



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

«ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ
ΟΛΙΣΘΑΙΝΟΝΤΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Όνομα φοιτητή: ΣΟΦΙΑ ΠΕΠΠΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: ΔΡ. Δ. ΚΑΡΑΜΠΑΤΑΚΗΣ

Επιτροπή:

ΔΡ. ΚΑΡΑΜΠΑΤΑΚΗΣ Δ.

ΔΡ. ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ Α.

ΔΡ. ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ Π.

ΒΟΛΟΣ 2003

Στη γιαγιά μου τη Μηνιά, που με έμαθε
τα πρώτα μου γράμματα.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2519/1

Ημερ. Εισ.: 11-03-2004

Δωρεά:

Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ - ΠΜ

2003

ΠΕΠ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000072561

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1. Ποιοτικές Πληροφορίες Και Περιγραφικά Στοιχεία

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | Γενικά..... | 2 |
| 1.2 | Ορισμός-Συστήματα κατάταξης κατολισθήσεων..... | 3 |
| 1.3 | Παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων..... | 5 |
| 1.4 | Ενδείξεις κίνησης και Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων..... | 10 |
| 1.4.1 | Ενδείξεις κίνησης..... | 10 |
| 1.4.2 | Μέτρα αντιμετώπισης..... | 13 |

Κεφάλαιο 2. Ερπυστική Απόκριση Εδάφους

| | | |
|-------|----------------------------------------------|----|
| 2.1 | Γενικά..... | 19 |
| 2.2 | Παράγοντες Επίδρασης επί του Ερπυσμού..... | 23 |
| 2.3 | Μελέτη του Ερπυσμού..... | 28 |
| 2.3.1 | Φαινομενολογική Προσέγγιση του Ερπυσμού..... | 29 |
| 2.3.2 | Αριθμητική Προσομοίωση..... | 31 |

Κεφάλαιο 3. Προτεινόμενο Εδαφικό Μοντέλο

| | | |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | Παρουσίαση Εδαφικών Ιξώδων - Πλαστικών Μοντέλων..... | 39 |
| 3.2 | Παρουσίαση της Θεωρία του Perzyna για την Ιξώδη-πλαστική απόκριση του εδάφους..... | 39 |
| 3.3 | Προτεινόμενο Εδαφικό Μοντέλο..... | 44 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 | Βασικές Καταστατικές Εξισώσεις..... | 51 |
| 3.4.1 | Μεταβολή του Τανυστή της Ιξώδους-πλαστικής Παραμόρφωσης..... | 53 |
| 3.4.2 | Μεταβολή του Τανυστή της Τάσης..... | 55 |
| 3.4.3 | Εξισώσεις Ισοροπίας..... | 56 |
| 3.5 | Διατύπωση Κριτηρίου Σύγκλισης | 58 |
| 3.6 | Μελέτη του Χρονικού Βήματος Δt | 60 |
| 3.7 | Προτεινόμενος Αλγόριθμος..... | 62 |

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση Προγραμμάτων

| | | |
|-----|-------------------------------------------|----|
| 4.1 | Παρουσίαση Προγραμμάτων..... | 68 |
| 4.2 | Παρουσίαση του προγράμματος CRP1.EXE..... | 69 |

Κεφάλαιο 5. Αριθμητικό Παράδειγμα

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------|----|
| 5.1 | Γενικά..... | 84 |
| 5.2 | Αριθμητική Επίλυση..... | 86 |
| 5.2.1 | Στοιχεία Καννάβου..... | 86 |
| 5.2.2 | Εδαφικές Παράμετροι..... | 86 |
| 5.2.3 | Σύστημα φόρτισης..... | 87 |
| 5.2.4 | Ρυθμός Εξέλιξης του Εντατικού Πεδίου..... | 88 |
| 5.2.5 | Καταστατικός Νόμος..... | 89 |
| 5.2.6 | Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης..... | 89 |
| 5.3 | Ανάλυση της συμπεριφοράς των μέτρων σταθεροποίησης..... | 94 |

Κεφάλαιο 6. Σύνοψη- Συμπεράσματα

| | | |
|-----|-------------------------------------|-----|
| 6.1 | Σύνοψη συμπεράσματα..... | 114 |
| 6.2 | Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα..... | 119 |

Παράρτημα Α. Μοντέλα Διεπιφάνειας

| | | |
|---------|-------------------------------------------------|-----|
| A.1 | Εισαγωγή..... | I |
| A.2 | Μοντέλα διεπιφάνειας..... | IV |
| A.2.1 | Σύντομη βιβλιογραφική αναδρομή..... | IV |
| A.2.2 | Μοντέλο του Desai et al (1984)..... | VI |
| A.2.2.1 | Μορφοποίηση του Στοιχείου Διεπιφάνειας | VI |
| A.3 | Εδαφικές Παράμετροι Στοιχείου Διεπιφάνειας..... | XII |

| | | |
|--|-------------------|-----|
| | Βιβλιογραφία..... | 143 |
|--|-------------------|-----|

Κεφάλαιο 1

1.1 Γενικά

Οι κατολισθήσεις, αναπόσπαστο κομμάτι των φυσικών γεωλογικών διεργασιών της γήινης επιφάνειας, είναι ένας γενικός όρος που δίνεται για να περιγράψει τις διάφορες μορφές εδαφικής μετακίνησης. Εκφράζουν την φυσική τάση του εδάφους να επανακτήσει την ισορροπία του, η οποία διαταράχτηκε από εξωγενείς ή ενδογενείς διεργασίες, ανακατανέμοντας έδαφος και ιζήματα.

Είναι δυνατόν να προκύψουν σε εδάφη οποιασδήποτε μορφολογίας, εάν συνδυαστούν οι «κατάλληλες» συνθήκες εδαφικής μορφολογίας, υγρασίας, φόρτισης ή/και κλίσης πρανούς. Η διαδικασία αυτή, της επαναφοράς της ισορροπίας, μπορεί να επέλθει είτε με απότομη κατάρρευση είτε με αργές βαθμιαίες ολισθήσεις. Ακριβώς αυτή η ποικιλία αιτιών και μορφών εμφάνισης τους, αποδεικνύει την πολύπλοκη φύση και την απρόβλεπτη συμπεριφορά του δυναμικού της γήινης επιφάνειας.

Το μέγεθος και ο συνολικός όγκος των υλικών που συμμετέχουν σε μια κατολίσθηση, καθιστούν το φαινόμενο ιδιαίτερα επικίνδυνο για τα τεχνικά έργα. Μόνο στις Η.Π.Α. οι υλικές ζημιές κοστολογούνται στα δύο δισεκατομμύρια δολάρια ετησίως και οι ανθρώπινες ζωές που χάνονται είναι πάνω από 50. Έχουν άμεσες συνέπειες σε όλα τα έργα υποδομής, δημόσιας και ιδιωτικής, καθώς και στις συγκοινωνίες. Η σοβαρότητα των συνεπειών αυξάνεται, όσο αυξάνουν οι ρυθμοί της αστικής ανάπτυξης και η αλλαγή στις χρήσεις γης.

Οι καταστροφικές κατολισθήσεις του παρελθόντος, λειτούργησαν επαγρυπνιστικά στην επιστημονική κοινότητα. Έτσι δεν προκαλεί έκπληξη το αυξημένο ενδιαφέρον και η διεξοδική μελέτη του φαινομένου για να γίνει φανερή η αιτία και κατανοητή η δρώσα σχέση ανάμεσα στις φυσικές συνθήκες και τον τύπο και τη φύση της καταστροφής. Τόσο λοιπόν η πρόβλεψη όσο και η αντιμετώπιση τους, αποτελούν σημαντικότερες παραμέτρους για την ασφάλεια των τεχνικών έργων.

1.1 Ορισμός-Συστήματα κατάταξης κατολισθήσεων

Πολλοί ορισμοί έχουν αποδοθεί στον όρο και όλοι ποικίλλουν ανάλογα με τον στόχο του συντάκτη. Για παράδειγμα ο Cruden (1991) όρισε την κατολίθωση ως τη μετακίνηση μικρών ή μεγάλων μαζών, πετρωμάτων ή χαλαρών υλικών σε πρηνή.

Τον ορισμό αυτό υιοθετεί και η ομάδα εργασίας για την απογραφή των κατολισθήσεων ανά τον κόσμο της UNESCO (WP/WLI), αναγνωρίζοντας ότι τα φαινόμενα που περιγράφονται με τον όρο έχουν μεγαλύτερο εύρος από τον ορισμό.

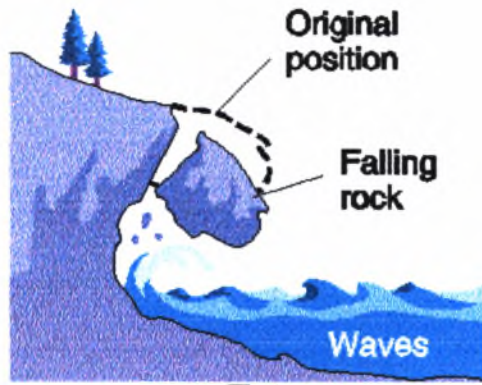
Η κατάταξη που χρησιμοποιεί η WP/WLI για την περιγραφή των κατολισθήσεων ακολουθεί αυτή του Varnes (1978). Δίνεται έμφαση στον τύπο της κίνησης και στον τύπο του υλικού. Τα είδη κίνησης διακρίνονται σε πέντε τύπους (βλ. Εικόνα 1.1.):

- πτώσεις (falls),
- ροές (flows),
- ολισθήσεις (slides), και
- ανατροπές (topples)

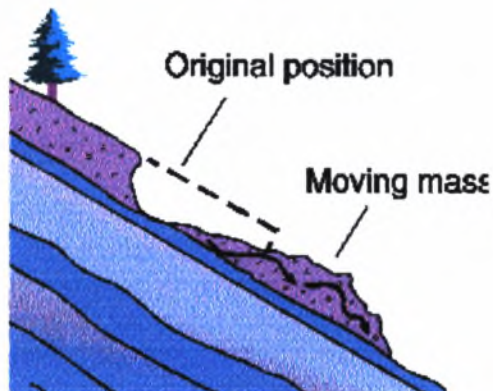
Η διάκριση που γίνεται για τα είδη των υλικών που συμμετέχουν σε ένα γεγονός κατολίθωσης είναι:

- βράχοι (rock),
- συντρίμμια (debris) και
- χώμα (earth).

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να διευκρινιστεί εάν οι κινήσεις των εδαφικών μαζών κατατάσσονται καθαρά στις πτώσεις ή στις ολισθήσεις και πολλές φορές τα υλικά τόσο ολισθαίνουν όσο και ρέουν. Η DOE (1994) αναγνωρίζει την ύπαρξη σύνθετων μορφών κατολισθήσεων στις περιπτώσεις όπου η μετακίνηση των εδαφικών μαζών επιτυγχάνεται με δύο ή και παραπάνω μηχανισμούς μετακίνησης τονίζεται όμως παράλληλα ότι αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με το σύστημα κατολίθωσης (landslide complex) , μια περιοχή δηλαδή όπου εμφανίζονται



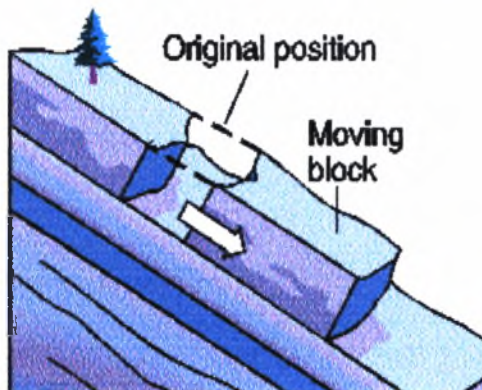
α. Πτώσεις



β. Ροές



γ. Ανατροπές



δ. Ολισθήσεις

Εικόνα 1.1 Κατάταξη κατολισθήσεων της WL/WPI βάσει του τύπου κίνησης

παράλληλα πολλοί τύποι εδαφικής μετακίνησης. Οι Cruden και Varnes (1996) προτείνουν οι σύνθετες μορφές κατολισθήσεων να προσδιορίζονται με συνδυασμό των πέντε βασικών τύπων μηχανισμών εδαφικής μετακίνησης και των τριών τύπων υλικών. Στην περίπτωση όπου ο τύπος της μετακίνησης διαφοροποιηθεί κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου, τότε το υλικό περιγράφεται ξεχωριστά για κάθε διακριτό τύπο μετακίνησης που εκπίπτει. Για παράδειγμα, μια πτώση βράχων (rock fall) η οποία ακολουθείται από ροή των κρημισμάτων είναι δυνατόν να περιγραφεί ως πτώση βράχων με ροή συντριμμίων (rock fall, debris flow). Ο χαρακτηρισμός μιας κατολίσθησης γίνεται λεπτομερέστερος και περίπλοκος καθώς συγκεντρώνονται όλο και περισσότερες πληροφορίες για την κίνηση.

«Το σύνολο των διαδικασιών κατά την διάρκεια μετακινήσεων πρανών συνθέτουν μια ατέρμονη σειρά γεγονότων που ξεκινούν από την αιτία και καταλήγουν στο αποτέλεσμα» αναφέρει ο Varnes (1978). Πάγια τακτική όταν συντάσσεται αναφορά κατολίσθησης για μια συγκεκριμένη τοποθεσία αποτελεί καταρχάς η αναγνώριση των συνθηκών που κατέστησαν το πρανές ασταθές και έπειτα ο μηχανισμός με τον οποίο εκδηλώθηκε η κίνηση. Μόνο μέσω μιας τέτοιας λεπτομερούς διάγνωσης καθίσταται δυνατή η πλήρης κατανόηση του φαινομένου και κατά συνέπεια η σωστότερη αντιμετώπιση του με τα κατάλληλα μέτρα.

1.2 Παράγοντες πρόκλησης κατολισθήσεων.

Σε κάθε πρανές υπάρχουν δυνάμεις που τείνουν να το ανατρέψουν και δυνάμεις που τείνουν να αντισταθούν στην κίνηση.

Ο γενικός ορισμός του συντελεστή ασφαλείας F ενός πρανούς προκύπτει από την σύγκριση της διατμητικής τάσης που τείνει να κινήσει το πρανές με την διατμητική αντοχή του εδάφους κατά μήκος μια υποτιθέμενης ή γνωστής επιφάνειας ολίσθησης. Ξεκινώντας από αυτήν την προσέγγιση από άποψη τάσεων, ο Terzaghi (1950)

διαχώρισε τις αιτίες του φαινομένου σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει εξωτερικές επιδράσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης. Αναφέρονται ενδεικτικά η αύξηση του βάρους του εδάφους με την αύξηση της περιεκτικότητας του σε νερό, η προσθήκη φορτίων στην επιφάνεια από την κατασκευή κτιρίων και οδών, η δυσμενής τοπική αλλαγή γεωμετρικών χαρακτηριστικών από διάβρωση ή εκσκαφή ή ακόμα και η εφαρμογή δυναμικών - σεισμικών- φορτίων. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει περιπτώσεις εσωτερικών επιδράσεων, στις οποίες παρατηρείται μείωση της αντοχής, όπως η ύγρανση, η οποία προκαλεί μείωση της συνοχής των συνεκτικών εδαφών, η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, η εξασθένιση διαγεννητικών δεσμών, από τη διαβρωτική δράση κλιματικών παραγόντων, η εξαλλοίωση γαιωδών ή βραχωδών σχηματισμών, η μείωση της αντοχής ευαίσθητων συνεκτικών εδαφών.

Παρόλα αυτά, ο Varnes (1978) επεσήμανε το γεγονός ότι υπάρχει μια πληθώρα εξωτερικών αιτιών που επηρεάζουν την αντοχή και εσωτερικών αιτιών που λειτουργούν με αύξηση των τάσεων, καθώς και αιτιών που επηρεάζουν εξίσου τους όρους που εμπεριέχονται στο λόγο του συντελεστή ασφαλείας.

Το μεγάλο εύρος στους τύπους της μετακίνησης των πρανών αντανακλά το πλήθος των συνθηκών, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την αστάθεια του πρανούς και αποτελούν τη γενεσιουργό αιτία της μετακίνησης του. Είναι λοιπόν ορθολογικότερη η αναφορά σε αιτιώδεις παράγοντες (causal factors) παρά σε αιτίες αυτές καθαυτές. Δεδομένης αυτής της θεώρησης, οι εδαφικές συνθήκες (μειωμένη αντοχή, ευαίσθητα υλικά, βαθμός κορεσμού κ.α.) είναι κριτήρια επηρεασμού αλλά όχι αιτίες. Αποτελούν, μαζί με τις επικρατούσες συνθήκες τάσης, την πίεση πόρων και τη θερμοκρασία, μέρος των συνθηκών, οι οποίες καθιστούν το πρανές ασταθές. Δεν έχει τόσο σημασία εάν το εδαφικό υλικό είναι «αδύναμο», η αστοχία θα προκύψει μόνο εάν δράσει παράλληλα κάποιος αιτιώδης παράγοντας. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι φυσικοί ή ανθρωπογενείς, αλλά σε κάθε περίπτωση αυτοί πρέπει να αλλάζουν δραστικά τις υφιστάμενες εδαφικές συνθήκες, έτσι ώστε να οδηγούν το

πρανές στην αστοχία, δηλαδή να αλλάζουν δυσμενώς την κατάσταση ευστάθειας (Popescu,1984).

Η υπολογιζόμενη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι μια ξεκάθαρη και απλή διάκριση για να χαρακτηριστεί ένα πρανές σταθερό ή όχι. Μια προσέγγιση πιο κοντά στις φυσικές συνθήκες, είναι αυτή του Crozier (1986), ο οποίος διακρίνει τα πρανή σε τρεις καταστάσεις: *ευσταθή (stable)*, *οριακώς ευσταθή (marginally stable)* και *ενεργώς ασταθή (actively unstable)*.

Τα ευσταθή πρανή είναι εκείνα στα οποία, το περιθώριο σταθερότητας είναι επαρκώς υψηλό για να αντισταθεί στις δυνάμεις ανατροπής. Στα οριακώς ευσταθή, η αστοχία θα προκύψει εν καιρώ, όταν οι δυνάμεις αποσταθεροποίησης πλησιάσουν μια κρίσιμη τιμή. Τέλος, τα ενεργώς ασταθή είναι εκείνα όπου η δράση των δυνάμεων αποσταθεροποίησης οδηγούν σε συνεχή ή περιοδική μετακίνηση.

Τα τρία στάδια σταθερότητας αποτελούν μέρος ενός συνεχούς, με την πιθανότητα αστοχίας να είναι ανύπαρκτη στην περιοχή ευστάθειας του φάσματος, αλλά διαρκώς αυξανόμενη στην περιοχή των οριακώς ευσταθών πρανών, για να γίνει βεβαιότητα στα ενεργώς ασταθή. Η διαγραμματοποίηση του παραπάνω συμπεράσματος στην εικόνα 1.2. δείχνει ότι σε οποιαδήποτε περιοχή, είναι πιθανότερο περισσότερα πρανή να υποβληθούν σε μικρού εύρους μετακίνησης ερπυσμός- παρά σε μεγάλης κλίμακας μετατοπίσεις.

Τα τρία αυτά στάδια ευστάθειας παρέχουν ένα χρήσιμο πλαίσιο εργασίας μέσα στο οποίο γίνονται κατανοητοί οι αιτιώδεις παράγοντες εμφάνισης κατολισθήσεων και κατατάσσονται σε δύο ομάδες, με βάση τη λειτουργία τους.

1. Προκαταρκτικοί αιτιώδεις παράγοντες, οι οποίοι καθιστούν το πρανές ευπαθές σε μετακινήσεις, χωρίς στην πραγματικότητα να την προκαλούν, χαρακτηρίζοντας το πρανές οριακά ευσταθές, και

Η διαδικασία εύρεσης των αιτιών μια κατολίσθησης στοχεύει στον εντοπισμό εκείνης ακριβώς της διαδικασίας, με τη δράση της οποίας προκάλεσε τον μεγαλύτερο βαθμό αλλαγής του συστήματος ευστάθειας. Αν και οι αργές αλλαγές δρουν σε μεγάλο βάθος χρόνου μειώνοντας το λόγο δυνάμεων αντίστασης προς διατμητική τάση, μια γρήγορη αλλαγή στις επικρατούσες συνθήκες κάθε είδους είναι αυτή που δίνει το έναυσμα για μετακίνηση.

Ο προσδιορισμός των αιτιών είναι σύνθετη διαδικασία και στις περισσότερες των περιπτώσεων οι κατολισθήσεις δεν ερευνούνται σε τέτοιο βάθος. Είναι λογικό λοιπόν να υιοθετηθεί ένα απλούστερο και εύχρηστο σύστημα κατάταξης των αιτιωδών παραγόντων μιας κατολίσθησης. Η προσέγγιση της WP/WLI είχε ως σκοπό την κάλυψη της πλειοψηφίας των περιπτώσεων κατολισθητικών γεγονότων. Λήφθηκαν υπόψη δεδομένα από in-situ διασκοπίσεις της εδαφικής μάζας. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση το είδος της επιρροής (προκαρτακτικοί, επιτελεστικοί) και την περιγραφή τους (εδαφικές συνθήκες, γεωμορφολογικές, ανθρωπογενείς). Στον πίνακα 1.1 παραθέτονται σε συντομία οι αιτιώδεις παράγοντες ταξινομημένοι με βάση τις διεργασίες που απαιτούνται για την καταγραφή τους.

Οι εδαφικές συνθήκες, περιλαμβάνουν τον χαρακτηρισμό για το είδος του γεω-υλικού στην επιφάνεια και σε μικρό βάθος της κατολίσθησης και στην περιοχή γύρω από αυτήν. Διερευνώνται με τη βοήθεια γεωτρήσεων και επιφανειακών δειγματοληψιών. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται με εργαστηριακές και in-situ δοκιμές.

Οι γεωμορφολογικές συνθήκες, προσδιορίζονται με σύγκριση προϋπαρχόντων χαρτών, πανοραμικών φωτογραφιών, τοπογραφικές μεθόδους ή προσεχτική και συνεχή παρατήρηση του πεδίου.

Οι φυσικές διεργασίες αφορούν στις περιβαλλοντικές επιδράσεις και ποσοτικοποιούνται με βροχόμετρα, σειсмоγράφους και πιεζόμετρα. Η προσεχτική

παρατήρηση στις στάθμες των πηγαδιών της περιοχής και η ανάλυση των ζημιών από σεισμούς είναι αποδεκτά υποκατάστατα.

Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις καταγράφονται από το ιστορικό των εκσκαφών και γενικά κάθε είδους εργασία στην περιοχή. Υπονοείται ότι έχει γίνει αρχικός διαχωρισμός στο αν το πρανές είναι φυσικό ή τεχνητό.

Η μορφή του πίνακα οδήγησε στη δημιουργία βάσεων δεδομένων, προσβάσιμων στον απλό χρήστη. Οι πληροφορίες που συλλέγονται, συγκρίνονται με εκθέσεις της WP/WLI και αποτελούν οδηγό για μελλοντικές έρευνες και μέτρα αντιμετώπισης

1.3 Ενδείξεις κίνησης και Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθήσεων

1.3.1 Ενδείξεις κίνησης

Τα κατολισθητικά γεγονότα σπάνια συμβαίνουν χωρίς προειδοποιητικές ενδείξεις. Αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την έγκαιρη και αποτελεσματικότερη προσέγγιση του προβλήματος. Μερικές από αυτές είναι:

- Ρωγμές στο οδόστρωμα δρόμων
- Ρωγμές σε τοίχους αντιστήριξης
- Ρωγμές στο πρανές ή ροή συντιμιών / ιζημάτων
- Απότομη αύξηση θολούρας νερού πηγών
- Απότομη ανάβλυση νερού από πρανές

Η Japan Landslide Society (J.L.C.) έχει δημοσιεύσει εύστοχα σκίτσα για την ευαισθητοποίηση και ενημέρωση των πολιτών (Εικόνα 1.3.)

ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

1 Αδύναμα, όλκιμα εδάφη

2 Ευαίσθητα εδάφη

3 Αποσαθρωμένα υλικά

4 Τεκτονισμένα υλικά

5 Δυσμενώς προσανατολισμένες ασυνέχειες (στρωματογραφία, schistosity, cleavage)

6 Παρουσία ρηγμάτων (faults, unconformities, flexural shears, sedimentary contacts)

7 Λιθολογικά ασταθή πετρώματα

8 Ανισότροπη συμπεριφορά

9 Διαφορές στην υδροπερατότητα (stiff, dense material over plastic material)

ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

1 Τεκτονικές ανυψώσεις

2 Ηφαιστειακές ανυψώσεις

3 Χειμάρειες διαβρώσεις στον πόδα

4 Θαλάσσιες διαβρώσεις στον πόδα

5 Υπεδάφιες διαβρώσεις

6 Αποθέσεις νέων υλικών στο πρανές ή την κορυφή του πρανούς

7 Αφαίρεση βλάστησης λόγω διάβρωσης, ξηρασίας ή πυρκαγιάς

8 Παγετοί

ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ

1 Μεγάλης έντασης βροχοπτώσεις

2 Ραγδαία τήξη χιονίων, παγετώνων

3 Παρατεταμένες βροχοπτώσεις

4 Ραγδαία μείωση στάθμης Κτόπιν πλημμυρών, παλοιοριών, ή θραύση φυσικών φραγμάτων

5 Σεισμοί

6 Ηφαιστιακές εκρήξεις

7 Τήξη permafrost

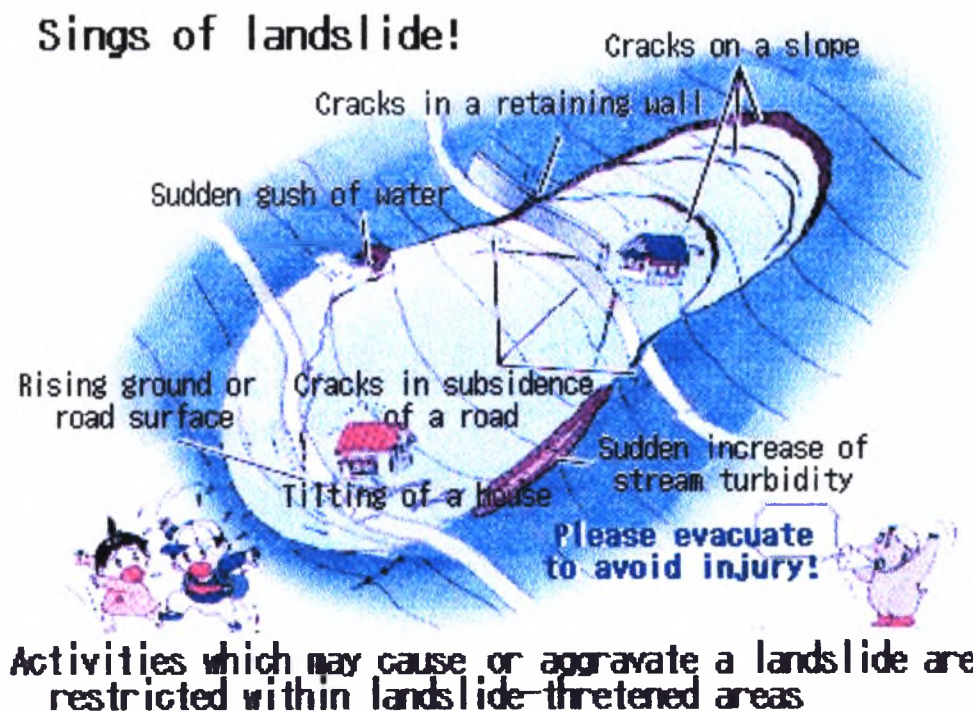
8 Παγετώδεις κύκλοι

9 Συρρίκνωση-διόγκωση διογκούμενων εδαφών

Πίνακας 11. Αιτιώδεις παρόντες πρόκλησης κατολισθήσεων

| ΑΝΘΡΩΠΟΓΕΝΕΙΣ ΠΑΡΕΜΒΑΣΕΙΣ |
|-------------------------------------------------------------------|
| 1 Υποσκαφές στο σώμα ή τον πόδα του πρανούς |
| 2 Φορτίσεις στην στέψη, κορυφή ή το σώμα του πρανούς |
| 3 Αρδρεύσεις |
| 4 Αλλαγές στην στάθμη λίμνης φραγμάτων |
| 5 Διαρροές απο δίκτυα υδροδότησης ή αποχετευτικά |
| 6 Κακή συντήρηση έργων αποστράγγισης |
| 7 Επιφανειακές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις |
| 8 Δημιουργία σωρών άχρηστων υλικών |
| 9 Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία βαρέων οχημάτων, έμπηξη πασσάλων) |
| 10 Αποψίλωση δασών |

Πίνακας 1.1 Αιτιώδεις Παράγοντες Πρόκλησης Κατολίσθησης (συνέχεια)



Εικόνα 1.3 Ενδείξεις ενδεχόμενης κατολίσθησης (J. L.C.)

1.3.2 Μέτρα αντιμετώπισης

Η αντιμετώπιση μιας υπάρχουσας κατολίσθησης ή η πρόληψη μιας επικείμενης εκδήλωσης στοχεύει στη μείωση των δυνάμεων ανατροπής και την αύξηση της διαθέσιμης αντοχής. Κάθε μέτρο που λαμβάνεται πρέπει ασφαλώς να στοχεύει σε ένα τουλάχιστον αν όχι και στους δύο στόχους.

Έχουν γίνει πολλές γενικές συγκεντρωτικές αναφορές στις μεθόδους που ακολουθούνται συνήθως από πολλούς επιστήμονες Hutchinson (1977), Zaruba and Mencl (1982), Scuster (1992), Bromhead (1992), Fell (1994).

Ο Hutchinson (1977) επεσήμανε ότι η αποστράγγιση είναι βασικότατο μέτρο για την σταθεροποίηση μιας κατολίσθησης και ακολούθως η αλλαγή στη γεωμετρία του πρανούς. Αυτό βέβαια υποστηρίζεται και λόγω του χαμηλού τους κόστους. Η συσσωρευμένη εμπειρία, έχει δείξει ότι ενώ ένα μέτρο μπορεί να είναι το πρωτεύων, στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται ο επιτυχής συνδυασμός δύο ή και περισσότερων μέτρων. Η αλλαγή στην γεωμετρία του πρανούς είναι ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος αντιμετώπισης ειδικότερα σε Deep-seated καθιζήσεις. Παρόλα αυτά, η επιτυχία τέτοιου είδους επέμβασης, με προσθήκη ή αφαίρεση υλικού στα κατάλληλα σημεία είναι συνιστώσα τόσο της τάξης μεγέθους των υλικών που απαιτούνται, όσο και από της θέσης του πρανούς. Ο Hutchinson (1997), παρέχει λεπτομέρειες για τη μέθοδο της "ουδέτερης γραμμής", η χρήση της οποίας αρωγεί στην εύρεση της βέλτιστης θέσης προσθήκης ή αφαίρεσης υλικού πάνω στο πρανές. Η μέθοδος αυτή σε πολλές περιπτώσεις δεν είναι εφαρμόσιμη. Πιο συγκεκριμένα σε κατολισθήσεις, στις οποίες ο πόδας ή η κορυφή του πρανούς δεν είναι ευδιάκριτα ή σε περιπτώσεις όπου η γεωμετρία του πρανούς περιορίζεται από παρακείμενες κατασκευές, η τοπική αλλαγή προς την σταθεροποίηση με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν να επιφέρει αποσταθεροποίηση σε άλλη περιοχή.

Η αποστράγγιση αποτελεί τις περισσότερες φορές το καθοριστικότερο μέτρο, επειδή η παρουσία του μέσω πίεσης πόρων μειώνει δραματικά τη διατμητική αντοχή. Η αποτελεσματικότητα μεθόδων αποστράγγισης υπογείων και επιφανειακών νερών, σε σχέση με το κόστος τους είναι πολύ καλή. Βέβαια το βάθος χρόνου είναι μικρό λόγω της συνεχούς συντήρησης που απαιτείται (Bromhead, 1992).

Το επιφανειακό νερό απομακρύνεται με αυλάκια και σωλήνες. Η αποστράγγιση υπόγειου ορίζοντα σε μικρό βάθος, επιτυγχάνεται με δίκτυο από αυλακωτά οριζόντια στραγγιστήρια (trench drains). Στις επιφάνειες αστοχίας, η αποστράγγιση γίνεται με βαθιά στραγγιστήρια τα οποία τέμνουν την επιφάνεια αστοχίας και προχωρούν βαθύτερα. Σε περίπτωση βαθιών κατολισθήσεων, συχνά ο πλέον αποτελεσματικός τρόπος μείωσης της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα είναι η τοποθέτηση/ έμπηξη αποστραγγιστικών τούνελ στο ανέπαφο υλικό κάτω από την κατολίσθηση. Από αυτή τη θέση, ανοίγεται ένας αριθμός φρεάτων αποστράγγισης με ανοδική κατεύθυνση από την οροφή των τούνελ έτσι ώστε να αποστραγγιστεί ο πόδας της κατολίσθησης. Εναλλακτικά, τα τούνελ συνδέονται με μια σειρά από κατακόρυφα πηγάδια τα οποία βυθίζονται από την επιφάνεια. Σε περιπτώσεις όπου ο υπόγειος ορίζοντας είναι σε μεγάλο βάθος και η κατολίσθηση μικρού εύρους για να δικαιολογήσει το κόστος των παραπάνω μεθόδων, επιλέγονται διανοιγώμενα οριζόντια στραγγιστήρια ή και ο συνδυασμός τους κατακόρυφα στραγγιστήρια. Ο Shuster (1992), αναφέρει λιγότερο διαδομένες αλλά εξίσου πρακτικές όπως η ηλεκτρο-ωσμωτική απομάκρυνση ύδατος vacuum and siphon drains.

Τα αντίβαρα ποδός από χάλικες που τοποθετούνται στον πόδα έχουν διττή λειτουργία. Τόσο αποστραγγιστική όσο και μηχανική.

Συγκεντρωτική αναφορά στα μέτρα που λαμβάνονται δίνονται στους πίνακες 1.2 (Αναγνωστόπουλος 1988) και 1.3 όπου προβάλλονται αντίστοιχα τα πλέον διαδεδομένα μέτρα αντιμετώπισης και τα μέτρα αντιμετώπισης που στοχεύουν

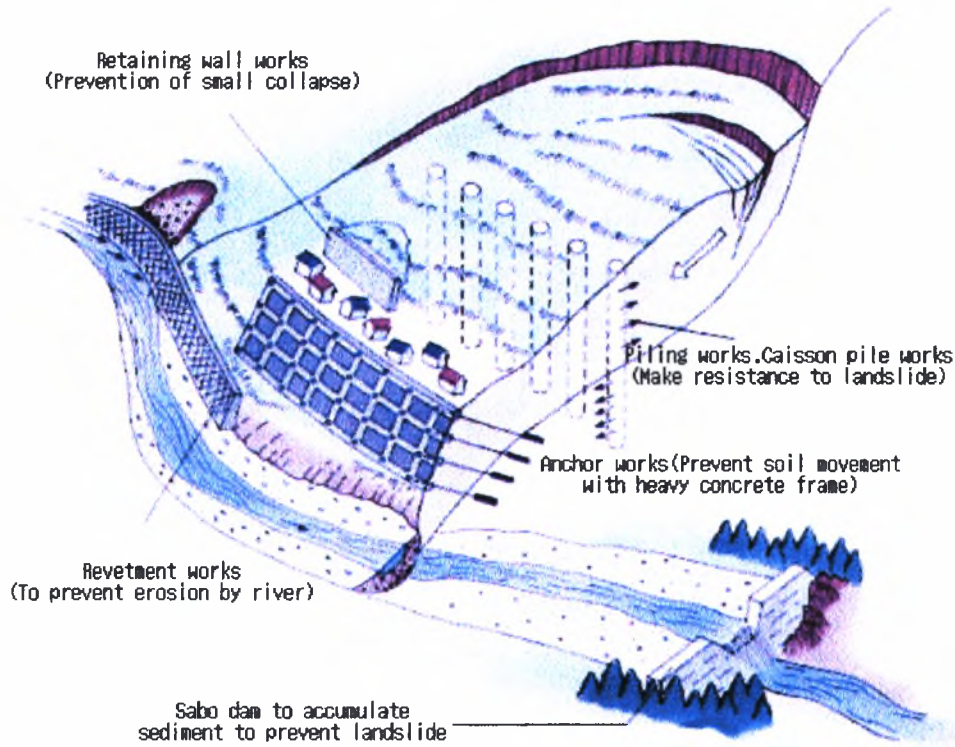
κυρίως στην επιβαρυντική δράση του νερού καθώς και η σχηματοποίησή τους όπως αυτή δίνεται από την J.L.C. στις εικόνες 1.4. και 1.5.

| ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ | |
|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. Μέτρα ελέγχου | <i>Εργα επιφανειακής αποστράγγισης</i> |
| | Σφραγίσεις ρωγμών |
| | Επιφ.αγωγοί απομάκρυνσης νερού |
| | <i>Εργα ρηχής αποστράγγισης</i> |
| | Υπόγειοι οχετοί |
| | Στραγγιστήρια |
| | Συνδυασμοί οχετών-στραγγιστηρίων |
| | "Εξωτερικά στραγγιστήρια" |
| | Οριζόντιες στραγγ. Γεωτρήσεις |
| | <i>Εργα βαθιάς αποστράγγισης</i> |
| | Κατακόρυφα στραγγιστήρια |
| | Οριζόντιες στραγγ. Γεωτρήσεις |
| | Στραχη. Φρέατα μεγάλης διαμέτρου |
| | Σήραγγες αποστράγγισης |
| | <i>Εκσκαφές</i> |
| <i>Αντίβαρα Ποδός</i> | |
| <i>Εργα σταθεροποίησης οχθώνκοίτης</i> | |
| 2. Μέτρα συγκράτησης | <i>Τοίχοι αντιστήριξης</i> |
| | <i>Πάσσαλοι</i> |
| | <i>Φρεατοπάσσαλοι</i> |
| | <i>Αγκυρώσεις</i> |

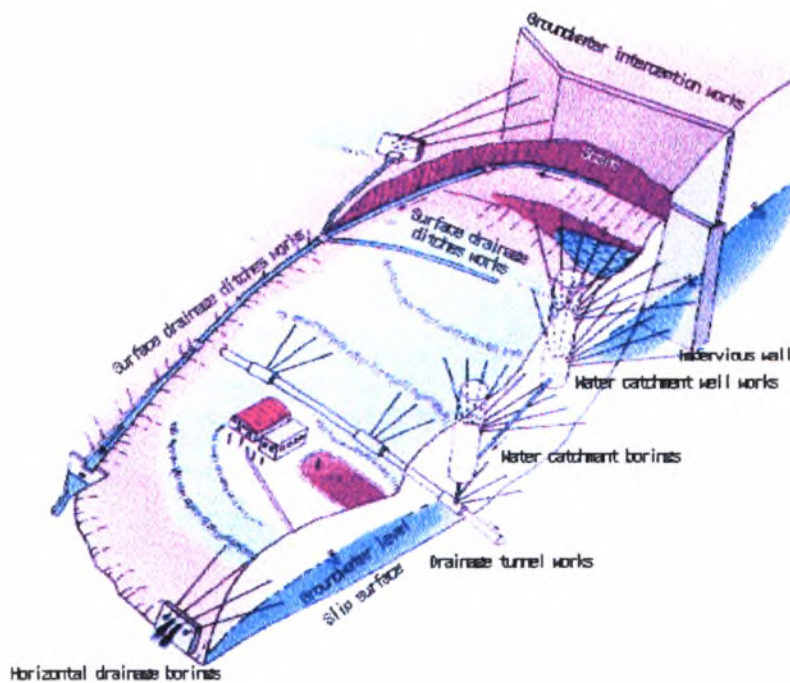
Πίνακας 1.2 Μέτρα Αντιμετώπισης Κατολισθήσεων (Αναγνωστόπουλος 1988)

| <i>Στόχος</i> | <i>Μέτρο αντιμετώπισης</i> |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Αποστράγγιση Επιφανειακών νερών |
| 1.Αποτροπή παρείσφυσης νερού βροχής στο σώμα της κατολίσθησης | Έργα για την εμπόδιση ροής Επιφανειακά στραγγιστήρια <με χαντάκια?> |
| 2.Απομάκρυνση επιφανειακού νερού | Αποστράγγιση Υπογείων Νερών Κατακόρυφα στραγγιστήρια Οριζόντιες στραγγ. Γεωτρήσεις |
| 3.Απομάκρυνση νερού απο το έδαφος της κατιλίσθησης | Στραγγ. Φρέατα μεγάλης διαμέτρου Σήραγγες αποστράγγισης Υπόγειοι οχετοί Στραγγιστήρια Συνδυασμοί οχετών-στραγγιστηρίων "Εξωτερικά στραγγιστήρια" Οριζόντιες στραγγ. Γεωτρήσεις |
| 4.Αποτροπή ροής υπογείου νερού | Μέτρα για διακοπή υπογείας ροής |

Πίνακας 1.3 Μέτρα αντιμετώπισης που στοχεύουν στη δράση του νερού



Εικόνα 1.4 Σχηματική απεικόνιση μέτρων αντιμετώπισης κατολισθήσεων



Εικόνα 1.5 Σχηματική απεικόνιση μέτρων αντιμετώπισης κατολισθήσεων που στοχεύουν στην επιβαρυντική δράση του νερού

Κεφάλαιο 2

2.1. Γενικά

Κάθε υλικό που φορτίζεται με σταθερό φορτίο παραμορφώνεται σε σχέση με το χρόνο. Η εξέλιξη και το μέγεθος της παραμόρφωσης εξαρτάται κυρίως από την τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και την αντοχή του υλικού. Στην περίπτωση του εδάφους η αντοχή καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του. Συγκεκριμένα, από τη διάταξη των κόκκων, το μέγεθος, το σχήμα και τη σύνθεσή τους, τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση των επιφανειών επαφής τους, καθώς και από την πιθανή ύπαρξη νερού στα διάκενα που δημιουργούνται ανάμεσά τους. Σε αντίθεση με άλλα υλικά, όπως στα πλαστικά και στα μέταλλα τα οποία παρουσιάζουν συνήθως πυκνή διάταξη κόκκων και ισχυρή δομή, στο έδαφος η μεταβολή των παραμορφώσεων σε σχέση με το χρόνο είναι σημαντική και θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων.

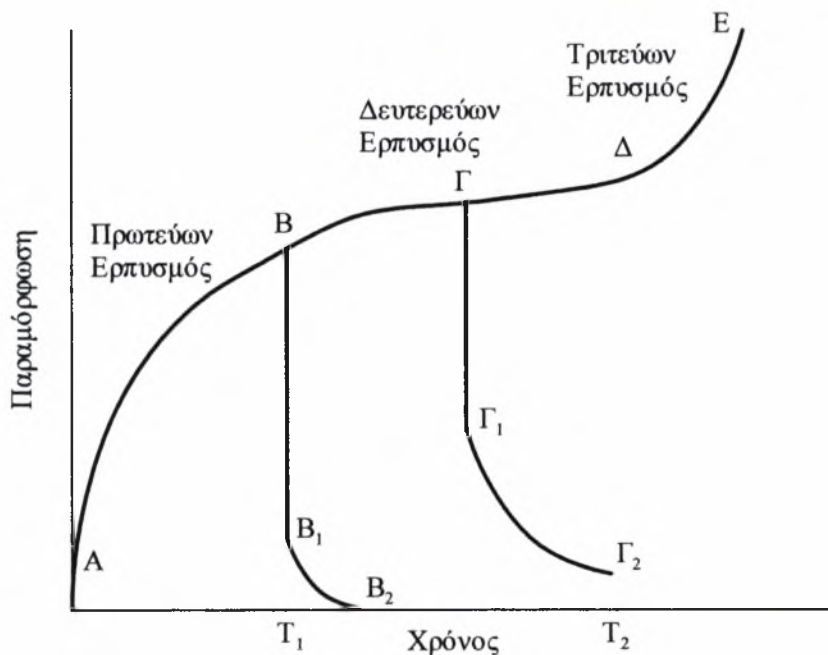
Η επιστήμη της ρεολογίας επιχείρησε στις αρχές του αιώνα να εισαγάγει την επίδραση του παράγοντα χρόνου στις κλασικές σχέσεις των τάσεων-παραμορφώσεων. Διατυπώνοντας ανάλογες καταστατικές εξισώσεις και θεωρώντας την κίνηση του εδάφους ως ροή ενός πυκνού ιξώδους ρευστού, αντιμετώπισε προβλήματα παραμορφώσεων (*deformation problems*), όπως η μακροχρόνια πρόβλεψη των καθιζήσεων κατασκευών, καθώς και προβλήματα ευστάθειας (*stability problems*), όπως η εξέλιξη κατολισθήσεων. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις αρχές της ρεολογίας ως ερπυσμός ορίζεται η εξέλιξη των παραμορφώσεων σε σχέση με το χρόνο, όταν το υλικό φορτίζεται υπό σταθερή τάση (φορτίο). Με βάση το Σχήμα 2.1, στο οποίο απεικονίζεται η ερπυστική συμπεριφορά που εμφανίζουν τα περισσότερα υλικά, το φαινόμενο του ερπυσμού περιλαμβάνει θεωρητικά τα παρακάτω επιμέρους στάδια (Owen και Hinton, 1980):

α) το στάδιο του πρωτεύοντος ερπυσμού (*primary creep*), που παρουσιάζεται από την καμπύλη (ΑΒ), κατά τη διάρκεια του οποίου η παραμόρφωση αυξάνεται αισθητά ως προς το χρόνο. Η συμπεριφορά του υλικού θεωρείται ελαστική και πιθανή

αποφόρτιση σε τυχαία χρονική στιγμή μεταξύ 0 και T_1 οδηγεί σε ελαστική επαναφορά με μικρή καθυστέρηση, η οποία εκφράζεται από το τμήμα (B_1B_2),

β) το στάδιο του δευτερεύοντος ερπυσμού (*secondary creep*), που απεικονίζεται από την καμπύλη ($B\Delta$), κατά το οποίο η παραμόρφωση αυξάνεται με μικρό και σχεδόν σταθερό ρυθμό. Στο συγκεκριμένο στάδιο η απόκριση του υλικού έχει πλαστικά χαρακτηριστικά και πιθανή αποφόρτιση σε χρονικό σημείο μεταξύ T_1 και T_2 οδηγεί σε πλαστική (μόνιμη) παραμόρφωση του υλικού,

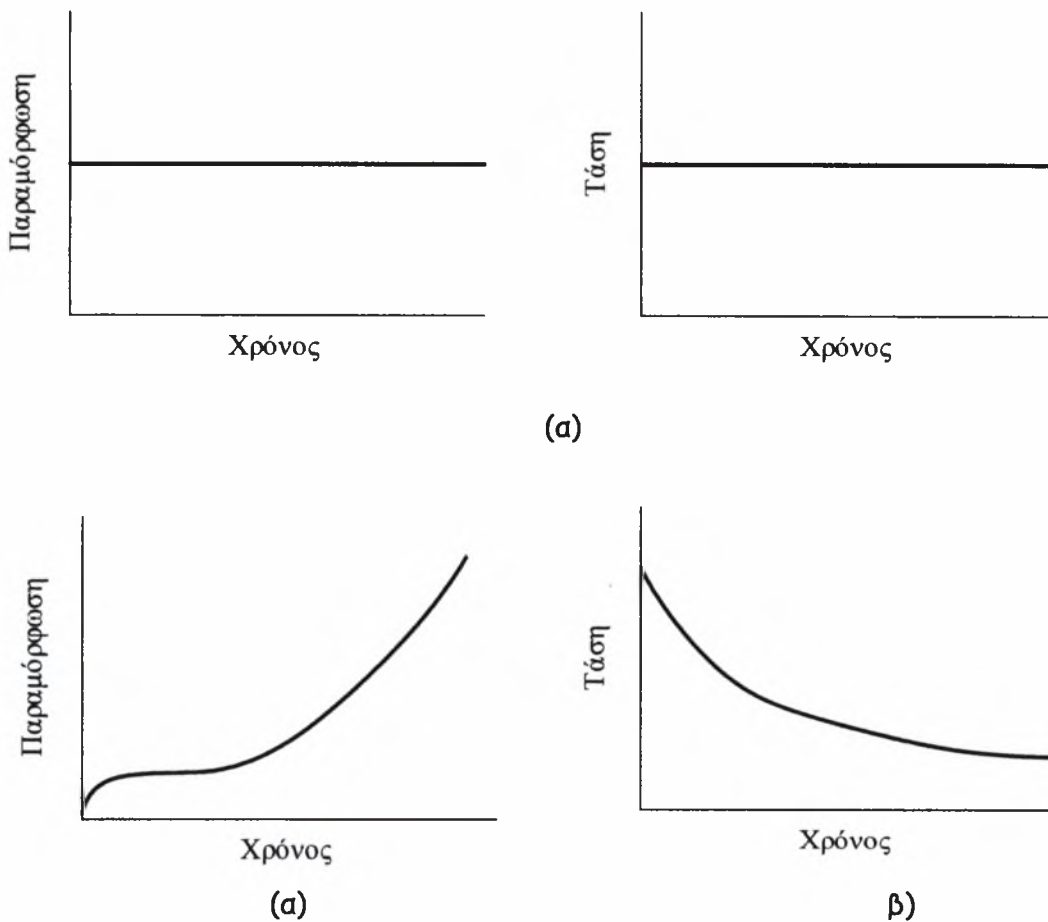
γ) το στάδιο του τριτεύοντος ερπυσμού (*tertiary creep*), που περιγράφεται από το τμήμα (ΔE). Η παραμόρφωση αυξάνεται απότομα ως προς το χρόνο και εκφράζει ουσιαστικά τη θραύση του υλικού, η οποία επέρχεται, εφόσον η φόρτιση εξακολουθήσει να επιβάλλεται και μετά τη χρονική στιγμή T_2 .



Σχήμα 2.1. Θεωρητική Καμπύλη Ερπυσμού (Owen & Hinton, 1980)

Αξίζει να σημειωθεί πως ο διαχωρισμός των παραπάνω σταδίων του ερπυσμού, τόσο κατά την πειραματική όσο και κατά την αριθμητική προσέγγιση του φαινομένου δεν είναι πάντοτε ευδιάκριτος και εξαρτάται κυρίως από την τιμή του φορτίου και την αντοχή του υλικού.

Φαινόμενο το οποίο σχετίζεται άμεσα με τον ερπυσμό είναι η χαλάρωση (relaxation) του εδάφους. Συχνά στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως το «αντίθετο» φαινόμενο του ερπυσμού, καθώς ορίζεται ως η εξέλιξη της τάσης σε σχέση με το χρόνο, όταν το υλικό φορτίζεται υπό σταθερή παραμόρφωση. Η χαλάρωση του εδάφους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και είναι πιθανό κάτω από συγκεκριμένο συνδυασμό φόρτισης να εμφανιστεί σχεδόν ταυτόχρονα με τον ερπυσμό (Findley κ.ά.,1976). Τα δύο φαινόμενα απεικονίζονται συγκριτικά στο Σχήμα 2.2.

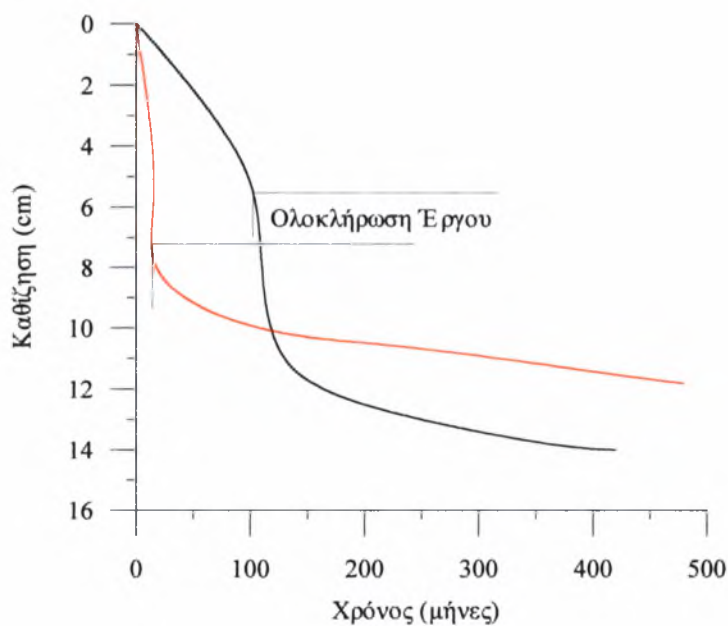


Σχήμα 2.2. (α) Ερπυσμός (β) Χαλάρωση

Η μελέτη του ερπυσμού αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επιτυχή πρόβλεψη της μακροχρόνιας αντοχής του εδάφους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως το τμήμα της καθίζησης μίας κατασκευής που οφείλεται στο φαινόμενο του ερπυσμού και καλείται ως δευτερεύουσα στερεοποίηση (secondary consolidation), αποτελεί σε ορισμένες περιπτώσεις το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής καθίζησης (Fedra, 1992).

Επίσης, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος του φαινομένου στην εξέλιξη των κατολισθήσεων καθώς και στη μελέτη της ευστάθειας πρανών. Ο ρυθμός παραμόρφωσης καθορίζει αισθητά τόσο τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού όσο και την αναγκαιότητα λήψης συγκεκριμένων μέτρων (πασαλότοιχοι αντιστήριξης, αγκυρώσεις) για την αποφυγή της κατάρρευσης.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται το φαινόμενο του ερπυσμού με βάση επί τόπου μετρήσεις και αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.3 εμφανίζεται η εξέλιξη της καθίζησης δύο κτηρίων συναρτήσει του χρόνου. Για το πρώτο εξετάζεται μία χρονική περίοδος πέντε ετών από την έναρξη της κατασκευής του και για το δεύτερο μία περίοδος σαράντα ετών αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από το σχήμα, σημαντικό τμήμα της συνολικής καθίζησης 66% για το πρώτο και 40% για το δεύτερο επέρχεται μετά το πέρασμα μεγάλου χρονικού διαστήματος από την ολοκλήρωση επιβολής της φόρτισης. Πιθανή παράβλεψη της συγκεκριμένης καθίζησης είναι φανερό πως θα οδηγούσε - με σοβαρό σφάλμα - σε υποεκτίμηση της συνολικής καθίζησης των δύο κτηρίων.



Σχήμα 2.3. Εξέλιξη Καθιζήσεων ως προς το Χρόνο (Feda, 1992).

Στο επόμενο σχήμα (2.4) αποτυπώνεται η εξέλιξη της μετακίνησης ενός πρνούς (Fedá,1992). Αρχικά, τις πρώτες σαράντα ημέρες η παραμόρφωση αυξάνεται με έναν σχεδόν σταθερό ρυθμό (δευτερεύων ερπυσμός). Στη συνέχεια, παρατηρείται μία έντονη μεταβολή και αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης με συνέπεια την κατάρρευση του πρνούς (τριτεύων ερπυσμός). Η συστηματική επεξεργασία του Σχήματος 2.4.α. σε συνδυασμό με επιπρόσθετες καταγραφές πεδίου και εργαστηριακές δοκιμές, είναι δυνατό να οδηγήσουν τόσο στην εμπειρική προσέγγιση του φαινομένου όσο και στην εκτίμηση του χρόνου της πιθανής κατάρρευσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.β.

2.2 Παράγοντες Επίδρασης επί του Ερπυσμού

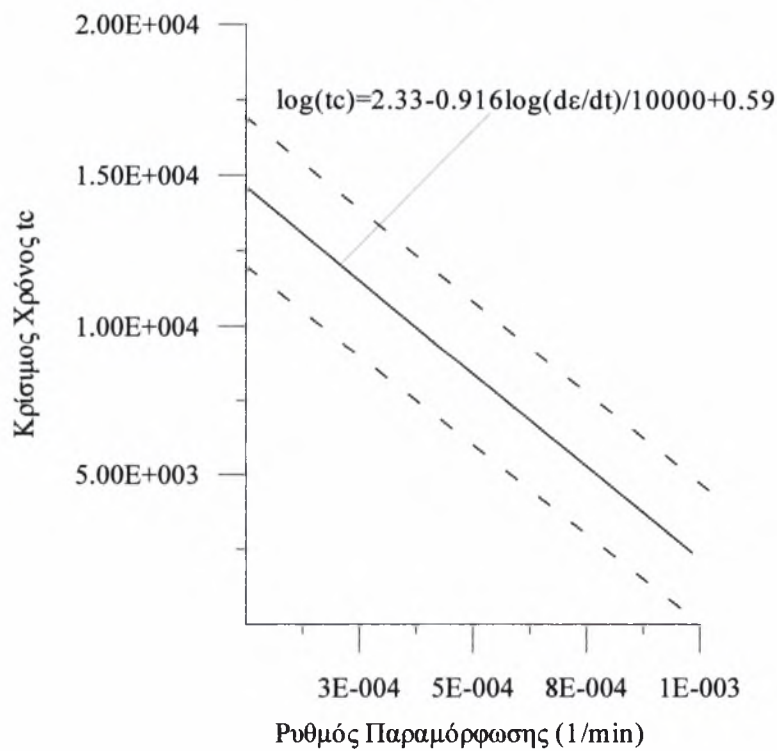
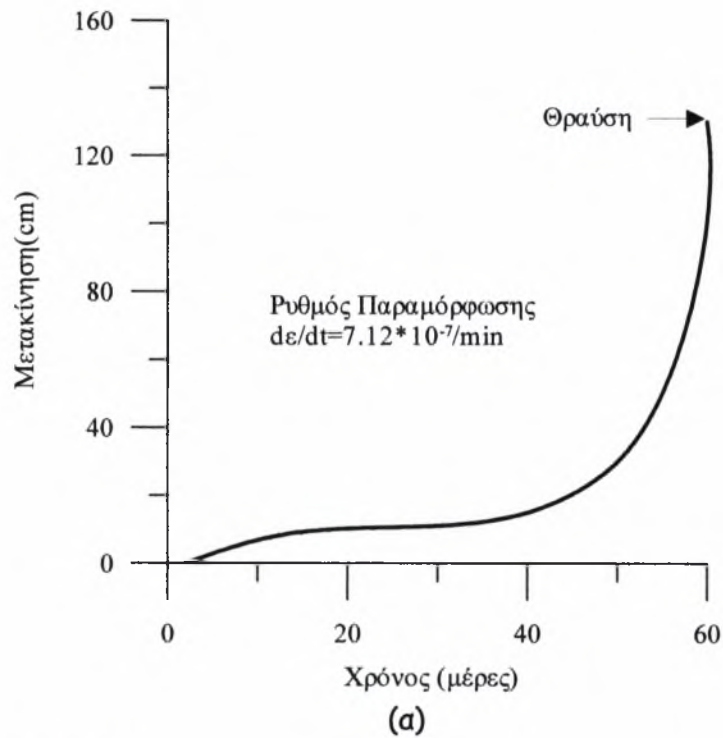
Η ερπυστική συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται κυρίως από:

- τη θερμοκρασία του
- την υγρασία του
- το επιβαλλόμενο φορτίο.

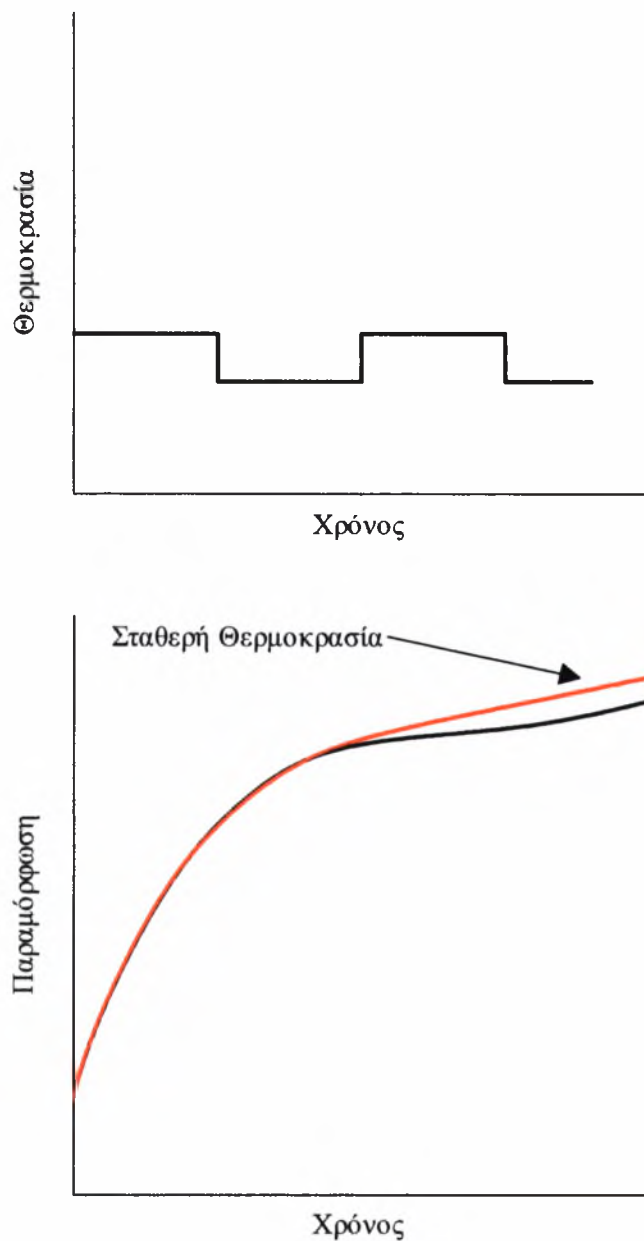
Η επιρροή καθενός ξεχωριστά από τα παραπάνω δεν είναι συνήθως εφικτό να προσδιοριστεί ποσοτικά, καθώς είναι φανερή η αλληλοεπίδρασή τους και κυρίως μεταξύ θερμοκρασίας και υγρασίας. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται πώς οι συγκεκριμένοι παράγοντες επηρεάζουν ποιοτικά το φαινόμενο του ερπυσμού.

Η μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας γίνεται κυρίως με βάση εργαστηριακές δοκιμές ερπυσμού (creep tests), όπου οι μεταβολές τόσο της θερμοκρασίας όσο και της παραμόρφωσης είναι άμεσα μετρήσιμες. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 (Fedá,1992), πιθανή θερμοκρασιακή αλλαγή δεν επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στο στάδιο του πρωτεύοντος ερπυσμού. Μείωση της θερμοκρασίας από τους 21°C στους 14°C στο στάδιο του δευτερεύοντος ερπυσμού οδηγεί σε μείωση του ρυθμού

παραμόρφωσης κατά 20% (περίπου 3% ανά 1°C). Αντίθετα, αύξηση της θερμοκρασίας από τους 21°C στους 40°C έχει ως συνέπεια την αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης κατά 75% (περίπου 4% ανά 1°C) (Felix,1980).



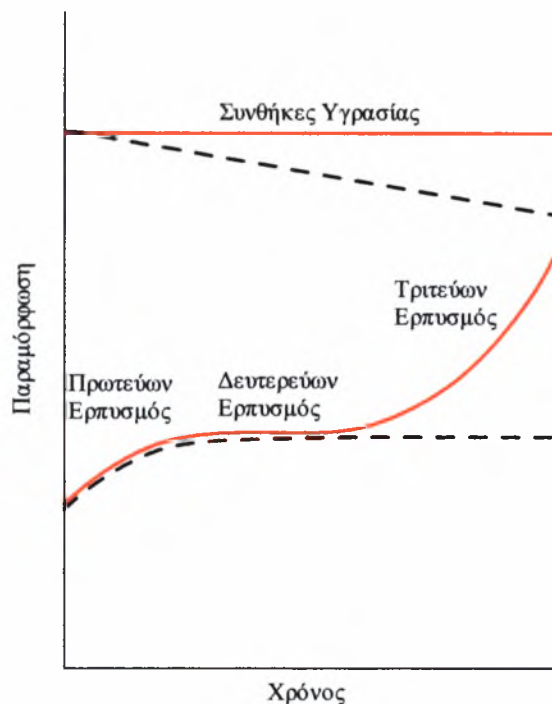
Σχήμα 2.4. Καμπύλες Καθιζήσεων-Χρόνου (Κατολίσθηση Takabayama) (Feda, 1992).



Σχήμα 2.5. Επίδραση της Θερμοκρασίας στο Φαινόμενο του Ερπυσμού (Feda, 1992).

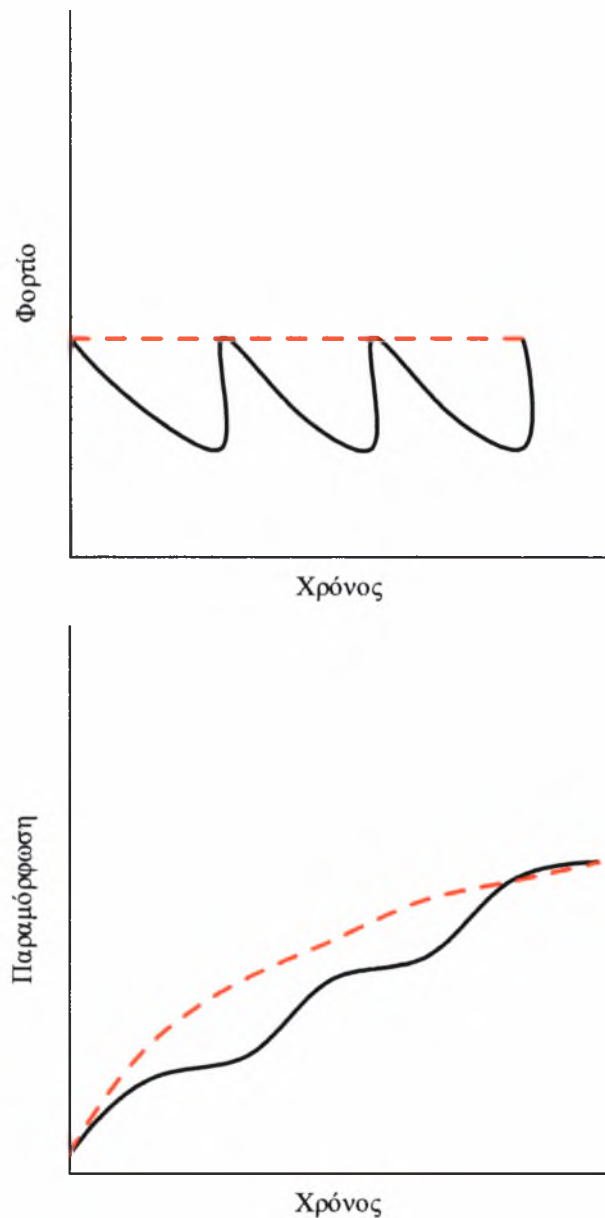
Η επίδραση της θερμοκρασίας σχετίζεται άμεσα με την πίεση του νερού των πόρων και είναι ιδιαίτερα αισθητή στις εργαστηριακές δοκιμές ερπυσμού που πραγματοποιούνται κάτω από αστράγγιστες συνθήκες. Αλλαγή θερμοκρασίας κατά $\pm 2^{\circ}\text{C}$ προκαλεί μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων κατά 0.21Μρα (+0.044Μρα,-0.013Μρα) (Henkel και Sowa,1963).

Στο Σχήμα 2.6 (Fedá,1992) παρουσιάζεται η επιρροή της υγρασίας στην ερπυστική συμπεριφορά του εδάφους. Στην περίπτωση που η τιμή της υγρασίας διατηρείται σταθερή, το εδαφικό δοκίμιο παραμορφώνεται σύμφωνα με τη θεωρητική καμπύλη του ερπυσμού (Σχήμα 2.1) και οδηγείται σε θραύση στο τέλος του πρωτεύοντος ερπυσμού (t_{F1}). Αντίθετα, μείωση της υγρασίας οδηγεί σε απόκριση, η οποία περιγράφεται ουσιαστικά μόνον από το στάδιο του πρωτεύοντος ερπυσμού. Εάν η επιβαλλόμενη φόρτιση παραμείνει σταθερή, η θραύση του εδάφους επέρχεται σε χρόνο t_{F2} , αρκετά μεγαλύτερο του χρόνου t_{F1} ($t_{F2} \gg t_{F1}$).



Σχήμα 2.6 Επίδραση της Υγρασίας στο Φαινόμενο του Ερπυσμού (Fedá, 1992)

Οι επιπτώσεις που εμφανίζονται λόγω πιθανής μεταβολής του επιβαλλόμενου φορτίου κατά την εξέλιξη του φαινομένου απεικονίζονται στο Σχήμα 2.7 (Fedá,1992). Όπως είναι φανερό, μείωση του φορτίου (αποφόρτιση) επιφέρει μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης, ενώ αντίθετα αύξηση του φορτίου (φόρτιση) οδηγεί σε ανάλογη αύξηση του ρυθμού. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρουσιάζεται ενδεικτικά μόνο το τμήμα του πρωτεύοντος ερπυσμού. Ανάλογη συμπεριφορά χαρακτηρίζει και τα υπόλοιπα στάδια του φαινομένου.



Σχήμα 2.7 Επίδραση της Μεταβολής του Επιβαλλόμενου Φορτίου στο Φαινόμενο του Ερπυσμού (Feda, 1992).

Οι παραπάνω διαπιστώσεις προκύπτουν, όπως προαναφέρθηκε, από την ανάλυση μετρήσεων που ελήφθησαν κατά την εκτέλεση κατάλληλων εργαστηριακών δοκιμών. Οι συχνές αλλαγές της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας καθιστούν ιδιαίτερα χρονοβόρα και θεωρητικά ανέφικτη την καταγραφή αντίστοιχων επί τόπου μετρήσεων. Στις περισσότερες, λοιπόν, των περιπτώσεων όπου μελετώνται προβλήματα ερπυσμού στο πεδίο, η επιρροή της μεταβολής - τόσο

της θερμοκρασίας όσο και της υγρασίας - θεωρείται αμελητέα και τα τρία επιμέρους στάδια του φαινομένου εξετάζονται υπό σταθερές τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας.

2.3. Μελέτη του Ερπυσμού

Η προσπάθεια προσομοίωσης του φαινομένου του ερπυσμού συνίσταται στην άμεση σύνδεση των καταστατικών εξισώσεων του εδάφους με τον παράγοντα χρόνο. Η μη εξαρτημένη από το χρόνο απόκριση, η οποία αποτελεί μία ιδεατή αντιμετώπιση της πραγματικής συμπεριφοράς του εδάφους, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα απλό πρόβλημα δύο διαστάσεων με κύριες «διαστάσεις» την τάση και την παραμόρφωση. Η εισαγωγή, όμως, του χρόνου μετατρέπει την προηγούμενη κατάσταση σε ένα σύνθετο τρισδιάστατο πρόβλημα (τάση, παραμόρφωση, χρόνος).

Οι μελέτες που πραγματοποιήθηκαν τα προηγούμενα χρόνια και είχαν ως στόχο την προσέγγιση του ερπυσμού, είναι δυνατό να ταξινομηθούν - με βάση τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε - στις δύο επόμενες κατηγορίες:

- α) στην κατηγορία της φαινομενολογικής (εμπειρικής) και
- β) στην κατηγορία της αναλυτικής (αριθμητικής) προσομοίωσης του φαινομένου.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μελέτες που βασίστηκαν στην εκτέλεση συγκεκριμένων εργαστηριακών δοκιμών και στη μετέπειτα επεξεργασία των καταγραφών, ενώ στη δεύτερη οι προσπάθειες προσέγγισης του ερπυσμού με βάση τη θεωρία και ανάλογες αναλυτικές σχέσεις (θεωρία ιξώδους-ελαστικότητας, ελαστικής ιξώδους-πλαστικότητας κ.ά.). Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά, με βάση αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές, οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες.

Γενικά, πρέπει να τονιστεί πως η μελέτη του ερπυσμού αποτελεί ένα πολύπλοκο πρόβλημα. Όπως θα δειχθεί εν συντομία και στη συνέχεια, τόσο η εμπειρική όσο και η αναλυτική προσομοίωση αδυνατούν να περιγράψουν αυτόνομα το φαινόμενο. Στις

κατά συνέπεια οι τάσεις και οι παραμορφώσεις υπολογίζονται από τη γνωστή θεωρία της ελαστικότητας. Τα αντίστοιχα μεγέθη της ιξώδους-πλαστικής περιοχής βρίσκονται με βάση τη θεωρία του Perzyna. Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην ενότητα 2.2 καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο, με τις απαιτούμενες τροποποιήσεις, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της ερπυστικής συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων διεπιφάνειας.

Μελετώντας την απόκριση των μαλακών αργίλων οι Hsieh και Kanazanjian (1987) παρουσίασαν καταστατικές εξισώσεις ως επέκταση της θεωρίας της πλαστικότητας, στις οποίες εισήγαγαν άμεσα τον παράγοντα χρόνο. Υιοθετώντας το εδαφικό μοντέλο Cam-Clay και χρησιμοποιώντας μη συζευγμένο κανόνα ροής περιέγραψαν την ερπυστική συμπεριφορά της συγκεκριμένης κατηγορίας εδάφους. Η επιφάνεια διαρροής εξαρτάται από τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου και προσδιορίζεται κάθε φορά με την εφαρμογή των προτεινόμενων σχέσεων. Η εισαγωγή των ερπυστικών τάσεων και παραμορφώσεων εξασφαλίζεται με τη μέθοδο των αρχικών τάσεων. Λόγω της ύπαρξης διαφορετικών εξισώσεων για τη συνάρτηση του κριτηρίου διαρροής και του πλαστικού δυναμικού, οι πίνακες και το γενικό σύστημα εξισώσεων που εμφανίζονται στα επιμέρους στάδια χαρακτηρίζονται από ασυμμετρία, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται σημαντικά η υπολογιστική διαδικασία του συγκεκριμένου μοντέλου.

Μελετώντας την προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων, αξίζει να σημειωθούν τα παρακάτω:

α) η συγκεκριμένη μεθοδολογία δεν αποτελεί μία αυτόνομη μέθοδο μελέτης του φαινομένου, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο του κεφαλαίου, αλλά σχετίζεται άμεσα με την αντίστοιχη εμπειρική. Συχνά, εκτός από τις γενικές εξισώσεις διαφόρων θεωριών χρησιμοποιούνται και σχέσεις που προκύπτουν από την ανάλυση αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών,

- β) για την εφαρμογή της δεν απαιτείται η εκτέλεση δοκιμών ερπυσμού. Οι εμπειρικές σχέσεις που ενδεχομένως να απαιτηθούν κατά την εξέλιξη των υπολογισμών, λαμβάνονται συνήθως από αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές,
- γ) το πεδίο εφαρμογής της είναι ευρύτερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο της φαινομενολογικής προσομοίωσης. Με μικρές τροποποιήσεις των καταστατικών εξισώσεων είναι δυνατό να μελετηθεί η ερπυστική συμπεριφορά εδαφών με διαφορετικά μεταξύ τους χαρακτηριστικά,
- δ) οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι είναι αρκετά σύνθετοι με συνέπεια η ενσωμάτωσή τους σε κώδικες αριθμητικών μεθόδων να απαιτεί την πλήρη κατανόηση της ανάλογης θεωρίας και καλές γνώσεις προγραμματισμού. Επίσης, επιβάλλεται ο ποιοτικός και ποσοτικός έλεγχος όχι μόνο των τελικών αποτελεσμάτων αλλά και των επιμέρους σταδίων της αριθμητικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο 3

3.1 Παρουσίαση Εδαφικών Ιξώδων - Πλαστικών Μοντέλων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η επίδραση του παράγοντα χρόνου στην απόκριση του εδάφους, με τη βοήθεια αναλυτικών σχέσεων και αποτελεσμάτων εργαστηριακών δοκιμών. Η κλασική θεωρία της πλαστικότητας (Drucker και Prager, 1952, Drucker, 1954), κατά την οποία η εδαφική συμπεριφορά αντιμετωπίζεται ως χρονικά ανεξάρτητη, πρέπει να υποστεί τις απαιτούμενες τροποποιήσεις ώστε να μπορέσει να περιγράψει και τα ιξώδη (ερπυστικά) χαρακτηριστικά, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις είναι εντονότερα από τα αντίστοιχα πλαστικά. Τα εδαφικά μοντέλα των οποίων η πλαστική απόκριση εκφράζεται συναρτήσει του χρόνου καλούνται ως ιξώδη-πλαστικά. Δύο από τις πλέον γνωστές θεωρίες για την ιξώδη-πλαστική απόκριση του εδάφους είναι αυτές των Valanis (1971) και Perzyna (1966). Ο Valanis τροποποιεί τις καταστατικές εξισώσεις της ιξώδους ελαστικότητας εισάγοντας την ενδοχρονική θεωρία, ενώ σύμφωνα με τη θεωρία του Perzyna, η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα, ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται άμεσα από ορισμένες εδαφικές παραμέτρους καθώς και από την τιμή του κριτηρίου διαρροής σε κάθε επίπεδο φόρτισης.

3.2. Παρουσίαση της Θεωρία του Perzyna για την Ιξώδη-πλαστική απόκριση του εδάφους.

Με βάση τις αρχές της συγκεκριμένης θεωρίας η ολική παραμόρφωση ορίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους παραμορφώσεων που εμφανίζονται στην ελαστική και ιξώδη-πλαστική περιοχή. Ο ρυθμός παραμόρφωσης σε τυχαίο χρονικό σημείο δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (3.1)$$

όπου:

- $\dot{\varepsilon}_{ij}$ είναι ο ρυθμός της ολικής παραμόρφωσης,
- $\dot{\varepsilon}_{ij}^e$ είναι ο ρυθμός της ελαστικής παραμόρφωσης,
- $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ είναι ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης.

Ο παράγοντας χρόνος θεωρείται ότι δεν επηρεάζει την ελαστική συμπεριφορά του εδάφους, με συνέπεια το αντίστοιχο εντατικό πεδίο να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη γνωστή θεωρία της ελαστικότητας. Πειραματικά έχει αποδειχθεί (Gurtin κ.ά.,1962) πως ο ρυθμός της ελαστικής παραμόρφωσης ακολουθεί το γενικευμένο νόμο του Hooke και για την εύρεσή του προτείνεται η σχέση:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{2\mu} \dot{s}_{ij} + \frac{1-2\nu}{E} \dot{s} \delta_{ij} \quad (3.2)$$

όπου:

- μ είναι το μέτρο διάτμησης,
- E είναι το μέτρο ελαστικότητας,
- ν είναι ο λόγος του Poisson,
- \dot{s} είναι ο ρυθμός της μέσης τάσης, ($s_{ij} = \sigma_{ij}/3$),
- \dot{s}_{ij} είναι ο ρυθμός του τανυστή του εκτροπέα των τάσεων (deviatoric stress tensor), $s_{ij} = \sigma_{ij} - s\delta_{ij}$,
- δ_{ij} είναι το δέλτα του Kronecker, $\delta_{ii} = 1$, $\delta_{ij} = 0$.

Σύμφωνα με τον Prevost (1978), το έδαφος αρχίζει να συμπεριφέρεται πλαστικά όταν οι τάσεις ικανοποιούν μία δεδομένη σχέση, η οποία ονομάζεται συνθήκη πλαστικότητας (yield condition). Στην παρούσα θεωρία η συγκεκριμένη συνθήκη καλείται ως στατική συνάρτηση (επιφάνεια) διαρροής (static yield function) και έχει τη γενική μορφή:

$$F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{kl}^{vp}) = \frac{f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{kl}^{vp})}{\kappa} - 1 \quad (3.3)$$

όπου:

$F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{kl}^{vp})$ είναι η στατική συνάρτηση διαρροής, ανάλογη της τάσης και της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης,

$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{kl}^{vp})$ είναι το κριτήριο διαρροής του εδάφους,

κ είναι η παράμετρος κράτυνσης.

Η παράμετρος κ ορίζεται από τη σχέση:

$$\kappa = \kappa(W_{vp}) = \kappa \left(\int_0^{\varepsilon_{kl}^{vp}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{kl}^{vp} \right) \quad (3.4)$$

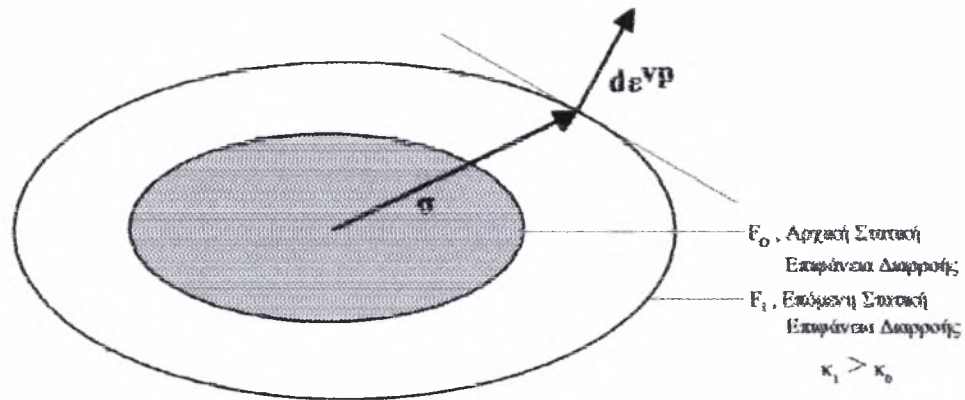
όπου:

W_{vp} είναι το έργο που παράγεται στην ιξώδη-πλαστική περιοχή.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η ελαστική ιξώδης-κρατυνόμενη-πλαστική απόκριση του εδάφους σύμφωνα με τη θεωρία του Perzyna (1966). Με σκίαση απεικονίζεται η αρχική περιοχή, στην οποία η απόκριση του εδάφους θεωρείται ελαστική. Όταν αναπτυχθεί το κατάλληλο εντατικό πεδίο και ικανοποιηθεί η συνθήκη πλαστικότητας, εμφανίζεται η αρχική στατική επιφάνεια διαρροής, η οποία ουσιαστικά αποτελεί το σύνορο μεταξύ ελαστικής και ιξώδους-πλαστικής απόκρισης. Στη συνέχεια, η συγκεκριμένη επιφάνεια διαστέλλεται, εάν η τιμή της παραμέτρου κράτυνσης αυξάνεται ή αντίστοιχα συστέλλεται, όταν η τιμή της κ μειώνεται. Η στατική επιφάνεια διαρροής μεταβάλλεται συνεχώς έως ότου πάρει την οριακή τιμή που αντιστοιχεί στη θραύση.

Στην απλούστερη περίπτωση της ελαστικής ιξώδους-τελείως-πλαστικής συμπεριφοράς η αρχική στατική επιφάνεια διαρροής δε μετακινείται καθώς συμπίπτει με την επιφάνεια θραύσης. Επίσης, και σε αναλογία με τη θεωρία της

ελαστοπλαστικότητας, το διάνυσμα των ιξώδων-πλαστικών παραμορφώσεων είναι κάθετο σε κάθε στατική επιφάνεια διαρροής.



Σχήμα 3.1. Ελαστική Ιξώδη-κρατυνόμενη-πλαστική απόκριση. Στατική Επιφάνεια Διαρροής.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης στην ιξώδη-πλαστική περιοχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.5)$$

όπου:

- $\dot{\varepsilon}_{vp}$ είναι ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης,
- γ είναι εδαφική παράμετρος με μονάδες αντίστροφες του χρόνου, η οποία καλείται παράμετρος ροής και επηρεάζει άμεσα την εξέλιξη της στατικής επιφάνειας διαρροής,
- $\Phi(F)$ είναι η συνάρτηση ροής, η οποία καθορίζει το μέγεθος του ρυθμού της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης,
- F είναι το κριτήριο διαρροής,
- Q είναι η συνάρτηση του ιξώδους-πλαστικού δυναμικού, που προσδιορίζει τη θέση των αλληλεπάληλων επιφανειών φόρτισης.

$\frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}}$ είναι το διάνυσμα που ορίζει τη διεύθυνση του ρυθμού παραμόρφωσης.

Από την αντικατάσταση των (3.2) και (3.5) στην (3.1) προκύπτει η σχέση:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu} s_{ij} + \frac{1-2\nu}{E} s \delta_{ij} + \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.6)$$

Η συνάρτηση ροής $\Phi(F)$ έχει μηδενική τιμή, όταν το έδαφος βρίσκεται στην ελαστική περιοχή ή ικανοποιείται οριακά το κριτήριο διαρροής του. Συγκεκριμένα, και κάνοντας χρήση του συμβόλου $\langle \cdot \rangle$, για τη συνάρτηση $\Phi(F)$ ισχύει:

$$\langle \Phi(F) \rangle = \begin{cases} 0, & \text{εάν } F \leq 0 \\ \Phi(F), & \text{εάν } F > 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Η δεύτερη αναλλοίωτη I_2^{vp} του ρυθμού της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης ορίζεται ως εξής:

$$I_2^{vp} = \frac{1}{2} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \quad (3.8)$$

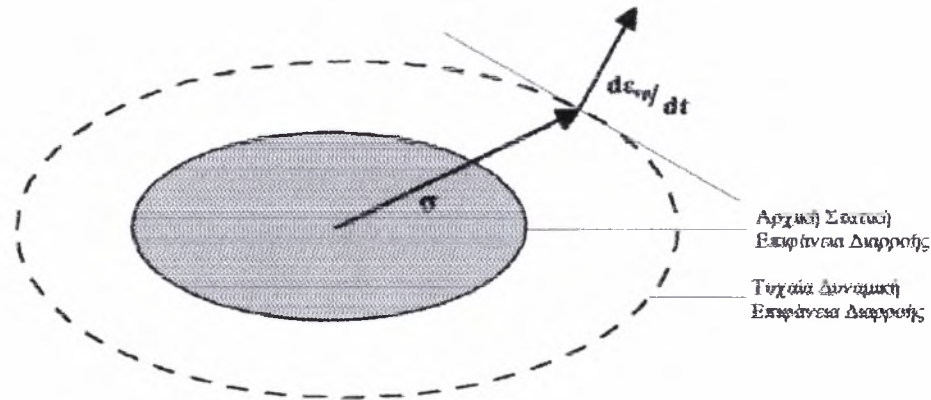
Υποτετραγωνίζοντας τα δύο μέλη της εξίσωσης (3.5) και θεωρώντας συζευγμένο κανόνα ροής, καταλήγουμε στη σχέση:

$$\sqrt{I_2^{vp}} = \gamma \Phi(F) \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}} \quad (3.9)$$

Η αντικατάσταση της (3.8) στην (3.3) και η περαιτέρω μαθηματική επεξεργασία οδηγούν στην παρακάτω σχέση:

$$f(\sigma_y, \varepsilon_M^{vp}) = \kappa(W_{vp}) \left\{ 1 + \Phi^{-1} \left[\frac{\sqrt{I_2^{vp}}}{\gamma} \left(\frac{1}{2} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{\rho a}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{\rho a}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (3.10)$$

Η συγκεκριμένη συνάρτηση καλείται δυναμική συνάρτηση (επιφάνεια) διαρροής για έδαφος με ελαστική ιξώδη-κρατυνόμενη-πλαστική απόκριση και ουσιαστικά εκφράζει τη συσχέτιση μεταξύ κριτηρίου διαρροής και ρυθμού παραμόρφωσης. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται, με τρόπο ανάλογο του Σχήματος 3.1, μία τυχαία δυναμική επιφάνεια διαρροής. Όπως διαπιστώνεται, το διάνυσμα του ρυθμού της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης είναι κάθετο στη δυναμική επιφάνεια διαρροής.

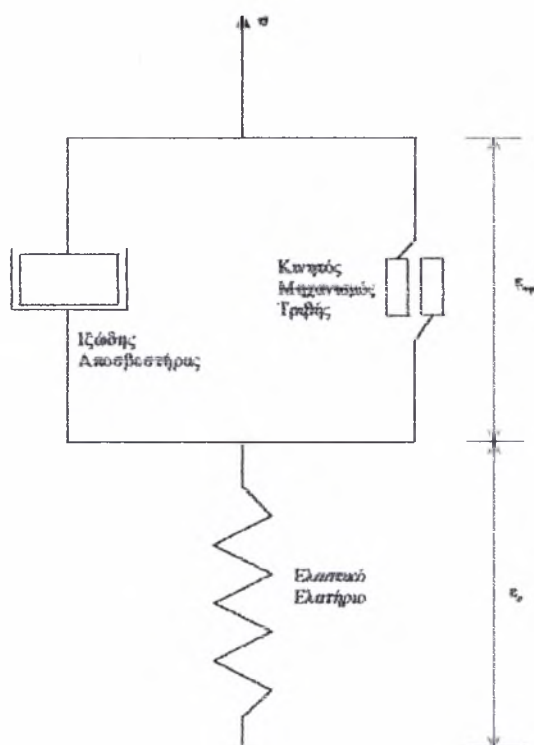


Σχήμα 3.2. Ελαστική Ιξώδη-πλαστική Απόκριση. Δυναμική Επιφάνεια Διαρροής.

3.3. Προτεινόμενο Εδαφικό Μοντέλο

Για τη μελέτη της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Οι εξισώσεις οι οποίες αναπτύσσονται παρακάτω, αναφέρονται στην απλή περίπτωση της μονοδιάστατης θεώρησης του προβλήματος του ερπυσμού, καθώς σκοπός της παρούσας ενότητας αποτελεί η παρουσίαση και κυρίως η κατανόηση του μηχανισμού λειτουργίας του συγκεκριμένου

εδαφικού μοντέλου. Οι πλήρεις καταστατικές εξισώσεις της διαδιάστατης αντιμετώπισης του ερπυσμού δίνονται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 3.3. Προτεινόμενο Εδαφικό Μοντέλο.

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα, τα χαρακτηριστικά στοιχεία του μοντέλου είναι το ελατήριο, το οποίο προσομοιάζει την ελαστική απόκριση, ο κινητός μηχανισμός τριβής (friction slider) και ο ιξώδης αποσβεστήρας (viscous dashpot), τα οποία περιγράφουν την πλαστική και ιξώδη συμπεριφορά αντίστοιχα. Η λειτουργία του προτεινόμενου μοντέλου βασίζεται στις εξής παραδοχές:

α) Η τάση η οποία αναπτύσσεται τόσο στην ελαστική όσο και στην ιξώδη-πλαστική περιοχή είναι ίση με την ολική τάση που ασκείται στο σύστημα. Σε κάθε χρονική στιγμή, λοιπόν, ισχύουν τα εξής:

$$\sigma_e = \sigma \quad (3.11)$$

$$\sigma_{vp} = \sigma \quad (3.12)$$

όπου:

σ είναι η ολική τάση,

σ_e είναι η ελαστική τάση,

σ_{vp} είναι η ιξώδης-πλαστική τάση.

β) Η ιξώδης-πλαστική τάση αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους τάσεων που παραλαμβάνουν ο κινητός μηχανισμός τριβής και ο ιξώδης αποσβεστήρας και υπολογίζεται από την επόμενη σχέση:

$$\sigma_{vp} = \sigma_d + \sigma_p \quad (3.13)$$

όπου:

σ_d είναι η ιξώδης τάση,

σ_p είναι η πλαστική τάση.

γ) Ο μηχανισμός τριβής ενεργοποιείται μόνον εάν η επιβαλλόμενη τάση υπερβεί, έστω και οριακά, την τάση διαρροής του συστήματος. Η συγκεκριμένη συνθήκη ορίζεται όπως παρακάτω:

$$\sigma_p = \sigma \quad \text{εάν} \quad \sigma < Y \quad (3.14)$$

$$\sigma_p = Y \quad \text{εάν} \quad \sigma \geq Y$$

όπου:

Y είναι η τάση διαρροής.

Από τη σχέση (3.14) γίνεται φανερό πως η μέγιστη τάση που μπορεί να αναπτυχθεί στο μηχανισμό τριβής είναι ίση με την τάση διαρροής Y .

δ) Η επιπρόσθετη τάση που εμφανίζεται στην περίπτωση υπέρβασης της τάσης διαρροής, παραλαμβάνεται από τον ιξώδη αποσβεστήρα, έτσι ώστε να ικανοποιείται η πρώτη παραδοχή. Για την ιξώδη τάση, δηλαδή, ισχύει:

$$\sigma_d = \sigma - \sigma_p \quad (3.15)$$

Θεωρώντας το ελατήριο ως γραμμικό ελαστικό, η τάση που εμφανίζεται σε αυτό δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_e = \sigma = E \cdot \varepsilon_e \quad (3.16)$$

όπου:

σ_e είναι η ελαστική τάση,

E είναι το μέτρο ελαστικότητας του ελατηρίου,

ε_e είναι η ελαστική τάση.

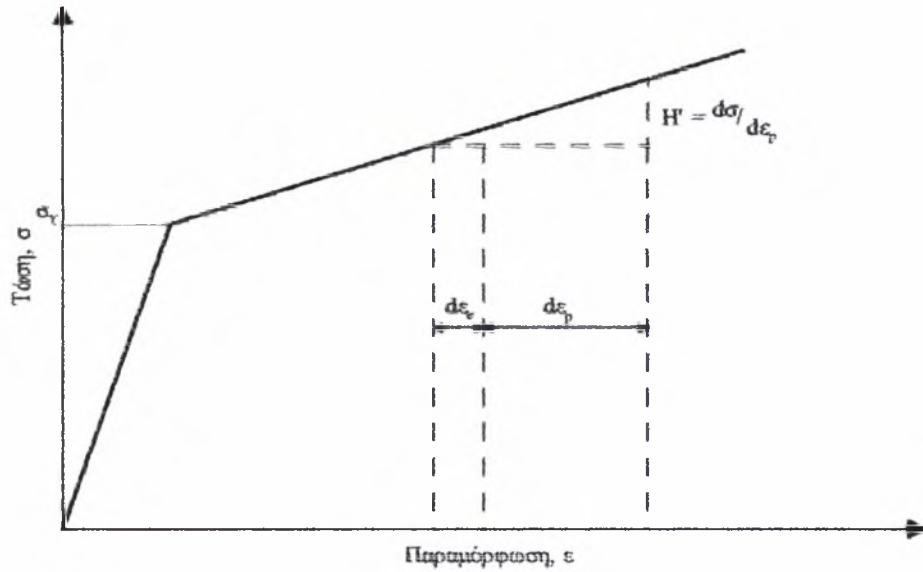
Το καθεστώς της ιξώδους-πλαστικής τάσης τη στιγμή της διαρροής και σε αντιστοιχία με την ελαστοπλαστική συμπεριφορά δίνεται από τη σχέση:

$$Y = \sigma_y + H' \cdot \varepsilon_{yp} \quad (3.17)$$

όπου:

σ_y είναι η οριακή τάση μεταξύ ελαστικής και πλαστικής περιοχής, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 3.4,

H' είναι η κλίση της ευθείας που περιγράφει την κρατυνόμενη πλαστική απόκριση.



Σχήμα 3.4. Ελαστική Κρατυνόμενη Πλαστική Απόκριση.

Η τάση που παραλαμβάνεται από τον ιξώδη αποσβεστήρα υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\sigma_d = \sigma - \sigma_p = \mu \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} \quad (3.18)$$

όπου:

σ_d είναι η ιξώδης τάση,

μ είναι συντελεστής που προσδιορίζει τα ιξώδη χαρακτηριστικά του μοντέλου.

Η ολική παραμόρφωση του συστήματος ε σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικής ιξώδους-πλαστικότητας ορίζεται ως ακολούθως:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp} \quad (3.19)$$

Εισάγοντας τις (3.14), (3.17), και (3.18) στην (3.15) προκύπτει ότι:

$$\sigma = \sigma_Y + H' \varepsilon_{vp} + \mu \frac{d\varepsilon_{vp}}{dt} \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας την ιξώδη-πλαστική παραμόρφωση, με τη βοήθεια της (3.19), και ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας την (3.16) η προηγούμενη σχέση γράφεται ως εξής:

$$H' \sigma + E(\sigma - \sigma_Y) + \mu \frac{d\sigma}{dt} = H' E\varepsilon + \mu E \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.21)$$

Η (3.21) είναι μία διαφορική εξίσωση πρώτης τάξεως, η οποία ουσιαστικά συσχετίζει το εντατικό πεδίο με τον παράγοντα χρόνο.

Ο ιξώδης συντελεστής μ μπορεί να αντικατασταθεί από την παράμετρο ροής γ η οποία ορίζεται όπως παρακάτω:

$$\gamma = \frac{I}{\mu} \quad (3.22)$$

Κάνοντας χρήση των (3.19) και (3.22), η (3.21) γράφεται τελικώς ως:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \gamma \left[\sigma - (\sigma_Y + H' \varepsilon_{vp}) \right] \quad (3.23)$$

Με βάση την (3.23) προκύπτει η ακόλουθη σχέση, η οποία προσδιορίζει το ρυθμό της ολικής παραμόρφωσης:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_{vp} \quad (3.24)$$

όπου:

$\dot{\varepsilon}_e$ είναι ο ρυθμός της ελαστικής παραμόρφωσης,

$$\dot{\varepsilon}_e = \frac{\dot{\sigma}}{E}$$

(3.25)

$\dot{\varepsilon}_{vp}$ είναι ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης,

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \gamma \left[\dot{\sigma} - (\sigma_{\gamma} + H' \varepsilon_{vp}) \right] \quad (3.26)$$

Όπως προαναφέρθηκε, η (3.21) εισάγει τον παράγοντα χρόνο στις καταστατικές εξισώσεις του μοντέλου. Για την άμεση, όμως, σύνδεση των τάσεων-παραμορφώσεων με το χρόνο επιβάλλεται η επίλυση της συγκεκριμένης διαφορικής εξίσωσης. Θεωρώντας, λοιπόν, πως στο σύστημα επιβάλλεται μία σταθερή τάση ($d\sigma/dt=0$) και η παράμετρος H' είναι διάφορη του μηδενός ($H' \neq 0$), η (3.21) γράφεται ως:

$$\frac{\gamma H'}{E} \sigma_A + \gamma (\sigma_A - \sigma_{\gamma}) = \gamma H' \varepsilon + \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.27)$$

όπου:

σ_A είναι η σταθερή επιβαλλόμενη τάση.

Η λύση της (3.27) δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_A}{E} + \frac{(\sigma_A - \sigma_{\gamma})}{H'} [1 - e^{-H'\gamma t}] \quad (3.28)$$

3.4. Βασικές Καταστατικές Εξισώσεις

Για την προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους και κατ' επέκταση και των αντίστοιχων στοιχείων διεπιφάνειας, εφαρμόστηκαν οι βασικές παραδοχές λειτουργίας του μοντέλου, το οποίο αναπτύχθηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα, σε συνδυασμό με τις καταστατικές εξισώσεις της ελαστικής ιξώδους-πλαστικής απόκρισης του εδάφους που προτείνονται από τον Perzyna και παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2.

Με βάση τα παραπάνω, ο ρυθμός εξέλιξης της ολικής παραμόρφωσης θεωρείται πως ισούται με το άθροισμα των αντίστοιχων ρυθμών της ελαστικής και ιξώδους-πλαστικής περιοχής. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η γνωστή σχέση:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_e + \dot{\epsilon}_{vp} \quad (3.29)$$

Η ελαστική απόκριση του εδάφους αντιμετωπίζεται ως ανεξάρτητη του χρόνου και συνεπώς το εντατικό πεδίο ορίζεται από τη γνωστή θεωρία της ελαστικότητας. Η εφαρμογή της γραμμικής ελαστικότητας οδηγεί στην επόμενη σχέση:

$$\sigma = D \dot{\epsilon}_e \quad (3.30)$$

όπου:

σ είναι ο τανυστής των τάσεων,

D είναι το μητρώο των τάσεων-παραμορφώσεων.

Η έναρξη της ιξώδους-πλαστικής συμπεριφοράς καθορίζεται από τη συνθήκη:

$$F(\sigma, \epsilon_{vp}) - F_0 = 0 \quad (3.31)$$

όπου:

$F(\sigma, \varepsilon_{vp})$ είναι η συνάρτηση διαρροής,

F_o είναι χαρακτηριστική τιμή αντοχής. Συχνά χρησιμοποιείται η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, ενώ για διάφορα κριτήρια διαρροής η τιμή της F_o ισούται με την τρίτη στήλη του Πίνακα 3.1.

| Κριτήριο Διαρροής | Εξίσωση Κριτηρίου Διαρροής | F_o |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Tresca | $2 (J_2)^{1/2} \cos\theta = \sigma_v(\kappa)$ | $\sigma_v(\kappa)$ |
| Von Mises | $(3 J_2)^{1/2} = \sigma_v(\kappa)$ | $\sigma_v(\kappa)$ |
| Mohr-Coulomb | $(1/3) J_1 \sin\varphi + (J_2)^{1/2} (\cos\theta - (1/3)^{1/2} \sin\theta \sin\varphi) = c \cos\varphi$ | $c \cos\varphi$ |
| Drucker-Prager | $\alpha J_1 + (J_2)^{1/2} = k$ | k |

Πίνακας 3.1. Προτεινόμενες Τιμές για τη Χαρακτηριστική Αντοχή F_o .

Υπενθυμίζεται πως σύμφωνα με τη θεωρία της ελαστικής ιξώδους-πλαστικότητας που εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη, ιξώδης-πλαστική παραμόρφωση εμφανίζεται μόνο εάν $F > F_o$.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης του εδάφους στην ιξώδη-πλαστική περιοχή ορίζεται ως εξής:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = f(\sigma) \quad (3.32)$$

όπου:

$f(\sigma)$ είναι συνάρτηση τάσης.

Είναι φανερό πως η παραπάνω σχέση έρχεται σε αντίθεση με επιστημονικές που θα αναπτυχθούν στο παράρτημα Α, καθώς αγνοεί την επίδραση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στην εξέλιξη του φαινομένου του ερπυσμού. Η ενσωμάτωση, όμως, των συγκεκριμένων παραμέτρων στην υπολογιστική διαδικασία οδηγεί σε

πολύπλοκους αλγόριθμους, με συνέπεια στη συγκεκριμένη μελέτη ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης να εξαρτάται μόνο από το καθεστώς των τάσεων. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται η επόμενη σχέση, η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.2:

$$\dot{\varepsilon}_{vp} = \gamma < \Phi(F) > \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3.33)$$

Για τη συνάρτηση ροής $\Phi(F)$ θεωρείται ότι ισχύει η συνθήκη (3.7).

3.4.1. Μεταβολή του Τανυστή της Ιξώδους-πλαστικής Παραμόρφωσης

Για την εύρεση της μεταβολής της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια ενός τυχαίου χρονικού διαστήματος $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (Kaneki κ.ά., 1978):

$$\Delta \varepsilon_{vp}^n = \Delta t_n \left[(1 - \theta) \dot{\varepsilon}_{vp}^n + \theta \dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1} \right] \quad (3.34)$$

όπου:

$\Delta \varepsilon_{vp}^n$ είναι η μεταβολή της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης στο χρονικό διάστημα Δt_n

$\dot{\varepsilon}_{vp}^n$ είναι ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης στην έναρξη του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος,

$\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1}$ είναι ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης στο τέλος του παραπάνω χρονικού διαστήματος.

Δt_n είναι το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα,

θ είναι αριθμητική παράμετρος, η οποία παίρνει τις τιμές 0.0, 0.5, 1.0.

Στην περίπτωση κατά την οποία η παράμετρος Θ λάβει τη μηδενική τιμή ($\Theta = 0$), η (3.34) εκφράζει την προς τα εμπρός-Euler διαδικασία, καθώς η μεταβολή της παραμόρφωσης $\Delta \varepsilon_{vp}$ εξαρτάται μόνον από το εντατικό πεδίο της αρχικής χρονικής στιγμής t_n . Με ανάλογο τρόπο, εάν $\Theta = 1$ από την (3.34) προκύπτει η προς τα πίσω-Euler διαδικασία και η τιμή της $\Delta \varepsilon_{vp}$ στην περίπτωση αυτή, καθορίζεται από το ρυθμό της παραμόρφωσης που εμφανίζεται στο τέλος του χρονικού διαστήματος Δt_n . Τέλος, εάν $\Theta = 0.5$, η (3.34) παράγει ένα γενικευμένο τραπεζοειδή κανόνα, ο οποίος είναι γνωστός και ως ο νόμος των Crank-Nicolson.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού παραμόρφωσης τη χρονική στιγμή t_{n+1} εφαρμόζεται ένα ανάπτυγμα κατά Taylor με πεπερασμένους όρους, όπως δίνεται παρακάτω:

$$\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1} = \dot{\varepsilon}_{vp}^n + H^n \Delta \sigma^n \quad (3.35)$$

όπου:

$\Delta \sigma^n$ είναι η μεταβολή της τάσης κατά το χρονικό διάστημα Δt_n

H^n είναι πίνακας ο οποίος ορίζεται ως:

$$H^n = \left(\frac{\partial \dot{\varepsilon}_{vp}}{\partial \sigma} \right)^n = H^n(\sigma^n) \quad (3.36)$$

Αναλυτική παρουσίαση του συγκεκριμένου πίνακα γίνεται στο Παράρτημα ΙΙ.

Αντικαθιστώντας την (3.35) στην (3.34) προκύπτει η εξής σχέση:

$$\Delta \varepsilon_{vp}^n = \dot{\varepsilon}_{vp}^n \Delta t_n + \Theta \Delta t_n H^n \Delta \sigma^n \quad (3.37)$$

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα C , ο οποίος ορίζεται ως:

$$C^n = \theta \Delta t_n H^n \quad (3.38)$$

η (3.37) γράφεται τελικώς όπως παρακάτω:

$$\Delta \varepsilon_{vp}^n = \dot{\varepsilon}_{vp}^n \Delta t_n + C^n \Delta \sigma^n \quad (3.39)$$

3.4.2. Μεταβολή του Τανυστή της Τάσης

Με βάση τη σχέση (3.30) και χρησιμοποιώντας τις μεταβολές των αντίστοιχων μεγεθών, προκύπτει πως:

$$\Delta \sigma^n = D \Delta \varepsilon_e^n = D(\Delta \varepsilon^n - \Delta \varepsilon_{vp}^n) \quad (3.40)$$

Η μεταβολή της ολικής παραμόρφωσης θεωρείται ότι συνδέεται με την αντίστοιχη των μετακινήσεων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta \varepsilon^n = B^n \Delta d^n \quad (3.41)$$

όπου:

Δd^n είναι η μεταβολή των μετακινήσεων κατά το χρονικό διάστημα Δt_n .

B^n είναι το μητρώο των παραμορφώσεων-μετακινήσεων.

Το μητρώο B αποτελεί το άθροισμα δύο επιμέρους μητρώων, όπως δίνεται παρακάτω:

$$B^n = B_o + B_{NL}^n \quad (3.42)$$

όπου:

B_0 είναι το γραμμικό μητρώο των παραμορφώσεων-μετακινήσεων, το οποίο παραμένει σταθερό κατά την εξέλιξη της υπολογιστικής διαδικασίας,

B_{NL} είναι το αντίστοιχο μη-γραμμικό μητρώο, το οποίο μεταβάλλεται στη διάρκεια των υπολογισμών.

Η χρήση της (3.42) επιβάλλεται στην περίπτωση προβλημάτων που επιλύονται με την παραδοχή των μεγάλων παραμορφώσεων, ενώ αντίθετα στις περισσότερες των περιπτώσεων, όπως και στην παρούσα μελέτη, το μη-γραμμικό μητρώο B_{NL} παραλείπεται και το μητρώο B θεωρείται ότι διατηρείται σταθερό σε κάθε στάδιο.

Με την αντικατάσταση των (3.41) και (3.39) στην (3.40), η μεταβολή του τανυστή της τάσης δίνεται τελικώς από τη σχέση:

$$\Delta \sigma^n = \hat{D}^n \left(B^n \Delta d^n - \epsilon_{vp}^n \Delta \epsilon_n \right) \quad (3.43)$$

όπου:

\hat{D}^n είναι πίνακας, ο οποίος ορίζεται ως:

$$\hat{D}^n = (I + DC^n)^{-1} D = (D^{-1} + C^n)^{-1} \quad (3.44)$$

3.4.3. Εξισώσεις Ισορροπίας

Η απαιτούμενη ευστάθεια της υπολογιστικής διαδικασίας εξασφαλίζεται με την ικανοποίηση, σε κάθε χρονική στιγμή t_n , των επόμενων εξισώσεων:

$$\int_{\Omega} [B^n]^T \sigma^n d\Omega + f^n = 0 \quad (3.45)$$

όπου:

$[B^n]^T$ είναι το ανάστροφο μητρώο του B^n ,

f^n είναι το διάνυσμα των ισοδύναμων επικόμβιων φορτίων που προκύπτει από την ανάλυση του συνόλου της επιβαλλόμενης φόρτισης (συνεχή, μοναχικά φορτία κ.ά.).

Με ανάλογο τρόπο κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος Δt_n , θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\int_{\Omega} [B^n]^T \Delta \sigma^n d\Omega + \Delta f^n = 0 \quad (3.46)$$

όπου:

Δf^n είναι η μεταβολή των ισοδύναμων επικόμβιων φορτίων που παρατηρείται κατά το διάστημα Δt_n

Από τη μαθηματική επεξεργασία των (3.39) και (3.43) προκύπτει πως η μεταβολή των μετακινήσεων για το χρονικό διάστημα Δt_n , δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta d^n = [K^n]^{-1} \Delta V^n \quad (3.47)$$

όπου:

K^n είναι το ελαστικό μητρώο ακαμψίας. Με βάση τη θεωρία των παραμορφώσεων, η οποία εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία, το συγκεκριμένο μητρώο ορίζεται ως:

$$K^n = \int_{\Omega} [B^n]^T D^n B^n d\Omega \quad (3.48)$$

ΔV είναι το μητρώο της μεταβολής των ψευδοφορτίων, το οποίο υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$\Delta V^n = \int_{\Omega} [B^n]^T D^n \varepsilon_{vp}^n \Delta t_n d\Omega + \Delta f^n \quad (3.49)$$

Από την επίλυση του γενικού συστήματος εξισώσεων που περιγράφει η (3.47) γίνονται γνωστές οι μεταβολές των μετακινήσεων κάθε κόμβου. Χρησιμοποιώντας την (3.43) βρίσκονται οι αντίστοιχες μεταβολές των τάσεων, ενώ με τη βοήθεια των (3.40) και (3.41) υπολογίζεται η μεταβολή της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης ως εξής:

$$\Delta \varepsilon_{vp}^n = B^n \Delta d^n - D^{-1} \Delta \sigma^n \quad (3.50)$$

Συνεπώς, το εντατικό πεδίο με το πέρας του διαστήματος Δt_n , περιγράφεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$\sigma^{n+1} = \sigma^n + \Delta \sigma^n \quad (3.51)$$

$$d^{n+1} = d^n + \Delta d^n \quad (3.52)$$

$$\varepsilon^{n+1} = \varepsilon^n + \Delta \varepsilon^n \quad (3.53)$$

3.5. Διατύπωση Κριτηρίου Σύγκλισης

Το σύστημα θεωρείται ότι εισέρχεται σε συνθήκες σταθερότητας (steady state conditions), όταν το διάνυσμα των μετακινήσεων δε μεταβάλλεται αισθητά

μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων. Η υπολογιστική, δηλαδή, διαδικασία τερματίζεται με την ικανοποίηση της σχέσης:

$$\frac{\|d^n - d^{n+1}\|}{\|d^{n+1}\|} \leq a \quad (3.54)$$

όπου:

- d^n, d^{n+1} είναι οι μετακινήσεις τις χρονικές στιγμές t_n και t_{n+1} αντίστοιχα,
- a είναι το επιθυμητό κριτήριο σύγκλισης των μετακινήσεων,
- $\| \cdot \|$ είναι η Ευκλείδειος απόσταση (νόρμα).

Κατά την επαναληπτική μέθοδο που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, η εύρεση της μεταβολής του τανυστή της τάσης $\Delta\sigma$ βασίζεται ουσιαστικά στη γραμμική προσέγγιση του συστήματος των εξισώσεων που ορίζεται στην (3.46). Συνέπεια της παραπάνω επισήμανσης αποτελεί η εμφάνιση σφάλματος στον υπολογισμό των $\Delta\sigma$ και σ , σε κάθε ενδιάμεσο στάδιο. Έτσι, κρίνεται αναγκαία η επιβολή διόρθωσης κατά την εξέλιξη της υπολογιστικής διαδικασίας, ώστε να περιοριστεί το προηγούμενο σφάλμα και οι εξισώσεις ισορροπίας (3.45) να ικανοποιούνται με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η διαδικασία διόρθωσης που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη μελέτη αποτελείται από τα επόμενα στάδια:

α) Εύρεση της τάσης σ^{n+1} χρησιμοποιώντας τις (3.43) και (3.51).

β) Υπολογισμός των εκτός ισορροπίας δυνάμεων (out-of-balance forces) με βάση τη σχέση:

$$\psi^{n+1} = \int_{\Omega} [B^{n+1}]^T \sigma^{n+1} d\Omega + f^{n+1} \neq 0 \quad (3.55)$$

όπου:

ψ^{n-1} είναι το διάνυσμα των εκτός ισορροπίας δυνάμεων.

γ) Πρόσθεση των πιο πάνω δυνάμεων στη μεταβολή της επιβαλλόμενης φόρτισης, κατά την έναρξη του επόμενου βήματος.

Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές (Owen και Hinton,1980, Desai κ.ά.,1996) η παραπάνω μεθοδολογία κρίνεται ως ιδιαίτερα αποτελεσματική, καθώς δεν περιπλέκει ιδιαίτερα την εξέλιξη των υπολογισμών και ταυτόχρονα επιφέρει ικανοποιητική μείωση του σφάλματος.

3.6. Μελέτη του Χρονικού Βήματος Δt

Σημαντική παράμετρο για την ευστάθεια καθώς και για την αξιοπιστία της υπολογιστικής διαδικασίας αποτελεί το μέγεθος του χρονικού βήματος Δt . Ο Courmeau (1974) μελετώντας την αριθμητική ευστάθεια της ελαστικής ιξώδους-πλαστικής απόκρισης με συζευγμένο κανόνα ροής, πρότεινε ορισμένα κριτήρια για την τιμή του βήματος Δt , τα οποία δίνονται στον Πίνακα 3.2. Πρέπει να τονιστεί πως οι συγκεκριμένοι περιορισμοί για το Δt ισχύουν μόνο για την περίπτωση που η παράμετρος θ της σχέσης (3.34) λάβει τη μηδενική τιμή. Αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για την εύρεση των τιμών του Πίνακα 3.2, παρέχεται στη βιβλιογραφία (Courmeau, 1974).

| <i>Κριτήριο Διαρροής</i> | <i>Tresca</i> | <i>Von-Mises</i> | <i>Mohr-Coulomb</i> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Προτεινόμενη τιμή χρονικού βήματος $\Delta t \leq \frac{\theta \gamma \sigma_0}{\gamma E}$ | $\Delta t \leq \frac{A(1+\nu)\sigma_0}{3\gamma E}$ | $\Delta t \leq \frac{A(1+\nu)(1-2\nu)\sigma_0}{\gamma(1-2\nu+\sin^2\phi)E}$ | |

Πίνακας 3.2. Προτεινόμενες Τιμές για το Μέγεθος του Χρονικού Βήματος Δt .

Στην περίπτωση που το χρονικό βήμα δε διατηρείται σταθερό αλλά μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη της επαναληπτικής διαδικασίας, εκτός από τα παραπάνω θεωρητικά κριτήρια για το μέγεθός του, είναι δυνατό να εφαρμοστούν και αντίστοιχα εμπειρικά τα οποία αναλύονται παρακάτω:

α) Σε κάθε στάδιο το μέγεθος του Δt πρέπει να ικανοποιεί την επόμενη σχέση:

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{vp}^n = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \left\{ \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^n \right)_{vp} \left(\dot{\varepsilon}_{ij}^n \right)_{vp} \right\}^{1/2} \Delta t_n \leq \tau \bar{\varepsilon}^n \quad (3.56)$$

όπου:

$\Delta \bar{\varepsilon}_{vp}^n$ είναι η μέγιστη μεταβολή της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης

$\bar{\varepsilon}$ είναι η συνολική παραμόρφωση,

τ είναι συντελεστής με σταθερή τιμή.

Η τιμή του βήματος Δt που τελικώς επιλέγεται και εισάγεται στο επόμενο στάδιο των υπολογισμών, είναι η ελάχιστη τιμή που προκύπτει από την εφαρμογή της (3.73) σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης.

Μία εναλλακτική μορφή της (3.56) αποτελεί η επόμενη σχέση η οποία προτείνεται από τον Desai et al (1996):

$$\Delta t^n \leq \rho \sqrt{\frac{I_2}{\dot{I}_2^{vp}}} \quad (3.57)$$

όπου:

I_2 είναι η δεύτερη αναλλοίωτη του τανυστή των παραμορφώσεων,

\dot{I}_2^{vp} είναι η δεύτερη αναλλοίωτη του τανυστή του ρυθμού των παραμορφώσεων,

ρ είναι συντελεστής με σταθερή τιμή.

Η τιμή του συντελεστή τ εξαρτάται από την τιμή της παραμέτρου θ της (3.34) και όπως διαπιστώνεται από τις σχέσεις (3.56) και (3.57) επηρεάζει αισθητά το μέγεθος του Δt . Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της προς τα εμπρός-Euler διαδικασίας ($\theta=0$) η τιμή του τ θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 0.15 ($0.01 < \tau < 0.15$) (Zienkiewicz και Cormeau,1974, Dinis και Owen,1978). Στην προς τα πίσω-Euler διαδικασία έχει διαπιστωθεί πως τιμές μεγαλύτερες του 10 ($\tau > 10$) οδηγούν σε ικανοποιητικά, από την άποψη της ακρίβειας, αποτελέσματα (Owen και Hinton, 1980).

β) Μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων πρέπει να ισχύει:

$$\Delta t_{n+1} \leq k \Delta t_n \quad (3.58)$$

όπου:

k είναι συντελεστής, για την τιμή του οποίου προτείνεται η τιμή $k = 1.5$.

3.7. Προτεινόμενος Αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής, παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα. Προσομοιάζει τη διδιάστατη ερπυστική συμπεριφορά του εδάφους χρησιμοποιώντας τις καταστατικές εξισώσεις και τις παραδοχές που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στις προηγούμενες ενότητες.

Η επίλυση του προβλήματος ξεκινά θεωρητικά από την αρχική κατάσταση κατά την οποία:

$$\cdot t = 0$$

• τα διανύσματα των τάσεων σ^p των μετακινήσεων σ^p των παραμορφώσεων ε^p καθώς και των φορτίων, είναι γνωστά και

$$\cdot \varepsilon_{vp}^0 = 0$$

Τα επόμενα στάδια της υπολογιστικής διαδικασίας είναι:

Στάδιο 1^ο

Για τη χρονική στιγμή $t = t_n$ υπολογίζονται

• το μητρώο παραμορφώσεων-μετακινήσεων σύμφωνα με τη σχέση (3.42)

$$B^n = B_o + B_{NL}^n \quad (B_{NL}^n = 0)$$

• το μητρώο C^n από τη σχέση (3.38)

$$C^n = \theta \Delta t_n H'$$

• το μητρώο \hat{D}^n από τη σχέση (3.44)

$$\hat{D}^n = (I + DC^n)^{-1} D = (D^{-1} + C^n)^{-1}$$

• το ελαστικό μητρώο ακαμψίας σύμφωνα με τη σχέση (3.48)

$$K^n = \int_{\Omega} [B^n]^T D^n B^n d\Omega$$

• ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης με βάση τη σχέση (3.33)

$$\dot{\varepsilon}_{vp}^n = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \right)^n$$

Στάδιο 4^ο

• Έλεγχος παραβίασης του κριτηρίου διαρροής σε όλα τα σημεία ολοκλήρωσης του καννάβου, σύμφωνα με την (3.31)

$$F(\sigma, \varepsilon_{vp}) - F_o = 0$$

Στο συγκεκριμένο στάδιο ελέγχεται, ουσιαστικά, εάν το έδαφος έχει εισέλθει στην ιξώδη-πλαστική περιοχή. Στην περίπτωση αυτή, ακολουθεί ο προσδιορισμός του ρυθμού της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης, όπως ορίζεται στη σχέση (3.33)

$$\dot{\varepsilon}_{vp}^{n+1} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \left(\frac{\partial Q}{\partial \sigma_y} \right)^{n+1} \quad (3.59)$$

Αντίθετα, για τα σημεία ολοκλήρωσης τα οποία παραμένουν στην ελαστική περιοχή η διαδικασία των υπολογισμών οδηγείται στο 7^ο Στάδιο.

Στάδιο 5^ο

• Εφαρμογή της σχέσης (3.55) για τον υπολογισμό των εκτός ισορροπίας δυνάμεων

$$\psi^{n+1} = \int_{\Omega} [B^{n+1}]^T \sigma^{n+1} d\Omega + f^{n+1} \neq 0$$

Στάδιο 6°

- Πρόσθεση των δυνάμεων ψ^{n+1} στη μεταβολή των ψευδοφορτίων

$$\Delta V^n = \int_{\Omega} [B^n]^T D^n \varepsilon_{vp}^n \Delta u_n d\Omega + \Delta f^{n+1} + \psi^{n+1} \quad (3.60)$$

και εισαγωγή τους στο διάνυσμα των φορτίων του επόμενου χρονικού βήματος.

Στάδιο 7°

- Προσδιορισμός του χρονικού βήματος Δt^{n+1} .
- Έλεγχος του κριτηρίου σύγκλισης σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης σύμφωνα με

την (3.71)

$$\frac{\|d^n\| - \|d^{n+1}\|}{\|d^{n+1}\|} \leq \alpha$$

Η ικανοποίησή του οδηγεί σε τερματισμό της υπολογιστικής διαδικασίας ή στην επιβολή του επόμενου βήματος της επιβαλλόμενης φόρτισης. Σε αντίθετη περίπτωση επιβάλλεται η επιστροφή στο 1° Στάδιο και η έναρξη της δεύτερης επανάληψης των υπολογισμών.

Κεφάλαιο 4



4.1. Παρουσίαση Προγραμμάτων

Για τη μελέτη της ερπυστικής συμπεριφοράς των εδαφικών στοιχείων διεπιφάνειας χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Οι απαιτούμενες τροποποιήσεις συνίστανται κυρίως στην αντικατάσταση των μητρώων παραμορφώσεων-μετακινήσεων B , τάσεων-μετακινήσεων D καθώς και του μητρώου ακαμψίας K , των εδαφικών στοιχείων από τα αντίστοιχα των στοιχείων διεπιφάνειας. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η αριθμητική ευστάθεια του στοιχείου διεπιφάνειας με ορισμένο πάχος (Desai κ.ά., 1984), του κοινού εδαφικού στοιχείου το οποίο είναι δυνατό να εφαρμοσθεί για την προσομοίωση των περιοχών επαφής (Zienkiewicz, 1974, Griffiths, 1985, Sharma & Desai, 1994), καθώς και του στοιχείου με εικονικό πάχος (Yuan & Chua, 1992).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε είναι τα εξής:

- α) είναι γραμμένο σε κώδικα FORTRAN90,
- β) παρέχει τη δυνατότητα χρήσης τετράπλευρων ισοπαραμετρικών στοιχείων οκτώ κόμβων με τέσσερα ή εννιά σημεία ολοκλήρωσης (2×2 ή 3×3), εφαρμόζοντας τη μέθοδο της αριθμητικής ολοκλήρωσης κατά Gauss,
- γ) η προσέγγιση της ερπυστικής απόκρισης γίνεται με βάση το εδαφικό μοντέλο της ενότητας 3.3, επιφέροντας τις απαιτούμενες τροποποιήσεις, ώστε να είναι εφικτή η αντιμετώπιση προβλημάτων δύο διαστάσεων,
- δ) ο καταστατικός νόμος και οι ανάλογες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του εντατικού πεδίου, είναι αυτές που περιγράφονται στην παράγραφο 3.4,
- ε) κατά την αποθήκευση του ολικού μητρώου ακαμψίας χρησιμοποιείται η μέθοδος Choleski,
- στ) η υπολογιστική διαδικασία τερματίζεται με την ικανοποίηση της συνθήκης που ορίζεται στη σχέση (3.71) ή με την εξάντληση του πλήθους των επαναληπτικών βημάτων που ορίζεται από το χρήστη.

4.2 CRP1.EXE

Πρόκειται για πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης των κρίσιμων περιοχών επαφής με στοιχεία διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση», βασιζόμενα στο μοντέλο των Desai κ.ά. (1984). Η υπολογιστική διαδικασία ακολουθεί τα στάδια που αναπτύχθηκαν στην ενότητα 3.7, ενώ η ενσωμάτωση του στοιχείου διεπιφάνειας σ' αυτήν εξασφαλίζεται:

α) με την εισαγωγή του μητρώου τάσεων-παραμορφώσεων C , όπως αυτό ορίζεται ενδεικτικά από τις σχέσεις (4.1), (4.2) στην (4.3),

$$[C^e] = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_2 & C_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [C_s] \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

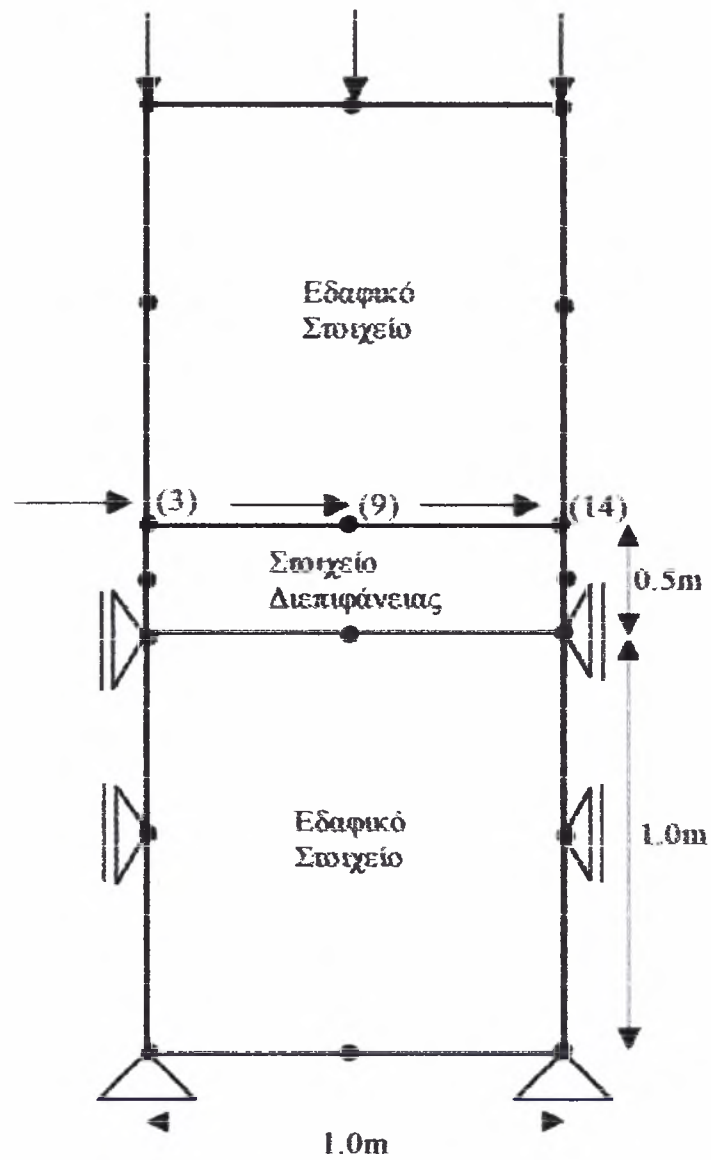
$$[C^{ep}]_i = [C^e(k_s, k_n)]_i - [C^e(k_s, k_n, \{dr^p\})]_i \quad (4.2)$$

$$B^e = B_0 + B_N^e \quad (4.3)$$

β) με τη χρήση του μητρώου ακαμψίας k_i το οποίο ορίζεται ως:

$$k_i = \int_{vol} B_i^T C_i B_i dv \quad (4.4)$$

Τα αρχεία δεδομένων (input files) που αναφέρονται στον κώνναρο του Σχήματος 4.1, δίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.1. Ενδεικτικός Κώνναρος.

CPR1.dat

3 1 3 18 4 0.001 9 25.0 0.001 0.1 100000.45500. 0.1 1. 2. 1. 20.

0.0000E+00 0.0000E+00

0.0000E+00 -0.5000E+00

0.0000E+00 -0.1000E+01

0.0000E+00 -0.1050E+01

0.0000E+00 -0.1100E+01

0.0000E+00 -0.1600E+01

0.0000E+00 -0.2100E+01

0.5000E+00 0.0000E+00

0.5000E+00 -0.1000E+01

0.5000E+00 -0.1100E+01

0.5000E+00 -0.2100E+01

0.1000E+01 0.0000E+00

0.1000E+01 -0.5000E+00

0.1000E+01 -0.1000E+01

0.1000E+01 -0.1050E+01

0.1000E+01 -0.1100E+01

0.1000E+01 -0.1600E+01

0.1000E+01 -0.2100E+01

3 2 1 8 12 13 14 9

5 4 3 9 14 15 16 10

7 6 5 10 16 17 18 11

7

5 0 1 6 0 1 7 0 0 11 0 0 16 0 1 17 0 1

18 0 0

6
 1 0.0 -.166667
 8 0.0 -.666667
 12 0.0 -.166667
 3 .8 .0
 9 .8 .0
 14 .8 .0

1
 10.0

mnuraps.dat

300000. 0.15 25. 15. 0.
 10000. 0.15 25. 15. 0.

Συγκεκριμένα, στα παραπάνω αρχεία ορίζονται:

CRPI.dat

- το πλήθος των στοιχείων του καννάβου (3),
- το πλήθος των στοιχείων κατά την οριζόντια διεύθυνση x-x (1) και κατά την κατακόρυφη y-y (3).
- το πλήθος των κόμβων (18),
- ο αριθμός των σημείων ολοκλήρωσης κάθε στοιχείου (4),
- η επιθυμητή σύγκλιση μεταξύ των διαδοχικών υπολογιστικών βημάτων (0.001 ή 1%),

• το επιθυμητό πλήθος των επαναλήψεων κατά την εξέλιξη ενός υπολογιστικού βήματος (9),

- η τιμή της παραμέτρου F_0 , η οποία περιγράφεται στη σχέση (3.31), (25.0),
- η τιμή της παραμέτρου γ , η οποία περιγράφεται στη σχέση (3.), (0.001),
- η τιμή του αρχικού χρονικού βήματος (0.1),
- η τιμή της ορθής ακαμψίας (10000.) και της διατμητικής (45500.),
- το πάχος του στοιχείου διεπιφάνειας (0.1),
- τα εδαφικά στοιχεία και τα στοιχεία διεπιφάνειας (1[] εδαφικό στοιχείο, 2 []

στοιχείο διεπιφάνειας),

- η τιμή του ειδικού βάρους (18.),
- οι συντεταγμένες (x,y) των κόμβων (0.,0.,.....,1.0,-2.1),
- η αρίθμηση των κόμβων κάθε στοιχείου με συγκεκριμένη φορά,
- το πλήθος των κόμβων με τουλάχιστον μία δεσμευμένη ελευθερία κίνησης

(7),

• οι κόμβοι με περιορισμένη ελευθερία κίνησης καθώς και τη δυνατότητα μετακίνησης τους (1[] ελευθερία κίνησης, 0[] απαγόρευση κίνησης),

- το πλήθος των κόμβων στους οποίους ασκείται φόρτιση (6),
- οι αριθμοί των κόμβων φόρτισης (1,...,14) και οι συντελεστές κατανομής του

φορτίου κατά τις διευθύνσεις x-x και y-y,

- ο αριθμός των βημάτων φόρτισης (1),
- η τιμή του ολικού επιβαλλόμενου φορτίου (10.)(kPa).

mhprops.dat

- η τιμή του μέτρου ελαστικότητας (30000.)(kPa),
- ο λόγος του Poisson (0.15),
- η τιμή της συνοχής (25.)(kPa),
- η γωνία εσωτερικής τριβής (15.)(°),
- η γωνία διαστολής (0.)(°)

για κάθε εδαφική στρώση.

Το αντίστοιχο αρχείο αποτελεσμάτων (output file) είναι το εξής:

CRP1.res

Global coordinates

| | | |
|---------|------------|-------------|
| node 1 | 0.0000E+00 | 0.0000E+00 |
| node 2 | 0.0000E+00 | -0.5000E+00 |
| node 3 | 0.0000E+00 | -0.1000E+01 |
| node 4 | 0.0000E+00 | -0.1050E+01 |
| node 5 | 0.0000E+00 | -0.1100E+01 |
| node 6 | 0.0000E+00 | -0.1600E+01 |
| node 7 | 0.0000E+00 | -0.2100E+01 |
| node 8 | 0.5000E+00 | 0.0000E+00 |
| node 9 | 0.5000E+00 | -0.1000E+01 |
| node 10 | 0.5000E+00 | -0.1100E+01 |
| node 11 | 0.5000E+00 | -0.2100E+01 |
| node 12 | 0.1000E+01 | 0.0000E+00 |
| node 13 | 0.1000E+01 | -0.5000E+00 |
| node 14 | 0.1000E+01 | -0.1000E+01 |
| node 15 | 0.1000E+01 | -0.1050E+01 |
| node 16 | 0.1000E+01 | -0.1100E+01 |
| node 17 | 0.1000E+01 | -0.1600E+01 |
| node 18 | 0.1000E+01 | -0.2100E+01 |

Global node numbers

| | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|----|----|----|----|----|
| Element 1 | 3 | 2 | 1 | 8 | 12 | 13 | 14 | 9 |
| Element 2 | 5 | 4 | 3 | 9 | 14 | 15 | 16 | 10 |
| Element 3 | 7 | 6 | 5 | 10 | 16 | 17 | 18 | 11 |

There are 26 equations and the half-bandwidth is 21

increment 1

The total time is 0.0000E+00

Displacements x-x are 0.5206E-02 0.5217E-02 0.5208E-02 0.4856E-02
0.4837E-02 0.4858E-02

Displacements y-y are -0.9931E-04 -0.2875E-03 -0.4689E-03 -0.7468E-04 -
0.2527E-03 -0.4374E-03

(1 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.8245E+01 0.2400E+02 0.0000E+00

(2 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1176E+02 0.2400E+02 0.0000E+00

(3 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.3445E+01 0.2400E+02 0.0000E+00

(4 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1656E+02 0.2400E+02 0.0000E+00

(1 G.P.) Strains in el.2 are 0.3052E-15 -0.3052E-05 0.3554E-04 -0.5744E-13

(2 G.P.) Strains in el.2 are 0.4106E-15 -0.4106E-05 0.3353E-04 0.5387E-12

(3 G.P.) Strains in el.2 are 0.1394E-15 -0.1394E-05 0.3886E-04 -0.1532E-12

(4 G.P.) Strains in el.2 are 0.5409E-15 -0.5409E-05 0.3136E-04 -0.7253E-12

Strains rate 0.5409E-04 -0.5409E-04 0.3136E-03 -0.7253E-11

The total time is 0.1000E+00

Displacements x-x are 0.1556E-01 0.1558E-01 0.1556E-01 0.1454E-01
0.1450E-01 0.1454E-01

Displacements y-y are -0.2607E-03 -0.7978E-03 -0.1320E-02 -0.2122E-03 -
0.7277E-03 -0.1258E-02

(1 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.2474E+02 0.7200E+02 0.0000E+00

(2 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.3527E+02 0.7200E+02 0.0000E+00

(3 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1034E+02 0.7200E+02 0.0000E+00

(4 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.4967E+02 0.7200E+02 0.0000E+00

(1 G.P.) Strains in el.2 are 0.5913E-14 -0.5913E-04 0.6885E-03 0.5132E-11
 (2 G.P.) Strains in el.2 are 0.8123E-14 -0.8123E-04 0.6633E-03 0.2211E-10
 (3 G.P.) Strains in el.2 are 0.2606E-14 -0.2606E-04 0.7261E-03 -0.2945E-11
 (4 G.P.) Strains in el.2 are 0.1091E-13 -0.1091E-03 0.6327E-03 -0.6413E-11

Strains rate 0.1987E-03 -0.1987E-03 -0.9340E-04 -0.1516E-10

The total time is 0.4054E+00

Displacements x-x are 0.3638E-01 0.3638E-01 0.3629E-01 0.3397E-01
 0.3388E-01 0.3397E-01

Displacements y-y are -0.5114E-03 -0.1827E-02 -0.2988E-02 -0.5314E-03 -
 0.1658E-02 -0.2891E-02

(1 G.P.) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.5772E+02 0.1680E+03 0.0000E+00
 (2 G.P.) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.8228E+02 0.1680E+03 0.0000E+00
 (3 G.P.) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.2412E+02 0.1680E+03 0.0000E+00
 (4 G.P.) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1159E+03 0.1680E+03 0.0000E+00

(1 G.P.) Strains in el.2 are 0.2087E-13 -0.2087E-03 0.2430E-02 0.1597E-10
 (2 G.P.) Strains in el.2 are 0.2875E-13 -0.2875E-03 0.2348E-02 0.3014E-10
 (3 G.P.) Strains in el.2 are 0.9155E-14 -0.9155E-04 0.2551E-02 -0.6523E-11
 (4 G.P.) Strains in el.2 are 0.3872E-13 -0.3872E-03 0.2245E-02 0.4115E-10

Strains rate 0.4550E-05 -0.4550E-05 0.1474E-05 0.3929E-12

The total time is 0.7108E+00

Displacements x-x are 0.7812E-01 0.7803E-01 0.7775E-01 0.7285E-01
 0.7264E-01 0.7288E-01

Displacements y-y are -0.9795E-03 -0.3931E-02 -0.6288E-02 -0.1216E-02 -
0.3481E-02 -0.6145E-02

(1 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1237E+03 0.3600E+03 0.0000E+00

(2 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1763E+03 0.3600E+03 0.0000E+00

(3 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.5170E+02 0.3600E+03 0.0000E+00

(4 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.2483E+03 0.3600E+03

0.0000E+00

(1 G.P.) Strains are 0.5454E-13 -0.5454E-03 0.6350E-02 0.7382E-10

(2 G.P.) Strains are 0.7521E-13 -0.7521E-03 0.6142E-02 0.1188E-09

(3 G.P.) Strains are 0.2387E-13 -0.2387E-03 0.6650E-02 -0.9643E-11

(4 G.P.) Strains are 0.1014E-12 -0.1014E-02 0.5880E-02 0.1377E-10

Strains rate 0.1796E-03 -0.1796E-03 0.3000E-04 0.2487E-09

The total time is 0.1016E+01

Displacements x-x are 0.1618E+00 0.1616E+00 0.1609E+00 0.1507E+00

0.1502E+00 0.1508E+00

Displacements y-y are -0.1882E-02 -0.8222E-02 -0.1297E-01 -0.2582E-02 -

0.7127E-02 -0.1274E-01

(1 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.2557E+03 0.7440E+03 0.0000E+00

(2 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.3644E+03 0.7439E+03

0.0000E+00

(3 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.1069E+03 0.7440E+03 0.0000E+00

(4 G.P) Stresses in el.2 are 0.0000E+00 -0.5131E+03 0.7439E+03 0.0000E+00

(1 G.P.) Strains in el.2 are 0.1256E-12 -0.1256E-02 0.1462E-01 0.1741E-09

(2 G.P.) Strains in el.2 are 0.1733E-12 -0.1733E-02 0.1416E-01 0.1788E-09

(3 G.P.) Strains in el.2 are 0.5493E-13 -0.5493E-03 0.1530E-01 0.2372E-10

(4 G.P.) Strains in el.2 are 0.2338E-12 -0.2338E-02 0.1356E-01 0.9667E-10

Strains rate -0.8621E-05 -0.4957E-04 0.4134E-04 0.5819E-04

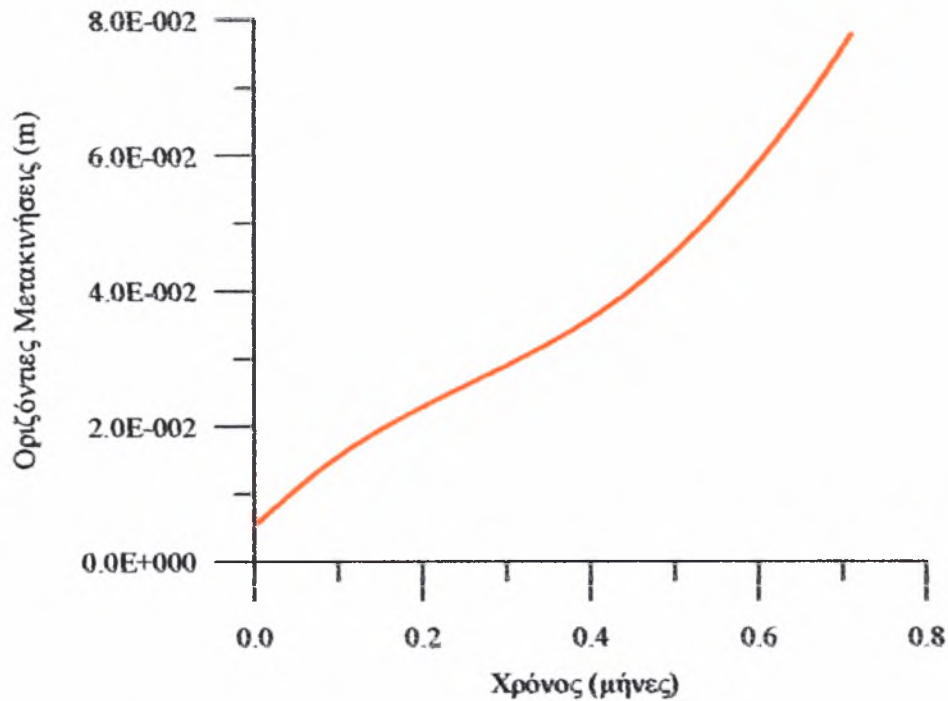
Όπως διαπιστώνεται στο αρχείο CRP1.res, δίνονται:

- οι συντεταγμένες και η αρίθμηση των κόμβων κάθε στοιχείου,
- η μεταβολή σε σχέση με το χρόνο
- των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων των κόμβων,
- των τάσεων, των παραμορφώσεων και του ρυθμού παραμόρφωσης στα σημεία ολοκλήρωσης του στοιχείου διεπιφάνειας.

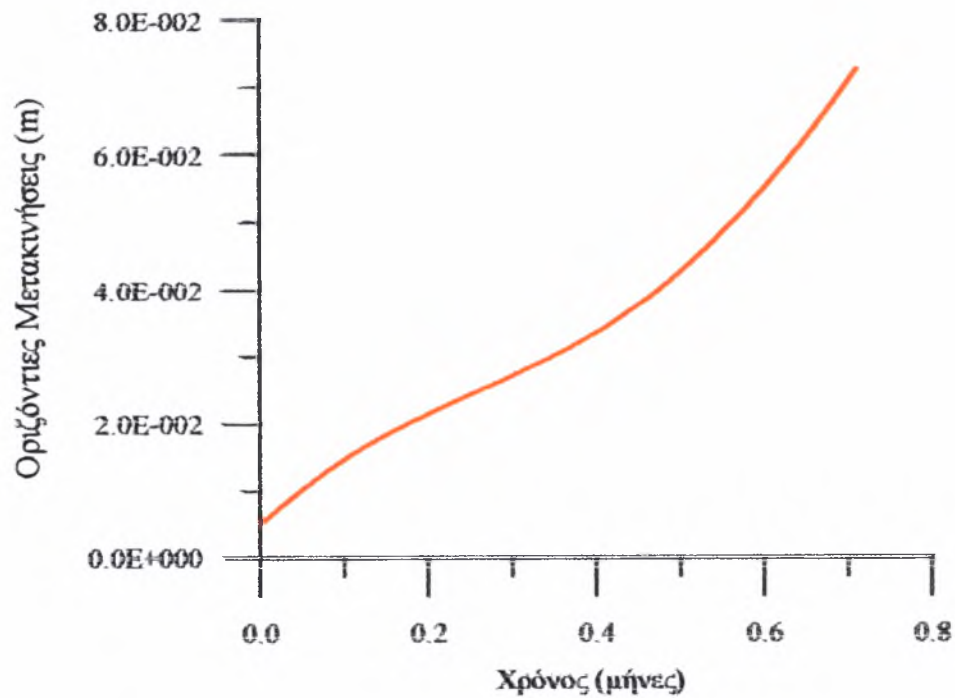
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, στα Σχήματα 4.2 - 4.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη των οριζόντιων μετακινήσεων των ανώτερων κόμβων του στοιχείου διεπιφάνειας, των διατμητικών τάσεων καθώς και του ρυθμού παραμόρφωσης του συγκεκριμένου στοιχείου.

Στην περίπτωση μεταβολής του επιβαλλόμενου φορτίου σε $P_2=100\text{kPa}$ ($P_1=10\text{kPa}$) και διατήρησης των υπολοίπων δεδομένων του προβλήματος, η σχέση μεταξύ των οριζόντιων μετακινήσεων του κόμβου 3 και του χρόνου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.7. Γίνεται φανερό πως η αύξηση του φορτίου επιταχύνει σημαντικά το ρυθμό παραμόρφωσης, με συνέπεια τα δύο πρώτα στάδια του φαινομένου του ερπυσμού να μην είναι ευδιάκριτα μεταξύ τους. Το στοιχείο διεπιφάνειας οδηγείται στη θραύση σε μικρότερο χρόνο από την αρχική περίπτωση ($P_1=10\text{kPa}$) και ουσιαστικά η απόκρισή του περιγράφεται από το στάδιο του τριτεύοντος ερπυσμού. Αντίθετα, με τη μείωση των ακαμψιών του στοιχείου διεπιφάνειας σε $k_{a(3)}=50000\text{kPa/cm}$, $k_{a(3)}=20000\text{kPa/cm}$ ($k_{a(1)}=100000\text{kPa/cm}$, $k_{a(1)}=45500\text{kPa/cm}$) και τη διατήρηση του αρχικού φορτίου ($P_2=P_1=10\text{kPa}$), η εξέλιξη των συγκεκριμένων μετακινήσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η

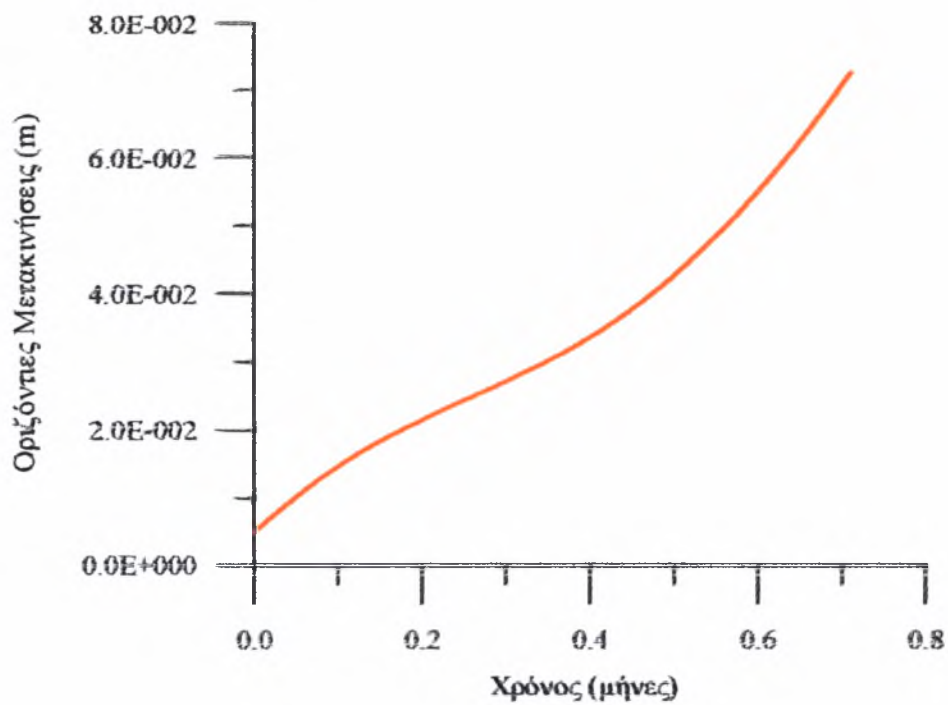
συμπεριφορά του στοιχείου περιγράφεται από τα στάδια του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ερπυσμού, ενώ η θραύση του εμφανίζεται θεωρητικά τη χρονική στιγμή $T_3 \gg T_1$.



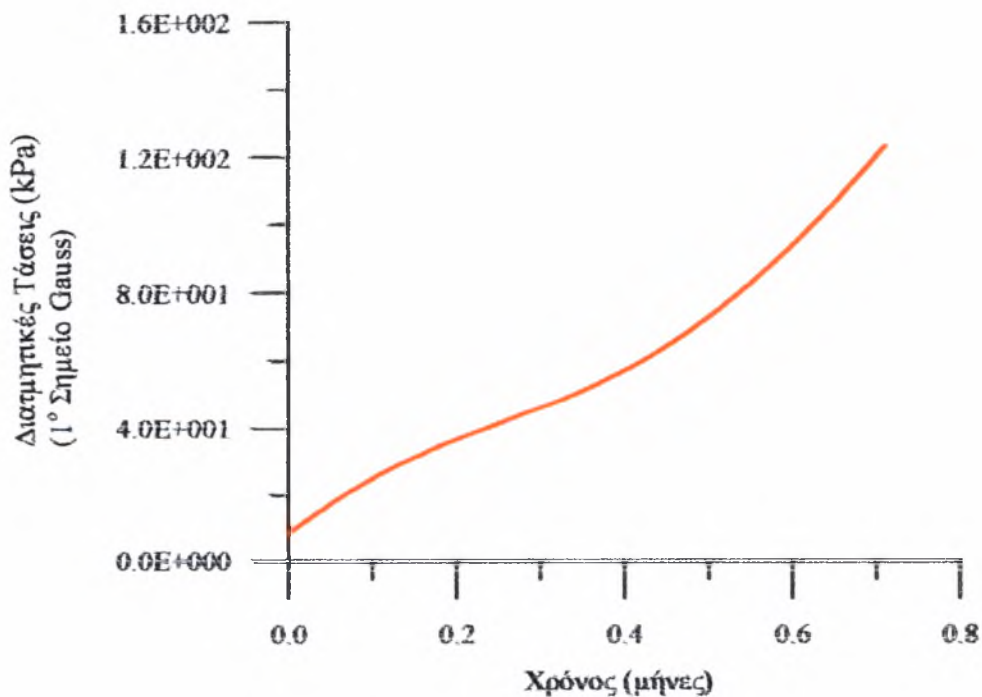
Σχήμα 4.2. Μεταβολή των Οριζόντιων Μετακινήσεων του Κόμβου 3 (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).



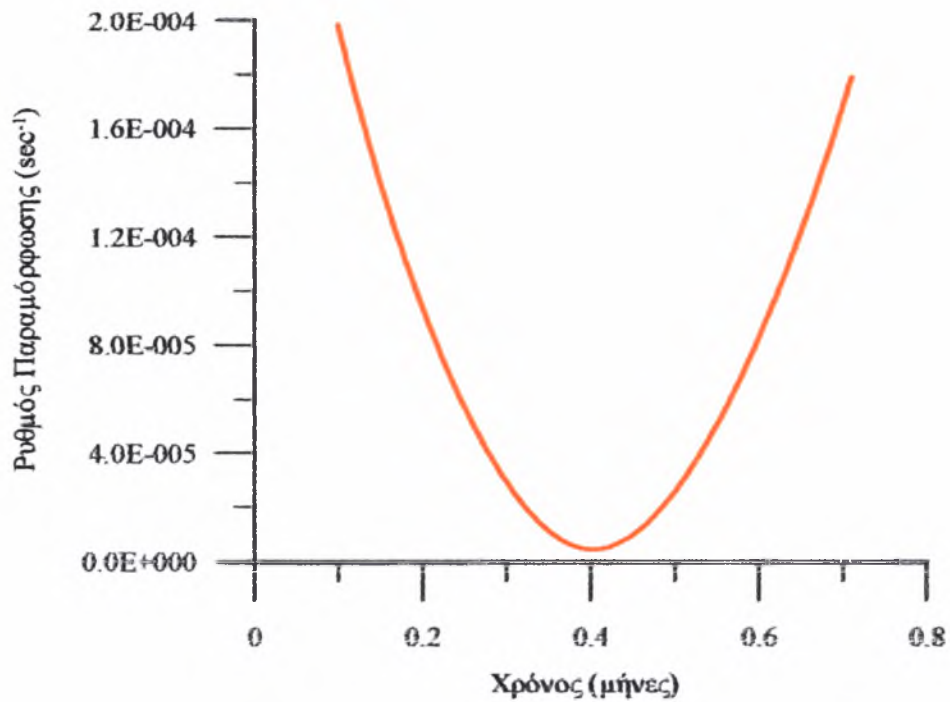
Σχήμα 4.3. Μεταβολή των Οριζόντιων Μετακινήσεων του Κόμβου 9 (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).



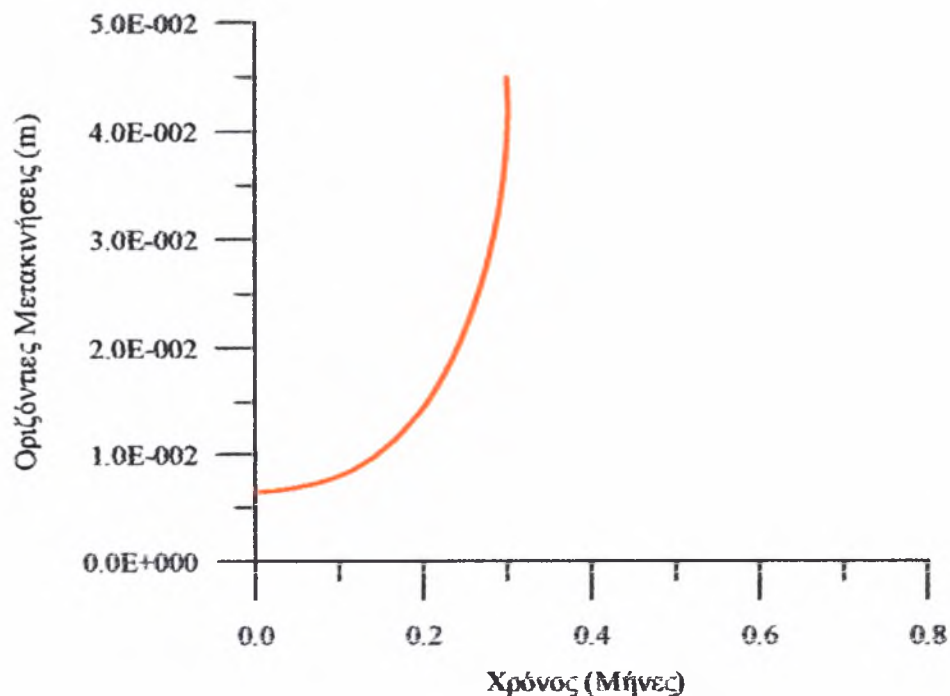
Σχήμα 4.4. Μεταβολή των Οριζόντιων Μετακινήσεων του Κόμβου 14 (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).



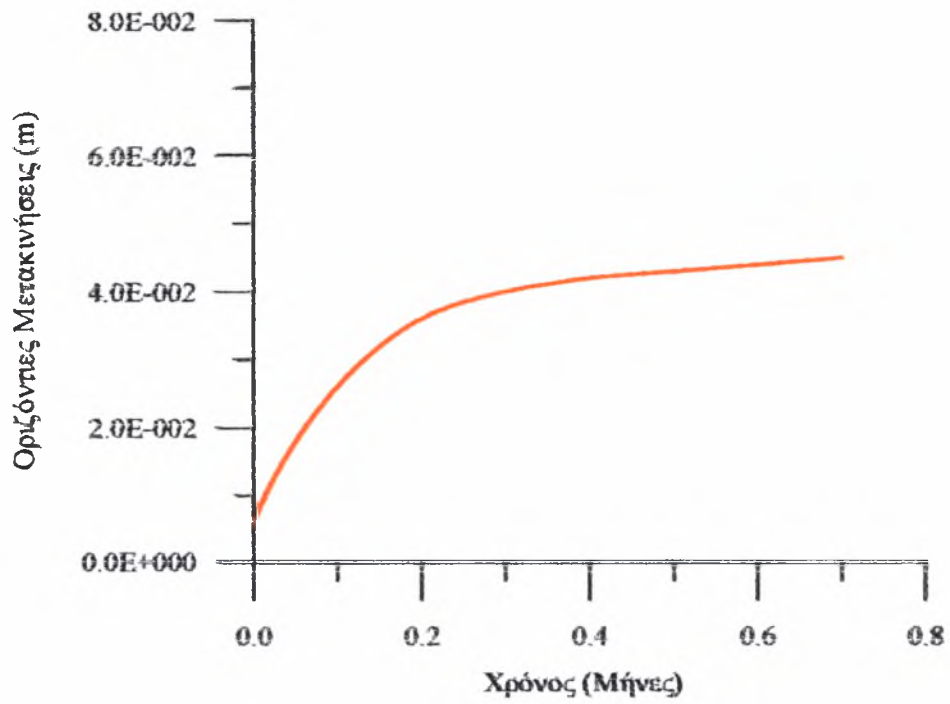
Σχήμα 4.5. Μεταβολή των Διατηρητικών Τάσεων του Στοιχείου Διεπιφάνειας (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).



Σχήμα 4.6. Μεταβολή του Ρυθμού Παραμόρφωσης στο Στοιχείο Διεπιφάνειας (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).



Σχήμα 4.7. Μεταβολή των Οριζόντιων Μετακινήσεων του Κόμβου 3 ($P_2=100\text{kPa}$), (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).

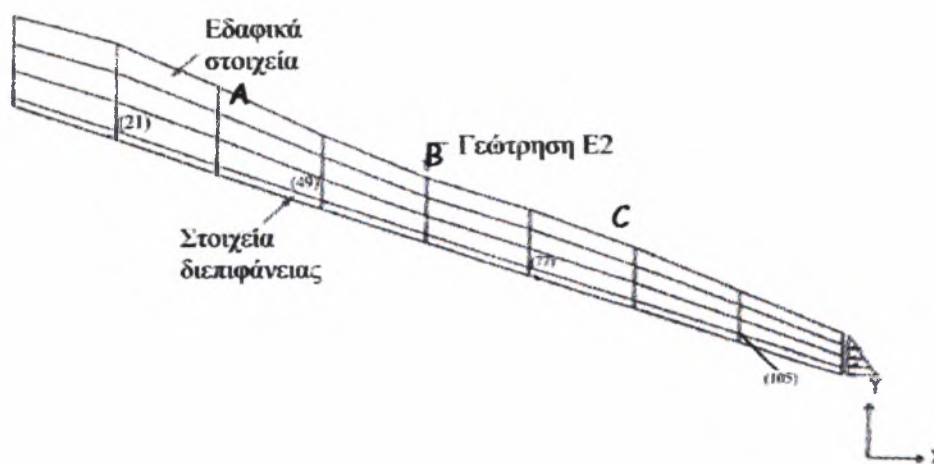


Σχήμα 4.8. Μεταβολή των Οριζόντιων Μετακινήσεων του Κόμβου 3 ($k_{x(3)}=50000\text{kPa/cm}$, $k_{y(3)}=20000\text{kPa/cm}$), (Στοιχείο Διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση»).

Κεφάλαιο 5

5.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μελέτης του ρυθμού μετακίνησης ενός ολισθαίνοντος φυσικού πρηνούς ερπυστικής συμπεριφοράς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά μελετάται χωρίς μέτρα υποστήριξης (Καραμπατάκης 2000) αλλά το κύριο μέρος της μελέτης γίνεται για χρήση σειράς πασσάλων σε ποικιλία θέσεων και αντοχών. Ο κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1 και αναφέρεται σε μία φυσική πλαγιά. Η συγκεκριμένη πλαγιά επιλέχθηκε ως παράδειγμα εφαρμογής καθώς υπήρχαν πλήρη βιβλιογραφικά δεδομένα (Vulliet και Hutter, 1988 Desai et al ,1995, Samtani et al,1996) σχετικά με τη γεωμετρία της, τις εδαφικές παραμέτρους, το σύστημα φόρτισης και με το ρυθμό εξέλιξης των μετακινήσεων της σε ορισμένες θέσεις.

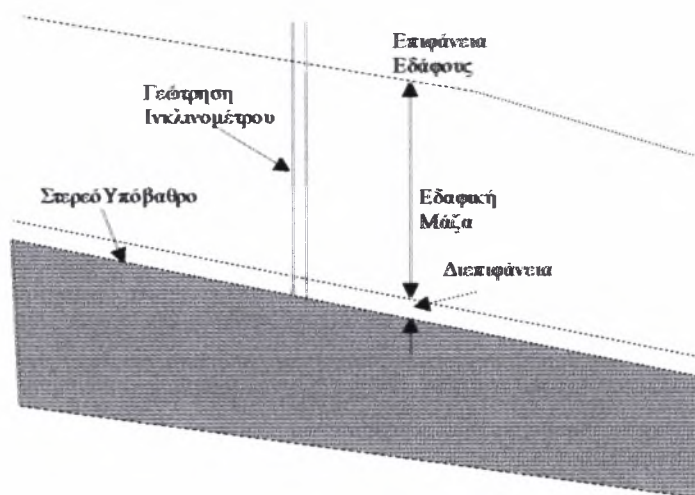


Σχήμα 5.1. Προτεινόμενος Κάνναβος (Samtani et al,1996).

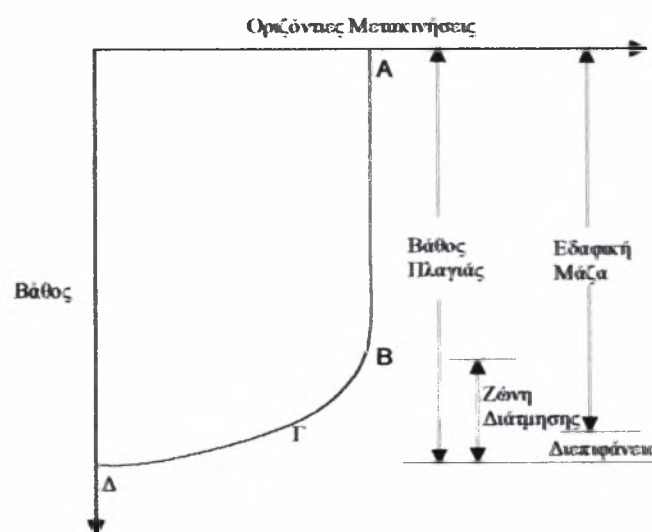
Στο Σχήμα 5.2 δίνεται μία ενδεικτική εδαφική τομή, στην οποία διακρίνονται το στερεό υπόβαθρο, η ζώνη διεπιφάνειας και η κύρια εδαφική μάζα. Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 5.3) απεικονίζεται σε ιδεατή μορφή η εξέλιξη των οριζόντιων

μετακινήσεων που παρατηρούνται στην κατακόρυφο (ΑΔ) συναρτήσει του βάθους. Όπως γίνεται φανερό, το διάγραμμα μεταβολής των μετακινήσεων του παραπάνω σχήματος, αποτελείται από δύο κύρια τμήματα:

- α) το τμήμα (ΑΒ) στο οποίο σημειώνονται αυξημένες και σταθερές, ως προς το βάθος, οριζόντιες μετακινήσεις,
- β) το τμήμα (ΒΔ) το οποίο αποτελεί τη ζώνη διάτμησης, και στο οποίο εμφανίζονται μικρότερες μετακινήσεις αλλά με σημαντική μεταβολή ως προς το μέγεθός τους.



Σχήμα 5.2. Ενδεικτική Εδαφική Τομή



Σχήμα 5.3. Ιδεατή Μεταβολή Οριζόντιων Μετακινήσεων ως προς το Βάθος.

Το κατώτερο μέρος της ζώνης διάτμησης περιγράφεται από το τμήμα (ΓΔ) και αποτελεί ουσιαστικά την περιοχή διεπιφάνειας μεταξύ στερεού υποβάθρου και εδαφικής μάζας. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται η εντονότερη διακύμανση των τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων, ενώ ο μηχανισμός παραμόρφωσης των στοιχείων είναι όμοιος με τον αντίστοιχο που δίνεται στο Σχήμα 1 του παραρτήματος Α.

5.2. Αριθμητική Επίλυση

5.2.1 Στοιχεία Καννάβου

Το μήκος της πλαγιάς που απεικονίζεται στον καννάβο του Σχήματος 5.1 είναι 100m, η κλίση της 17° , και το μέσο πάχος της είναι της τάξης των 8.0m. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν 24 ισοπαραμετρικά εδαφικά στοιχεία οκτώ κόμβων, για την προσομοίωση της εδαφικής μάζας, και 8 στοιχεία διεπιφάνειας για την προσέγγιση της απόκρισης της ζώνης διεπιφάνειας. Οι κόμβοι της κατώτερης πλευράς των στοιχείων διεπιφάνειας θεωρούνται αμετακίνητοι, καθώς αντιπροσωπεύουν το στερεό υπόβαθρο, ενώ οι κόμβοι που βρίσκονται στο σύνορο της ανάντι και κατάντι πλευράς της πλαγιάς έχουν τη δυνατότητα μετακίνησης και προς τις δύο διευθύνσεις.

5.2.2. Εδαφικές Παράμετροι

Τα χαρακτηριστικά και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αριθμητική επίλυση παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 5.1. Επίσης στο κάτω μέρος του πίνακα δίνονται πληροφορίες σχετικά με τον υπολογισμό των συγκεκριμένων παραμέτρων τόσο για τα εδαφικά στοιχεία όσο και για τα στοιχεία διεπιφάνειας.

| | <i>Εδαφικά Στοιχεία</i> | <i>Στοιχεία Διευθύνσεως</i> |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------------|
| α) Ελαστικότητα | | |
| Μέτρο Ελαστικ. E | 10400 kPa | $E=k_{vm} \cdot t=8 \cdot 10^{10}$ kPa |
| Λόγος Poisson ν | 0.35 | 0.35 |
| Ορθή Ακαμψία k_n | - | $8 \cdot 10^8$ kPa/cm |
| Διατμ. Ακαμ k_s | - | 2800 kPa/cm |
| β) Πλαστικότητα | | |
| Συνοχή c | 18 kPa | 18 kPa |
| Γωνία Τριβής φ | 20° | 20° |
| γ) Ιξώδης Απόκριση | | |
| Παράμ. Ροής γ | 0.00015/min | 0.057/min |
| Εκθετική Παράμ. N | 2.58 | 3.15 |

*E, c, φ : Κλασσικές εργαστηριακές δοκιμές
 k_n, k_s : Δοκιμή άμεσης διάτμησης με τη συσκευή CMDF (Desai 1981)
 γ, N : Δοκιμή ερπυσμού με τη συσκευή GEONOR H12.*

Πίνακας 5.1. Εδαφικές παράμετροι (Samtani et al.,1996).

5.2.3. Σύστημα Φόρτισης

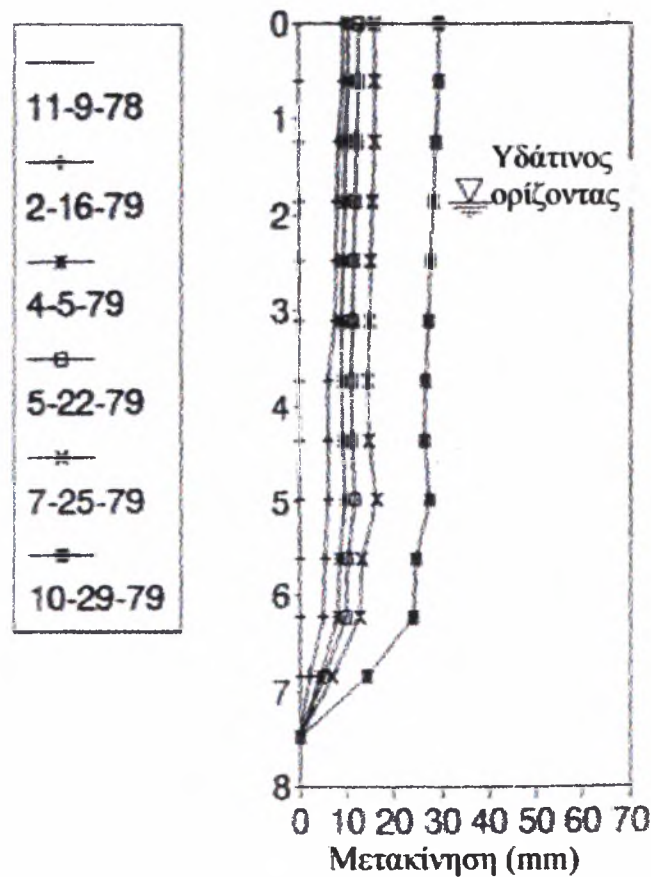
Με βάση βιβλιογραφικές αναφορές (Desai et al,1995,Samtani et al,1996) κατά τη μελέτη της μεταβολής του εντατικού πεδίου της συγκεκριμένης πλαγιάς, το σύστημα φόρτισης αποτελείται:

- α) από τα φορτία που προέρχονται από το ίδιο βάρος του εδάφους,
- β) τα φορτία που αναπτύσσονται λόγω της ύπαρξης του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα (υδροστατική πίεση),
- γ) τα φορτία που ασκούνται στην κατάντη παρειά της πλαγιάς και αντιπροσωπεύουν την αντίσταση (παθητικές ωθήσεις) του τμήματος της πλαγιάς, το οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη κατά την αριθμητική επίλυση.

Η στάθμη του υδάτινου οριζοντα θεωρείται ότι βρίσκεται σε βάθος 2.0m, από την επιφάνεια του εδάφους και διατηρείται σταθερή κατά την εξέλιξη της υπολογιστικής διαδικασίας. Επίσης, με βάση τη μελέτη του Ter-Stepanian [1988] το κατάντι επιβαλλόμενο φορτίο ισούται με το 75% των παθητικών ωθήσεων του εδάφους, υπολογιζόμενες με τη μέθοδο Coulomb.

5.2.4. Ρυθμός Εξέλιξης του Εντατικού Πεδίου

Για τον έλεγχο της εξέλιξης του εντατικού πεδίου και συγκεκριμένα των οριζόντιων μετακινήσεων, χρησιμοποιούνται οι καταγραφές ινκλινομέτρου, το οποίο τοποθετήθηκε στη γεώτρηση E2 βάθους 7.5m. Οι επί τόπου μετρήσεις που ελήφθησαν σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους δίνονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 5.4



Σχήμα 5.4. Καταγραφές Ινκλινομέτρου (Samtani et al.,1996)

5.2.5. Καταστατικός Νόμος

Η συμπεριφορά τόσο των εδαφικών στοιχείων όσο και των στοιχείων διεπιφάνειας θεωρείται ως ελαστική ιξώδης-πλαστική και βασίζεται στο εδαφικό μοντέλο που περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Επίσης, ως κριτήριο διαρροής χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο των Mohr-Coulomb.

5.2.6. Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης

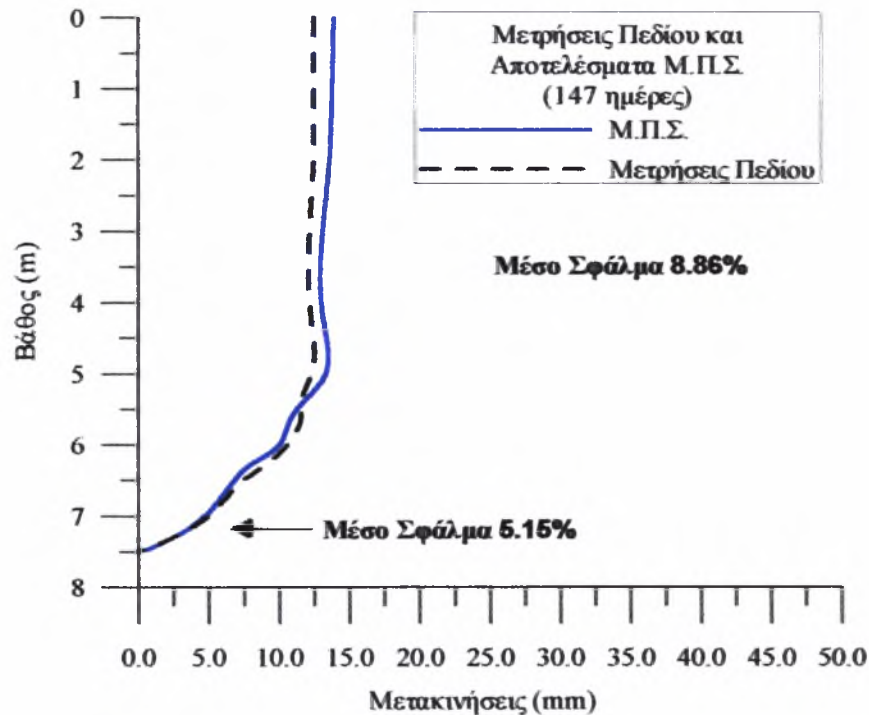
Κατά τη μελέτη του συγκεκριμένου προβλήματος η επίλυση πραγματοποιήθηκε με προσομοίωση της ζώνης διεπιφάνειας ως «λεπτή-στρώση». Για την ολοκλήρωση της επίλυσης χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων CRP1.EXE (Κεφάλαιο 4)

Σύμφωνα με τους Samtani et al (1996) το πάχος των στοιχείων διεπιφάνειας στην επίλυση είναι δυνατό να υπολογιστεί με βάση τις επί τόπου καταγραφές των οριζόντιων μετακινήσεων (Σχήμα 5.3). Συγκεκριμένα, προτείνεται για το πάχος των στοιχείων διεπιφάνειας η τιμή 1.0m.

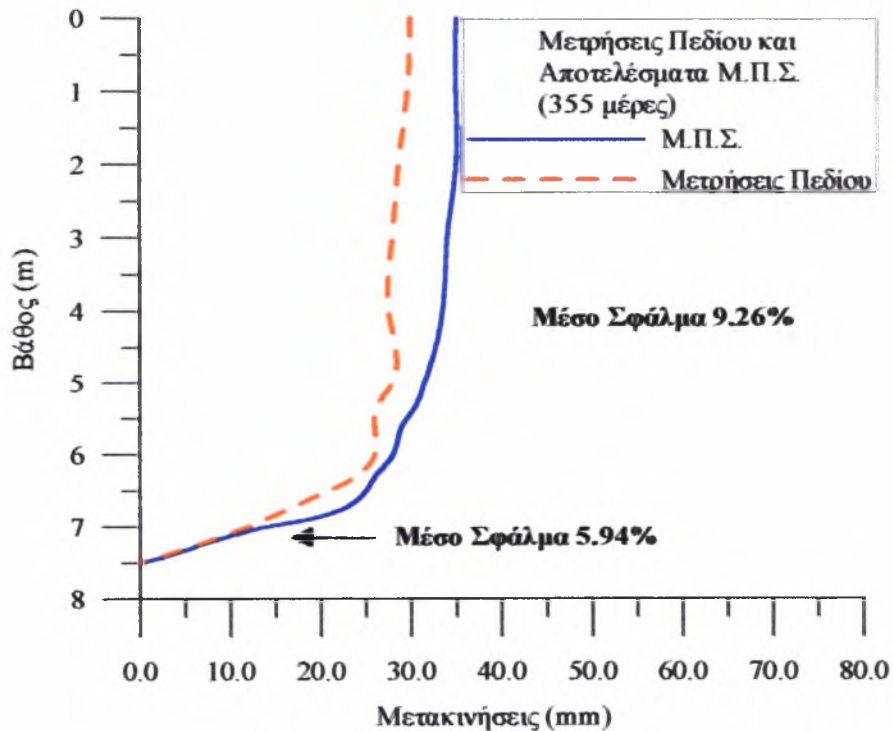
Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των επί τόπου ενδείξεων του ινκλινομέτρου στη θέση E2 και των αντίστοιχων οριζόντιων μετακινήσεων που προκύπτουν από την αριθμητική επίλυση, μετά το πέρασμα 147 ημερών από την τοποθέτηση του ινκλινομέτρου. Όμοια, στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 5.6) δίνεται η σύγκριση μετά από 355 ημέρες από την έναρξη των καταγραφών του οργάνου. Αξίζει να σημειωθεί πως και στις δύο περιπτώσεις στη ζώνη διεπιφάνειας έχουν χρησιμοποιηθεί στοιχεία διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση» με πάχος 1.0m.

Το μέσο σφάλμα ανάμεσα στις επί τόπου καταγραφές και τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης, μετά το πέρασμα των 147 ημερών, είναι της τάξης του 8.86%. Στη ζώνη διεπιφάνειας το σφάλμα, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά και στο Σχήμα

5.5, μειώνεται στο 5.15%. Αντίστοιχα, μετά από 355 ημέρες τα συγκεκριμένα σφάλματα αυξάνονται σε 9.26% και 5.94%. Με βάση τις παραπάνω επιστημονικές είναι δυνατό να διατυπωθεί το εξής:



Σχήμα 5.5. Μετρήσεις Πεδίου και Αποτελέσματα Μ.Π.Σ. (147 ημέρες)



Σχήμα 5.6. Επί τόπου Καταγραφές και Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης (355 ημέρες)

- ο χρησιμοποιούμενος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων (CRP1.EXE) προσεγγίζει ικανοποιητικά την ερπυστική συμπεριφορά της παρούσας πλαγιάς. Το μέσο σφάλμα του 9.26% το οποίο εμφανίζεται στον υπολογισμό των οριζόντιων μετακινήσεων μετά από 355 ημέρες θεωρείται πως κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια. Για την αμεσότερη αντίληψη του συγκεκριμένου σφάλματος δίνονται στον Πίνακα 5.1 οι τιμές των μετακινήσεων έτσι όπως λαμβάνονται από τις επί τόπου μετρήσεις και την αριθμητική επίλυση αντίστοιχα.

| <i>Βάθος (m)</i> | <i>Οριζόντιες Μετακιν. (mm) Καταγραφές Πεδίου</i> | <i>Οριζόντιες Μετακιν. (mm) Μ.Π.Σ. (CRP1.EXE)</i> |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 0.00 | 12.50 | 13.90 |
| 1.00 | 12.50 | 13.80 |
| 2.00 | 12.50 | 13.60 |
| 3.00 | 12.20 | 13.10 |
| 4.00 | 12.20 | 13.00 |
| 5.00 | 12.35 | 13.30 |
| 5.42 | 11.60 | 11.60 |
| 5.60 | 11.60 | 10.90 |
| 6.00 | 10.60 | 10.00 |
| 6.30 | 9.00 | 7.80 |
| 6.50 | 7.50 | 6.80 |
| 7.00 | 5.00 | 4.00 |
| 7.50 | 0.00 | 0.00 |

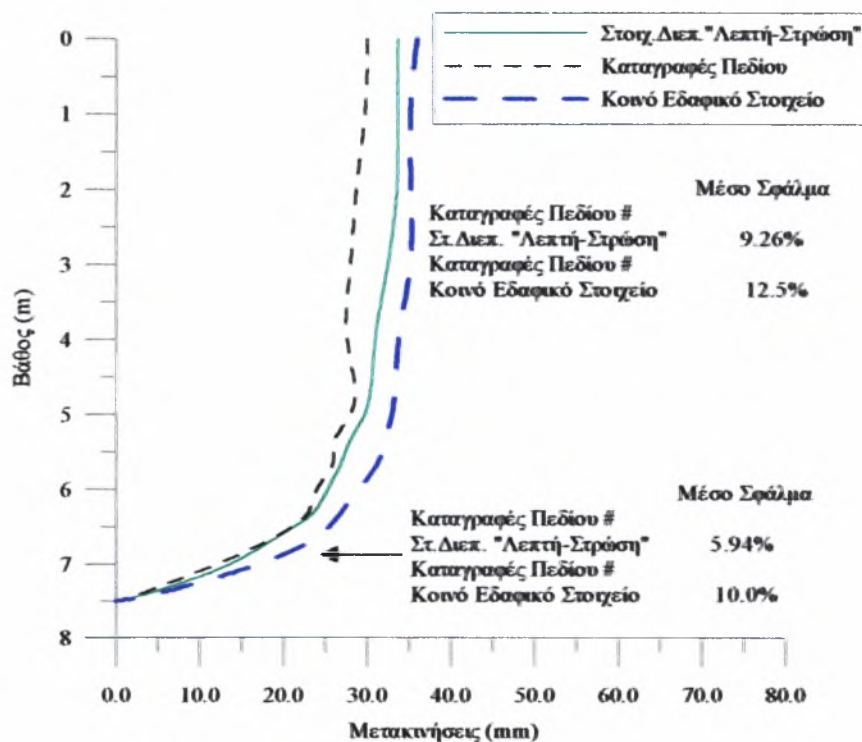
Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα Επί Τόπου Καταγραφών και Μ.Π.Σ. με το Πρόγραμμα CRP1.EXE.

Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται επιπρόσθετα σε σχέση με το Σχήμα 5.6 οι οριζόντιες μετακινήσεις που προκύπτουν από την επίλυση του προβλήματος με τη

χρήση κοινών εδαφικών στοιχείων στην περιοχή διεπιφάνειας. Όπως παρατηρείται με την εφαρμογή των εδαφικών στοιχείων ως στοιχεία διεπιφάνειας το μέσο σφάλμα αυξάνεται σε 12.5% ενώ στη ζώνη διεπιφάνειας μεταξύ στερεού υπόβαθρου και εδαφικής μάζας, το σφάλμα αυξάνεται σε 10.0%. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό πως:

α) η προσομοίωση της περιοχής διεπιφάνειας με τη χρησιμοποίηση εδαφικών στοιχείων έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση του μέσου σφάλματος της υπολογιστικής διαδικασίας, σε σύγκριση με τις επί τόπου καταγραφές,

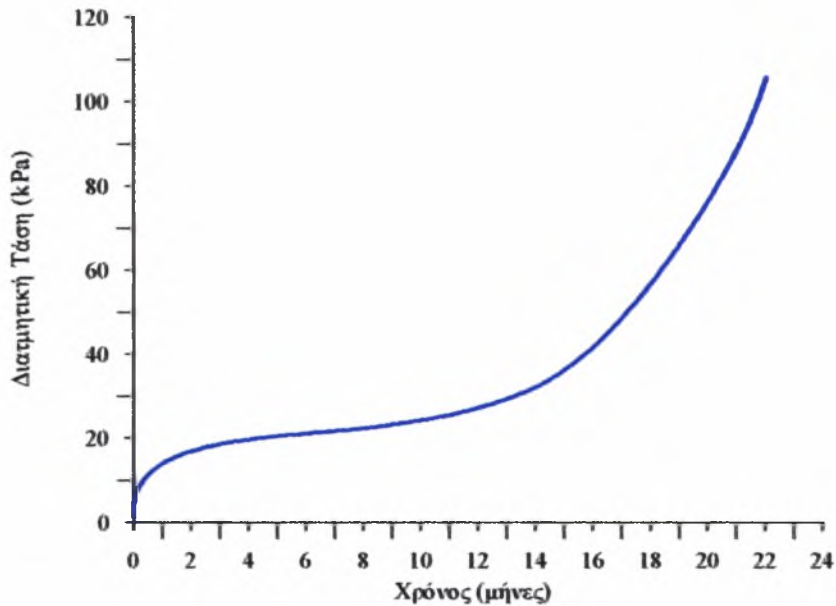
β) το στοιχείο διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση» προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ερπυστική συμπεριφορά της ζώνης διεπιφάνειας σε αντίθεση με το κοινό εδαφικό στοιχείο.



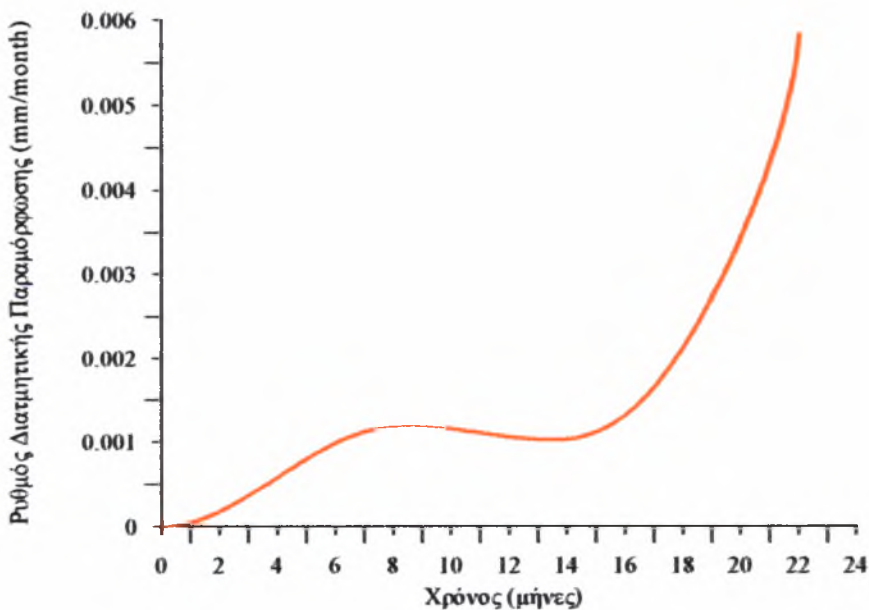
Σχήμα 5.7. Επί τόπου Καταγραφές και Αποτελέσματα Αριθμητικής Επίλυσης με τη Χρήση Στοιχείων Διεπιφάνειας «Λεπτή-Στρώση» και Κοινών Εδαφικών Στοιχείων (355 ημέρες).

Στα Σχήματα 5.8, 5.9, παρουσιάζεται η μεταβολή της διατμητικής τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης του πρώτου σημείου ολοκλήρωσης του στοιχείου 20. Γίνεται

αντιληπτό πως από την έναρξη των καταγραφών ($t=0$) μέχρι τους πρώτους 7 μήνες ο ρυθμός παραμόρφωσης του στοιχείου διεπιφάνειας αυξάνεται σταθερά (πρωτεύων ερπυσμός). Στη συνέχεια για τους υπόλοιπους 7 έως 8 μήνες διατηρείται σχεδόν αμετάβλητος (δευτερεύων ερπυσμός), ενώ με το πέρας 15 μηνών εμφανίζεται μία απότομη αύξηση του ρυθμού, η οποία ουσιαστικά περιγράφει τη θραύση στη συγκεκριμένη θέση της πλαγιάς.



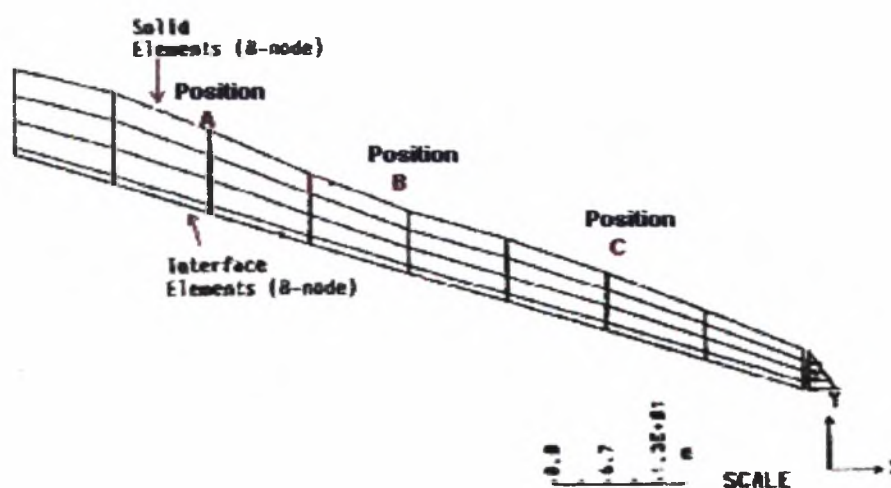
Σχήμα 5.8. Μεταβολή Διατμητικής Τάσης του Στοιχείου 20 ως προς το Χρόνο.



Σχήμα 5.9. Μεταβολή Ρυθμού Παραμόρφωσης του Στοιχείου 20 ως προς το Χρόνο.

5.3 Ανάλυση της συμπεριφοράς των μέτρων σταθεροποίησης

Στοχεύοντας στην σταθεροποίηση του υπο εξέταση πρανούς επιλέχθηκε η λύση σειράς πασσάλων και μελετήθηκε η αποτελεσματικότητα ορισμένων μέτρων σταθεροποίησης στη μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης του φυσικού ολισθαίνοντος πρανούς. Συγκεκριμένα, εξετάσθηκε η επιρροή στη συμπεριφορά του πρανούς, της κατασκευής πασσαλομάδας στις θέσεις A, B και C που παρουσιάζονται αναλυτικά στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10. Χρησιμοποιούμενος κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων με την απεικόνιση των θέσεων A, B και C.

Η αριθμητική προσομοίωση των προαναφερθέντων μέτρων σταθεροποίησης επιτεύχθηκε προσεγγιστικά με τη χρήση του κώδικα CRP1.F90 και με την επιβολή οριζόντιων φορτίων στις συγκεκριμένες θέσεις A, B και C, από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (κεφαλή των πασσάλων) έως το στερεό υπόβαθρο του πρανού (αιχμή των πασσάλων). Επιπρόσθετα, λαμβάνοντας υπόψη τη βασική σχέση της οριακής ισορροπίας, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση 5.1, και έχοντας ως στόχο ο συντελεστής ευστάθειας FOS να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.1 έως 1.3, προκύπτει πως το αναγκαίο επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο θα πρέπει να είναι της τάξεως των 200kN/m και 600kN/m αντίστοιχα.

$$P_{design} = (F_{tot} - 1) * P_{slide} \quad (5.1)$$

όπου:

P_{design} είναι το επιβαλλόμενο φορτίο σχεδιασμού,

FOS είναι ο συντελεστής ευστάθειας του πρανούς ($1.1 \leq FOS \leq 1.3$),

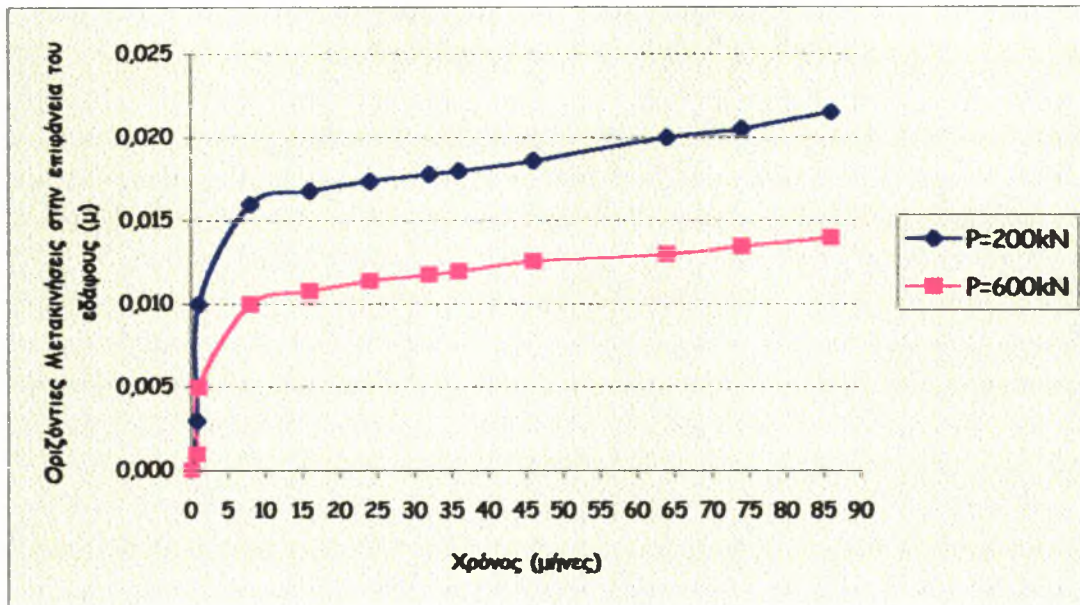
P_{slide} είναι το αναπτυσσόμενο φορτίο λόγω ολίσθησης του πρανούς.

Για τη συγκριτική παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα οποία προέκυψαν από την επίλυση του συνόλου των αριθμητικών αναλύσεων, παρουσιάζονται στη συνέχεια ενδεικτικά σχήματα στα οποία δίνεται η εξέλιξη εντατικών μεγεθών (μετακινήσεων) συναρτήσει του χρόνου και του βάθους του πρανούς. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.11 έως 5.17 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη των οριζόντιων μετακινήσεων της επιφάνειας του εδάφους στις θέσεις Α, Β και C για τις εκάστοτε συνθήκες φόρτισης, ενώ στα Σχήματα 5.18 έως 5.25 δίνεται η εξέλιξη των οριζόντιων μετακινήσεων στις συγκεκριμένες θέσεις συναρτήσει του αντίστοιχου βάθους.

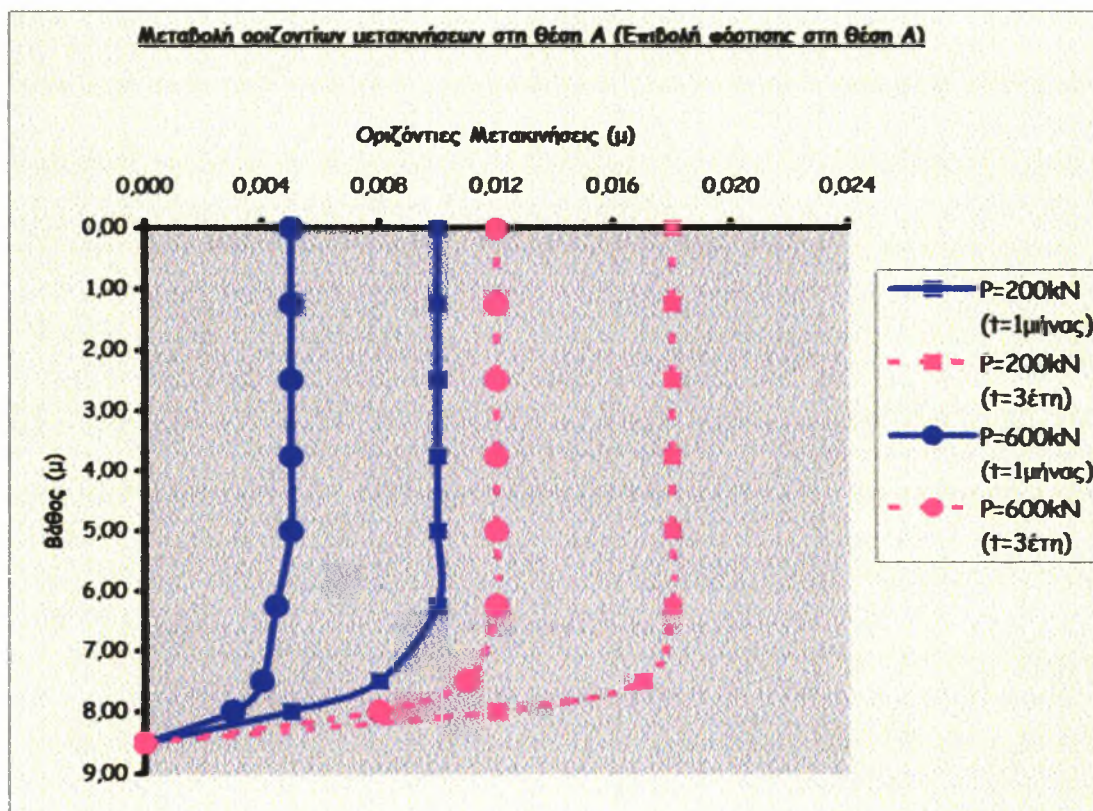
5.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

| <i>ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Α</i> | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ Α (ΕΠΙΒΟΛΗ ΠΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ Α) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 month | P=200kN after 3 years | P=600kN after 1 month | P=600kN after 3 years |
| 0,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 1,2500 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 2,5000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 3,7500 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 5,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 6,2500 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0045 | 0,0120 |
| 7,5000 | 0,0080 | 0,0170 | 0,0040 | 0,0110 |
| 8,0000 | 0,0050 | 0,0120 | 0,0030 | 0,0080 |
| 8,5000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| <i>ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΟΥ ΑΔΑΡΟΥΣ</i> | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0030 | 0,0010 |
| 1 | 0,0100 | 0,0050 |
| 8 | 0,0160 | 0,0100 |
| 16 | 0,0168 | 0,0108 |
| 24 | 0,0174 | 0,0114 |
| 32 | 0,0178 | 0,0118 |
| 36 | 0,0180 | 0,0120 |
| 46 | 0,0186 | 0,0126 |
| 64 | 0,0200 | 0,0130 |
| 74 | 0,0205 | 0,0135 |
| 86 | 0,0215 | 0,0140 |



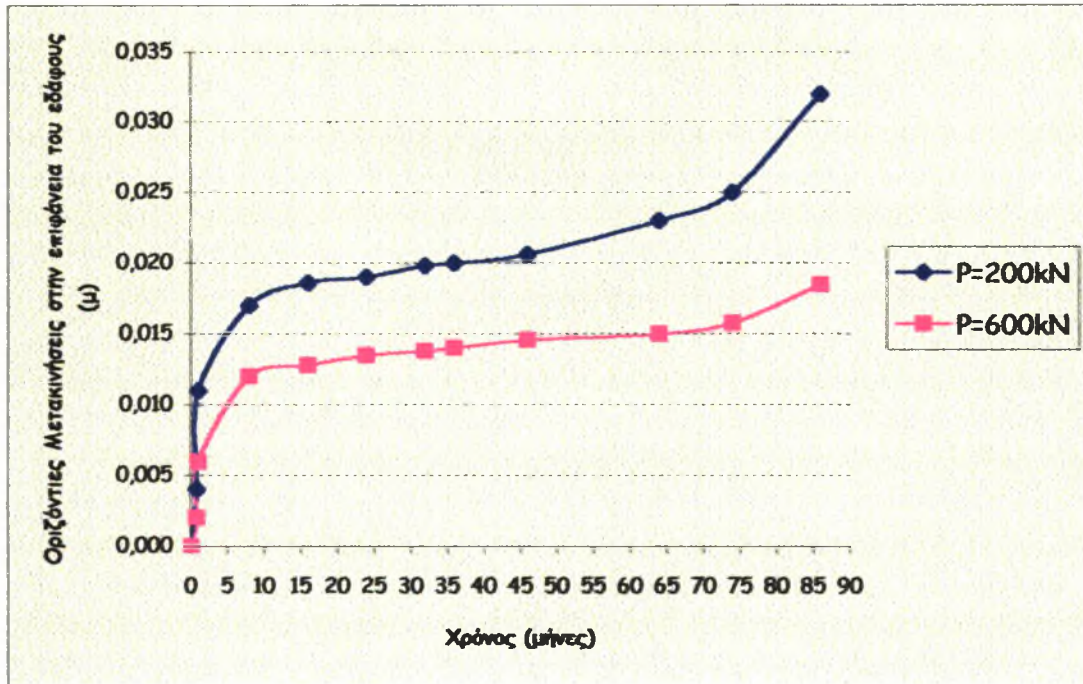
Σχήμα 5.11. Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση Α, Επιβολή φόρτισης στη Θέση Α.)



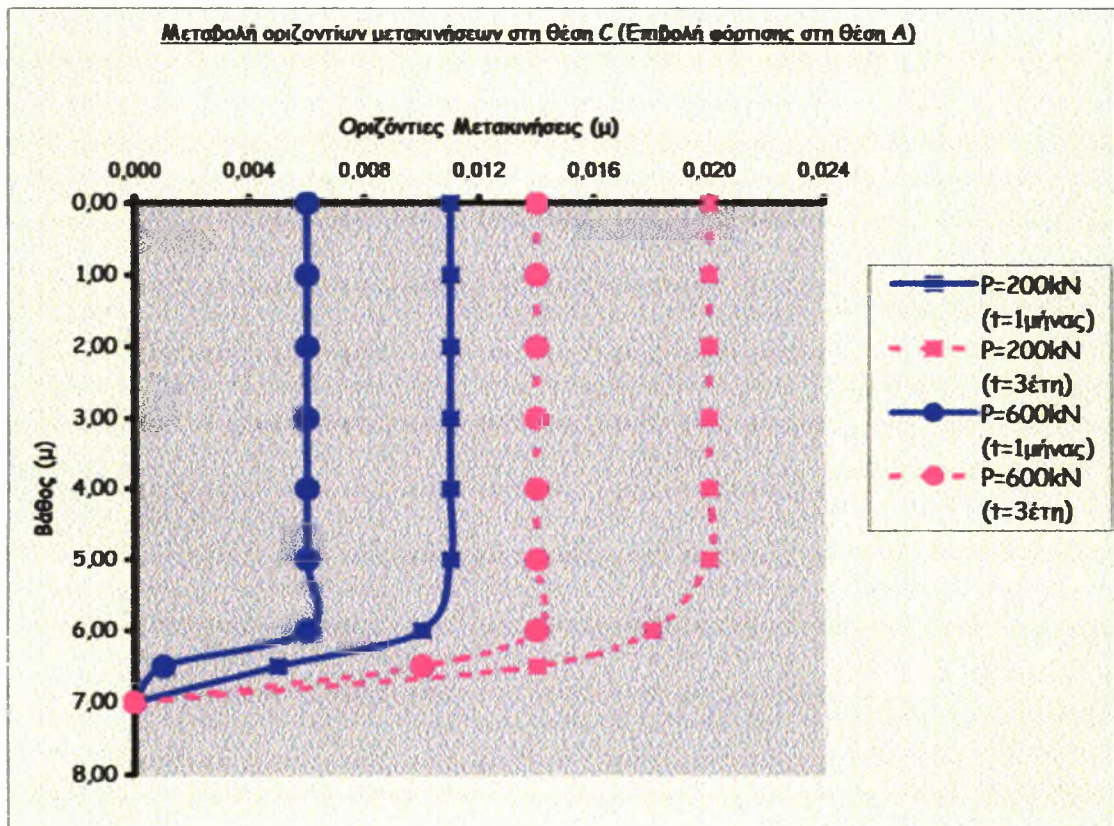
Σχήμα 5.12 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση Α, Επιβολή φόρτισης στη Θέση Α.)

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ C | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ A (ΕΠΙΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ A) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 | P=200kN after 3 | P=600kN after 1 | P=600kN after 3 |
| | month | years | month | years |
| 0,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 1,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 2,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 3,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 4,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 5,0000 | 0,0110 | 0,0200 | 0,0060 | 0,0140 |
| 6,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0060 | 0,0140 |
| 6,5000 | 0,0050 | 0,0140 | 0,0010 | 0,0100 |
| 7,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| Στην επιφάνεια του εδάφους | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες | Οριζόντιες |
| | Μετακινήσεις (μ) | Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0020 |
| 1 | 0,0110 | 0,0060 |
| 8 | 0,0170 | 0,0120 |
| 16 | 0,0186 | 0,0128 |
| 24 | 0,0190 | 0,0135 |
| 32 | 0,0198 | 0,0138 |
| 36 | 0,0200 | 0,014 |
| 46 | 0,0206 | 0,0146 |
| 64 | 0,0230 | 0,0150 |
| 74 | 0,0250 | 0,0158 |
| 86 | 0,0320 | 0,0185 |



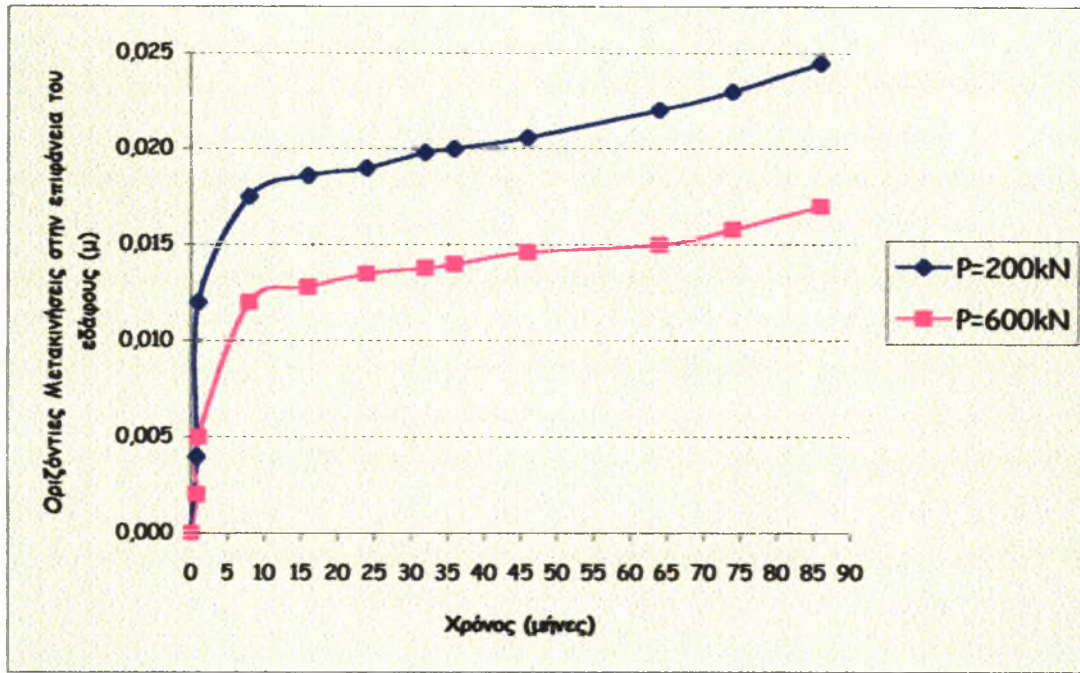
Σχήμα 5.13 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση A.)



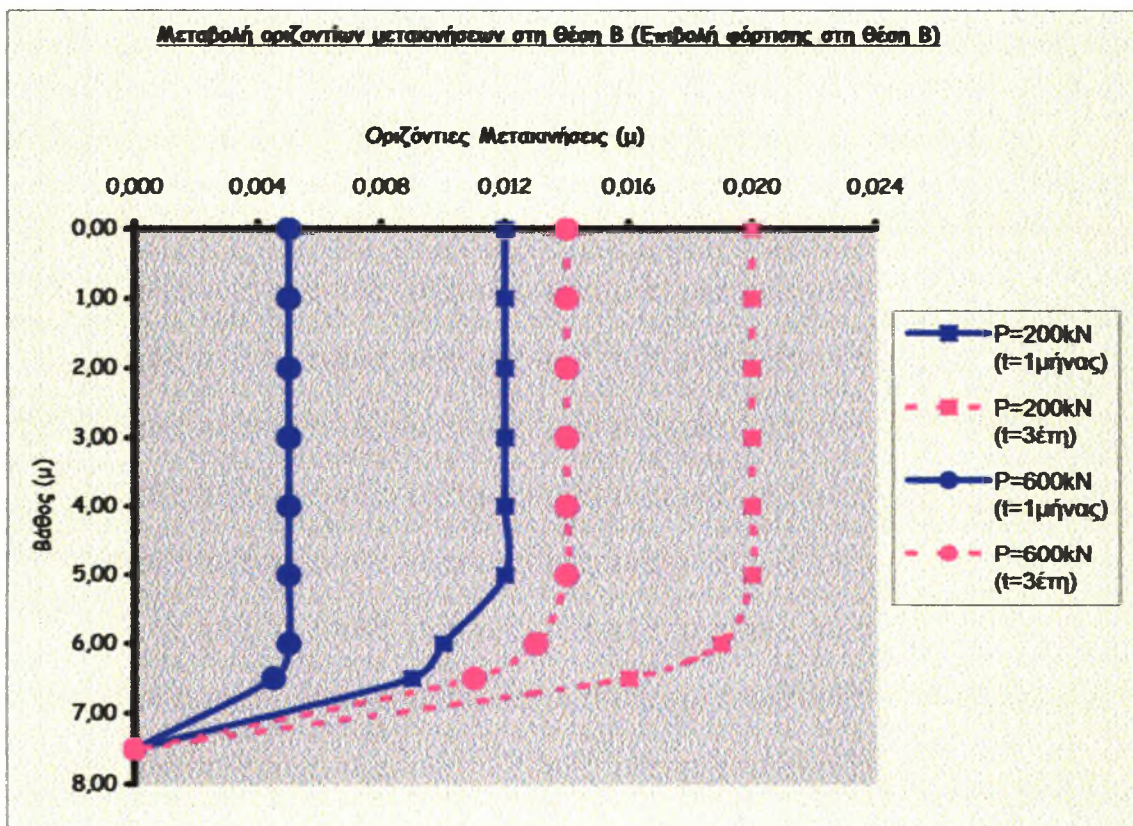
Σχήμα 5.14 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση A.)

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Β | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ Β (ΕΠΙΒΟΛΗ ΒΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ Β) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 | P=200kN after 3 | P=600kN after 1 | P=600kN after 3 |
| | month | years | month | years |
| 0,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 1,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 2,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 3,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 4,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 5,0000 | 0,0120 | 0,0200 | 0,0050 | 0,0140 |
| 6,0000 | 0,0100 | 0,0190 | 0,0050 | 0,0130 |
| 6,5000 | 0,0090 | 0,0160 | 0,0045 | 0,0110 |
| 7,5000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| Στην επιφάνεια του εδάφους | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες | Οριζόντιες |
| | Μετακινήσεις (μ) | Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0020 |
| 1 | 0,0120 | 0,0050 |
| 8 | 0,0175 | 0,0120 |
| 16 | 0,0186 | 0,0128 |
| 24 | 0,0190 | 0,0135 |
| 32 | 0,0198 | 0,0138 |
| 36 | 0,0200 | 0,0140 |
| 46 | 0,0206 | 0,0146 |
| 64 | 0,0220 | 0,0150 |
| 74 | 0,0230 | 0,0158 |
| 86 | 0,0245 | 0,0170 |



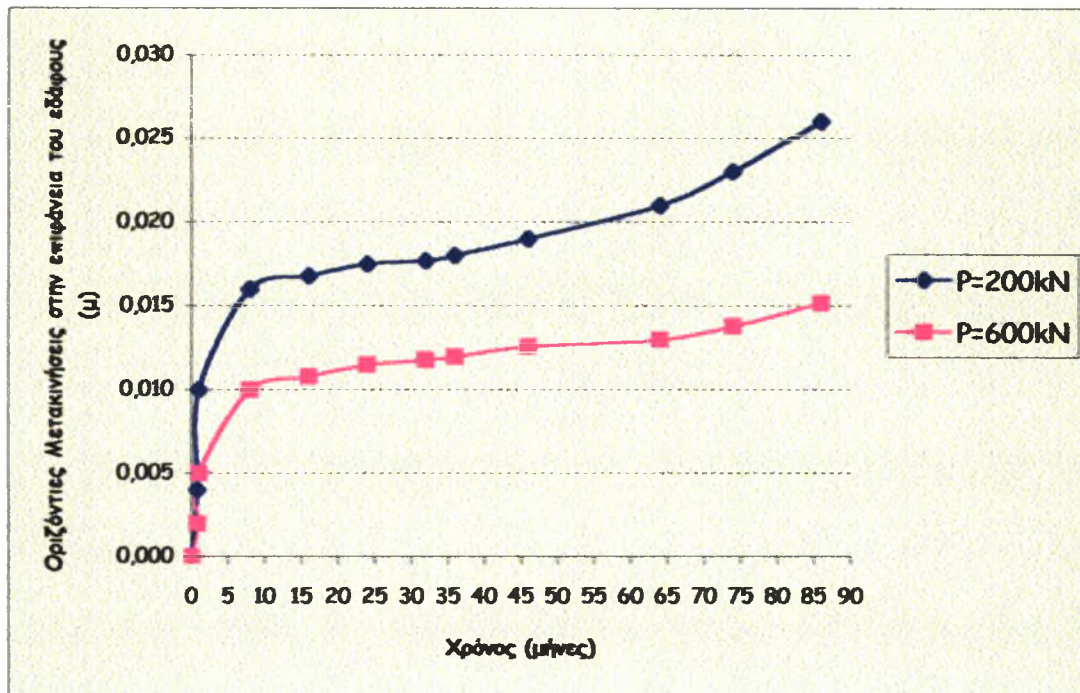
Σχήμα 5.15 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση Β, Επιβολή φόρτισης στη Θέση Β.)



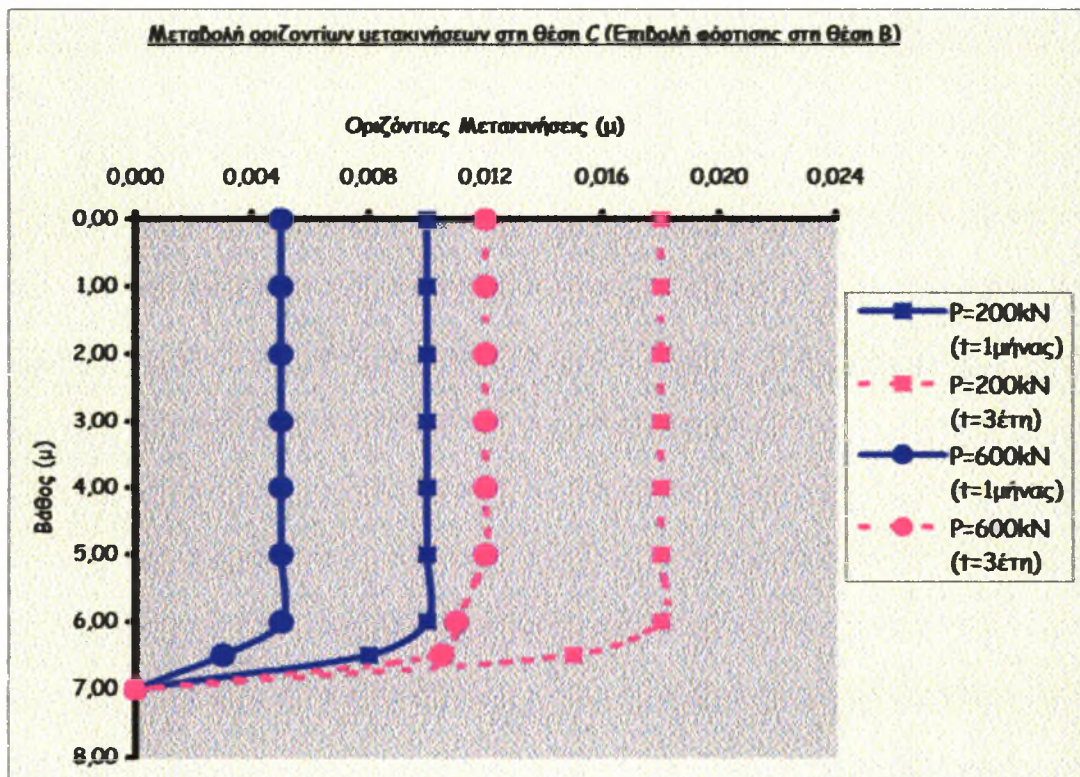
Σχήμα 5.16 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση Β, Επιβολή φόρτισης στη Θέση Β.)

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ C | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ B (ΕΠΙΒΟΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ B) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 | P=200kN after 3 | P=600kN after 1 | P=600kN after 3 |
| | month | years | month | years |
| 0,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 1,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 2,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 3,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 4,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 5,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0120 |
| 6,0000 | 0,0100 | 0,0180 | 0,0050 | 0,0110 |
| 6,5000 | 0,0080 | 0,0150 | 0,0030 | 0,0105 |
| 7,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| Στην επιφάνεια του εδάφους | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες | Οριζόντιες |
| | Μετακινήσεις (μ) | Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0020 |
| 1 | 0,0100 | 0,0050 |
| 8 | 0,0160 | 0,0100 |
| 16 | 0,0168 | 0,0108 |
| 24 | 0,0175 | 0,0115 |
| 32 | 0,0177 | 0,0118 |
| 36 | 0,0180 | 0,0120 |
| 46 | 0,0190 | 0,0126 |
| 64 | 0,0210 | 0,0130 |
| 74 | 0,0230 | 0,0138 |
| 86 | 0,0260 | 0,0152 |



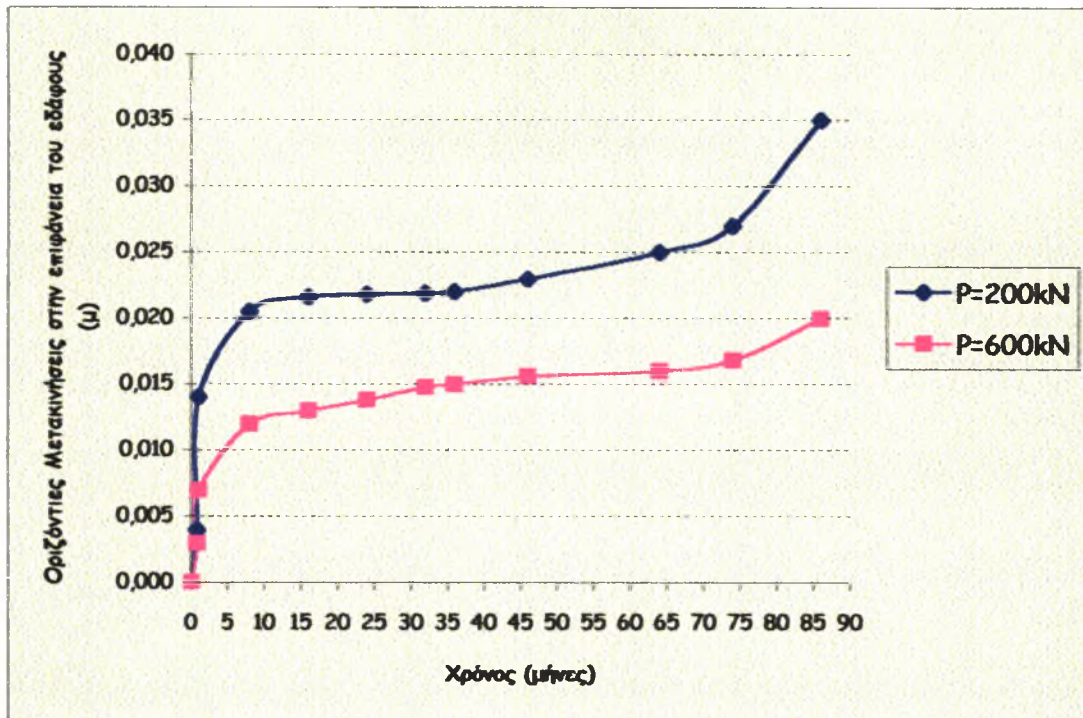
Σχήμα 5.17 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση B.)



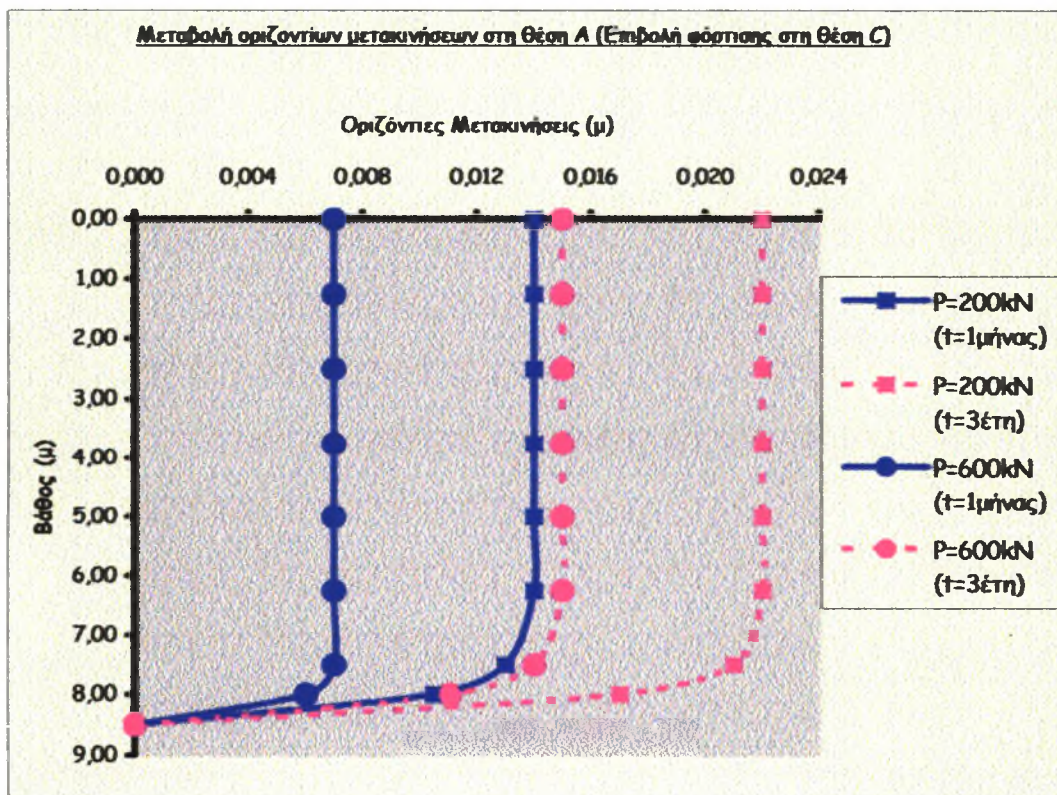
Σχήμα 5.18 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση B.)

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Α | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ C (ΕΠΙΒΟΛΗ ΒΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ C) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 | P=200kN after 3 | P=600kN after 1 | P=600kN after 3 |
| | month | years | month | years |
| 0,0000 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 1,2500 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 2,5000 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 3,7500 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 5,0000 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 6,2500 | 0,0140 | 0,0220 | 0,0070 | 0,0150 |
| 7,5000 | 0,0130 | 0,0210 | 0,0070 | 0,0140 |
| 8,0000 | 0,0105 | 0,0170 | 0,0060 | 0,0111 |
| 8,5000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| Στην επιφάνεια του εδάφους | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0030 |
| 1 | 0,0140 | 0,0070 |
| 8 | 0,0205 | 0,0120 |
| 16 | 0,0216 | 0,0130 |
| 24 | 0,0218 | 0,0138 |
| 32 | 0,0219 | 0,0148 |
| 36 | 0,0220 | 0,0150 |
| 46 | 0,0230 | 0,0156 |
| 64 | 0,0250 | 0,0160 |
| 74 | 0,0270 | 0,0168 |
| 86 | 0,0350 | 0,0200 |



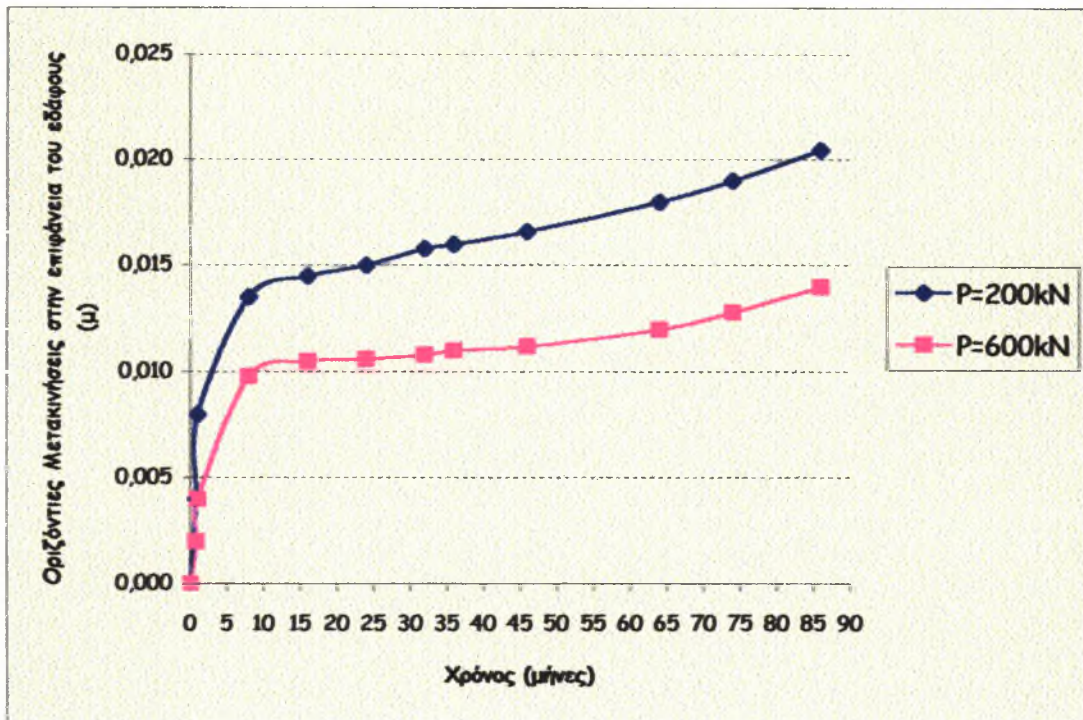
Σχήμα 5.19 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση A, Επιβολή φόρτισης στη Θέση C.)



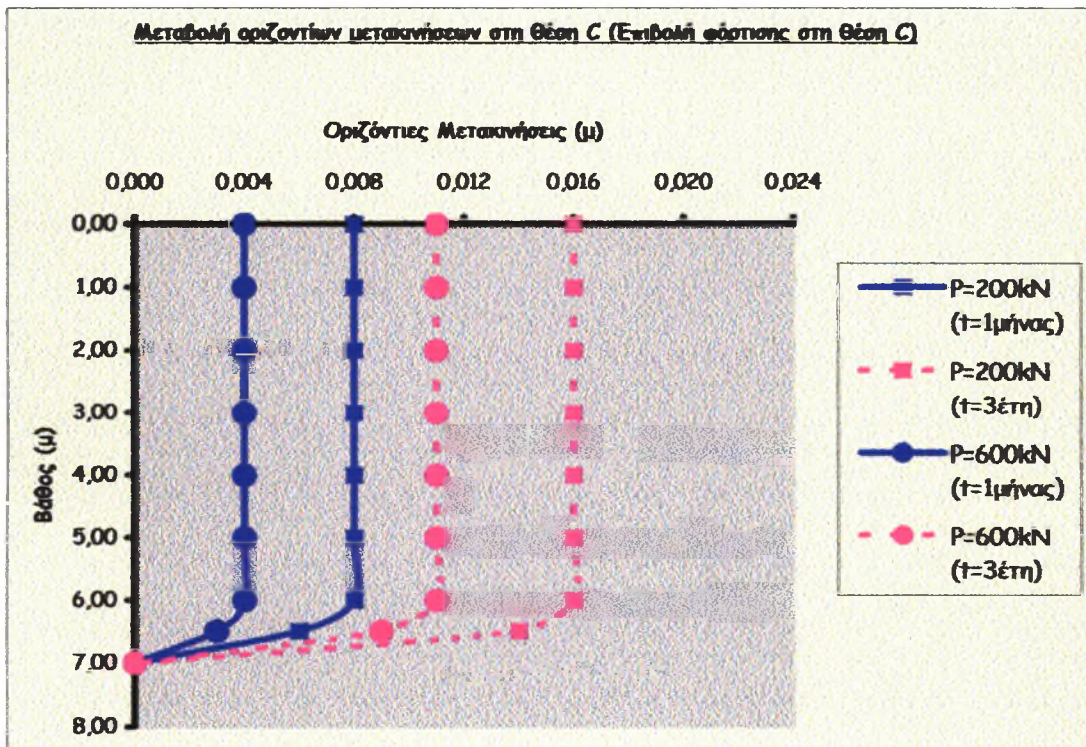
Σχήμα 5.20 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση A, Επιβολή φόρτισης στη Θέση C.)

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ C | | | | |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΗ ΘΕΣΗ C (ΕΠΙΒΟΛΗ ΞΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ C) | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 | P=200kN after 3 | P=600kN after 1 | P=600kN after 3 |
| | month | years | month | years |
| 0,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 1,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 2,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 3,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 4,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 5,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 6,0000 | 0,0080 | 0,0160 | 0,0040 | 0,0110 |
| 6,5000 | 0,0060 | 0,0140 | 0,0030 | 0,0090 |
| 7,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

| Στην επιφάνεια του εδάφους | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες | Οριζόντιες |
| | Μετακινήσεις (μ) | Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0020 |
| 1 | 0,0080 | 0,0040 |
| 8 | 0,0135 | 0,0098 |
| 16 | 0,0145 | 0,0105 |
| 24 | 0,0150 | 0,0106 |
| 32 | 0,0158 | 0,0108 |
| 36 | 0,0160 | 0,0110 |
| 46 | 0,0166 | 0,0112 |
| 64 | 0,0180 | 0,0120 |
| 74 | 0,0190 | 0,0128 |
| 86 | 0,0205 | 0,0140 |



Σχήμα 5.21 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση C.)

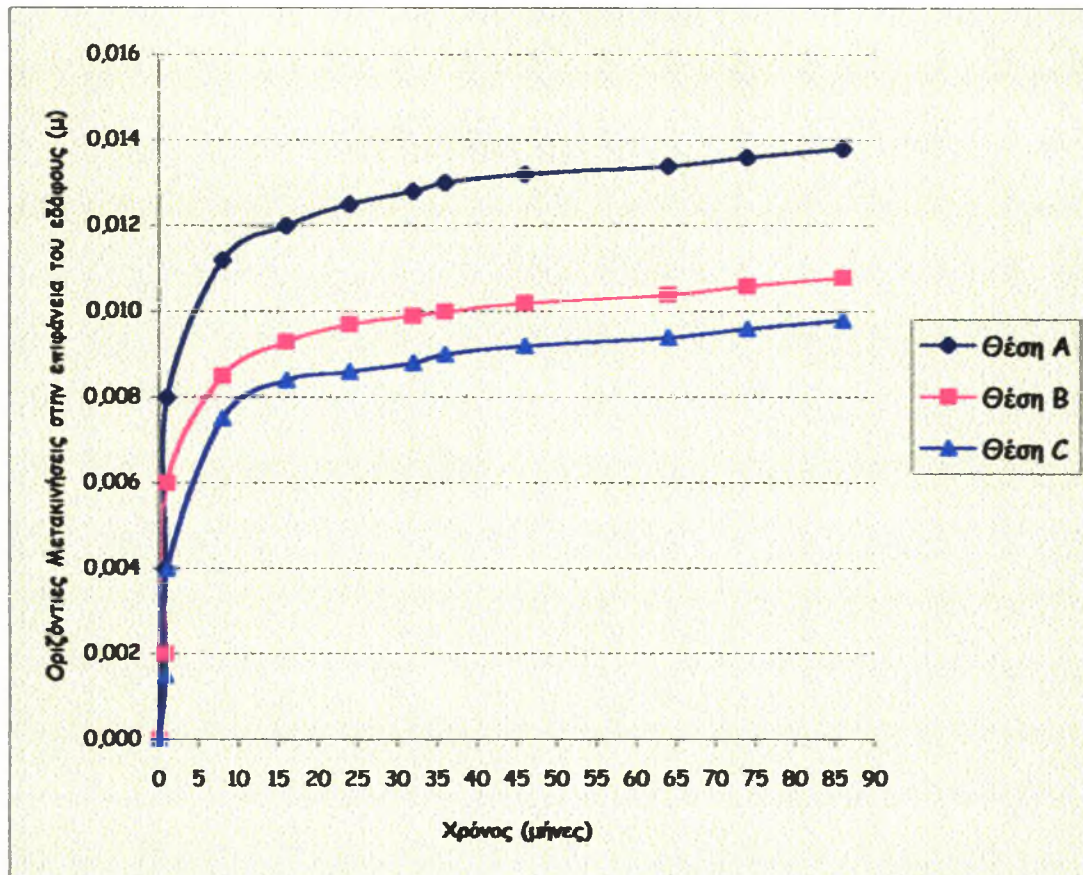


Σχήμα 5.22 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Θέση C, Επιβολή φόρτισης στη Θέση C.)

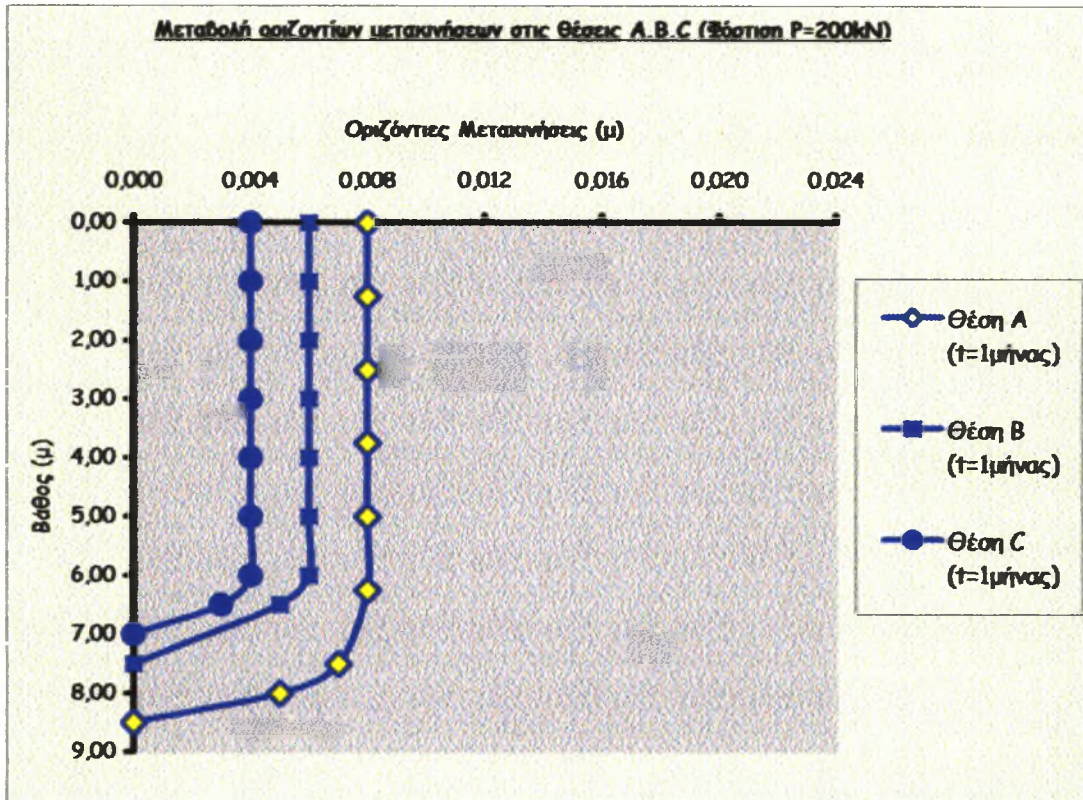
| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ Α, Β, C | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ Α, Β, C (ΕΠΙΒΟΛΗ ΞΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ Α, Β, C) | | | | | |
| ΣΗΜΕΙΟ Α | | ΣΗΜΕΙΟ Β | | ΣΗΜΕΙΟ C | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 1 month | Βάθος (μ) | P=200kN after 1 month | Βάθος (μ) | P=200kN after 1 month |
| 0,0000 | 0,0080 | 0,0000 | 0,0060 | 0,0000 | 0,0040 |
| 1,2500 | 0,0080 | 1,0000 | 0,0060 | 1,0000 | 0,0040 |
| 2,5000 | 0,0080 | 2,0000 | 0,0060 | 2,0000 | 0,0040 |
| 3,7500 | 0,0080 | 3,0000 | 0,0060 | 3,0000 | 0,0040 |
| 5,0000 | 0,0080 | 4,0000 | 0,0060 | 4,0000 | 0,0040 |
| 6,2500 | 0,0080 | 5,0000 | 0,0060 | 5,0000 | 0,0040 |
| 7,5000 | 0,0070 | 6,0000 | 0,0060 | 6,0000 | 0,0040 |
| 8,0000 | 0,0050 | 6,5000 | 0,0050 | 6,5000 | 0,0030 |
| 8,5000 | 0 | 7,5000 | 0 | 7,0000 | 0 |

| ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΣΗΜΕΙΑ Α, Β, C | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| ΠΑΣΣΑΛΟΟΜΑΔΑ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ Α, Β, C (ΕΠΙΒΟΛΗ ΞΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΙΣ ΘΕΣΕΙΣ Α, Β, C) | | | | | |
| Βάθος (μ) | P=200kN after 3 years | Βάθος (μ) | P=200kN after 3 years | Βάθος (μ) | P=200kN after 3 years |
| 0,0000 | 0,0130 | 0,0000 | 0,0100 | 0,0000 | 0,0090 |
| 1,2500 | 0,0130 | 1,0000 | 0,0100 | 1,0000 | 0,0090 |
| 2,5000 | 0,0130 | 2,0000 | 0,0100 | 2,0000 | 0,0090 |
| 3,7500 | 0,0130 | 3,0000 | 0,0100 | 3,0000 | 0,0090 |
| 5,0000 | 0,0130 | 4,0000 | 0,0100 | 4,0000 | 0,0090 |
| 6,2500 | 0,0130 | 5,0000 | 0,0100 | 5,0000 | 0,0090 |
| 7,5000 | 0,0120 | 6,0000 | 0,0100 | 6,0000 | 0,0090 |
| 8,0000 | 0,0100 | 6,5000 | 0,0080 | 6,5000 | 0,0080 |
| 8,5000 | 0 | 7,5000 | 0 | 7,0000 | 0 |

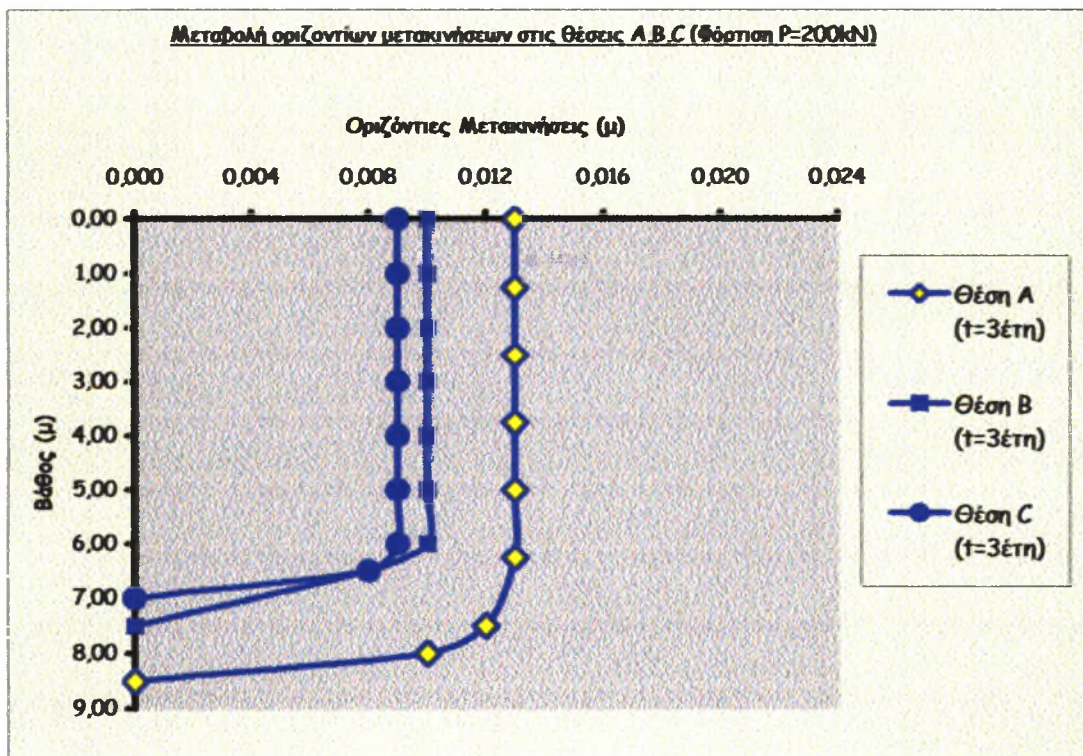
| Στην επιφάνεια του εδάφους | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | A | B | C |
| Χρόνος (μήνες) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) | Οριζόντιες Μετακινήσεις (μ) |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,8 | 0,0040 | 0,0020 | 0,0015 |
| 1 | 0,0080 | 0,0060 | 0,0040 |
| 8 | 0,0112 | 0,0085 | 0,0075 |
| 16 | 0,0102 | 0,0093 | 0,0084 |
| 24 | 0,0125 | 0,0097 | 0,0086 |
| 32 | 0,0128 | 0,0099 | 0,0088 |
| 36 | 0,0130 | 0,0100 | 0,0090 |
| 46 | 0,0132 | 0,0102 | 0,0092 |
| 64 | 0,0134 | 0,0104 | 0,0094 |
| 74 | 0,0136 | 0,0106 | 0,0096 |
| 86 | 0,0138 | 0,0108 | 0,0098 |



Σχήμα 5.23 Χρονική εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων στην επιφάνεια του εδάφους. (Επιβολή φόρτισης $P=200\text{kN/m}$ στις θέσεις A,B,C.)



Σχήμα 5.24. Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Επιβολή φόρτισης P=200kN/m στις θέσεις Α, Β, C.)



Σχήμα 5.25 Εξέλιξη οριζόντιων μετακινήσεων συναρτήσει του βάθους. (Επιβολή φόρτισης P=200kN/m στις θέσεις Α, Β, C.)

Από την αξιολόγηση του συνόλου των παραπάνω αποτελεσμάτων προκύπτουν τα επόμενα βασικά συμπεράσματα:

α) Η επιβολή των συγκεκριμένων μέτρων σταθεροποίησης (κατασκευή πασσαλομάδας σε συγκεκριμένες θέσεις του πρανούς) επιφέρει σημαντική μείωση στο ρυθμό μετακίνησης του φυσικού ολισθαίνοντος πρανούς. Ειδικότερα, επισημαίνεται πως ο αρχικός μέσος ρυθμός μετακίνησης του πρανούς, χωρίς μέτρα σταθεροποίησης, είναι της τάξεως των 35mm/έτος. Με την επιβολή των μέτρων σταθεροποίησης ο αντίστοιχος ρυθμός μειώνεται αισθητά και γίνεται ίσος με 13mm/έτος και 19mm/έτος για επιβολή φόρτισης 600kN/m και 200kN/m αντίστοιχα.

β) Η θέση κατασκευής των μέτρων σταθεροποίησης επηρεάζει, αλλά όχι σε σημαντικό βαθμό, τη συνολική μείωση του ρυθμού μετακίνησης του πρανούς. Συγκεκριμένα, τονίζεται πως στην άμεση περιοχή κατασκευής των μέτρων σταθεροποίησης διαπιστώθηκε μία σημαντική μείωση των υπολογισθέντων μετακινήσεων. Αντίθετα, όμως, στις ανάντι και κατάντι περιοχές των θέσεων αυτών η αντίστοιχη μείωση είναι σαφώς μικρότερη.

Ενδεικτικά, αναφέρεται πως με την επιβολή φόρτισης 200kN/m και 600kN/m στη θέση Α σημειώνεται μείωση των υπολογισθέντων μετακινήσεων στη θέση Α κατά 53% και 59% αντίστοιχα, ενώ στην κατάντι θέση C παρατηρείται αντίστοιχη μείωση κατά 40% και 44% (t=3 έτη).

γ) Η τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης δεν συνεισφέρει καθοριστικά στην αποτελεσματική σταθεροποίηση του ρυθμού μετακίνησης του πρανούς, καθώς βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων διαπιστώθηκε πως αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά 200% (από 200kN/m σε 600kN/m) επιφέρει μείωση του ρυθμού μετακίνησης μόνον της τάξεως του 35% (από 19mm/έτος σε 13mm/έτος).

δ) Η επιμέρους κατανομή μικρής -σχετικά- επιβαλλόμενης φόρτισης και στις τρεις θέσεις που εξετάζονται Α, Β και C επιφέρει μεγαλύτερη μείωση των μετακινήσεων του πρανούς, σε σύγκριση με την επιβολή σημαντικής φόρτισης σε μία μόνο θέση. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε πως με την ταυτόχρονη επιβολή φόρτισης $P=200\text{kN/m}$ στις θέσεις Α, Β και C ο μέσος ρυθμός μετακίνησης του πρανούς υπολογίσθηκε της τάξεως των $9\text{mm}/\text{έτος}$, ενώ ο αντίστοιχος μέσος ρυθμός που προκύπτει από την επιβολή φόρτισης 600kN/m σε μία μόνο θέση είναι $13\text{mm}/\text{έτος}$.

Κεφάλαιο 6

6.1. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από πέντε κεφάλαια στα οποία παρουσιάσθηκαν αντίστοιχα οι βασικές μορφές-κατηγορίες κατολισθήσεων καθώς και αντίστοιχα μέτρα αντιμετώπισης και σταθεροποίησής τους, το φαινόμενο του ερπυσμού και η προσπάθεια προσομοίωσής του, το χρησιμοποιούμενο εδαφικό μοντέλο σε συνδυασμό με τον ανάλογο αλγόριθμο, ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της εργασίας και τέλος η αριθμητική προσομοίωση ενός φυσικού ολισθαίνοντος πρηνούς.

Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 1 δώθηκαν τα συστήματα κατάταξης κατολισθήσεων, οι αιτιώδεις παράγοντες καθώς και τα επικρατέστερα μέτρα αντιμετώπισης

Στο επόμενο κεφάλαιο δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην προσομοίωση του φαινομένου του ερπυσμού, που εμφανίζεται συχνά κατά τη μελέτη γεωτεχνικών προβλημάτων. Η προσέγγισή του διακρίνεται σε φαινομενολογική και αναλυτική. Κατά τη φαινομενολογική ή εμπειρική αντιμετώπιση του ερπυσμού εκτελούνται κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές τα αποτελέσματα των οποίων, υφίστανται σε ανάλογη επεξεργασία με απώτερο στόχο τη διατύπωση σχέσεων, οι οποίες να συνδέουν το αναπτυσσόμενο εντατικό πεδίο με τον παράγοντα χρόνο. Μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αποτελούν η ύπαρξη και χρήση ειδικών συσκευών, ο αυξημένος χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των δοκιμών ερπυσμού, η αδυναμία ερμηνείας ως φυσικά μεγέθη ορισμένων παραμέτρων που εμφανίζονται στα επιμέρους στάδια της διαδικασίας (καθώς προέρχονται κυρίως από τη στατιστική ανάλυση των καταγραφών) και τέλος το περιορισμένο πεδίο εφαρμογής των τελικών σχέσεων καθώς αυτές αναφέρονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες εδαφών.

Η αναλυτική ή αριθμητική προσέγγιση του φαινομένου βασίζεται στην εφαρμογή μαθηματικών και αναλυτικών σχέσεων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία και εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, είναι αυτή που οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση σύνθετων αλγορίθμων και καταστατικών εξισώσεων, στοιχεία απαραίτητα για την αριθμητική προσομοίωση του ερπυσμού. Σε αντίθεση με τη φαινομενολογική προσέγγιση, η αναλυτική δεν προϋποθέτει την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών και επιπρόσθετα χαρακτηρίζεται από ευρύτερο πεδίο εφαρμογής.

Από την παρουσίαση του συγκεκριμένου κεφαλαίου προκύπτει το συμπέρασμα πως ο συνδυασμός και των δύο μεθοδολογιών (φαινομενολογική, αναλυτική) αποτελεί την ιδεατή προσέγγιση του ερπυσμού. Η αναλυτική αντιμετώπιση του φαινομένου ενδείκνυται να συνοδεύεται από εργαστηριακές δοκιμές, ώστε να εξασφαλίζεται η ακριβέστερη εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων αλλά και ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της υπολογιστικής διαδικασίας.

Το εδαφικό μοντέλο που εφαρμόστηκε στα πλαίσια της εργασίας παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Αποτελεί ένα ελαστικό ιξώδες-πλαστικό μοντέλο η απόκριση του οποίου στην ελαστική περιοχή θεωρείται ανεξάρτητη του παράγοντα χρόνου, ενώ αντίθετα με την υπέρβαση του ορίου διαρροής και τη μετάβαση στην ιξώδη-πλαστική περιοχή η επιρροή του χρόνου λαμβάνεται άμεσα υπόψη. Για την εύρεση του ρυθμού παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε η θεωρία του Perzyna σχετικά με την ελαστική ιξώδη-πλαστική συμπεριφορά του εδάφους.

Με βάση τη συγκεκριμένη θεωρία, ο ρυθμός της ιξώδους-πλαστικής παραμόρφωσης είναι συνάρτηση εδαφικών παραμέτρων και του κριτηρίου διαρροής σε κάθε επίπεδο φόρτισης. Πρέπει να τονισθεί πως η θεωρία του Perzyna στη βιβλιογραφία εφαρμόζεται κυρίως στην επίλυση ελαστοπλαστικών

προβλημάτων, θεωρώντας τον παράγοντα χρόνο ως ψευδοπαράμετρο (ελαστική «ψευδό»-ιξώδης-πλαστική απόκριση ή μέθοδος των αρχικών παραμορφώσεων). Στην παρούσα μελέτη όμως, αποδείχθηκε πως επιφέροντας τις απαιτούμενες τροποποιήσεις στην παραπάνω θεωρία και εισάγοντας το χρόνο, με τη φυσική του υπόσταση, στις καταστατικές εξισώσεις του μοντέλου είναι δυνατή η προσομοίωση και του φαινομένου του ερπυσμού.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης βασίστηκε στο προτεινόμενο εδαφικό μοντέλο και στις καταστατικές εξισώσεις που το περιγράφουν. Από τη σύγκριση μεταξύ αριθμητικών αποτελεσμάτων και αντίστοιχων θεωρητικών-πειραματικών, διαπιστώθηκε πως προσεγγίζει ικανοποιητικά την ερπυστική απόκριση του εδάφους. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο γεγονός, πως ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, σε αντίθεση με αντίστοιχους που παρέχονται στη βιβλιογραφία, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης και των τριών σταδίων του ερπυσμού (πρωτεύων, δευτερεύων, τριτεύων).

Με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο έγινε χρήση κατάλληλου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN90, ο οποίος περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4. Από την επίλυση ενδεικτικών παραδειγμάτων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, διαπιστώθηκε πως ο συγκεκριμένος κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη του ερπυσμού, καθώς προσεγγίζει τις θεωρητικές καμπύλες του φαινομένου. Επίσης, ελέγχθηκε επιτυχώς η ευαισθησία τους τόσο ως προς τη μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου, όσο και ως προς την αντίστοιχη των εδαφικών παραμέτρων των στοιχείων διεπιφάνειας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε διεξοδικά η αριθμητική προσομοίωση ενός φυσικού ολισθαίνοντος πρανούς, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στη διεθνή

βιβλιογραφία. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση του χρησιμοποιούμενου κώδικα πεπερασμένων στοιχείων με τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την αριθμητική επίλυση του προβλήματος και αντίστοιχων επιτόπου καταγραφών. Από τη συγκριτική αξιολόγησή τους προέκυψε πως τόσο το χρησιμοποιούμενο εδαφικό μοντέλο όσο και ο αντίστοιχος κώδικας πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζουν ικανοποιητικά την ερπυστική συμπεριφορά του πρανούς καθώς το σφάλμα μεταξύ αριθμητικών αποτελεσμάτων και επιτόπου δεδομένων κρίνεται αποδεκτό.

Στη συνέχεια εξετάσθηκε η αποτελεσματικότητα συγκεκριμένων μέτρων σταθεροποίησης στη μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης του φυσικού ολισθαίνοντος πρανούς. Ειδικότερα, μελετήθηκε η επιρροή στη συμπεριφορά του πρανούς, της κατασκευής πασσαλοομάδας σε ορισμένες χαρακτηριστικές θέσεις και συγκεκριμένα ανάντι του πρανούς (θέση Α), στη μέση του πρανούς (θέση Β) και κατάντι αυτού (θέση C). Για τη συγκριτική παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα οποία προέκυψαν από το σύνολο των αριθμητικών επιλύσεων, παρουσιάσθηκε -με τη βοήθεια κατάλληλων διαγραμμάτων- η εξέλιξη εντατικών μεγεθών συναρτήσει τόσο του χρόνου όσο και του βάθους του πρανούς για διάφορες συνθήκες φόρτισης.

Από την εξέταση των διαγραμμάτων αυτών προέκυψαν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

α) Η επιβολή των συγκεκριμένων μέτρων σταθεροποίησης (κατασκευή πασσαλοομάδας σε συγκεκριμένες θέσεις του πρανούς) επιφέρει σημαντική μείωση στο ρυθμό μετακίνησης του φυσικού ολισθαίνοντος πρανούς. Ειδικότερα, αναφέρεται πως ανάλογα με τη φέρουσα ικανότητα της πασσαλοομάδας η μείωση του ρυθμού μετακίνησης του πρανούς είναι της τάξεως του 54% έως 63%.

β) Η θέση κατασκευής των μέτρων σταθεροποίησης επηρεάζει, αλλά όχι καθοριστικά, τη συνολική μείωση του ρυθμού μετακίνησης του πρανούς. Συγκεκριμένα, επισημαίνεται πως στην άμεση περιοχή κατασκευής των μέτρων

σταθεροποίησης διαπιστώθηκε μία αισθητή μείωση των υπολογισθέντων μετακινήσεων, ενώ στις ανάντι και κατάντι περιοχές των θέσεων αυτών η αντίστοιχη μείωση είναι σαφώς μικρότερη.

γ) Η τιμή της επιβαλλόμενης φόρτισης δεν συνεισφέρει καθοριστικά στην αποτελεσματική σταθεροποίηση του ρυθμού μετακίνησης του πρανούς, καθώς βάσει των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων διαπιστώθηκε πως αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου κατά 200% (από 200kN/m σε 600kN/m) επιφέρει μείωση του ρυθμού μετακίνησης μόνον της τάξεως του 35% (από 19mm/έτος σε 13mm/έτος).

δ) Η επιμέρους κατανομή μικρής -σχετικά- επιβαλλόμενης φόρτισης και στις τρεις θέσεις που εξετάζονται Α, Β και C επιφέρει μεγαλύτερη μείωση των μετακινήσεων του πρανούς, σε σύγκριση με την επιβολή σημαντικής φόρτισης σε μία μόνο θέση. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε πως με την ταυτόχρονη επιβολή φόρτισης $P=200\text{kN/m}$ στις θέσεις Α, Β και C ο μέσος ρυθμός μετακίνησης του πρανούς υπολογίσθηκε της τάξεως των 9mm/έτος, ενώ ο αντίστοιχος μέσος ρυθμός που προκύπτει από την επιβολή φόρτισης 600kN/m σε μία μόνο θέση είναι 13mm/έτος.

Πέρα των παραπάνω επισημάνσεων πρέπει να τονισθεί το γεγονός πως για την αριθμητική προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους, απαιτείται η αποδοχή και η χρήση βασικών απλοποιημένων παραδοχών, κυρίως ως προς την ενσωμάτωση του παράγοντα χρόνου στις καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν την απόκριση του εδάφους. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία για την αριθμητική προσομοίωση του συγκεκριμένου πρανούς καθώς και τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την αντίστοιχη προσομοίωση των μέτρων σταθεροποίησής του, κρίνεται πως συμβάλουν ουσιαστικά στην αριθμητική μελέτη φυσικών ολισθαίνοντων πρανών. Παρόλα

αυτά, για την ευρύτερη εφαρμογή τους επιβάλλεται η τροποποίηση και η προσαρμογή τους στις εκάστοτε μορφολογικές και εδαφικές συνθήκες, οι οποίες συναντώνται σε κάθε πρηνές.

6.2. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Η αριθμητική προσομοίωση της ερπυστικής συμπεριφοράς του εδάφους **επιβάλλει** την αποδοχή και χρήση βασικών απλοποιημένων παραδοχών, κυρίως ως προς την ενσωμάτωση του παράγοντα χρόνου στις καταστατικές εξισώσεις που περιγράφουν την απόκριση του εδάφους καθώς και ως προς τη διατήρηση σταθερών συνθηκών φόρτισης συναρτήσει του χρόνου. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία καθώς και ο κώδικας πεπερασμένων στοιχείων προϋποθέτουν τη διατήρηση του υπόγειου υδάτινου οριζοντα σε συγκεκριμένη στάθμη. Λαμβάνοντας, όμως, υπόψη το σημαντικό εύρος του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο μελετάται η συμπεριφορά του πρηνούς ($t=3$ έτη), κρίνεται σκόπιμη και ιδιαίτερα χρήσιμη η μελέτη της επιρροής της ταπείνωσης και ανύψωσης του υπόγειου υδάτινου οριζοντα, στη συμπεριφορά του πρηνούς.

Επιπροσθέτα, για την ολοκληρωμένη μελέτη της αποτελεσματικότητας των μέτρων σταθεροποίησης, επιβάλλεται η ενσωμάτωση στον κώδικα στοιχείων δοκού για την προσομοίωση δομικών στοιχείων καθώς και στοιχείων παθητικών ή και ενεργητικών αγκυρώσεων. Επίσης, ιδιαίτερα στην τροποποίηση του βρόχου

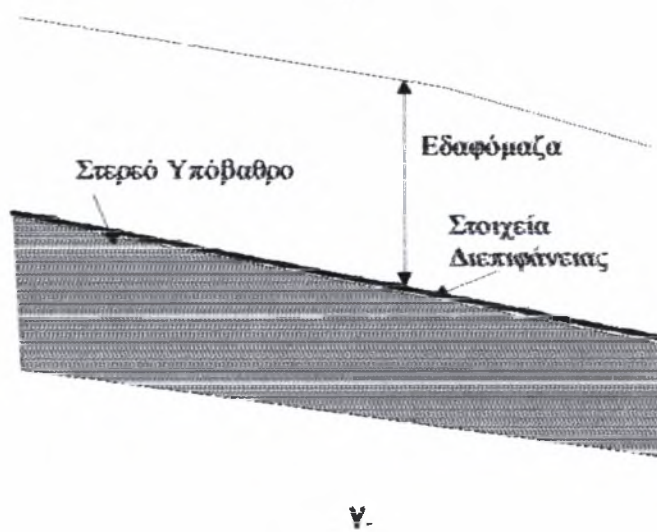
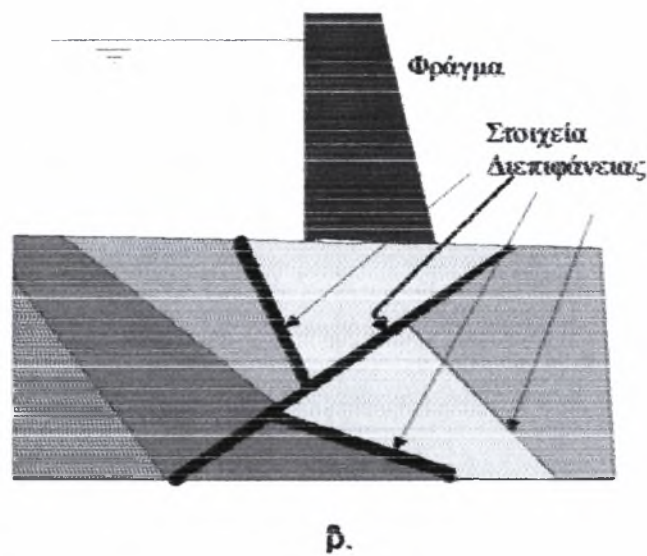
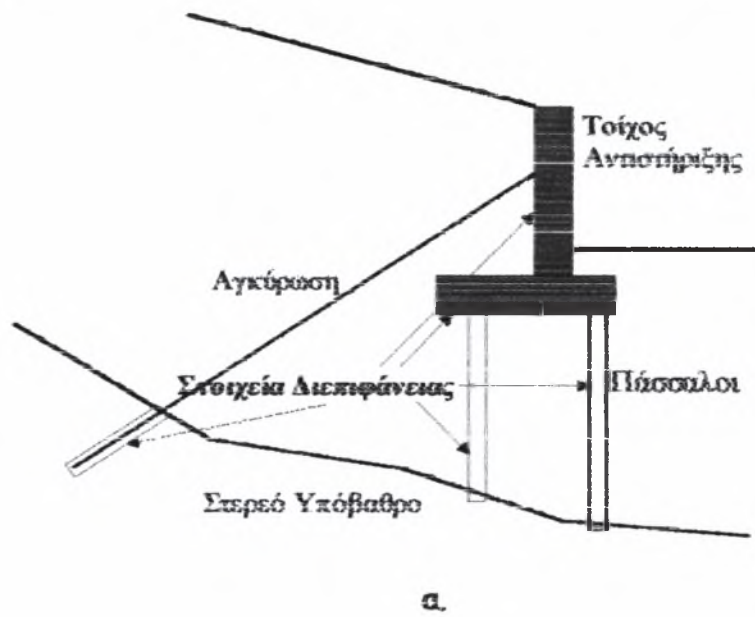
επιβολής του εξωτερικού φορτίου, ώστε να παρέχεται η δυνατότητα μείωσης ή και αφαίρεσης του φορτίου σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά θα εξετασθεί η ερπυστική απόκριση του εδάφους κατά την αποφόρτιση, κατάσταση που παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, όπως η περίπτωση των έργων αντιστήριξης κατόντι της πλαγιάς ή της αφαίρεσης εδαφόμαζας από την ανάντι πλευρά.

Οι παραπάνω βελτιώσεις απαιτούν γνώσεις υψηλού επιπέδου σε προγραμματισμό. Η δημιουργία και ενσωμάτωση των νέων υπορουτινών στο γενικό πρόγραμμα επιβάλλει τον αυστηρό έλεγχο κάθε επιμέρους σταδίου της υπολογιστικής διαδικασίας, ώστε να αποφευχθεί πιθανή αλλοίωση τόσο του αλγορίθμου όσο και του χρησιμοποιούμενου κώδικα.

Α.1. Εισαγωγή

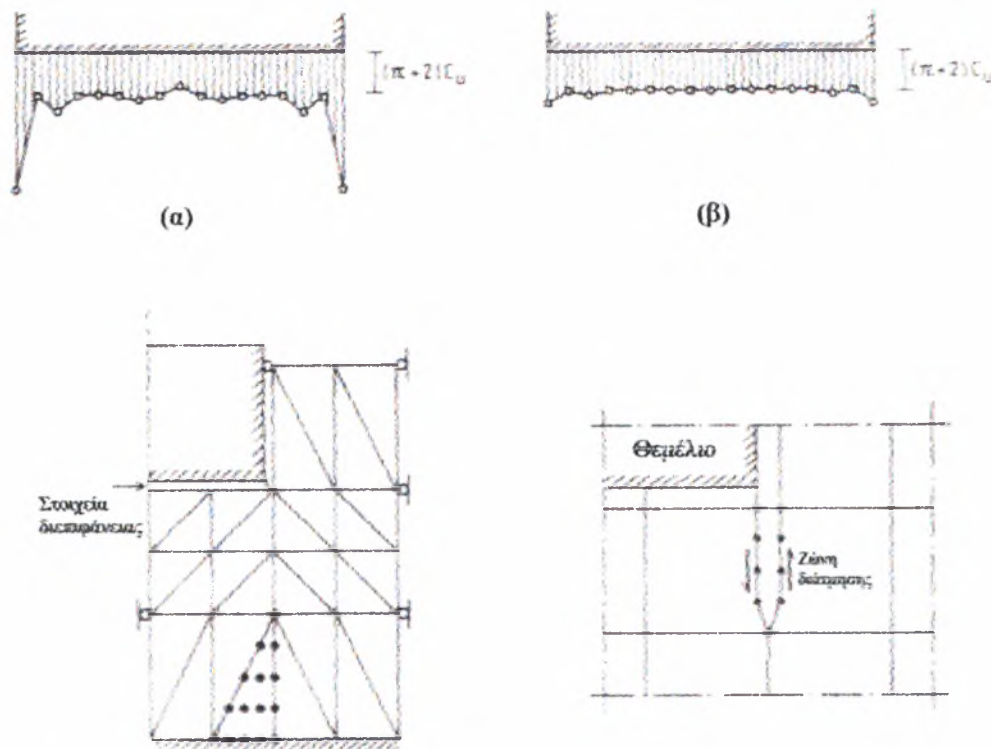
Κατά την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζονται συχνά δυσκολίες στην προσομοίωση των περιοχών επαφής μεταξύ σωμάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Η αμοιβαία μεταφορά τάσεων, που παρατηρείται στις συγκεκριμένες θέσεις, έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση σχετικών μετακινήσεων και έντονων μεταβολών στα διανύσματα των τάσεων-παραμορφώσεων. Η χρήση ομογενών πεπερασμένων στοιχείων (continuum finite elements) οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση του εντατικού πεδίου, καθώς τα παραπάνω στοιχεία αδυνατούν να περιγράψουν τόσο τις σχετικές μετακινήσεις όσο και την αλληλοεπίδραση μεταξύ των σωμάτων. Για τη βέλτιστη αντιμετώπιση, λοιπόν, των περιοχών επαφής προτείνεται η εφαρμογή ειδικών πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία είναι γνωστά ως στοιχεία διεπιφάνειας (interface elements).

Σύμφωνα με τους Samtani et al (1996), ως διεπιφάνεια ορίζεται το επίπεδο επαφής που εμφανίζεται ανάμεσα σε δύο γειτονικά σώματα και το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί μία ζώνη με μικρό πάχος. Στοιχεία διεπιφάνειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρύτατα στη γεωτεχνική μηχανική, όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στο Σχήμα Α.1.



Σχήμα Α.1 Παραδείγματα εφαρμογής στοιχείων διεπιφάνειας στην γεωτεχνική μηχανική

Η αναγκαιότητα της χρήσεώς τους τονίζεται από τους Van Langen και Vermeer (1991), οι οποίοι χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων PLAXIS μελετούν τη φόρτιση ενός επίπεδου άκαμπτου πεδίου με συνεχές φορτίο (Σχήμα Α.2. α,β.) και την έμπηξη ενός πασσάλου σε συνεκτικό έδαφος (Σχήμα Α.3.α,β). Συγκεκριμένα, στα Σχήματα Α.2.α. και Α.3.α., δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων επαφής που εμφανίζονται στις παραπάνω περιπτώσεις, χωρίς τη χρήση στοιχείων διεπιφάνειας. Κύρια χαρακτηριστικά τους αποτελούν η διακύμανση των τιμών του τασικού πεδίου και η αδυναμία προσέγγισής του στις θέσεις έντονων γεωμετρικών αλλαγών (π.χ. γωνίες). Αντίθετα, στα Σχήματα Α.2.β. και Α.3.β. παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν από την προσομοίωση των περιοχών επαφής με στοιχεία διεπιφάνειας. Γίνεται φανερό πως με τη χρήση των συγκεκριμένων στοιχείων επιτυγχάνεται αισθητή εξομάλυνση των τάσεων και γενικότερα μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση του αναπτυσσόμενου εντατικού πεδίου.



Σχήμα Α.2. Μελέτη Φόρτισης Άκαμπτου Πεδίου. (α) Διάγραμμα Τάσεων Επαφής χωρίς Στοιχ.Διεπιφάνειας, (β) Διάγραμμα Τάσεων Επαφής με Στοιχ.Διεπιφάνειας (Van Langen & Vermeer, 1991).

Οι πιθανοί τρόποι παραμόρφωσης ενός στοιχείου διεπιφάνειας, το οποίο φορτίζεται υπό ορθή σ_n και διατμητική τάση τ περιγράφονται αναλυτικά στο Σχήμα Α.4. Η κατάσταση του Σχήματος Α.4.α. κατά την οποία η διατμητική τάση που ασκείται, δεν υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή, με συνέπεια να μην εμφανίζονται σχετικές μετακινήσεις μεταξύ της διεπιφάνειας και των γειτονικών στοιχείων, καλείται κατάσταση μη ολίσθησης. Αντίθετα, με την παραβίαση της διατμητικής αντοχής το σύστημα ολισθαίνει όπως ορίζεται στο Σχήμα Α.4.β. Στις δύο προηγούμενες καταστάσεις το στοιχείο διεπιφάνειας

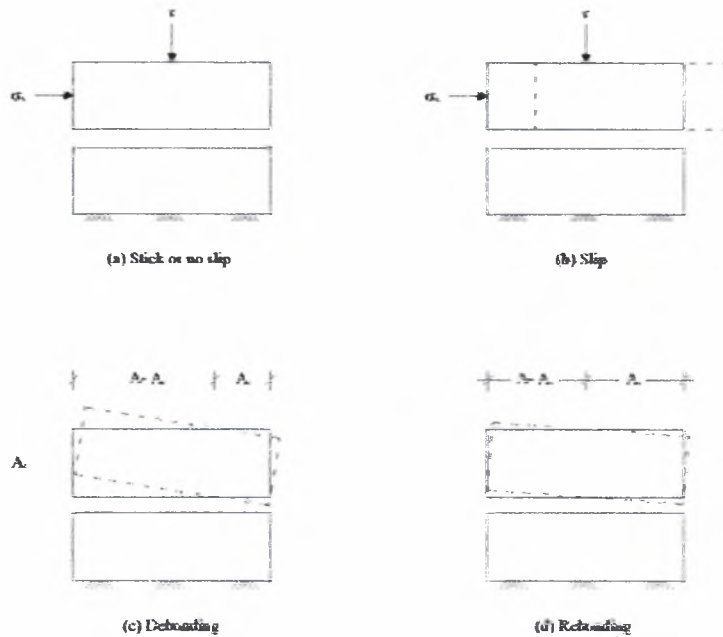
Θεωρείται πως βρίσκεται σε πλήρη επαφή με τα αντίστοιχα γειτονικά, καθώς η ορθή τάση εξακολουθεί να παραμένει θλιπτική. Στην περίπτωση που το παραγόμενο εντατικό πεδίο οδηγήσει στην ανάπτυξη ορθής εφελκυστικής τάσης, ο μηχανισμός παραμόρφωσης περιγράφεται από το Σχήμα Α.4.γ. Εμφανίζονται τα πρώτα διάκενα μεταξύ των στοιχείων και το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής μειώνεται αισθητά. Η περαιτέρω επιβολή φόρτισης οδηγεί τα στοιχεία στην απόκριση, η οποία δίνεται στο Σχήμα Α.4.δ. Το πλάτος των προηγούμενων διακενων περιορίζεται και το σύστημα τείνει προς την αρχική κατάσταση. Πρέπει να τονιστεί πως οι δύο τελευταίοι μηχανισμοί παραμόρφωσης εμφανίζονται κυρίως κατά την επιβολή δυναμικής φόρτισης.

Α.2 Μοντέλα διεπιφάνειας

Α.2.1 Σύντομη βιβλιογραφική αναδρομή

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά των στοιχείων διεπιφάνειας που προτείνονται στη βιβλιογραφία, είναι τα ακόλουθα:

α) η επίπεδη μοντελοποίησή τους με συνέπεια τα περισσότερα από αυτά να χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση προβλημάτων επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain). Η πρώτη σημαντική προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός στοιχείου διεπιφάνειας το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη αξονοσυμμετρικών προβλημάτων, γίνεται από τους Heuze και Barbour (1982).



β) η ταξινόμησή τους με βάση:

- το πάχος τους και
- τη δυνατότητα μεταβολής του όγκου τους κατά τη διατμητική παραμόρφωση.

Ως προς το πρώτο κριτήριο και σύμφωνα με τους Hohberg και Schweiger (1992) αναφέρονται δύο μεγάλες ομάδες-σχολές: αυτή των στοιχείων με μηδενικό πάχος (zero-thickness elements) και η αντίστοιχη των στοιχείων με πεπερασμένο πάχος (thin-layer elements), ενώ ως προς το δεύτερο τα στοιχεία διεπιφάνειας χωρίζονται σε διαστελλόμενα (dilatant elements) και σε μη-διαστελλόμενα (non-dilatant elements).

Το πλήθος των μελετών που αναφέρονται στη μορφοποίηση μοντέλων διεπιφάνειας καθώς και στην εφαρμογή τους κατά την επίλυση γεωτεχνικών προβλημάτων, είναι αρκετά εκτεταμένο. Πλήρη δεδομένα και αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με την εξέλιξη των στοιχείων διεπιφάνειας παρέχονται από τους Desai (1981), Heuze και Barbour (1982) και Wolf (1985). Στόχος του παρόντος κεφαλαίου δεν αποτελεί η ανάλυση των βιβλιογραφικών αναφορών που δίνονται στις παραπάνω εργασίες, ούτε η αναλυτική παρουσίαση των μοντέλων διεπιφάνειας, παρά η

A.2.2 Μοντέλο του Desai et al (1984)

Βασική αρχή του μοντέλου των Desai κ.ά. [1984] αποτελεί το γεγονός πως οι περιοχές επαφής μεταξύ διαφορετικών σωματίων-υλικών μπορούν να αντικατασταθούν από μία λεπτή στρώση στοιχείων διεπιφάνειας (thin - layer elements), τα οποία έχουν πεπερασμένο πάχος. Η διαφορά των συγκεκριμένων στοιχείων σε σχέση με τα αντίστοιχα γειτονικά τους εντοπίζεται στις ιδιαίτερες καταστατικές εξισώσεις που τα διέπουν, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται οι μηχανισμοί παραμόρφωσης του Σχήματος A.4 και παράλληλα να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των στοιχείων. Οι Desai & Nagaraj (1988) υποστηρίζουν πως το μοντέλο των Desai κ.ά. [1984] μπορεί να χρησιμοποιηθεί:

- α) για την προσομοίωση μίας εδαφικής στρώσης με μικρό πάχος και ιδιαίτερες εδαφικές ιδιότητες, η οποία εμφανίζεται ανάμεσα στη συνεχή εδαφική μάζα,
- β) για τη μελέτη της σύνδεσης τόσο μεταξύ στοιχείων με κοινές παραμέτρους (π.χ. έδαφος-έδαφος) όσο και στοιχείων τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικά υλικά (π.χ. έδαφος-τοιχος αντιστήριξης).

(A.14)

$$k_i = \int_{\text{vol}} B_i^T C_i B_i \, dv$$

όπου:

- k_i είναι το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου,
 B_i^T είναι το ανάστροφο μητρώο των παραμορφώσεων-μετακινήσεων,
 C_i είναι το μητρώο των τάσεων-παραμορφώσεων,
 B_i είναι το μητρώο των παραμορφώσεων-μετακινήσεων.

Το μητρώο B_i βασίζεται στη μορφοποίηση του αντίστοιχου μητρώου των κοινών εδαφικών στοιχείων (Zienkiewicz, 1977). Ιδιαίτερη προσοχή στην παρούσα μοντελοποίηση πρέπει να δοθεί στο γεγονός πως για την εύρεση του ολικού μητρώου ακαμψίας K δεν απαιτείται ο μετασχηματισμός του τοπικού μητρώου k_i όπως συμβαίνει στα προηγούμενα μοντέλα [Goodman, 1968, Heuze & Barbour, 1982, Yuan & Chua, 1992], αλλά μόνον ο αντίστοιχος και απλούστερος μετασχηματισμός του μητρώου τάσεων-παραμορφώσεων, C_i (Sharma & Desai, 1992).

Όπως επισημαίνεται από τους Desai et al (1984) τα κύρια πλεονεκτήματα του στοιχείου που προτείνουν, είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησής του για τη μελέτη της αλληλοεπίδρασης εδάφους-ανωδομής (interface element), καθώς και για την προσομοίωση των ασυνεχειών που εμφανίζονται στα βραχώδη εδάφη (joint element). Επίσης, σε αντίθεση με τα στοιχεία μηδενικού πάχους τονίζονται τα εξής:

- α) η μορφή των μητρώων C_i , B_i , K_i , επιτρέπει την εύκολη ενσωμάτωσή του σε κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς θεωρείται δεδομένη η συμβατότητά του με τα γειτονικά εδαφικά στοιχεία,
- β) προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την ορθή και διατμητική απόκριση των κρίσιμων περιοχών επαφής,
- γ) εξασφαλίζεται ο υπολογισμός ομοιόμορφων διαγραμμμάτων τάσεων κατά μήκος του στοιχείου.

Α.3. Εδαφικές Παράμετροι Στοιχείου Διεπιφάνειας

Οι τιμές των εδαφικών παραμέτρων του στοιχείου διεπιφάνειας αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για τη ρεαλιστική προσέγγιση των περιοχών επαφής. Σύμφωνα με τους Desai και Rigby (19970 για την εύρεσή τους θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλες συσκευές, οι οποίες να προσομοιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική συμπεριφορά του στοιχείου διεπιφάνειας, ενώ παράλληλα προτείνεται και η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών με αντίστοιχα που προκύπτουν από την εφαρμογή αναλυτικών σχέσεων.

Όπως διαπιστώνεται από την παρουσίαση των παραπάνω μοντέλων διεπιφάνειας, η ορθή k_n και διατμητική k_s ακαμψία οι οποίες εμφανίζονται τόσο στο μητρώο τάσεων-παραμορφώσεων όσο και στο μητρώο ακαμψίας τους, επηρεάζουν σημαντικά την απόκρισή τους. Για τον υπολογισμό των συγκεκριμένων μεγεθών έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μεθοδολογίες, οι πιο αντιπροσωπευτικές των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια.

Οι Potyondy (1961), Coyle και Sulaiman (1967), Walt et al (1969), O'Neil και Reese (1972) και Floate (1972), μεταξύ άλλων, προτείνουν τη χρήση της ομοαξονικής άμεσης διάτμησης (direct shear device), στην περίπτωση κατά την οποία το στοιχείο διεπιφάνειας χρησιμοποιείται για τη μελέτη της αλληλοεπίδρασης εδάφους-ανωδομής, υπό στατική φόρτιση. Οι τιμές της ορθής και διατμητικής ακαμψίας ορίζονται από την κλίση των ευθειών που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ ορθής τάσης-κατακόρυφων σχετικών μετακινήσεων και διατμητικής τάσης-οριζόντιων σχετικών μετακινήσεων αντίστοιχα. Οι Yoshini και Kishida (1981) και Uesugi και Kishida (1986) υποστηρίζουν πως η χρήση της κυκλικής ομοαξονικής διάτμησης (ring shear test) είναι δυνατό να οδηγήσει στον υπολογισμό των k_n και k_s με μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι Crawford και Curran (1981) και οι Huang et al (1993) ανέπτυξαν ειδικές συσκευές για τη μελέτη της ορθής και διατμητικής απόκρισης των στοιχείων διεπιφάνειας, υπό την επιβολή δυναμικών φορτίων.

Οι Goodman et al. (1968) δίνοντας ιδιαίτερη βαρύτητα στον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων επισημαίνουν πως:

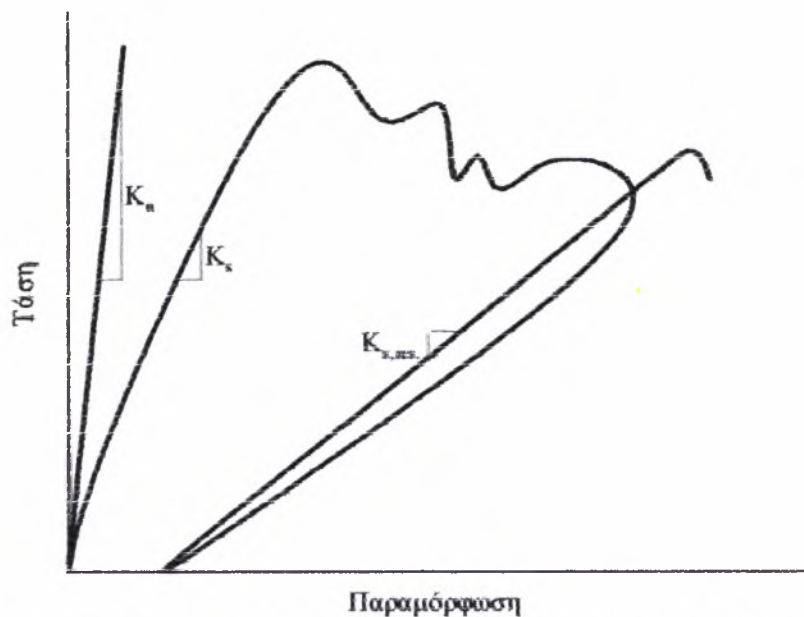
α) η ορθή ακαμψία k_o του στοιχείου εξαρτάται από

- το εμβαδό της επιφάνειας επαφής μεταξύ των στοιχείων,
- τα εδαφικά χαρακτηριστικά του υλικού πληρώσεως (εφόσον υπάρχει),

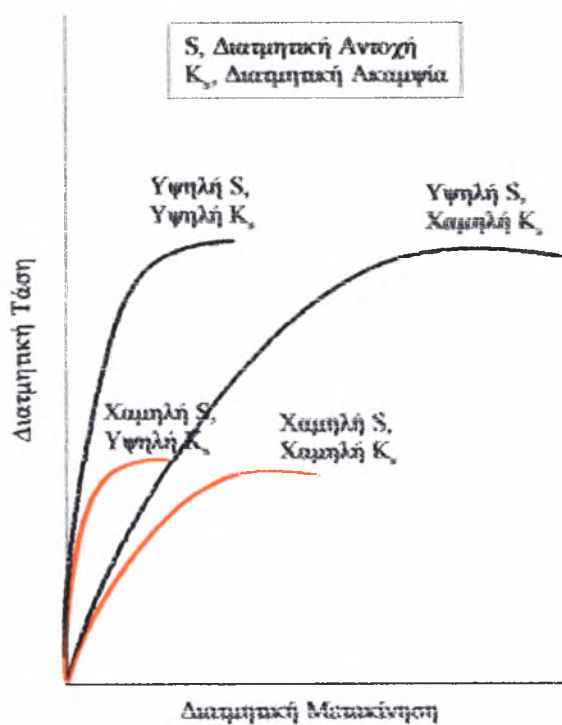
β) η διατμητική ακαμψία k_s του στοιχείου εξαρτάται από

- την τραχύτητα της επιφάνειας επαφής,
- το εμβαδό της επιφάνειας επαφής μεταξύ των στοιχείων,
- τα εδαφικά χαρακτηριστικά του υλικού πληρώσεως (εφόσον υπάρχει).

Για την εύρεση των τιμών των k_o , k_s , προτείνεται η εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης και η μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων, όπως απεικονίζεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα Α.7. Στο επόμενο σχήμα δίνεται η αλληλοεξάρτηση της διατμητικής ακαμψίας συναρτήσει της επιβαλλόμενης διατμητικής τάσης και της αντίστοιχης μετακίνησης. Επίσης, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το προτεινόμενο σύστημα κατάταξης των στοιχείων διεπιφάνειας, το οποίο περιγράφεται συνοπτικά στον Πίνακα Α.1. Η ταξινόμηση των στοιχείων στις επιμέρους κατηγορίες γίνεται με βάση τις τιμές της ορθής και διατμητικής ακαμψίας καθώς και της διατμητικής αντοχής. Στον Πίνακα Α.1 δίνεται ένα στοιχείο διεπιφάνειας με υψηλή ορθή ακαμψία, μέση διατμητική αντοχή και μέση διατμητική ακαμψία.



Σχήμα Α.7. Εύρεση Ακαμψιών Στοιχείου Διεπιφάνειας (Goodman et al,1968).



Σχήμα Α.8. Ιδεατές Καμπύλες Σχέσης μεταξύ Διατμητικής Αντοχής και Διατμητικής Ακαμψίας (Goodman et al,1968).

| S | | | | |
|----------------|---|---|---|----------------|
| K _o | H | M | L | K _s |
| H | | | | H |
| H | | * | | M |
| H | | | | L |
| M | | | | H |
| M | | | | M |
| M | | | | L |
| L | | | | H |
| L | | | | M |
| L | | | | L |

S: Διατμητική αντοχή στοιχείου διεπιφάνειας,

K_o: Ορθή ακαμψία στοιχείου διεπιφάνειας,

K_s: Διατμητική ακαμψία στοιχείου διεπιφάνειας,

H: Υψηλή τιμή,

M: Μέση τιμή,

L: Χαμηλή τιμή.

Πίνακας Α.1. Σύστημα Κατάταξης Στοιχείων Διεπιφάνειας κατά Goodman et al (1968)

Οι Desai et al (1974) για τον υπολογισμό της διατμητικής ακαμψίας εισάγουν τη σχέση:

$$k_s = (1 - \lambda_2)^2 k_i \quad (\text{A.15})$$

όπου:

λ_2 είναι συντελεστής οριζόμενος ως:

$$\lambda_2 = \frac{R_f \tau}{c_a + \sigma_n \tan \delta}$$

(A.16)

όπου:

R_f είναι παράμετρος που προκύπτει από την ανάλυση των εργαστηριακών δοκιμών άμεσης διάτμησης.

τ είναι η διατμητική τάση,

c_o είναι η συνοχή του στοιχείου διεπιφάνειας,

σ_n είναι η ορθή τάση,

δ είναι η γωνία τριβής μεταξύ εδάφους-πασσάλου.

k_i είναι η αρχική ακαμψία υπολογιζόμενη όπως παρακάτω:

$$k_i = k_j \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^n \quad (\text{A.17})$$

όπου:

k_j, n είναι παράμετροι που προκύπτουν από την επεξεργασία των εργαστηριακών δοκιμών,

γ_w είναι το ειδικό βάρος του νερού,

P_a είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Για την ορθή ακαμψία προτείνουν την υιοθέτηση μίας υψηλής τιμής, ώστε να αποτραπεί η εισχώρηση των εδαφικών στοιχείων στην περιοχή επαφής.

Οι Høhberg και Schweiger (1992) συνδέουν την ακαμψία του στοιχείου με τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την ελαστική συμπεριφορά του, σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις:

$$k_n = \frac{E}{l} \quad , \quad k_s = \frac{G}{l} \quad (\text{A.18})$$

όπου:

E είναι το μέτρο ελαστικότητας,

G είναι το μέτρο διάτμησης,

t είναι το πάχος του στοιχείου.

Οι VanLangen και Vermeer [1991] για τον προσδιορισμό των k_n , k_s χρησιμοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

$$k_s = \mu \frac{G}{l} \quad (\text{A.19})$$

$$k_n = \frac{\mu G}{(1 - 2\nu)l} \quad (\text{A.20})$$

όπου:

G είναι το μέτρο διάτμησης,

l είναι το μήκος του στοιχείου,

μ είναι συντελεστής με προτεινόμενη τιμή $\mu=50$,

ν είναι ο λόγος του Poisson.

Οι Sharma και Desai [1992] για τη μελέτη της ελαστικής και ελαστοπλαστικής απόκρισης των στοιχείων διεπιφάνειας βασίζονται στις επόμενες αναλυτικές σχέσεις:

$$E \cong k_n t \quad (\text{A.21})$$

$$G \cong k_s t \quad (\text{A.22})$$

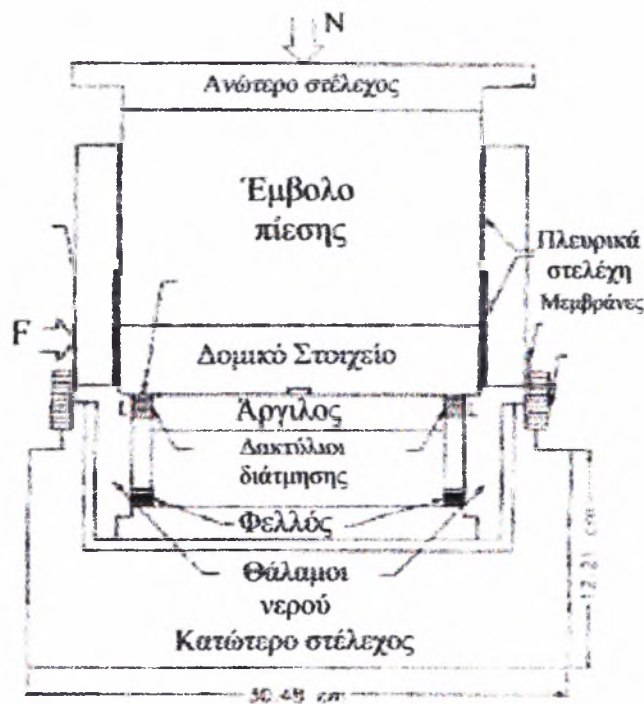
$$\nu = \frac{k_n}{2k_s} - 1 \quad (\text{A.23})$$

όπου:

Ε,θ,ν είναι οι παράμετροι του στοιχείου, έτσι όπως έχουν οριστεί στις προηγούμενες παραγράφους.

Οι Desai και Rigby (1997) παρουσιάζουν την εξέλιξη μίας ειδικής συσκευής διάτμησης, η οποία είναι γνωστή ως CYMDOF-P (Cyclic Multi-Degree-Of-Freedom) και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία κατά την εργαστηριακή μελέτη των στοιχείων διεπιφάνειας «λεπτή-στρώση» (Desai et al, 1995, Drumm και Desai, 1986, Desai και Nagarath, 1988). Η συσκευή απεικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα Α.8 και αποτελείται από:

- α) το ηλεκτρονικό και υδραυλικό σύστημα φόρτισης,
- β) το ηλεκτρικό σύστημα καταγραφής του εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά την εξέλιξη της δοκιμής,
- γ) τη διάταξη ρύθμισης των συνθηκών αποστράγγισης,
- δ) το μεταλλικό κυκλικό δοκίμιο, στο οποίο τοποθετείται το εδαφικό δείγμα.

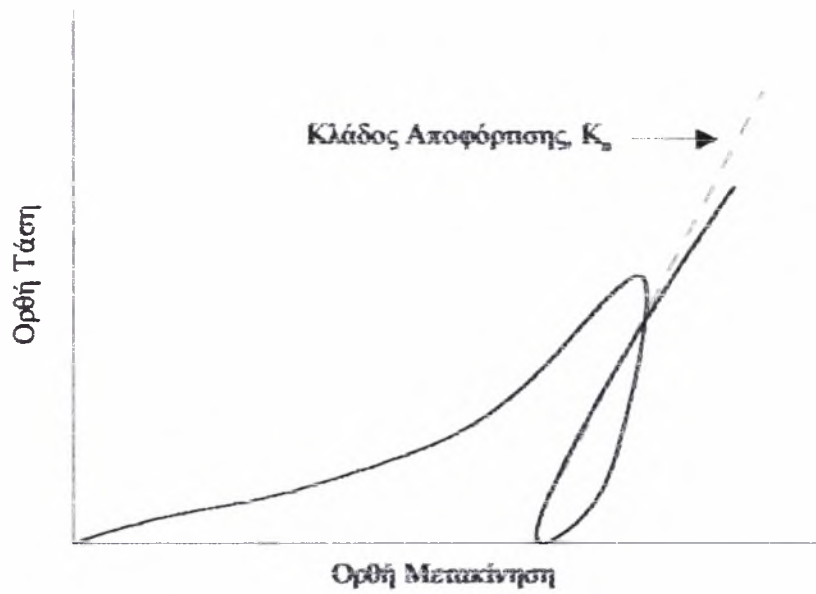


Σχήμα Α.9. Συσκευή Διάτμησης CYMDOF-P (Cyclic Multi-Degree-Of-Freedom)

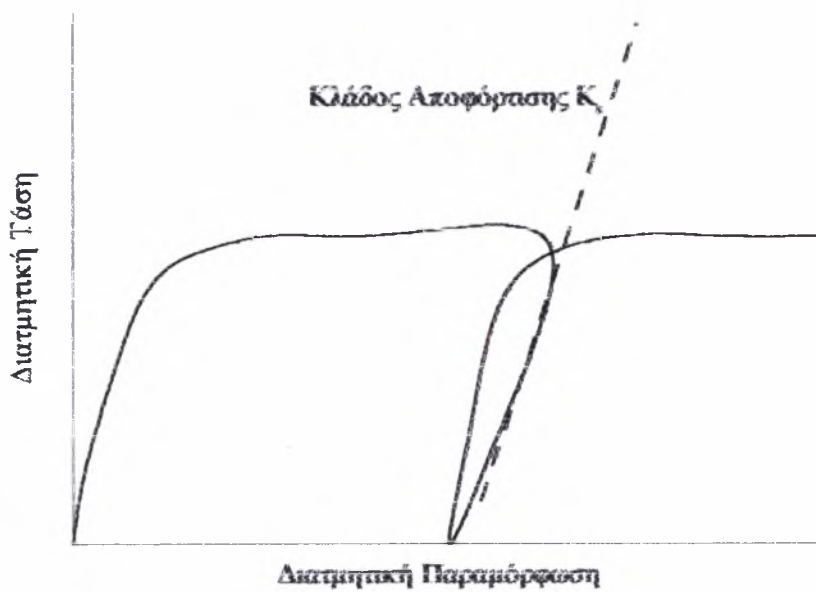
Περισσότερες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και τη λειτουργία των παραπάνω τμημάτων της συσκευής παρέχονται στη βιβλιογραφία (Desai και Rigby, 1997). Τα βασικά πλεονεκτήματά της συσκευής CYMDOF-P είναι τα εξής:

- α) η δυνατότητα προσομοίωσης τριών βαθμών ελευθερίας κατά την παραμόρφωση του στοιχείου διεπιφάνειας. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια ελατηρίων τοποθετημένων σε κατάλληλες θέσεις είναι δυνατό εκτός από τις κατακόρυφες και οριζόντιες μετακινήσεις, να ληφθεί υπόψη και η πιθανή περιστροφή (rotation) του στοιχείου,
- β) η επιβολή στατικών και δυναμικών ορθών-διατμητικών φορτίων καθώς και αντίστοιχων εξαναγκασμένων μετακινήσεων,
- γ) η δυνατότητα εκτέλεσης στραγγιζόμενων και αστραγγιστων δοκιμών διάτμησης, με ικανότητα μέτρησης της πίεσης των πόρων που αναπτύσσεται στο στοιχείο διεπιφάνειας.

Ο υπολογισμός της ορθής και διατμητικής ακαμψίας συνίσταται στην εύρεση της κλίσης των ευθειών αποφόρτισης, έτσι όπως αυτές δίνονται στα Σχήματα Α.10.α,β. αντίστοιχα. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως η χρήση της συσκευής CYMDOF-P δεν αποσκοπεί μόνο στην εύρεση των παραπάνω μεγεθών αλλά και στον προσδιορισμό των εδαφικών παραμέτρων σύνθετων κατασταστικών νόμων (Desai και Ma, 1992, Katt και Desai, 1995, Desai και Toth, 1996, Samtani et al 1996).



(α)



(β)

Σχήμα Α.10.(α) Εύρεση Ορθής Ακαμψίας, (β) Εύρεση Διατμητικής Ακαμψίας κατά Samtani et al (1996)

Βιβλιογραφία

Ευρετήριο Βιβλιογραφικών Αναφορών

- Broomhead E.N., "The stability of slopes", Blackie Academic&Professional, London, (1992)
- Cormeau I. C., " Numerical stability in quasi-static elasto/visco-plasticity ", Int. J. Num. Meth. Eng., 9,109-127 (1974)
- Coyle H. M. and Sulaiman I., "Skin friction for stell piles in sand", J. Soil Mech. And Found. Eng., ASCE, 93 (6), 261-278
- Craig R.F. "Soil mechanics" ,E&FN Spon, London (1997)
- Crawford A. M. and Curran J. H., "The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities", Int. J. Rock Mech. And Min. Sci., 18 (6), 505-515 (1981)
- Crozier M. J., "Landslides- Causes, consequences and Enviroment", Croom Helm, London, (1986)
- Cruden D. M., "A simple definition of a landslide", Bulletin IAEG, 43, 27-29 (1991)
- Cruden D. M. and Varnes D.J., "Landslide Types and proresses", (A.K. Turner and R.L. Schuster editors), Landslide Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report, (1996)
- Desai C. S., " Behavior of interfaces between structural and geologic media", Proc. Int. Conf. On Recent Advances in Geotech. Earthquake Eng. And Soil Dynamics, (1981)
- Desai C. S. and Ma Y., "Modeling of joints and interfaces using the disturbed-state concept", Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech., 16, 623-653 (1992)
- Desai C. S. and Nagaraj B.K., "Modeling for cyclic normal and shear behavior of interfaces", J. Eng. Mech., ASCE, 114, 1198-1217 (1988)
- Desai C. S. AND Rigby D. B., "Cyclic interface and joint shear device including pore pressure effects", J. Geothech. And Geoenvironm. Eng., 123, 568-579 (1997)

- Desai C. S., Samtani N. C. and Vulliet L., "Constitutive modeling and analysis of creeping slopes", *J. Geotech. Eng., ASCE*, 121 (1), 43-56 (1995)
- Desai C. S. and Toth J., "Disturbed state modeling based on stress-strain and non-destructive behavior", *Int. J. Solids And Struct.*, 33, 1619-1650 (1996)
- Desai C. S., Zaman M. M., Lightner J.G. and Siriwardane H. J., "Thin layer element for interfaces and joints", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 8, 19-43 (1984)
- Dinis L. M. S. and Zhang D., "Elastic-viscoplastic analysis of plates by the finite element method", *Computers and Structures*, 8, 207-215 (1978)
- DOE (Departement Of the Environment), "Landsliding in Great Britain" (edited by D.K.C. Jones and E.M. Lee), HMSO, London, (1994)
- Drucker D.C., "Coulomb friction, plasticity and limit loads", *Jnl. Appl. Mech.*, 21, 71-74 (1954)
- Drucker D.C. and Prager W., "Soil mechanics and plastic analysis on limit design", *Q. Appl. Math.*, 10, 157-165 (1952)
- Drumm E. C. and Desai C. S., "Determination of parameters for a model for the cyclic behavior of interfaces", *Int. J. Earthquake Eng. And Struct. Dyn.*, 14, 1-18(1986)
- Feda J., "Creep of soils and related Phenomena", Elsevier, (1992)
- Felix B. "La fluage des sols agrileux", *Raport de recherche LPC No.93*, 231 (1980)
- Findley W. N., Lai J. S. and Onaran K., "Creep and relaxation of non-linear viscoelastic materials", Dover Publications, Inc., New York (1976)
- Flaate K., "Effects of pile driving in clay", *Can. Geotech. J.*, Ottawa, Canada, 9 (1), 81-88 (1992)
- Goodman R. E., Taylor R. L. and Brelle T. L., "A model for the mechanics of jointed rock", *J. Soil Mech. And Foundations Div.*, 94 (SM4), 339-442 (1972)

- Griffiths D. V., "Numerical modeling of interfaces using conventional finite elements", *Proch 5th Int. Conf. On Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, 837-844 (1985)
- Gurtin M. and Sternberg E., "On the linear theory of visco-elasticity", *Arch. Rational Mech. Anal*, 11, 291-356 (1962)
- Henkel D. J. and Sowa V. A., "Discussion on creep tests of clays", *Symp. On Lab. Test Of Soils*, ASTM Spec. Publ., 361, 104-107 (1963)
- Hohberg J. M. and Schweiger H. F., "On the penalty behavior of thin-layer elements", *Numerical Models in Geomechanics*, Pande and Pietrusczak (eds), Balkema, Rotterdam, 241-248 (1992)
- Hsieh H. S. and Kavazanjian E. J., "A non-associative cam-clay plasticity model for the stress-strain time behavior of soft clays", *Geot. Eng. Res. Rep. No. GT4, XII*, 231 (1987)
- Huang X., Haimen B. C., Plesha M. E. and Qui X., "An investigation of the mechanics of rock-joints -Part I. Laboratory investigation", *Int. J. Rock Mech. And Min. Sci.*, 30 (3), 257-269 (1993)
- Hueze F. E. AND Barbour T. G., "New models for rock joints and interfaces", *J. Geotech. Eng. Div.*, 108, 757-776 (1982)
- Kanchi M. B., Zienkiewicz O. C., and Owen D.R.J., "The visco-plastic approach to problems of elasticity and creep involving geometric non-linear effects", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 12, 169-181 (1978)
- Karabatakis D., Anagnostopoulos C., Pitilakis K., Hatzigogos T., "Analysis of a natural creeping slope-Aspects of stabilization measures", (2001)
- Katti D. R. and Desai C. S., "Modeling and testing of cohesive soil using disturbed state concept", *J. Eng. Mech., asce*, 121 (5), 648-658 (1995)
- O'Neil M. W. and Reese L. C., "Behavior of bored piles in Beaumont clay", *J. Soil Mech. And Found. Eng., ASCE*, 98 (2), 195-213 (1972)
- Owen D. R. J. and Hinton E., "Finite elements in plasticity: Theory and practice", Pineridge Press Ltd., Swansea, U.K. (1980)

- Perzyna P., "Fundamental problems in viscoplasticity", *Adv. Appl. Mech.*, 9, 243-377 (1966)
- Popescu M.E., "Landslide in overconsolidated Clays as encountered in eastern Europe, state-of-the-art-report", *Proceedings 4th Int. Symp. On Landslides*, (1984)
- Popesku M.E., "Landslide causal Factors and landslide Remedial Options", on-line paper www.geoengineer.org, (2003)
- Potyindy J. G., "Skin friction between various soils and construction materials", *Geotechnique*, London, England, 11 (4), 339-353 (1961)
- Prevost J. H., "Plasticity theory for soil stress-strain behavior", *J. Eng. Mech. Div., ASCE*, 104, 1177-1194 (1978)
- Samtani N. C., Desai C. S. and Vulliet L., "An interface model to describe viscoplastic behavior", *Int. J. Numer. Analyt. Meth. Geomech.*, 20, 231-252 (1996)
- Sharma K. G. and Desai C. S., "Analysis and implementation of thin-layer element for interfaces and joints", *J. Eng. Mech., ASCE*, 118, 2442-2443 (1992)
- Schuster R.L. "recent advances in slope stabilization", Keynote paper proc. 6th Int. Symp. On Landslides, Christchurch, (1992)
- Terzaghi K., "Mechanisms of landslide", *Geological Society of America*, Berkley, (1950)
- The Japan Landslide Society, "Landslides In Japan", 5th revision, Proc. Of The National Conference of Landslide Control, (1996)
- Uesugi M. and Kishida H., "Influential factors of friction between steel and dry sands", *Soils and Found.*, 26 (2), 33-46 (1986)
- Valanis K. C., "A theory of viscoplasticity without a yield surface", *Arch. Mech.*, 23, 517-555 (1971)
- Varnes D.J., " Slope Movements and types and processes", *Landslide Analysis and Control Transportation Resarch Board Special Report*, 176, 11-35, (1978)

- Vulliet L. and Hutter K., "Set of constitutive models of soils under slow movement", *J. of Geotech. Eng.*, 114, 1022-1041 (1988a)
- Vulliet L. and Hutter K., "Viscous type sliding laws for landslides", *Canadian Geotechn.*, 25, 467-477 (1988b)
- Walt W. G. Kurfurst P. J. and Zaman Z. P., "Comparison of pile load test skin friction values and laboratory strength tests", *Can Geotech. J.*, Ottawa, Canada, 6 (3), 1969
- Wolf J. P., "Dynamic soil-structure interaction", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., (1985)
- WP/WLI :International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party World Landslide Inventory "A suggested method for a landslide summary", *Bulletin IAEG*, 43, (1991)
- WP/WLI :International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party World Landslide Inventory-Cruden D.M. Chairman, "A suggested method for reporting a landslide", *Bulletin IAEG*, 41, (1991)
- WP/WLI :International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party World Landslide Inventory-Popescu M. E. Chairman, "A suggested method for reporting landslide causes", *Bulletin IAEG*, 50, (1994)
- Yoshini Y. and Kishida T., "A ring torsion apparatus for evaluating friction between soils and metal surfaces", *Geotech. Testing. J.*, 4 (4), 145-152 (1981)
- Yuan Z. and Chua K. M., "exact formulation of axisymmetric-interface-element stiffness matrix", *J. of Geotech. Eng.*, 118, 1264-1271 (1992)
- Zaman M. M., Desai C. S. and Drumm E. C., "Interface model for dynamic soil-structure interaction", *J. Geotech. Eng. Div.*, 110, 1257-1273 (1984)
- Zienkiewich O. C., "The finite element method, 3rd end., Mc Graw-Hill, London, (1977)
- Zieekiewich O. C. and Cormeau I. C., "Visco-plasticity, plasticity and creep in elastic solids. A unified numerical solution approach", *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 8, 821-845 (1974)

- Καραμπατάκης Δ., "Μελέτη στοιχείων διεπιφάνειας με ερπυστική συμπεριφορά", Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη (2000)
- Καραμπατάκης Δ., Χατηγιώγος Θ., Τσότσος Στ., Αναγνωστόπουλος Χρ., "Αριθμητική προσομοίωση Συμπεριφοράς ολισθαίνοντος φυσικού πρανούς", Πρακτικά 4^{ου} Παν. Συνεδρίου Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα (2001)
- Μπαντής Σ., "Διαχείριση φυσικών κινδύνων: Κατολισθήσεις", Διδακτικές Σημειώσεις προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών: Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη, Θεσσαλονίκη, (2002)
- Τσότσος Σ. "Εδαφομηχανική: Θεωρία, μέθοδοι, εφαρμογές", Εκδόσεις Βερβερίδης-Πολυχρονίδης, Θεσσαλονίκη, (1991)

