

---

# ΔΡΑΣΕΙΣ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

---

Γ. Μπακογιάννης  
Μεταλλειολόγος Μηχανικός στην ΕΥΔΕ/ΟΣΥΕ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Η τέχνη της σηραγγοποιίας χρειάζεται τις θετικές και εμπειρικές επιστήμες.
- Η όχι θεαματική εξέλιξη στον τομέα της ανάλυσης θα πρέπει να αναζητηθεί στην περιορισμένη ακόμη κατανόηση κάποιων φαινομένων και καταστάσεων και την ουσιαστική έλλειψη αστοχιών σε μόνιμη επένδυση.
- Οι αστοχίες που έχουν παρατηρηθεί σχετίζονται με αγνόηση του μηχανισμού αστοχίας, παρά με ανεπαρκή θεώρηση της αντίστοιχης δράσης. Ιδιαίτερης σημασίας: *συνθήκες διεπιφανειών, ανθεκτικότητα*.
- Τα μοντέλα θα πρέπει να είναι επαρκώς ασφαλή, απλά και πραγματικά, με βελτιστοποίηση της κοινής τομής των τριών ιδιοτήτων.
- Η απαίτηση των επαρκώς απλών μοντέλων προσεγγίζεται: *«Τα πράγματα πρέπει να γίνονται όσο το δυνατόν πιο απλά αλλά όχι απλούστερα»*.

## 2. ΟΡΙΣΜΟΙ - ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Μόνιμη επένδυση νοείται το δομικό σύστημα το οποίο ικανοποιεί τις *απαιτήσεις επιτελεστικότητας* για την *τεχνική διάρκεια ζωής* της σήραγγας.

### ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Ο Εργοδότης θέτει με σαφήνεια, σε ποσοτικούς ή/και ποιοτικούς όρους, τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας, με βάση και αναφορά καθοριζόμενες οριακές καταστάσεις (αστοχίας, λειτουργικότητας ή ειδικές).

- **Απαιτήσεις λειτουργικότητας** (π.χ. παραμορφώσεις, απόλυτες ή/και διαφορικές μακροχρόνιες καθιζήσεις, επιτρεπόμενο αποδεκτό εύρος ρηγματώσεων, αποδεκτές απώλειες σε υδραυλικές σήραγγες, αποδεκτές εισροές από το στεγανωτικό σύστημα, απαιτήσεις τραχύτητας της τελικής επιφάνειας.)
- **Καθορισμός της δυνατότητας ανακατασκευής** εν όλω ή εν μέρει της μόνιμης επένδυσης στην διάρκεια της τεχνικής ζωής του έργου.
- **Καθορισμός των χρονικών διαστημάτων διακοπής λειτουργίας** για συντήρηση επισκευές ή ανακατασκευή.

**Ο Εργοδότης θα πρέπει επίσης να καθορίσει την αντικειμενική συνάρτηση** (π.χ. στόχος ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους στην διάρκεια ζωής του έργου, ή ελαχιστοποίηση κόστους συντήρησης και επισκευών).

### ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

Συνήθως ορίζεται από τον Εργοδότη. Για τις οδικές και σιδηροδρομικές είναι 100 χρόνια. Άγνωστο πώς προκύπτει σε όλους το ίδιο. Ο ρόλος του μεγέθους είναι διττός:

- **Ποσοτικοποίηση δράσεων για το συγκεκριμένο διάστημα αναφοράς** (π.χ. σεισμική δράση, υδραυλικό καθεστώς, μακροχρόνιες χρονικά συντηρημένες ιδιότητες και φαινόμενα)
- **Ανθεκτικότητα του δομικού συστήματος για τον αντίστοιχο χρόνο.** Τα υπάρχοντα κανονιστικά κείμενα δεν μπορούν να διαχειριστούν ένα τέτοιο αποδεικτέο μέγεθος. Η θεώρησή τους είναι ότι εφ' όσον ικανοποιούνται κάποιοι κανόνες, η κατασκευή θα επιτυγχάνει αποδεκτώς μακρά αλλά μη προδιαγραφόμενη ή προκαθοριζόμενη τεχνική διάρκεια ζωής.

### **Η πρόβλεψη της νέας οδηγίας για την μελέτη οδικών σηράγγων:**

«Εφόσον τηρηθούν τα αναφερόμενα στο παρόν τεύχος σε ό,τι αφορά την μελετητική προσέγγιση, γίνει επιτυχής επιλογή υλικών και κατασκευαστικών διαδικασιών κατά την φάση της υλοποίησης, και εφαρμοστεί κατάλληλο συνολικό σύστημα διασφάλισης ποιότητας, θεωρείται ότι εξασφαλίζεται η απαιτούμενη τεχνική διάρκεια ζωής του τελικού δομικού συστήματος της σήραγγας, με καθορισμένο αποδεκτώς χαμηλό κόστος συντήρησης και επισκευών. Ειδικότερα οι συνθήκες περιβάλλοντος που θα επικρατούν κατά την διάρκεια της τεχνικής ζωής του έργου, θα πρέπει να εκτιμηθούν κατά τον σχεδιασμό, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση της σπουδαιότητας τους σε σχέση με την ανθεκτικότητα, και να προβλέπονται τα κατάλληλα μέτρα. Ο εργοδότης μπορεί να απαιτήσει σε περιπτώσεις πολύ διαβρωτικών συνθηκών περιβάλλοντος την απόδειξη της ικανοποίησης της απαίτησης για την τεχνική ζωή του τελικού δομικού συστήματος της σήραγγας. Ως βάση για την προσέγγιση αυτή θα χρησιμοποιηθούν οι αρχές σχεδιασμού για την λειτουργική ζωή του έργου (service life design). Ο

μελετητής θα προτείνει και ο εργοδότης θα αποφασίσει για τις οριακές καταστάσεις που προκύπτουν από απαιτήσεις ανθεκτικότητας, κατατάσσοντας αυτές σε οριακές καταστάσεις αστοχίας ή λειτουργικότητας, προτείνοντας αντίστοιχους δείκτες αξιοπιστίας (προσέγγιση πιθανολογικών προσομοιωμάτων) και την απαιτούμενη επιτελεστικότητα (performance) της κατασκευής.»

### **3. ΑΝΑΓΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΟΝΙΜΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ**

Συνήθως η μόνιμη επένδυση κατασκευάζεται μετά την διάνοιξη και αρχική υποστήριξη και τον μηδενισμό του ρυθμού εξέλιξης μετακινήσεων εντάσεων κ.λπ., δηλαδή μετά την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ γεωυλικού και αρχικής υποστήριξης, φορτιζόμενη κατ' αρχήν μόνο με το ίδιο βάρος.

Οι λόγοι που επιβάλουν την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης είναι:

#### **A. Επίτευξη αποδεκτού επιπέδου ασφαλείας μόνιμης λειτουργίας**

Για την μόνιμη επένδυση η αποδεκτή πιθανότητα αστοχίας είναι της τάξης του  $10^{-6}$ , με την ευθύνη να αναλαμβάνεται από το κοινωνικό σύνολο, ενώ οι εμπλεκόμενοι χρήστες θεωρώντας την κατασκευή a priori ασφαλή έχουν μικρή δυνατότητα επηρεασμού και μικρή ευθύνη.

Στην φάση κατασκευής (αρχική υποστήριξη) οι εμπλεκόμενοι:

- Μελετητής
- Κατασκευαστής και το επί τόπου ειδικευμένο προσωπικό
- Σύμβουλος
- Κύριος του Έργου

συμμετέχουν εκουσίως στην διαχείριση της αβεβαιότητας και του κινδύνου, δρώντας συνειδητά, έτσι ώστε να είναι αποδεκτή μια μεγαλύτερη πιθανότητα αστοχίας (της τάξης του  $10^{-4}$ ).

## **B. Ανάλυση από την μόνιμη επένδυση των αναδιανεμημένων φορτίων του γεωυλικού λόγω απαξίωσης της υποστηρικτικής δράσης στοιχείων της αρχικής υποστήριξης**

Για τα επί μέρους στοιχεία της αρχικής υποστήριξης και την πιθανή συνεισφορά τους στην ανάληψη δράσεων της μόνιμης επένδυσης θα αναφερθούμε στα αγκύρια και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

### **B.1. Αγκύρια**

Συνήθως αγνοείται εντελώς η δράση των αγκυρίων της αρχικής υποστήριξης λόγω:

- *Αδυναμίας εγγύησης της τεχνικής διάρκειας ζωής των επί μέρους στοιχείων των αγκυρίων.*
- *Ερπυστικής συμπεριφοράς των επί μέρους στοιχείων των αγκυρίων.*
- *Ερπυστικής συμπεριφοράς του γεωυλικού.*

Εφόσον τα ανωτέρω αξιολογηθούν, πρέπει να δίνεται η δυνατότητα αιτιολογημένα να συνυπολογίζεται η δράση των αγκυρίων στην μόνιμη επένδυση.

Περίπτωση συνυπολογισμού αγκυρίων στην μόνιμη επένδυση:

Στην περίπτωση της μελετητικής διερεύνησης της μόνιμης επένδυσης της συναρμογής της σήραγγας Ευήνου-Μόρνου με τον θάλαμο θυροφραγμάτων, η αγνόηση της δράσης των αγκυρίων είχε ως αποτέλεσμα μία αρκετά βαριά οπλισμένη επένδυση.

Η προβληματική κατασκευαστική διαρρύθμιση για την τοποθέτηση του οπλισμού, λόγω και της πολύπλοκης γεωμετρίας της συναρμογής και των συνοδών έργων, οδήγησε στην διερεύνηση άλλων λύσεων, κατασκευαστικά απλούστερων και υλοποιήσιμων σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα. Η λύση που επελέγη ήταν η τοποθέτηση μόνιμων αγκυρίων και συνυπολογισμός αυτών στην ανάλυση φορτίων της μόνιμης επένδυσης, η οποία έτσι προέκυψε άοπλη. Χρησιμοποιήθηκαν αυτοδιάτρητα μόνιμα αγκυρία της ISCHEBECK, ενώ αυξήθηκε ο αριθμός τους ώστε να λειτουργήσουν σε χαμηλό φορτίο και να καλυφθεί η περίπτωση αστοχίας κάποιων από αυτά, με ανακατανομή των φορτίων των γειτονικών αγκυρίων και μείωση της πιθανότητας παρουσίας ερπυστικών φαινομένων.

## **B.2. Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Συνήθως αγνοείται εντελώς η δράση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος της αρχικής υποστήριξης λόγω:

- Μειωμένης ανθεκτικότητας (στην τεχνική διάρκεια ζωής)
- Έντονης ερπυστικής συμπεριφοράς.

## **Ανθεκτικότητα εκτοξευόμενου σκυροδέματος**

Βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ανθεκτικότητα:

- *Συνθήκες έκθεσης*
- *Υλικά και μεθοδολογία εφαρμογής και κατασκευής*
- *Εντατικό και παραμορφωσιακό παρελθόν και ιστορία του*

Οι εξελίξεις στον τομέα των πρόσθετων και πρόσμικτων, η ανάπτυξη συγκροτημάτων ελεγχόμενης παραγωγής και κατασκευής, σε συνδυασμό με την εφαρμογή συνολικών προγραμμάτων διασφάλισης ποιότητας, επιτρέπουν την απόληψη προϊόντος με επαρκή ανθεκτικότητα, εφάμιλλη του εγχύτου σκυροδέματος.

## **Εντατικό και παραμορφωσιακό παρελθόν του εκτοξευομένου σκυροδέματος**

Σημαντικός παράγοντας η φόρτιση και η ταχύτητα επιβολής της, στο νεαρής ηλικίας και χρονικώς συντηρημένων ιδιοτήτων εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Οι μηχανισμοί που συμμετέχουν στο συνολικό φαινόμενο δεν έχουν διερευνηθεί και κατανοηθεί επαρκώς.

### **Φαινομενολογική προσέγγιση:**

*Οι από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επενδύσεις δεν παρουσιάζουν ζημιές όταν οι προκύπτουσες παραμορφώσεις είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες μίας κρίσιμης τροπής\* 0.8% - 1%, ενώ η μακροχρόνια συμπεριφορά και αντοχή δεν επηρεάζονται αρνητικά όταν οι επιβαλλόμενες τάσεις δεν υπερβαίνουν το 70% της αντοχής του εκτοξευομένου σκυροδέματος.*

## **Πρόταση για τον συνυπολογισμό του εκτοξευομένου σκυροδέματος στην ανάληψη φορτίων μόνιμης επένδυσης**

Όταν οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας που αφορούν σύνθεση, παραγωγή και εφαρμογή του εκτοξευομένου σκυροδέματος (σε σχέση με τις συνθήκες έκθεσής του) ικανοποιούνται και εφαρμόζεται πρόγραμμα διασφάλισης ποιότητας, μπορεί να λαμβάνεται υπόψη σαν στοιχείο μόνιμης επένδυσης όταν:

- Η κύρια λειτουργία του είναι αποφυγή απεμπλοκής τεμαχώδους βραχώμαζας, η σφράγιση του ορίου εκσκαφής, η προστασία του προσωπικού από τυχαίες πτώσεις τεμαχών.
- Οι συνολικές παραμορφώσεις είναι μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν σε μία κρίσιμη τροπή 0.8% (δηλα-

---

\* τροπή = ανηγμένη παραμόρφωση «ε».

δή σε σήραγγα διαμέτρου 12m οι μετρούμενες παραμορφώσεις να είναι μικρότερες από 5cm) και οι επιβαλλόμενες τάσεις δεν υπερβαίνουν το 70% της αντοχής του εκτοξευομένου σκυροδέματος.

### **Υπολογιστική διαχείριση του συνυπολογιζόμενου στην μόνιμη επένδυση εκτοξευομένου σκυροδέματος**

- Απλοποιημένη θεώρηση σαν υλικό Mohr Coulomb με συντηρητική εκτίμηση των χαρακτηριστικών του π.χ.  $c = 0$ ,  $\phi = 30^\circ$  και  $E = 10 \text{ GPa}$ .
- Συνδυασμένα ομοαξονικά κελύφη εκτοξευομένου σκυροδέματος και εσωτερικού από έγχυτο ή/και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, με θεώρηση κατάλληλων καταστατικών νόμων συμπεριφοράς που λαμβάνουν υπόψη και τις χρονικώς συνηρημένες ιδιότητες των υλικών και διεπιφανειών. Δυσκολίες υπολογιστικής διαχείρισης λόγω της πολύπλοκης φύσης, δύσκολη ενσωμάτωση στους υπό χρήση εμπορικούς κώδικες, ελλιπή δεδομένα καταστατικών νόμων.

### **Η θεώρηση της δράσης του γεωυλικού στην μόνιμη επένδυση**

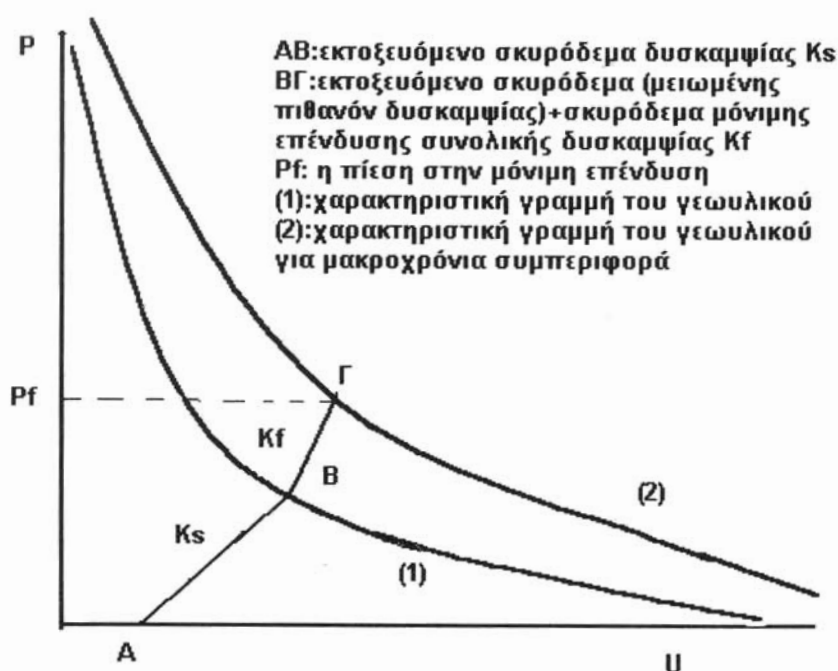
Σταδιακή απενεργοποίηση των στοιχείων της αρχικής υποστήριξης, που αξιολογήθηκε ότι δεν συμμετέχουν στην μακροχρόνια λειτουργία του έργου, ή τροποποίηση των ιδιοτήτων αυτών που εξακολουθούν να δρούν με χαρακτηριστικά μακροχρόνιας συμπεριφοράς.

Η σταδιακή διαδικασία διατηρεί την έννοια της αλληλεπίδρασης των στοιχείων του συστήματος γεωυλικό – αρχική υποστήριξη – μόνιμη επένδυση, με την ανακατανομή των τάσεων και την «ενδιάμεση» επίτευξη ισορροπιών, με αποτέλεσμα τελικώς μικρότερα υπολογιζόμενα φορτία στην μόνιμη επένδυση, λόγω του μή γραμμικού χαρακτήρα του συστήματος.

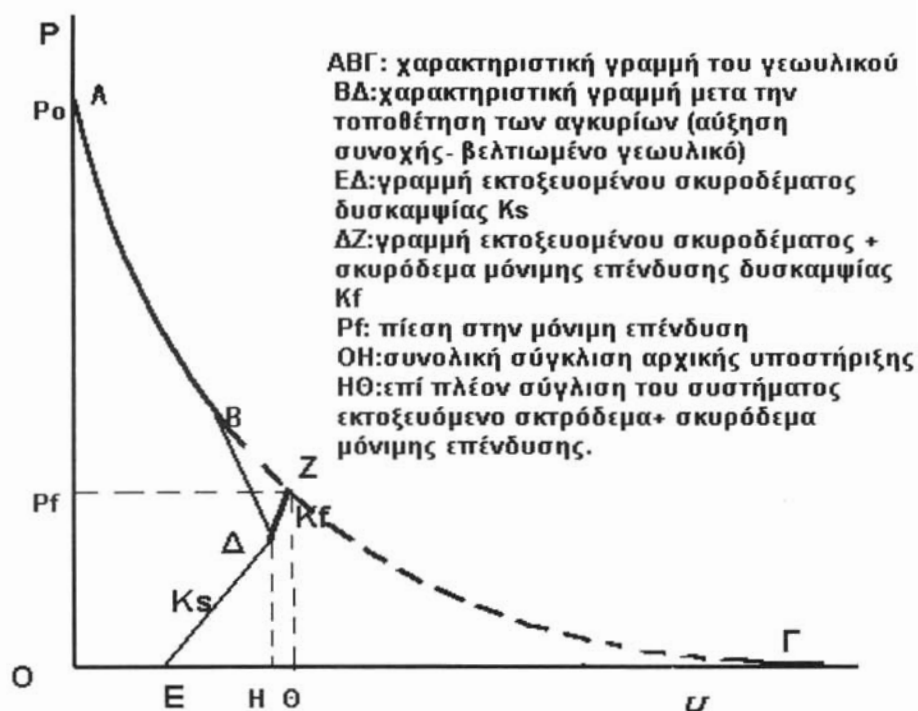


### Μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης για υπολογισμό φορτίων στην μόνιμη επένδυση

Η μέθοδος σύγκλισης - αποτόνωσης, με όλους τους περιορισμούς και υποθέσεις εφαρμογής της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, ιδιαίτερα στο πρώτο στάδιο της μελέτης, για τον υπολογισμό των φορτίων του γεωυλικού στην μόνιμη επένδυση.



**Σχ. 1:** Εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης –αποτόνωσης για συνδυασμένο σύστημα εκτοξευομένου σκυροδέματος – σκυροδέματος μόνιμης επένδυσης με διαφοροποιημένες (χρονικά εξαρτημένες) ιδιότητες του γεωυλικού.



Σχ. 2: Εφαρμογή της μεθόδου σύγκλισης – αποτόνωσης για συνδυασμένο σύστημα εκτοξευομένου σκυροδέματος – σκυροδέματος με απαξίωση της δράσης αγκυριών.

### Μακροχρόνιος ερπυσμός εκτοξευομένου σκυροδέματος

Πειραματικά δεδομένα για ερπυσμό (ηλικία 160 ημέρες, C/40)

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:  $0.01 - 0.06\% \text{ MPa}^{-1}$

Έγχυτο επί τόπου σκυρόδεμα:  $0.008\% \text{ MPa}^{-1}$

- Περιορισμός ερπυσμού από εσωτερική επένδυση συνεπάγεται φορτία στην επένδυση.
- Επένδυση απλού κελύφους. Πρόσθετες παραμορφώσεις στην επένδυση οδηγούν σε πρόσθετες παραμορφώσεις στο γεωυλικό.

- Όταν το γεωυλικό εξακολουθεί να μπορεί να αναλάβει τα πρόσθετα φορτία, τα αντίστοιχα φορτία της επένδυσης θα ΜΕΙΩΘΟΥΝ.
- Στην αντίθετη περίπτωση τα φορτία της επένδυσης λόγω των πρόσθετων παραμορφώσεων θα ΑΥΞΗΘΟΥΝ.

### **Γ. Ανάλυση δράσεων γεωυλικού που προέρχονται από το ενδεχόμενο μεταβολής μηχανικών ή/και φυσικοχημικών ιδιοτήτων κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας**

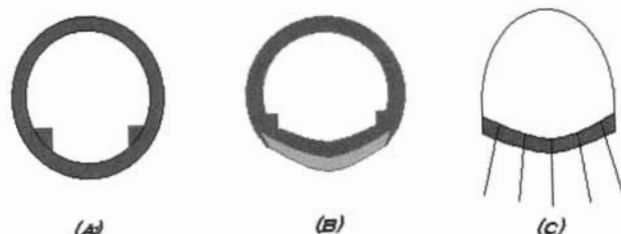
- Γεωυλικό με συμπιέζουσα-συνθλίβουσα συμπεριφορά
- Γεωυλικό με συμπεριφορά διόγκωσης
- Γεωυλικό με ερπυστική συμπεριφορά.

Το φαινόμενο της σύνθλιψης είναι η παρουσία χρονικώς εξαρτημένων μεγάλων παραμορφώσεων, οι οποίες συμβαίνουν στην περίμετρο της σήραγγας και συνδέονται ουσιαστικά με ερπυσμό που προκαλείται από την υπέρβαση μιας οριακής διατμητικής τάσης. Οι παραμορφώσεις αυτές μπορούν να τερματιστούν κατά την διάρκεια της κατασκευής ή να συνεχίζονται για μια μεγάλη χρονική περίοδο. (Barla 1995 ISRM).

Το φαινόμενο της διόγκωσης είναι χρονικώς εξαρτημένες παραμορφώσεις, που συμβαίνουν συνήθως στον πυθμένα της σήραγγας, και προέρχονται από έναν συνδυασμό φυσικοχημικών διεργασιών οι οποίες περιλαμβάνουν το υδραυλικό και εντατικό καθεστώς, και οδηγούν σε αύξηση του όγκου του γεωυλικού.

Το φαινόμενο του ερπυσμού αναφέρεται στις χρονικώς εξαρτημένες παραμορφώσεις υπό σταθερή (και μικρότερη από την αντοχή) τάση.

### Γ.1. Μελετητική και κατασκευαστική διαρρύθμιση σηράγγων σε μακροχρόνια διόγκωση



Σχ. 3: Κατασκευαστικές διαρρυθμίσεις μονίμων επενδύσεων σε διογκούμενα γεωλικά. Α) Άκαμπτη κατασκευή, Β) Με παραμορφούμενο υπόστρωμα, C) Αγκύρωση πυθμένα.

- Κρίσιμες παράμετροι για επενδύσεις με παραμορφώσιμο υπόστρωμα: Υδραυλικές συνθήκες, πίεση διόγκωσης  $\sigma_0$ , μέτρο ελαστικότητας της βραχώμαζας, γωνία εσωτερικής τριβής των ασυνεχειών και παράμετρος παραμόρφωσης διόγκωσης  $K_q$  ( $K_q$  είναι η κλίση σε ημιλογαριθμική κλίμακα της ευθείας της σχέσης του Grob, 1972), διατομή σήραγγας, κατασκευαστική αλληλουχία.
- Κρίσιμες παράμετροι για άκαμπτη επένδυση: Υδραυλικές συνθήκες, πίεση διόγκωσης  $\sigma_0$ , διατομή σήραγγας, κατασκευαστική αλληλουχία.

### Γ.2. Ερπυσμός του γεωλικού

- Αποτέλεσε πάντα έναν καλό λόγο αιτιολόγησης της ανάγκης κατασκευής μόνιμης επένδυσης.
- Η δράση συνήθως δεν ποσοτικοποιείται· σε λίγες περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψη μέσω απλουστευτικών και αυθαίρετων τρόπων· σπάνια με θεώρηση συνολικού καταστατικού νόμου.
- Πολύπλοκη φύση του φαινομένου
- Πτωχή γνώση μηχανισμού εμφάνισης και εξέλιξης

- Επίδραση ασυνεχειών
- Περιβαλλοντικές συνθήκες (υδραυλικές, εντατικές, θερμοκρασιακές)
- Κλίμακα του μοντέλου
- Χρονικό διάστημα θεώρησης
- Δομή και σύνθεση γεωυλικού
- Πτωχή βαθμονόμηση των μοντέλων με επαρκείς μετρήσεις.

### **Περιπτώσεις κατά τις οποίες θα πρέπει να γίνεται υποχρεωτικά θεώρηση του ερπυσμού**

- Σήραγγες με πολύ μεγάλο ύψος υπερκειμένων
- Σήραγγες μέσου βάθους σε φτωχές βραχώμαζες, μαλακούς βράχους - σκληρά εδάφη.
- Περιοχές στομίων και κλιτυοσήραγγες, όπου αναμένονται ή παρατηρούνται ερπυστικού τύπου παραμορφώσεις.

### **Υπολογιστική διαχείριση ερπυσμού γεωυλικού**

#### **1. Άμεση προσέγγιση**

- 1.I.** Απλοποιημένη (π.χ. μείωση μακροχρόνιου μέτρου παραμόρφωσης γεωυλικού)
- 1.II.** Ορθολογική.

**2. Έμμεση προσέγγιση:** Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχετική ταχύτητα παραμόρφωσης γεωυλικού και σκυροδέματος επένδυσης. Έτσι, υποθέτοντας έναν λόγο αυτών των ταχυτήτων παραμόρφωσης, με κατάλληλη παρέμβαση στο μακροχρόνιο μέτρο παραμόρφωσης του σκυροδέματος, λαμβάνεται στον υπολογισμό ένα εικονικό ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας, στο οποίο έχει ληφθεί υπόψη έμμεσα και ο ερπυσμός του γεωυλικού.

- **Ορθολογική προσέγγιση**

Θεώρηση κατάλληλου για το γεωυλικό καταστατικού νόμου συμπεριφοράς, συντηρημένου με την ταχύτητα παραμόρφωσης – και όχι χρονικώς συντηρημένου της μορφής  $\varepsilon = \varepsilon(t)$ .

- γραμμικά βισκο-ελαστικά
  - γραμμικά ελαστικά-γραμμικά βισκώδη
  - γραμμικά ελαστικά-μη γραμμικά βισκώδη
  - ελαστο-βισκο-πλαστικά
- Οι παράμετροι των μοντέλων πρέπει να προκύπτουν από επί τόπου μετρήσεις σε σημαντικό χρονικό εύρος και με επίλυση αντιστρόφου προβλήματος.

#### **Δ. Ικανοποίηση απαιτήσεων τραχύτητας και εμφάνισης τελικής επιφάνειας μόνιμης επένδυσης**

Π.χ.

*Υδραυλικές σήραγγες:*

- Παροχετευτικότητα
- Σπηλαιώση
- Επιφανειακή φθορά από παρασυρόμενα στερεά.

*Οδικές σήραγγες:*

- Οπτική
- Ακουστική
- Αισθητική εμφάνιση
- Συντήρηση, βαφή, καθαρισμός
- Ασφάλεια, αντίληψη οδηγών.

### **Ε. Ανάλυση δράσεων του πλήν γεωυλικού περιβάλλοντος, που δεν υπάρχουν κατά την διάνοιξη της σήραγγας αλλά προβλέπονται κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας**

- Πρόβλεψη μελλοντικών κατασκευών στην επιφάνεια ή στον παρακείμενο της σήραγγας χώρο.
- Δράση του εσωτερικού περιβάλλοντος της σήραγγας (π.χ. λύματα στις αποχετευτικές σήραγγες).
- Υδραυλικά φορτία. (Η αρχική υποστήριξη συνήθως σχεδιάζεται υποθέτοντας πλήρη στράγγιση).
  - Σήραγγες με πλήρη, μερική ή χωρίς αποστράγγιση.
  - Σήραγγες με απαιτήσεις στεγανότητας.

Κρίσιμο θέμα: ΕΞΑΣΦΑΛΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΕΓΑΝΩΣΗΣ.

### **ΣΤΕΓΑΝΩΣΗ**

- Γενική συμβολή στην ανθεκτικότητα της επένδυσης.
- Υδραυλικές υπό πίεση: Αποφυγή υδραυλικής θραύσης.
- Οδικές: Αίσθηση ασφάλειας οδηγών, αποφυγή δημιουργίας παγωμένων περιοχών.

Ορθολογική επιλογή των απαιτήσεων στεγανότητας.  
Καθορισμός ορίων απώλειας της επιτελεστικότητας.

### **ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ**

- *Σήραγγες με επιτρεπόμενη αποστράγγιση:*  
Εξασφάλιση επιτελεστικότητας του αποστραγγιστικού συστήματος.  
Διαμόρφωση συστήματος παρακολούθησης, δυνατότητα παρέμβασης αποκατάστασης λειτουργίας, πρόβλεψη εναλλακτικού σεναρίου αποστράγγισης.  
Θεώρηση ενός μικρού υδροστατικού φορτίου (π.χ. 5m νερού) τυχηματικού χαρακτήρα.  
Κανένα μόνιμο ή μεταβλητό φορτίο στην επένδυση.

- Σήραγγες όπου η αποστράγγιση είναι απαγορευτική π.χ. επηρεασμός υπόγειου υδροφορέα, ανεπιθύμητες καθιζήσεις:
  - 1η Επιλογή: Πλήρη υδροστατικά φορτία στην επένδυση. ΜΟΝΙΜΑ ΦΟΡΤΙΑ.
  - 2η Επιλογή: Μείωση της διαπερατότητας σε σημαντικό εύρος γύρω από την σήραγγα, θεώρηση της απόκρισης-επηρεασμού του υδροφορέα, και αντιμετώπιση σαν πλήρως αποστραγγιζόμενη κατασκευή.

### **ΣΤ. Δράσεις από την λειτουργία της σήραγγας**

- Έκρηξη
- Κυκλοφορία οχημάτων ή συρμών
- Ενσωματούμενος ή αναρτημένος εξοπλισμός.
- Αεροδυναμικά φορτία
- Υδραυλικά φορτία.

### **Ζ. Σεισμική δράση αντιστοιχούσα στην τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας**

Τρία κύρια βήματα:

- Καθορισμός του σεισμικού περιβάλλοντος, απόληψη σεισμικών παραμέτρων και χαρακτηριστικών
- Εκτίμηση της απόκρισης του γεωυλικού στην σεισμική δράση, θεώρηση αστοχίας και παραμορφώσεων
- Εκτίμηση της συμπεριφοράς της σήραγγας υπό τις συνθήκες της σεισμικής δράσης.

### **Στάθμες σχεδιασμού αντιμετώπισης της σεισμικής δράσης**

*ΣΤΑΘΜΗ 1 (όριο επιβίωσης)*

Μέγιστες δράσεις με μικρή πιθανότητα υπέρβασης. Αποδεκτές σημαντικές βλάβες, έμφραξη κάποιων στομίων (όταν υπάρχουν πολλαπλές έξοδοι).



Η πιθανότητα κατάρρευσης επαρκώς μικρή συνδυαζόμενη με διατήρηση ακεραιότητας και επαρκούς παραμένουσας αντοχής. Χρόνος αποκατάστασης μερικοί μήνες. Έχει προταθεί πιθανότητα υπέρβασης 5% στα 100 έτη (περίοδος επαναφοράς ~ 2000 έτη).

Η περίοδος επαναφοράς μπορεί να γίνει 1500 έτη.

#### *ΣΤΑΘΜΗ 2 (όριο ελεγχόμενων βλαβών)*

Αποδεκτές μικρές βλάβες στις σήραγγες και τα στόμια, με χρόνο επισκευής μερικές ημέρες.

Σεισμός σχεδιασμού: πιθανότητα υπέρβασης 5% στα 50 έτη (περίοδος επαναφοράς ~ 500 έτη).

Γενικότερα, ο οριστικός καθορισμός του σεισμού σχεδιασμού είναι το αποτέλεσμα συνεργασίας

Εργοδότη και Μελετητή και αποτελεί αντικείμενο της μελέτης.

### **H. Ικανοποίηση απαιτήσεων πυραντίστασης - πυρασφάλειας**

### **Θ. Αντιμετώπιση περιβαλλοντικών επιδράσεων**

### **I. Αντιμετώπιση δράσεων από κατασκευαστικές δραστηριότητες και δράσεις ή καταναγκασμούς από αυτή την ίδια την επένδυση**

## **4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ**

Στο Διάγραμμα 1 γίνεται μια περιεκτική καταγραφή των κυριότερων μεθόδων ανάλυσης των μονίμων επενδύσεων

### ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

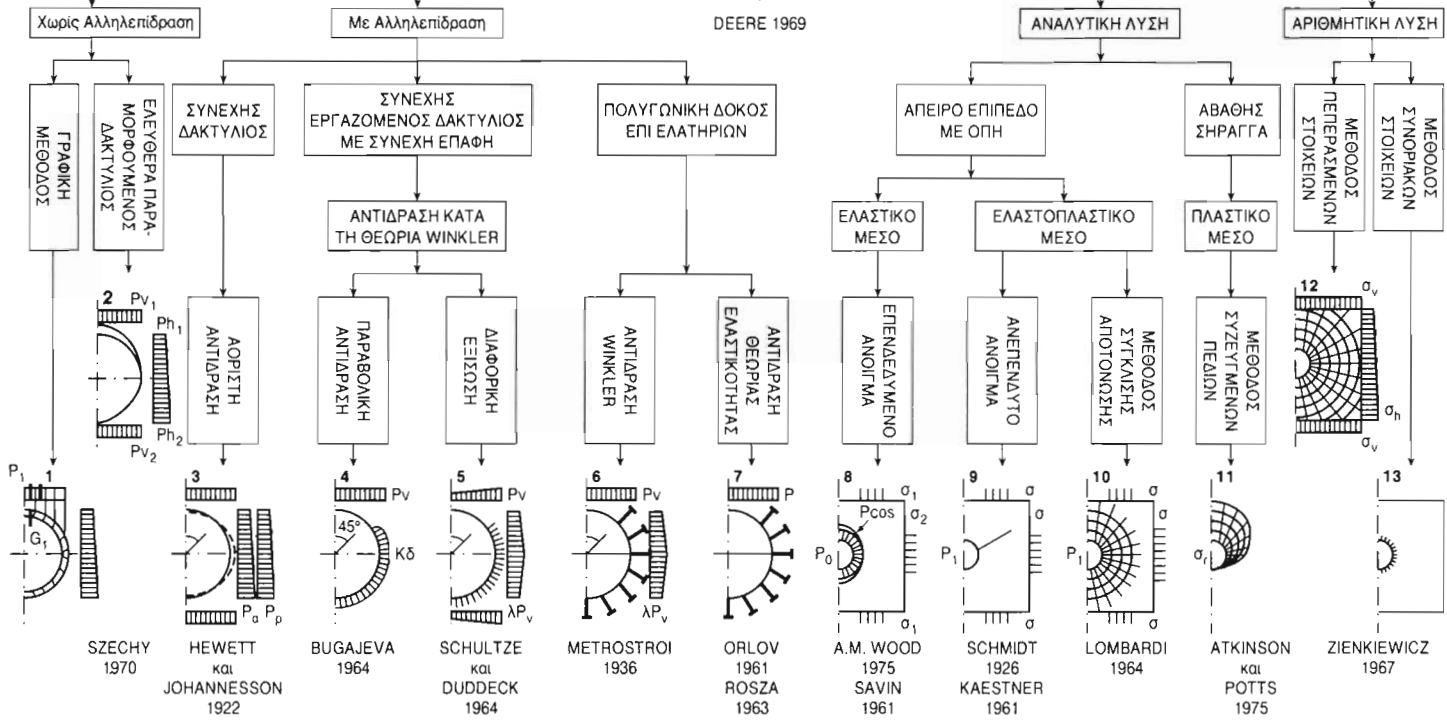
Πίεση γεωλικού (ενεργό φορτίο) εφαρμόζεται στην επένδυση καθοριζόμενη με διάφορες μεθόδους (Terzaghi, Caquot, Protodiakonov...)

**ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ**  
Βασισμένο στην θεωρία Της Αντοχής Υλικών

ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ  
DEERE 1969

ΣΥΝΕΧΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΕΩΡΙΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Η πίεση του γεωλικού επί της επένδυσης:  
- λαμβάνεται στο τέλος των υπολ. (12)  
- τίθεται κατά την έναρξη των υπολ. (8, 10, 11)



Διαγρ. 1: Μοντέλα Δομοστατικού Σχεδιασμού Σηράγγων (IFTIMIE 1994)

## 4.2. Αναλυτικές μέθοδοι

Καταγράφουν κλειστού τύπου λύσεις με τις παρακάτω παραδοχές και προϋποθέσεις εφαρμογής:

- Το Σχήμα του υπογείου ανοίγματος συνήθως υποτίθεται κυκλικό, αν και υπάρχουν λύσεις και για ελλειψοειδή σχήματα.
- Για τα καθ' οιονδήποτε τρόπο εμπλεκόμενα υλικά υποτίθεται ελαστική συνήθως συμπεριφορά.
- Οι συνοριακές συνθήκες δεν μπορούν να περιλάβουν παρά μόνο απλουστευτικά σχήματα.
- Συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, προσέγγιση μηχανικώς συνεχούς μέσου με ομογενή και ισότροπα χαρακτηριστικά.

## 4.3. Αριθμητικές μέθοδοι

Σε συνδυασμό με τους εξελιγμένους καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς, είναι το πλέον κατάλληλο και δυνατό εργαλείο διερεύνησης και κατανόησης του συνολικού φαινομένου.

Η διαστασιολόγηση της μόνιμης επένδυσης είναι συνήθως τελευταία φάση μίας πολυσταδιακής διαδικασίας προσομοίωσης, που αρχίζει από το φυσικό εντατικό πεδίο και φτάνει στην λειτουργία της σήραγγας. Στο πλαίσιο λοιπόν μίας τέτοιας θεώρησης, είναι επιθυμητό η προσομοίωση να είναι «συνεχής» χωρίς ενδιάμεσες διακοπές, ώστε να προσεγγίσει με ανεκτή προσέγγιση τις συνοριακές συνθήκες κάθε «ενδιάμεσου» σταδίου, αλλά και την κατασκευαστική αλληλουχία.

## **Ο τρόπος και η φιλοσοφία χρήσης των αριθμητικών μεθόδων στην μελέτη των σηράγγων**

*«Πριν αρχίσουμε τις διαδικασίες προσομοίωσης και αριθμητικής ανάλυσης πρέπει να γνωρίζουμε την απάντηση.»*

Η απάντηση αυτή προσεγγίζεται κατ' αρχήν με χρήση εμπειρικών και αναλυτικών μεθόδων. Αυτές οι προσεγγίσεις θα δώσουν κατ' αρχάς την αίσθηση του ποιά είναι η αναμενόμενη λύση, θα αναδείξουν τις κρίσιμες παραμέτρους και μεταβλητές που καθορίζουν την λύση κάθε ιδιαίτερου προβλήματος, και θα δώσουν τις γενικές κατευθύνσεις, όπου θα πρέπει να εστιαστούν οι αριθμητικές αναλύσεις.

*Η χρήση των αριθμητικών αναλύσεων αποσκοπεί στο να διερευνηθούν, επιβεβαιωθούν, τροποποιηθούν (αν παρίσταται ανάγκη) και οριστικοποιηθούν τα αποτελέσματα των κατ' αρχήν λύσεων που έχουν προσεγγιστεί κατά τα ανωτέρω.*

### **4.4. Μέθοδος δοκών και ελατηρίων**

Ευρύτατη εφαρμογή στην μελέτη μονίμων επενδύσεων. Η επένδυση προσομοιώνεται με στοιχεία ελαστικών δοκών, ενώ το γεωυλικό με ελαστικά ελατήρια. Τα φορτία καθορίζονται στην αρχή της διαδικασίας υπολογισμού και παραμένουν σταθερά.

- Η μέθοδος δεν διαχειρίζεται αναδιανομή τάσεων και γεωυλικό με μή ελαστικές ιδιότητες.
- Διαχειρίζεται μή κυκλικά σχήματα, διεύθυνση και κατανομή φορτίων και συνθήκες διεπιφάνειας.

Για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των εδαφικών ελατηρίων γίνονται οι παραδοχές:

- Κυκλική σήραγγα με συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης
- Υδροστατικό φυσικό εντατικό πεδίο ( $K_h = K_v$ )
- Οι ιδιότητες του γεωυλικού παραμένουν ελαστικές σε όλο το φάσμα των υπολογισμών.

Έτσι, για την γραμμική ελαστική συμπεριφορά, οι μετατοπίσεις δίνονται από την σχέση:

$$u = (p - p_1) \cdot (1 + \nu) \cdot r/E$$

όπου  $u$  οι μετατοπίσεις,  $p$  το φυσικό εντατικό πεδίο,  $p_1$  η πίεση υποστήριξης,  $\nu$  ο λόγος Poisson,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του γεωυλικού και  $r$  η ακτίνα της εκσκαφής. Από την παραπάνω σχέση, και δεδομένου ότι  $G = E/2(1 + \nu)$ , η σταθερά του ελατηρίου στην ακτινική διεύθυνση θα είναι  $K_r = 2G \cdot A/r$ , όπου  $G$  το διατμητικό μέτρο του γεωυλικού, και  $A$  η επιφάνεια επί της οποίας θεωρείται ότι δρά το ελατήριο.

- Η μέθοδος παρουσιάζει όλα τα μειονεκτήματα και απλοποιητικές παραδοχές που είναι γνωστά από τις θεμελιώσεις.
- Ο υπολογισμός και η θεώρηση των φορτίων δεν είναι εσωτερική διαδικασία της μεθόδου. Τα φορτία πρέπει να υπολογισθούν με κάποια άλλη ανεξάρτητη διαδικασία και να εισαχθούν στους υπολογισμούς παραμένοντας σταθερά.
- Η μέθοδος πρέπει σήμερα να καταταχθεί σ' αυτές που κάνουν τα πράγματα απλούστερα, η δε χρήση της να περιορισθεί κατά κύριο λόγο στο πρώτο στάδιο της μελέτης.

## **5. ΘΕΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ**

- 5.1. Οι τάσεις στην διαμήκη έννοια**
- 5.2. Μή γραμμική ανάλυση μόνιμης επένδυσης**
- 5.3. Μόνιμη επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα**
- 5.4. Επιλογή παραμέτρων και συνθηκών σχεδιασμού**
- 5.5. Διαχείριση και εφαρμογή κανονισμών**

### **5.1. Οι τάσεις στην διαμήκη έννοια**

Ασύνηθες διαμήκες εντατικό καθεστώς:

- Ζώνες επιρροής των στομιών της σήραγγας.
- Διαμήκης συνιστώσα σεισμικής δράσης.
- Ανομοιογενή γεωυλικά ή συγκεντρωμένα φορτία.
- Στρωματογραφία με κλίση που δίνει διαμήκη συνιστώσα δύναμης.
- Φορτία λειτουργίας π.χ. κίνηση συρμού
- Υπερεκκαφές που διαφοροποιούν το πάχος της επένδυσης
- Συστηματική διαφοροποίηση της διατομής της επένδυσης, π.χ. εφαρμογή τεχνικών προπορείας.

### **5.2. Μή γραμμική ανάλυση**

- Συνήθης θεώρηση: γραμμική ελαστική ανάλυση, παραδοχή γραμμικών διαγραμμάτων ροπών καμπυλοτήτων, τάσεων παραμορφώσεων, σταθερή δυσκαμψία.
- Οι μόνιμες επενδύσεις παρουσιάζουν συχνά ρηγματώσεις στις ζώνες συγκέντρωσης τάσεων εφελκυσμού, με μειωμένη ροπή αδρανείας, πιο εύκαμπτη συμπεριφορά της διατομής και ανακατανομή εντατικών μεγεθών.

- Η μή γραμμική ανάλυση, στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται, θα πρέπει να εξετάζεται συνολικά με τις επιπτώσεις της πιο εύκαμπτης συμπεριφοράς.

### 5.3. Μόνιμη επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα

#### 5.3.1. Υπολογισμός κατά DIN 1045 με θεώρηση διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης M-N

Καταστατικός νόμος σκυροδέματος όμοιος με αυτόν του σχήματος 10.2 του ΕΚΩΣ 2000, με θεώρηση όμως της  $f_{ck}$  και όχι της σχέσης  $(0.85 f_{ck}/\gamma_c)$ .

Τα επιτρεπόμενα εντατικά μεγέθη προκύπτουν με εφαρμογή συντελεστή ασφάλειας 2.1 (ανεξάρτητα από την τιμή της τροπής).

Συνολικός συντελεστής ασφάλειας: Δεν αντιμετωπίζει την φύση της αβεβαιότητας και του γεωυλικού ως φορτίζον και φορτιζόμενο στοιχείο.

#### 5.3.2. Υπολογισμός με επί μέρους συντελεστές ασφάλειας

- Οι συντελεστές δεν εφαρμόζονται στις δράσεις ή στις παραμέτρους του γεωυλικού, αλλά στα προκύπτοντα εντατικά μεγέθη. Ο βασικός συνδυασμός δράσεων  $(1.35 G_{max} + (G_{min}) + 1.5 Q)$  λαμβάνεται στον υπολογισμό  $(G_{max} + (0.74 G_{min}) + 1.11 Q)$ .
- Καταστατικός νόμος σκυροδέματος παρ. 10.4.3.1 του ΕΚΩΣ 2000, με θεώρηση όμως της σχέσης  $(0.85 f_{ck}/\gamma_c)$  με  $\gamma_c = 1.5$ .
- Ισχύουν οι επί μέρους συντελεστές για το άοπλο σκυρόδεμα;

#### 5.4. Επιλογή παραμέτρων και συνθηκών σχεδιασμού

**Στόχος:** Αποφυγή διευρύνσεων της διατομής μετά την κατασκευή της αρχικής υποστήριξης ή την απόληψη βαριά οπλισμένης και δύσκολα κατασκευάσιμης διατομής.

Ανεξάρτητα από την στρατηγική και επιλογές σχεδιασμού της αρχικής υποστήριξης στο πλαίσιο μιας μεθόδου που ενσωματώνει την αξιολόγηση των ενόργανων μετρήσεων και παρατηρήσεων, για την αρχική διαστασιολόγηση της μόνιμης επένδυσης θα πρέπει να γίνεται συντηρητική επιλογή παραμέτρων.

#### 5.5. Διαχείριση και εφαρμογή κανονισμών

Ανυπαρξία κανονιστικών διατάξεων



Υιοθέτηση κανονισμών για υπέργειες κατασκευές  
π.χ. θα ισχύει

$$\gamma_g N_k = \gamma_c N_c + \gamma_s N_s \quad \gamma_g M_k = \gamma_c M_c + \gamma_s M_s$$

$$\text{με } \gamma_g = 1,35, \quad \gamma_c = 1,5 \quad \text{και} \quad \gamma_s = 1,15$$

Προβληματική ενσωμάτωση της σχετικής αβεβαιότητας και της φύσης του γεωυλικού ως φορτιζοντος και φορτιζόμενου στοιχείου.

#### Περαιτέρω βελτιώσεις

- Υιοθέτηση διαδικασίας βαθμονόμησης κωδίκων για το υπό συζήτηση θέμα.
- Καθορισμός και αιτιολόγηση αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας και δεικτών αξιοπιστίας με βάση κοινωνικά (π.χ. CIRIA Report 63) και οικονομικά κριτήρια.



- Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης για βελτιστοποίηση (π.χ. ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους κατά την τεχνική διάρκεια ζωής της σήραγγας)
- Απόληψη βέλτιστων επί μέρους συντελεστών ασφάλειας με βάση ταξινόμηση - κατηγοριοποίηση σηράγγων, θεώρηση των πιθανών τύπων αστοχίας και της μορφής και τύπου των κωδίκων.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Η μελέτη της μόνιμης επένδυσης αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα μίας συνολικής μελετητικής προσέγγισης, που ξεκινά από το φυσικό εντατικό πεδίο και φτάνει στην μακροχρόνια (στην τεχνική διάρκεια ζωής) λειτουργία της σήραγγας.

2. Η συνεισφορά των μέτρων αρχικής υποστήριξης στην ανάληψη φορτίων της μακροχρόνιας λειτουργίας της σήραγγας δεν πρέπει να αποκλείεται *a priori*, αλλά πρέπει να αποτελεί θεώρηση της μελέτης σε σχέση με την ανθεκτικότητα των μέτρων κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου.

3. Η μελέτη θα πρέπει να αναγνωρίζει την ανάγκη ιδιαίτερης θεώρησης της ανθεκτικότητας του συστήματος της μόνιμης επένδυσης κατά την τεχνική διάρκεια ζωής του έργου, πέραν των προβλέψεων των υπάρχοντων κανονισμών, και να ανιχνεύει τους κατάλληλους τρόπους και τις μεθόδους διαχείρισης του προβλήματος.

4. Ο Κύριος του έργου ή ο Εργοδότης θα πρέπει να μορφώνουν τις απαιτήσεις επιτελεστικότητας και τα κριτήρια μελέτης με ορθολογικό τρόπο, με δυνατότητα κατά περίπτωση θεώρησης, λαμβάνοντας υπόψη και την σχέση κόστους - ωφέλειας και τις τεχνικές αβεβαιότητες των προτεινόμενων λύσεων.

**5.** Η χρήση μεθόδων και μοντέλων μελέτης με απλουστευτικές παραδοχές, περιλαμβανομένης και της μεθόδου ράβδων - ελατηρίων, θα πρέπει να περιορίζεται στο αρχικό στάδιο της μελέτης.

**6.** Θα πρέπει να γίνεται υποχρεωτικά θεώρηση της μακροχρόνιας συμπεριφοράς του γεωυλικού με θεώρηση κατάλληλου καταστατικού νόμου συμπεριφοράς, οι παράμετροι του οποίου θα απολαμβάνονται από συνδυασμό εργαστηριακών δοκιμών και ανάστροφων αναλύσεων των επί τόπου μετρήσεων, στις περιπτώσεις:

Σηράγγων με πολύ μεγάλο ύψος υπερκειμένων.

Σηράγγων μέσου βάθους σε φτωχές βραχώμαζες, μαλακούς βράχους ή σκληρά εδάφη.

Περιοχών στομίων ή κλιτυοσήραγγες

**7.** Η υιοθέτηση των υφισταμένων κανονιστικών κειμένων (που αναφέρονται στις υπέργειες κατασκευές) για την μελέτη των μόνιμων επενδύσεων, πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και να υπάρχει η δυνατότητα αιτιολογημένων αποκλίσεων από τις προβλέψεις αυτών, για την ορθολογικότερη προσέγγιση και απόληψη του αποδεκτού επιπέδου ασφαλείας.

**8.** Η σηραγγοποιία καλείται να ενσωματώσει και αξιοποιήσει την συνδυασμένη εξέλιξη επιστήμης - θεωρίας και τεχνικής - πρακτικής. Όπως παραστατικά περιγράφει ο καθηγητής Brandl:

Στην θεωρία όλα είναι γνωστά και κατανοητά, αλλά τίποτα δεν δουλεύει. Στην τεχνική - πρακτική όλα δουλεύουν, αλλά κανένας δεν γνωρίζει γιατί.

Πιστεύουμε ότι ο συνδυασμός αυτών δεν θα οδηγήσει σε κατάσταση όπου τίποτε δεν δουλεύει και κανένας δεν γνωρίζει γιατί, και προσδοκούμε να απολάβουμε την κατάσταση όπου όλα δουλεύουν και όλοι γνωρίζουν πώς και γιατί.