

Σχεδιασμός Οπλισμένων Επιχωμάτων: Οριακή Ισορροπία και Αριθμητικές Μέθοδοι

Design of Reinforced Embankments: Limit Equilibrium and Numerical Methods

ΚΩΜΟΔΡΟΜΟΣ, Α.	Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ.
ΚΛΗΜΗΣ, Ν.	Δρ Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ
ΕΦΡΑΙΜΙΔΗΣ, Χ.	Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., Γραφείο Συμβούλων Μηχανικών σ_1
ΑΡΓΥΡΙΑΔΗ, Δ.	Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ., Γραφείο Συμβούλων Μηχανικών σ_1
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ, Μ.	Πολιτικός Μηχανικός, ΜΔΕ Α.Π.Θ., ΓΕΩΣΤΑΤΙΚΗ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Αντικείμενο του παρόντος άρθρου αποτελεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλυσης οπλισμένου επιχώματος με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Κατά την πρώτη εφαρμόζεται η αρχή της οριακής ισορροπίας σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται έλεγχος ισορροπίας δυνάμεων ή/και ροπών κατά μήκος προκαθορισμένων επιφανειών και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα κινηματικά μεγέθη και οι επιπτώσεις τους στην απόκριση των συστατικών υλικών. Κατά τη δεύτερη προσέγγιση γίνεται χρήση αριθμητικής μεθόδου με πλήρη σύζευξη κινηματικών και εντατικών μεγεθών και προσομοίωση των αναπτυσσόμενων μηχανισμών. Τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων συγκρίνονται ποιοτικά και ποσοτικά ενώ παρατίθενται και τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθοδολογίας.

ABSTRACT: The aim of this paper is a comparative study of a reinforced embankment using two different design approaches. The first methodology is based on the limit equilibrium approach and the fundamental aspect of achieving equilibrium of forces and/or moments along a predefined failure surface, without taking into account the effect of cinematic field and the level of strains. The powerful tool of numerical analysis is applied in the second approach giving the ability of taking into account the effect of the cinematic field. Quantitative and qualitative comparison of the results arising from the aforementioned approaches is made and the main advantages and inconvenient are discussed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι αρχές σχεδιασμού των οπλισμένων επιχωμάτων έχουν κυρίως αναπτυχθεί την τελευταία 15ετία. Βασικός άξονας των κανονιστικών διατάξεων που τα διέπουν, σε διεθνές επίπεδο, είναι η θεωρία της οριακής ισορροπίας. Κατά την προσέγγιση αυτή εξετάζεται η ισορροπία δυνάμεων ή / και ροπών, παρά δε τα σχετικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει εξακολουθεί να είναι ιδιαίτερα δημοφιλής μεταξύ των γεωτεχνικών μελετητών καθ'ότι αποτυπώνει την επάρκεια και ασφάλεια ενός έργου με την τιμή ενός γενικευμένου συντελεστή ασφαλείας. Επιπρόσθετα, η χρήση εύρους μερικών συντελεστών ασφαλείας μπορεί να προσδιορίσει άνω και κάτω όριο

ασφαλείας και σχεδιασμού ενός έργου οπλισμένου επιχώματος. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατή η προσμέτρηση των επιπτώσεων διαφόρων παραγόντων που δεν μπορούν να εισαχθούν στην ανάλυση. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η απόζευξη κινηματικών και εντατικών μεγεθών με επακόλουθο την αδυναμία εισαγωγής της μεταβλητότητας της αντοχής των συστατικών υλικών συναρτήσει των διαδρομών τάσεων και των αναπτυσσόμενων μηχανισμών.

Η χρήση αριθμητικών μεθόδων, σε αντίθεση με την προηγούμενη μέθοδο, προσφέρει ουσιαστικές δυνατότητες προσομοίωσης των αναπτυσσόμενων μηχανισμών, μεταβολή της διατμητικής αντοχής συναρτήσει του τασικού και κινηματικού πεδίου, ανάλογα πάντα με τον

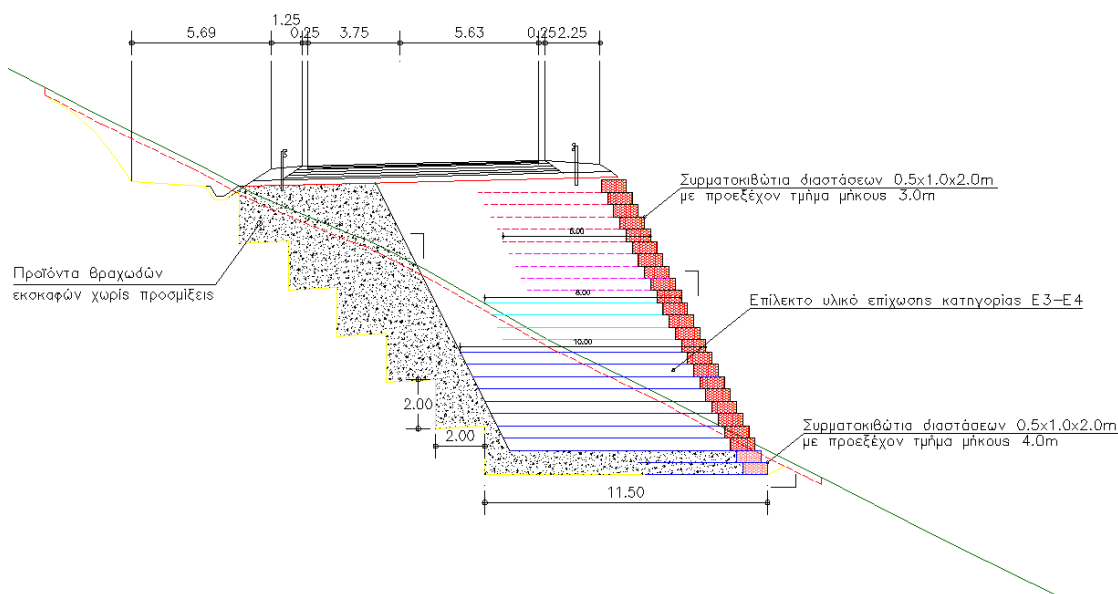
καταστατικό νόμο που χρησιμοποιεί κανείς, ενώ είναι σε θέση, πέραν της αποτίμησης ενός γενικού συντελεστή, να προσδιορίσει τις ευπαθείς περιοχές, όπου αναμένεται η εκδήλωση αστοχίας με εν συνεχεία αλυσιδωτή εξάπλωσή της. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, κυρίως για έργα μεγάλου κόστους, όπου η βελτίωση του σχεδιασμού με ενίσχυση των ευπαθών περιοχών και μόνον μπορεί να εξασφαλίσει τις απαιτήσεις ασφαλείας έναντι μικρότερου κόστους. Κύριο αντικείμενο της παρούσας αποτελεί η επίλυση του ίδιου προβλήματος με χρήση των δύο μεθοδολογιών και η ποιοτική και ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων, στα οποία αυτές οδηγούν. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε οπλισμένο επίχωμα ύψους 14.0 μέτρων του οποίου η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά δίνονται στην επόμενη παράγραφο. Οι επιλύσεις πραγματοποιούνται τόσο για στατικές συνθήκες λειτουργίας όσο και σε σεισμική δράση, ενώ κατά την αριθμητική προσέγγιση πραγματοποιούνται και επιλύσεις προσομοίωσης των επιμέρους κατασκευαστικών φάσεων καθώς και διερεύνηση της απόκρισης προ και μετά την εκδήλωση των ερπυστικών φαινομένων.

Η σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε ιδιαίτερα ενδιαφέροντα συμπεράσματα, και προσδιορίζει αφενός το πλαίσιο αξιοπιστίας και εφαρμοσιμότητας της προσέγγισης της οριακής ισορροπίας, και αφετέρου, τις δυσκολίες προσομοίωσης της αλληλεπίδρασης

γεωσυνθετικού οπλισμού και υλικού επίχωσης, καθώς επίσης και τη σημαντική υπολογιστική επιβάρυνση η οποία συνοδεύει χρήση αριθμητικών μεθόδων. Η διαφορετική προσέγγιση αναδεικνύει τις δυνατότητες της κάθε μεθοδολογικής προσέγγισης, καθώς και το σημαντικό πλεονέκτημα της αριθμητικής ανάλυσης σχετικά με τους ελέγχους και τα θέματα της λειτουργικότητας, που πρακτικά δεν εξετάζονται από τη μεθοδολογία της οριακής ισορροπίας.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το εξεταζόμενο οπλισμένο επίχωμα έχει ύψος 14.0 m παρουσιάζει κλίση πρανού 2:1 (υ:β), είναι μονόπλευρο και διαθέτει κύριο οπλισμό γεωπλεγμάτων ανά 0.5 m. Το μήκος και η αντοχή των γεωπλεγμάτων καθορίσθηκε με εφαρμογή της μεθοδολογίας οριακής ισορροπίας μετά από διαδοχικές επαναλήψεις ώστε η τελική λύση να προσεγγίζει τα αποδεκτά όρια ασφαλείας. Στο Σχήμα 1 δίνεται η χαρακτηριστική τομή του οπλισμένου επιχώματος. Η χαρακτηριστική αυτή τομή περιλαμβάνει τρεις εδαφικές στρώσεις: α) το βραχώδες υπόβαθρο, β) την αποστραγγιστική στρώση και γ) το εδαφικό υλικό του οπλισμένου επιχώματος. Πέραν των γεωπλεγμάτων το επίχωμα περιλαμβάνει και συρματοκιβώτια επένδυσης της παρειάς στην όψη του πρανού για την αποφυγή εκδήλωσης επιδερμικών αστοχιών.



Σχήμα 1. Τομή σχεδιασμού οπλισμένου επιχώματος.
Figure 1. Design section of the reinforced embankment.

Πίνακας 1. Τιμές παραμέτρων διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας συστατικών υλικών.
Table 1. Shear strength and deformation values for soil layers and geogrids.

	Συνοχή c (kPa)	Γωνία τριβής φ (Deg)	Μέτρο Μεταβολής Ογκου K (MPa)	Μέτρο Διάτμησης G (MPa)	Επιτρεπόμενη Δύναμη Tail (kN)	Δυστένεια (kPa) άμεση / με ερπυσμό
Βραχώδεις Υπόβαθρο	50	35	600	450		
Αποστραγγιστική στρώση	--	35	90	30		
Υλικό Επιχώματος	--	30	63	21		
Γεωπλέγματα 1-12					50	1400 / 500
Γεωπλέγματα 13-16					34	1272 / 340
Γεωπλέγματα 17-22					25	1200 / 250

Στον Πίνακα 1 δίνονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής και παραμορφωσιμότητας των συστατικών υλικών. Ας σημειωθεί ότι αρχή των σειρών αρίθμησης των γεωπλεγμάτων αποτελεί η βάση του επιχώματος, ενώ η αντοχή σχεδιασμού σε ελκυσμό προσδιορίσθηκε μετά την εφαρμογή των διαφόρων επιμέρους συντελεστών, όπως αυτοί επεξηγούνται στην επόμενη παράγραφο.

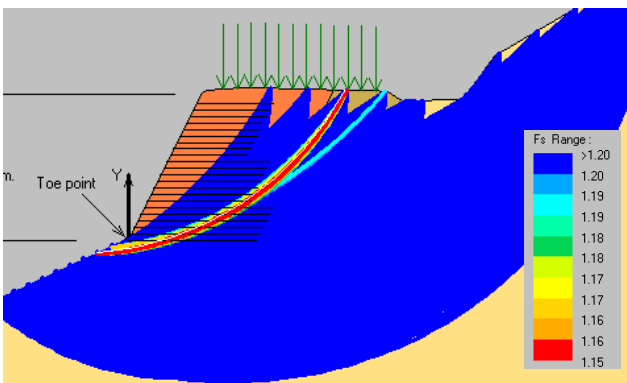
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Η θεωρία της οριακής ισορροπίας χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες στο σχεδιασμό εδαφικών πρηνών. Η υιοθέτηση της μεθόδου οριακής ισορροπίας για την διαστασιολόγηση και τον έλεγχο οπλισμένων επιχωμάτων, θεωρείται από πολλούς ερευνητές ενδεδειγμένη. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στη σημαντική μελετητική και κατασκευαστική εμπειρία, στην απλότητά της και στις σχετικά περιορισμένες και εύκολα προσδιοριζόμενες παραμέτρους που απαιτεί. Δεν θα πρέπει να παραληφθεί δε το γεγονός, ότι τα αποτελέσματα της μπορούν εύκολα να ελεγχθούν με απλουστευμένους υπολογισμούς, ενώ παρέχουν και τη δυνατότητα εποπτικού ελέγχου. Κύριο μειονέκτημα της μεθόδου οριακής ισορροπίας αποτελεί η απόζευξη εντατικών και κινηματικών μεγεθών, καθώς και η προσομοίωση διαφόρων αναπτυσσόμενων μηχανισμών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ενώ κατά την οριακή ισορροπία θεωρείται ταυτόχρονη

ανάπτυξη της μέγιστης διατμητικής αντοχής του εδάφους και των γεωσυνθετικών υλικών, ενώ στην πραγματικότητα τούτο αποτελεί ειδική απλουστευτική και μόνον περίπτωση. Ωστόσο, η θεώρηση αυτή, με την επιλογή κατάλληλων τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού οδηγεί συνήθως σε επιτυχή σχεδιασμό με τον προσδιορισμό άνω και κάτω ορίων ασφαλείας.

Κατά τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας πραγματοποιούνται τρεις κύριοι έλεγχοι με θεώρηση αντίστοιχης προκαθορισμένης επιφάνειας θραύσης. Ο πρώτος αντιστοιχεί στη θεώρηση περιστροφικής αστοχίας. Αποτελεί επιστημονικά κοινή θεώρηση ότι σε περιπτώσεις ομογενούς ισότροπου μέσου η επιφάνεια περιστροφικής αστοχίας έχει κυκλική μορφή, οι δε ακριβείς διαστάσεις της προκύπτουν από την ισορροπία ροπών ανατροπής και ροπών ευστάθειας. Εντούτοις, στην περίπτωση των οπλισμένων επιχωμάτων και ειδικότερα, όταν η επιφάνεια θραύσης τέμνει τα γεωσυνθετικά υλικά η επιφάνεια θραύσης παίρνει μορφή λογαριθμικής σπείρας, Leshchinsky (1997). Στο Σχήμα 2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από πολυάριθμες περιστροφικές αναλύσεις για κυκλικές επιφάνειες θραύσης. Οι εξισώσεις ισορροπίας για αυτής της μορφής τις επιφάνειες διαφοροποιούνται ελαφρά, ως προς τη γωνία της εφελκυστικής δύναμης γεωσυνθετικού, ενώ αντίστοιχες διαφοροποιήσεις προκύπτουν και από διαφορετική θεώρηση ισορροπίας των εδαφικών στηλών

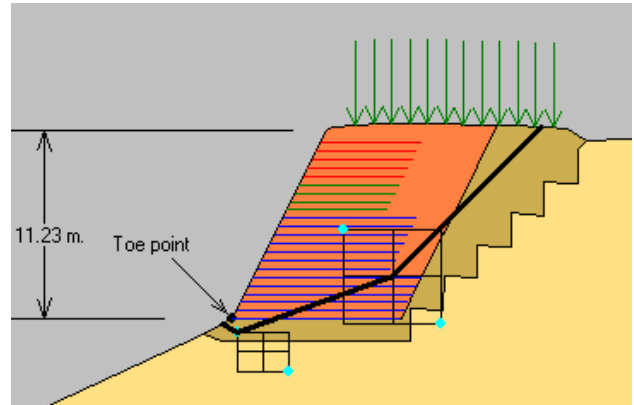
(μέθοδος Bishop, τροποποιημένη μέθοδος Bishop, μέθοδος Spencer, κλπ.)



Σχήμα 2. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης σε περιστροφική θραύση
Figure 2. Presentation of rotational analysis results

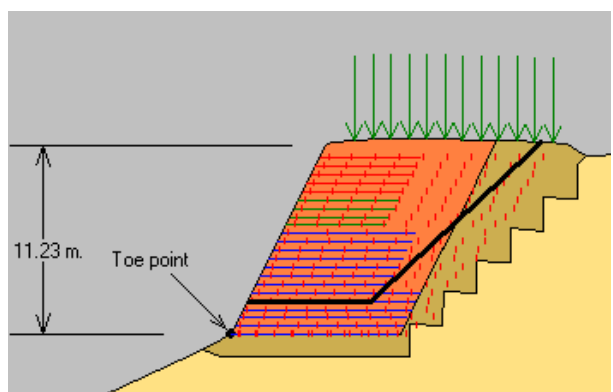
Κατά το δεύτερο έλεγχο θεωρείται θραύση τριών τμημάτων και ισορροπία στερεού σώματος για τις τρεις επιφάνειες θραύσης. Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει να θεωρηθεί συμπληρωματικός του πρώτου, δεδομένου ότι για περιπτώσεις με έντονη ανομοιογένεια των εδαφικών στρώσεων (τυχόν συμπαγές βραχώδες υπόβαθρο σε αντιπαραβολή με το εδαφικό υλικό κατασκευής του επιχώματος), η ελαφρά διαφοροποίηση από την κυκλική μορφή μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερους συντελεστές ασφαλείας. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι κατά την περίπτωση όπου η επιφάνεια θραύσης διέρχεται από το οπλισμένο επίχωμα, η αποφυγή γεωπλεγμάτων με χάραξη πολυγωνικής επιφάνειας θραύσης μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μικρότερους συντελεστές ασφαλείας. Στο Σχήμα 3 δίνονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα ανάλυσης αυτού του τύπου, όπου απεικονίζονται και τα όρια των προκαθορισμένων τρικλαδικών επιφανειών θραύσης.

Ο τρίτος και τελευταίος έλεγχος αποτελεί έλεγχο ισορροπίας ολίσθησης στερεού σώματος η δε επιφάνεια θραύσης αποτελεί τεθλασμένη γραμμή δύο κλάδων. Ο ένας κλάδος βρίσκεται κατά μήκος της διεπιφάνειας εδάφους και γεωσυνθετικού υλικού, ενώ ο δεύτερος συνεχίζει κεκλιμένα μέχρι την επιφάνεια του επιχώματος ή του φυσικού εδάφους. Πρόκειται ουσιαστικά για έλεγχο ολίσθησης στη διεπιφάνεια εδάφους και γεωσυνθετικού υλικού.

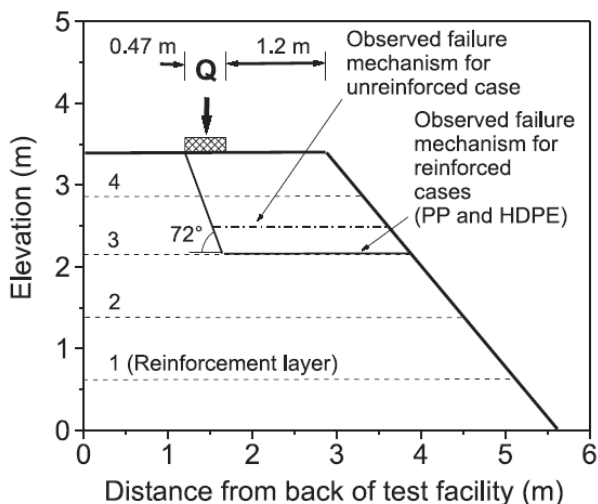


Σχήμα 3. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης θραύσης σε τρία επίπεδα
Figure 3. Results from a three part wedge mode

Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται επιφάνεια θραύσης αυτής της μορφής, καθώς και δεκάδες προκαθορισμένες επιφάνειες προς έλεγχο της μορφής αυτής. Ο μηχανισμός θραύσης αυτής της μορφής έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά από τους Blatz and Bathurst (2003), βλ. Σχήμα 5. Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η προσομοίωση του αναπτυσσόμενου κατά μήκος της διεπιφάνειας μηχανισμού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται και έλεγχος σε εξόλκευση, ο οποίος συνοδεύεται από σχετικά μεγάλο συντελεστή ασφαλείας.



Σχήμα 4. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης θραύσης σε δύο επίπεδα
Figure 4. Results from a translational failure mode (two part wedge mode)



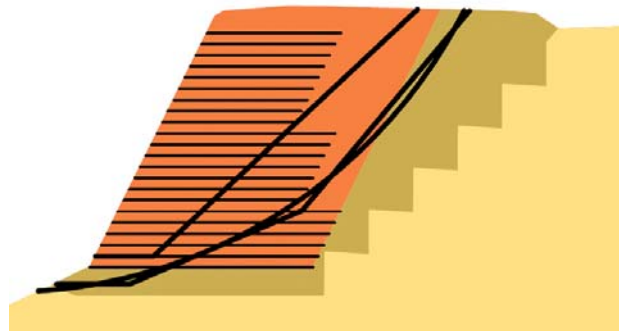
Σχήμα 5. Εργαστηριακά αποτελέσματα ανάλυσης θραύσης επίπεδης μορφής (σε δύο επιφάνειες θραύσης)

Figure 4. Results from small scale models for a translational failure mode

Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί, ότι πέραν των ανωτέρω ελέγχων, οι οποίοι περιγραφικά και μόνον παρουσιάζονται στην παρούσα, καθοριστικό παράγοντα για το σχεδιασμό των οπλισμένων επιχωμάτων έχουν οι εφαρμοζόμενοι γενικοί ή επιμέρους συντελεστές ασφαλείας. Στο πεδίο αυτό επικρατούν δύο διαφορετικές αντιλήψεις. Κατά την πρώτη εφαρμόζονται μερικοί συντελεστές ασφαλείας σε όλες τις δράσεις και τις αντιστάσεις και υπολογίζονται οι αποκαλούμενοι μερικοί συντελεστές ασφαλείας (αντιπροσωπευτική περίπτωση αποτελεί ο αγγλικός κανονισμός BS8006). Κατά τη δεύτερη προσέγγιση προσδιορίζονται γενικευμένοι συντελεστές ασφαλείας, ενώ για τα συστατικά υλικά εφαρμόζονται οι τιμές σχεδιασμού (αντιπροσωπευτική περίπτωση αποτελούν οι οδηγίες του αμερικανικού οργανισμού FHWA). Ας σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις η επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή των γεωσυνθετικών υλικών προσδιορίζεται με πειραματικά αποτελέσματα αφού ληφθούν υπόψη οι μειωτικές δράσεις που οφείλονται σε ερπυστική συμπεριφορά, σε φθορά λόγω εγκατάστασης, σε φθορά λόγω χρόνου, λόγω χημικών δράσεων κλπ. Οι συντελεστές αυτοί προσδιορίζονται εργαστηριακά από τις εταιρείες παραγωγής, ελέγχονται δε από διεθνείς οργανισμούς, οι οποίοι και εκδίδουν τα αντίστοιχα πιστοποιητικά.

Για την εφαρμογή της μεθόδου οριακής ισορροπίας στο οπλισμένο επίχωμα του

Σχήματος 1 χρησιμοποιείται το λογισμικό ReSSA version 2.0 (2006), το οποίο είναι εγκεκριμένο από τον αμερικάνικο οργανισμό FHWA για έλεγχο και διαστασιολόγηση οπλισμένων επιχωμάτων. Οι παράμετροι σχεδιασμού του προβλήματος δίνονται στον Πίνακα 1. Στο Σχήμα 6 δίνονται οι επιφάνειες θραύσης που αντιστοιχούν στους τρεις ελέγχους για στατικές συνθήκες και θεώρηση επιφανειακού φορτίου κυκλοφορίας 20 KPa. Αντίστοιχα στο Σχήμα 7 δίνονται οι ίδιες επιφάνειες για πρόσθετη σεισμική δράση αντιστοιχούσα σε συντελεστή οριζόντιας επιτάχυνσης $a_h = 0.14$ και ταυτόχρονη μείωση του κυκλοφοριακού φορτίου σε 10 kPa. Οι συντελεστές ασφαλείας και των δύο επιλύσεων δίνονται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 6. Επιφάνειες θραύσης σε στατικές συνθήκες από το λογισμικό ReSSA.

Figure 6. Failure surfaces for static conditions from code ReSSA.



Σχήμα 7. Επιφάνειες θραύσης λόγω σεισμικής δράσης από το λογισμικό ReSSA.

Figure 7. Failure surfaces for seismic action from code ReSSA.

Πίνακας 2. Συντελεστές ασφαλείας από την εφαρμογή της μεθόδου οριακής ισορροπίας

Table 2. Factors of safety resulting from the application of the limit equilibrium analysis

	Συντελεστές Ασφαλείας, F	
	Στατικές Συνθήκες	Σεισμική Δράση
Περιστροφική Θραύση	1.46	1.15
Θραύση σε τρία επίπεδα	1.36	1.06
Θραύση σε δύο επίπεδα	1.38	1.07

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

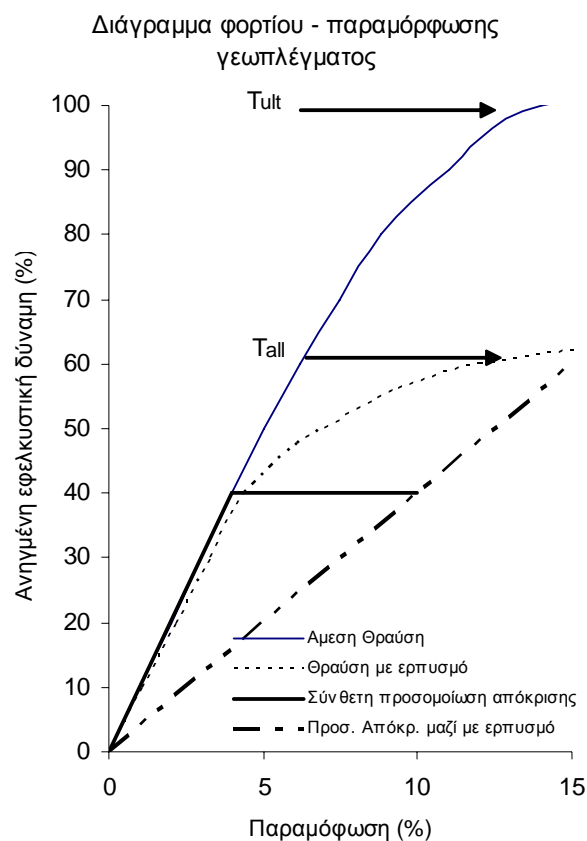
3.1 Παραδοχές - Επιλύσεις

Για λόγους σύγκρισης επιλύεται στη συνέχεια το ίδιο πρόβλημα με χρήση του προγράμματος FLAC (2005). Κατά την προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη και η ύπαρξη των συρματοκιβωτίων (διαφορετικά δεν μπορεί η λύση να οδηγηθεί σε σύγκλιση λόγω της απότομης κλίσης), μειώνεται εντούτοις η συμβολή τους έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών. Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών προσομοίωσης του προβλήματος.

Πραγματοποιείται σειρά επιλύσεων ώστε να διερευνηθούν οι επιπτώσεις από διάφορους παράγοντες. Πρωταρχική διερεύνηση αποτελεί η επίπτωση των κατασκευαστικών φάσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται επίλυση κατασκευής σε ένα και μόνο στάδιο και σε πέντε επιμέρους στάδια (Η προσομοίωση ενός σταδίου ανά τοποθέτηση πλέγματος είναι μεν ακριβέστερη, αλλά παρουσιάζει σημαντική επιβάρυνση στο υπολογιστικό κόστος). Οι επιλύσεις πραγματοποιούνται με θεώρηση μεγάλων παραμορφώσεων ώστε να αναπροσαρμόζονται οι θέσεις των στοιχείων.

Η σεισμική δράση λαμβάνεται υπόψη με περιστροφή του βαρυτικού πεδίου που αντιστοιχεί σε οριζόντια σεισμική συνιστώσα $a_h=0.14g$. Οι πρώτες αυτές επιλύσεις αντιστοιχούν στην άμεση κατασκευή του επιχώματος. Κατά τη φάση αυτή, ως επιτρεπόμενη εφελκυστική αντοχή των γεωπλεγμάτων λαμβάνεται η αντοχή θραύσης μετά από μείωση λόγω των διαφόρων συντελεστών, αλλά η δυστένεια τους αντιστοιχεί σε αυτήν της άμεσης δοκιμής θραύσης. Είναι φανερό ότι μετά από

παρέλευση μεγάλου χρονικού διαστήματος η δυστένεια μειώνεται λόγω της ερπυστικής συμπεριφοράς. Κατά συνέπεια, πραγματοποιείται δεύτερη σειρά επιλύσεων η οποία λαμβάνει υπόψη τη δράση αυτή, της οποίας ο μηχανισμός αποτυπώνεται στο Σχήμα 8. Στην έντονη γραμμή, ο πρώτος κλάδος αντιστοιχεί στην επίλυση σε άμεσο χρονικό διάστημα από την κατασκευή του οπλισμένου επιχώματος, ενώ ο δεύτερος οριζόντιος κλάδος αντιστοιχεί στη δράση του ερπυσμού. Από τη σχηματική αυτή απεικόνιση είναι κατανοητό ότι η ερπυστική δράση θα οδηγήσει σε αισθητά μεγαλύτερες παραμορφώσεις, ενώ σχετική ανακατανομή είναι επίσης δυνατόν να επέλθει στις αναλαμβανόμενες από τα γεωπλέγματα δυνάμεις, λόγω της μεταβολής του κινηματικού πεδίου.



Σχήμα 8. Απόκριση και προσομοίωση γεωπλέγματος σε αξονική φόρτιση.

Figure 8. Response and simulation of geogrid under axial loading

Για την αποτίμηση της ευαισθησίας των δύο μεθοδολογιών, τέλος πραγματοποιούνται επιλύσεις μετά από μείωση του μήκους των χαρακτηριστικών γεωπλεγμάτων, τα δε αποτελέσματα συγκρίνονται ποιοτικά και ποσοτικά.

3.2 Αποτελέσματα επιλύσεων

α. Πολυσταδιακή επίλυση

Στα Σχήματα 10 και 11 δίνονται οι ισοτιμές των οριζοντίων μετακινήσεων και των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα γεωπλέγματα από την προσομοίωση ενός σταδίου και την πολυσταδιακή αντίστοιχα, για στατικές συνθήκες και κυκλοφοριακό φορτίο 20 kPa. Από τη σύγκριση των δύο σχημάτων προκύπτει ότι οι μετακινήσεις είναι σημαντικά μικρότερες στις ανώτερες στρώσεις, δεδομένου ότι η σταδιακή προσομοίωση με παραδοχή μεγάλων παραμορφώσεων είναι σε θέση να μειώσει τις επιπτώσεις λόγω εσωτερικής καθίζησης (συνίζησης). Λόγω του γεγονότος αυτού η προσομοίωση σε πολλαπλά στάδια οδηγεί σε ελαφρά μείωση, της τάξης του 5% στην αναλαμβανόμενη από τα γεωπλέγματα δύναμη, ενώ η μείωση στα γεωπλέγματα των ανωτέρων στρώσεων είναι ποσοστιαία σημαντικά μεγαλύτερη, της τάξης του 40%, χωρίς ωστόσο να υπερβαίνει την τιμή των 5 kN. Μπορεί, κατά συνέπεια, να θεωρηθεί ότι η απλούστευση της επίλυσης με θεώρηση προσομοίωσης ενός σταδίου είναι ικανοποιητική, οι δε μετακινήσεις που προκύπτουν από την επίλυση αυτή είναι αισθητά μεγαλύτερες από την πραγματικότητα για τις ανώτερες στρώσεις.

β. Επίλυση για άμεσες και μακροχρόνιες συνθήκες

Είναι φανερό ότι κατά την κατασκευή και αμέσως μετά την ολοκλήρωση ενός οπλισμένου επιχώματος τα γεωπλέγματα δεν εμφανίζουν ερπυστική συμπεριφορά. Υπό την έννοια αυτή η απόκρισή τους κυριαρχείται από την δυστένεια που εμφανίζουν κατά την άμεση δοκιμή θραύσης (Σχήμα 8). Το ίδιο προφανώς ισχύει και για την περίπτωση σεισμικής δράσης σε άμεσο με την κατασκευή του επιχώματος χρόνο. Με την πάροδο του χρόνου, και χωρίς την επιβολή πρόσθετου φορτίου, η δυστένεια μειώνεται με αποτέλεσμα την πρόσθετη πρόκληση ανελαστικών μετακινήσεων. Τα παραπάνω απεικονίζονται σχηματικά με την έντονη τεθλασμένη γραμμή του Σχήματος 8. Για τη διερεύνηση των επιπτώσεων του φαινομένου διενεργήθηκαν αρχικά επιλύσεις που αντιστοιχούν στον ανιόντα κλάδο και εν συνεχεία στον οριζόντιο ερπυστικό κλάδο. Οι επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν τόσο για την περίπτωση στατικών συνθηκών, όσο και για

την περίπτωση σεισμικής δράσης. Στα Σχήματα 12 και 13 δίνονται τα αποτελέσματα χωρίς και με ερπυσμό αντίστοιχα για στατικές συνθήκες και σεισμική δράση αντίστοιχα. Παρατηρείται σημαντική αύξηση των οριζοντίων (ανελαστικών) μετακινήσεων (από 10 σε 22 cm), ενώ οι αναλαμβανόμενες από τα γεωπλέγματα δυνάμεις μεταβάλλονται ελαφρά άλλοτε αυξητικά και άλλοτε μειωτικά, ανάλογα με τη θέση που κατέχουν. Παρόμοια φαινόμενα παρατηρούνται και κατά την προσομοίωση της σεισμικής δράσης.

γ. Σύγκριση αποτελεσμάτων επιλύσεων με τα λογισμικά ReSSA και FLAC

Οι επιλύσεις του προβλήματος με το λογισμικό ReSSA απεικονίζονται στα Σχήματα 6 και 7, οι δε συντελεστές ασφαλείας δίνονται στον Πίνακα 2. Στο Σχήμα 10 δίνονται οι ισοτιμές των μετακινήσεων και οι δυνάμεις των γεωπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε στατικές συνθήκες και κυκλοφοριακή φόρτιση 20 kPa. Οι μέγιστες δυνάμεις εμφανίζονται στα γεωπλέγματα 2, 3, 4 και 5 και είναι της τάξης των 25 kN (με επιτρεπόμενο όριο 50 kN). Ας σημειωθεί ότι η έννοια του συντελεστή ασφαλείας στις αριθμητικές αναλύσεις μπορεί να αποδοθεί με διάφορους τρόπους και στη προκειμένη περίπτωση θα μπορούσε να προσδιορισθεί συναρτήσει της διαθέσιμης αντοχής στο γεώπλεγμα με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία καταπόνηση σε συσχέτιση με τη μέση ποσοστιαία καταπόνηση. Η διαφορά δε των δύο αυτών μεγεθών θα μπορούσε να αποτελέσει κριτήριο καλού σχεδιασμού. Για χάρη σύγκρισης εντούτοις πραγματοποιείται επίλυση προσδιορισμού του συντελεστή ασφαλείας με συνεχή μείωση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής. Στο Σχήμα 14 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της επίλυσης η οποία οδηγεί σε συντελεστή ασφαλείας $F=1.49$, ενώ οι ισοτιμές των διατμητικών παραμορφώσεων διαμορφώνουν την επιφάνεια αστοχίας, η οποία καλύπτει τις αντίστοιχες περιοχές των επιφανειών αστοχίας που καθορίζονται από τις επιλύσεις με το λογισμικό ReSSA.

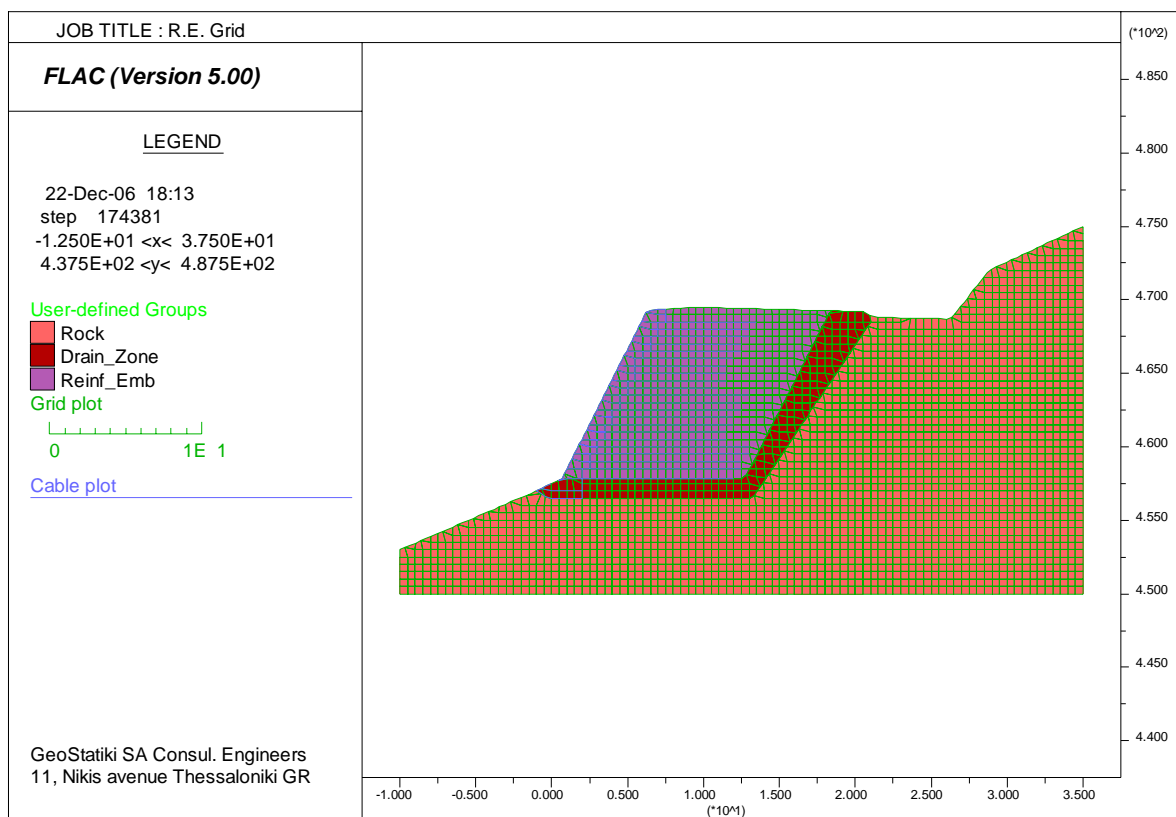
Στο Σχήμα 15 δίνονται οι ισοτιμές των μετακινήσεων και οι δυνάμεις των γεωπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε σεισμική δράση, η οποία εισάγεται με περιστροφή του πεδίου βαρύτητας. Οι μέγιστες δυνάμεις εμφανίζονται στα γεωπλέγματα 1 έως 5 και είναι της τάξης των 40 kN (με επιτρεπόμενο όριο 50 kN). Η επίλυση προσδιορισμού

συντελεστή ασφαλείας οδηγεί σε τιμή $F = 1.10$, ενώ οι ισοτιμές των διατμητικών παραμορφώσεων αντιστοιχίζονται και πάλι με τις επιφάνειες αστοχίας που προσδιορίζονται από το λογισμικό ReSSA.

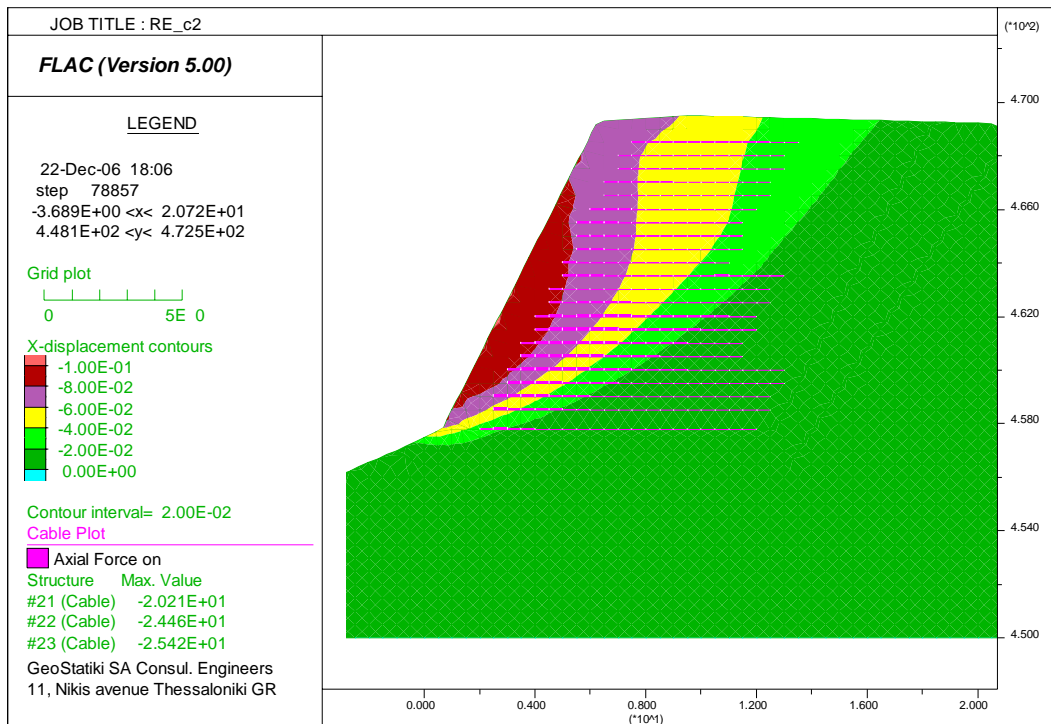
δ. Ανάλυση ευαισθησίας των λογισμικών ReSSA και FLAC

Κατά τη συγκριτική αυτή ανάλυση μειώνεται το μήκος των γεωπλεγμάτων N° 7 έως 13 από 8 σε 6 μέτρα και το πρόβλημα επιλύεται εκ νέου με τη χρήση των δύο ανωτέρω λογισμικών για την περίπτωση σεισμικής δράσης. Στο Σχήμα 16 απεικονίζονται οι επιφάνειες θραύσης που αντιστοιχούν σε

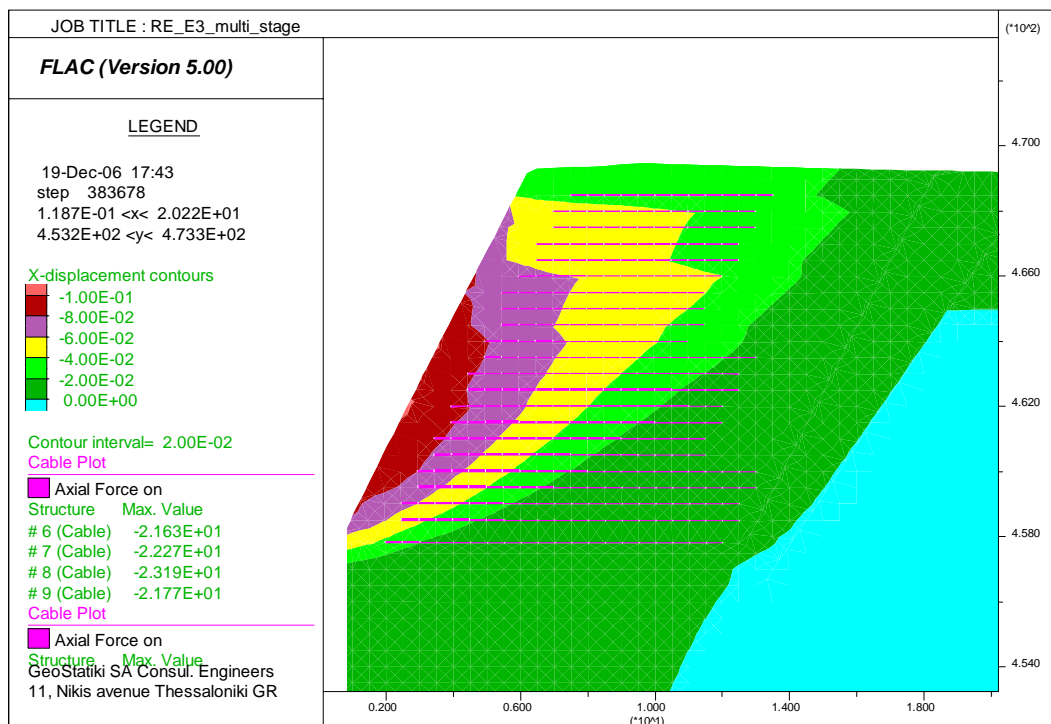
περιστροφικού τύπου αστοχία, και σε μεταθετικού τύπου αστοχία προσδιοριζόμενη από δύο και τρία επίπεδα. Οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν είναι ίσοι με 1.04, 0.95 και 0.97, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 17 απεικονίζεται η επίλυση του προγράμματος FLAC. Ειδικότερα δίνονται και οι ισοτιμές των οριζοντίων μετακινήσεων και οι δυνάμεις των γεωπλεγμάτων. Οι μετακινήσεις μαρτυρούν την εκδήλωση θραύσης ενώ τα γεωπλέγματα N° 2 έως 5 βρίσκονται σε διαρροή. Η επιφάνεια διαρροής που προκύπτει από την επίλυση του λογισμικού FLAC αντιστοιχεί με αυτές που προκύπτουν από το λογισμικό ReSSA.



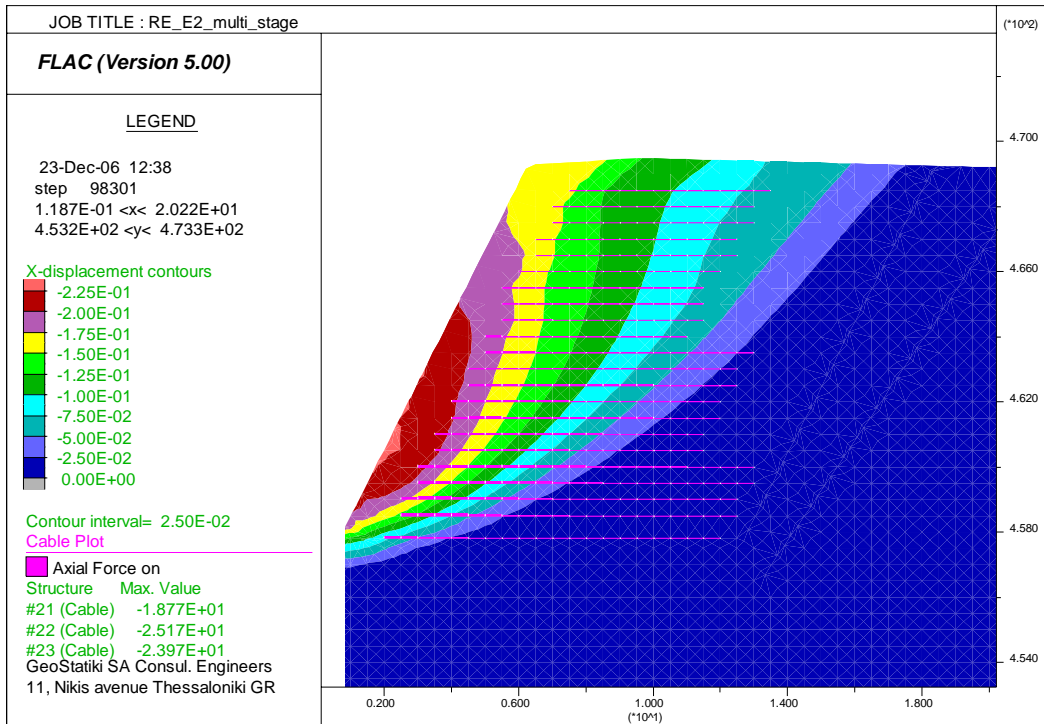
Σχήμα 9. Πλέγμα πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση του προβλήματος
Figure 9. Finite difference mesh



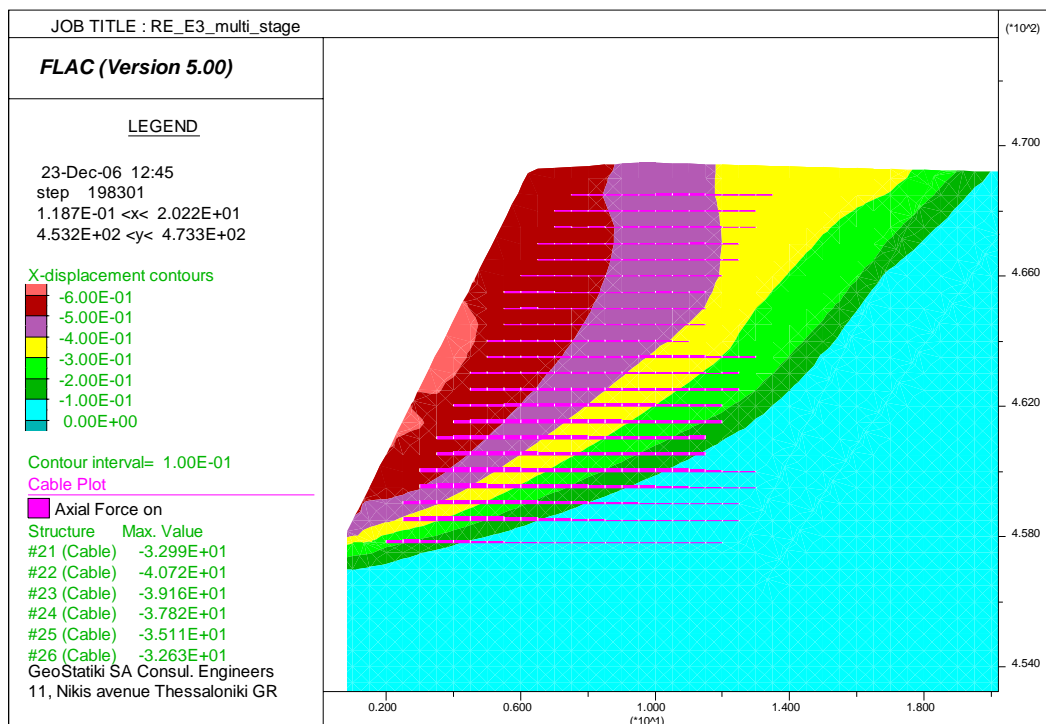
Σχήμα 10. Πεδίο οριζοντίων μετακινήσεων και αξονικών δυνάμεων γεωπλεγμάτων με ανάλυση ενός σταδίου
 Figure 10. Horizontal displacement field and axial forces of geogrids with a single stage analysis



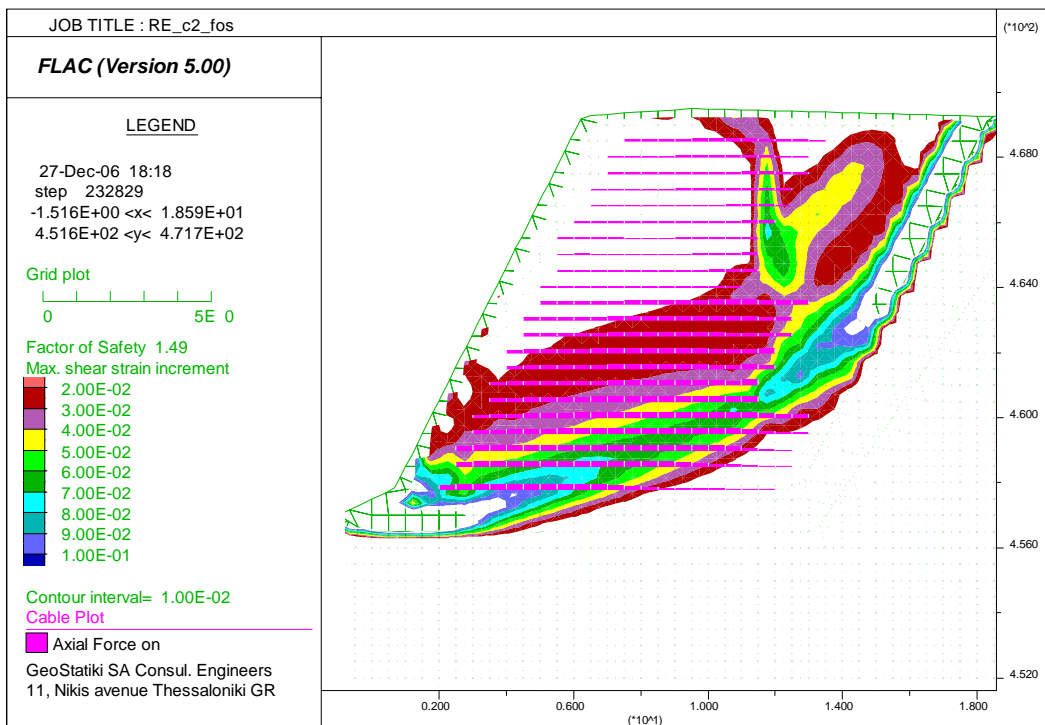
Σχήμα 11. Πεδίο οριζοντίων μετακινήσεων και αξονικών δυνάμεων γεωπλεγμάτων με πολυσταδιακή ανάλυση
 Figure 11. Horizontal displacement field and axial forces of geogrids with multi-stage analysis



Σχήμα 12. Πεδίο οριζοντίων μετακινήσεων και αξονικών δυνάμεων γεωπλεγμάτων, ανάλυση με ερπυσμό σε στατικές συνθήκες
Figure 12. Horizontal displacement field and axial forces of geogrids, creep effect under static conditions

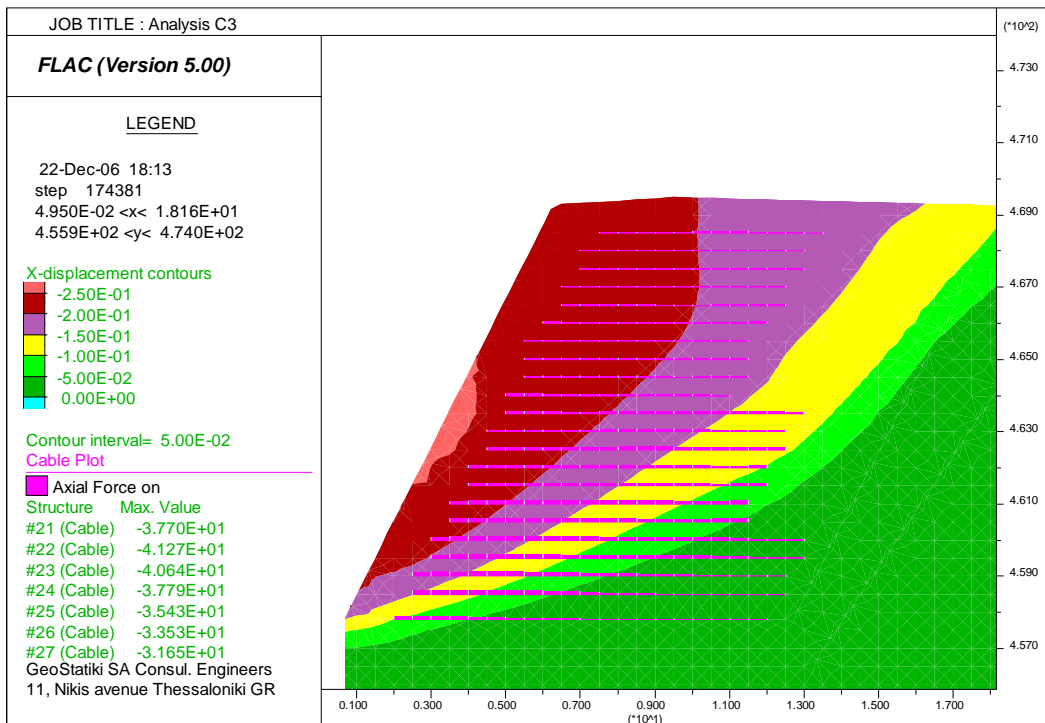


Σχήμα 13. Πεδίο οριζοντίων μετακινήσεων και αξονικών δυνάμεων γεωπλεγμάτων, ανάλυση με ερπυσμό και σεισμική δράση
Figure 13. Horizontal displacement field and axial forces of geogrids, creep effect under seismic action



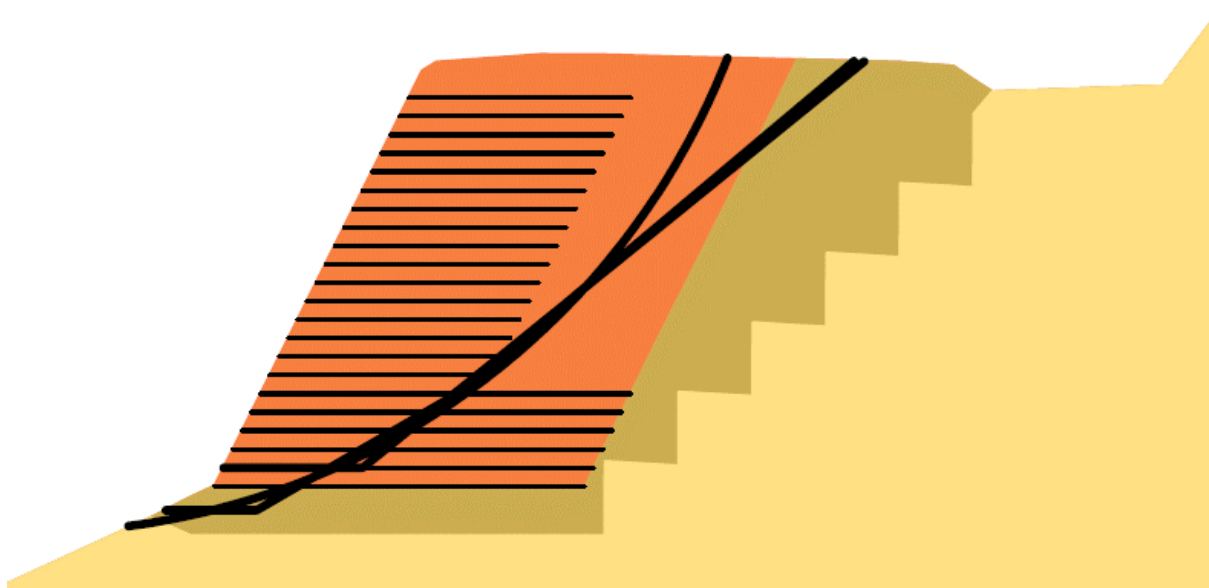
Σχήμα 14. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης προσδιορισμού συντελεστή ασφαλείας σε στατικές συνθήκες

Figure 14. Presentation of results resulting from a factor of safety assignment analysis under static conditions

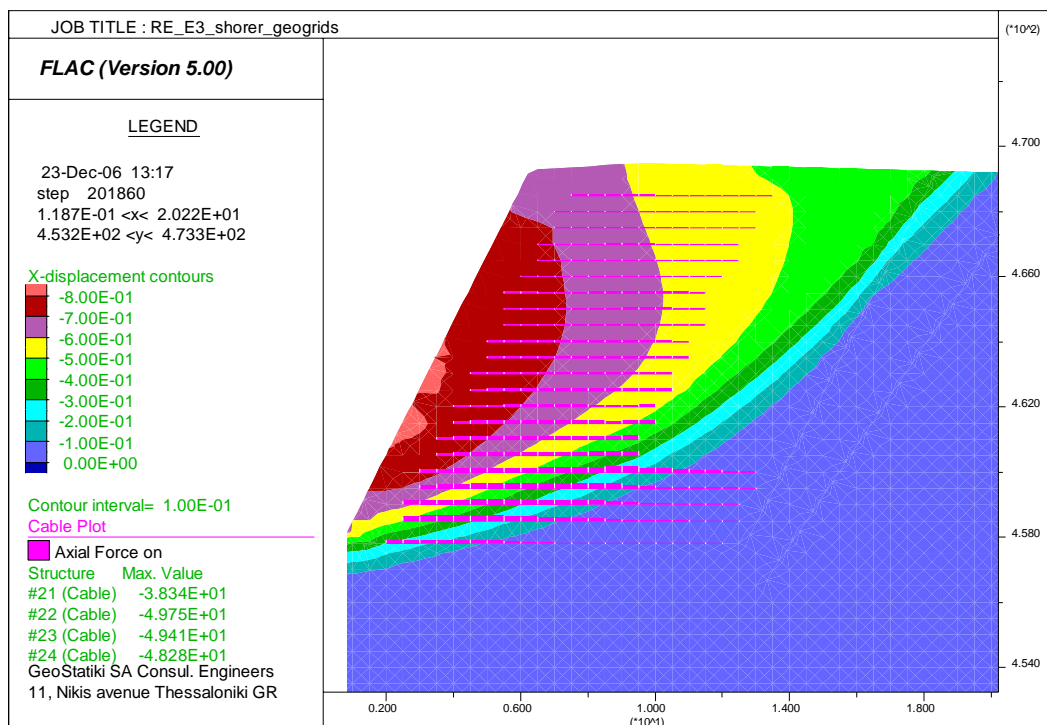


Σχήμα 15. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης σε σεισμική δράση

Figure 15. Presentation of results resulting from analysis under seismic action



Σχήμα 16. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης με μειωμένο μήκος γεωπλεγμάτων, ReSSA
 Figure 16. Presentation of results from an analysis with shortened geogrids, ReSSA



Σχήμα 17. Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης με μειωμένο μήκος γεωπλεγμάτων, FLAC
 Figure 17. Depiction of results from an analysis with shortened geogrids, FLAC

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο του παρόντος άρθρου απετέλεσε η σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάλυσης οπλισμένου επιχώματος με τη μεθοδολογία οριακής ισορροπίας και αριθμητικής ανάλυσης. Για το σκοπό αυτό επιλύθηκε οπλισμένο επίχωμα ύψους 14 μέτρων σε στατικές συνθήκες και σεισμική δράση. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις προσομοίωσης της κατασκευής σε ένα και μόνο στάδιο και σε πολλαπλά. Αποτιμήθηκαν επίσης οι επιπτώσεις της ερπυστικής συμπεριφοράς.

Ειδικότερα παρατηρείται ότι, παρόλο που η πολυσταδιακή ανάλυση είναι πιο ακριβής, η απλουστευτική εφαρμογή της προσομοίωσης σε ένα και μόνο στάδιο οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα διαστασιολόγησης για επιχώματα αυτού του μεγέθους. Από την διερεύνηση των επιπτώσεων της ερπυστικής συμπεριφοράς παρατηρείται σημαντική επαύξηση των κινηματικών μεγεθών, ενώ οι αναλαμβανόμενες από τα γεωπλέγματα δυνάμεις μικρές και μόνο μεταβολές παρουσιάζουν, οι οποίες θα πρέπει να αποδοθούν σε τοπικές ανακατανομές.

Η σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας που προκύπτουν από τις επιλύσεις της οριακής ισορροπίας και από την αριθμητική ανάλυση με σταδιακή μείωση των παραμέτρων διατμητικής αντοχής οδηγεί σε συγκρίσιμα αποτελέσματα, ενώ και οι επιφάνειες θραύσης ακολουθούν παρόμοια διαδρομή. Μπορεί ακόμη να ειπωθεί ότι οι επιλύσεις της αριθμητικής ανάλυσης εμπεριέχουν όλες τις αντίστοιχες της οριακής ισορροπίας. Ας σημειωθεί εντούτοις ότι τούτο παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου οι κατά την μέθοδο οριακής ισορροπίας συντελεστές έχουν παραπλήσιες τιμές.

Από τις αναλύσεις επίσης προκύπτει ότι η μέθοδος της οριακής ισορροπίας, η οποία τυγχάνει ευρείας εφαρμογής λόγω της απλότητας και της συσσωρευμένης εμπειρίας που τη συνοδεύει, είναι σε θέση να οδηγήσει σε ικανοποιητική διαστασιολόγηση οπλισμένων επιχωμάτων. Η χρήση αριθμητικών μεθόδων σε αντιπαραβολή, εμφανίζει σαφή πλεονεκτήματα

αναφορικά με την πρόβλεψη εντατικών και κινηματικών μεγεθών, την κατανόηση των αναπτυσσόμενων μηχανισμών σε ειδικά προβλήματα. Παρέχουν επίσης τη δυνατότητα προσδιορισμού και ενίσχυσης περιοχών με τοπική ευπάθεια και βελτίωση της απόκρισης και του βαθμού ασφαλείας με το μικρότερο δυνατό κόστος. Σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η σημαντική αύξηση του υπολογιστικού κόστους, το οποίο καθιστά ενδιαφέρουσα την εφαρμογή της μεθόδου μόνον σε ειδικές περιπτώσεις και σε περίπλοκες γεωμετρίες.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Blatz J.A. & Bathurst R.J. (2003), 'Limit equilibrium analysis of large-scale reinforced and unreinforced embankments loaded by a strip footing' *Can. Geot. J.*, Vol. 40, pp. 1084-1092.
- British Standard 8006 (1995), 'Code of practice for strengthened – reinforced soils and other fills', U.K.
- Koerner, R.M. (1998), 'Designing with geosynthetics' 4th edition, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NY.
- FHWA–NHI (2001), 'Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes – Design and construction guidelines', Report 00-043, USA.
- Elias V. & Christopher B. R. (1997), 'Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Steep Slopes: Design and construction guidelines', Report No FHWA-SA-96-071, FHWA Demonstration Project 82.
- Itasca Consulting Group Inc. FLAC (2005): *Fast Lagrangian Analysis of Continua. User's Manuals version 5.0*
- Leshchinsky D. (1997), 'Design Procedure for Geosynthetic Reinforced Steep Slopes', Technical Report REMR-GT-23, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers.
- Re.S.S.A. (2006), 'Reinforced and unreinforced Slope Stability Analysis', Ver. 2.0, ADAMA Engineering Inc., USA.