

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

# ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΚΑΙ ΑΜΕΣΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

### 6.1 Γενικά

Η ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης μιας σήραγγας έχει τους εξής σκοπούς:

1. Να ελέγξει ότι η διατομή της σήραγγας σε κάθε φάση εκσκαφής είναι ευσταθής, δηλαδή ότι το μέτωπο της εκσκαφής είναι ευσταθές και ότι τα μέτρα άμεσης υποστήριξης μπορούν να αναλάβουν με επαρκή ασφάλεια τα φορτία της βραχόμαζας.
2. Να ελέγξει ότι οι συγκλίσεις του τοιχώματος της σήραγγας, της περιβάλλουσας βραχόμαζας και (εφόσον απαιτείται) της επιφάνειας του εδάφους είναι εντός των αποδεκτών ορίων. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τις ανοχές των δομημάτων που επηρεάζονται από την κατασκευή της σήραγγας και από την απαίτηση να αποφευχθεί η υπερβολική χαλάρωση της περιβάλλουσας βραχόμαζας αλλά και ταυτοχρόνως να ενεργοποιηθεί η αντοχή της βραχόμαζας σε ικανοποιητικό βαθμό.
3. Να προσδιορίσει τη διαδικασία εκσκαφής (αριθμός και διαστάσεις των φάσεων εκσκαφής και μέγιστο βήμα προχώρησης) και το σύστημα άμεσης υποστήριξης (είδος και πυκνότητα μέτρων υποστήριξης, πρόγραμμα τοποθέτησης κλπ) τα οποία συνδυάζουν ικανοποιητική ασφάλεια με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Κατά τη διάνοιξη σήραγγων με τη μέθοδο NATM, η διαδικασία εκσκαφής και άμεσης υποστήριξης έχει σκοπό να επιτρέψει την ελεγχόμενη σύγκλιση της βραχόμαζας προς το εσωτερικό της σήραγγας ώστε να αναπτυχθεί φαινόμενο θόλου, δηλαδή θλιπτική ένταση ( $\sigma_\theta$ ) της βραχόμαζας κατά την περιφέρεια της σήραγγας, και με τον τρόπο αυτό να μειωθεί η πίεση στην άμεση υποστήριξη, δεδομένου ότι η πίεση της βραχόμαζας στην άμεση υποστήριξη της σήραγγας δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη αλλά εξαρτάται από τον τρόπο εκσκαφής και υποστήριξης. 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).

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, η ανάλυση της άμεσης υποστήριξης δεν μπορεί να γίνει με κάποια συμβατικά φορτία επειδή τα φορτία αυτά δεν εξαρτώνται μόνον από τα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας αλλά και από τον τρόπο διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Συνεπώς, οι διάφορες μέθοδοι εκτίμησης των φορτίων της βραχόμαζας στην επένδυση σήραγγων (μέθοδος Bieniawski, Terzaghi, Protodyakonov, NGI κλπ) δίνουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα, επειδή βασίζονται σε παραδοχές περί του τρόπου διάνοιξης και υποστήριξης της σήραγγας οι οποίες διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο. Τέλος, σημειώνεται ότι οι περισσότερες από τις μεθόδους αυτές<sup>1</sup> έχουν αναπτυχθεί πριν από την εκτεταμένη εφαρμογή των

---

<sup>1</sup> με εξαίρεση τη μέθοδο NGI

σύγχρονων μεθόδων διάνοιξης και υποστήριξης σηράγγων και συνεπώς οι παραδοχές τους διαφέρουν σημαντικά από τις σύγχρονες συνθήκες διάνοιξης σηράγγων. Κατά συνέπεια, μια αξιόπιστη ανάλυση της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης σηράγγων θα πρέπει να προσομοιώνει την πλήρη ακολουθία των φάσεων διάνοιξης και υποστήριξης, δηλαδή την αλληλεπίδραση μεταξύ των μέτρων υποστήριξης και της περιβάλλουσας βραχώμαζας. Ειδικότερα, θα πρέπει να προσομοιώνονται τα εξής:

1. Η σύγκλιση της βραχώμαζας πριν από την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Η σύγκλιση αυτή συμβαίνει αφενός μεν πριν το μέτωπο εκσκαφής φθάσει στη συγκεκριμένη θέση αφετέρου δε στο διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της εκσκαφής και της τοποθέτησης των μέτρων άμεσης υποστήριξης<sup>2</sup>. Κατά τη διδιάστατη ανάλυση σηράγγων (δηλαδή την ανάλυση σε επίπεδο κάθετα στον άξονα της σήραγγας) τα ανωτέρω μπορούν να προσομοιωθούν είτε μέσω του συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ) που προσδιορίζεται από τις καμπύλες Panet είτε μέσω μιας ισοδύναμης απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.
2. Η βαθμιαία ενεργοποίηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης, όπως π.χ. η βαθμιαία αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η βαθμιαία αύξηση της συνάφειας των αγκυρίων πλήρους πάκτωσης με τσιμεντένεμα, η τυχόν ατελής επαφή των χαλύβδινων πλαισίων με τη βραχώμαζα κλπ.

## 6.2 Μέθοδοι διδιάστατης ανάλυσης

### 6.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη μέθοδος ανάλυσης της διάνοιξης και άμεσης υποστήριξης σηράγγων είναι η διδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία στο επίπεδο της διατομής της σήραγγας. Κατά τη μέθοδο αυτή προσομοιώνονται τα διαδοχικά στάδια (φάσεις) εκσκαφής και υποστήριξης της σήραγγας καθώς και η χρονική υστέρηση στην τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης μετά την εκσκαφή κάποιας φάσης. Η βραχώμαζα αλλά και τα στοιχεία της άμεσης υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ) προσομοιώνονται ως ελαστοπλαστικά υλικά με κάποια ελαστικά χαρακτηριστικά και ένα κριτήριο αστοχίας που καθορίζει το πέρας της ελαστικής τους συμπεριφοράς. Από την ανάλυση υπολογίζονται:

1. Οι παραμορφώσεις του τοιχώματος της σήραγγας.
2. Η έκταση της πλαστικής ζώνης (δηλαδή της ζώνης στην οποία ικανοποιείται το κριτήριο αστοχίας) στη βραχώμαζα που περιβάλλει τη σήραγγα.
3. Η ένταση των μέτρων άμεσης υποστήριξης (δυνάμεις στα αγκύρια, δυνάμεις και ροπές στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κλπ)

Σημειώνεται ότι λόγω της προσωρινής λειτουργίας των μέτρων άμεσης υποστήριξης είναι αποδεκτή η ανάπτυξη περιορισμένης έκτασης πλαστικών ζωνών στην περιβάλλουσα βραχώμαζα καθώς και η αστοχία (δηλαδή η λειτουργία στο φορτίο διαρροής) ορισμένων αγκυρίων. Αντίθετα, κατά κανόνα επιδιώκεται η ύπαρξη του περιθωρίου ασφαλείας (συντελεστή ασφαλείας) που απαιτείται για προσωρινά έργα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τα χαλύβδινα πλαίσια της άμεσης υποστήριξης. Η λογική της αποδοχής περιορισμένης έκτασης πλαστικών ζωνών στη βραχώμαζα και αστοχίας ορισμένων αγκυρίων είναι ότι στην περίπτωση αυτή υπάρχει η δυνατότητα

<sup>2</sup> δεδομένου ότι η άμεση υποστήριξη τοποθετείται σε κάποια απόσταση από το μέτωπο εκσκαφής

αναδιανομής των φορτίων σε παρακείμενες περιοχές της βραχώμαζας και σε γειτονικά αγκύρια, ενώ αντίθετα ο δακτύλιος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και τα χαλύβδινα πλαίσια δεν διαθέτουν ανάλογη δυνατότητα αναδιανομής της έντασης σε περίπτωση ανάπτυξης πλαστικής άρθρωσης.

Για την ανάλυση σηράγγων με πεπερασμένα στοιχεία διατίθενται ποικίλα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή όπως τα γενικής χρήσεως προγράμματα ABAQUS, SOFISTIK αλλά και ειδικά προγράμματα σηράγγων όπως τα TUNNEL, CESAR, PHASES. Σε όλα τα προγράμματα αυτά η διάνοιξη και υποστήριξη κάθε τμήματος της διατομής της σήραγγας γίνεται σε δυο (τουλάχιστον) φάσεις:

1. Κατά την πρώτη φάση, χαλαρώνεται η περιοχή που πρόκειται να εκσκαφεί σε βαθμό ώστε να προκληθεί σύγκλιση του τοιχώματος ίση με τη σύγκλιση που συμβαίνει μέχρι την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης. Ο βαθμός χαλάρωσης υπολογίζεται μέσω των καμπύλων Panet σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Στο τέλος της φάσης αυτής, τοποθετούνται τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τα οποία αρχικώς είναι αφόρτιστα.
2. Κατά τη δεύτερη φάση, ολοκληρώνεται η εκσκαφή του συγκεκριμένου τμήματος της διατομής με τοποθετημένα τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τα οποία βαθμιαίως αναλαμβάνουν φορτίο περιορίζοντας την περαιτέρω σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας. Η φάση αυτή μπορεί να αποτελείται από περισσότερες της μιας υποφάσεις εάν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης τοποθετούνται τμηματικά.

## 6.2.2 Ανάλυση με τη μέθοδο Rabcewicz

### 6.2.2.1 Γενικά

Η μέθοδος Rabcewicz βασίζεται στο άρθρο των L. Rabcewicz and J. Golser με τίτλο "*Principles of dimensioning the supporting system for the New Austrian Tunnelling Method*" που δημοσιεύθηκε στο περιοδικό *Water Power* το Μάρτιο 1973. Κατά τη μέθοδο αυτή ελέγχεται η επάρκεια του συστήματος άμεσης υποστήριξης μιας σήραγγας, δηλαδή υπολογίζεται ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας του συστήματος άμεσης υποστήριξης.

Η μέθοδος Rabcewicz βασίζεται στις εξής παραδοχές:

1. Η διατομή της σήραγγας είναι κυκλική με ακτίνα  $R$ . Η παραδοχή αυτή δεν περιορίζει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου επειδή τα αποτελέσματα των υπολογισμών δεν είναι πολύ ευαίσθητα στην τιμή της ακτίνας  $R$ . Συνεπώς στις μη-κυκλικές σήραγγες μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέση ακτίνα καμπυλότητας του ανώτερου τμήματος της σήραγγας (αφού ο έλεγχος επάρκειας γίνεται στην περιοχή της στέψης της σήραγγας).
2. Οι αρχικές τάσεις είναι ισότροπες, δηλαδή  $\sigma_v = \sigma_h = p_o$ . Η παραδοχή αυτή είναι αρκετά σημαντική και περιορίζει κάπως το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Παρά ταύτα, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιείται με τη συντηρητική θεώρηση  $p_o = \max(\sigma_v, \sigma_h)$  ή θεωρώντας  $p_o = (\sigma_v + \sigma_h)/2$ .

Η εφαρμογή της μεθόδου Rabcewicz περιλαμβάνει τα εξής στάδια υπολογισμών:

1. Υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα ( $p_u$ ) των στοιχείων άμεσης υποστήριξης, δηλαδή η οριακή πίεση που μπορούν να αναλάβουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, τα χαλύβδινα πλαίσια και τα αγκύρια.
2. Από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της ανυποστήρικτης διατομής, τον συντελεστή αποτόνωσης των τάσεων που αντιστοιχεί στην εφαρμογή των μέτρων

άμεσης υποστήριξης (που υπολογίζεται από τις καμπύλες Panet) και την ακαμψία του δακτυλίου από εκτοξευόμενο σκυροδέμα/χαλύβδινα πλαίσια, υπολογίζεται η τελική κατάσταση ισορροπίας του συστήματος βραχόμαζα-υποστήριξη, δηλαδή η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας και η αντίστοιχη πίεση ( $p_l$ ) της βραχόμαζας στην επένδυση της σήραγγας.

3. Υπολογίζεται ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας της άμεσης υποστήριξης από τη σχέση:

$$FS = \frac{p_u}{p_l}$$

Στα επόμενα περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των ( $p_u$ ) και ( $p_l$ ).

### 6.2.2.2 Υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας της άμεσης υποστήριξης

Η φέρουσα ικανότητα ( $p_u$ ) της άμεσης υποστήριξης υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντοχών του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ( $S$ ), των αγκυρίων ( $A$ ) και των χαλυβδίνων πλαισίων ( $R$ ) από τη σχέση:

$$p_u = p_u^S + p_u^A + p_u^R$$

όπου:

$$p_u^S = \frac{d \cdot \tau^S}{\left(\frac{b}{2}\right) \sin \alpha^S}$$

είναι η φέρουσα ικανότητα του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, πάχους ( $d$ ) και διατμητικής αντοχής:  $\tau^S = 0.20 f_c$ , όπου ( $f_c$ ) είναι η θλιπτική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Τα μεγέθη ( $b$ ) και ( $\alpha^S$ ) φαίνονται στο Σχήμα 1, ενώ ( $L + 0.50 m$ ) είναι το μήκος των αγκυρίων στην περιοχή της στέψης της σήραγγας, ( $l$ ) είναι η απόσταση μεταξύ των αγκυρίων κατά τη διατομή της σήραγγας, ( $R$ ) είναι η μέση ακτίνα καμπυλότητας στην περιοχή της στέψης της σήραγγας και:

$$\alpha^S = \alpha^R = 45 - \varphi/2, \quad b = 2R \cos \alpha^S$$

Η φέρουσα ικανότητα του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος προσδιορίζεται μέσω της οριακής διατμητικής αντοχής στο σημείο A (Σχήμα 1), θεωρώντας ως πιθανή επιφάνεια αστοχίας της βραχόμαζας την επιφάνεια (AKBC). Επιπλέον:

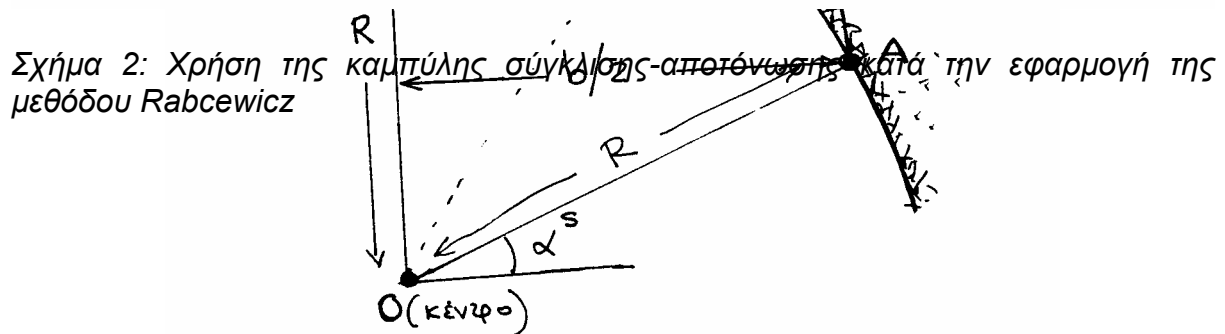
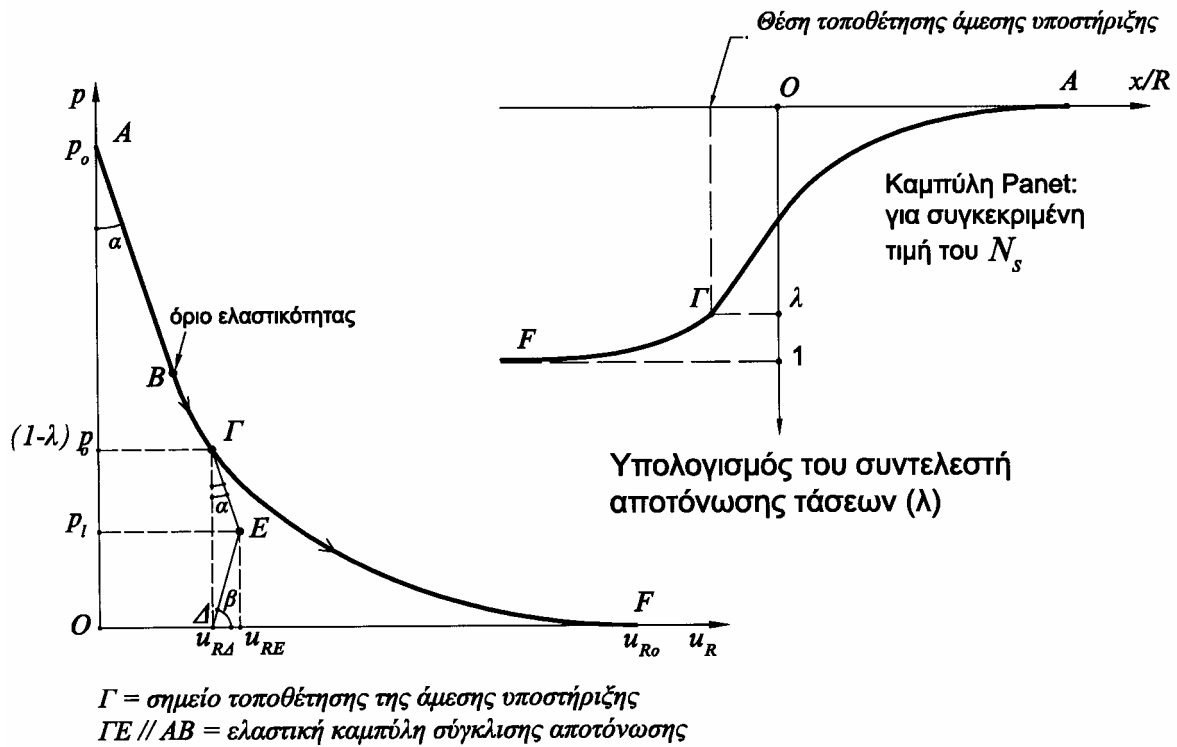
$$p_u^A = \frac{f^A \cdot \beta_s}{l \times t}$$

είναι η φέρουσα ικανότητα του κανάβου των αγκυρίων με εμβαδόν διατομής  $f^A = \pi D^2/4$  ( $D$  = διάμετρος ράβδου του αγκυρίου),  $\beta_s$  = όριο διαρροής του χάλυβα των αγκυρίων και ( $l \times t$ ) είναι οι διαστάσεις του κανάβου των αγκυρίων. Η ως άνω φέρουσα ικανότητα του κανάβου των αγκυρίων προσδιορίστηκε ως η μέση πίεση που αντιστοιχεί στο φορτίο διαρροής των αγκυρίων.

Τέλος:

$$p_u^R = \frac{(f^R/L^R) \cdot \tau^R}{\left(\frac{b}{2}\right) \sin \alpha^S}$$

είναι η φέρουσα ικανότητα των χαλύβδινων πλαισίων εμβαδού διατομής ( $f^R$ ), τοποθετημένων σε αποστάσεις ( $L^R$ ) και:



Σχήμα 1: Μέθοδος Rabcewicz

$$\tau^R = \tau^S \left( \frac{E_R}{E_S} \right)$$

είναι η διατμητική τάση στα χαλύβδινα πλαίσια<sup>3</sup> κατά τη διατμητική αστοχία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στην περιοχή του σημείου A. Στην τελευταία σχέση, ( $E_R$ ) είναι το μέτρο ελαστικότητας των χαλύβδινων πλαισίων και ( $E_S$ ) είναι το μέτρο ελαστικότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

### 6.2.2.3 Υπολογισμός της πίεσης της βραχόμαζας στην επένδυση

Η πίεση της βραχόμαζας στην άμεση επένδυση σηράγγων υπολογίζεται μέσω της καμπύλης σύγκλισης-αποτόνωσης και των καμπύλων Panet. Ειδικότερα, ακολουθείται η εξής διαδικασία που φαίνεται και στο Σχήμα 2:

1. Υπολογίζεται ο συντελεστής υπερφόρτισης (overload factor)  $N_s$  :

<sup>3</sup> υπολογιζόμενη μέσω της συμβατότητας των παραμορφώσεων μεταξύ των πλαισίων και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος

$$N_s = \frac{p_o}{c\sqrt{N_\phi}}, \quad N_\phi = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

όπου ( $p_o$ ) είναι η μέση αρχική γεωστατική πίεση:  $p_o = (\sigma_v + \sigma_h)/2$  και ( $c, \phi$ ) είναι οι παράμετροι αστοχίας της βραχόμαζας κατά Mohr-Coulomb. Σε περίπτωση ισχύος του κριτηρίου αστοχίας Hoek-Brown, οι αντίστοιχες παράμετροι ( $c, \phi$ ) μπορούν να υπολογισθούν σύμφωνα με όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 2 για τιμή της ελάχιστης κύριας τάσης  $\sigma_3 = p_o/2$  (δηλαδή θεωρώντας ότι ο συντελεστής αποτόνωσης των τάσεων είναι περίπου ίσος<sup>4</sup> με 0.50).

2. Για τη συγκεκριμένη θέση ( $x$ ) τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης και την ως άνω υπολογισθείσα τιμή του ( $N_s$ ), υπολογίζεται από τις καμπύλες Panet ο συντελεστής αποτόνωσης των τάσεων ( $\lambda$ ). Η μέθοδος υπολογισμού του ( $\lambda$ ) αναφέρεται στο Κεφάλαιο 4.
3. Με βάση τα μηχανικά χαρακτηριστικά παραμορφωσιμότητας και αντοχής της βραχόμαζας υπολογίζεται η καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στα Κεφάλαια 3 και 4. Η μορφή της καμπύλης φαίνεται στο Σχήμα 2 (καμπύλη ABGF). Το αρχικό τμήμα της καμπύλης (AB) αντιστοιχεί στην ελαστική συμπεριφορά της βραχόμαζας και έχει κλίση:

$$\tan \alpha = \frac{(1+\nu)R}{E}$$

όπου:  $R$  = μέση ακτίνα καμπυλότητας της σήραγγας  
 $E, \nu$  = ελαστικές σταθερές της βραχόμαζας

4. Από την καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης και για την ισοδύναμη εσωτερική πίεση  $p_r = (1-\lambda)p_o$  υπολογίζεται η θέση του σημείου Γ επί της καμπύλης που αντιστοιχεί στο σημείο τοποθέτησης της άμεσης υποστήριξης.
5. Η ευθεία ΔΕ αντιστοιχεί στην απόκριση (δηλαδή τη σχέση σύγκλισης ως προς φόρτιση) του δακτυλίου του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και έχει κλίση (βλέπε Κεφάλαιο 4):

$$\tan \beta = \frac{E_s}{R(1+\nu_s) \left[ (1-\nu_s) \left( \frac{R}{d} \right) - \left( \frac{\nu_s}{2} \right) \right]}$$

όπου ( $E_s, \nu_s$ ) είναι οι ελαστικές σταθερές του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ( $d$ ) είναι το πάχος του.

6. Η ευθεία ΓΕ είναι παράλληλη με την AB και αντιστοιχεί στην ελαστική καμπύλη σύγκλισης-αποτόνωσης της βραχόμαζας, δεδομένου ότι μετά την τοποθέτηση της άμεσης υποστήριξης η αντοχή της βραχόμαζας αυξάνει λόγω εγκιβωτισμού και συνεπώς η περαιτέρω συμπεριφορά της είναι ελαστική. Έτσι, το σημείο Ε αντιστοιχεί στην κατάσταση τελικής ισορροπίας της υποστηριζόμενης διατομής και η πίεση της βραχόμαζας στην επένδυση της σήραγγας είναι:

$$p_l = \left[ \frac{(1-\lambda) \tan \alpha \cdot \tan \beta}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta} \right] p_o$$

ενώ η αντίστοιχη σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας είναι:

$$u_{RE} = u_{RA} + \frac{p_l}{\tan \beta}$$

όπου ( $u_{RA}$ ) είναι η σύγκλιση του τοιχώματος της σήραγγας κατά την τοποθέτηση των μέτρων άμεσης υποστήριξης.

<sup>4</sup> η παραδοχή αυτή δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων επειδή αφορά μόνον την εκτίμηση των παραμέτρων αντοχής

## 6.2.3 Απλοποιημένη ελαστοπλαστική ανάλυση

### 6.2.3.1 Γενικά

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην απλοποίηση της λειτουργίας των μέτρων άμεσης υποστήριξης της σήραγγας μέσω της αντικατάστασής τους από μια ισοδύναμη αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας. Στη συνέχεια αναλύεται<sup>5</sup> η διάνοιξη της σήραγγας (στην ως άνω ενισχυμένη βραχόμαζα) χωρίς πλέον μέτρα άμεσης υποστήριξης<sup>6</sup> και υπολογίζονται οι τάσεις γύρω από τη σήραγγα. Οι τάσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της επάρκειας της άμεσης υποστήριξης. Η μέθοδος είναι ελαφρώς συντηρητική επειδή κατά τον έλεγχο επάρκειας των αγκυρίων θεωρείται ότι το σύνολο των φορτίων της βραχόμαζας αναλαμβάνεται μόνον από τα αγκύρια (δηλαδή σε ορισμένους ελέγχους αμελείται η υποβοηθητική λειτουργία του εκτοξευόμενου σκυροδέματος και των χαλύβδινων πλαισίων). Σημειώνεται ότι το εκτοξευόμενο σκυροδέμα και τα χαλύβδινα πλαίσια δεν αμελούνται πλήρως αφού η λειτουργία τους λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό της αύξησης της διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας. Τέλος, εάν η ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας γίνει μέσω των καμπύλων σύγκλισης-αποτόνωσης, εξ ανάγκης γίνεται η παραδοχή ισότροπων αρχικών γεωστατικών τάσεων ( $\sigma_v = \sigma_h = p_o$ ) που περιορίζει κάπως το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου. Παρά ταύτα η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιείται με τη συντηρητική θεώρηση  $p_o = \max(\sigma_v, \sigma_h)$  ή θεωρώντας ότι  $p_o = (\sigma_v + \sigma_h)/2$ . Στα επόμενα περιγράφεται ο τρόπος εφαρμογής της απλοποιημένης ελαστοπλαστικής ανάλυσης.

### 6.2.3.2 Αύξηση της διατμητικής αντοχής της βραχόμαζας

Η βραχόμαζα που περιβάλλει τη σήραγγα ασκεί πίεση στην άμεση υποστήριξη της διατομής οπότε και η άμεση υποστήριξη ασκεί μια ίση και αντίθετη πίεση στη βραχόμαζα. Η πίεση αυτή προκαλεί εγκιβωτισμό της βραχόμαζας και συνεπώς αυξάνει την αντοχή της (λειτουργία  $\sigma_3$ ). Στα επόμενα, υπολογίζεται η ισοδύναμη αύξηση της συνοχής ( $\Delta c$ ) της βραχόμαζας που αντιστοιχεί στην παραπάνω πίεση  $\sigma_3$ . Θεωρείται ότι η βραχόμαζα ακολουθεί το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb με παραμέτρους ( $c, \varphi$ ).

(α) Αντοχή ( $\sigma_1$ ) της βραχόμαζας με την παρουσία της πίεσης ( $\sigma_3$ ):

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \quad \text{όπου} \quad N_\varphi = \tan^2\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right)$$

(β) Αντοχή της βραχόμαζας χωρίς την παρουσία της πίεσης ( $\sigma_3$ ) αλλά με αυξημένη συνοχή<sup>7</sup>:

$$\sigma_1 = 2(c + \Delta c)\sqrt{N_\varphi}$$

Εξίσωση των ανωτέρω αντοχών δίνει:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \sigma_3 \sqrt{N_\varphi}$$

Σημειώνεται ότι η μέγιστη δυνατή τιμή της πίεσης ( $\sigma_3$ ) είναι ίση με τη φέρουσα ικανότητα των μέτρων άμεσης υποστήριξης, δηλαδή:

<sup>5</sup> μέσω των καμπύλων σύγκλισης-αποτόνωσης ή μέσω πεπερασμένων στοιχείων

<sup>6</sup> αφού τα μέτρα άμεσης υποστήριξης έχουν ληφθεί υπόψη στην ενισχυμένη βραχόμαζα

<sup>7</sup> θεωρείται ότι η γωνία τριβής παραμένει σταθερή

$$\sigma_3 = p_u = p_u^S + p_u^A + p_u^R$$

που υπολογίσθηκε στο προηγούμενο εδάφιο (μέθοδος Rabcewicz).

### 6.2.3.3 Ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας

Μετά τον υπολογισμό της αυξημένης αντοχής της βραχόμαζας, αναλύεται η διάνοιξη της σήραγγας στην ενισχυμένη βραχόμαζα (χωρίς πλέον την τοποθέτηση μέτρων άμεσης υποστήριξης αφού αυτά έχουν ληφθεί υπόψη στην αυξημένη αντοχή της βραχόμαζας). Ειδικότερα διανοίγεται (σε μια φάση) μια οπή με τις διαστάσεις της σήραγγας σε υλικό με τις ελαστικές σταθερές ( $E, \nu$ ) της βραχόμαζας<sup>8</sup> και χαρακτηριστικά αστοχίας ( $c+\Delta c, \varphi$ ), όπου ( $c, \varphi$ ) είναι τα χαρακτηριστικά αστοχίας της βραχόμαζας και ( $\Delta c$ ) η αύξηση της αντοχής λόγω της άμεσης υποστήριξης της σήραγγας. Η διαδικασία αυτή δεν εισάγει σημαντικό σφάλμα για τους εξής λόγους:

1. Είναι γεγονός ότι η αντοχή της βραχόμαζας είναι αυξημένη μόνον σε μια περιορισμένη ζώνη κοντά στο τοίχωμα της σήραγγας και όχι σε όλη την έκταση της βραχόμαζας. Όμως, συνήθως, η περιοχή της βραχόμαζας που αστοχεί περιορίζεται κοντά στο τοίχωμα της σήραγγας ενώ η υπόλοιπη βραχόμαζα παραμένει ελαστική. Κατά συνέπεια, η παραδοχή αυξημένης αντοχής και μακριά από το τοίχωμα της σήραγγας δεν προκαλεί σφάλμα αφού ούτως ή άλλως η περιοχή αυτή δεν αστοχεί.
2. Η εξ' αρχής θεώρηση αυξημένης αντοχής της βραχόμαζας δεν είναι απολύτως ορθή αφού η άμεση υποστήριξη τοποθετείται αφού ήδη έχουν συμβεί κάποιες παραμορφώσεις της βραχόμαζας (και πιθανώς έχουν αναπτυχθεί και κάποιες πλαστικές παραμορφώσεις). Όμως, συνήθως η έκταση της πλαστικοποίησης είναι περιορισμένη και συνεπώς μπορεί πρακτικώς να αμεληθεί. Σε περίπτωση που απαιτείται λεπτομερέστερη θεώρηση, μπορεί να γίνει διάνοιξη της οπής σε δυο φάσεις:
  - (α) Χαλάρωση κατά τον συντελεστή αποτόνωσης με χαρακτηριστικά βραχόμαζας ( $c, \varphi$ ), δηλαδή χωρίς βελτίωση.
  - (β) Ολοκλήρωση της διάνοιξης (δηλαδή μηδενισμός της εσωτερικής πίεσης της οπής) με βελτιωμένα χαρακτηριστικά της βραχόμαζας ( $c+\Delta c, \varphi$ ) λόγω της παρουσίας της άμεσης υποστήριξης.

Η ανάλυση της διάνοιξης της σήραγγας μπορεί να γίνει με δυο τρόπους:

1. Με πεπερασμένα στοιχεία. Η μέθοδος αυτή είναι ακριβέστερη και επιτρέπει τη θεώρηση ανισότροπης γεωστατικής τάσης ( $\sigma_v \neq \sigma_h$ ).
2. Με τις καμπύλες σύγκλισης-αποτόνωσης. Η μέθοδος αυτή υποθέτει κυκλική σήραγγα και ισότροπες γεωστατικές τάσεις ( $\sigma_v = \sigma_h = p_o$ ).

Από την ανάλυση προκύπτει η κατανομή των κύριων τάσεων  $\sigma_1 = \sigma_\theta$  και  $\sigma_3 = \sigma_r$  γύρω από τη σήραγγα και ειδικότερα στη ζώνη από  $r = R$  έως  $r = R + L$ , όπου ( $R$ ) είναι η ακτίνα της σήραγγας και ( $L$ ) είναι το μήκος των αγκυρίων. Από τις κατανομές αυτές υπολογίζονται οι μέσες τάσεις ( $\bar{\sigma}_1$  και  $\bar{\sigma}_3$ ) κατά μήκος των αγκυρίων (δηλαδή στο μήκος  $L$ ).

<sup>8</sup> η παρουσία των αγκυρίων προκαλεί μια μικρή μείωση της παραμορφωσιμότητας η οποία συνήθως αμελείται



#### 6.2.3.4 Έλεγχος επάρκειας της άμεσης υποστήριξης

Οι ως άνω μέσες τιμές των κύριων τάσεων ( $\bar{\sigma}_1$  και  $\bar{\sigma}_3$ ) χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της επάρκειας της άμεσης υποστήριξης ως εξής:

1. Εκτίμηση του διαθέσιμου συντελεστή ασφαλείας (Σχήμα 3α).

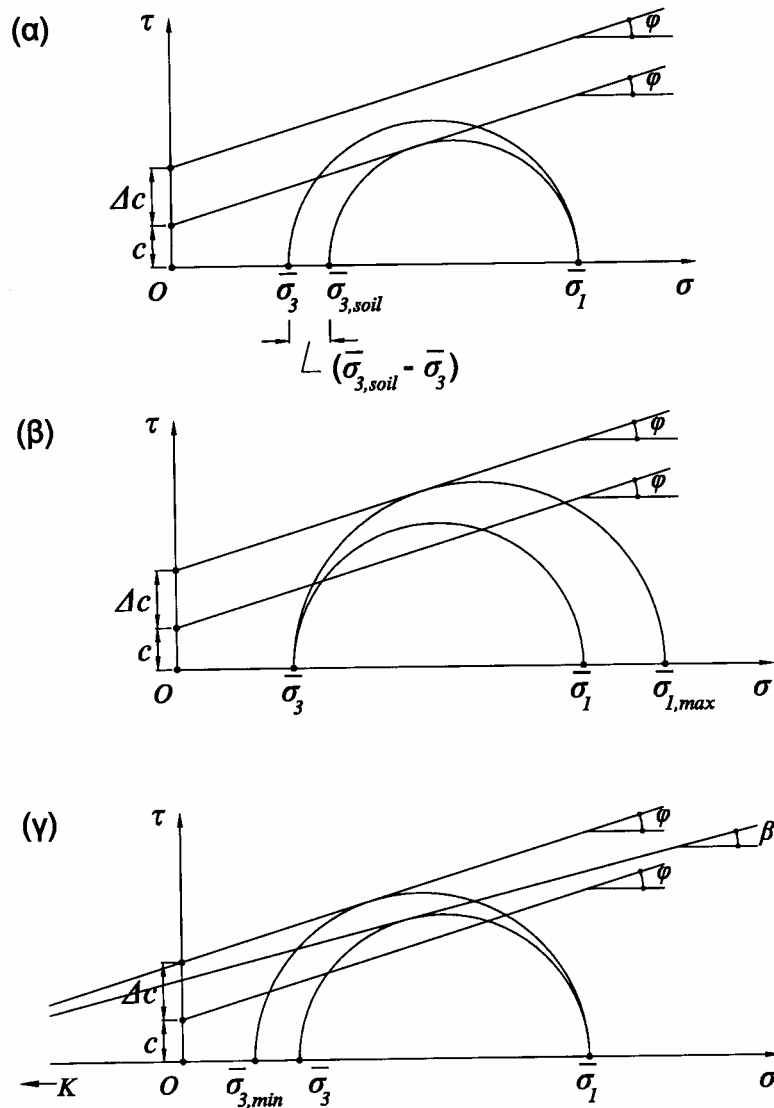
Οι τάσεις ( $\bar{\sigma}_1$  και  $\bar{\sigma}_3$ ) δεν προκαλούν την αστοχία της βελτιωμένης βραχόμαζας που διαθέτει αυξημένη συνοχή ( $c+\Delta c$ ) όμως εν γένει θα προκαλούσαν την αστοχία της μη-βελτιωμένης βραχόμαζας με συνοχή ( $c$ ). Ειδικότερα, θεωρώντας σταθερή την τάση ( $\bar{\sigma}_1$ ), η τάση ( $\bar{\sigma}_{3,soil}$ ) που θα προκαλούσε την αστοχία της μη-βελτιωμένης βραχόμαζας είναι:

$$\bar{\sigma}_{3,soil} = \frac{\bar{\sigma}_1 - 2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi} \geq \bar{\sigma}_3$$

Συνεπώς, η άμεση υποστήριξη αναλαμβάνει πίεση ( $\bar{\sigma}_{3,soil} - \bar{\sigma}_3$ ), ενώ η φέρουσα ικανότητά της είναι ( $p_u$ ). Άρα ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας της άμεσης υποστήριξης είναι:

$$FS_1 = \frac{p_u}{\bar{\sigma}_{3,soil} - \bar{\sigma}_3}$$

όπου:  $p_u = p_u^S + p_u^A + p_u^R$  (βλέπε προηγούμενο εδάφιο).



Σχήμα 3: Έλεγχος επάρκειας της άμεσης υποστήριξης

2. Έλεγχος επάρκειας του μήκους των αγκυρίων (Σχήμα 3β).

Θεωρώντας σταθερή την ελάχιστη κύρια τάση ( $\bar{\sigma}_3$ ), υπολογίζεται η μέγιστη κύρια τάση ( $\bar{\sigma}_{1,max}$ ) που θα προκαλούσε αστοχία της βελτιωμένης βραχόμαζας:

$$\bar{\sigma}_{1,max} = \bar{\sigma}_3 N_\phi + 2(c + \Delta c)\sqrt{N_\phi} \geq \bar{\sigma}_1$$

Η τάση αυτή είναι η μέγιστη τιμή της περιφερειακής τάσης ( $\sigma_\theta$ ) που μπορεί να αναλάβει η βελτιωμένη βραχόμαζα. Το ελάχιστο μήκος αγκυρίων από το οποίο θα μπορούσε να αναληφθεί η τάση αυτή είναι ( $L_{min}$ ):

$$\bar{\sigma}_{1,max} \cdot L_{min} = \bar{\sigma}_1 \cdot L = \text{μέση θλιπτική δύναμη στη ζώνη μήκους } (L)$$

Άρα:

$$L_{min} = \bar{\sigma}_1 \cdot L / \bar{\sigma}_{1,max}$$

οπότε ο διαθέσιμος συντελεστής ασφαλείας του μήκους των αγκυρίων είναι:

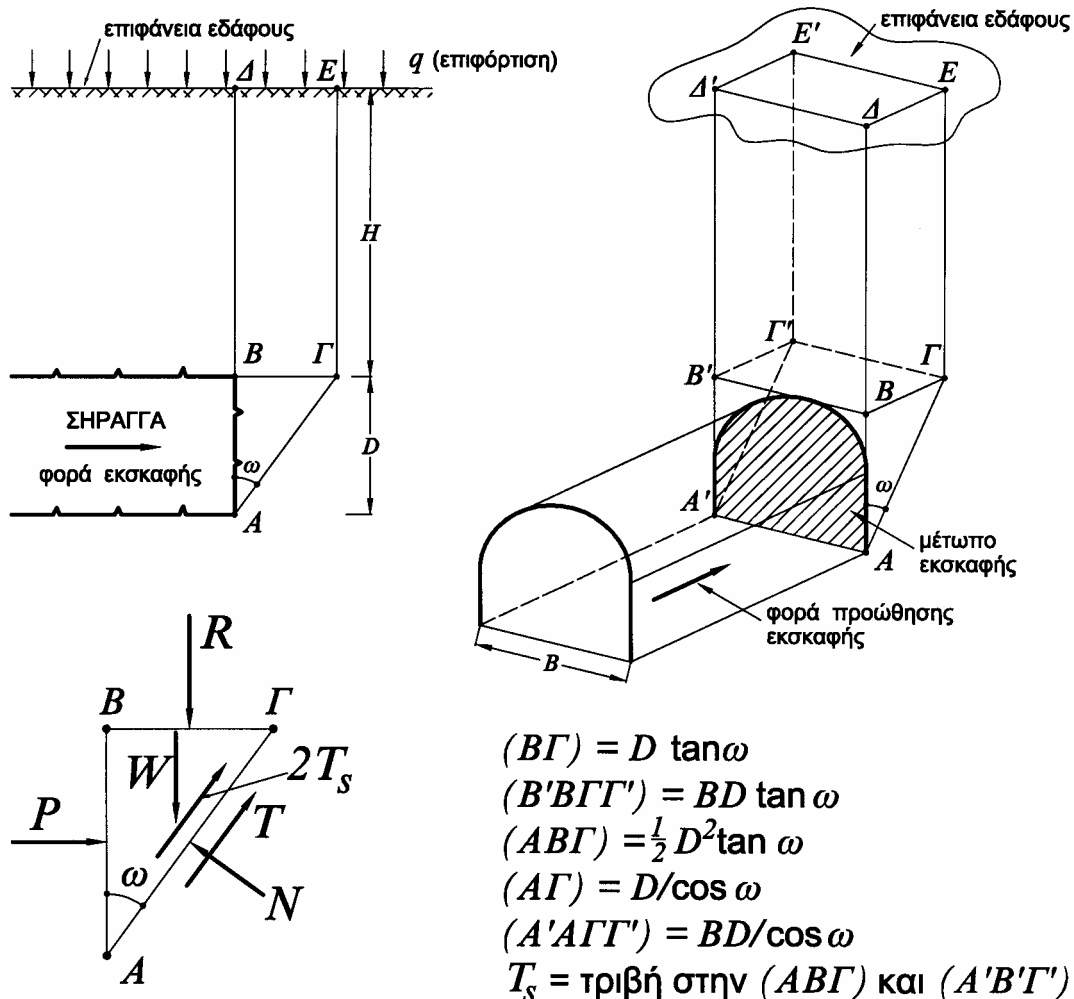
$$FS_2 = \frac{L}{L_{min}} = \frac{\bar{\sigma}_{1,max}}{\bar{\sigma}_1}$$

3. Έλεγχος επάρκειας έναντι γενικευμένης αστοχίας (Σχήμα 3γ).  
 Θεωρώντας σταθερή τη μέγιστη κύρια τάση ( $\bar{\sigma}_1$ ), υπολογίζεται η ελάχιστη κύρια τάση ( $\bar{\sigma}_{3,\min}$ ) που θα προκαλούσε αστοχία της βελτιωμένης βραχώμαζας:

$$\bar{\sigma}_{3,\min} = \frac{\bar{\sigma}_1 - 2(c + \Delta c)\sqrt{N_\phi}}{N_\phi} < \bar{\sigma}_3$$

Από το σημείο τομής (Κ) της περιβάλλουσας αστοχίας της βελτιωμένης βραχώμαζας άγεται εφαπτομένη στο κύκλο ( $\bar{\sigma}_1, \bar{\sigma}_3$ ) που σχηματίζει γωνία ( $\beta$ ) ως προς τον οριζόντιο άξονα. Δεδομένου ότι  $\beta \leq \phi$ , ο συντελεστής ασφάλειας της άμεσης υποστήριξης έναντι αστοχίας μπορεί να εκφρασθεί ως:

$$FS_3 = \frac{\tan \phi}{\tan \beta} = \frac{2 \tan \phi \sqrt{\left(\bar{\sigma}_1 + \frac{c + \Delta c}{\tan \phi}\right) \left(\bar{\sigma}_3 + \frac{c + \Delta c}{\tan \phi}\right)}}{(\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3)}$$



Σχήμα 4: Ανάλυση ευστάθειας του μετώπου σήραγγας

## 6.3 Έλεγχος ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής

### 6.3.1 Περιγραφή της μεθόδου ανάλυσης

Κατά τη διδιάστατη ανάλυση της διάνοιξης σήραγγων (στο επίπεδο της διατομής) εξετάζεται η ευστάθεια της οροφής αλλά δεν εξετάζεται η ευστάθεια του μετώπου, επειδή αφορά την τρίτη διάσταση, δηλαδή τη διεύθυνση του άξονα της σήραγγας. Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται μια απλοποιημένη μέθοδος ανάλυσης της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής μιας σήραγγας η οποία βασίζεται στη στερεοστατική ισορροπία ενός πρίσματος στο μέτωπο της σήραγγας (Σχήμα 4). Η μέθοδος προτάθηκε αρχικώς από τον Horn (1961) και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τους Anagnostou and Kovari (1991-1996).

Στο Σχήμα 4 φαίνονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρίσμα (ΑΒΓΑ'Β'Γ') και είναι:

1. Το βάρος του πρίσματος:

$$W = \gamma B (AB\Gamma) = \frac{1}{2} \gamma D^2 B \tan w$$

2. Η τυχόν ασκούμενη δύναμη ( $P$ ) στο μέτωπο εκσκαφής της σήραγγας. Κατά την εκσκαφή με τη μέθοδο NATM, η δύναμη αυτή είναι μηδέν. Κατά τη μηχανική εκσκαφή σήραγγων, η δύναμη αυτή ισούται με την ώθηση του μηχανήματος επί του μετώπου εκσκαφής.
3. Η κατακόρυφη δύναμη ( $R$ ):

$$R = \sigma_v (B'B\Gamma\Gamma') = \sigma_v B D \tan w$$

όπου ( $\sigma_v$ ) είναι η κατακόρυφη πίεση στην επιφάνεια (Β'ΒΓΓ'). Η πίεση αυτή υπολογίζεται από τη θεωρία σιλό κατά Terzaghi θεωρώντας ότι το πρίσμα (ΒΓΒ'Γ'ΔΕΔ'Ε') λειτουργεί ως σιλό. Ο υπολογισμός της ( $\sigma_v$ ) περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

4. Η δύναμη τριβής ( $T_s$ ) που ασκείται στην παράπλευρη επιφάνεια (ΑΒΓ) του πρίσματος:

$$T_s = (AB\Gamma) \frac{\tau_f}{F} = \frac{1}{2} (D^2 \tan w) \frac{\tau_f}{F}$$

όπου ( $\tau_f$ ) είναι η οριακή διατμητική τάση στην επιφάνεια (ΑΒΓ):

$$\tau_f = c + k \sigma_{vo} \tan \varphi, \quad \sigma_{vo} = \gamma \left( H + \frac{1}{3} D \right)$$

$\sigma_{vo}$  = η κατακόρυφη γεωστατική πίεση

$k$  = ο συντελεστής οριζόντιας ώθησης ( $k = 0.50-1.00$ )

$\gamma$  = ειδικό βάρος του εδάφους

( $c, \varphi$ ) = οι παράμετροι αντοχής του εδάφους

$F$  = ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής

5. Η ορθή δύναμη ( $N$ ) στη βάση του πρίσματος.

6. Η διατμητική δύναμη ( $T$ ) στη βάση του πρίσματος που δίνεται από τη σχέση:

$$T = \frac{1}{F} [c (A'ΑΓΓ') + N \tan \varphi]$$

όπου ( $A'ΑΓΓ'$ ) =  $BD/\cos w$  και ( $F$ ) είναι ο συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής.

Οι δυνάμεις αυτές ισορροπούν και συνεπώς:

$$N = (R + W) \sin w + P \cos w$$

$$T + 2T_s = (R + W) \cos w - P \sin w$$

Οι ανωτέρω σχέσεις επιλύονται ως προς ( $F$ ) και δίνουν:

$$F = \frac{N \tan \varphi + c (A' \text{ΑΓΓ}') + 2\tau_f (AB\Gamma)}{(R + W) \cos w - P \sin w}$$

όπου:  $N = (R + W) \sin w + P \cos w$ . Η τελευταία σχέση δίνει το συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής της σήραγγας συναρτήσει της γωνίας ( $w$ ) του πρίσματος, η οποία όμως δεν έχει προσδιορισθεί. Η τιμή του ( $w$ ) είναι εκείνη που δίνει τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ( $F$ ). Η ελάχιστη αυτή τιμή του ( $F$ ) είναι ο πραγματικός συντελεστής ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου της εκσκαφής.

Σημειώνεται ότι στους ανωτέρω υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η επιρροή τυχόν υδατικών πιέσεων πόρων και υδατικών δυνάμεων διηθήσεως προς το εσωτερικό της εκσκαφής. Οι παράγοντες αυτοί δρουν αποσταθεροποιητικά και μειώνουν το συντελεστή ασφαλείας έναντι αστοχίας του μετώπου εκσκαφής.

### 6.3.2 Εκτίμηση της κατακόρυφης πίεσης $\sigma_v$

Στο παρόν εδάφιο εκτιμάται η κατακόρυφη πίεση ( $\sigma_v$ ) στην άνω επιφάνεια (ΒΓΓ'Β') του ωθούντος πρίσματος (βλέπε Σχήμα 4) με θεώρηση λειτουργίας τύπου σιλό στις παράπλευρες επιφάνειες του πρίσματος (ΒΓΓ'Β'ΔΕΕ'Δ'). Το πρίσμα αυτό έχει διαστάσεις κατόψεως ( $B$ ) επί ( $D \tan w$ ) και ύψος ( $H$ ). Η ισορροπία μιας λωρίδας ύψους ( $dz$ ) του πρίσματος αυτού δίνει:  $dW = A d\sigma_v + \Pi \tau dz$ , όπου:

$dW = \gamma BD \tan w \cdot dz$  είναι το βάρος της λωρίδας,  $A = BD \tan w$  είναι το εμβαδόν της κατόψεως,  $\Pi = 2(B + D \tan w)$  είναι η περίμετρος της λωρίδας και  $\tau = c + K \sigma_v \tan \varphi$  είναι η διατμητική τάση στην παράπλευρη επιφάνεια της λωρίδας. Κατά Terzaghi, ο συντελεστής  $K$  μπορεί να θεωρηθεί περίπου ίσος με τη μονάδα.

Η τελευταία σχέση δίνει τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \Lambda \sigma_v = M$$

όπου:

$$\Lambda = 2K \left( \frac{B + D \tan w}{BD \tan w} \right) \tan \varphi, \quad M = \gamma - 2c \left( \frac{B + D \tan w}{BD \tan w} \right)$$

Η εξίσωση αυτή επιλύεται με τη συνοριακή συνθήκη  $\sigma_v(z=0) = q$  και δίνει:

$$\sigma_v = \left( q - \frac{M}{\Lambda} \right) e^{-\Lambda z} + \frac{M}{\Lambda}$$

Στη συνέχεια θεωρείται ότι η λειτουργία τύπου σιλό εκτείνεται έως ύψος  $H_{max} = 2.5B$  πάνω από τη στέψη της σήραγγας, δηλαδή ότι η πίεση ( $\sigma_v$ ) ισούται με τη γεωστατική σε αποστάσεις μεγαλύτερες του  $H_{max}$  από τη στέψη της σήραγγας. Με την ανωτέρω παραδοχή, η κατακόρυφη πίεση στην επιφάνεια ΒΓΓ'Β' του πρίσματος είναι:

(α) Για  $H \leq 2.5B$

$$\sigma_v = \left( q - \frac{M}{\Lambda} \right) e^{-\Lambda H} + \frac{M}{\Lambda}$$

(β) Για  $H > 2.5B = H_{max}$

$$\sigma_v = \left[ q + \gamma (H - H_{max}) - \frac{M}{\Lambda} \right] e^{-\Lambda H_{max}} + \frac{M}{\Lambda}$$

όπου  $q$  = επιφόρτιση στην επιφάνεια του εδάφους

$\gamma$  = ειδικό βάρος του εδάφους

## 6.4 Έλεγχος ευστάθειας των στομίων της σήραγγας

Η ευστάθεια των στομίων μιας σήραγγας αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση μελέτης για τους εξής λόγους:

1. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας δεν είναι δυνατή η πλήρης ανάπτυξη φαινομένου θόλου λόγω του μικρού πάχους των υπερκειμένων γαιών αλλά και της γειννίασης με το πρανές προσβολής του μετώπου της σήραγγας.
2. Λόγω γειννίασης με την επιφάνεια του εδάφους η βραχόμαζα είναι συνήθως αποσαθρωμένη και εξαλλοιωμένη.
3. Λόγω της κλίσης του φυσικού ή τεχνητού πρανούς του εδάφους, οι αρχικές συνθήκες δεν είναι γεωστατικές, δηλαδή υπάρχουν σημαντικές αρχικές διατμητικές τάσεις.
4. Συχνά ο συντελεστής ασφαλείας έναντι διατμητικής αστοχίας του φυσικού πρανούς πριν από τη διάνοιξη της σήραγγας είναι ανεπαρκής (δηλαδή ελαφρά μεγαλύτερος της μονάδας). Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται ακόμη περισσότερο λόγω της διατάραξης της βραχόμαζας και ενίοτε γίνεται μικρότερος της μονάδας με συνέπεια την αστοχία του στομίου της σήραγγας.

Για τους ανωτέρω λόγους κατά τη διαμόρφωση του στομίου της σήραγγας συνήθως εφαρμόζονται τα εξής:

1. Το πρανές γύρω από το μέτωπο προσβολής του στομίου σταθεροποιείται με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και αγκυρώσεις (συνήθως παθητικές) ικανού μήκους (6-8 μέτρα).
2. Η περιοχή της στέψης του μετώπου προσβολής ενισχύεται με δοκούς προπορείας (forepoling) για τη βελτίωση των συνθηκών ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής.
3. Η άμεση υποστήριξη της σήραγγας περιλαμβάνει και χαλύβδινα πλαίσια για την ενίσχυση της ακαμψίας της. Τα χαλύβδινα πλαίσια συχνά επεκτείνονται σε κάποιο μήκος και εκτός του στομίου της σήραγγας (προπλαίσια) με σκοπό την ενίσχυση της ακαμψίας αλλά και την προστασία του στομίου από τοπικές καταπτώσεις βράχων.
4. Η άμεση υποστήριξη σχεδιάζεται ώστε να αναλάβει τα πλήρη γεωστατικά φορτία των υπερκειμένων γαιών χωρίς απομείωση των πιέσεων της βραχόμαζας λόγω φαινομένου θόλου.