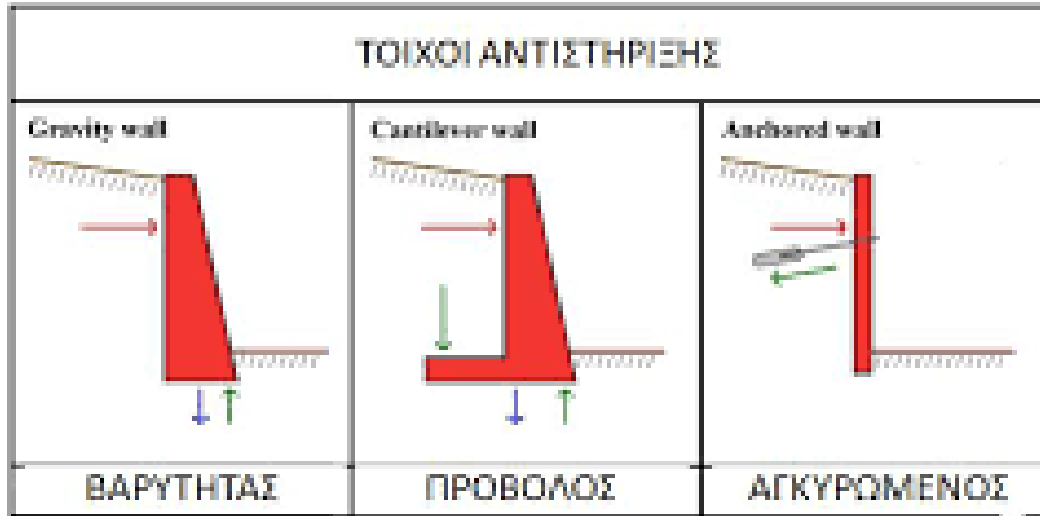


# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

## ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ-- ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΡΓΑ ΟΔΟΠΟΙΑΣ

7<sup>η</sup> ΔΙΑΔΕΞΗ – ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ-

Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΕΠΑΝΕΠΙΧΩΣΗΣ-

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΟΔΙΚΩΝ ΕΠΙΧΩΜΑΤΩΝ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2020

# 13. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

## ΠΡΑΝΩΝ

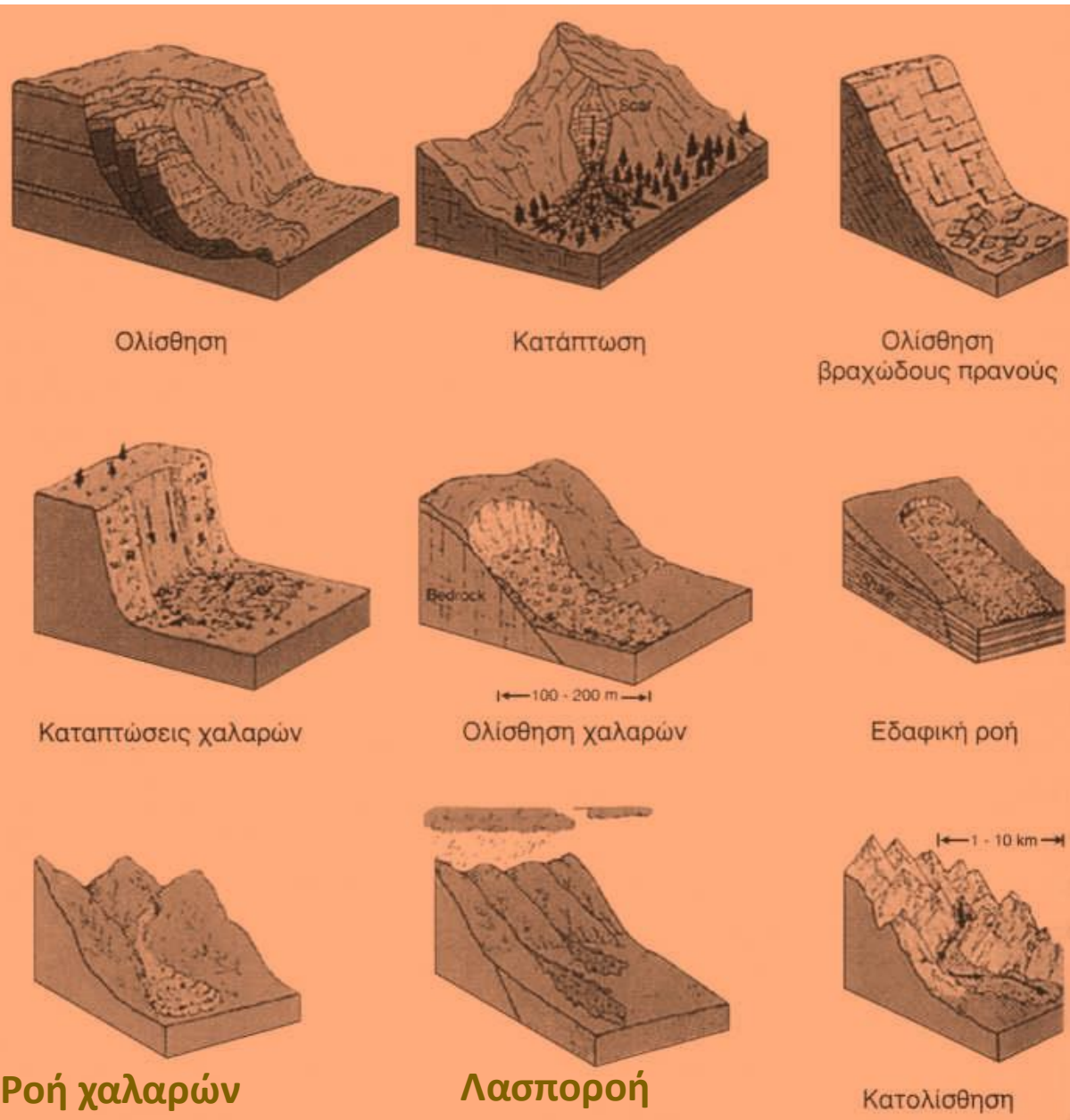
# 13.1 Φυσικά και τεχνητά πρανή

- ✓ Ονομάζονται πρανή οι εξωτερικές επιφάνειες, συνήθως κεκλιμένες, των εδαφικών σχηματισμών.
- Τα φυσικά πρανή έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα γεωλογικών φαινομένων, στο πέρασμα των αιώνων, και έχουν ισορροπήσει σε κεκλιμένα επίπεδα, ακανόνιστου σχήματος και μορφής, ανάλογα με τη διαστρωμάτωση και τα χαρακτηριστικά των γεωσχηματισμών, την υπόγεια δίαιτα και τη φυτοκάλυψη. Ευρίσκονται, τις περισσότερες φορές, σε μόνιμη και σταθερή ισορροπία, η οποία είναι, ωστόσο, δυνατό να διαταραχθεί από τη μεταβολή των υδραυλικών συνθηκών ή από τη δράση δυναμικών φορτίων.
- Τα τεχνητά πρανή, στα οποία ανήκουν και τα πρανή των έργων οδοποιίας, δημιουργούνται κατά τη φάση εκτέλεσης χωματουργικών εργασιών, ως επίπεδες επιφάνειες ενιαίας κλίσης κατά τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια των γεωκατασκευών.
- Ο προσδιορισμός της εκάστοτε βέλτιστης κλίσης και της τελικής διαμόρφωσης των τεχνητών πρανών, έτσι ώστε αφενός να περιορίζεται ο όγκος των χωματουργικών εργασιών και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αφετέρου να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της εδαφικής μάζας, αποτελεί βασικό και κρίσιμο αντικείμενο γεωτεχνικού σχεδιασμού.
- Ανάμεσα στις περισσότερο ισχυρές κλίσεις που επιτάσσει η οικονομία και το περιβάλλον και τις πιο ήπιες που υπαγορεύει η ασφάλεια των κατασκευών, ο μελετητής καλείται να προσδιορίσει τη χρυσή τομή και να δώσει την ενδεδειγμένη λύση για τη διαμόρφωση κάθε ορύγματος και επιχώματος ξεχωριστά σε ένα έργο οδοποιίας.

## 13.2 Ολισθήσεις πρανών

- Ολισθήσεις πρανών συμβαίνουν όταν η ισορροπία φυσικών ή τεχνητών πρανών διαταραχθεί και η διατμητική αντοχή του εδάφους ή του βράχου δεν επαρκεί ώστε να αντισταθεί στις δυνάμεις βαρύτητας και, ενδεχομένως, στα δυναμικά φορτία που προκαλούν την αστοχία.
- ✓ Στην πραγματικότητα, τα φαινόμενα αστοχίας πρανών παρατηρούνται συνήθως κατά ή μετά από περιόδους βροχοπτώσεων.
- ✓ Η δράση του ύδατος στο εσωτερικό των γεωσχηματισμών επιφέρει μείωση των δυνάμεων διατμητικής αντοχής και, επακόλουθα, μείωση της αντίστασης σε ολίσθηση.
- Στις περιπτώσεις αυτές αναπτύσσονται μικρότερης ή μεγαλύτερη έκτασης κατολισθήσεις με απρόβλεπτες συνέπειες για ανθρώπους και κατασκευές.

## 13.2 Ολισθήσεις πρανών



- Ο όρος “ολίσθηση πρανών” καλύπτει μία μεγάλη ποικιλία γεωτεχνικών αστοχιών, που έμμεσα ή άμεσα συνδέονται με την κατασκευή οδικών έργων.
- Οι διάφορες μορφές ολίσθησης πρανών χαρακτηρίζονται από το υλικό της γεωκατασκευής, το γεωμετρικό σχήμα της αστοχίας, την ταχύτητα του φαινομένου, την έκταση και τη διάρκεια του (Σχ. 92).
- Η ορολογία, η οποία χρησιμοποιείται, ακόμη και διεθνώς, δεν είναι σταθερή και, κατά συνέπεια, η διάκριση μεταξύ ρωών, καταπτώσεων, ολισθήσεων, καταρρεύσεων και φαινομένων ερπυσμού είναι δύσκολη.
- Μία συνοπτική περιγραφή του φαινομένου είναι συχνά απαραίτητη για να προσδιορισθεί επακριβώς το είδος της κάθε αστοχίας.

Σχ. 92.Είδη ολισθήσεων

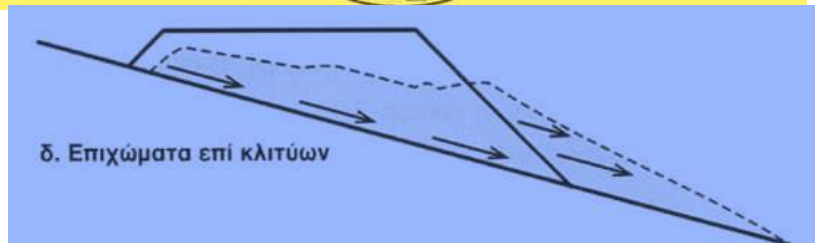
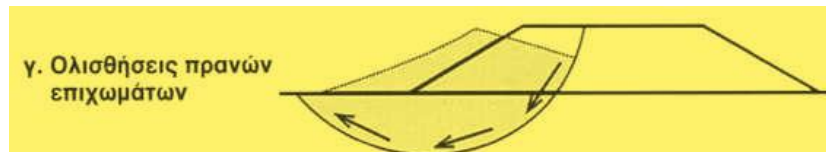
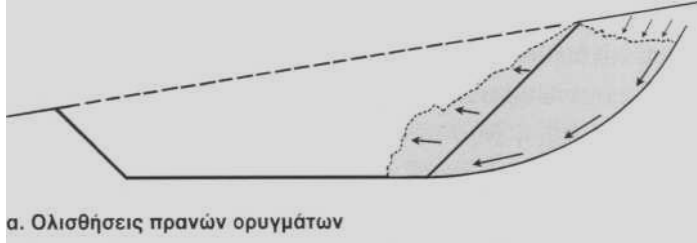
## 13.2 Ολισθήσεις πρανών

- ✓ Στατιστικές μελέτες σε πραγματικές περιπτώσεις γεωκατασκευών οδικών έργων έδειξαν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ολισθήσεων εμφανίζουν τα γαιώδη πρανή ορυγμάτων.
- ✓ Συγκεκριμένα σε ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο ολισθήσεων παρατηρήθηκαν τα εξής ποσοστά [48]:
  - γαιώδη πρανή ορυγμάτων 40%
  - φυσικά πρανή 20%
  - επιχώματα επί κλιτύων 15%
  - πρανή επιχωμάτων 15%
  - πρανή βραχωδών σχηματισμών 10%
- ✓ Η κατανομή αυτή θα πρέπει να θεωρείται φυσιολογική, δεδομένου ότι τα πρανή των ορυγμάτων είναι γεωκατασκευές οδοποιίας, που διαμορφώνονται με κλίσεις αισθητά πιο απότομες από εκείνες της φυσικής ισορροπίας και κινδυνεύουν περισσότερο, είτε λόγω ανεπάρκειας σχεδιασμού είτε λόγω απρόβλεπτης μεταβολής των επί τόπου συνθηκών.
- ✓ Εάν τα μέτρα προστασίας και σταθεροποίησης δεν είναι επαρκή, η εδαφική μάζα θα ολισθήσει μέχρις ότου ευρεθεί εκ νέου σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας, σε επιφάνειες περισσότερο ήπιας κλίσης.

## 13.2 Ολισθήσεις πρανών

- ✓ Αντίθετα, τα πρανή των επιχωμάτων είναι γεωκατασκευές εξ ολοκλήρου τεχνητές.
- ✓ Διαμορφώνονται σε επίπεδα με κλίσεις, κατά τεκμήριο, ασφαλείς, ενώ και η απουσία υπόγειας υδροφορίας είναι ευεργετική για την ευστάθεια του επιχώματος.
- Κατά συνέπεια, αναμενόμενο είναι τα ποσοστά αστοχιών να παραμένουν μικρά.
- Οι ολισθήσεις πρανών ανάλογα με το γεωμετρικό τους σχήμα και την εν γένει μορφή της αστοχίας κατατάσσονται στις
  - περιστροφικές ολισθήσεις (circular failures) και
  - στις επίπεδες ολισθήσεις (translational failure).
- ✓ Οι πρώτες, υπό διάφορες μορφές, σφαιρικές, κυλινδρικές, λογαριθμικής καμπύλης, είναι χαρακτηριστικές των συνεκτικών εδαφών ( $c \neq 0$ ).
- ✓ Οι δεύτερες, επίπεδες ή πολυγωνικές συμβαίνουν σε περιπτώσεις πρανών ψαθυρών εδαφών ( $c = 0$ ) και βραχωδών σχηματισμών.

## 13.2 Ολισθήσεις πρανών

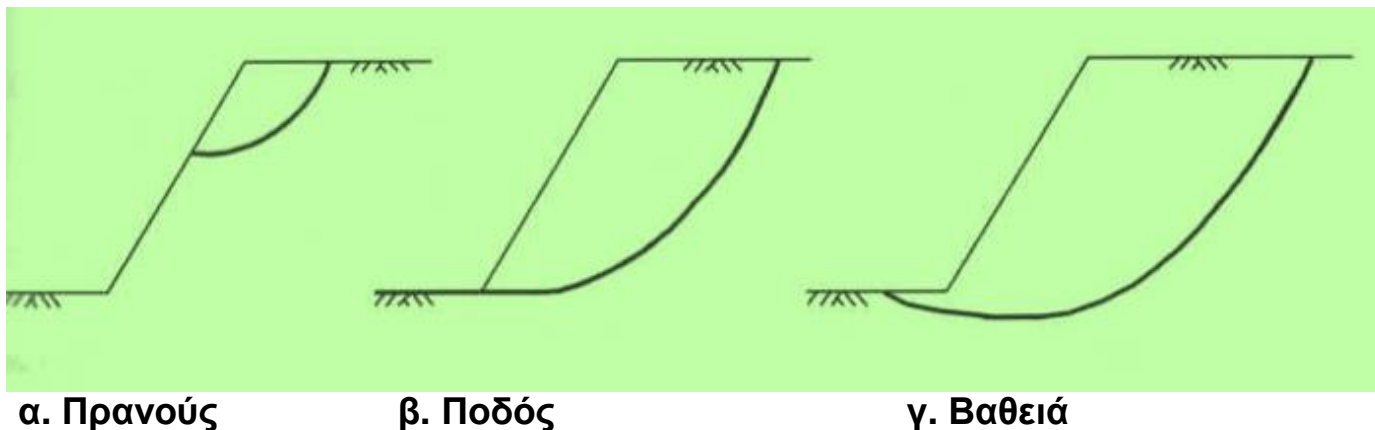


- Οι ολισθήσεις γαιωδών πρανών αναπτύσσονται συνήθως κατά κυλινδρικές επιφάνειες.
- ✓ Όταν η έκτασή τους, κατά την έννοια του άξονα της οδού είναι περιορισμένη, η καμπύλη επιφάνεια ολίσθησης σε πρανή ορυγμάτων μοιάζει περισσότερο με “κουτάλι” ή “κοχύλι”.
- Στις περιπτώσεις αυτές οι αστοχίες αναφέρονται ως “πεταλοειδείς” ή “κοχυλοειδείς” ολισθήσεις.
- Οι ολισθήσεις φυσικών κλιτύων αναπτύσσονται συνήθως κατά επίπεδες επιφάνειες, όταν, λόγω κατασκευής του τεχνικού έργου, διαταραχθεί η ισορροπία της ευρύτερης περιοχής και συχνά της περιοχής ανάντη του έργου.
- Στη φάση των εκσκαφών, η απομάκρυνση γαιωδών μαζών από τον πόδα ενός ασταθούς φυσικού πρανούς μπορεί να προκαλέσει μετακίνηση ασταθών σχηματισμών (Σχ. 93β).

Σχήμα 93. Τύποι ολισθήσεων πρανών



## 13.2 Ολισθήσεις πρανών



Σχήμα 94. Είδη ολισθήσεων σε πρανή ομοιογενών γαιωδών υλικών.

❖ Ανάλογα με την έκταση της αστοχίας κατά την έννοια του ύψους του πρανού αλλά και το βάθος της ολισθαίνουσας μάζας, διακρίνονται τρία είδη ολισθήσεων (Σχ. 94),

- πρανούς ή μετώπου (face),
- ποδός (toe),
- βαθειά (deep-seated).

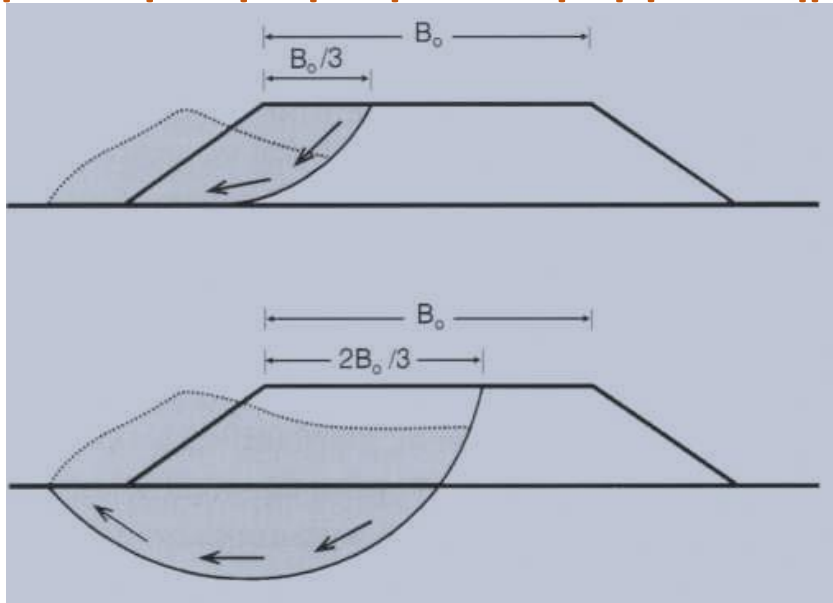
➤ Επίπεδες είναι και οι ολισθήσεις επιχωμάτων επί κεκλιμένων επιφανειών (Σχ. 93δ).

✓ Η κλασική οδοποιία απαγορεύει την κατασκευή επιχωμάτων σε περιοχές έντονου ανάγλυφου, όπως είναι τα φυσικά πρανή λοφωδών ή ορεινών περιοχών.

✓ Αν και η σύγχρονη τεχνολογία έχει ανατρέψει παλαιούς θεμελιώδεις κανόνες, ωστόσο, η κατασκευή επιχωμάτων σε επιφάνειες ισχυρών κλίσεων φυσικού εδάφους ( $i > 1/3$ ) θεωρείται επισφαλής.

## 13.2 Ολισθήσεις πρανών

- Οι ολισθήσεις πρανών επιχωμάτων μπορεί να είναι επίπεδες, για ψαθυρά υλικά επιχώματος, ή περιστροφικές, σε περιπτώσεις συνεκτικών εδαφικών υλικών. Ανάλογα με τη θέση τους και το μέγεθος τους, οι αστοχίες αυτές διακρίνονται, όπως και στην περίπτωση των ορυγμάτων, σε ολισθήσεις στέψης ή μετώπου, σε ολισθήσεις ποδός και σε βαθιές ολισθήσεις.
- Αν και η ποικιλία της γεωμετρίας των οδικών επιχωμάτων δεν επιτρέπει τη διατύπωση γενικών εμπειρικών κανόνων, ωστόσο, το ίχνος της αστοχίας στην επιφάνεια της οδού ευρίσκεται συνήθως σε απόσταση από το φρύδι του επιχώματος ίση προς το  $1/3$  του πλάτους στέψης για ολίσθηση ποδός και στα  $2/3$  του πλάτους στέψης για βαθιά ολίσθηση (Σχ. 95).
- Τα πρανή των βραχιδών σχηματισμών θραύονται κατά επιφάνειες επίπεδες, σε ολισθήσεις ολικής μετατόπισης (translational) ή σε σφηνοειδείς ολισθήσεις (wedge failures). Σε περίπτωση αποσαθρωμένου βράχου, η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να αποτελείται από επίπεδα και καμπύλα τμήματα και να φθάνει να προσιδιάζει προς μία περιστροφική ολίσθηση για πλήρη αποσάθρωση του υλικού.



Σχήμα 95. Ολίσθηση πρανών επιχωμάτων.

## 13.3 Συνθήκες ισορροπίας πρανών

- ✓ Ένα πρανές είναι μία εδαφική δομή η οποία υφίσταται την επίδραση ορισμένων δυνάμεων που διακρίνονται σε:
  - δυνάμεις βαρύτητας και επιφόρτισης
  - δυνάμεις διατμητικής αντοχής των εδαφικών στοιχείων
  - δυνάμεις πίεσης ύδατος
  - **δυναμικά φορτία.**
- Όταν ένα πρανές ευρεθεί σε συνθήκες οριακής ισορροπίας, οι δυνάμεις βαρύτητας τείνουν να παρασύρουν το έδαφος σε ολίσθηση ενώ παράλληλα ενεργοποιείται η αντίσταση σε διάτμηση, μέσω της συνοχής και της εσωτερικής τριβής, που αντιτίθεται στην κίνηση αυτή.
- Το ύδωρ υπεισέρχεται είτε ως πίεση πόρων, είτε ως παράγοντας που μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους προκαλώντας μείωση της αντοχής σε διάτμηση.
- Όταν οι παραπάνω δυνάμεις δεν ισορροπούν λόγω ανεπάρκειας της διατμητικής αντοχής, παρατηρείται ολίσθηση πρανούς.

## 13.3 Συνθήκες ισορροπίας πρανών



*Εικόνα 52. Αστοχία βραχώδους πρανούς ορύγματος.*

- Η ισορροπία των εδαφικών σχηματισμών εξαρτάται από τη γεωμετρική διαμόρφωση της εξωτερικής επιφάνειας του πρανού, τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, τις συνθήκες υπόγειας και επιφανειακής δίκαιας και την επιφόρτιση. Η μεταβολή με τον χρόνο των υδραυλικών συνθηκών και των μηχανικών χαρακτηριστικών επιφέρει διαφοροποίηση των συνθηκών ισορροπίας και, κατά συνέπεια, η ευστάθεια σε μία χρονική στιγμή δεν εξασφαλίζει την ισορροπία σε μεγάλη διάρκεια μέσα στο χρόνο.
- Οι παράμετροι διατμητικής αντοχής που εισάγονται στα προβλήματα ευστάθειας πρανών ή στις αντίστοιχες μεθόδους ανάλυσης της ευστάθειας είναι:
- Οι παράμετροι αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$ ,  $\phi_u$  (συνήθως  $\phi_u = 0$ ) σε περιπτώσεις κίνδυνου εκδήλωσης άμεσης ολίσθησης.
- Εφαρμογή αυτού του μοντέλου συμπεριφοράς επιλέγεται σε εδάφη κορεσμένα, μικρής διαπερατότητας και σε προβλήματα άμεσης εξέλιξης, όπως, επί παραδείγματι η συμπεριφορά ενός γαιώδους αργιλικού πρανού αμέσως μετά τη φάση εκσκαφής.
- Οι παράμετροι ενεργού διατμητικής αντοχής,  $c'$  και  $\phi'$ , για προβλήματα κινδύνου ολίσθησης σε μεγάλης διαπερατότητας εδάφη αλλά και για το σύνολο των γαιωδών υλικών σε προβλήματα ευστάθειας μακράς διάρκειας, όταν, δηλαδή, επιτευχθεί μηδενισμός της πίεσης πόρων.

## 13.3 Συνθήκες ισορροπίας πρανών

- Τέτοια προβλήματα είναι όλα όσα σχετίζονται με τη μακροχρόνια συμπεριφορά (long-term performance) των γεωκατασκευών, πολύ αργότερα από τη φάση εκτέλεσης των χωματουργικών εργασιών.
- Ο έλεγχος υπό συνθήκες πλήρους στράγγισης θα πρέπει να εκτελείται σε όλες τις περιπτώσεις, ακόμη και σε πρανή κεκορεσμένων λεπτόκοκκων εδαφών, για παραμέτρους διατμητικής αντοχής  $c'$  και  $\phi'$  που προσδιορίζονται μέσω τριαξονικών δοκιμών πλήρους στερεοποίησης (CU ή CD).

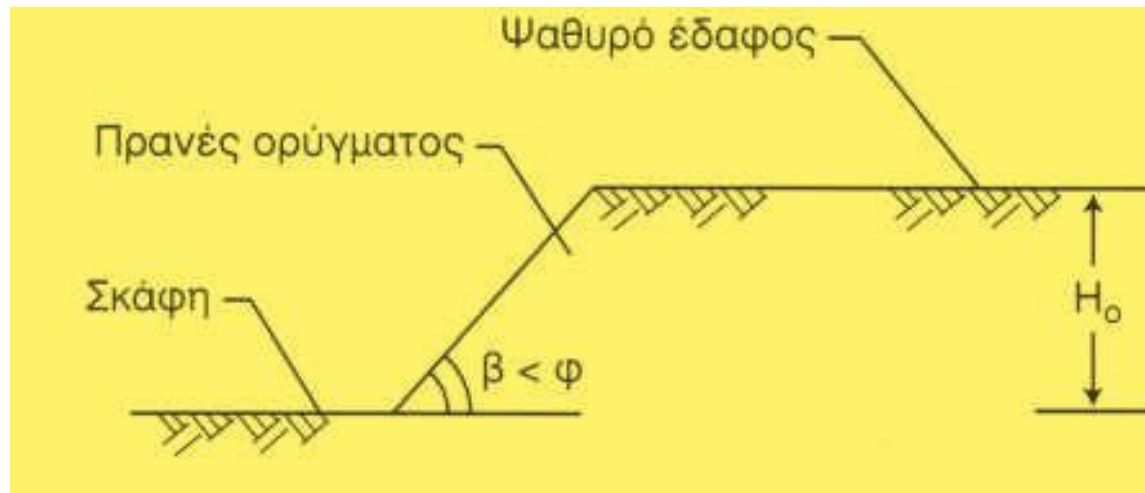
## 13.4 Έλεγχος της ευστάθειας

- ✓ Στη γενική μορφή του, το πρόβλημα της ευστάθειας πρανών παρουσιάζεται ιδιαίτερα πολύπλοκο, και η επίλυσή του απαιτεί σαφή γνώση της μορφολογίας (γεωλογική διαστρωμάτωση, ετερογένεια σχηματισμών, υπόγεια υδροφορία) και της σύστασης (φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά) του εδάφους. Ακόμη όμως και στην περίπτωση που μία πλήρης γεωτεχνική έρευνα είναι δυνατή, τα αποτελέσματά της δεν είναι δυνατό να αξιοποιηθούν παρά μόνο μέσω κατάλληλου λογισμικού επειδή μία πλήρης ανάλυση απαιτεί επίλυση του προβλήματος δι' αριθμητικών μεθόδων.
- Σήμερα υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεθόδων, νομογραφημάτων και πινάκων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επίλυση προβλημάτων ευστάθειας πρανών. Διαγράμματα και πίνακες καλύπτουν περιπτώσεις απλουστευμένης γεωμετρίας ή μηχανικής συμπεριφοράς αν και, συνήθως, στη φάση σχεδιασμού χρησιμοποιούνται μέθοδοι και μοντέλα ενσωματωμένα σε προγράμματα επίλυσης μέσω Η/Υ. Στο σύνολο των μεθόδων και εν χρήσει τεχνικών, το πρόβλημα παραμένει ένα κλασικό πρόβλημα οριακής ισορροπίας: οι δυνάμεις και ροπές ανατροπής (mobilizing moments) πρέπει να είναι μικρότερες από τις δυνάμεις και ροπές αντίστασης (resisting moments) σε οποιαδήποτε πιθανή επιφάνεια αστοχίας. Οι ροπές ολίσθησης προκύπτουν από το βάρος των εδαφικών υλικών και τις δυνάμεις επιφόρτισης ενώ οι ροπές αντίστασης οφείλονται στη δράση της διατμητικής αντοχής.
- ✓ Στο πλαίσιο της εκπόνησης μελετών έργων οδοποιίας, η ανάλυση της ευστάθειας πρανών είναι απαραίτητη για πρανή ορυγμάτων και επιχωμάτων ύψους μεγαλύτερου των 10 μέτρων. Σε περιπτώσεις δε ασταθών εδαφών και ολισθημένων υλικών, η ανάλυση της ευστάθειας των γεωκατασκευών και για μικρότερου ύψους πρανή ( $H_0 > 5 \text{ m}$ ) είναι επιβεβλημένη.

## 13.5 Πρανή ψαθυρών και συνεκτικών εδαφών

- Σε περιπτώσεις πρανών απλής γεωμετρίας, απλοποιητικές παραδοχές είναι δυνατό να οδηγήσουν σε αναλυτικές σχέσεις ελέγχου της ευστάθειας. Έτσι, για αμιγώς ψαθυρά εδάφη ( $c = 0$ ), η ευστάθεια εξασφαλίζεται όταν η γωνία του πρανού παραμένει μικρότερη της γωνίας εσωτερικής τριβής του εδάφους (Σχ. 96).
- Το ύψος  $H_0$  του πρανού, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να είναι οσοδήποτε μεγάλο. Όταν το πρανές υφίσταται την επίδραση υδροστατικών πιέσεων ή πιέσεων ροής, επιβάλλεται η γωνία  $\beta$  να είναι ακόμη μικρότερη. Προσεγγιστικά, ως προϋπόθεση ευστάθειας στην περίπτωση αυτήν, και εφόσον οι συνθήκες υπόγειας διαίτας μεταβάλλονται με τον χρόνο, λαμβάνεται η σχέση:  $\beta \leq \Phi/2$
- Τα συνεκτικά εδάφη είναι δυνατό να μορφωθούν σε κατακόρυφα πρανή υπό την προϋπόθεση ότι το ύψος τους δεν ξεπερνά την τιμή:

$$H_0 = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}} \text{ όπου } K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)$$



Σχήμα 96. Πρανή ψαθυρών εδαφών

# 13.5 Πρανή ψαθυρών και συνεκτικών εδαφών

❖ Για τα συνεκτικά εδάφη υπό αστράγγιστες συνθήκες, στη γενική μορφή κυκλικής αστοχίας, ο έλεγχος της ευστάθειας γίνεται μέσω υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης SF (safety factor). Ο συντελεστής αυτός είναι ο λόγος των ανθιστάμενων στην ολίσθηση ροπών προς τις ροπές ανατροπής. Για πρανή μεταξύ οριζοντίων επιπέδων (Σχ. 97), ο προσδιορισμός του συντελεστή ασφαλείας έχει ως εξής:

- $c = c_u, \phi = 0$

- μήκος τόξου ολισθαίνουσας μάζας:  $l$

- βάρος ολισθαίνουσας μάζας:  $G$

- ακτίνα κύκλου ολίσθησης:  $R$ .

➤ Η ροπή ανατροπής είναι:

- $M_F = G \cdot x$

➤ Η ροπή της διατμητικής αντοχής είναι:

- $M_s = s \cdot R = c_u \cdot l \cdot R$

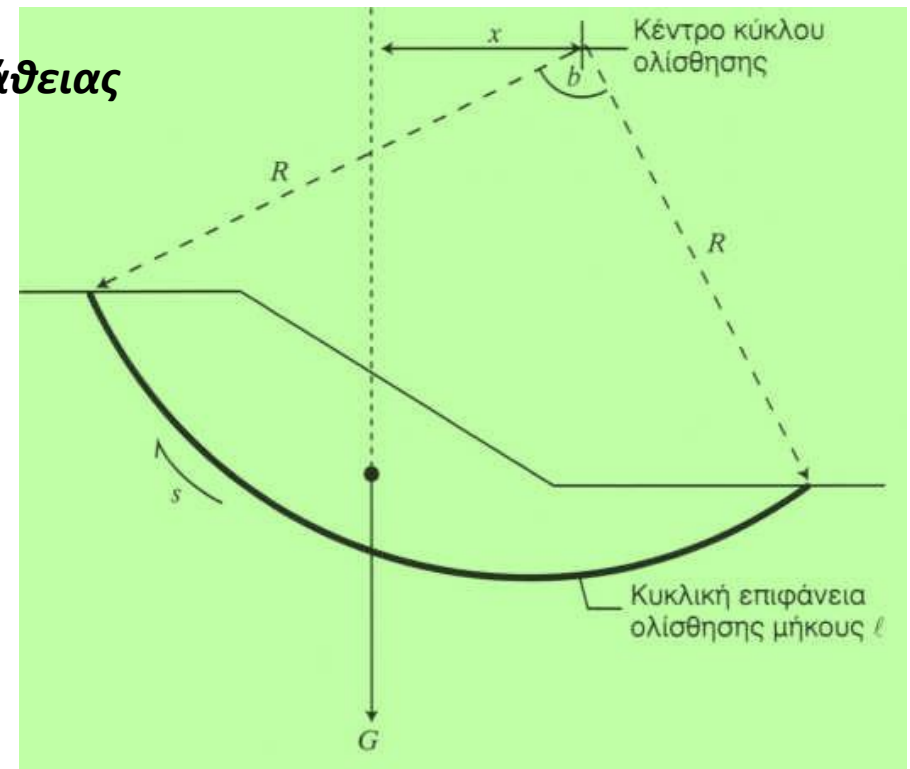
➤ Και ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει:

$$SF = \frac{M_s}{M_F} = \frac{c_u \cdot l \cdot R}{G \cdot x}$$

- Στη γενική περίπτωση για τον έλεγχο της ευστάθειας εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι (Caquot, Morgenstern, Fellenius, Taylor), η κάθε μία από τις οποίες στηρίζεται σε διαφορετικές παραδοχές.

- Κοινός τρόπος για όλες τις μεθόδους είναι ότι το πρόβλημα της ευστάθειας μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδο και να αναλυθεί ως πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης.

Σχ.97 Ανάλυση ευστάθειας  
πραμών

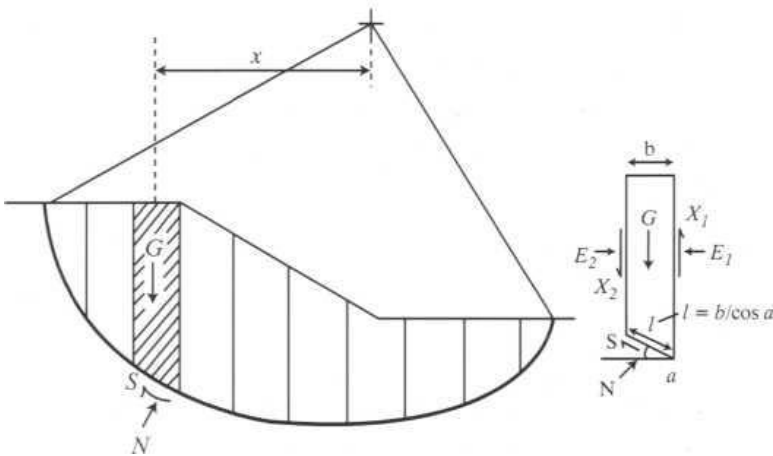
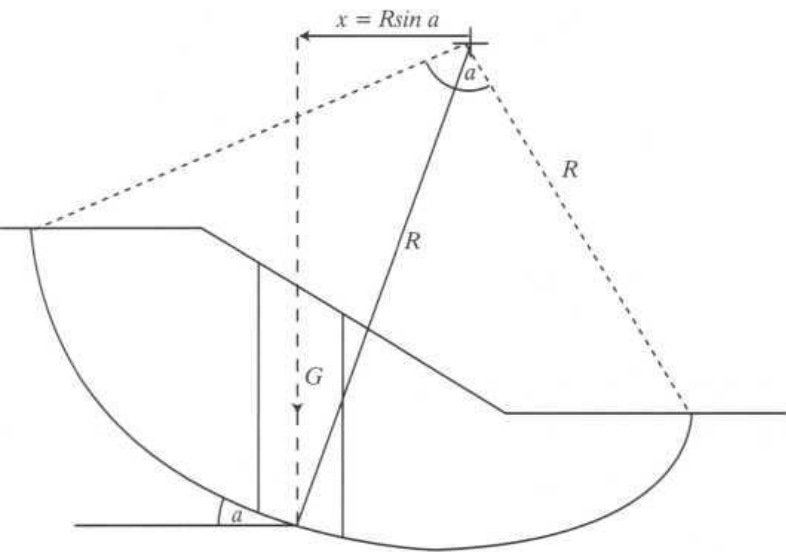




## 13.6 Μέθοδος FELLENIUS

- Η αρχή υπολογισμού της μεθόδου FELLENIUS είναι ότι η καμπύλη ολίσθησης μπορεί να εξομοιωθεί με τόξο κύκλου.
- Θεωρείται ότι το έδαφος ευρίσκεται σε οριακή ισορροπία κατά μήκος αυτής της καμπύλης, ενώ η ισορροπία είναι εξασφαλισμένη για άλλους πιθανούς κύκλους εκατέρωθεν της καμπύλης.
- Στο πλαίσιο μιας γεωτεχνικής ανάλυσης, για κάθε πιθανό κύκλο ολίσθησης η μεταξύ της καμπύλης και της επιφάνειας του εδάφους μάζα χωρίζεται με κατακόρυφα επίπεδα σε ιδεατά τμήματα (φέτες).

# 13.6 Μέθοδος FELLENIUS



- ✓ Βασική παραδοχή της μεθόδου FELLENIUS είναι ότι οι δυνάμεις επί των κατακορύφων επίπεδων, ορθές και διατμητικές, αλληλοαναιρούνται  $E_1 = E_2$ ,
- $X_1 = X_2$  (Σχ. 98). Σε κάθε τμήμα, δηλαδή, το βάρος  $G$  και η επιφόρτιση  $AG$  μεταβιβάζονται εξ ολοκλήρου στην επί μέρους επιφάνεια ολίσθησης του αντίστοιχου τμήματος. Επί της επιφάνειας αυτής ασκούνται οι δυνάμεις:
  - το βάρος  $G$  της εδαφικής μάζας μαζί και η επιφόρτιση  $\Delta G$
  - οι τυχόν δυνάμεις άνωσης
  - η αντίδραση  $N$  του υποκείμενου εδάφους.
- ✓ Για κάθε πιθανό κύκλο αστοχίας, είναι δυνατό να υπολογισθούν:
  - η διατμητική αντοχή  $s$  και η ροπή αντίστασης  $M_s$  κατά την έννοια της επιφάνειας ολίσθησης  $s = c' + (G \cos \alpha - u) \tan \varphi'$
  - $M_s = s \cdot R$
  - η ροπή ανατροπής  $M_F = G \cdot x = G \cdot R \cdot \sin \alpha$

Σχήμα 98. Ανάλυση ευστάθειας κατά Fellenius [9].

## 13.6 Μέθοδος FELLENIUS

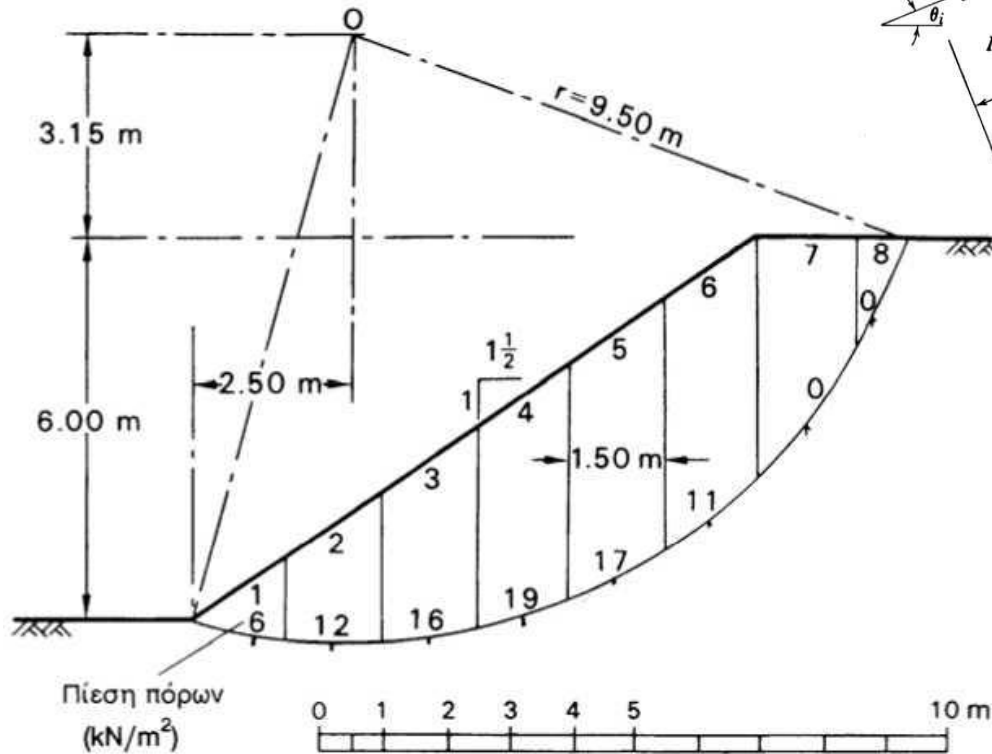
❖ Ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει:

$$SF = \frac{\sum_n [c' + (G \cos \alpha - u) \tan \phi']}{\sum_n G \sin \alpha}$$

- όπου  $u$  η πίεση ύδατος πόρων και  $\alpha$  η γωνία της εφαπτομένης κάθε επιμέρους τόξου μήκους  $l$  του κρίσιμου κύκλου.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορους πιθανούς κύκλους ολίσθησης μέχρις ότου ευρεθεί ο κύκλος που δίδει τη μικρότερη τιμή του συντελεστή ασφαλείας.
- Στα συνήθη προβλήματα οδοποιίας η ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας πρέπει να είναι:  
 $SF = 1,5$
- Μικρότερη μπορεί να είναι η τιμή του συντελεστή για έλεγχο ευστάθειας σε δυναμικές επιπονήσεις.

# 13.6 Μέθοδος FELLENIUS

Δυνάμεις σε κάθε λωρίδα.



Σχήμα 1

## Παράδειγμα 1

❖ Με χρήση της μεθόδου λωρίδων Fellenius, να προσδιορισθεί ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς του Σχήματος 1 για τη συγκεκριμένη πιθανή επιφάνεια αστοχίας. Η πυκνότητα του εδαφικού υλικού είναι  $\rho = 2 \text{ Mg/m}^3$  και οι παράμετροι διατμητικής αντοχής:  $c = 10 \text{ kPa}$  και  $\phi = 29$  μοίρες. Στο ίδιο Σχήμα είναι σημειωμένες και οι τιμές της πίεσης πόρων ( $u$ ) σε  $\text{kPa}$ , στη βάση κάθε λωρίδας.

## ✓ Λύση:

• Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι εξωτερικές επιφορτίσεις είναι μηδέν ( $P, = H, = 0$ ), και συνεπώς, ο συντελεστής ασφαλείας κατά τη μέθοδο λωρίδων Fellenius δίνεται από τη σχέση 1a:

$$F = \frac{\sum_i [c_i \Delta l_i + (W_i \cos \theta_i - u_i \Delta l_i) \tan \phi_i]}{\sum_i W_i \sin \theta_i}$$

## 13.6 Μέθοδος FELLENIUS

- ✓ Το βάρος κάθε λωρίδας είναι:  $W_i = \gamma b h_i$ , όπου  $\gamma = 2 \times 10 = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $b = 1.50 \text{ m}$  και  $h_i$  το ύψος της λωρίδας.
- ✓ Οι ποσότητες:  $h$ ,  $\Delta l_i$ ,  $\theta_i$  υπολογίζονται γραφικά (ή αναλυτικά) για κάθε λωρίδα, ενώ  $\varphi = \varphi = 29^\circ$  και  $c_i = 10 \text{ kPa}$ .
- ✓ Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί φαίνονται στον Πίνακα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Λωρίδα	$h_i$ (m)	$\Delta l_i$ (m)	$\theta_i$ (μοίρες)	$W_i$ (kN/m)	$u_i$ (kPa)	Αριθμητής*	Παρονομαστής*
1	0.76	1.55	-11.30	22.8	6	22.738	-4.468
2	1.80	1.50	-3.18	54.0	12	34.909	-2.996
3	2.73	1.55	8.43	81.9	16	46.661	12.007
4	3.40	1.60	17.10	102.0	19	53.189	29.992
5	3.87	1.70	26.90	116.1	17	58.372	52.528
6	3.89	1.95	37.16	116.7	11	59.163	70.492
7	2.94	2.35	49.82	88.2	0	55.043	67.387
8	1.10	2.15	59.93	33.0	0	30.665	28.559
ΑΘΡΟΙΣΜΑ:						360.741	253.500

\* της σχέσης 1a (κάθε όρος του αθροίσματος)

Με βάση τα ανωτέρω, ο συντελεστής ασφαλείας για το συγκεκριμένο πιθανό κύκλο ολίσθησης είναι:

$$F = \frac{360.741}{253.500} = 1.423$$

## 13.7 Μέθοδος BISHOP

- Η μέθοδος BISHOP αποτελεί μία παραλλαγή της μεθόδου FELLENIUS και στηρίζεται στην παραδοχή ότι η διατμητική αντοχή  $s$ , που είναι η εφαπτομενική συνιστώσα της αντίδρασης σε κάθε τόξο του κρίσιμου κύκλου, δεν είναι η μέγιστη δυνατή, αλλά η πραγματική (αναπτυσσόμενη) αντίσταση σε διάτμηση:

$$s = \frac{c' \cdot l + (G \cos \alpha - ul) \tan \varphi'}{SF}$$

- Στη γενική της μορφή, εξάλλου, η μέθοδος δέχεται ότι οι δυνάμεις επί των κατακόρυφων επιπέδων πρέπει να ληφθούν υπ' όψη στους υπολογισμούς. Οι κατακόρυφες συνιστώσες  $X_1$   $X_2$  των ωθήσεων αυτών θεωρείται ότι δεν ισορροπούν και υπεισέρχονται στην έκφραση του συντελεστή ασφαλείας:

$$SF = \frac{\sum_n [c' l \cos \alpha + (G + \Delta X) \tan \varphi] [\cos \alpha + \tan \varphi \sin \alpha / SF]^{-1}}{\sum_n G \sin \alpha}$$

- Συνήθως χρησιμοποιείται η απλουστευμένη μέθοδος BISHOP (Bishop simplified) που δέχεται ότι  $\Delta X = 0$ .
- Ο συντελεστής ασφαλείας ευρίσκεται:

$$SF = \frac{\sum_n [cb + G \tan \varphi] [\cos \alpha + \tan \varphi \sin \alpha / SF]^{-1}}{\sum_n G \sin \alpha}$$

# 13.8 Ανάλυση του TAYLOR

❖ Ο TAYLOR έλυσε αναλυτικά το πρόβλημα της ευστάθειας ενός επιπέδου πρανού που περιλαμβάνεται μεταξύ 2 οριζόντιων επιφανειών σε περίπτωση ομοιογενούς εδάφους .

➤ Οι διαστάσεις του πρανού και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος είναι:

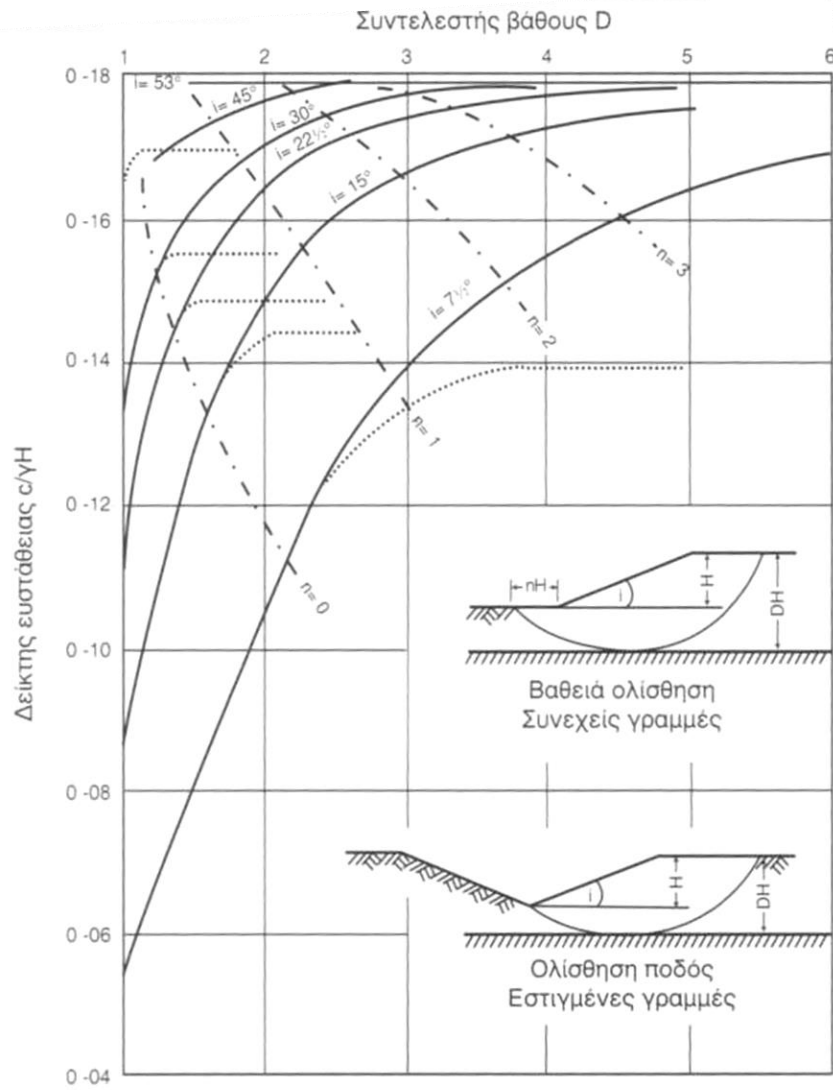
- $H$  : το ύψος του πρανού
- $D$  : συντελεστής βάθους (σχ. 99)
- $\beta$  : η γωνία του πρανού
- $\eta$  : συντελεστής εύρους του κρίσιμου κύκλου

(στον πόδα της ολίσθησης)

•  $N = c/\gamma H$  : δείκτης ευστάθειας.

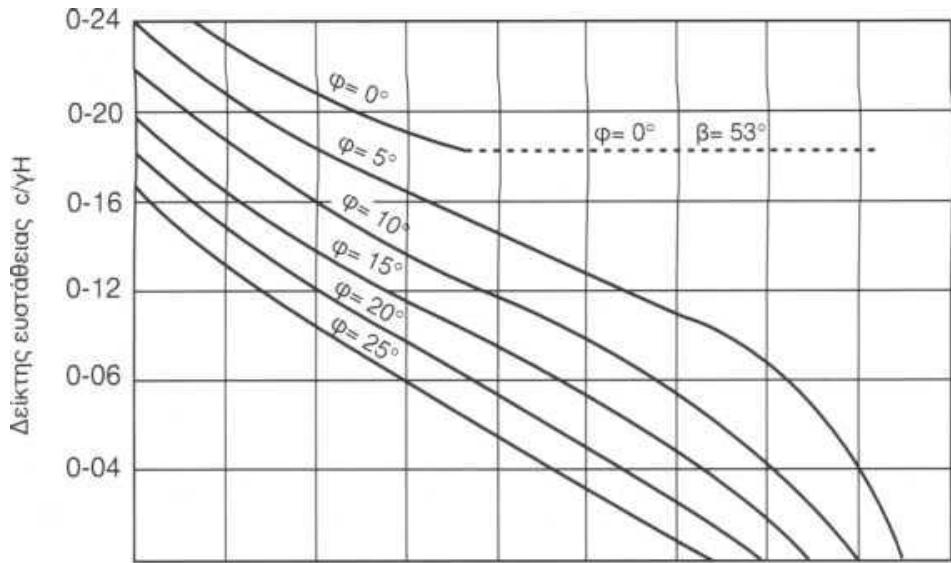
• Η επίλυση του προβλήματος για συντελεστή ασφαλείας  $SF = 1$  δίδεται από το νομογράφημα (Σχ. 99).

• Οι τιμές του συντελεστή βάθους ( $D$ ) και έκτασης της αστοχίας ( $\eta$ ), που καθορίζουν, ουσιαστικά, τον κρίσιμο κύκλο ολίσθησης δίδονται για περιπτώσεις κεκορεσμένων συνεκτικών εδαφών υπό αστράγγιστες συνθήκες ( $\phi = 0$ ) για γωνία πρανού  $i < 53^\circ$ .



Σχήμα 99. Νομογράφημα επίλυσης αστοχίας πρανού συνεκτικού εδάφους.

# 13.8 Ανάλυση του TAYLOR



Σχήμα 100. Νομογράφημα εύρεσης συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης.

❖ Στη γενικότερη μορφή του, δηλαδή για  $c \neq 0$  και  $\phi \neq 0$ , το αντίστοιχο νομογράφημα (Σχ. 100) δίδει τη μέγιστη δυνατή γωνία πρανούς και, κατά συνέπεια, την τιμή του συντελεστή ασφαλείας.

➤ Η μέθοδος Taylor δεν είναι δυνατό να εφαρμοσθεί σε περίπτωση που το εδαφικό υλικό εμφανίζει ετερογένεια, ενώ, παράλληλα προκαθορίζει και μία συγκεκριμένη γεωμετρική μορφή του προβλήματος που, ουσιαστικά, συναντάται μόνον σε περιπτώσεις κατασκευής επιχωμάτων.

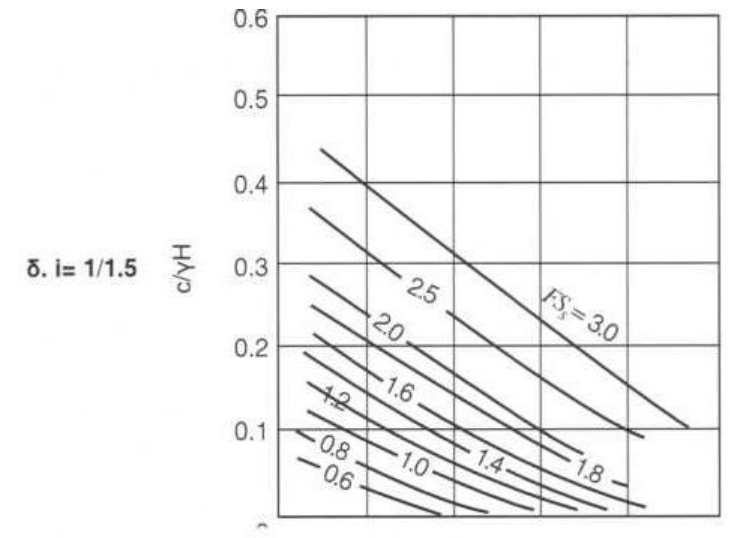
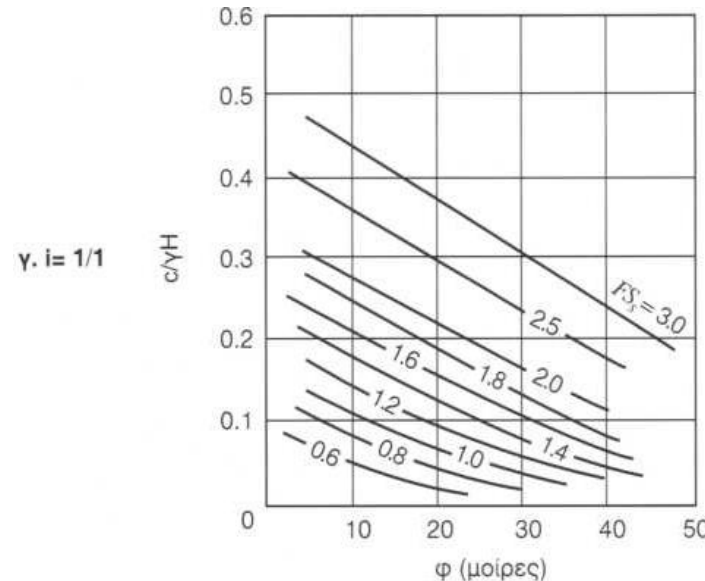
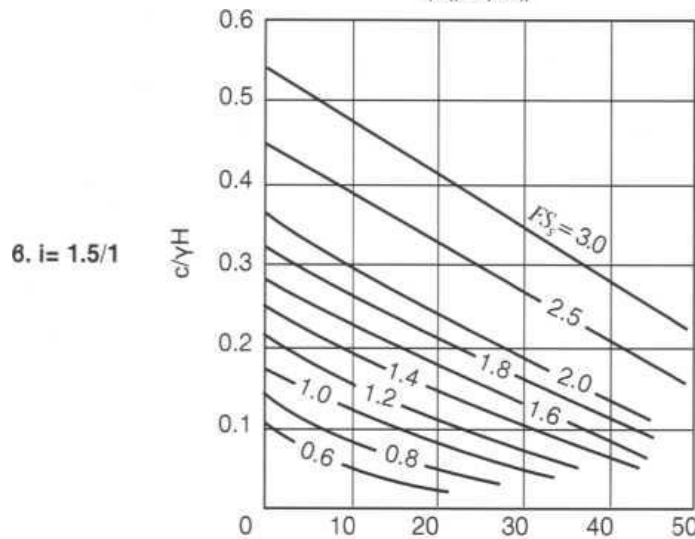
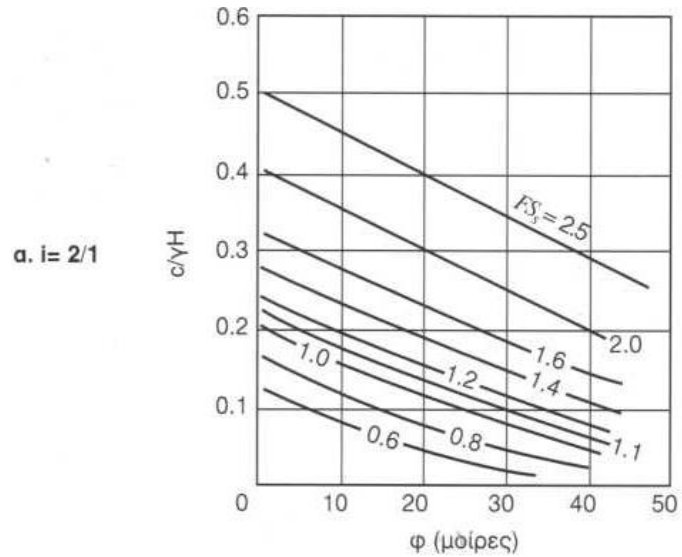
✓ Παρουσιάζει ωστόσο, το πλεονέκτημα της απλότητας, γιατί η ανάλυση της συμπεριφοράς του πρανούς βασίζεται σε μαθηματικές σχέσεις και νομογραφήματα, σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους, όπου επιβάλλεται μία χρονοβόρα διαδικασία γραφικής και μαθηματικής ανάλυσης για τον έλεγχο της ευστάθειας.



# 13.9 Νομογραφήματα υπολογισμών

❖ Μια εκτεταμένη παρουσίαση της μεθόδου Taylor σε νομογραφήματα [9], στα οποία υπεισέρχεται και ο συντελεστής ασφαλείας έναντι της ολίσθησης της κατασκευής έχει προταθεί για κάθε πιθανή γωνία πρανούς ( $i = 2/1, 1.5/1, 1/1, 1/1.5, 1/2, 1/2.5, 1/3$ ) ξεχωριστά (Singh, 1970).

- Με βάση τα νομογραφήματα αυτά, είναι πολύ απλό να προσδιοριστεί προσεγγιστικά, για κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα, ο συντελεστής ασφαλείας (FS) της γεωκατασκευής (Σχ. 101).



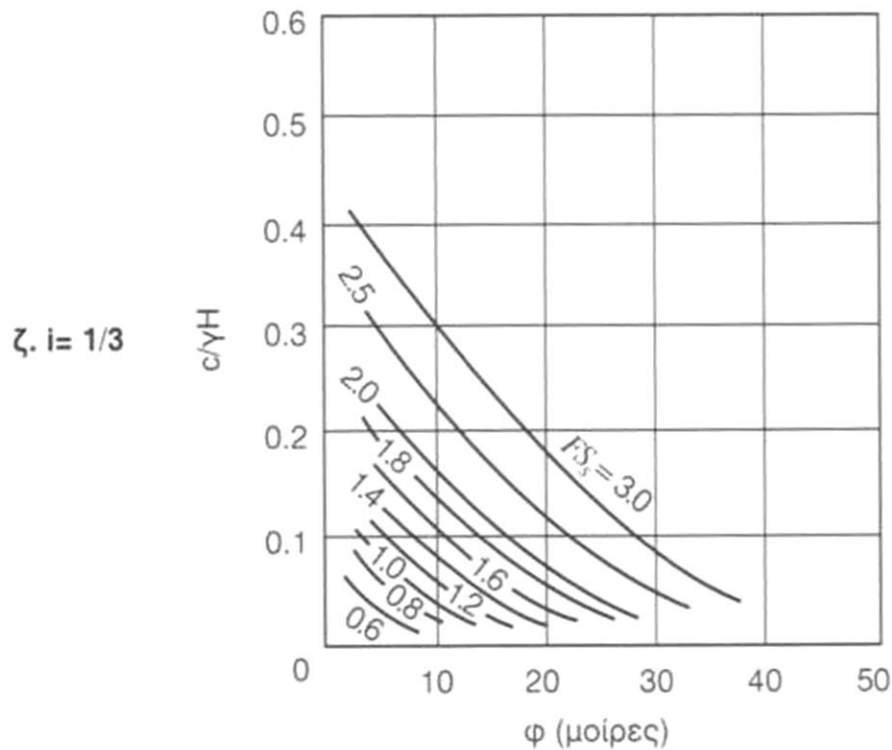
Σχήμα 101. Νομογραφήματα υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας

## 13.9 Νομογραφήματα υπολογισμών

✓ Η μέθοδος προσδιορισμού των συντελεστών ασφαλείας έναντι ολίσθησης πρανών επιχωμάτων με βάση τη μέθοδο αυτήν παρουσιάζει, παρά τον ημιεμπειρικό της χαρακτήρα, σημαντικά πλεονεκτήματα.

✓ Δίδει απαντήσεις με ικανοποιητική προσέγγιση σε προβλήματα ευστάθειας οδικών επιχωμάτων χωρίς να απαιτεί χρονοβόρες διαδικασίες αναλυτικών επιλύσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωτεχνικές μελέτες για περιπτώσεις συνήθων κατασκευών που απέχουν σημαντικά από την κατάσταση οριακής ισορροπίας.

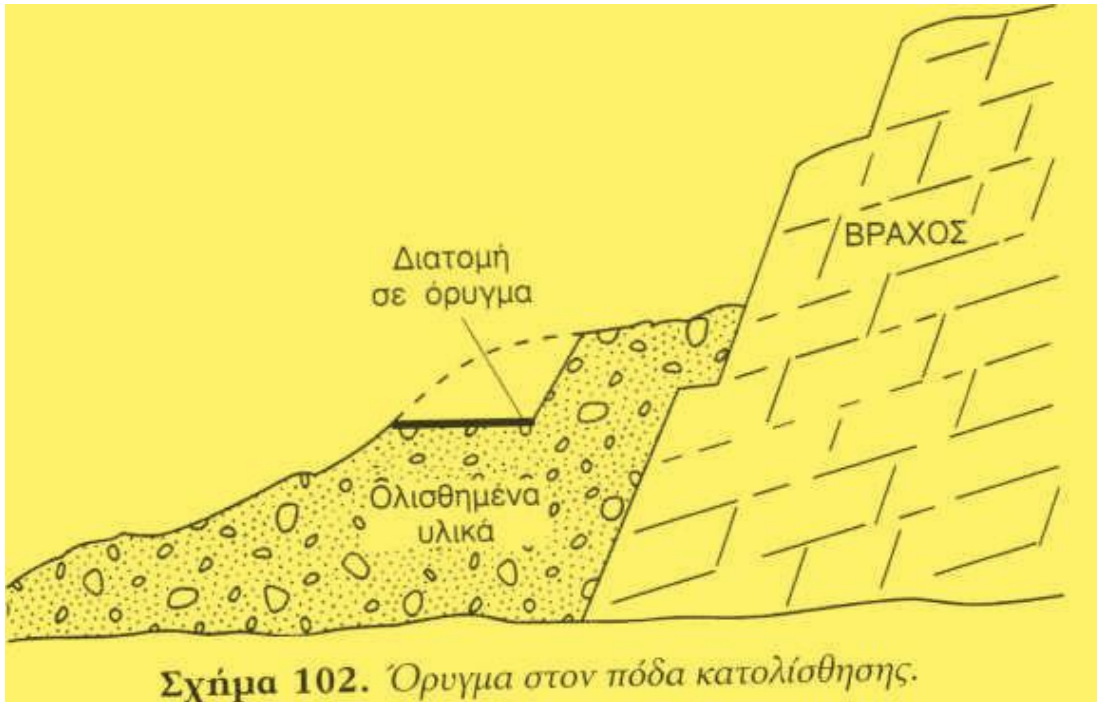
✓ Αντίθετα, σε περιπτώσεις σημαντικών γεωκατασκευών οδοποιίας, μία πλήρης ανάλυση κατά τη μέθοδο Bishop ή Janbu, συνήθως με χρήση κατάλληλου λογισμικού, και αντίστοιχα, μια διεξοδική μελέτη όλων των φάσεων, προ και μετά τη στερεοποίηση του εδάφους, καθώς και των σεισμικών επιπονήσεων, είναι επιβεβλημένη.



Σχήμα 101. (συνέχεια).

## 13.10 Μέτρα σταθεροποίησης πρανών

- Τα μέτρα για την προστασία της οδού από αστοχίες πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων ξεκινούν από τη φάση του βασικού σχεδιασμού.



- Η επιλογή της χάραξης της οδού πρέπει να γίνεται χρησιμοποιώντας, πλην των άλλων, και κριτήρια ευστάθειας των γεωκατασκευών.
- Η διέλευση, επί παραδείγματι, μιας οδικής χάραξης στον πόδα ενός φυσικού πρανούς ολισθημένων υλικών, αναπότρεπτα δημιουργεί τεράστια και δυσεπίλυτα προβλήματα ευστάθειας (Σχ. 102). Ανάλογα προβλήματα δημιουργεί και ο σχεδιασμός διατομών σε υψηλά επιχώματα επί ασθενών συμπιεστών εδαφών σε συνθήκες κορεσμού.
- **Σημαντικά μέτρα προστασίας πρανών είναι όλα τα μέτρα αποστράγγισης και επένδυσης που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 7.**
- Τα μέτρα αυτά είναι εξίσου αποτελεσματικά με αυτά που στοχεύουν άμεσα στην αύξηση της μηχανικής αντοχής των εδαφών και της ευστάθειας των γεωκατασκευών.

## 13.10 Μέτρα σταθεροποίησης πρανών



Εικόνα 53. Συρματοκιβώτια στον πόδα επιχώματος.

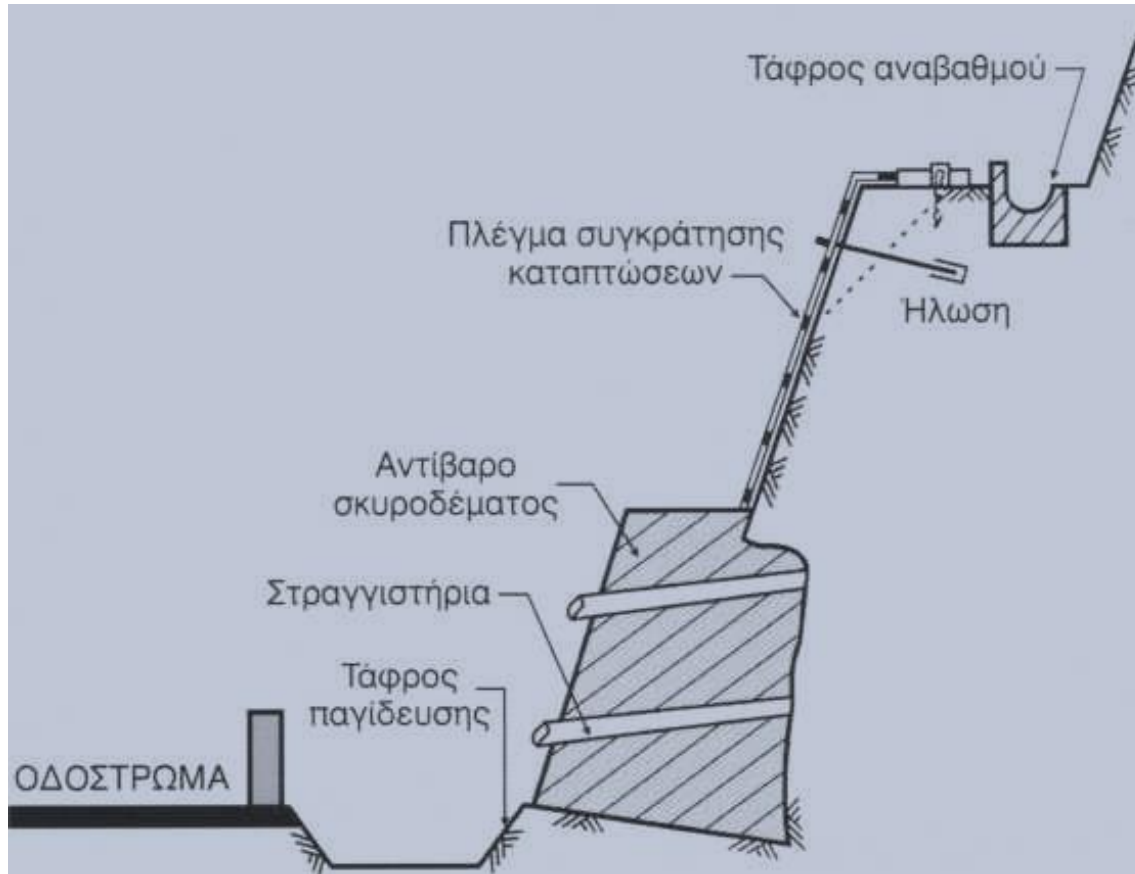


□ Στα μέτρα σταθεροποίησης πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων περιλαμβάνονται:

- α) τα έργα αντιστήριξης, οι τοίχοι αντιστήριξης, οι αγκυρωμένοι τοίχοι, οι “τοίχοι Βερολίνου”, τα διαφράγματα σκυροδέματος, οι μικροπάσσαλοι
- β) τα αντίβαρα ποδός, μία ειδική μορφή έργων αντιστήριξης, οι διατάξεις συρματοκιβωτίων και τα επιχώματα λιθορριπής (Εικ. 53)
- γ) τα έργα ενίσχυσης της μάζας του εδάφους ή του βράχου, ηλώσεις, αγκύρια
- δ) οι χωματοργικές επεμβάσεις ανάντη της οφρύος του πρανούς, η απάλυνση κλίσεων, η απομάκρυνση πλεονάζουσας μάζας ανάντη (Σχ. 103), η μείωση δυνάμεων επιφόρτισης
- ε) οι συνδυασμοί διατάξεων επένδυσης, μεταλλικών πλεγμάτων, γεωπλεγμάτων με διατάξεις ενίσχυσης, όπως συνήθη παθητικά αγκύρια, αυτοδιατηρήσιμα αγκύρια.

Σχήμα 103. Καθαίρεση και απομάκρυνση ολισθημένων υλικών στα ανάντη αυτοκινητοδρόμου.

## 13.10 Μέτρα σταθεροποίησης πρανών



- Η επιλογή των μέτρων σταθεροποίησης, σε συνδυασμό με τα μέτρα αποστράγγισης και επένδυσης (Σχ. 104) γίνεται σε κάθε έργο και σε κάθε γεωκατασκευή ανάλογα με τη φύση των εδαφικών υλικών, τη γεωμετρία και τις ειδικές συνθήκες κάθε προβλήματος.

*Σχήμα 104. Έργα σταθεροποίησης πρανούς ορύγματος.*

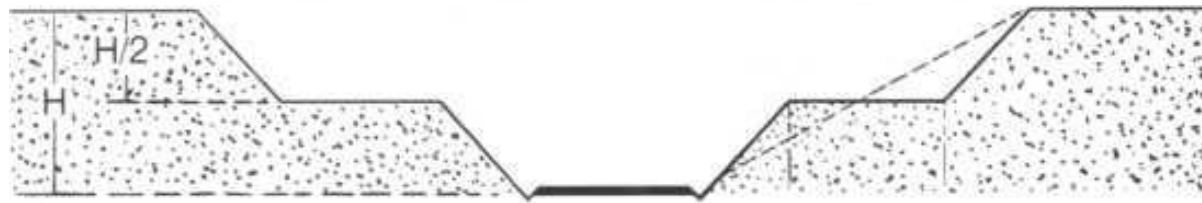
# 13.11 Μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης κατολισθήσεων



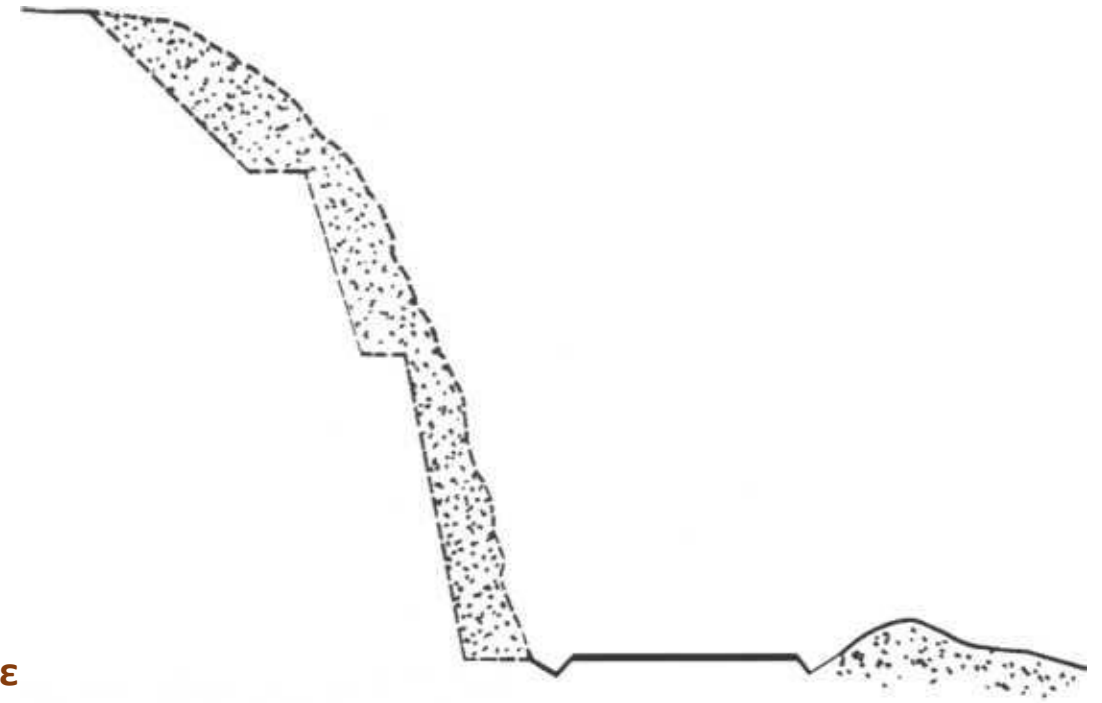
α. Απάλυνση κλίσεων πρανών



β. Κατασκευή πλευρικού αντίβαρου



γ. Κατασκευή αναβαθμών ορυγμάτων



δ. Αναβαθμοί σε βραχώδη πρανή

- Τα μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης κατολισθήσεων εντάσσονται σε πλαίσιο ευρύτερο από το προηγούμενο, όπου ο στόχος δεν είναι απλώς η σταθεροποίηση του πρανούς αλλά, γενικότερα, η αντιμετώπιση του ενδεχομένου και των συνεπειών μιας κατολίσθησης. Τα μέτρα αυτά διακρίνονται σε μέτρα παράκαμψης, με παραλλαγή της χάραξης, μέτρα χωματουργικών εργασιών, με πρόσθετες εκσκαφές, επιχωματώσεις ή κατασκευή αναβαθμών (Σχ. 105), μέτρα αποστράγγισης, μέτρα αντιστήριξης, που συνοπτικά περιγράφονται ως προς τη συχνότητα εφαρμογής και τα αποτελέσματά τους στον Πίνακα 54.

- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ως κατάρρευση (collapse) νοείται μια αστοχία, ταχείας εξέλιξης και, συνήθως, επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης, ενώ η ροή (flow) αναφέρεται σε υδαρή κατάσταση γεωυλικών που αστοχούν.

*Σχήμα 105. Μέτρα πρόληψης κατολισθήσεων πρανών οδοποιίας.*

# Πίνακας 54. Μέτρα πρόληψης και αποκατάστασης κατολισθήσεων

• 54

Μέθοδος	Τεχνική εφαρμογής	Στάδιο κατασκευής		Καταλληλότητα ανά είδος αστοχίας			Προϋποθέσεις εφαρμογής και όρια αποτελεσματικότητας
		Πρόληψη	Αποκατάσταση	Κατάρρευση	Ολίσθηση	Ροή	
1. Παράκαμψη	α. Αλλαγή χάραξης	✓	✓	*	*	*	Απαραίτητη η τεχνικοοικονομική ανάλυση
	β. Κατασκευή κοιλαδογέφυρας	✓	✓	(*)	(*)	(*)	
2. Χωματοουργικές εργασίες	α. Εκσκαφή στέψης	✓	✓	—	**	—	Εξέταση του όγκου των χωματοουργικών εργασιών
	β. Εξομάλυνση κλίσεων πρανών	✓	✓	**	**	**	
	γ. Κατασκευή αναβαθμών	✓	✓	**	**	**	
	δ. Απομάκρυνση ολισθαίνουσας μάζας	✓	✓	*	*	*	
3. Αποστράγγιση – επιφανειακή	α. Περιφερειακές τάφροι	✓	✓	**	**	**	Θετικές επιπτώσεις σε κάθε περίπτωση
	β. Επένδυση πρανών	✓	✓	(*)	(*)	(*)	
	γ. Σφράγιση ρωγμών	✓	✓	*	*	*	
– υπόγεια	δ. Οριζόντια στραγγιστήρια	✓	✓	—	*	*	Θετικές επιπτώσεις σε βαθιές κατολισθήσεις
	ε. Σκάμματα αποστράγγισης	✓	✓	—	**	(*)	
	στ. Φίλτρα πρανούς	✓	✓	—	(*)	(*)	

## Πίνακας 54. συνέχεια

Μέθοδος	Τεχνική εφαρμογής	Στάδιο κατασκευής		Καταλληλότητα ανά είδος αστοχίας			Προϋποθέσεις εφαρμογής και όρια αποτελεσματικότητας
		Πρόληψη	Αποκατάσταση	Κατάρρευση	Ολίσθηση	Ροή	
4. Έργα αντιστήριξης	α. Αντίβαρο	✓	✓	—	**	**	Τεχνικοοικονομική ανάλυση και πλήρης γεωτεχνική μελέτη για τις εκ σκυροδέματος κατασκευές
	β. Τοίχοι αντιστήριξης	✓	✓	(*)	(*)	(*)	
	γ. Πάσσαλοι	—	✓	—	(*)	—	
	δ. Αγκύρια βράχου	✓	✓	(*)	(*)	—	
5. Χημική σταθεροποίηση	α. Σιμεντενέσεις	—	✓	(*)	(*)	(*)	Μάλλον σπάνιες τεχνικές σε ειδικές εφαρμογές
	β. Ψυχρή προσβολή	✓	—	—	(*)	(*)	
	γ. Ηλεκτρική όσμωση	✓	—	—	(*)	(*)	



# *ΚΕΦ. 14*

## *14. Η Μέθοδος της Εκσκαφής και Επανεπίχωσης CUT AND COVER*

# 14.1. Πεδίο εφαρμογής της τεχνικής

- ❖ Η μέθοδος της “εκσκαφής και επανεπίχωσης”, γνωστή ως μέθοδος “cut and cover”, είναι μια διαδομένη τεχνική κατασκευής οδικών σηράγγων.
- ✓ Συνίσταται στην επιφανειακή εκσκαφή και δημιουργία ανοικτού ορύγματος, στην εν συνεχεία διαμόρφωση και κατασκευή της σήραγγας και, τέλος, στην επανεπίχωση υπεράνω της σήραγγας, συνήθως, μέχρι την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους.
- ✓ Η μέθοδος “cut and cover” εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου λειτουργικοί και περιβαλλοντικοί λόγοι απαγορεύουν τη δημιουργία διατομής οδοποιίας ανοικτού ορύγματος αλλά και εκεί όπου το χαμηλό υπερκείμενο ή η φύση του εδάφους δεν συνηγορούν υπέρ μιας συμβατικής μεθόδου εκσκαφής σήραγγας.
- ✓ Η μέθοδος “cut and cover” γνωρίζει ευρεία εφαρμογή στην αστική οδοποιία για κατασκευή κάτω διαβάσεων, ανισόπεδων διασταυρώσεων αλλά και εκτεταμένων οδικών έργων όπως οι υπόγειες αστικές αρτηρίες.
- Στις περιπτώσεις αυτές και, ιδιαίτερα, όταν το βάθος του υπό κατασκευή έργου δεν είναι μεγάλο, η εν λόγω μέθοδος προτιμάται από τη μέθοδο διάτρησης με χρήση ενός μηχανήματος ολομέτωπης προσβολής (TBM).

# 14.1. Πεδίο εφαρμογής της τεχνικής

- ❑ Στην υπεραστική οδοποιία, η μέθοδος εφαρμόζεται, αντί της συνηθέστερης μεθόδου προρρηγμάτωσης και εκσκαφής (“drill and blast” method) κατασκευής σηράγγων, όταν συντρέχουν ορισμένοι λόγοι και, συγκεκριμένα, όταν:
  - το μήκος της σήραγγας είναι μικρό
  - το υπερκείμενο είναι χαμηλό
  - το εδαφικό υλικό είναι χαλαρό
  - οι γεωσχηματισμοί παρουσιάζουν πολλαπλές και επικίνδυνες ασταθείς ζώνες, ρήγματα, έγκοιλα κ.ά.
  - σε ενδιάμεση θέση, πρόκειται να κατασκευαστεί ανοικτό όρυγμα.
- Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος εφαρμόζεται και στις εισόδους και εξόδους των οδικών σηράγγων που κατασκευάζονται με τη συμβατική μέθοδο, επειδή στις θέσεις αυτές το υπερκείμενο είναι, συνήθως, χαμηλό.
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοσθεί, πέραν των οδικών έργων, και σε άλλα συγκοινωνιακά έργα, όπως σε διάνοιξη σηράγγων για κατασκευή αστικού σιδηροδρόμου (μετρό).

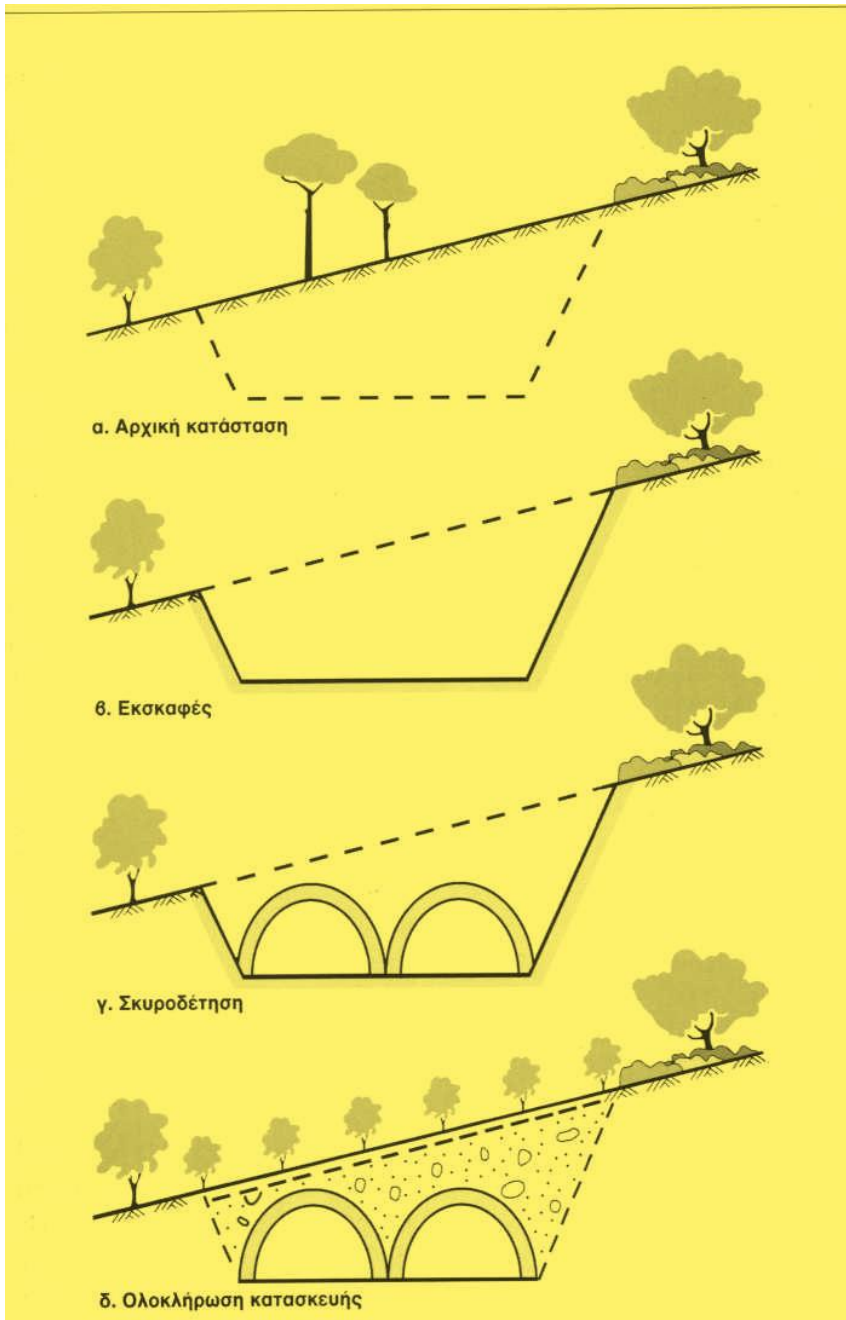
## 14.2. Περιγραφή της τεχνικής

- ❑ Η εκτέλεση έργων οδικών σηράγγων με τη μέθοδο “cut and cover” περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Αν και η φιλοσοφία της τεχνικής είναι ίδια και ενιαία, ωστόσο, υπάρχει μεγάλη διαφοροποίηση από την αστική στην υπεραστική οδοποιία.
- ✓ Κοινή, όμως, είναι και απαραίτητη σε κάθε περίπτωση, η πλήρης διερεύνηση των γεωτεχνικών συνθηκών της ευρύτερης περιοχής και η σύνταξη σχετικής μελέτης για την εκτέλεση του έργου, είτε πρόκειται για δομημένο είτε για φυσικό περιβάλλον.

## 14.2. Περιγραφή της τεχνικής

❖ Στην υπεραστική οδοποιία οι φάσεις κατασκευής (Σχ. 106) περιλαμβάνουν τα εξής:

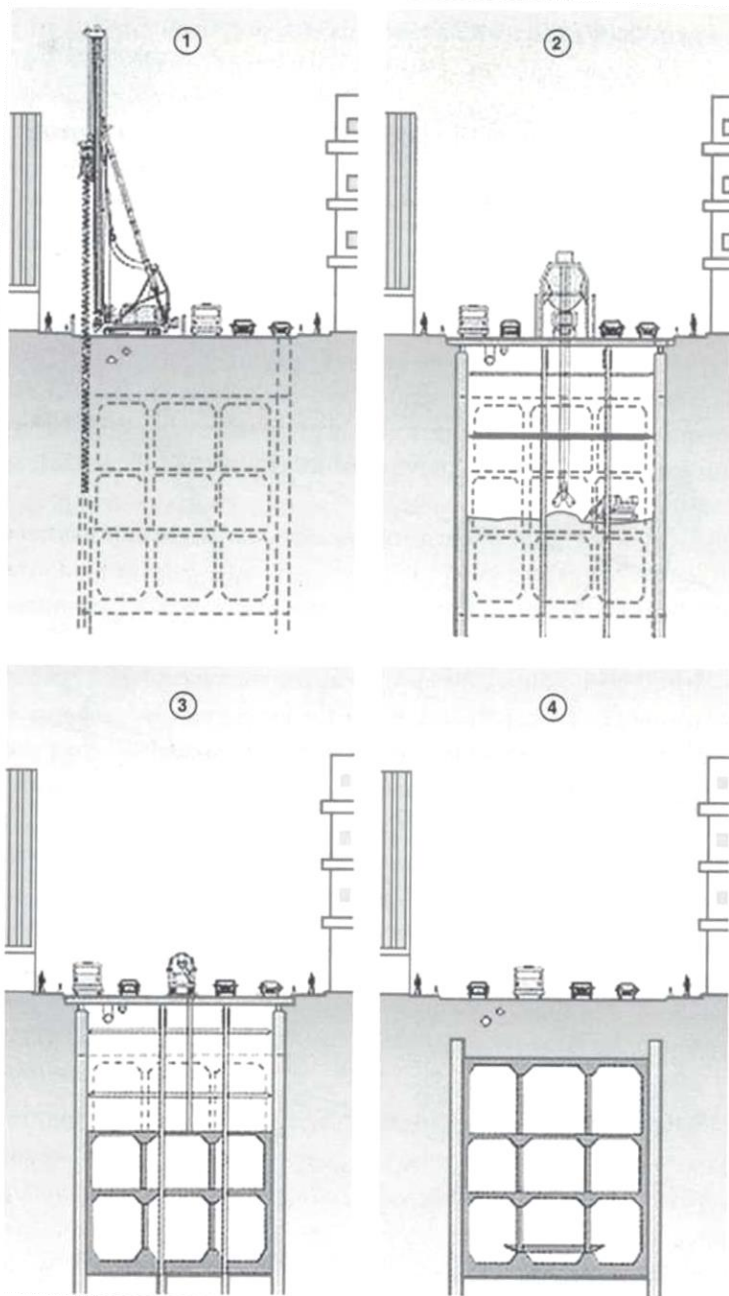
- προκαταρκτικές ενέργειες, απομάκρυνση εμποδίων, εκτροπή τοπικών δικτύων
- **εκχερσώσεις, επιφανειακές εκσκαφές**
- κατασκευή προσωρινών και μόνιμων έργων υδροσυλλογής, αποστράγγισης και προστασία γεωκατασκευών
- **γενικές εκσκαφές, δημιουργία ανοικτού ορύγματος**
- προσωρινά μέτρα αντιστήριξης, πασσαλοδιαφράγματα, τοίχοι “τύπου Βερολίνου”, αγκύρια βράχου στο ανάντη πρανές
- **κατασκευή αποστραγγιστικών πετασμάτων, κλινών**
- διαμόρφωση δαπέδου εργασίας για τις εργασίες σκυροδέτησης
- σκυροδέτηση σήραγγας-μέτρα στεγάνωσης
- επιχωματώσεις, επενδύσεις, αποστραγγιστικά μέτρα, προστασία πρανών
- αποκατάσταση τοπικών δικτύων, κυρίως, οδικού δικτύου
- **ολοκλήρωση εργασιών σήραγγας, Η/Μ έργα, αποχέτευση, οδοστρωσία, ασφαλτικά.**



Σχήμα 106. Φάσεις κατασκευής με τη μέθοδο “cut and cover”

## 14.2. Περιγραφή της τεχνικής

- ❖ Στις αστικές περιοχές, οι υπόγειες σήραγγες κατασκευάζονται κάτω από οδικές αρτηρίες.
- ✓ Η εκσκαφή, συνεπώς, για μια τέτοια κατασκευή προσκρούει στο πρόβλημα της κυκλοφορίας.
- Αυτό είναι και το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου “cut and cover” έναντι της συνήθους μεθόδου διάτρησης σε αστικές περιοχές.
- ✓ Όταν, ωστόσο, επιλέγεται η μέθοδος “cut and cover”, απαραίτητα είναι τα συμπληρωματικά μέτρα άμεσης αποκατάστασης κυκλοφορίας μέσω προσωρινού οδοστρώματος (Σχ. 107).



Σχήμα 107. Σταδιακή κατασκευή σήραγγας σε αστικές περιοχές.

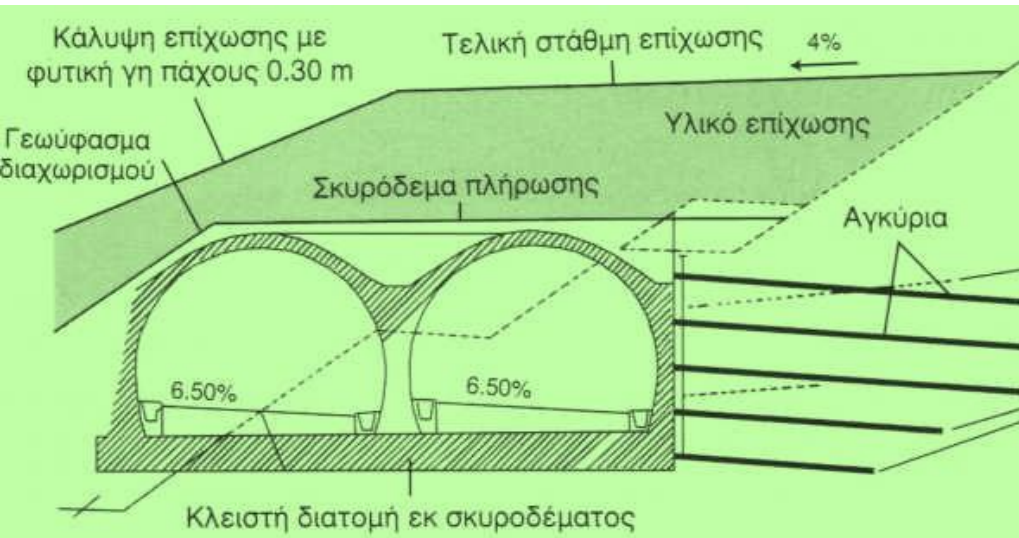
## 14.2. Περιγραφή της τεχνικής



Εικόνα 54. Σήραγγα “cut and cover” σε φάση κατασκευής

- ❖ Ως προς τα άλλα θέματα που αντιμετωπίζονται στην υπεραστική οδοποιία, η εφαρμογή της τεχνικής σε δομημένο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τα εξής:
  - προκαταρκτικές ενέργειες, απομάκρυνση εμποδίων, προσωρινή εκτροπή κυκλοφορίας, εκτροπή υπογείων και επιγείων δικτύων
  - προσωρινή σήμανση, μέτρα ασφαλείας
  - έργα αντιστήριξης, διαφράγματα, “τοίχοι Βερολίνου”
  - εκσκαφές σε κατακόρυφα μέτωπα
  - κατασκευή προσωρινού οδοστρώματος
  - κατασκευή της υπόγειας σήραγγας
  - επίχωση και κατασκευή νέου οδοστρώματος.
- Σε περίπτωση που το επιβάλλουν κυκλοφοριακοί λόγοι, η ως άνω κατασκευή μπορεί να γίνει τμηματικά, κατά την έννοια του μήκους της οδού. Κάτι ανάλογο μπορεί να συμβεί και σε υπεραστική οδοποιία, όταν η χάραξη διέρχεται από εδαφικούς σχηματισμούς μεγάλης αστάθειας και υψηλού κινδύνου.

## 14.3. Κατασκευαστικά θέματα



Σχήμα 108. Περιορισμοί ως προς το εύρος κατάληψης και αντιστήριξη ανάντη.

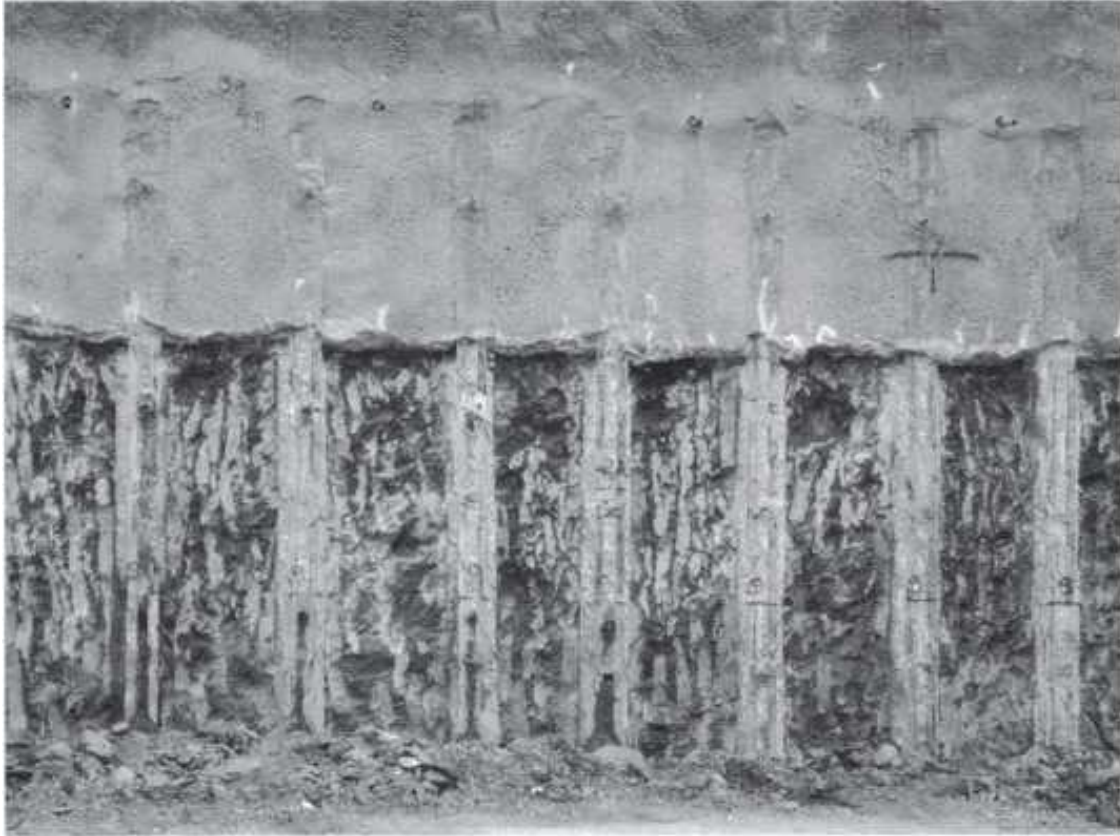
- ❖ Η μέθοδος της εκσκαφής και επανεπίχωσης παρουσιάζει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα έναντι μιας συμβατικής εκσκαφής και διαμόρφωσης ανοικτού ορύγματος:
- ✓ ελάχιστη περιβαλλοντική όχληση, ασήμαντα γεωτεχνικά προβλήματα στη φάση λειτουργίας.
- Επιπλέον, στη φάση κατασκευής, η διέλευση του άξονα από ζώνες ασταθούς συμπεριφοράς μπορεί να αντιμετωπισθεί με σταδιακή κατασκευή (εκσκαφή - σκυροδέτηση - επανεπίχωση) ανά τμήματα ώστε να μειωθούν οι κίνδυνοι αστοχιών στα πρηνή της εκσκαφής.
- ✓ **Αντίθετα, το κόστος κατασκευής είναι υψηλό και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η εφαρμογή της μεθόδου αυτής περιορίζεται σε ειδικές περιπτώσεις.**
- **Η φάση των εκσκαφών και των έργων προσωρινής αντιστήριξης είναι ιδιαίτερα σημαντική.**
- Συνήθως, υπάρχουν περιορισμοί στη δυνατότητα επέκτασης των εκσκαφών και δημιουργίας πρηνών ήπιων κλίσεων (Σχ. 108).



## 14.3. Κατασκευαστικά θέματα

□ Συχνά, της εκσκαφής προηγούνται ορισμένα μέτρα αντιστήριξης, όπως η κατασκευή διαφραγματικών τοίχων ή τοίχων “τύπου Βερολίνου” (Εικ. 55), ούτως ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητα της εδαφικής μάζας ανάντη (και, ενδεχομένως, κατόντη) όσο βαθαίνει το ανοικτό όρυγμα.

➤ Πολλές φορές, εξάλλου, με την πρόοδο των εργασιών εκσκαφής εκτελούνται διατρήσεις, σε βραχώδη κερματισμένα υλικά, και τοποθετούνται αγκύρια βράχου, ώστε να βελτιωθεί η γενική ευστάθεια του τεχνητού πρανούς.



*Εικόνα 55. Τοίχος τύπου Βερολίνου (όψη) με αγκύρια βράχου ως προσωρινή αντιστήριξη.*

## 14.3. Κατασκευαστικά θέματα

- ✓ Η τεχνική του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ως μέτρου προσωρινής προστασίας και επένδυσης των πρανών είναι αρκετά συνηθισμένη σε περιπτώσεις κατασκευής σηράγγων “cut and cover”.
- Μπορεί να εφαρμοσθεί σε γεωκατασκευές που παρουσιάζουν πρανή ενδιάμεσων κλίσεων (1,5:1,1:1,1:1,5) και επιφανειακά στρώματα από υλικά ευαίσθητα σε διάβρωση και αποσύνθεση ή σε βραχώδη πρανή που εμφανίζουν πολύ ρηγματωμένη επιφάνεια.
- ✓ Η τεχνική αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της εύκολης και γρήγορης κατασκευής, δεν αποτελεί, ωστόσο, η ίδια μια τεχνική αντιστήριξης πρανών.
- ✓ Σε κάθε περίπτωση εφαρμογής, θα πρέπει να συνοδεύεται από κατάλληλα μέτρα αποστράγγισης.
- Τα μειονεκτήματα της τεχνικής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, ως μεθόδου επένδυσης προσωρινών πρανών είναι τα εξής:
  - δυσκολία αποκατάστασης σε περίπτωση τοπικών ή γενικευμένων αστοχιών
  - σημαντικό κόστος
  - αναγκαιότητα καθαίρεσης της στρώσης του σκυροδέματος στη φάση της επανεπίχωσης, ειδάλλως, ο κίνδυνος ολίσθησης κατά την έννοια της επιφάνειας αυτής είναι μεγάλος.

## 14.3. Κατασκευαστικά θέματα

- Η διαδικασία επιχωμάτωσης ακολουθεί τις συνήθεις οδηγίες κατασκευής επιχωμάτων.
- Τα υλικά είναι, εξ ορισμού, τα προϊόντα εκσκαφών με εξαίρεση εκείνα τα οποία κρίνονται εντελώς ακατάλληλα για εκτέλεση γεωκατασκευών.
- Ανεξάρτητα από τα μέτρα προστασίας και υδρομόνωσης της σήραγγας, ένα στρώμα σκύρων κυμαινόμενου πάχους, λόγω ιδιαιτερότητας κατασκευής, θα πρέπει να περιβάλλει την εξωτερική επιφάνεια της σήραγγας για βελτίωση της αποστράγγισης.
- Σε περίπτωση που το υλικό επανεπίχωσης είναι συνεκτικό και το υπερκείμενο υψηλό, ενδιάμεσες στραγγιστικές στρώσεις θα πρέπει να προβλεφθούν, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη πίεσης πόρων στο σώμα του υλικού επανεπίχωσης μετά το πέρας της κατασκευής.
- Συνήθως, η απαίτηση συμπύκνωσης για το υλικό επανεπίχωσης κυμαίνεται μεταξύ 90 και 95% κατά Proctor.

Η απαίτηση αυτή πρέπει να είναι μεγαλύτερη όταν πρόκειται να κατασκευασθούν τεχνικά έργα (τοπικές οδοί) στην επιφάνεια της γεωκατασκευής και μικρότερη σε αντίθετη περίπτωση.

- Η συμπύκνωση, στην περίπτωση της επανεπίχωσης σηράγγων “cut and cover” εκτελείται για να βελτιώσει τις συνθήκες ευστάθειας των πρανών και για να μειώσει τη διαπερατότητα των σχηματισμών.
- Αν δεν συντρέχουν ειδικοί λόγοι, η έντονη συμπύκνωση είναι σκόπιμο να αποφεύγεται και να επιδιώκεται βαθμός συμπύκνωσης γύρω στο 90%.

## 14.3. Κατασκευαστικά θέματα

- Η έναρξη των εργασιών επανεπίχωσης θα πρέπει να γίνεται αφού ολοκληρωθεί το στάδιο σκλήρυνσης του τσιμεντοπολτού του σκυροδέματος.
- Για τα πρώτα στρώματα υπεράνω του φορέα, δε συνιστάται η χρήση οδοστρωτήρων μεγάλου βάρους ή η επιβολή δόνησης κατά τη διαδικασία συμπύκνωσης.
- Η τελική επιφάνεια της γεωκατασκευής, καθώς και τα πρανή, θα πρέπει να καλύπτονται από στρώμα φυτικής γης πάχους 30-50 cm για να διευκολυνθεί η ανάπτυξη βλάστησης και φυτοκάλυψης του όλου έργου.



*Εικόνα 56. Κατασκευή φορέα σήραγγας “cut and cover”*

## 14.4. Στέγαστρα και ημιστέγαστρα οδών



Εικόνα 57. Ημιστέγαστρο αυτοκινητοδρόμου



Εικόνα 58. Εσωτερικό οδικού ημιστέγαστρου

- ✓ Μια παραλλαγή της τεχνικής της εκσκαφής και επανεπίχωσης εφαρμόζεται σε περιπτώσεις κατασκευής οδικών στεγάστρων και ημιστεγάστρων.
- Τα στέγαστρα κατασκευάζονται σε θέσεις διατομών σε μονόπλευρο, συνήθως, όρυγμα για προστασία της οδού από καταπτώσεις και τοπικές αστοχίες.
- Στα ημιστέγαστρα, το ένα μόνον από τα δύο καταστρώματα της οδού καλύπτεται από σήραγγα διατομής σκυροδέματος.
- Παρουσιάζουν, έναντι του συμβατικού “cut and cover” το πλεονέκτημα του φυσικού αερισμού και φωτισμού, δεδομένου ότι στην κατάντη παρειά η διατομή του σκυροδέματος διαμορφώνεται με υποστυλώματα.
- Κατά τα λοιπά, ισχύουν όσα προηγουμένως αναφέρθηκαν για τις κατασκευές “cut and cover” της υπεραστικής οδοποιίας.

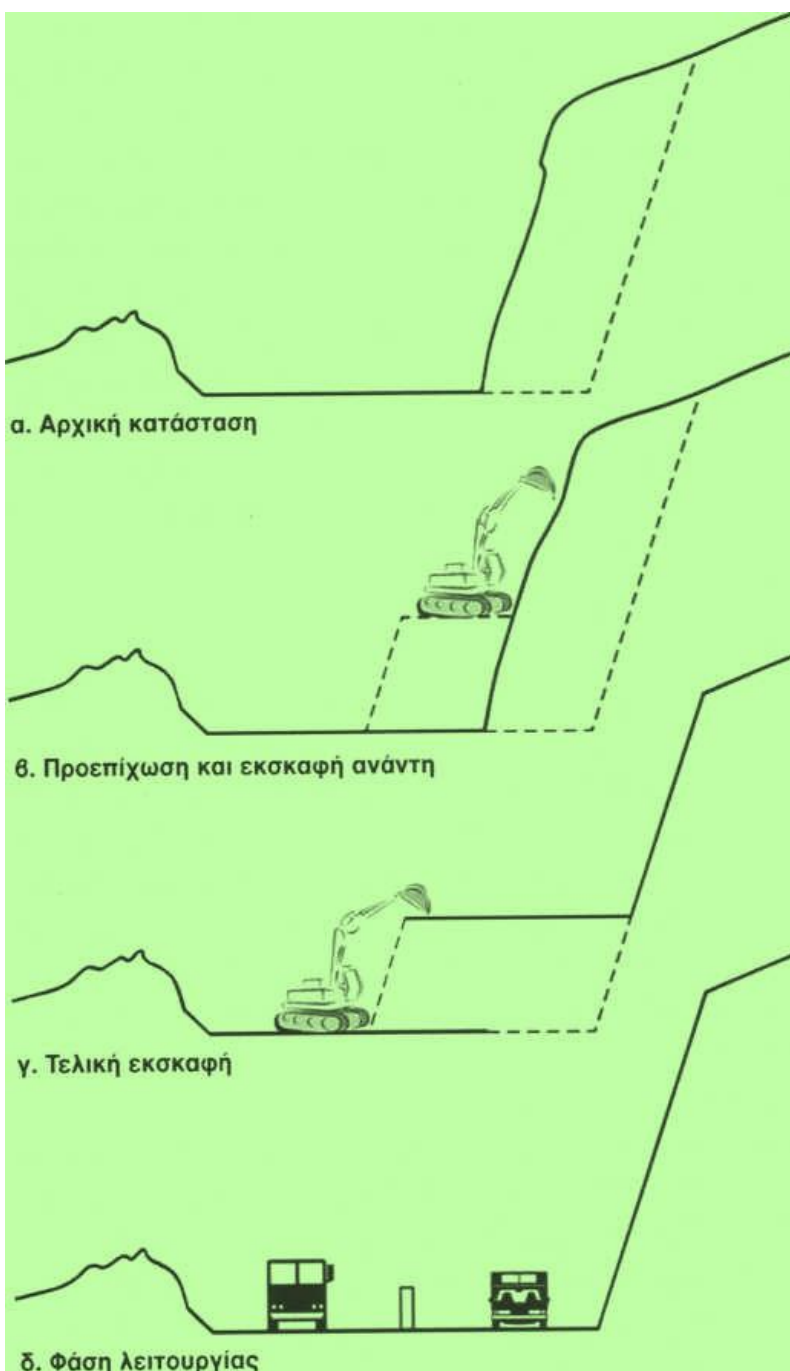
## 14.5. Μέθοδος της προεπίχωσης

- Η μέθοδος της προεπίχωσης (“cover and cut” method) είναι μια άλλη παραλλαγή, κατά την οποία μια προκαταρκτική επίχωση λειτουργεί ως προσωρινή αντιστήριξη φυσικών πρανών για την κατασκευή ενός τεχνικού έργου οδοποιίας ή μιας εκσκαφής σε μικρό πάχος και μεγάλο ύψος.
- Σε έργα σηράγγων, η διάτρηση γίνεται κάτω από τον θόλο και ακολουθεί την κατασκευή της επιφανειακής εκσκαφής και προεπίχωσης, η οποία μπορεί να παίζει και ρόλο δαπέδου εργασίας. Μετωπική προσβολή πραγματοποιείται μετά την κατασκευή του θολού και των πλευρικών πασσαλότοιχων.
- Σε έργα σηράγγων δηλαδή, η μέθοδος συνίσταται στην δημιουργία ενός θολού εκ σκυροδέματος (“cover”) και στην εν συνεχεία εκσκαφή στο εσωτερικό του (“cut”).
- Η σκυροδέτηση της τελικής επένδυσης ακολουθεί.
- Πρόκειται για παραλλαγή της κλασικής μεθόδου με ευρύτατη εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον και ονομάζεται μέθοδος της προϋποστήριξης και εκσκαφής.

## 14.5. Μέθοδος της προεπίχωσης

➤ Σε περιπτώσεις διαπλάτυνσης υφισταμένων οδών με διατομές σε όρυγμα και ειδικότερα, όταν δεν υπάρχει πρόσβαση ανάντη για την πρόσθετη εκσκαφή των πρανών, η μέθοδος “cover and cut” είναι ουσιαστικά η μοναδική και αποτελεσματικότερη επιλογή.

- Κατά μήκος του υφιστάμενου πρανού εκτελείται αρχικά επίχωση ύψους 3-5 m και πλάτους κατάλληλου για την έδραση του εκσκαφέα.
- Ακολουθεί η εκσκαφή των υπερκείμενων στρωμάτων (β) και ακολούθως των υποκείμενων και του τεχνητού επιχώματος (γ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 109.



**Σχήμα 109- Εφαρμογή της μεθόδου της προεπίχωσης για εκσκαφή πρανών**

## 14.6. Πεδίο εφαρμογής

- Το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου “cut and cover” και των συναφών τεχνικών είναι δύσκολο να καθορισθεί με απόλυτη ακρίβεια.
- Σε κάθε περίπτωση οδικού έργου τα κριτήρια επιλογής μεταξύ των διαφόρων μεθόδων κατασκευής μιας “βυθισμένης διατομής” (depressed section), δηλαδή μεταξύ ανοικτού ορύγματος ή κάποιου τεχνικού είναι ποικίλα: τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά.
- Σημαντική είναι ακόμη η διάκριση ανάμεσα στην υπεραστική οδοποιία και την αστική οδοποιία για την επιλογή μιας τεχνικής.
- Αν, επί παραδείγματι, η κατασκευή υπόγειων έργων με τη μέθοδο “cut and cover” σπανίως ξεπερνά τα 200 m μήκος σε υπεραστική οδοποιία, αντίθετα, φτάνει σε πολύ μεγαλύτερα μεγέθη μέσα σε δομημένο περιβάλλον.



# 14.6. Πεδίο εφαρμογής

**Πίνακας 55.** Χαρακτηριστικά και κριτήρια επιλογής μεθόδου “C&C” και εναλλακτικών τεχνικών κατασκευής

a/a	Χαρακτηριστικά οδού – Εδάφους – Τεχνικού	Ανοικτό όρυγμα	Ημιστέγαστρο	“Cut and cover”	Συμβατική σήραγγα
1.	Υψομετρική διαφορά “εδάφους – ερυθράς”	$H_o < 25$ m	$H_o = 15-40$ m	$H_o = 20-50$ m	$H_o > 30$ m
2.	Μήκος διατομής	Οσοδήποτε	$L_o < 200$ m	$L_o < 500$ m	$L_o = 100-5000$ m
3.	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	Μεγάλες	Μικρές	Μικρές	Αμελητέες
4.	Είδος εδάφους	Γαίες, ημίβραχοι, βράχοι	Χαλαρά, γαιώδη, ημιβραχώδη	Χαλαρά, γαιώδη, ημιβραχώδη	Ημιβραχώδη – Βραχώδη
5.	Εφαρμογή μέτρων αντιστήριξης	Κατά περίπτωση	Συχνή	Συνήθης πρακτική	Προσωρινή αντιστήριξη απαραίτητη
6.	Πεδίο εφαρμογής	Υπεραστική οδοποιία	Υπεραστική οδοποιία	Αστική, περιαστική, υπεραστική οδοποιία	Αστική, υπεραστική οδοποιία

- Στον Πίνακα 55 δίδεται μια συνοπτική εικόνα των χαρακτηριστικών εδάφους - τεχνικού καθώς και των κριτηρίων επιλογής μιας από τις πιθανές τεχνικές που μπορούν να εφαρμοσθούν σε περιπτώσεις διατομών οδού με στάθμη ερυθράς χαμηλότερη εκείνης του φυσικού εδάφους.

# ΚΕΦ. 15

## *15. Μηχανική Συμπεριφορά Οδικών Επιχωμάτων*

# 15.1. Παραμορφώσεις και αστοχίες οδικών επιχωμάτων

- ✓ Η σύγχρονη οδοποιία χρησιμοποιεί οδικά επιχώματα σημαντικού πλάτους και μεγάλου μήκους για να εξυπηρετήσει οδούς ταχείας κυκλοφορίας.
- ✓ Επιχώματα ύψους άνω των 100 m αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ και στη χώρα μας κατασκευές ύψους 50-60 m είναι πλέον συνηθισμένες.
- Οι απαιτήσεις υψηλών προδιαγραφών που αναφέρονται στην κατασκευή οδικών αρτηριών προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά των οδικών επιχωμάτων μέσα στο χρόνο.
- Οι γεωκατασκευές αυτές πρέπει να διατηρούνται άθικτες και απαραμόρφωτες ώστε, αντίστοιχα, και το οδόστρωμα να παραμένει σε άριστη κατάσταση και η οδός να παρουσιάζει ένα υψηλό επίπεδο λειτουργικότητας από πλευράς κυκλοφοριακής άνεσης και οδικής ασφάλειας.
- Οι δύο μεγάλες κατηγορίες ζητημάτων μηχανικής συμπεριφοράς των οδικών επιχωμάτων είναι τα προβλήματα οριακής ισορροπίας και τα προβλήματα παραμορφώσεων.

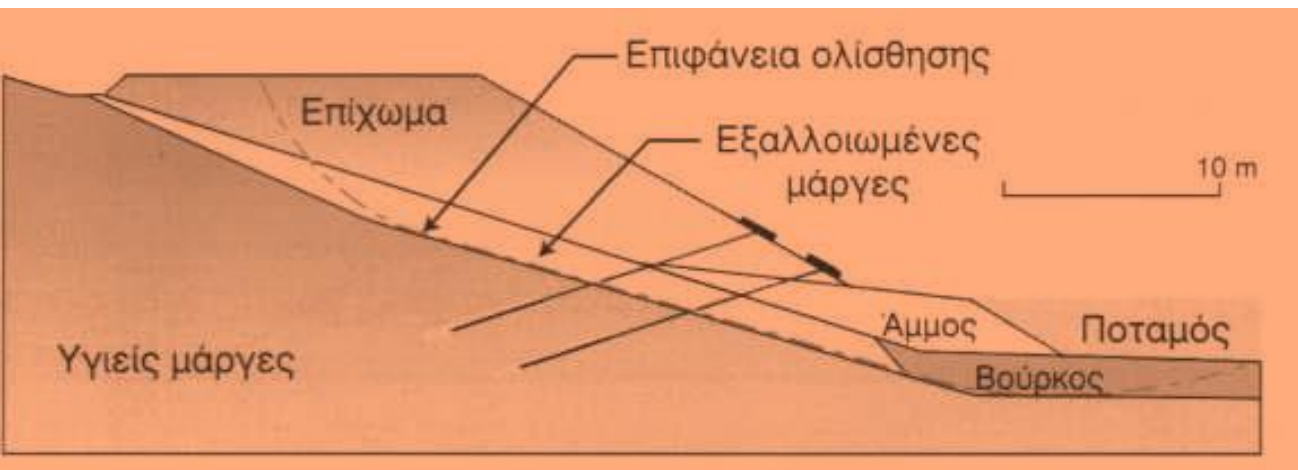
## 15.1. Παραμορφώσεις και αστοχίες οδικών επιχωμάτων

❖ Στα προβλήματα οριακής ισορροπίας εντάσσονται όλα τα θέματα αστοχιών, οι περιπτώσεις, δηλαδή, ολίσθησης πρανούς, ποδός και βαθιάς ολίσθησης, που διερευνήθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

➤ Το μέτρα σταθεροποίησης και προστασίας, που πρέπει σε κάθε ιδιαίτερη περίπτωση να έχουν ως στόχο τη διατήρηση της αρτιότητας της κατασκευής (Σχ. 110).

- Στα προβλήματα παραμορφώσεων ανήκουν τα φαινόμενα συνίζησης και καθίζησης του επιχώματος.

- Αντίστοιχα μέτρα μείωσης ή αποτροπής της εκδήλωσης σημαντικών παραμορφώσεων θα πρέπει να εφαρμόζονται σε κάθε σύγχρονη γεωκατασκευή που κινητοποιεί και απορροφά μεγάλους όγκους χωματισμών και προκαλεί ανάπτυξη υψηλών τάσεων στο υπέδαφος.



Σχήμα 110. Μέτρα σταθεροποίησης επιχώματος.

## 15.2. Συνίζηση επιχώματος

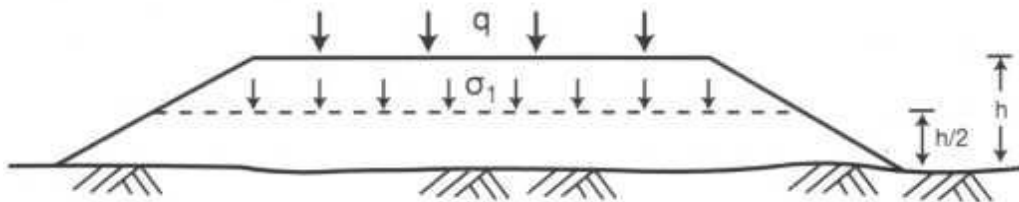
- Συνίζηση ονομάζεται η κατακόρυφη παραμόρφωση του σώματος του επιχώματος (self-settlement) η οποία οφείλεται αποκλειστικά και μόνον στην παραμορφωσιμότητα των υλικών επίχωσης.
- Εκδηλώνεται, εν μέρει στη φάση της κατασκευαστικής διαδικασίας και, κυρίως, της συμπύκνωσης, κα εν μέρει στη φάση λειτουργίας του έργου.
- Επειδή η συνίζηση των υλικών επίχωσης κατά τη διαδικασία συμπύκνωσης είναι γνωστή και λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιάσμό αλλά και κατά την εκτέλεση του έργου, το ενδιαφέρον, συνήθως, στρέφεται προς τη συνιστώσα που αναφέρεται στη φάση λειτουργίας του έργου.
- Συχνά, ο όρος “συνίζηση” περιλαμβάνει μόνον τη συνιστώσα της κατακόρυφης παραμόρφωσης του επιχώματος, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του έργου.
- Μέθοδοι υπολογισμού της συνίζησης επιχειρούν να προσδιορίσουν την κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης του επιχώματος υπό τη δράση των φορτίων λειτουργίας, που αποτελεί και το κρίσιμο μέγεθος για τη συμπεριφορά της γεωκατασκευής.

## 15.2. Συνίζηση επιχώματος

❖ Μια απλή προσέγγιση για την εκτίμηση της μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης  $\Delta h$  της στέψης του επιχώματος είναι η παραδοχή της μονοαξονικής επιπόνησης ελαστικού μέσου.

▪ Η συνίζηση, στον άξονα συμμετρίας προσδιορίζεται (Σχ. 111):

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma_1 + q}{E}$$



Σχήμα 111. Υπολογισμός συνίζησης επιχώματος.

- όπου  $\Delta h$  : η κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης του επιχώματος
- $h$  : το ύψος του επιχώματος
- $\sigma_1$  : η κατακόρυφη τάση στο μέσο του ύψους του επιχώματος
- $q$  : η επιφόρτιση λόγω φορτίου οδοστρώματος και κυκλοφορίας
- $E$  : το μέτρο ελαστικότητας του υλικού επίχωσης που αντιστοιχεί στις επί τόπου συνθήκες συμπίκνωσης.

## 15.2. Συνίζηση επιχώματος

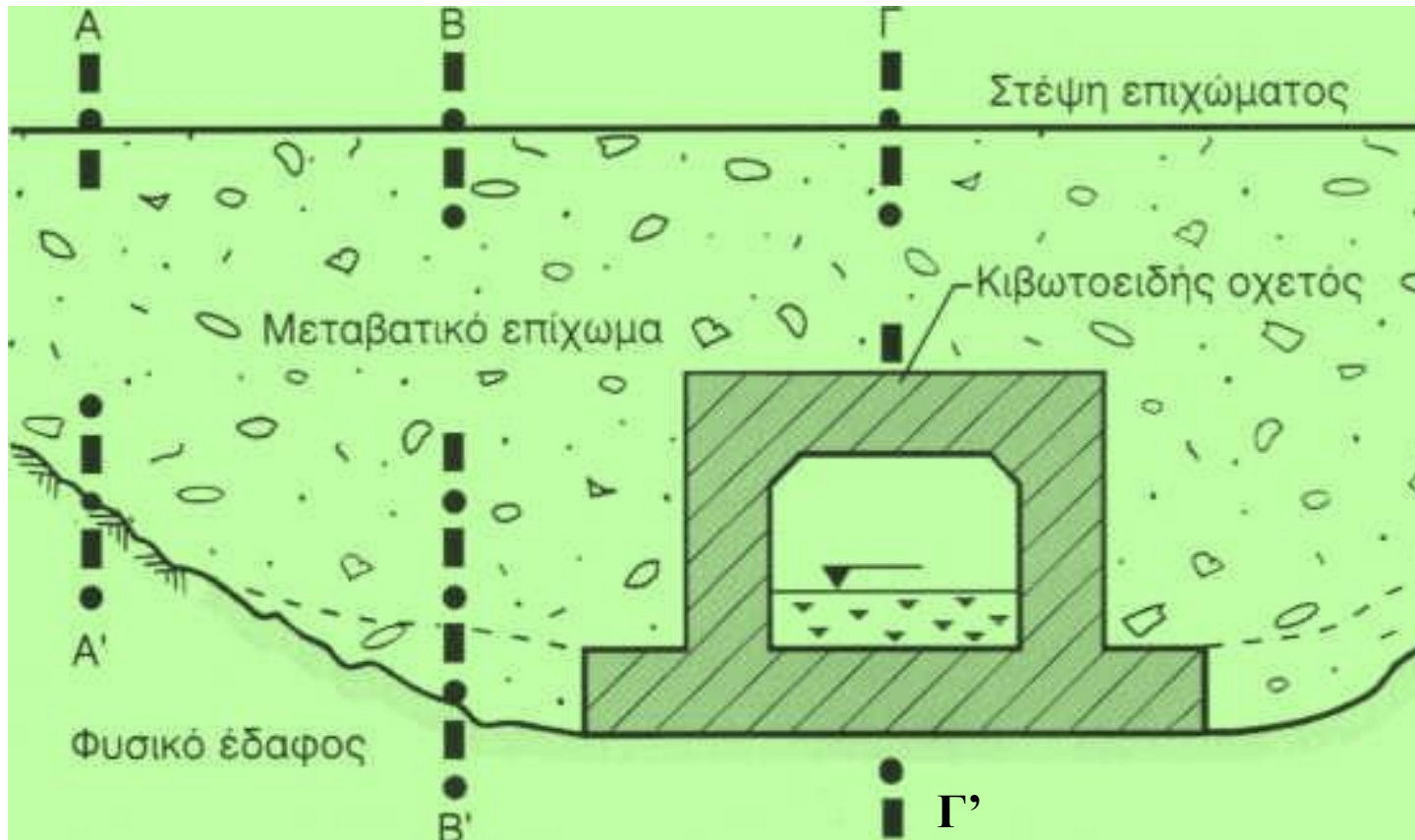
- ✓ Η απλή αυτή προσέγγιση, αν και θεωρητικώς εμπεριέχει ορισμένες απλοποιητικές παραδοχές, κυρίως λόγω του ότι αγνοεί την πλευρική συνιστώσα της τάσης, είναι αρκετά ακριβής.
- Η μείωση της τιμής της συνίζησης λόγω πλευρικής τάσης εξισορροπείται από την πλαστική παραμόρφωση, που, για λόγους απλότητας, και αυτή αγνοείται.
- Η προτεινόμενη σχέση, συνεπώς, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να προσδιορίσει με αρκετή ακρίβεια το μέγεθος της συνίζησης, ιδιαίτερα σε επιχώματα μεγάλου πλάτους.
- Γενικώς, σε οδικά επιχώματα, η συνίζηση που παρατηρείται στη στέψη της γεωκατασκευής δεν πρέπει να ξεπερνά ένα μέγιστο όριο:

$$\Delta h = 0,5\% \times h$$

- Σε περιπτώσεις ειδικών επιχωμάτων, μεταβατικών ή εκείνων που είναι σε επαφή με άλλα τεχνικά έργα, το μέγιστο όριο μπορεί να είναι και ακόμη μικρότερο.
- Η όλη ανάλυση του προσδιορισμού της συνίζησης του επιχώματος προϋποθέτει απαραμόρφωτο υπέδαφος.
- Στην πραγματικότητα, η συνολική κατακόρυφη μετατόπιση της στέψης των οδικών επιχωμάτων οφείλεται σε καθίζηση λόγω παραμόρφωσης του υπεδάφους, ενώ το φαινόμενο της συνίζησης αφορά μικρή μόνον μετατόπιση, συνήθως της τάξης λίγων εκατοστών.

## 15.3. Μεταβατικά επιχώματα

- Ειδική περίπτωση φαινομένου αστοχίας οδοστρώματος λόγω συνίζησης του υλικού επίχωσης αποτελεί η περίπτωση των μεταβατικών επιχωμάτων.
- Στην πραγματικότητα η γεωμετρία της κατασκευής (Σχ. 112) δημιουργεί προϋποθέσεις εμφάνισης φαινομένου διαφορικής συνίζησης, αλλά και διαφορικής καθίζησης.
- Έτσι, μια σημαντική κατακόρυφη μετατόπιση παρατηρείται στη διατομή Β-Β', ενώ μικρότερη είναι η παραμόρφωση της διατομής Α-Α' και ασήμαντη στη διατομή Γ-Γ'.

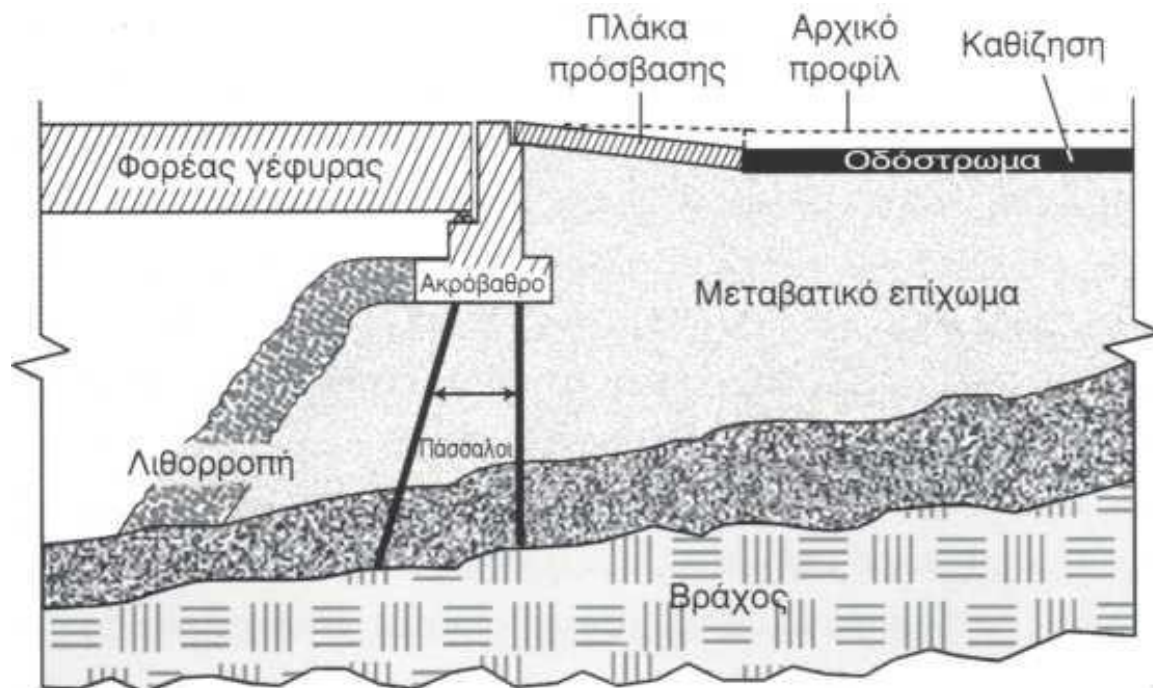


Σχήμα 112. *Καθιζήσεις σε μεταβατικό επίχωμα.*



## 15.3. Μεταβατικά επιχώματα

- ❖ Ανάλογο είναι και το φαινόμενο της καθίζησης των πλακών πρόσβασης στα ακρόβαθρα γεφυρών.
- Οι μετατοπίσεις είναι και στις περιπτώσεις αυτές σημαντικές (Σχ. 113) ειδικά όταν η κατασκευή δεν είναι επιμελημένη.
- Το φαινόμενο της χαρακτηριστικής αυτής παραμόρφωσης (“σαμάρι”) στα μεταβατικά επιχώματα είναι αρκετά διαδεδομένο στους ελληνικούς δρόμους.
- **Μέτρα κατάλληλα να αποτρέψουν τα συναφή δυσάρεστα επακόλουθα θα πρέπει να προβλέπονται και να εκτελούνται στη φάση της κατασκευής.**



Σχήμα 113. *Καθίζηση πλάκας πρόσβασης σε ακρόβαθρο γέφυρας.*

## 15.4. Αστοχίες λόγω καθίζησης

- ❖ Η κατασκευή οδικών επιχωμάτων προκαλεί παραμορφώσεις στη μάζα του υπεδάφους, οι οποίες πολλές φορές είναι σημαντικές σε μέγεθος και εξελίσσονται μέσα στο χρόνο, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται βλάβες στο οδόστρωμα και στην επιφάνεια κυκλοφορίας της οδού μετά την περάτωση του έργου.
- ❖ Οι αστοχίες λόγω καθίζησης δημιουργούν σοβαρά προβλήματα και είναι δυνατό να οδηγήσουν σε οριακή κατάσταση το οδόστρωμα από πλευράς λειτουργικότητας, ενώ η διαδικασία επανακατασκευής είναι δύσκολη από τεχνική άποψη και απαιτεί μεγάλο κόστος.
- ✓ Το φαινόμενο πρέπει να μελετηθεί στο σύνολο του προ της κατασκευής και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα που θα αποτρέψουν την εμφάνιση σημαντικών παραμορφώσεων στο σώμα της οδού.
- ✓ Λόγω του γραμμικού χαρακτήρα των οδικών έργων, το φαινόμενο της καθίζησης είναι δυνατό να θεωρηθεί και να μελετηθεί ως πρόβλημα επίπεδης παραμόρφωσης.
- ✓ Η ανάλυση του προβλήματος στρέφεται γύρω από δυο άξονες: τον υπολογισμό του μεγέθους της τελικής καθίζησης και την παρακολούθηση της πορείας του φαινομένου μέσα στο χρόνο.
- Ανεξαρτήτως, όμως, της θεωρητικής μελέτης, παράγοντες όπως η ποιότητα των υλικών επίχωσης και οι συνθήκες αποστράγγισης παίζουν σημαντικό ρόλο και θα πρέπει να επιδιώκονται οι οποιοσδήποτε δυνατές βελτιώσεις για να αποφευχθούν οι μεγάλες μετατοπίσεις και αστοχίες.
- ✓ Έτσι, η επιλογή του καταλληλότερου από τα διαθέσιμα υλικά σε συνδυασμό με διατάξεις αποστράγγισης του υπεδάφους, σε περιπτώσεις υψηλού υδροφόρου ορίζοντα, μπορούν να δημιουργήσουν προϋποθέσεις σταθερής μηχανικής συμπεριφοράς στις γεωκατασκευές.

## 15.4. Αστοχίες λόγω καθίζησης

- Αν και η εξέλιξη των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών σε συνδυασμό με χρήση αριθμητικών μεθόδων έδωσε πολύ μεγάλες δυνατότητες επίλυσης προβλημάτων συμπεριφοράς οδικών επιχωμάτων κατά τα τελευταία χρόνια, ωστόσο το πρόβλημα δεν μπορεί να θεωρηθεί οριστικά λυμένο.
- ❑ Όλες οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, αναλυτικές και αριθμητικές, βασίζονται υποχρεωτικά σε προσεγγίσεις, σχηματοποιήσεις και παραδοχές που αλλοιώνουν λιγότερο ή περισσότερο την εικόνα του φαινομένου.
- Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι, αν στον χώρο της αριθμητικής επίλυσης η πρόοδος ήταν ραγδαία, στον χώρο της γεωτεχνικής αναγνώρισης παραμένουν οι αδυναμίες επακριβούς προσδιορισμού διαφόρων φυσικών και μηχανικών παραμέτρων.
- Έτσι, παράμετροι όπως οι
  - ελαστικές σταθερές,
  - η διαπερατότητα,
  - ο συντελεστής ερπυσμού,
  - σε συνδυασμό με την ετερογένεια και την ανισοτροπία των εδαφικών υλικών παρουσιάζουν δυσκολίες επακριβούς εκτίμησης.

## 15.4. Αστοχίες λόγω καθίζησης

- ❖ Μέσω στατιστικής έρευνας έχει διαπιστωθεί ότι οι τιμές των εργαστηριακών αποτελεσμάτων συχνά απέχουν αρκετά από την πραγματικότητα.
- Ακόμη περισσότερο, έχει αποδειχθεί ότι η γεωμηχανική προσομοίωση μιας υπεδάφιας μάζας που χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς ελάχιστα ανταποκρίνεται στις πραγματικές επί τόπου συνθήκες.
- Από την άλλη μεριά, μια εκτεταμένη και διεξοδική γεωτεχνική έρευνα του εδάφους έδρασης ενός επιχώματος είναι ασύμφορη για ένα έργο που εμφανίζει μικρό κόστος σε σχέση με την έκταση που καταλαμβάνει.
- ✓ Κατ' ανάγκη λοιπόν, ο Μηχανικός είναι συχνά υποχρεωμένος να αντιμετωπίσει το πρόβλημα έχοντας στη διάθεση του μόνον εργαστηριακά δεδομένα δοκιμών κατάταξης (κοκκομετρία, όρια Atterberg) που συμπληρώνονται, ενδεχομένως από στοιχεία εργαστηριακών δοκιμών συμπίεστικότητας ανάλογα με τη σημασία του έργου.
- Στις περιπτώσεις αυτές οι υπολογισμοί περιορίζονται σε ποιοτικές εκτιμήσεις όπου η χρήση απλών ημιεμπειρικών μεθόδων είναι η περισσότερη ενδεδειγμένη.

## 15.5. Μέγεθος καθίζησης

- ❖ Η καθίζηση ενός επιχώματος οφείλεται κυρίως στην κατακόρυφη μετατόπιση της επιφάνειας του φυσικού εδάφους, εφόσον το ίδιο το επίχωμα θεωρείται ουσιαστικά απαραμόρφωτο υπό την επίδραση των κατακόρυφων φορτίων του οδοστρώματος και της κυκλοφορίας.
- ❖ Τα φορτία του οδοστρώματος και του επιχώματος είναι στην πραγματικότητα το ίδιο βάρος των υλικών ενώ για τα φορτία κυκλοφορίας γίνεται μια παραδοχή αναγωγής των φορτίων των οχημάτων σε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στην επιφάνεια του οδοστρώματος (Πίν. 56).

Πίνακας 56. *Επιφόρτιση λόγω κυκλοφορίας*

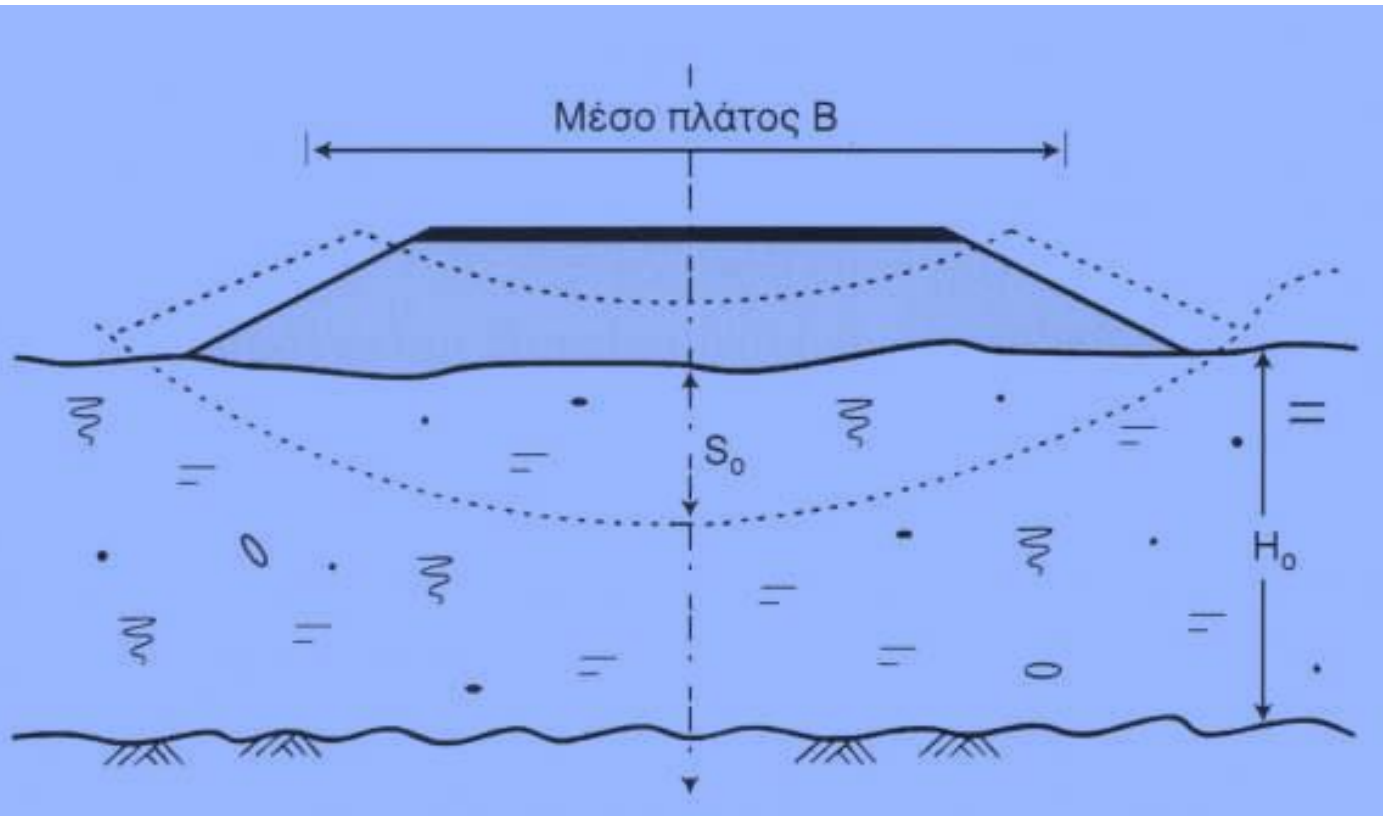
Ύψος επιχώματος	Ισοδύναμη επιφόρτιση
$h < 2 \text{ m}$	2,0 $\text{t/m}^2$
$h = 2\text{-}5 \text{ m}$	1,5 $\text{t/m}^2$
$h > 5 \text{ m}$	1,0 $\text{t/m}^2$

## 15.5. Μέγεθος καθίζησης

- ❖ Συνήθως, το ενδιαφέρον εστιάζεται στη μεγίστη κατακόρυφη μετατόπιση που παρατηρείται στον άξονα συμμετρίας της οδού, ενώ η καθίζηση κάτω από τους πόδες του επιχώματος είναι αισθητά μικρότερη.
  - ❖ Η γενική έκφραση της τελικής καθίζησης του εδάφους έδρασης κάτω από το φορτίο του επιχώματος έχει ως εξής:  $S_o = S_i + S_c + S_f$
  - όπου  $S_i$  : η άμεση καθίζηση (immediate settlement)
  - $S_c$  : η καθίζηση εκ στερεοποίησης (settlement due to consolidation)  $S_f$  : η δευτερογενής καθίζηση (secondary settlement).
  - Ο πρώτος από τους τρεις παραπάνω όρους αναφέρεται στη στιγμιαία απόκριση της εδαφικής μάζας στην επιβολή των κατακόρυφων φορτίων.
  - Ο δεύτερος όρος αφορά την καθίζηση που οφείλεται στο φαινόμενο της στερεοποίησης.
- Οι παραμορφώσεις στη φάση αυτήν προκαλούνται από τη σταδιακή αύξηση των ενεργών τάσεων, αποτέλεσμα της μεταβίβασης των φορτίων από την υγρά φάση, που παραλαμβάνει αρχικά την εξωτερική φόρτιση, στους στερεούς κόκκους του εδάφους.
- Ο τρίτος όρος περιλαμβάνει την καθίζηση εξ ερπυσμού, όπου οι παραμορφώσεις συντελούνται υπό σταθερή ενεργό τάση.

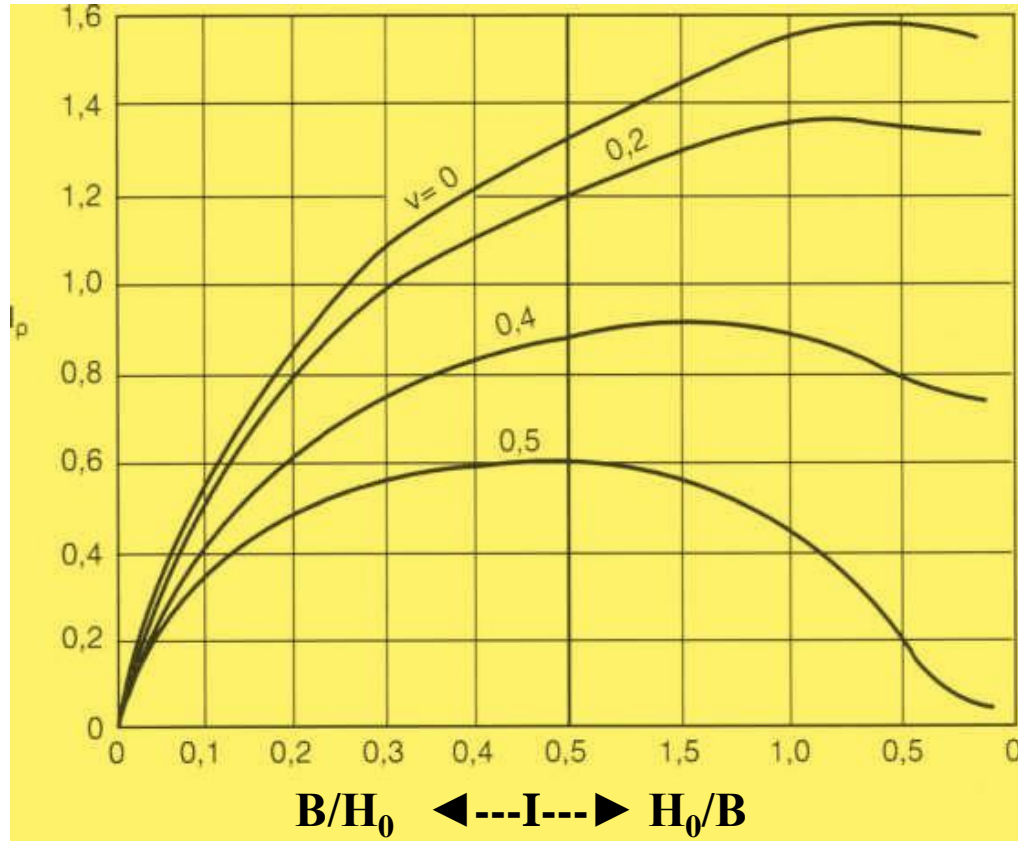
## 15.5. Μέγεθος καθίζησης

- Σε περίπτωση που το υπέδαφος συντίθεται από ψαθυρά εδάφη μεγάλης διαπερατότητας (άμμος, χαλίκια), ο όρος της στερεοποίησης είναι μηδενικός  $S_c = 0$  ενώ ο όρος του ερπυσμού αμελητέος  $S_f \approx 0$ .
- ✓ Η τελική καθίζηση πραγματοποιείται ουσιαστικά αμέσως μετά την επιβολή των φορτίων:  $S_0 = S_i$
- Αντίθετα, στα συνεκτικά εδάφη (αργιλώδη, ιλυώδη και οργανικά εδάφη), για τον υπολογισμό της τελικής καθίζησης, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι τρεις όροι, γεγονός που προϋποθέτει τον προσδιορισμό ενός σημαντικού αριθμού γεωτεχνικών παραμέτρων.



Σχήμα 114. Καθίζηση επιχώματος.

## 15.5. Μέγεθος καθίζησης



Σχήμα 115. Υπολογισμός άμεσης καθίζησης

❖ Ο υπολογισμός της άμεσης καθίζησης βασίζεται στην ελαστική θεωρία. Όταν το συμπιεστό στρώμα του υπεδάφους έχει πεπερασμένο πάχος (Σχ. 115), η άμεση καθίζηση ευρίσκεται [29]:

$$S_i = 2I_p \frac{\rho H_0}{\pi E}$$

- $H_0$ : το πάχος του συμπιεστού υπεδάφους
  - $\rho$ : το κατανεμημένο φορτίο του επιχώματος
  - $B$ : το μέσο πλάτος του επιχώματος
  - $E$ : το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας του υπεδάφους
  - $I_p$ : συντελεστής που προσδιορίζεται συναρτήσει των γεωμετρικών δεδομένων και του συντελεστή Poisson  $\nu$  (Σχ. 115).
- ❖ Η μέθοδος αυτή υποεκτιμά το μέγεθος της καθίζησης, ειδικά όταν πρόκειται για επιχώματα μεγάλου πλάτους  $B > H_0$ .
- ✓ Δίδει, ωστόσο, μια πρώτη προσέγγιση σε περιπτώσεις όπου η ελαστική θεωρία μπορεί να εφαρμοστεί.



## 15.5. Μέγεθος καθίζησης

□ Όταν πρόκειται για ημιάπειρη ελαστική μάζα (Σχ. 116), η άμεση καθίζηση στον άξονα συμμετρίας δίδεται από τη σχέση [28]:

$$S_i = p B \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right) I_\rho$$

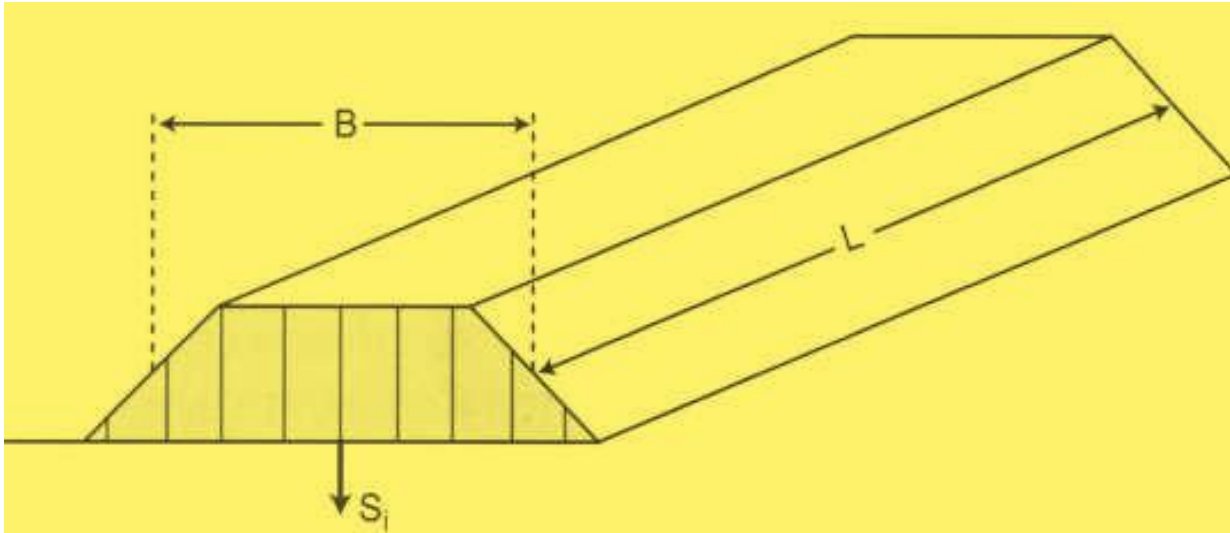
όπου ο συντελεστής  $I_\rho$  προσδιορίζεται συναρτήσει του λόγου  $L/B$ , όπου  $L$  το μήκος και  $B$  το μέσο πλάτος του επιχώματος.

❖ Ορισμένες τιμές του συντελεστή  $I_\rho$  είναι οι ακόλουθες:

- $L/B = 5$        $I_\rho = 2,1$
- $L/B = 10$       $I_\rho = 2,5$
- $L/B = 100$      $I_\rho = 4,0$

➤ Σε αντίθεση με την προηγούμενη, η μέθοδος αυτή οδηγεί σε υπερεκτίμηση της ελαστικής συνιστώσας της καθίζησης.

- Για συνεκτικά εδάφη, το μέτρο ελαστικότητας και για τις δύο μεθόδους θα πρέπει να προσδιορίζεται μέσω τριαξονικών δοκιμών UU.



Σχήμα 116. Άμεση καθίζηση επιχώματος επί ημιάπειρου ελαστικού μέσου

## 15.5. Μέγεθος καθίζησης

❖ Για επιχώματα επί συμπιεστών εδαφών, με υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, η καθίζηση εκ στερεοποίησης είναι το σημαντικότερο μέγεθος κατακόρυφης παραμόρφωσης.

- Η καθίζηση εκ στερεοποίησης  $S_c$  μπορεί να υπολογισθεί κατά την οιδημετρική μέθοδο σύμφωνα με τη σχέση:

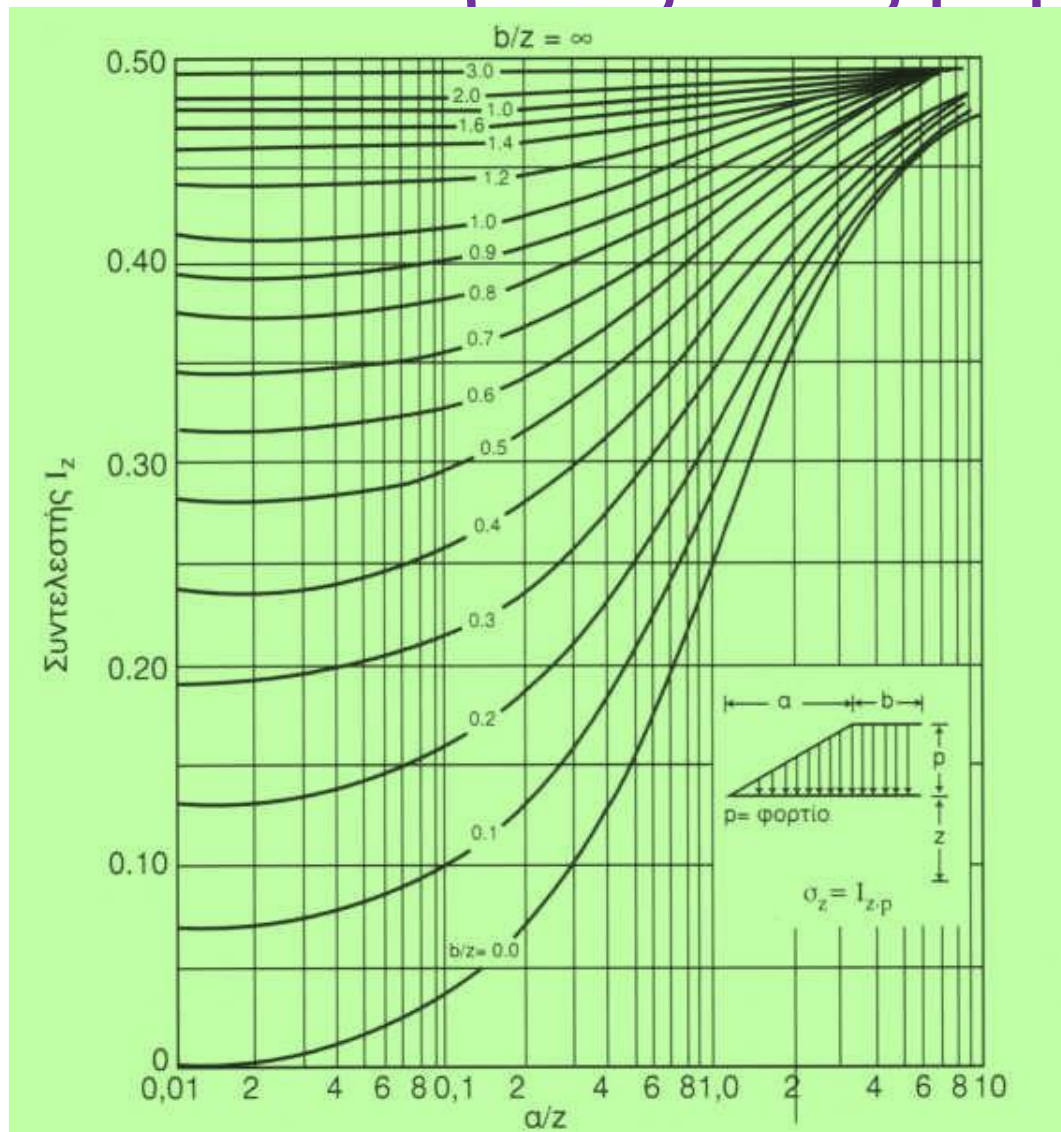
$$S_c = H_o \left[ \frac{C_s}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_o} + \frac{C_c}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_p} \right]$$

❖ Όπου:

- $H_o$  : το πάχος του συμπιεστού στρώματος
- $C_s, C_c$  : συντελεστές δοκιμής οιδημέτρου
- $e_o$  : ο αρχικός δείκτης πόρων
- $\sigma'_o$  : η αρχική κατακόρυφη τάση
- $\sigma'_p$  : η τάση υπερστερεοποίησης
- $\Delta\sigma'$  : η πρόσθετη κατακόρυφη τάση.

✓ Η παραπάνω σχέση ισχύει όταν το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί επίπεδο.

## 15.5. Μέγεθος καθίζησης



Σχήμα 117. Νομογράφημα υπολογισμού των κατακόρυφων τάσεων κάτω από επίχωμα.

➤ Οι τάσεις  $\sigma'_o, \sigma'_p, \Delta\sigma'$  είναι ενεργές τάσεις (effective stresses) και υπολογίζονται στο μέσο του πάχους του συμπιεστού στρώματος.

- Η τάση υπερστερεοποίησης υπολογίζεται από το διάγραμμα συμπίεστούτητας της οιδημετρικής δοκιμής, ενώ η πρόσθετη κατακόρυφη τάση προσδιορίζεται συναρτήσει της πίεσης  $p$  λόγω φορτίου επιχώματος και του βάθους αναφοράς  $z$ .

➤ Συνήθως χρησιμοποιούνται οι λύσεις του Osterberg που δίνουν την πρόσθετη τάση  $\Delta\sigma$  ως ποσοστό της συνολικής επιφόρτισης  $p$  σύμφωνα με τη γεωμετρία του προβλήματος (Σχ. 117).

$$\Delta\sigma_v = I_z p$$

# 15.5. Μέγεθος καθίζησης

□ Η οιδημετρική μέθοδος για τον υπολογισμό της καθίζησης εκ στερεοποίησης είναι δυνατό να εφαρμοσθεί για στρωματοποιημένη ετερογενή μάζα, υπό την προϋπόθεση ότι για κάθε στρώση είναι γνωστές οι παράμετροι που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς.

✓ Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και κυρίως από το λόγο  $B/H_0$ .

• Όταν ο λόγος  $B/H_0$  παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας, τότε οι υπολογισμοί δίνουν για την καθίζηση τιμή μικρότερη από την πραγματική αγνοώντας την επίδραση των πλαγίων μετατοπίσεων.

❖ Η δευτερογενής καθίζηση  $S_f$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$S_f = H_0 \frac{C_f}{1 + e_0} \log \frac{t_0}{t_1}$$

• όπου  $C_f$  : ο συντελεστής ερπυσμού

•  $t_0$  : χρόνος δευτερογενούς καθίζησης

•  $t_1$  : χρόνος αναφοράς (συνήθως  $t_1 = 1$ )

• Σε περίπτωση που τα στοιχεία των εργαστηριακών δοκιμών δεν είναι αρκετά, μια σχέση συνυπολογισμού της καθίζησης εκ στερεοποίησης και της δευτερογενούς καθίζησης για εδάφη που δεν παρουσιάζουν έντονη υπερστερεοποίηση είναι η εξής:

$$S_{cf} = S_c + S_f = H_0 \frac{C_c}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_p}$$

# 15.5. Μέγεθος καθίζησης

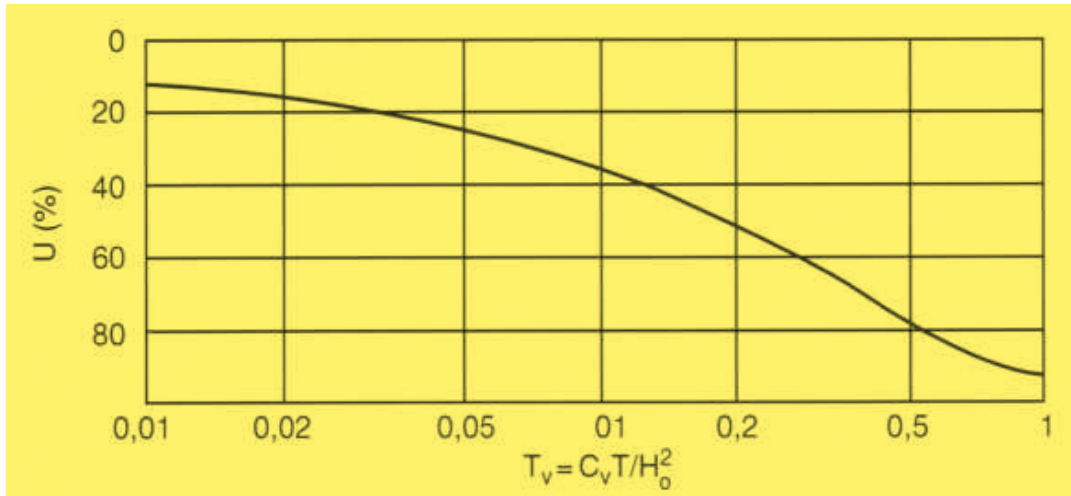
- ❖ Οι παραπάνω αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της καθίζησης προϋποθέτουν, παρ' όλη την απλότητα τους, τη γνώση ορισμένων παραμέτρων.
- ✓ Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών απαιτεί ένα σημαντικό αριθμό δοκιμών, οι οποίες σπάνια εκτελούνται στα κοινά έργα οδοποιίας, οπότε ο Μηχανικός υποχρεώνεται σε εμπειρικές συσχετίσεις και βιβλιογραφικές αναφορές. Κλασικό παράδειγμα αποτελούν οι σχέσεις υπολογισμού του δείκτη συμπίεσης  $C_c$  και του δείκτη διόγκωσης  $C_s$  από το όριο υδαρότητας  $WL$  (%):

$$C_c = 0,009 \times (WL - 10)$$

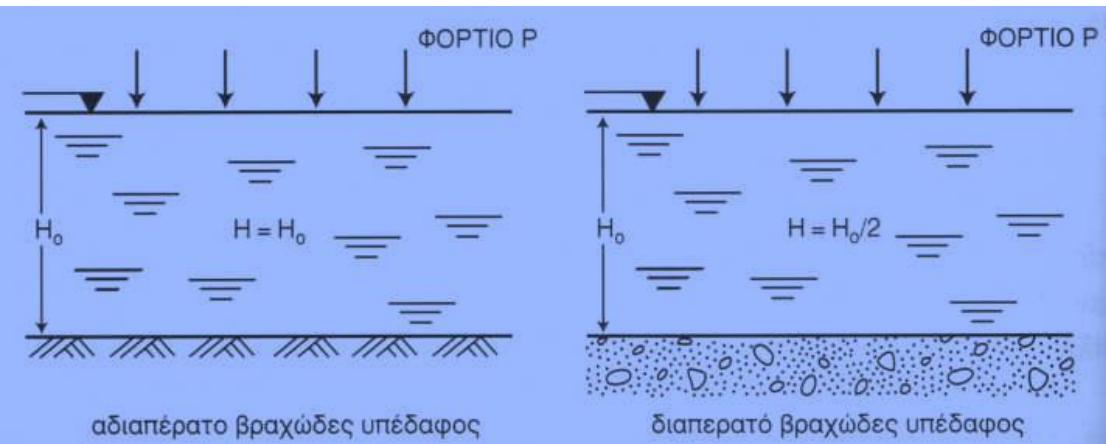
$$C_s = 0,0463 \times (WL/100) \times \gamma_s$$

- Γενικά η χρήση αναλυτικών μεθόδων σε συνδυασμό με εμπειρικές συσχετίσεις εγκυμονεί κινδύνους σημαντικών σφαλμάτων και για τον λόγο αυτόν αντενδείκνυται σε περιπτώσεις έργων μεγάλης σπουδαιότητας, όπου μια πλήρης εργαστηριακή ανάλυση είναι απαραίτητη.
- ✓ Το ζήτημα του μεγέθους της καθίζησης και η εξέλιξη του φαινομένου όπως περιγράφεται στη συνέχεια, πρέπει να αποτελούν αντικείμενο ειδικής μελέτης στη φάση του σχεδιασμού.
- Αν και σαφή όρια είναι δύσκολο να καθοριστούν, ωστόσο συνιστάται η εκπόνηση πλήρους μελέτης για επιχώματα ύψους μεγαλύτερου των 5 m σε υπεδάφη μεγάλης συμπίεστότητας (CL, CH, MH, OH, Pt) και υψηλής στάθμης υδροφόρου ορίζοντα και για επιχώματα ύψους μεγαλύτερου των 10 m για υπεδάφη μέσης συμπίεστότητας (SM, SC, ML) και ενδιάμεσης στάθμης υδροφορίας.

# 15.6. Ταχύτητα καθίζησης



Σχήμα 118. Προσδιορισμός του βαθμού στερεοποίησης.



Σχήμα 119. Αποστράγγιση από μια και δύο επιφάνειες.

❖ Μια απλή μέθοδος για την εύρεση της ταχύτητας καθίζησης είναι η μέθοδος Terzaghi. Υπό την προϋπόθεση ότι η αποστράγγιση συντελείται μόνο κατά την κατακόρυφη έννοια, ο βαθμός στερεοποίησης  $U_t$  σε κάθε χρονική στιγμή ευρίσκεται από νομογραφήματα συναρτήσεως του παράγοντα χρόνου  $T_v = C_v t / H^2$ .

❖ Απαραίτητος για τους υπολογισμούς είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή στερεοποίησης  $C_v$  από οιδημετρικές δοκιμές ( $C_v = k / m_v / \gamma_w$ ). Το ύψος  $H$  λαμβάνεται ίσο προς το πάχος  $H_0$  του συμπιεστού στρώματος για μια επιφάνεια αποστράγγισης και ίσο με  $H_0/2$  για δύο επιφάνειες αποστράγγισης (Σχ. 118 & 119).

• Ο υπολογισμός του βαθμού στερεοποίησης  $U_t$  για κάθε χρονική στιγμή ( $t$ ) δίδει την τιμή της καθίζησης μέσα στον χρόνο:

$$S_t = S_i + U_t S_c$$

➤ Έτσι είναι γνωστή η πορεία του φαινομένου μέσα στον χρόνο με συνέπεια να μπορεί εκ των προτέρων να προσδιοριστεί, για τις χρονικές στιγμές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον π.χ. πέρασ χωματουργικών εργασιών, ολοκλήρωση εργασιών οδοστρωσίας, διάστρωση ασφαλτοτάπητα κυκλοφορίας, το ποσοστό της συνολικής καθίζησης που έχει ήδη πραγματοποιηθεί.

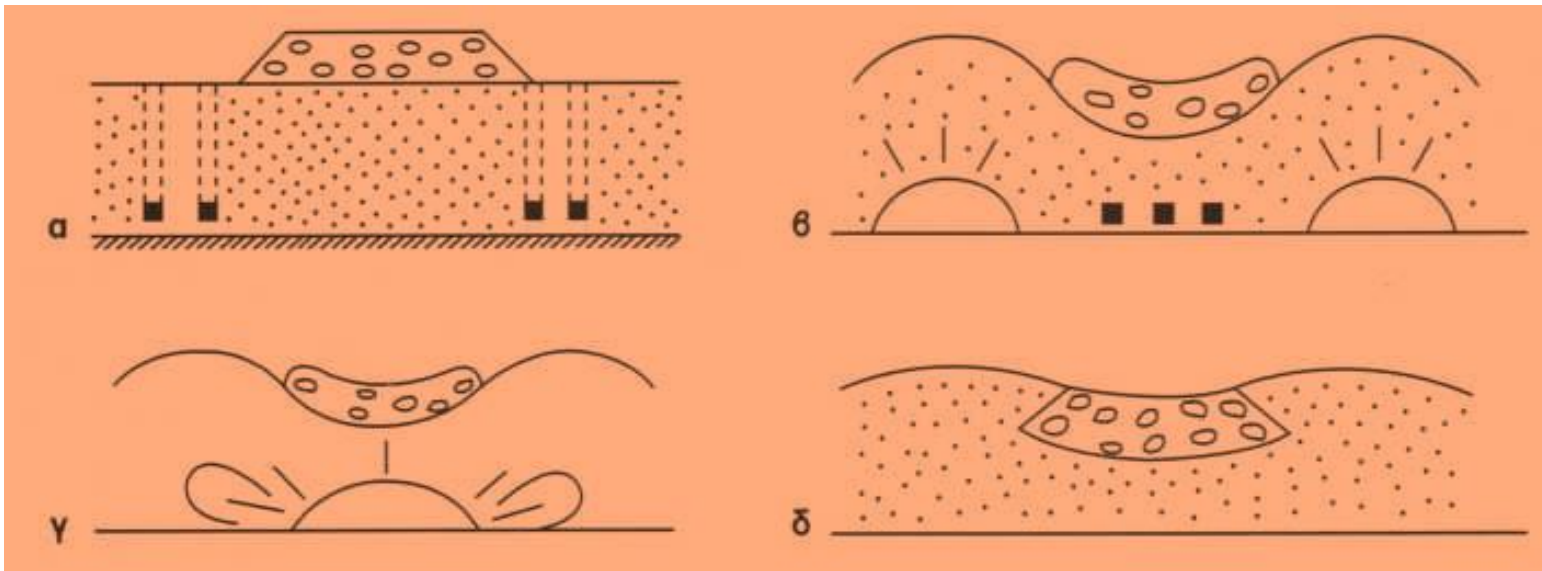
## 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

- Η κατασκευή υψηλών οδικών επιχωμάτων παρουσιάζει προβλήματα, όταν το έδαφος αποτελείται από συμπιεστά υλικά:
  - αργιλώδη,
  - ιλυώδη και
  - οργανικά εδάφη.
- Το μέγεθος της καθίζησης είναι σημαντικό και η διάρκεια του φαινομένου μπορεί να ξεπεράσει τα 5 χρόνια σε υλικά μικρής διαπερατότητας και συμπιεστά στρώματα μεγάλου πάχους.
- Για την αντιμετώπιση ανάλογων καταστάσεων, εφαρμόζονται βελτιωτικές μέθοδοι, οι οποίες έχουν στόχο να αποκαταστήσουν την ισορροπία του συστήματος “επίχωμα-υπέδαφος” στο βραχύτερο δυνατό χρόνο, περιορίζοντας ταυτόχρονα το μέγεθος των καθιζήσεων.

## 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

□ Οι κυριότερες από τις μεθόδους αυτές, οι οποίες εκ παραλλήλου, μπορεί να αυξάνουν τη μηχανική αντοχή και να μειώνουν κινδύνους ολίσθησης ή ρευστοποίησης του υπεδάφους, είναι:

- ✓ Η μερική ή ολική αντικατάσταση του υπεδάφους. Εκτελείται, πριν αρχίσουν οι εργασίες επιχωμάτωσης, εκσκαφή σε βάθος ανάλογο με το πάχος του συμπιεστού στρώματος και απομάκρυνση του υλικού. Στη συνέχεια τοποθετείται στη θέση του υγιές υλικό, συνήθως θραυστό λατομείου ή κροκάλες, μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και για τον λόγο αυτόν, η τεχνική αυτή ονομάζεται και εξυγίανση του υπεδάφους.
- ✓ Η μέθοδος είναι δυνατό να συνδυασθεί με την τεχνική των εκρήξεων, όπου η απομάκρυνση του υλικού επιτυγχάνεται δια πυροδότησης εκρηκτικών που έχουν τοποθετηθεί στον πυθμένα του συμπιεστού στρώματος και συγχρόνως το θραυστό υλικό που ευρίσκεται στην επιφάνεια μετατοπίζεται κατακόρυφα λόγω ίδιου βάρους (Σχ. 120).

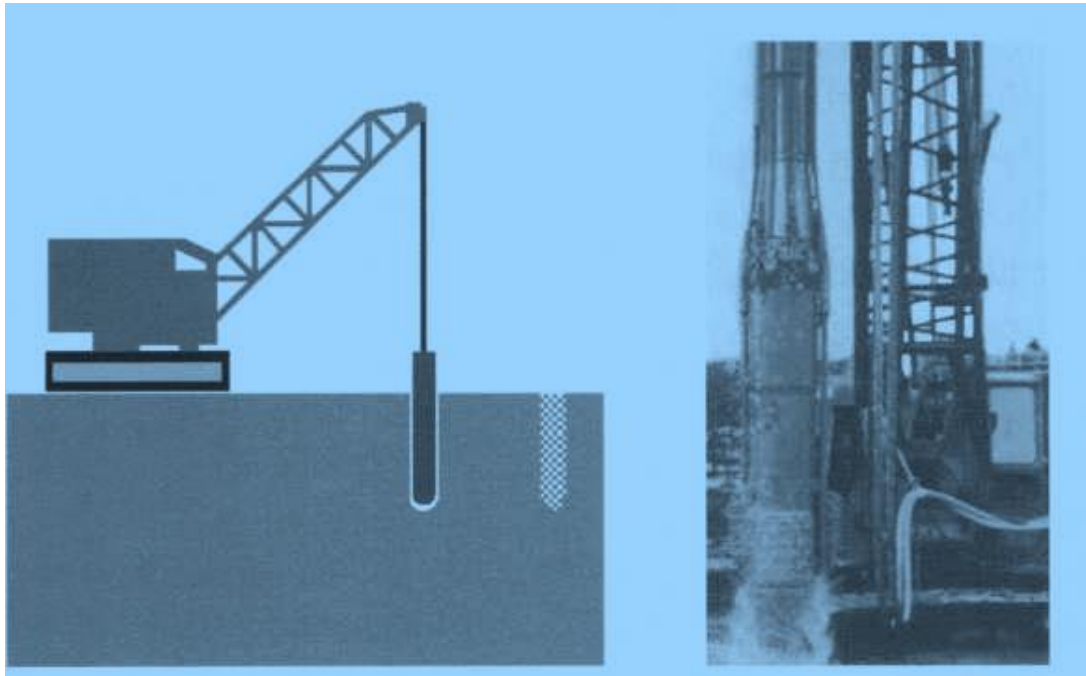


Σχήμα 120. *Αντικατάσταση υπεδάφους δι' εκρηκτικών.*



# 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

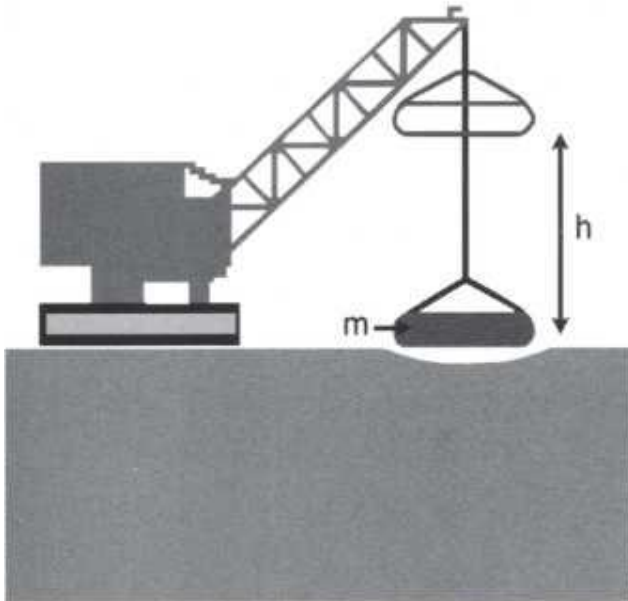
- Η δονητική συμπίκνωση (vibro-compaction) που εφαρμόζεται για αύξηση της φέρουσας ικανότητας χονδρόκοκκων εδαφών.
- Καταλληλότερα για εφαρμογή της τεχνικής αυτής είναι εδάφη με μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων (< 15%).
- ✓ Η τεχνική απαιτεί ειδικό εξοπλισμό που αποτελείται από ένα δονούμενο έμβολο μεγάλου βάρους ανηρτημένου σε έναν ερπυστριοφόρο γερανό.
- Το έμβολο διεισδύει λόγω ασκούμενης πίεσης στο έδαφος και, μέσω της δόνησης, προκαλεί συμπίκνωση σε μια ακτίνα 2,50 m.
- ✓ Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για βελτίωση χαρακτηριστικών υπεδάφους μέχρι βάθος 10 m (Σχ. 121).



Σχήμα 121. Δονητική συμπίκνωση

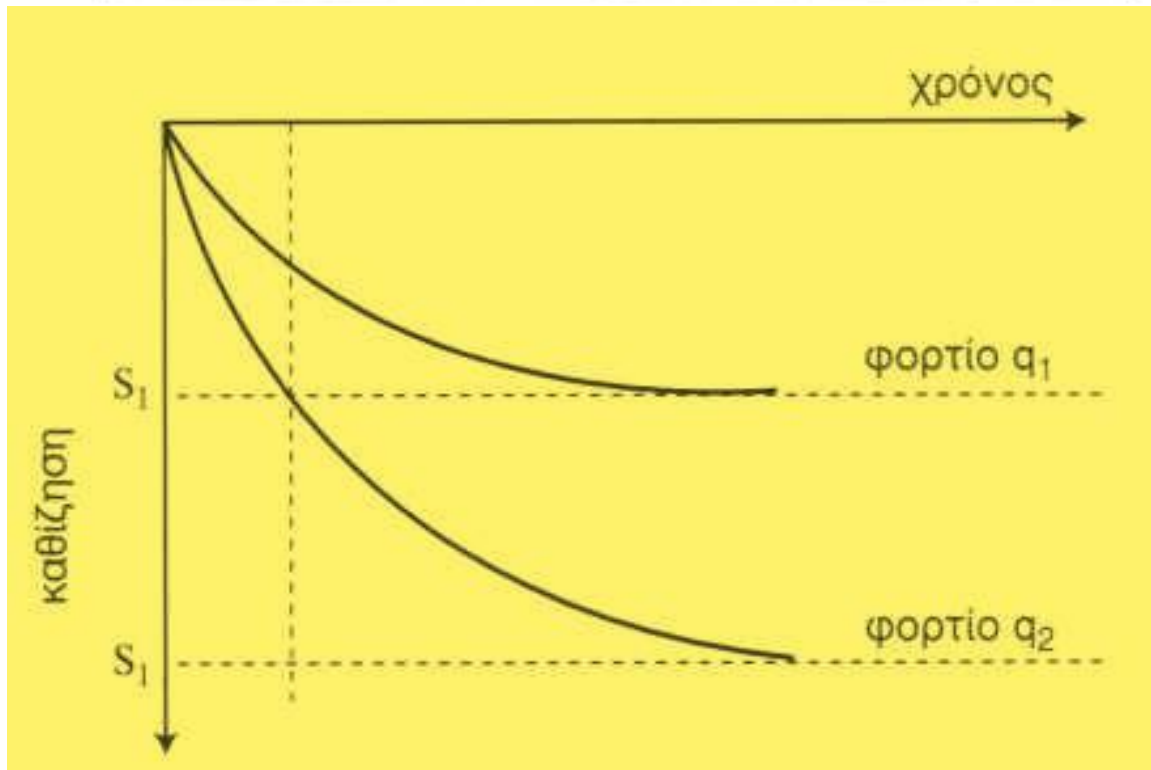
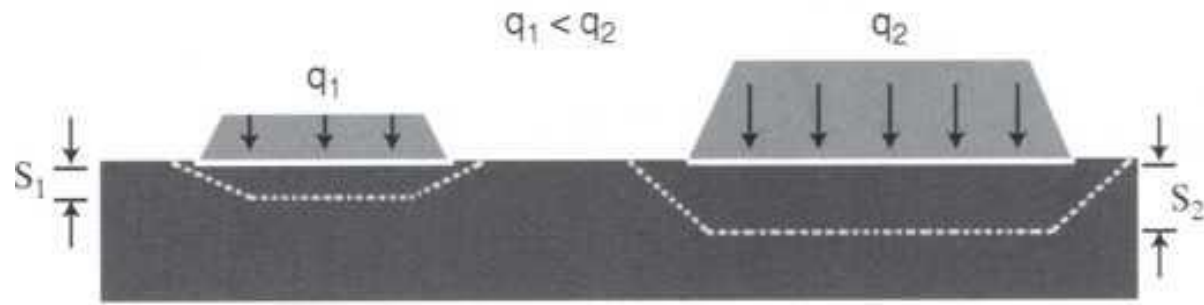
# 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

- Η δυναμική συμπίκνωση (dynamic compaction) χρησιμοποιείται για βελτίωση αμμωδών εδαφών.
- Η τεχνική συνίσταται στην πτώση ενός μεγάλου φορτίου (5-10t) από ένα ύψος 5-10 m.
- Το φορτίο είναι ανηρητημένο σε ερπυστριοφόρο γερανό και αφήνεται να προσπέσει στην επιφάνεια του προς συμπίκνωση υπεδάφους.
- Η τεχνική είναι αρκετά δημοφιλής στη Γαλλία όπου πολύ μεγάλα φορτία χρησιμοποιούνται για συμπίκνωση αμμωδών, αμμοϊλυωδών και αργιλοϊλυωδών εδαφών.
- Η **ενέργεια ανά κτύπο είναι** :  $E = mgh$ , όπου  $h$  το ύψος πτώσης του φορτίου. Η ακτίνα εμβέλειας της τεχνικής είναι  $a = n(mh)^{1/2}$ , όπου  $n$  εμπειρικός συντελεστής με τιμές  $n = 0,5-1$  για αμμώδη εδάφη,  $n = 0,3-0,5$  για αργιλικά εδάφη (Σχ. 122).



Σχήμα 122. Δυναμική συμπίκνωση.

# 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους



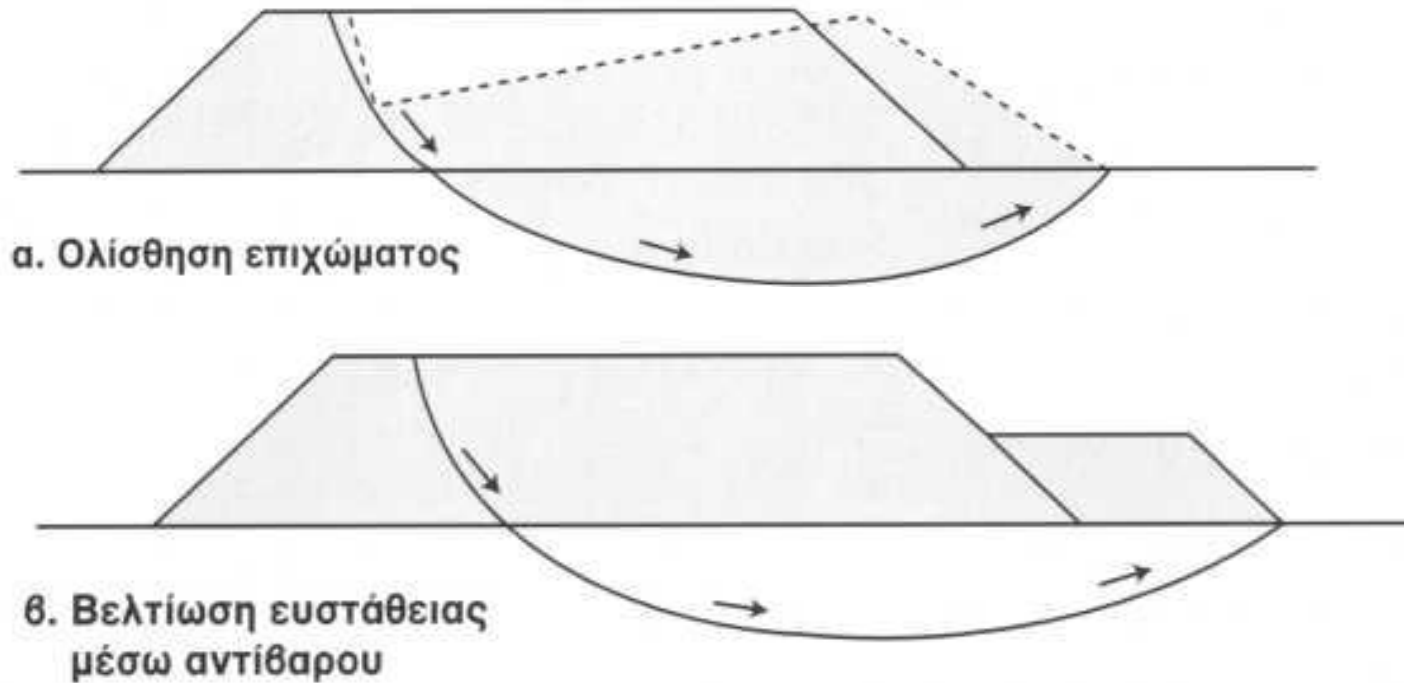
Σχήμα 123. Καθίζηση λόγω προφόρτισης.

- Η προφόρτιση (preloading) που εφαρμόζεται για να επιταχυνθεί η διαδικασία της στερεοποίησης συνεκτικών εδαφών υπό την επίδραση αυξημένου κατακόρυφου φορτίου.
- Το πρόσθετο φορτίο  $\Delta q$ , συνήθως από εδαφικά ή θραυστά υλικά επί της στέψης του επιχώματος, αφαιρείται στην τελική φάση κατασκευής για να τοποθετηθεί το οδόστρωμα (Σχ. 123).
- Για την εκτέλεση της προφόρτισης απαιτείται προηγουμένως έλεγχος της ευστάθειας του επιχώματος το οποίο κινδυνεύει να ολισθήσει υπό την επίδραση αυξημένου φορτίου αν η διατμητική αντοχή του υπεδάφους είναι μικρή.

## 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

□ Η κατασκευή πλευρικών αναχωμάτων.

- Πρόκειται για τεχνική που χρησιμοποιείται για αποτροπή της ολίσθησης του επιχώματος, μέσω της αύξησης των δυνάμεων και της ροπής αντίστασης (Σχ. 124).



Σχήμα 124. Πλευρικά αναχώματα.

## 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

### □ Η σταδιακή κατασκευή.

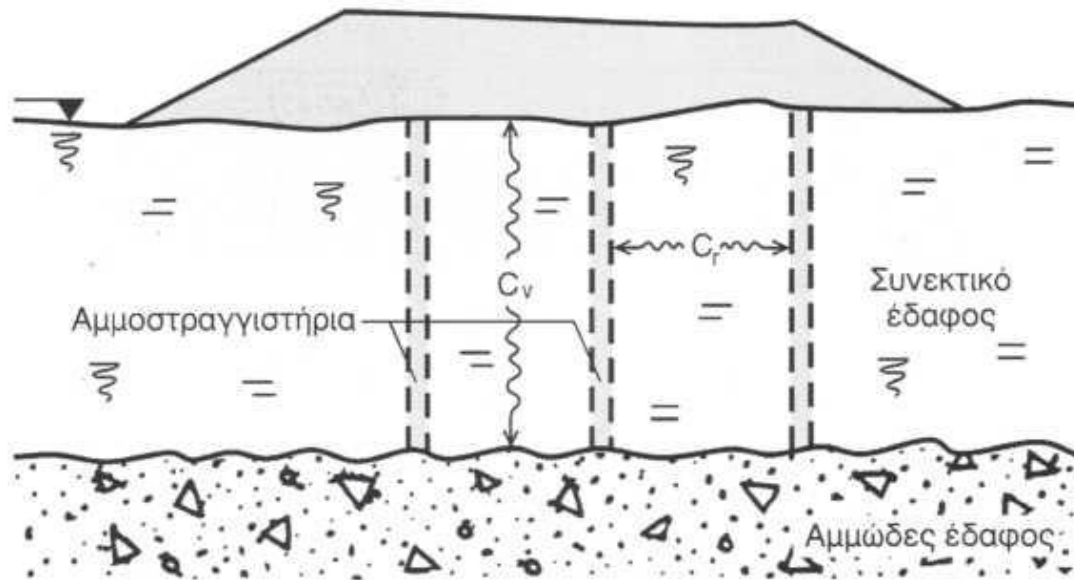
- Όταν το συνολικό φορτίο του επιχώματος είναι μεγάλο, ο κίνδυνος ολίσθησης είναι σημαντικός σε υπεδάφη μικρής διατμητικής αντοχής ( $c_u < 0,5 \text{ kg/cm}^2$ ).
- Δια της σταδιακής κατασκευής επιχώματος επί συνεκτικού υπεδάφους, εξασφαλίζεται προοδευτική αύξηση της διατμητικής αντοχής στο υπέδαφος παράλληλα με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma'_o$ . Εργαστηριακές εμπειρίες έχουν καταγράψει μια σχέση της μορφής:  $\Delta c_u = a \Delta \sigma'_o$

με συντελεστή  $a$  0,20.

- ✓ Έτσι η σταδιακή αύξηση της ενεργού τάσης δημιουργεί σε κάθε χρονική στιγμή τις απαραίτητες συνθήκες ευστάθειας του επιχώματος.

# 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

□ Η εκτέλεση αμμοστραγγιστηρίων και χαλικοπασσάλων που ενδείκνυται για βελτίωση λεπτόκοκκων εδαφών.



Σχήμα 125. Εκτέλεση κατακόρυφων στραγγιστηρίων.

- Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης.
- Κατά την εφαρμογή της τεχνικής αυτής η αποστράγγιση εκτελείται προς δυο διευθύνσεις:
  - με συντελεστή  $C_v$  για την κατακόρυφη αποστράγγιση και
  - συντελεστή  $C_r$  για την ακτινική αποστράγγιση (Σχ. 125).
- Οι χαλικοπάσσαλοι, παράλληλα με την παραπάνω ευεργετική επίδραση, παραλαμβάνοντας ένα μέρος του φορτίου, μειώνουν κατά ένα ποσοστό το μέγεθος της τελικής καθίζησης.

## 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

- Η χημική επεξεργασία.

- Είναι μέθοδος που αποσκοπεί στη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του εδάφους έδρασης του επιχώματος μέσω διάχυσης καταλλήλων ενεμάτων (τσιμέντου, ασφαλτοϋδαρών, μπεντονίνη).
- Συνήθως η τεχνική των ενεμάτων χρησιμοποιείται σε χονδρόκοκκο εδάφη και κατακερματισμένους βράχους.
- Πολλές από τις ως άνω μεθόδους, αλλά και ορισμένες άλλες, συνδυάζονται με χρήση γεωσυνθετικών υλικών που αποτελούν πλέον ένα ικανότατο εργαλείο για αντιμετώπιση προβλημάτων μηχανικής συμπεριφοράς σε γεωκατασκευές οδοποιίας.

# 15.7. Μέθοδοι βελτίωσης του υπεδάφους

Πίνακας 57. Αξιολόγηση ορισμένων μεθόδων βελτίωσης υπεδάφους

a/a	Μέθοδος	Αύξηση φέρουσας ικανότητας	Μείωση ή εξομάλυνση καθίζησης	Μείωση της διάρκειας καθίζησης	Μείωση πιθανότητας ρευστοποίησης	Βελτίωση ευστάθειας έναντι ολίσθησης
1.	Δονητική συμπύκνωση	**	*	—	**	(*)
2.	Αντικατάσταση δι' εκρηκτικών	*	*	—	(*)	—
3.	Δυναμική συμπύκνωση	**	*	—	**	(*)
4.	Προφόρτιση	*	—	*	—	—
5.	Κατακόρυφα στραγγιστήρια	(*)	*	**	—	(*)
6.	Πλευρικά αναχώματα	—	(*)	—	—	**
7.	Εξυγίανση	(*)	(*)	—	(*)	(*)
8.	Χαλικοπάσσαλοι	**	**	*	*	(*)
9.	Τσιμεντενέσεις	*	*	—	—	*
10.	Διατάξεις γεωσυνθετικών	(*)	*	—	—	(*)