



Problem Set 6 (submitted individually by each student)

As part of the construction of the extension of the Athens metro Line 3, a station is to be built with a combined method of open pit excavation (cut & cover) and underground part, due to a lack of available space.

The underground part of the station will be constructed as an underground tunnel excavation (conventional method), with equivalent tunnel diameter $D = 16\text{m}$. Near the main station tunnel, a ventilation tunnel will be constructed, with equal diameter $D = 6\text{m}$, in horizontal distance of 25m. As presented on the following **Figure 1**, the main tunnel section will be excavated in four (4) phases and the ventilation tunnel in two (2) phases. Both of tunnels, are placed under buildings.

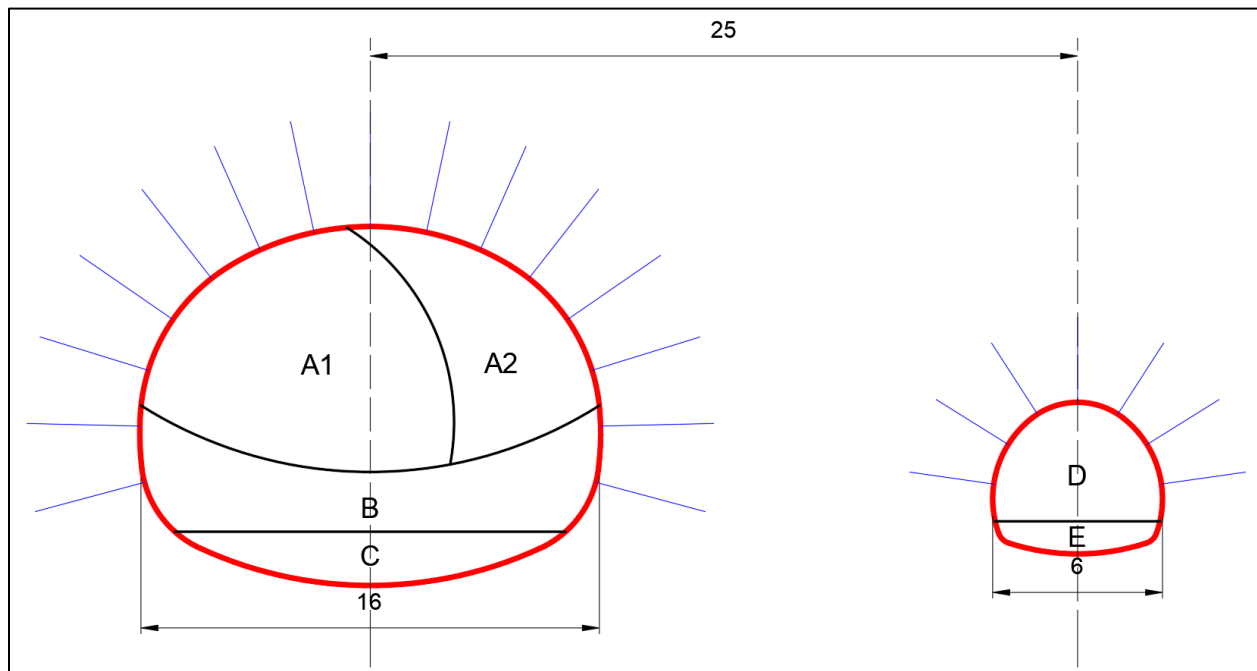


Figure 1. Tunnels section.

Multiple tunnel phase excavation on the main tunnel, it is chosen due to the poor ground conditions, but also the existence of constructions on the ground surface

From the geotechnical investigation program through boreholes, it emerged that tunnels will be excavated within the Athens Schist formation and the following stratigraphy appears in the tunnel area:

- **Depth: 0 to -2m: Artificial fill (TE)**
 - ✓ Unit weight (γ): 21 kN/m³
 - ✓ Cohesion (c): 10 KPa
 - ✓ Friction angle (ϕ): 28°
 - ✓ Elastic modulus (E_m): 40 MPa
 - ✓ Poisson ratio (ν): 0.30

- **Depth: -2 to -8m: Metasandstone – Schists (AS – ST)**
 - ✓ Unit weight (γ): 23 kN/m³
 - ✓ Cohesion (c): 60 KPa
 - ✓ Friction angle (ϕ): 36°
 - ✓ Elastic modulus (E_m): 200 MPa
 - ✓ Poisson ratio (ν): 0.30
- **Depth: > -8m: Alteration of Metasandstone – Metasiltstone (AS – STL)**
 - ✓ Unit weight (γ): 23 kN/m³
 - ✓ Compressive strength of intact rock (σ_{ci}): 5 MPa
 - ✓ Friction angle (ϕ): 35°
 - ✓ Elastic modulus of intact rock (E_i): 7 GPa
 - ✓ Poisson ratio (ν): 0.25
 - ✓ m_i : 11
 - ✓ GSI: 30

*Depth measured from the ground surface.

The tunnel axis for both tunnels, is **25m** below the ground surface. The coefficient of horizontal stress (K_o), estimated to **0.5**.

Due to the poor ground conditions, the tunnel excavation advance length, both on main and ventilation tunnel, is set to **1m** for all the excavation phases. As the usage of mechanical excavation equipment (hydraulic excavator) for the tunnel excavation, the rockmass disturbance factor (D) for the (AS – STL) unit, estimated to 0.4.

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

Table 1. 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 2 m (longitudinal x radial)
Steel sets	
Type	Lattice girder 4bar-140,Φ26
Elastic modulus (E_{steel})	200 GPa
Longitudinal spacing	1 set every excavation advance length

The tunnel excavation sequence, is the following: a) full excavation of the main tunnel and then b) full excavation of the ventilation tunnel.

It is required to:

1. Plot the tunnel longitudinal tunnel displacement profile (LDP) for both tunnels, 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 $(\lambda - u)$ for both tunnels, only for the ground layer where the tunnel will be excavated.
3. Simulate - analyze the tunnels excavation, based on a two dimensional (2D) numerical analyses, using the RS2 – Rocscience software. The scope of the simulations, 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.

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 perimeter, will be equal or higher of **15cm**. The shotcrete thickness (t) on the tunnel temporary invert, could be similar or lower of the tunnel perimeter shotcrete support thickness.

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

- The tunnel displacement (total displacement) on the tunnel crown and sidewalls (upper and bottom), after the construction of each tunnel excavation phase.
 - The ground surficial settlements (vertical displacements), after the construction of each tunnel excavation phase. Plot in the form of settlement (vertical axis) and ground distance - x/D (horizontal axis), measured from the tunnel axis.
 - The maximum plastic zone length around the excavation, after the total tunnel excavation.
4. Check the tunnel face stability of the main tunnel, only for the whole area of the tunnel top heading, by calculating the tunnel face stability factor (FS_o) , for the case of unsupported tunnel face. In case of unsupported tunnel face stability factor $FS_o \leq 1.5$, calculate the tunnel face reinforcement density (ρ) by usage of fiberglass nails with tensile capacity 280kN, in order to achieve tunnel face stability factor $FS > 1.5$. For the fiberglass nails material, the partial safety factor, is $SF= 1.2$. The whole tunnel face area of the top heading, is $A= 104.9 \text{ m}^2$. Technical properties of the fiberglass nails, presented on the following **Figure 2**.

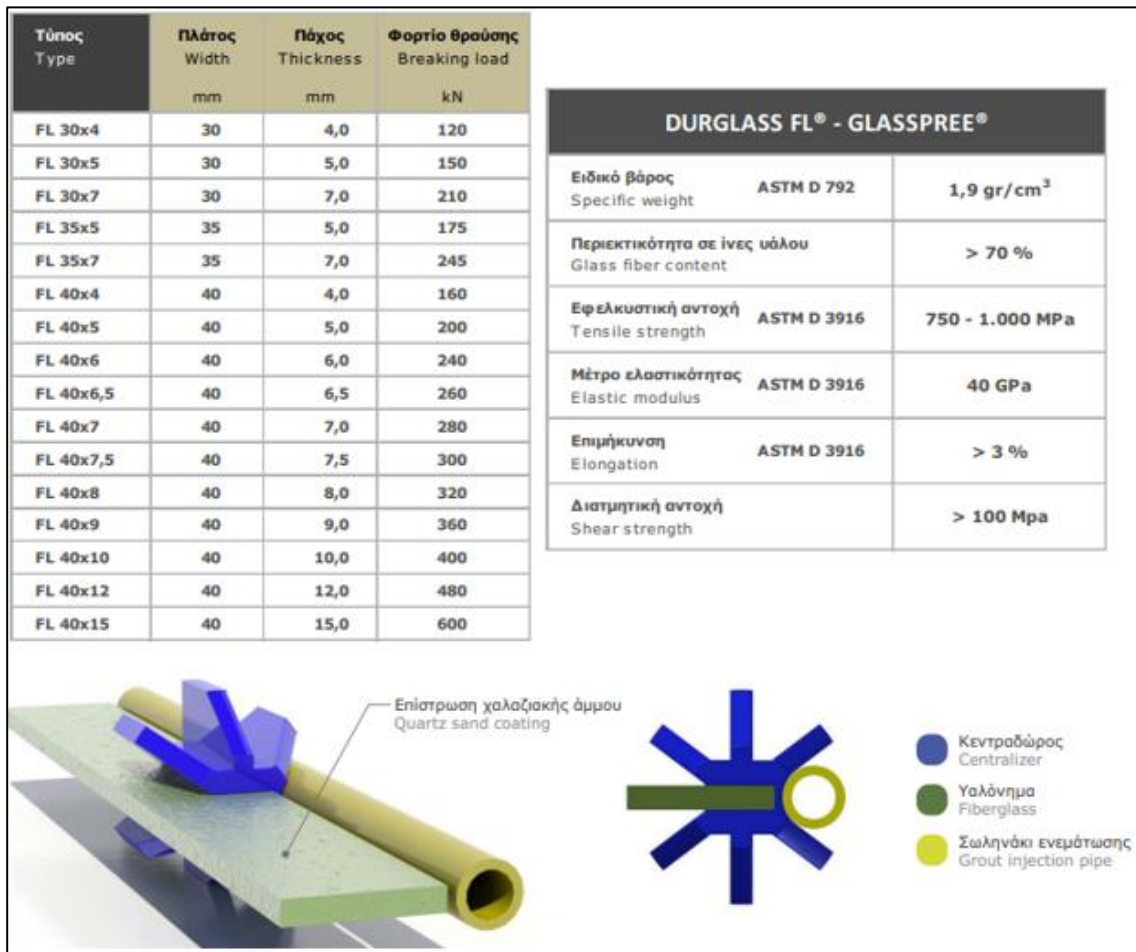


Figure 2. Fiberglass nails technical properties (ELEBOR S.A.)

* The dilation angle (δ) on the numerical analysis and calculations, will be taken: $\delta = 0^\circ$.

** In the numerical analyses, the effect of the shotcrete hardening will be taken into account.

*** Limitation on the acceptable surficial settlements, presented on the following Table 3, according to the guidelines of Attiko Metro.

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.

Table 3. Acceptable surficial settlements limits, according to Attiko Metro.

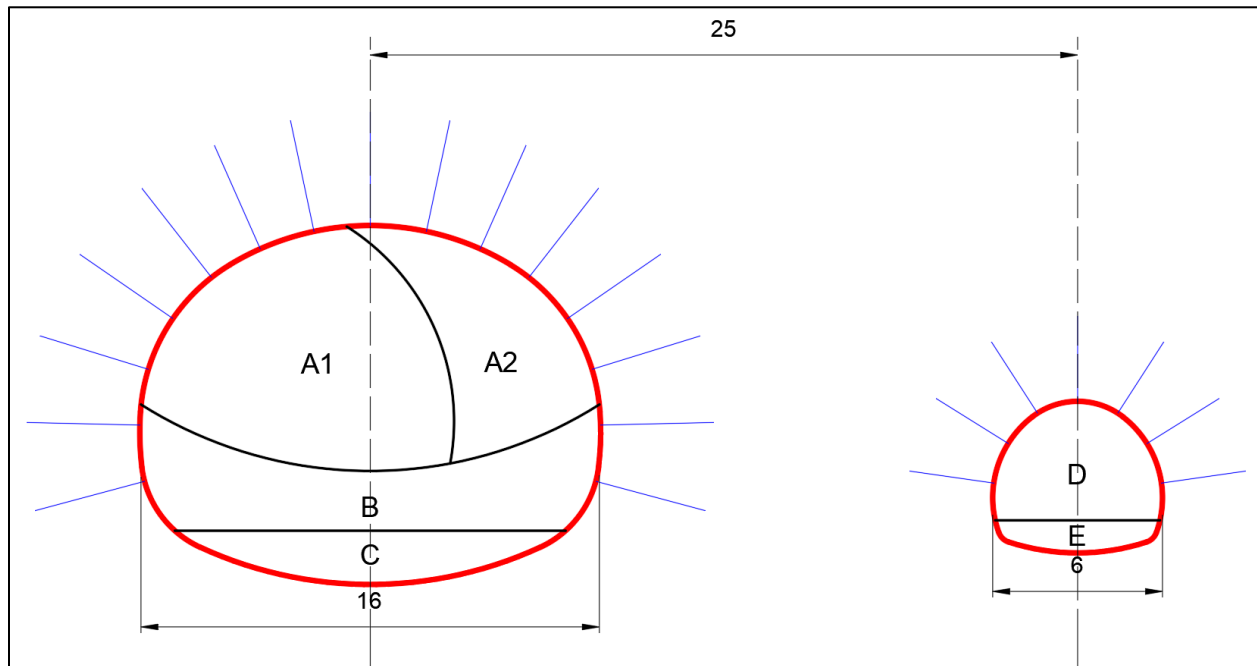
No	Displacement, Deformation	Sensitive Building or Structure	Other Buildings	Roads, Pavements, Ducts
1	Total settlement (mm)	20	25	30
2	Angular deformation	1:800	1:600	1:600
3	Total settlement ratio (mm/day)	3	3	4
4	Cracks open ratio (mm/day)	1	1	1
5	Horizontal deformation (%)	0,15	0,25	0,30



Άσκηση 6 (υποβάλλεται ατομικά από τους φοιτητές)

Στα πλαίσια κατασκευής επέκτασης της Γραμμής 3 του μετρό της Αθήνας, πρόκειται να γίνει κατασκευή σταθμού με συνδυασμένη μέθοδο εκσκαφής ανοικτού ορύγματος (cut & cover) και υπόγειας διάνοιξης, λόγω έλλειψης διαθέσιμου χώρου.

Η υπόγεια διάνοιξη θα πραγματοποιηθεί με κατασκευή σήραγγας ισοδύναμης διαμέτρου $D = 16\text{m}$, ενώ σε οριζόντια απόσταση περί τα 25m από αυτή, θα κατασκευαστεί βοηθητική σήραγγα εξαερισμού, ισοδύναμης διαμέτρου $D = 6\text{m}$. Όπως παρουσιάζεται στην ακόλουθη **Εικόνα 1**, η εκσκαφή της κύριας σήραγγας του σταθμού, θα πραγματοποιηθεί σε τέσσερις (4) φάσεις εκσκαφής, ενώ η βοηθητική σήραγγα εξαερισμού, θα διανοιχθεί σε δύο (2) φάσεις εκσκαφής. Και οι δύο σήραγγες, βρίσκονται κάτω από περιοχή κτηρίων.



Εικόνα 1. Διατομές εκσκαφής σηράγγων

Για την κύρια σήραγγα, επιλέγεται να γίνει τμηματική εκσκαφή της διατομής, λόγω των ασθενών μηχανικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους, αλλά και της ύπαρξης κατασκευών στην επιφάνεια του εδάφους.

Συγκεκριμένα από την γεωτεχνική έρευνα του υπεδάφους μέσω ερευνητικών γεωτρήσεων, πρόκυψε ότι οι σήραγγες θα διανοιχθούν εντός του σχηματισμού του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου και εμφανίζεται η ακόλουθη στρωματογραφία:

- ✓ **Βάθος 0 έως – 2m: Τεχνητές Επιχωματώσεις (TE)**
 - Ειδικό βάρος (γ): 21 kN/m³
 - Συνοχή (c): 10 KPa
 - Γωνία τριβής (ϕ): 28°
 - Μέτρο ελαστικότητας (E): 40 MPa
 - Λόγος Poisson (ν): 0.30
- ✓ **Βάθος -2 έως – 8m: Μεταψαμμίτες – Σχιστόλιθοι (AS – ST)**
 - Ειδικό βάρος (γ): 23 kN/m³
 - Συνοχή (c): 60 KPa
 - Γωνία τριβής (ϕ): 36°
 - Μέτρο ελαστικότητας (E): 200 MPa
 - Λόγος Poisson (ν): 0.30
- ✓ **Βάθος μεγαλύτερο των -8m: Εναλλαγές Μεταψαμμιτών – Μεταίλυοι λίθων (AS – STL)**
 - Ειδικό βάρος (γ): 23 kN/m³
 - Αντοχή σε θλίψη (σ_{ci}): 5 MPa
 - Γωνία τριβής (ϕ): 35°
 - Μέτρο ελαστικότητας αρρήκτου βράχου (E_i): 7 GPa
 - Λόγος Poisson (ν): 0.25
 - m_i : 11
 - Γεωλογικός δείκτης αντοχής (GSI): 30

*Τα παραπάνω βάθη, μετρώνται από την επιφάνεια του εδάφους.

Ο άξονας των σήραγγων εντοπίζεται σε βάθος **H= 25m** από την επιφάνεια του εδάφους.

Για το σύνολο των εδαφικών σχηματισμών εκτιμάται ότι ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων **K₀ = 0. 5**.

Λόγω των δυσμενών γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της περιβάλλουσας βραχώμαζας, επιλέγεται βήμα προχώρησης **1m**. Λόγω της εκσκαφής της σήραγγας με μηχανικά μέσα (υδραυλικός εκσκαφές), για τη ενότητα (AS – STL), λαμβάνεται βαθμός διαταραχής βραχώμαζας λόγω εκσκαφής **D = 0.4**.

Η προσωρινή υποστήριξη της σήραγγας, θα αποτελείται από τον ακόλουθο συνδυασμό μέτρων υποστήριξης; α) Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, β) Αγκύρια και γ) 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	Fully bonded
Διάμετρος (d)	25 mm
Φέρουσα ικανότητα (F_{tk})	270 kN
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa
Μήκος (L)	46 m
Κάνναβος	1 x 2 m (διαμήκης x ακτινικά)

Πλαίσια	
Τύπος	Lattice girder 4bar-140,Φ26
Μέτρο ελαστικότητας (E_{steel})	200 GPa
Διαμήκης απόστασης	1 κάθε βήμα εκσκαφής

Η κατασκευαστική ακολουθία για την διάνοιξη των σηράγγων, είναι η ακόλουθη: α) Κατασκευή κύριας σήραγγας σταθμού και με την ολοκλήρωσή της, β) Κατασκευή της βοηθητικής σήραγγας εξαερισμού του σταθμού.

Ζητείται:

1. Να σχεδιαστεί η καμπύλη διαμήκους προφίλ μετακινήσεων (u) και ισοδύναμης αποτόνωσης (λ) και για τις δύο σήραγγες, βασιζόμενοι στην μέθοδο *Chern et al. 1998*.
2. Να σχεδιαστεί η καμπύλη σύγκλισης – αποτόνωσης ($\lambda - u$) και για τις δύο σήραγγες, βασιζόμενοι στις προτεινόμενες εξισώσεις που σας δόθηκαν στα πλαίσια του μαθήματος.
3. Να πραγματοποιηθεί διδιάστατη (2D) αριθμητική ανάλυση με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων RS2 – Rocscience της διάνοιξης των σηράγγων. Θα εφαρμοστεί η μέθοδος της ισοδύναμης εσωτερικής πίεσης (p) μέσω του αντίστοιχου βαθμού αποτόνωσης (λ), ώστε να ληφθεί υπόψιν η συμπεριφορά της τρίτης διάστασης.

Συγκεκριμένα θα πρέπει να προτείνεται τελική διατομή προσωρινής υποστήριξης, λαμβάνοντας υπόψιν την επάρκεια των μέτρων προσωρινής υποστήριξης κατά EC2 EN 1992-1. Να λάβετε υπόψιν ότι το ελάχιστο πάχος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από $t = 15 \text{ cm}$. Επίσης το πάχος του προσωρινού ανάστροφου τόξου θα πρέπει να είναι ίδιο ή μικρότερο από το πάχος της περιμετρικής επένδυσης της σήραγγας.

Αφού προτείνεται την διατομή προσωρινής υποστήριξης και για τις δύο σήραγγες, να υπολογίσετε τα ακόλουθα:

- ✓ Τις μετακινήσεις στην περίμετρο της εκσκαφής σε κάθε στάδιο ολοκλήρωσης εκσκαφής σε επίλεκτες θέσεις.
 - ✓ Τις επιφανειακές καθιζήσεις, μετά την ολοκλήρωση κάθε σταδίου εκσκαφής. Να παρουσιαστούν 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.
 - ✓ Το μέγιστο μήκος πλαστικής ζώνης πέριξ της εκσκαφής.
4. Να πραγματοποιηθεί έλεγχος της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής, μόνο για την Α' φάση εκσκαφής (στο σύνολο). Συγκεκριμένα να εκτιμηθεί ο συντελεστής ασφαλείας ανυποστήρικτου μετώπου εκσκαφής (FS_0). Εφόσον ο συντελεστής ασφαλείας είναι μικρότερος ή ίσος από 1.5, να εκτιμήσετε την πυκνότητα του καννάβου αγκύρωσης (ρ) του μετώπου με αγκύρια μετώπου τύπου fiberglass και φέρουσας ικανότητας 280 kN, ώστε να επιτευχθεί συντελεστής ασφαλείας $FS > 1.5$. Για το υλικό των αγκυρίων fiberglass, να λάβετε επιμέρους συντελεστή ασφαλείας $SF = 1.2$.

Το συνολικό εμβαδόν της Α' φάσης εκσκαφής είναι 104.9 m^2 . Τεχνικά χαρακτηριστικά των αγκυρίων, παρουσιάζονται στην ακόλουθη **Εικόνα 2**.

Τύπος Type	Πλάτος Width mm	Πάχος Thickness mm	Φορτίο θραύσης Breaking load kN
FL 30x4	30	4,0	120
FL 30x5	30	5,0	150
FL 30x7	30	7,0	210
FL 35x5	35	5,0	175
FL 35x7	35	7,0	245
FL 40x4	40	4,0	160
FL 40x5	40	5,0	200
FL 40x6	40	6,0	240
FL 40x6,5	40	6,5	260
FL 40x7	40	7,0	280
FL 40x7,5	40	7,5	300
FL 40x8	40	8,0	320
FL 40x9	40	9,0	360
FL 40x10	40	10,0	400
FL 40x12	40	12,0	480
FL 40x15	40	15,0	600

DURGLASS FL® - GLASSPREE®		
Ειδικό βάρος Specific weight	ASTM D 792	1,9 gr/cm ³
Περιεκτικότητα σε ίνες υάλου Glass fiber content		> 70 %
Εφελκυστική αντοχή Tensile strength	ASTM D 3916	750 - 1.000 MPa
Μέτρο ελαστικότητας Elastic modulus	ASTM D 3916	40 GPa
Επιμήκυνση Elongation	ASTM D 3916	> 3 %
Διατμητική αντοχή Shear strength		> 100 Mpa

Εικόνα 2. Τεχνικά χαρακτηριστικά αγκυρώσεων μετώπου τύπου fiberglass (ΕΛΕΒΟΡ Α.Ε.Β.Ε.).

* Για του υπολογισμούς σας να λάβετε γωνία διαστολικότητας $\delta=0^\circ$.

** Να λάβετε υπόψιν στις αναλύσεις την επίδραση και τον ρυθμό σκλήρυνσης του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

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.

Για τον έλεγχο της επάρκειας της διατομής της εκσκαφής, έναντι των αναπτυσσόμενων επιφανειακών καθιζήσεων λόγω εκσκαφής, να συμβουλευτείτε τον ακόλουθο **Πίνακα 3**, θεωρώντας ότι η σήραγγα διανοίγεται κάτω από οδό.

Πίνακας 3. Επιτρεπόμενα όρια καθιζήσεων και παραμορφώσεων λόγω διάνοιξης σήραγγας (Πηγή: Αττικό Μετρό).

A/A	Μετακίνηση, παραμόρφωση, ρηγμάτωση κλπ.	Ευαίσθητο Κτίριο ή Κατασκευή	Άλλα Κτίρια	Οδοί, Πεζοδρόμια ή Δίκτυα Ο.Κ.Ω.
1	Συνολική καθίζηση (mm)	20	25	30
2	Γωνιακή παραμόρφωση	1:800	1:600	1:600
3	Ρυθμός συνολικής καθίζησης (mm/day)	3	3	4
4	Ρυθμός ανοίγματος ρωγμής (mm/day)	1	1	1
5	Οριζόντια παραμόρφωση (%)	0,15	0,25	0,30