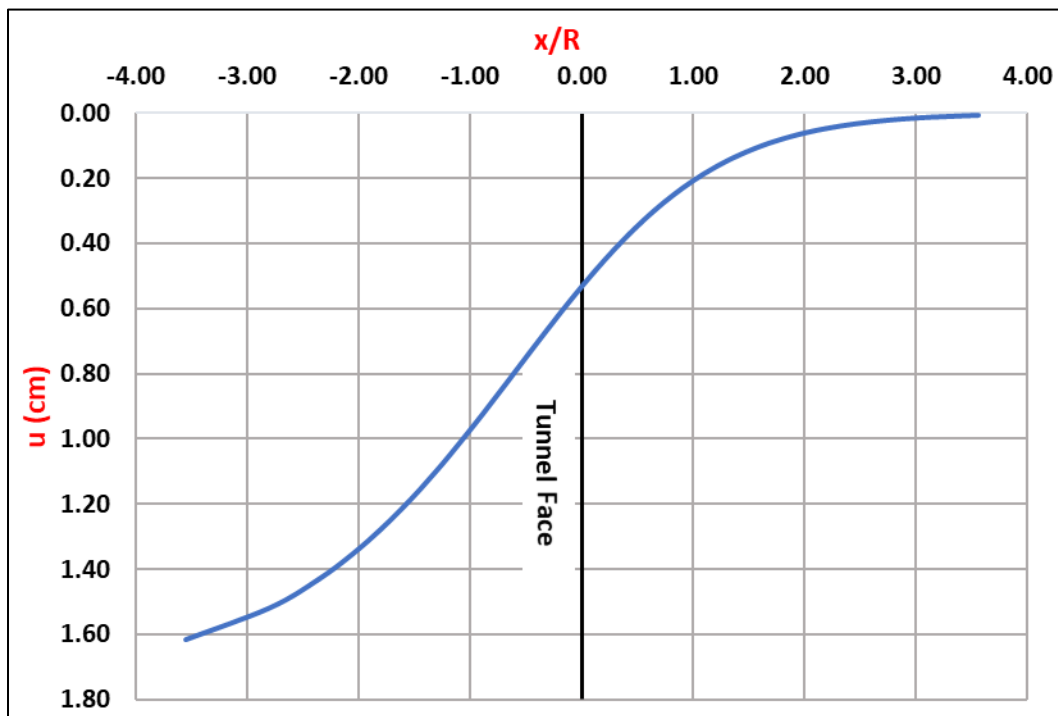


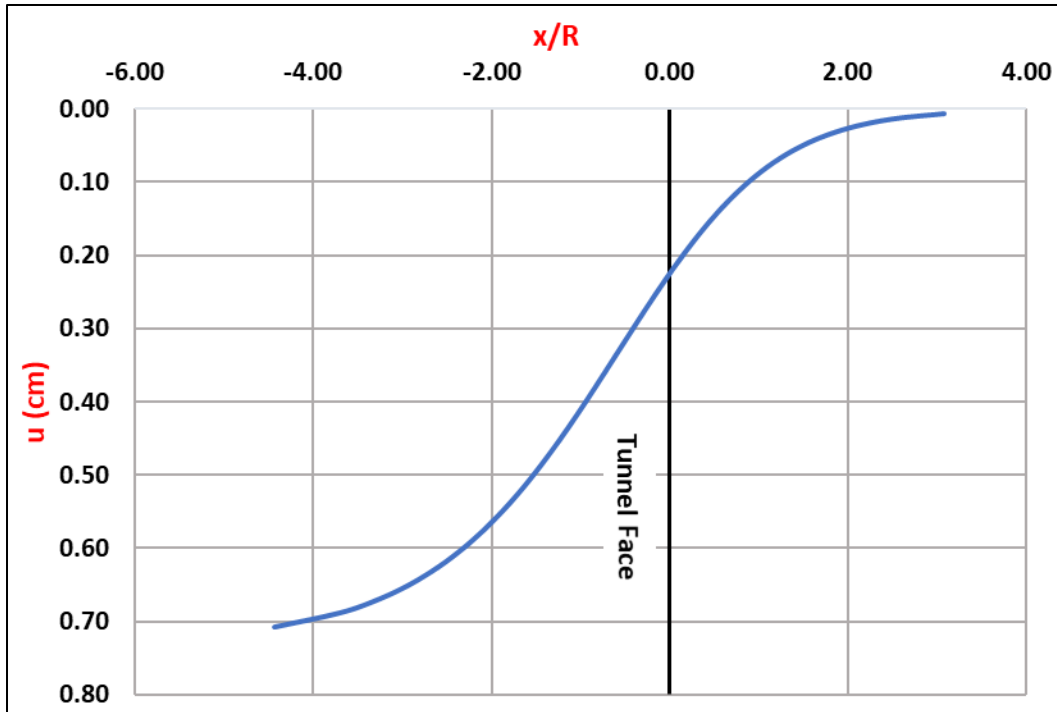
Λύση Άσκησης 4

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση αστικής σήραγγας Μετρό με διδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων (Rocscience – RS2) με σκοπό να εκτιμηθούν τα μέτρα της προσωρινής υποστήριξης της σήραγγας.

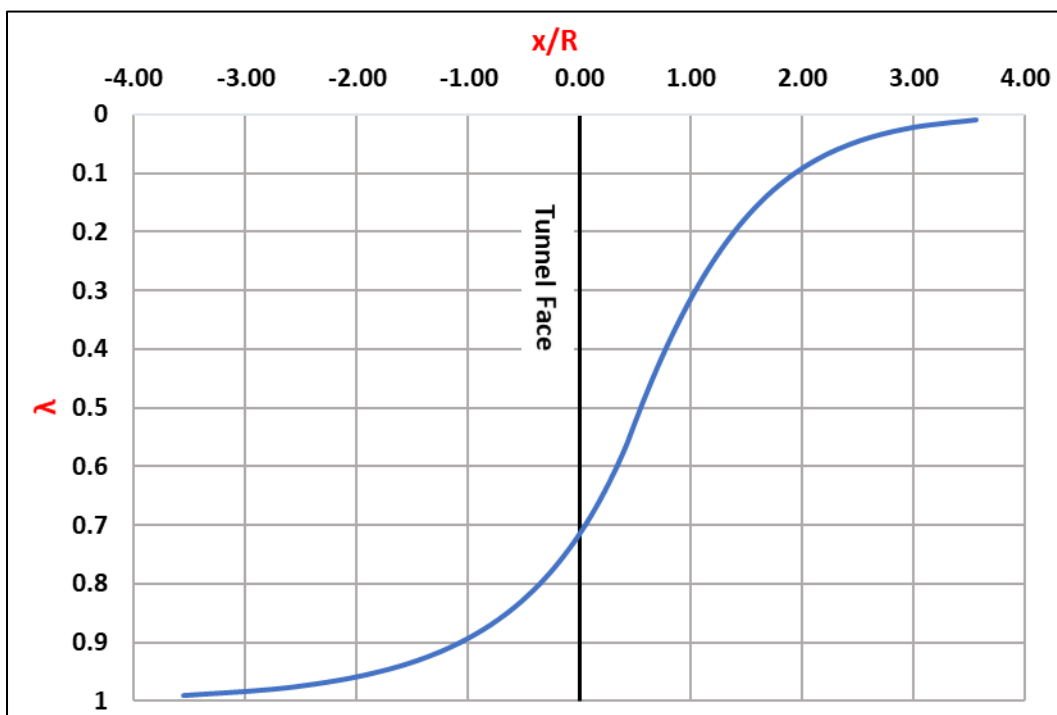
Για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες (Τ.Ε. 1, 2) διαμορφώνονται οι ακόλουθες καμπύλες διαμήκους προφίλ μετακινήσεων (*Διαγράμματα 1,2*) και διαμήκους ανάπτυξης του βαθμούς αποτόνωσης (*Διαγράμματα 3,4*), βασιζόμενοι στην μέθοδο *Chern et al 1998*.



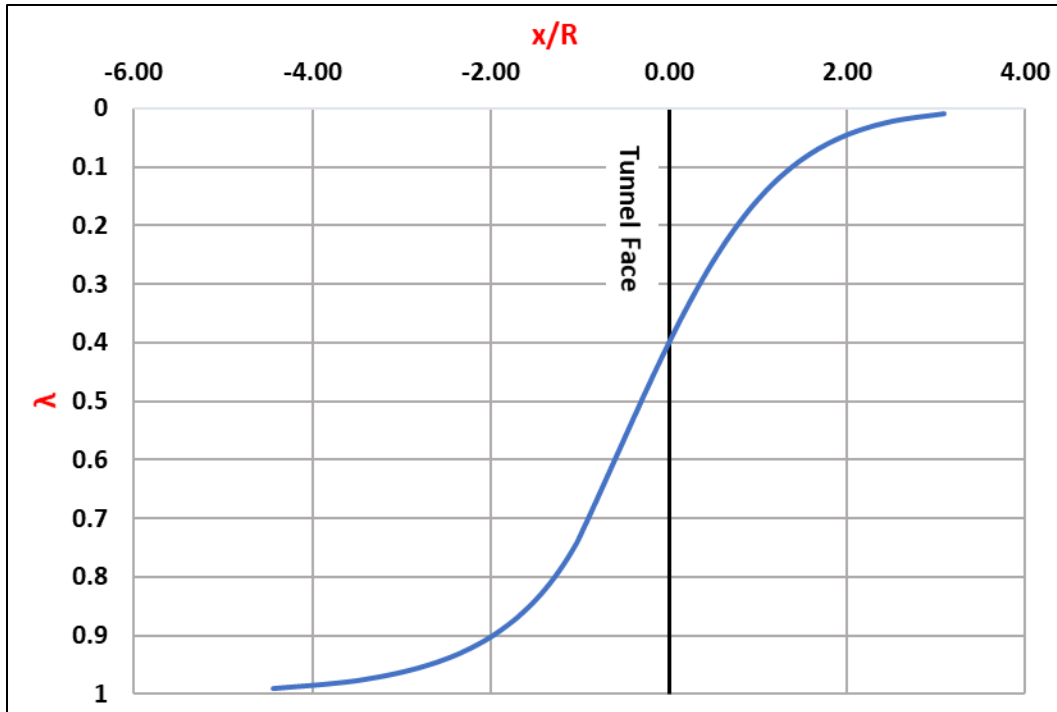
Διάγραμμα 1. Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (*u*) για την τεχνικογεωλογική ενότητα (Τ.Ε.1), βάσει μεθόδου *Chern et al. 1998*.



Διάγραμμα 2. Διαμήκες προφίλ μετακινήσεων (u) για την τεχνικογεωλική ενότητα (Τ.Ε.2), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998.

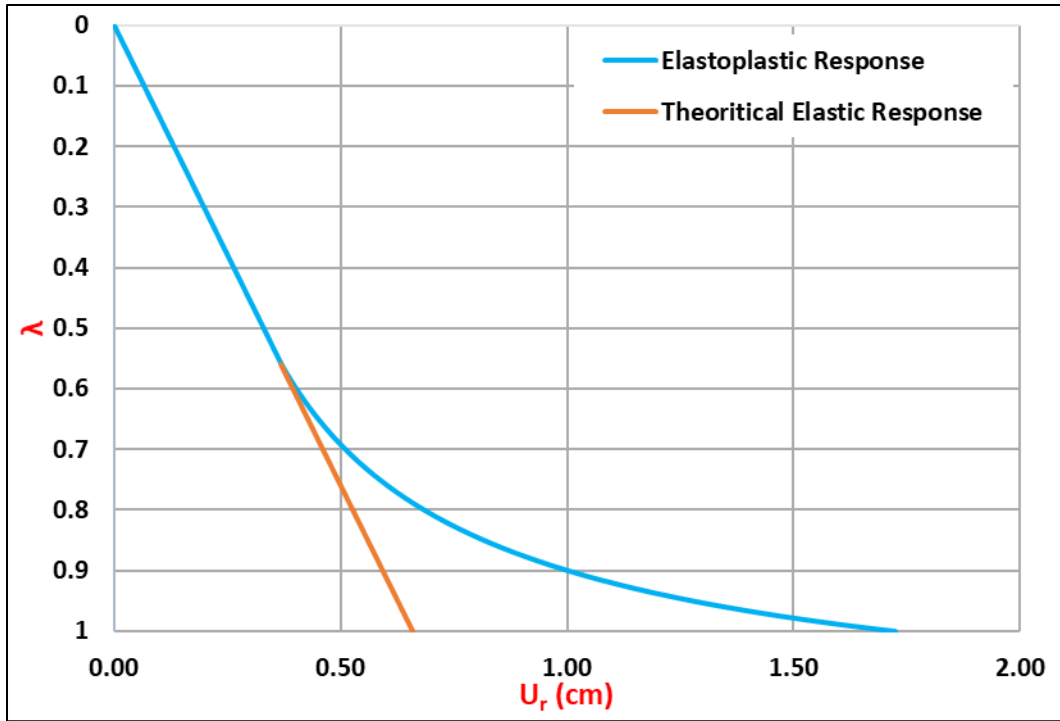


Διάγραμμα 3. Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για την τεχνικογεωλική ενότητα (Τ.Ε.1), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998.

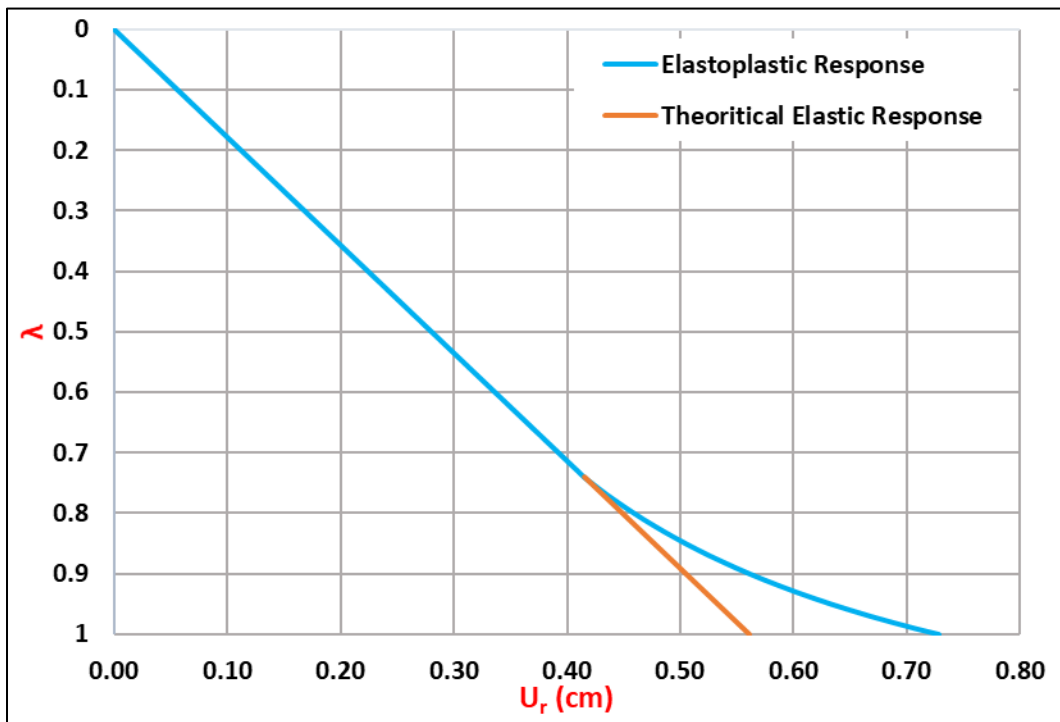


Διάγραμμα 4. Διαμήκες προφίλ βαθμού αποτόνωσης (λ) για την τεχνικογεωλική ενότητα (Τ.Ε.2), βάσει μεθόδου Chern et al. 1998.

Στην συνέχεια στα **Διαγράμματα 5 και 6**, παρατίθενται οι χαρακτηριστικές καμπύλες σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για ανυποστήρικτη εκσκαφή για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες (Τ.Ε. 1,2).



Διάγραμμα 5. Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για την τεχνικογεωλογική ενότητα (T.E. 1) ανυποστήρικτης εκσκαφής.



Διάγραμμα 6. Χαρακτηριστική καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($u - \lambda$) για την τεχνικογεωλογική ενότητα (T.E. 2) ανυποστήρικτης εκσκαφής.

Με βάσει τα **Διαγράμματα 3 και 4**, προκύπτει ο βαθμός αποτόνωσης σε διάφορες θέσεις από το μέτωπο, όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 1**.

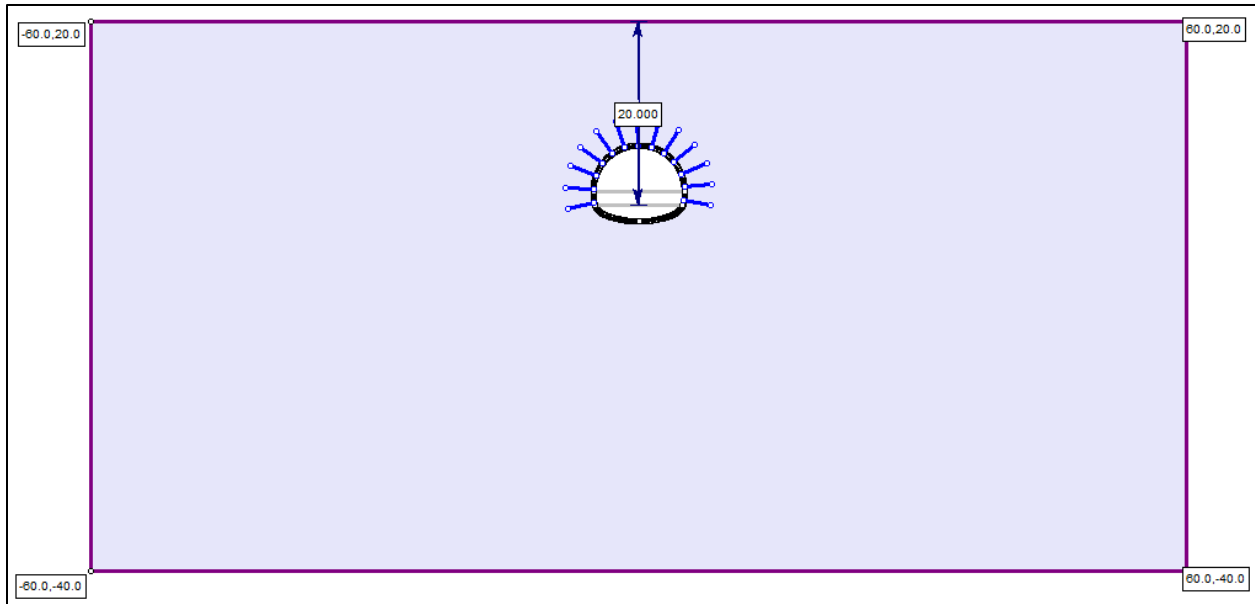
Τεχνικογεωλογική ενότητα	Απόσταση από μέτωπο εκσκαφής	Βαθμός αποτόνωσης (λ)	1-λ	Περιγραφή
T.E. 1	0m	0.72	0.28	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.0 m	0.77	0.23	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης
T.E. 2	0m	0.4	0.6	Μέτωπο εκσκαφής
	-1.0 m	0.47	0.53	Θέση τοποθέτησης προσωρινής υποστήριξης

Πίνακας 1. Βαθμός αποτόνωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις κατά μήκος του άξονα της σήραγγας για τις δύο τεχνικογεωλογικές ενότητες.

Τα όρια του μοντέλου στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων RS2 - Rocscience, ορίζονται ίσα με έξι (6) διαμέτρους (D) αριστερά και δεξιά της εκσκαφής, τέσσερις (4) διαμέτρους (D) κάτω της εκσκαφής, ενώ το άνω όριο ορίζεται ως το επίπεδο του εδάφους, δηλαδή 20m πάνω από τον άξονα της σήραγγας. Στον **Πίνακα 2**, παρατίθενται οι συντεταγμένες του προσομοιώματος (**Εικόνα 1**).

Σημείο	Άξονας Χ	Άξονας Υ
1	60.0	20.0
2	60.0	-40.0
3	-60.0	-40.0
4	-60.0	20.0

Πίνακας 2. Συντεταγμένες προσομοιώματος.



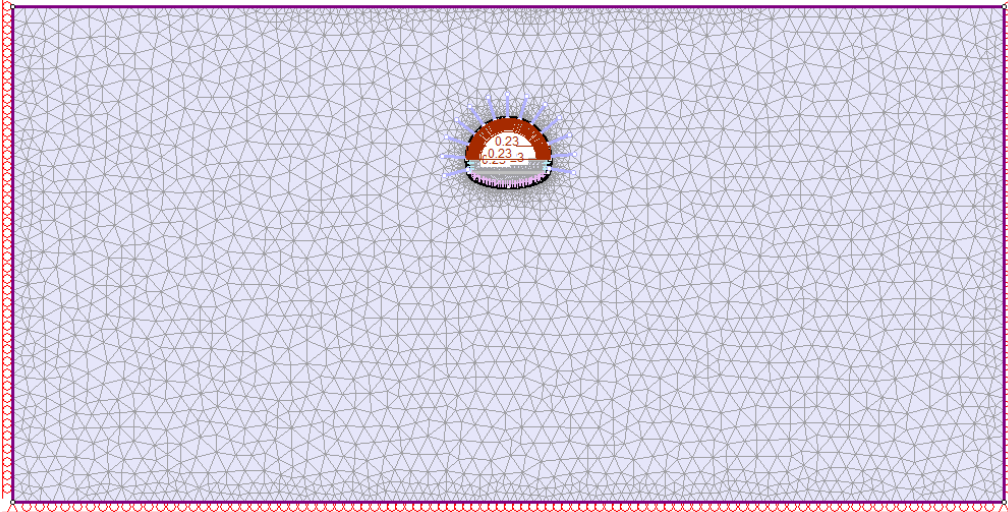
Εικόνα 1. Διαστάσεις προσομοιώματος.

Τα στάδια της προσομοίωσης που ακολουθηθήκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 3**.

Στάδιο	Αριθμητικό προσομοίωμα
1. Γεωστατικό Πεδίο	<p>The image shows a numerical simulation of a geostatic field. It features a dense triangular mesh covering the entire rectangular domain. In the center, the same circular structure and upward force from the previous diagram are visible. The mesh is finer around the central structure and coarser towards the boundaries. The domain is bounded by a red dashed line.</p>

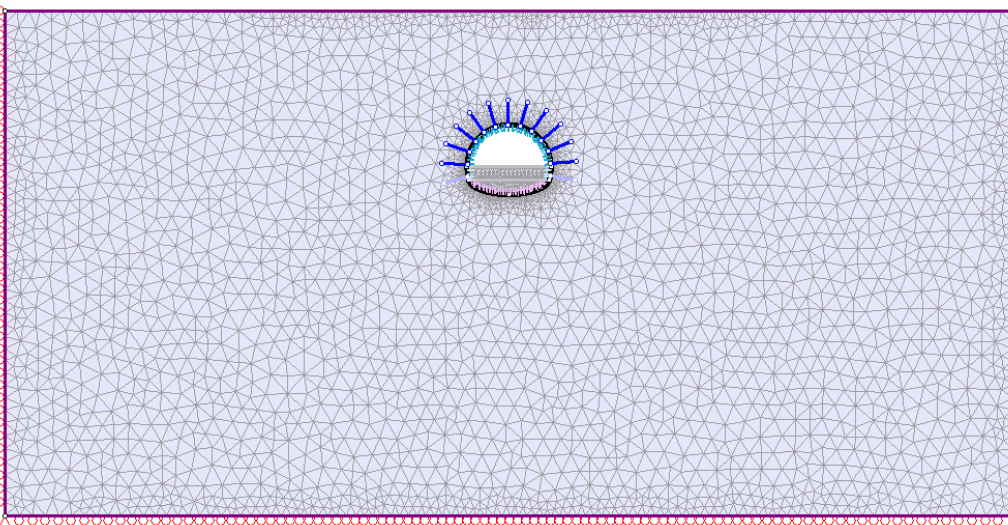
2. Εκκαφή και Αποτόνωση

Α' φάσης εκκαφής



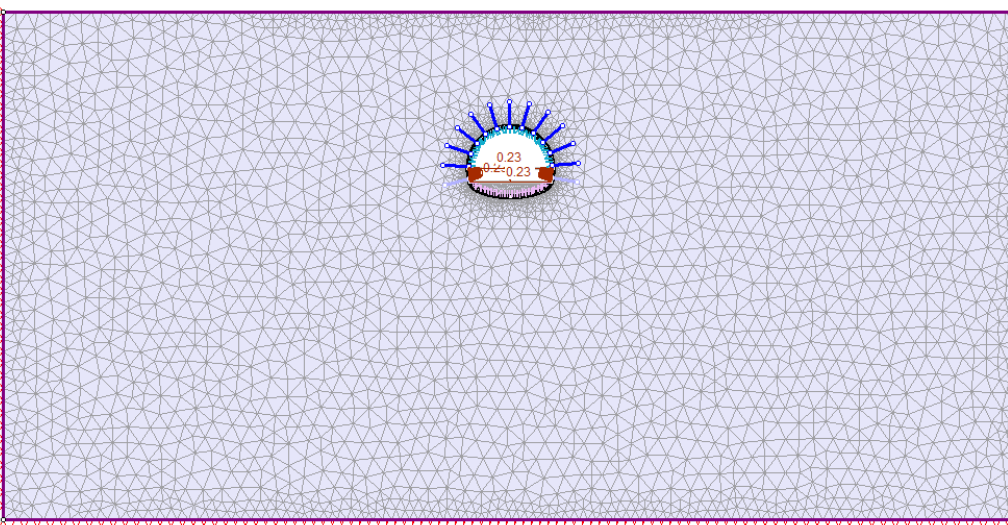
3. Ενεργοποίηση Άμεσης Υποστήριξης

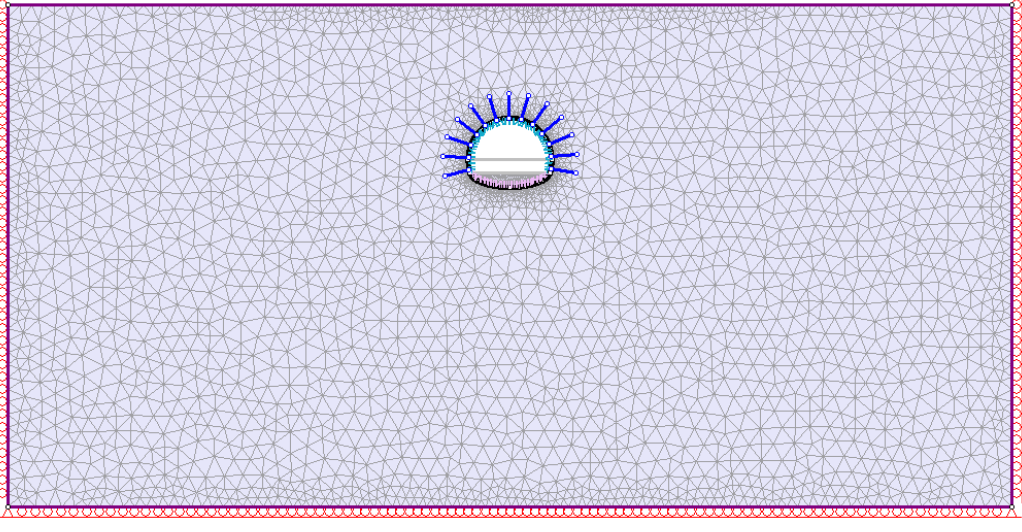
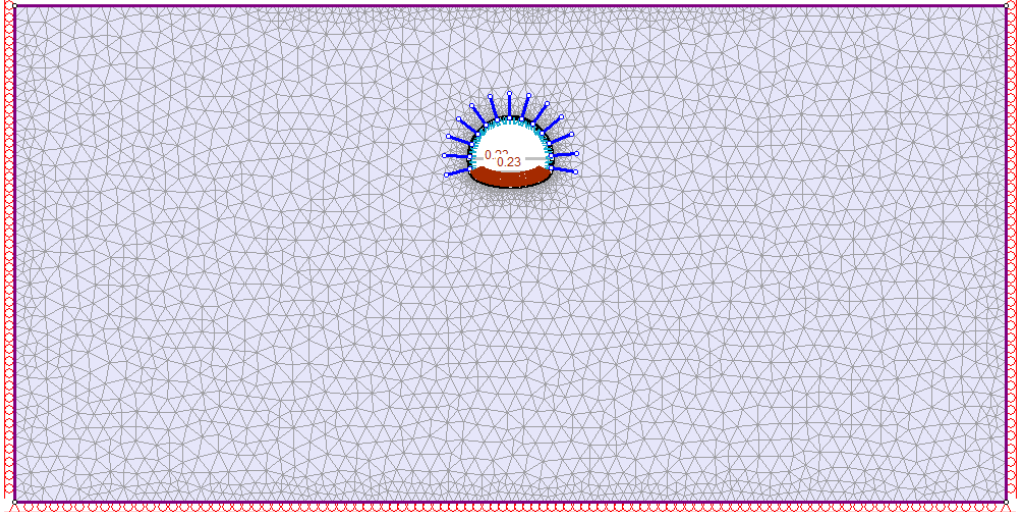
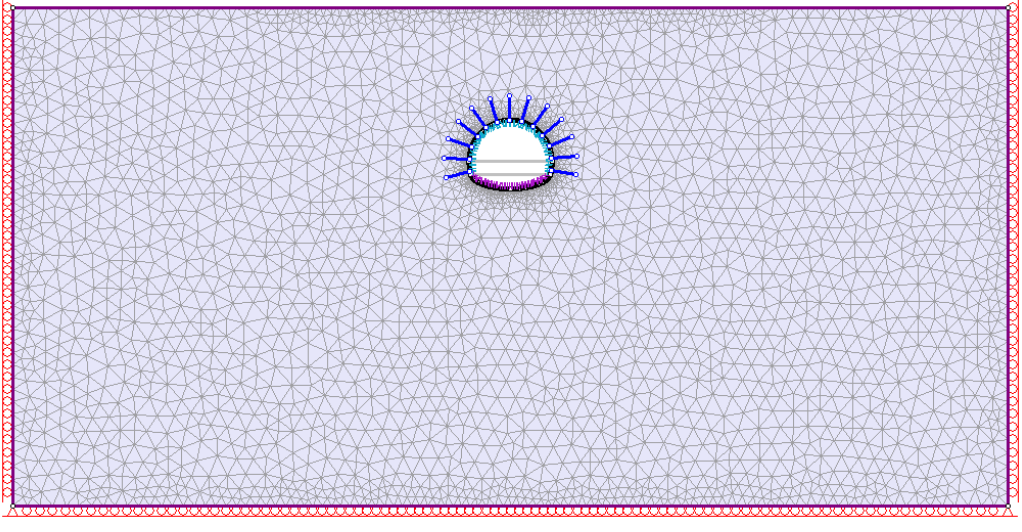
Α' φάσης εκκαφής



4. Εκκαφή και Αποτόνωση

Β' φάσης εκκαφής



<p>5. Ενεργοποίηση Άμεσης Υποστήριξης Β' φάσης εκσκαφής</p>	
<p>6. Εκσκαφή και Αποτόνωση Γ' φάσης εκσκαφής</p>	
<p>7. Ενεργοποίηση Άμεσης Υποστήριξης Γ' φάσης εκσκαφής</p>	

Πίνακας 3. Στάδια προσομοίωσης.

- **Βασικές Παραδοχές**

- ✓ Προσομοίωση εδάφους

Το έδαφος προσομοιώθηκε με ελαστοπλαστικά, χρησιμοποιώντας ισότροπη γραμμική ελαστικότητα. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του γεωυλικού, χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, παρουσιάζονται στον

Πίνακα 4.

<u>Παράμετρος</u>	T.E. 1	T.E. 2
	<u>Τιμή</u>	<u>Τιμή</u>
<i>Ειδικό βάρος (γ)</i>	23 kN/m³	23 kN/m³
<i>Μέτρο Ελαστικότητας (E_{soil})</i>	340 MPa	400 MPa
<i>Λόγος Poisson (ν)</i>	0.3	0.3
<i>Συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_0)</i>	0.5	0.5
<i>Συνοχή (c)</i>	35 kPa	70 kPa
<i>Γωνία τριβής (ϕ)</i>	28°	35°
<i>Διαστολικότητα (δ)</i>	7.0°	8.75°

Πίνακας 4. Ιδιότητες γεωυλικού.

- ✓ Μέτρα Υποστήριξης

Η υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος πραγματοποιήθηκε από ένα κέλυφος εκτοξευόμενου σκυροδέματος (shotcrete) και μεταλλικών πλαισίων (steel ribs) και αγκυρώσεις ολόσωμης πάκτωσης (bolt). Οι ιδιότητες των μέτρων υποστήριξης, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.**

<i>Αγκύρια Ολόσωμης Πάκτωσης (Fully Bonded Bolts)</i>	
<i>Διάμετρος (d)</i>	25
<i>Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})</i>	200 GPa
<i>Φέρουσα ικανότητα ($P_u, Tensile$)</i>	270 kN
<i>Μήκος (L)</i>	4.0 m
<i>Κάναβος</i>	1 x 1.5 m
<i>Συμπεριφορά</i>	Ελαστική
<i>Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (Shotcrete)</i>	
<i>Πάχος (t)</i>	15 cm

<i>Μέτρο Ελαστικότητας ($E_{shotcrete}$)</i>	17 GPa
<i>Λόγος Poisson (ν)</i>	0.2
<i>Θλιπτική Αντοχή (f_{ck})</i>	30 MPa
<i>Εφελκυστική Αντοχή (f_{ctm})</i>	6 MPa
<i>Ειδικό βάρος (γ_{shot})</i>	25 kN/m³
<i>Συμπεριφορά</i>	Ελαστική
<i>Μεταλλικά Πλαίσια (Steel Ribs)</i>	
<i>Τύπος</i>	HEB 140
<i>Μέτρο Ελαστικότητας (E_{steel})</i>	200 GPa
<i>Εμβαδό (A)</i>	42.96 cm²
<i>Ροπή Αδρανείας (I)</i>	1.509 x 10⁻⁵ m⁴
<i>Συμπεριφορά</i>	Ελαστική

Πίνακας 5. Ιδιότητες μέτρων άμεσης υποστήριξης.

- **Διακριτοποίηση (Mesh)**

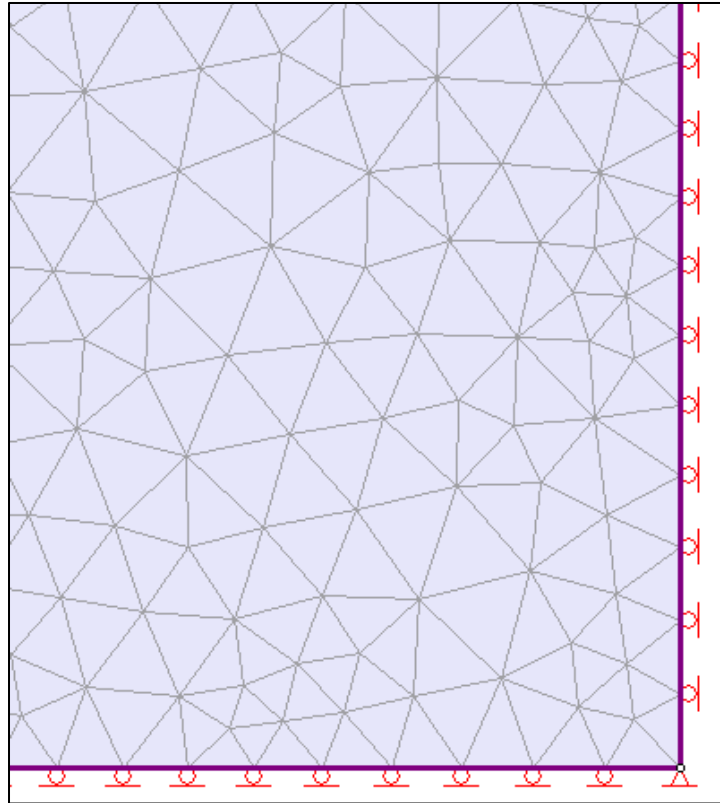
Επιλέχθηκαν τριγωνικά – τρικομβικά στοιχεία συνεχούς μέσου (3 nodes triangles elements). Το σύνολο των στοιχείων και των ενδιάμεσων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση, παρατίθενται στον **Πίνακα 6**.

<i>Στοιχεία (elements)</i>	9304
<i>Κόμβοι (nodes)</i>	5145

Πίνακας 6. Σύνολο στοιχείων και κόμβων προσομοιώματος.

- **Συνοριακές συνθήκες (Boundary restrains)**

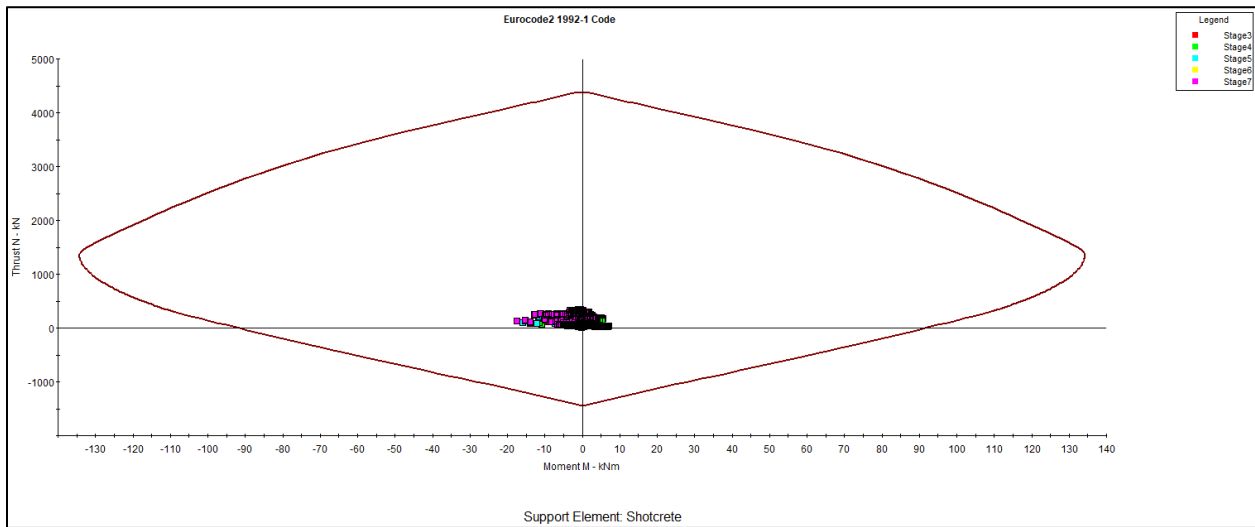
Χρησιμοποιήθηκαν κυλίσεις (rollers) τόσο κατά τον άξονα X, όσο και τον άξονα Y και τοπική άρθρωση (pinned) στην τομή των αξόνων X και Y , όπως παρουσιάζεται στην **Εικόνα 2**.



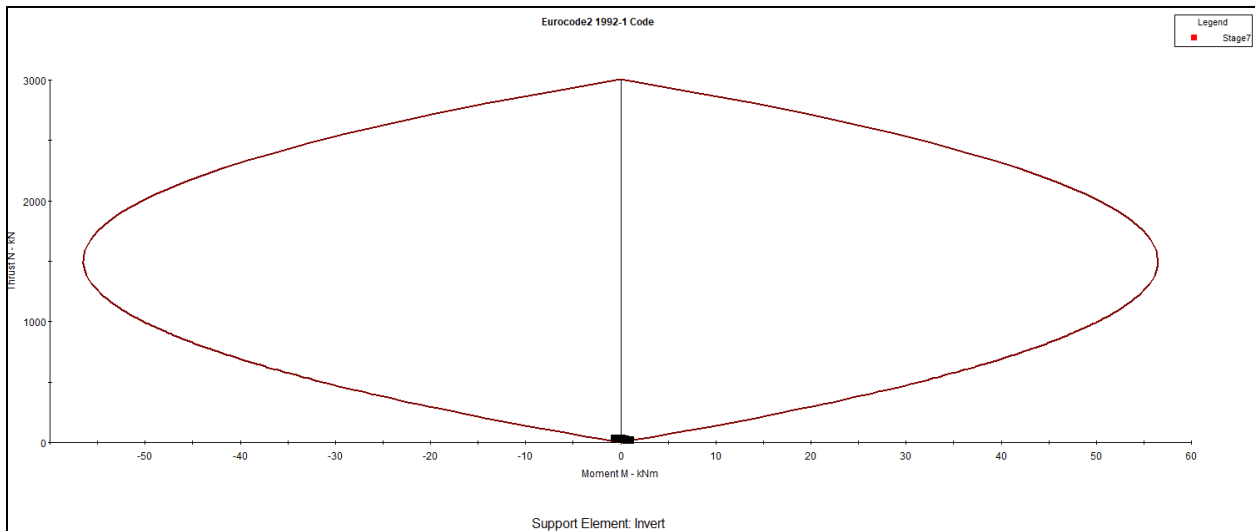
Εικόνα 2. Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος.

Αποτελέσματα για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα Τ.Ε. 1

Αρχικά έγινε παρομοίωση της προσωρινής υποστήριξης για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους ($t = 15\text{cm}$). Από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, καθώς δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στις **Εικόνες 3 και 4**, παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τόσο για το κέλυφος υποστήριξης πέριξ της σήραγγας, όσο και για το τελικό ανάστροφο τόξο (invert).

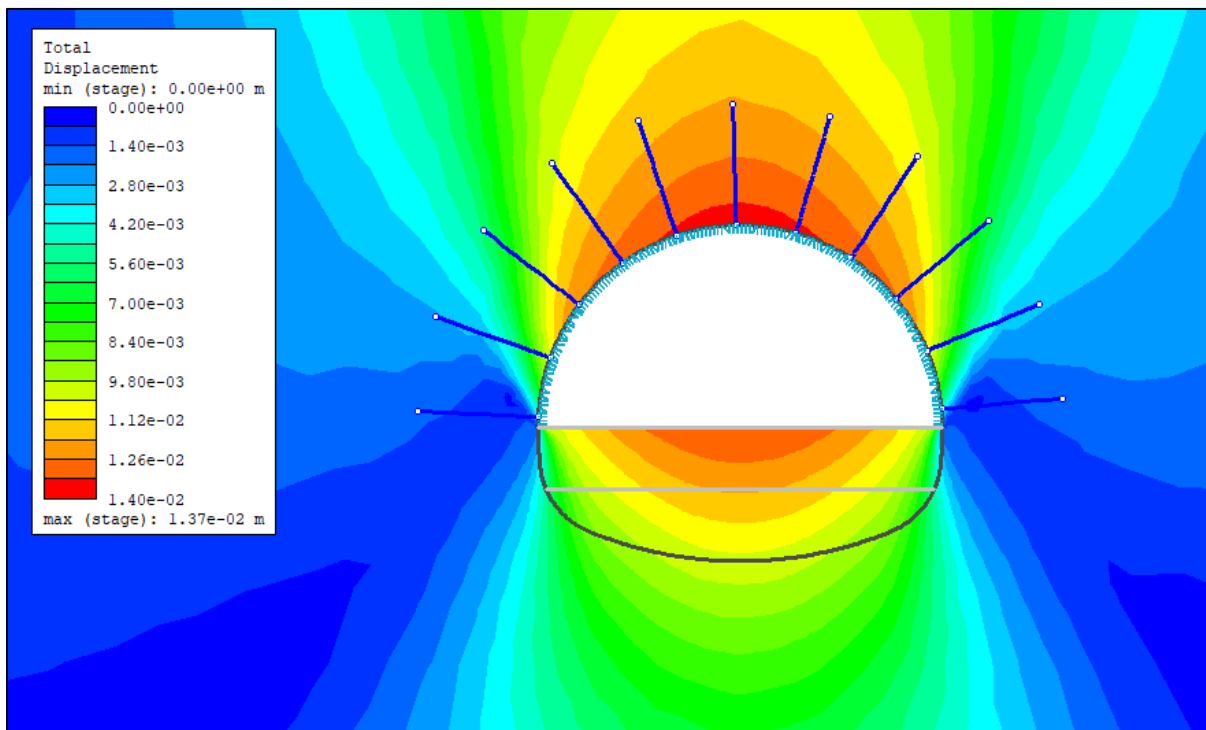


Εικόνα 3. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης κελύφους προσωρινής υποστήριξης, βάσει Eurocode 2 – 1992.

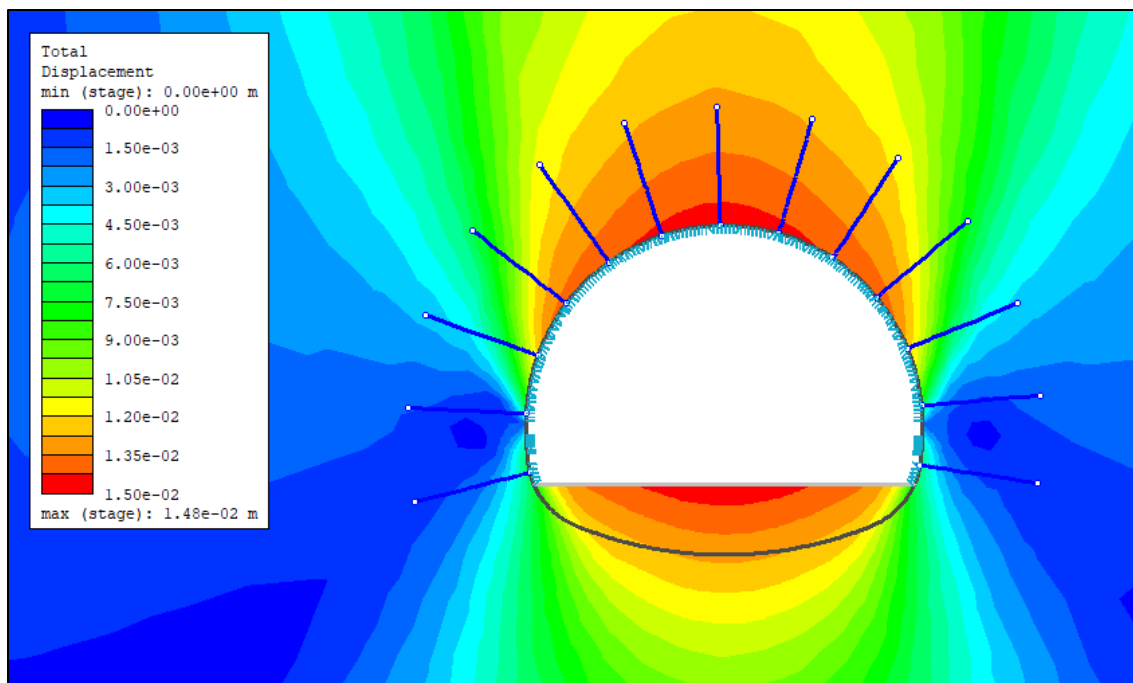


Εικόνα 4. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τελικού ανάστροφου τόξου (invert), βάσει Eurocode 2 – 1992.

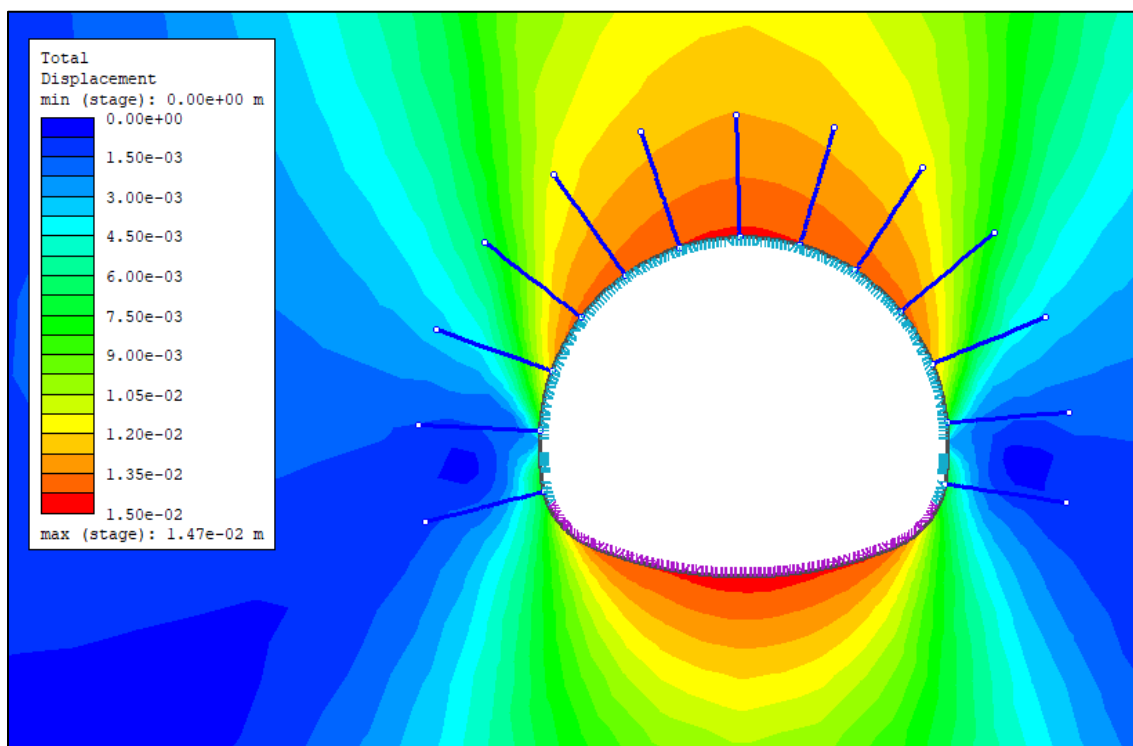
Με βάση την παραπάνω προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων τόσο κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής, της Β' φάσης εκσκαφής αλλά και της Γ' φάσης εκσκαφής, παρουσιάζονται στις **Εικόνες 5, 6 και 7** αντίστοιχα.



Εικόνα 5. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής.

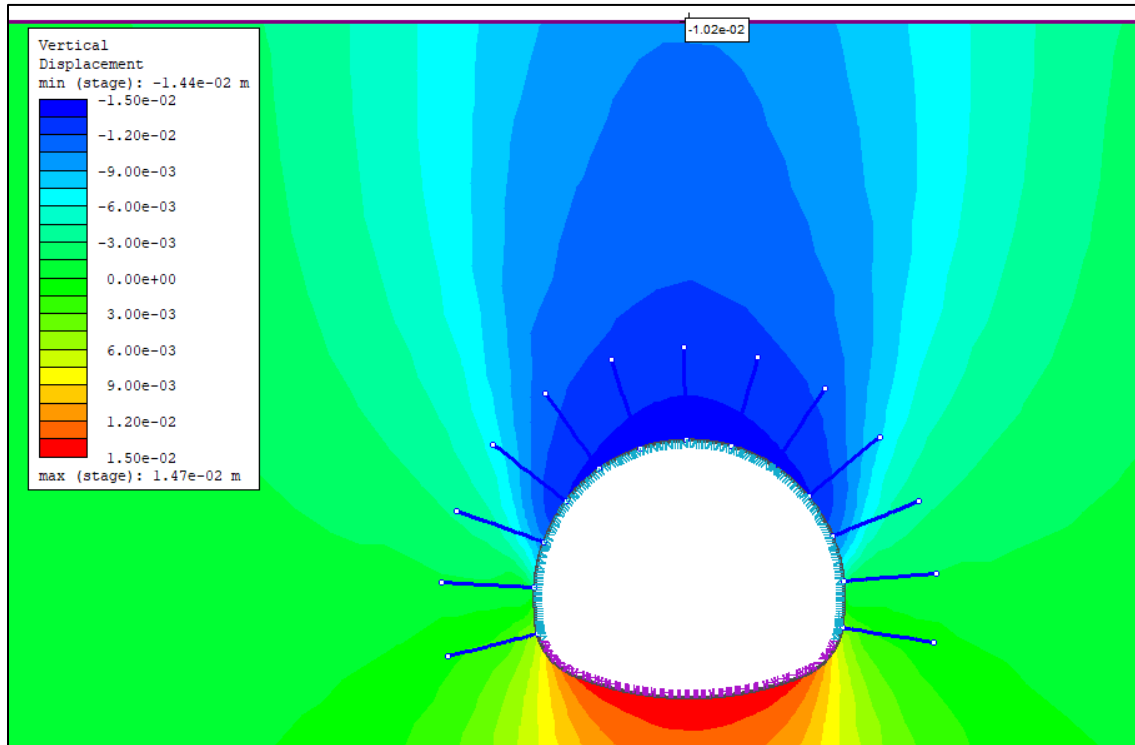


Εικόνα 6. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Β' φάσης εκσκαφής.

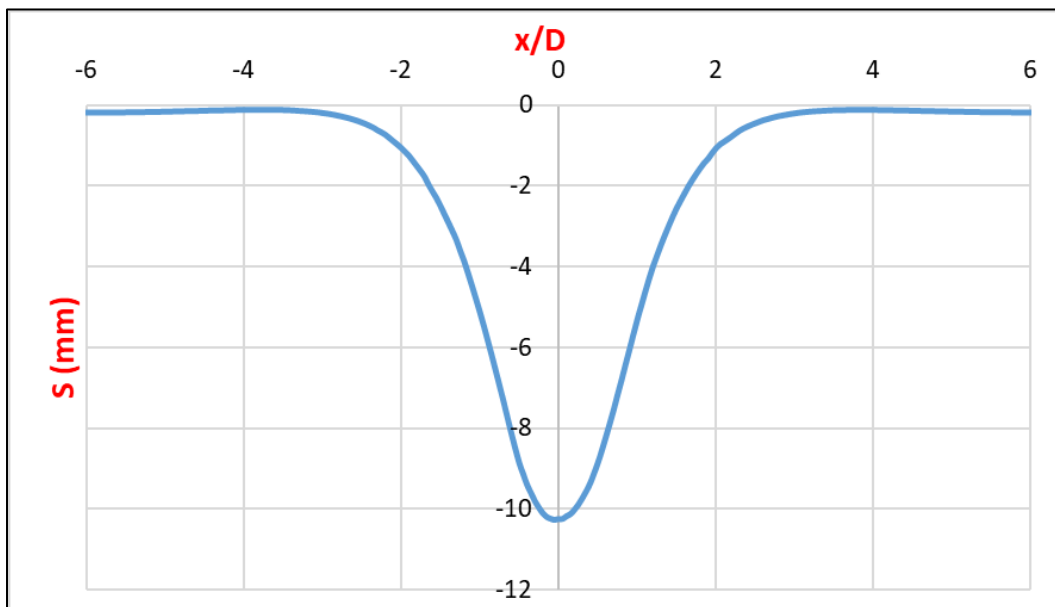


Εικόνα 7. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Γ' φάσης εκσκαφής.

Τέλος η ανάπτυξη των κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, αποτυπώνονται στην **Εικόνα 8** και το **Διάγραμμα 7**, με την μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας να είναι $s = 10.2 \text{ mm}$.



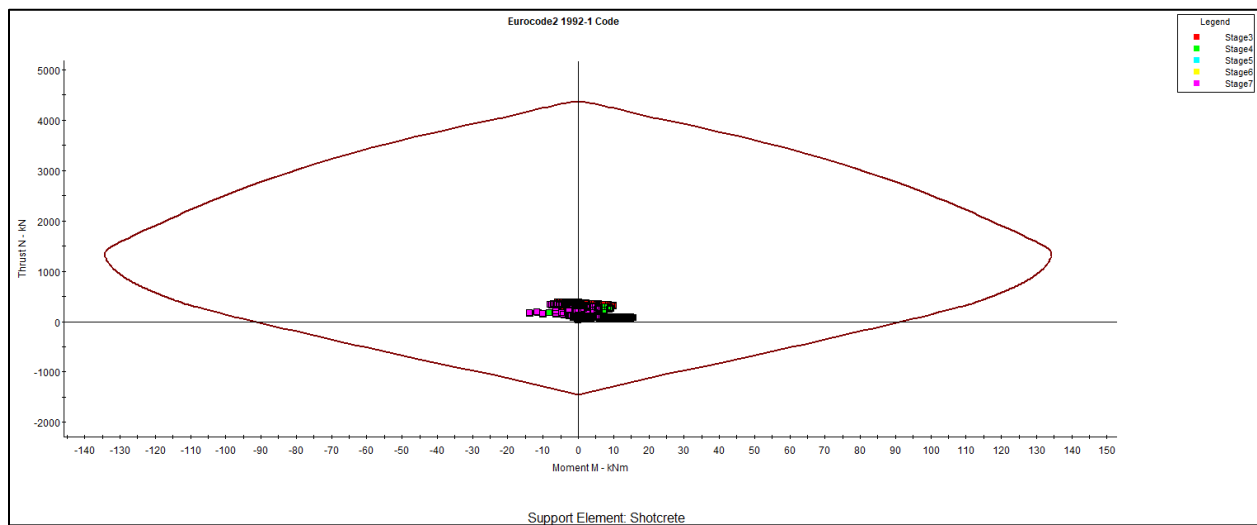
Εικόνα 8. Ανάπτυξη κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση της Γ' φάσης εκσκαφής



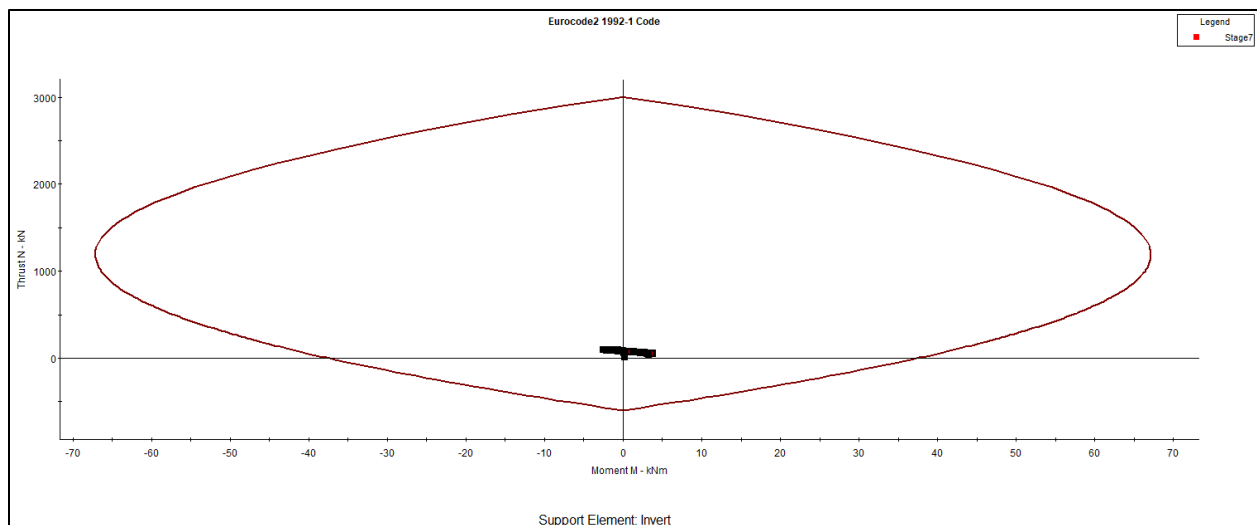
Διάγραμμα 7. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (S) για την τεχνικογεωλογική ενότητα Τ.Ε. 1.

Αποτελέσματα για την Τεχνικογεωλογική Ενότητα Τ.Ε. 2

Αρχικά έγινε παρομοίωση της προσωρινής υποστήριξης για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους ($t = 15\text{cm}$). Από τις αριθμητικές αναλύσεις προκύπτει ότι το πάχος αυτό αρκεί για την υποστήριξη του υπόγειου ανοίγματος, καθώς δεν αστοχεί οποιοδήποτε σημείο εκτός της περιβάλλουσας αστοχίας στο διάγραμμα αλληλεπίδρασης, βάσει Eurocode 2 – 1992. Στις **Εικόνες 9 και 10**, παρουσιάζεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης τόσο για το κέλυφος υποστήριξης περίξ της σήραγγας, όσο και για το τελικό ανάστροφο τόξο (invert).

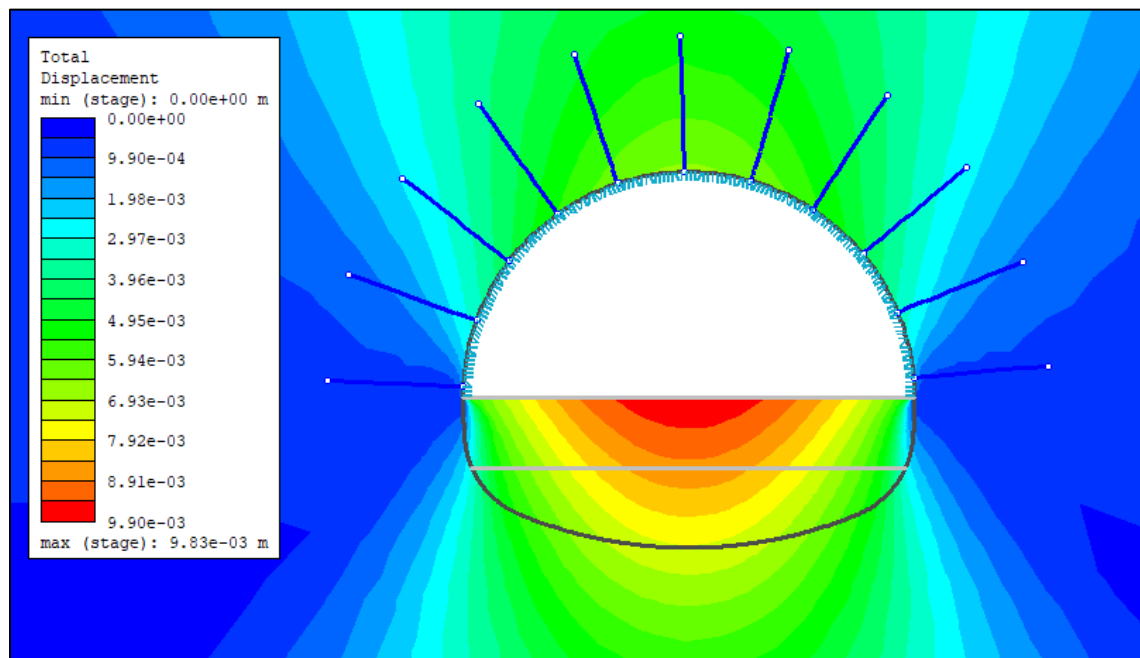


Εικόνα 9. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης κελύφους προσωρινής υποστήριξης, βάσει Eurocode 2 – 1992.

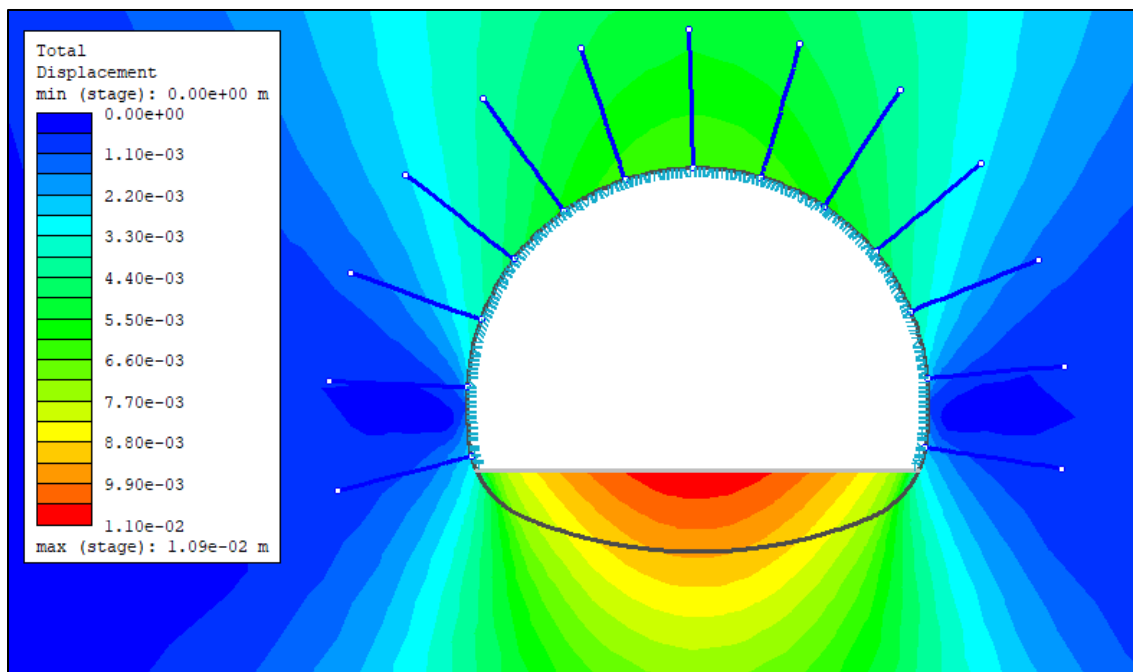


Εικόνα 10. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τελικού ανάστροφου τόξου (invert), βάσει Eurocode 2 – 1992.

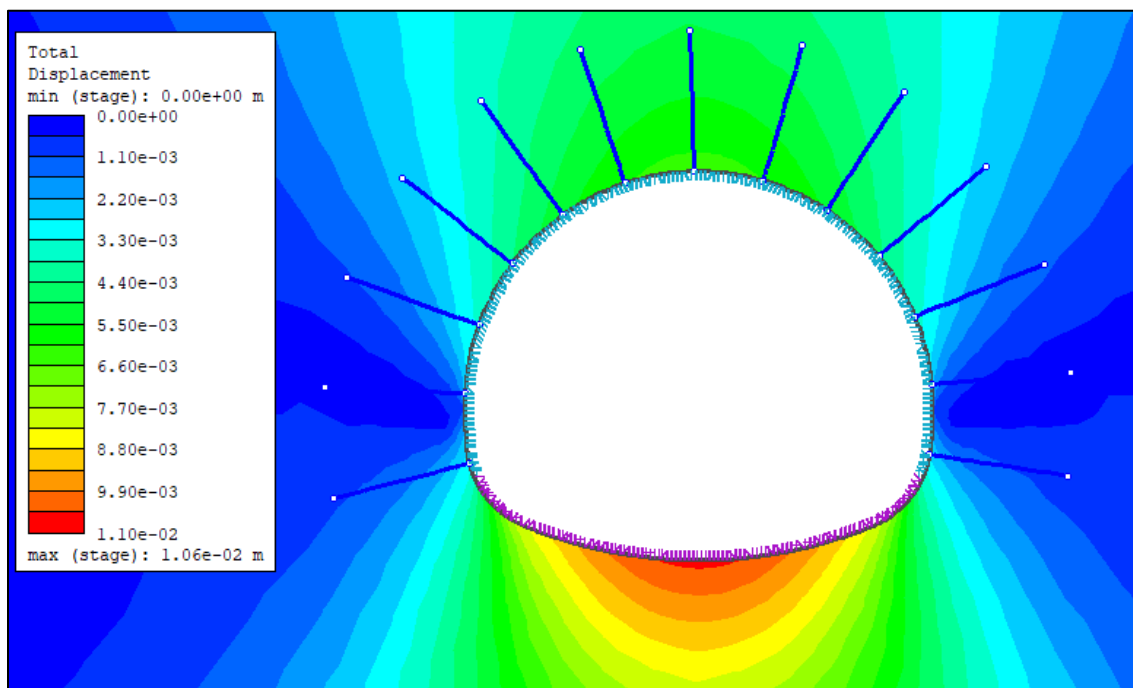
Με βάσει την παραπάνω προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, η ανάπτυξη των μετακινήσεων τόσο κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής, της Β' φάσης εκσκαφής αλλά και της Γ' φάσης εκσκαφής, παρουσιάζονται στις **Εικόνες 11, 12 και 13** αντίστοιχα.



Εικόνα 11. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Α' φάσης εκσκαφής.

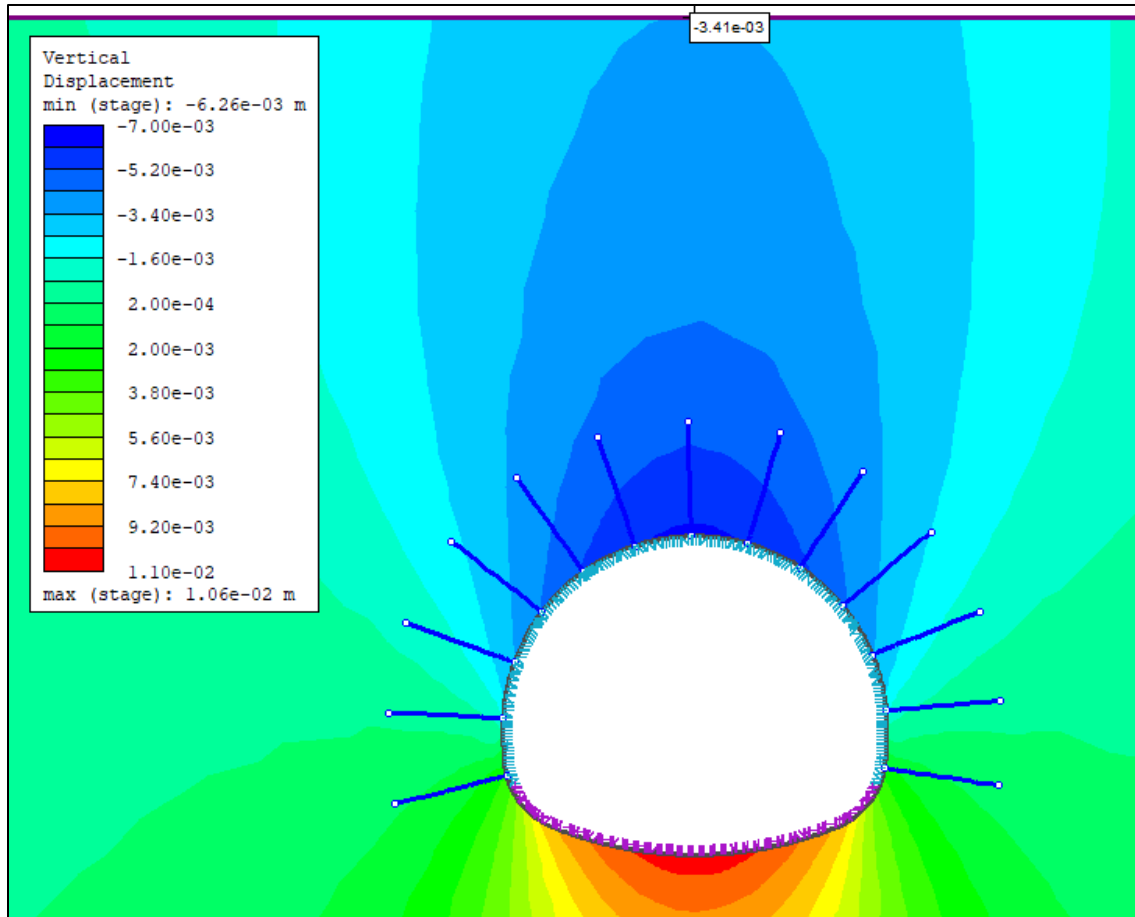


Εικόνα 12. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Β' φάσης εκσκαφής.

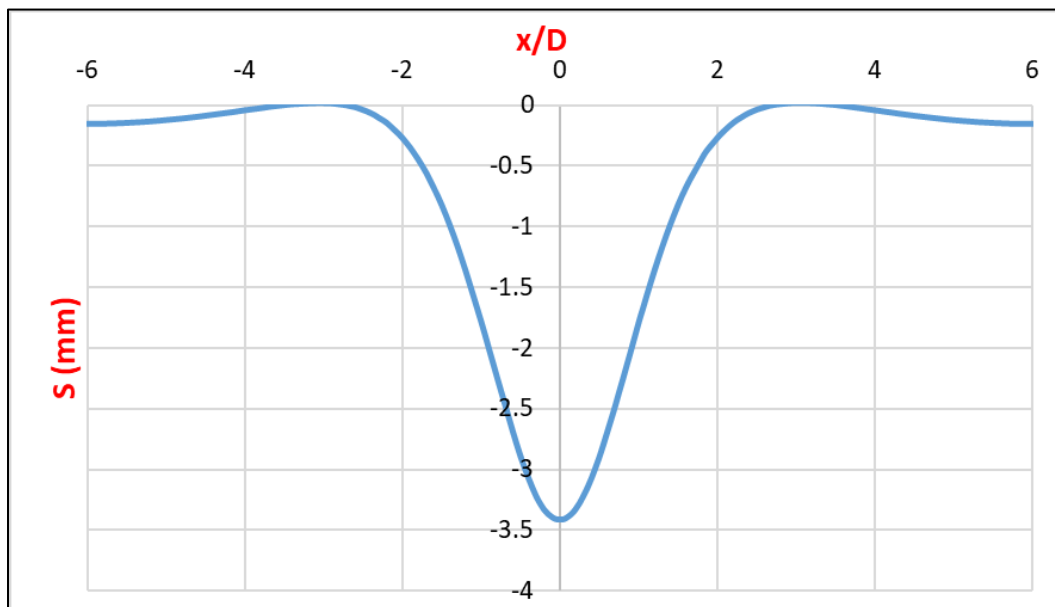


Εικόνα 13. Ανάπτυξη ολικών μετακινήσεων (total displacements) κατά την ολοκλήρωση της Γ' φάσης εκσκαφής.

Τέλος η ανάπτυξη των κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) λόγω της διάνοιξης της σήραγγας, αποτυπώνονται στην *Εικόνα 14* και το *Διάγραμμα 8*, με την μέγιστη επιφανειακή καθίζηση ακριβώς πάνω από τον άξονα της σήραγγας να είναι $s = 3.4 \text{ mm}$.



Εικόνα 14. Ανάπτυξη κατακόρυφων μετακινήσεων (vertical displacements) κατά την ολοκλήρωση της Γ' φάσης εκσκαφής



Διάγραμμα 8. Καμπύλη επιφανειακών καθιζήσεων (S) για την τεχνικογεωλογική ενότητα Τ.Ε. 2.