

Υψηλά Οπλισμένα Επιχώματα: Βασικές Αρχές Ανάλυσης - Μεθοδολογική Προσέγγιση Σχεδιασμού και Κατασκευαστικές Λεπτομέρειες

High Reinforced Embankments: Basic Principles of Analysis - Methodology of Design and Structural Details

ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ, Χ. Φ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ, Γραφείο Συμβούλων Μηχανικών σ_1
ΑΡΓΥΡΙΑΔΗ, Δ. Ε. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ, Γραφείο Συμβούλων Μηχανικών σ_1
ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Σ. Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΠΟΛΥΖΟΣ, Χ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η ανακοίνωση αυτή περιλαμβάνει σε αρχικό στάδιο και σε συνοπτική μορφή τις βασικές αρχές σχεδιασμού οπλισμένων επιχωμάτων, σύμφωνα με τις σύγχρονες Αμερικάνικες Οδηγίες, βασισμένες στις αρχές της οριακής ισορροπίας. Στη συνέχεια της εργασίας παρουσιάζεται η περίπτωση ενός υψηλού οπλισμένου επιχώματος, με επένδυση παρειάς (facing), όπου γίνεται αναφορά στις παραμέτρους σχεδιασμού, στα στάδια ανάλυσης και σχεδιασμού του έργου, στις τεχνικές προδιαγραφές και στην τεχνική περιγραφή του.

ABSTRACT: This paper outlines the basic principles of analysis and design of reinforced embankments, according to the "Design & Construction Guidelines" of the U.S. Department of Transportation, which are based on limit equilibrium principles. In addition, a project of a high reinforced embankment with gabion's facing is presented, with reference to the parameters of design, the stages of analysis and design process, technical specifications and structural details of the project.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή οπλισμένων επιχωμάτων με κλίσεις πρηνών έως 70° αποτελεί σχετικά νέα εμπειρία για τα Ελληνικά δεδομένα, παρόλο που σε διεθνές επίπεδο η πρακτική αυτή δεν αποτελεί πρόσφατο απόκτημα ή καινοτομία. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι αυτές οι γεωκατασκευές σημαντική ανάπτυξη γνώρισαν την τελευταία 10ετία και αντιστοίχως οι σχετικοί Κανονισμοί ή Οδηγίες που αναφέρονται στο σχεδιασμό τους και στην άρτια κατασκευή τους.

Ένα αξιόπιστο εργαλείο του μελετητή για το σχεδιασμό και τη διαστασιολόγηση των οπλισμένων επιχωμάτων αποτελούν οι πρόσφατες Αμερικάνικες Οδηγίες Σχεδιασμού και Κατασκευής Οπλισμένων Επιχωμάτων (RSS) και Τοίχων Οπλισμένου Εδάφους (MSEW) (ο γενικευμένος όρος, «Reinforced Soil Slopes – RSS», αποδίδεται στην Ελληνική συνήθως με τον όρο «οπλισμένο επίχωμα» εφόσον η κλίση των πρηνών δεν υπερβαίνει τις 70° , ενώ ο γενικευμένος όρος «Mechanically Stabilized Earth Walls – MSEW», αναφέρεται στις

γεωκατασκευές οι οποίες συνήθως αποδίδονται στην Ελληνική με τον όρο «τοίχοι οπλισμένου εδάφους», και οι οποίες εμφανίζουν κλίσεις πρηνούς μεγαλύτερες από 70° έως και κατακόρυφες). Οι εν λόγω οδηγίες επέχουν κατ' ουσία θέση κανονιστικών διατάξεων για το σχεδιασμό και την κατασκευή αντιστοιχών έργων στο δημόσιο αλλά και στον ιδιωτικό τομέα ("Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Design & Construction Guidelines", U.S. Department of Transportation / Federal Highway Administration, FHWA-NHI-00-043, March 2001).

Η αξιοπιστία των εν λόγω οδηγιών αποδεικνύεται από την ευρεία χρήση τους στο σχεδιασμό σημαντικού αριθμού έργων, τα οποία έχουν ήδη κατασκευαστεί τόσο στο εξωτερικό όσο και στην Ελλάδα και εν γένει παρουσιάζουν καλή συμπεριφορά. Ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα από τον ελλαδικό χώρο θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

Η μεθοδολογία διαστασιολόγησης των οπλισμένων επιχωμάτων βασίζεται στη θεωρία της οριακής ισορροπίας (limit equilibrium methodology). Η υιοθέτηση της μεθόδου οριακής ισορροπίας για τη διαστασιολόγηση και τον έλεγχο οπλισμένων επιχωμάτων και μάλιστα με απότομα πρανή (Geosynthetic Reinforced Steep Slopes) θεωρείται ενδεδειγμένη λόγω της απλότητας των παραμέτρων που χρησιμοποιεί και των αποτελεσμάτων της, η ορθότητα των οποίων, εύκολα μπορεί να διασταυρωθεί είτε με άλλες αναλύσεις είτε ακόμη και με υπολογισμούς με το χέρι, και για την οποία υπάρχει σημαντική εμπειρία μελετητική και κατασκευαστική. Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου οριακής ισορροπίας είναι η αδυναμία της να προσδιορίσει μετακινήσεις και παραμορφώσεις. Ωστόσο, λαμβανομένου υπόψη ότι ο πλέον δόκιμος και αξιόπιστος τρόπος για τον υπολογισμό πλαστικών παραμορφώσεων και μετακινήσεων είναι ο σχεδιασμός με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ή / και διαφορών, υπάρχει πάντοτε η δυσκολία επιλογής του πλέον κατάλληλου καταστατικού νόμου ο οποίος θα περιγράφει με ακρίβεια την ανελαστική συμπεριφορά του σύνθετου μορφώματος (γεωπλεγμα και εδαφικό υλικό). Σε κάθε περίπτωση, οι έλεγχοι λειτουργικότητας στην περίπτωση των οπλισμένων επιχωμάτων δεν συνιστούν στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, τους κρίσιμους ελέγχους υπό την προϋπόθεση ότι επιλέγονται κατάλληλες παράμετροι σχεδιασμού των εδαφικών υλικών κατασκευής των οπλισμένων επιχωμάτων και υιοθετούνται κατάλληλοι συντελεστές ασφαλείας. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι κατά AASHTO' 98 δεν απαιτείται έλεγχος λειτουργικότητας, εφόσον εξασφαλίζονται οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις. Σύμφωνα με το AASHTO, μετρήσεις από ενοργανωμένες γεωκατασκευές (οπλισμένα επιχώματα) έδειξαν σε όλες τις περιπτώσεις ότι οι παραμορφώσεις των γεωπλεγμάτων ήταν σημαντικά μικρότερες από τις υπολογισθείσες, ανεξαρτήτως της αναλυτικής μεθοδολογίας που είχε χρησιμοποιηθεί κατά το σχεδιασμό του έργου, και επομένως δεν απαιτούνται έλεγχοι λειτουργικότητας.

Οι έλεγχοι που διενεργούνται για την ευστάθεια και επάρκεια του οπλισμένου επιχώματος πρέπει να εξασφαλίζουν τη

σύνθετη αυτή γεωκατασκευή, έναντι εσωτερικής, εξωτερικής και μικτής αστοχίας. Ειδικότερα, προβλέπονται οι ακόλουθοι έλεγχοι (Leshchinsky, 2002):

1) Ανάλυση ευστάθειας κυκλικής ολίσθησης (Rotational Failure Mode): Πρόκειται για τον έλεγχο έναντι ολίσθησης με την τροποποιημένη μέθοδο του Bishop βάσει της οποίας προσδιορίζεται ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας σε κυκλική ολίσθηση διερχόμενη τόσο μέσα από το σώμα του επιχώματος πίσω ή και διαμέσου των οπλισμών, όσο και κάτω από την έδρασή του. Ο έλεγχος αυτός συνήθως καθορίζει τις απαιτούμενες αντοχές των γεωπλεγμάτων

2) Ανάλυση ευστάθειας μεταφορικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια γεωπλέγματος – υλικού επίχωσης (Translational Failure Mode): Η υπόψη ανάλυση απευθύνεται σε δυνητικές ολισθήσεις του οπλισμένου τμήματος του επιχώματος κατά μήκος του 1^{ου} οπλισμού ή οποιουδήποτε άλλου (translational sliding). Η εν λόγω ανάλυση προσδιορίζει τα απαιτούμενα μήκη των οπλισμών μέσω των εξισώσεων ισορροπίας των υφιστάμενων δυνάμεων. Στα πλαίσια αυτού του ελέγχου εντάσσεται και ο έλεγχος σε εξόλκευση του γεωπλέγματος. Αξίζει να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη ανάλυση έχει αποτελέσει, σχεδόν πάντοτε, τον κρίσιμότερο έλεγχο ευστάθειας και αυτόν που καθορίζει τελικά το απαραίτητο μήκος των γεωπλεγμάτων.

3) Ανάλυση ευστάθειας πολυγωνικής επιφάνειας ολίσθησης (3-part Wedge Failure Mechanism): Πρόκειται για ανάλυση ευστάθειας βάσει της μεθόδου Spencer με την οποία ελέγχονται πολυγωνικές επιφάνειες ολίσθησης που διέρχονται κάτω από την έδραση του επιχώματος και μέσα ή πίσω από το οπλισμένο τμήμα του και δεν είναι ούτε περιστροφικής, ούτε μεταφορικής μορφής. Με τον τρόπο αυτό ολοκληρώνονται όλες οι πιθανές μορφές επιφανειών ολίσθησης που μπορούν να εμφανισθούν.

4) Έλεγχος καθιζήσεων: Ο υπολογισμός των καθιζήσεων και της συνίζησης του ίδιου του επιχώματος γίνεται με την παραδοχή του ελαστικού ημιχώρου και κατανομή τάσεων κατά Boussinesq, αν και για αμμοχαλικώδη υλικά τα αναμενόμενα μεγέθη είναι μικρά και η ανάληψη των καθιζήσεων πρακτικά άμεση, αναπτυσσόμενη κυρίως κατά την κατασκευή.

3. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ

Όλοι οι παραπάνω έλεγχοι είναι απαραίτητοι για την εξασφάλιση της ευστάθειας οπλισμένων επιχώματων αλλά και εμμέσως για την εξασφάλιση της λειτουργικότητας εφόσον γίνει χρήση κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας. Οι συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιούνται για τη διαστασιολόγηση του οπλισμένου επιχώματος σχετίζονται: α) με τη διατμητική αντοχή των γεωυλικών του επιχώματος, β) με την αντοχή των γεωπλεγμάτων (ήτοι: μηχανικά χαρακτηριστικά γεωπλέγματος, μηχανικά χαρακτηριστικά αλληλεπίδρασης γεωπλέγματος – γεωυλικών οπλισμένου επιχώματος, χαρακτηριστικά μακροχρόνιας ανθεκτικότητας και κατά την τοποθέτηση του γεωπλέγματος), γ) με τον συνδυασμό των δράσεων σχεδιασμού (μόνιμα, κινητά και σεισμικά φορτία) και δ) με λοιπές παραμέτρους σχεδιασμού του οπλισμένου επιχώματος. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας που λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό του έργου διάρκειας ζωής 120 ετών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μερικοί συντελεστές απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωπλεγμάτων καθώς και ο συντελεστής αλληλεπίδρασης εδαφικού υλικού - γεωπλέγματος εξαρτώνται τόσο από το υλικό κατασκευής του γεωπλέγματος (πολυεστέρας ή πολυαιθυλένιο), όσο και από το εδαφικό υλικό επίχωσης (μέγεθος και αδρότητα κόκκου, συνθήκες οξύτητας). Τα έγγραφα πιστοποίησης που συνοδεύουν τα γεωπλέγματα συνήθως προτείνουν τιμές για τους εν λόγω συντελεστές, βασιζόμενες σε δοκιμές που έχουν διεξαχθεί για το σκοπό αυτό. Στον πίνακα 1 δίνεται ένα διάστημα τιμών μέσα στο οποίο κινούνται οι συντελεστές, προερχόμενο από τη διεθνή βιβλιογραφία, το εύρος του οποίου, αξίζει να τονιστεί ότι είναι αρκετά μεγάλο. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει την ανάγκη να έχει ο μελετητής ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τα υλικά όπλισης και επίχωσης, προκειμένου να αποφευχθεί μια πιθανή υπερδιαστασιολόγηση του έργου με τη χρήση δυσμενών τιμών των εν λόγω συντελεστών, στην προσπάθεια διασφάλισής του.

Πίνακας 1: Συντελεστές ασφαλείας
Table 1: Factors of safety

	Στατικές συνθήκες	Στατικές συνθήκες & υπόγειος ορίζοντας 50-ετίας	Σεισμικές συνθήκες
1. Εδαφικά υλικά			
Ενεργή γωνία τριβής οπλισμένου εδαφικού υλικού (φ'd)	1,0	1,0	1,0
Ενεργή συνοχή οπλισμένου εδαφικού υλικού (c'd)	1,0	1,0	1,0
Ενεργή γωνία τριβής εδαφικού υλικού θεμελίωσης	1,0	1,0	1,0
Ενεργή συνοχή εδαφικού υλικού θεμελίωσης	1,0	1,0	1,0
2. Γεωπλέγματα			
Μειωτικός συντελεστής λόγω καταπόνησης στην εγκατάσταση (Installation damage – RFid)	1,05-3,0	1,05-3,0	1,05-3,0
Μειωτικός συντελεστής ανθεκτικότητας (Durability – RFd)	1,1-2,0	1,10-2,0	1,10-2,0
Μειωτικός συντελεστής ερπυσμού (Creep – RFC)	1,6-5,0	1,60-5,0	1,60-5,0
Συντελεστής αλληλεπίδρασης εδαφικού υλικού – γεωπλέγματος σε ολίσθηση κατά μήκος οπλισμένου εδαφικού υλικού (Direct sliding coefficient along reinforced soil – Cds)	0,6-1,0	0,6-1,0	0,8 x (0,6-1,0)
3. Γενικοί συντελεστές ασφαλείας			
Συντελεστής ασφαλείας έναντι κυκλικής ολίσθησης (rotational analysis – Fs-ds)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφαλείας έναντι μεταφορικής ολίσθησης (translational analysis – Fs-ds)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφαλείας έναντι πολυγωνικής επιφάνειας ολίσθησης (3 – part wedge – Fs-dw)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφαλείας έναντι εξόλκευσης γεωπλέγματος (geosynthetic pullout – Fs-po)	1,5	1,5	1,125

4. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΠΙΧΩΜΑ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ 1.1.5/6 ΤΗΣ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ

4.1 Γεωμετρικά και γεωλογικά στοιχεία έργου

Η εργασία που παρουσιάζεται αφορά στο σχεδιασμό οπλισμένου επιχώματος μεταξύ των Χ.Θ.: 26+393,18 έως Χ.Θ.: 27+117,97 στο τμήμα 1.1.5/6 της Εγνατίας Οδού, σε αντικατάσταση της γέφυρας Γ3.



Φωτ. 1: Θέση κατασκευής του εξεταζόμενου οπλισμένου επιχώματος
Picture 1: Location of the examined reinforced embankment

Σύμφωνα με τη μελέτη οδοποιίας το μέγιστο ύψος του επιχώματος είναι περίπου 32,0m και παρουσιάζεται στη διατομή 1354 (Χ.Θ.: 26+999,55), για κλίση πρανών ίση με 70° . Η κλίση του υφιστάμενου φυσικού πρανούς είναι περίπου $\nu:\beta=1:1$. Σύμφωνα με τα σχέδια των διατομών της μελέτης εφαρμογής της οδοποιίας η κατασκευή επιχώματος με ηπιότερη κλίση θα είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους του, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η κατασκευή επιχώματος με κλίση πιο απότομη από 70° δεν προσέφερε σημαντική μείωση του ύψους. Έτσι υπόψη κλίση πρανών εξασφαλίζει τις βέλτιστες συνθήκες γεωμετρίας.

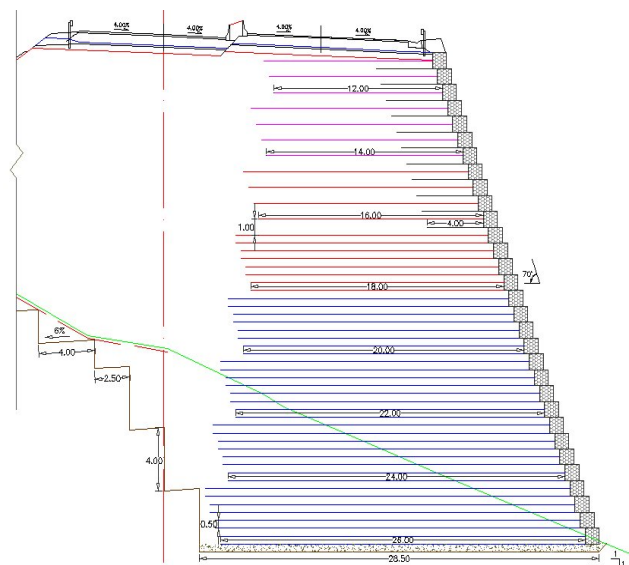
Η όπλιση επιχωμάτων με έντονες κλίσεις, μεγαλύτερες από 45° και έως 70° , είναι δυνατή με συνθετικά γεωπλέγματα υπό την προϋπόθεση ότι θα υπάρξει ειδική πρόβλεψη για προστασία της εξωτερικής παρειάς (facing) από επιφανειακή διάβρωση, διαρροή του γεωυλικού μεταξύ των οπλισμών, καταστροφή από βανδαλισμούς, πυρκαϊά και έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV ακτίνες). Για τη συγκεκριμένη περίπτωση στο οπλισμένο επίχωμα η προστασία του απότομου πρανούς

(επένδυση όψης) επιτεύχθηκε με ειδικά συρματοκιβώτια πληρωμένα με λιθορριπή, διαστάσεων $2 \times 1 \times 1\text{m}$ (μήκος \times πλάτος \times ύψος), τα οποία διαθέτουν προεξέχον τμήμα μήκους 4m, που χρησιμεύει και ως δευτερεύον οπλισμός στις περιπτώσεις εκείνες που η κατακόρυφη απόσταση του πρωτεύοντος οπλισμού από γεωσυνθετικά είναι μεγάλη ($>0,5\text{m}$). Λαμβανομένου υπόψη ότι η επένδυση της παρειάς του οπλισμένου επιχώματος θα πρέπει να είναι αρκετά εύκαμπτη, αλλά και αισθητικά να μπορεί να ενταχθεί στο περιβάλλον, η λύση της κατασκευής με ειδικά συρματοκιβώτια πληρωμένα με υγιείς λίθους συγκεκριμένων διαστάσεων, πληροί όλες τις προϋποθέσεις μιας ευέλικτης και τεχνικά άρτιας λύσης η οποία συνδυάζεται πολύ καλά με την όπλιση με γεωπλέγματα.

Οι προβλεπόμενοι γεωσυνθετικοί οπλισμοί του επιχώματος τοποθετούνται σε οριζόντιες στρώσεις και καθ' ύψος αποστάσεις $S_v=0,5\text{m}$ στις αρχικές στρώσεις και 1,0m στα υψηλότερα σημεία του επιχώματος.

Ο πόδας του οπλισμένου επιχώματος εδράζεται σε αποστραγγιστική-εξυγιαντική στρώση πάχους 0,50m από θραυστό καθαρό αμμοχάλικο ή χαλίκι, προκειμένου αφενός να τοποθετηθούν τα ειδικά συρματοκιβώτια επένδυσης παρειάς και ο οπλισμός και αφετέρου να εξασφαλίζονται οι συνθήκες στράγγισης των κατεισδυόντων υδάτων.

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται μια τυπική διατομή του έργου, με τους οπλισμούς που προέκυψαν από τους ελέγχους που διενεργήθηκαν στη συνέχεια.



Σχήμα 1: Τυπική διατομή έργου
Figure 1: Design cross section of the project

Από γεωλογικής άποψης, η έρευνα που διεξήχθη στην ευρύτερη περιοχή έδειξε ότι η στρωματογραφία του υπεδάφους αποτελείται από δύο κυρίως σχηματισμούς. Επιφανειακά συναντάται ένας μανδύας αποσάθρωσης ασβεστολιθικού υποβάθρου, μέγιστου πάχους 3,0m, ο οποίος συνίσταται από ιλυώδη – αργιλώδη άμμο και χάλικες, ενώ βαθύτερα εμφανίζεται το ασβεστολιθικό υπόβαθρο.

Από πλευράς σεισμολογικών δεδομένων η περιοχή κατατάσσεται στις περιοχές μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας, ήτοι στην κατηγορία II κατά (Ε.Α.Κ. 2000 - Φ.Ε.Κ. 1154 / 12-08-2003) με μέγιστη αναμενόμενη εδαφική επιτάχυνση $a_{max} = 0,24g$.

4.2 Υλικά επίχωσης και οπλισμού

Τα γεωυλικά με τα οποία κατασκευάζεται ένα οπλισμένο επίχωμα θα πρέπει να πληρούν ορισμένες απαιτήσεις σχετικά με τα φυσικά, μηχανικά και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους. Οι απαιτήσεις αυτές είναι αυστηρότερες στην περίπτωση επιχωμάτων με σημαντικό ύψος και απότομη κλίση πρανών, όπως το εξεταζόμενο.

Συγκεκριμένα, το υλικό επίχωσης προδιαγράφηκε να είναι επίλεκτο υλικό κατηγορίας E_4 ή E_3 κατά ΟΣΜΕΟ (κατά USCS οι ακόλουθες κατηγορίες γεωυλικών θεωρούνται κατάλληλες: GW, GP, GM, SP, SW, SM, SC) εφόσον: το λεπτόκοκκο κλάσμα (διερχόμενο από το κόσκινο N° 200) είναι λιγότερο από 25%, η διάμετρος του μέγιστου κόκκου είναι μικρότερη των 80mm, το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας είναι μικρότεροι από 20 και 10 αντίστοιχα ($W_L \leq 20$ και $PI \leq 10$), ο Καλιφορνιακός λόγος φέρουσας ικανότητας είναι $CBR > 10$, ποσοστό οργανικών και διόγκωση πρακτικά μηδενικά.

Ειδικά στη θέση του μετώπου του απότομου πρανούς πίσω από την επένδυση με τα ειδικά συρματοκιβώτια και σε πλάτος 2,0m, προδιαγράφηκε το τοποθετούμενο γεωυλικό (εδώ κατά προτίμηση υλικό κατηγορίας E_4), να είναι το πλέον χονδρόκοκκο με τα ελάχιστα, κατά το δυνατόν, λεπτόκοκκο, και τον χαμηλότερο δείκτη πλαστικότητας (PI), προκειμένου να εξασφαλίζονται η βέλτιστη γωνία τριβής, η μέγιστη δυνατή αποστράγγιση αλλά και οι ελάχιστες διαφορικές καθιζήσεις λόγω συνίζησης. Οι ίδιοι περιορισμοί ζητήθηκαν και για τις 4 έως 5 αρχικές στρώσεις διαστρωμένου γεωυλικού στη στάθμη έδρασης του επιχώματος καθώς επίσης και για τα σημεία συναρμογής του επιχώματος με τους

αναβαθμούς αγκύρωσης. Όσον αφορά στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του γεωυλικού επίχωσης, σε κάθε περίπτωση οι τιμές του PH του θα πρέπει να κυμαίνονται από 3 έως 9.

Οι προβλεπόμενοι γεωσυνθετικοί οπλισμοί του επιχώματος αποτελούνται από κατάλληλα πολυμερικά γεωπλέγματα από πολυεστερικούς τένοντες σε περίβλημα πολυαιθυλενίου. Σχετικά με τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά των γεωπλεγμάτων για τις ανάγκες σχεδιασμού του υπόψη έργου, ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Φυσικά και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων όπλισης:

- Τα γεωπλέγματα που τοποθετήθηκαν παραμένουν ανεπηρέαστα κατ' ελάχιστον για τιμές PH κυμαινόμενες από 3 έως 9.
- Τα χρησιμοποιούμενα γεωπλέγματα δεν επηρεάζονται από τη χημική σύνθεση των υλικών επίχωσης και παραμένουν ανεπηρέαστα ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά σε μικροβιακές (μικροβιολογικές) δράσεις. Επίσης δεν επηρεάζονται τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, τόσο σε βραχυχρόνιες όσο και σε μακροχρόνιες συνθήκες.
- Τα χρησιμοποιούμενα γεωπλέγματα είναι ανθεκτικά και ανεπηρέαστα από την υπεριώδη ακτινοβολία UV (βασικό μέτρο προφύλαξης κυρίως κατά το στάδιο της κατασκευής όπου τα γεωπλέγματα είναι εκτεθειμένα στο ηλιακό φως).
- Τα γεωπλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν, είναι ανεπηρέαστα από θερμοκρασίες μεταξύ 0° και $30^\circ C$, ενώ θερμοκρασίες εκτός των παραπάνω ορίων θα πρέπει να είναι ανεκτές για περιορισμένα χρονικά διαστήματα, χωρίς να αλλοιώνονται τα βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα μηχανικά τους χαρακτηριστικά.

2. Μηχανικά χαρακτηριστικά γεωπλεγμάτων όπλισης:

- Η ονομαστική – οριακή αντοχή (με διάστημα εμπιστοσύνης 95%) σε ελκυσμό για βραχυχρόνια φόρτιση είναι κατ' ελάχιστον 200kN/m, 150kN/m, 110kN/m, 80kN/m και 55kN/m στη θερμοκρασία $20^\circ C$, δεδομένου ότι προβλέπονται πέντε αντίστοιχων αντοχών συνθετικά γεωπλέγματα για την όπλιση του επιχώματος.
- Η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής παραμόρφωσης στους $20^\circ C$ στο ονομαστικό όριο θραύσης (T_{ult}) δεν υπερβαίνει την τιμή του 12,5%.

- Η χαρακτηριστική αντοχή σε ελκυσμό ($T_{lt,ult}$), για θερμοκρασία σχεδιασμού 20°C και για μακροχρόνια φόρτιση ($t=120$ έτη) είναι μεγαλύτερη ή ίση των 101,8kN/m, 76,3kN/m, 56kN/m, 33,5kN/m και 25,2kN/m, αντίστοιχα για τα προαναφερθέντα γεωπλέγματα. Οι τιμές αυτές προκύπτουν αφού επιβληθούν επί των ονομαστικών αντοχών των γεωσυνθετικών οι μερικοί συντελεστές

απομείωσης των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, που αναφέρθηκαν στην §3 του παρόντος. Πιο συγκεκριμένα, οι μερικοί συντελεστές καθώς και ο συντελεστής αλληλεπίδρασης εδαφικού υλικού - γεωπλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της μελέτης παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα 2.

Πίνακας 2: Συντελεστές ασφαλείας που υιοθετήθηκαν στους ελέγχους ευστάθειας
Table 2: Factors of safety (total and partial) adopted for stability analyses

	Στατικές συνθήκες	Στατικές συνθήκες & υπόγειος ορίζοντας 50-ετίας	Σεισμικές συνθήκες
1. Εδαφικά υλικά			
Ενεργή γωνία τριβής οπλισμένου εδαφικού υλικού ($\phi'd$)	1,0	1,0	1,0
Ενεργή συνοχή οπλισμένου εδαφικού υλικού ($c'd$)	1,0	1,0	1,0
Ενεργή γωνία τριβής εδαφικού υλικού θεμελίωσης	1,0	1,0	1,0
Ενεργή συνοχή εδαφικού υλικού θεμελίωσης	1,0	1,0	1,0
2. Γεωπλέγματα			
Μειωτικός συντελεστής λόγω καταπόνησης στην εγκατάσταση (Installation damage – RFid)	1,07 / 1,30 / 1,19 για γεωπλέγματα εφελκυστικής αντοχής: 200, 150, 110 / 80 / 55kN/m αντίστοιχα	1,07 / 1,30 / 1,19 για γεωπλέγματα εφελκυστικής αντοχής: 200, 150, 110 / 80 / 55kN/m αντίστοιχα	1,07 / 1,30 / 1,19 για γεωπλέγματα εφελκυστικής αντοχής: 200, 150, 110 / 80 / 55kN/m αντίστοιχα
Μειωτικός συντελεστής ανθεκτικότητας (Durability – RFd)	1,10	1,10	1,10
Μειωτικός συντελεστής ερπισμού (Creep – RFC)	1,67	1,67	1,00
Συντελεστής αλληλεπίδρασης εδαφικού υλικού – γεωπλέγματος σε ολίσθηση κατά μήκος οπλισμένου εδαφικού υλικού (Direct sliding coefficient along reinforced soil – Cds)	0,8	0,8	0,64
3. Γενικοί συντελεστές ασφαλείας			
Συντελεστής ασφάλειας έναντι κυκλικής ολίσθησης (rotational analysis – Fs-ds)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφάλειας έναντι μεταφορικής ολίσθησης (translational analysis – Fs-ds)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφάλειας έναντι πολυγωνικής επιφάνειας ολίσθησης (3 – part wedge – Fs-dw)	1,3	1,2	1,1
Συντελεστής ασφάλειας έναντι εξόλκευσης γεωπλέγματος (geosynthetic pullout – Fs-po)	1,5	1,5	1,125

4.3 Έλεγχοι ευστάθειας

Για το σχεδιασμό του οπλισμένου επιχώματος διενεργήθηκαν όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι ευστάθειας, σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες Σχεδιασμού και Κατασκευής Οπλισμένων Επιχωμάτων (U.S. Department of Transportation / FHWA-NHI-003-043, March 2001), όπως αναφέρθηκε λεπτομερέστερα στην §2 του παρόντος. Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ReSSa V2.0 (2002) της εταιρίας Adama Engineering, Inc. Το σχήμα 2 που ακολουθεί προέρχεται από το αρχείο αποτελεσμάτων του εν λόγω λογισμικού. Αναφέρεται σε μία ενδεικτική διατομή της μελέτης και παρουσιάζει τις κρίσιμότερες επιφάνειες αστοχίας που προέκυψαν αφενός από τον έλεγχο σε κυκλική ολίσθηση του επιχώματος (rotational failure mode) και αφετέρου από τον έλεγχο μεταφορικής ολίσθησης στη διεπιφάνεια γεωπλέγματος – υλικού επίχωσης (translational failure mode).



Σχήμα 2: Κρίσιμες επιφάνειες αστοχίας τυπικής διατομής του έργου, ReSSa.
Figure 2: Critical failure surfaces on a typical cross-section of the project, ReSSa.

4.4 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες

Το πρώτο στάδιο κατασκευής του οπλισμένου επιχώματος περιλαμβάνει τις εκσκαφές για την έδρασή του, στις οποίες συγκαταλέγονται αφενός οι γενικές εκσκαφές και η απομάκρυνση των επιφανειακών φυτικών και χαλαρών γαιών τυπικού βάρους 30cm, και αφετέρου, οι εκσκαφές για τη δημιουργία των απαιτούμενων αναβαθμών αγκύρωσης (εφόσον η εγκάρσια κλίση του φυσικού πρανούς επί του οποίου εδράζεται το επίχωμα διαθέτει κλίση μεγαλύτερη των

20⁰), οι εκσκαφές για την τοποθέτηση της εξυγιαντικής – αποστραγγιστικής στρώσης, και φυσικά οι απαραίτητες εκσκαφές για τη σωστή τοποθέτηση των γεωσυνθετικών οπλισμών.

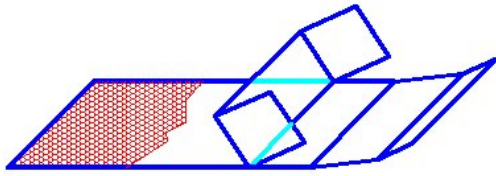


Φωτ. 2: Εκσκαφές για την κατασκευή του οπλισμένου επιχώματος
Picture 2: Excavations for the construction of the reinforced embankment



Φωτ. 3: Εκσκαφές αναβαθμών αγκύρωσης
Picture 3: Slope cutting gradually conducted to ensure embankment anchorage

Μετά την ολοκλήρωση των εκσκαφών και την κατασκευή της εξυγιαντικής – αποστραγγιστικής στρώσης γίνεται κατ' αρχήν η τοποθέτηση του 1^{ου} ειδικού συρματοκιβωτίου επένδυσης, με προεξέχον τμήμα μήκους 4m προς το εσωτερικό του επιχώματος, αφού διασφαλιστεί η ομαλότητα και η επιπεδότητα της επιφάνειας επί της οποίας θα τοποθετηθούν οι γεωσυνθετικοί οπλισμοί.



Σχήμα 3: Σχηματική απεικόνιση συρματοκιβωτίου επένδυσης παρειάς επιχώματος
Figure 3: Schematic depiction of a typical gabion unit used as facing element



Φωτ. 4: Ειδικό συρματοκιβώτιο επένδυσης παρειάς του οπλισμένου επιχώματος
Picture 4: Typical gabion unit used as facing element for the reinforced embankment

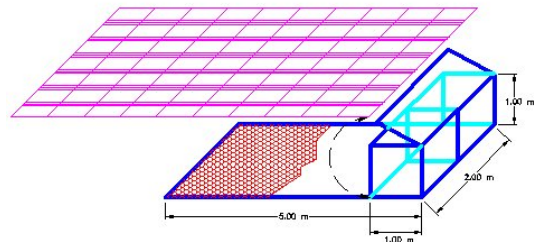
Ακολουθεί η επιτόπου συναρμολόγηση των ειδικών συρματοκιβωτίων επένδυσης και η πλήρωση τους με λίθους κατάλληλων διαστάσεων (1,0 έως 2,5D = 20cm) και κλείσιμο του «καπακιού» του συρματοκιβωτίου με τους προδιαγραφόμενους συνδετήρες. Στο στάδιο αυτό τοποθετείται και το απαραίτητο τμήμα γεωϋφάσματος στην πίσω όψη του συρματοκιβωτίου επένδυσης για διαχωρισμό του γεωυλικού επίχωσης και των λίθων πλήρωσης των υπόψη συρματοκιβωτίων.

Στη συνέχεια ο 1^{ος} γεωσυνθετικός οπλισμός τοποθετείται κατά τη διεύθυνση της κύριας όπλισης, ήτοι εγκάρσια προς το μέτωπο του επιχώματος (το μέτωπο του επιχώματος υλοποιείται με την επένδυση από τα ειδικά συρματοκιβώτια). Συγκεκριμένα, ξετυλίγονται τα ρολά με κατεύθυνση από το πίσω μέρος του συρματοκιβωτίου επένδυσης προς το εσωτερικό του επιχώματος, σύμφωνα με το υπολογισθέν μήκος και αγκυρώνονται σε αμφότερα τα άκρα με μικρού μήκους σιδηρές ράβδους (J-rip, ύψους 0,50m) για να εξασφαλιστεί η τάνυσή τους και η επιπεδότητά τους.



Φωτ. 5: Πλήρωση των ειδικών συρματοκιβωτίων με υγιείς λίθους
Picture 5: Filling of the special gabion units with unweathered stones

Το αρχικό τμήμα του πρώτου οπλισμού τοποθετείται σε επαφή επί του προεξέχοντος τμήματος του συρματοκιβωτίου επένδυσης, ενώ το υπόλοιπο τμήμα του πρώτου γεωσυνθετικού οπλισμού εναποτίθεται επί του γεωυλικού έδρασης του επιχώματος σε όσο μήκος απαιτείται.



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση 1^{ης} σειράς γεωπλεγμάτων
Figure 4: Schematic depiction of the 1st geosynthetic reinforcement strip



Φωτ. 6: Τοποθέτηση 1^{ου} γεωπλέγματος
Picture 6: Installation of the 1st geosynthetic reinforcement strip

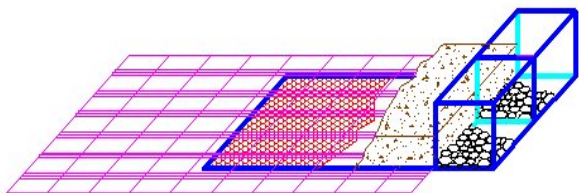


Φωτ. 7: Τοποθέτηση 1^{ου} γεωπλέγματος
 Picture 7: Installation of the 1st geosynthetic reinforcement strip



Φωτ. 8: Αγκύρωση του γεωπλέγματος με σιδηρές ράβδους (J-pin)
 Picture 8: Anchorage of the reinforcement strip using metal pins (J-pin)

Τα ρολά των γεωσυνθετικών οπλισμών τοποθετούνται σε επαφή, ήτοι σε κάλυψη 100%, χωρίς σύνδεση μεταξύ τους. Μετά την τοποθέτηση και τάνυση του πρώτου γεωσυνθετικού οπλισμού, ακολουθεί η διάστρωση και συμπίκνωση του υλικού επίχωσης σε στρώσεις των 50cm.



Σχήμα 5: Διάστρωση υλικού επίχωσης
 Figure 5: Spreading of fill material



Φωτογραφία 9: Διάστρωση & συμπίκνωση υλικού επίχωσης
 Picture 9: Spreading and compaction of fill material

Η επιλεγείσα μέθοδος συμπίκνωσης πρέπει να διασφαλίζει την επίτευξη των απαιτούμενων συμπυκνώσεων, ήτοι 95% συμπύκνωση κατά AASHTO T-180 σε υγρασία +2% w_{OPT} .

Έπεται η τοποθέτηση του 2^{ου} γεωσυνθετικού οπλισμού, σε καθ' ύψος απόσταση 0,5m από τον προηγούμενο, κατά τον ίδιο ακριβώς τρόπο με τον προηγούμενο και ακολουθεί εκ νέου διάστρωση πάχους 50cm.



Φωτ. 10: Διάστρωση υλικού επίχωσης πάνω στον 2^ο γεωσυνθετικό οπλισμό
 Picture 10: Spreading of fill material over the 2nd reinforcement strip

Μετά την ολοκλήρωση των προηγούμενων βημάτων, ακολουθεί τοποθέτηση και αντίστοιχα συναρμολόγηση του επόμενου συρματοκιβωτίου επένδυσης παρειάς και ακολουθούν νέοι κύκλοι τοποθέτησης των γεωσυνθετικών οπλισμών και του υλικού

επίχωσης.

Το επίχωμα κατασκεύασε η τεχνική εταιρία "ΠΑΝΤΕΧΝΙΚΗ Α.Ε.", ξεπερνώντας με επιτυχία αρκετές αντιξοότητες που παρουσιάστηκαν στην πορεία των εργασιών, τόσο λόγω της δυσκολίας του ίδιου του έργου, όσο και λόγω της δυσμενούς μορφολογίας της περιοχής.



Φωτ. 11: Όψη οπλισμένου επιχώματος κατά τη διάρκεια της κατασκευής
Picture 11: View of the reinforced embankment during construction

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια συνοπτικής παρουσίασης των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της μεθοδολογίας οριακής ισορροπίας και του τρόπου με την οποία αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση των οπλισμένων επιχωμάτων, σύμφωνα με τις Αμερικάνικες Οδηγίες του Οργανισμού FHWA (March, 2001).

Η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού και των επιμέρους μειωτικών συντελεστών και συντελεστών ασφαλείας αποτελεί ένα ευαίσθητο θέμα το οποίο απαιτεί προσοχή προκειμένου να αποφευχθούν πιθανές αστοχίες, αλλά και υπερδιαστασιολόγηση του έργου, καθώς ο αριθμός των συντελεστών αυτών είναι σημαντικός και προσπαθεί να καλύψει τόσο τα θέματα αστοχίας, όσο και τα θέματα λειτουργικότητας κατά έμμεσο τρόπο. Οι διάφοροι επιμέρους συντελεστές επιδιώκουν να καλύψουν επίσης και τη λειτουργία ενός σύνθετου υλικού, όπως είναι το οπλισμένο επίχωμα και η αλληλεπίδραση των ετερογενών υλικών: γεώπλεγμα και εδαφικό υλικό επίχωσης.

Η κατασκευή ενός ιδιαίτερα απαιτητικού

έργου, όπως αυτό που περιγράφει η εν λόγω ανακοίνωση, οφείλεται αφενός στις δύσκολες γεωμορφολογικές συνθήκες της θέσης του έργου, αλλά και στην ίδια τη διαδικασία της κατασκευής η οποία είναι επίπονη και προϋποθέτει καλή γνώση και αντίληψη εκ μέρους του κατασκευαστή του τρόπου λειτουργίας του έργου και των ευπαθών περιοχών του. Επίσης, είναι προφανές ότι εκ μέρους του μελετητή απαιτείται σαφής κατανόηση της μεθοδολογίας που υιοθετείται για τις αναλύσεις και το σχεδιασμό, των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που εμπεριέχει, των απλουστευτικών παραδοχών της και κυρίως των δυνατοτήτων της.

Τέλος, οι σύνθετες γεωκατασκευές αυτού του τύπου που πλέον αποκτούν κατασκευαστική οντότητα και συχνά επιβάλλονται σε θέσεις με έντονη τοπογραφία ή σε θέσεις με προβλήματα περιορισμένου χώρου ή για λόγους οικονομικούς ή τέλος ακόμη και για λόγους περιβαλλοντικούς, κάνουν ακόμη πιο επιτακτική την αναγκαιότητα ύπαρξης μελετών με πληρότητα, αλλά και δημιουργίας ή υιοθέτησης ενός κατάλληλα προσαρμοσμένου στα Ελληνικά δεδομένα κανονιστικού πλαισίου ή πλαισίου οδηγιών που θα διέπει τη μελέτη τους και την κατασκευή τους.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ADAMA Engineering, Inc (2002). ReSSA version 2.0 (www.GeoPrograms.com), NewYark, Del
- AASHTO (1998). *Standard Specifications for Highway bridges*, American Association of State Highway and Transportations Officials, Washington, DC
- EAK 2000, Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΦΕΚ 1154/12-08-2003)
- FHWA-NHI (2001), *'Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Design and construction guidelines'*, Report 00-043, USA
- Leshchinsky, D. (2002). *"Design software for geosynthetic-reinforced soil structures"* Geotechnical Fabrics Report, 2(8), 44-49.
- Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Εγνατίας Οδού (ΟΣΜΕΟ), Εγνατία Οδός Α.Ε., Θεσσαλονίκη 2001.