

Εσωτερικές μορφές αστοχίας διατάξεων αντιστηρίξεων με εδαφοηλώσεις

Internal failure modes of soil nailing walls

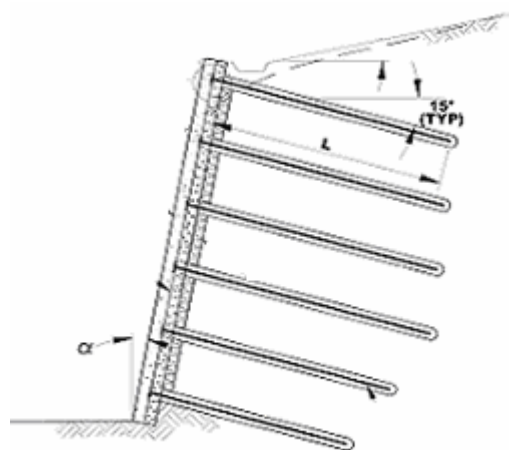
ΚΑΡΑΜΠΑΤΑΚΗΣ Δ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.
ΤΖΑΡΟΣ Χ. Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται οι βασικές εσωτερικές μορφές αστοχίας που είναι δυνατόν να εμφανισθούν τόσο κατά τη διάρκεια της κατασκευής όσο και κατά τη λειτουργία διατάξεων αντιστηρίξεων με εδαφοηλώσεις και ειδικότερα σε πρηνή με ιδιαίτερα απότομο έως κατακόρυφο μέτωπο. Συγκεκριμένα, αναλύονται η αστοχία λόγω εξόλκευσης της ήλωσης καθώς και η αστοχία λόγω θραύσης του ήλου λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή των τάσεων συνάφειας και την κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του ήλου. Τέλος, προτείνεται η εφαρμογή συγκεκριμένων αναλυτικών σχέσεων με σκοπό τον ολοκληρωμένο και συστηματικό έλεγχο των ως άνω μορφών αστοχίας.

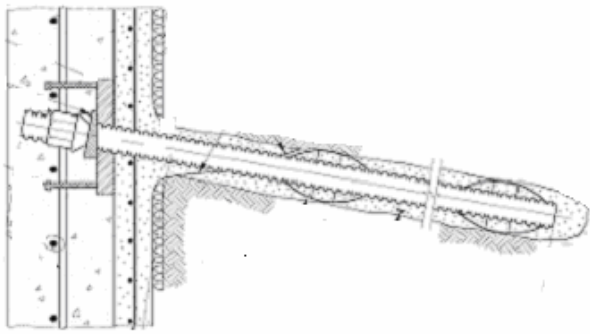
ABSTRACT : In the present paper the basic internal failure modes of soil nailing walls that may be revealed during the construction or at long term conditions are analyzed. More specifically, both the nail pullout failure and the nail tensile failure are developed considering the soil nail interaction, the distribution of the tensile forces and the bond shear stresses along the nail. Finally, the use of specific analytical relations is proposed in order to achieve a total and systematic checking of the aforementioned failure modes.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως εδαφοήλωση είναι δυνατόν να θεωρηθεί η εισαγωγή χαλύβδινων, κατά κανόνα, ράβδων μήκους μεγαλύτερου του 1.5m εντός του εδάφους, με σκοπό την ανάληψη εφελκυστικών και διατμητικών δυνάμεων καθώς και καμπτικών ροπών. Οι χαλύβδινες ράβδοι εισάγονται στο έδαφος είτε με αυτοδιάτρηση (shelf drilling), είτε σε ήδη υπάρχον διάτρημα. Η ράβδος πακτώνεται καθ' όλο το μήκος της (με την προσθήκη τσιμεντενέματος) και μεταφέρει εφελκυστικά φορτία στο έδαφος μέσω των δυνάμεων συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ της πάκτωσης και του εδάφους. Βάσει των παραπάνω οι ηλώσεις είναι δυνατόν να χαρακτηρισθούν και ως παθητικά αγκύρια συνεχούς πρόσφυσης (Σχήματα 1 και 2).



Σχήμα 1. Τυπική αντιστήριξη σε έδαφος ενισχυμένο με ηλώσεις
Figure 1. Typical cross section of soil nail wall.



Σχήμα 2. Λεπτομέρεια σχήματος 1
Figure 2. Detail of figure 1.

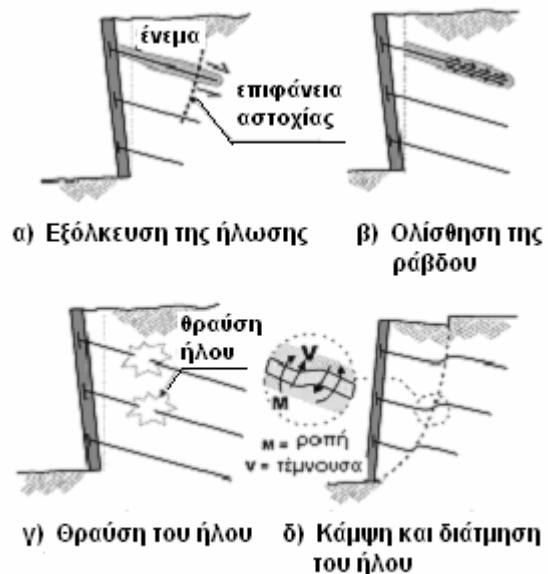
2. ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ως εσωτερικές μορφές αστοχίας αναφέρονται οι αστοχίες που είναι πιθανόν να συμβούν στη ζώνη μεταξύ εδάφους, ήλου και ενέματος. Η πραγματοποίηση αστοχιών αυτής της μορφής προϋποθέτει προφανώς την εκ των προτέρων ενεργοποίηση της ήλωσης, ως μέσου παραλαβής των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων.

Αναλόγως της εφελκυστικής αντοχής και του μήκους του ήλου καθώς και των αναπτυσσόμενων δυνάμεων συνάφειας μεταξύ εδάφους - ενέματος και ενέματος-ήλου, είναι δυνατόν να εμφανισθούν οι ακόλουθες μορφές εσωτερικής αστοχίας (Σχήμα 3):

- α) εξόλκευση ήλωσης, λόγω ανεπαρκούς συνάφειας μεταξύ εδάφους και ήλωσης ή λόγω μικρότερου μήκους ήλου από το απαιτούμενο,
- β) ολίσθηση της ράβδου, η οποία οφείλεται στην ανεπαρκή συνάφεια μεταξύ ράβδου καιτσιμεντέματος. Η πιθανότητα να αστοχήσει η ήλωση λόγω ολίσθησης της ράβδου κατά μήκος της ενεματωμένης οπής αυξάνεται σημαντικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται λείες ράβδοι, αντί ράβδων με νευρώσεις οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή στην ολίσθηση. Επισημαίνεται πως οι τάσεις συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ ράβδων χάλυβα καιτσιμεντέματος οφείλονται σε τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς ήτοι στη φυσικοχημική συνάφεια (πρόσφυση), στη συνάφεια λόγω τριβής και στη μηχανική συνάφεια. Σημαντική αύξηση της συνάφειας επιτυγχάνεται όταν αναπτύσσεται ο τρίτος από τους ανωτέρω μηχανισμούς συνάφειας, η ανάπτυξη του οποίου προϋποθέτει τη χρήση αποκλειστικά ράβδων με νευρώσεις,

- γ) θραύση του ήλου, λόγω μειωμένης εφελκυστικής αντοχής του και
- δ) κάμψη και διάτμηση του ήλου. Ειδικότερα, αναφέρεται πως στις περιπτώσεις χρήσης εδαφοηλώσεων σε κατασκευές αντιστήριξης πρανών με ιδιαίτερα απότομο έως κατακόρυφο μέτωπο, οι ήλοι παραλαμβάνουν κυρίως εφελκυστικές δυνάμεις. Εντούτοις, κατά την εμφάνιση σχετικά σημαντικών μετακινήσεων ενεργοποιείται η καμπτική και η διατμητική τους αντοχή, χωρίς ωστόσο το γεγονός αυτό να συνεισφέρει σημαντικά στη συνολική ευστάθεια του συστήματος (λιγότερο από 10%). Γι' αυτό το λόγο στο σχεδιασμό έργων αντιστήριξης με τη χρήση εδαφοηλώσεων συνήθως θεωρείται αμελητέα η διατμητική και καμπτική αντοχή των ήλων με αποτέλεσμα αστοχία τέτοιας μορφής να μην αναμένεται στις περισσότερες των περιπτώσεων. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις σταθεροποίησης πρανών οι ήλοι παραλαμβάνουν κυρίως δυνάμεις διάτμησης και καμπτικές ροπές.

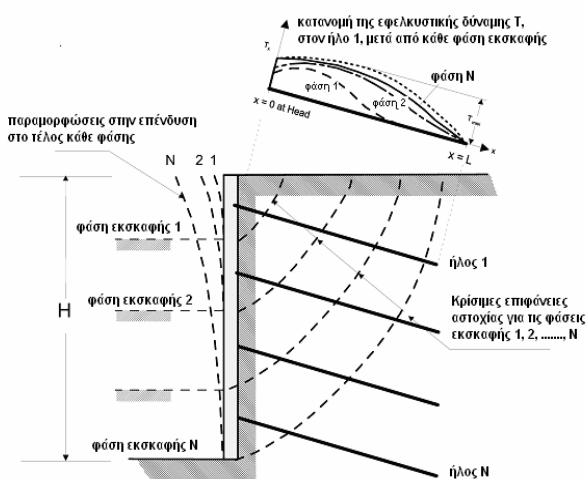


Σχήμα 3. Εσωτερικές μορφές αστοχίας
Figure 3. Internal failure modes.

3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΗΛΟΥΣ

Πριν από τη θεωρητική ανάλυση του προβλήματος κρίνεται σκόπιμη η συνοπτική αναφορά στο μηχανισμό μεταφοράς του φορτίου στους ήλους, κατά τη διάρκεια των επιμέρους σταδίων κατασκευής του έργου.

Συγκεκριμένα κατά την αρχική φάση της τμηματικής εκσκαφής και πριν την εγκατάσταση της πρώτης σειράς των ήλων, οι μετακινήσεις του εδάφους θεωρούνται αμελητέες λόγω κινητοποίησης της διατμητικής αντοχής του εδάφους κατά μήκος της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας (συνήθως υπό τη μορφή κύκλου ολίσθησης). Κατόπιν της εγκατάστασης της πρώτης σειράς των ήλων, λόγω προκαλούμενων μετακινήσεων στο εκσκαφθέν τμήμα, παράγεται ένταση στη συγκεκριμένη περιοχή, η οποία μέσω των δυνάμεων συνάφειας μεταξύ ήλων και εδάφους παραλαμβάνεται από τον ήλο



Σχήμα 4. Πιθανές επιφάνειες αστοχίας και κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων
Figure 4. Potential failure surfaces and distribution of the tensile forces.

υπό μορφή αξονικής εφελκυστικής δύναμης (Σχήμα 4). Καθώς η εκσκαφή συνεχίζεται στα επόμενα στάδια, πρόσθετες μετακινήσεις δημιουργούν επιπλέον ένταση η οποία παραλαμβάνεται από το σύνολο των προηγούμενων ήλων. Συνεπώς, όταν η κρίσιμη επιφάνεια αστοχίας αναμένεται να εμφανισθεί σε σημαντικό βάθος από τη στέψη του έργου, η επιρροή των ανωτέρων στρώσεων ήλων στη σταθεροποίηση του μετώπου μειώνεται. Σ' αυτές τις περιπτώσεις οι συγκεκριμένες στρώσεις ήλων συνεισφέρουν στη σταθεροποίηση ενδιάμεσων σταδίων εκσκαφής ενώ παράλληλα βοηθούν και στη μείωση των προκαλούμενων μετακινήσεων.

4. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΗΛΩΣΗΣ

Η αντοχή εξόλκευσης μίας εδαφοήλωσης ανά μονάδα μήκους δίδεται από την Εξίσωση 1:

$$Q = \pi \cdot q \cdot D_{DH} \quad (1)$$

όπου q είναι η τάση συνάφειας στη διεπιφάνεια εδάφους - ήλωσης και D_{DH} η ενεργός διάμετρος του διατρήματος.

Αν θεωρηθεί ότι ασκείται αξονική εφελκυστική δύναμη T_o στο ένα άκρο ενός μεμονωμένου ήλου (Σχήμα 5), τότε η τάση συνάφειας q σχετίζεται με τη δύναμη T_o βάσει της Εξίσωσης 2 (σε ένα στοιχειώδη τμήμα του ήλου dx):

$$dT = \pi \cdot D_{DH} \cdot q \cdot dx = Q \cdot dx \quad (2)$$

Η παραπάνω Εξίσωση 2 ουσιαστικά απαικονίζει τη διαδικασία ανάληψης εφελκυστικών δυνάμεων από τους ήλους μέσω των αναπτυσσόμενων τάσεων συνάφειας στη διεπιφάνεια εδάφους-ήλωσης. Στη γενικότερη περίπτωση ενός ήλου μήκους x θα εφαρμόζεται η Εξίσωση 3:

$$T(x) = \int_0^x \pi D_{DH} q dx = \int_0^x Q dx \quad (3)$$

Η κατανομή των τάσεων συνάφειας q καθώς και της εφελκυστικής δύναμης $T(x)$ κατά μήκος του ήλου όπως διακρίνεται και στο Σχήμα 5 δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως είναι το μήκος του ήλου, το μέγεθος της εφαρμοζόμενης δύναμης T_o , τα χαρακτηριστικά του τσιμεντεμάτος και τις επικρατούσες εδαφικές συνθήκες. Κατά τους υπολογισμούς για λόγους απλοποίησης υιοθετείται σταθερή κατανομή των τάσεων συνάφειας, συνεπώς βάσει της Εξίσωσης 1 και η αντοχή εξόλκευσης Q είναι σταθερή, οπότε από την ολοκλήρωση της Εξίσωσης 3 προκύπτει :

$$T(L_p) = T_o = Q \cdot L_p \quad (4)$$

όπου L_p είναι το μήκος πρόσφυσης του ήλου στο έδαφος.

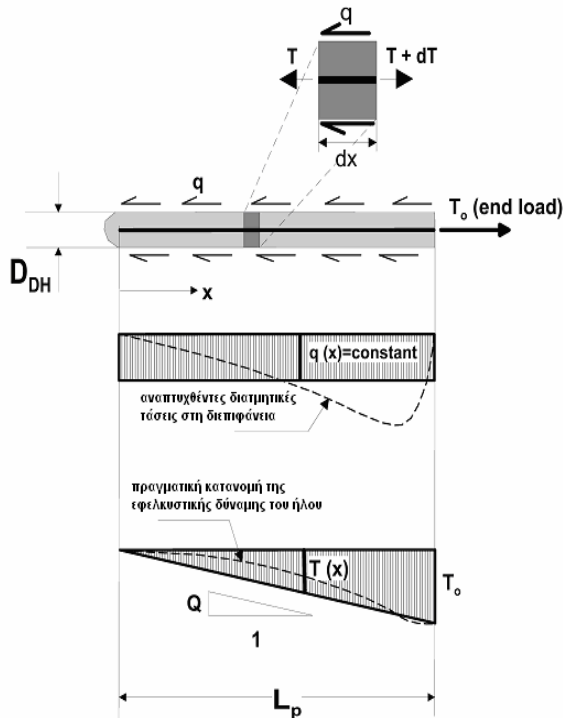
Η οριακή αντοχή εξόλκευσης R_p κινητοποιείται όταν επιτευχθεί η οριακή τάση συνάφειας q_u και ισούται με :

$$R_p = T_{\max} = Q_u \cdot L_p \quad (5)$$

όπου $Q_u = \pi \cdot q_u \cdot D_{DH}$ είναι η οριακή αντοχή εξόλκευσης ανά μονάδα μήκους και q_u η οριακή

τάση συνάφειας στη διεπιφάνεια εδάφους - ήλωσης.

Η τάση συνάφειας q_u υπολογίζεται συνήθως βάσει ενός αριθμού (εξαρτάται από το εμβαδό της επιφάνειας του πρηνούς που πρόκειται να οπλιστεί) δοκιμαστικών εξολκεύσεων.



Σχήμα 5. Μηχανισμός μεταφοράς τάσεων σε μεμονωμένο ήλο
Figure 5. Transfer mode of stresses in a single nail.

Επίσης η ανωτέρω τιμή είναι δυνατό να εκτιμηθεί και μέσω τυπικών τιμών που προτείνονται σε βιβλιογραφικές αναφορές. Τονίζεται ότι σε περίπτωση εκτίμησης της οριακής τάσης συνάφειας μέσω αριθμητικών αναλύσεων, απαιτείται να αποδοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην εισαγωγή τόσο των γεωμετρικών όσο και των εδαφικών δεδομένων των στοιχείων διεπιφάνειας, έτσι ώστε να αποφευχθούν προβλήματα αριθμητικής αστάθειας και ταυτόχρονα να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων (Karabatakis D. et al, 2002).

Σε κάθε περίπτωση, όμως, λόγω των αβεβαιοτήτων που εισάγει η εξάρτηση της συνάφειας με σημαντικό αριθμό διαφόρων παραγόντων (εδαφικές συνθήκες, είδος ράβδου, μέθοδος διάτρησης οπών, τύπος και μέθοδος εισπίεσης ενέματος, μέγεθος ενεματωμένης ζώνης κ.λπ.) απαιτείται η αποδοχή ενός συντελεστή ασφαλείας μεταξύ 1.50 και 2.00 στον έλεγχο έναντι εξόλκευσης. Συνεπώς, ο έλεγχος

αντοχής της ήλωσης σε εξόλκευση απαιτεί την εφαρμογή του εξής κριτηρίου:

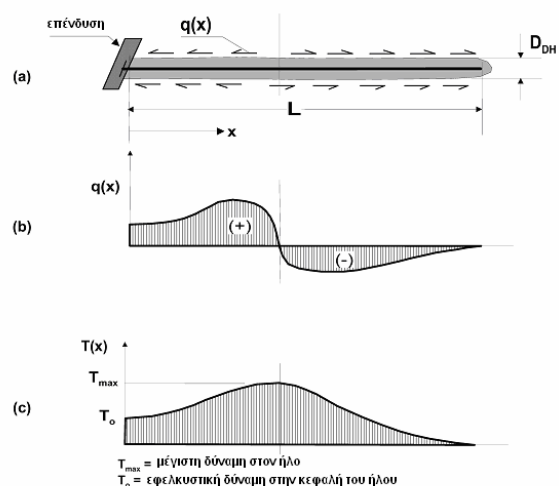
$$T_{\max} \leq \frac{R_p}{FS_p} \quad (6)$$

όπου FS_p είναι ο μερικός συντελεστής ασφαλείας έναντι εξόλκευσης της ήλωσης.

5. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ - ΗΛΩΣΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ

5.1 Θεωρητικό μοντέλο

Η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και ήλωσης κρίνεται ως μία ιδιαίτερως σύνθετη διαδικασία. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, οι ήλοι παραλαμβάνουν φορτία κατόπιν προκαλούμενων μετακινήσεων κατά τη φάση της εκσκαφής.

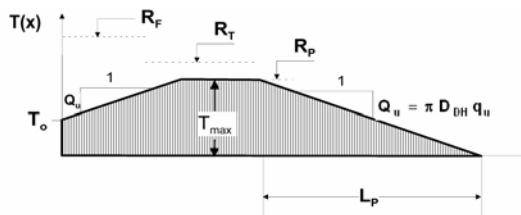


Σχήμα 6. Μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων σε μεμονωμένο ήλο
Figure 6. Transfer mode of forces in a single nail.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6, η κατανομή της εφελκυστικής δύναμης κατά μήκος του ήλου δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται ξεκινώντας αρχικά από τη μηδενική τιμή στο πέρας του ήλου, αυξάνεται έως τη μέγιστη τιμή της στην ενδιάμεση περιοχή του μήκους (όχι απαραίτητα στο σημείο τομής με την επιφάνεια ολίσθησης) και εν συνεχεία μειώνεται έως μία τιμή T_0 στην κεφαλή του ήλου. Ομοίως και η κατανομή των δυνάμεων συνάφειας δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται μεταξύ αρνητικών και θετικών τιμών.

5.2 Απλοποιημένη κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων

Κατά το σχεδιασμό και για λόγους απλότητας, είναι δυνατόν να θεωρηθεί η κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος του ήλου που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7. Διαπιστώνεται ότι συγκρινόμενη η εν λόγω κατανομή με την αντίστοιχη του Σχήματος 6 δε διαφέρει σημαντικά και ως εκ τούτου δεν επηρεάζει αισθητά και τον τελικό σχεδιασμό του έργου.



R_T , αντοχή έναντι θραύσης

R_F , αντοχή επένδυσης

R_P , αντοχή εξόλκευσης

$Q_u = \pi \cdot q_u \cdot D_{DH}$, οριακή αντοχή εξόλκευσης ανά μονάδα μήκους,

q_u , οριακή τάση συνάφειας και

$T_0 = 0.60 - 1.00 T_{max}$.

Σχήμα 7. Απλοποιημένη κατανομή εφελκυστικών δυνάμεων ήλου

Figure 7. Simplified distribution of nail tensile forces.

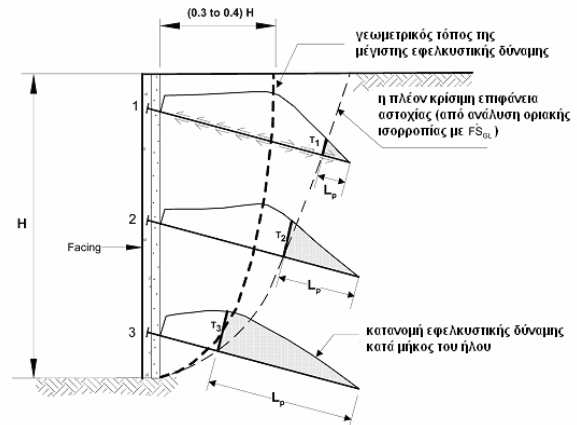
Η τιμή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης T_{max} εξαρτάται από την αντοχή εξόλκευσης R_P όταν $R_P < R_T < R_F$, την αντοχή έναντι θραύσης R_T όταν $R_T < R_P < R_F$ και από την αντοχή της επένδυσης R_F και το λόγο T_0/T_{max} όταν $R_F < R_P < R_T$. Για το βέλτιστο σχεδιασμό θα πρέπει οι τιμές των παραπάνω αντοχών να είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους.

5.3 Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις

Η κατανομή της εφελκυστικής δύναμης κατά μήκος ενός ήλου συναρτάται άμεσα από τη θέση στην οποία τέμνει ο ήλος την επιφάνεια αστοχίας, με αποτέλεσμα τη διαφοροποίησή της σε κάθε στρώση ήλων. Ωστόσο, η μέγιστη τιμή της κατανομής αυτής συνήθως δεν παρουσιάζεται στο σημείο τομής του ήλου με την επιφάνεια αστοχίας αλλά σε σχετικά κοντινή απόσταση από αυτό, καθώς η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας προκύπτει βάσει των συνθηκών οριακής ισορροπίας ενώ η κατανομή της εφελκυστικής δύναμης κατόπιν μελέτης

ενός σύνθετου μηχανισμού μεταφοράς φορτίου.

Οργανομετρήσεις σε συστήματα υποστήριξης ενισχυμένα με εδαφοηλώσεις κατέγραψαν πως οι μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις εμφανίζονται στο άνω τμήμα του συστήματος σε απόσταση $0.30H$ έως $0.40H$ από την επένδυση, ενώ στο κάτω τμήμα αυτού σε απόσταση $0.15H$ έως $0.20H$ από το μέτωπο εκσκαφής.



Σχήμα 8. Θέσεις μέγιστων εφελκυστικών δυνάμεων σε σχέση με την επιφάνεια αστοχίας, (Byrne et al., 1998)

Figure 8. Schematic location of soil nail maximum tensile forces in relation to the failure surface (Byrne et al., 1998).

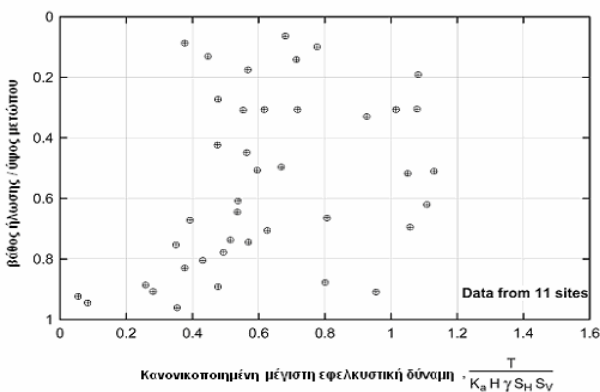
Βάσει του Σχήματος 8 γίνεται αντιληπτό πως κάθε σειρά ήλων δε συνεισφέρει εξίσου στη συνολική ευστάθεια του συστήματος. Συγκεκριμένα, οι ανώτερες στρώσεις ήλων συνεισφέρουν λιγότερο (κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής) σε σχέση με τις κατώτερες, διότι το μήκος τους πέραν της επιφάνειας αστοχίας L_p δεν είναι ικανό να αναπτύξει την μέγιστη αντοχή εξόλκευσης.

Η πλήρης ανάπτυξη της κατανομής των εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος ενός ήλου πραγματοποιείται σταδιακά κατά τη διάρκεια της εκσκαφής του προς υποστήριξη μετώπου. Συνήθως, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που παραλαμβάνει ο ήλος αναπτύσσεται μετά το πέρας δύο διαδοχικών φάσεων εκσκαφής από τη στιγμή εγκατάστασής του. Παρόλα αυτά υπάρχει η πιθανότητα οι εφελκυστικές δυνάμεις που πρέπει να παραλάβουν οι ηλώσεις να αυξηθούν (περίπου κατά 15%, Plumelle et al., 1990) κατά τη φάση λειτουργίας της κατασκευής, λόγω εδαφικού ερπυσμού και αποτόνωσης των τάσεων. Οι δύο αυτές παράμετροι δεν λαμβάνονται άμεσα υπόψη στους υπολογισμούς αλλά έμμεσα μέσω του συντελεστή ασφαλείας.

5.4 Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις κατά τη φάση λειτουργίας

Από την αξιολόγηση οργανομετρήσεων που εκτελέστηκαν σε κατασκευές αντιστήριξης με εδαφοηλώσεις, προέκυψε το διάγραμμα του Σχήματος 9 που απεικονίζει διάφορες τιμές της κανονικοποιημένης (σε σχέση με το ειδικό βάρος του εδάφους γ , την οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των ήλων S_V και S_H , το ύψος H της επένδυσης και το συντελεστή ενεργητικών ωθήσεων K_A) μέγιστης εφελκυστικής δύναμης συναρτήσεως του λόγου του βάθους ήλωσης προς το ύψος μετώπου. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις μέγιστες δυνάμεις που παραλαμβάνουν οι ήλοι μετά το πέρας της κατασκευής δηλαδή σε συνθήκες λειτουργίας του έργου, χωρίς βεβαίως να λαμβάνονται υπόψη πρόσθετα φορτία ασκούμενα στην επένδυση ή προερχόμενα από συνθήκες παγετού.

Όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 9 οι τιμές των κανονικοποιημένων μέγιστων εφελκυστικών δυνάμεων ποικίλουν σε σχέση με το βάθος. Ειδικότερα, κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0.50 - 0.60 στην κορυφή, αυξάνονται σε 0.75 - 0.85 στα δύο τρίτα περίπου του βάθους του μετώπου ($2/3H$), μειώνονται μεταξύ 0.40 - 0.50 στο ένα τρίτο αυτού ($1/3H$) και τελικά στο δάπεδο της εκσκαφής τείνουν στο μηδέν. Αξίζει να αναφερθεί πως οι παρατηρήσεις αυτές συμφωνούν και με τις αντίστοιχες του ερευνητικού προγράμματος Clouterre (Plumelle et al., 1990).



Σχήμα 9. Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις ήλων βάσει επί τόπου μετρήσεων, (Byrne et al., 1998)

Figure 9. Maximum measured tensile forces in nails, (Byrne et al., 1998).

Κατά τη φάση σχεδιασμού, σε μία παρόμοια κατασκευή, μπορεί να θεωρηθεί ότι η μέγιστη κανονικοποιημένη εφελκυστική δύναμη εμφα-

νίζεται στους ήλους που βρίσκονται περίπου στα $2/3$ του ύψους του μετώπου από τη βάση και ισούται με $T_{max}=0.75 \cdot \gamma \cdot H \cdot K_A \cdot S_V \cdot S_H$. Επίσης, θεωρείται πως οι δυνάμεις στο κάτω μέρος του μετώπου είναι μειωμένες κατά περίπου 50% σε σχέση με αυτές που ασκούνται στο ανώτερο τμήμα.

Εναλλακτικά, οι Briaud και Lim (1997) προτείνουν ως μέση μέγιστη εφελκυστική δύναμη την τιμή $T_{max}=0.65 \cdot \gamma \cdot H \cdot K_A \cdot S_V \cdot S_H$ στην υψηλότερη στρώση ήλων και την εν συνεχεία, ανά στρώση, μείωση αυτής κατά το ήμισυ.

6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ

Για να επιτευχθεί ο επαρκής σχεδιασμός έναντι των εσωτερικών μορφών αστοχίας απαιτείται η πλήρης κινητοποίηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, ταυτόχρονα με την πλήρη κινητοποίηση της εφελκυστικής αντοχής των ήλων. Συγκεκριμένα, όταν ο συντελεστής ασφαλείας σε συνολική ευστάθεια ισούται με $FS_G=1.0$ (πλήρης κινητοποίηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους) τότε θα πρέπει και ο μερικός συντελεστής ασφαλείας έναντι θραύσης του ήλου να είναι $FS_T=1.0$ (πλήρης κινητοποίηση της εφελκυστικής αντοχής του ήλου). Σε αυτή την περίπτωση η εφελκυστική δύναμη του ήλου είναι η μέγιστη εφελκυστική δύναμη σχεδιασμού T_{max-s} . Προφανώς όταν ισχύει $FS_G>1.0$ (δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης κινητοποίηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους) και για σταθερή φόρτιση, η δύναμη T_{max-s} αυξάνεται έτσι ώστε να ισχύει η συνθήκη ισορροπίας. Επομένως, ο υπολογισμός της T_{max-s} μέσω της ανάλυσης συνολικής ευστάθειας είναι αρκετά συντηρητικός.

Για την εκτίμηση της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης που παραλαμβάνει ο ήλος όταν ισχύει $FS_G=1.0$ και χωρίς να προηγηθεί πρόσθετη ανάλυση ευστάθειας, είναι δυνατόν να εφαρμοσθεί η ακόλουθη απλοποιημένη μεθοδολογία. Συγκεκριμένα, η εξίσωση η οποία προσδιορίζει τη δύναμη T_{max-s} βασίζεται στην παραδοχή πως ο λόγος της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης T_{max} προς τη μέση εφελκυστική δύναμη των ήλων T_{avg} , όταν ισχύει $FS_G>1.0$, είναι ανάλογος του λόγου της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης T_{max-s} προς τη μέση εφελκυστική δύναμη των ήλων T_{avg-s} , όταν ισχύει $FS_G=1.0$. Συνεπώς μία ικανοποιητική προσέγγιση της δύναμης T_{max-s} δίδεται από την Εξίσωση 7 :

$$\frac{T_{max-s}}{T_{max}} = \frac{T_{avg-s}}{T_{avg}} \quad (7)$$

Αστοχία έναντι θραύσης του ήλου θα συμβεί όταν η εφελκυστική δύναμη $T_{\max-s}$ υπερβεί την εφελκυστική αντοχή της ράβδου, η οποία δίδεται από την Εξίσωση 8 :

$$R_T = A_t \cdot f_y \quad (8)$$

όπου A_t είναι το εμβαδόν και f_y το όριο διαρροής της ράβδου. Η αντοχή που προσδίδει το τσιμεντένεμα αμελείται λόγω διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας μεταξύ ενέματος και ήλου. Τέλος, για να ληφθούν υπόψη διάφορες αβεβαιότητες (όπως η αντοχή της ράβδου, πρόσθετη φόρτιση) στην Εξίσωση 8 προτείνεται να εισάγεται συντελεστής ασφαλείας με ελάχιστη τιμή 1.80. Συνεπώς, για την αποφυγή αστοχίας της ήλωσης λόγω θραύσης θα πρέπει να επιλεγεί κατάλληλη διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου έτσι ώστε να ισχύει:

$$A_t \geq \frac{T_{\max-s} \cdot FS_T}{f_y} \quad (9)$$

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν αναλυτικά οι βασικές εσωτερικές μορφές αστοχίας των διατάξεων αντιστηρίξεων με εδαφοηλώσεις. Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδόθηκε στις αστοχίες λόγω εξόλκευσης, ολίσθησης και θραύσης της ράβδου των ηλώσεων καθώς και στην αστοχία λόγω κάμψης και διάτμησης.

Για την αμεσότερη κατανόηση του μηχανισμού πρόκλησης των ανωτέρω αστοχιών παρουσιάστηκαν ολοκληρωμένα - μέσω αναλυτικών σχέσεων - η διαδικασία μεταφοράς φορτίου στους ήλους κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας του έργου αντιστήριξης, η αλληλεπίδραση εδάφους-ήλωσης καθώς και η κατανομή των εφελκυστικών δυνάμεων κατά μήκος των ήλων. Βάσει των ανωτέρω, προτάθηκε συγκεκριμένη μεθοδολογία που δύναται να εφαρμοσθεί κατά τη διενέργεια των κρίσιμότερων ελέγχων εσωτερικής αστοχίας των εν λόγω αντιστηρίξεων και ειδικότερα των ελέγχων έναντι εξόλκευσης και θραύσης της ράβδου των ηλώσεων.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Briaud J.L. and Lim Y., (1997). "Soil Nailed Wall under Piled Bridge Abutment : Simulation and Guidelines", Journal of Geotech-

nical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers.

Byrne R.J., Cotton D., Porterfield J., Wolschlag C. and Ueblacker G. (1998). "Manual for Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", Report FHWA-SA-96-69R Federal Highway Administration, Washington D.C.

Carlos A. Lazarte, Elias V., Espinoza D. and Sabatini J., (2002). "Soil Nail Walls" Geotechnical engineering circular No.7, Publication No. FHWA-0-IF-03-017, Federal Highway Administration Washington D.C.

CLOUTERRE (1993). "Recommendations CLOUTERRE 1991 – Soil Nailing Recommendations 1991", English Translation, Presses de l' Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Paris, France.

Karabatakis D. A. and Hatzigogos T. N., (2002). "Analysis of creep behavior using interface elements", Computer and Geotechnics, Vol. 29, pp. 257-277.

Plummele C., Schlosser F., Oclage P and Knochenmus G, (1990). "French National Research Project on Soil Nailing: CLOUTERRE", Geotechnical Special Publication No.25, American Society of Civil Engineers.