



Problem Set 4 (submitted individually by each student)

As part of the construction of the new Line 4 of the Athens Metro, a tunnel is to be excavated within the Athens Schist formation. The tunnel excavation in the section under consideration, will be excavated by the conventional tunneling method (NATM) using mechanical excavation equipment (hydraulic excavator). The tunnel area under consideration is located between the "Panepistimio" station and the "Amerikis" trumpet tunnel, as shown in the following *Figure 1*.

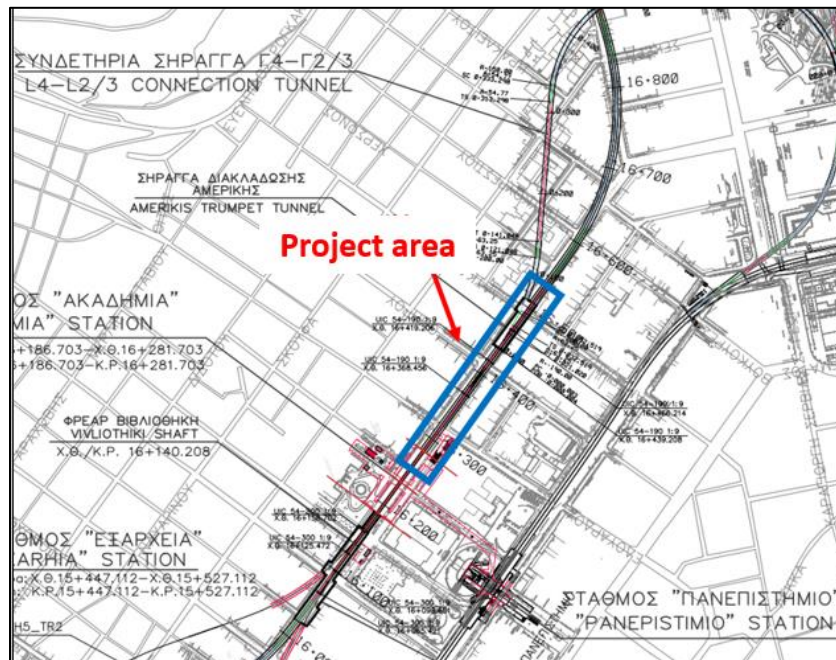


Figure 1. Project area.

In the project area, the mean tunnel overburden height, measured form the tunnel axis to the ground surface, is $H= 20m$. According to the geological and geotechnical area investigation, the typical ground profile consists of two (2) geotechnical layers, as follow:

- Layer 1 - Alluvial deposits (al): Depth: 0m – 3m
- Layer 2 – Weak Athens Schist rockmass (sch): Depth: >3m

**Soil layers depths measured from the ground surface*

On the following **Table 1**, the soil layer geotechnical parameters are presented, according to the geotechnical evaluation.

Table 1. Geotechnical parameters of ground layers.

Parameter	al	sch
Ground unit weight (γ)	23 kN/m ³	26 kN/m ³
Cohesion (c)	10 KPa	50 KPa
Friction angle (φ)	25°	35°
Soil / Rockmass modulus (E_m)	30 MPa	350 MPa
Poisson ratio (ν)	0.3	0.25

The coefficient of horizontal stress (K_o), estimated to **0.8**.

The equivalent tunnel diameter **D=10m**. The tunnel section will be excavated in three (3) phases with the following excavation steps: a) Top heading, b) Bench and c) Final invert, as presented on the following **Figure 2**.

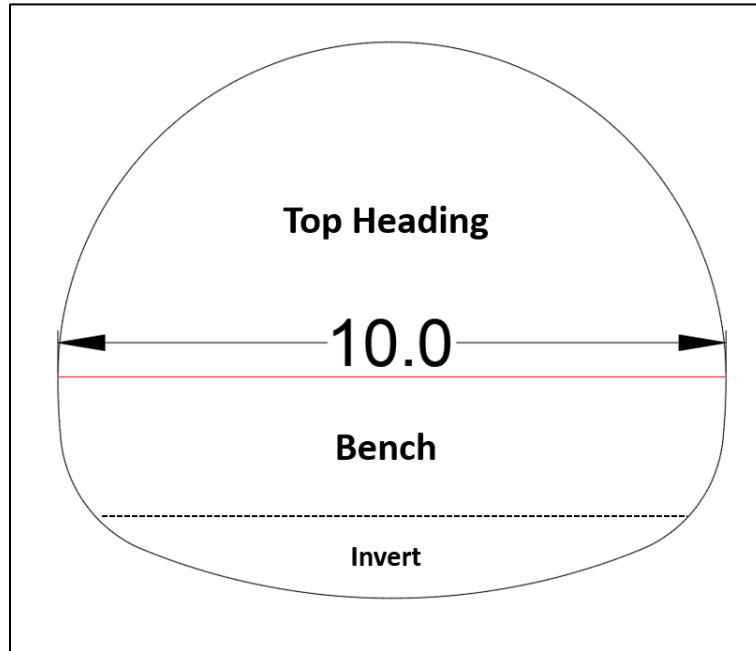


Figure 2. Tunnel excavation section.

The tunnel primary support, will consist of a combination of the following tunnel support measures: a) Shotcrete, b) Rockbolts and c) Steel sets. On the following **Table 2**, the support measures parameters, are presented.

Table 2. Tunnel support measures properties.

Shotcrete	
Concrete class	C30/37
Reinforcement	T188 wire mesh
Compression strength (f_{ck})	30 MPa
Tensile strength (f_{tk})	6 MPa
Elastic modulus (E_{shot})	17 GPa
Poisson ratio (ν)	0.2
Unit weight (γ_{shot})	25 kN/m ³
Rockbolts	
Type	Fully bonded
Diameter (d)	25 mm
Tensile capacity (F_{tk})	270 kN
Elastic modulus (E_{steel})	200 GPa
Length (L)	4 m
Pattern	1 x 1.5 m (longitudinal x radial)
Steel sets	
Type	HEB 120
Elastic modulus (E_{steel})	200 GPa
Longitudinal spacing	1 set every excavation advance length

Due to the poor ground conditions, the tunnel excavation advance length, is set to **1m**.

It is required to:

1. Plot the tunnel longitudinal tunnel displacement profile (LDP), in the form of $(\lambda - x/D)$ and $(u - x/D)$, using the *Chern et al. 1998* LDP method. (*Using only the ground layer, where the tunnel will be excavated*).
2. Plot the convergence-confinement curve $(\lambda - u)$, only for the ground layer where the tunnel will be excavated.
3. Simulate - analyze the tunnel excavation, based on a two dimensional (2D) numerical analysis, using the RS2 – Rocscience software, takes into account all the ground layers. The scope of the simulation, is the tunnel primary support design. It is necessary to be achieved the tunnel support design capacity requirements, according to EC2 EN 1992-1 (liner stresses and strength) envelope. Moreover, it is necessary to be achieved, the maximum ground surface settlement (vertical displacement), lower than 30mm.

On the numerical analysis, the effect of the third dimension (3D), will be simulated by the deconfinement factor (λ), using the equivalent internal tunnel support pressure (p), as internal loading.

The deconfinement factor (λ), will be the same in all excavation steps.

The minimum shotcrete thickness (t) on the tunnel support design, will be equal or higher of **15cm**.

For the proposed tunnel support design, the following values can be presented:

- The tunnel displacement (total displacement) on the tunnel crown, after the construction of the tunnel top heading.
- The tunnel displacement (total displacement) on the tunnel crown, after the construction of the tunnel bench.
- The tunnel displacement (total displacement) on the tunnel crown, after the construction of the tunnel invert.
- The maximum surficial settlement (vertical displacement), after the total tunnel excavation. Plot in the form of settlement (vertical axis) and ground distance - x/D (horizontal axis), measured from the tunnel axis.

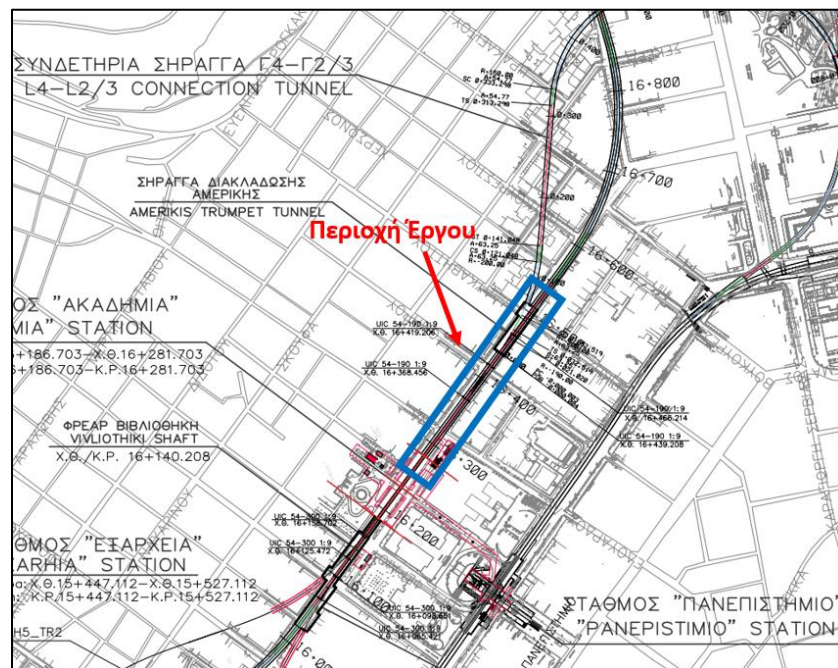
** The dilation angle (δ) on the numerical analysis and calculations, will be taken: $\delta = \varphi/4$, where φ : friction angle.*

The results of this problem, should be presented in the form of a short technical report, where the basic assumptions, numerical model limits and final results will be presented.



Άσκηση 4 (υποβάλλεται ατομικά από τους φοιτητές)

Στα πλαίσια κατασκευής της Γραμμής 4 του Μετρό της Αθήνας, πρόκειται να διανοιχθεί σήραγγα εντός του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστολίθου. Η διάνοιξη της σήραγγας στο τμήμα που εξετάζεται, θα πραγματοποιηθεί με την συμβατική μέθοδο διάνοιξης σηράγγων (NATM) με χρήση μηχανικών μέσων εκσκαφής (υδραυλικός εκσκαφέας). Το τμήμα που εξετάζεται, χωροθετείται μεταξύ του σταθμού «Πανεπιστήμιο» και της σήραγγας διακλάδωσης «Αμερικής», όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1**.



Σχήμα 1. Περιοχή Έργου

Στην περιοχή αυτή το μέσο υπερκείμενο μεταξύ της στάθμης του εδάφους και του άξονα της σήραγγας, είναι $H = 20 \text{ m}$. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωλογικής και γεωτεχνικής έρευνας, η τυπική στρωματογραφία του υπεδάφους αποτελείται από δύο (2) γεωτεχνικές στρώσεις, ως ακολούθως:

- Στρώση 1 - Αλλουβιακ (al): Depth: 0m – 3m
- Soil Layer 2 – Weak Athens Schist rockmass (sch): Depth: >3m

Από την γεωλογική και γεωτεχνική διερεύνηση του υπεδάφους, προκύπτουν δύο τεχνικογεωλογικές (Τ.Ε.) ενότητες κατά μήκος του τμήματος αυτού, με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε μιας ενότητας, να παρουσιάζονται τον **Πίνακα 1**.

In the project area, the mean tunnel overburden height, measured from the tunnel axis to the ground surface, is $H = 20\text{m}$. According to the geological and geotechnical area investigation, the typical ground profile consists of two (2) geotechnical layers, as follow:

- Στρώση 1 – Αλλουβιακές αποθέσεις (al): Βάθος: 0m – 3m
- Στρώση 2 – Αποσαθρωμένη βραχώμαζα Αθηναϊκού Σχιστολίθου (sch): Βάθος: >3m

*Το βάθος των στρώσεων, μετράται από την επιφάνεια του εδάφους.

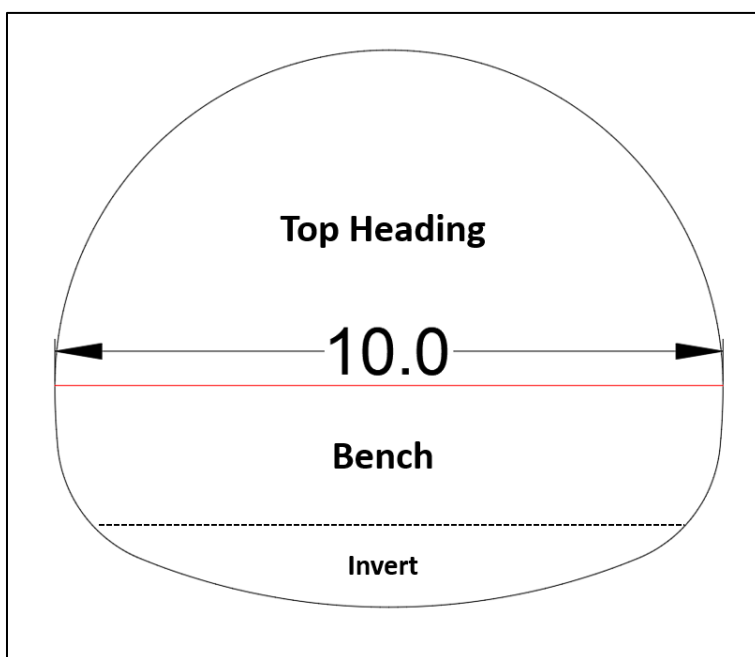
Στον ακόλουθο **Πίνακα 1**, παρουσιάζονται οι γεωτεχνικές παράμετροι των στρώσεων, βάση της γεωτεχνικής αξιολόγησης,

Πίνακας 1. Γεωτεχνικές παράμετροι στρώσεων.

Παράμετρος	al	sch
Ειδικό βάρος (γ)	23 kN/m ³	26 kN/m ³
Συνοχή (c)	10 KPa	50 KPa
Γωνία τριβής (φ)	25°	35°
Μέτρο ελαστικότητας εδάφους/ βραχώμαζας (E_m)	30 MPa	350 MPa
Λόγος poisson (ν)	0.3	0.25

Ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K_0), εκτιμήθηκε σε 0.8.

Η ισοδύναμη διάμετρος της σήραγγα είναι **D = 10 m**, και πρόκειται να διανοιχθεί σε τρεις (3) φάσεις εκσκαφής, με την ακόλουθη σειρά εκσκαφής: α) Άνω ημιδιατομή, β) Βαθμίδα και γ) Τελικό ανάστροφο τόξο – invert, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2. Διατομή εκσκαφής.

Η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, θα αποτελείται από τον ακόλουθο συνδυασμό μέτρων υποστήριξης; α) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, β) Αγκύρια βράχου και γ) Μεταλλικά πλαίσια. Στον ακόλουθο **Πίνακα 2**, παρουσιάζονται οι παράμετροι των μέτρων υποστήριξης.

Πίνακας 2. Παράμετροι μέτρων προσωρινής υποστήριξης

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα	
Κατηγορία	C30/37
Οπλισμός	T188 wire mesh
Θλιπτική αντοχή (f_{ck})	30 MPa
Εφελκυστική αντοχή (f_{tk})	6 MPa
Μέτρο ελαστικότητας (E_{shot})	17 GPa
Λόγος poisson (ν)	0.2
Ειδικό βάρος (γ_{shot})	25 kN/m ³
Αγκύρια βράχου	
Τύπος	Ολόσωμης πάκτωσης

Διάμετρος (d)	25 mm
Φέρουσα ικανότητα (F_{tk})	270 kN
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa
Μήκος (L)	4 m
Κάνναβος	1 x 1.5 m (διαμήκης x ακτινικά)
Μεταλλικά πλαίσια	
Τύπος	HEB 120
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa
Διαμήκης απόστασης	1 κάθε βήμα εκσκαφής

Λόγω των δυσμενών γεωτεχνικών συνθήκων διάνοιξης σήραγγας, το βήμα προχώρησης της εκσκαφής, ορίζεται σε **1m**.

Ζητείται:

1. Να σχεδιαστεί η καμπύλη διαμήκου προφίλ μετακινήσεων LDP, στη μορφή ($\lambda - x/D$) και ($u - x/D$), βασιζόμενοι στην μέθοδο *Chern et al. 1998*. (Να ληφθεί υπόψιν μόνο η στρώση εντός της οποίας διανοίγεται η σήραγγα).
2. Να σχεδιαστεί η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($\lambda - u$), μόνο για τη στρώση εντός της οποίας διανοίγεται η σήραγγα.
3. Να πραγματοποιηθεί διδιάστατη (2D) αριθμητική ανάλυση με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience της διάνοιξης της σήραγγας. Σκοπός της ανάλυσης, είναι η διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης. Είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EC2 EN 1992-1 (περιβάλλουσα αστοχίας). Επιπλέον, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η μέγιστη επιφανειακή καθίζηση (κατακόρυφη μετακίνηση), να είναι μικρότερη από 30mm.

Θα εφαρμοστεί η μέθοδος της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p) μέσω του αντίστοιχου βαθμού αποτόνωσης (λ), ώστε να ληφθεί υπόψιν η συμπεριφορά της τρίτης διάστασης. Ο συντελεστής αποτόνωσης (λ), να ληφθεί ίδιος σε όλα τα βήματα – φάσεις εκσκαφής.

Να λάβετε υπόψιν ότι το ελάχιστο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από **15 cm**.

Για την διατομή προσωρινής υποστήριξης που θα προτείνεται, να υπολογίσετε τα ακόλουθα μεγέθη:

- Την μετακίνηση στην στέψη κατά την ολοκλήρωση της Άνω ημιδιατομής (Top heading).
- Την μετακίνηση στην στέψη κατά την ολοκλήρωση της Βαθμίδας (Bench).
- Την μετακίνηση στην στέψη κατά την ολοκλήρωση του Ανάστροφου τόξου (invert).
- Την μέγιστη καθίζηση της επιφάνειας του εδάφους με την ολοκλήρωση της εκσκαφής. Να παρουσιαστεί υπό τη μορφή γραφήματος, με την καθίζηση (κατακόρυφος άξονας) και την απόσταση από τον άξονα της σήραγγας (x/D), μετρούμενο από τον άξονα της σήραγγας.

* Για του υπολογισμούς σας να λάβετε γωνία διαστολικότητας $\delta = \varphi/4$.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας να παρουσιαστούν υπό μορφή μικρή τεχνικής έκθεσης, όπου θα γίνεται παράθεση των βασικών παραδοχών, ορίων μοντέλου προσομοίωσης και τελικών αποτελεσμάτων.