl/fl
Χιλιομετρικές θέσεις	5+291-5+432	5+432-5+538	5+538-5+654	5+654-5+715	5+304-5+442	5+442-5+551	5+551-5+665	5+665-5+707.92
Μήκος	141	106	116	61	138	109	114	42.92
Ομπρέλες	37+	23-36	9-22	1-8	34+	21-33	7-20	1-6
RMR	<20	33-45	<20	22-31	<20	33-45	<20	33-42
GSI	15-25	41-50	15-25	40-46	15-25	41-50	15-25	39-45
$E_{mass}$ (GPa)	0.4-0.82	2.4-5.0	0.4-0.82	3.5-6.6	0.4-0.82	2.4-5.0	0.4-0.82	1.59-2.2
$\sigma_{mass}$ (MPa)	0.11-0.25	0.68-1.18	0.11-0.25	1.54-3.02	0.11-0.25	0.68-1.18	0.11-0.25	0.30-0.34
$\Phi_{mass}$ (°)	16.8-22.9	33.1-35.6	16.8-22.9	32.8-34.5	16.8-22.9	33.1-35.6	16.8-22.9	27.6-29.2

(st):ψαμμίτες , (sl):ερυθροπηλίτες-ιλύολιθοι , (fl):εναλλαγές ψαμμίτη-ιλύόλιθου ,  
(ov):υλικά επώθησης

*Πίνακας 3.2: Τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών της βραχόμαζας που περιβάλλει τη διπλή σήραγγα Ανθοχωρίου.*



### 3.5 Κατηγορίες βραχόμαζας.

Ο προσδιορισμός των συμβατικών διατομών εφαρμογής εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης, για το σύνολο των γεωλογικών σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν κατά μήκος της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου, πραγματοποιήθηκε βάσει των αναμενόμενων τεχνικογεωλογικών συνθηκών της βραχόμαζας, των συνθηκών πίεσης και παραμόρφωσης, των αναγκών αντιστήριξης και του τρόπου εκσκαφής. Στο ανώτερο πλαίσιο διάκρισης της βραχόμαζας στην περιοχή της σήραγγας σε επιμέρους κατηγορίες, προσδιορίστηκαν πέντε βασικές κατηγορίες **B,C,D** και **E**. Στα κύρια χαρακτηριστικά βάσει των οποίων υπάγονται οι συναντώμενοι γεωλογικοί σχηματισμοί σε κάθε μια εκ των ανωτέρω κατηγοριών συμπεριλαμβάνονται τα μέτρα υποστήριξης, το βήμα προχώρησης, η αλληλουχία και η μέθοδος εκσκαφής και το απαιτούμενο πάχος της τελικής επένδυσης, όπως προέκυψαν από τις σχετικές αριθμητικές και αναλυτικές μεθόδους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ποσοστά των μηκών εφαρμογής των συμβατικών κατηγοριών εκσκαφής και προσωρινής αντιστήριξης της δίδυμης σήραγγας Ανθοχωρίου.

ΑΡΙΣΤΕΡΟΣ ΚΛΑΔΟΣ		
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΜΗΚΟΣ(m)	ΠΟΣΟΣΤΟ(%)
B	40.0	6.1
C	213.5	32.2
D	126.0	19.0
E	257.0	38.8
C <sub>p</sub>	26.0	3.9
ΔΕΞΙΟΣ ΚΛΑΔΟΣ		
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΜΗΚΟΣ(m)	ΠΟΣΟΣΤΟ(%)
B	40.0	5.9
C	222.4	33.0
D	129.0	19.2
E	252.0	37.4
C <sub>p</sub>	30.0	4.5

*Πίνακας 3.3: Κατηγορίες εκσκαφής και προσωρινής υποστήριξης κατά μήκος των δύο κλάδων της σήραγγας Ανθοχωρίου.*

Κατά τον αρχικό σχεδιασμό, τα χαρακτηριστικά της υποστήριξης τα οποία τέθηκαν σε εφαρμογή για τις προαναφερθείσες κατηγορίες βραχώμαζας, είναι τα παρακάτω:

Lithology	fl	st	sl	ov
Support category	C	C	D	E
Main characteristics	Optional forepoling umbrella, shotcrete and rockbolts.	Optional forepoling umbrella, shotcrete and rockbolts.	Forepolling umbrella*, HEB140, step 1m, ring closure with invert 7m behind top heading, elephant feet.	Forepolling umbrella, HEB180, step 0.8m, ring closure with invert 5.6m behind top heading, elephant feet.
*	44O114mm steel tubes, 12m long with overlapping of 4m, angle of 5 <sup>0</sup>			
The first 48m of each bore (6 umbrellas) due to low overburden and worse rockmass than anticipated were bored with N <sub>p</sub> support, that is with forepolling umbrella and HEB140.				

*Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά υποστήριξης κατά τον αρχικό σχεδιασμό, για κάθε τύπο βραχώμαζας.*

Τα δυο κύρια χαρακτηριστικά που αφορούν την εκσκαφή και προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας Ανθοχωρίου είναι η πτωχή ποιότητα βραχώμαζας και το μικρό εύρος του ενδιάμεσου στύλου που επιτρέπει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων λόγω των ταυτόχρονων εργασιών εκσκαφής και υποστήριξης.

Οι σημαντικές παραμορφώσεις εντοπίζονται στην πλευρά του μετώπου εξόδου όπου μπορούμε να διακρίνουμε ένα πρώτο τμήμα 150m με μέγιστες παραμορφώσεις της τάξης των 60-70cm και ένα επόμενο τμήμα 150m με μέγιστες παραμορφώσεις της τάξης των 30-35cm. Η παραπάνω αρχική μελέτη λοιπόν, αποδείχθηκε ανεπαρκής για την ανάληψη των πιέσεων και για την υποστήριξη της χαλαρής βραχώμαζας. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος, η σήραγγα επανεπιχώθηκε έτσι ώστε να σταματήσει η αύξηση των συγκλίσεων και πραγματοποιήθηκε νέα μελέτη προσωρινής υποστήριξης. Στη συνέχεια της κατασκευής οι συγκλίσεις υπερέβαιναν και πάλι τις επιτρεπτές τιμές, με αποτέλεσμα

την εκπόνηση τρίτης μελέτης. Τα νέα μέτρα έπρεπε να είναι μεγαλύτερης αντοχής ανεξάρτητα από τις κατατάξεις της βραχώμαζας ,εξαιτίας της απρόβλεπτης συμπεριφοράς της βραχώμαζας και της εκτίμησης ότι με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ταχύτητα, αποδοτικότητα και πιθανόν μείωση του κόστους της διάνοιξης.

Με βάσει τις παραπάνω παραμορφώσεις, οι τύποι της προσωρινής υποστήριξης ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερις βασικές φιλοσοφίες και παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Υποστήριξη N<sub>p</sub> και E1-E4:** Χρήση ομπρέλας δοκών προπορείας βαρέως τύπου (**forepoling**), βαρέων πλαισίων HEB140 και HEB180 και τοποθέτηση αγκυρίων αρχικά απλών και εν συνέχεια τύπου self-drilling. Η διάνοιξη γινόταν κυρίως σε δυο φάσεις, άνω ημιδιατομή (**A' φάση**) και βαθμίδα – ανάστροφος πυθμένας (**B'-Γ' φάση**) εκτός από την 7<sup>η</sup> ομπρέλα και των δυο κλάδων του μετώπου εξόδου όπου ακολουθήθηκε κατ'ουσίαν ολομέτωπη εκσκαφή. Η διάνοιξη και υποστήριξη της A' φάσης έκλεινε με την κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου προκειμένου να επιτευχθεί κλείσιμο της διατομής μέχρι την κατασκευή της B' και Γ' φάσης. Η υποστήριξη εφαρμόστηκε για 188m στο δεξιό κλάδο (180m από το μέτωπο εξόδου και 8m από το μέτωπο εισόδου) και για 173m στον αριστερό(156m από το μέτωπο εξόδου και 17m από το μέτωπο εισόδου).Η συγκεκριμένη υποστήριξη εγκαταλείφθηκε αφ'ενός λόγω του μεγάλου κόστους και αφ'ετέρου λόγω της υποψίας ότι οι παρατηρούμενες καθιζήσεις σχετίζονταν κατά ένα μέρος στο ίδιο βάρος της υποστήριξης.
- **Μεταβατική υποστήριξη E5:** Συνδυασμός ομπρέλας δοκών προπορείας βαρέως τύπου και εύκαμπτων πλαισίων **lattice girder** και τοποθέτηση αγκυρίων τύπου **self-drilling** ακτινικά στη διατομή. Η διάνοιξη γινόταν σε δυο φάσεις, άνω ημιδιατομή (A' φάση) και βαθμίδα-ανάστροφος πυθμένας(B'-Γ' φάση) ενώ η A' φάση έκλεινε με προσωρινό ανάστροφο τόξο. Η υποστήριξη σχεδιάστηκε ως μεταβατική μεταξύ της προηγούμενης και μιας πιο εύκαμπτης και ελαφριάς υποστήριξης που ευρίσκετο στο στάδιο της μελέτης. Η υποστήριξη όφειλε να εφαρμοστεί για 24m σε κάθε κλάδο, παρ'όλα αυτά εφαρμόστηκε για 181m στο δεξιό κλάδο (88m από το μέτωπο

εξόδου και 93m από το μέτωπο εισόδου) και για 173m στον αριστερό (88m από το μέτωπο εξόδου και 85m από το μέτωπο εισόδου). Η συμπεριφορά της προαναφερθείσας υποστήριξης όσον αφορά στο μέτωπο εξόδου ήταν καλή κατά τη διάνοιξη της Α' φάσης αλλά άρχισε να εμφανίζει σημαντικά προβλήματα στα τελευταία 32m όταν το ύψος των υπερκειμένων υπερέβη τα 60m, ενώ το σύνολο της υποστήριξης εμφάνισε εκ νέου επιταχυνόμενες παραμορφώσεις κατά τη διάνοιξη της Β' φάσης όποτε διακόπηκαν οι εργασίες και επανεπιχώθηκε η σήραγγα σε όλο το μήκος εφαρμογής της συγκεκριμένης υποστήριξης ως το επίπεδο της Α' φάσης. Όσον αφορά στο μέτωπο εισόδου, η υποστήριξη δεν παρουσίασε κανένα πρόβλημα, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι το ύψος των υπερκειμένων ήταν σημαντικά μικρότερο ενώ και η ποιότητα της βραχόμαζας ήταν καλύτερη.

- **Υποστήριξη N1,N2,N3:** Εύκαμπτη και ελαφριά υποστήριξη με συνδυασμό ομπρέλας δοκών προπορείας ελαφρού τύπου (**spiling**), που τοποθετούνταν σε κάθε βήμα προχώρησης, και εύκαμπτων πλαισίων **lattice girder** καθώς και τοποθέτηση αγκυρίων τύπου **self-drilling** ακτινικά στη διατομή. Η διάνοιξη γινόταν επίσης σε δυο φάσεις, άνω ημιδιατομή (Α' φάση με κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου) και βαθμίδα –ανάστροφος πυθμένας (Β'-Γ' φάση). Η μελέτη προϋπέθετε διαφορά της Α' φάσης των δυο κλάδων κατά 50m ενώ και η Β' φάση κάθε κλάδου έπρεπε να υστερεί της Α' φάσης του ίδιου κλάδου τουλάχιστον κατά 50m. Η υποστήριξη εφαρμόστηκε για 198m στο δεξιό κλάδο (52m από το μέτωπο εξόδου και 146m από το μέτωπο εισόδου) και για 171m στον αριστερό (57m από το μέτωπο εξόδου και 114m από το μέτωπο εισόδου). Η συμπεριφορά της υποστήριξης ήταν γενικά καλή εκτός από τα πρώτα 20m των δυο κλάδων από το μέτωπο εξόδου, όπου παρουσιάστηκαν σημαντικές παραμορφώσεις που πιθανόν σχετίζονταν με τις παραμορφώσεις στο προηγούμενο τμήμα της μεταβατικής υποστήριξης. Η βαρύτερη κατηγορία υποστήριξης (**N3**) εγκαταλείφθηκε καθώς ήταν δυσχερής η ενίσχυση του θόλου και η αποστράγγιση της βραχόμαζας λόγω του πυκνού θυσάνου των **spiles**.
- **Υποστήριξη R:** Επαναφορά των δοκών προπορείας βαρέως τύπου και βαρέων πλαισίων HEB 200 με τοποθέτηση αγκυρίων τύπου self-drilling

ακτινικά στη διατομή ενώ υιοθετήθηκε και κυκλική διατομή. Η μελέτη προϋποθέτει κλείσιμο του δακτυλίου υποστήριξης με σκυροδέτηση του τελικού ανάστροφου τόξου 25m πίσω από το μέτωπο της Α' φάσης και του άλλου κλάδου κατά 50m έναντι του μετώπου της Β' φάσης του κλάδου που προηγείται. Η διάνοιξη και υποστήριξη γίνεται σε δυο φάσεις, την Α' φάση με κατασκευή προσωρινού ανάστροφου τόξου και την Β'-Γ' φάση που ολοκληρώνεται με σκυροδέτηση του τελικού ανάστροφου τόξου. Η κατασκευή του τελικού ανάστροφου τόξου κατά τη φάση της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας επιλέχθηκε προκειμένου να καταστεί δυνατή η άμεση σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης σε περίπτωση που παρουσιαστούν εκ νέου σημαντικές παραμορφώσεις.



*Εικόνα 3.6. Εργασίες κατασκευής της Β' Φάσης στη σήραγγα Ανθοχωρίου.*

### **3.6 Σύντομο ιστορικό των παραμορφώσεων.**

Οι παραμορφώσεις στην σήραγγα του Ανθοχωρίου χρονολογούνται από την έναρξη των εκσκαφών και αποτέλεσαν μια συνεχή δραστηριότητα που προκάλεσε σημαντικές καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση του έργου. Οι κύριοι τρόποι παραμορφώσεων που παρατηρήθηκαν ήταν είτε αστοχίες στη σύνδεση μεταξύ της

άνω ημιδιατομής (top heading) και της βαθμίδας, που ξεκινούν με ρωγμές στο σκυρόδεμα και καταλήγουν σε σχεδόν ολοκληρωτική αστοχία του αρμού στο εσωτερικό της σήραγγας ή τοπικό λυγισμό των δοκών και διαμήκεις διαρρήξεις του κελύφους από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παράλληλα στον άξονα της σήραγγας. Ο πρώτος τύπος αστοχίας συναντάται περισσότερο στις πρώτες ομπρέλες του δεξιού κλάδου και παρατηρήθηκε κυρίως όταν η εκσκαφή του αριστερού κλάδου πέρασε από τον ήδη κλειστό δακτύλιο του δεξιού κλάδου. Ο δεύτερος εκ των δυο ήταν συνήθης σε περιοχές με υψηλότερα υπερκείμενα όπου τα δικτυωτά πλαίσια ελαφριού τύπου (lattice girders) βρίσκονταν σε ένα ενισχυμένο προσωρινό ανάστροφο τόξο, κάτω από βαριά ομπρέλα προπορείας (ομπρέλες 29 και εξής του δεξιού κλάδου και 22 και εξής του αριστερού).

Οι παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν είναι αποτέλεσμα των σημαντικών καθιζήσεων και συγκλίσεων που αναπτύχθηκαν στη σήραγγα του Ανθοχωρίου, οι οποίες ελέγχονται από έναν αριθμό παραγόντων όπως το στάδιο της κατασκευής στους δυο κλάδους (ταυτόχρονες εργασίες εκσκαφής και υποστήριξης), η αλληλεπίδραση μεταξύ τους (μικρό πάχος του ενδιάμεσου στύλου), η πτωχή ποιότητα της βραχώμαζας και το ύψος των υπερκειμένων. Στον πίνακα 5 που ακολουθεί φαίνεται ο διαχωρισμός των συγκλίσεων σε τέσσερις κατηγορίες και σε κάθε κλάδο.

Δεξιός κλάδος				Αριστερός κλάδος			
Ομπρέλα προπορείας	Ύψος υπερκειμένων (m)	Σύγκλιση (mm)	Καθίζηση (mm)	Ομπρέλα προπορείας	Ύψος υπερκειμένων (m)	Σύγκλιση (mm)	Καθίζηση (mm)
1-7	5-24	184-354	260-326	1-7	3-17	21-54	81-108
8-15	24-41	12-88	191-288	8-14	17-32	31-85	203-272
16-28	41-70	19-77	59-131	15-21	32-47	16-60	55-143
29+	70-89	121-255	170-248	22+	47-74	45-166	125-208

**Πίνακας 3.5:** Κατηγοριοποίηση των παραμορφώσεων ανάλογα με την χιλιομετρική θέση της κάθε διατομής.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού των αιτιών που προκάλεσαν αυτές τις μετακινήσεις, έγιναν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Οι μετακινήσεις στις πρώτες 7 ομπρέλες του αριστερού κλάδου είναι χαμηλές λόγω της καλύτερης ποιότητας της βραχόμαζας που συναντήθηκε και του χαμηλού ύψους υπερκειμένων. Ωστόσο, οι πρώτες 7 ομπρέλες του δεξιού κλάδου υπέστησαν σημαντικές παραμορφώσεις και μετακινήσεις εξαιτίας της πολύ φτωχής ποιότητας της βραχόμαζας και της εγγύτητας του δεξιού κλάδου σε μια χαράδρα που είναι δίπλα στο δεξιό τοίχωμα της σήραγγας, με αποτέλεσμα να μειωθεί η βραχόμαζα που λειτουργεί σαν υποστήριξη. Επιπλέον, η εκσκαφή της βαθμίδας ήταν πολύ κοντά στο μέτωπο και ειδικά στην ομπρέλα 7 και στα δυο μέτωπα, η προχώρηση έγινε με ολομέτωπη εκσκαφή.
- Οι ομπρέλες 8-14 του αριστερού κλάδου και 8-15 του δεξιού εκδήλωσαν την ίδια συμπεριφορά και το ίδιο εύρος καθιζήσεων που ήταν οι κύριες μετακινήσεις. Και οι δυο κλάδοι παρουσίασαν βύθιση λόγω της φτωχής βραχόμαζας και των υψηλών υπερκειμένων. Οι συγκλίσεις ήταν σημαντικά μικρότερες λόγω της έγκαιρης εφαρμογής αγκυρίων όπως είχε προβλεφθεί από το σχεδιασμό. Μετά την ομπρέλα 7 και στους δυο κλάδους αυξήθηκε στα 20m η απόσταση μεταξύ της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής και της βαθμίδας.
- Οι ομπρέλες 15-21 του αριστερού κλάδου και 16-28 του δεξιού κλάδου εμφάνισαν καλύτερη συμπεριφορά. Στο τμήμα αυτό παρατηρήθηκε βελτίωση της ποιότητας της βραχόμαζας στο δεξιό κλάδο παρά την αύξηση των υπερκειμένων, ενώ στον αριστερό η βραχόμαζα παραμένει φτωχή. Οι αυξημένες μετακινήσεις στις ομπρέλες 24 ως 28 του δεξιού κλάδου και στην 21 του αριστερού, οφείλονταν κυρίως στην εκσκαφή της βαθμίδας. Προκειμένου να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η προπορεία του δεξιού κλάδου στα 50m που προβλέπονταν στον σχεδιασμό, μετά την ολοκλήρωση της ομπρέλας 16, σταμάτησε προσωρινά η προώθηση του μετώπου στον αριστερό κλάδο.
- Μετά την ομπρέλα 21 του αριστερού κλάδου και παρά τη βελτίωση της βραχόμαζας λόγω αυξημένης συμμετοχής του ψαμμίτη και μέχρι την ομπρέλα 30, αναπτύχθηκαν επιταχυνόμενες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια της

εκσκαφής της βαθμίδας και στους δυο κλάδους, λόγω της αύξησης του ύψους των υπερκειμένων. Όσον αφορά το δεξιό κλάδο, μετά την ομπρέλα 28, εμφανίστηκαν μεγάλες συγκλίσεις και καθιζήσεις, που άρχισαν να συμβαίνουν σε μικρή απόσταση από το μέτωπο της εκσκαφής, εξαιτίας της σταδιακά φτωχότερης βραχόμαζας και των μεγαλύτερων υπερκειμένων. Το μεγαλύτερο μέρος των μετακινήσεων παρατηρήθηκε στην εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, ενώ στη βαθμίδα οι μετακινήσεις ήταν ελάχιστες καθώς οι συνέπειες μεταφέρθηκαν κυρίως στον άλλο κλάδο. Στα πρώτα μέτρα εκσκαφής της κατηγορίας N3 (στις ομπρέλες 29-30 του αριστερού και 30-33 του δεξιού κλάδου) τοποθετήθηκαν προεντεταμένα αγκύρια στο στύλο, καθώς και εσωτερικός δακτύλιος σκυροδέματος και αγκύρια βράχου μήκους 15m. Κατά τη διάνοιξη της Β' φάσης της σήραγγας στη διατομή N3, λόγω επιταχυνόμενων παραμορφώσεων, αποφασίστηκε να σταματήσουν οι εργασίες κατασκευής στην ομπρέλα 32 του δεξιού κλάδου και στην 29 του αριστερού. Ακολούθως, η βαθμίδα επανεπιχώθηκε για ένα μήκος 70m σε κάθε κλάδο, μέχρι το επίπεδο της άνω ημιδιατομής ώστε να σταματήσουν οι παρατηρούμενες μετακινήσεις.

Στη συνέχεια, μετά τη σταθεροποίηση των μετακινήσεων, αποφασίστηκε να γίνει επανεκσκαφή της επιχώσης στη σήραγγα ξεκινώντας από το μέτωπο εξόδου ως το μέτωπο εκσκαφής και αντικατάσταση των ανεστραμμένων ανάστροφων τόξων με πλέγματα και οπλισμένο έγχυτο σκυρόδεμα στα νέα ανάστροφα. Τοποθετήθηκε οπλισμός με τη μορφή μεταλλικών πλαισίων (**steel ribs**) ή δικτυωτών πλαισίων ελαφριού τύπου (**lattice girders**), σε κάθε ομπρέλα προπορείας και πλήρη ενσωμάτωση αυτού του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Επιπλέον τοποθετήθηκαν αγκύρια **tension bolts** στο στύλο μεταξύ των δυο κλάδων, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους και για επίτευξη ευστάθειας.

Συνοψίζοντας τα προβλήματα κατά τη διάρκεια των εργασιών προέκυψαν οι παρακάτω διαπιστώσεις:

- Ο συνδυασμός δοκών προπορείας με τα δικτυωτά πλαίσια ελαφρού τύπου σε περιοχές υψηλών υπερκειμένων (ακόμα και σε καλή ποιότητα βραχόμαζας) προκάλεσε μεγαλύτερες παραμορφώσεις λόγω



μεταφοράς του φορτίου μέσω των δοκών προπορείας και υπέρβαση της αντοχής των πλαισίων.

- Εξαιτίας του στενού στύλου ανάμεσα στους κλάδους της σήραγγας, υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση μεταξύ τους, η οποία ελαχιστοποιείται και στους δυο κλάδους περίπου 30m πίσω από την εκσκαφή της βαθμίδας του προπορευόμενου κλάδου.
- Η αποστράγγιση της σήραγγας δεν ήταν ικανοποιητική και εμφανίστηκε η ανάγκη εφαρμογής περισσότερο αποτελεσματικού συστήματος αποστράγγισης.

Στη διατομή N3 έγινε εκ νέου σχεδιασμός, με χρήση δοκίδων προπορείας ελαφριού τύπου(spiles) και δικτυωτών πλαισίων ελαφριού τύπου (lattice girders), που τοποθετήθηκαν στο κέλυφος από σκυρόδεμα και εφαρμόσθηκαν στη διατομή από την ομπρέλα 33 και στο εξής.

Οι παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν σε μερικές διατομές κατέλαβαν τον διαθέσιμο χώρο που προοριζόταν για την εφαρμογή της τελικής επένδυσης. Ήταν λοιπόν απαραίτητο να εφαρμοστούν λύσεις που θα περιόριζαν τις περαιτέρω μετακινήσεις ώστε να αποφευχθεί η επανεκσκαφή (μείωση της εσωτερικής ωφέλιμης ακτίνας της σήραγγας από **5.50m** σε **5.05m**).



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ**

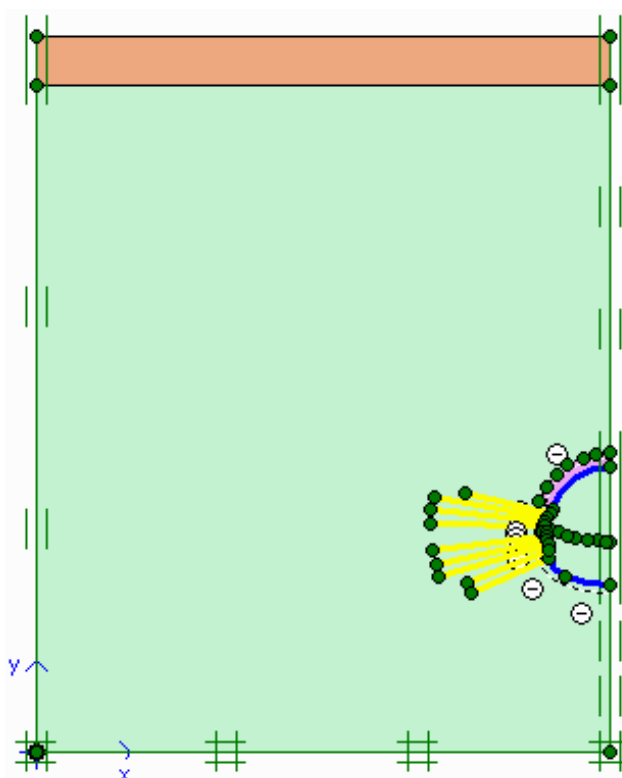
### **4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PLAXIS V8.2 2D**

#### 4.1 Γενικά χαρακτηριστικά του PLAXIS v.8.2.

Το Plaxis είναι ένας κώδικας πεπερασμένων στοιχείων ο οποίος έχει αναπτυχθεί ειδικά για την ανάλυση της παραμόρφωσης και σταθερότητας γεωτεχνικών κατασκευών. Επιπλέον, προσφέρει την δυνατότητα του εύκολου σχεδιασμού μη-κυκλικής σήραγγας και της προσομοίωσης των φάσεων κατασκευής αυτής. Παρακάτω περιγράφεται η κατασκευή της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου μη-κυκλικής διατομής η οποία φορτίζεται από βραχώμαζα κακής ποιότητας (**GSI 15-25**) συνολικού ύψους 90m. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο σηράγγων καθώς έχουμε θεωρήσει ότι οι δύο σήραγγες, κατά τη φάση της διάνοιξης, βρίσκονται σε αρκετά μεγάλη κατά μήκος απόσταση.

#### 4.2 Ιδιότητες προσομοιώματος.

Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η δυνατότητα εκτίμησης των συγκλίσεων σε κάθε φάση κατασκευής της σήραγγας και η αποτίμηση των αντιστοιχών πιέσεων στην επένδυση, στοιχεία που μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS.



**Εικόνα 4.1.** Χαρακτηριστικά της σήραγγας και του εδαφικού προσομοιώματος το οποίο έχει εύρος 60m κατά x και 75m κατά y.

Η σήραγγα έχει ακτίνα 5,05m περίπου και τοποθετείται σε ένα μέσο βάθος 75m. Το εδαφικό προφίλ αποτελείται ουσιαστικά μόνο από υλικά επώθησης (GSI 15-25) με την ανώτερη στρώση πάχους 5m να αποτελεί ουσιαστικά μια ζώνη η οποία υποκαθιστά, κυρίως για υπολογιστικούς λόγους, τα επιπλέον 45m βραχώμαζας που φορτίζουν την διατομή N3. Επειδή η φόρτιση είναι συμμετρική, έχει ληφθεί υπόψη η μίση διατομή και συγκεκριμένα η αριστερή. Στην ανάλυση που ακολουθεί χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο προσομοίωμα επίπεδης παραμόρφωσης, το οποίο αναφέρεται σε κατασκευές με ομοιόμορφη διατομή και αντίστοιχη κατάσταση τάσεων και φορτίσεων για ένα συγκεκριμένο μήκος κάθετα στο επίπεδο (z διεύθυνση), όπου οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις θεωρούνται μηδενικές. Η ανάλυση έγινε με δεκαπεντάκομβο (**15-nodes**) τριγωνικού σχήματος πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία παρέχουν μεγαλύτερης ακρίβειας και ποιότητας αποτελέσματα όσον αφορά την εντατική κατάσταση των εδαφικών και κατασκευαστικών προσομοιωμάτων σε φυσικά προβλήματα.

Το εδαφικό προσομοίωμα ως προς την διεύθυνση x έχει μήκος 60m, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1. Η επιλογή έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να μην επηρεάζονται από την απόσταση της σήραγγας από τα αμετακίνητα όρια του προσομοιώματος.

Η διατομή της σήραγγας σχεδιάστηκε μέσω του εικονιδίου **tunnel** στην γραμμή εργαλείων του Plaxis και η Νέα Αυστριακή Μέθοδος (**NATM**) είναι ο τρόπος διάνοιξης που επιλέχθηκε. Επιπλέον η διατομή έχει σχεδιαστεί σε πέντε τομείς (**sections**) και το σημείο με συντεταγμένες  $x=0$  και  $y=0$  έχει επιλεγεί η στέψη της σήραγγας.

Οι συνοριακές συνθήκες είναι συνθήκες κατακόρυφης κύλισης στο δεξιό και αριστερό όριο και συνθήκες πάκτωσης στο κάτω όριο. Το εδαφικό προσομοίωμα καθορίζεται ως εξής:

- Το έδαφος συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά-ιδεατά πλαστικά (Mohr-Coulomb)
- Το έδαφος έχει τις παραμέτρους αντοχής που παρατίθενται στο Πίνακα .1
- Η παρουσία νερού αγνοείται.

Material model	Model	MC	-
Material type	Type	Drained	-
Ειδικό βάρος κάτω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{sat}$	27	$\text{kN/m}^3$
Ειδικό βάρος πάνω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{unsat}$	27	$\text{kN/m}^3$
Μέτρο ελαστικότητας Young	$E_{ref}$	293000	$\text{kN/m}^2$
Λόγος Poisson	$\nu$	0.33	-
Συνοχή	$c_{ref}$	115	$\text{kN/m}^2$
Γωνία εσωτερικής τριβής	$\phi$	22.82	°
Γωνία διασταλτικότητας	$\psi$	0	°

**Πίνακας 4.1:** Χαρακτηριστικές ιδιότητες του εδάφους που εισάγονται στο πρόγραμμα και αναφέρονται στην τοπική διατομή N3.

#### 4.3 Υποκατάσταση του υπερκείμενου εδάφους με νέο έδαφος μικρότερου πάχους αλλά ισοδύναμου με το αρχικό.

Σκοπός της υποκατάστασης ενός μέρους από το υπερκείμενο έδαφος είναι η μείωση του μεγέθους του προς επίλυση προσομοιώματος, χαρακτηριστικό το οποίο απλοποιεί αρκετά τον κάνναβο των πεπερασμένων στοιχείων και διευκολύνει την υπολογιστική διαδικασία.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια ζώνη πάχους 5m, που τοποθετείται σε ύψος 45m πάνω από το κέντρο της σήραγγας για να υποκαταστήσει 45m υπερκείμενου εδάφους, το οποίο έχει ειδικό βάρος ίσο με  $\gamma=243 \text{ kN/m}^3$ . Οι ιδιότητες της ζώνης φαίνονται στον Πίνακα 2.

Material model	Model	MC	-
Material type	Type	Drained	-
Ειδικό βάρος κάτω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{sat}$	243	kN/m <sup>3</sup>
Ειδικό βάρος πάνω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{unsat}$	243	kN/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας Young	$E_{ref}$	293000	kN/m <sup>2</sup>
Λόγος Poisson	$\nu$	0.33	-
Συνοχή	$c_{ref}$	115	kN/m <sup>2</sup>
Γωνία εσωτερικής τριβής	$\varphi$	22.82	°
Γωνία διασταλτικότητας	$\psi$	0	°

*Πίνακας 4.2: Ιδιότητες της ζώνης υποκατάστασης.*

#### **4.4 Μέθοδοι υποστήριξης της διατομής N3 και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά ακαμψίας.**

Όπως έχει περιγραφεί και στο προηγούμενο κεφαλαίο, ο τύπος διατομής N3 αφορά αποδιοργανωμένη βραχόμαζα «φτωχών» χαρακτηριστικών με ένα εύρος δείκτη GSI από 15-25. Στο μήκος της διάνοιξης της σήραγγας η διατομή N3 συναντήθηκε στις περιοχές όπου εμφανίζεται το μεγαλύτερο υπερκείμενο στρώμα, το οποίο είναι της τάξης των 90m.

Για την άνω ημιδιατομή τοποθετήθηκε δικτυωτό πλαίσιο (lattice-girder) καθώς και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm. Για την προσομοίωση γίνεται επιλογή ελαστοπλαστικού μοντέλου με τις τιμές της μέγιστης πλαστικής ροπής και αξονικής δύναμης να είναι 18kN.m/m και 7140 kN/m αντίστοιχα. Εφόσον η επένδυση είναι προσωρινή είναι ανεκτό ένα μικρό ποσοστό ρωγμών στο σκυρόδεμα.

Material set		Properties		
Identification:	shotcrete+lattice girders	EA :	6.643E+06 kN/m	
Material type:	Elastoplastic	EI :	4.784E+04 kNm <sup>2</sup> /m	
Comments		d :	0.294 m	
		w :	0.000 kN/m/m	
		v :	0.150	
		M <sub>p</sub> :	18.000 kNm/m	
		N <sub>p</sub> :	7140.000 kN/m	
		Rayleigh α :	0.000	
		Rayleigh β :	0.000	
				Ok

*Εικόνα 4.2: Χαρακτηριστικά του κελύφους της προσωρινής επένδυσης της άνω ημιδιατομής.*



*Εικόνα 4.3.Τυπική εικόνα δικτυωτού πλαισίου(lattice girder) κατασκευασμένο για την άμεση υποστήριξη σήραγγας πεταλοειδούς διατομής.*



Στην κατασκευή του προσωρινού ανάστροφου τόξου (Α' φάση διάνοιξης) γίνεται χρήση μόνο εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ώστε να κλείσει ο δακτύλιος της οπής και να ενισχυθεί η θλιπτική λειτουργία της διατομής.

Material set		Properties	
Identification:	shotcrete only	EA :	7.500E+06 kN/m
Material type:	Elastoplastic	EI :	5.625E+04 kNm <sup>2</sup> /m
Comments		d :	0.300 m
		w :	0.000 kN/m/m
		v :	0.150
		M <sub>p</sub> :	13.000 kNm/m
		N <sub>p</sub> :	5000.000 kN/m
		Rayleigh α :	0.000
		Rayleigh β :	0.000
		Ok	

*Εικόνα 4.4: Χαρακτηριστικά του προσωρινού ανάστροφου τόξου της άνω ημιδιατομής.*



*Εικόνα 4.5. Επένδυση του προσωρινού ανάστροφου τόξου με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.*

Το τελικό ανάστροφο τόξο αποτελείται από διπλή στρώση δομικού πλέγματος, χωρίς δικτυωτό πλαίσιο, και 25cm εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Material set	
Identification:	final invert
Material type:	Elastoplastic

Comments  
teliko anastrofo tokso 25cm.

Properties	
EA :	6.250E+06 kN/m
EI :	3.255E+04 kNm <sup>2</sup> /m
d :	0.250 m
w :	0.000 kN/m/m
ν :	0.150
M <sub>p</sub> :	10.000 kNm/m
N <sub>p</sub> :	4000.000 kN/m
Rayleigh α :	0.000
Rayleigh β :	0.000

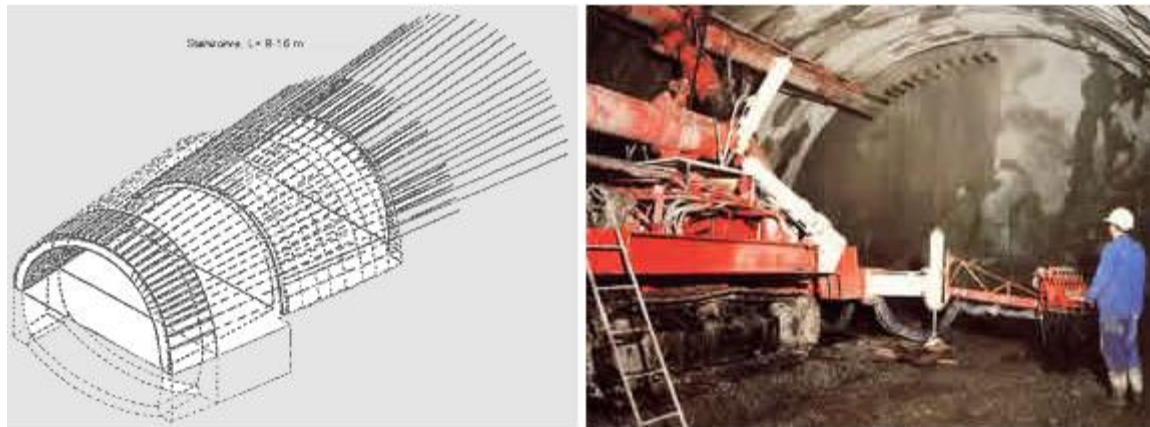
Ok Cancel Help

*Εικόνα 4.6: Χαρακτηριστικά του τελικού ανάστροφου τόξου της διατομής N3*

Η προσομοίωση των μεταλλικών δοκίδων προπορείας έγινε με την τοποθέτηση μιας ενισχυμένης ζώνης, πάνω από το κέλυφος της άνω ημιδιατομής, πάχους 1,5m περίπου. Αυτή η ενισχυμένη ζώνη αυξάνει σημαντικά τις ιδιότητες της βραχώμαζας στην έκταση που καλύπτει και μειώνει αισθητά τις αναμενόμενες ακτινικές μετατοπίσεις, αφού εφαρμόζεται μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης. Οι μεταλλικές δοκίδες προπορείας τοποθετούνται σε κάθε βήμα προχώρησης στην περιοχή άνωθεν του θόλου και υπεράνω των ήδη εγκατεστημένων δικτυωτών πλαισίων. Τα χαρακτηριστικά έχουν καταγράψει στον Πίνακα 3.

Material model	Model	MC	-
Material type	Type	Drained	-
Ειδικό βάρος κάτω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{sat}$	27	kN/m <sup>3</sup>
Ειδικό βάρος πάνω από τη ΣΥΟ	$\gamma_{unsat}$	27	kN/m <sup>3</sup>
Μέτρο ελαστικότητας Young	$E_{ref}$	3019000	kN/m <sup>2</sup>
Λόγος Poisson	$\nu$	0.33	-
Συνοχή	$c_{ref}$	1945	kN/m <sup>2</sup>
Γωνία εσωτερικής τριβής	$\phi$	22.82	°
Γωνία διασταλτικότητας	$\psi$	0	°

**Πίνακας 4.3.** Ιδιότητες της ενισχυμένης ζώνης των δοκών προπορείας.



**Εικόνα 4.7.** Τυπική εικόνα ομπρέλας δοκών προπορείας οι οποίες τοποθετούνται υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα της σήραγγας.

Τα αγκύρια της διατομής N3 είναι τύπου self-drilling και έχουν τοποθετηθεί ακτινικά στη διατομή. Προβλέπεται η χρήση δυο τύπων αγκυρίων πλήρους πακτώσεως, φέρουσας ικανότητας 350 kN και μήκους 9m και 12m αντίστοιχα, που τοποθετούνται στην άνω ημιδιατομή και στις παρειές της Β' φάσης.

<b>Material set</b> Identification: <input type="text" value="rockbolts 9m"/> <input type="text" value="Elastoplastic"/>	<b>Properties</b> EA : <input type="text" value="1.484E+07"/> kN/m N <sub>p</sub> : <input type="text" value="350.000"/> kN/m Extension only!
<b>Comments</b> <input type="text"/>	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>	

*Εικόνα 4.8: Χαρακτηριστικά αγκυρίου τύπου self-drilling μήκους 9m.*

<b>Material set</b> Identification: <input type="text" value="rockbolts 12m"/> <input type="text" value="Elastoplastic"/>	<b>Properties</b> EA : <input type="text" value="3.340E+07"/> kN/m N <sub>p</sub> : <input type="text" value="350.000"/> kN/m Extension only!
<b>Comments</b> <input type="text"/>	
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/>	

*Εικόνα 4.9: Χαρακτηριστικά αγκυρίου τύπου self-drilling μήκους 12m.*

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής με προσωρινό ανάστροφο τόξο είναι η ανάγκη παροχής επαρκούς υποστήριξης του κελύφους της άνω ημιδιατομής, δηλαδή του δικτυωτού πλαισίου και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ιδιαίτερα μετά την απομάκρυνση της βραχώμαζας της κατώτερης βαθμίδας κατά την Β' φάση της διάνοιξης.

Η συνηθέστερη μέθοδος υποστήριξης παγκοσμίως της βάσης του τόξου είναι η κατασκευή ενός επιμήκη τομέα ο οποίος μεταφέρει τα φορτία του τόξου στην βραχόμαζα παραπλεύρως της διατομής. Ο σχεδιασμός της πλευρικής διεύρυνσης (γνωστής με τον όρο elephant foot) και η ικανότητα της βραχόμαζας να παραλάβει τα μεταβιβαζόμενα φορτία αποτελούν τους κρίσιμους παράγοντες για την ολική επάρκεια της υποστήριξης. Σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος αστοχίας της βάσης του κελύφους της άνω ημιδιατομής ή βύθισης της, στην περίπτωση «ασθενούς» βραχόμαζας.

Κατά την εισαγωγή της πλευρικής διεύρυνσης (elephant foot) στο Plaxis, επιλέχθηκε η υποκατάσταση της περιοχής του elephant foot με μια πλάκα πάχους 50cm και με τις ιδιότητες του Σχήματος 7.

The image shows a software dialog box for defining material properties. It is divided into three main sections: 'Material set', 'Comments', and 'Properties'.  
- **Material set:** 'Identification' is set to 'elephant foot' and 'Material type' is set to 'Elastic'.  
- **Comments:** A large empty text area for notes.  
- **Properties:** A list of mechanical properties with input fields:  
 - EA : 1.250E+07 kN/m  
 - EI : 2.604E+05 kNm<sup>2</sup>/m  
 - d : 0.500 m  
 - w : 0.000 kN/m/m  
 - ν : 0.150  
 - M<sub>p</sub> : 1.000E+15 kNm/m  
 - N<sub>p</sub> : 1.000E+15 kN/m  
 - Rayleigh α : 0.000  
 - Rayleigh β : 0.000  
At the bottom, there are three buttons: 'Ok', 'Cancel', and 'Help'.

*Εικόνα 4.10: Χαρακτηριστικά της πλευρικής διεύρυνσης.*

Είναι σημαντικό η πλευρική διεύρυνση να έχει μια βάση ικανοποιητικού μεγέθους και δυσκαμψίας ώστε να μπορεί να διασφαλίσει επαρκώς την κατανομή των τάσεων και επίσης, αν κριθεί απαραίτητο, να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας κάτω από τη βάση του elephant foot.

Στην διατομή N3 έχει γίνει η χρήση μικροπασσάλων στην βάση της πλευρικής διεύρυνσης, δυο σε κάθε πλευρά της άνω ημιδιατομής και η τοποθέτηση τους έχει γίνει σχεδόν κάθετα στη βάση.

Το πραγματικό μήκος του μικροπασσάλου είναι 4m ενώ το τοποθετούμενο στο προσομοίωμα επιλέχθηκε ίσο με 0,85m περίπου για τον πρώτο μικροπάσσαλο και 0,61m περίπου για τον δεύτερο. Οι ακαμψίες των πασσάλων υπολογίστηκαν με βάση τις ιδιότητες της χαλύβδινης διατομής τους και προέκυψαν ίσες με 2809.2 GPa και 2000 GPa αντίστοιχα. Τα στοιχεία που εισήχθησαν στο πρόγραμμα φαίνονται χαρακτηριστικά παρακάτω στα Σχήματα 8 και 9.

Material set	
Identification:	mikropassalos 1
Material type:	Elastic

Properties	
EA :	2.809E+09 kN
L <sub>spacing</sub> :	1.000 m
F <sub>max,tens</sub>   :	1.000E+15 kN
F <sub>max,comp</sub>   :	1.000E+15 kN

Values per anchor !

OK Cancel Help

**Εικόνα 4.11:** Χαρακτηριστικά του μικροπασσάλου με μήκος 0.85m. Η εισαγωγή του στο προσομοίωμα έχει γίνει ως node to node anchor.

<b>Material set</b>	<b>Properties</b>
Identification: mikropassalos 2	EA : 2.000E+09 kN
Material type: Elastic	$L_{spacing}$ : 1.000 m
	$ F_{max,tens} $ : 1.000E+15 kN
	$ F_{max,comp} $ : 1.000E+15 kN
<b>Comments</b>	Values per anchor !
	OK Cancel Help

*Εικόνα 4.12: Χαρακτηριστικά του μικροπασσάλου με μήκος 0.61m.*





## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ**

### **5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PLAXIS V 8.2 2D**

## 5.1 Γενικά.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός των τάσεων και των μετατοπίσεων στην άντυγα της διατομής N3 κατά την προώθηση του μετώπου της σήραγγας Ανθοχωρίου. Οι κατακόρυφες συγκλίσεις της στέψης της σήραγγας αλλά και ο υπολογισμός του εύρους της πλαστικής ζώνης εμφανίζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού, πρώτον στη στέψη παρατηρούνται (λόγω συμμετρίας) οι μεγαλύτερες ακτινικές μετατοπίσεις και δεύτερον μπορούμε να παρατηρήσουμε το πλήθος των εδαφικών στοιχείων που έχουν αστοχήσει λόγω του κριτηρίου Mohr-Coulomb, σε κάθε φάση εκσκαφής.

Για τον ακριβέστερο υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών είναι αναγκαία η όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της διαδικασίας διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας. Ο κώδικας **Plaxis V8.2 2D** δίνει την δυνατότητα προσομοίωσης των σταδίων κατασκευής ενός έργου όπως της ενεργοποίησης των δοκίδων προπορείας μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης, της αποτόνωσης της βραχόμαζας σε κάποια απόσταση πίσω από το μέτωπο κτλ.

## 5.2 Περιγραφή των φάσεων προσομοίωσης.

Στην ανάλυση που έγινε θεωρήθηκε εκσκαφή της διατομής σε δυο φάσεις και για την προσομοίωση των φάσεων αυτών χρησιμοποιήθηκαν πέντε στάδια προσομοίωσης. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την ενεργοποίηση της ενισχυμένης ζώνης των δοκίδων προπορείας πάνω από το κέλυφος της άνω ημιδιατομής της σήραγγας. Στο δεύτερο στάδιο προσομοίωσης πραγματοποιείται η εκσκαφή της **A' φάσης** χωρίς υποστήριξη της διατομής και με βαθμό αποτόνωσης της τάξης του  $\lambda=0,90$ . Στο τρίτο στάδιο ενεργοποιούνται τα μέτρα υποστήριξης της A' φάσης (εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αγκύρια, elephant foot, προσωρινό ανάστροφο τόξο και μικροπάσσαλοι). Το τέταρτο στάδιο περιλαμβάνει την εκσκαφή της **B' φάσης** της διατομής χωρίς ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης και με θεώρηση ανακατανομής του 90% των τάσεων. Τέλος, στο πέμπτο στάδιο ενεργοποιούνται τα μέτρα υποστήριξης της ολικής διατομής. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά στάδια προσομοίωσης της διάνοιξης και υποστήριξης της διατομής N3 της σήραγγας Ανθοχωρίου.

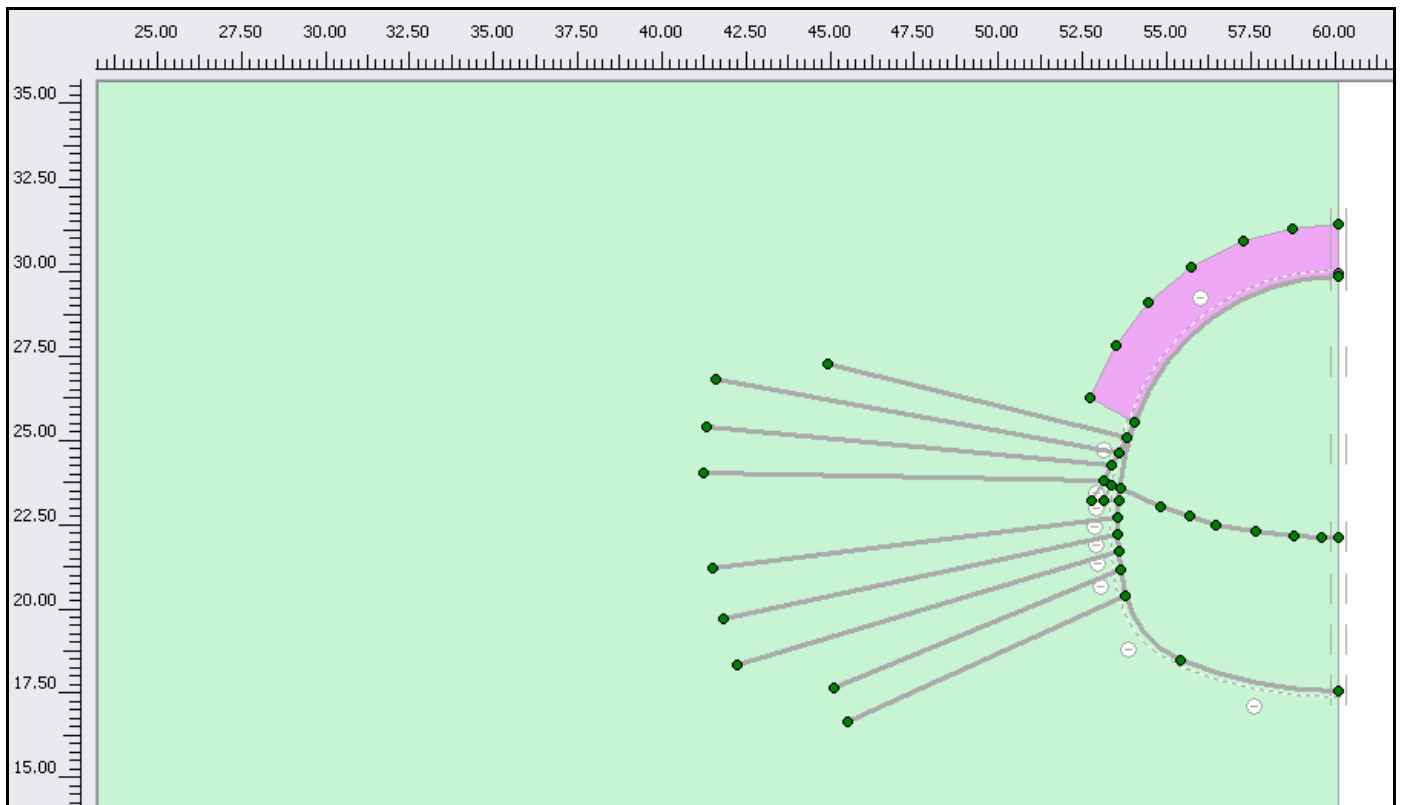
Στάδιο	Περιγραφή Εργασιών
1	Ενεργοποίηση της ενισχυμένης ζώνης των δοκίδων προπορείας.
2	Μηδενισμός των μετακινήσεων λόγω του σταδίου 1 και αποτόνωση της άνω ημιδιατομής με $\lambda=0,90$ .
3	Εκσκαφή της άνω ημιδιατομής και τοποθέτηση όλων των μέτρων άμεσης υποστήριξης (συμπεριλαμβανομένου και του προσωρινού ανάστροφου τόξου).
4	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου με ταυτόχρονη αποτόνωση της βαθμίδας με $\lambda=0,90$ .
5	Πλήρη αποτόνωση της βαθμίδας με ταυτόχρονη ενεργοποίηση όλων των μέτρων άμεσης υποστήριξης της πλήρους διατομής N3.

*Πίνακας 5.1: Σταδία προσομοίωσης της διάνοιξης και υποστήριξης της διατομής N3 της σήραγγας Ανθοχωρίου.*

### 5.2.1 Πρώτο στάδιο προσομοίωσης

Στον τομέα **Calculations** του Plaxis και στην εντολή **define** ενεργοποιείται μόνο η ενισχυμένη ζώνη προσομοίωσης των δοκίδων προπορείας, χωρίς αποτόνωση της βραχόμαζας. Η διατομή φαίνεται στο Σχήμα 1 και ακολουθούν τα αποτελέσματα των συγκλίσεων.

Ο λόγος ύπαρξης αυτού του πρώτου σταδίου είναι για να εκτιμήσουμε τη συμβολή των δοκίδων προπορείας στον περιορισμό των συγκλίσεων ορισμένα μέτρα μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης (αυτός είναι και ο λόγος που δεν αποτονώνεται η βραχόμαζα εσωτερικά της διατομής).



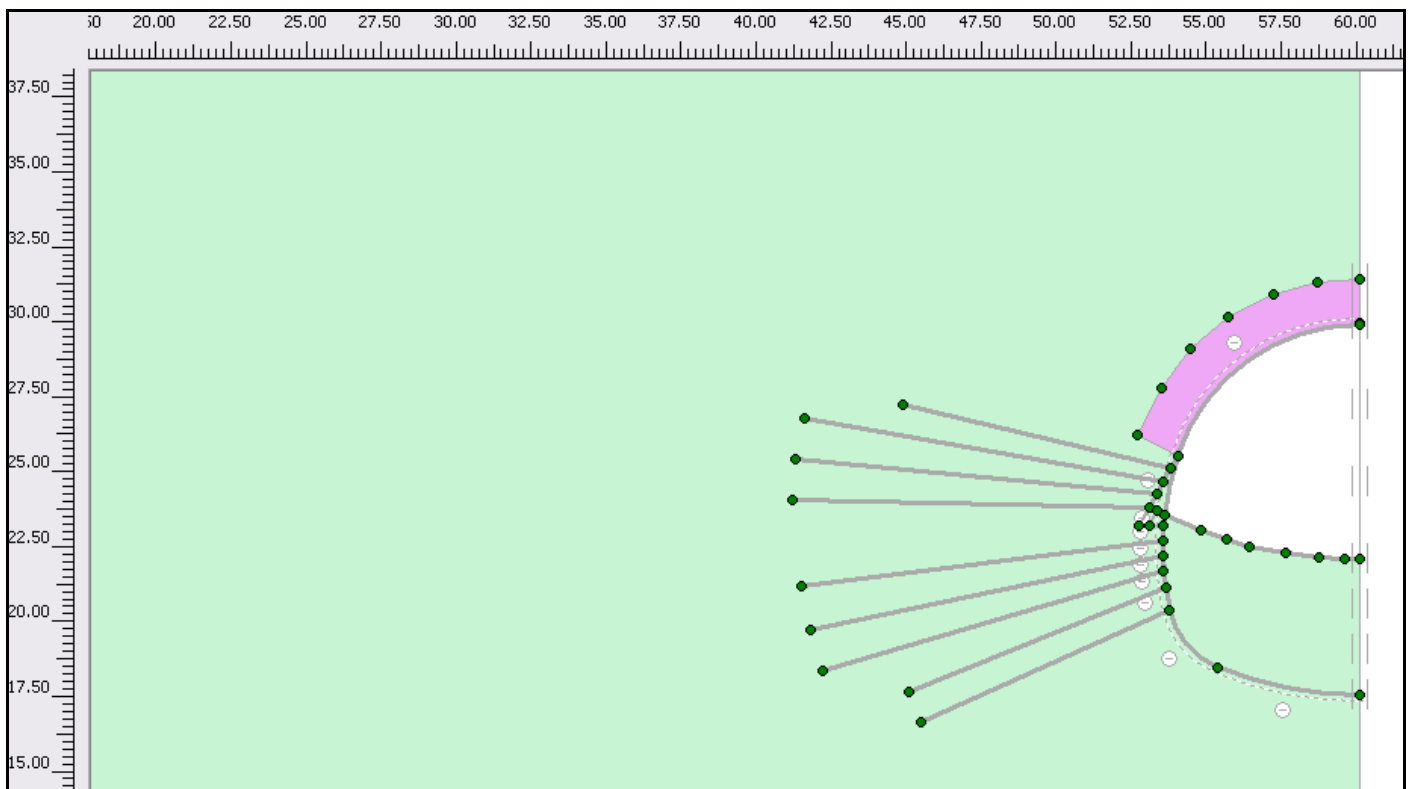
**Εικόνα 5.1:** Ενεργοποίηση της ζώνης των spiles στην πρώτη φάση της προσομοίωσης.

Λόγω πολύ μικρών ολικών μετατοπίσεων, της τάξης του  $5.67 \cdot 10^{-6}$  m, δεν προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα μέσω του Plaxis. Επιπλέον, η κατακόρυφη μετατόπιση στη στέψη προέκυψε  $36.52 \cdot 10^{-9}$  m και οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις  $1.81 \cdot 10^{-6}$  m.

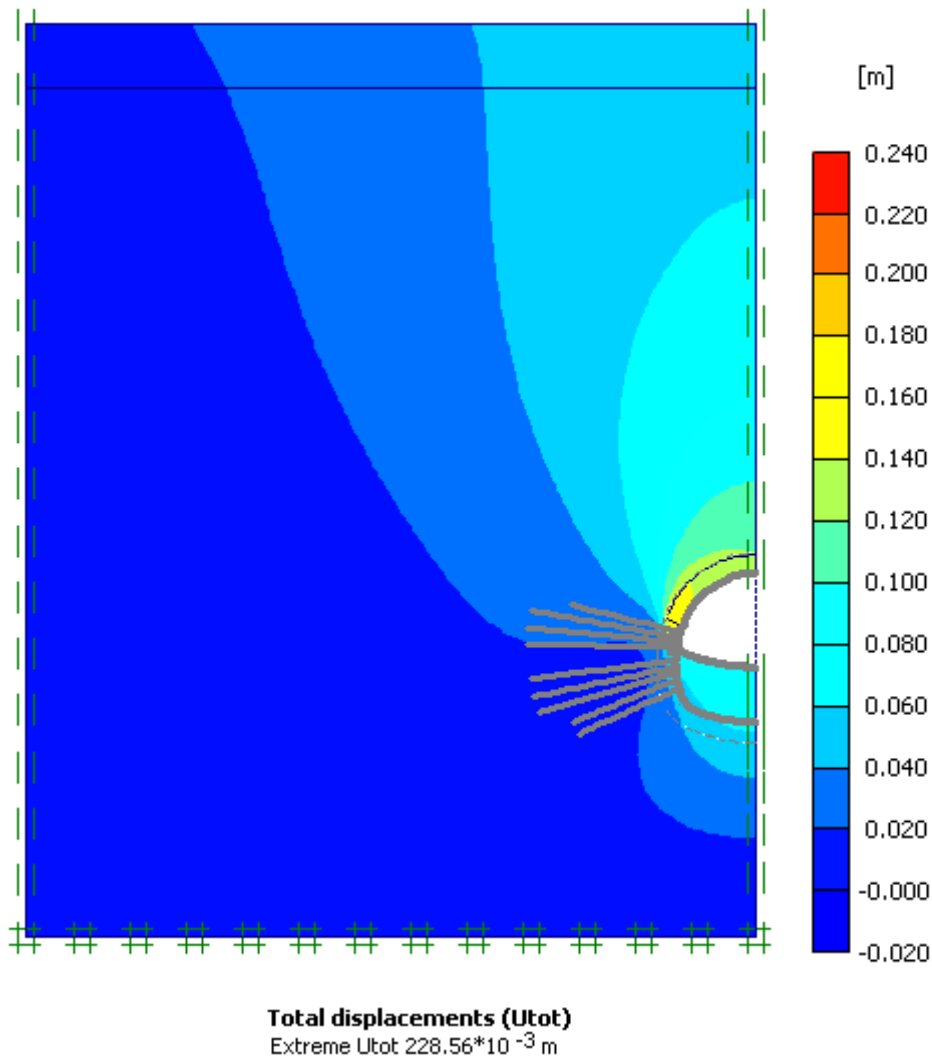
### 5.2.2 Δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.

Το δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης, δηλαδή αποτόνωση της άνω ημιδιατομής με  $\lambda=0,90$  χωρίς ενεργοποίηση των μέτρων υποστήριξης του κελύφους, περιγράφει την διατομή της σήραγγας λίγα μόλις μέτρα πίσω από το μέτωπο διάνοιξης όπου η βραχώμαζα δεν έχει φτάσει σε βαθμό αποτόνωσης  $\lambda=1$  και η άνω ημιδιατομή δεν έχει ενισχυθεί ακόμα με δικτυωτά πλαίσια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (πρόκειται δηλαδή για ανυποστήρικτη διατομή). Τέλος, κατά την έναρξη αυτής της φάσης προσομοίωσης έγινε μηδενισμός των μετακινήσεων της φάσης 1 (εντολή **reset displacements to zero**).

Οι σχεδιαστικές λεπτομέρειες και τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στα σχήματα 2 έως 5.

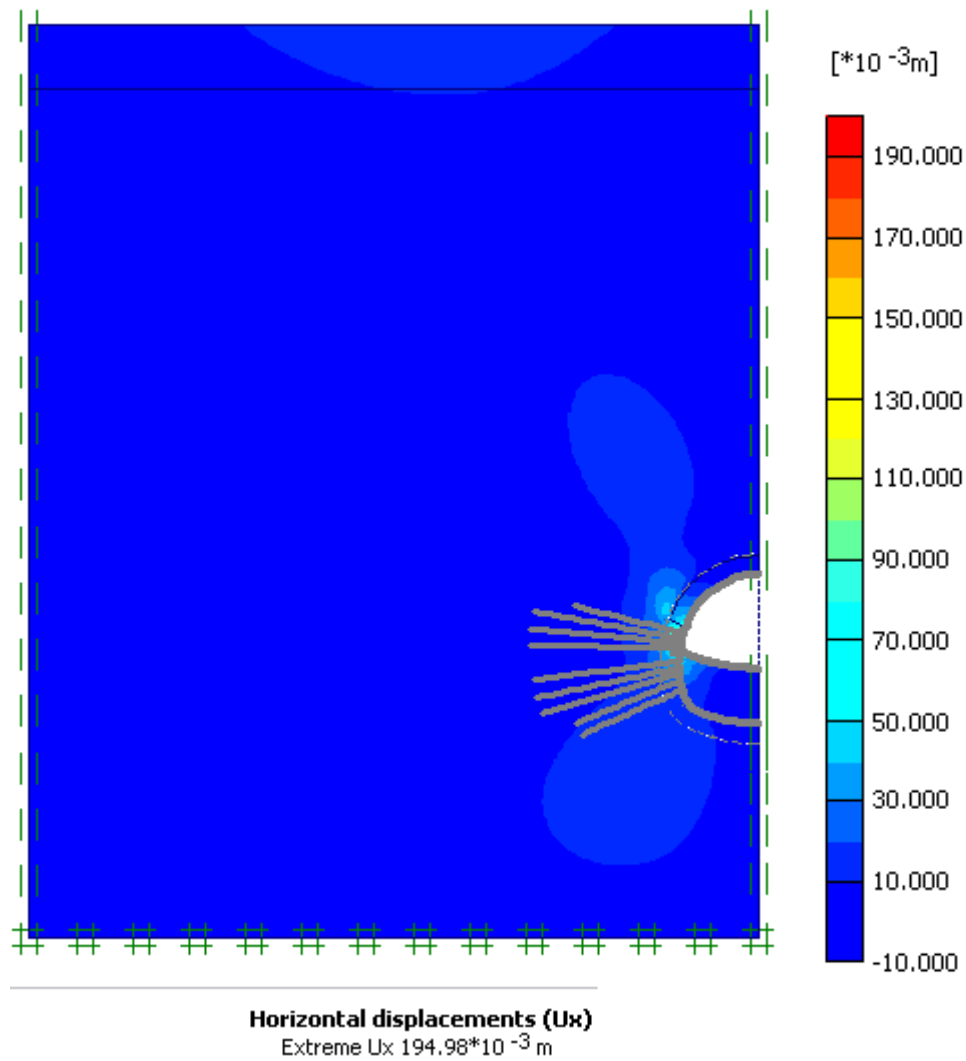


*Εικόνα 5.2: Αποτόνωση της άνω ημιδιατομής στο δεύτερο στάδιο της προσομοίωσης.*



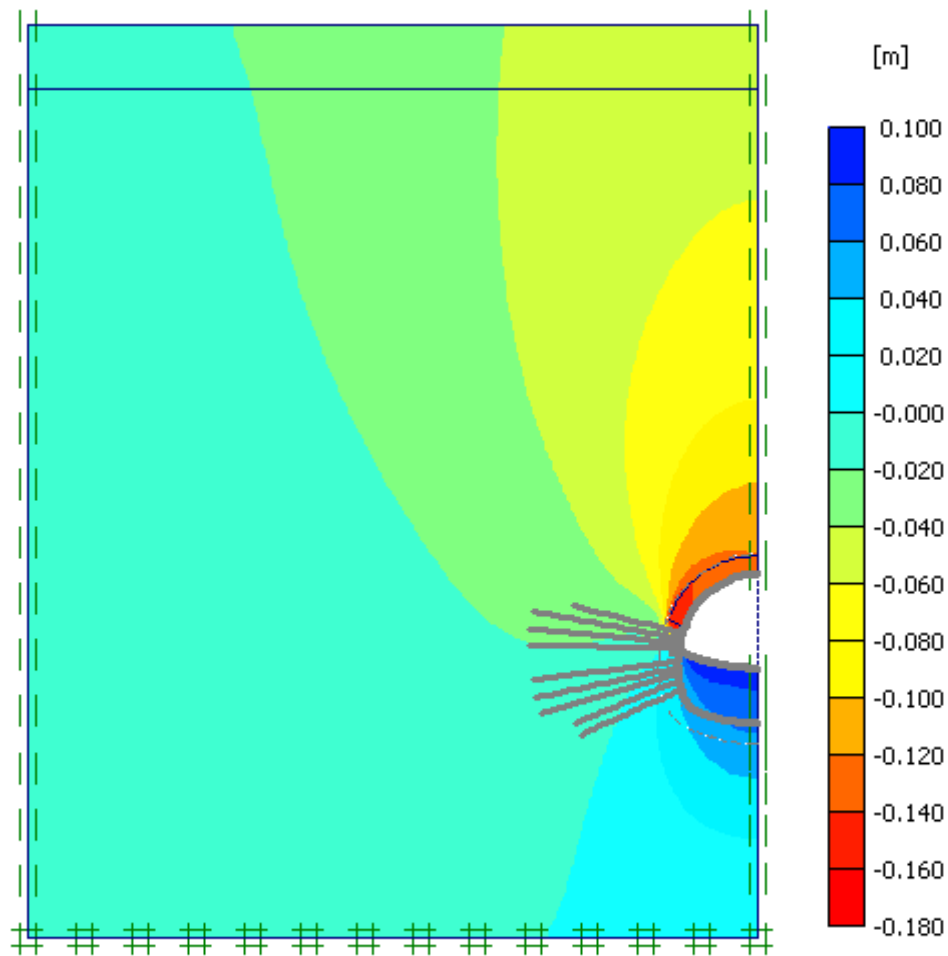
*Εικόνα 5.3: Ολικές παραμορφώσεις της διατομής για το στάδιο προσομοίωσης 2 (για βαθμό αποτόνωσης 0.90 της άνω ημιδιατομής).*

Η μέγιστη τιμή της ολικής μετατόπισης εμφανίζεται στην παρειά της διατομής, στην επιφάνεια κάτω από την ενισχυμένη ζώνη των δοκίδων προπορείας. Η αντίστοιχη τιμή της σύγκλισης στην στέψη της σήραγγας προέκυψε ίση με  $u_{tot}=122.02 \cdot 10^{-3}$  m.



*Εικόνα 5.4: Οριζόντιες παραμορφώσεις της διατομής στο στάδιο προσομοίωσης 2.*

Οι μέγιστες οριζόντιες παραμορφώσεις εμφανίζονται στην παρειά της άνω ημιδιατομής, εκεί που τελειώνει η ενισχυμένη ζώνη των δοκών προπορείας και έχουν τιμή  $194.98 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ στην στέψη της διατομής η τιμή των οριζοντίων μετακινήσεων είναι αμελητέες.



**Vertical displacements (Uy)**  
Extreme Uy -161.21\*10<sup>-3</sup> m

*Εικονα 5.5: Κατακόρυφες μετατοπίσεις της διατομής N3 για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.*

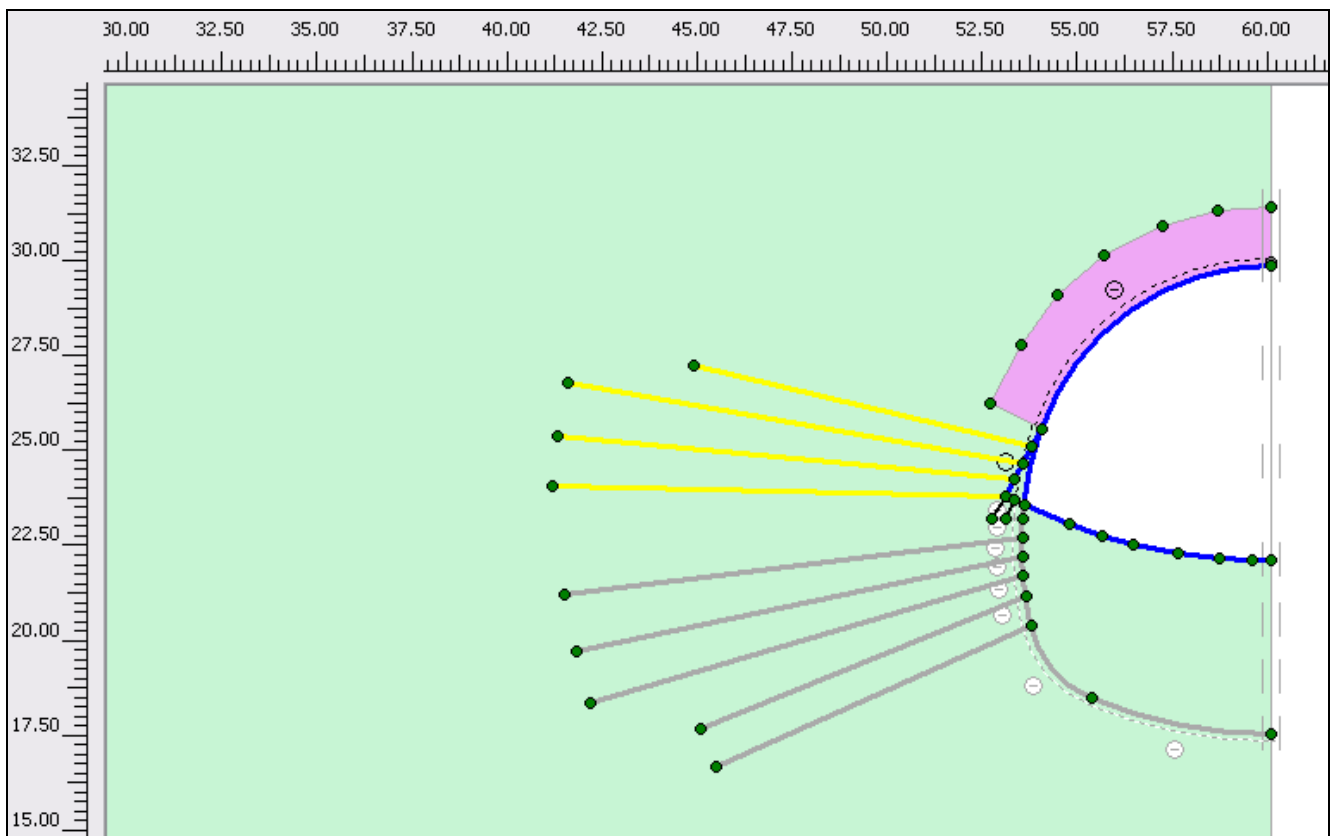
Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι μέγιστες στην παρειά της διατομής και έχουν τιμή  $161.21 \cdot 10^{-3}$  m, ενώ η κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη είναι ίση με την ολική μετακίνηση  $\mathbf{u}_{tot}=122.02 \cdot 10^{-3}$  m.



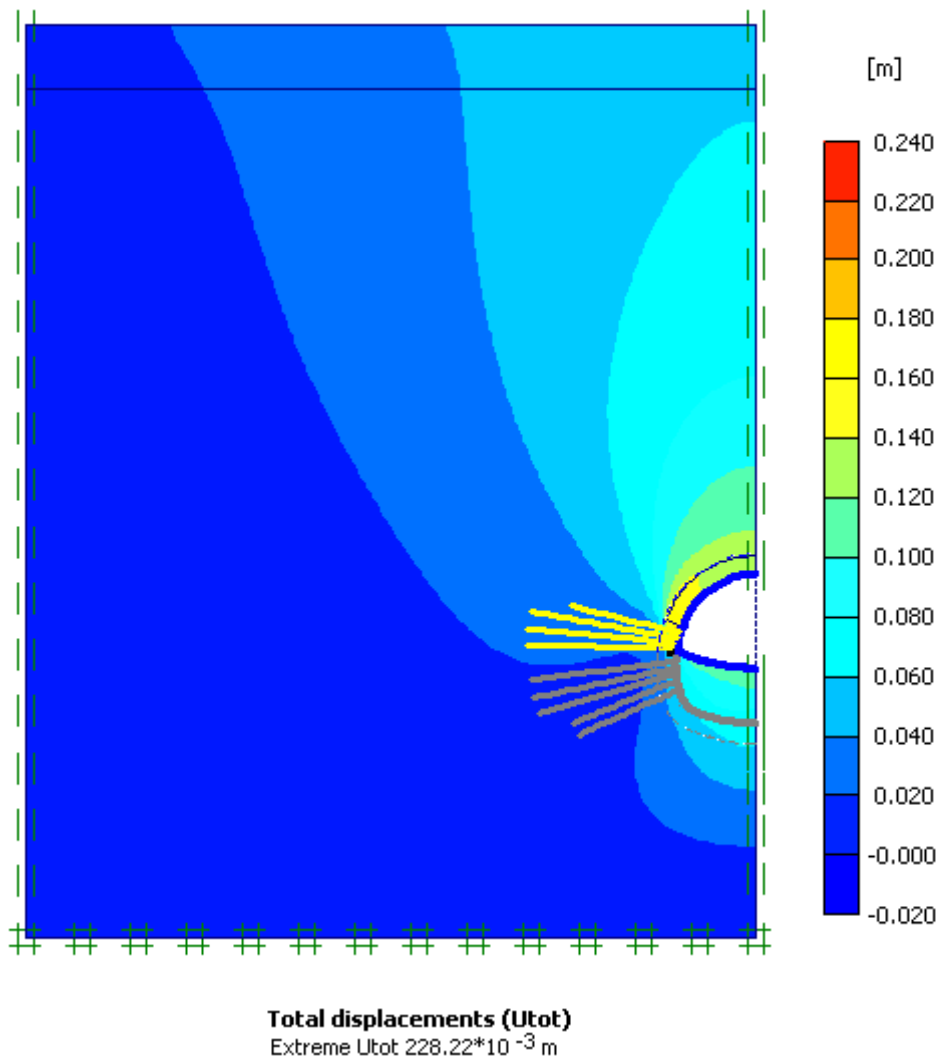
### 5.2.3 Τρίτο στάδιο προσομοίωσης.

Στο στάδιο αυτό η άνω ημιδιατομή υποστηρίζεται με τα συστήματα άμεσης υποστήριξης του κελύφους, δηλαδή εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και δικτυωτά πλαίσια, πλευρική διεύρυνση, μικροπάσσαλοι, αγκύρια και το προσωρινό ανάστροφο τόξο. Επειδή το στάδιο αυτό περιγράφει τη συμπεριφορά της διατομής N3 αρκετά πίσω από το μέτωπο, ο βαθμός αποτόνωσης επιλέγεται ίσος με  $\lambda=1$ .

Στο σχήμα 6 απεικονίζονται τα στοιχεία που ενεργοποιήθηκαν για το τρίτο στάδιο προσομοίωσης.

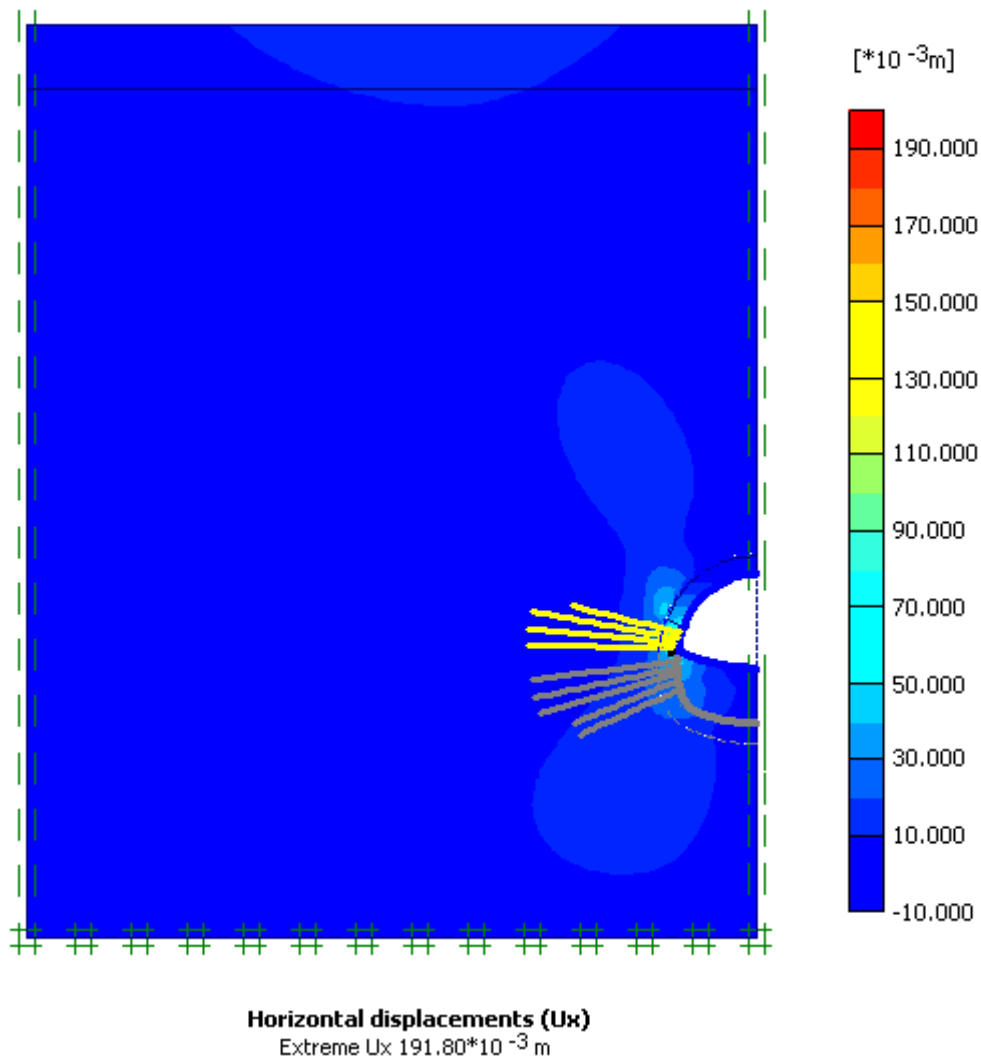


**Εικόνα 5.6:** Ενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης της άνω ημιδιατομής και εκσκαφή με συντελεστή αποτόνωσης  $\lambda=1$ .



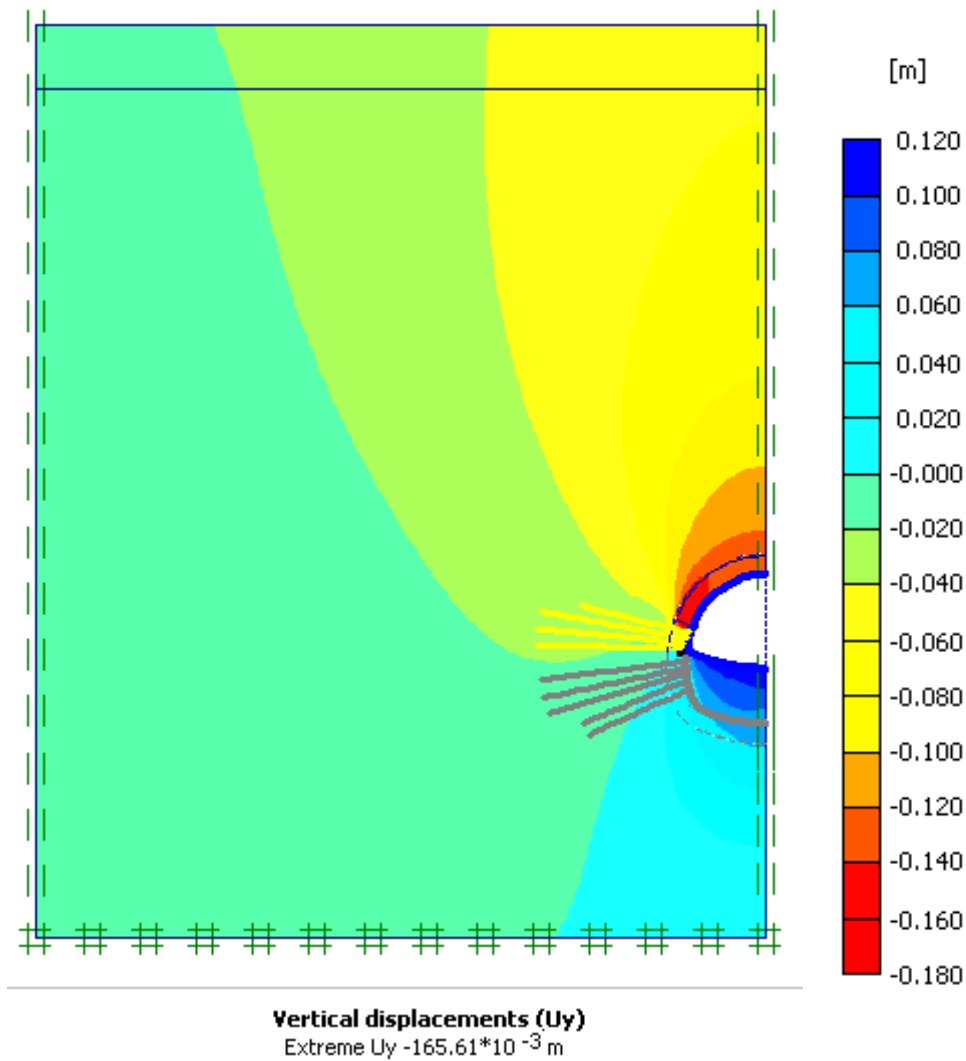
*Εικόνα 5.7: Ολικές μετατοπίσεις στη διατομή N3 στο στάδιο 3 της προσομοίωσης.*

Παρατηρούμε ότι οι ολικές μετακινήσεις λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους μετά το πέρας της ενισχυμένης ζώνης με  $u_{tot} = 228.22 \cdot 10^{-3}$  m. Αν συγκρίνουμε την τιμή αυτή με την αντίστοιχη τιμή της μέγιστης ολικής μετακίνησης στο στάδιο 2 συμπεραίνουμε ότι ουσιαστικά μετά την εφαρμογή των μέτρων υποστήριξης η διατομή δεν συγκλίνει περαιτέρω. Αντιθέτως, οι ολικές μετατοπίσεις στη στέγη της σήραγγας εμφανίζονται ελαφρά αυξημένες και ίσες με  $128.34 \cdot 10^{-3}$  m.



*Εικόνα 5.8: Οριζόντιες μετακινήσεις της διατομής για το στάδιο προσομοίωσης 3.*

Οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφάνισαν την μέγιστη τιμή τους, ίση με  $191.80 \cdot 10^{-3}$  m, μετά το πέρας της ενισχυμένης ζώνης των δοκίδων προπορείας ενώ είναι ελάχιστες στην στέψη. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η βραχόμαζα έχει αποτονωθεί με βαθμό αποτόνωσης  $\lambda=1$ , τα μέτρα υποστήριξης δείχνουν να διατηρούν τις οριζόντιες μετατοπίσεις στα ίδια επίπεδα.



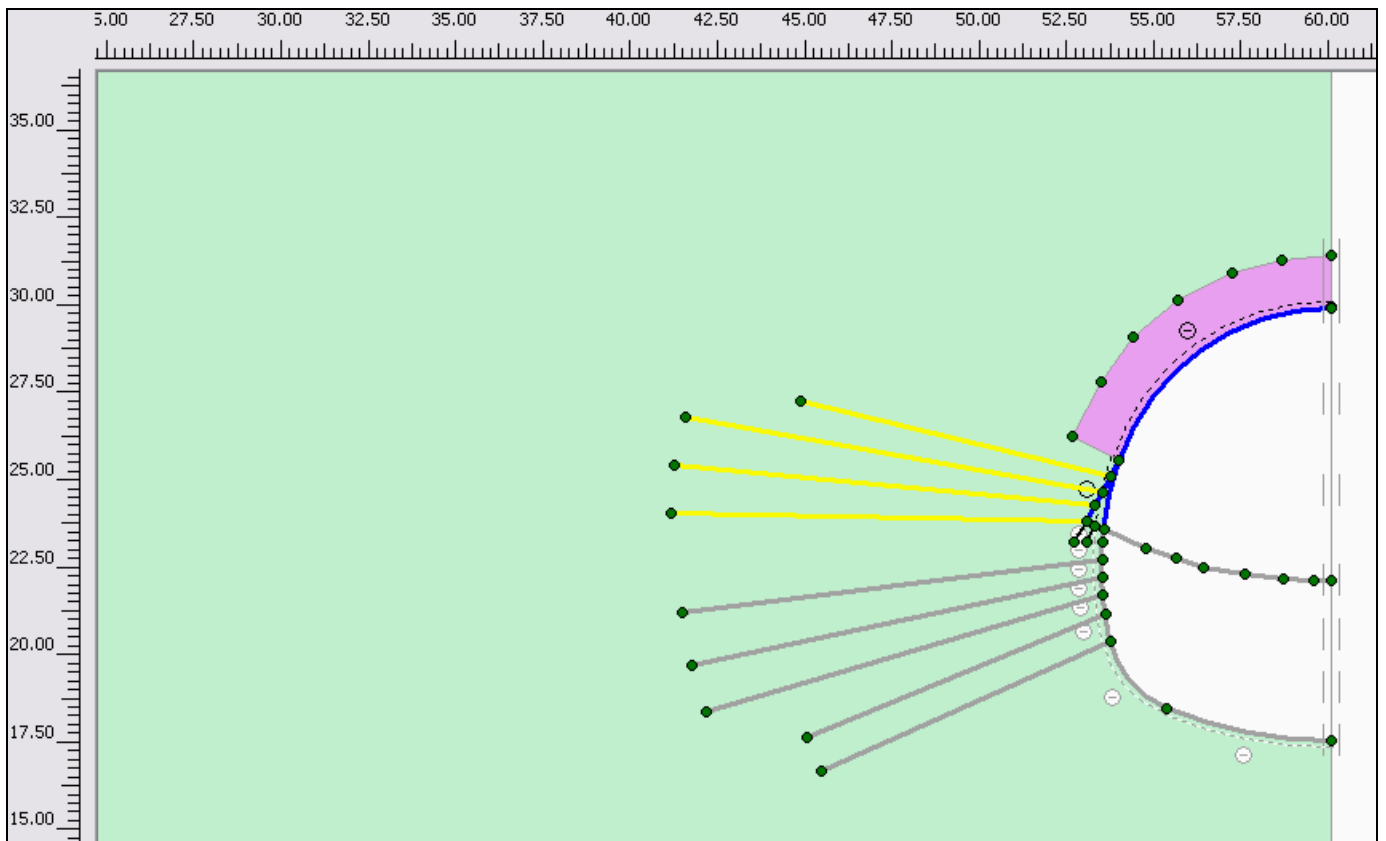
*Εικόνα 5.9: Κατακόρυφες μετακινήσεις της διατομής για το στάδιο προσομοίωσης 3.*

Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση εμφανίζεται στη παρειά της άνω ημιδιατομής και παίρνει την τιμή  $u_y = 165.61 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ η σύγκλιση στην κορυφή της σήραγγας είναι ίση με  $128.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

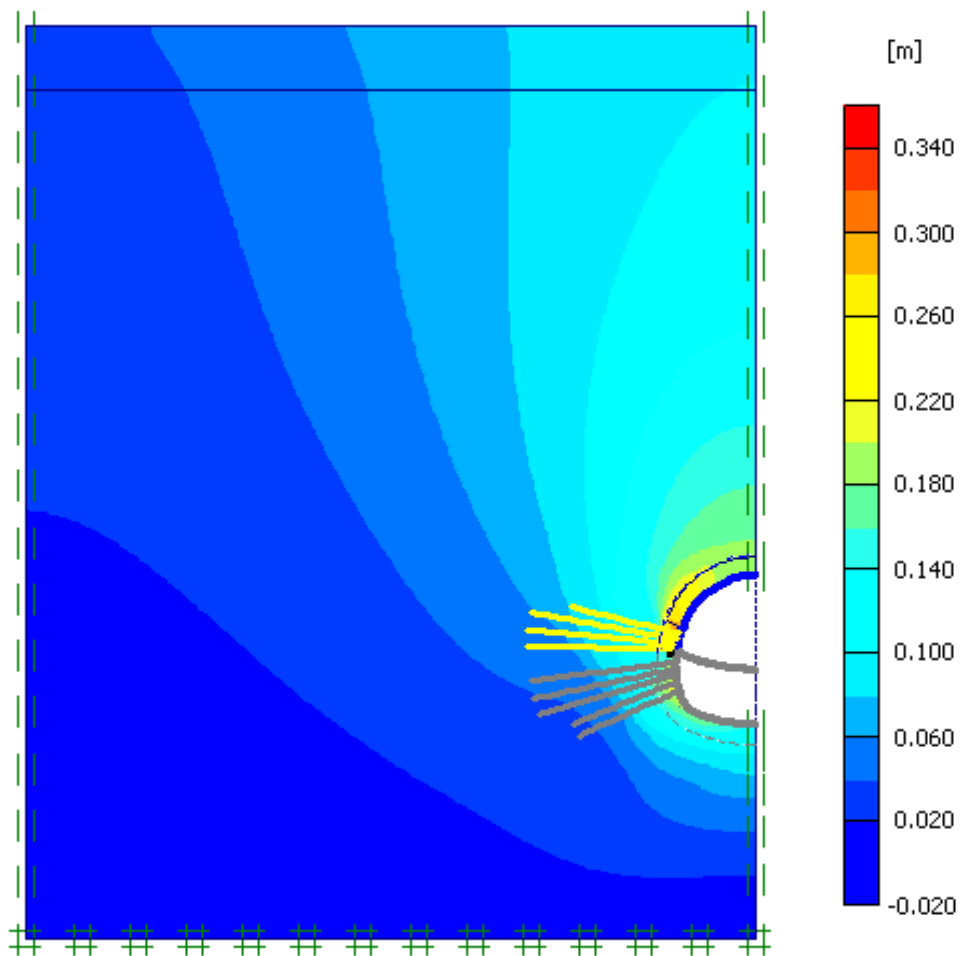
#### 5.2.4 Τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.

Στο στάδιο αυτό απενεργοποιείται το προσωρινό ανάστροφο τόξο και αποτονόνεται η βαθμίδα με  $\lambda=0.90$ , χωρίς να τίθενται σε εφαρμογή τα μέτρα υποστήριξης του τελικού ανάστροφου τόξου.

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται λεπτομερώς η μορφή της διατομής και στα Σχήματα 11, 12 και 13 υπολογίζονται κατά προσέγγιση οι μετακινήσεις.



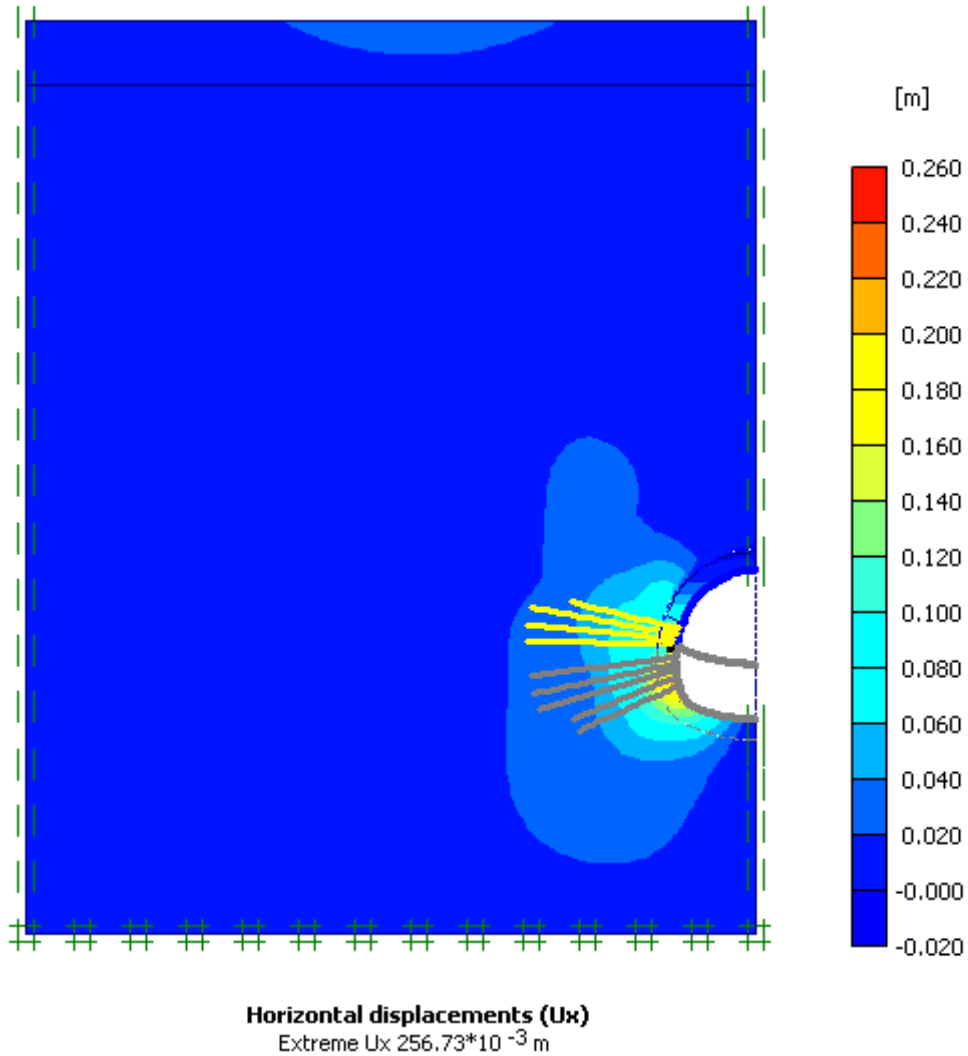
*Εικόνα 5.10: Χαρακτηριστικά της διατομής N3 για το τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*



**Total displacements (Utot)**  
Extreme Utot  $343.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

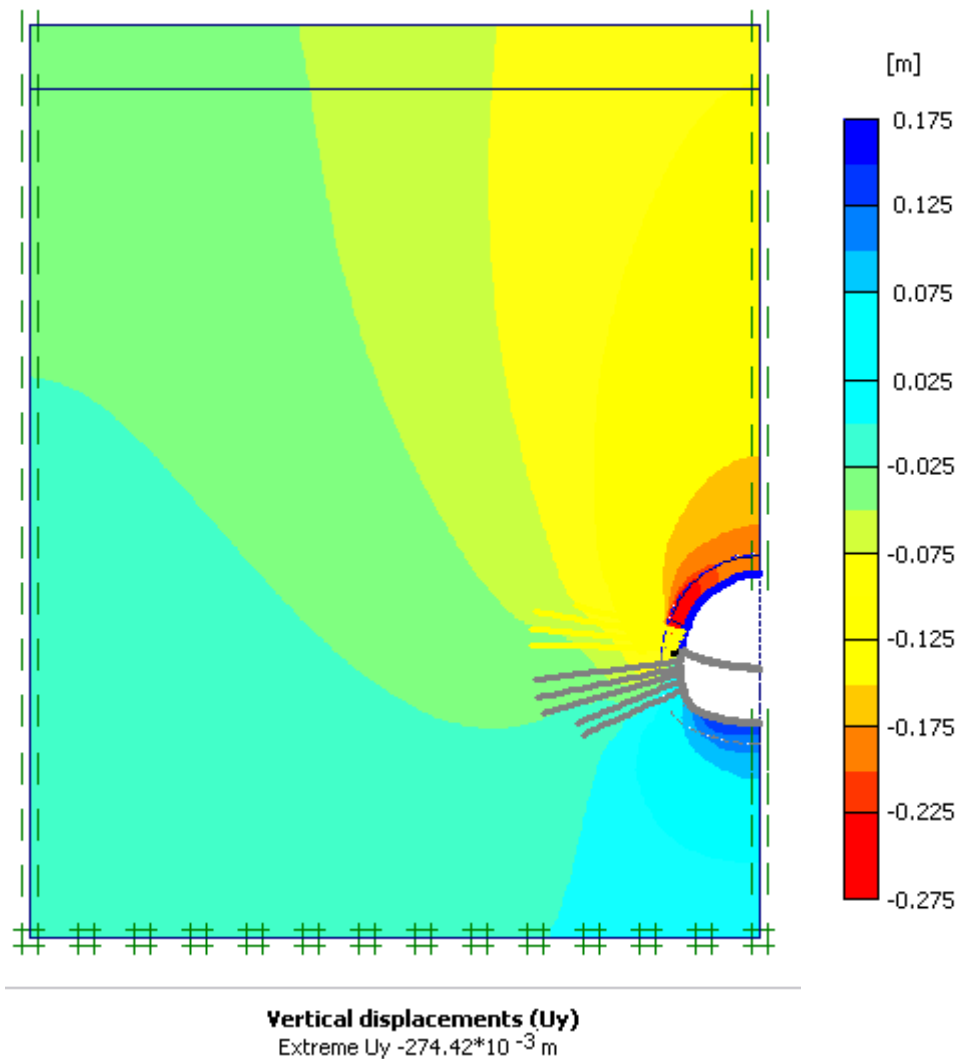
*Εικόνα 5.11: Ολικές μετατοπίσεις της σήραγγας για το τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*

Με την απομάκρυνση του προσωρινού ανάστροφου τόξου και την αποτόνωση της βαθμίδας, οι μέγιστες ολικές μετακινήσεις αυξάνονται σημαντικά και φτάνουν την τιμή  $u_{tot} = 343.88 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  (στην επιφάνεια μετά το πέρας της προσομοιωμένης ζώνης των δοκίδων προπορείας). Στη στέψη, η ολική μετακίνηση εκτιμάται ίση με  $185.20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



*Εικόνα 5.12: Οριζόντιες μετακινήσεις στο τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*

Σε αυτό το στάδιο, οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίζονται αυξημένες τόσο στην παρειά της άνω ημιδιατομής όσο και στην παρειά της βαθμίδας με την μέγιστη τιμή να είναι  $u_x=256.73 \cdot 10^{-3} \text{m}$ .



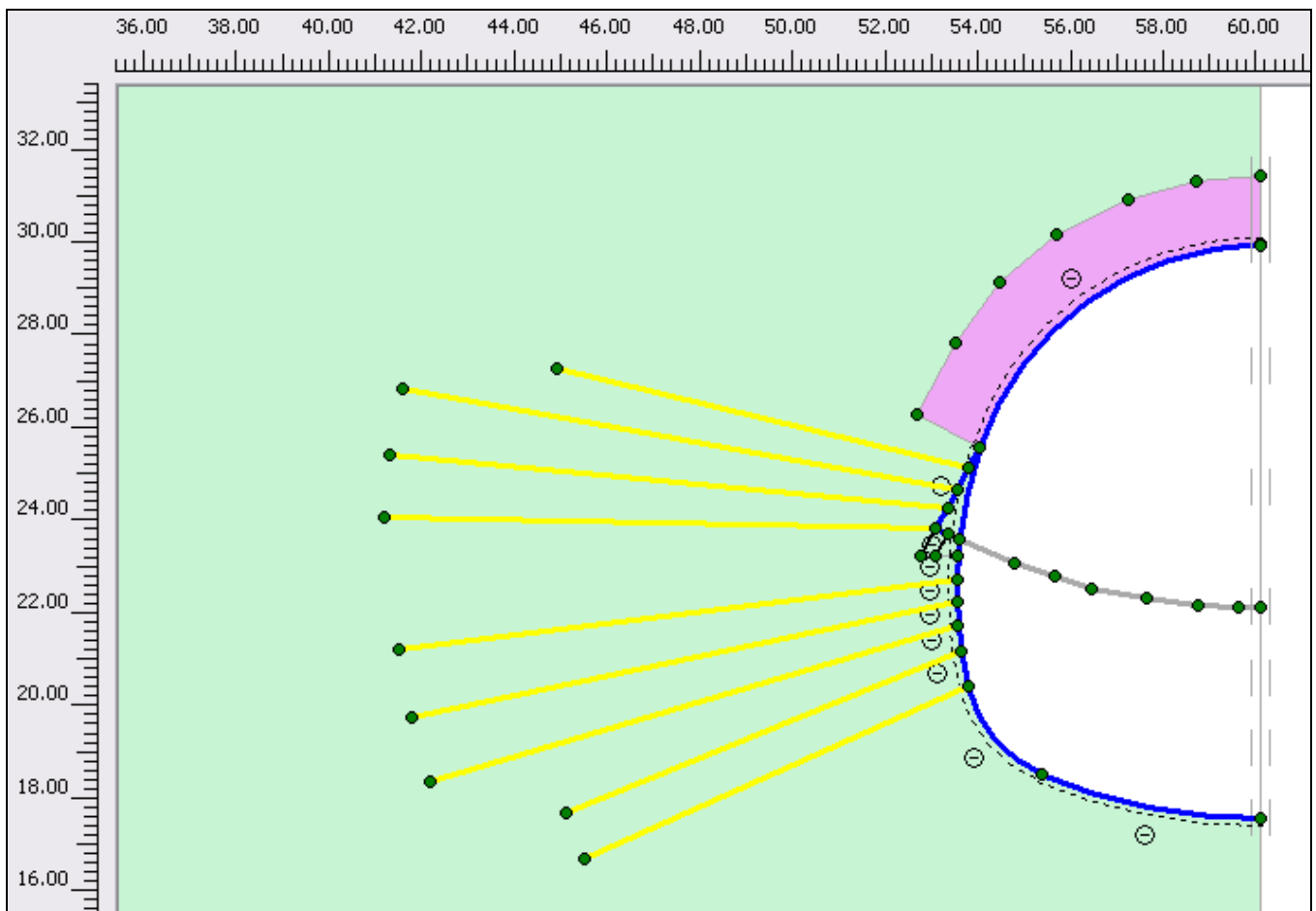
*Εικόνα 5.13: Κατακόρυφες μετακινήσεις της διατομής N3 στο τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*

Στο τέταρτο στάδιο προσομοίωσης η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη της διατομής προέκυψε από την ανάλυση  $u_y = 185.20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Στην παρειά, η μέγιστη μετακίνηση αυτής της φάσης προσομοίωσης στην κατακόρυφη διεύθυνση είναι  $u_{y \max} = 274.42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

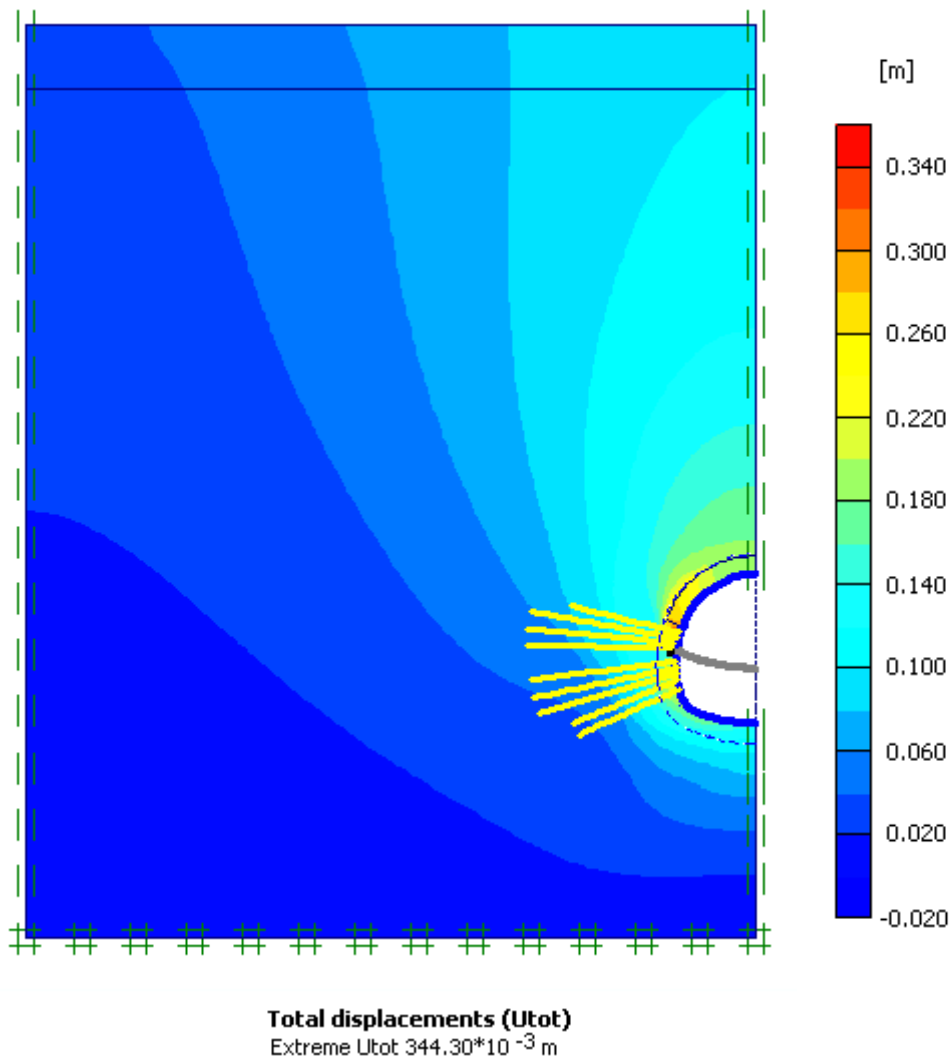


### 5.2.5 Πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.

Στο στάδιο αυτό ενεργοποιούνται όλα τα μέτρα προσωρινής υποστήριξης της τελικής διατομής. Η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά την πιο απομακρυσμένη διατομή από το μέτωπο διάνοιξης, με τον βαθμό αποτόνωσης να έχει την τιμή 1.

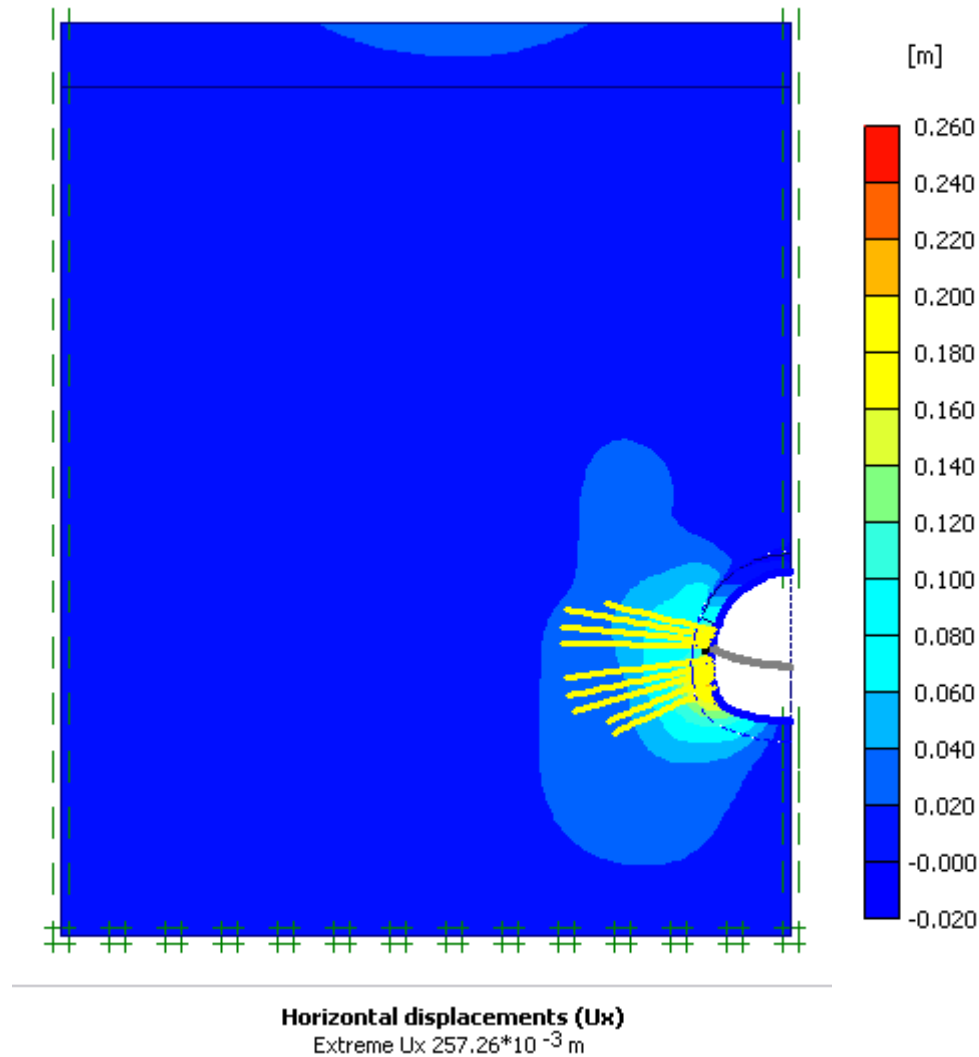


*Εικόνα 5.14: Τελική μορφή της διατομής N3 για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.*



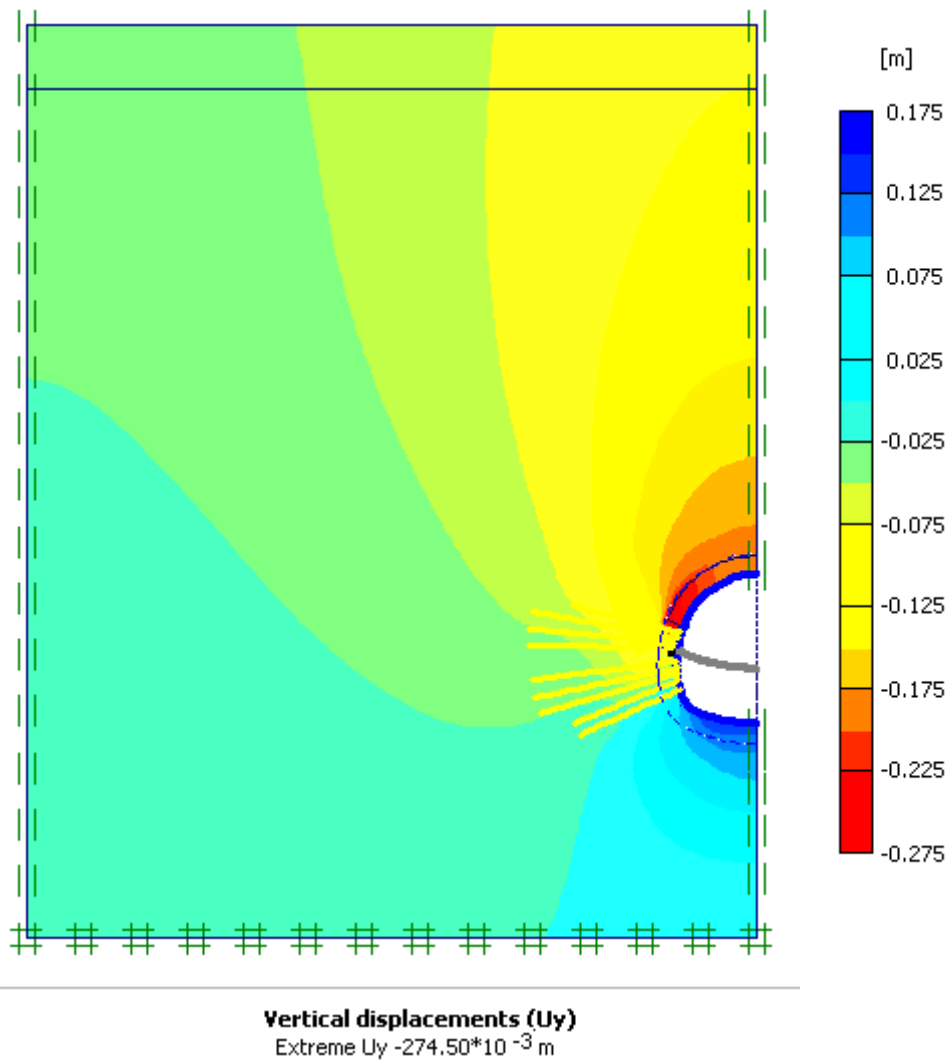
*Εικόνα 5.15: Ολικές μετατοπίσεις για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.*

Η παρεία της άνω ημιδιατομής εμφανίζει και στο τελευταίο στάδιο τις μεγαλύτερες ολικές μετακινήσεις με  $u_{tot}=344.30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ η αντίστοιχη τιμή στην στέψη ισούται με  $184.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



*Εικόνα 5.16: Οριζόντιες μετατοπίσεις στην διατομή N3 για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.*

Ιδιαίτερα αυξημένες εμφανίζονται οι οριζόντιες μετακινήσεις στην βαθμίδα της διατομής με τιμές λίγο μικρότερες από τις μέγιστες  $u_{x \max} = 257.26 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ λόγω συμμετρίας η μετακίνηση της κλείδας κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι μηδέν.



*Εικόνα 5.17: Κατακόρυφες μετατοπίσεις της διατομής N3 στο πέμπτο στάδιο της προσομοίωσης.*

Μετά την επίλυση της διατομής με το Plaxis προέκυψαν μέγιστες κατακόρυφες μετακινήσεις στην παρειά της άνω ημιδιατομής  $u_{y \max} = 274.50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  και η κατακόρυφη μετακίνηση στη στέψη ισούται με την ολική  $u = 184.96 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

### 5.3 Υπολογισμός πραγματικού βαθμού αποτόνωσης.

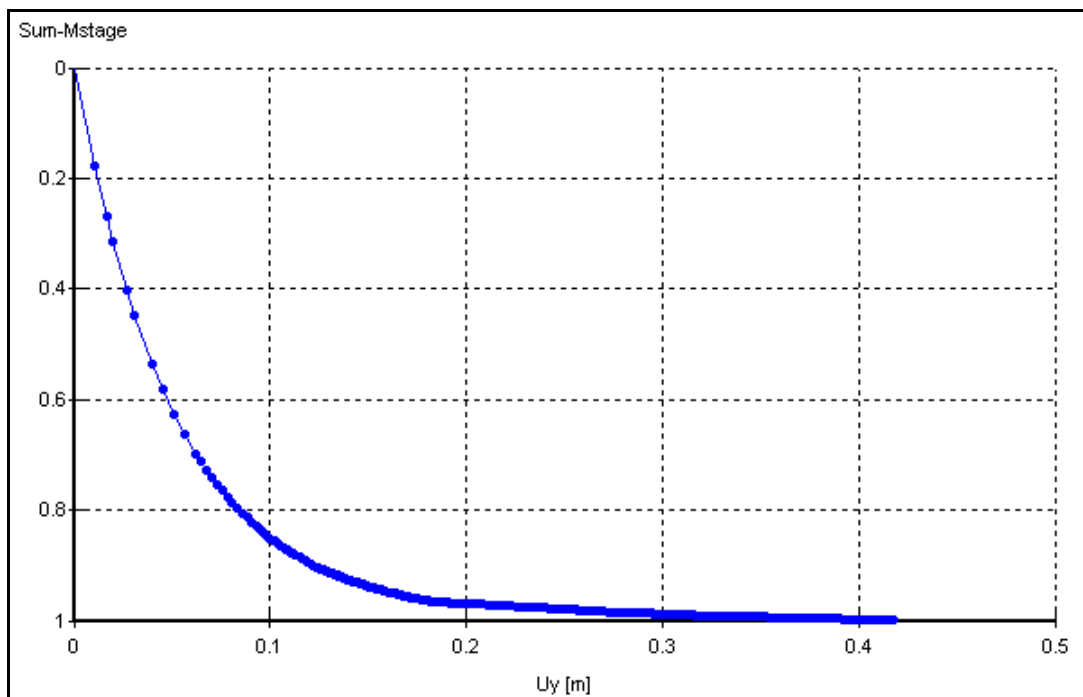
Οι εκτιμήσεις των συγκλίσεων σε αυτό το κεφάλαιο έγιναν με χρήση του Plaxis και ο βαθμός αποτόνωσης πήρε την τιμή  $\lambda=0,90$ . Η τιμή αυτή είναι υποθετική, χωρίς να ληφθεί υπόψη σε ποια απόσταση πίσω από το μέτωπο τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης. Για τον υπολογισμό του πραγματικού βαθμού αποτόνωσης θα γίνει χρήση του τύπου του Chern ο οποίος υπολογίζει το βαθμό αποτόνωσης σε κυκλική διατομή, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ανεξάρτητα από την τοποθέτηση μέτρων υποστήριξης στη διατομή.

Ο τύπος του Chern ισούται με :

$$U_R(x) = U_R^\infty [1 + \exp(0.9|x/R|)]^{-1.7}$$

Τα μέτρα υποστήριξης της Α' φάσης τοποθετούνται σε απόσταση  $x=2m$  πίσω από το μέτωπο διάνοιξης (άρα η απόσταση αυτή θεωρείται αρνητική) και η ισοδύναμη ακτίνα ισούται με  $R=5.05m$ . Ως  $U_R^\infty$  ορίζεται η μέγιστη ακτινική μετακίνηση της άντυνας της ανυποστήρικτης διατομής, σε αρκετά μεγάλη απόσταση δηλαδή από το μέτωπο εκσκαφής. Για τον υπολογισμό του θα χρειαστεί χάραξη της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης του σημείου της στέψης της ανυποστήρικτης άνω ημιδιατομής.

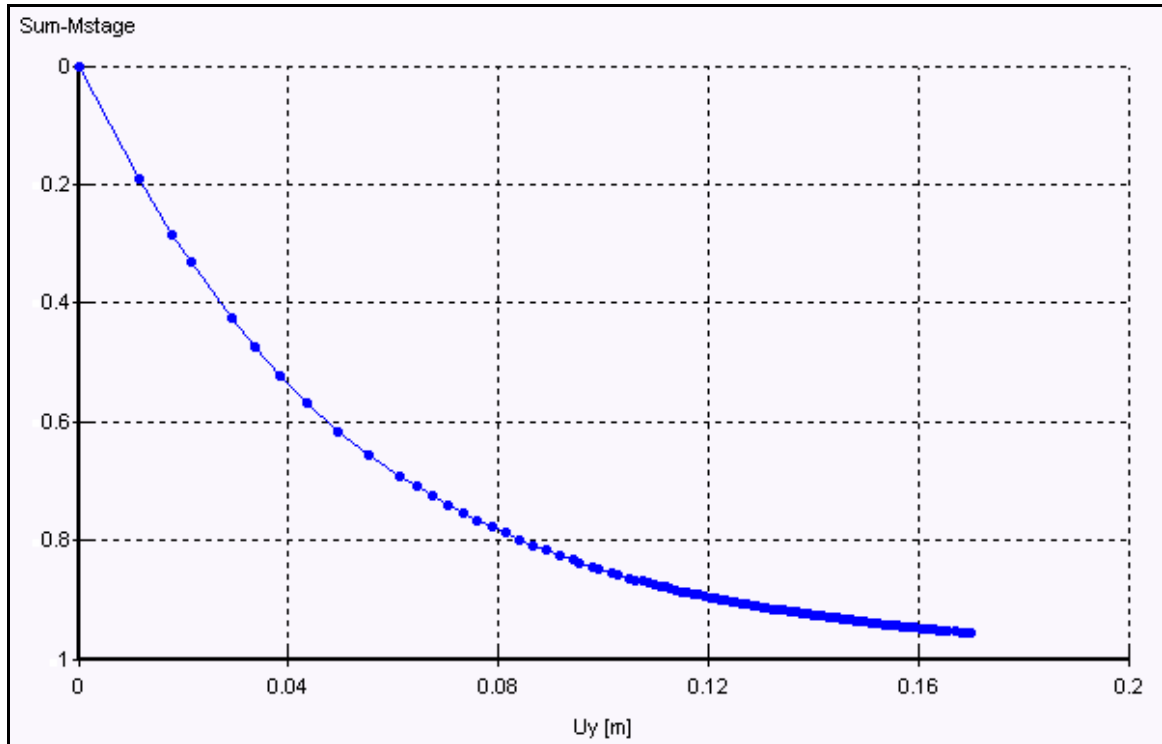
Με χρήση του Plaxis και για βαθμό αποτόνωσης  $\lambda=1$  προκύπτει η παρακάτω καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης (σχήμα 18) με τον βαθμό αποτόνωσης στον άξονα Y και την ακτινική μετατόπιση στον άξονα X.



**Εικόνα 5.18:** Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ανυποστήρικτης άνω ημιδιατομής με  $\lambda=1$ .

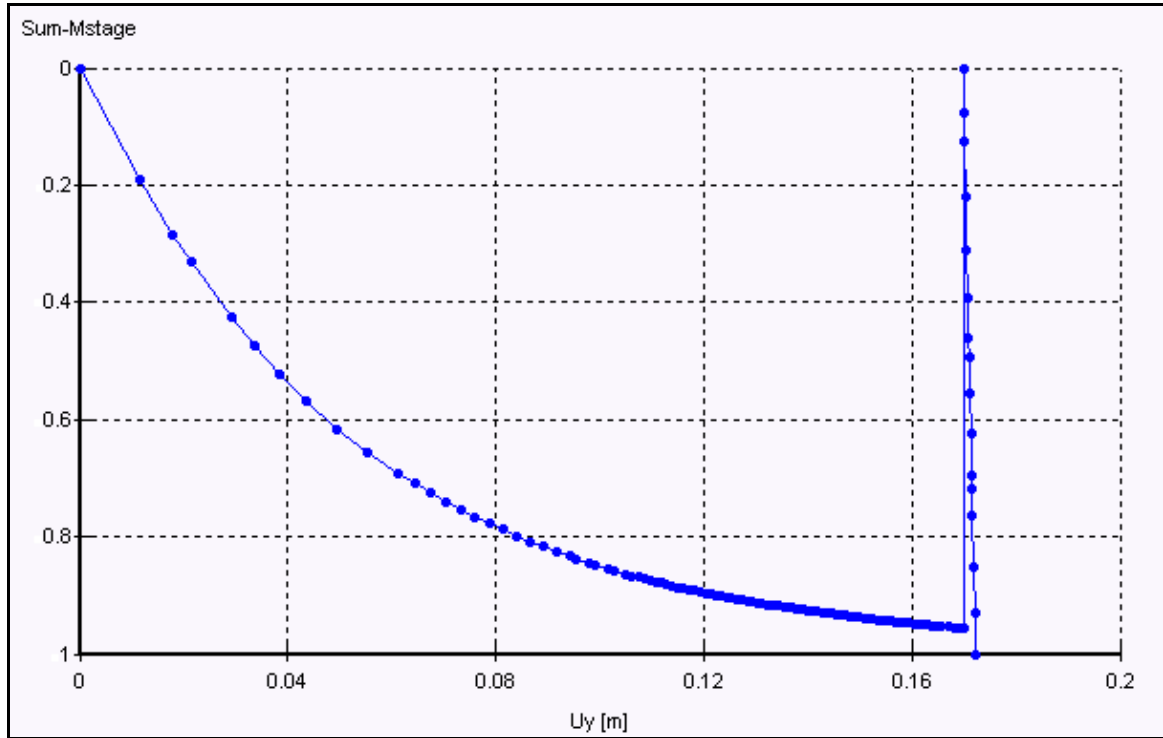
Παρόλο που οι ακτινικές μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες, ιδιαίτερα για  $\lambda > 0.90$ , η διατομή δεν καταρρέει και προκύπτει  $U_R^\infty = 0.418 \text{ m}$ . Η επίλυση του τύπου του Chern υπολογίζει την ακτινική μετακίνηση της ανυποστήρικτης σήραγγας για  $x=2\text{m}$  και προκύπτει  $U_{R(x=2\text{m})} = 0.406 * 0.418 \text{ m} = 0.17\text{m}$ . Από το σχήμα 18 και για  $U_\gamma = 0.17\text{m}$  προκύπτει  $\lambda = 0,96$ .

Στη συνέχεια γίνεται επίλυση του δεύτερου σταδίου προσομοίωσης (ανυποστήρικτη άνω ημιδιατομή) με βαθμό αποτόνωσης  $\lambda = 0,957$  και χαράσσεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης για το σημείο της στέψης της σήραγγας όπως φαίνεται στο σχήμα 19.



*Εικόνα 5.19: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ανυποστήρικτης άνω ημιδιατομής για  $\lambda=0,957$ .*

Επειδή ο τύπος του Chern ισχύει και για διατομές με την τοποθέτηση της επένδυσης, ο τελικός βαθμός αποτόνωσης θα προκύψει με  $U_R^\infty$  την μέγιστη μετακίνηση μετά το τρίτο στάδιο προσομοίωσης. Στο σχήμα 20 απεικονίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ως το τρίτο στάδιο προσομοίωσης και προκύπτει  $U_R^\infty=0.172m$ .



*Εικόνα 5.20: Καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης ,του σημείου της στέψης της διατομής, έως το τρίτο στάδιο προσομοίωσης.*

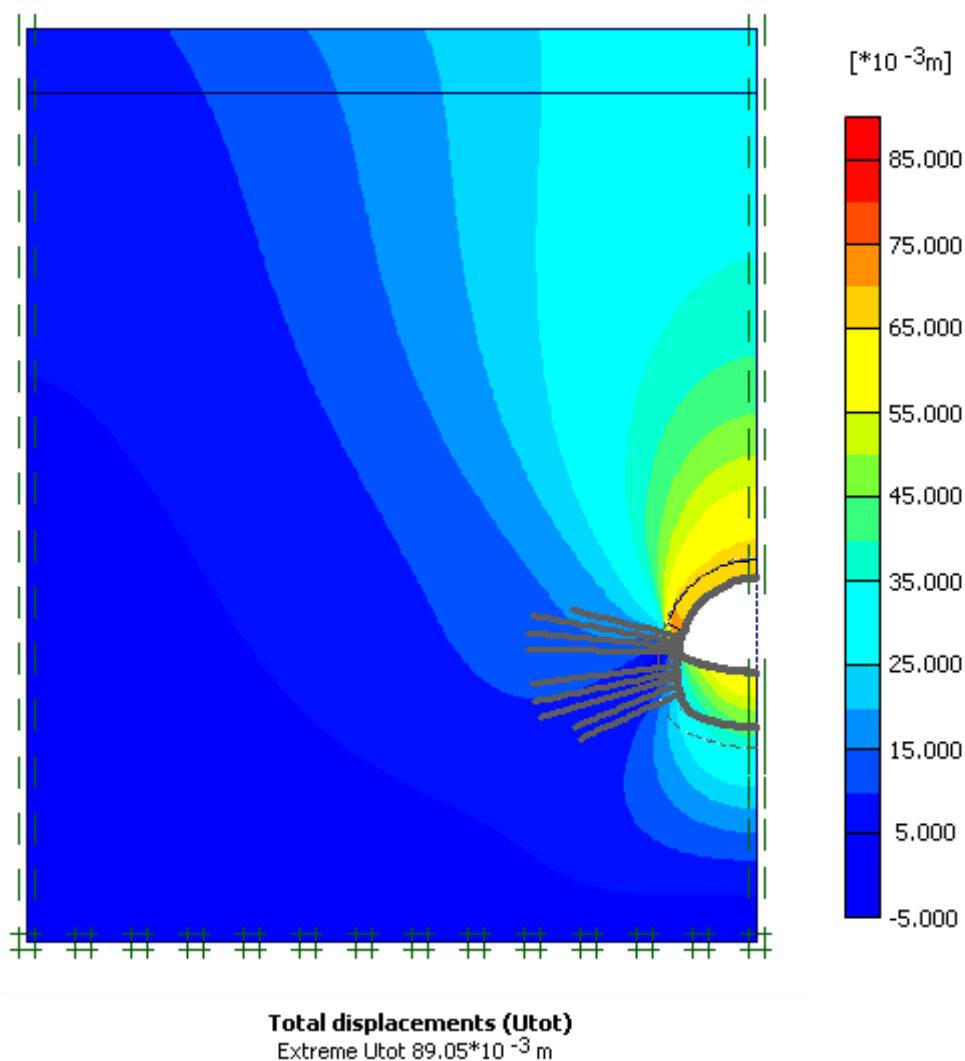
Τελικά,  $U_{R(x=2m)} = 0.406 * 0.172m = 0,07m$ . Από την παραπάνω καμπύλη ο βαθμός αποτόνωσης προκύπτει  $\lambda = 0.74$ .



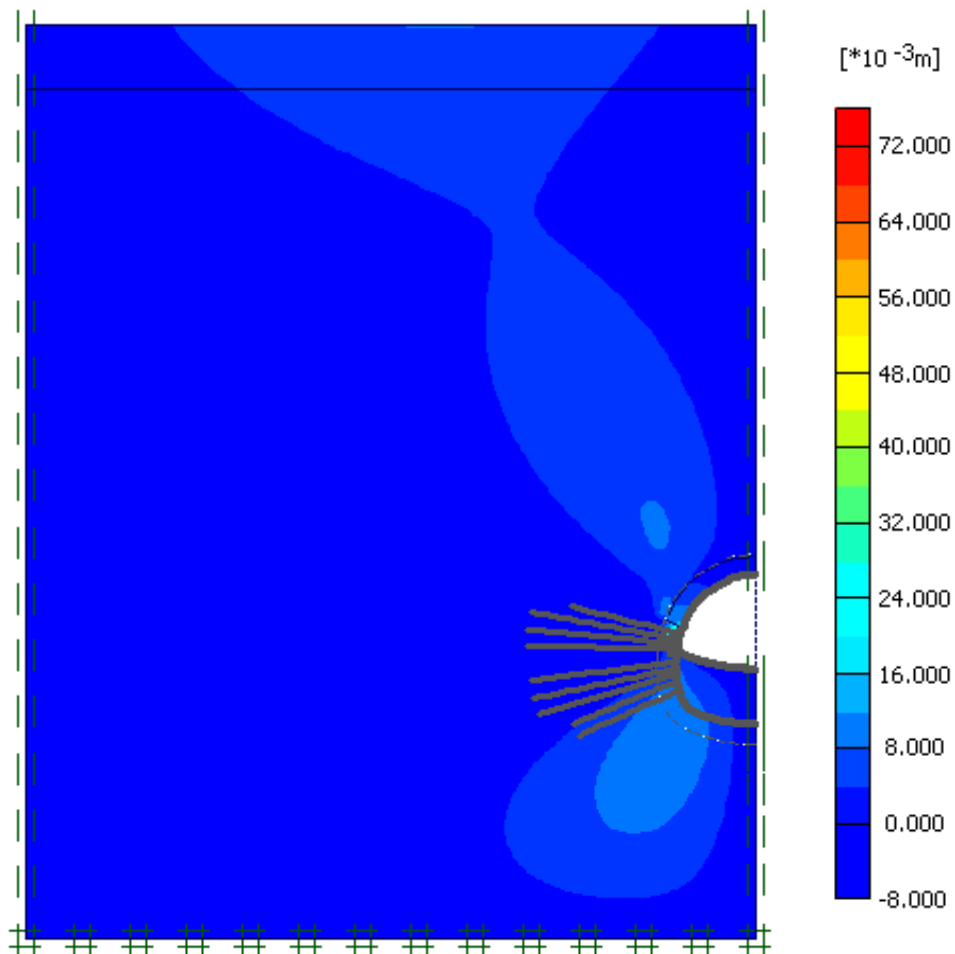
#### 5.4 Αποτελέσματα αναλύσεων τυπικής διατομής N3 για συντελεστή αποτόνωσης $\lambda=74\%$ .

Στην ενότητα αυτή θα υπολογιστούν οι συγκλίσεις της διατομής N3 για κάθε στάδιο προσομοίωσης, με βάση τον νέο βαθμό αποτόνωσης. Για το πρώτο στάδιο προσομοίωσης, τα αποτελέσματα είναι ίδια με τα παραπάνω και δεν χρειάζεται περαιτέρω σχολιασμός.

- Οι συγκλίσεις για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης αναμένονται σαφώς μικρότερες από εκείνες της ανάλυσης με  $\lambda=0.90$ . Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 21,22 και 23.



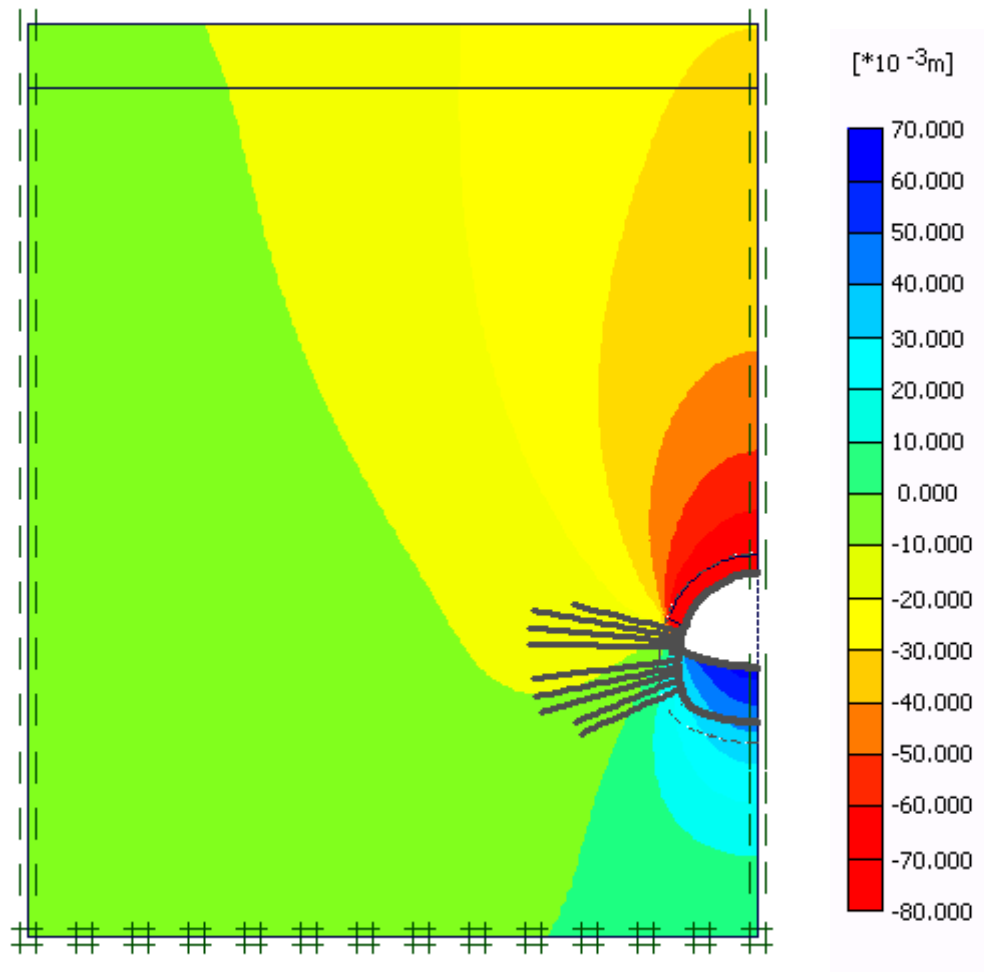
*Εικόνα 5.21: Ολικές παραμορφώσεις της διατομής για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης (αποτόνωση της άνω ημιδιατομής με  $\lambda=74\%$ ).*



**Horizontal displacements (Ux)**  
Extreme Ux 73.43\*10<sup>-3</sup> m

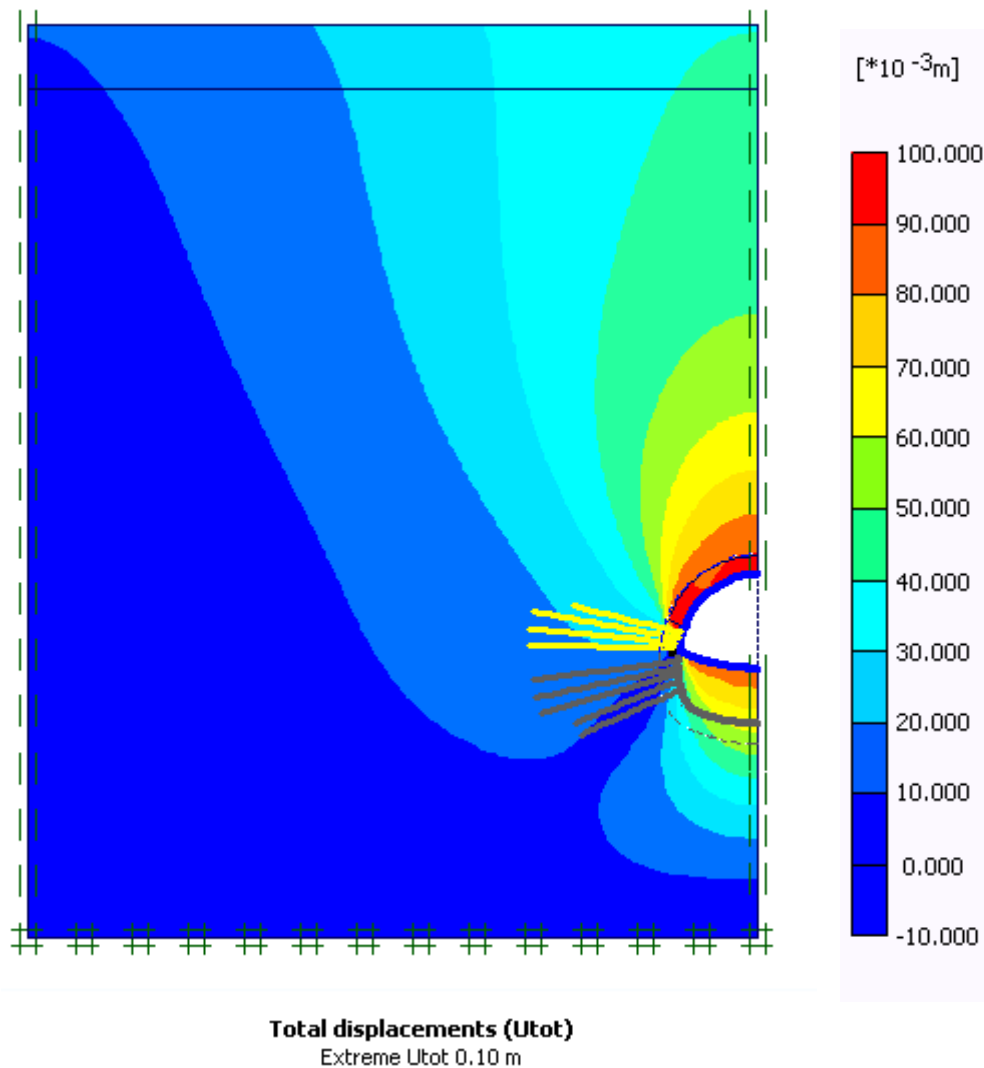
*Εικόνα 5.22: Οριζόντιες μετακινήσεις της διατομής για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.*

Οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι μηδενικές στην οροφή της διατομής και μεγιστοποιούνται στην παρειά της και κάτω από την ζώνη των spiles. Η μέγιστη μετακίνηση κατά την οριζόντια διεύθυνση είναι  $U_{xmax}=73.43 * 10^{-3}$  m.



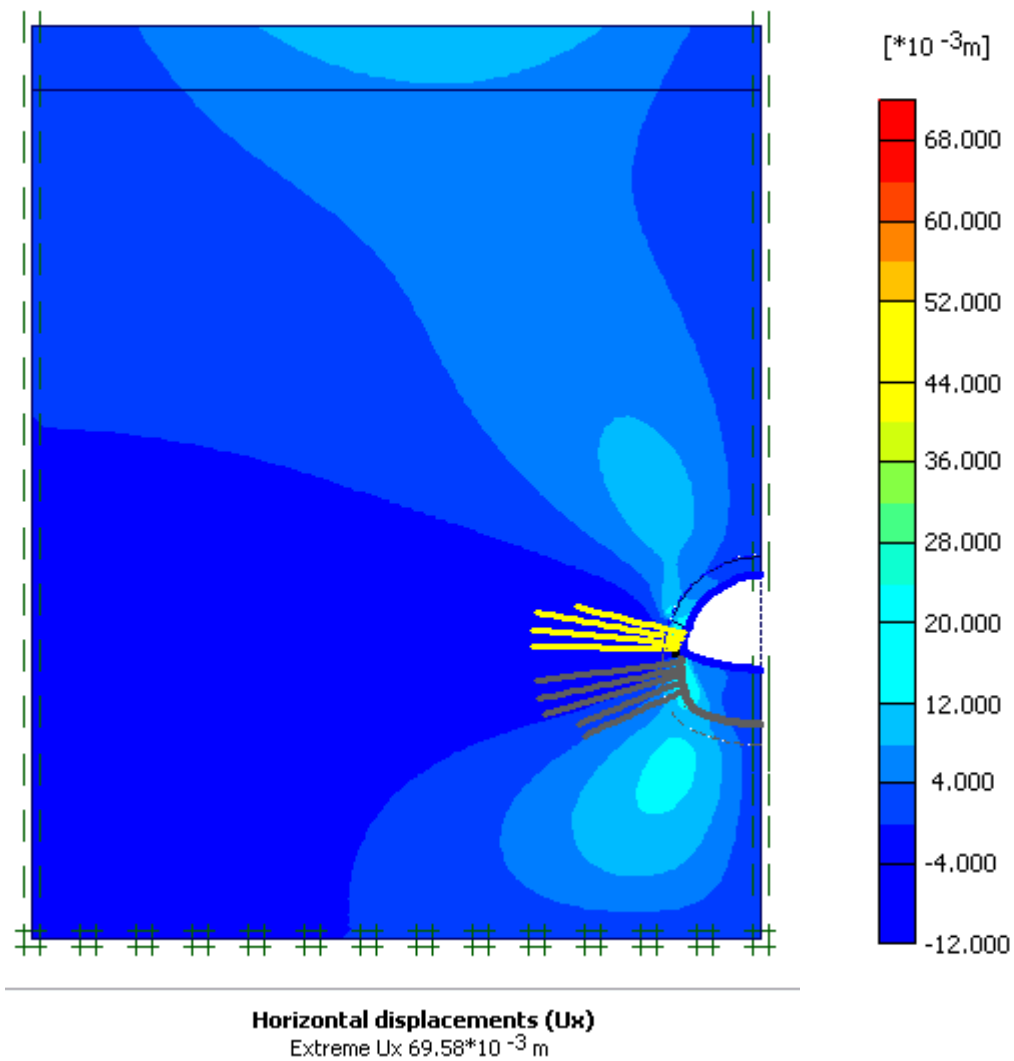
*Εικόνα 5.23: Κατακόρυφες μετατοπίσεις της διατομής για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.*

Η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση ,για το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης, πραγματοποιείται στην οροφή της άνω ημιδιατομής και είναι ίση με  $U_{y\max} = 71.30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Στη στέψη, η ακτινική μετατόπιση έχει την τιμή  $70.41 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



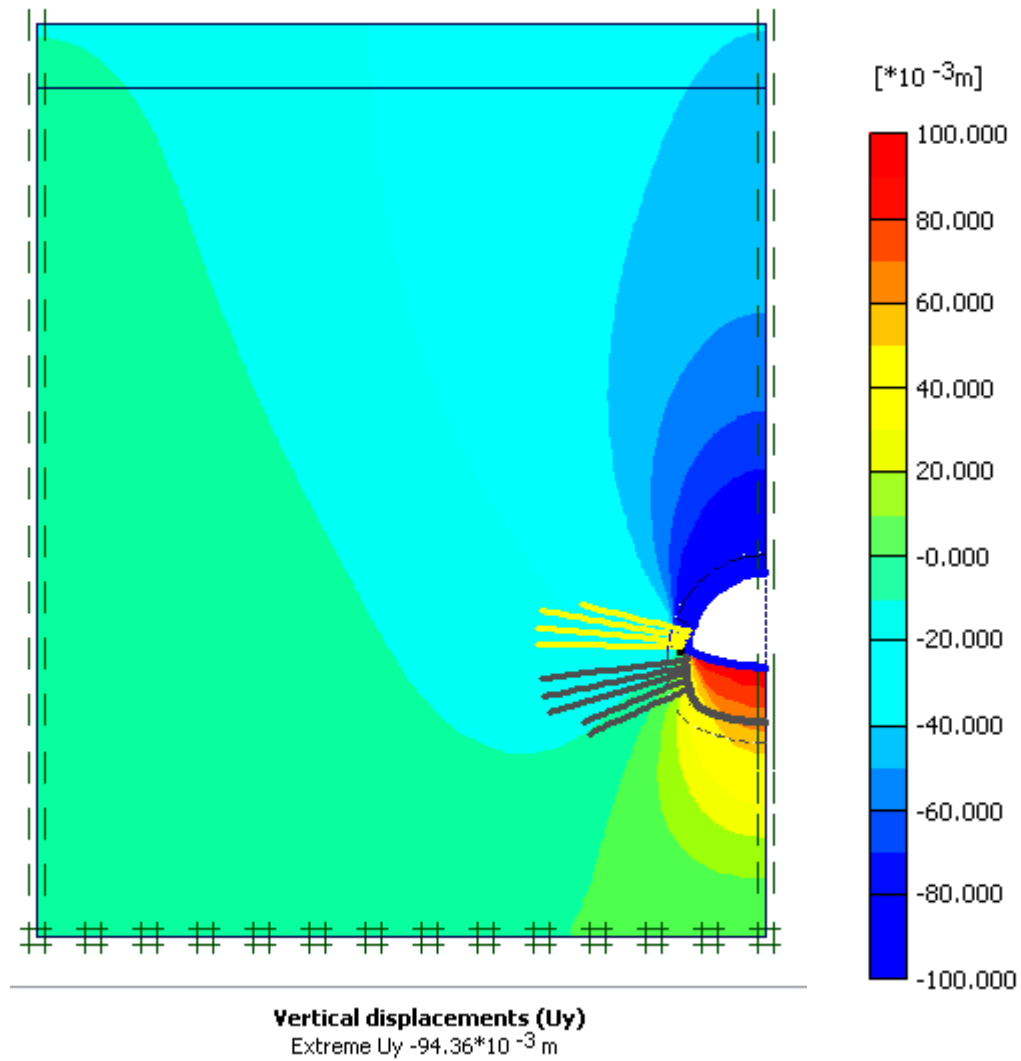
*Εικόνα 5.24: Ολικές μετατοπίσεις για το τρίτο στάδιο προσομοίωσης.*

Κατά το τρίτο στάδιο προσομοίωσης, όπου εκσκάπτεται η άνω ημιδιατομή και τοποθετείται η προσωρινή υποστήριξη, οι μέγιστες ολικές παραμορφώσεις παίρνουν την τιμή  $U_{\text{tot max}} = 0.10 \text{ m}$ .



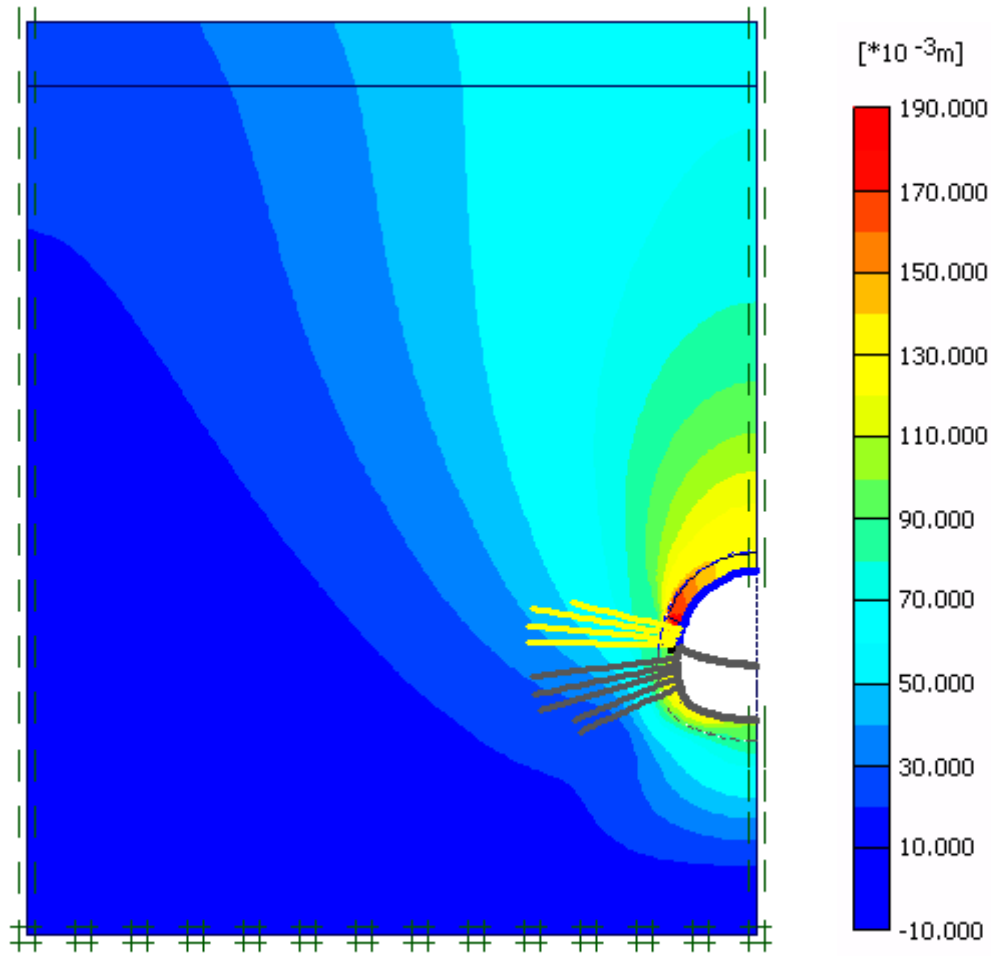
*Εικόνα 5.25: Κατανομή των οριζόντιων μετακινήσεων για το τρίτο στάδιο προσομοίωσης.*

Η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση παρατηρείται κάτω από την ενισχυμένη ζώνη των δοκίδων προπορείας και ισούται με  $U_{x\max} = 69.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



*Εικόνα 5.26 :Κατακόρυφες μετακινήσεις της διατομής N3 για το τρίτο στάδιο προσομοίωσης.*

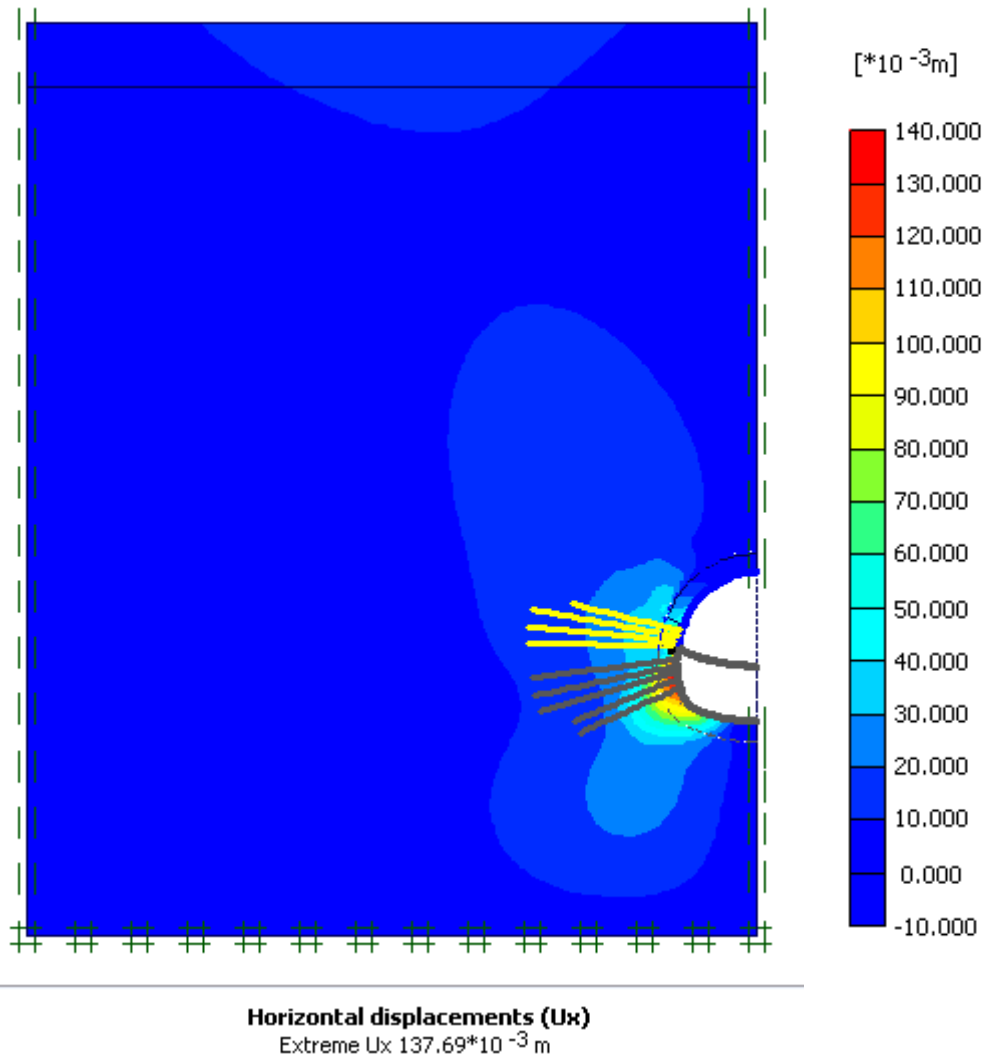
Οι κατακόρυφες μετακινήσεις εμφανίζουν ιδιαίτερα μεγάλες τιμές τόσο στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής όσο και κάτω από το προσωρινό ανάστροφο τόξο. Στη στέψη, η κατακόρυφη μετακίνηση παίρνει τη τιμή  $92.09 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  ενώ στο δάπεδο η κατακόρυφη ανύψωση έχει τιμή  $89.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .



**Total displacements (Utot)**  
Extreme Utot 187.64\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 5.27: Ολικές παραμορφώσεις της διατομής για το τέταρτο στάδιο προσομοίωσης (αποτόνωση της βαθμίδας με  $\lambda=74\%$ ).*

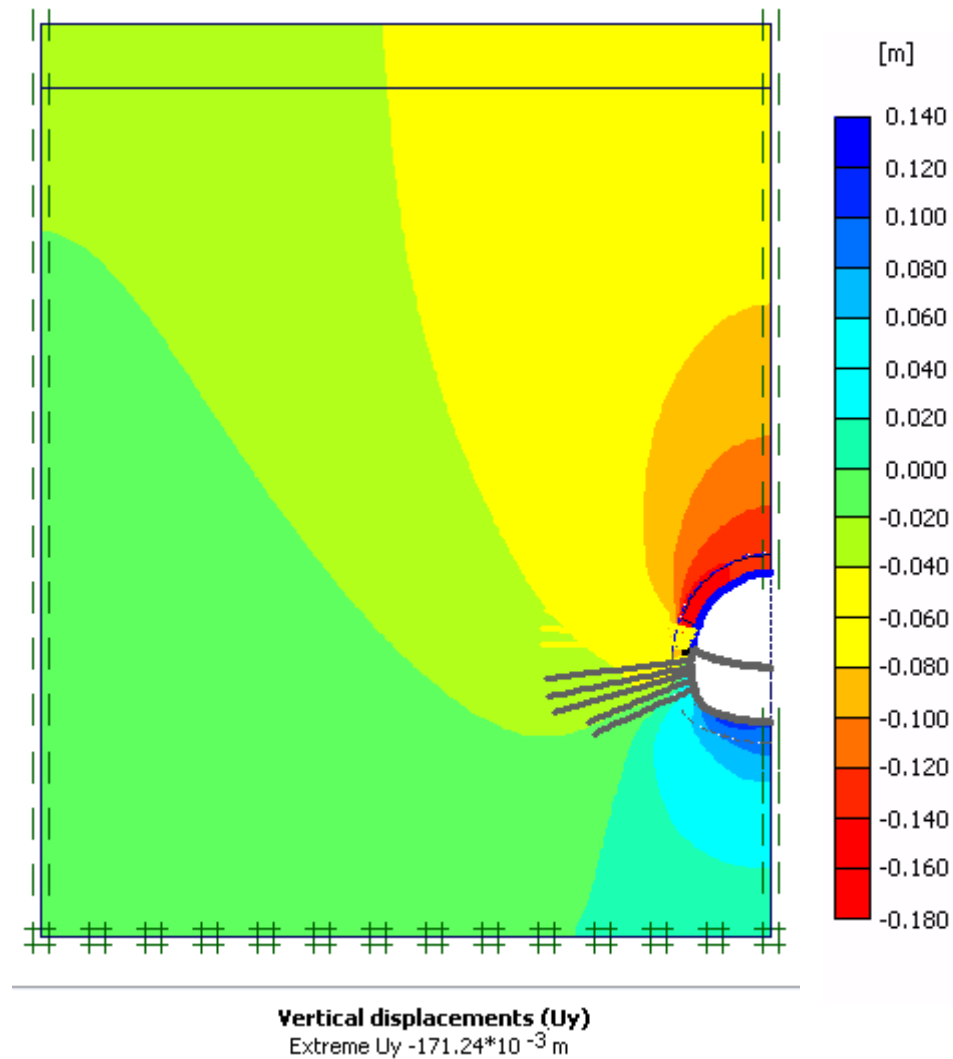
Η μέγιστη παραμόρφωση πραγματοποιείται κάτω από την ενισχυμένη ζώνη των δοκίδων προπορείας και έχει την τιμή  $U_{tot\ max}=187.64*10^{-3}\ m$ .



*Εικόνα 5.28: Οριζόντιες μετακινήσεις της διατομής N3 για το τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*

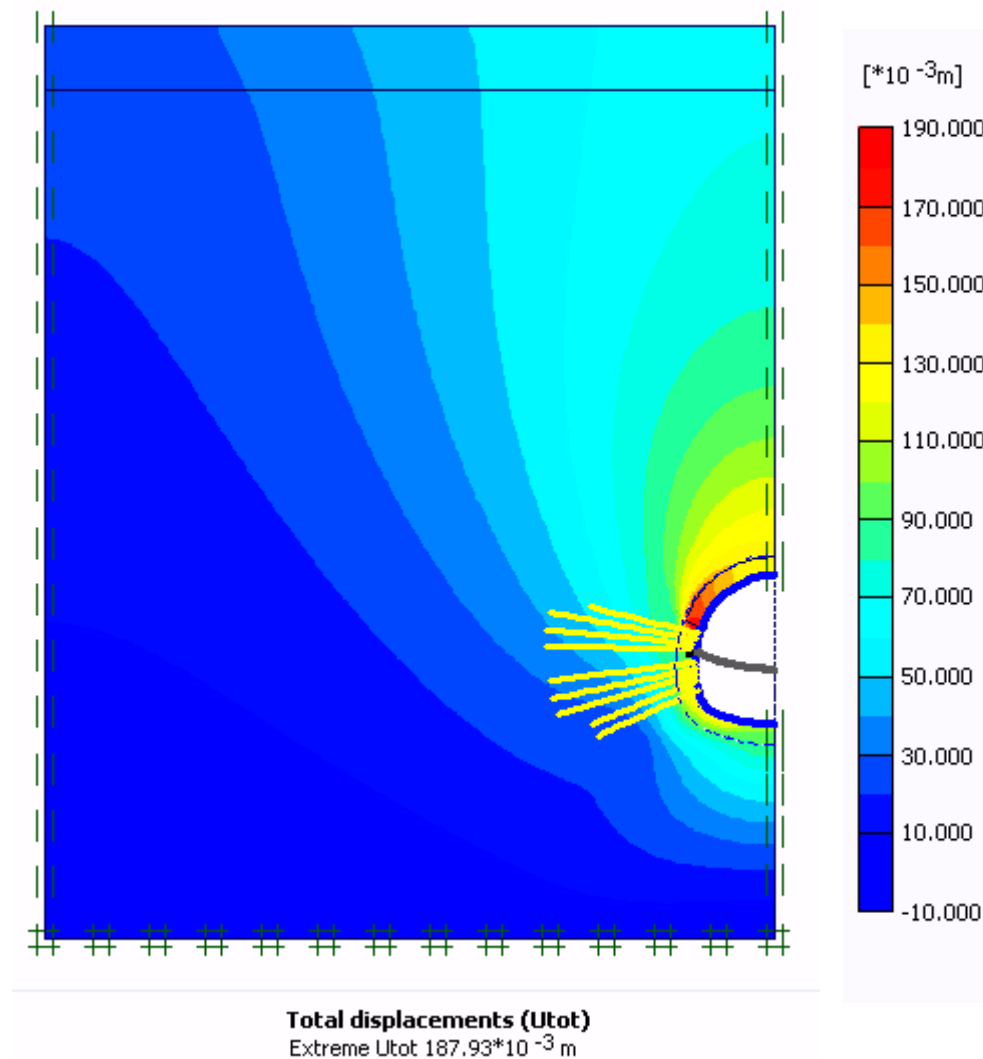
Παρατηρούμε ότι η οριζόντια παραμόρφωση γίνεται μέγιστη στην παρειά της βαθμίδας, στην περιοχή τοποθέτησης των αγκυριών και λαμβάνει την τιμή  $U_{x \max} = 137.69 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , ενώ στη στέψη δεν προκύπτει οριζόντια μετατόπιση.





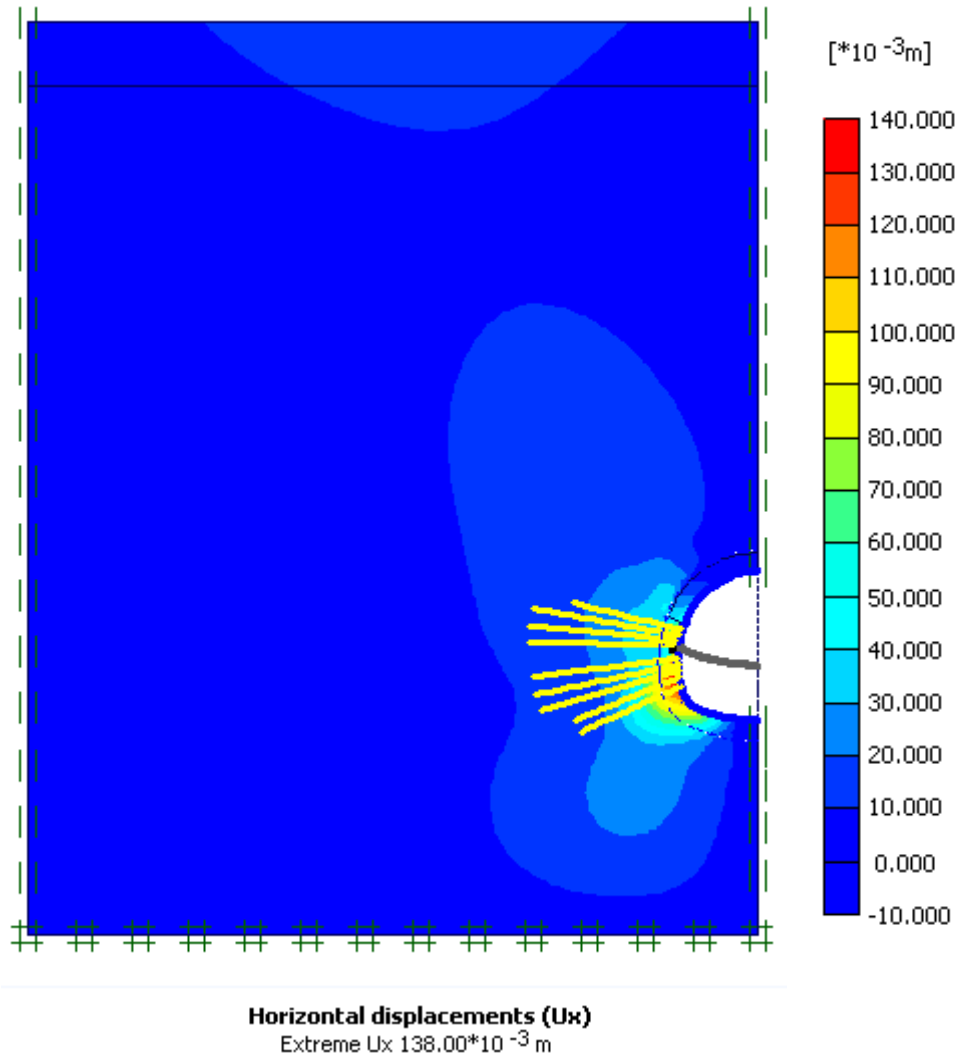
*Εικόνα 5.29: Κατακόρυφες μετακινήσεις της διατομής N3 για το τέταρτο στάδιο προσομοίωσης.*

Η κατακόρυφη μετακίνηση που μετρήθηκε μετά την αποτόνωση της βαθμίδας με  $\lambda=74\%$  στην οροφή της σήραγγας είναι  $U_y=135.04 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Η μέγιστη σύγκλιση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση εμφανίστηκε στην παρειά και αντιστοιχεί σε  $U_{y_{\max}}=171.24 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

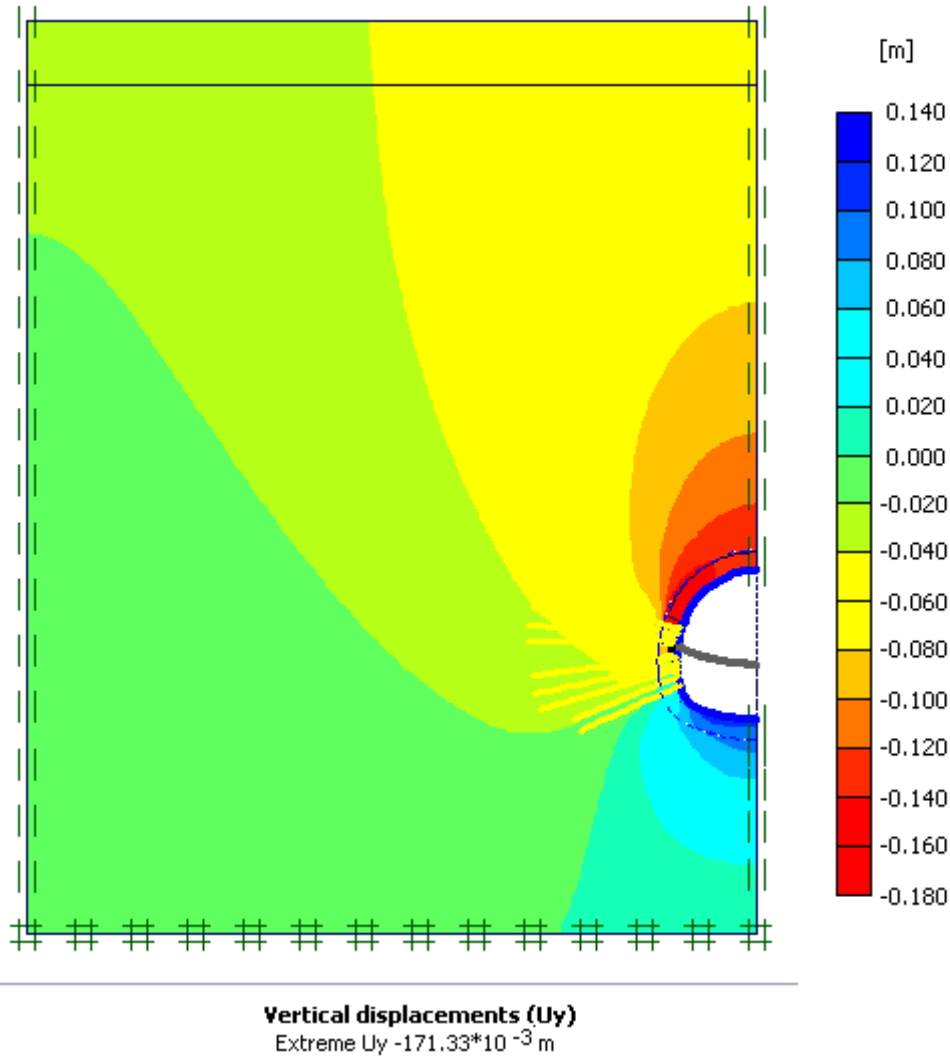


*Εικόνα 5.30: Ολικές παραμορφώσεις της διατομής για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.*

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η παραπάνω τιμή των συνολικών μετακινήσεων δεν αφορά πλήρη αποτόνωση της βραχόμαζας αφού η ανάλυση μέσω του Plaxis διακόπτεται αρκετά νωρίς λόγω «κατάρρευσης» της διατομής. Είναι αναμενόμενο λοιπόν και τα επόμενα ήδη μετατοπίσεων να είναι αρκετά συντηρητικά.



*Εικόνα 5.31: Οριζόντιες μετακινήσεις της διατομής N3 για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης.*



*Εικόνα 5.32: Κατακόρυφες μετακινήσεις της διατομής N3 για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης (ολοκλήρωση της εκσκαφής και εφαρμογή της άμεσης υποστήριξης).*

Η εικόνα των κατακόρυφων μετακινήσεων του Σχήματος 32 υποδεικνύει την εμφάνιση των μέγιστων στην παρειά της Α' φάσης, με  $U_{y\max}=171.33 \cdot 10^{-3}$  m. Στην κλείδα της οροφής υπολογίστηκε σύγκλιση  $U_y=134.81 \cdot 10^{-3}$  m.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ**

### **6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΣΥΓΚΛΙΣΕΩΝ ΤΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΣΗΡΑΓΓΑΣ ΑΝΘΟΧΩΡΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PLAXIS 3D TUNNEL.**

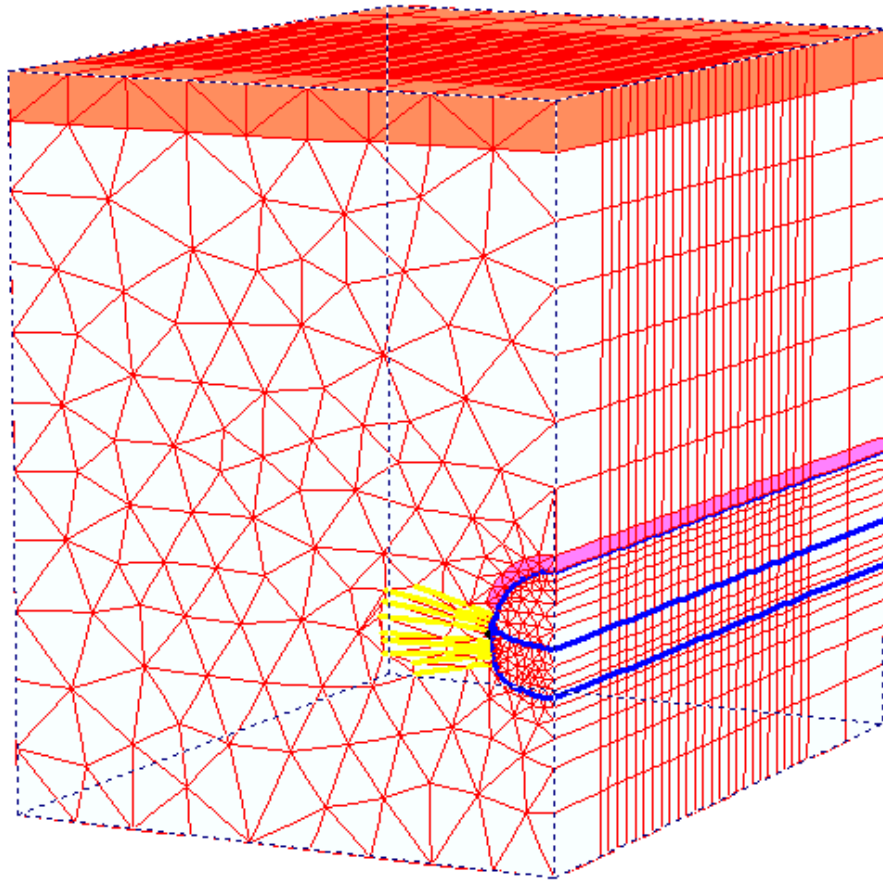
## 6.1. Γενικά.

Στο παρόν Κεφάλαιο έγινε μια προσπάθεια λεπτομερέστερης ανάλυσης του προσομοιώματος της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου σε σχέση με την ανάλυση του Κεφαλαίου 5 που έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος Plaxis V8.2 2D. Για την ανάλυση αυτή έγινε χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 3D Tunnel το οποίο παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα προσομοίωσης της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας σε μεγαλύτερο αριθμό φάσεων, τη δυνατότητα επιλογής του βήματος προώθησης της εκσκαφής, της δυνατότητα επιλογής της απόστασης της τοποθέτησης των αγκυριών σε σχέση με το μέτωπο κλπ. Σημαντικό ρόλο στην τελική τιμή των παραμορφώσεων παίζει μεταξύ άλλων η απόσταση μεταξύ του μετώπου διάνοιξης και της εκσκαφής της βαθμίδας σε αντίθεση με τη διδιάστατη ανάλυση όπου η επιλογή του βαθμού αποτόνωσης ( $\lambda$ ) καθόριζε σε μεγάλο βαθμό την έκταση των ακτινικών μετατοπίσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος, περιγράφονται λεπτομερώς οι φάσεις προσομοίωσης και εξετάζονται οι συγκλίσεις της κλείδας της οροφής των Επιπέδων P(-40.0 m) και C(-14.0m) για κάθε φάση ξεχωριστά.

## 6.2. Ιδιότητες του προσομοιώματος.

Στο επίπεδο **x-y** το προσομοίωμα της σήραγγας είναι ίδιο με εκείνο της εικόνας 4.1 του Κεφαλαίου 4, δηλαδή το έδαφος έχει 60 m εύρος στον **άξονα x**, 70 m εύρος στον **άξονα y** και τα τελευταία 45 m έχουν αντικατασταθεί από μια υποκατάστατη ζώνη πάχους 5 m.

Στον **άξονα z** το προσομοίωμα έχει μήκος 80m, χωρίστηκε σε 28 slices και επιλέχθηκε βήμα προχώρησης 2m. Εξαιρέση αποτελούν το slice 1 και slices 27 και 28 τα οποία είχαν εύρος 10 m το καθένα έτσι ώστε τα σύνορα του προσομοιώματος να μην επηρεάζουν τις μέγιστες τιμές των παραμορφώσεων. Στην εικόνα 6.1 που ακολουθεί απεικονίζονται επακριβώς τα επίπεδα (planes), το εύρος του προσομοιώματος στις τρεις διαστάσεις, ο κάρναβος των πεπερασμένων στοιχείων και η τυπική μορφή της σήραγγας.



*Εικόνα 6.1.Χαρακτηριστικά του προσομοιώματος της σήραγγας Ανθοχωρίου με χρήση του προγράμματος Plaxis 3D Tunnel.*

### 6.3.Φάσεις Προσομοίωσης.

Η εκσκαφή και άμεση υποστήριξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε σε 25 φάσεις μετά το τέλος των οποίων μετρήθηκαν οι μέγιστες συγκλίσεις. Στη συνέχεια περιγράφεται λεπτομερώς η κάθε φάση προσομοίωσης και σχολιάζεται κάθε φορά η επιλογή των μέτρων υποστήριξης και οι τιμές των ακτινικών μετατοπίσεων.

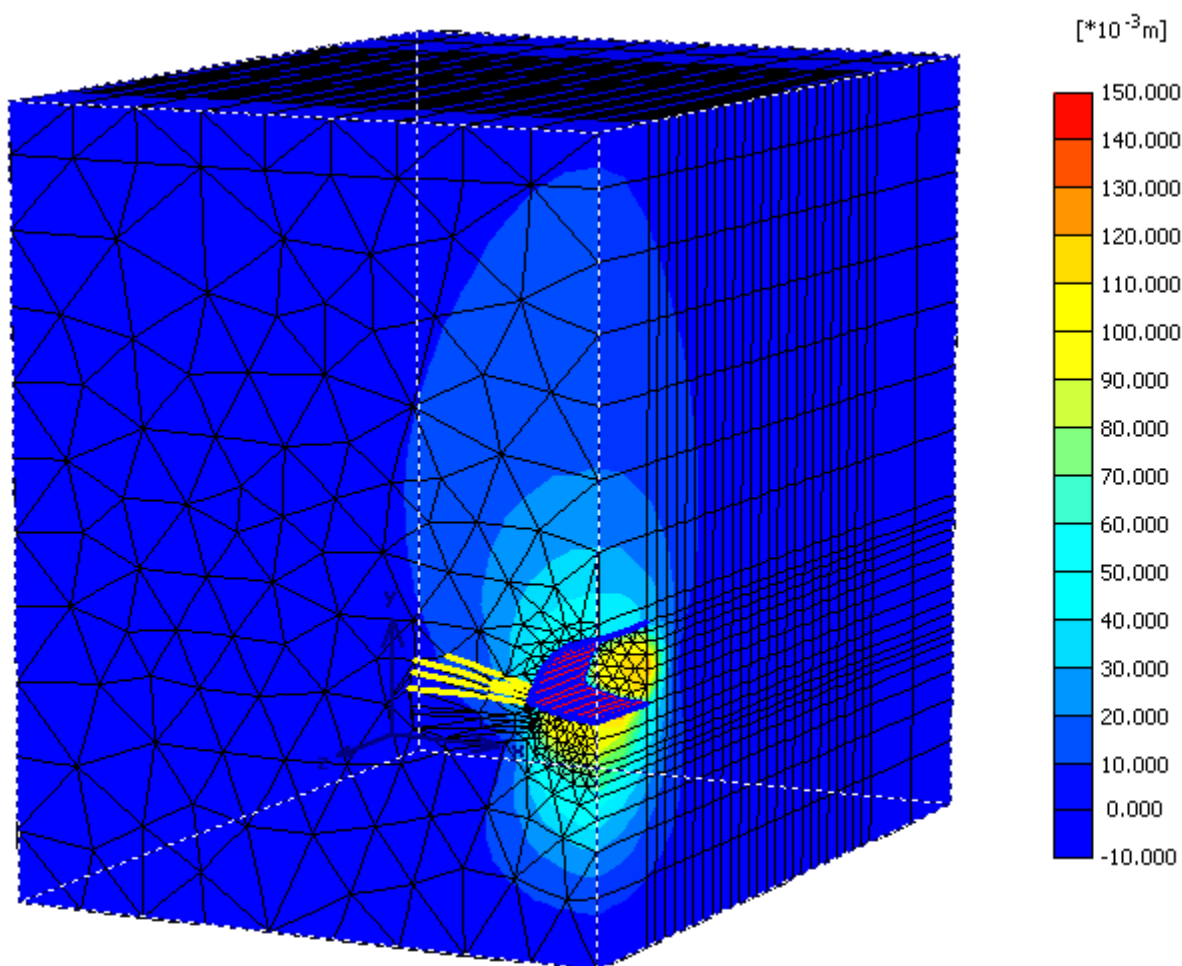
ΦΑΣΗ 1		
slices	1	Εκσκαφή και πλήρη υποστήριξη της άνω ημιδιατομής.
	2,3,4	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.

Το slice 1 έχει εύρος 10m, πραγματοποιείται εκσκαφή της άνω ημιδιατομής και υποστήριξη του κελύφους με συνδυασμό δοκίδων προπορείας, αγκυριών, πλευρικής διεύρυνσης, μικροπασσάλων, δικτυωτών πλαισίων και εκτοξευόμενου σκυροδέματος με χαρακτηριστικές τιμές  $EA=1,329 E+07 \text{ kN/m}$  ,  $EI=9.568 E+04 \text{ kN/m}^2/\text{m}$  και



συνολικού πάχους 30cm. Επιπλέον ενεργοποιείται το προσωρινό ανάστροφο τόξο από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και  $E=25\text{GPa}$ .

Οι δοκίδες προπορείας έχουν μήκος 6m και το βήμα προχώρησης του μετώπου είναι 2m, επομένως στην πρώτη φάση πραγματοποιείται ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας για τα slices 2,3,4.



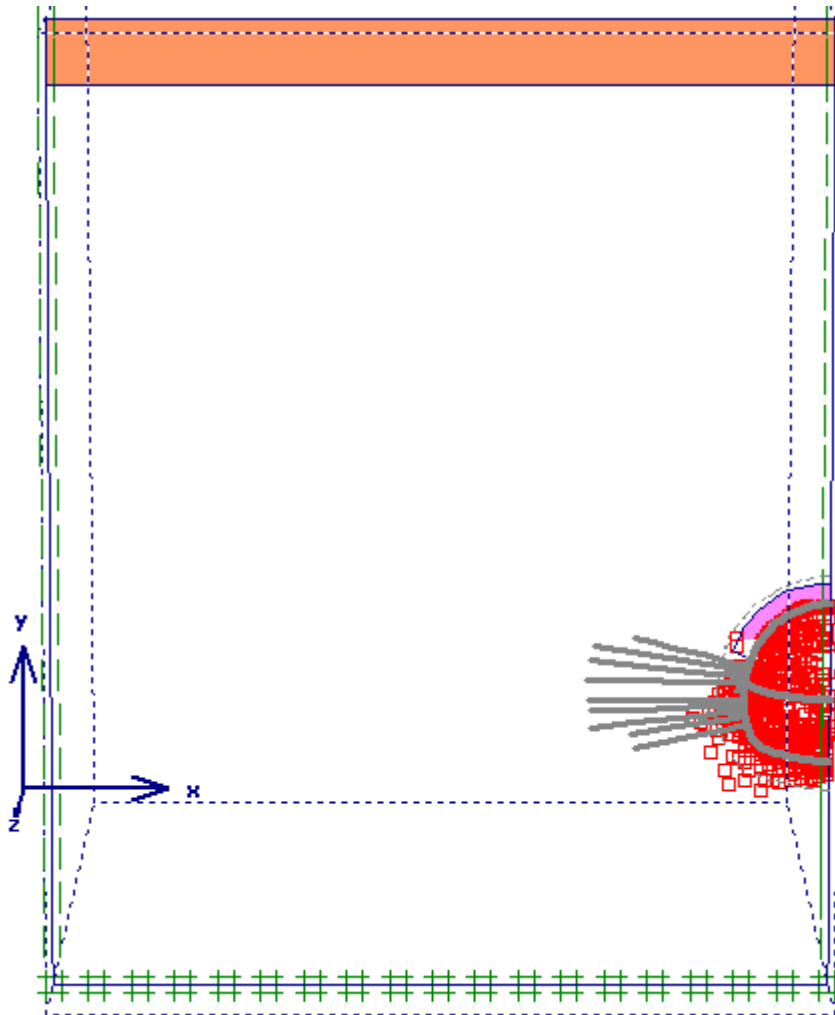
**Total displacements ( $U_{tot}$ )**

Extreme  $U_{tot}$   $141,09 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.2. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την πρώτη φάση προσομοίωσης.*

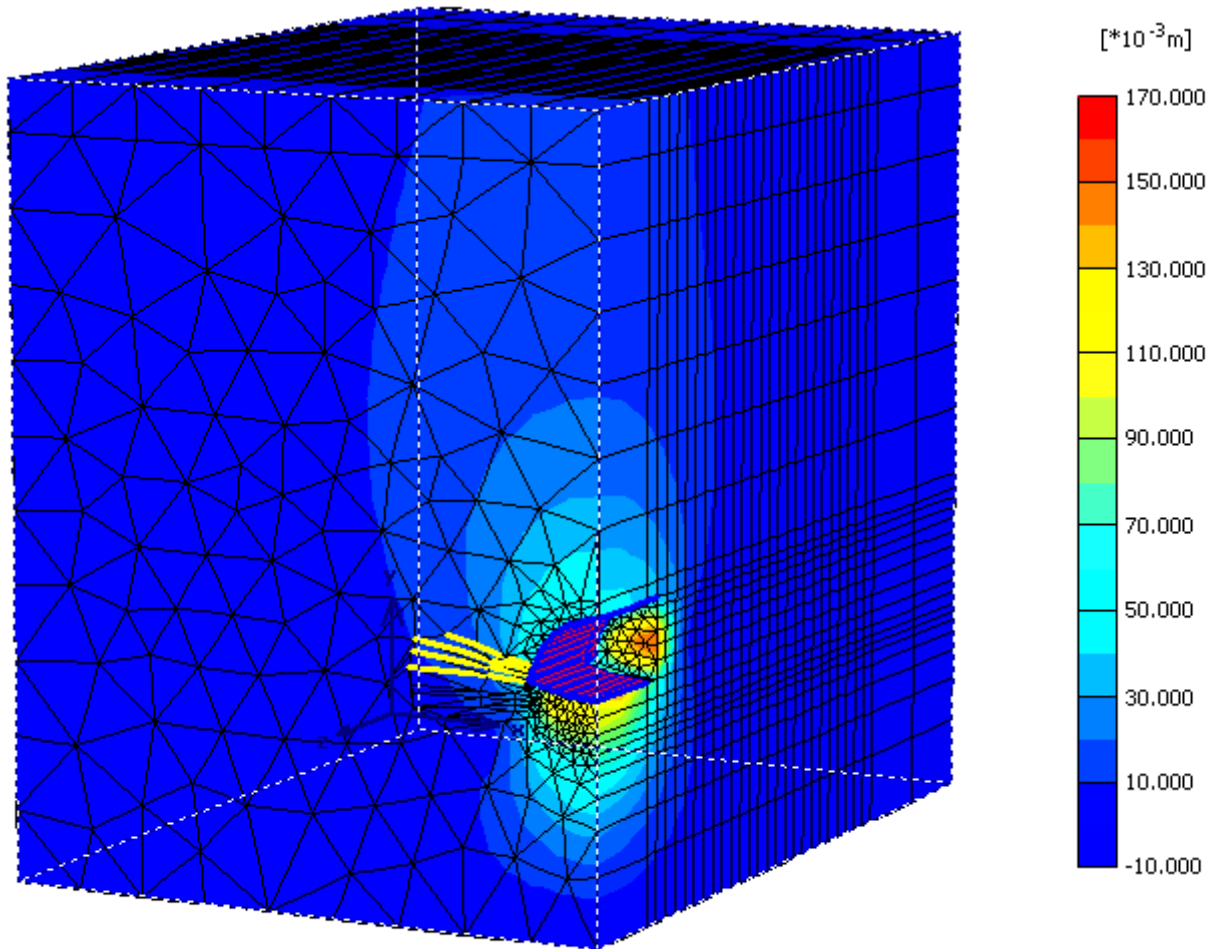
Κατά την πρώτη φάση παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις στο μέτωπο της εκσκαφής και κάτω από το προσωρινό ανάστροφο τόξο. Η ομπρέλα των δοκίδων προπορείας δείχνει να λειτουργεί πολύ ικανοποιητικά αφού οι μετακινήσεις στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής δείχνουν να περιορίζονται σημαντικά όπως επίσης και η αστοχία των εδαφικών στοιχείων. Η απουσία όμως μέτρων ενίσχυσης του μετώπου

έχει οδηγήσει τη βραχόμαζα σε αστοχία βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb τουλάχιστον για τα επόμενα 6m. Η εικόνα 6.3 απεικονίζει τα σημεία αστοχίας του Επίπεδου (Plane) A(-10,0m).



**Εικόνα 6.3.** Σημεία αστοχίας βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb στο Plane A(-10.0m) κατά την πρώτη φάση προσομοίωσης.

ΦΑΣΗ 2		
Slices	2	Εεκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας $E=7,5\text{GPa}$ στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

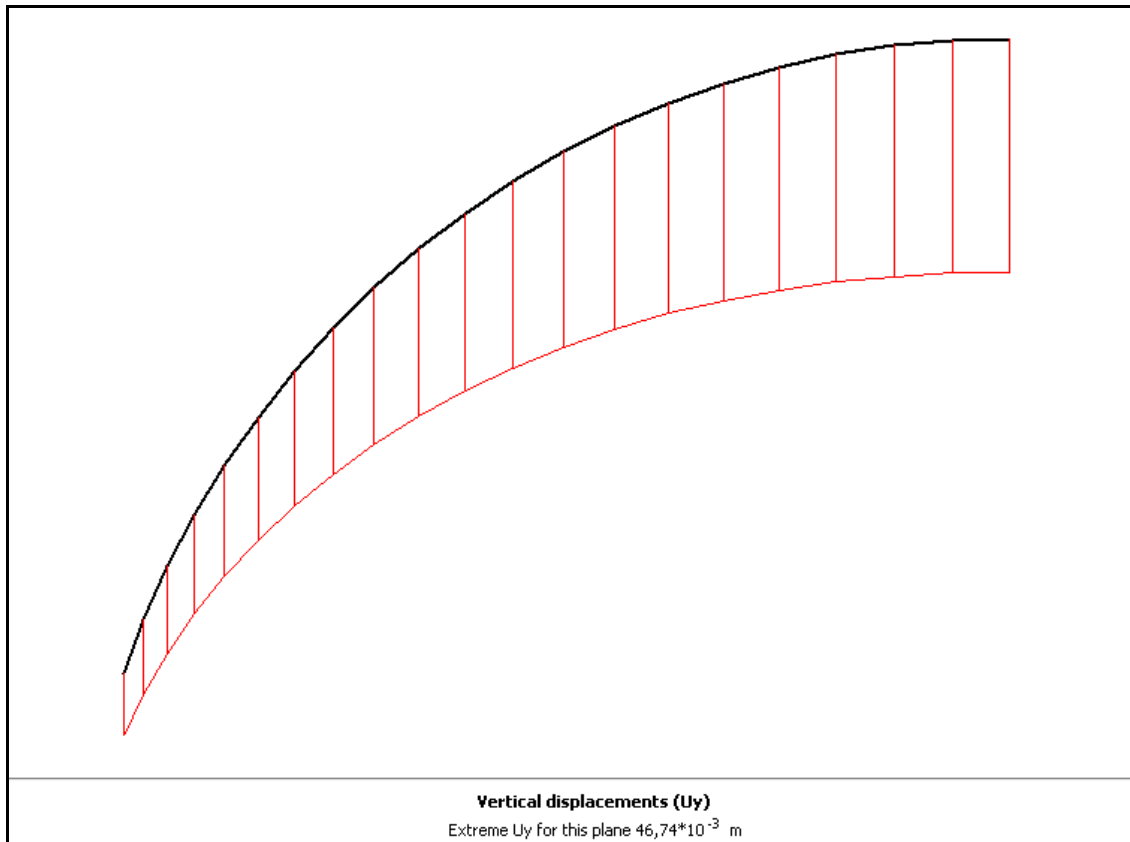


**Total displacements (Utot)**

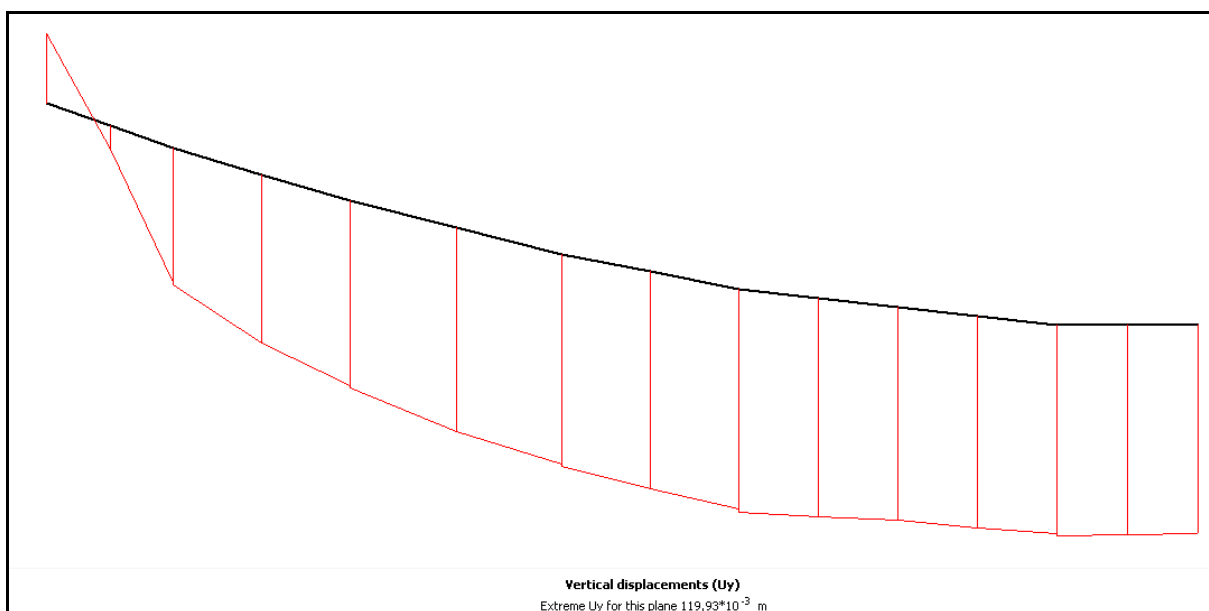
Extreme Utot 160,74\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.4. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεύτερη φάση προσομοίωσης.*

Στην **Εικόνα 6.5** φαίνεται χαρακτηριστικά ότι κατά την δεύτερη φάση οι κατακόρυφες μετακινήσεις στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής του Plane A(-10,0m) δεν είναι ιδιαίτερα έντονες συγκριτικά με το ανάστροφο τόξο (**Εικόνα 6.6**) και το μέτωπο διάνοιξης.

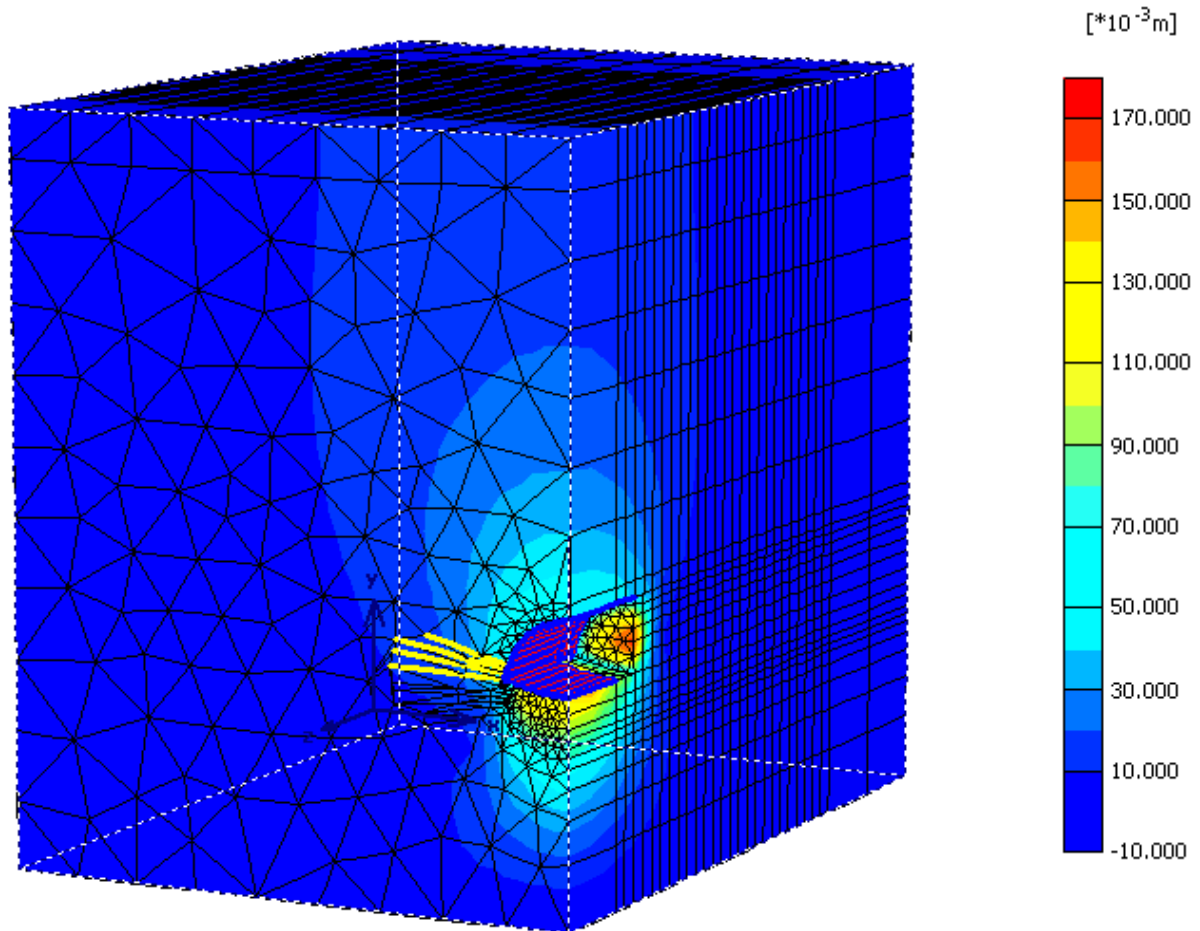


**Εικόνα 6.5.**Κατακόρυφες μετακινήσεις στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής του Plane A (-10.0m) κατά το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης.



**Εικόνα 6.6.**Κατακόρυφες συγκλίσεις του ανάστροφου τόξου του Front Plane(0.0m) κατά τη δεύτερη φάση προσομοίωσης.

ΦΑΣΗ 3		
Slices	2	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και $E=7,5\text{GPa}$ στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	3	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας $E=7,5\text{GPa}$ στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής

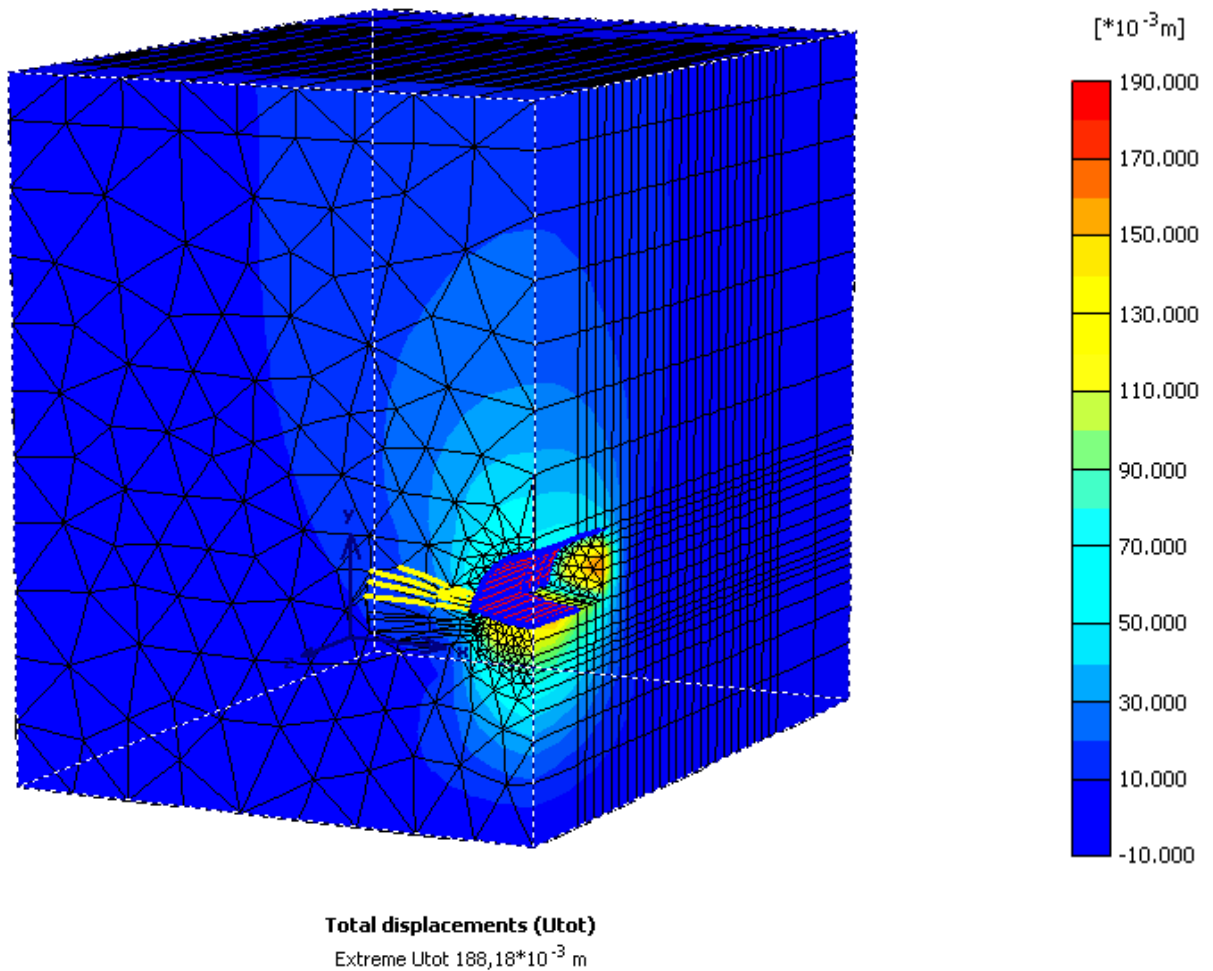


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 177,46\*10<sup>-3</sup> m

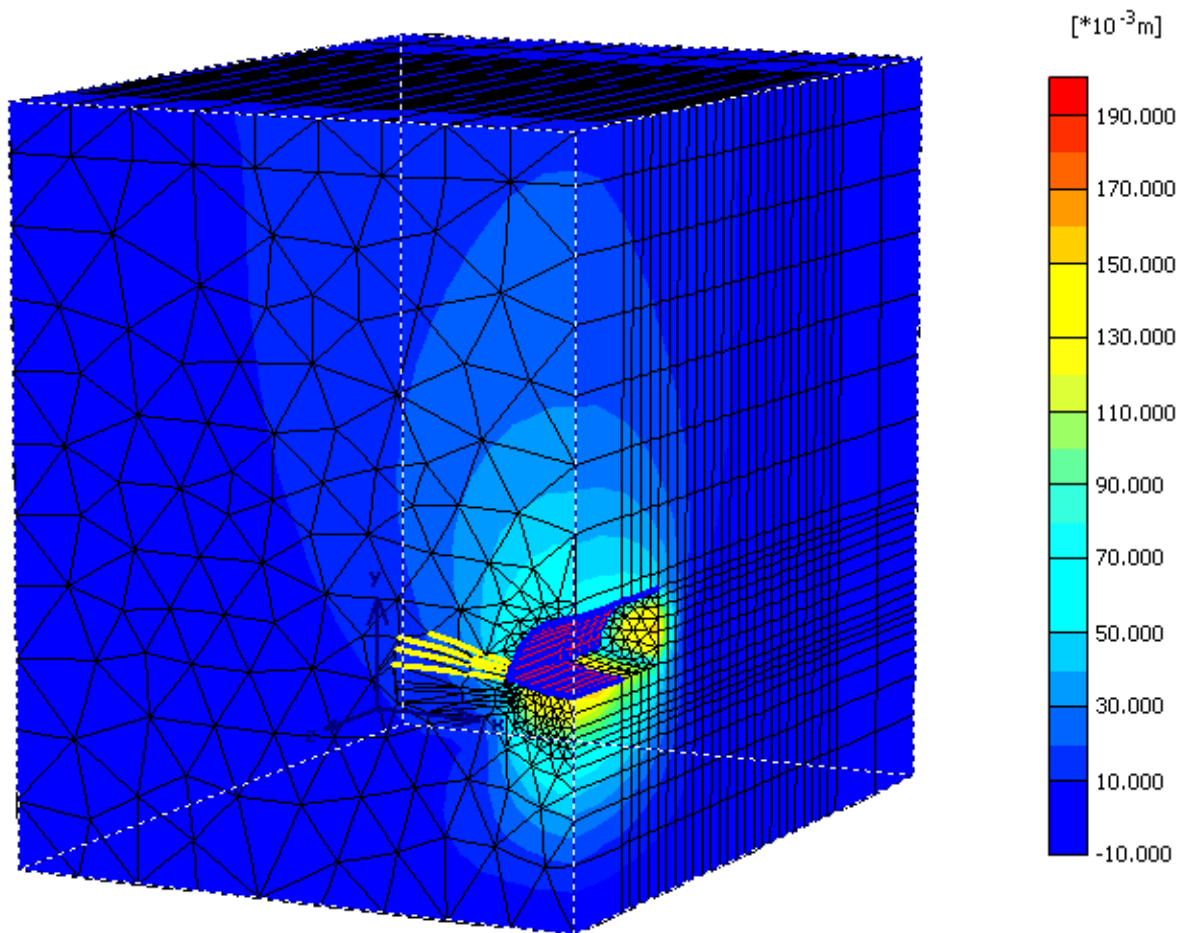
*Εικόνα 6.7. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την τρίτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 4		
<b>Slices</b>	<b>2</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>3</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και $E=7,5\text{GPa}$ στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής
	<b>4</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας $E=7,5\text{GPa}$ στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής
	<b>5,6,7</b>	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.



*Εικόνα 6.8. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την τέταρτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 5		
Slices	2	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	3	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	4	Ττοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	5	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.



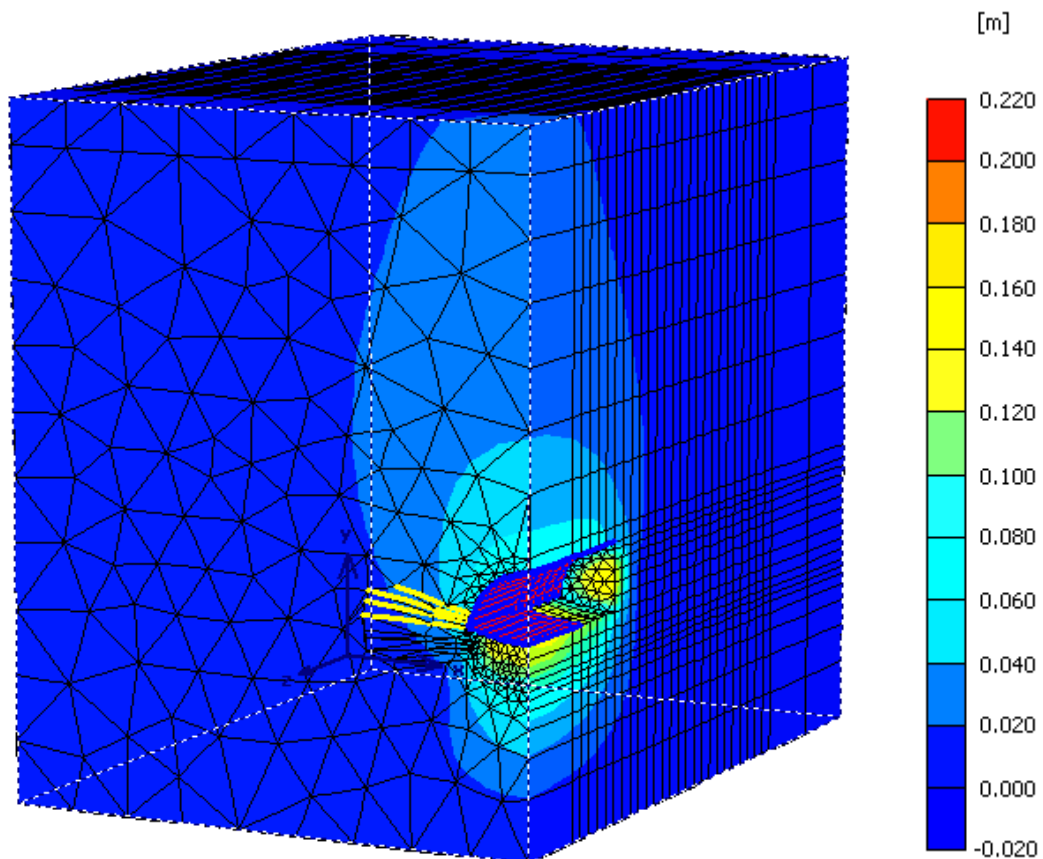
**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 196,27\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.9. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την πέμπτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 6		
Slices	2	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	3	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	4	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	5	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	6	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

Η Α' Φάση της διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας ολοκληρώνεται **10m** πίσω από το μέτωπο διάνοιξης ενώ η έναρξη της εκσκαφής και υποστήριξης της βαθμίδας (Β' Φάση) ξεκινά **36m** πίσω από το μέτωπο.

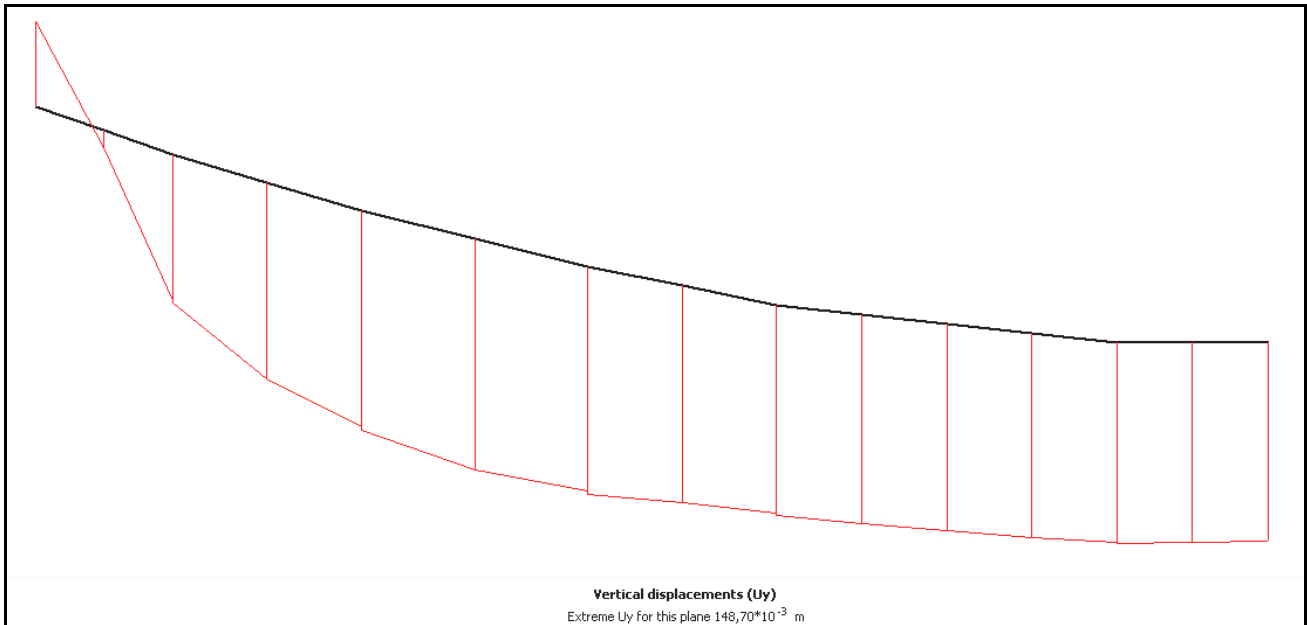


**Total displacements (Utot)**

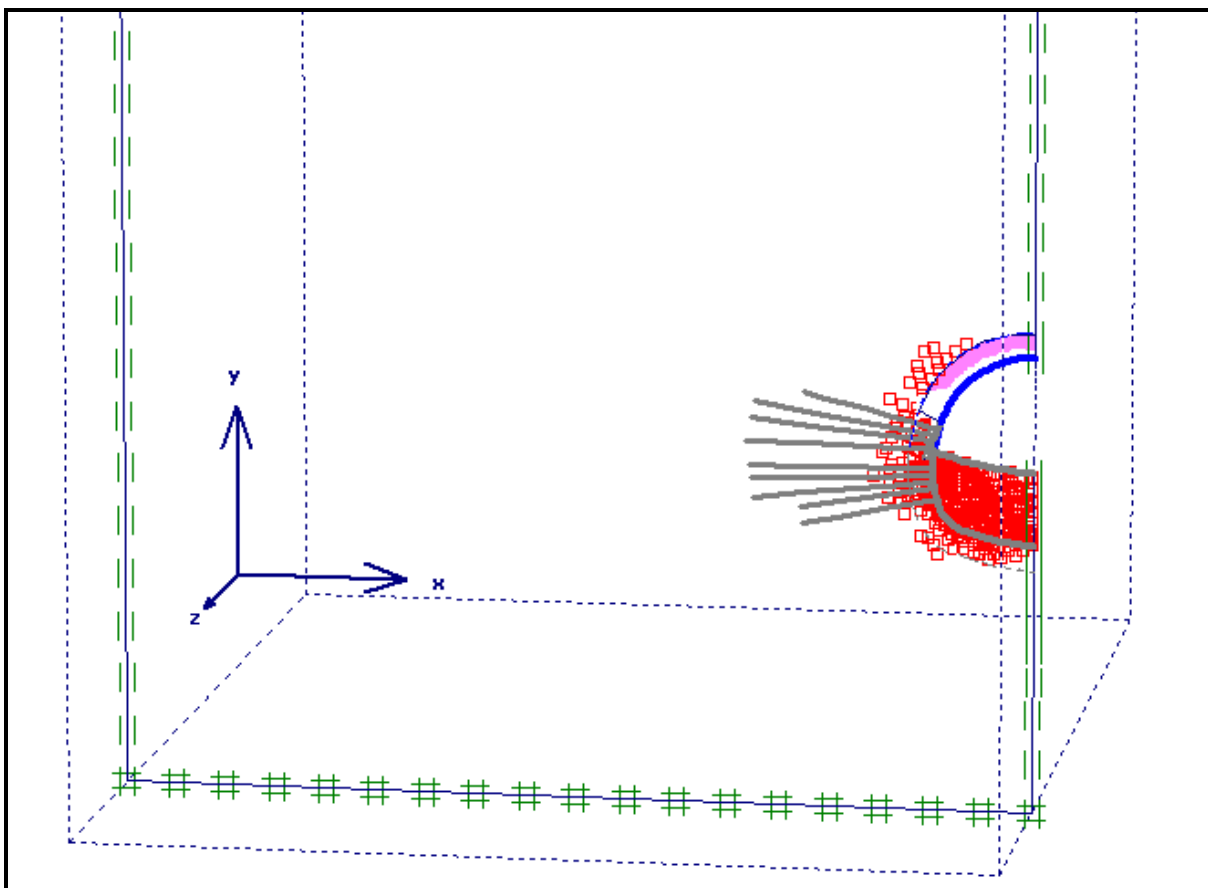
Extreme Utot 201,14\*10<sup>-3</sup> m

**Εικόνα 6.10.** Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την έκτη φάση προσομοίωσης.



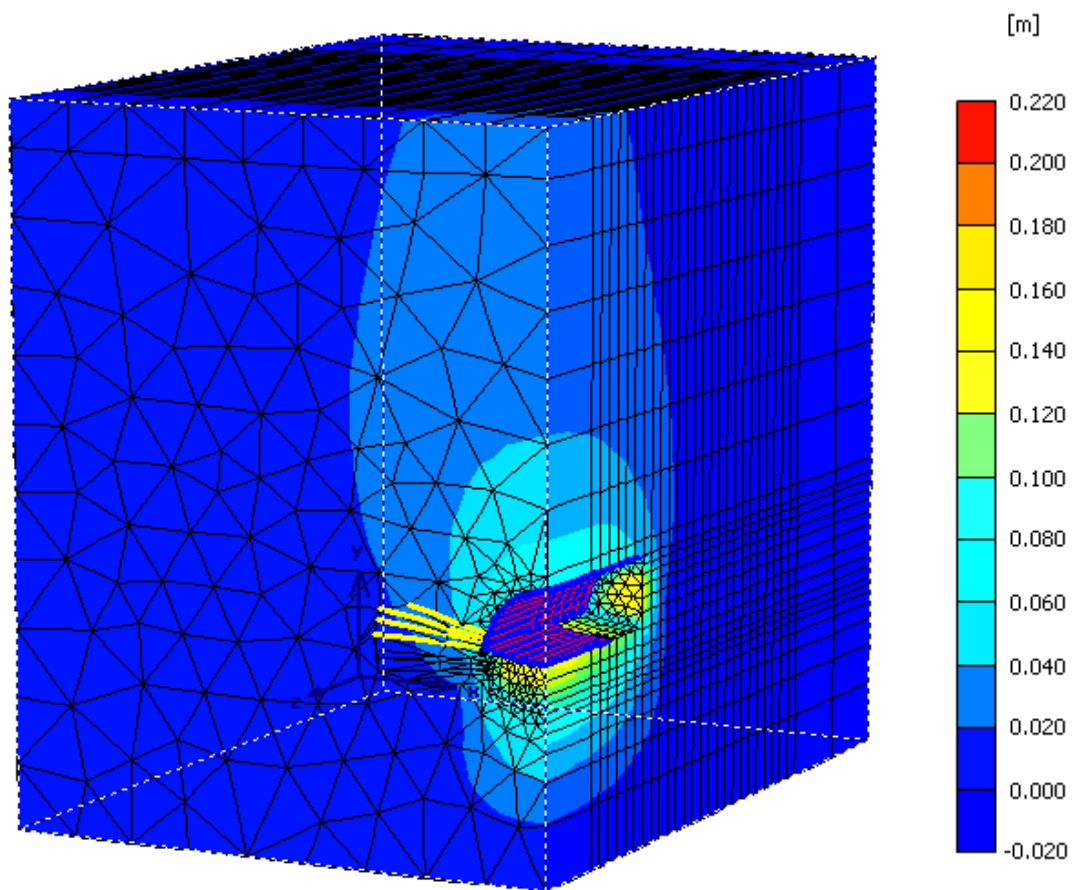


*Εικόνα 6.11. Κατακόρυφες συγκλίσεις του ανάστροφου τόξου του **Plane A(-10.0m)** κατά τη έκτη φάση προσομοίωσης. Η μέγιστη τιμή τους είναι ίση με **14,8cm**.*



*Εικόνα 6.12. Σημεία αστοχίας βάσει του κριτηρίου Mohr-Coulomb στο **Plane E(-18.0m)** κατά την έκτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 7		
Slices	3	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	4	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	5	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	6	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	7	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	8,9,10	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.

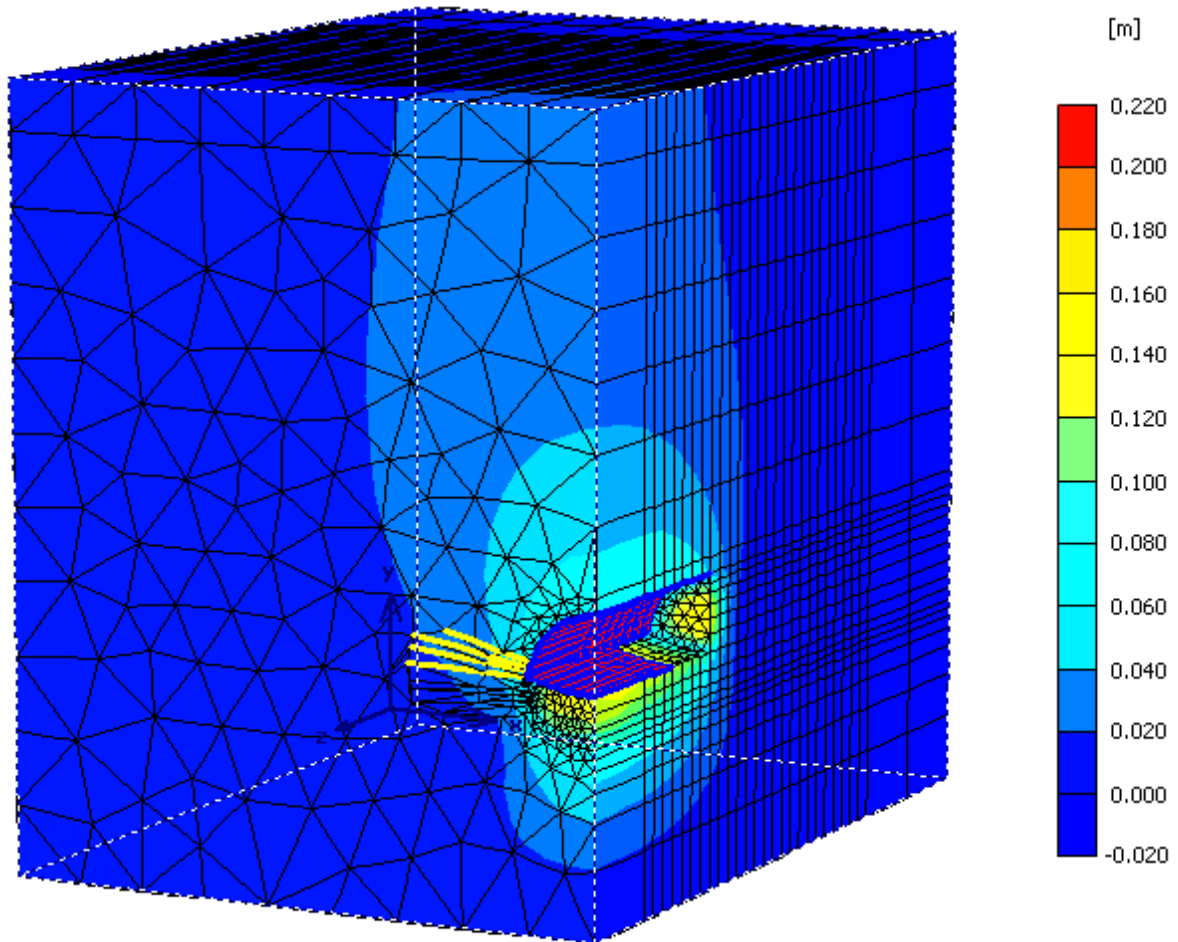


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 204,08\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.13. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την έβδομη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 8		
<b>Slices</b>	<b>4</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>5</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>6</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>7</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>8</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

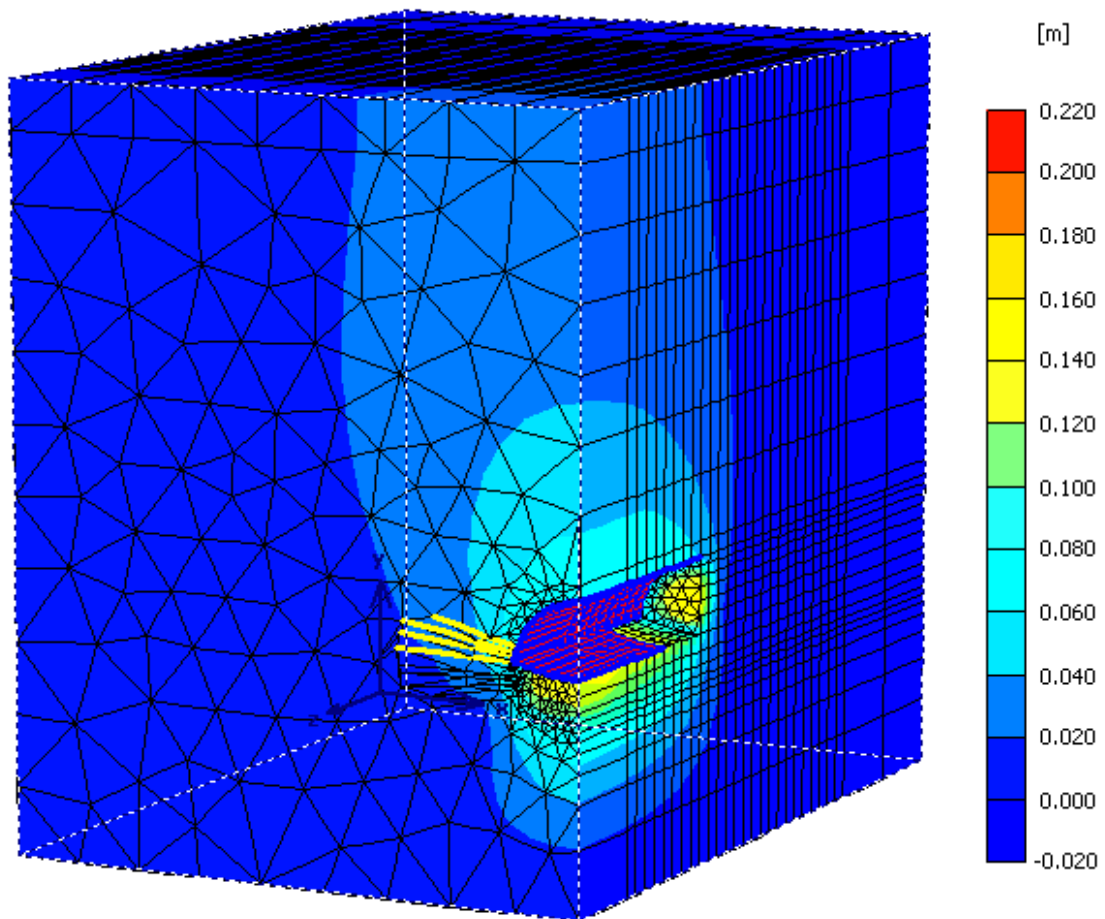


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 206,01\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.14. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την όγδοη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 9		
<b>Slices</b>	<b>5</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>6</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>7</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>8</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>9</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

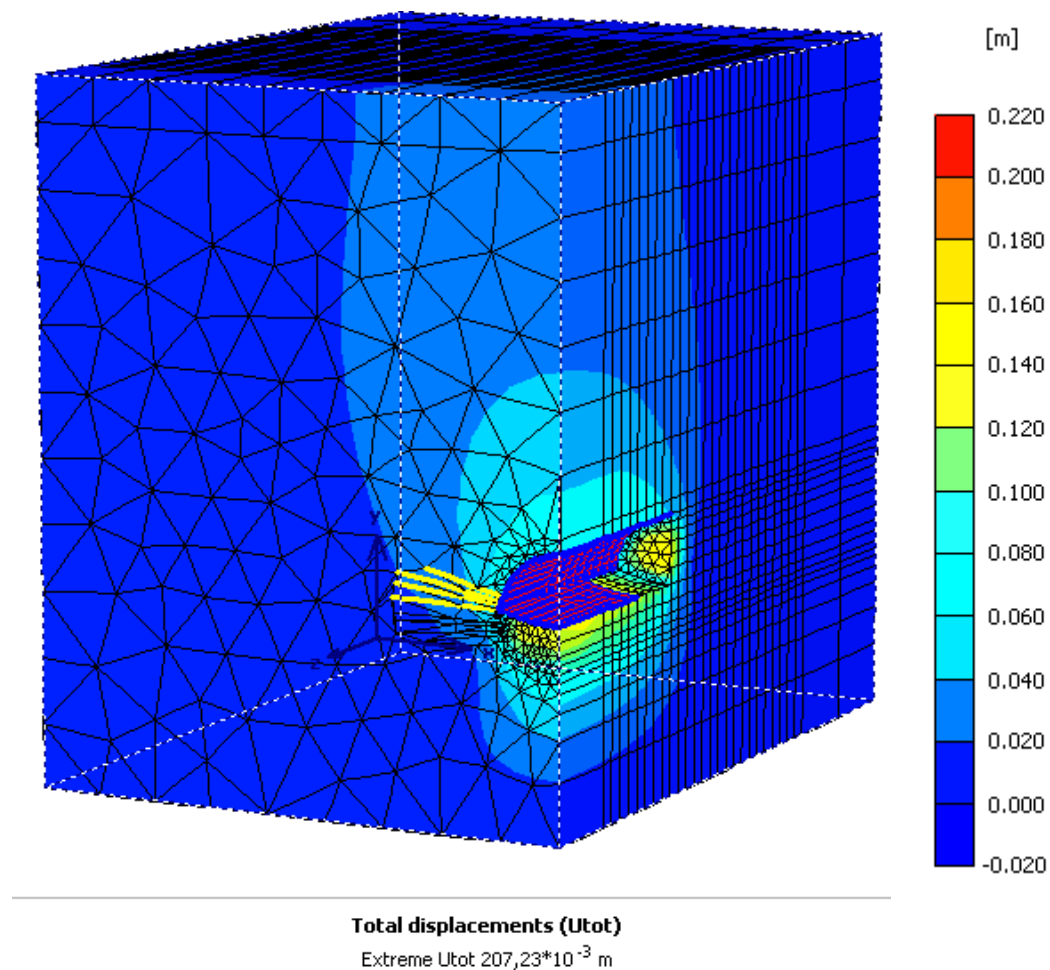


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 207,23\*10<sup>-3</sup> m

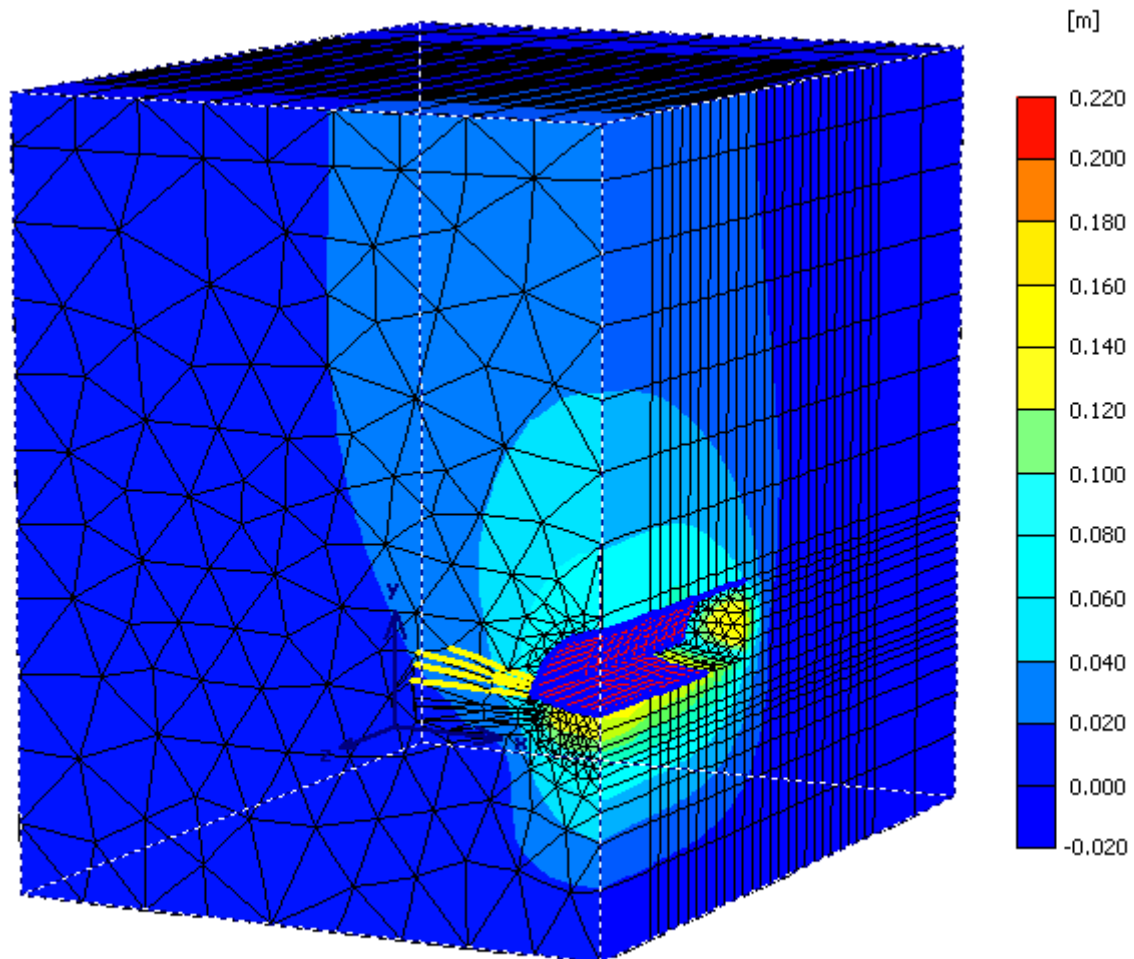
*Εικόνα 6.15. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την ένατη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 10		
Slices	6	Ενεργοποίηση του προσωρινού αναστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	7	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	8	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	9	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	10	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	11,12,13	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.



**Εικόνα 6.16.** Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δέκατη φάση προσομοίωσης.

ΦΑΣΗ 11		
<b>Slices</b>	<b>7</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>8</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>9</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιατομή.
	<b>10</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>11</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.

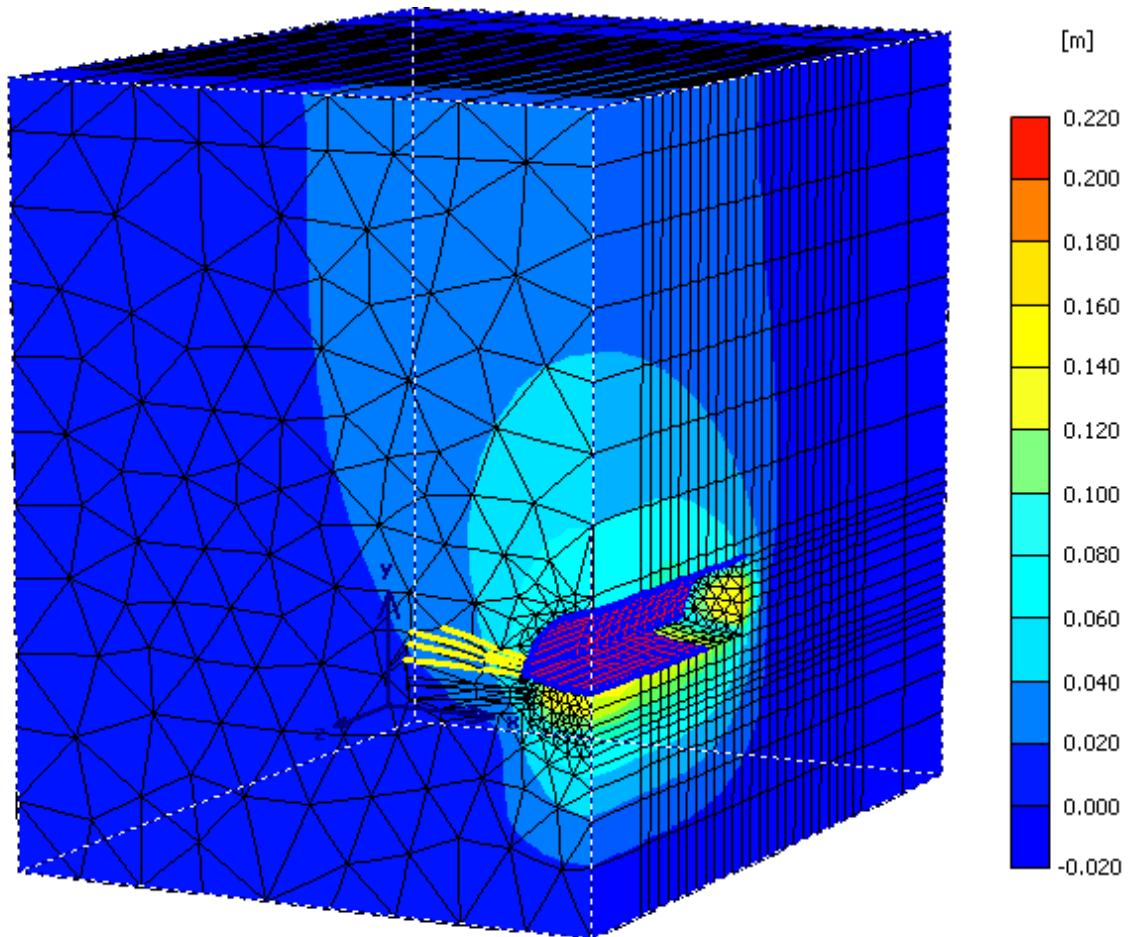


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $208,51 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.17. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την ενδέκατη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 12		
<b>Slices</b>	<b>8</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>9</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>10</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>11</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>12</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

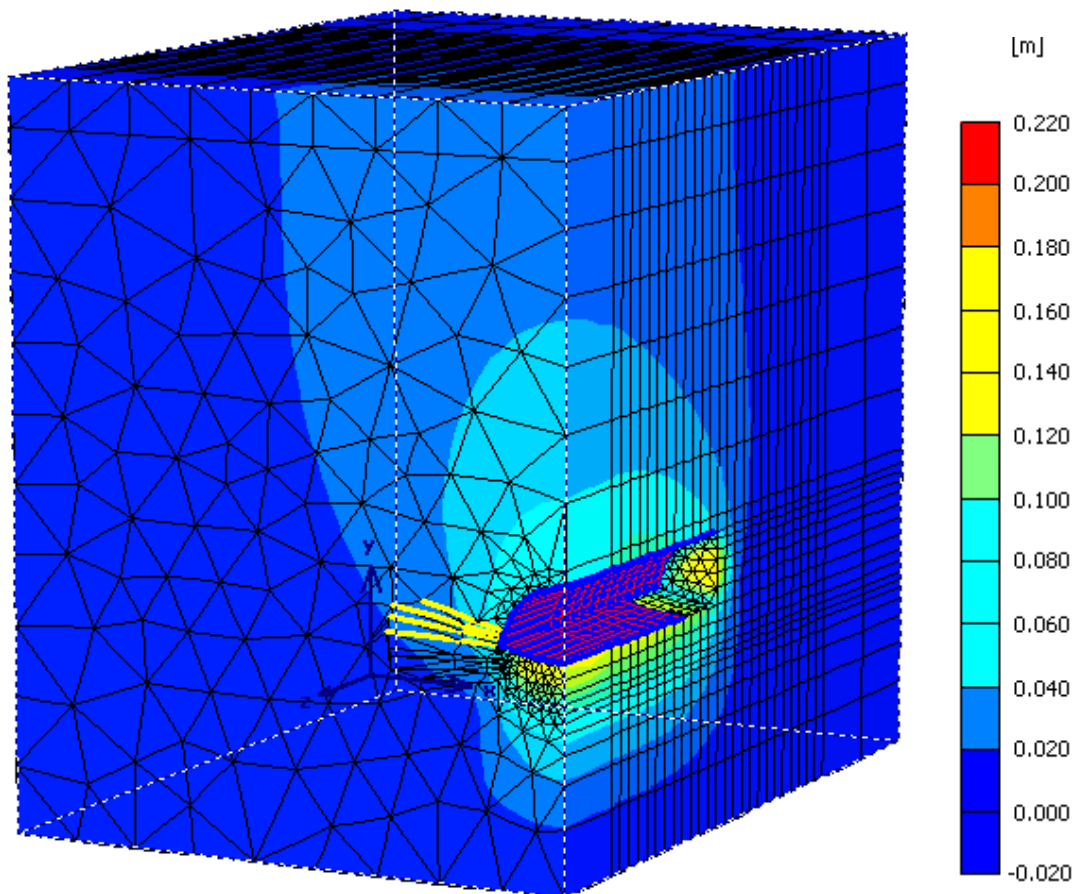


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 208,81\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.18. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δωδέκατη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 13		
Slices	9	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	10	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	11	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	12	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	13	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	14,15,16	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.



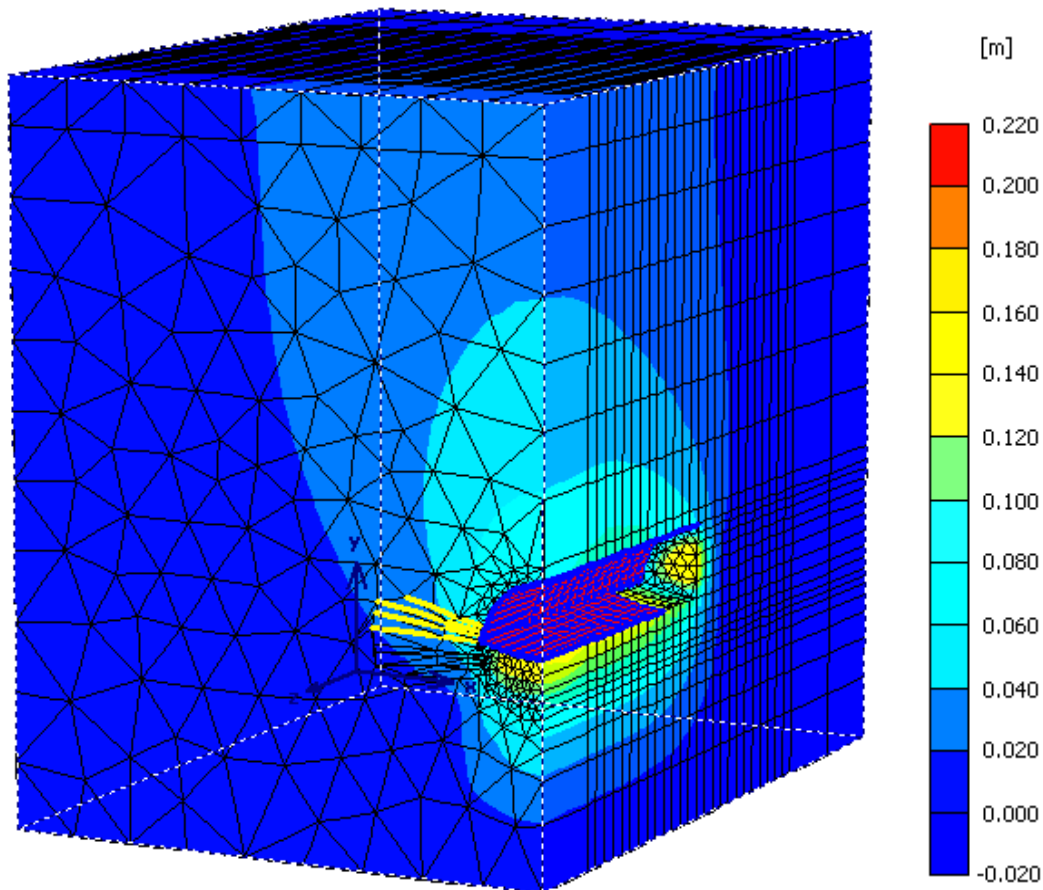
**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 208,96\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.19. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατηρίτη φάση προσομοίωσης.*



ΦΑΣΗ 14		
<b>Slices</b>	<b>10</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>11</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>12</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>13</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>14</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

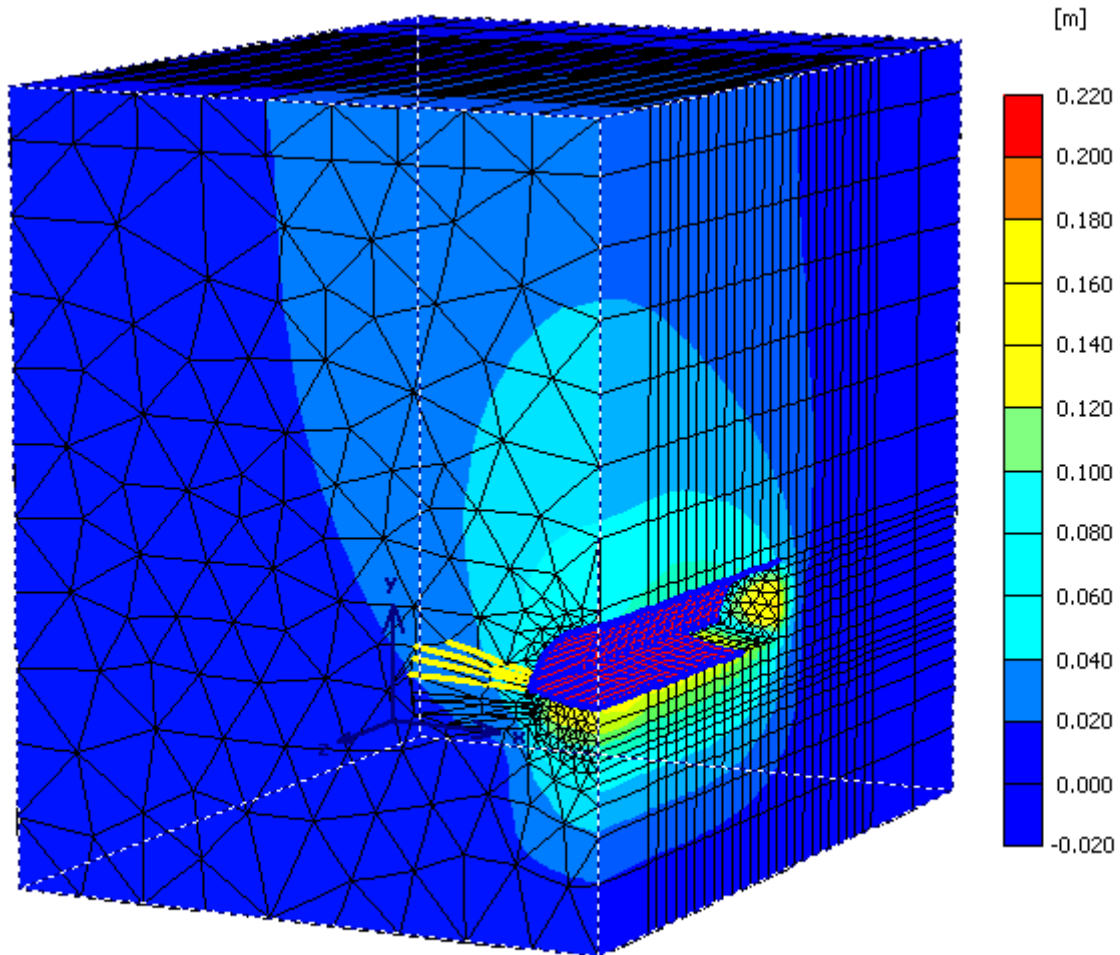


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 209,06\*10<sup>-3</sup> m

*Εικονα 6.20. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατητέατη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 15		
<b>Slices</b>	<b>11</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>12</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>13</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιατομή.
	<b>14</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>15</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.

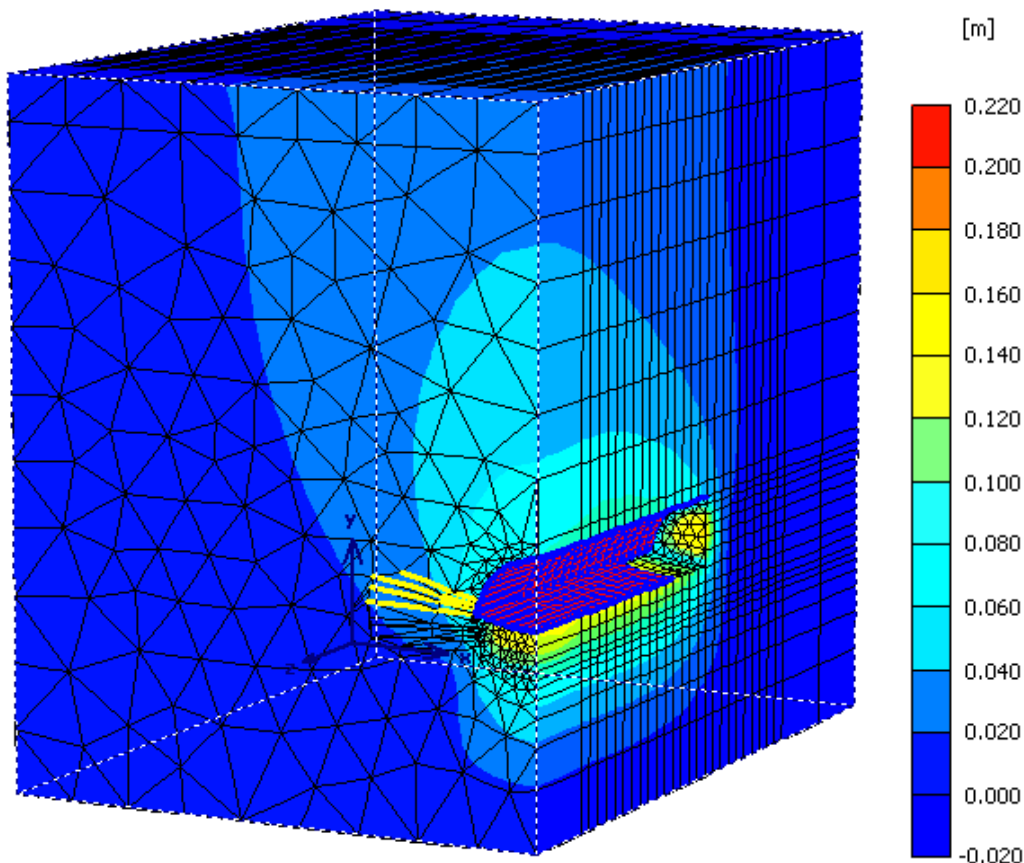


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 209,12\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.21. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατηπέμπτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 16		
Slices	12	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	13	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	14	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	15	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	16	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	17,18,19	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.

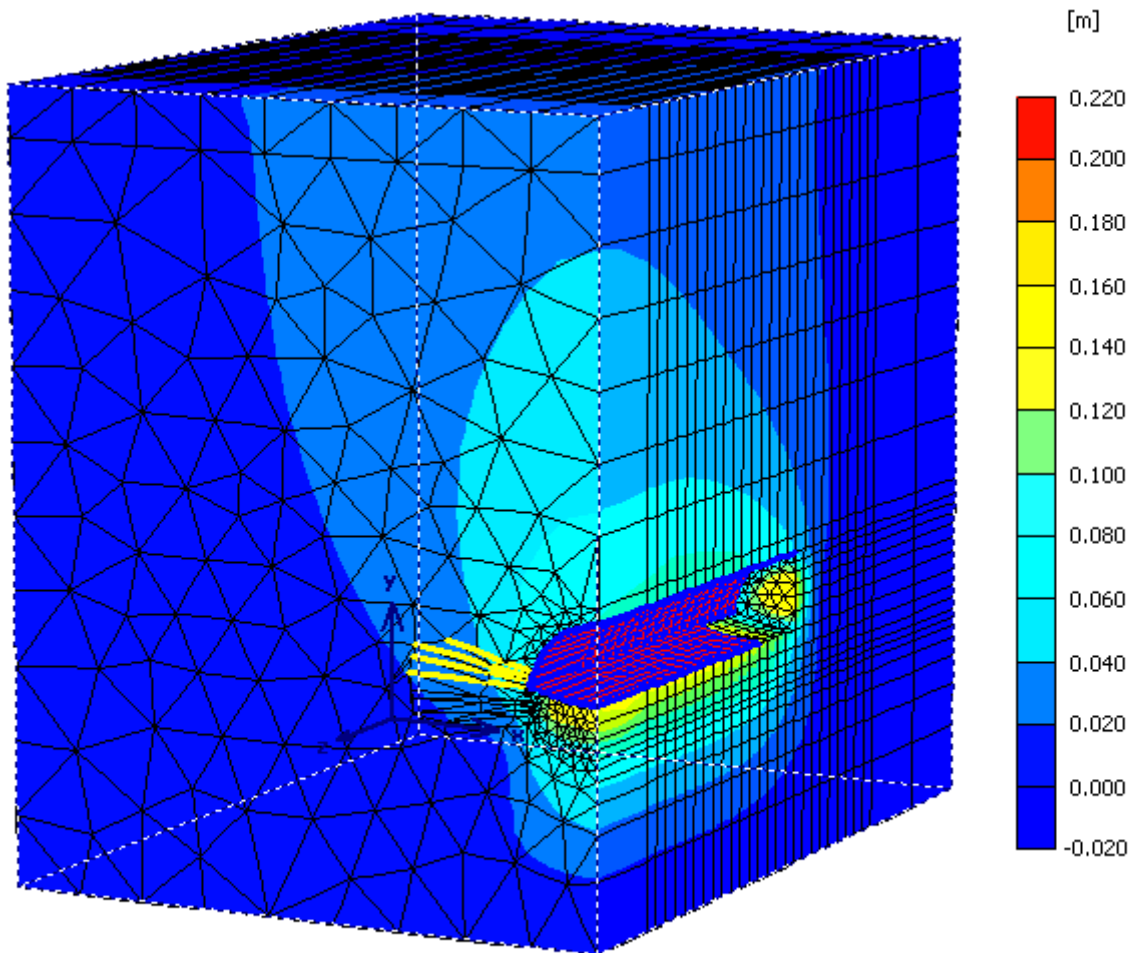


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 209,20\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.22. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατέκτη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 17		
<b>Slices</b>	<b>13</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>14</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>15</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>16</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>17</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

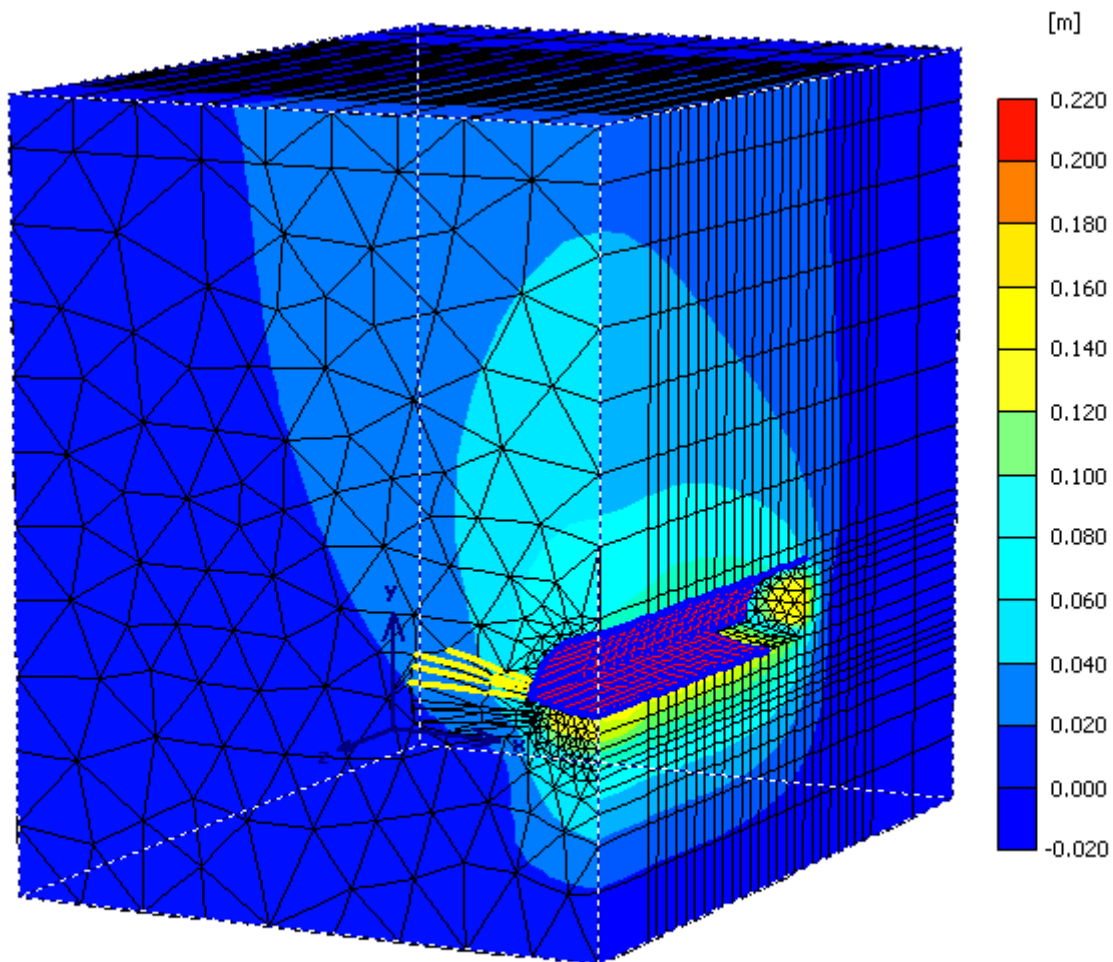


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 209,25\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.23. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατηέβδομη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 18		
<b>Slices</b>	<b>14</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>15</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>16</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιατομή.
	<b>17</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.
	<b>18</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιατομής.

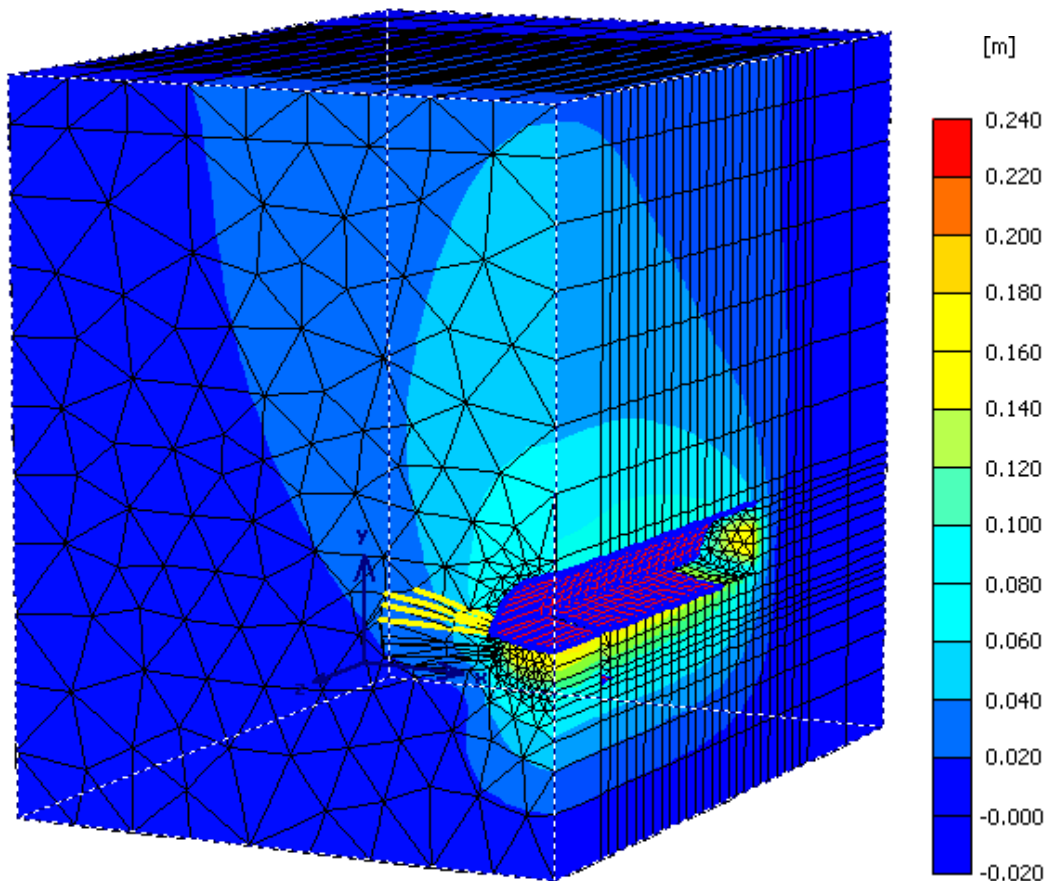


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 209,36\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.24. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατηγόδη φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 19		
Slices	2	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	15	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α΄ Φάσης).
	16	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	17	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	18	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	19	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	20,21,22	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.

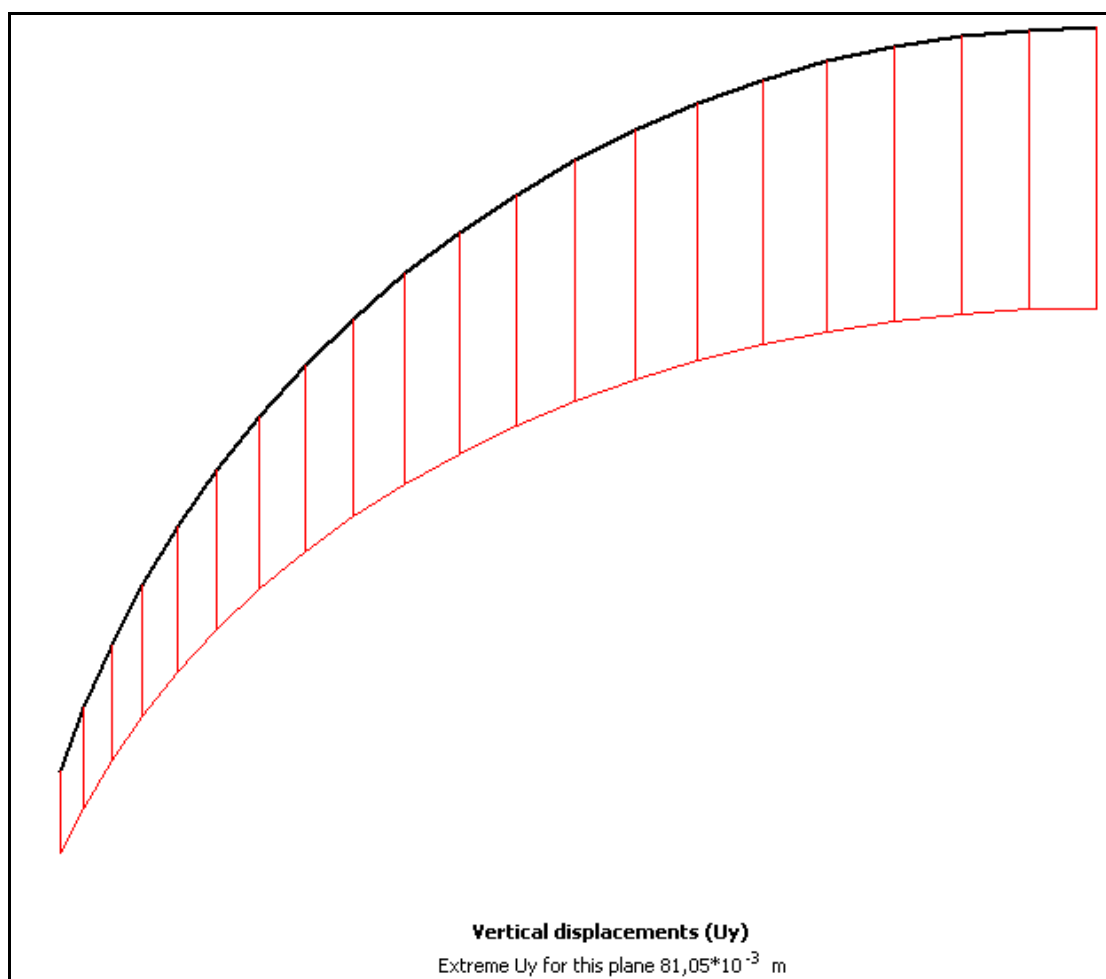


**Total displacements (Utot)**

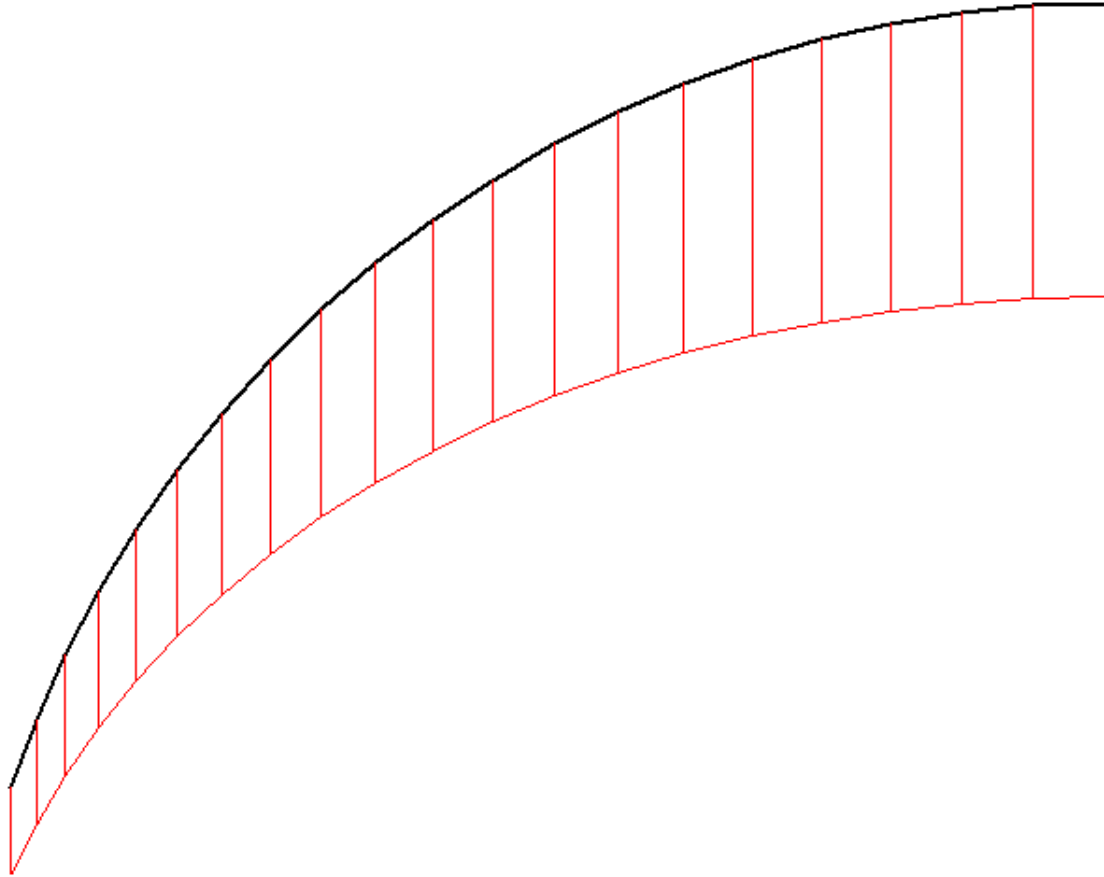
Extreme Utot  $224,86 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.25. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την δεκατηνάτη φάση προσομοίωσης.*

Μέχρι την δεκατηόδοη φάση προσομοίωσης, δηλαδή πριν την έναρξη εκσκαφής της βαθμίδας, το σύστημα βραχόμαζα-προσωρινή υποστήριξη έδειχνε να ισορροπεί αφού η σταδιακή προώθηση του μετώπου δεν έδειχνε να επηρεάζει τις τιμές των μεγίστων συγκλίσεων του προσομοιώματος. Πράγματι αν εξετάσουμε το Plane A(-10.0m) θα παρατηρήσουμε ότι από την δεκατητρίτη φάση έως την δεκατηόδοη φάση οι μέγιστες ακτινικές μετατοπίσεις της οροφής σταθεροποιούνται στα **8,3cm** περίπου και οι μέγιστες ροπές της οροφής παίρνουν τιμές της τάξεως των **27kNm/m** περίπου. Με την έναρξη της εκσκαφής της βαθμίδας όμως κατά τη δεκατηένατη φάση οι κατακόρυφες συγκλίσεις αυξάνονται σημαντικά σε όλο το μήκος της σήραγγας με τη στέγη του Plane A να συγκλίνει κατά **9,0cm** περίπου (μικρή αύξηση συγκριτικά με τις μετατοπίσεις της βαθμίδας)



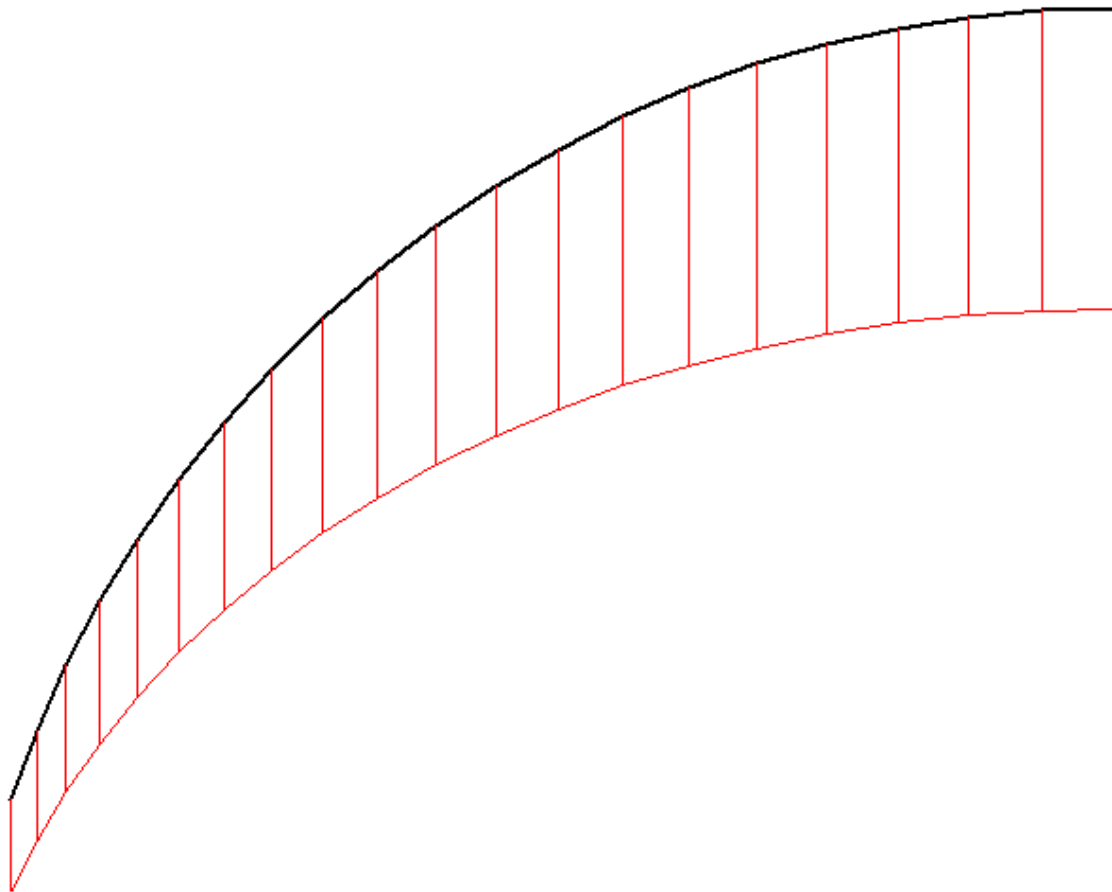
**Εικόνα 6.26.** Κατακόρυφες μετατοπίσεις του κελύφους της άνω ημιδιατομής του Plane A(-10.0m) για την δεκατητρίτη φάση προσομοίωσης.



**Vertical displacements (Uy)**  
Extreme Uy for this plane  $84,88 \cdot 10^{-3}$  m

**Εικόνα 6.27.** Κατακόρυφες μετατοπίσεις του κελύφους της άνω ημιδιατομής του Plane A(-10.0m) για την δεκατηόγδοη φάση προσομοίωσης.



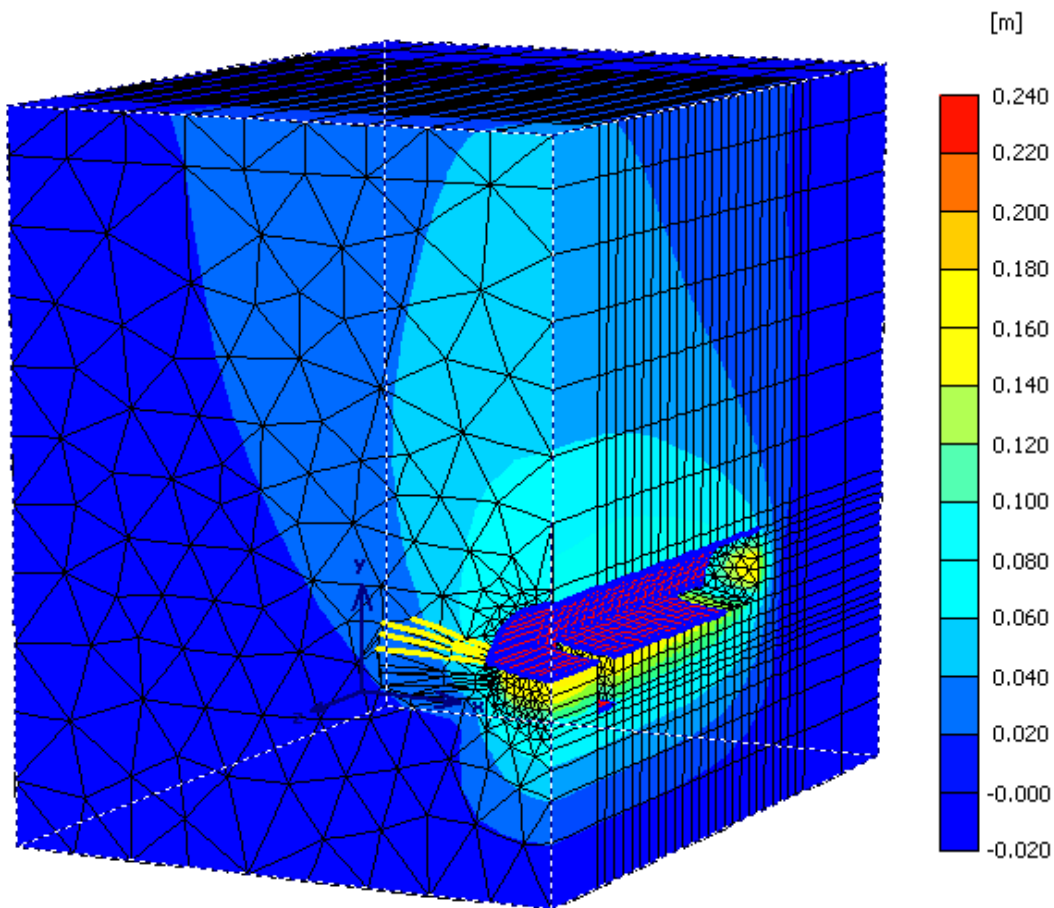


**Vertical displacements (Uy)**

Extreme Uy for this plane  $89,60 \cdot 10^{-3}$  m

**Εικόνα 6.28.** Κατακόρυφες μετατοπίσεις του κελύφους της άνω ημιδιατομής του Plane A (-10.0m) για την δεκατηένατη φάση προσομοίωσης.

ΦΑΣΗ 20		
Slices	2	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	3	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	16	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	17	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	18	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασάλων στην άνω ημιδιατομή.
	19	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	20	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

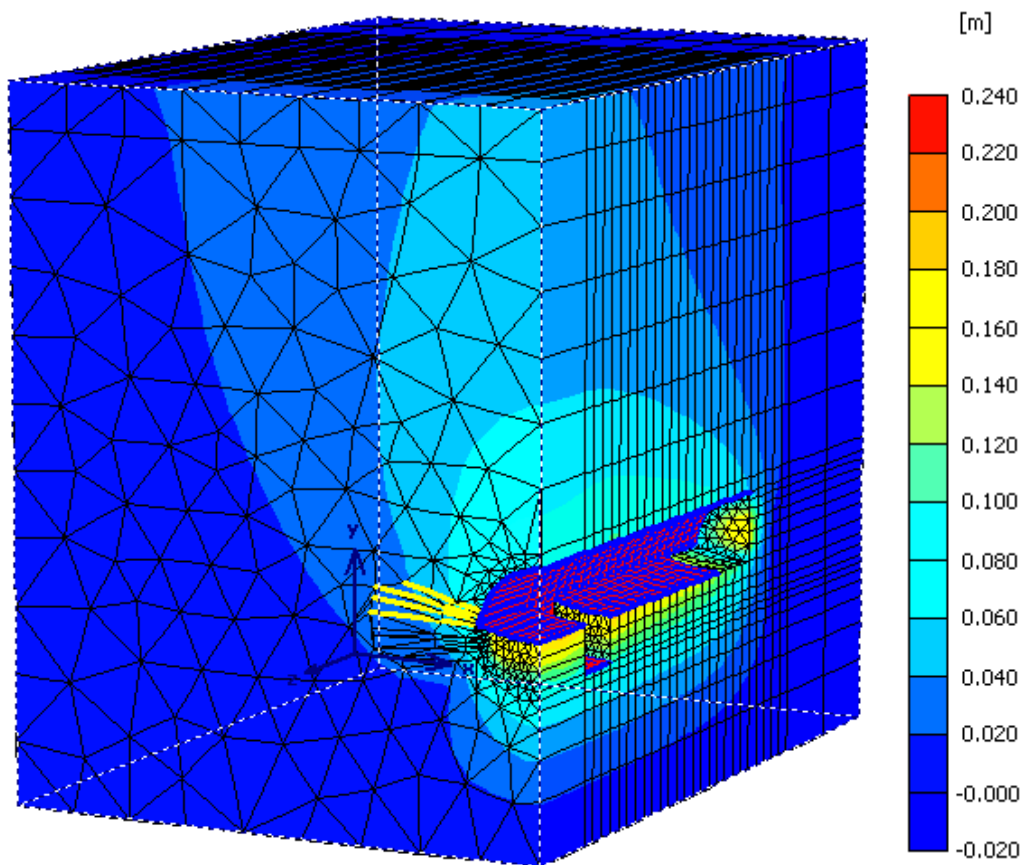


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot 233,14\*10<sup>-3</sup> m

*Εικόνα 6.29. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστή φάση προσομοίωσης.*

ΦΑΣΗ 21		
Slices	2	Τοποθέτηση αγκυρίων στη βαθμίδα.
	3	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	4	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	17	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	18	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	19	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	20	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	21	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.

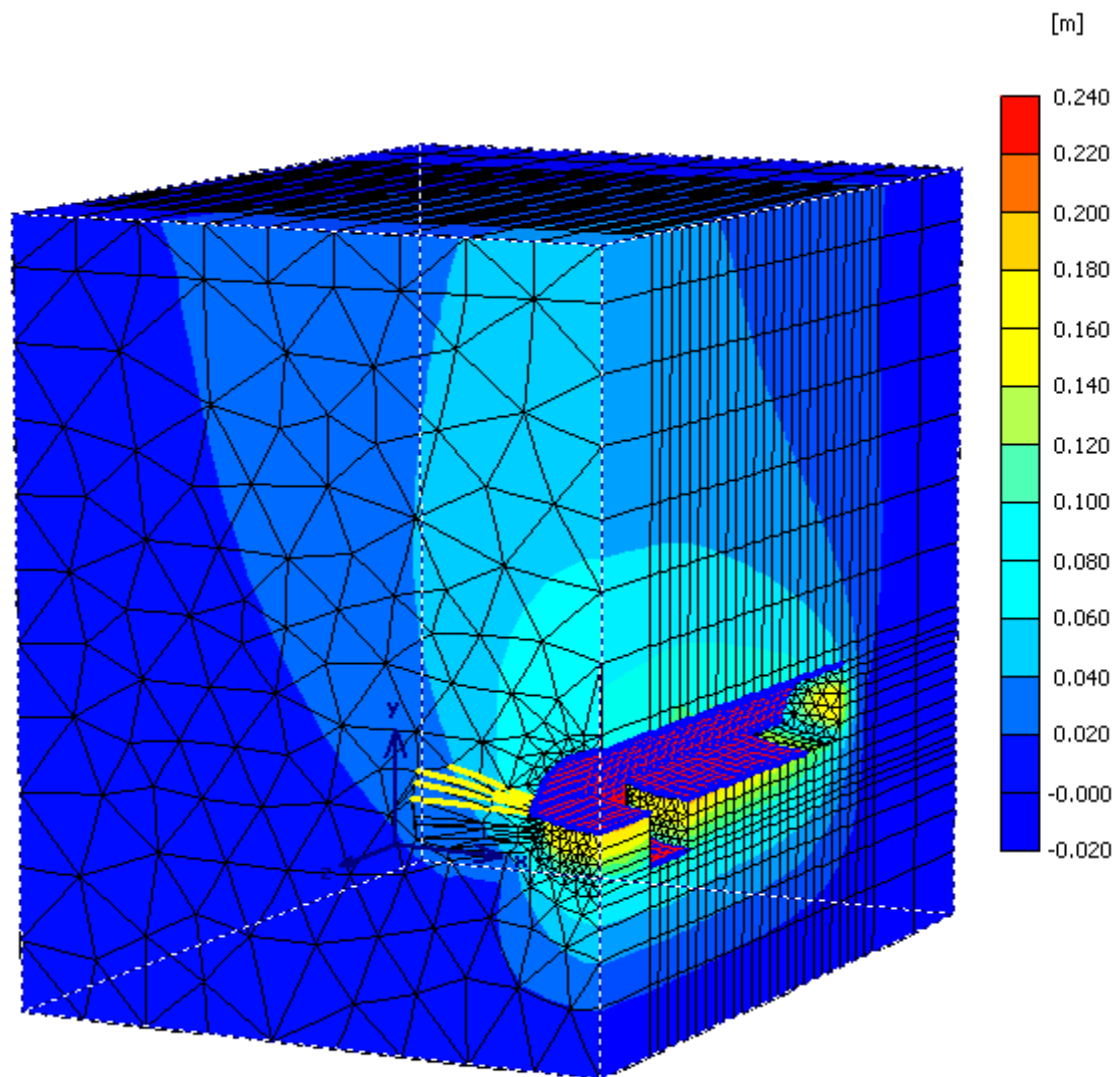


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $235,71 \cdot 10^{-3}$  m

**Εικόνα 6.30.** Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστήπρωτη φάση προσομοίωσης.

<b>ΦΑΣΗ 22</b>		
<b>Slices</b>	<b>2</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa πλευρικά στη βαθμίδα.
	<b>3</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων στη βαθμίδα.
	<b>4</b>	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	<b>5</b>	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	<b>18</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>19</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>20</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>21</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>22</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>23,24,25</b>	Ενεργοποίηση των δοκίδων προπορείας.

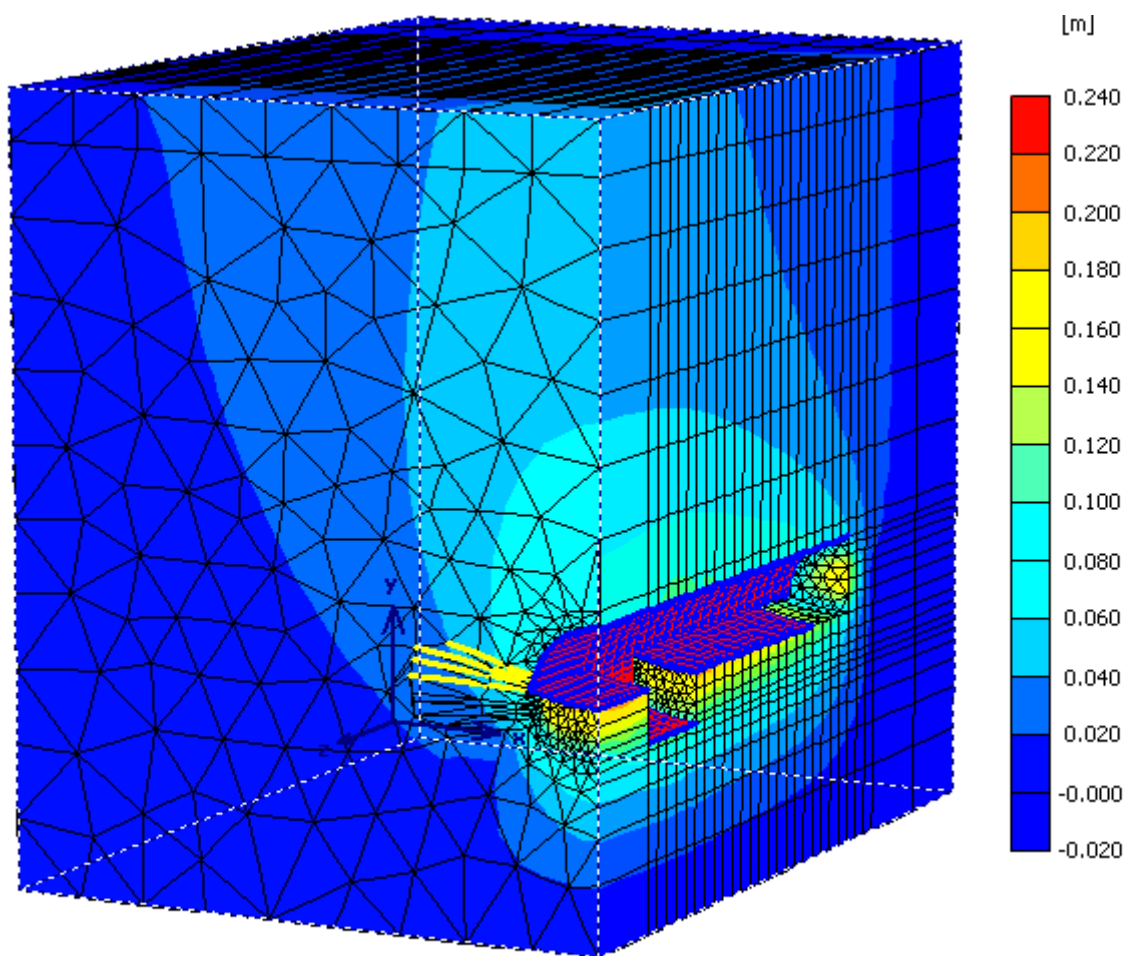


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $237,75 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.31. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστηδέυτερη φάση προσομοίωσης.*

<b>ΦΑΣΗ 23</b>		
<b>Slices</b>	<b>2</b>	Ενεργοποίηση τελικού ανάστροφου τόξου και ανάπτυξη πλήρους αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος(ολοκλήρωση υποστήριξης της τελικής διατομής).
	<b>3</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa πλευρικά στη βαθμίδα.
	<b>4</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων στη βαθμίδα.
	<b>5</b>	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	<b>6</b>	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	<b>19</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>20</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>21</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>22</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>23</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.



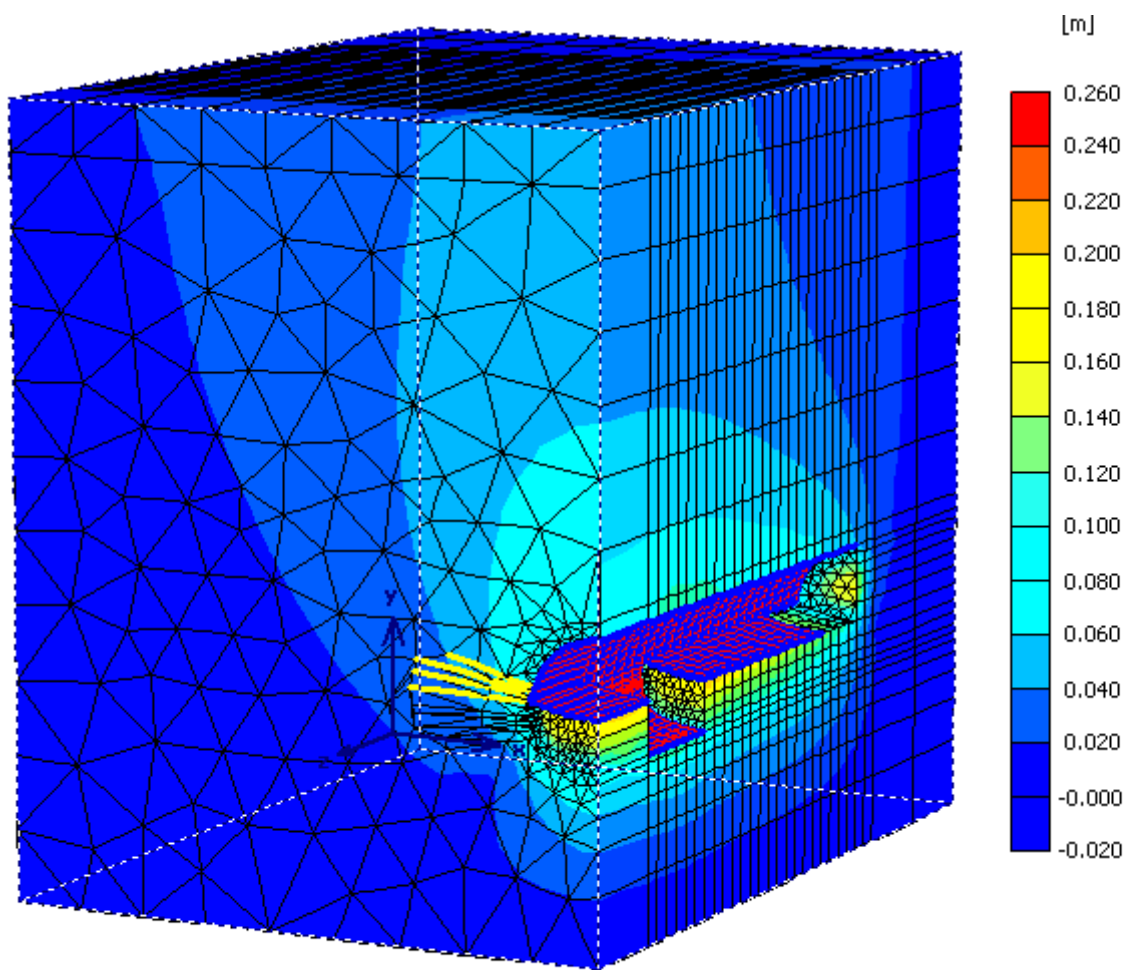
**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $239,53 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.32. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστή τρίτη φάση προσομοίωσης.*

		<b>ΦΑΣΗ 24</b>
<b>Slices</b>	<b>3</b>	Ενεργοποίηση τελικού ανάστροφου τόξου και ανάπτυξη πλήρους αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος(ολοκλήρωση υποστήριξης της τελικής διατομής).
	<b>4</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa πλευρικά στη βαθμίδα.
	<b>5</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων στη βαθμίδα.
	<b>6</b>	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	<b>7</b>	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	<b>20</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>21</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>22</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>23</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>24</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.



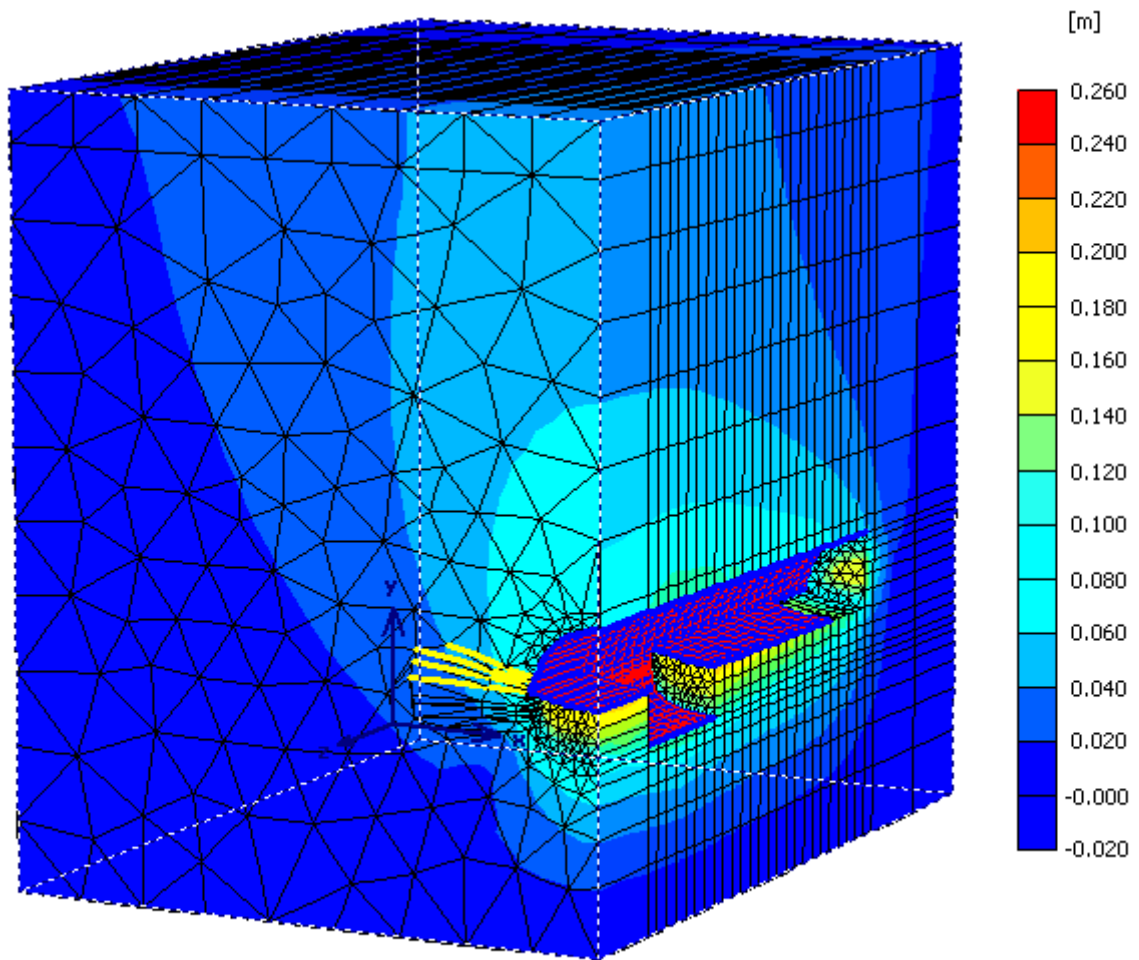


**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $240,95 \cdot 10^{-3}$  m

*Εικόνα 6.33. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστή τέταρτη φάση προσομοίωσης.*

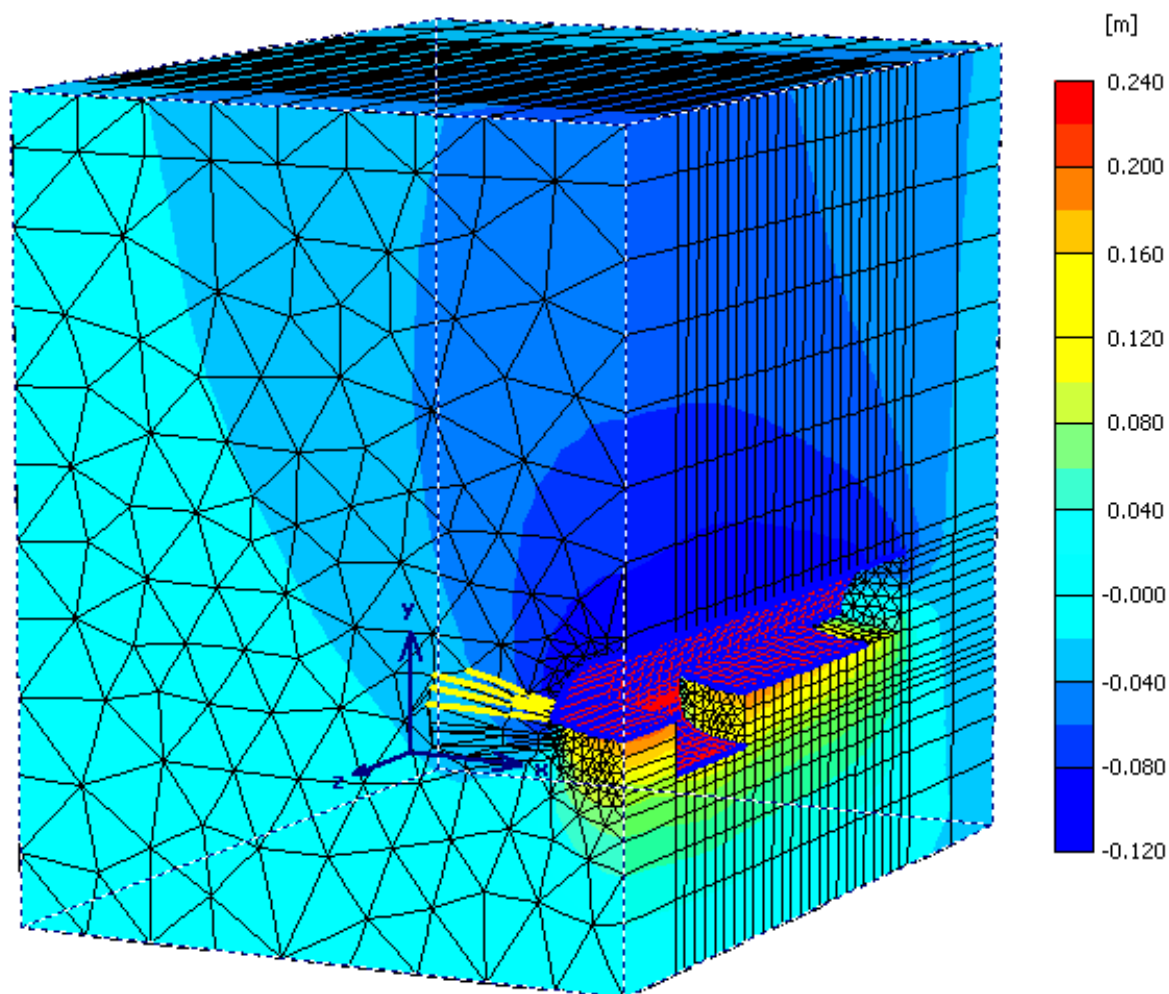
<b>ΦΑΣΗ 25</b>		
<b>Slices</b>	<b>4</b>	Ενεργοποίηση τελικού ανάστροφου τόξου και ανάπτυξη πλήρους αντοχής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος(ολοκλήρωση υποστήριξης της τελικής διατομής).
	<b>5</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa πλευρικά στη βαθμίδα.
	<b>6</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων στη βαθμίδα.
	<b>7</b>	Τοποθέτηση στο τελικό ανάστροφο τόξο εκτοξευόμενο σκυροδέμα πάχους 30cm και E=7,5GPa.
	<b>8</b>	Απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου, εκσκαφή της βαθμίδας και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και E=7,5GPa.
	<b>21</b>	Ενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου πάχους 30cm και E=25 GPa (ολοκλήρωση της Α' Φάσης).
	<b>22</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=15GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>23</b>	Τοποθέτηση αγκυρίων, ενεργοποίηση του elephant foot και των μικροπασσάλων στην άνω ημιδιατομή.
	<b>24</b>	Τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 30cm και E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.
	<b>25</b>	Εκσκαφή και τοποθέτηση εκτοξευόμενου σκυροδέματος πάχους 7,5cm και μέτρου Ελαστικότητας E=7,5GPa στο κέλυφος της άνω ημιδιατομής.



**Total displacements (Utot)**

Extreme Utot  $241,94 \cdot 10^{-3}$  m

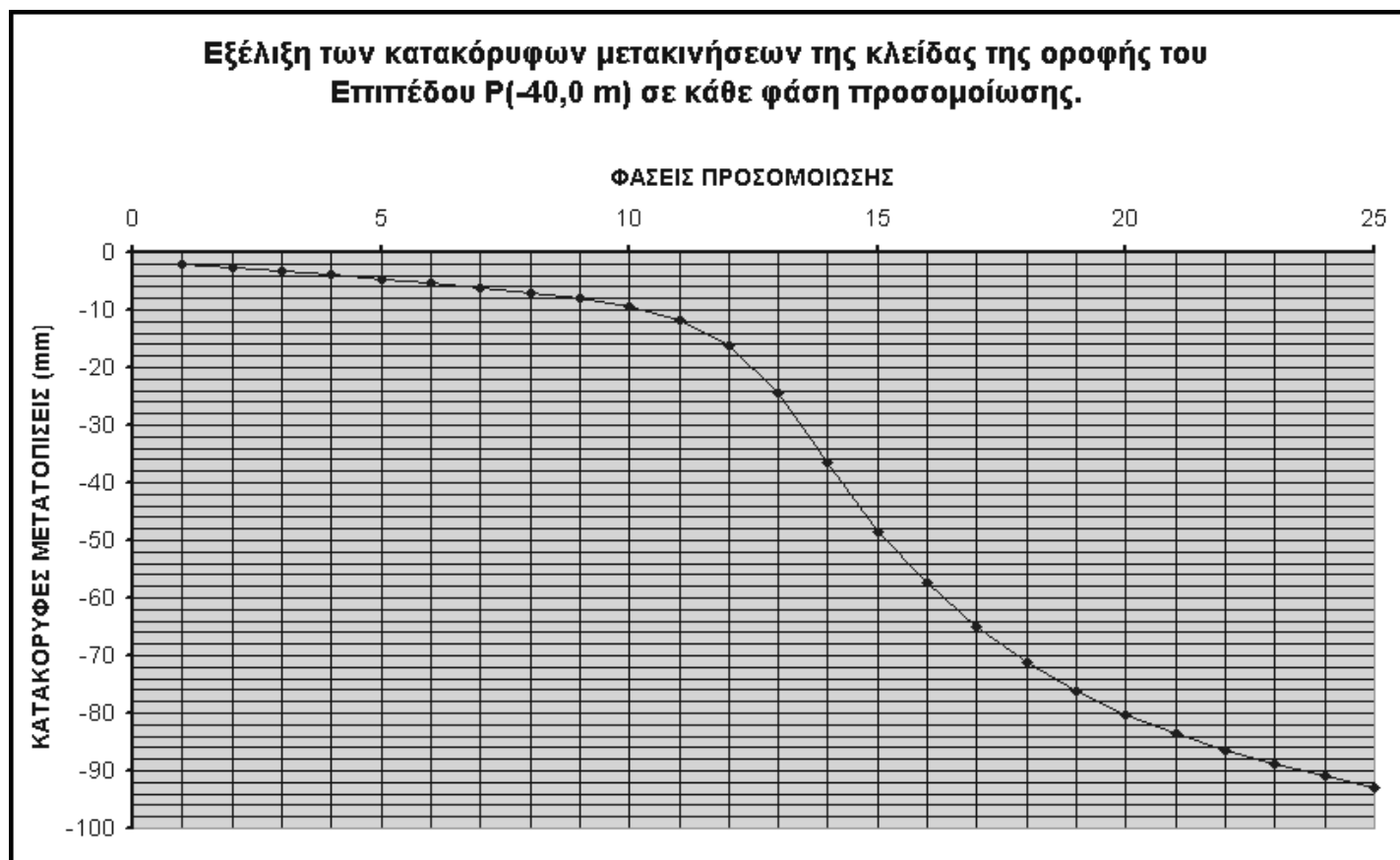
*Εικόνα 6.34. Μέγιστες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστηπέμπτη φάση προσομοίωσης.*



*Εικόνα 6.35. Μέγιστες κατακόρυφες παραμορφώσεις της διπλής σήραγγας Ανθοχωρίου κατά την εικοστηπέμπτη φάση προσομοίωσης.*

#### 6.4 Έλεγχος των κατακόρυφων μετατοπίσεων.

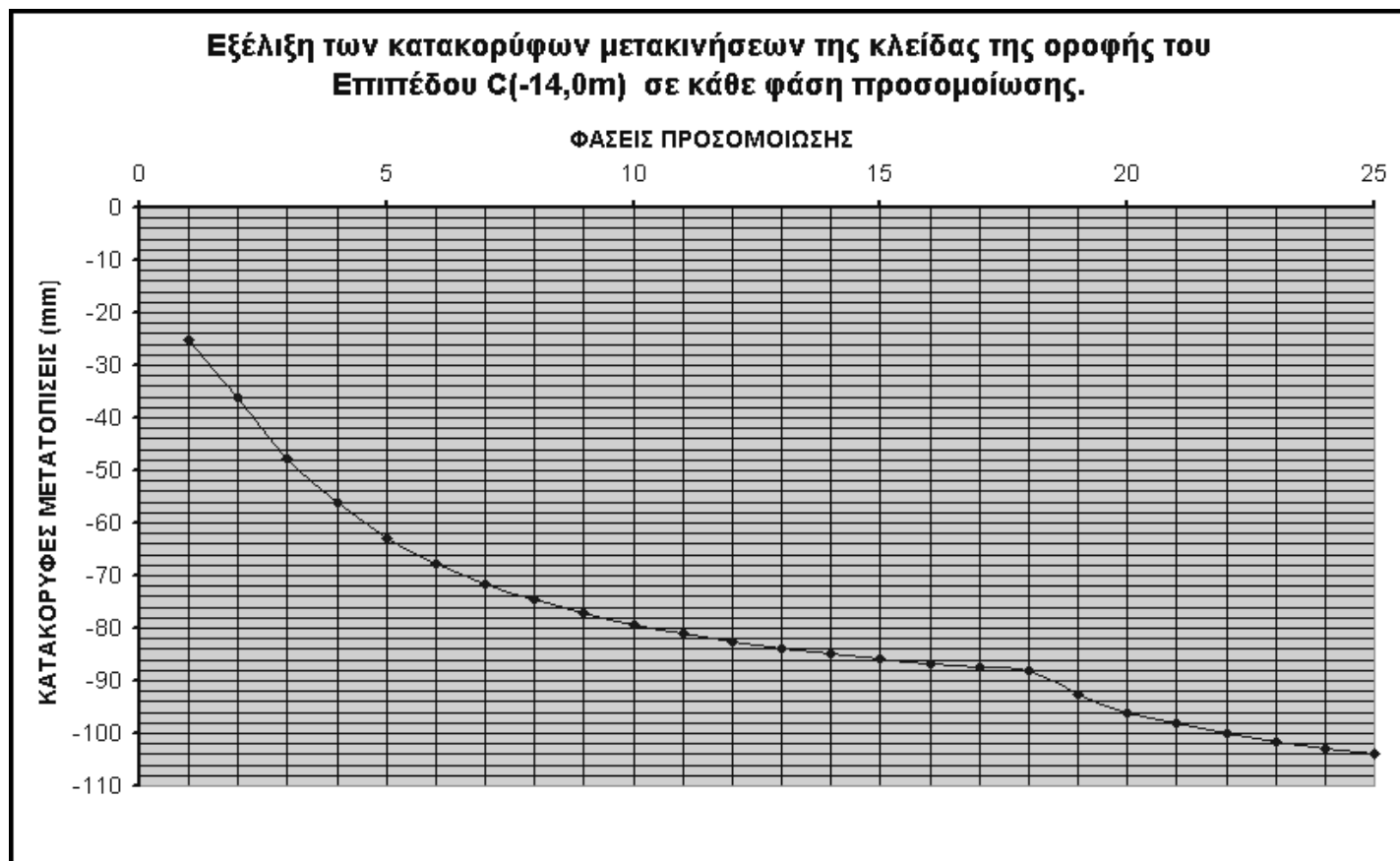
Για την καλύτερη κατανόηση της εξέλιξης των παραμορφώσεων κατασκευάστηκε ένα διάγραμμα της μεταβολής των κατακόρυφων μετακινήσεων της κλείδας της οροφής του Plane P(-40.0m) συναρτήσει των φάσεων προσομοίωσης (Εικόνα 6,36).



*Εικόνα 6.36. Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων της κλείδας της οροφής του Επιπέδου P σε κάθε φάση προσομοίωσης.*

Κατά τις πρώτες φάσεις προσομοίωσης και μέχρι τη φάση 12 το μέτωπο βρίσκεται αρκετά πίσω από το επίπεδο P, επομένως οι συγκλίσεις είναι περιορισμένες αλλά υπαρκτές όπως περιγράφονται και από τους τύπους Chern και Panet του πρώτου Κεφαλαίου (1.2). Στη συνέχεια (Φάση 13 έως 15) η οροφή λαμβάνει αυξημένες μετακινήσεις επειδή το μέτωπο φτάνει στην διατομή και έπειτα την ξεπερνά. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραμορφώσεις θα εμφάνιζαν πολύ μεγαλύτερη κλίση αν δεν είχε εφαρμοστεί η ομπρέλα των δοκίδων προπορείας και η υποστήριξη του κελύφους της άνω ημιδιατομής ακριβώς στο μέτωπο. Στις επόμενες φάσεις και μέχρι το τέλος η διατομή εμφανίζει μια συμπεριφορά προοδευτικής μείωσης του ρυθμού αύξησης των μετακινήσεων, δηλαδή το σύστημα περιβάλλουσα βραχόμαζα-άμεση υποστήριξη τείνει να ισορροπήσει. Αυτό που παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα είναι ότι η εκσκαφή της κάτω ημιδιατομής δεν μεταβάλλει τις μετακινήσεις. Το γεγονός αυτό δείχνει λογικό αφού ακόμα και στην εικοστήπέμπτη φάση προσομοίωσης η εκσκαφή και υποστήριξη του τελικού ανάστροφου τόξου βρίσκεται **16m** περίπου πίσω από το Επίπεδο P, απόσταση αρκετά μεγάλη για να επηρεάσει τις παραμορφώσεις.

Για τον λόγο αυτό εξετάστηκαν οι μετακινήσεις του **Επιπέδου C (-14,0m)** σε κάθε φάση προσομοίωσης.



*Εικόνα 6.37. Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων της κλείδας της οροφής του Επιπέδου C σε κάθε φάση προσομοίωσης.*

Κατά τις πρώτες **5 φάσεις** οι κατακόρυφες μετακινήσεις στη διατομή είναι έντονες αφού το μέτωπο διάνοιξης βρίσκεται πολύ κοντά. Στη συνέχεια, και μέχρι τη **φάση 18**, οι συγκλίσεις τείνουν να σταθεροποιηθούν στη τιμή των **8,5cm** αλλά η απενεργοποίηση του προσωρινού ανάστροφου τόξου και η εκσκαφή της βαθμίδας προκαλεί περαιτέρω μετατοπίσεις με κλίση (τουλάχιστον μέχρι τη **φάση 21**) παρόμοια με εκείνη των αρχικών φάσεων προσομοίωσης.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ**

### **7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**



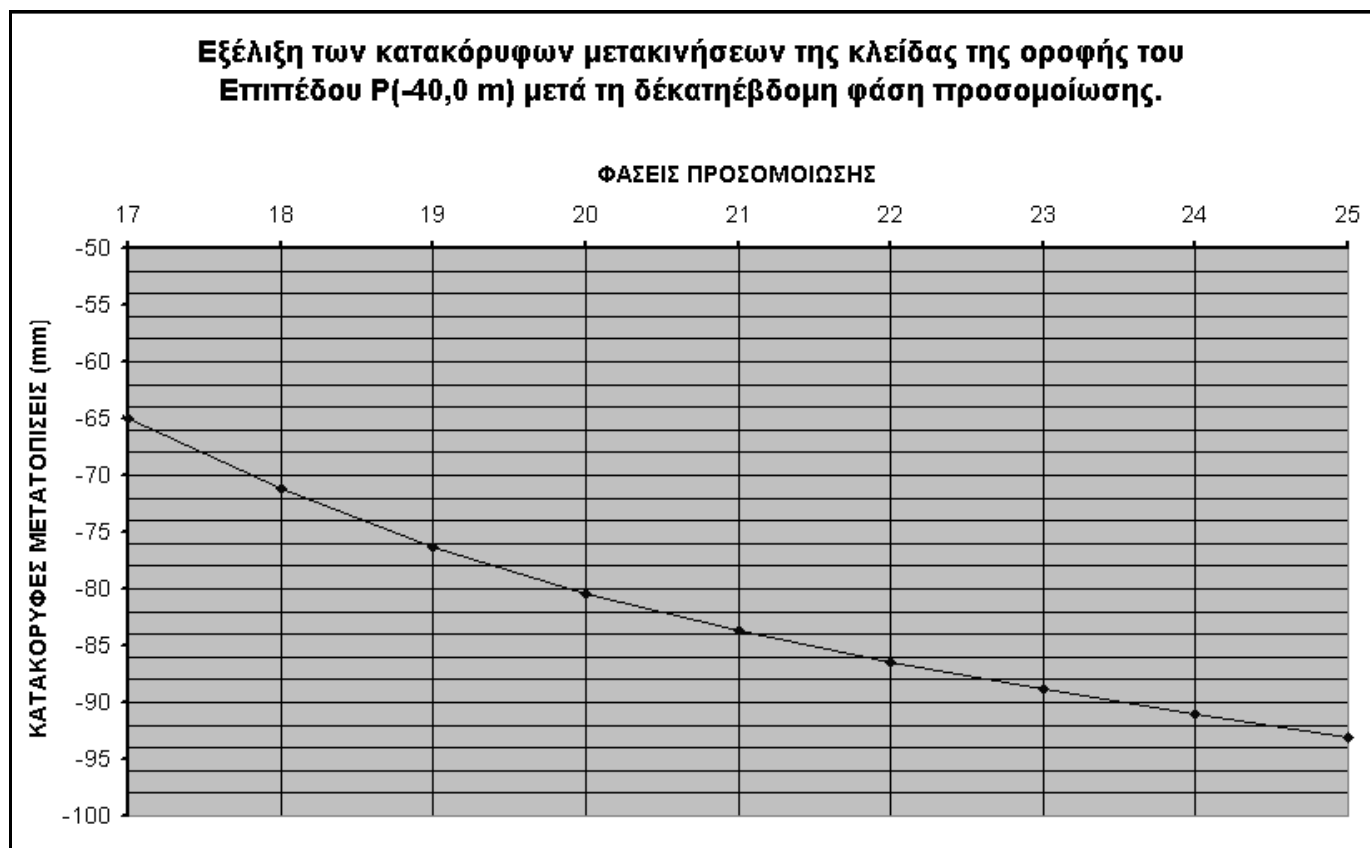
Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ερμηνείας των μετατοπίσεων που υπολογίστηκαν με χρήση των προγραμμάτων Plaxis V8.2 2D και Plaxis 3D Tunnel συγκριτικά με τις πραγματικές μετατοπίσεις που μετρήθηκαν στην σήραγγα και συγκεκριμένα στην ακίδα 3 η οποία βρίσκεται στη στέψη της.

Σύμφωνα με τις μετρήσεις οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στον αριστερό κλάδο και στη χιλιομετρική θέση Χ.Θ. 5+5457,023 η τελική κατακόρυφη μετατόπιση της ακίδας 3 μετρήθηκε ίση με **12,1 cm**. Στην εικόνα 5.17 του Κεφαλαίου 5 παρατηρούμε ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις της στέψης, κατά το πέμπτο και τελευταίο στάδιο προσομοίωσης της διδιάστατης ανάλυσης και για βαθμό αποτόνωσης  $\lambda=0,90$ , ισούνται με  $u_y=184.96* 10^{-3}m$ . Αν ελέγξουμε τα στάδια προσομοίωσης θα παρατηρήσουμε ότι σε αυτή τη διδιάστατη ανάλυση οι μετατοπίσεις της υπό μελέτη διατομής αρχίζουν να εμφανίζονται μετά το δεύτερο στάδιο όπου αποτονώνεται η ανυποστήρικτη άνω ημιδιατομή, δηλαδή δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη οι μετατοπίσεις της διατομής πριν το μέτωπο εκσκαφής φτάσει στη διατομή αυτή. Ακόμη και κατά το πρώτο στάδιο προσομοίωσης όπου γίνεται μια προσπάθεια υπολογισμού των μετατοπίσεων πριν την εκσκαφή της άνω ημιδιατομής, οι μετακινήσεις είναι ελάχιστες διότι δεν μπορεί να προσομοιωθεί η αποτόνωση της βραχόμαζας μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης όπως περιγράφονται από τις καμπύλες Chern και Panet (τη στιγμή που στην επόμενη φάση πρέπει να ορίσουμε έναν καινούργιο βαθμό αποτόνωσης). Συνεπώς θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η παραπάνω κατακόρυφη μετακίνηση που υπολογίστηκε με το Plaxis 2D μπορεί να συγκριθεί με την τελική κατακόρυφη μετατόπιση της ακίδας 3, και αυτό διότι η ακίδα μέτρησης τοποθετείται τουλάχιστον ακριβώς μπροστά στο μέτωπο ή κάποια μέτρα πίσω από αυτό (δεν είναι όμως κατασκευαστικά δυνατό η ακίδα να τοποθετηθεί μπροστά από το μέτωπο διάνοιξης).

Σημαντικό ρόλο στην απόκλιση των δυο τιμών παίζει ο βαθμός αποτόνωσης. Είναι πολύ πιθανόν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης της άνω ημιδιατομής να τοποθετήθηκαν πιο νωρίς, δηλαδή όταν η βραχόμαζα δεν είχε αποτονωθεί σε τόσο μεγάλο βαθμό. Μια μικρότερη τιμή δηλαδή του βαθμού αποτόνωσης κατά το δεύτερο στάδιο προσομοίωσης θα είχε σαν αποτέλεσμα περιορισμένες μετακινήσεις της ανυποστήρικτης διατομής. Πράγματι, στην εικόνα 5.32 του Κεφαλαίου 5, η κατακόρυφη μετακίνηση της στέψης της διατομής N3 για το πέμπτο στάδιο προσομοίωσης με  $\lambda=0,74$ , είναι ίση με  $U_y=134.81* 10^{-3}m$ , αρκετά κοντά δηλαδή στην μετρημένη τιμή των **12.1 cm**. Ένα σημαντικό δεδομένο το οποίο δεν έχει ληφθεί υπόψη στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο κλάδων εξαιτίας του στενού στύλου ανάμεσα τους, γεγονός το οποίο έχει επηρεάσει τις μετρημένες μετακινήσεις της ακίδας 3. Στην περίπτωση αυτή η μετακίνηση  $U_y$  θα ήταν μεγαλύτερη αφού η βραχόμαζα θα αστοχούσε σε μεγαλύτερο βαθμό και ο ελαστοπλαστικός κλάδος της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης θα ήταν μεγαλύτερος. Η απόκλιση η οποία θα προέκυπτε οφείλεται κυρίως στην διδιάστατη ανάλυση κατά την οποία δεν είναι εφικτή η επιλογή βήματος πρόωθησης, η σταδιακή τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης και η σταδιακή «σκλήρυνση» του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, δεδομένα τα οποία θα προκαλούσαν μείωση των τελικών μετατοπίσεων.

Το προσομοίωμα της τρισδιάστατης ανάλυσης έχει εύρος, κατά τον άξονα πρόωθησης, 80m. Μια αντιπροσωπευτική διατομή, οι μετακινήσεις της οποίας θα μπορούσαν να συγκριθούν με εκείνες της ακίδας 3, είναι το επίπεδο P το οποίο

βρίσκεται στο μέσον του προσομοιώματος. Στην εικόνα 6.36 του Κεφαλαίου 6 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων της κλείδας της οροφής σε κάθε φάση προσομοίωσης. Για να μπορέσουν να συγκριθούν οι μετακινήσεις αυτές με τις πραγματικές θα πρέπει να διαχωριστούν οι μετακινήσεις που θα κατέγραφε η ακίδα αν είχε τοποθετηθεί στη διατομή από τις ολικές μετατοπίσεις στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και εκείνες που πραγματοποιεί η διατομή πριν το μέτωπο φτάσει εκεί. Στη φάση 17 λοιπόν το μέτωπο φτάνει στη διατομή P, οπότε οι μετακινήσεις από εκεί και μέχρι το τέλος των φάσεων προσομοίωσης θα μπορέσουν να συγκριθούν με τις πραγματικές.



*Εικόνα 7.1. Εξέλιξη των κατακόρυφων μετακινήσεων της κλείδας της οροφής του Επιπέδου P(-40,0m) μετά τη δέκατηέβδομη φάση προσομοίωσης.*

Στην παραπάνω εικόνα παρατηρείται ότι η κατακόρυφη μετακίνηση που προκύπτει μετά την δέκατηέβδομη φάση είναι ίση με **3cm** περίπου, τιμή η οποία απέχει πολύ από την μετακίνηση των **12,1cm** που μετρήθηκε στην ακίδα 3. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξέλιξη των μετατοπίσεων στην εικόνα 7.1 διατηρεί σταθερή κλίση μέχρι το τέλος των φάσεων προσομοίωσης και δεν απομειώνεται σταδιακά, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι οι κατακόρυφες μετακινήσεις του επιπέδου P κατά την Α' Φάση δεν έχουν φτάσει στη μέγιστη τιμή τους. Επιπλέον, στην εικόνα 7.1 δεν υπολογίζονται οι περαιτέρω κατακόρυφες μετακινήσεις που προκύπτουν λόγω εκσκαφής της βαθμίδας, και αυτό γιατί μετά το τέλος των φάσεων προσομοίωσης η εκσκαφή της βαθμίδας βρίσκεται 16m πίσω από την υπό μελέτη διατομή. Επομένως ένα προσομοίωμα με μεγαλύτερο εύρος ή η επιλογή μιας αντιπροσωπευτικής

διατομής στην οποία έχουν προκληθεί μετακινήσεις λόγω της Β' Φάσης θα έδινε αυξημένες τιμές οι οποίες θα μπορούσαν να συγκριθούν με τις μετακινήσεις της ακίδας 3 στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί και οι δυο φάσεις εκσκαφής και υποστήριξης.

Τέλος, αξίζει να τονισθεί η σημαντική αβεβαιότητα στην επιλογή του μέτρου ελαστικότητας, η τιμή του οποίου επηρεάζει αισθητά τις τελικές τιμές των παραμορφώσεων. Η παράμετρος αυτή είναι πιθανόν να έχει επηρεάσει τις συγκλίσεις της διατομής καθώς έχει επιλεγεί ένα μεγαλύτερο μέτρο Ελαστικότητας σε σχέση με το πραγματικό μέσω του τύπου:

$$E=(\sigma_{ci}/100)^{0,5} \alpha \log((GSI-10)/40) \quad (\text{Hoek,1998})$$



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- **Hoek E. (1999) “Support for very weak rock associated with faults and shear zones”**  
Proc. International Symposium on Rock Support and Reinforcement Practice in Mining, Kalgoorlie, Australia, March 1999.
- **Marinos P., Hoek E., “The appropriate use of geological information in the design and construction of the Egnatia Motorway tunnels”**  
Δημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού», ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. και Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., Ιωάννινα, 2001.
- **Marinos P., Hoek E., Kazilis N., Agistalis G., Rahaniotis N., Marinos V. (2006) “The tunnels of Egnatia Highway. Design in a variety of rock masses under difficult geological conditions”**  
5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
- **Γεωργανόπουλος Χ., “Στοιχεία σχεδιασμού της Εγνατίας Οδού και των σηράγγων της”**  
Δημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού», ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. ΚΑΙ Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., Ιωάννινα, 1999.
- **Καββαδάς Μ., «Σημειώσεις Σχεδιασμού υπογείων έργων».**  
Σημειώσεις μαθήματος του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π., Μάρτιος 2005, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- **Μαρίνος Β., Μαρίνος Π., Ηοεκ Ε., «Γεωλογικός δείκτης αντοχής GSI: Εφαρμογή, συστάσεις, περιορισμοί και πεδία μεταβολών ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος».**  
Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI (2004), Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη, Απρίλιος 2004.
- **Παντζαρτζής Π., Μπότσιαλας Χ., «Σήραγγα Ανθοχωρίου: Ιδιαιτερότητες της γεωλογικής/γεωτεχνικής έρευνας».**  
Δημερίδα «Οι σήραγγες της Εγνατίας Οδού», ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ Α.Ε. και Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., Ιωάννινα, 1999.
- **Παπαδόπουλος Β., Στοιχεία του μαθήματος «Βραχομηχανική-Σήραγγες» (σημειώσεις).**  
Αθήνα 2004, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.

- **Γιαμούζη Ε., Μπουζιάνη Σ., «Αξιολόγηση συγκλίσεων της σήραγγας Ανθοχωρίου».**  
Αθήνα 2010, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.
- **PLAXIS 3D Tunnel User's Manual, Version 1,** Edited by R.B.J. Brinkgreve, and P.A. Vermeer, Balkema Publishers, 2001.
- **PLAXIS Professional User's Manual, Version 8,** Edited by R.B.J. Brinkgreve, Balkema Publishers, 2002.

