

# Συμπεριφορά Μικροπασσάλων σε Πλευρική Φόρτιση ως Στοιχείων Βελτίωσης της Ευστάθειας Πρανών

## Response of Micropiles Under Lateral Load for the Improvement of Slope Stability

ΣΑΡΗΓΙΑΝΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ  
ΡΙΤΣΟΣ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ  
ΙΩΑΚΕΙΜΙΔΗΣ ΓΙΑΝΝΗΣ  
ΣΤΑΘΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΓΓΕΛΗΣ

Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc D.I.C., Εγνατία Οδός Α.Ε.  
Πολιτικός Μηχανικός, Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε.  
Πολιτικός Μηχανικός, Εγνατία Οδός Α.Ε.  
Πολιτικός Μηχανικός, ΔΟΜΗ Ο.Ε.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς σειράς εύκαμπτων κατακόρυφων μικροπασσάλων, η οποία υποβάλλεται σε πλευρική φόρτιση λόγω μετακίνησης του εδάφους, με σκοπό την ενίσχυση ή την αντιστήριξη ενός πρανού. Η διερεύνηση γίνεται για διάφορους συνδυασμούς εδαφών χαμηλής και υψηλής αντοχής. Γενικώς, προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα που αφορούν τον ακριβή μηχανισμό αστοχίας και τη μέγιστη δύναμη αντίστασης με την οποία τα στοιχεία αντιστέκονται στην ολίσθηση. Σημαντική παράμετρος για τη διαστασιολόγηση παρόμοιων συστημάτων είναι η συσχέτιση της αναπτυσσόμενης δύναμης αντίδρασης με την αντίστοιχη μετακίνηση του εδάφους.

**ABSTRACT:** This paper discusses the response of vertical micropiles under lateral load, in order to improve the stability of a slope. Computational simulations have been done for a variety of low and high strength soils. Useful results have been obtained with relation to the accurate mechanism of failure and the maximum resisting forces, which withstand soil movement. The relation between the developed resisting forces and the relative displacements seems to be a critical parameter for the design of such systems.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή κατακόρυφων πασσάλων μέσης έως μεγάλης διαμέτρου (50 έως 120cm) έχει ληφθεί σε αρκετές περιπτώσεις ως μέσο ενίσχυσης για την ευστάθεια πρανών με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία στηρίζεται στην αρχή της αύξησης του γενικού συντελεστή ασφάλειας έναντι ολίσθησης ενός πρανού, μέσω της διατμητικής αντίστασης που αναπτύσσεται προοδευτικά από την αλληλεπίδραση μεταξύ του συστήματος «πάσσαλοι-περιβάλλον έδαφος» κατά τη διάρκεια μιας εδαφικής παραμόρφωσης. Τα συγκεκριμένα στοιχεία θεωρείται ότι είναι υψηλής δυσκαμψίας και μπορούν να αναπτύξουν αξιοσημείωτες σταθεροποιητικές δυνάμεις ευστάθειας έναντι ολίσθησης ενός

πρανού, δίχως να υποστούν αστοχία (Poulos, 1999). Οι ανάγκες κατασκευής των έργων στη σύγχρονη εποχή εισάγουν κάποιες γενικές δεσμεύσεις στις επιλογές των λύσεων με πασσάλους που αφορούν τα εξής:

1) Τη δυσκολία έως και αδυναμία πρόσβασης κάποιων θέσεων, λόγω των μεγάλων διαστάσεων διατρητικών μηχανημάτων που απαιτούνται για την κατασκευή των πασσάλων.

2) Τη σημαντική διατάραξη της ευρύτερης περιοχής κατά το στάδιο της διάτρησης.

3) Τη δυσκολία διάτρησης των πασσάλων σε υψηλής αντοχής βραχύδες υπέδαφος.

Οι παραπάνω δεσμεύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν με την επιλογή πασσάλων μικρής διαμέτρου (συνήθως  $D \leq 30\text{cm}$ ), οι οποίοι ονομάζονται διεθνώς με τον όρο μικροπασσάλοι (micropiles, minipiles). Τα συγκεκριμένα στοιχεία πλεονεκτούν σε σχέση με τους πασσάλους, κυρίως στην ταχύτητα κατασκευής και στην απαίτηση μικρών διαστάσεων διατρητικού εξοπλισμού.

Το βασικό χαρακτηριστικό ενός μικροπασσάλου ως στοιχείου ενίσχυσης για την ευστάθεια ενός πρηνούς, είναι ότι συμπεριφέρεται ως εύκαμπτο δομικό στοιχείο, το οποίο αντιστέκεται στην ολίσθηση με ένα τμήμα του συνολικού του μήκους στο οποίο αναπτύσσονται διατμητικές και καμπτικές αντιστάσεις.

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η υπολογιστική διερεύνηση της συμπεριφοράς σειράς εύκαμπτων κατακόρυφων μικροπασσάλων οι οποίοι υποβάλλονται σε πλευρική φόρτιση, λόγω μετακίνησης τμήματος του εδάφους. Με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι προσομοιάζεται η συμπεριφορά ενός παρόμοιου συστήματος κατά την διάρκεια μιας εδαφικής ολίσθησης.

## 2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης ενός εδαφικού πρηνούς οπλισμένου με κατακόρυφα στοιχεία μικροπασσάλων, αναπτύσσονται προοδευτικά πλευρικές δυνάμεις αντίστασης, οι οποίες αντιστέκονται στην ολίσθηση, με μεταφορά του φορτίου στο υποκείμενο ευσταθές εδαφικό τμήμα.

Ο τρόπος λειτουργίας ενός μικροπασσάλου εντός της περιοχής της ολισθαίνουσας ζώνης (active zone) αποδεικνύεται ότι εξαρτάται από την παράμετρο του μήκους αναφοράς  $L_o$  του στοιχείου ( $L_o = [4EI/E_s]^{1/4}$ , όπου  $EI$ : η καμπτική δυσκαμψία του μικροπασσάλου,  $E_s$ : Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους). Ανάλογα με το βάθος  $z_A$  της ολισθαίνουσας εδαφικής ζώνης (active zone), το στοιχείο μπορεί να θεωρηθεί δύσκαμπτο όταν  $z_A \leq L_o$ , μέσης δυσκαμψίας όταν  $L_o < z_A \leq 3L_o$  και εύκαμπτο όταν  $z_A > 3L_o$  (Cai & Keizo, 2003 & Clouterre, 1991).

Ομοίως, παρόμοια συμπεριφορά είναι δυνατό να ισχύσει και για το μήκος του στοιχείου εντός της ευσταθούς περιοχής του εδάφους (μήκος  $z_b$ ). Κατά κύριο όμως λόγο, η συνήθης πρακτική σχεδιασμού επιλέγει μεγάλα μήκη μικροπασσάλου εντός της συγκεκριμένης περιοχής, τα οποία υπερβαίνουν κατά πολύ την παράμετρο  $L_o$  ( $z_b \gg L_o$ ), με αποτέλεσμα η

συμπεριφορά του στοιχείου στην αντίστοιχη περιοχή να χαρακτηρίζεται συνήθως ως εύκαμπτη.

Η περιορισμένη δυσκαμψία του μικροπασσάλου έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο στοιχείο κατά τη διάρκεια μίας σημαντικής μετακίνησης του εδάφους. Μετά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης θεωρείται ότι το στοιχείο μπορεί κατά περίπτωση να συνεισφέρει στην αντίσταση της ολίσθησης για ακόμη μεγαλύτερες παραμορφώσεις του εδάφους (Knochenmus & Bretelle & Schlosser, 1997).

Η ανάπτυξη των πλευρικών δυνάμεων αντίστασης από τα στοιχεία των μικροπασσάλων είναι συνάρτηση των εξής παραμέτρων:

- 1) Της διαμέτρου  $D$  και της δυσκαμψίας  $EI$  του μικροπασσάλου σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος. Από τα στοιχεία αυτά καθορίζεται το μήκος αναφοράς  $L_o$ .
- 2) Του μεγέθους και της κατανομής της μετακίνησης. Η παθητική αντίσταση του μικροπασσάλου αναπτύσσεται προοδευτικά με τη μετακίνηση. Η μέγιστη δυνατή παθητική αντίσταση του μικροπασσάλου, απαιτεί μεγάλες και συνήθως απαγορευτικές για το έργο παραμορφώσεις.
- 3) Της πλευρικής αντοχής του εδάφους  $P_{ult}$ . Η συγκεκριμένη εδαφική παράμετρος συνδυάζεται και με την αξονική απόσταση των μικροπασσάλων. Υπέρβαση της συγκεκριμένης παραμέτρου οδηγεί είτε σε πλήρη θραύση του εδάφους περιμετρικά του μικροπασσάλου, είτε σε διαρροή-θραύση του εδαφικού υλικού ανάμεσα από τα στοιχεία.
- 4) Του μήκους του μικροπασσάλου τόσο εντός της ολισθαίνουσας εδαφικής ζώνης (active zone)  $z_A$ , όσο και εντός της ευσταθούς εδαφικής ζώνης (passive zone)  $z_b$ .

## 3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η διερεύνηση της συμπεριφοράς των παραπάνω συστημάτων πραγματοποιήθηκε με την εφαρμογή αριθμητικής προσομοίωσης για τον καθορισμό της λειτουργίας μικροπασσάλων που τοποθετούνται για την αντιμετώπιση εδαφικής κατολίσθησης και για την αντιστήριξη-ενίσχυση τεχνητών

υφιστάμενων επιχωμάτων οδοποιίας. Το σύστημα προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 1.

Για τις ανάγκες των αναλύσεων θεωρήθηκε ολίσθηση επιφανειακής εδαφικής ζώνης SM1 (κατολισθαίνουσα ζώνη-Πίνακας 1) αποτελούμενη από χαλαρή αμμώδη στρώση, η οποία ολισθαίνει επί ευσταθούς εδαφικού υποβάθρου διαφόρων τύπων εδαφών (βλ. Πίνακας 1).

Για την εκτίμηση της επιρροής των χαρακτηριστικών του υποβάθρου στην απόκριση των μικροπασσάλων, θεωρήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι εδαφικών υλικών πάκτωσης εντός της ευσταθούς ζώνης, οι οποίες αντιστοιχούν σε μέσης πυκνότητας άμμο (στρώση SM2), κατακερματισμένο βράχο (στρώση SI-w), και πολύ σφιγγή άργιλο (στρώση CL1). Τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 :Μηχανικές Παράμετροι Γεωυλικών  
Table 1 :Mechanical Properties of Soils

Τύπος Εδάφους	$\gamma$	$\phi$	c	E	$\nu$	$\Sigma$
SM1	18,0	25	5	10	0,3	A
SM2	19,5	32	5	20	0,3	P
SI-w	24,0	38	54	800	0,3	P
CL1	20,0	24	30	30	0,3	P

$\gamma$  : Ειδικό φαινόμενο βάρος ( $\text{kN/m}^3$ )  
 $\phi$  : Γωνία τριβής (deg)  
 c : Συνοχή (kPa)  
 E : Μέτρο ελαστικότητας (MPa)  
 $\nu$  : Λόγος poisson (-)  
 $\Sigma$  : A=Κατολισθαίνουσα ζώνη  
 P=Ευσταθής ζώνη πάκτωσης

Το σύνολο των ελέγχων πραγματοποιήθηκε για την περίπτωση εξωτερικής παρειάς πρανούς κλίσης 2:3 (33,7°) και για διεπιφάνεια ολίσθησης της επιφανειακής εδαφικής ζώνης SM1 παράλληλη προς το εξωτερικό πρανές.

Το σύστημα αντιστήριξης αποτελείται σε όλες τις περιπτώσεις από σειρά κατακόρυφων μικροπασσάλων, ελεύθερης κεφαλής, διαμέτρου  $D=22\text{cm}$ , μήκους  $L=12,0\text{m}$ , σε αξονική απόσταση κατά την οριζόντια διεύθυνση  $s_n=1,0\text{m}$ . Ο οπλισμός των στοιχείων αποτελείται από χαλύβδινη σωληνωτή διατομή τύπου TUBO, διαμέτρου  $d=129\text{mm}$  και πάχους τοιχώματος  $t=10\text{mm}$ .

Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για δύο επιμέρους περιπτώσεις τοποθέτησης των μικροπασσάλων μία στο μέσον του μετώπου του πρανούς, θεωρώντας ότι πρόκειται για

στοιχεία ανάσχεσης κατολίσθησης (περίπτωση τοποθέτησης (A)) και μία στη στέψη του πρανούς σε απόσταση 1,0m από το μέτωπο, θεωρώντας ότι πρόκειται για στοιχεία αντιστήριξης-ενίσχυσης του θεωρηθέντος ασταθούς επιχώματος οδοποιίας (περίπτωση τοποθέτησης (B)).

Η αριθμητική προσομοίωση έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων διαφορών  $\text{FLAC}^{2D}$  με εφαρμογή του ελαστοπλαστικού μοντέλου ανάλυσης Mohr-Coulomb. Τα στοιχεία των μικροπασσάλων προσομοιώνονται σαν στοιχεία δοκού δεδομένης πλαστικής ροπής αντίστασης, με δυνατότητα τριών βαθμών ελευθερίας (μετακίνηση σε δύο διευθύνσεις και μία δυνατότητα στροφής) σε κάθε κόμβο. Για την επιλεχθείσα χαλύβδινη κοίλη διατομή εφαρμόζεται ροπή πλαστικοποίησης  $M_{pl,RD} = 29,0 \text{ kNm}$  και διατμητική αντοχή  $V_{Rd}=289\text{kN}$ .

Η αριθμητική αλληλεπίδραση των δομικών στοιχείων των μικροπασσάλων με το περιβάλλον έδαφος, γίνεται με τη θεώρηση διεπιφάνειας επαφής οριζόμενης δυσκαμψίας και αντοχής μετωπικά και διατμητικά. Η προσομοίωση της διεπιφάνειας πραγματοποιείται με την εφαρμογή γραμμικών ελατηρίων και στις δύο διευθύνσεις κίνησης, καθοριζόμενης ενδοσιμότητας και αντοχής (Itasca, 2005). Για τις δεδομένες εδαφικές στρώσεις εφαρμόστηκαν οι ακόλουθες μέσες τιμές αντοχής και δυσκαμψίας των ελατηρίων :

Πίνακας 2 :Παράμετροι Διεπιφανειών  
Table 2 :Interface Properties

Τύπος Εδάφους	$k_n$	$\phi_n$	$c_n$	$k_s$	$\phi_s$	$c_s$
SM1	21,4	86	0	5,5	25	6
SM2	127,0	89	0	9,0	32	6
SI-w	17200	89	2680	27,6	35	138
CL1	11,9	0	356	11,1	0	55

$k_n$  : Πλευρικό Ελατήριο ( $\text{MN/m}^3$ )  
 $\phi_n, c_n$  : Παράμετροι περιβάλλουσας πλευρικής αντοχής (deg, kPa)  
 $k_s$  : Διατμητικό Ελατήριο ( $\text{MN/m}^3$ )  
 $\phi_s, c_s$  : Παράμετροι περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής (deg, kPa)

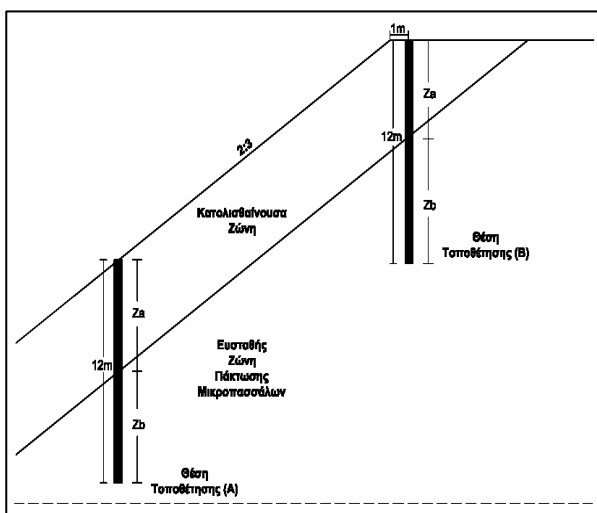
Η αριθμητική προσομοίωση της ολίσθησης πραγματοποιείται με ενεργοποίηση της ασταθούς ζώνης υπό την επίδραση της βαρύτητας. Με τον τρόπο αυτό θεωρείται ότι επιτυγχάνεται η ρεαλιστικότερη προσομοίωση του μηχανισμού αστοχίας, και η αναμενόμενη απόκριση του συστήματος αντιστήριξης για την ανάσχεση της κατολίσθησης.

Εφαρμόσθηκαν τέσσερις συνδυασμοί εδαφικών στρωμάτων, σε συνδυασμό και την θεωρούμενη θέση τοποθέτησης των μικροπασσάλων είτε (A), είτε (B).  
Τοποθέτηση μικροπασσάλων στο πρηνές (A):

- Συνδυασμός A.1 (SM1-SM2)

Τοποθέτηση μικροπασσάλων στη στέψη (B):

- Συνδυασμός B.1 (SM1-SM2),
- Συνδυασμός B.2 (SM1-SI-w)
- Συνδυασμός B.3 (SM1-CL1).



Σχήμα 1 : Γεωμετρία Συστήματος  
Figure 1 : System Geometry

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε αρχική διερεύνηση του μοντέλου για το συνδυασμό A.1 (Περίπτωση A), με εναλλακτική τοποθέτηση της ζώνης ολίσθησης  $z_A$  σε διάφορα βάθη των 4,0m, 6,0m, 8,0m και 10,0m. Λαμβάνονται για κάθε βάθος τα διαγράμματα των ροπών και των τεμνουσών δυνάμεων του στοιχείου, των εδαφικών πιέσεων και η ελαστική γραμμή. Το μήκος αναφοράς  $L_o$  στην ολισθαίνουσα και στη σταθερή ζώνη έχει τιμή  $L_{oa}=4,2m$  και  $L_{os}=3,9m$  αντίστοιχα (French Project Clouterre, 1991).  
Πιο συγκεκριμένα:

- Ζώνη ολίσθησης  $z_A=4m$  ( $z_A/L=0,33$ )  
Σχήμα 2(α)  
«Επιφανειακή εδαφική ροή»

Η μέγιστη διατμητική δύναμη αναπτύσσεται στη στάθμη της επιφάνειας ολίσθησης και η μέγιστη ροπή (ροπή πλαστικοποίησης)

ελαφρώς πιο βαθιά και σε παραμόρφωση της τάξης των 10,5cm. Η συμπεριφορά του μικροπασσάλου στην ολισθαίνουσα ζώνη χαρακτηρίζεται ως δύσκαμπτη, δεδομένου ότι το βάθος  $z_A=4m$  της ζώνης ολίσθησης, είναι περίπου ίσο με την παράμετρο  $L_{oa}=4,2m$ . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και με τη μορφή της ελαστικής γραμμής, η οποία είναι ευθύγραμμη δίχως να στρέφει τα κοίλα προς τα άνω.

Όσο αφορά τη συμπεριφορά στο τμήμα της ευσταθούς εδαφικής ζώνης, αυτή χαρακτηρίζεται ως εύκαμπτη, εφόσον το μήκος του στοιχείου  $z_b=8,0m$  στη συγκεκριμένη περιοχή, είναι αρκετά μεγαλύτερο από την παράμετρο  $L_{os}=3,9m$ .

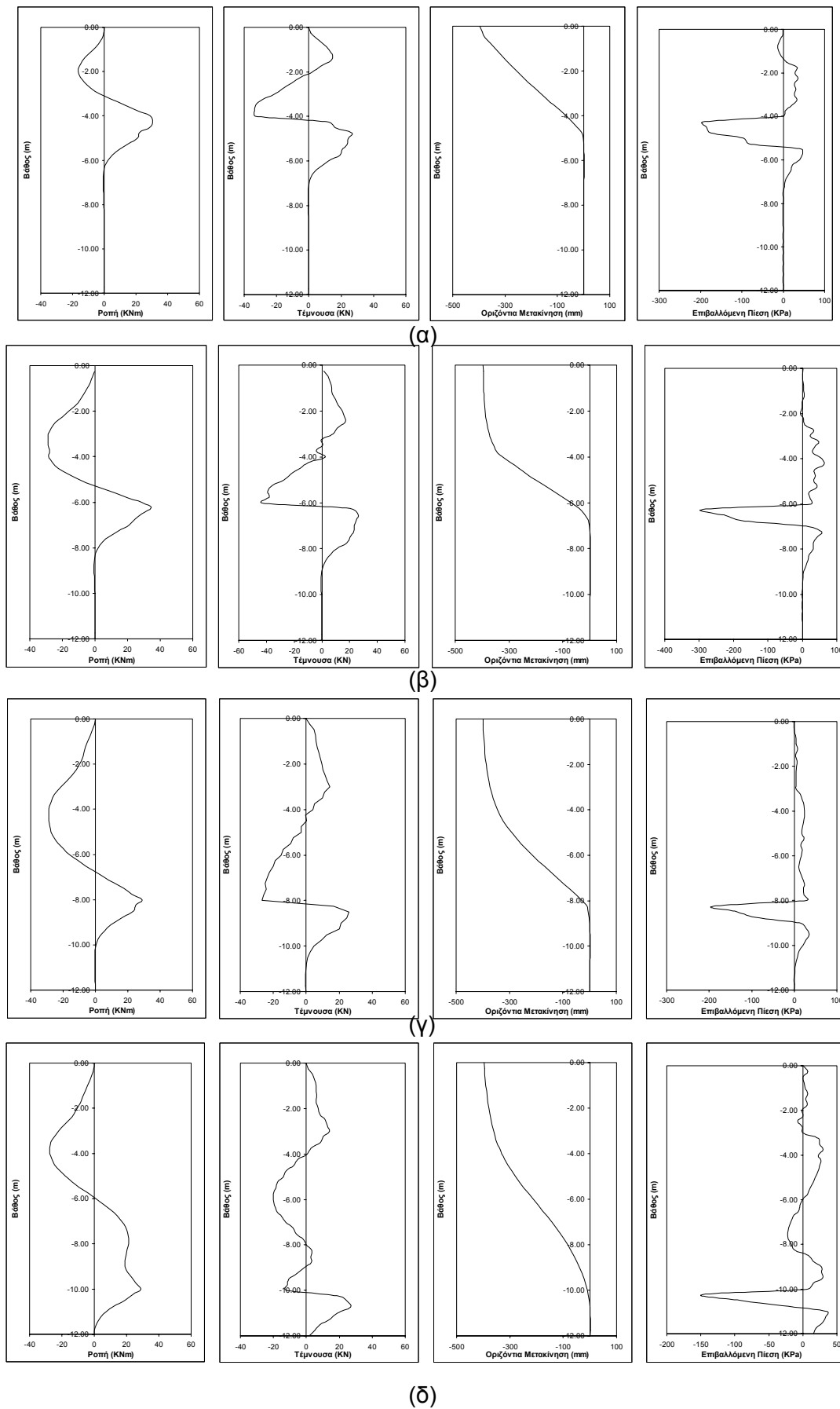
Το μήκος  $L_A$  με το οποίο ο μικροπασσάλος φαίνεται να αντιδρά στην παραμόρφωση προκύπτει από το διάγραμμα των πλευρικών επιβαλλόμενων πιέσεων, εντοπίζεται στην άμεση περιοχή της ζώνης ολίσθησης από βάθος 4,0 έως 5,6m ( $L_A \approx 1,6m$ ) και αντιστοιχεί στο τμήμα μεταξύ των δύο μέγιστων τιμών της τέμνουσας κάτω από τη ζώνη ολίσθησης.

Λόγω της δύσκαμπτης συμπεριφοράς του μικροπασσάλου εντός της ολισθαίνουσας ζώνης και μετά από μεγάλες μετακινήσεις, εξαντλείται η πλευρική αντοχή  $P_{ult}$  του εδάφους τόσο σε ένα μέρος του τμήματος του μήκους αντίδρασης  $L_A$ , όσο και σε ολόκληρο σχεδόν το τμήμα του στοιχείου εντός της ολισθαίνουσας ζώνης. Η εδαφική μετακίνηση προκαλεί διαρροή του εδάφους η οποία εξαντλείται είτε περιμετρικά του στοιχείου, είτε ανάμεσα από τα στοιχεία (Guo, 2005 & Poulos, 1999).

- Ζώνη ολίσθησης  $z_A=6-8m$  ( $z_A/L=0,50$  &  $0,67$ )  
Σχήματα 2(β) και 2(γ)  
«Συνολική Εύκαμπτη συμπεριφορά του στοιχείου»

Η μέγιστη διατμητική δύναμη παρουσιάζεται στη στάθμη της επιφάνειας ολίσθησης και η μέγιστη ροπή (ροπή πλαστικοποίησης) ελαφρώς πιο βαθιά, σε μετακίνηση της τάξης των 8,5cm για την ολίσθηση στα  $z_A=6m$  και των 10cm για την ολίσθηση στα  $z_A=8m$ .

Η συμπεριφορά του μικροπασσάλου τόσο στην ολισθαίνουσα ζώνη, όσο και στη ευσταθή χαρακτηρίζεται ως εύκαμπτη, δεδομένου ότι το βάθος της ζώνης ολίσθησης  $z_A=6,0m$  &  $8,0m$  και το μήκος  $z_b=6m$  &  $4m$ , είναι μεγαλύτερο από την παράμετρο  $z_A > L_{oa}=4,2m$  και  $z_b > L_{os}=3,9m$  αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και με τη μορφή της ελαστικής



Σχήμα 2 : Διαγράμματα Εντατικών Μεγεθών Συνδυασμού A.1  
 Figure 2 : Mobilized Structural Diagrams of Case A.1

γραμμής, η οποία και στις δύο περιπτώσεις ( $z_A=6\text{m}$  &  $8\text{m}$ ) στρέφει τα κοίλα προς τα άνω.

Το μήκος  $L_A$  με το οποίο ο μικροπασσάλος φαίνεται να αντιδρά στην μετακίνηση προκύπτει από το διάγραμμα των πλευρικών επιβαλλόμενων πιέσεων, εντοπίζεται στην άμεση περιοχή της ζώνης ολίσθησης σε βάθη  $6,0$  έως  $7,3\text{m}$  ( $L_A \approx 1,3\text{m}$ ) και σε βάθη  $8,0$  έως  $9,1\text{m}$  ( $L_A \approx 1,1\text{m}$ ) και αντιστοιχεί στο τμήμα μεταξύ των δύο μέγιστων τιμών της τέμνουσας κάτω από τη ζώνη ολίσθησης.

Η εύκαμπτη συμπεριφορά του μικροπασσάλου τόσο στο τμήμα της ολισθαίνουσας ζώνης, όσο και της ευσταθούς ζώνης, ενεργοποιεί τη μέγιστη πλευρικά επιβαλλόμενη πίεση σε τμήμα του μικροπασσάλου άνω και κάτω της ζώνης ολίσθησης.

- Ζώνη ολίσθησης  $z_A=10,0\text{m}$  ( $z_A/L=0,83$ )  
Σχήμα 2(δ)  
«Μηχανισμός κοντού στοιχείου»

Η μέγιστη διατμητική δύναμη αναπτύσσεται στη στάθμη της επιφάνειας ολίσθησης και η μέγιστη ροπή (ροπή πλαστικοποίησης) ελαφρώς πιο πάνω σε μετακίνηση της τάξης των  $32\text{cm}$ .

Η συμπεριφορά του μικροπασσάλου στην ολισθαίνουσα ζώνη χαρακτηρίζεται ως εύκαμπτη, δεδομένου ότι το βάθος  $z_A=10,0\text{m}$  είναι μεγαλύτερο από την παράμετρο  $L_{os}=4,2\text{m}$ . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και με τη μορφή της ελαστικής γραμμής, η οποία στρέφει τα κοίλα προς τα άνω.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά στο τμήμα της ευσταθούς εδαφικής ζώνης χαρακτηρίζεται ως δύσκαμπτη, εφόσον το μήκος του στοιχείου  $z_b=2,0\text{m}$  στη συγκεκριμένη περιοχή είναι αρκετά μικρότερο από την παράμετρο  $L_{os}=3,9\text{m}$ .

Το μήκος  $L_A$  με το οποίο ο μικροπασσάλος φαίνεται να αντιδρά στην παραμόρφωση προκύπτει από το διάγραμμα των πλευρικών επιβαλλόμενων πιέσεων, εντοπίζεται στην άμεση περιοχή της ζώνης ολίσθησης από βάθος  $10,0 \div 11,0\text{m}$  ( $L_A \approx 1,0\text{m}$ ) και αντιστοιχεί στο τμήμα μεταξύ των δύο μέγιστων τιμών της τέμνουσας κάτω από τη ζώνη ολίσθησης.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας περιλαμβάνει συνδυασμό ενεργοποίησης της μέγιστης πλευρικής αντοχής και εξόλκευση του στοιχείου στο τμήμα  $z_b$ .

Η μέγιστη διατμητική δύναμη η οποία προκύπτει από κάθε διάγραμμα τέμνουσών

δυνάμεων, είναι η συνισταμένη των δυνάμεων με την οποία το στοιχείο του μικροπασσάλου αντιστέκεται στην ολίσθηση. Η συγκεκριμένη δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε αντίστοιχες αναλύσεις ευστάθειας για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας ενός οπλισμένου πρανούς.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το διάγραμμα της προοδευτικής ανάπτυξης της διατμητικής δύναμης συναρτήσει της μετακίνησης της κεφαλής του μικροπασσάλου για την περίπτωση του συνδυασμού A.1 που αναπτύχθηκε παραπάνω.

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνεται ότι για μικρές τιμές μετακίνησης κεφαλής οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $2,0$  έως  $2,5\text{cm}$ , αναπτύσσονται μικρές διατμητικές δυνάμεις της τάξης των  $10-15\text{kN}$ , για όλα τα αντίστοιχα βάθη ( $z_A/L$ ) της ζώνης ολίσθησης.

Για τιμές μετακίνησης κεφαλής που υπερβαίνουν τα  $5,0$  έως  $10,0\text{cm}$  παρατηρείται διαφορετική εξέλιξη των αναπτυσσόμενων διατμητικών δυνάμεων σε κάθε αντίστοιχο βάθος της ζώνης ολίσθησης. Για  $z_A/L=0,50$  («συνολικά εύκαμπτο στοιχείο») παρατηρείται η μεγαλύτερη ανάπτυξη διατμητικής δύναμης της τάξης των  $40\text{kN}$ , ακολουθεί η περίπτωση  $z_A/L=0,33$  («Επιφανειακή εδαφική ροή») όπου οι διατμητικές δυνάμεις κυμαίνονται μεταξύ  $30$  έως  $35\text{kN}$  και τέλος οι περιπτώσεις  $z_A/L=0,67$  &  $z_A/L=0,83$  («συνολικά εύκαμπτο στοιχείο» & «κοντό στοιχείο» αντίστοιχα) όπου αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις της τάξης των  $25\text{kN}$ .

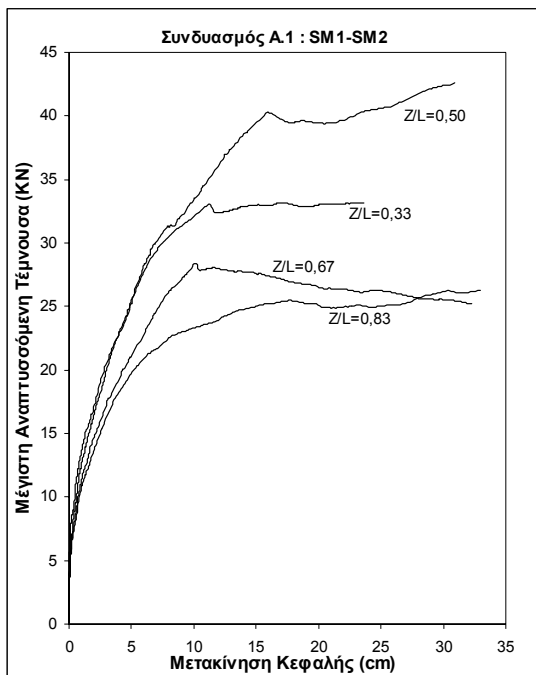
Τα διαγράμματα τέμνουσών δυνάμεων λαμβάνονται αντίστοιχα και για τους συνδυασμούς B.1, B.2 και B.3 (βλ. παρ. 3).

Για την περίπτωση B.2 Σχήμα 4 παρατηρείται ότι για τιμές μετακίνησης κεφαλής οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $3,0-5,0\text{cm}$ , αναπτύσσονται αξιοσημείωτες διατμητικές δυνάμεις της τάξης των  $75-85\text{kN}$ , για όλα τα αντίστοιχα βάθη ( $z_A/L=0,50/0,67/0,83$ ) της ζώνης ολίσθησης. Για τιμές μετακίνησης κεφαλής που υπερβαίνουν τα  $10,0\text{cm}$  παρατηρείται σημαντική αύξηση των διατμητικών δυνάμεων για του λόγους  $z_A/L=0,50$  &  $0,67$  και πολύ μικρότερη εξέλιξη για τον λόγο  $z_A/L=0,83$  («κοντό στοιχείο»).

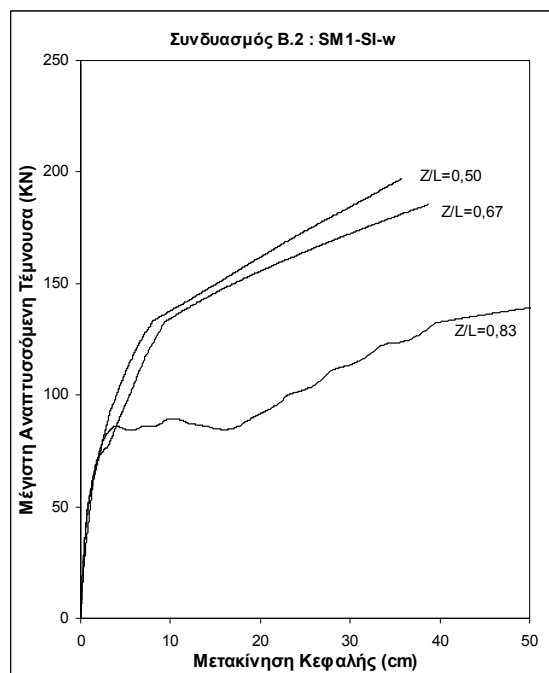
Για την περίπτωση B.1 Σχήμα 5 παρατηρείται ότι για τιμές μετακίνησης κεφαλής οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $3,0-5,0\text{cm}$ , αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις της τάξης των  $10-15\text{kN}$ , για όλα τα αντίστοιχα βάθη ( $z/L=0,50/0,67/0,83$ ) της ζώνης

ολίσθησης. Για τιμές μετακίνησης κεφαλής που υπερβαίνουν τα 10,0cm παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση των διατμητικών δυνάμεων με χαμηλότερη εξέλιξη για τον λόγο  $z/L=0,83$  και μεγαλύτερη για τον λόγο  $z/L=0,50$ .

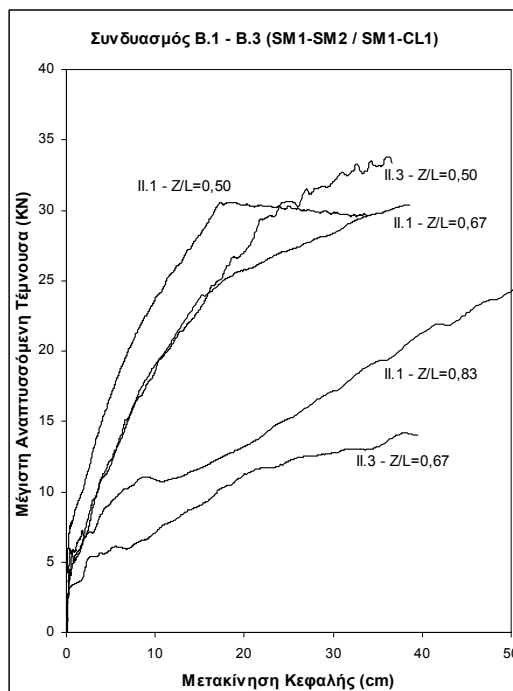
Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και για την περίπτωση B.3 Σχήμα 5, με πολύ μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των λόγων  $z/L=0,50$  και  $z/L=0,67$ .



Σχήμα 3 : Συνδυασμός A.1  
Figure 3 : Case A.1



Σχήμα 4 : Συνδυασμός B.2  
Figure 4 : Case B.2



Σχήμα 5 : Συνδυασμός B.1 και B.3  
Figure 5 : Casew B.1 and B.3

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων επαληθεύεται ότι τα συγκεκριμένα εύκαμπτα στοιχεία μικροπασσάλων αναπτύσσουν πλευρικές δυνάμεις αντίστασης που προέρχονται από ένα μικρό τμήμα του συνολικού τους μήκους, το οποίο βρίσκεται στην άμεση περιοχή της θεωρηθείσας ζώνης ολίσθησης.

Η θέση της ζώνης ολίσθησης ως προς το συνολικό μήκος του μικροπασσάλου, σε συνδυασμό με τη σχετική δυσκαμψία του στοιχείου, καθορίζει τον ακριβή μηχανισμό αστοχίας.

Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές δυνάμεις αντίστασης των μικροπασσάλων είναι σε πλήρη συσχέτιση με την μετακίνηση του εδάφους για δεδομένη στρωματογραφία.

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας προκύπτει ότι για τα συνήθη επίπεδα ανεκτών μετακινήσεων, η αναπτυσσόμενη δύναμη αντίδρασης του μικροπασσάλου είναι αρκετά μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του στοιχείου. Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται εντονότερη όσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υποκείμενης ευσταθούς ζώνης απομειώνονται.

Η ροπή πλαστικοποίησης του δομικού στοιχείου αναπτύσσεται σε γενικά σημαντικές μετακινήσεις, πέραν των οποίων η δύναμη αντίδρασης του μικροπασσάλου συνεχίζει να

αυξάνει με μικρότερο όμως ρυθμό, μέχρι το όριο πλαστικοποίησης του εδάφους.

Γενικώς σε εδάφη με χαμηλά μηχανικά χαρακτηριστικά και για ανεκτές μετακινήσεις που κυμαίνονται μεταξύ 3,0÷7,0cm υπολογίζονται ιδιαίτερα περιορισμένες τιμές δυνάμεων αντίδρασης, της τάξης του 20% της διαθέσιμης δομικής αντοχής του στοιχείου. Αντίθετα σε εδάφη υψηλής αντοχής (ημιβραχώδη & βραχώδη) η παραπάνω τιμές δυνάμεων αντίδρασης ανέρχονται στο 60÷70% της διαθέσιμης δομικής αντοχής του στοιχείου για ανάλογες μετακινήσεις.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι ο σχεδιασμός συστήματος στοιχισμένων σε σειρά κατακόρυφων μικροπασσάλων με αξονικές αποστάσεις ανά 1m, σε χαμηλής αντοχής εδάφη, παρουσιάζει μικρή συνεισφορά στην αντιμετώπιση της ολίσθησης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται εναλλακτικός σχεδιασμός προσανατολισμένος είτε στη δημιουργία πυκνά οπλισμένης εδαφικής ζώνης ή στη διαφοροποίηση των κλίσεων της συστοιχίας των μικροπασσάλων για την εκμετάλλευση της αξονικής λειτουργίας των στοιχείων (F.H.W.A., 2000).

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cai F. and Keizo U. (2003), "Response of flexible piles under laterally linear movements of the sliding layer in landslides". Canadian Geotechnique, J. 40, pp. 46-53.
- F.H.W.A, SA-97-070, (2000), "Micropile design and construction guidelines". U.S. Department of Transportation.
- French National Project Clouterre. (1991), F.H.W.A.-SA-93-026.
- Guo W. D. (2005), "A simplified approach for piles due to soil movements". Free on Internet site, Griffith University Australia.
- Itasca Consulting Group, (2005), "F.L.A.C Version 5".
- Knochenmus G. , Bretelle S. , Schlosser F. (1997), "TALREN Stability analysis program for the design of complex reinforced structures". Important Case Histories, Ground improvement geosystems, Thomas Telford, London, p. 390-397.
- Poulos H.G. (1999), "Design of slope stabilizing Piles". Research report No R784, University of Sydney.