



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ
ΠΡΑΝΟΥΣ ΣΕ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΠΗΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

υπό

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ
ΚΥΡΙΑΖΟΠΟΥΛΟΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2019

© 2019 Ελευθερίου Δημήτριος και Κυριαζόπουλος Φίλιππος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ανήκουν αποκλειστικά στους συγγραφείς και δεν εκφράζουν επίσημη άποψη της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων της Περιφερειακής Ενότητας Μαγνησίας και Σποράδων.

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης
(Επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου

Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Θεοφάνης Γραμμένος

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, τη Λέκτορα κ. Πολυξένη Καλλιόγλου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Θεοφάνη Γραμμένο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Επιπροσθέτως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την Περιφερειακή ενότητα Μαγνησίας και Σποράδων, και πιο συγκεκριμένα τη Διεύθυνση Τεχνικών Έργων για την παραχώρηση δεδομένων που ήταν αναγκαία για την εκπόνηση της εργασίας. Ακόμη, θα θέλαμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στις οικογένειες μας, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης πρανούς σε περιοχή του

Πηλίου με χρήση αριθμητικών μεθόδων

Ελευθερίου Δημήτριος, Κυριαζόπουλος Φίλιππος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γεώργιος Εφραιμίδης, Επίκουρος Καθηγητής

Παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης πρανούς σε περιοχή του Πηλίου με χρήση αριθμητικών μεθόδων

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η παραμετρική διερεύνηση κατολίσθησης πρανούς σε περιοχή του Πηλίου με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα ευστάθειας και μελετούνται οι πιθανοί μηχανισμοί που οδηγούν στην αστοχία φυσικού πρανούς που έλαβε χώρα στο νομό Μαγνησίας και συγκεκριμένα κατά μήκος επιμέρους τμήματος της επαρχιακής οδού Αγριάς – Δράκεια.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, έγινε η προσομοίωση της κατολίσθησης, με τα γεωτεχνικά προγράμματα Phase2 και Slide της εταιρίας Rocscience. Οι μηχανικές και οι γεωλογικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν, λήφθηκαν με τη βοήθεια της Διεύθυνσης Τεχνικών Έργων της Περιφερειακής Ενότητας Μαγνησίας και Σποράδων της Περιφέρειας Θεσσαλίας, από τη γεωτεχνική μελέτη "Μελέτη πασσαλότοιχου στη Χ.Θ. 4+500 της Ε.Ο. Αγριάς – Δρακειάς στη θέση «Βαγόني»" που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή καθώς και από τη βιβλιογραφία.

Στα πρώτα κεφάλαια παρουσιάζεται η βασική θεωρία η οποία είναι απαραίτητη για την κατανόηση και τη διερεύνηση του φαινομένου της κατολίσθησης και όλα τα στοιχεία της υπό εξέταση διατομής στην περιοχή μελέτης. Παρουσιάζεται η τεκτονική της περιοχής, η στρωματογραφία των γεωλογικών σχηματισμών και οι γεωτεχνικές παράμετροι του κάθε γεωολικού που συναντάται στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, περιγράφονται στοιχεία για τις υδρολογικές συνθήκες και τη σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής.

Στη συνέχεια προσομοιώνεται το πρανές και τοποθετούνται τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης. Έπειτα γίνονται αναλύσεις ευστάθειας και ευαισθησίας για στατικές και σεισμικές συνθήκες σύμφωνα με τον ΕΑΚ. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν.

Parametric investigation of a landslide in Pelion area using numerical methods

Abstract

In the present diploma thesis, the parametric investigation of a landslide in Pelion area using numerical methods is performed. Several slope stability models are presented and the possible failure mechanisms of a natural slope that took place in the prefecture of Magnesia and specifically along a part of the provincial road Agria – Drakeia, are analyzed.

The landslide simulation was performed by using Phase2 and Slide, two geotechnical programs of Rocscience. The mechanical and geological parameters used were taken from the geotechnical study "Study of Retaining wall at 4 + 500 Km. part of Agia - Drakia in the position «Vagoni»" that carried out in the field as well as from bibliography.

In the first chapters we present the basic theory which is necessary for the understanding and investigation of this landslide event and all the elements of the cross section under consideration in the study area. Namely, we present the tectonics of the area, the stratigraphy of the geological formations and the geotechnical parameters of each geomaterial exists in the study area. In addition, data from the hydrological conditions and the seismicity of the surrounding area are described.

Afterwards the slope is simulated where the proposed support measures are placed. Stability and sensitivity analysis are then performed, for static and seismic conditions according to the Greek Seismic Code (2000). Finally, the results and conclusions that emerged from the analysis are presented.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Κίνητρο και Υπόβαθρο	1
1.2	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2	Κατολισθήσεις	3
2.1	Χαρακτηριστικά Κατολίσθησης.....	3
2.2	Ταξινόμηση Κατολισθήσεων.....	5
2.2.1	Καταπτώσεις	6
2.2.2	Ανατροπές	8
2.2.3	Ολισθήσεις	9
2.2.4	Πλευρικές Επεκτάσεις.....	11
2.2.5	Ροές	12
2.2.6	Σύνθετες Μετακινήσεις Πρανών.....	12
2.3	Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα μετακίνησης.....	13
2.4	Αιτίες Κατολισθήσεων.....	14
Κεφάλαιο 3	Ευστάθεια Πρανών.....	19
3.1	Μορφές Αστοχίας βραχυδών πρανών	20
3.1.1	Επίπεδη Ολίσθηση	22
3.1.2	Σφηνοειδής Ολίσθηση.....	24
3.1.3	Ανατροπή	25
3.1.4	Κυκλική ή Περιστροφική Αστοχία	27
Κεφάλαιο 4	Στοιχεία Γεωλογικής - Γεωτεχνικής έρευνας	36
4.1	Γεωμορφολογία Περιοχής Έργου	36
4.2	Γεωλογικά Στοιχεία Ευρύτερης Περιοχής Έργου	41
4.3	Κλιματολογικά Στοιχεία Περιοχής Έργου.....	50
4.4	Υδρογεωλογικά Στοιχεία Ευρύτερης Περιοχής Έργου	52
4.5	Στοιχεία Σεισμικότητας.....	52
Κεφάλαιο 5	Γεωτεχνικά Προγράμματα	54
5.1	Γεωτεχνικό πρόγραμμα Phase2.....	54
5.1.1	Απομείωση διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction - SSR)	56
5.1.2	Συντελεστής Αντοχής (Strength Factor)	57
5.1.3	Ολικές Μετατοπίσεις (Total displacement)	58
5.1.4	Yielded elements	59
5.2	Slide v.6.0	59
Κεφάλαιο 6	Αναλύσεις Ευστάθειας Πρανούς	61

6.1	Βασικό μοντέλο.....	62
6.1.1	Απλοποιημένο Μοντέλο	64
6.1.2	Μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών	68
6.1.3	Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς τη κλίση του πρανούς και παρουσία νερού.	76
6.1.4	Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς την κλίση του πρανούς, παρουσία νερού και σεισμικό φορτίο-1	80
6.1.5	Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς την κλίση του πρανούς, παρουσία νερού και σεισμικό φορτίο-2	84
6.2	Συντελεστές Ασφαλείας.....	87
6.3	Αναλύσεις ευαισθησίας.....	92
6.3.1	Ανάλυση ευαισθησίας σε απλοποιημένο μοντέλο	93
6.3.2	Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων με τη κλίση του πρανούς.....	98
6.3.3	Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανούς και νερό	102
6.3.4	Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανούς, νερού και σεισμικού φορτίου 1	107
6.3.5	Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανούς, νερού και σεισμικού φορτίου 2	112
6.4	Συντελεστές Ασφαλείας.....	117
Κεφάλαιο 7 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης		122
7.1	Ανάλυση με τα μέτρα υποστήριξης.....	123
Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα		126
Βιβλιογραφία.....		128

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1 Σύντομη ταξινόμηση των κατολισθητικών κινήσεων [9].	6
Πίνακας 2-2 Ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα και πιθανές επιπτώσεις [10].	13
Πίνακας 2-3. Παράγοντες που προκαλούν την εκδήλωση κατολισθήσεων [13].	18
Πίνακας 4-1. Βάθος εντοπισμού γεωλογικών σχηματισμών, περιγραφή, κατάταξη κατά U.S.C.S. και μέσες τιμές εργαστηριακών αποτελεσμάτων των δειγμάτων που λήφθηκαν από τη γεώτρηση Γ-1, [6].	42
Πίνακας 4-2. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.	43
Πίνακας 4-3. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.	44
Πίνακας 4-4. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.	44
Πίνακας 4-5 Αντιπροσωπευτικές τιμές υπολογισμού βάσει του δείκτη GSI των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού των σχιστολίθων.	49
Πίνακας 4-6 Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού τεχνικογεωλογικής ενότητας των μαλακών σχιστολίθων.	50
Πίνακας 4-7. Προσδιορισθείσες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έκαστου στρώματος. ..	50
Πίνακας 6-1. Συντελεστές Ασφαλείας (Σ.Α.) για το απλοποιημένο μοντέλο	88
Πίνακας 6-2. Σ.Α για μοντέλο με νερό.	89

Πίνακας 6-3. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1.....	90
Πίνακας 6-4. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2.....	91
Πίνακας 6-5. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1.....	118
Πίνακας 6-6. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1.....	119
Πίνακας 6-7. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2.....	120
Πίνακας 6-8. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2.....	121
Πίνακας 7-1. Σ.Α για μοντέλο με νερό σεισμό τύπου 1 και αγκυρώσεις.....	124

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2-1. Κύρια χαρακτηριστικά τυπικής κατολίσθησης [9].	5
Εικόνα 2-2. Καταπτώσεις βράχων [9].	7
Εικόνα 2-3. Περιπτώσεις ανατροπών [4].	9
Εικόνα 2-4. α) Περιτροφική ολίσθηση βράχων, β) Μεταθετική ολίσθηση γαιών [9].	10
Εικόνα 2-5. Πλευρική επέκταση βράχων [9].	11
Εικόνα 2-6. α) - β) ροή κορημάτων, γ) ροή γαιών, δ) ροή άμμου ιλύος [4].	12
Εικόνα 2-7. Σχηματική απεικόνιση δυνάμεων σε ένα πρανές [4].	14
Εικόνα 2-8. Παράδειγμα μεταβολής συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τον χρόνο [13].	15
Εικόνα 3-1. Μηχανισμοί εκδήλωσης αστοχιών σε βραχώδεις σχηματισμούς. [24].	21
Εικόνα 3-2. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε επίπεδη αστοχία [4].	24
Εικόνα 3-3. Βραχώδεις πρανές σε σφηνοειδή αστοχία [25].	25
Εικόνα 3-4. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε ανατροπή [4].	26
Εικόνα 3-5. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε περιστροφική αστοχία (μικρού βάθους) [4].	27
Εικόνα 3-6. Σκαρίφημα μεθόδου λωρίδων. [14].	29
Εικόνα 3-7. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Fellenius [5].	31
Εικόνα 3-8. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Bishop [5].	33
Εικόνα 3-9. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Janbu [5].	34
Εικόνα 4-1: Τοποθεσία κατολίσθησης, Συντεταγμένες (39.352183, 23.039863), [21].	37
Εικόνα 4-2: Περιοχή κατολίσθησης, [6].	38

Εικόνα 4-3: Βραχώδης Πρανές. [6].....	38
Εικόνα 4-4: Φυτοκάλυψη Πρανούς, [21].	39
Εικόνα 4-5: Αστοχία τοίχου αντιστήριξης, [21].....	39
Εικόνα 4-6: Ασυνέχειες Πρανούς, [21].	40
Εικόνα 4-7: Κλίση Ασυνεχειών Πρανούς, [21].....	40
Εικόνα 4-8: Γεωλογική αποτύπωση της περιοχής μελέτης [6].	41
Εικόνα 4-9: Το κλιματόγραμμα Emberger – Sauvage [22].....	51
Εικόνα 4-10.Διάγραμμα Βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης[20]	51
Εικόνα 4-11: Χάρτης κατολισθητικής επικινδυνότητας [8].....	52
Εικόνα 6-1. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.	64
Εικόνα 6-2. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,230083 m..	65
Εικόνα 6-3. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	65
Εικόνα 6-4. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.	66
Εικόνα 6-5. Συντελεστής αντοχής	66
Εικόνα 6-6. Γεωμετρία Πρανούς – Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.....	68
Εικόνα 6-7. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,121379m...	69
Εικόνα 6-8. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	69
Εικόνα 6-9. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	70
Εικόνα 6-10. Συντελεστής αντοχής	70
Εικόνα 6-11. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.	72

Εικόνα 6-12. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,006781m.	73
Εικόνα 6-13. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	73
Εικόνα 6-14. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	74
Εικόνα 6-15. Συντελεστής αντοχής.....	74
Εικόνα 6-16. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί -τόπου τάσεων.....	76
Εικόνα 6-17. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,32294m...	77
Εικόνα 6-18. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	77
Εικόνα 6-19. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	78
Εικόνα 6-20. Συντελεστής αντοχής.....	78
Εικόνα 6-21. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων – Σεισμική φόρτιση-1. .	80
Εικόνα 6-22. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,53806m...	81
Εικόνα 6-23. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	81
Εικόνα 6-24. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	82
Εικόνα 6-25. Συντελεστής αντοχής.....	82
Εικόνα 6-26. Γεωμετρία Πρανούς – Συντελεστής επί-τόπου τάσεων – Σεισμική φόρτιση -	284
Εικόνα 6-27. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,50577m...	85
Εικόνα 6-28. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	85
Εικόνα 6-29. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	86
Εικόνα 6-30. Συντελεστής αντοχής.....	86
Εικόνα 6-31.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	88

Εικόνα 6-32.Εξαγωγή Σ.Α με μέθοδο Bishop – Διεύθυνση τάσεων.....	89
Εικόνα 6-33. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Spencer	90
Εικόνα 6-34.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο GLE	91
Εικόνα 6-35.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο GLE	92
Εικόνα 6-36. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,5164m.	93
Εικόνα 6-37. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	94
Εικόνα 6-38. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	94
Εικόνα 6-39. Συντελεστής αντοχής.....	95
Εικόνα 6-40. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,185295m. 96	
Εικόνα 6-41. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	96
Εικόνα 6-42. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	97
Εικόνα 6-43. Συντελεστής αντοχής.....	97
Εικόνα 6-44. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,121976m. 98	
Εικόνα 6-45. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	99
Εικόνα 6-46. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	99
Εικόνα 6-47. Συντελεστής αντοχής.....	100
Εικόνα 6-48. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων.	101
Εικόνα 6-49. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	101
Εικόνα 6-50. Συντελεστής αντοχής.....	102
Εικόνα 6-51. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,41987m. 103	

Εικόνα 6-52. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	103
Εικόνα 6-53. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	104
Εικόνα 6-54. Συντελεστής αντοχής.....	104
Εικόνα 6-55. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,273012m.	105
Εικόνα 6-56. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	106
Εικόνα 6-57. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	106
Εικόνα 6-58. Συντελεστής αντοχής.....	107
Εικόνα 6-59. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,34129m.	108
Εικόνα 6-60. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	108
Εικόνα 6-61. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	109
Εικόνα 6-62. Συντελεστής αντοχής.....	109
Εικόνα 6-63. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0.59899m.	110
Εικόνα 6-64. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	111
Εικόνα 6-65. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	111
Εικόνα 6-66. Συντελεστής αντοχής.....	112
Εικόνα 6-67. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,33052m.	113
Εικόνα 6-68. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	113
Εικόνα 6-69. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	114
Εικόνα 6-70. Συντελεστής αντοχής.....	114

Εικόνα 6-71. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0.28529m.	115
Εικόνα 6-72. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.....	116
Εικόνα 6-73. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.....	116
Εικόνα 6-74. Συντελεστής αντοχής.....	117
Εικόνα 6-75.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	118
Εικόνα 6-76.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	119
Εικόνα 6-77.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Janbu.....	120
Εικόνα 6-78. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	121
Εικόνα 7-1. Μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών, νερού, σεισμό τύπου 1 και αγκύρια.....	123
Εικόνα 7-2. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	124
Εικόνα 7-3. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.....	125

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με τη δομή και το υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της.

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Η γεωλογική δομή της Ελλάδας χαρακτηρίζεται από δεδομένη στρωματογραφική διαδοχή των ιζημάτων της, από σύνθετους λιθολογικούς τύπους γεωυλικών και από την ιδιαίτερη τεκτονική της συμπεριφορά, στοιχεία γενικά που σχετίζονται με την παλαιογεωγραφική της θέση. Έτσι παρουσιάζει μία σύνθετη γεωλογική δομή με μεγάλη ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών. Αυτό καθιστά την Ελλάδα μια χώρα με μεγάλη αναγκαιότητα στη λεπτομερή μελέτη της γεωλογίας της τόσο για την ασφαλή θεμελίωση κατασκευών όσο και για την πρόβλεψη φυσικών γεωκινδύνων αλλά και για την σωστή εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων της. Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική μελέτη με χρήση αριθμητικών μεθόδων μιας περίπτωσης κατολίσθησης, στο τμήμα της επαρχιακής οδού Αγριάς-Δράκειας, στην περιοχή του Πηλίου.

1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε τρεις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 έως 7, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση σχετικά με τα χαρακτηριστικά και την ταξινόμηση των κατολισθήσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο, αναφέρεται στην ευστάθεια των πρανών. Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο όπου περιγράφεται το γεωλογικό περιβάλλον και η δομή της βραχώμαζας (αποσάθρωση, κερματισμός), καθώς και η γεωλογία της περιοχής – μελέτης, οι γεωμορφολογικές συνθήκες, τα κλιματολογικά στοιχεία, τα υδρογεωλογικά στοιχεία και η σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται συνοπτική περιγραφή των προγραμμάτων Phase2 και Slide και αναφέρονται οι βασικές αρχές της λειτουργίας τους. Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις αναλύσεις ευστάθειας για τα πρανή που μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν και τα δεδομένα που προέκυψαν από τη χρήση των παραπάνω λογισμικών. Παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις οι κατανομές των μετατοπίσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στα πρανή, οι συντελεστές αντοχής των πρανών, καθώς και οι συντελεστές ασφάλειας στις κρίσιμες επιφάνειες ολίσθησης. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται πιθανά μέτρα αντιστήριξης για τη διασφάλιση της ευστάθειας του πρανού και τέλος, ακολουθεί το κεφάλαιο με τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2 Κατολισθήσεις

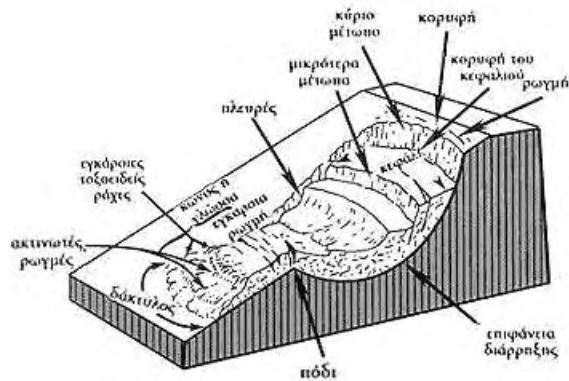
Ο όρος κατολίσθηση αποτελεί ένα γεωλογικό φαινόμενο που περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μετακινήσεων της μάζας του εδάφους (ή βράχου), όπως πτώσεις, ολισθήσεις, ανατροπές και ροές. Επιπλέον, το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει όχι μόνο στην ξηρά αλλά και μέσα σε λίμνες, ταμιευτήρες φραγμάτων και θάλασσες. Με την γενική έννοια του όρου, κατολίσθηση είναι κάθε αλλαγή μεγάλη ή μικρή της επιφάνειας μια κλιτύος, συνοδευόμενη από μετακίνηση υλικού, με ρήξη ή όχι της συνέχειας της, αργή ή ξαφνική που προέρχεται κυρίως από δυνάμεις βαρύτητας (αλλά και υδροστατικές δυνάμεις, σεισμικά φορτία κλπ.) και εμφανίζεται σε τεχνικά ή φυσικά πρανή. Η κατολίσθηση εκφράζει το αποτέλεσμα αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας της κατολισθαίνουσας μάζας (εδαφικής ή βραχώδους) και είναι δυνατή η ανθρώπινη επέμβαση για την αποτροπή ή επιβράδυνση του φαινομένου [1].

2.1 Χαρακτηριστικά Κατολίσθησης

Τα χαρακτηριστικά (γεωμετρικά και μορφολογικά) μιας κυκλικής κατολίσθησης κατά Cruden and Varnes (1996) είναι τα εξής [10]:

- **Το κυρίως μέτωπο:** Είναι η απότομη επιφάνεια που δημιουργείται στο αδιατάρακτο γεωολικό γύρω από την περιφέρεια της μετακίνησης.

- **Δευτερεύοντα μέτωπα:** Είναι απότομες επιφάνειες στο εσωτερικό του υλικού που μετατοπίστηκε και η οποία προκύπτει από διαφορετικές κινήσεις μέσα στη μάζα που ολισθαίνει.
- **Κεφαλή:** Βρίσκεται στην κορυφή της κατολίσθησης και αποτελείται από τα ανώτερα τμήματα των γεωυλικών που κατολίσθησαν.
- **Πόδας** της κατολίσθησης είναι το ακραίο, χαμηλότερο συνήθως τμήμα του κώνου .
- **Δάκτυλος:** Το τμήμα των υλικών που έχουν κατολισθήσει στη μεγαλύτερη απόσταση από το κύριο μέτωπο της κατολίσθησης.
- **Κορυφή:** Το ουσιαστικά αδιατάρακτο υλικό που βρίσκεται στα ψηλότερα σημεία του κύριου μετώπου.
- **Στέψη:** Το ουσιαστικά αμετακίνητο υλικό που γειτονεύει με τα υψηλότερα σημεία της κύριας ουλής.
- **Επιφάνεια διάρρηξης:** Είναι η επιφάνεια αποχωρισμού των υλικών που κατολισθαίνουν από το σταθερό υπόβαθρο.
- **Η επιφάνεια ολισθήσεως:** Είναι η επιφάνεια πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα ή μετακίνηση των μαζών που κατολίσθησαν.
- **Ο κώνος ή σωρός της κατολίσθησης:** Σχηματίζεται από τη συσσώρευση των γεωυλικών, τα οποία αφού μετακινήθηκαν κατά μία διαδρομή, σταμάτησαν και συγκεντρώθηκαν στη θέση στην οποία η κινητική ενέργεια μηδενίστηκε, δηλαδή στο κάτω μέρος του σώματος της κατολίσθησης.



Εικόνα 2-1. Κύρια χαρακτηριστικά τυπικής κατολίσθησης [9].

Στην εικόνα 2-1 απεικονίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά μιας τυπικής κυκλικής κατολίσθησης.

2.2 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων

Η ταξινόμηση των κατολισθήσεων θεωρείται ένα αρκετά δύσκολο έργο λόγω του γεγονότος ότι πρόκειται για ένα φυσικό πολυπαραγοντικό φαινόμενο. Κατά καιρούς διάφοροι επιστημονικοί κλάδοι έχουν αναπτύξει μοντέλα για την περιγραφή και την ταξινόμηση των κατολισθήσεων, που στηρίζονται σε ποικίλα κριτήρια, με αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών διαφοροποιημένων συστημάτων ταξινόμησης. Παρόλα αυτά στις μέρες οι σημαντικότερες ταξινομήσεις που συναντάμε στα βιβλία είναι αυτές που προτάθηκαν από τον Varnes [9],[10].

Ο Varnes εισήγαγε τη πρώτη του ταξινόμηση το 1978 όπου διαχώρισε τις εδαφικές μετακινήσεις στις αρχικές τους μορφές οι οποίες ήταν οι πτώσεις, οι ολισθήσεις, οι ροές και οι εκτάσεις. Ωστόσο, ύστερα από λεπτομερείς αναλύσεις και βελτιώσεις πήρε την τελική της μορφή και μπορεί να περιγραφεί και να ταξινομηθεί με βάση δυο βασικά κριτήρια [9],[10]:

- **Κριτήριο 1 - Ο τύπος της μετακίνησης.** Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, οι κατολισθήσεις διακρίνονται σε καταπτώσεις, ανατροπές, ολισθήσεις, πλευρικές επεκτάσεις, ροές και σύνθετες μορφές.
- **Κριτήριο 2 - Το είδος του μετακινούμενου υλικού.** Με το κριτήριο αυτό οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται σε μετακινήσεις που εκδηλώνονται σε βραχώδες υπόβαθρο ή σε εδαφικούς σχηματισμούς που διακρίνονται σε κορήματα (χονδρόκοκκοι σχηματισμοί) και σε γαίες (λεπτόκοκκοι σχηματισμοί).

Τύπος κίνησης	Τύπος υλικού	Τύπος υλικού	
	Υπόβαθρο	Εδάφη	
		Κορήματα	Γαίες
Πτώσεις	Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
Ανατροπές	Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις - κυκλικές μεταθετικές	Καθίζηση βράχων Ολίσθηση βράχων	Καθίζηση κορημάτων Ολισθήσεις κορημάτων	Καθίζηση γαιών Ολισθήσεις γαιών
Πλευρικές Εκτάσεις	Έκταση βράχων	Έκταση κορημάτων	Έκταση γαιών
Ροές	Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών (ή ροή ιλύος)
Σύνθετες	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων		

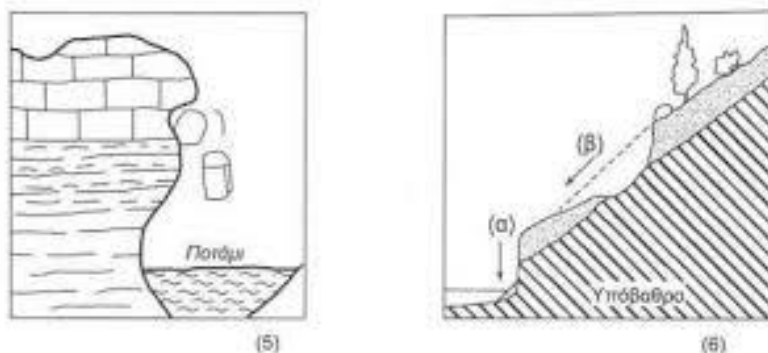
Πίνακας 2-1 Σύντομη ταξινόμηση των κατολισθητικών κινήσεων [9].

2.2.1 Καταπτώσεις

Στις καταπτώσεις, μία μάζα (κυρίως πετρώματος αλλά και συνεκτικού εδάφους) οποιουδήποτε μεγέθους, αποσπάται από ένα απότομο εδαφικό ή βραχώδες πρηνές, κατά μήκος μιας επιφάνειας (χωρίς ή με ελάχιστη διατμητική μετατόπιση) και η πτώση γίνεται

κυρίως ελεύθερα με αναπήδηση ή κύλιση στην επιφάνεια του πρανούς. Η αποσύνδεση του γεωυλικού από το πρανές συμβαίνει κατά μήκος ασυνεχειών. Η πτώση είναι εξαιρετικά γρήγορη και είναι πιθανό να αποτελεί αποτέλεσμα προηγούμενων μικρότερων μετακινήσεων που οδήγησαν στον προοδευτικό αποχωρισμό της μετακινούμενης μάζας από το μητρικό πέτρωμα [4].

Το φαινόμενο των καταπτώσεων είναι συνηθισμένο στα απότομα πρανή πολύ συνεκτικών εδαφών ή βράχων τα οποία υποσκάπτονται από θαλάσσια κύματα ή ρεύματα ποταμών ή ακόμα και από ανθρώπινες παρεμβάσεις (εικόνα 2-2). Σε αυτήν την κατηγορία μετακινήσεων διακρίνονται τρεις υποκατηγορίες. Στην πρώτη υποκατηγορία ανήκουν οι πτώσεις βράχων, όπου η μάζα που μετακινείται είναι η μάζα βράχων που αποσπάστηκαν από μία περιοχή του υποβάθρου. Στην δεύτερη υποκατηγορία ανήκουν οι καταπτώσεις κορημάτων, όπου η μάζα που αποκολλάται είναι κορήματα, τα οποία αποτελούνται από θραύσματα που δημιουργήθηκαν (λόγω αποσάθρωσης και διάβρωσης) πριν από την εκδήλωση της κατολίσθησης. Τέλος στην τρίτη υποκατηγορία ανήκει η πτώση γαιών (ή εδάφους) η οποία είναι αρκετά σπάνιο φαινόμενο σε σχέση με τις καταπτώσεις των προηγούμενων τύπων [9],[10].



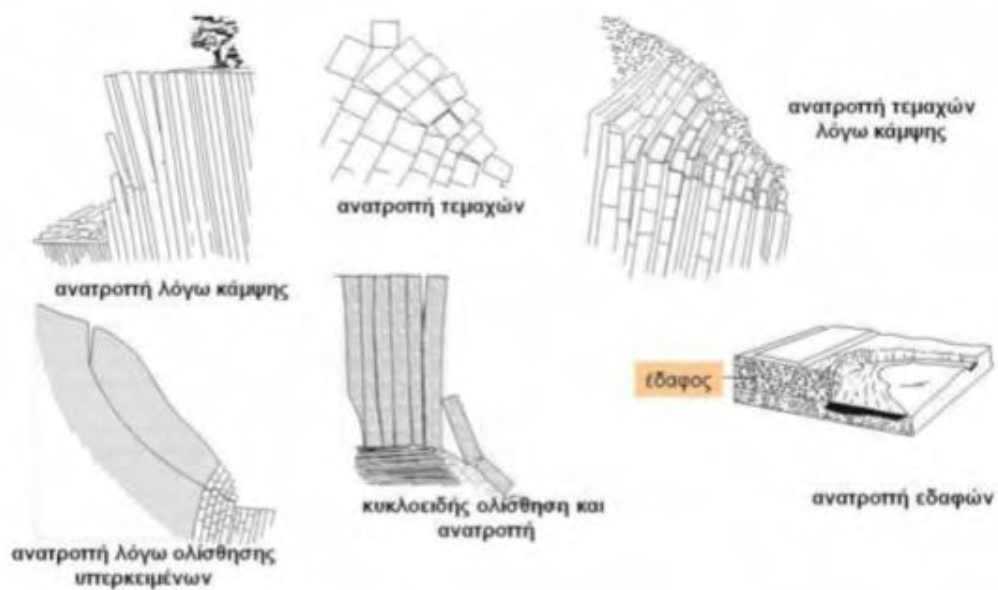
Εικόνα 2-2. Καταπτώσεις βράχων [9].

2.2.2 Ανατροπές

Στις ανατροπές η κίνηση είναι μία προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας από ένα βραχώδες κυρίως πρανές, γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής που βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από την βαρύτητα και από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή από την επίδραση του νερού (υδροστατικές πιέσεις, παγετός) που γεμίζει τις ασυνέχειες και ρωγμές. Η ταχύτητα μετακίνησης μπορεί να είναι εξαιρετικά αργή στα πρώτα στάδια και να μετατραπεί εξαιρετικά γρήγορη στα τελευταία στάδια [4].

Οι Goodman and Bray (1976) και στη συνέχεια οι Hoek and Bray (1977) συνέβαλαν στην ταξινόμηση των ανατροπών στους βραχώδεις κυρίως σχηματισμούς με βάση τους μηχανισμούς που συμβάλουν στην εκδήλωσή τους [4]. Έτσι διακρίνονται τα ακόλουθα τέσσερα είδη ανατροπών (εικόνα 2-3):

- Ανατροπή λόγω κάμψης. Το σκληρό πέτρωμα αποχωρίζεται σε κολώνες λόγω της ύπαρξης ενός καλά αναπτυγμένου συστήματος ασυνεχειών.
- Ανατροπή τεμαχίων. Ανάλογη περίπτωση με την προηγούμενη με την διαφορά ότι η θραύση και η ανατροπή έρχεται λόγω της παρουσίας ενός δεύτερου συστήματος ασυνεχειών.
- Ανατροπή τεμαχίων λόγω κάμψης. Σε απότομα βραχώδη πρανή μπορεί να παρατηρηθεί σημαντική κάμψη των πετρωμάτων κατά μήκος μιας καλά διαμορφωμένης επιφάνειας.
- Δευτερογενείς ανατροπές. Εντάσσονται περιπτώσεις που προκαλούνται κυρίως από υποσκαφή της βάσης του πρανούς λόγω φυσικών διεργασιών.



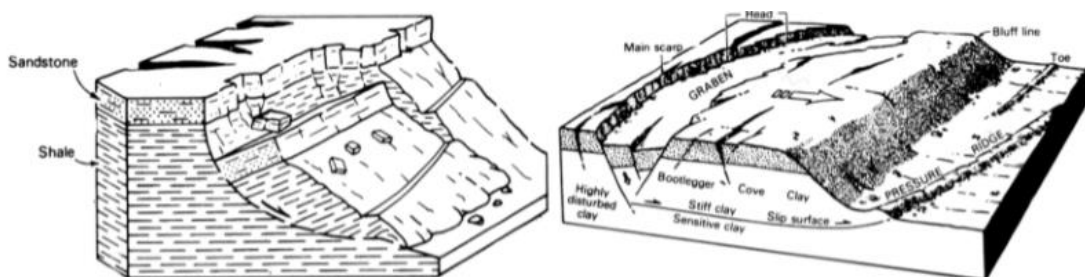
Εικόνα 2-3. Περιπτώσεις ανατροπών [4].

2.2.3 Ολισθήσεις

Πρόκειται για την προς τα κάτω κίνηση εδαφικής ή βραχώδους μάζας και κυρίως λαμβάνει χώρα κατά μήκος επιφανειών θραύσης ή σχετικά λεπτών ζωνών διάτμησης. Η κίνηση αρχικά, δεν εκδηλώνεται ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια αστοχίας. Ο όγκος της μετακινούμενης μάζας μεγαθύνεται από την αρχική περιοχή τοπικής αστοχίας. Συχνά τα πρώτα σημάδια μετακίνησης είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος της οποίας θα διαμορφωθεί το κύριο μέτωπο της ολίσθησης. Η μετακινούμενη μάζα ολισθαίνει πέρα από τον πόδα της επιφάνειας θραύσεως, καλύπτοντας την αρχική εδαφική επιφάνεια στο πρηνές, η οποία τελικά μεταπίπτει σε επιφάνεια διαχωρισμού [4].

Ο Varnes (1978) διαχώρισε τις ολισθήσεις σε περιστροφικές και μεταθετικές [9],[10] :

- **Οι περιστροφικές ολισθήσεις ή κυκλικές ολισθήσεις** περιλαμβάνουν κινήσεις της κατολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος μιας κεκλιμένης επιφάνειας αστοχίας η οποία είναι κοίλη προς τα πάνω. Όταν η επιφάνεια αστοχίας έχει προφίλ κυκλικό ή κυκλοειδές, η κινηματική υπαγορεύει ότι η μετακινούμενη μάζα θα κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας θραύσης έχοντας υποστεί μικρή εσωτερική παραμόρφωση. Επίσης, ο άξονας της κυκλικής επιφάνειας είναι παράλληλος στον άξονα περιστροφής.
- **Οι μεταθετικές ολισθήσεις** αφορούν σε μια μετακινούμενη μάζα η οποία ολισθαίνει κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματοειδούς επιφάνειας αστοχίας. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να δημιουργείται και από δύο ασυνέχειες οι οποίες προκαλούν τη μετακίνηση της μάζας που περικλείεται από αυτές προς τα κατάντη κατά μήκος του ίχνους τομής τους, σχηματίζοντας μία σφήνα.



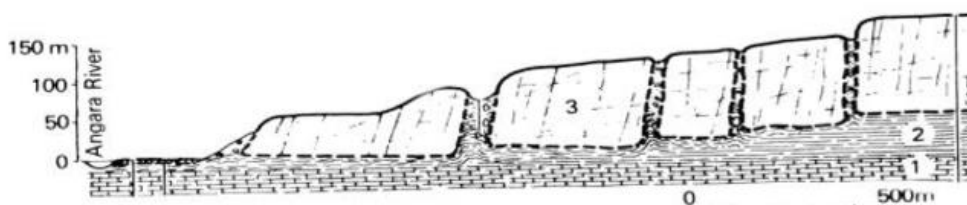
Εικόνα 2-4. α) Περιστροφική ολίσθηση βράχων, β) Μεταθετική ολίσθηση γαιών [9].

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των παραπάνω δύο κατηγοριών κατολισθήσεων είναι ότι οι περιστροφικές ολισθήσεις, με την κίνησή τους τείνουν να ισορροπήσουν και πάλι τη μετακινούμενη μάζα, ενώ οι μεταθετικές ολισθήσεις συνεχίζουν ανεξέλεγκτα, ιδιαίτερα αν η επιφάνεια αποκόλλησης έχει μεγάλη κλίση (εικόνα 2-4). Καθώς η μεταθετική ολίσθηση

εξελίσσεται, η μετακινούμενη μάζα μπορεί να διασπαστεί σε πολλά κομμάτια, ιδιαίτερα αν η ταχύτητα ή η περιεκτικότητα σε νερό αυξηθούν (εικόνα 2-4), [12].

2.2.4 Πλευρικές Επεκτάσεις

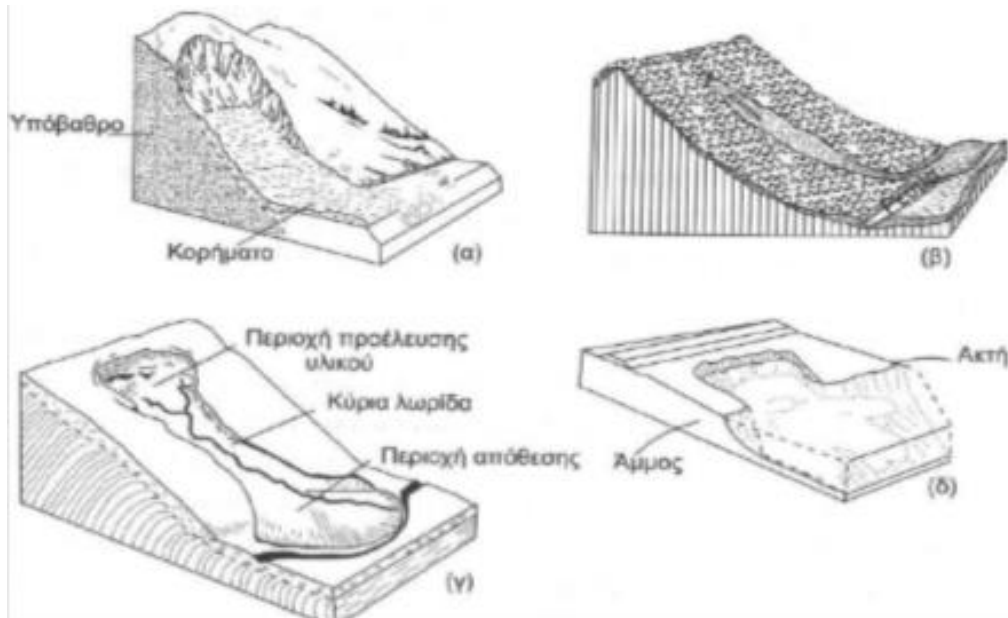
Είναι κινήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από πλευρικές εκτάσεις (εξαπλώσεις) συνεκτικών υλικών επί μαλακότερων υλικών όπου και στηρίζονται. Διευκολύνονται από τη παρουσία διατμητικών ή εφελκυστικών ρωγμών και είναι αρκετά διακριτές. Διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες, οι **επεκτάσεις βράχων** απαντούν σε ισχυρά διαρρηγμένες βραχώμαζες, και συχνά σχετίζονται με καθίζηση της διαρρηγμένης μάζας όταν υπόκεινται πιο μαλακά υλικά. Συχνά δεν είναι δυνατή η αναγνώριση μια επιφάνειας ολίσθησης στο υπόβαθρο, ούτε μιας πλήρως προσδιορισμένης ζώνης πλαστικής ροής (εικόνα 2-5). Οι **επεκτάσεις ρευστοποίησης** δημιουργούνται σε ευαίσθητες αργίλους και ιλύες οι οποίες έχασαν την αντοχή τους και η δομή τους έχει καταστραφεί. Τέλος, οι **σύνθετες επεκτάσεις** αποτελούν μετακινήσεις που εκδηλώνονται ως έντονες παραμορφώσεις οριζόντιων ανθεκτικών και διερρηγμένων πετρωμάτων που καλύπτουν ρωγματωμένους αργίλους ή μαλακούς σχιστόλιθους [9],[10].



Εικόνα 2-5.Πλευρική επέκταση βράχων [9]

2.2.5 Ροές

Οι ροές, υγρές ή ξηρές, γρήγορες ή αργές, εκδηλώνονται κυρίως σε χαλαρά υλικά.



Εικόνα 2-6. α) - β) ροή κορημάτων, γ) ροή γαιών, δ) ροή άμμου ιλύος [4].

Αντίθετα στο βραχώδες υπόβαθρο, οι αντίστοιχες μετακινήσεις περιλαμβάνουν τις πολύ αργές παραμορφώσεις που κατανέμονται ανάμεσα σε πολλές κοντινές ρωγμές και διακλάσεις, καθώς και εκείνες που παρατηρούνται μέσα στη μάζα του πετρώματος και προέρχονται από κάμψη, πτύχωση ή διόγκωση. Οι βασικοί τύποι ροών είναι (εικόνα 2-6.): α) ροές βραχώδους υποβάθρου, β) ροές κορημάτων, γ) ροές γαιών, δ) ροές άμμου ιλύος.

2.2.6 Σύνθετες Μετακινήσεις Πρανών

Συνήθως οι σύνθετες μετακινήσεις των πρανών είναι ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων εκ των κύριων τύπων μετακινήσεων που περιγράφηκαν μέχρι τώρα, που

εκδηλώνονται είτε στα διάφορα τμήματα της μετακινούμενης μάζας είτε στα διάφορα στάδια της εξέλιξης της μετακίνησης.

2.3 Ταξινόμηση με βάση την ταχύτητα μετακίνησης

Η ταχύτητα μετακίνησης μιας κατολισθήσεως αποτελεί μια παράμετρο που σχετίζεται άμεσα με τις συνέπειες που εμφανίζει σε ανθρώπινες ζωές, βλάβες κτιρίων και έργων υποδομής.

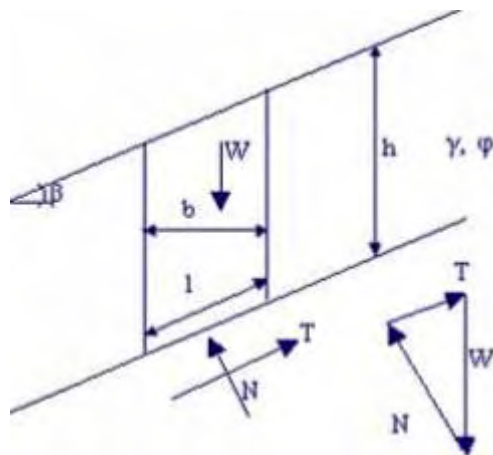
Κλάση Ταχύτητας	Περιγραφή	Ταχύτητα	Πιθανές Επιπτώσεις
1	Εξαιρετικά αργή	<0.06 m/έτος	Καταστροφές κατασκευών επίσης από πρόσκρουση της μετακινούμενης μάζας, πολλοί θάνατοι, αδύνατη η διαφυγή
2	Πολύ αργή	0.06 m/έτος- 1.6 m/έτος	Μερικώς θανατηφόρες επιπτώσεις, περιορισμένη διαφυγή
3	Αργή	1.6 m/έτος- 1.6 m/μήνα	Δυνατή η διαφυγή. Καταστροφή ή μεγάλες βλάβες κατασκευών, εγκαταστάσεων και εξοπλισμού.
4	Μέτρια	1.6m/μήνα- 1.6 m/ημέρα	Μερικές προσωρινές εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν προσωρινά
5	Γρήγορη	1.6 m/ημέρα- 0.3 m/min	Είναι δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας. Καλά σχεδιασμένες κατασκευές μπορεί να διατηρούνται με συχνή συντήρηση εφόσον δεν υπάρχουν περιοδικές εξάρσεις στην ταχύτητα μετακίνησης
6	Πολύ γρήγορη	0.3 m/min- 0.3 m/sec	Ορισμένες μόνο μόνιμες κατασκευές μπορεί να παραμένουν αμετάβλητες
7	Εξαιρετικά γρήγορη	>0.3 m/sec	Εξαιρετικά μικρή κίνηση ανιχνεύσιμη μόνο με όργανα. Οι κατασκευές είναι αβλαβείς με μέτρα προφύλαξης

Πίνακας 2-2 Ταξινόμηση των κατολισθήσεων με βάση την ταχύτητα και πιθανές επιπτώσεις [10].

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το πίνακα 2-2, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μιας μετακίνησης, τόσο πιο καταστροφικές θα είναι και οι επιπτώσεις. Οι πιθανές βλάβες που μπορούν να προκληθούν από κατολισθητικά φαινόμενα διακρίνονται σε επτά κατηγορίες κατά Cruden και Varnes (1996), σύμφωνα με τον πίνακα 2-2, [10].

2.4 Αιτίες Κατολισθήσεων

Οι παράγοντες που καθορίζουν αν θα προκληθεί μετακίνηση σε κάποιο βραχώδες υλικό ενός πρανού είναι η διατμητική τάση ολίσθησης και η διατμητική αντοχή, οι οποίες είναι αντίρροπες μεταξύ τους. Το βάρος ενός πετρώματος επί ενός πρανού μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα κάθετη στη δυνητική επιφάνεια ολίσθησης, την ορθή συνιστώσα του βάρους (δρώσα δύναμη) και μια συνιστώσα παράλληλη προς τη δυνητική επιφάνεια ολίσθησης, τη διατμητική συνιστώσα του βάρους (αντιδρώσα δύναμη), (εικόνα 2-7).

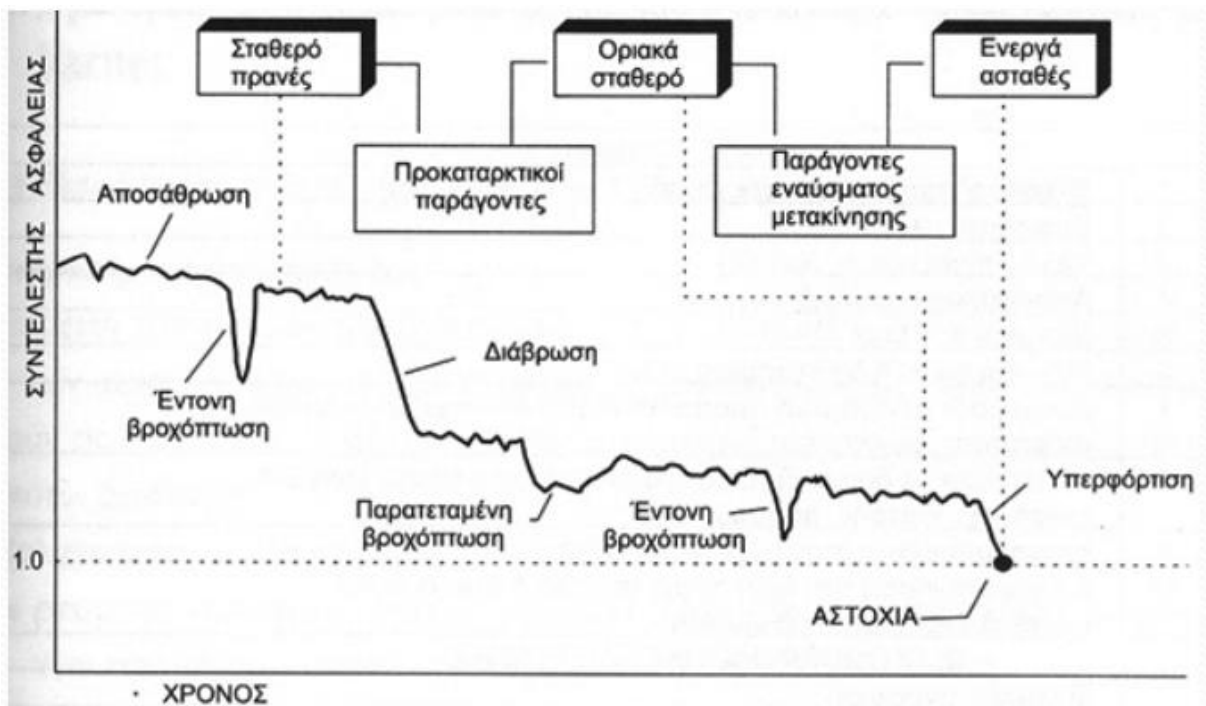


Εικόνα 2-7. Σχηματική απεικόνιση δυνάμεων σε ένα πρανές [4].

Η διατμητική συνιστώσα του βάρους θα κινούσε το πέτρωμα προς τα κάτω αν αυτό δεν αντιδρούσε με την εσωτερική αντοχή του (διατμητική αντοχή). Αυτή καθορίζεται από την

τριβή και την συνεκτικότητα των επί μέρους τμημάτων του πετρώματος (και/ή του αποσαθρωμένου μανδύα)[4]. Ο λόγος της αντιδρώσας δύναμης προς την δρώσα δύναμη ορίζει τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς.

Ο συντελεστής ασφαλείας ενός φυσικού πρανούς δεν έχει μία σταθερά τιμή σε σχέση με το χρόνο. Ανάλογα με τις γεωλογικές διεργασίες (αποσάθρωση/διάβρωση) και τις κλιματολογικές συνθήκες (έντονα καιρικά φαινόμενα) που επικρατούν στην περιοχή βαίνει μειούμενος και τελικά γίνεται μικρότερος της μονάδας, γεγονός το οποίο οδηγεί σε αστοχία το πρανές. Με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των αιτιών που προκαλούν μία κατολίσθηση παρατίθεται το παρακάτω ενδεικτικό διάγραμμα της μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας ενός φυσικού πρανούς με το χρόνο (εικόνα 2-8).



Εικόνα 2-8. Παράδειγμα μεταβολής συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τον χρόνο [13].

Στην εικόνα 2-8 παρατηρείται ότι το πρανές μεταβαίνει από την σταθερή κατάσταση στην οριακά σταθερή και εν συνεχεία στην ασταθή. Τα αίτια για αυτή την μετάβαση διακρίνονται στα προπαρασκευαστικά τα οποία καθιστούν το πρανές ευάλωτο στην μετακίνηση χωρίς αυτή να έχει αρχίσει και στα αίτια που αποτελούν το έναυσμα της κίνησης.

Ο Terzaghi (1950) διέκρινε τα αίτια έναρξης μιας ολίσθησης σε δυο βασικές κατηγορίες :

- Τα εξωγενή αίτια που προκαλούν αύξηση της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης (π.χ. αλλαγές στη γεωμετρία, επιφορτίσεις κ.α.),
- Τα ενδογενή αίτια που προκαλούν μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού (π.χ. αποσάθρωση, διάβρωση κ.α.).

Ο Varnes (1978) επιπλέον χώρισε τους παράγοντες μιας ολίσθησης σε τρεις επιμέρους κατηγορίες [9]:

- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην αύξηση της αναπτυσσόμενης διατμητικής τάσης (π.χ. αλλαγές στην γεωμετρία, επιφορτίσεις κ.α.).
- Στους παράγοντες που συμβάλλουν στην πιθανή χαμηλή διατμητική αντοχή του υλικού (π.χ. δομή, ορυκτολογική σύσταση κ.α.).
- Στους παράγοντες που συντελούν στη μείωση της διατμητικής αντοχής του υλικού (π.χ. αποσάθρωση, διάβρωση κ.α.).

Οι πλέον σημαντικοί παράγοντες εκδήλωσης κατολισθήσεων βάση της UNESCO (WP/WLI 1994) αναφέρονται στον πίνακα 2-3 [18]:

1.	Εδαφικές συνθήκες
i.	Πλαστικό, χαμηλής αντοχής, υλικό
ii.	Ευαίσθητο υλικό
iii.	Υλικό επιρρεπές σε θραύση
iv.	Αποσαθρωμένο υλικό
v.	Διατμημένο υλικό
vi.	Ρωγματομένο ή διακλασμένο υλικό
vii.	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (στρώση, σχιστότητα, διακλάσεις)
viii.	Βραχώμαζα με δυσμενή προσανατολισμό ασυνεχειών (ρήγματα, επιφάνειες επαφής, ασυμφωνίες)
ix.	Διαφοροποίηση στην υδροπερατότητα και οι επιδράσεις της στη διαφοροποίηση της δυσκαμψίας
2.	Γεωμορφολογικές διεργασίες
i.	Τεκτονική ανύψωση
ii.	Ανύψωση λόγω ηφαιστειών
iii.	Επίδραση παγετώνων
iv.	Ποτάμια διάβρωση της βάσης του πρανούς
v.	Θαλάσσια διάβρωση της βάσης του πρανούς
vi.	Διάβρωση της βάσης του πρανούς από παγετώνα
vii.	Διάβρωση των πλευρών του πρανούς
viii.	Εσωτερική διάβρωση
ix.	Φόρτιση από φυσική απόθεση υλικών στη στέψη του πρανούς
x.	Απομάκρυνση φυτοκάλυψης (από πυρκαγιά, διάβρωση, κ.τ.λ.)
3.	Φυσικές διεργασίες
i.	Έντονη, μικρής διάρκειας βροχόπτωση

ii.	Γρήγορο λιώσιμο χιονιού
iii.	Παρατεταμένη υψηλή βροχόπτωση
iv.	Γρήγορη πτώση στάθμης νερού μετά από πλημμύρες, παλίρροιες ή διάρρηξη φυσικών φραγμάτων
v.	Σεισμοί
vi.	Εκρήξεις ηφαιστείων
vii.	Διάρρηξη λιμνών σε κρατήρες ηφαιστείων
viii.	Λιώσιμο παγωμένου εδάφους
ix.	Αποσάθρωση λόγω παγετού
x.	Αποσάθρωση από διόγκωση και συρρίκνωση εδαφών
4.	Ανθρωπογενείς διεργασίες
i.	Εκσκαφές στη βάση του πρηνούς
ii.	Φόρτιση στο μέτωπο ή πάνω από τη στέψη του πρηνούς
iii.	Υποβιβασμός της στάθμης σε ταμιευτήρες
iv.	Άρδευση
v.	Κακή συντήρηση αποστραγγιστικών έργων
vi.	Διαρροή νερών από τεχνικά έργα (δίκτυα, δεξαμενές, κ.τ.λ.)
vii.	Αποψίλωση δασών
viii.	Λατομεία και μεταλλεία
ix.	Δημιουργία χωματερών
x.	Τεχνητές δονήσεις (κυκλοφορία οχημάτων, λειτουργία μηχανών, κ.τ.λ.)

Πίνακας 2-3. Παράγοντες που προκαλούν την εκδήλωση κατολισθήσεων [13].

Κεφάλαιο 3 Ευστάθεια Πρανών

Τα πρανή ορίζονται ως κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Σε κάθε πρανές η διαφορά στάθμης και οι κλίσεις που το χαρακτηρίζουν δημιουργούν δυνάμεις βαρύτητας οι οποίες, σε συνδυασμό με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από την πιθανή παρουσία νερού στο έδαφος, δημιουργούν με την σειρά τους διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν την εδαφική (ή βραχώδη) μάζα τους ούτως ώστε να επέλθει μία νέα κατάσταση ισορροπίας. Στις τάσεις αυτές ανθίσταται η διατμητική αντοχή του εδάφους (ή του βράχου) και στην περίπτωση που αυτές την υπερβούν, τότε οδηγούν σε αστοχία του πρανούς και σε κατολίσθηση [19].

Ένα φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, σεισμικών, ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, ο παγετός, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα και οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία, δηλαδή την ολίσθηση ή την κατάρρευση εδαφικής/βραχώδους μάζας, ενός φυσικού πρανούς. Αστοχία μπορεί να προκληθεί και λόγω επέμβασης του ανθρώπου στην φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (ορύγματα, υποσκαφές, κ.α.).

Θα πρέπει να σημειωθεί επίσης, ότι εκτός από την χαμηλή διατμητική αντοχή κατά μήκος μιας δυνητικής επιφάνειας ολίσθησης, η αποφόρτιση και η απόληψη τμήματος των γεωλογικών σχηματισμών που εμφανίζονται στο πρανές αποτελούν εξίσου σημαντικούς παράγοντες της διαμόρφωσης του εντατικού πεδίου, της διατμητικής αντοχής και της εξέλιξης της σχετικής κίνησης μεταξύ των στρωμάτων που εμφανίζονται στην περιοχή.

Ένα πρανές μπορεί να διέρχεται από τρία στάδια [4]:

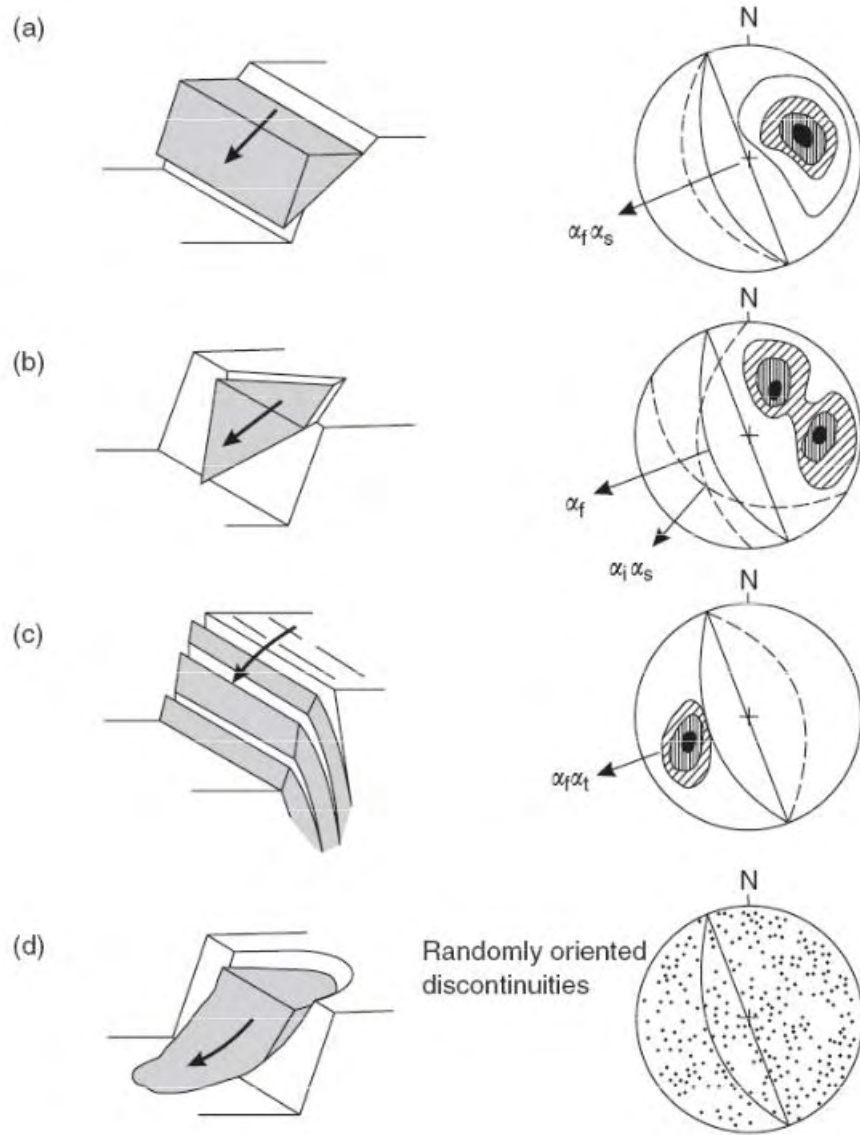
- Σταθερό όταν αντιδρά σε όλες τις αποσταθεροποιητικές δυνάμεις.
- Οριακά σταθερό όταν η ευστάθεια έχει μειωθεί αρκετά και αναμένεται εκδήλωση αστάθειας. και
- Ενεργά ασταθές στη περίπτωση που οι αποσταθεροποιητικές δυνάμεις είναι μεγαλύτερες από τις αντιδρώσες δυνάμεις και προκαλούν μετακινήσεις.

Επίσης, η εκδήλωση μιας κατολίσθησης εξαρτάται από την γεωλογική σύσταση και δομή των γεωλογικών σχηματισμών, την κλίση και τα μηχανικά χαρακτηριστικά (συνοχή, γωνία εσωτερικής τριβής και εντατική κατάσταση) των γεωυλικών που δομούν το πρανές. Σημαντικό επίσης ρόλο παίζει το νερό με την μορφή υγρασίας, κατείσδυσης, επιφανειακής και υπόγειας ροής [2].

3.1 Μορφές Αστοχίας βραχωδών πρανών

Τα βραχώδη πρανή αποτελούν μία ξεχωριστή κατηγορία πρανών και παρουσιάζονται ξεχωριστά διότι η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται με πρανή αυτού του είδους. Τα βραχώδη πρανή αστοχούν με μηχανισμούς ανάλογους του βαθμού κατακερματισμού αλλά και του βαθμού αποσάθρωσής τους. Οι μηχανισμοί εκδήλωσης αστοχιών διακρίνονται σε (εικόνα 3-1): α) Επίπεδες ολισθήσεις, β) Σφηνοειδείς ολισθήσεις, γ) Ανατροπές και δ) Κυκλικές ή περιστροφικές ολισθήσεις. Στην περίπτωση ολίσθησης σε καμπύλη επιφάνεια, η γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας είναι συνάρτηση της γεωμετρίας του πρανούς και της αντοχής της βραχομάζας. Στους υπόλοιπους τρεις βασικούς μηχανισμούς η επιφάνεια

αστοχίας καθορίζεται από τις ασυνέχειες, οι οποίες δημιουργούν επίπεδα ολίσθησης και ανατροπής τεμαχών πετρώματος από την επιφάνεια της εκσκαφής.



Εικόνα 3-1. Μηχανισμοί εκδήλωσης αστοχιών σε βραχώδεις σχηματισμούς. [24].

Στην εικόνα 3-1 παρουσιάζονται οι μηχανισμοί εκδήλωσης αστοχιών σε βραχώδεις σχηματισμούς και απεικόνιση των κινηματικών συνθηκών αστοχίας με τη βοήθεια της βοήθεια μέγιστων κύκλων και πόλων σε δίκτυο Schmidt. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της κυκλικής ολίσθησης (περίπτωση d) δεν μπορεί να προβλεφτεί με ασφάλεια η κατεύθυνση

της ολίσθησης λόγω της τυχαιότητας στην κατανομή των ασυνεχειών στην κατολισθαίνουσα μάζα.

Η γενική συνθήκη ισορροπίας που ισχύει σε όλες τις επιλύσεις ευστάθειας, τόσο των βραχωδών όσο και των εδαφικών πρανών, είναι ότι οι δυνάμεις ή οι ροπές συγκράτησης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από αυτές της ολίσθησης. Ο συντελεστής ασφαλείας, F (ή $F.S.=\text{Factor of Safety}$), καθορίζεται από το λόγο του συνόλου των δυνάμεων ή ροπών που ανθίστανται στην ολίσθηση και που οφείλονται στη διατμητική αντοχή του εδάφους, προς τις αντίστοιχες δυνάμεις ή ροπές που συνεισφέρουν στην αστάθεια του πρανούς, προκαλώντας την ολίσθησή του. Στην περίπτωση που $F=1$ το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας, αν $F>1$ το πρανές ευσταθεί, και αν $F<1$ τότε το πρανές είναι ασταθές.

3.1.1 Επίπεδη Ολίσθηση

Ολίσθηση τεμάχους πετρώματος σε επίπεδη επιφάνεια δύναται να συμβεί όταν υπάρχει σαφής επικράτηση ενός συστήματος ασυνεχειών, συνήθως της στρώσης, που έχει διεύθυνση σχεδόν παράλληλη με το πρανές και κλίση ομόρροπη και μικρότερη της κλίσης του πρανούς. Κατά τους Hoek and Bray (1981), ολίσθηση σε επίπεδη επιφάνεια δεν εμφανίζεται πολύ συχνά στη πράξη, καθώς για να συμβεί θα πρέπει να ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι ακόλουθες γεωμετρικές προϋποθέσεις: α) το επίπεδο ολίσθησης να είναι σχεδόν παράλληλο στο επίπεδο του πρανούς (να έχουν διαφορά το πολύ μέχρι 20°), β) η κλίση του πρανούς (ψ_f) να είναι μεγαλύτερη της κλίσης του επιπέδου ολίσθησης (ψ_p), η οποία με τη σειρά της θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής (ϕ) του επιπέδου ολίσθησης ($\psi_f > \psi_p > \phi$) και γ) η ύπαρξη στην βραχομάζα «επιφανειών απελευθέρωσης» με αμελητέα (πρακτικά μηδενική) αντίσταση στην ολίσθηση που οριοθετούν τα πλευρικά όρια της ολίσθησης [4].

Τέλος υπάρχουν δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις επίπεδης ολίσθησης, με ή χωρίς την ύπαρξη εφελκυστικής ρωγμής. Στην πρώτη περίπτωση η ρωγμή μπορεί να είναι ή πάνω από τη στέψη ή στο μέτωπο του πρανούς και να περιέχει νερό (εμφάνιση δυνάμεων ώθησης). Νερό επίσης μπορεί να υπάρχει και κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (εμφάνιση δυνάμεων άνωσης). Ο συντελεστής ασφαλείας F δίνεται από τη σχέση [4]:

$$F = \frac{c \cdot A + [W \cdot \cos \psi_p - a \cdot \sin \psi_p - U - V \cdot \sin \psi_p] \cdot \tan \varphi}{W \cdot (\sin \psi_p + \alpha \cdot \cos \psi_p) + V \cdot \cos \psi_p} \quad (1)$$

όπου:

c: συνοχή (kPa),

a: συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης,

φ: γωνία τριβής,

ψ_p: κλίση επιπέδου ολίσθησης,

U, V: συνισταμένες δυνάμεις άνωσης και ώθησης,

W: το βάρος της μάζας που ολισθαίνει,

A: επιφάνεια της βάσης της μάζας που ολισθαίνει (θεωρείται με μοναδιαίο πάχος).

Ενώ στη δεύτερη η ολίσθηση συμβαίνει κατά μήκος μόνο μιας επιφάνειας ασυνέχειας και ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τη σχέση [4]:

$$F = \frac{c \cdot A + [W \cdot \cos \psi_p - a \cdot \sin \psi_p - U] \cdot \tan \varphi}{W \cdot (\sin \psi_p + \alpha \cdot \cos \psi_p)} \quad (2)$$



Εικόνα 3-2. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε επίπεδη αστοχία [4]

Στην εικόνα 3-2 απεικονίζεται η τομή πρανούς σε επίπεδη αστοχία κατά μήκος ομόρροπης με την κλίση του πρανούς ασυνέχειας.

3.1.2 Σφηνοειδής Ολίσθηση

Ολίσθηση σφήνας κατά μήκος της τομής δύο τεμνόμενων ασυνεχειών μπορεί να συμβεί όταν η κλίση της ευθείας τομής των δύο επιπέδων των ασυνεχειών είναι ομόρροπη και μικρότερη από την κλίση του πρανούς (εικόνα 3-3). Για να συμβεί μια τέτοια ολίσθηση θα πρέπει: α) η διεύθυνση του πρανούς και της σφήνας να συμφωνούν, β) τα δύο επίπεδα να τέμνουν την επιφάνεια του πρανούς και να αλληλοτέμνονται, και γ) η γραμμή διατομής των επιπέδων να σχηματίζει γωνία με το οριζόντιο επίπεδο που να είναι μεγαλύτερη της γωνίας τριβής της βραχομάζας, αλλά ταυτόχρονα μικρότερη της γωνίας του επιπέδου του πρανούς. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο την τριβή των επιπέδων ασυνεχειών, και σε ξηρές συνθήκες, ο συντελεστής ασφαλείας F που προκύπτει δίνεται από την ακόλουθη σχέση [4]:

$$F = A * \tan\varphi_A + B * \tan\varphi_B \quad (3)$$

όπου:

A και B: είναι αδιάστατοι συντελεστές που εξαρτώνται από την κλίση και τη φορά της μέγιστης κλίσης των επιπέδων ασυνεχειών,

φ_A, φ_B : οι γωνίες εσωτερικής τριβής των δύο αλληλοτεμνόμενων επιπέδων των ασυνεχειών.



Εικόνα 3-3. Βραχώδες πρανές σε σφηνοειδή αστοχία [25].

3.1.3 Ανατροπή

Ανατροπή σχεδόν κατακόρυφων δομών δύναται να συμβεί για μεγάλη κλίση ασυνεχειών των στρωμάτων, η οποία να είναι αντίρροπη προς την κλίση της επιφάνειας του πρανούς. Κατά τους Goodman και Bray (1976) και στη συνέχεια τους Hoek and Bray (1977) διακρίνονται οι ακόλουθοι κύριοι τύποι ανατροπής: 1) Ανατροπή λόγω κάμψης: συνεχή στρώματα πετρώματος, που βυθίζονται απότομα και αντίρροπα προς το πρανές, κάμπτονται προς την επιφάνεια του πρανούς και θραύονται. Κατά την κάμψη, οι διεπιφάνειες των

στρώσεων ολισθαίνουν και η πάνω επιφάνεια του πρανούς αποκτά βαθμιδωτή μορφή. 2) Ανατροπή τεμαχών: ανατροπή εγκάρσια ρωγματωμένων παρακατακόρυφων στρωμάτων ή στηλοειδών τεμαχών πετρώματος. 3) Ανατροπή τεμαχών εμφανιζόμενη ως κάμψη: ψευδοσυνεχής κάμψη παρακατακόρυφων στρωμάτων με πολλαπλές εγκάρσιες ασυνέχειες [3],[17].

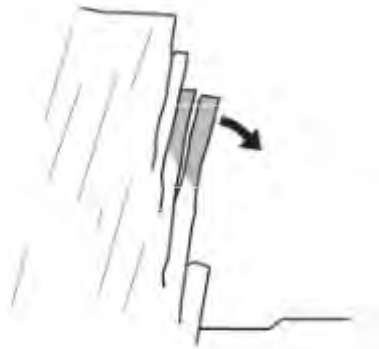
Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται από τη σχέση [4]:

$$F = \frac{\tan\varphi_{available}}{\tan\varphi_{required}} \quad (4)$$

όπου:

$\varphi_{available}$ είναι η διαθέσιμη γωνία τριβής,

$\varphi_{required}$ είναι η απαιτούμενη γωνία τριβής, ώστε το βραχώδες τέμαχος να είναι οριακά ευσταθές.

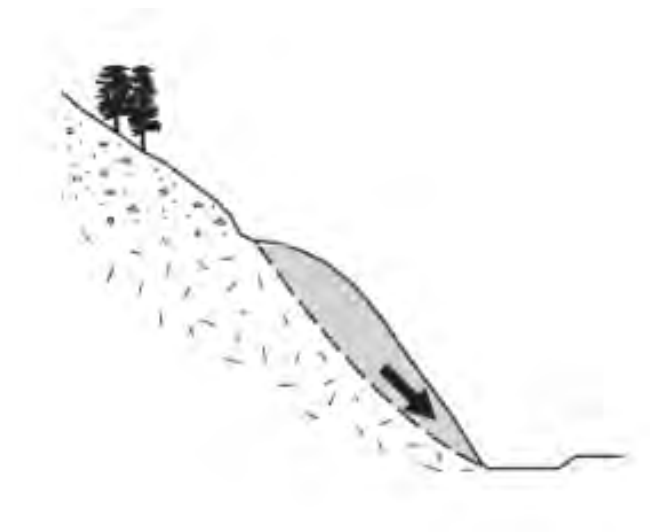


Εικόνα 3-4. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε ανατροπή [4]

Στην εικόνα 3-4 αποτυπώνεται η σκαριφηματική τομή πρανούς σε ανατροπή.

3.1.4 Κυκλική ή Περιστροφική Αστοχία

Σε βραχώμαζες πολύ πτωχής ποιότητας (π.χ. πυκνά διακλασμένες, με πτωχό αλληλοκλείδωμα τεμαχών, αποσαθρωμένες και εδαφοποιημένες) αναπτύσσονται ολισθήσεις σε καμπύλη επιφάνεια (εικόνα 3-5), [3].



Εικόνα 3-5. Σκαριφηματική τομή πρανούς σε περιστροφική αστοχία (μικρού βάθους) [4]

Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση της ευστάθειας γίνεται σύμφωνα με δύο βασικές μεθοδολογίες [4]:

- A. Γενικευμένη μέθοδος (circular arc analysis),
- B. Μέθοδος των λωρίδων (method of slices).

Ο έλεγχος της ευστάθειας πρανούς με αυτές τις μεθόδους εστιάζει σε ένα και μοναδικό κύκλο ολίσθησης μόνο για την περίπτωση που πρόκειται για συγκεκριμένη αστοχία που έχει συμβεί στη συγκεκριμένη κυκλική επιφάνεια ολίσθησης. Στην περίπτωση που υπολογίζεται η ευστάθεια πρανούς (υφιστάμενου ή σχεδιαζόμενου) προσδιορίζεται με αυτές τις μεθόδους ο

κρίσιμος κύκλος ολίσθησης που αντιστοιχεί στην κυκλική επιφάνεια με τον ελάχιστο συντελεστή ασφάλειας. Για την εκτίμηση του κρίσιμου κύκλου είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του συντελεστή ασφάλειας για διάφορες θέσεις κέντρων κύκλων με διαφορετική ακτίνα έτσι ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός του κρίσιμου κύκλου με τον χαμηλότερο συντελεστή ασφάλειας. Η εργασία αυτή γίνεται πολύ πιο γρήγορα με τα εξελιγμένα λογισμικά γεωτεχνικής χρήσης.

A. Γενικευμένη Μέθοδος

Αναπτύχθηκε από τον Patterson (1995) και κάνει λόγο για τον υπολογισμό των ροπών περιστροφής και των ροπών αντίστασης της ολισθαίνουσας γεωμάζας. Οι δυνάμεις που ασκούνται στη μάζα προκαλούνται από [4]:

- Το βάρος της ολισθαίνουσας μάζας W.
- Τις ενεργές τάσεις N.
- Τη διατμητική αντοχή της γεωμάζας (c/συνοχή και Φ/γωνία εσωτερικής τριβής).
- Την πίεση πόρων u.

Ο συντελεστής ασφάλειας εκφράζεται ως ο λόγος των παθητικών ροπών (αντίστασης) και των ενεργητικών ροπών (ανατροπής) και έχει ως εξής [4]:

$$F = \frac{r \cdot [c'_d \cdot (AB) + \tan \varphi'_d] \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \sigma_i}{Wd} \quad (5)$$

όπου:

c'_d : η συνοχή που αντιστοιχεί σε μοναδιαίο μήκος τόξου του κύκλου ολίσθησης,

(AB): μήκος τόξου επιφάνειας ολίσθησης,

ϕ' : μέση γωνία τριβής,

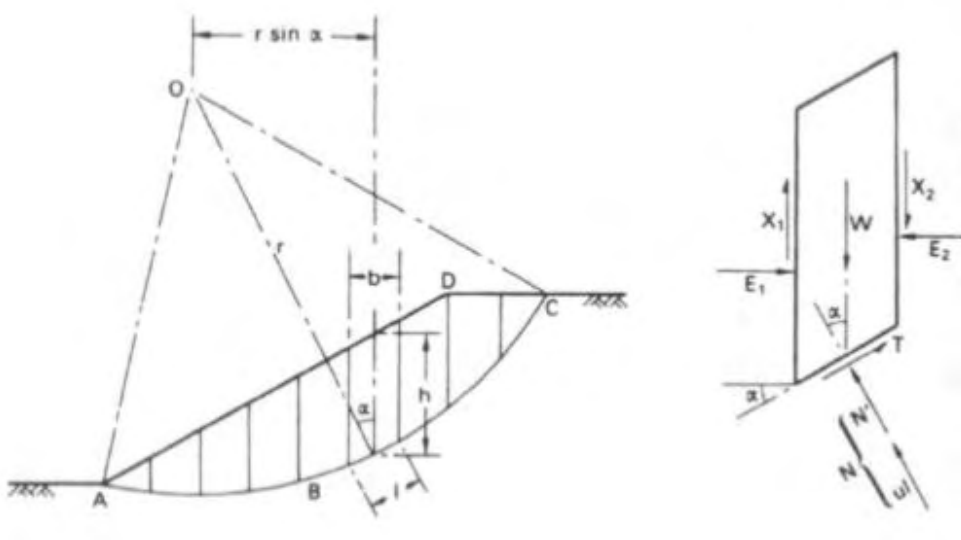
σ_i : ενεργή τάση σε σημείο i ,

W : βάρος ολισθαίνουσας μάζας,

d : απόσταση του κέντρου του κύκλου ολίσθησης από την κατακόρυφη που περνάει από το κέντρο βάρους της μάζας.

B. Μέθοδος των λωρίδων

Με βάση το Nash (1987), στην περίπτωση που πρόκειται να γίνει ανάλυση των τάσεων σε ένα πρανές, οι τάσεις πρέπει να οριστούν γύρω από την επιφάνεια αστοχίας. Πρακτικά αυτό επιτυγχάνεται με το διαχωρισμό της ολισθαίνουσας μάζας σε κατακόρυφες λωρίδες (εικόνα 3-6). Έτσι για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας χρησιμοποιούνται μη γραμμικές εξισώσεις.



Εικόνα 3-6. Σκαρίφημα μεθόδου λωρίδων. [14]

Ο συντελεστής ασφάλειας θεωρείται ότι είναι ο ίδιος για κάθε τομή, εφόσον υπάρχει αμοιβαία υποστήριξη μεταξύ των τομών, δηλαδή δρουν δυνάμεις μεταξύ των τομών. Οι δυνάμεις που δρουν είναι οι εξής (εικόνα 3-6), [14]:

W: βάρος ολισθαίνουσας μάζας $W = \gamma b h$ (γ_{sat} όπου χρειάζεται),

T: διατμητική τάση στη βάση ($\tau = c' + \sigma_i \tan \phi'$),

N: ενεργή τάση κάθετη στη βάση της λωρίδας,

u: πίεση πόρων που ασκείται κάθετα στη βάση της λωρίδας,

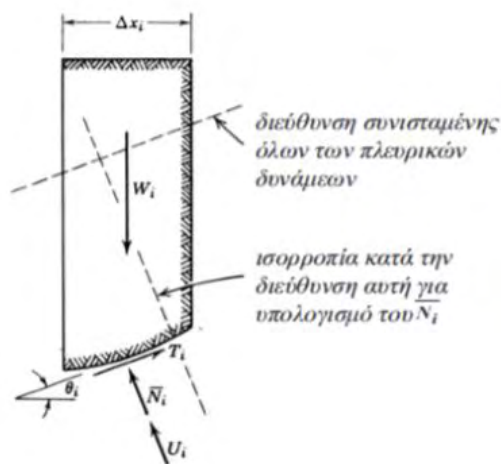
X: διαλωριδική πλευρική δύναμη κατά τη διεύθυνση των πλευρών της λωρίδας,

E: διαλωριδική πλευρική δύναμη κάθετη στην πλευρά της λωρίδας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές απ' τις πιο συνηθισμένες μεθόδους των λωρίδων.

I. Μέθοδος του Fellenius ή Σουηδική

Η μέθοδος αυτή είναι η παλιότερη (1936) και είναι γνωστή ως συμβατική μέθοδος των λωρίδων. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι πως δεν λαμβάνει υπόψη της όλες τις δυνάμεις που επενεργούν σε κάθε λωρίδα. Παραλείπει τις διατμητικές και τις ορθές τάσεις που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας και ικανοποιεί μόνο την ισορροπία των ροπών στο σύνολο της ολισθαίνουσας μάζας. Η παραδοχή αυτή οδηγεί σε μια υποεκτίμηση του συντελεστή ασφάλειας κατά 10-15% ενώ στην περίπτωση των απότομων πρανών με μεγάλη γωνία εσωτερικής τριβής, η υποεκτίμηση αυτή μπορεί να πλησιάσει το 60% (εικόνα 3-7), [2].



Εικόνα 3-7. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Fellenius [5]

Η συνισταμένη των διαλωριδικών πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα έχει διεύθυνση παράλληλη προς την βάση της λωρίδας. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται εύκολα η ορθή δύναμη στη βάση της λωρίδας N_i , από ισορροπία δυνάμεων που ασκούνται κάθετα προς την βάση της λωρίδας και ακολούθως η διατμητική δύναμη T_i , από τις σχέσεις που ακολουθούν. Τέλος, ο συντελεστής ασφάλειας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' \cdot \Delta l + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot \Delta l) \cdot \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (6)$$

όπου:

c' , ϕ' : η μέση συνοχή και γωνία τριβής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης σε ενεργές συνθήκες φόρτισης,

W_i : το βάρος της i λωρίδας,

u_i : η πίεση πόρων στη βάση της i λωρίδας,

$\alpha_i = \theta_i$: η γωνία μεταξύ της ακτίνας του κύκλου ολίσθησης που διέρχεται από το μέσο της βάσης κάθε λωρίδας και της κατακορύφου. η κλίση ως προς την οριζόντια και το μήκος της βάσης της i λωρίδας,

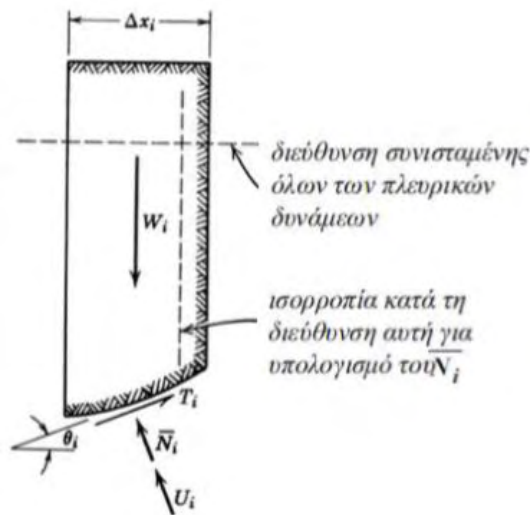
Δl : το μήκος της βάσης της κάθε λωρίδας,

II. Απλοποιημένη μέθοδος Bishop

Αποτελεί την απλούστευση της αρχικής πρότασης του Bishop (1955). Είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος και θεωρεί ότι οι εφαπτομενικές δυνάμεις στις πλευρές των λωρίδων είναι αρκετά μικρές και μπορούν να παραληφθούν [2].

Η μέθοδος Bishop παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την Σουηδική μέθοδο που παρουσιάστηκε προηγουμένως αλλά έχει και δύο βασικές διαφορές (εικόνα 3-8):

- Η παραδοχή που γίνεται για τις πλευρικές δυνάμεις είναι πλησιέστερα στην πραγματικότητα, γιατί οδηγεί σε λύσεις που οδηγούν σε κάποιες θεμελιώδεις γεωτεχνικές συνθήκες.
- Η εξίσωση που δίνει τον συντελεστή ασφάλειας είναι μη-γραμμική [ο συντελεστής ασφάλειας εμφανίζεται και στα δύο μέλη της εξίσωσης (εξ. 7)], με αποτέλεσμα η επίλυση γίνεται επαναληπτικά και να απαιτεί μεγαλύτερο χρόνο.



Εικόνα 3-8. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Bishop [5]

Ο συντελεστής ασφάλειας διαμορφώνεται ακολούθως:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \{ [c' + b + (W_i - u_i - b) \cdot \tan \phi'] \left(\frac{1}{m_a} \right) \}}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (7)$$

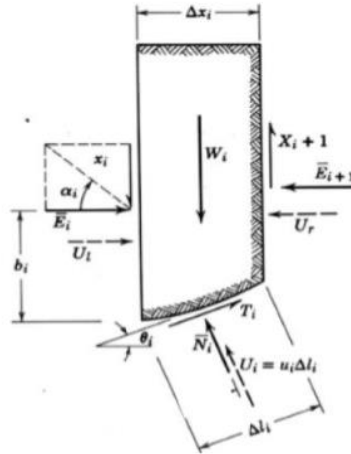
όπου : $m_a = \cos \alpha_i \left[1 + \left(\frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{F} \right) \right]$, $b = \Delta x_i$ το πάχος της λωρίδας και οι υπόλοιποι παράμετροι είναι όμοιοι με την προηγούμενη ενότητα.

III. Απλοποιημένη μέθοδος Janbu

Η μέθοδος αυτή αρχικά προτάθηκε από τους Janbu, Bjerrum και Kjaernsli (1956) αλλά αναπτύχθηκε πολύ αργότερα από τις δύο προηγούμενες μεθόδους, το 1973 περίπου, από τον καθηγητή του πανεπιστημίου του Trondheim της Νορβηγίας, Nilmar Janbu. Τότε διαπιστώθηκε ότι οι μέθοδοι για κυκλικές επιφάνειες δεν επαρκούν στην περίπτωση κατολισθήσεων μεγάλου μήκους [5].

Οι δύο βασικές παραδοχές της μεθόδου αυτής είναι (εικόνα 3-9) :

- Οι πλευρικές οριζόντιες δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε λωρίδα είναι ίσες.
- Κατά την υφιστάμενη κατάσταση του πρανούς ικανοποιείται η ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων που ασκούνται στο εξεταζόμενο πρίσμα αστοχίας.



Εικόνα 3-9. Παραδοχές υπολογισμού των δυνάμεων κατά Janbu [5]

Ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται ως εξής:

$$F = f_0 \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{c' + b + (W_i - u_i + b) \cdot \tan \phi_i}{\cos \alpha_i + m \alpha} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i + \tan \alpha_i} \quad (8)$$

Ο εμπειρικός διορθωτικός συντελεστής f_0 υπολογίζεται συναρτήσει της συνοχής, της γωνίας εσωτερικής τριβής και της γεωμετρίας της επιφάνειας αστοχίας και ανάλογα προς την μεθοδολογία ανάλυσης (ολικών ή ενεργών τάσεων).

IV. Μέθοδος Spencer

Ο Spencer το 1967 ανέπτυξε δύο ισότητες για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας η μία ικανοποιώντας την ισορροπία των δυνάμεων σε δυναμικές συνθήκες και η άλλη ισορροπία των οριζόντιων δυνάμεων. Στη μέθοδο αυτή γίνεται η παραδοχή ότι οι πλευρικές δυνάμεις είναι παράλληλες, δηλαδή όλες οι πλευρικές δυνάμεις κλείνουν με την ίδια γωνία, λαμβάνοντας υπόψη διατμητικές και κανονικές δυνάμεις. Παρόλου που ο Spencer εισήγαγε τη μέθοδο για τις κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης το 1969 ο Wright έδειξε ότι η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί και σε μη κυκλικές επιφάνειες ολίσθησης.

V. Μέθοδος Morgenstern και Price (GLE)

Η μέθοδος των Morgenstern και Price (1965) αναφέρεται σε μη-κυκλική επιφάνεια ολίσθησης και βασίζεται στην υπόθεση ότι οι διατμητικές δυνάμεις (T) μεταξύ των λωρίδων σχετίζονται με τις αντίστοιχες ορθές (E) σύμφωνα με τη σχέση $X = \lambda f(\chi)E$, όπου: X, E: οι κάθετες και οι οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων (διαλωριδικές), $f(\chi)$: συνάρτηση που αναφέρεται στη μεταβολή των διαλωριδικών (εσωτερικών) δυνάμεων, και λ : παράμετρος κλίμακας της παραπάνω συνάρτησης.

Σημειώνεται ότι, η συνάρτηση $f(\chi)$ δεν είναι σταθερή κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης και ότι σύμφωνα με τους Morgenstern and Price (1965) ο συντελεστής ασφαλείας δεν είναι ευαίσθητος σε αυτήν.

Σημειώνεται ότι η επίλυση όλων ανεξαιρέτως των μεθόδων λωρίδων για την ανάλυση της ευστάθειας πρυνών είναι πραγματοποιήσιμη μόνο με την χρήση του κατάλληλου γεωτεχνικού λογισμικού λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου. Κατ' επέκταση η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται κυρίως από την «σωστή» επιλογή των γεωτεχνικών παραμέτρων του εξεταζόμενου γεωολικού.

Κεφάλαιο 4 Στοιχεία Γεωλογικής - Γεωτεχνικής έρευνας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα βασικά σημεία της γεωτεχνικής μελέτης που εκπόνησε η Τεχνική Υπηρεσία της Περιφέρειας Θεσσαλίας, που είναι απαραίτητα για την παρουσίαση του έργου. Επίσης γίνεται αναφορά στην γεωμετρία, τα χωροταξικά δεδομένα, τη στρωματογραφία και τις παραμέτρους αντοχής του εδάφους

4.1 Γεωμορφολογία Περιοχής Έργου

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται κατά μήκος του άξονα της Επαρχιακής Οδού Αγριά – Δράκεια, στη θέση <<Βαγόني>> και ειδικότερα στη Χ.Θ. 4+500,00. Το φυσικό ανάγλυφο της περιοχής κατασκευής του τμήματος της οδού, χαρακτηρίζεται ως ορεινό το οποίο δομείται από μανδύα πάχους λίγων μέτρων αποτελούμενο από σχιστολιθικά κορήματα, εδραζόμενο επί σχιστολίθων. Στην εικόνα 4-1 αποτυπώνεται η περιοχή της μελέτης από αεροφωτογραφία (earth google). Στην εικόνα 4-2 φαίνεται η περιοχή που συνέβη το κατολισθητικό φαινόμενο. Στις εικόνες 4-3, 4-4 φαίνεται ανάντη η φυτοκάλυψη του πρανούς της περιοχής μελέτης. Στην εικόνα 4-5 φαίνεται μία χαρακτηριστική αστοχία τοίχου αντιστήριξης στην εξεταζόμενη περιοχή, γεγονός που αποτελούσε προειδοποιητική ένδειξη για πιθανή κατολίσθηση. Στις εικόνες 4-6, 4-7 φαίνονται οι ασυνέχειες των πρώτων στρώματων καθώς και η κλίση τους.



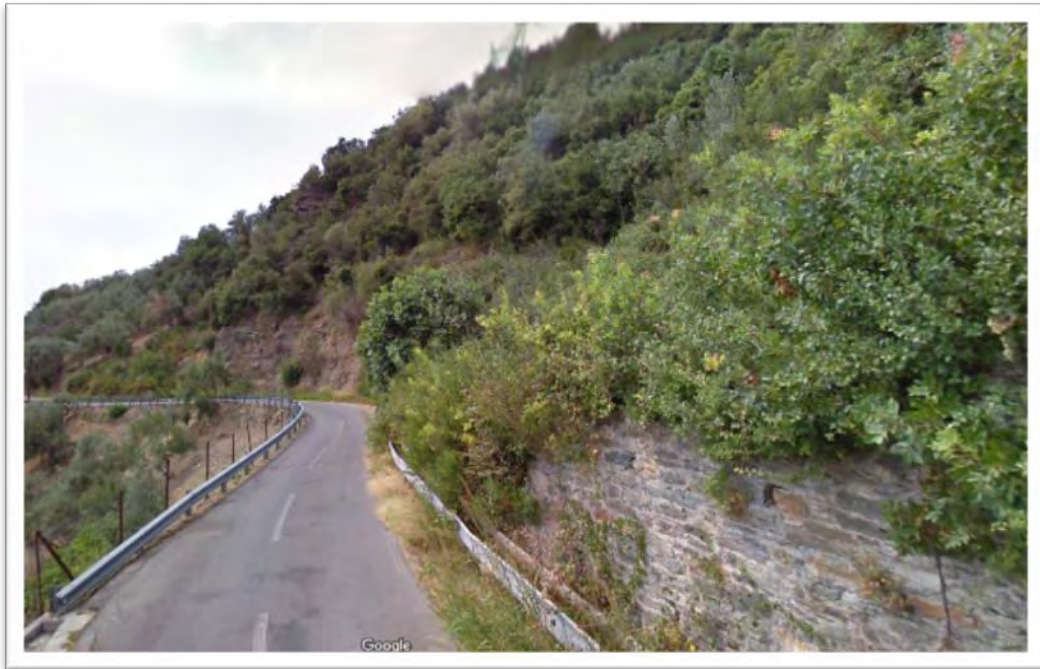
Εικόνα 4-1: Τοποθεσία κατολίσθησης, Συντεταγμένες (39.352183, 23.039863), [21].



Εικόνα 4-2: Περιοχή κατολίσθησης, [6].



Εικόνα 4-3: Βραχώδης Πρανές. [6].



Εικόνα 4-4: Φυτοκάλυψη Πρανούς, [21].



Εικόνα 4-5: Αστοχία τοίχου αντιστήριξης, [21].



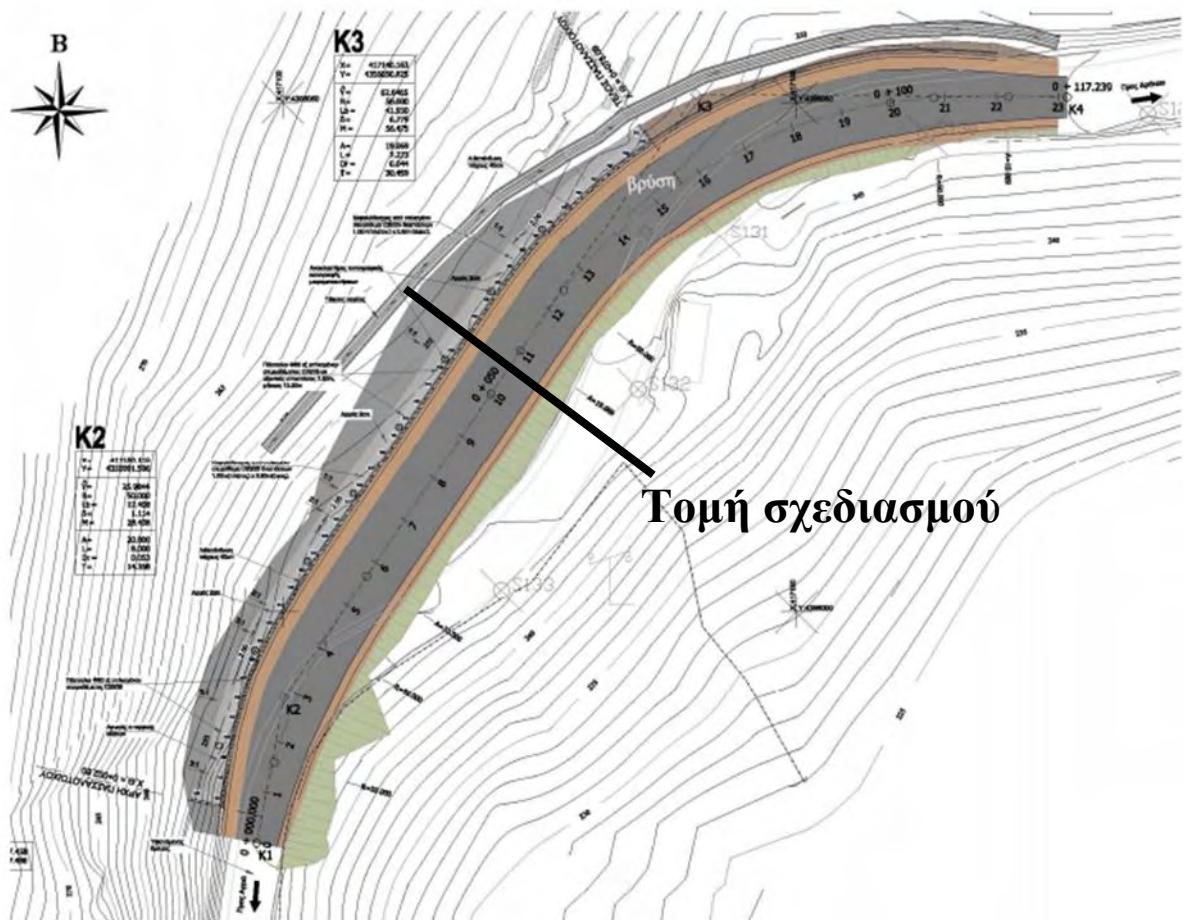
Εικόνα 4-6: Ασυνέχειες Πρανούς, [21].



Εικόνα 4-7: Κλίση Ασυνεχειών Πρανούς, [21].

4.2 Γεωλογικά Στοιχεία Ευρύτερης Περιοχής Έργου

Σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης «Εργασίες γεωτρήσεων στο δρόμο Αγριά – Δράκεια στη θέση Καστελόβραχο» [23], στην υπό μελέτη περιοχή εκτελέστηκε μία ερευνητική γεώτρηση. Κατά την ανωτέρω έρευνα, πραγματοποιήθηκαν, τόσο επί τόπου, όσο και εργαστηριακές δοκιμές.



Εικόνα 4-8: Γεωλογική αποτύπωση της περιοχής μελέτης [6].

Κατά τη διενέργεια της γεώτρησης, πραγματοποιήθηκε γεωλογική αποτύπωση της περιοχής μελέτης (Εικόνα 4-8). Το βάθος όρυξης της γεώτρησης ήταν 20.00m. Η γεώτρηση Γ1 εκτελέστηκε 40m περίπου νότια από τη Χ.Θ. 0+000,00.

Το βάθος εντοπισμού των γεωλογικών σχηματισμών, οι περιγραφές τους, η κατάταξη τους κατά U.S.C.S. (Unified Soil Classification System), καθώς και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα εδαφικά δείγματα των σχηματισμών που λήφθηκαν από τη γεώτρηση, παρουσιάζονται αναλυτικά στις σχετικές εγκεκριμένες μελέτες της Υπηρεσίας, ενώ στη συνέχεια δίδονται συνοπτικά και συγκεντρωτικά σε πίνακες τα στοιχεία τα οποία υπεισέρχονται στο σχεδιασμό της παρούσας μελέτης [6].

ΒΑΘΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ (m)		ΣΤΡΩΣΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΚΑΤΑΤΑΞΗ U.S.C.S.	ΟΡΙΑ ATTERBERG		
Από	Εως				LL (%)	PL (%)	PI (%)
0,00	4,90	1 ^η	Σχιστολιθικά κορήματα	GC-SC-GM	34,7	23,7	10,9
4,90	9,70	2 ^η	Εδαφοποιημένος Σχιστόλιθος (Ισχυρά έως Τελείως αποσαθρωμένος Σχιστόλιθος, βαθμός αποσάθρωσης IV-V)	GC-GM	29,9	23,1	6,7
9,70	20,00 Τέλος γεώ- τρησης	3 ^η	Μέτρια έως Ισχυρά αποσαθρωμένος Σχιστόλιθος (βαθμός αποσαθρωμένος III-IV)	SC-GM-GW	34,6	23,1	11,5

Πίνακας 4-1. Βάθος εντοπισμού γεωλογικών σχηματισμών, περιγραφή, κατάταξη κατά U.S.C.S. και μέσες τιμές εργαστηριακών αποτελεσμάτων των δειγμάτων που λήφθηκαν από τη γεώτρηση Γ-1, [6].

Σημειώνεται ότι για τον προσδιορισμό του αντιπροσωπευτικού γεωτεχνικού προφίλ σχεδιασμού και αντίστοιχα για τον προσδιορισμό των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού (της συνοχής, της γωνίας εσωτερικής τριβής και του ειδικού βάρους), ώστε να διενεργηθούν

οι αναλύσεις ευστάθειας, λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα της γεώτρησης, των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών, καθώς επίσης και βιβλιογραφικές αναφορές [6]. Στη συνέχεια, δίδεται το αντιπροσωπευτικό γεωτεχνικό προφίλ σχεδιασμού, τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία έκαστου στρώματος που αφορούν σε αποτελέσματα επί τόπου ή εργαστηριακών δοκιμών και οι προσδιορισθείσες τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων, βάσει των οποίων διενεργήθηκαν οι αναλύσεις ευστάθειας. Οι τιμές των εργαστηριακών δοκιμών που παρατίθενται κατωτέρω για κάθε γεωλογικό σχηματισμό αποτελούν τις αντιπροσωπευτικές μέσες τιμές κάθε γεωτεχνικής παραμέτρου [6].

➤ **Στρώση 1: Σχιστολιθικά κορήματα, κατάταξη GC-SC-GM (κατά U.S.C.S.).**

Η εν λόγω τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική ενότητα συναντήθηκε για βάθος γεώτρησης 0,00m έως 4,90m. Στην εν λόγω τεχνικογεωλογική ενότητα εκτελέστηκαν δύο δοκιμές SPT, με αριθμό κρούσεων 5 και 23. Τα διαθέσιμα στοιχεία για το εν λόγω στρώμα, βάσει της γεωτεχνικής έρευνας και των αντίστοιχων δοκιμών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα 4-2 [6]:

<i>Χαρακτηριστικά στρώσης</i>	<i>Εύρος τιμών</i>	<i>Μέσες τιμές</i>
<i>N_{SPT}</i>	<i>5 – 23</i>	<i>14</i>
<i>Όριο υδαρότητας LL (%)</i>	<i>31,0 – 34,2 – 36,0</i>	<i>34,7</i>
<i>Όριο πλαστικότητας PL (%)</i>	<i>22,6 – 23,5 – 25,2</i>	<i>23,7</i>
<i>Δείκτης πλαστικότητας PI (%)</i>	<i>8,8 – 10,7 – 13,4</i>	<i>10,9</i>

Πίνακας 4-2. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.

➤ **Στρώση 2: Εδαφοποιημένος Σχιστόλιθος (Ισχυρά έως Τελείως αποσαθρωμένος Σχιστόλιθος, βαθμός αποσάθρωσης IV-V), κατάταξη GCGM (κατά U.S.C.S.)**

Η εν λόγω τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική ενότητα συναντήθηκε για βάθος γεώτρησης 4,90m έως 9,70m. Τα διαθέσιμα στοιχεία για το εν λόγω στρώμα, βάσει της γεωτεχνικής έρευνας και των αντίστοιχων δοκιμών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα 4-3 [6]:

<i>Χαρακτηριστικά στρώσης</i>	<i>Εύρος τιμών</i>	<i>Μέσες τιμές</i>
<i>Όριο υδαρότητας LL (%)</i>	<i>27,9 – 31,9</i>	<i>29,9</i>
<i>Όριο πλαστικότητας PL (%)</i>	<i>20,6 – 25,7</i>	<i>23,1</i>
<i>Δείκτης πλαστικότητας PI (%)</i>	<i>6,2 – 7,3</i>	<i>6,7</i>

Πίνακας 4-3. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.

➤ **Στρώση 3: Μέτρια έως Ισχυρά αποσαθρωμένος Σχιστόλιθος (βαθμός αποσαθρωμένος III-IV), κατάταξη SC- GM-GW (κατά U.S.C.S.).**

Η εν λόγω τεχνικογεωλογική-γεωτεχνική ενότητα συναντήθηκε για βάθος γεώτρησης 9,70m έως 20,00m. Τα διαθέσιμα στοιχεία για το εν λόγω στρώμα, βάσει της γεωτεχνικής έρευνας και των αντίστοιχων δοκιμών δίνονται στον ακόλουθο πίνακα [6].

<i>Χαρακτηριστικά στρώσης</i>	<i>Εύρος τιμών</i>	<i>Μέσες τιμές</i>
<i>I_{S50} (MPa)</i>	<i>0,18 – 0,62</i>	<i>0,40</i>

Πίνακας 4-4. Μέσες τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της ανωτέρω τεχνικογεωλογικής γεωτεχνικής στρώσης.

Βάσει των διαθέσιμων γεωλογικών και γεωτεχνικών πληροφοριών που αναφέρονται ανωτέρω προσδιορίστηκαν οι γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού κατά μήκος της ζώνης κατασκευής της πασσαλοστοιχίας [6].

Προκειμένου να διενεργηθούν οι αναλύσεις διαστασιολόγησης της εν λόγω πασσαλοστοιχίας, προσδιορίστηκαν οι μέσες και αντιπροσωπευτικές τιμές της συνοχής (c), της γωνίας εσωτερικής τριβής (φ), του ειδικού βάρους (γ) και του μέτρου ελαστικότητας (E) έκαστου στρώματος που εντοπίζεται στη γεώτρηση [6]. Για τον προσδιορισμό των ανωτέρω γεωτεχνικών παραμέτρων, επιπλέον των τιμών που προέρχονται από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών, που υπεισέρχονται στους γεωτεχνικούς υπολογισμούς για όλες τις στρώσεις, έγινε προσέγγιση των τιμών τους βιβλιογραφικά, αξιοποιώντας το σύνολο των διαθέσιμων στοιχείων [6].

Λαμβάνοντας υπόψη και αξιολογώντας τα διαθέσιμα στοιχεία, της γεώτρησης Γ1, των εργαστηριακών και επί τόπου δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας, καθώς και των βιβλιογραφικών τιμών προσδιορίστηκαν για τις επιμέρους τεχνικογεωλογικές - γεωτεχνικές ενότητες – στρώσεις, οι αντιπροσωπευτικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων των αντιπροσωπευτικών προφίλ που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό [6].

Η διάκριση και η ομαδοποίηση των επιμέρους στρώσεων βασίσθηκε σε γεωτεχνικά δεδομένα, τα οποία αποτελούν κριτήρια προσδιορισμού των τιμών των κρίσιμων παραμέτρων που υπεισέρχονται στους γεωτεχνικούς υπολογισμούς. Συγκεκριμένα για τις στρώσεις που εκτιμάται ότι αναπτύσσονται κατά μήκος του έργου προσδιορίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές παράμετροι, αξιοποιώντας τα διαθέσιμα στοιχεία, ως ακολούθως [6]:

✓ **Στρώσεις 1 και 2: Σχιστολιθικά κορήματα και εδαφοποιημένος σχιστόλιθος.**

Λόγω της κοκκώδους σύστασης του εν λόγω σχηματισμού, η τιμή της συνοχής του λαμβάνεται μηδενική. Η γωνία εσωτερικής τριβής του εν λόγω σχηματισμού προκύπτει ότι για σχηματισμό GC: $\varphi > 31^\circ$, για το σχηματισμό GM: $\varphi > 34^\circ$ και για σχηματισμό SC: $\varphi = 31^\circ$ [12].

Ο τύπος $\tan \varphi = 0.58 - 0.0045 I_p$, όπου I_p ο δείκτης πλαστικότητας (%), ο οποίος συσχετίζει την γωνία εσωτερικής τριβής με τον δείκτη πλαστικότητας, δίνει για τον εν λόγω στρώμα: $\varphi = 27,5^\circ \sim 28,4^\circ$ [13].

Δίδονται οι ακόλουθες σχέσεις [14]:

$$E_s = 1200 (N + 6) = 13.200 \sim 34.800 \text{ kPa},$$

$$E = 600 (N + 6) + 2000 = 19.400 \text{ kPa}, (N > 15).$$

Όπου, E_s είναι το μέτρο πλαστικότητας, E είναι το μέτρο ελαστικότητας και N ο αριθμός χτύπων στην δοκιμή SPT.

Για τον προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στις αναλύσεις διαστασιολόγησης της πασσαλοστοιχίας, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι για τη συνοχή, τη γωνία εσωτερικής τριβής, και το ειδικό βάρος για το ανωτέρω στρώμα. Οι τιμές που προσδιορίστηκαν για τις εν λόγω παραμέτρους είναι [6]:

- Συνοχή: $c = 5 \text{ kPa}$,
- Γωνία εσωτερικής τριβής: $\varphi = 35^\circ$,
- Ειδικό βάρος: $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$.

✓ Στρώση 3: Σχιστόλιθος.

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι αντιπροσωπευτικές γεωτεχνικές παράμετροι για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες των σχιστόλιθων, που συναντώνται στην περιοχή του έργου και αποκαλύφθηκαν από τη γεώτρηση Γ1, εφαρμόστηκε κατάλληλα η κατάταξη πετρωμάτων με βάση το δείκτη GSI - Geological Strength Index. Με το δείκτη GSI καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των παραμέτρων αντοχής της βραχόμαζας για σημαντικό εύρος τεχνικογεωλογικών συνθηκών, όπως αυτές καταγράφονται με παρατηρήσεις πεδίου. Για τον άμεσο χαρακτηρισμό της βραχόμαζας λαμβάνεται υπόψη η κατάσταση που παρουσιάζει ως προς τη δομή και τον τεμαχισμό της. Ως προς τον τεμαχισμό της βραχόμαζας αξιολογούνται η κατάσταση των ασυνεχειών, η τραχύτητα και η εξαλλοίωσή τους. Ο συνδυασμός των ανωτέρω παραμέτρων ικανοποιεί την περιγραφή τεχνικογεωλογικών συνθηκών που δύναται να αφορούν διαφορετικούς τύπους γεωλογικών σχηματισμών και δομές βραχόμαζας [6].

Στο πλαίσιο των ανωτέρω και των αρχών προσδιορισμού του εν λόγω δείκτη, λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία περιγραφής της εν γένει δομής και της πετρογραφικής "εικόνας" όλων των τύπων των γεωλογικών σχηματισμών που αναμένεται να συναντηθούν στις θέσεις θεμελίωσης των ιστών, τα διαθέσιμα στοιχεία προγενέστερων μελετών και τα στοιχεία της γεωλογικής/γεωτεχνικής έρευνας που διενεργήθηκε [6].

Για να καλυφθεί όλο το εύρος των συνθηκών που διαμορφώνονται επί τόπου για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες των γνευσιοσχιστολίθων και των μαρμάρων, εν σχέση με την κατάσταση της βραχόμαζας, κρίθηκε σκόπιμο, ανάλογα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που οι ανωτέρω τρεις τεχνικογεωλογικές ενότητες παρουσιάζουν, να διενεργηθεί διακριτά υπολογισμός του δείκτη GSI, προκειμένου να προσδιορισθούν αντίστοιχα οι κρίσιμες γεωτεχνικές παράμετροι, ώστε να επιτευχθεί κατά το δυνατόν αξιόπιστα και με την απαιτούμενη ακρίβεια και λεπτομέρεια η προσομοίωση των επί τόπου συνθηκών [6].

Για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες των μαλακών, των καφέ και των γκρι σχιστόλιθων που περιγράφονται ανωτέρω και που εντοπίζονται στις θέσεις εκσκαφής του ορύγματος που μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προσδιορίστηκε εύρος των αντιπροσωπευτικών τιμών του δείκτη GSI, ώστε να καλύπτεται όλο το εύρος της κατάστασης στην οποία αναμένεται να συναντηθεί, βάσει των στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά την επί τόπου τεχνικογεωλογική αποτύπωση. Για τις εν λόγω τιμές του δείκτη GSI διενεργήθηκαν αναλυτικοί υπολογισμοί των γεωτεχνικών παραμέτρων αντοχής της βραχώμαζας. Οι εκτιμηθείσες τιμές του δείκτη GSI για κάθε περίπτωση και οι αναλυτικοί υπολογισμοί των γεωτεχνικών παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία Hoek-Brown και περιέχονται στα αναλυτικά φύλλα υπολογισμού τα οποία υπάρχουν στην υπό εξέταση μελέτη [6]. Σε κάθε φύλλο υπολογισμού δίδονται οι παραδοχές υπό τις οποίες διενεργούνται οι αντίστοιχοι υπολογισμοί των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας [6]. Στη διαδικασία υπολογισμού των τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων της βραχώμαζας με βάση το δείκτη GSI υπεισέρχεται η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του άρρηκτου πετρώματος. Προκειμένου να προσδιορισθεί το εν λόγω μέγεθος για τις τεχνικογεωλογικές ενότητες των σχιστόλιθων, αξιολογήθηκαν τα διαθέσιμα στοιχεία των προγενέστερων μελετών του έργου. Συγκρίνοντας την τεχνικογεωλογική περιγραφή των κατηγοριών βραχώμαζας που προσδιορίζονται στις προγενέστερες μελέτες του έργου, τις τεχνικογεωλογικές περιγραφές των ενοτήτων των σχιστόλιθων, και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών αντοχής της βραχώμαζας προσδιορίστηκε το εύρος του δείκτη GSI. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του δείκτη GSI για το σύνολο του εύρους έκαστης τεχνικογεωλογικής ενότητας και οι αντιπροσωπευτικές τιμές σχεδιασμού των μηχανικών ιδιοτήτων σχεδιασμού δίδονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες (4-5, 4-6, 4-7) [6].

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη του "υγιούς" βράχου (σ_c) εκτιμήθηκε από τα αποτελέσματα των δοκιμών σημειακής φόρτισης [$I_s(50)$], εφόσον λόγω του υψηλού κερματισμού, δεν ήταν δυνατόν να μορφωθούν πυρήνες για την εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης [6].

Σε δύο δοκιμές σημειακής φόρτισης που εκτελέστηκαν σε σχιστολιθικά τεμάχια η αντοχή κυμάνθηκε από $I_s(50) = 0,62 - 0,18$ MPa, με μέση τιμή $I_s(50)_{\text{μέση}} = 0,40$ MPa.

Η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση: $\sigma_c \sim 20 \div 25 I_s(50)$ σύμφωνα με την οποία η αντοχή του «υγιούς» πετρώματος είναι της τάξης των, $\sigma_c = 8 \sim 15$ MPa [6].

<i>ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ</i>	<i>Μαλακός Σχιστόλιθος</i>
GSI	20-30
m_i	10
σ_c (MPa)	8-15

Πίνακας 4-5 Αντιπροσωπευτικές τιμές υπολογισμού βάσει του δείκτη GSI των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού των σχιστολίθων.

Για την τιμή του δείκτη GSI και των αντίστοιχων τιμών των γεωτεχνικών παραμέτρων που προσδιορίζονται με εφαρμογή της σχετικής μεθοδολογίας, εκτιμήθηκαν και καθορίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού των μηχανικών ιδιοτήτων που λήφθηκαν υπόψη στους γεωτεχνικούς υπολογισμούς διαστασιολόγησης της πασσαλοστοιχίας αντιστήριξης [6].

Βάσει των ανωτέρω, υπολογίσθηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των γεωτεχνικών παραμέτρων σχεδιασμού και δίδονται συγκεντρωτικά στους ακόλουθους πίνακες (4-6, 4-7). [6].

Ιδιότητες	Εύρος τιμών	Αντιπροσωπευτικές τιμές
GSI	20~30	-
σ_{ci} (MPa)	8~15	-
ν	0,3	-
γ (kN/m ³)	23~24	23
Συνολική c (kPa)	45~88	87
Γωνία εσωτ. τριβής ϕ (°)	39~46	45
Αντοχή βραχόμαζας σ_{cm} (MPa)	0,650~1,096	1,00
Μέτρο ελαστικότητας βραχόμαζας (MPa)	300~550	400

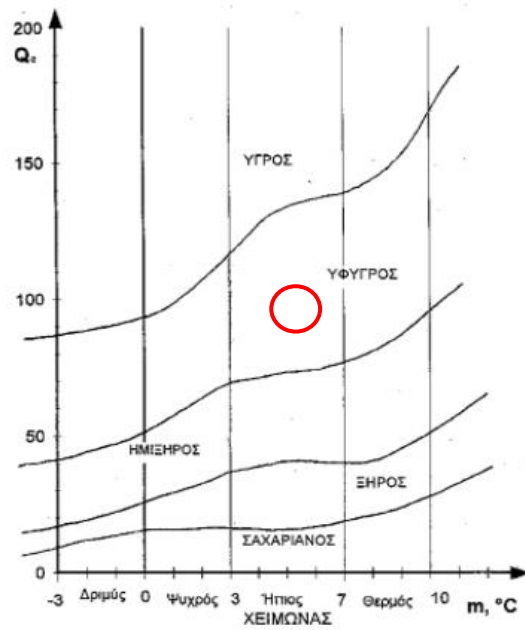
Πίνακας 4-6 Γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού τεχνικογεωλογικής ενότητας των μαλακών σχιστολίθων.

A/A Στρώσης	Ενότητα	c (kPa)	ϕ (°)	γ (kN/m ³)
1+2	Σχιστολιθικά κορήματα και εδαφοποιημένος σχιστόλιθος	5	35	21
3	Σχιστόλιθος	87	45	23

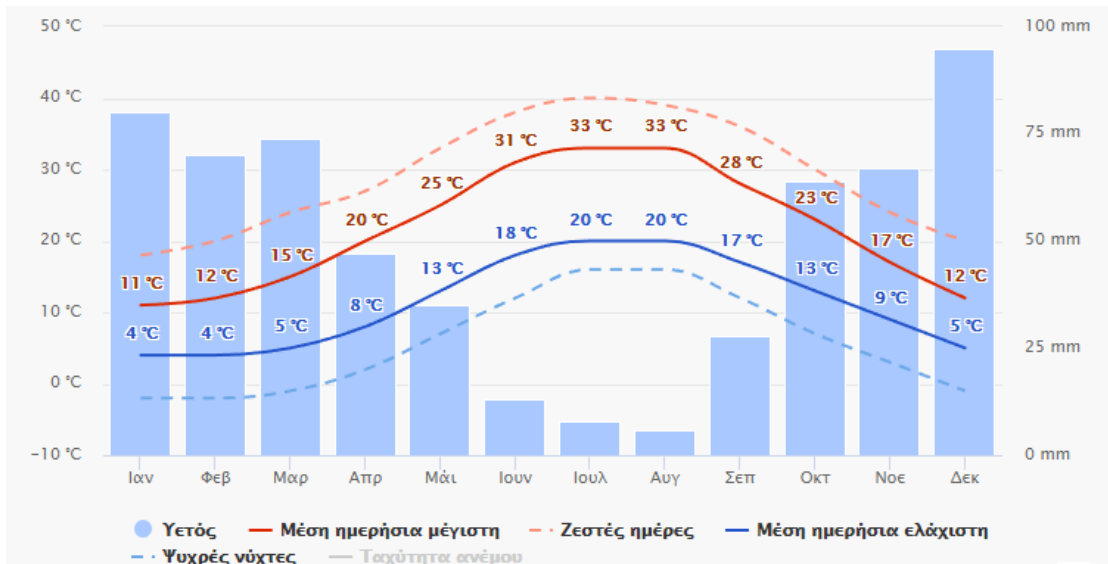
Πίνακας 4-7. Προσδιορισθείσες γεωτεχνικές παράμετροι σχεδιασμού έκαστου στρώματος.

4.3 Κλιματολογικά Στοιχεία Περιοχής Έργου

Από τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής και τους πίνακες που παρατίθενται παρακάτω το βιοκλίμα της περιοχής, κατά Emberger, είναι το ύφυγρο, με χειμώνα ήπιο. Επίσης προκύπτει ότι η περίοδος ξηρασίας της περιοχής μελέτης είναι 3,5 μήνες και βιοκλιματικά εντάσσεται στον έντονο μέσο-μεσογειακό τύπο (εικόνες 4-9, 4-10), [6].



Εικόνα 4-9: Το κλιματόγραμμα Emberger – Sauvage [22].



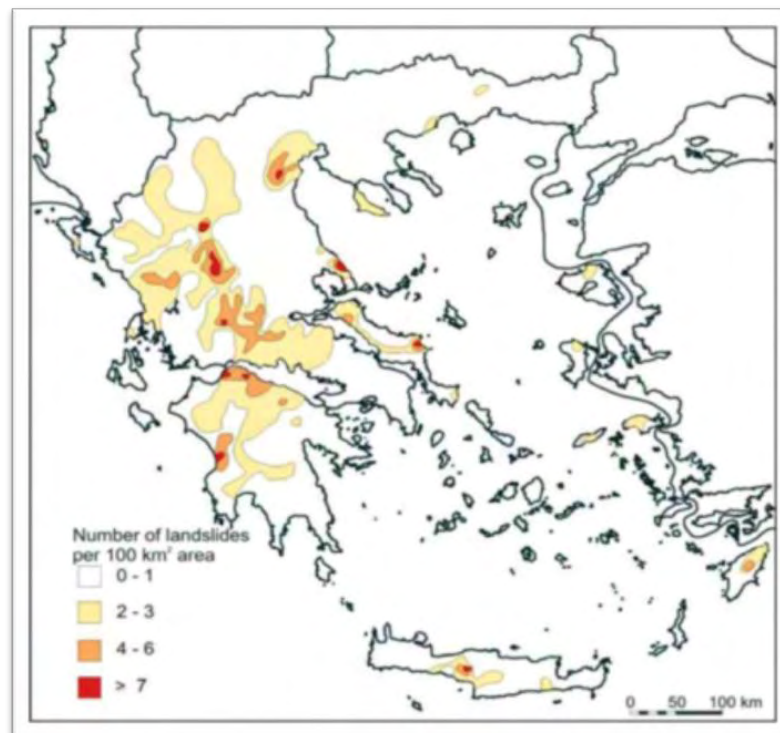
Εικόνα 4-10. Διάγραμμα Βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης [20]

4.4 Υδρογεωλογικά Στοιχεία Ευρύτερης Περιοχής Έργου

Από τα στοιχεία της γεωτεχνικής μελέτης του έργου προκύπτει ότι στη γεώτρηση Γ-1, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρέθηκε σε βάθος 5,0m περίπου [6].

4.5 Στοιχεία Σεισμικότητας

Σύμφωνα με τον ΕΑΚ, η περιοχή του νομού Μαγνησίας ανήκει εξ' ολοκλήρου στη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ, με συντελεστή σεισμικής επιτάχυνσης για τεχνητά πρανή ίσο με $\alpha=0,24$. Συνεπώς ο οριζόντιος και ο κατακόρυφος συντελεστής σεισμικής επιτάχυνσης, σύμφωνα με τον ΕΑΚ θα είναι : $a_h=0,12$ και $a_v=\pm 0,06$ αντίστοιχα, [8].



Εικόνα 4-11: Χάρτης κατολισθητικής επικινδυνότητας [8].

Η σεισμικότητα της περιοχής μπορεί να συνδυαστεί με τον χάρτη κατολισθητικής επικινδυνότητας (εικόνα 4-11) όπου διαπιστώνεται ότι η περιοχή του Πηλίου ανήκει στην κόκκινη περιοχή όπου εκδηλώνονται παραπάνω από επτά κατολισθήσεις ανά 100 Km². Ο σεισμικός παράγοντας σε συνδυασμό με την ποιότητα και την μηχανική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής αυξάνουν την επικινδυνότητα εκδήλωσης ενός κατολισθητικού φαινομένου.

Κεφάλαιο 5 Γεωτεχνικά Προγράμματα

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται περιγραφή των γεωτεχνικών προγραμμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Η προσομοίωση των πρανών έγινε με τη βοήθεια των προγραμμάτων Phase2 και Slide, της εταιρίας Rocscience [16].

5.1 Γεωτεχνικό πρόγραμμα Phase2

Το γεωτεχνικό πρόγραμμα Phase2 βασίζεται σε έναν δισδιάστατο κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των τάσεων και των μετατοπίσεων γύρω από υπόγειες ή επιφανειακές εκσκαφές. Ποικίλα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με το συγκεκριμένο πρόγραμμα που περιλαμβάνουν διάφορα προβλήματα επίπεδης παραμόρφωσης, όπως: διάνοιξη εκσκαφής σε φάσεις, προβλήματα ευστάθεια πρανών, σήραγγες και άλλα. Η επίλυση του εκάστοτε μοντέλου στο Phase2 γίνεται σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, με τις δύο κύριες τάσεις στο επίπεδο της διατομής ανάλυσης και μία κύρια τάση κάθετα προς αυτό. Επίσης η διατομή θεωρείται σταθερή κατά μήκος του άξονα της ενώ η εκσκαφή θεωρείται ότι έχει άπειρο μήκος κάθετα προς το επίπεδο της ανάλυσης [16].

Η διαδικασία μοντελοποίησης συγκροτείται από τρία στάδια [16]:

A. Παραγωγή μοντέλου (Model)

Η παραγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2 πραγματοποιείται με γραφική εισαγωγή της γεωμετρίας του, γίνεται σε αυτόνομο περιβάλλον μορφής CAD, και με εισαγωγή των παραμέτρων σε αντίστοιχες φόρμες εισαγωγής. Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing). Η διαδικασία αυτή γίνεται σε δύο βήματα. Αρχικά γίνεται διακριτοποίηση των ορίων της εκσκαφής και στη συνέχεια η δημιουργία του πλέγματος. Για την αρχική φόρτιση των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη είτε το ίδιο βάρος των στοιχείων είτε οι αρχικές τάσεις της γεωμάζας είτε και τα δύο ταυτόχρονα. Εισάγονται οι επί τόπου τάσεις του εντατικού πεδίου, τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες, οι οποίες έχουν τη μορφή κινηματικών περιορισμών ή προκαθορισμένων εντατικών συνθηκών στα σύνορα του μοντέλου. Στον προσδιορισμό των παραμέτρων του γεωυλικού, γίνεται η επιλογή της κατάλληλης καταστατικής σχέσης σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας (π.χ. γραμμικά ελαστική, ψαθυρή κλπ.) και την ανισοτροπία. Σχετικά με τη συμπεριφορά της βραχομάζας επιλέγεται το κατάλληλο κριτήριο αστοχίας όπως είναι τα κριτήρια Mohr-Coulomb, Hoek-Brown και Drucker-Prager. Στη συνέχεια της κατασκευής του μοντέλου θα εισαχθούν οι ιδιότητες και οι γεωτεχνικές παράμετροι της βραχομάζας βάσει των γεωλογικών και γεωτεχνικών στοιχείων που λαμβάνονται από την μελέτη κατασκευής του έργου. Τέλος, είναι δυνατή και η εισαγωγή των κατάλληλων μέτρων υποστήριξης όπως είναι τα αγκύρια και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

B. Υπολογισμός (Compute)

Είναι το στάδιο όπου γίνεται ο υπολογισμός και οι αναλύσεις, και προσδιορίζονται οι μετατοπίσεις, οι τάσεις, οι συντελεστές ασφαλείας και όλα τα χρήσιμα για τη μελέτη μεγέθη. Η ενέργεια αυτή να πραγματοποιηθεί μόνο εφόσον υπάρχει το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων και έχει αποθηκευτεί το μοντέλο σε ένα αρχείο.

C. Ερμηνεία των Αποτελεσμάτων (Interpret)

Αποτελεί το στάδιο στο οποίο εξάγονται, με οπτικοποίηση, τα αποτελέσματα, και ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει τις αναλύσεις γραφικά.

Τέλος ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στο πρόγραμμα είναι και η μέθοδος της απομείωσης της διατμητικής τάσης (Shear Strength Reduction- SSR method). Η μέθοδος αυτή, με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους με συγκεκριμένους συντελεστές (SRF), μέχρι να προκύψει αστάθεια, και εξάγει τον κρίσιμο συντελεστή απομείωσης αντοχής του πρανούς, ο οποίος στη διαδικασία ονομάζεται κρίσιμος απομειωμένος συντελεστής αντοχής (critical SRF), και είναι αντίστοιχος με τον συντελεστή ασφαλείας του πρανούς [16].

5.1.1 Απομείωση διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction - SSR)

Σημειώνεται ότι η επιλογή του Phase σχετικά με την απομείωση της διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction-SSR) επιτρέπει να εκτελείται αυτόματα ανάλυση ευστάθειας του πρανούς με πεπερασμένα στοιχεία και να υπολογίζεται ο κρίσιμος συντελεστής απομείωσης (διατμητικής) αντοχής (critical strength reduction factor – critical

SRF) για το εξεταζόμενο μοντέλο. Ο κρίσιμος συντελεστής απομείωσης της αντοχής είναι ισοδύναμος με τον "συντελεστή ασφαλείας" του πρανούς. Η βασική έννοια της μεθόδου απομείωσης της διατμητικής αντοχής (SSR) είναι αρκετά απλή. Οι παράμετροι αντοχής ενός πρανούς μειώνονται με έναν ορισμένο συντελεστή απομείωσης της αντοχής (SRF) και υπολογίζεται η τασική ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διαφορετικές τιμές του συντελεστή SRF, έως ότου το μοντέλο γίνει ασταθές (δηλ. τα αποτελέσματα της ανάλυσης να μην συγκλίνουν). Αυτό καθορίζει τον κρίσιμο συντελεστή απομείωσης της αντοχής (κρίσιμος SRF), ή τον συντελεστή ασφαλείας, του πρανούς.

5.1.2 Συντελεστής Αντοχής (Strength Factor)

Η επιλογή συντελεστής αντοχής (strength factor) του προγράμματος Phase προσδιορίζει τις τιμές και απεικονίζει ταυτόχρονα τον συντελεστή αντοχής γύρω από την εκσκαφή. Ο συντελεστής αντοχής υπολογίζεται διαιρώντας την αντοχή του βράχου (βασισμένο στο επιλεγμένο κριτήριο αστοχίας), από την τάση που ασκείται σε κάθε σημείο του πλέγματος. Και οι τρεις κύριες τάσεις (σ_x , σ_y , σ_z) επηρεάζουν τον συντελεστή αντοχής (strength factor-SF) με αποτέλεσμα ο SF να μπορεί να εφαρμοστεί και σε μοντέλα τριών διαστάσεων (3-D). Στα ελαστικά υλικά ο SF μπορεί να είναι και μικρότερος από τη μονάδα (για τις περιπτώσεις ανάπτυξης υπερπίεσεων). Στην περίπτωση των πλαστικών υλικών ο SF είναι πάντα μεγαλύτερος ή ίσος της μονάδας. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τύποι εύρεσης του SF με την χρήση του κριτηρίου αστοχίας Mohr- Coulomb.[16]

c = συνοχή

φ = γωνία τριβής

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \right] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$$

$$J_3 = \left(\sigma_x - \frac{I_1}{3} \right) \left(\sigma_y - \frac{I_1}{3} \right) \left(\sigma_z - \frac{I_1}{3} \right) + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \left(\sigma_x - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{yz}^2 - \left(\sigma_y - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{zx}^2 - \left(\sigma_z - \frac{I_1}{3} \right) \tau_{xy}^2$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin \left(-\frac{3\sqrt{3}J_3}{2J_2^{3/2}} \right), \quad -\frac{\pi}{6} < \theta < \frac{\pi}{6}$$

$$S = \sqrt{J_2}$$

$$S_{max} = \frac{\frac{I_1}{3} \sin \varphi + c \cos(\varphi)}{\cos(\theta) + \frac{\sin(\theta) \sin(\varphi)}{\sqrt{3}}}$$

$$\text{strength factor} = \frac{S_{max}}{S}$$

5.1.3 Ολικές Μετατοπίσεις (Total displacement)

Το πρόγραμμα Phase υπολογίζει οι τιμές των ακόλουθων μετακινήσεων (interpret toolbar list) :

- Οριζόντια μετατόπιση X (πραγματικές τιμές),
- Οριζόντια μετατόπιση X (απόλυτες τιμές),
- Κατακόρυφη μετατόπιση Y (πραγματικές τιμές),

- Κατακόρυφη μετατόπιση Y (απόλυτες τιμές),
- Ολική μετατόπιση $u_{total} = \sqrt{X^2 + Y^2}$

Με την επιλογή set displacement δίνεται η δυνατότητα να καθοριστεί μια μη μηδενική σταθερή μετακίνηση, σαν συνοριακή συνθήκη για την ανάλυση των τάσεων. Αντί να καθοριστεί ότι η μετατόπιση σε έναν κόμβο είναι σταθερή και ίση με το μηδέν, καθορίζεται ότι η μετατόπιση σε έναν κόμβο (node) είναι σταθερή και ίση με μία μη μηδενική τιμή. Η επιλογή set displacement χρησιμοποιείται για σενάρια ανάστροφης ανάλυσης, όπου οι συνοριακές μετακινήσεις είναι γνωστές και υπολογίζεται η τελική εντατική κατάσταση [16].

5.1.4 Yielded elements

Η επιλογή “Yielded Elements” επιτρέπει στο χρήστη να περιγράψει τον βαθμό πλαστικοποίησης στη μάζα του βράχου γύρω από τις εκσκαφές. Στην ουσία περιγράφει ποια στοιχεία έχουν πλαστικοποιηθεί (διαρρεύσει). Πιο συγκεκριμένα, δείχνει ποια στοιχεία έχουν ξεπεράσει την ελαστική περιοχή και έχουν χάσει σημαντικό τμήμα της φέρουσας ικανότητάς τους. Η επιλογή αυτή είναι διαθέσιμη μόνο στη λίστα γραμμής εργασιών “Interpret” [16].

5.2 Slide v.6.0

Επόμενο πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Slide v.6.0 της εταιρίας Rocscience [16]. Το πρόγραμμα πραγματοποιεί αναλύσεις οριακής ισορροπίας σε δύο διαστάσεις για κυκλικές ή μη κυκλικές επιφάνειες αστοχίας σε εδαφικά ή βραχώδη πρανή. Έχει εφαρμογές σε πληθώρα τεχνικών έργων, όπως πρανή, εκσκαφές, φράγματα κ.α. και διαθέτει πολλά εργαλεία για τη μορφοποίηση ενός μοντέλου.

Αρχικά, εισάγεται το μοντέλο με τα γεωμετρικά του στοιχεία και όρια. Στη συνέχεια, μπορούν να εφαρμοστούν φορτία, και μετά να εισαχθούν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφών/βράχων, επιλέγοντας και το κατάλληλο κριτήριο αστοχίας. Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η εισαγωγή νερού, είτε με πιεζομετρική γραμμή, είτε με συντελεστή πίεσης πόρων R_u , καθώς και η επιβολή σεισμικού φορτίου. Οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιούνται με τη χρήση της μεθόδου των κατακόρυφων λωρίδων. Επιπλέον, είναι δυνατή η ανάλυση μιας ορισμένης επιφάνειας ολίσθησης, ή να επιλεγεί η ενέργεια να βρεθεί η κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης, καθώς και ο συντελεστής ασφάλειας του πρανούς.

Κεφάλαιο 6 Αναλύσεις Ευστάθειας Πρανούς

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται τα δεδομένα και τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του υπό εξέταση προβλήματος της παρούσας εργασίας. Τόσο η γεωμετρία όσο και οι εδαφικές παράμετροι λήφθηκαν από την γεωτεχνική μελέτη που περιγράφηκε προηγουμένως, [23]. Η μηχανική συμπεριφορά των γεωλικών που εμφανίζονται στην περιοχή του εξεταζόμενου πρανούς θεωρήθηκε ελαστοπλαστική και εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Εν συνεχεία, με τη χρήση του προγράμματος Phase παρουσιάζονται τα διαγράμματα των μετακινήσεων, οι περιοχές της διατομής που το έδαφος έχει υποστεί πλαστικοποίηση και τις τιμές του συντελεστή αντοχής για διάφορα σενάρια περιπτώσεων. Σημειώνεται ότι σε όλες τις αναλύσεις με το Phase παρουσιάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα: 1) Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων, 2) Ολικές μετατοπίσεις και μέγιστη τιμή μετατόπισης, 3) Παραμορφωμένα όρια του εξεταζόμενου πρανούς, 4) Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει και 5) Συντελεστής αντοχής.

Τέλος, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Slide παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας που προκύπτουν από τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης για την υπό μελέτη διατομή.

6.1 Βασικό μοντέλο

Το βασικό μοντέλο που εισήχθη στο Phase παρουσιάζεται παρακάτω σε πέντε διαφορετικές καταστάσεις :

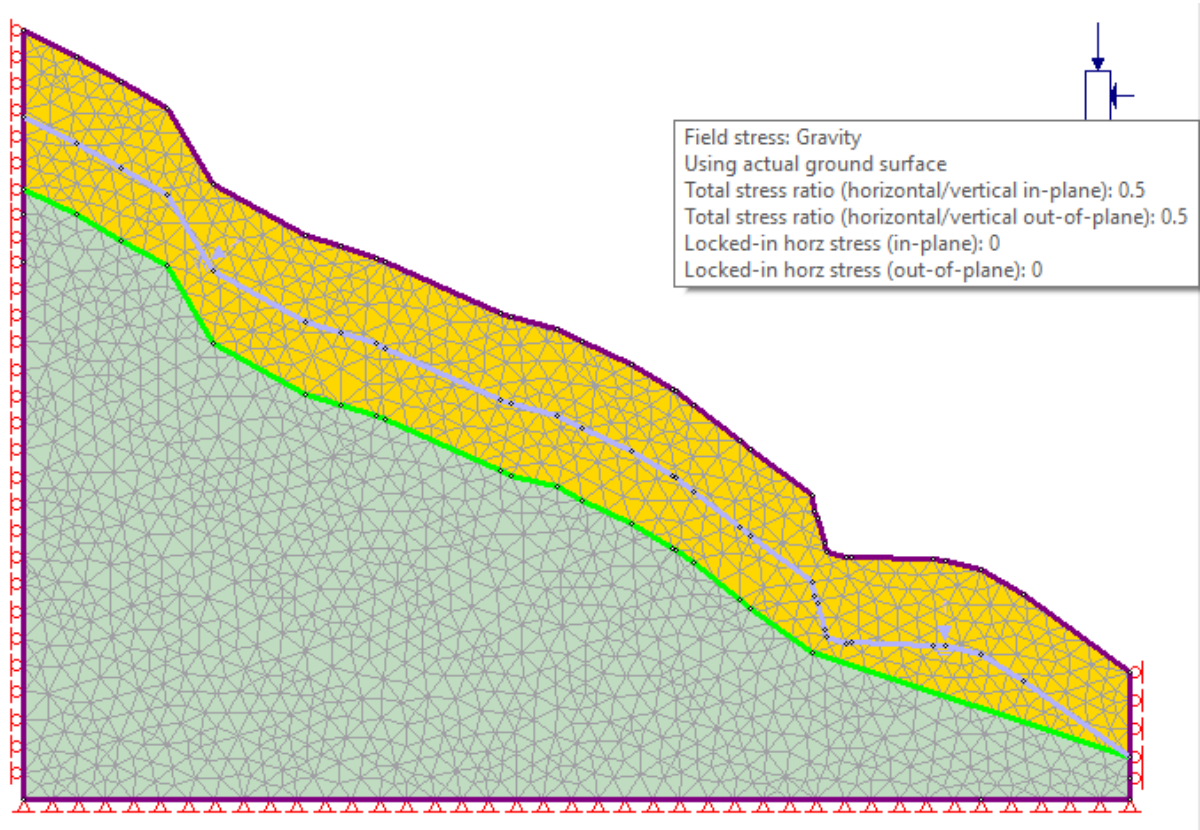
1. Απλοποιημένο μοντέλο: Θεώρηση των γεωλικών της τομής σχεδιασμού ως συνεχή και ισότροπα μέσα, χωρίς ασυνέχειες, χωρίς παρουσία υδροφόρου ορίζοντα, χωρίς θεώρηση σεισμού.
2. Μοντέλο με παρουσία ασυνεχειών. Θεωρούνται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνονται δύο οικογένειες ασυνεχειών όπου η κύρια οικογένεια είναι αντίρροπη προς την κλίση του πρσανούς και η δευτερεύουσα οικογένεια ασυνεχειών έχει διεύθυνση κατακόρυφη και αποτελείται από μικρού μήκους ασυνέχειες μεταξύ των ασυνεχειών της κύριας οικογένειας. Στην δεύτερη περίπτωση λαμβάνονται επίσης δύο οικογένειες ασυνεχειών όπου όμως η κύρια οικογένεια είναι ομόρροπη προς την κλίση του πρσανούς ενώ για την δευτερεύουσα οικογένεια ασυνεχειών ισχύουν τα ίδια με την πρώτη περίπτωση.
3. Μοντέλο με παρουσία ασυνεχειών και προσθήκη πιεζομετρικής γραμμής, η οποία αντιπροσωπεύει έναν υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.
4. Μοντέλο με παρουσία ασυνεχειών, προσθήκη πιεζομετρικής γραμμής και εισαγωγή σεισμού (με $\alpha_h = 0,12$ και $\alpha_v = +0,06$).
5. Μοντέλο με παρουσία ασυνεχειών, προσθήκη πιεζομετρικής γραμμής και εισαγωγή σεισμού ($\alpha_h = 0,12$ και $\alpha_v = -0,06$).

Η επιλογή σεισμικής φόρτισης επιτρέπει να συμπεριληφθεί μια ψευδοστατική σεισμική φόρτιση (σεισμός) στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων του phase. Οι σεισμικοί

συντελεστές που χρησιμοποιούνται είναι αδιάστατοι και αντιπροσωπεύουν την (μέγιστη) σεισμική επιτάχυνση ως κλάσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Όταν ορίζεται ένας σεισμικός συντελεστής, θα εφαρμοστεί μια πρόσθετη δύναμη σώματος σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο στο πλέγμα, ως εξής: Σεισμική δύναμη = σεισμικός συντελεστής X δύναμη σώματος (λόγω βαρύτητας). Για τους σεισμικούς συντελεστές χρησιμοποιείται η ακόλουθη σύμβαση κατεύθυνσης: ένας θετικός οριζόντιος συντελεστής αντιπροσωπεύει μια δύναμη που εφαρμόζεται προς τα δεξιά και ένας αρνητικός οριζόντιος συντελεστής αντιπροσωπεύει μια δύναμη που εφαρμόζεται προς τα αριστερά. Ο θετικός κάθετος συντελεστής αντιπροσωπεύει μια δύναμη που εφαρμόζεται προς τα πάνω. Ο αρνητικός κάθετος συντελεστής αντιπροσωπεύει μια δύναμη που εφαρμόζεται προς τα κάτω.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στα πέντε μοντέλα της ανάλυσης.

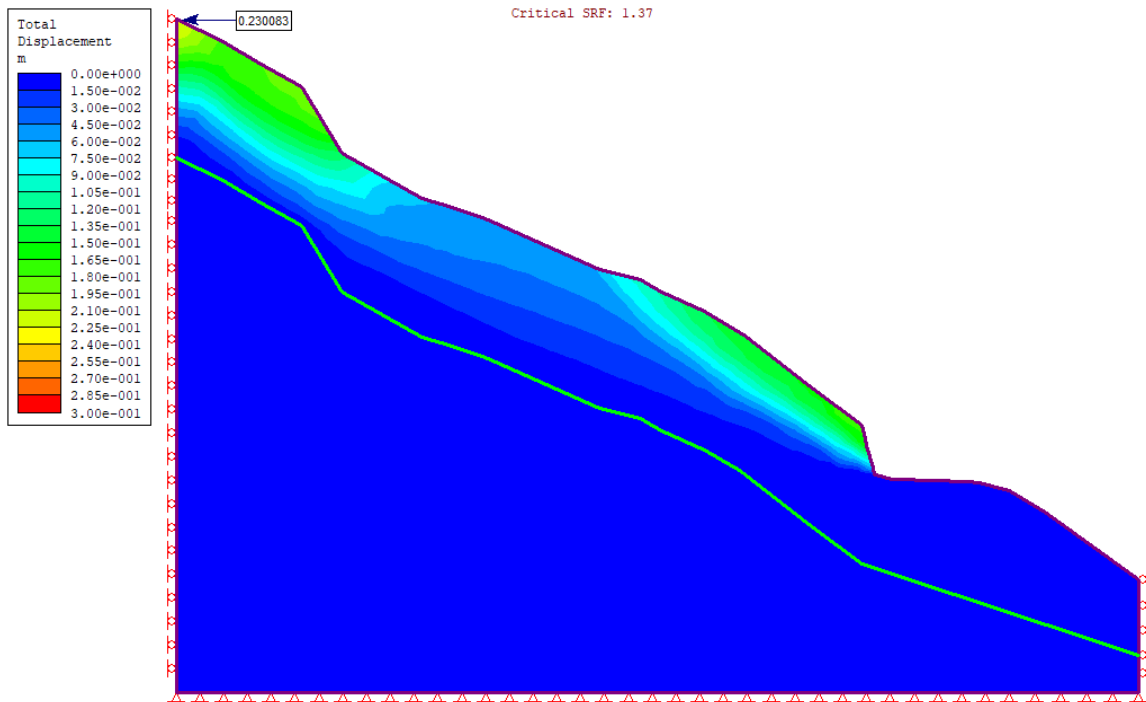
6.1.1 Απλοποιημένο Μοντέλο



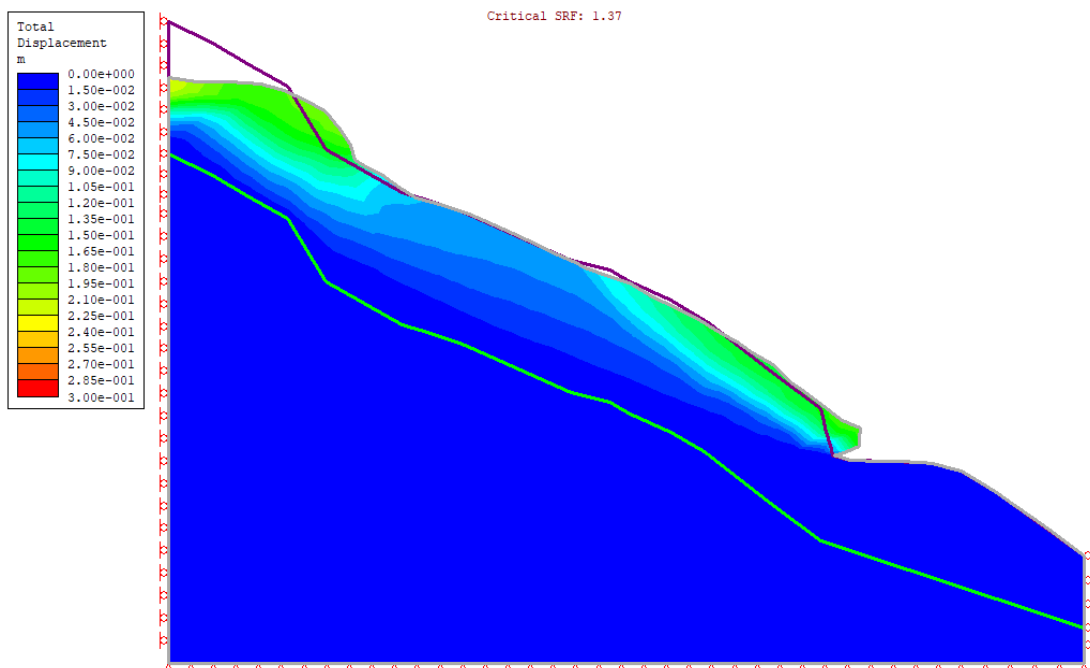
Εικόνα 6-1. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.

Με την εντολή COMPUTE και στην συνέχεια INTERPRET παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

Total displacements

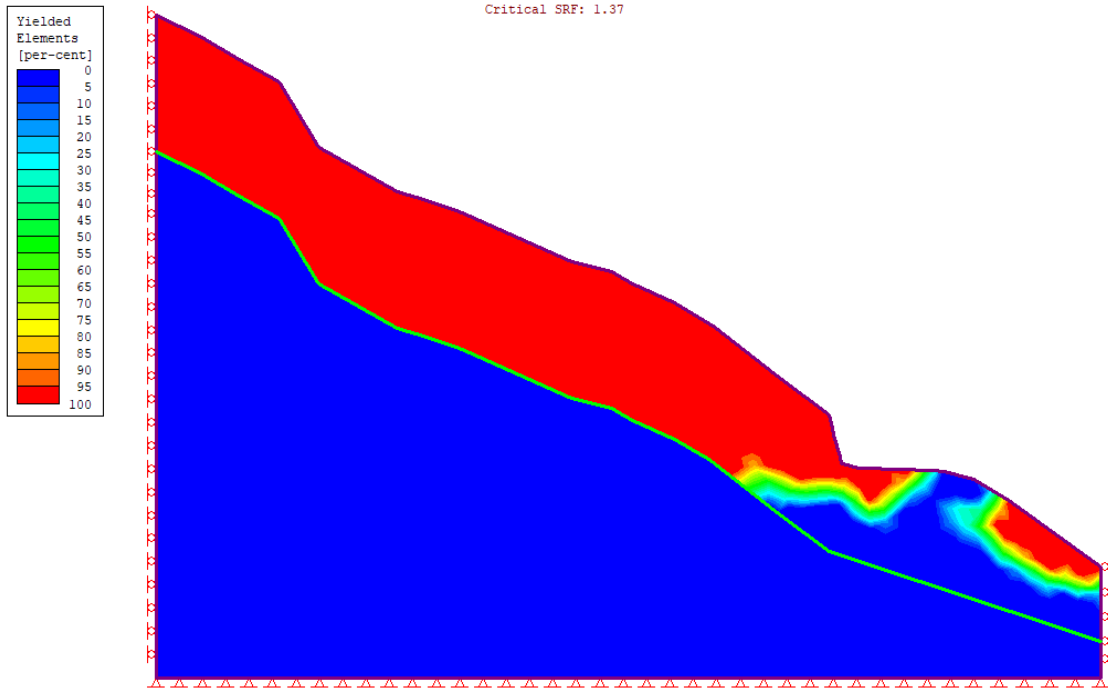


Εικόνα 6-2. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,230083 m.



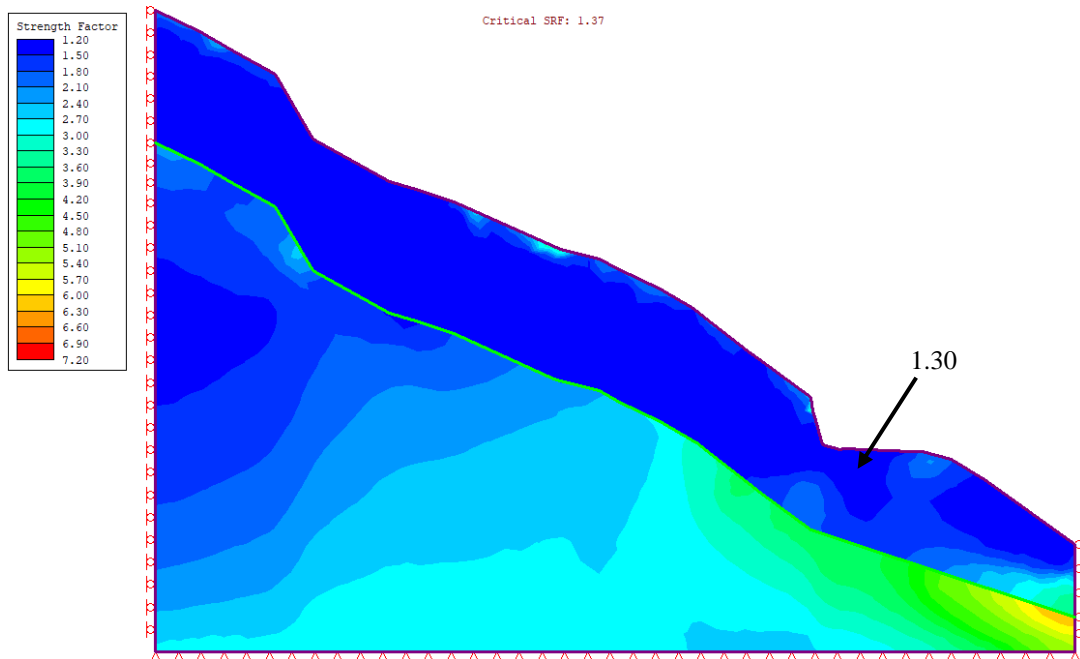
Εικόνα 6-3. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-4. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



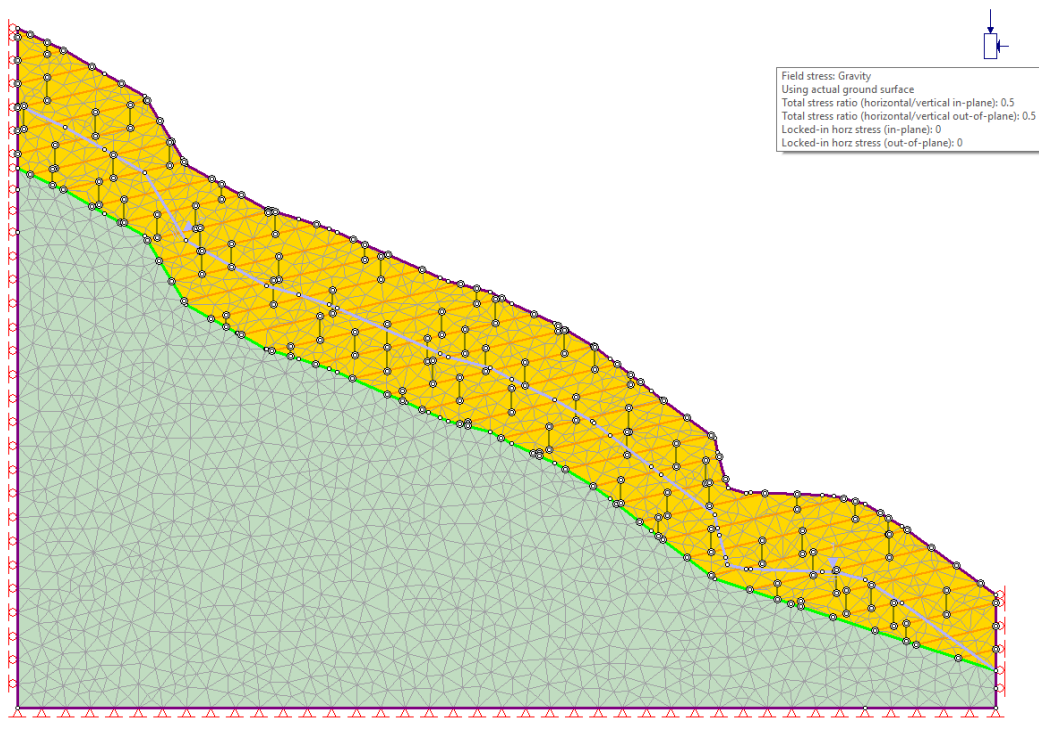
Εικόνα 6-5. Συντελεστής αντοχής

Στην εικόνα 6-1 αποτυπώνεται η γεωμετρία του πρανούς και ο συντελεστής των επιτόπου τάσεων ($k=\sigma_h/\sigma_v$) ο οποίος θεωρείται ίσος με $k=0.5$. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίση με 1.37 και η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,23m η οποία παρατηρείται στην κεφαλή του πρανούς, (εικόνες 6-2, 6-3).

Στην εικόνα 6-3 παρατηρούνται δύο περιοχές του πρανούς που παραμορφώνονται πιο έντονα. Η μία στη κεφαλή του πρανούς και η άλλη στο μέσο περίπου της απόστασης κεφαλή-πόδας του πρανούς. Επίσης, παρατηρείται ότι σχεδόν όλο το ανώτερο στρώμα της τομής έχει διαρρεύσει εκτός μιας περιοχής στην περιοχή του πόδα (εικόνα 6-4). Τέλος, ο συντελεστής αντοχής, κυμαίνεται σε τιμές κοντά στο 1.2 (εικόνα 6-5).

6.1.2 Μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών

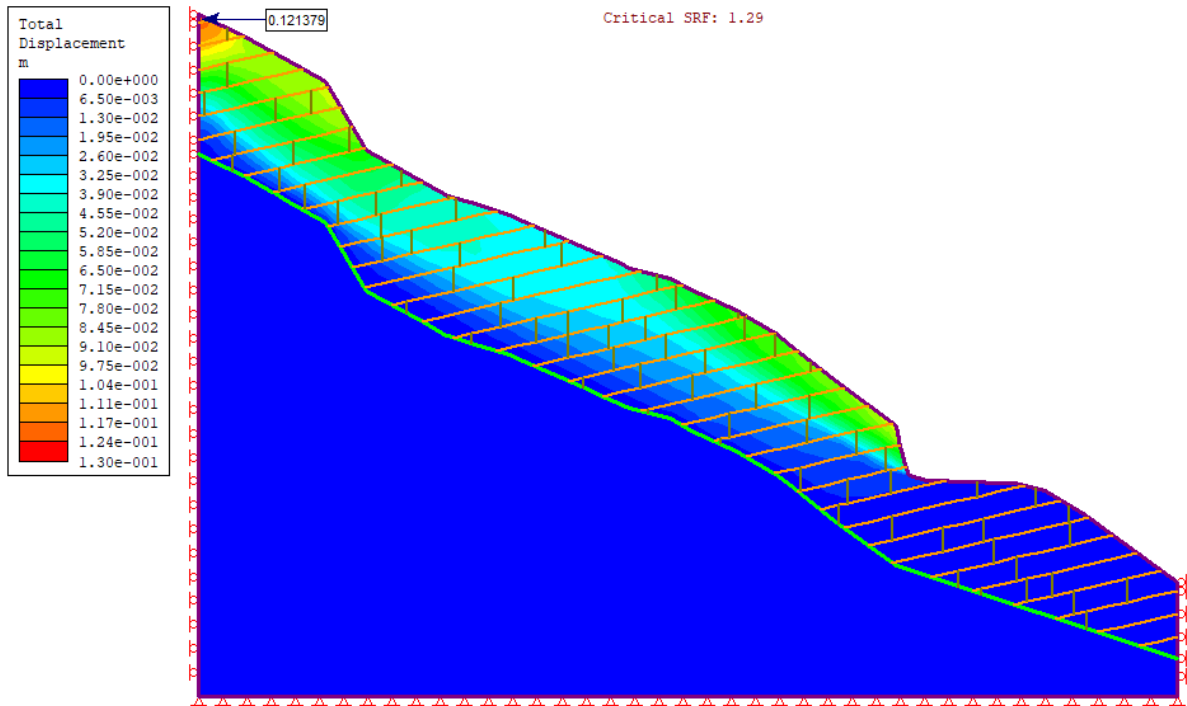
- i. Αντίρροπες ασυνέχειες ως προς την κλίση του πρανούς



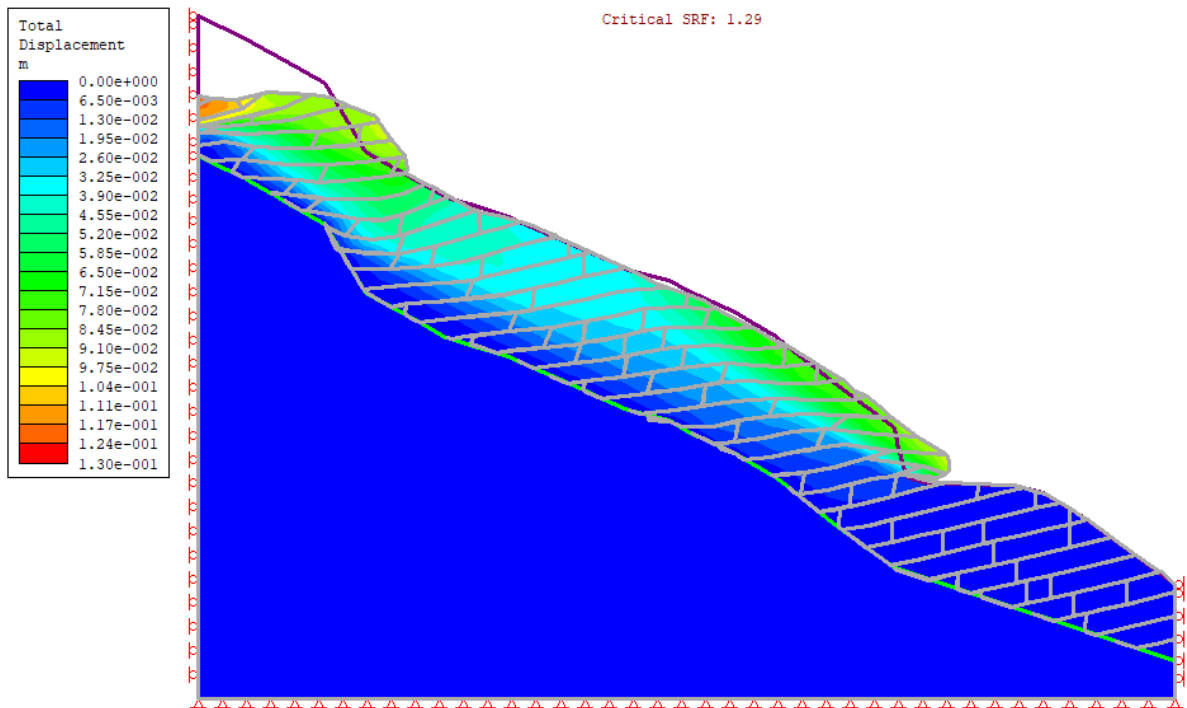
Εικόνα 6-6. Γεωμετρία Πρανούς – Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.

Με την εντολή COMPUTE και στην συνέχεια INTERPRET παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

Total displacements

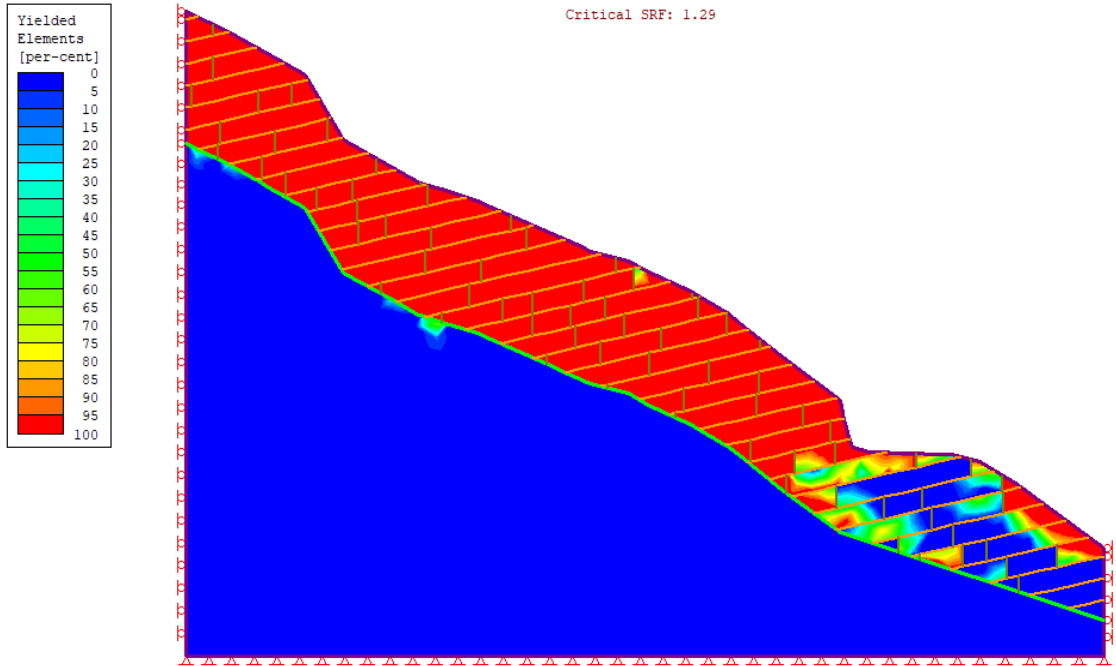


Εικόνα 6-7. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,121379m.



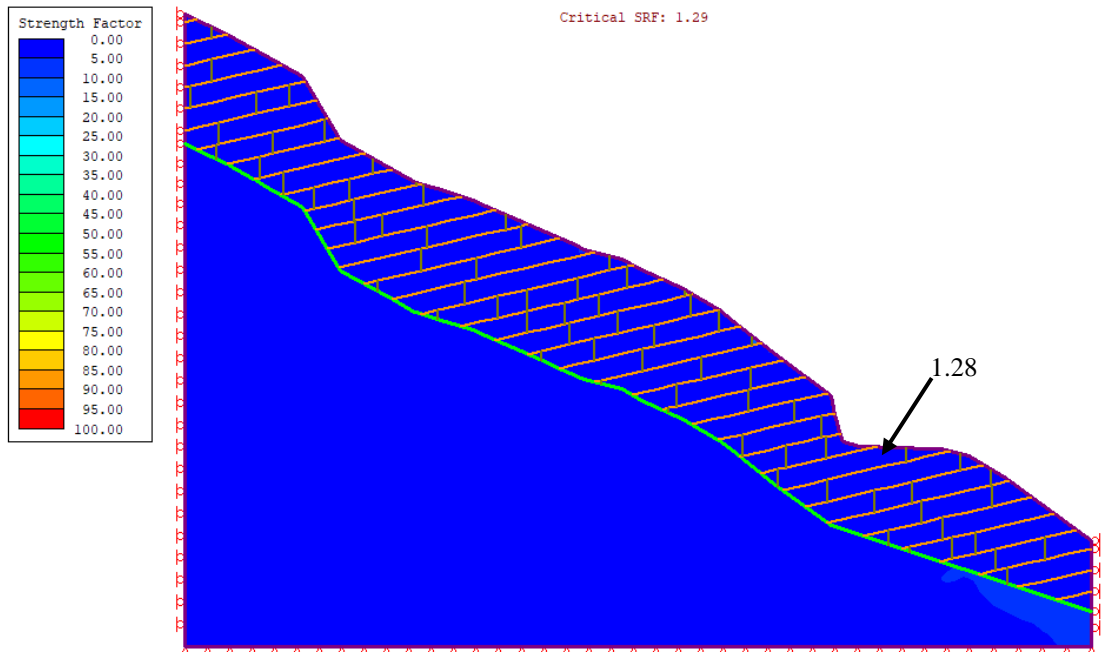
Εικόνα 6-8. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-9. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

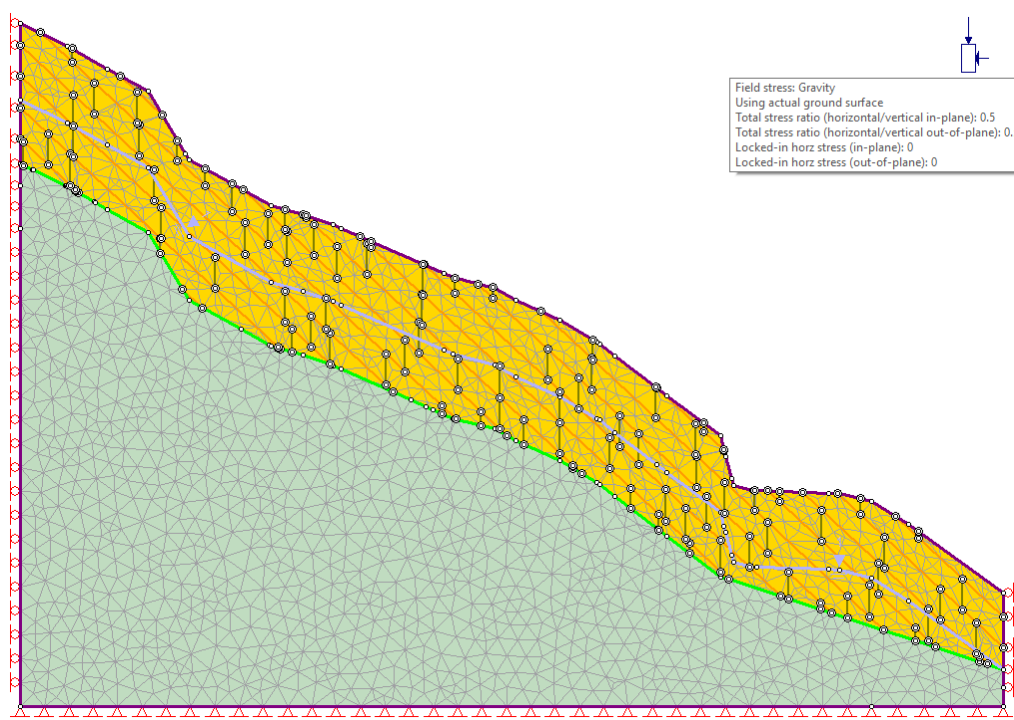
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-10. Συντελεστής αντοχής

Παρατηρούμε ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίση με 1.29, δηλ. το πρανές είναι ευσταθές, ενώ η μέγιστη ολική μετατόπιση είναι ίση με 0,12m και παρατηρείται στην κεφαλή του πρανούς. Παρατηρούνται δύο περιοχές του πρανούς που αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις και οι οποίες δείχνουν ότι συνενώνονται με αποτέλεσμα την επιδείνωση της πιθανότητας εκδήλωσης κατολισθητικού φαινομένου. Η κατώτερη επιφάνεια της περιοχής αυτής είναι κοντά στη διεπιφάνεια των δύο κύριων γεωλογικών σχηματισμών που δομούν το πρανές (οι στρώσεις 1-2 θεωρούνται ενιαίο στρώμα που τοποθετείται πάνω στην στρώση 3) (εικόνες 6-7, 6-8). Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο, παρατηρείται ότι σχεδόν όλο το ανώτερο στρώμα της τομής έχει διαρρεύσει εκτός μιας περιοχής στην περιοχή του πόδα (εικόνα 6-9). Τέλος, ο συντελεστής αντοχής, κυμαίνεται σε πολύ μικρές τιμές κοντά στο 1 (εικόνα 6-10).

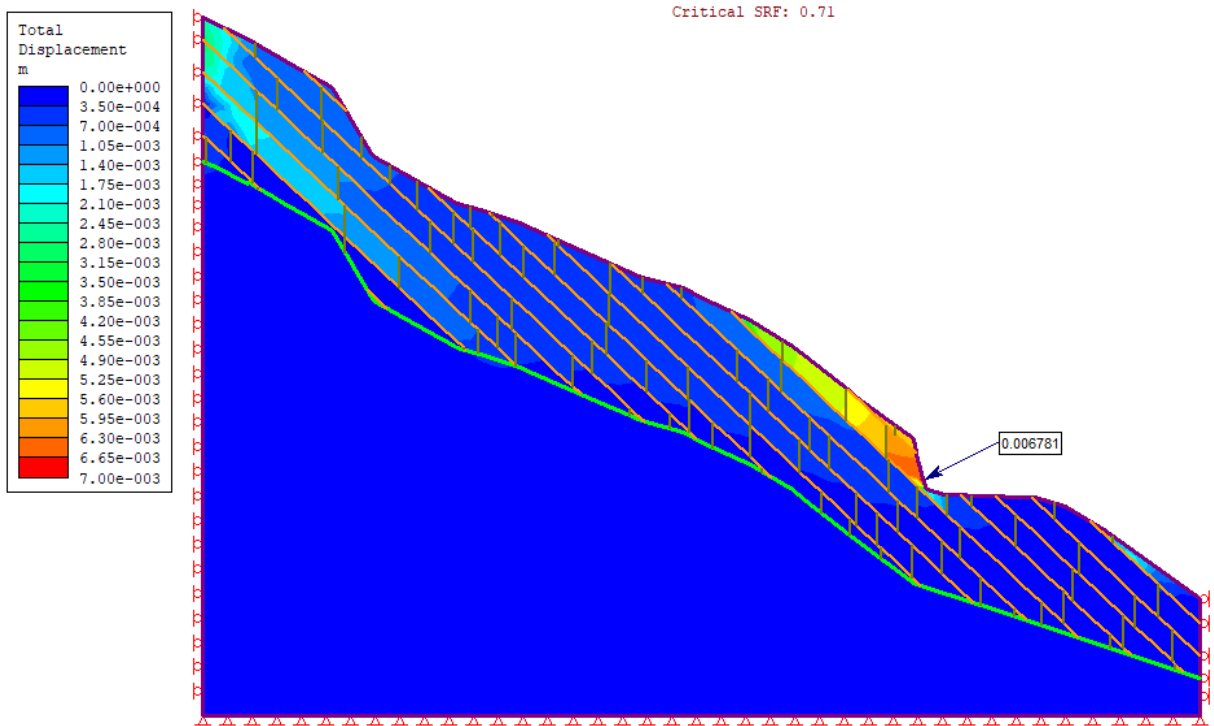
ii. Ομόρροπες ασυνέχειες ως προς την κλίση του πρανούς



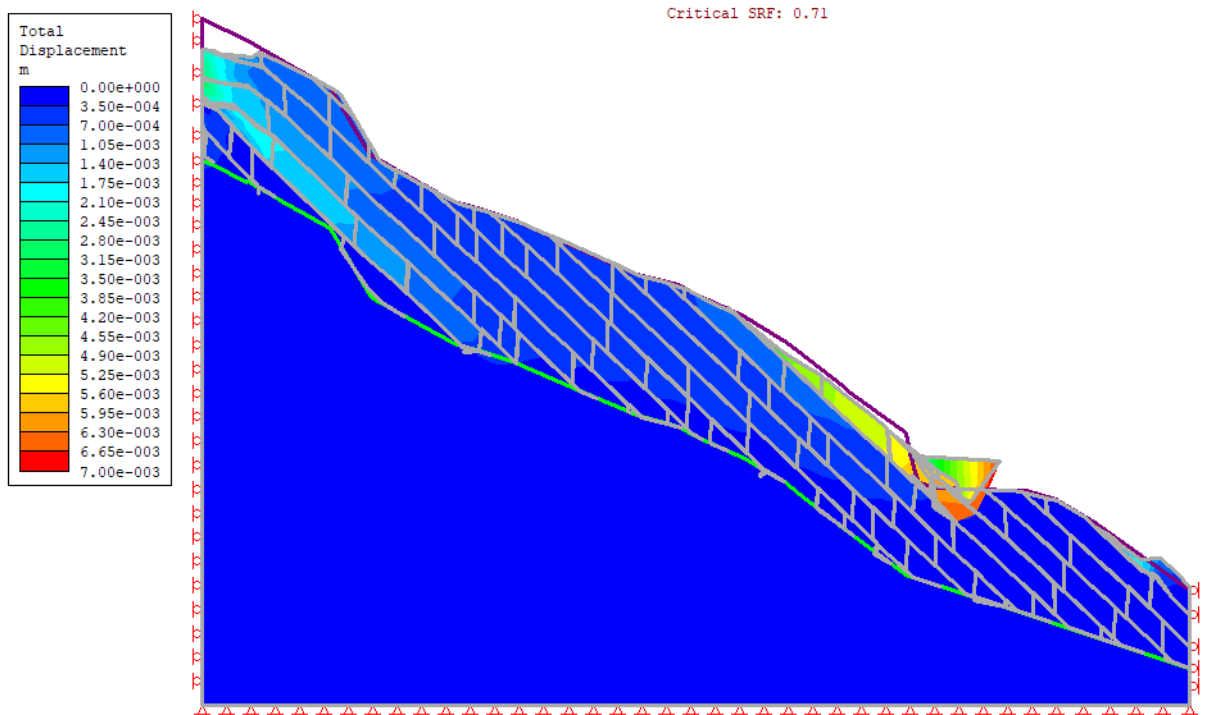
Εικόνα 6-11. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.

Με την εντολή COMPUTE και στην συνέχεια INTERPRET λαμβάνονται τα παρακάτω αποτελέσματα :

Total displacements

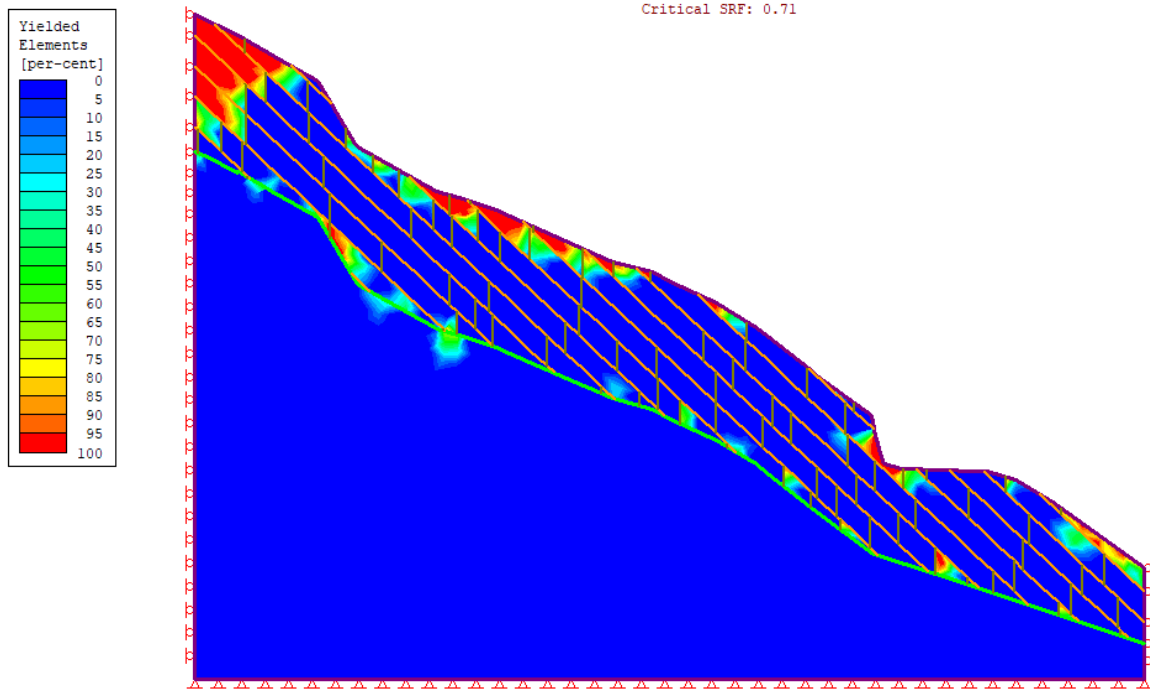


Εικόνα 6-12. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,006781m.



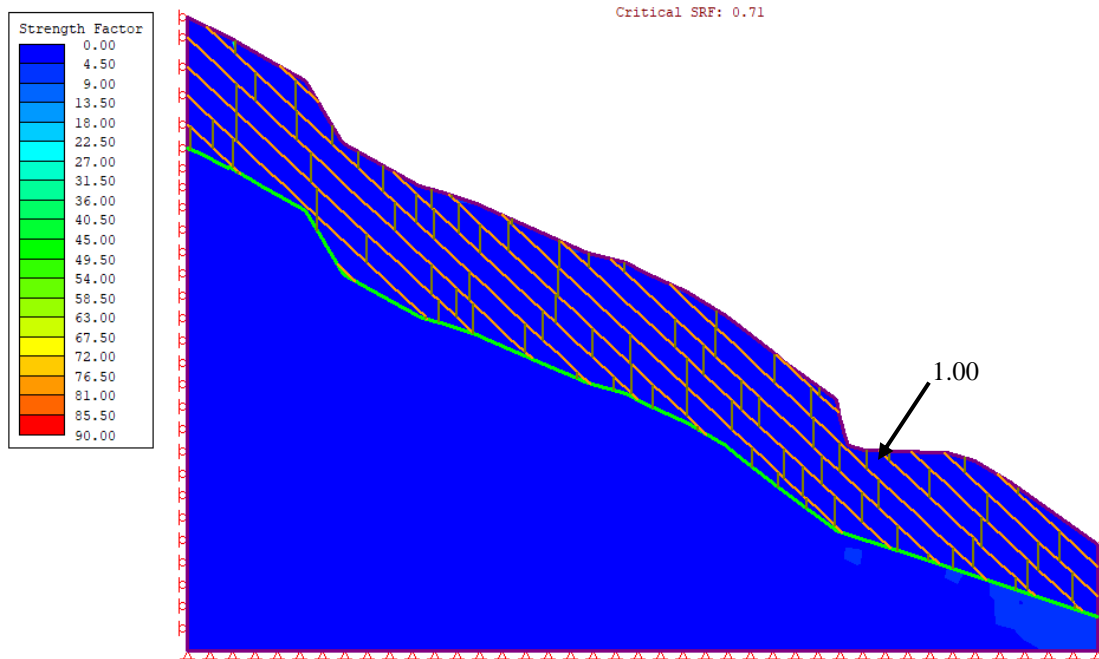
Εικόνα 6-13. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-14. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

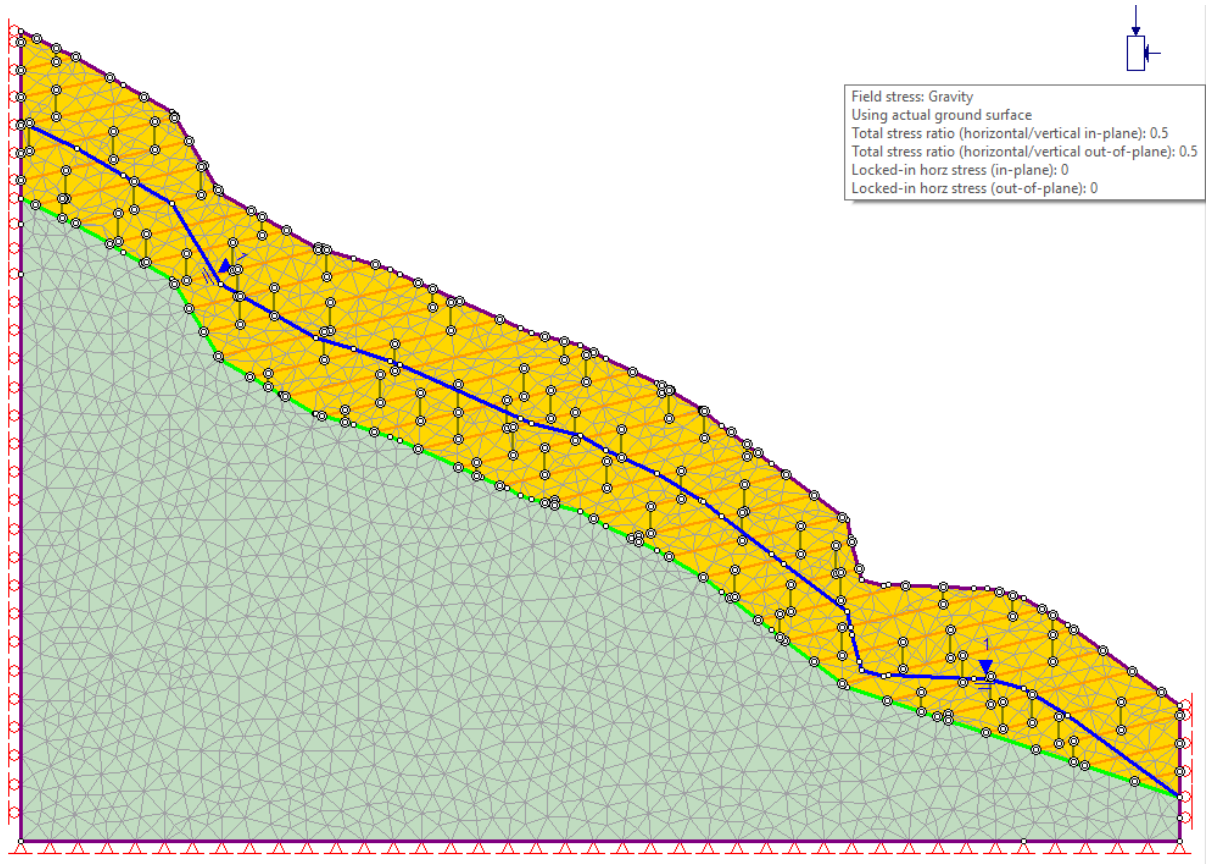


Εικόνα 6-15. Συντελεστής αντοχής.

Παρατηρούμε ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίσος με 0.71, δηλ. το πρανές είναι ασταθές. Η μέγιστη μετατόπιση (πριν την ολίσθηση) είναι ίση περίπου με 0,007m και παρατηρείται στο μέσο περίπου της απόστασης κεφαλή-πόδας του πρανούς, περιοχή η οποία τοποθετείται ανάντη της επαρχιακής οδού Αγριάς – Δράκειας. Τα διαρρέοντα στοιχεία κατά την εκδήλωση της ολίσθησης εντοπίζονται κυρίως στην κεφαλή του πρανούς. Ο συντελεστής αντοχής λαμβάνει μικρές τιμές κοντά στο 1 και στο σημείο της μέγιστης ολικής μετατόπισης έχει τιμές μικρότερης της μονάδας (εικόνες 6-12 – 6-15).

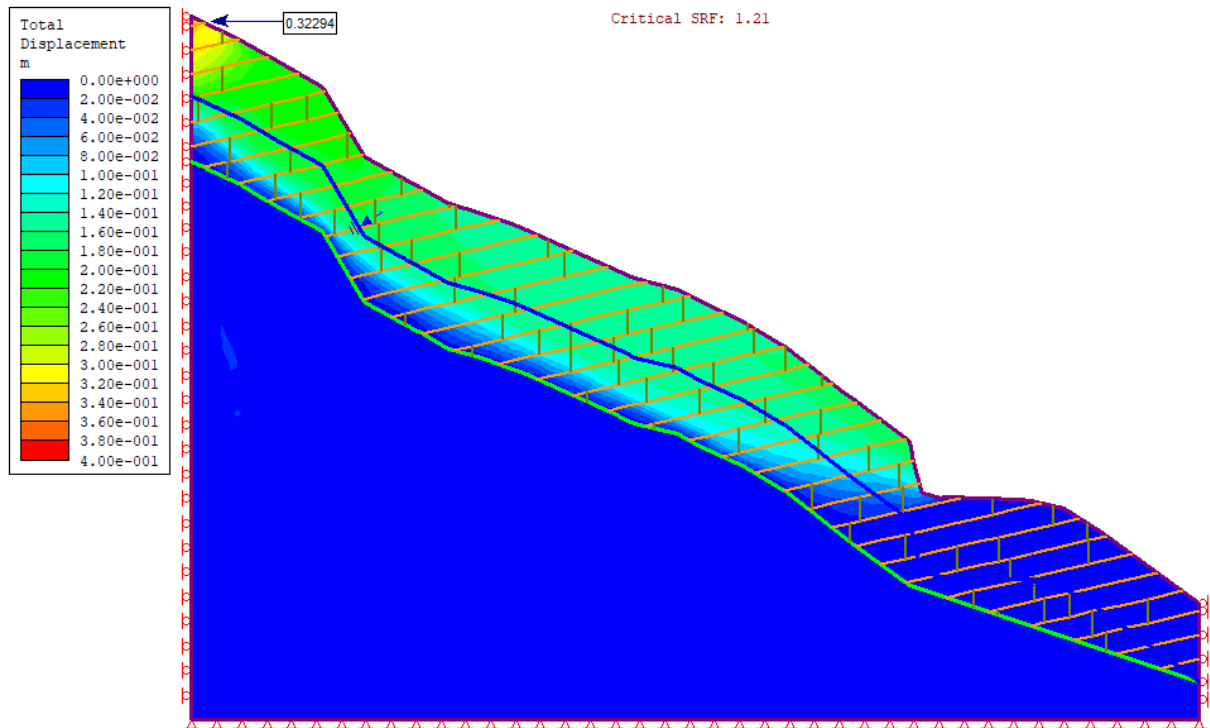
Στη συνέχεια γίνεται περαιτέρω ανάλυση, λαμβάνονται υπόψη την παρουσία υδροφόρου ορίζοντα και την εκδήλωση σεισμικού γεγονότος, με βάση το μοντέλο με τις αντίρροπες ασυνέχειες. Πρέπει να τονιστεί ότι οι αναλύσεις μέχρι αυτό το σημείο έδειξαν ότι οι παραμορφώσεις και οι πιθανές μετακινήσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε κατολίσθηση εντοπίζονται στο ανώτερο στρώμα της περιοχής (στρώσεις 1 και 2) του υπό εξέταση πρανούς.

6.1.3 Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς τη κλίση του πρανούς και παρουσία νερού.

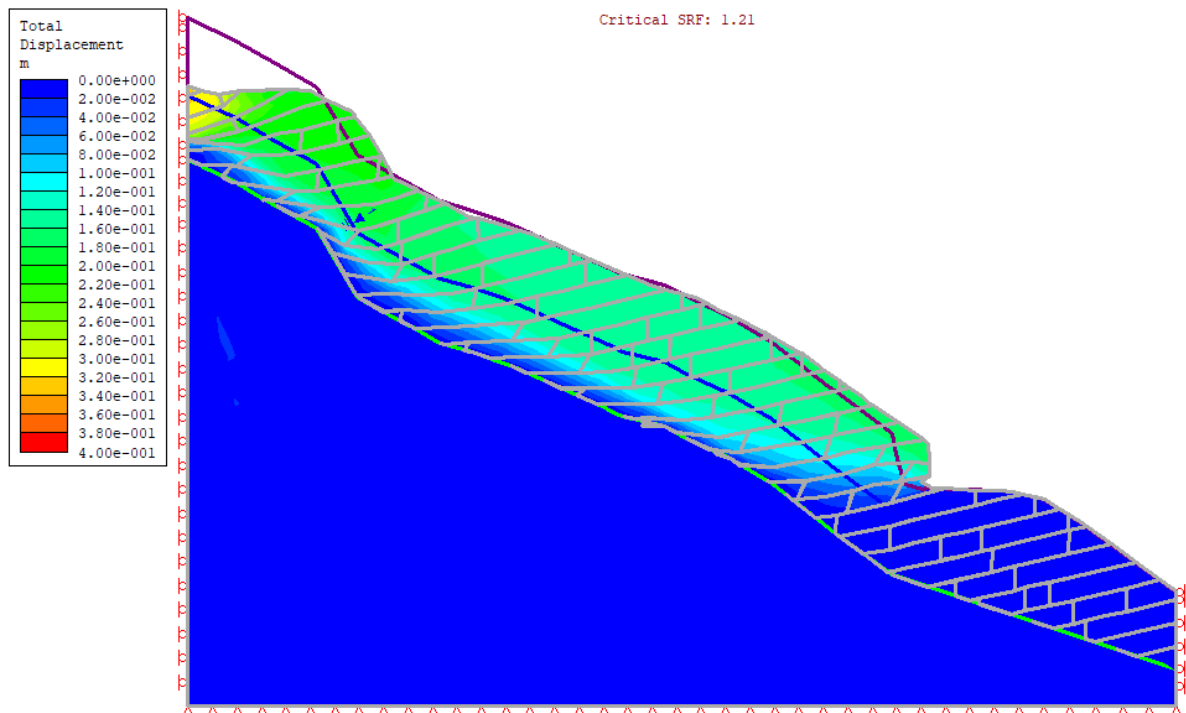


Εικόνα 6-16. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων.

Total displacements

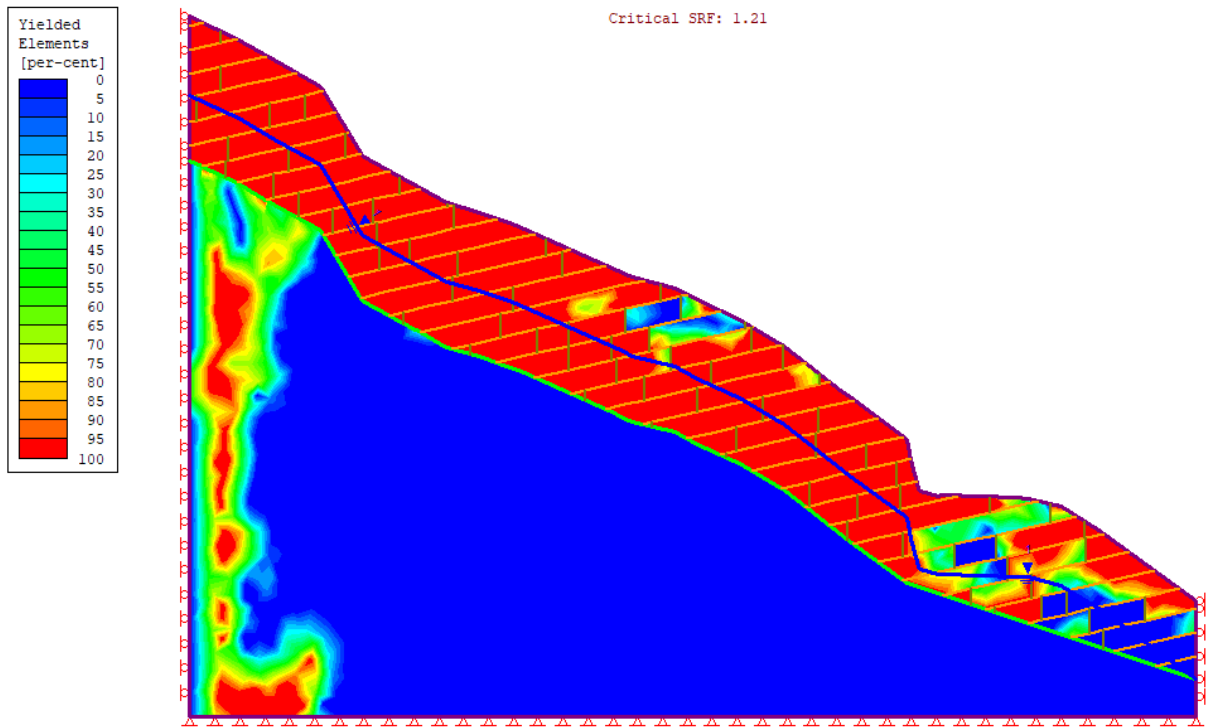


Εικόνα 6-17. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,32294m.



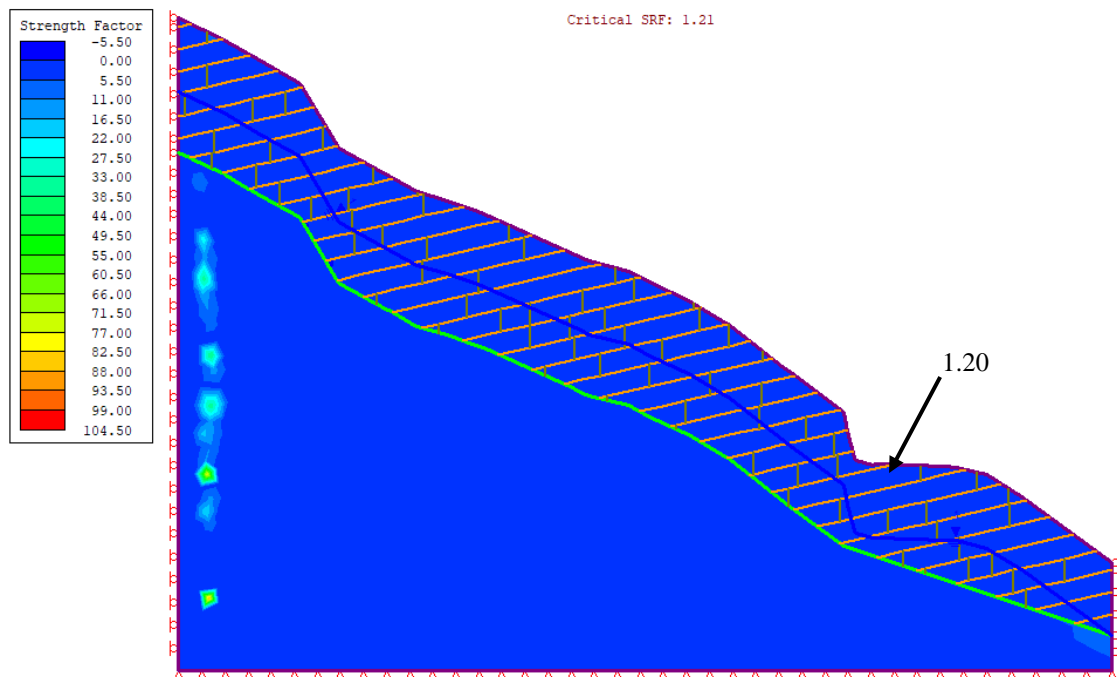
Εικόνα 6-18. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς

Yielded Elements



Εικόνα 6-19. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

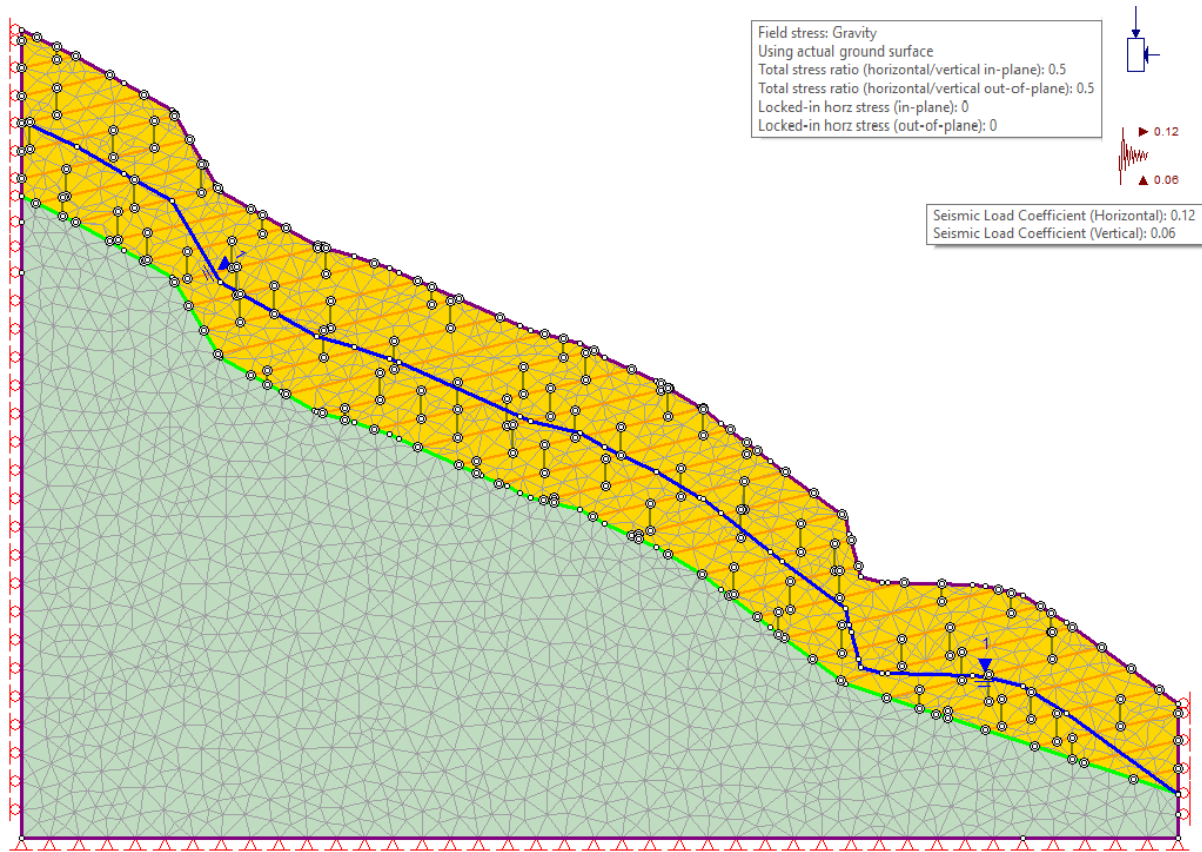
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-20. Συντελεστής αντοχής.

Παρατηρείται ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίση με 1.21, δηλ. το πρανές είναι ευσταθές και η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,32m και αναπτύσσεται στην κεφαλή του πρανούς. Παρατηρείται η δημιουργία μιας περιοχής με μετατοπίσεις $>0.14\text{m}$ όπου η κατώτερη επιφάνειά της είναι πολύ κοντά (σχεδόν ταυτίζεται) με τη επιφάνεια διαχωρισμού του δύο ανώτερων γεωλογικών σχηματισμών που συναντούνται στο υπό εξέταση πρανές (εικόνες 6-17, 6-18). Τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει κατανέμονται σε όλο το ανώτερο γεωλογικό στρώμα του πρανούς εκτός μιας μικρής περιοχής στον πόδα του πρανούς (εικόνα 6-19). Παρατηρούνται επίσης και διαρρέοντα στοιχεία σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την κεφαλή του πρανούς γεγονός το οποίο πιθανώς να οφείλεται σε φαινόμενα περιθωρίου (edge effects) του μοντέλου. Ο συντελεστής αντοχής κυμαίνεται σε μικρές τιμές κοντά στο 1 (εικόνα 6-20).

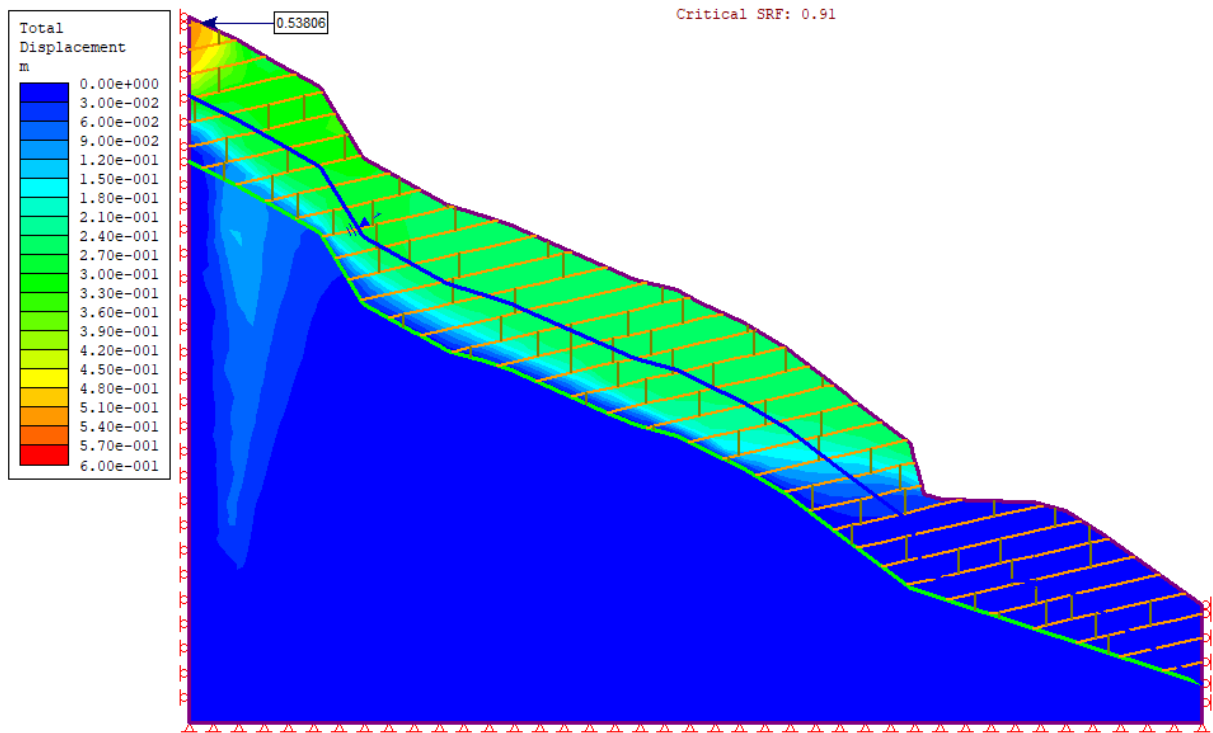
6.1.4 Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς την κλίση του πρανούς, παρουσία νερού και σεισμικό φορτίο-1



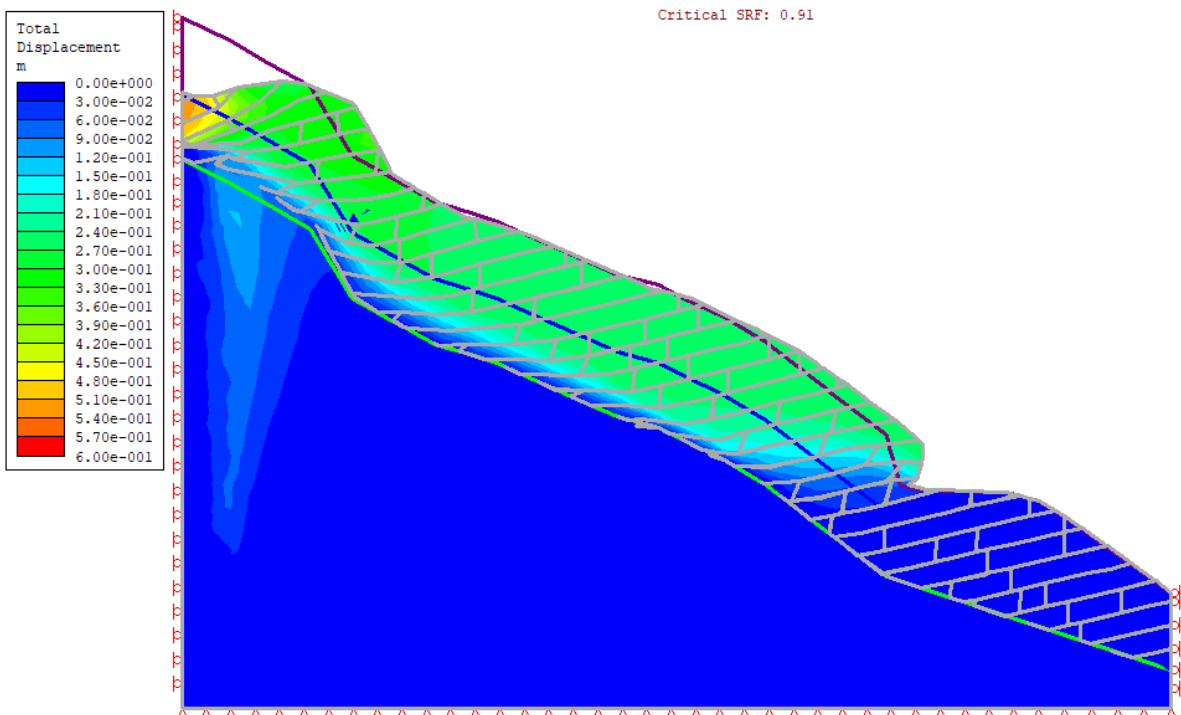
Εικόνα 6-21. Γεωμετρία Πρανούς - Συντελεστής επί-τόπου τάσεων – Σεισμική φόρτιση-1.

Με την εντολή COMPUTE και στην συνέχεια INTERPRET παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

Total displacements

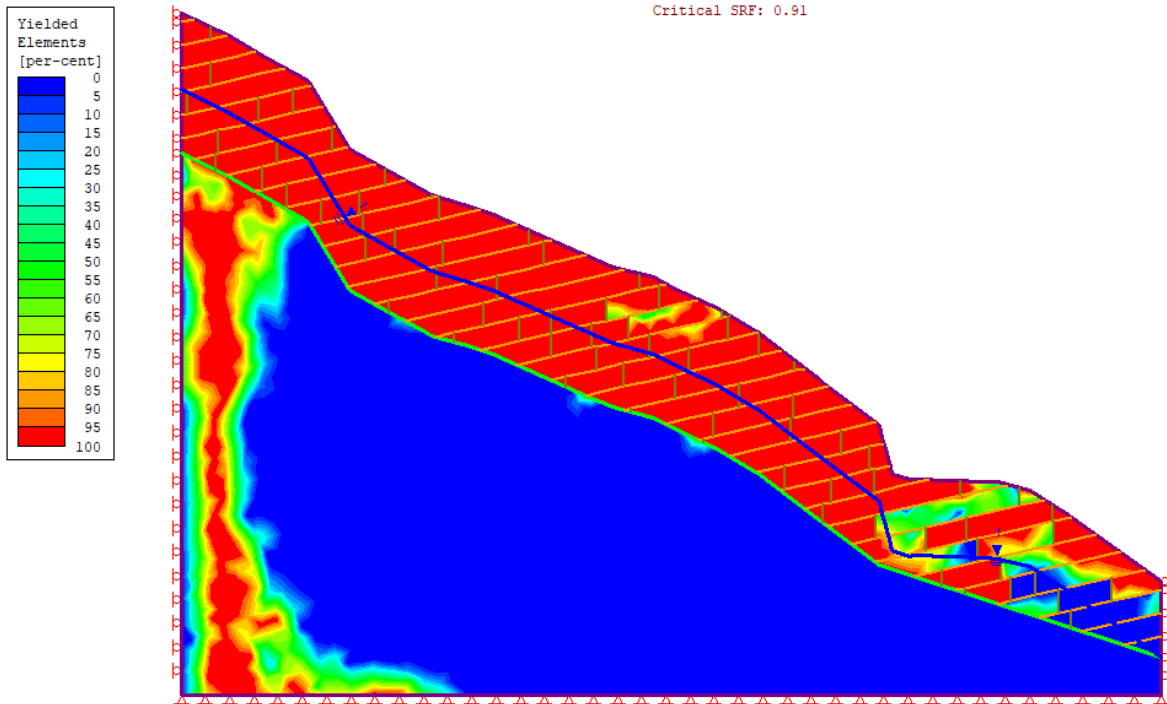


Εικόνα 6-22. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,53806m.



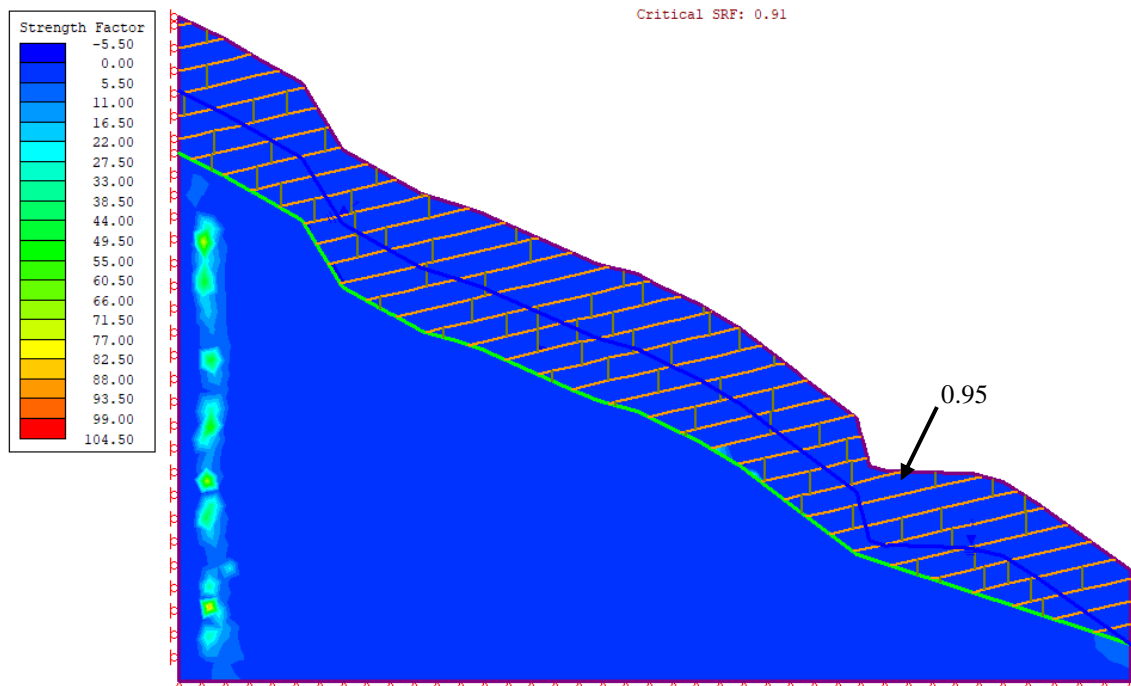
Εικόνα 6-23. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-24. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

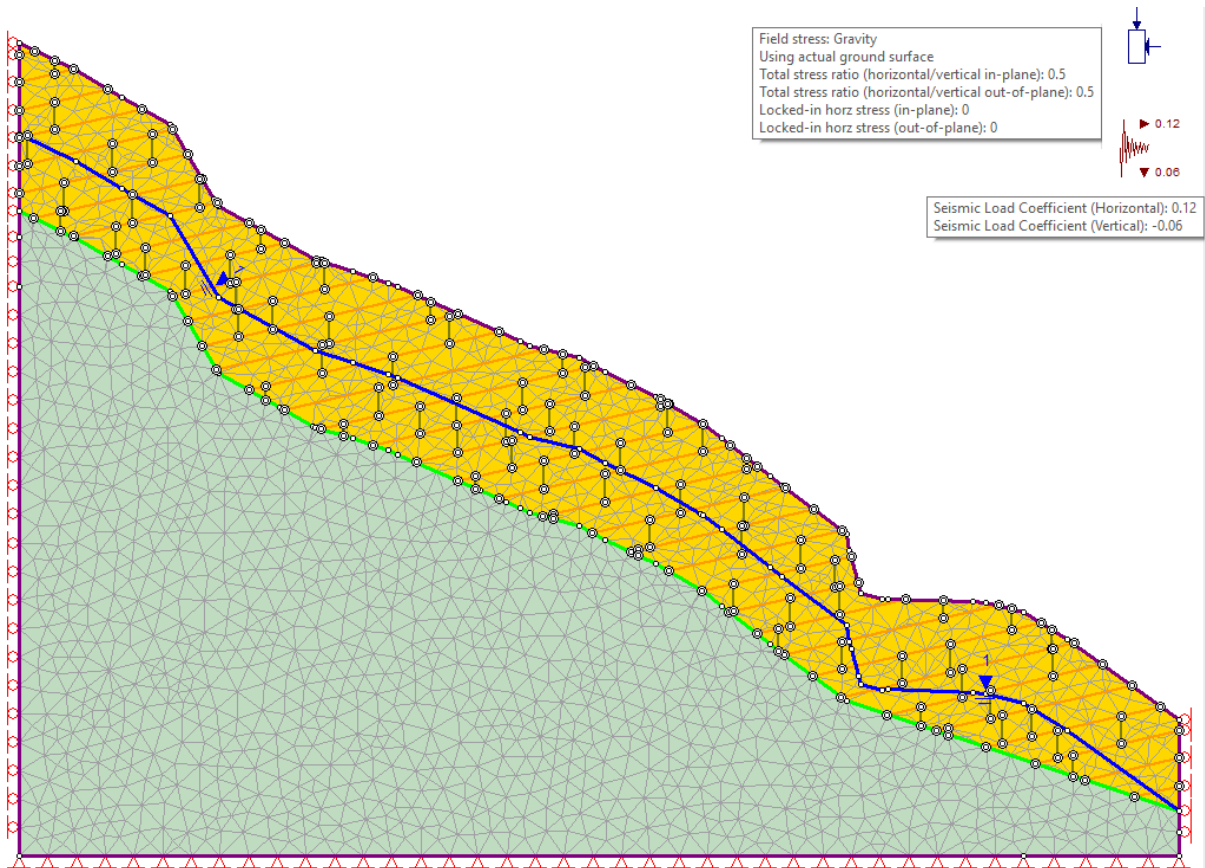
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-25. Συντελεστής αντοχής.

Οι δύο συνιστώσες του σεισμικού φορτίου 1 έχουν διεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά για την οριζόντια συνιστώσα και από κάτω προς τα πάνω για την κατακόρυφη συνιστώσα. Παρατηρείται ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίση με 0.91, επομένως το πρανές είναι ασταθές. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,54m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανούς (εικόνες 6-22, 6-23). Τα στοιχεία που έχουν διαρρεύσει κατανέμονται σχεδόν σε όλο το ανώτερο γεωλογικό στρώμα του πρανούς (στρώσεις 1 και 2), (εικόνα 6-24). Τα διαρρέοντα στοιχεία σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την κεφαλή του πρανούς δείχνουν ότι έχουν επεκταθεί γεγονός το οποίο οφείλεται στην θεώρηση σεισμικού φορτίου, στις συνοριακές συνθήκες αλλά και σε φαινόμενα περιθωρίου (edge effects) του μοντέλου. Ο συντελεστής αντοχής κυμαίνεται σε μικρές τιμές κοντά στο 1 και σε μερικά σημεία (στην κεφαλή του πρανούς) μπορεί να πάρει τιμή μικρότερη της μονάδας (εικόνα 6-25).

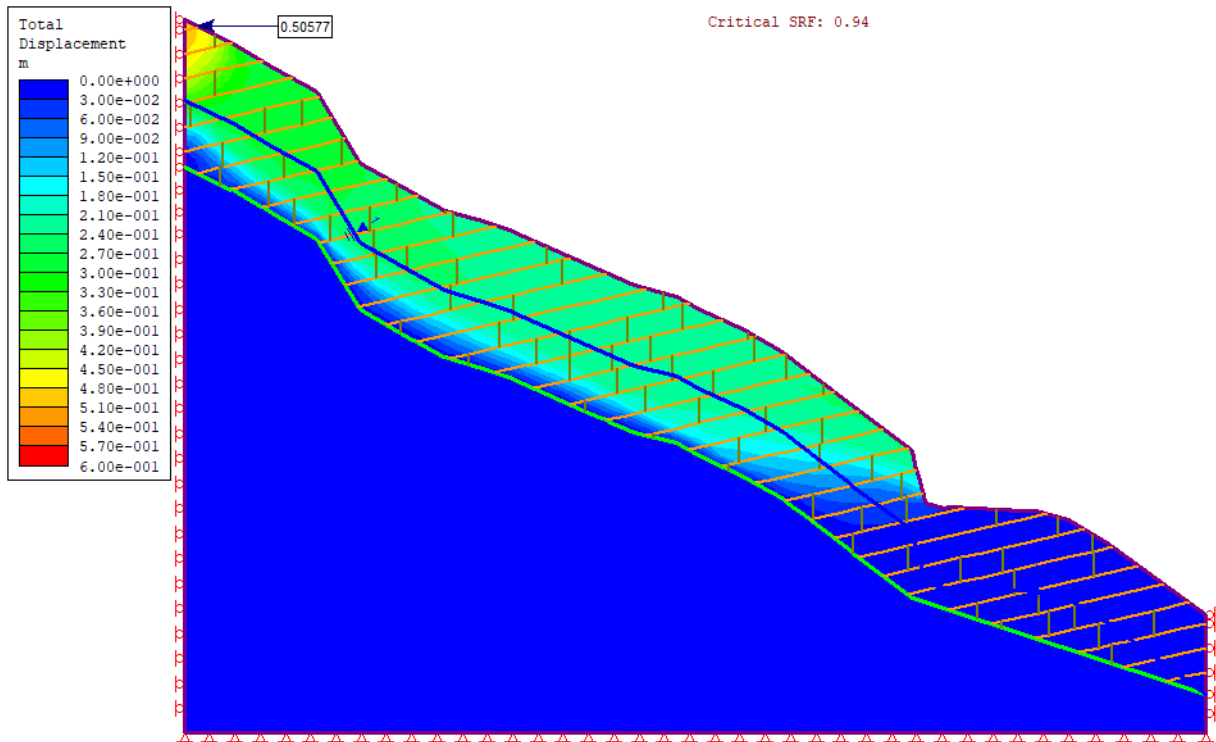
6.1.5 Μοντέλο με εισαγωγή αντίρροπων ασυνεχειών ως προς την κλίση του πρανούς, παρουσία νερού και σεισμικό φορτίο-2



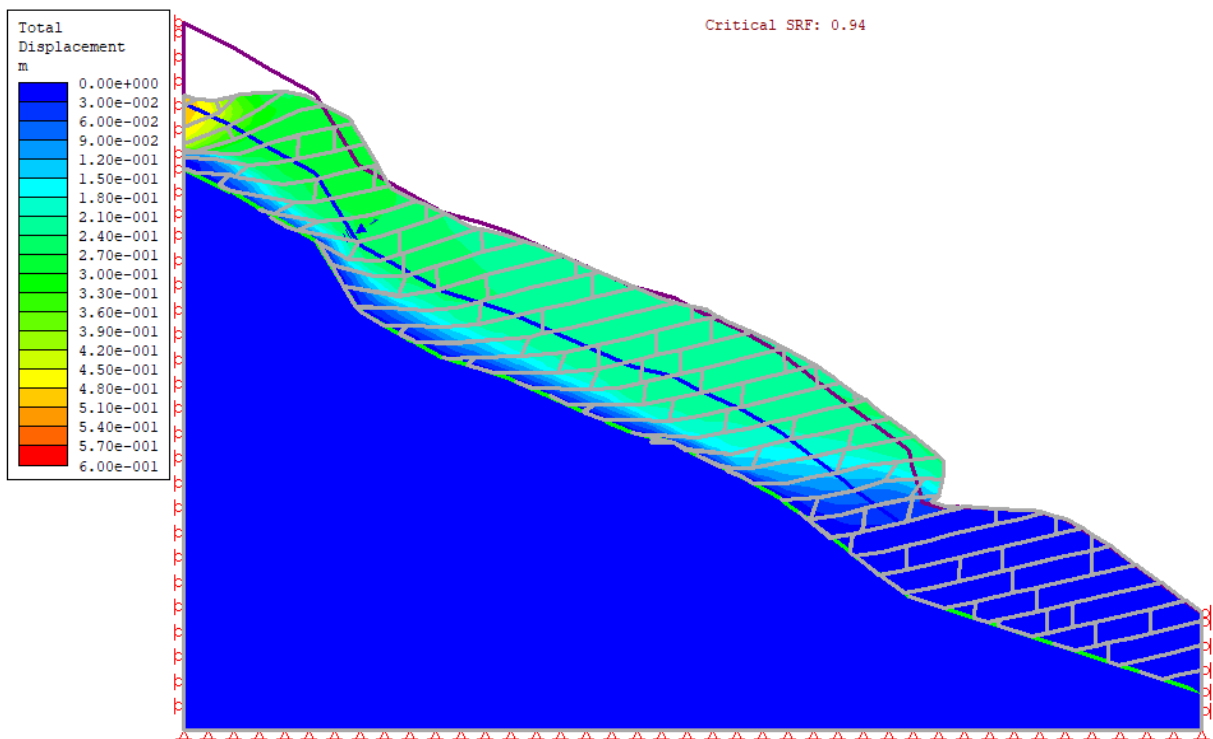
Εικόνα 6-26. Γεωμετρία Πρανούς – Συντελεστής επί-τόπου τάσεων – Σεισμική φόρτιση - 2

Με την εντολή COMPUTE και στην συνέχεια INTERPRET παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα :

Total displacements

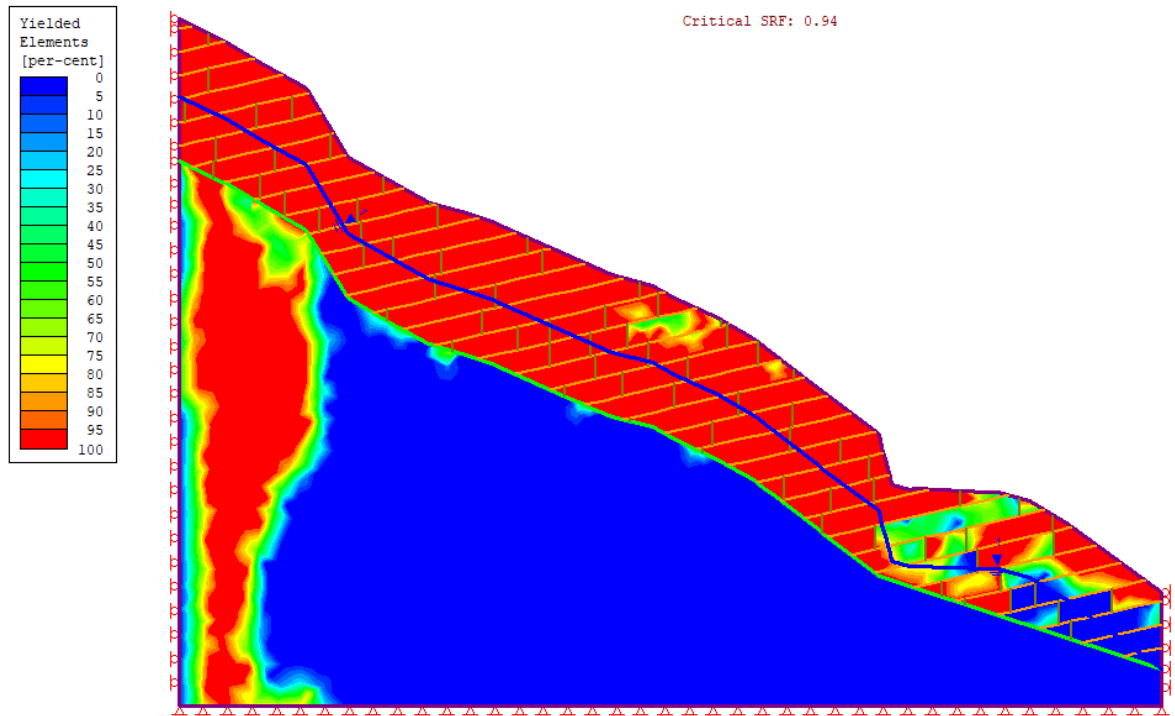


Εικόνα 6-27. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,50577m.



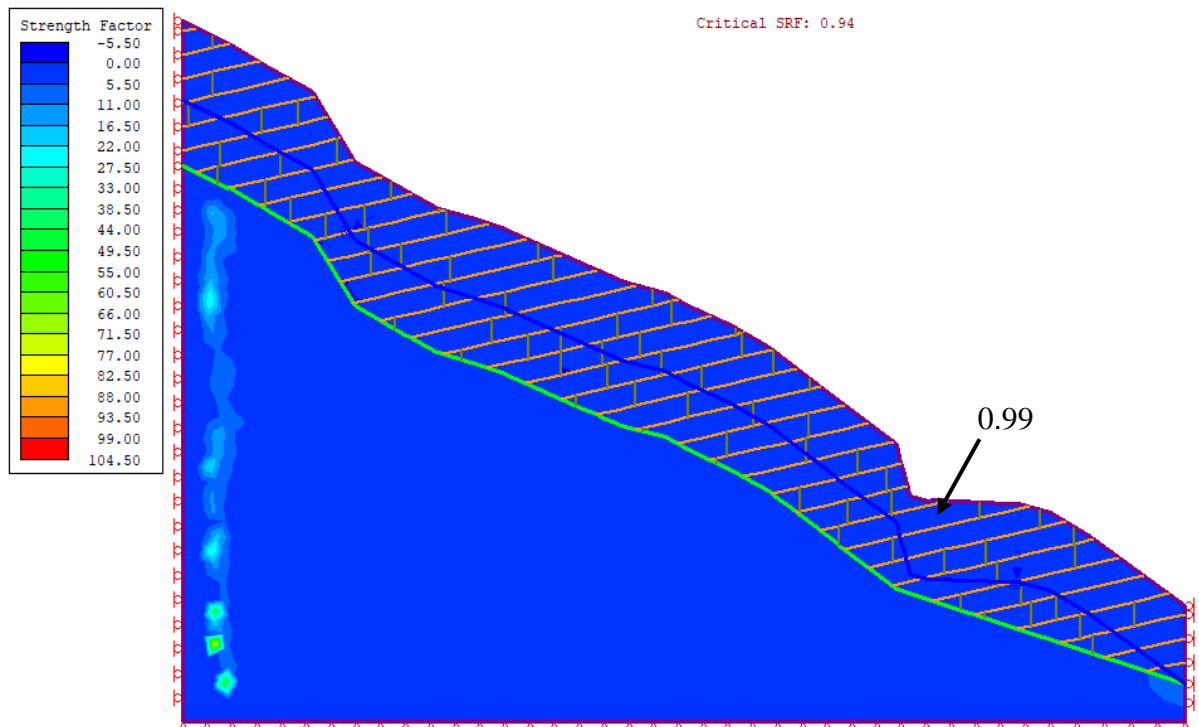
Εικόνα 6-28. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανού.

Yielded Elements



Εικόνα 6-29. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-30. Συντελεστής αντοχής.

Παρατηρείται ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) είναι ίση με 0.94, δηλ. το πρανές είναι ασταθές. Η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,51m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανούς. Η ολισθαίνουσα μάζα αποτελείται από τα 2/3 σχεδόν του ανώτερου γεωλογικού στρώματος του πρανούς και η επιφάνεια ολίσθησης σχεδόν ταυτίζεται με την διεπιφάνεια των δύο ανώτερων γεωλογικών σχηματισμών του πρανούς (εικόνες 6-27, 6-28).

Τα στοιχεία που έχουν διαρρέυσει κατανέμονται σχεδόν σε όλο το ανώτερο γεωλογικό στρώμα του πρανούς (εικόνα 6-29). Τα διαρρέοντα στοιχεία σε μεγαλύτερο βάθος κάτω από την κεφαλή του πρανούς έχουν επεκταθεί περαιτέρω γεγονός το οποίο οφείλεται στην θεώρηση σεισμικού φορτίου, στις συνοριακές συνθήκες αλλά και σε φαινόμενα περιθωρίου (edge effects) του μοντέλου. Ο συντελεστής αντοχής κυμαίνεται σε μικρές τιμές κοντά στο 1 αλλά και σε τιμές μικρότερες της μονάδας (εικόνα 6-30).

6.2 Συντελεστές Ασφαλείας

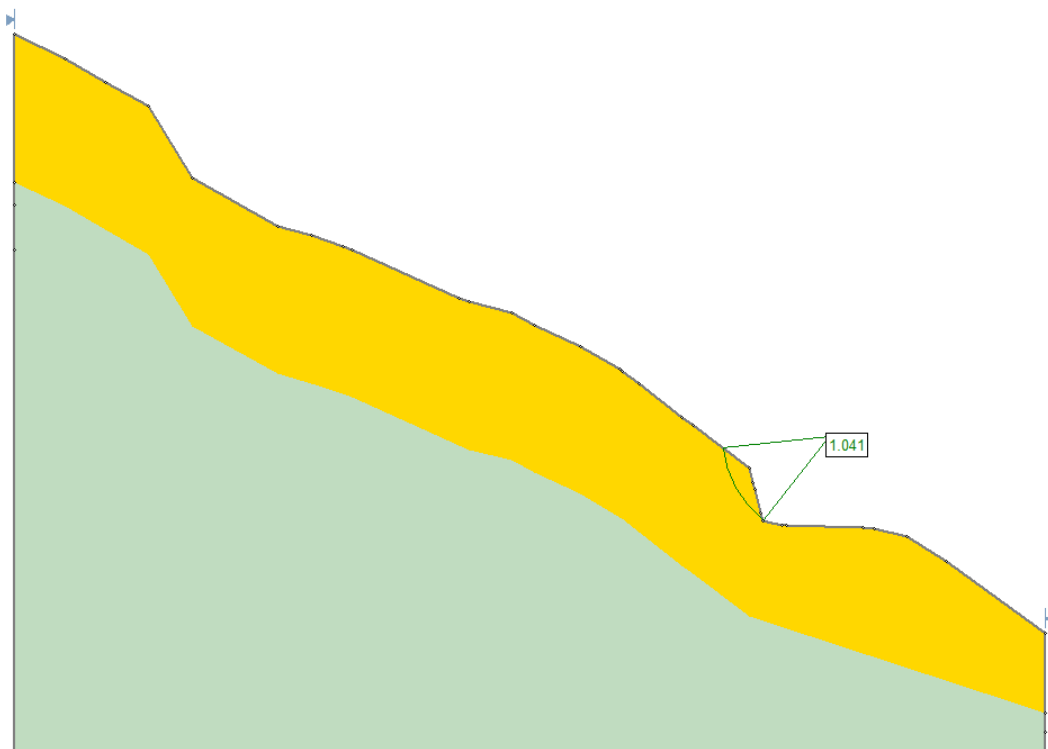
Στην ενότητα αυτή γίνεται η ανάλυση με το πρόγραμμα Slide v.6. Από το πρόγραμμα Slide προκύπτουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τις μεθόδους Bishop, Janbu, Spencer και GLE για τον προσδιορισμό της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης και της τιμής του συντελεστή ασφαλείας.

Στην περίπτωση του απλοποιημένου μοντέλου τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1.

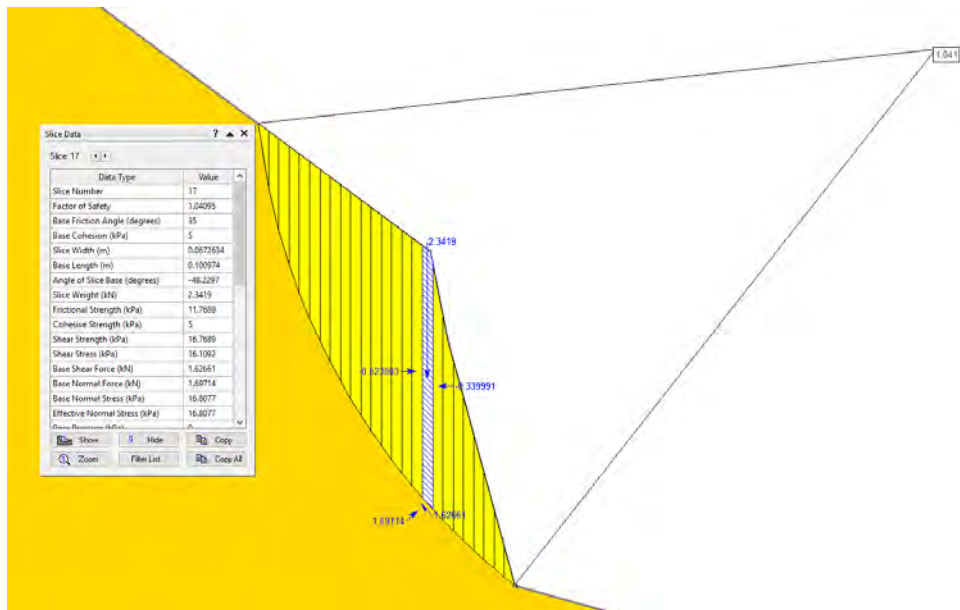
Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	1.041
Janbu	1.085
Spencer	1.073
GLE	1.074

Πίνακας 6-1. Συντελεστές Ασφαλείας (Σ.Α.) για το απλοποιημένο μοντέλο

Παρατηρείται ότι οι συντελεστές ασφαλείας σε κάθε μία από τις μεθόδους προσεγγίζουν την οριακή τιμή 1 γεγονός που δείχνει ότι στις δεδομένες συνθήκες υφίσταται οριακή ευστάθεια του πρανούς. Από αυτό γίνεται κατανοητό ότι με την εφαρμογή μιας οποιασδήποτε εξωτερικής φόρτισης (π.χ. μια έντονη βροχόπτωση) θα προκληθεί αστοχία του πρανούς η οποία θα αναλυθεί παρακάτω.



Εικόνα 6-31. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop

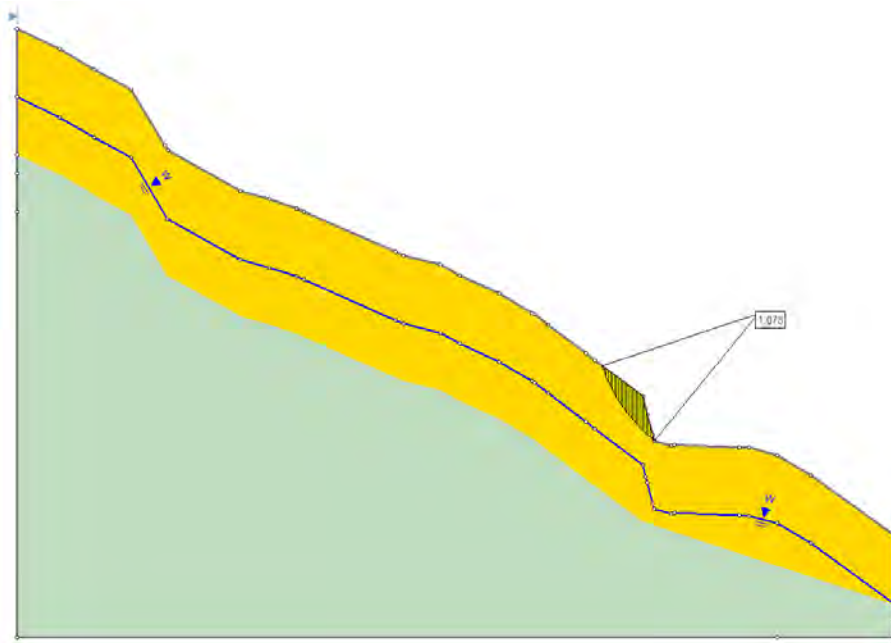


Εικόνα 6-32.Εξαγωγή Σ.Α με μέθοδο Bishop – Διεύθυνση τάσεων

Στην περίπτωση του μοντέλου με εισαγωγή νερού τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-2.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	1.048
Janbu	1.087
Spencer	1.078
GLE	1.077

Πίνακας 6-2. Σ.Α για μοντέλο με νερό



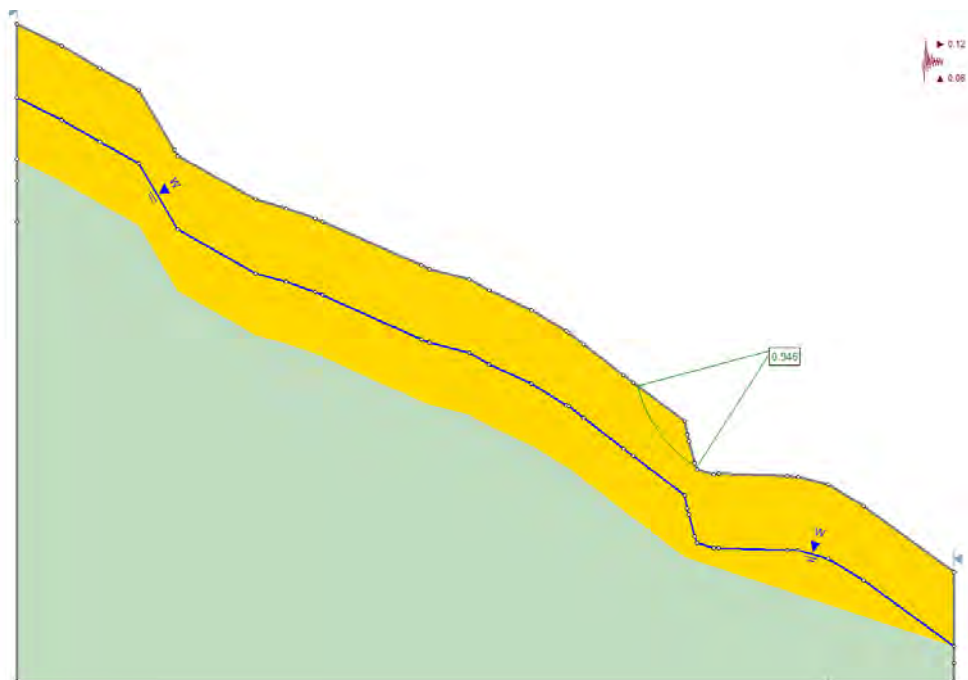
Εικόνα 6-33. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Spencer

Με την παρουσία νερού παρατηρείται μια στοιχειώδη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο) σε όλες τις μεθόδους που πρακτικά δεν επηρεάζει την ευστάθεια του πρίσματος σε σχέση με την παραπάνω περίπτωση (εικόνα 6-33).

Στην περίπτωση του μοντέλου με εισαγωγή νερού και σεισμικής φόρτισης τύπου 1, τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-3.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	0.941
Janbu	0.930
Spencer	0.942
GLE	0.946

Πίνακας 6-3. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1.

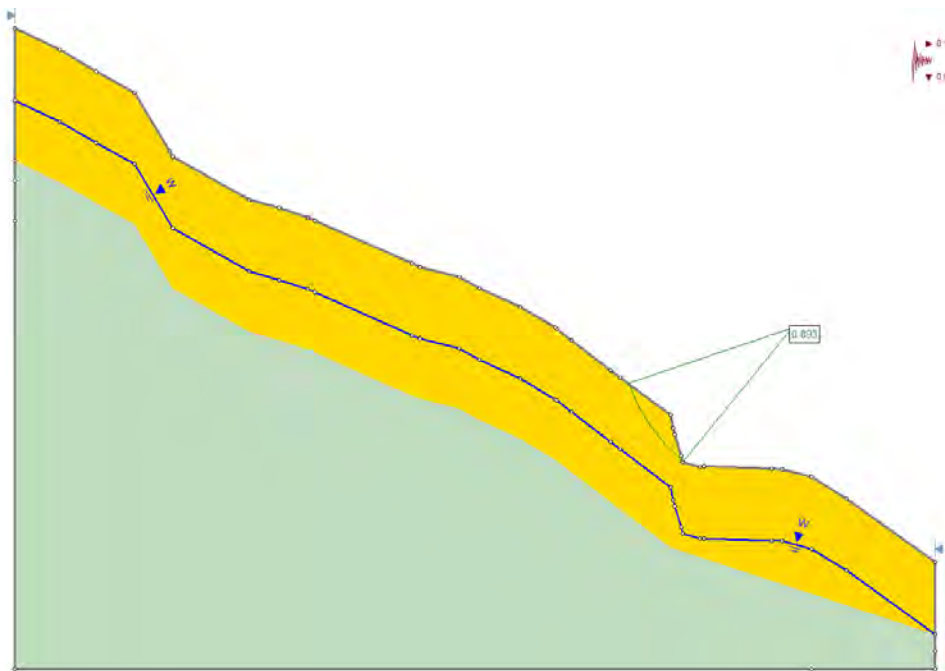


Εικόνα 6-34.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο GLE

Στην περίπτωση του μοντέλου με εισαγωγή νερού και σεισμικής φόρτισης τύπου 2, τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-4.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	0.896
Janbu	0.896
Spencer	0.892
GLE	0.893

Πίνακας 6-4. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2



Εικόνα 6-35.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο GLE

Παρατηρείται ότι με την εισαγωγή σεισμού (ειδικά με σεισμό τύπου 2) ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται κάτω από τη μονάδα και κρίνεται απαραίτητη η εφαρμογή μέτρων αντιστήριξης.

Σημειώνεται ότι στο Slide δεν υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής ασυνεχειών ή συστήματος ασυνεχειών. Για αυτόν τον λόγο η μελέτη της ευστάθειας του, υπό μελέτη, πρανούς έγινε χωρίς την ύπαρξη αυτών.

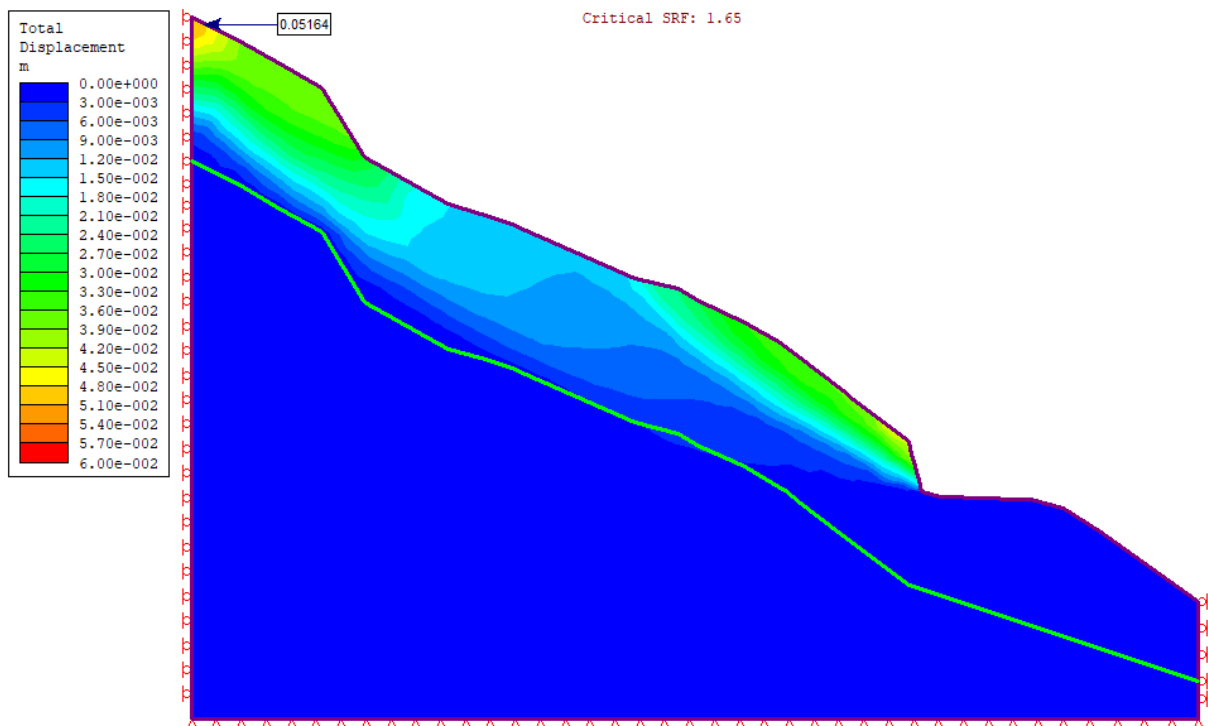
6.3 Αναλύσεις ευαισθησίας

Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων ευαισθησίας αυξήθηκαν και μειώθηκαν οι τιμές των c και ϕ κατά 20%.

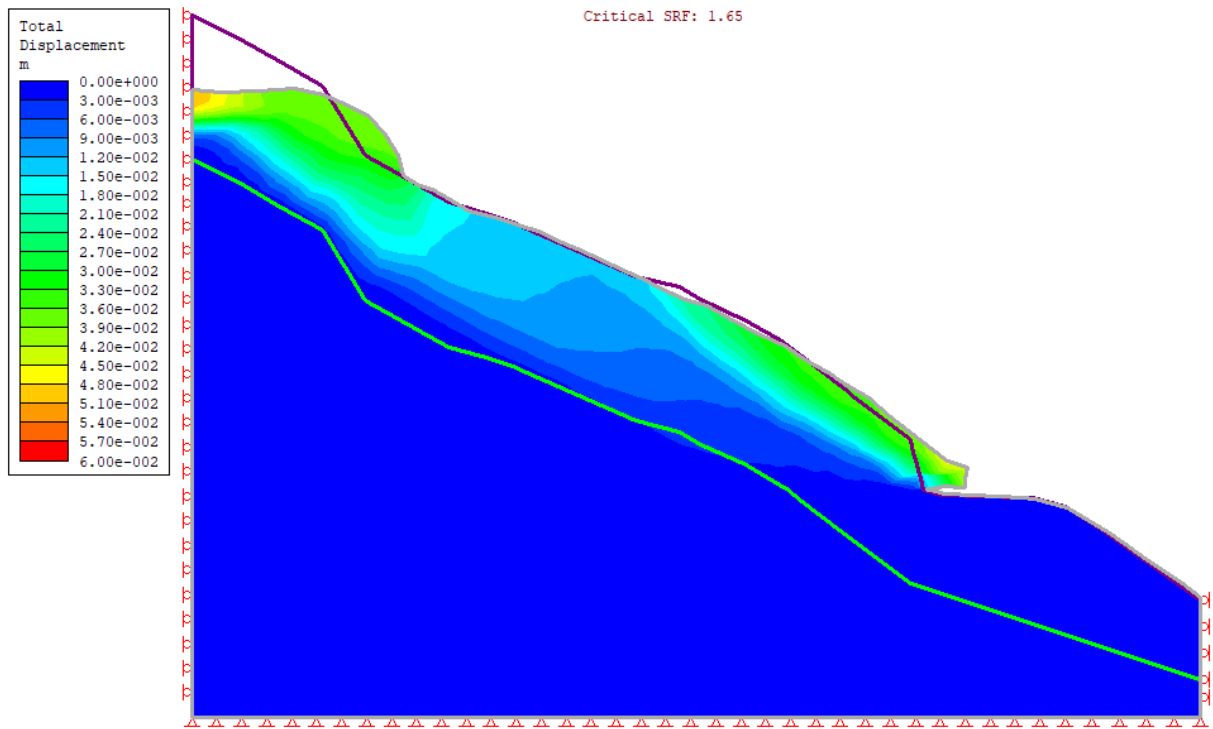
6.3.1 Ανάλυση ευαισθησίας σε απλοποιημένο μοντέλο

Αρχικά πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας στο Phase2 8.0 για +20% των c και ϕ . Οι νέες τιμές του c και ϕ όσο αναφορά τη πρώτη και την δεύτερη στρώση θα είναι $c=6\text{kPa}$ και $\phi=42^\circ$, ενώ για τη τρίτη στρώση θα είναι $c=104.4\text{kPa}$ και $\phi=54^\circ$. Όπως παρατηρείται στις παρακάτω εικόνες (6-35 - 6-38), με την αύξηση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.65 η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,05m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανού (εικόνες 6-36, 6-37).

Total displacements

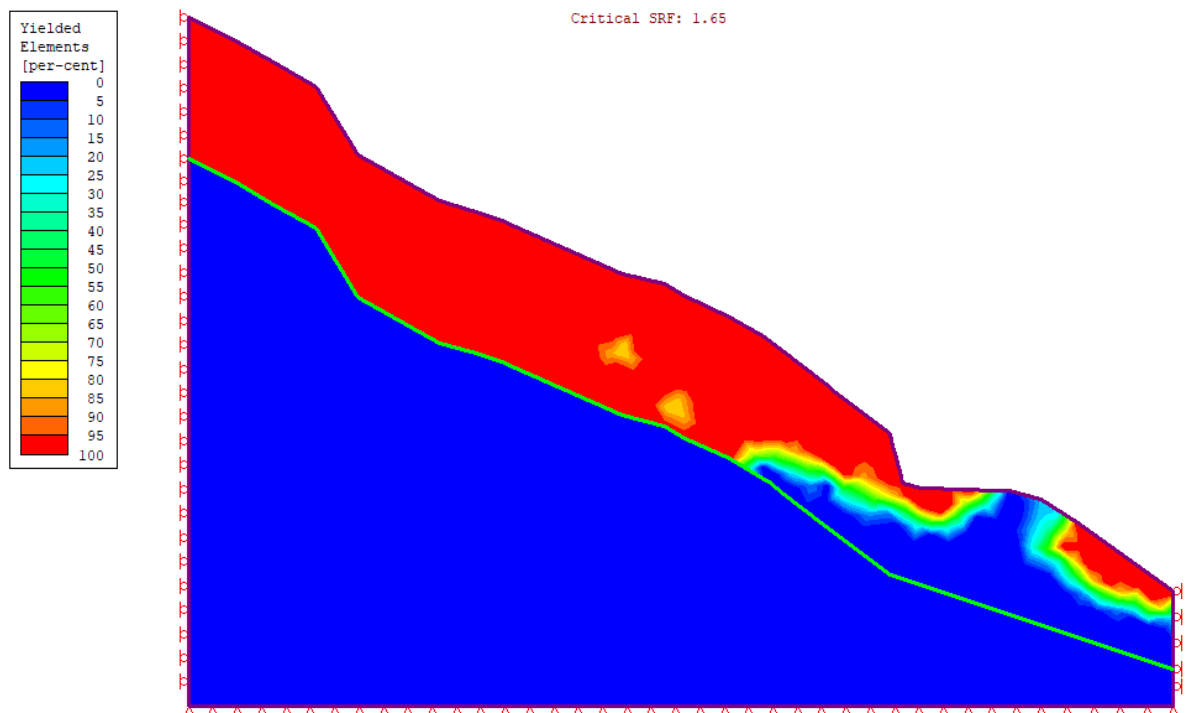


Εικόνα 6-36. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,05164m.



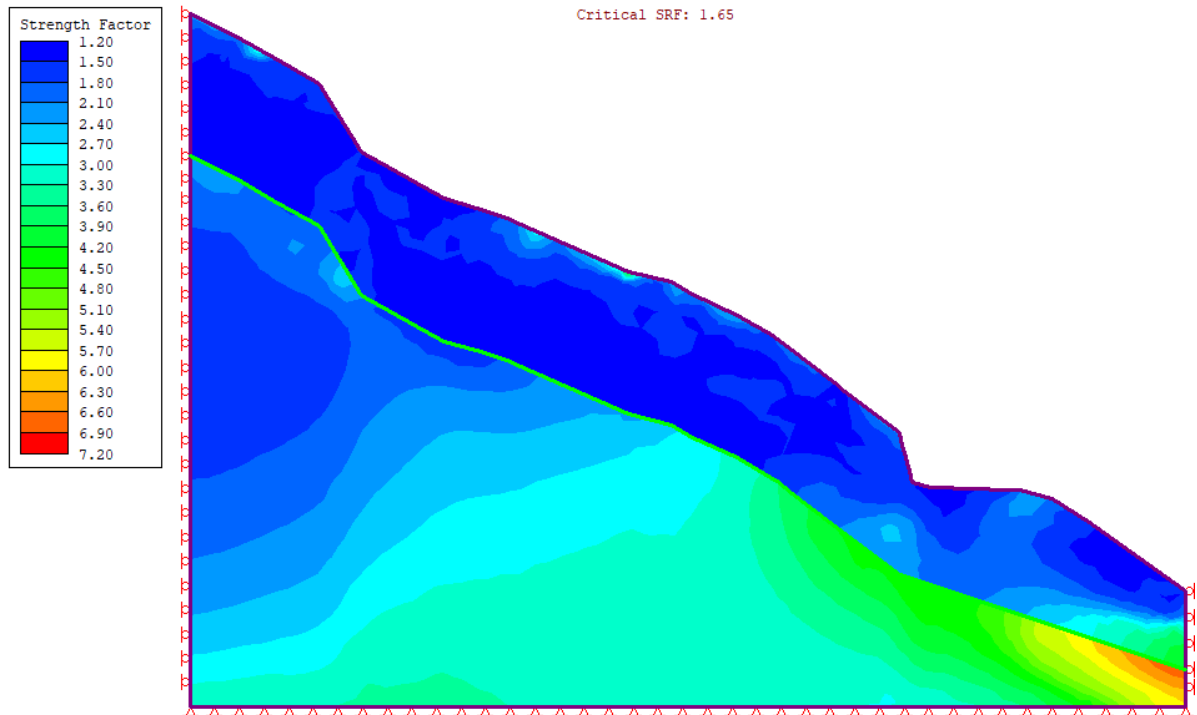
Εικόνα 6-37. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-38. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

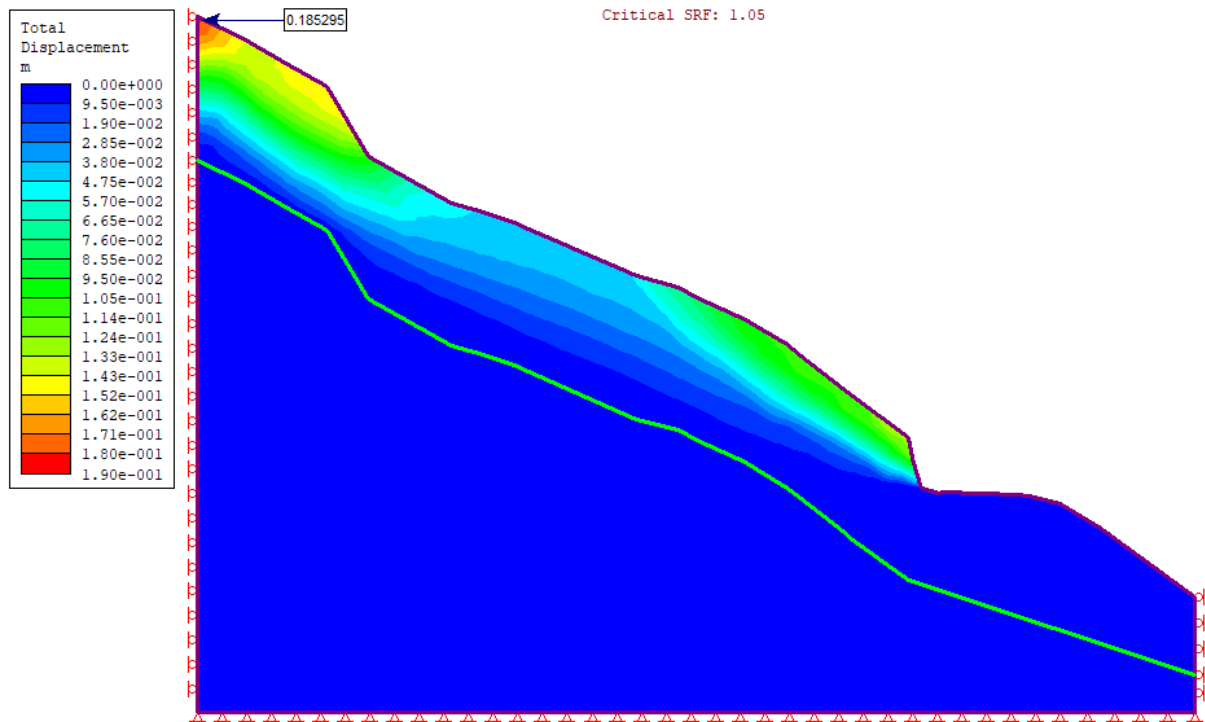


Εικόνα 6-39. Συντελεστής αντοχής

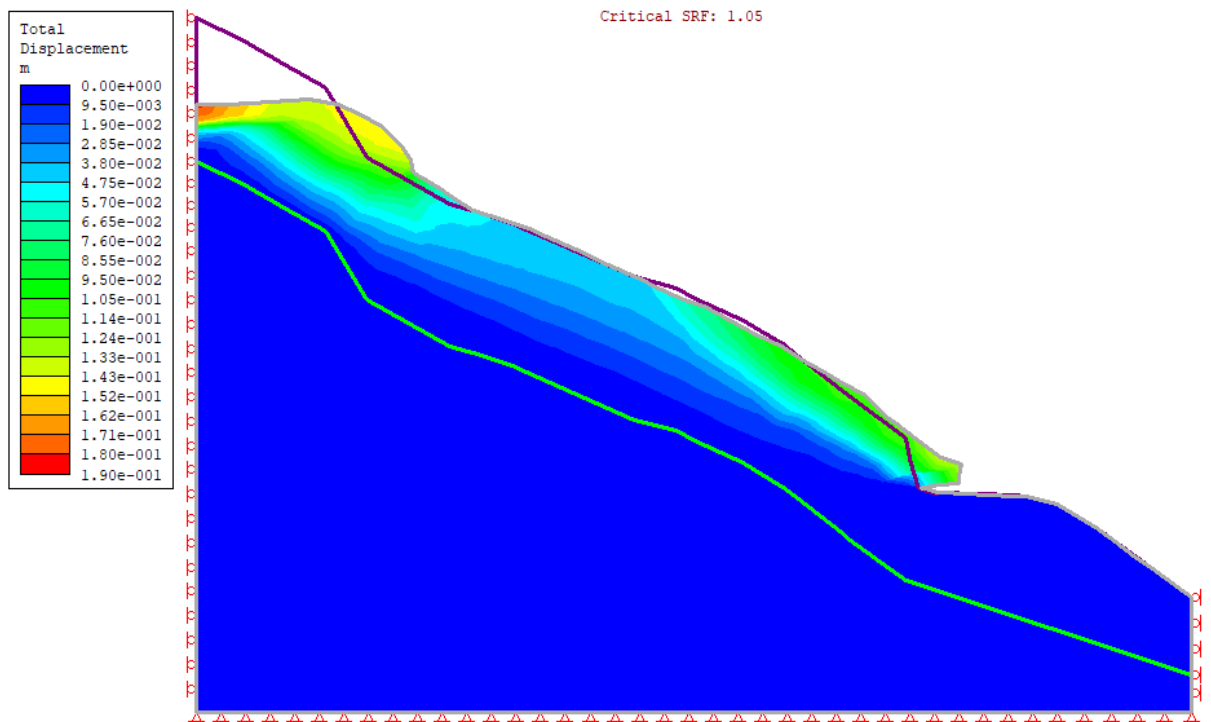
Στην συνέχεια γίνεται η ανάλυση στο Phase2 8.0 για -20% στις τιμές των c και ϕ . Οι νέες τιμές του c και ϕ όσο αναφορά τη πρώτη και δεύτερη στρώση θα είναι $c=4\text{kPa}$ και $\phi=28^\circ$, ενώ για τη τρίτη στρώση θα είναι $c=69.6\text{kPa}$ και $\phi=36^\circ$.

Στις παρακάτω εικόνες (6-40 - 6-41) παρατηρείται ότι, με την μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.05 και μέγιστη μετατόπιση ίση με 0,19m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

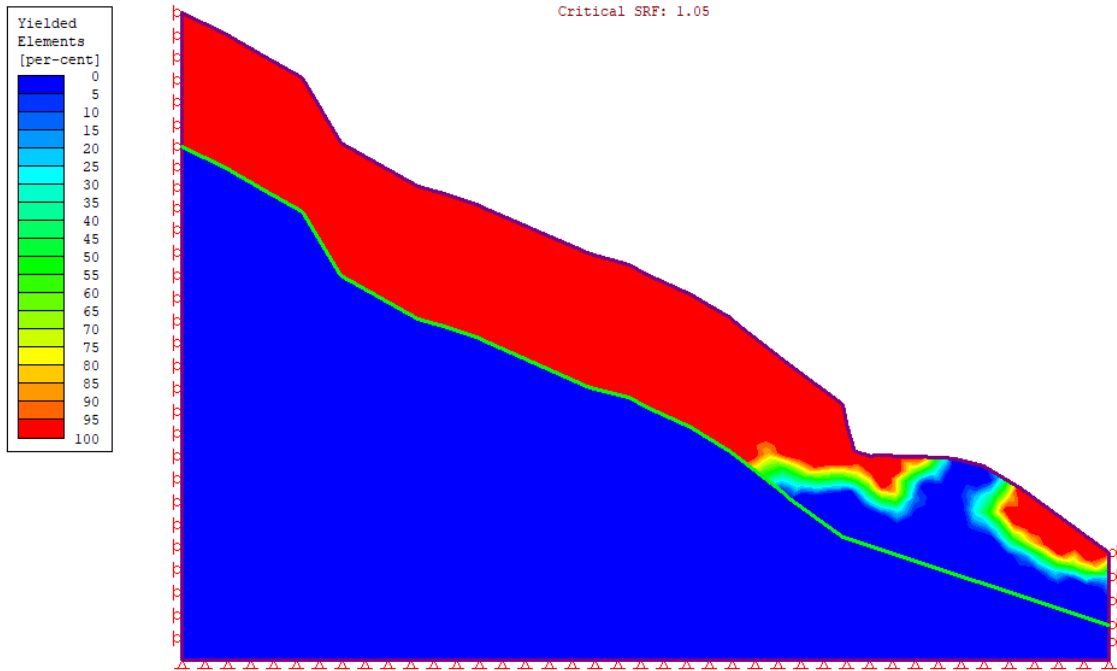


Εικόνα 6-40. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,185295m.



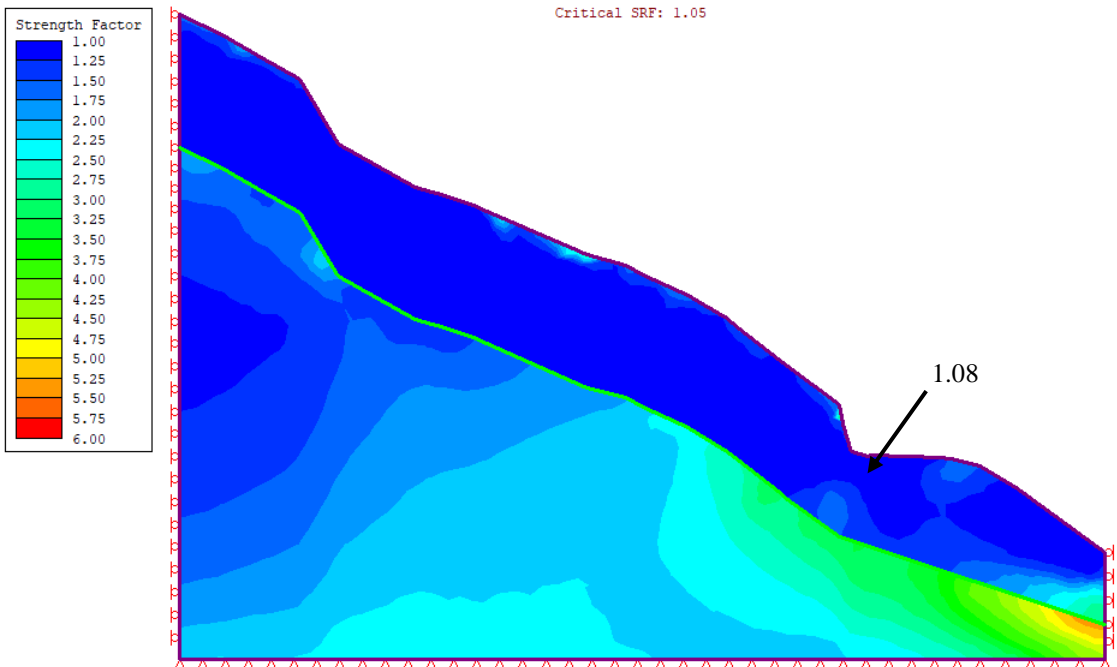
Εικόνα 6-41. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-42. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

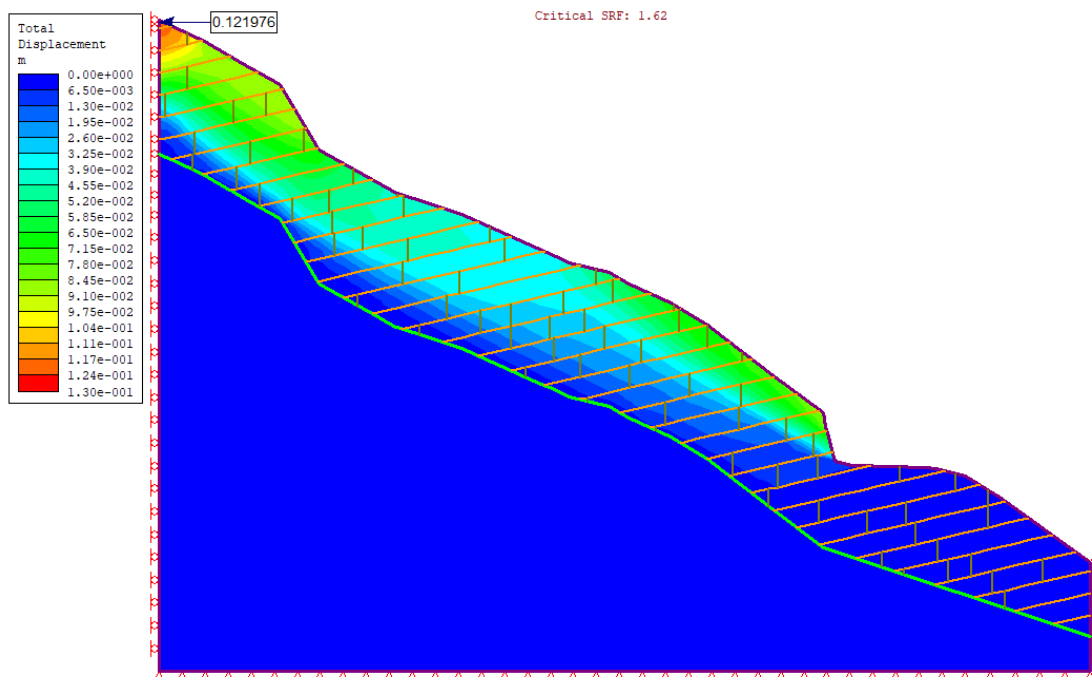


Εικόνα 6-43. Συντελεστής αντοχής.

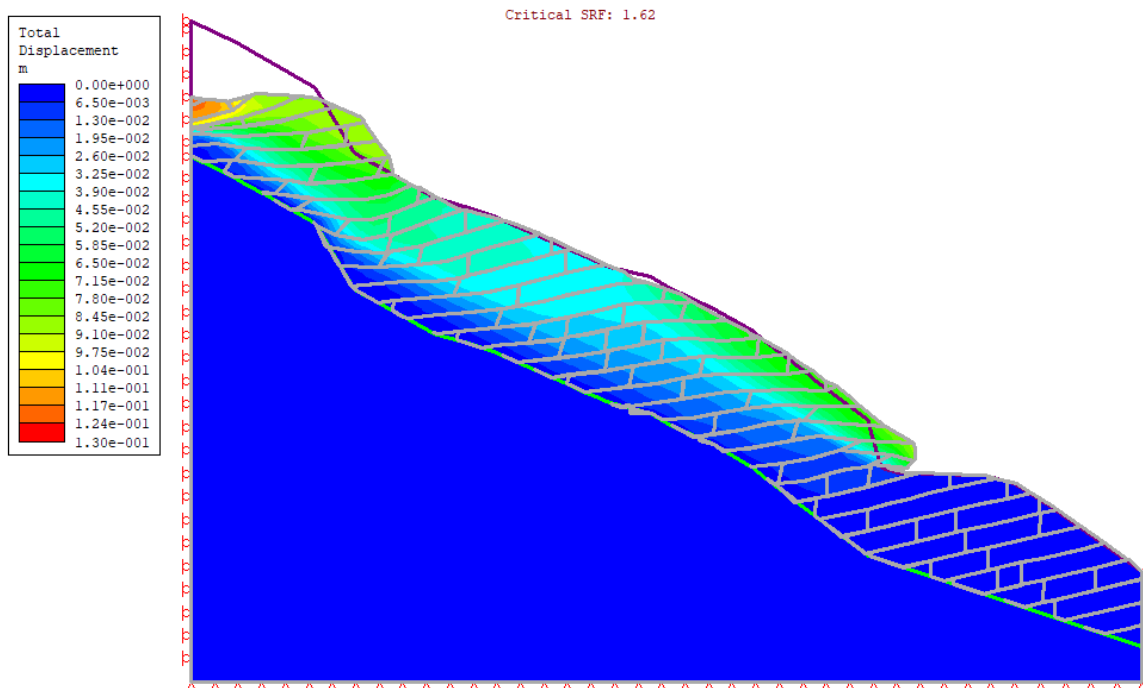
6.3.2 Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων με τη κλίση του πρανούς

Όπως παρατηρείται στις εικόνες (6-43 - 6-46), με την αύξηση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.42 και μέγιστη μετατόπιση ίση με 0,12m στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

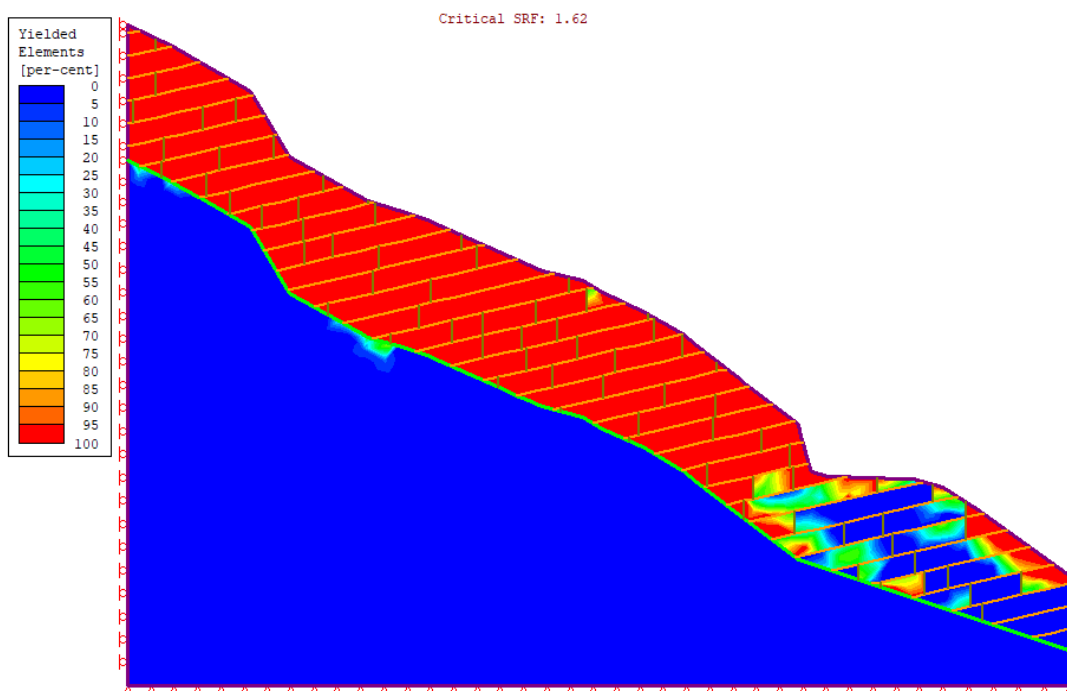


Εικόνα 6-44. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,121976m.



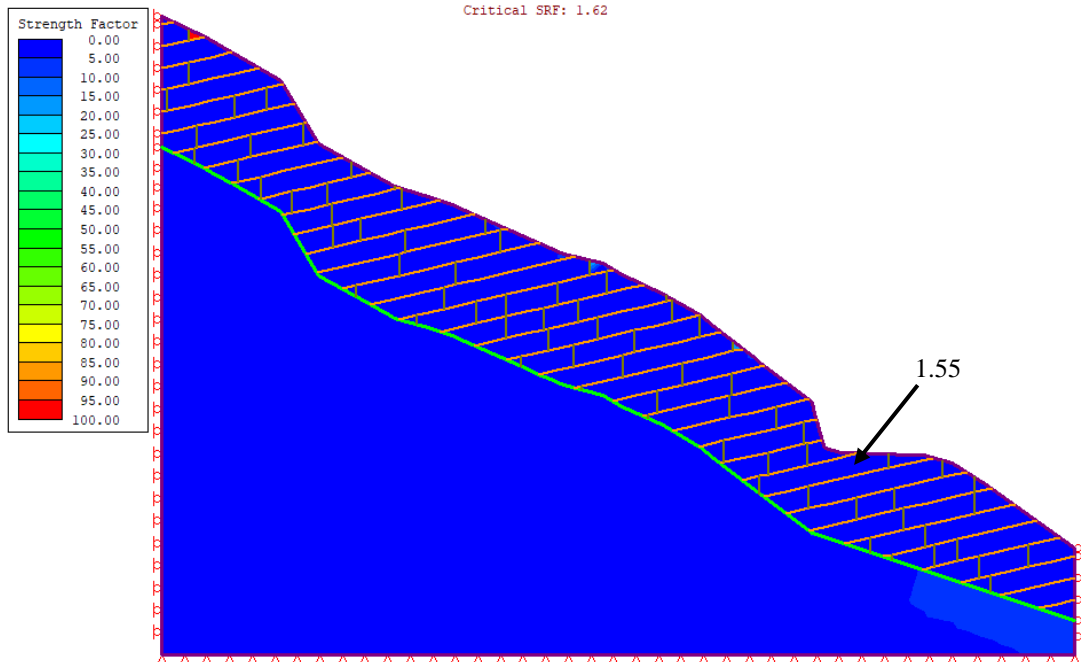
Εικόνα 6-45. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-46. Στοιχεία που έχουν διαρρέυσει.

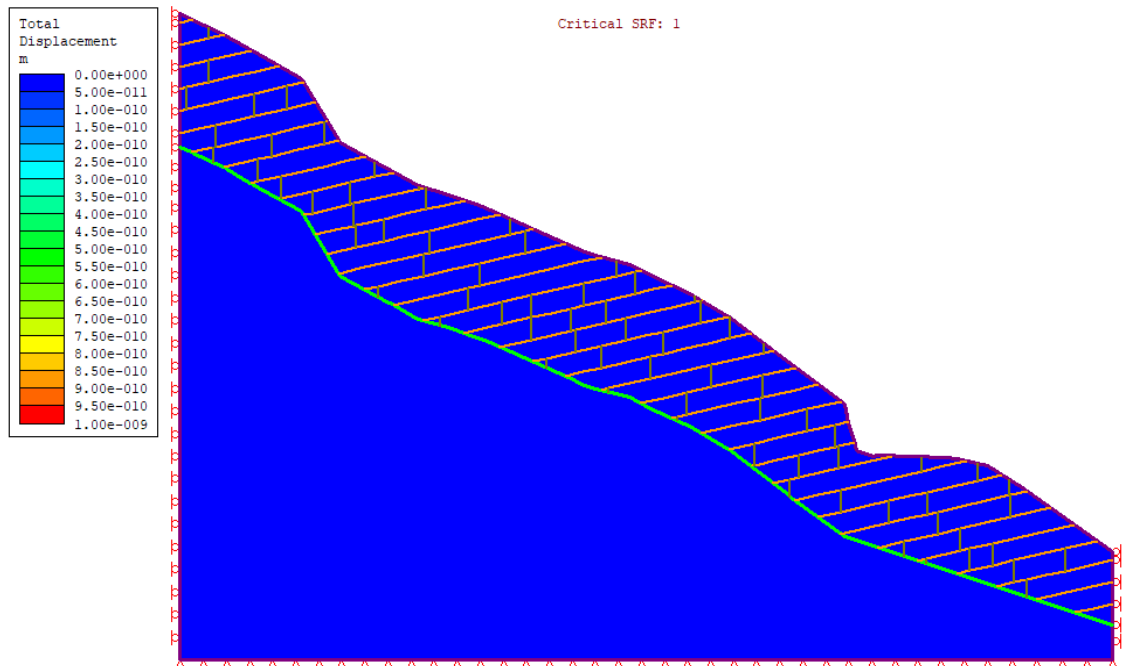
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-47. Συντελεστής αντοχής

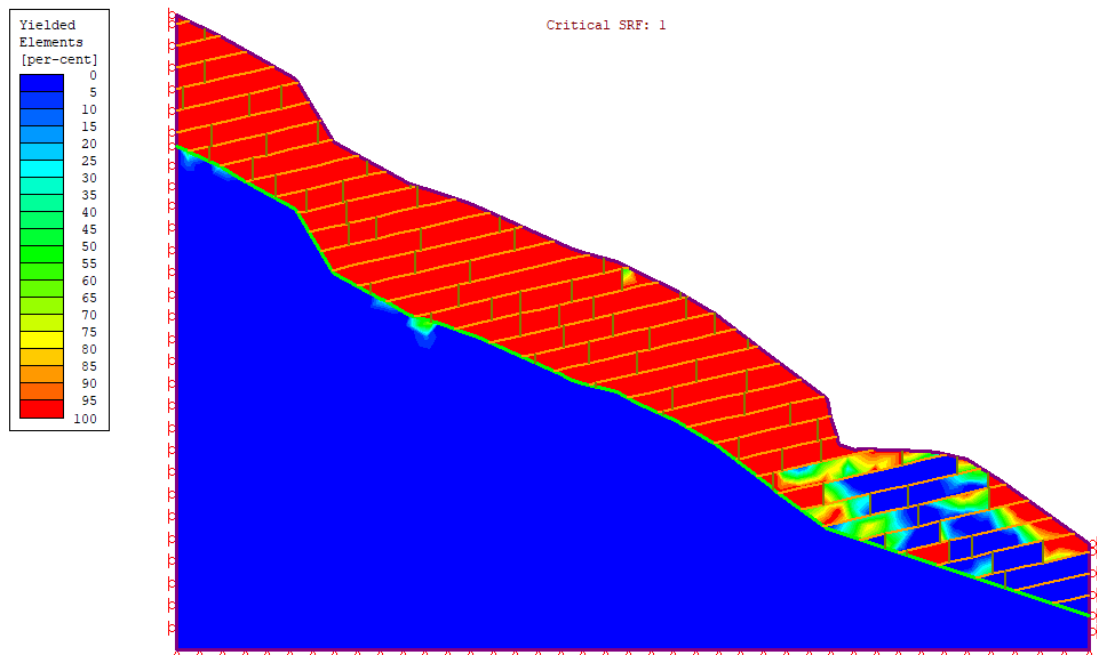
Στις εικόνες (6-47 - 6-49), παρατηρείται ότι με την μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά -20%, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1, δηλ. προκύπτει οριακή ισορροπία.

Total displacements



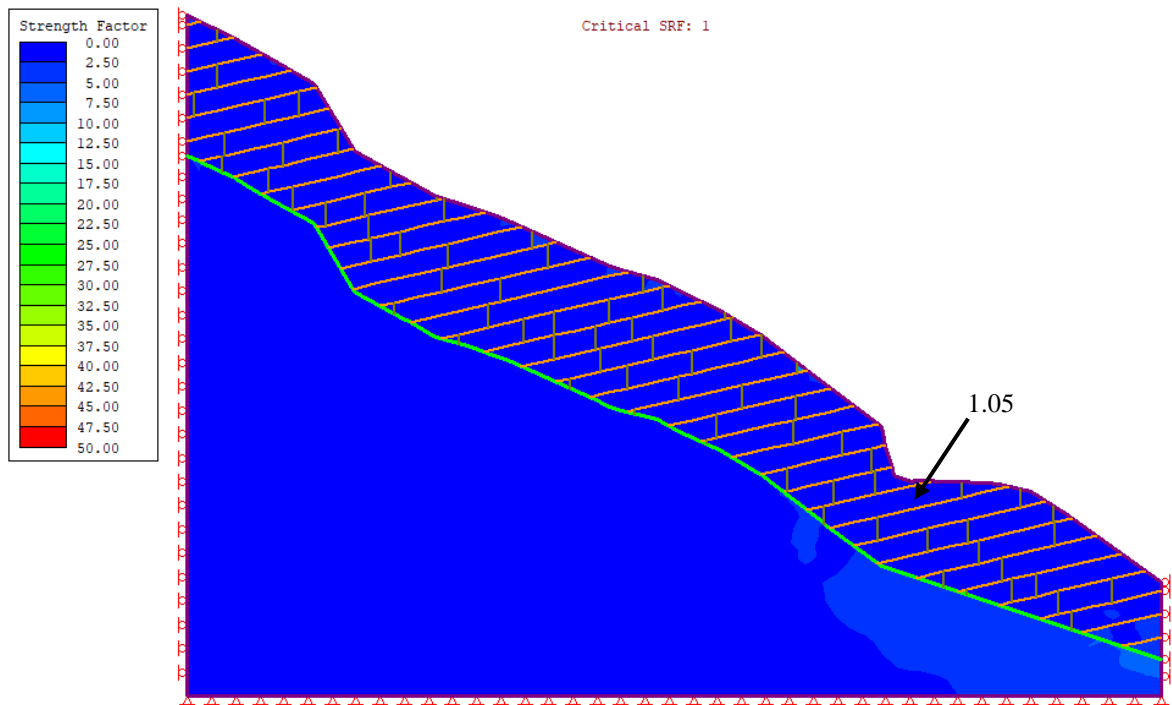
Εικόνα 6-48. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων.

Yielded Elements



Εικόνα 6-49. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

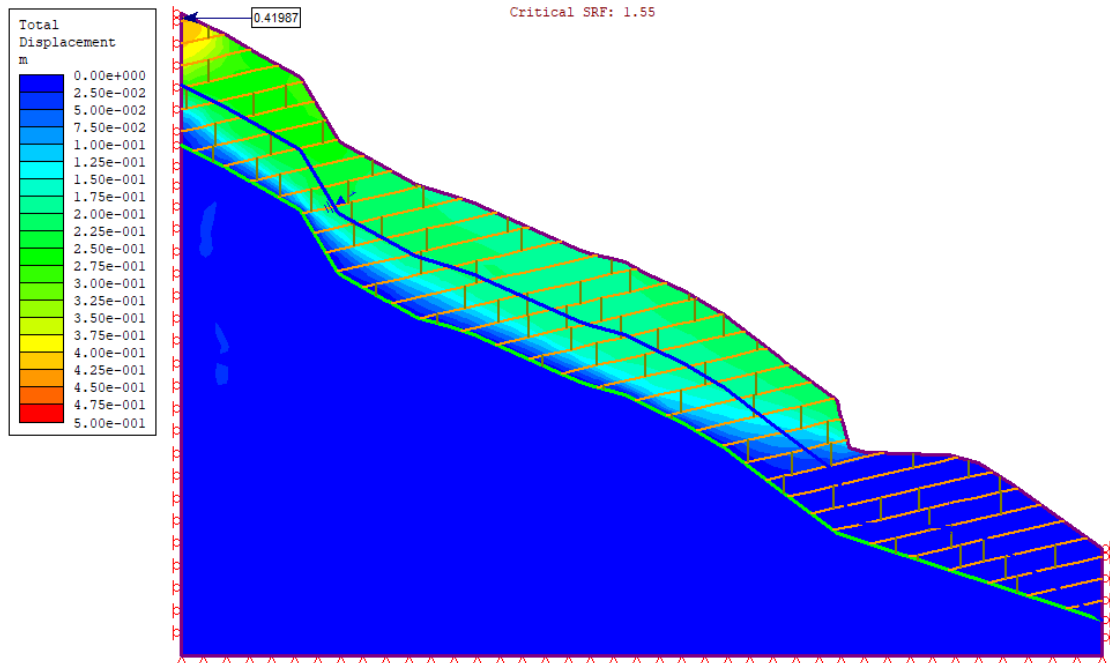


Εικόνα 6-50. Συντελεστής αντοχής

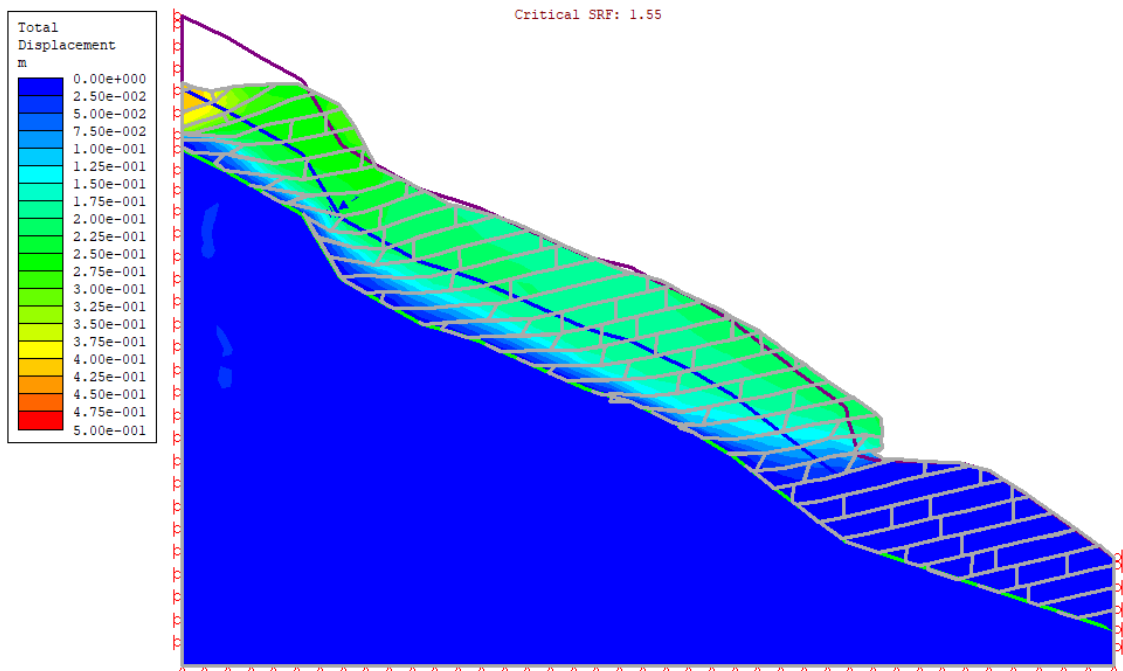
6.3.3 Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανούς και νερό

Παρατηρείται, στις παρακάτω εικόνες (6-51 - 6-52), ότι με την αύξηση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.55 και μέγιστη μετατόπιση ίση με 0,05m που αναπτύσσεται στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

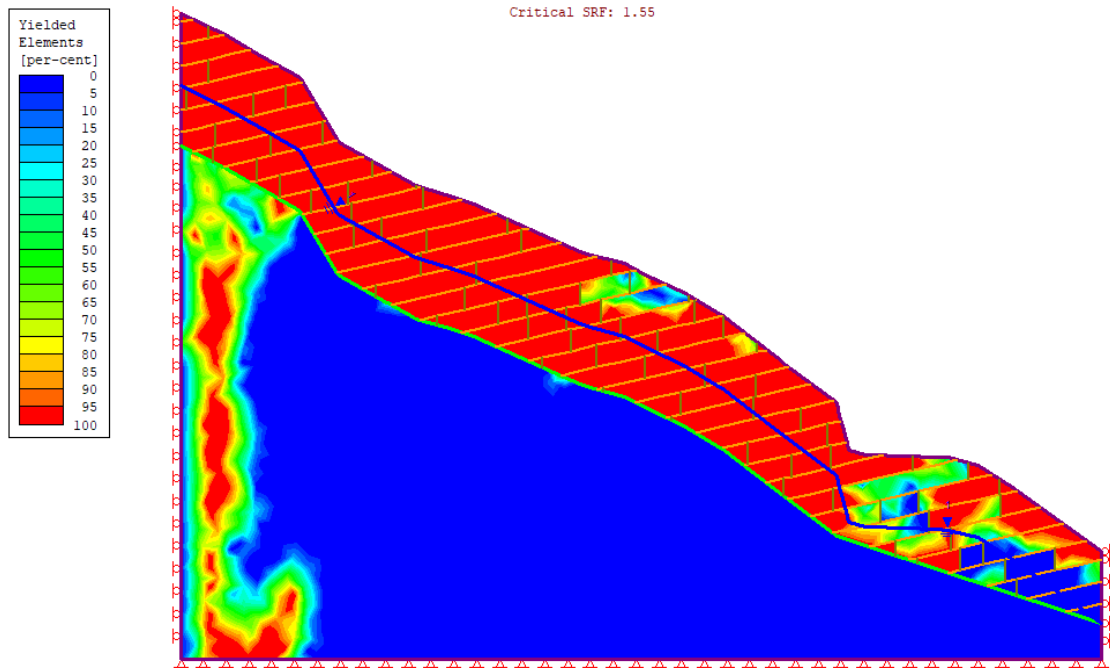


Εικόνα 6-51. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,41987m.



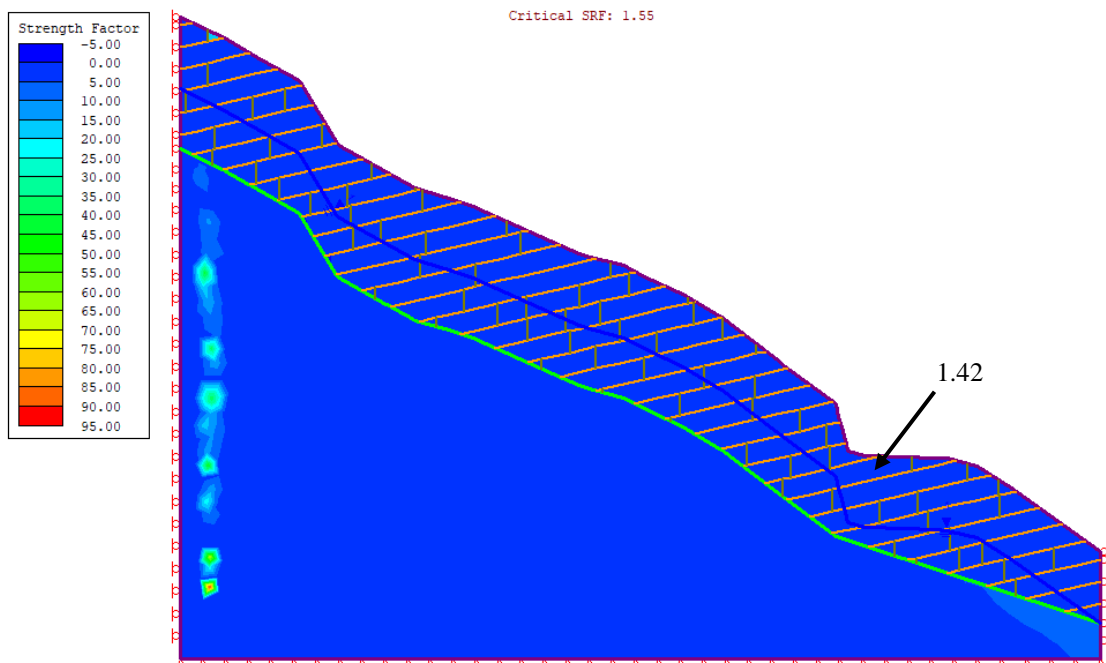
Εικόνα 6-52. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-53. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

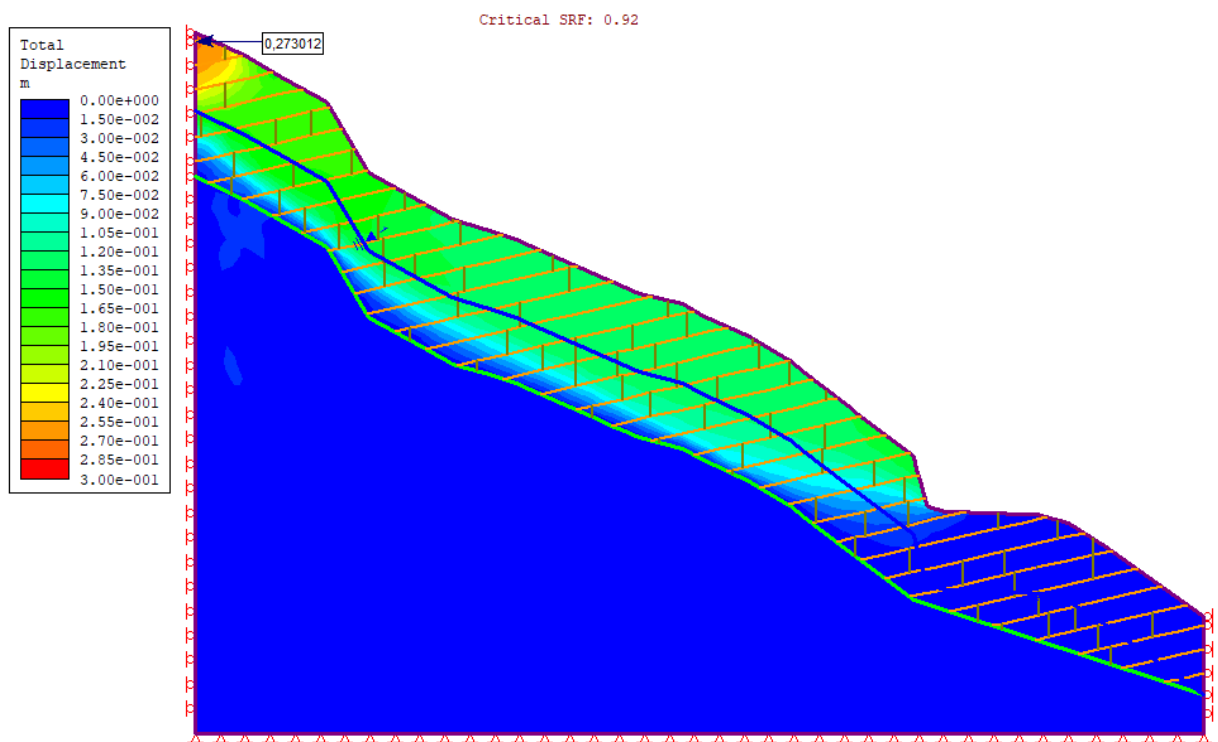
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



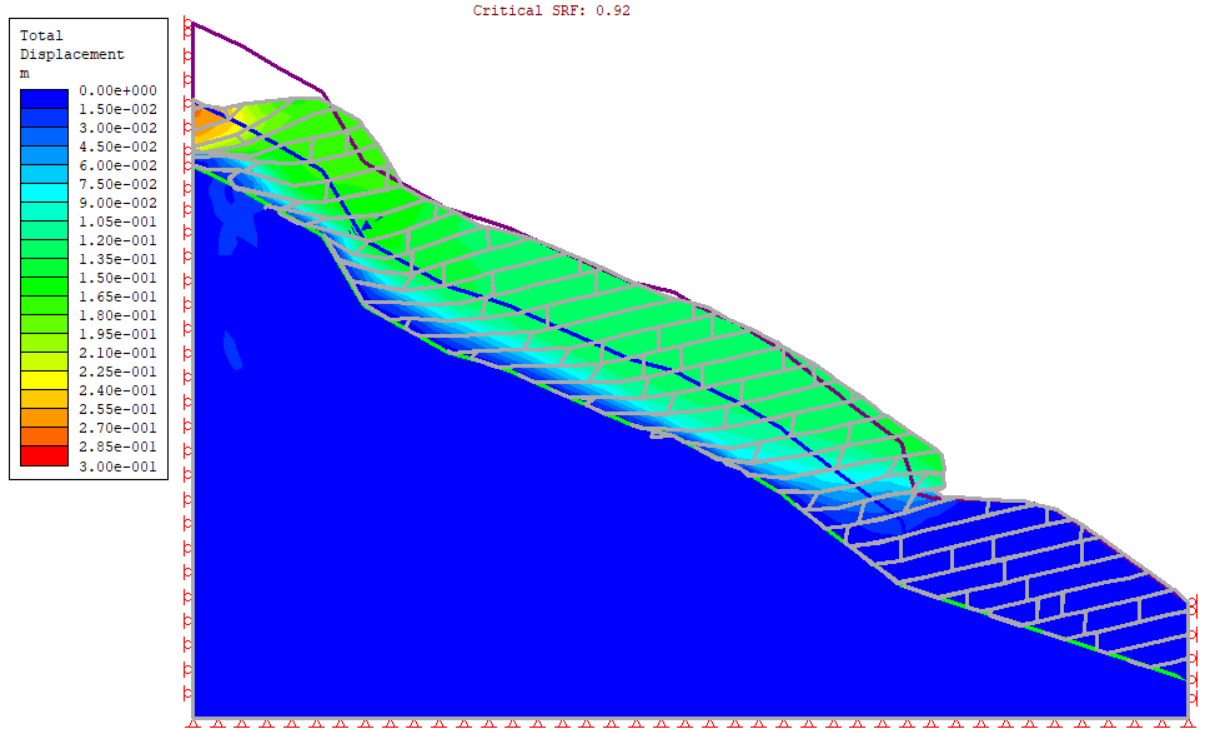
Εικόνα 6-54. Συντελεστής αντοχής

Με την μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, παρατηρείται, στις παρακάτω εικόνες (6-55 - 6-56), ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 0.92 και η μέγιστη μετατόπιση είναι ίση με 0,27m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

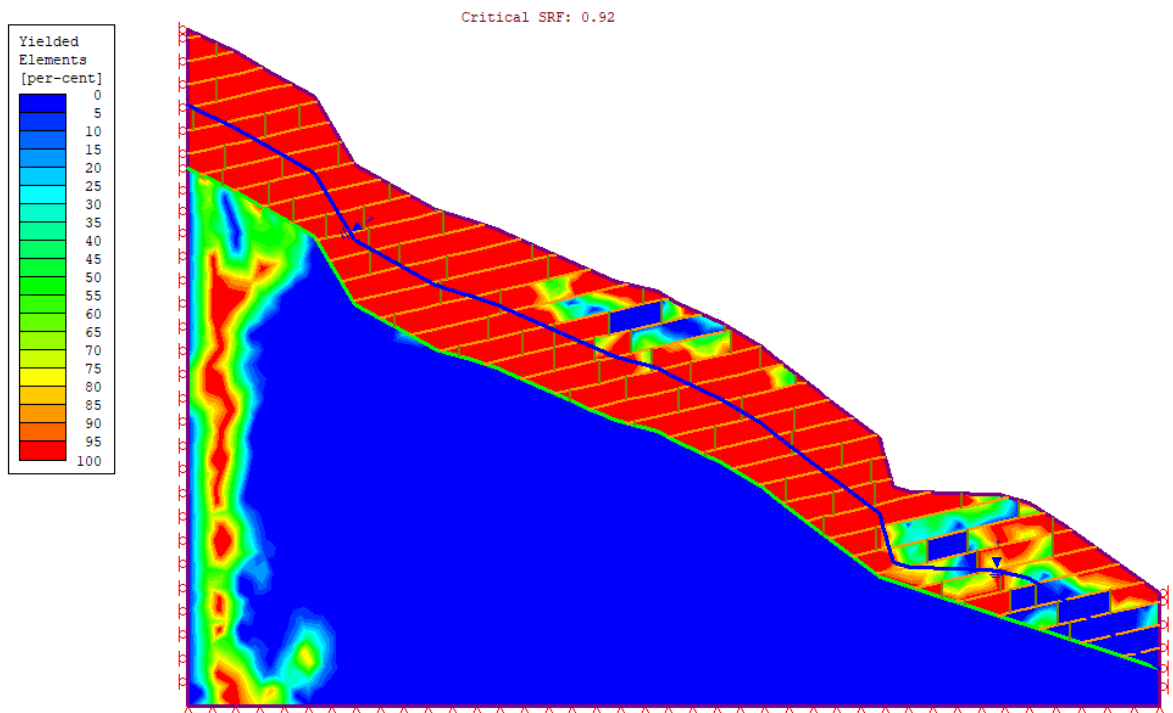


Εικόνα 6-55. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,273012m.



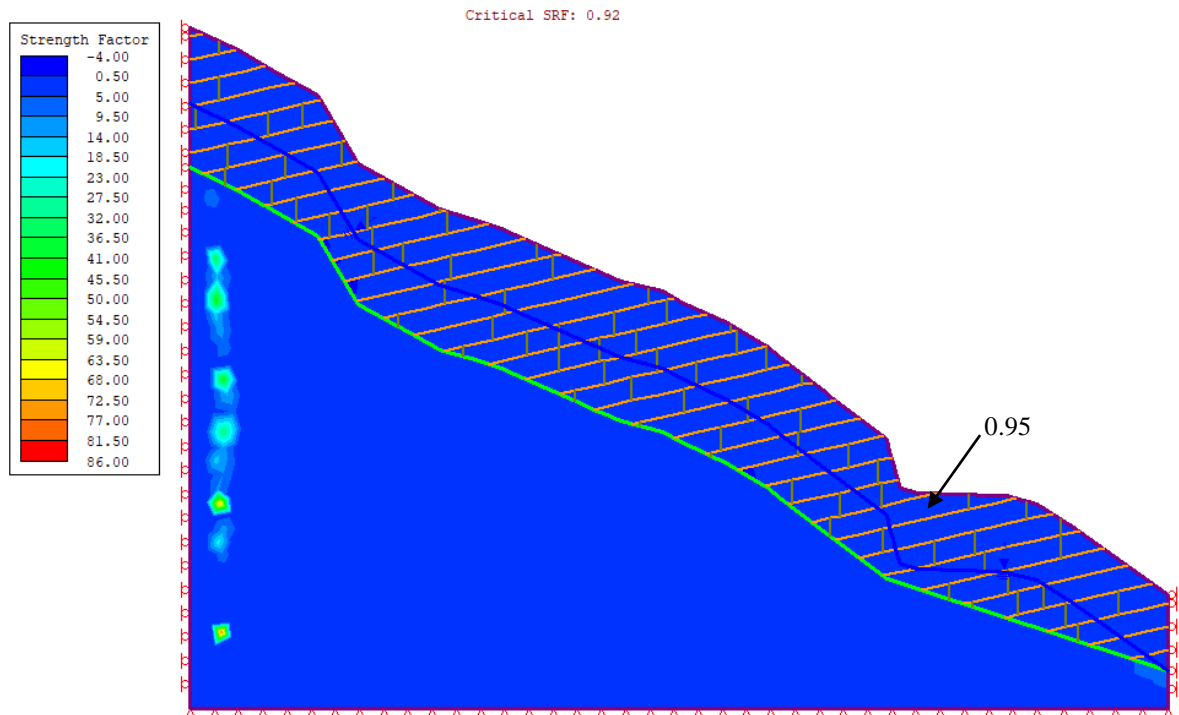
Εικόνα 6-56. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-57. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

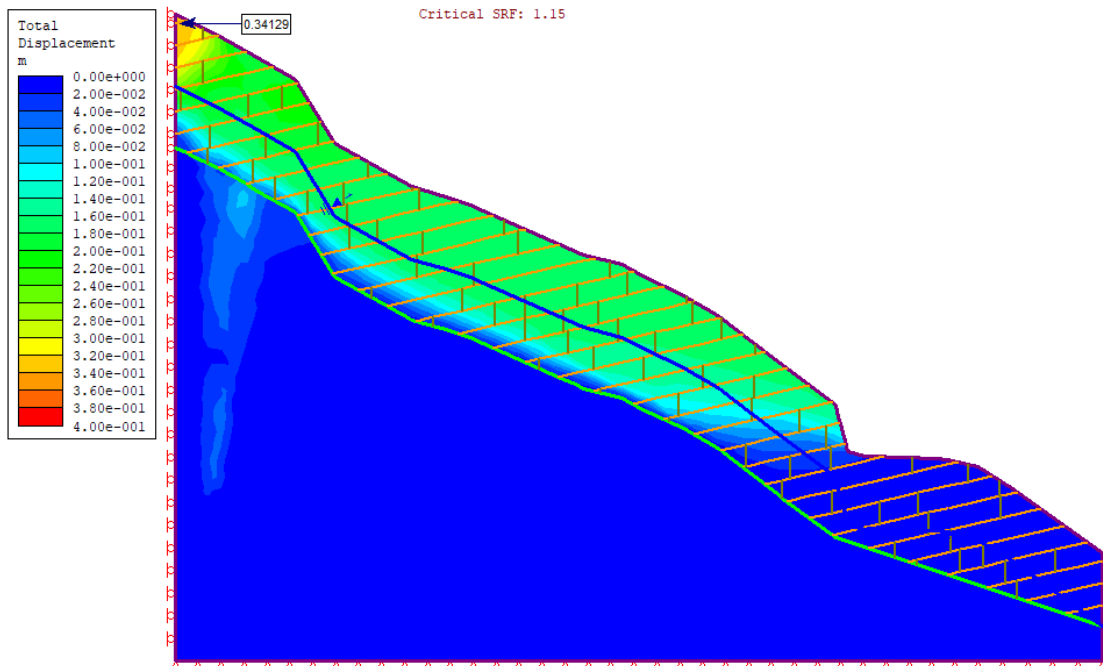


Εικόνα 6-58. Συντελεστής αντοχής.

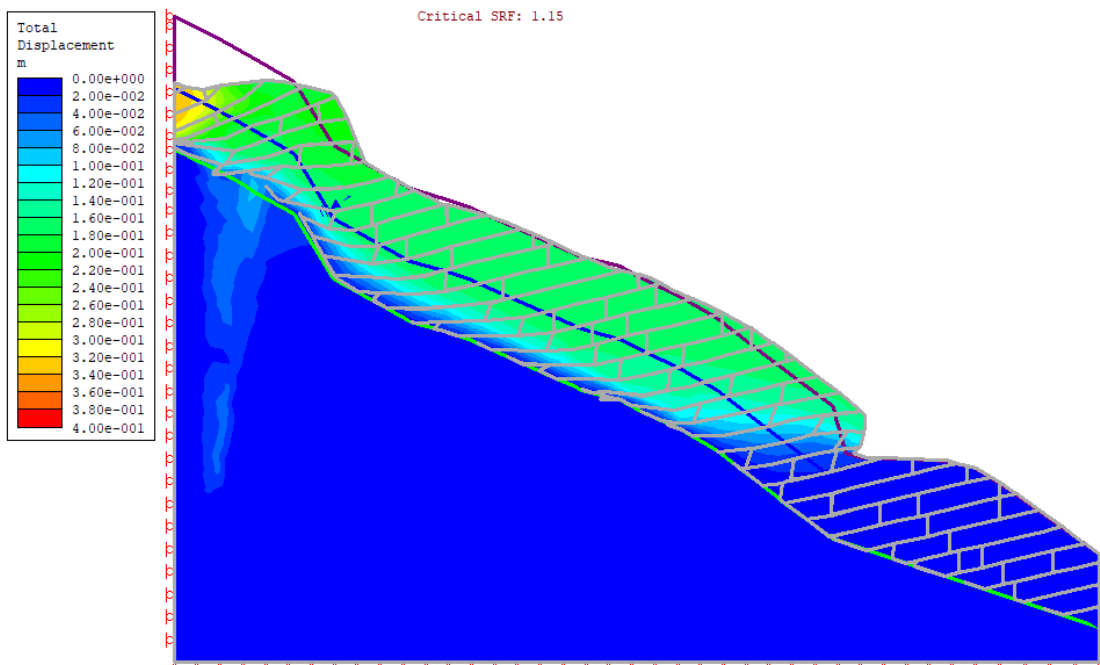
6.3.4 Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανού, νερού και σεισμικού φορτίου 1

Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (6-59 - 6-60), με την αύξηση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.15 και η μέγιστη μετατόπιση ίση με 0,34m και συμβαίνει στην κεφ

Total displacements

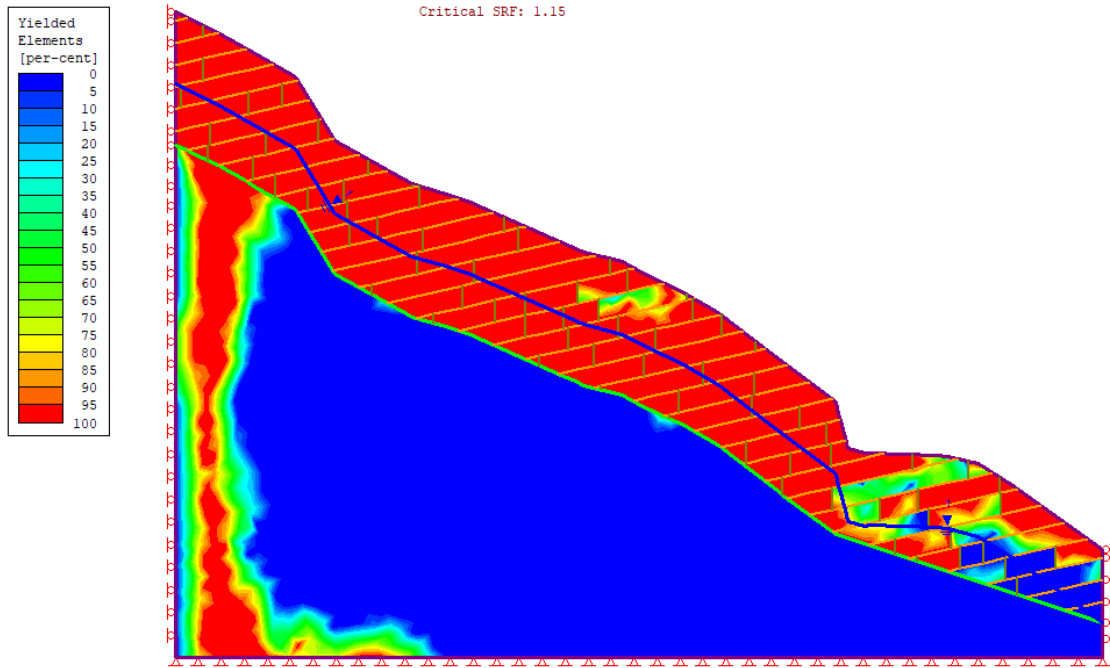


Εικόνα 6-59. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,34129m.



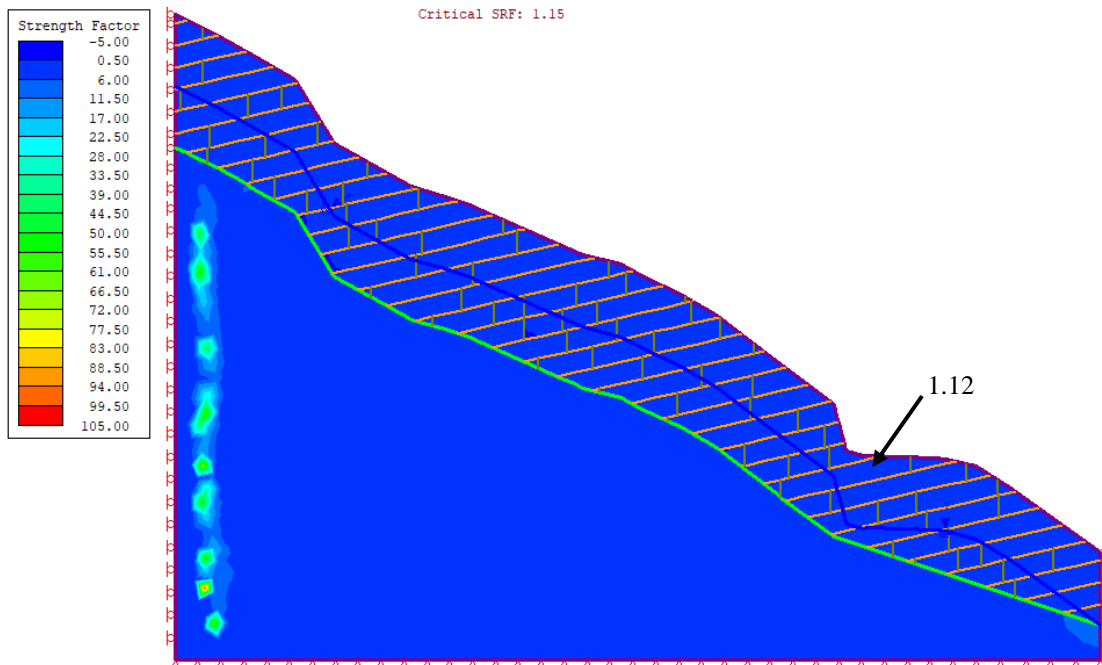
Εικόνα 6-60. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-61. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει

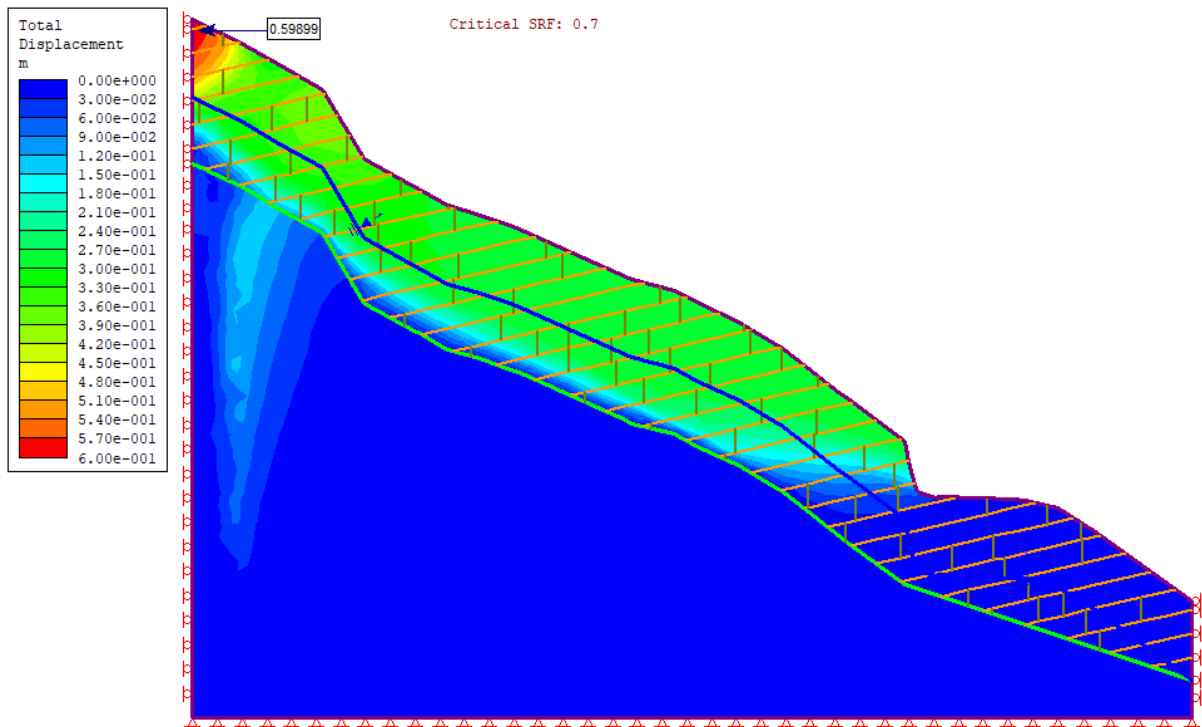
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



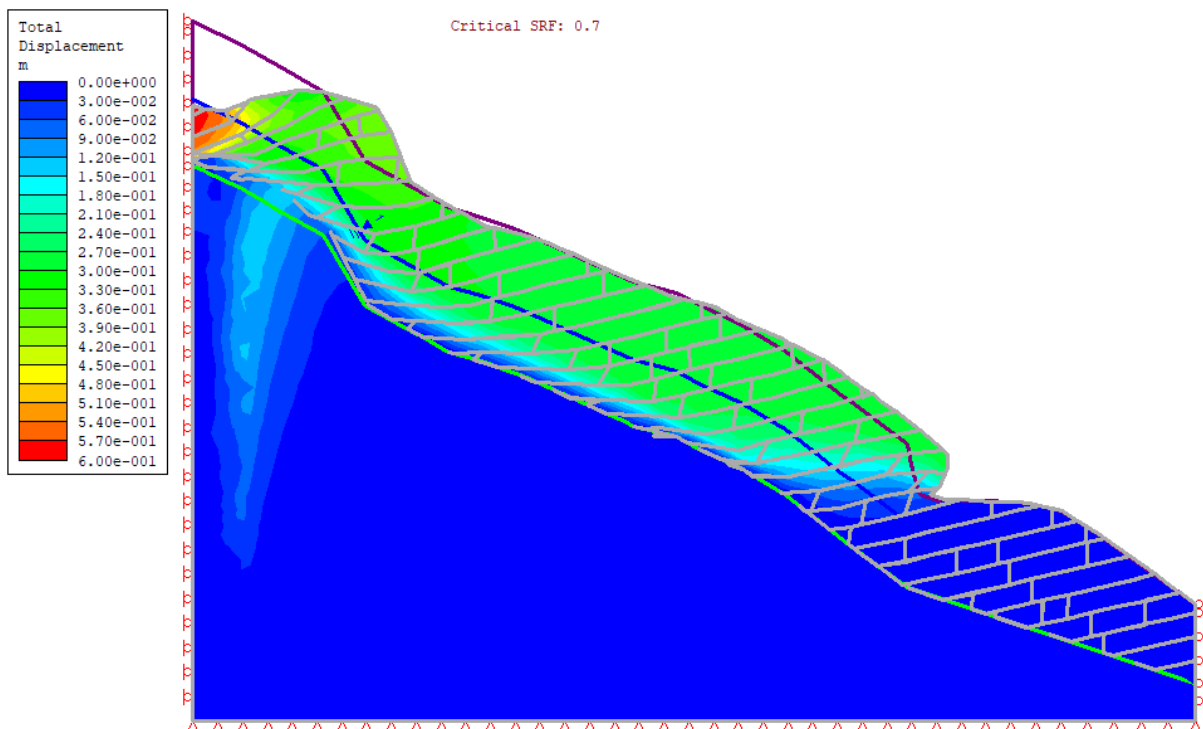
Εικόνα 6-62. Συντελεστής αντοχής

Στη συνέχεια με την μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, παρατηρείται στις εικόνες (6-63 - 6-64), ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 0.7 δηλ. το πρανές είναι ασταθές και η μέγιστη μετατόπιση ισούται με 0.6m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

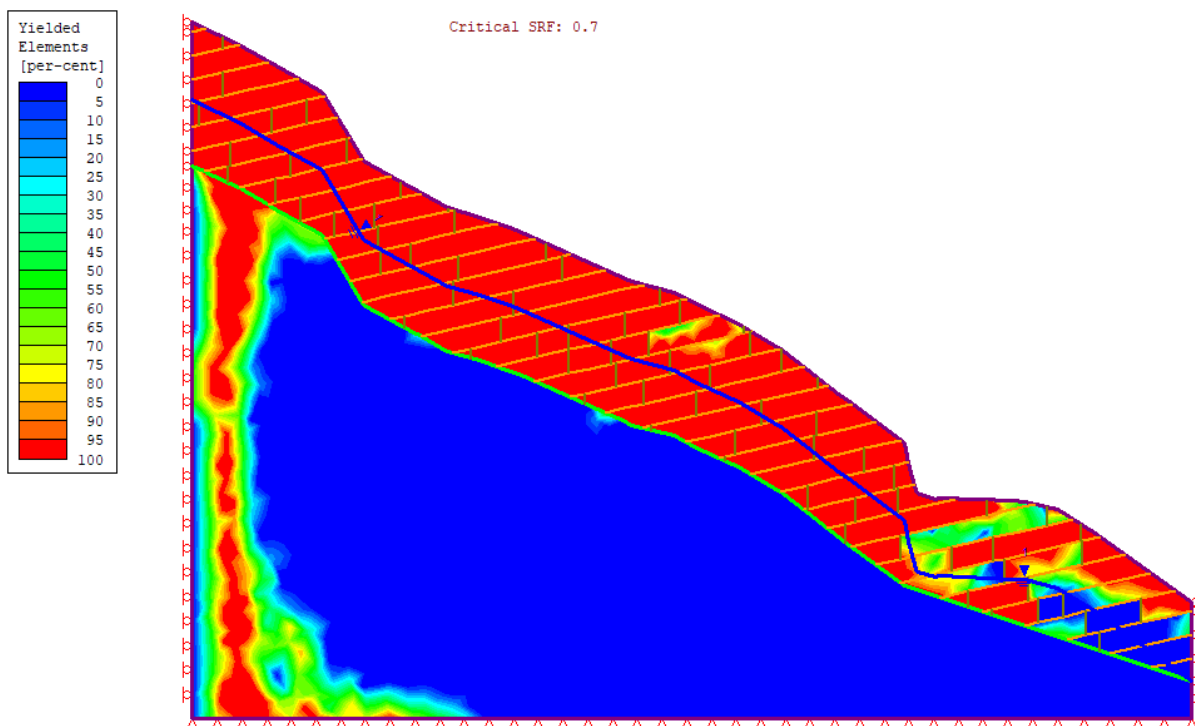


Εικόνα 6-63. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0.59899m.



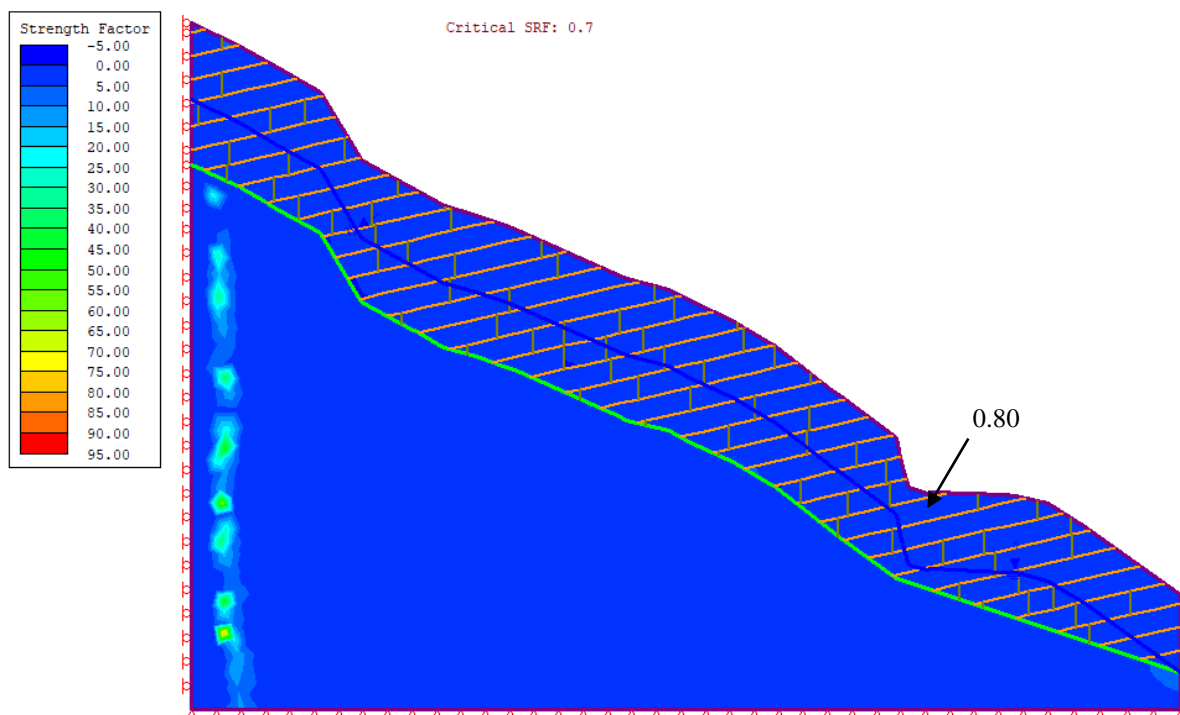
Εικόνα 6-64. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-65. Στοιχεία που έχουν διαρρέψει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor

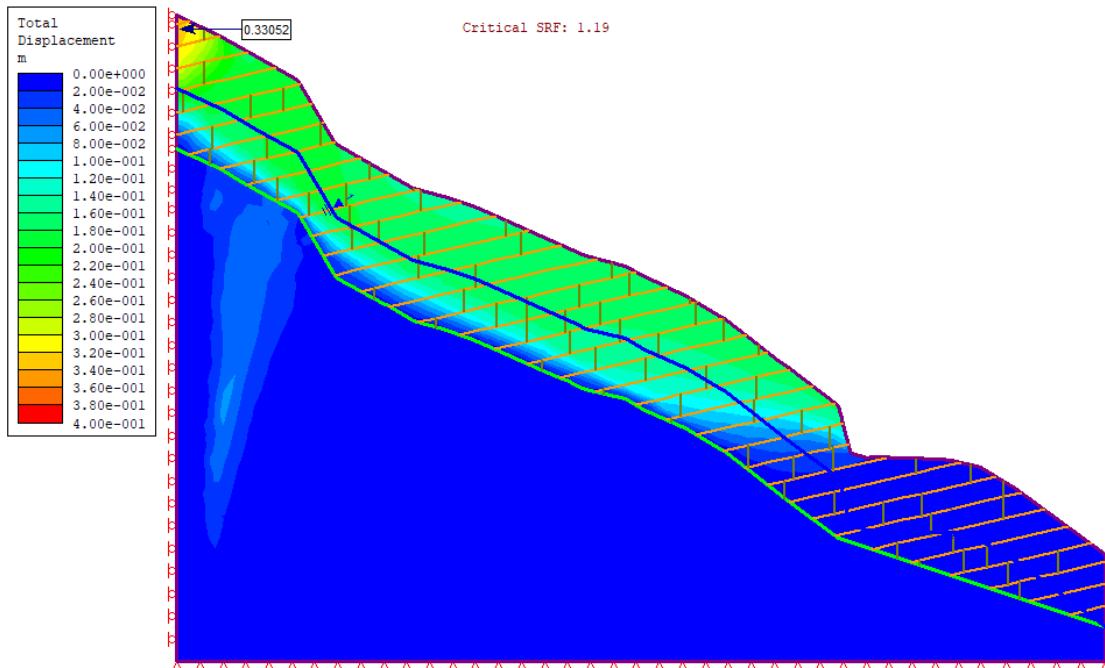


Εικόνα 6-66. Συντελεστής αντοχής.

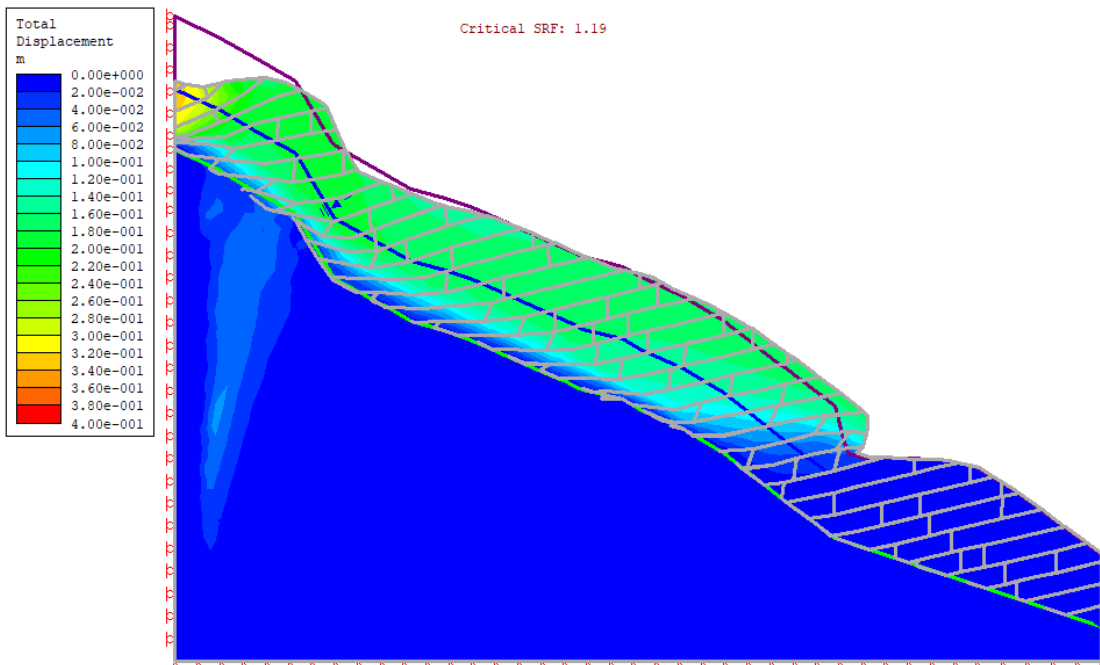
6.3.5 Ανάλυση ευαισθησίας σε μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών αντίρροπων στη κλίση του πρανού, νερού και σεισμικού φορτίου 2

Με την αύξηση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, παρατηρείται στις παρακάτω εικόνες (6-67 - 6-68), ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 1.19 (ευσταθές πρανές) και η μέγιστη μετατόπιση ισούται με 0,33m και συμβαίνει στην κεφαλή του πρανού.

Total displacements

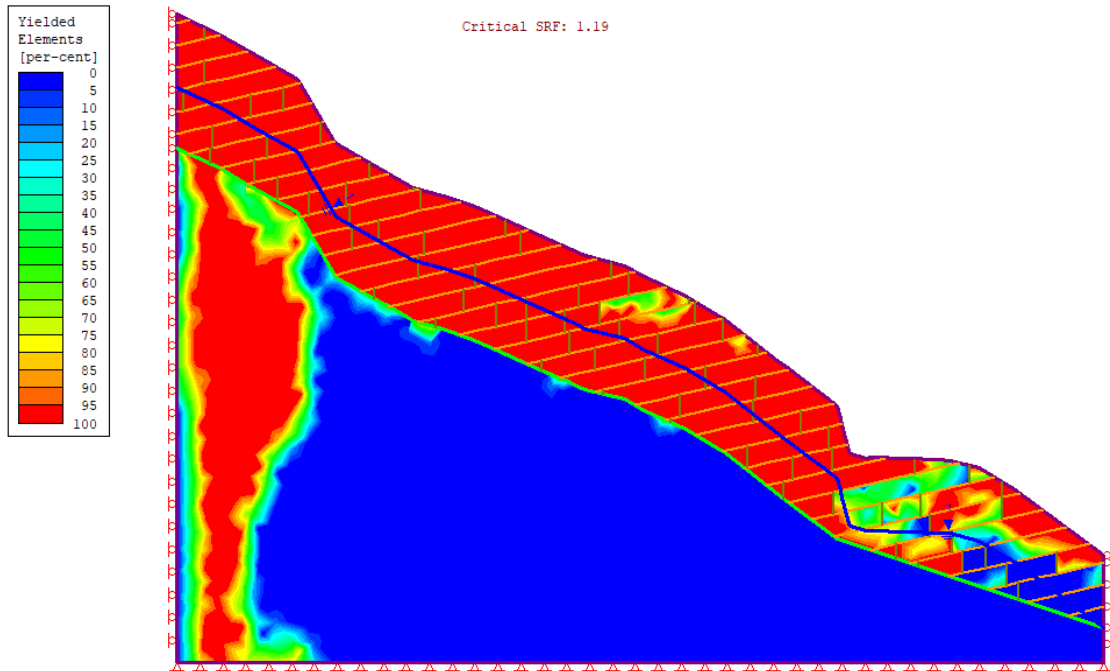


Εικόνα 6-67. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0,33052m.



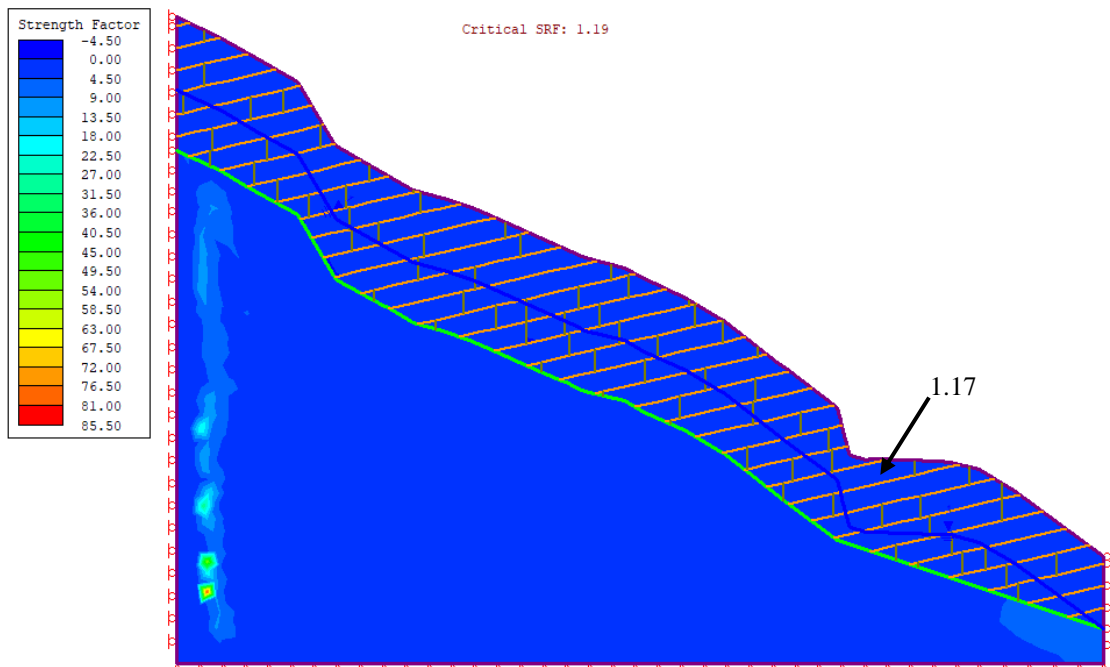
Εικόνα 6-68. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-69. Στοιχεία που έχουν διαρρέυσει.

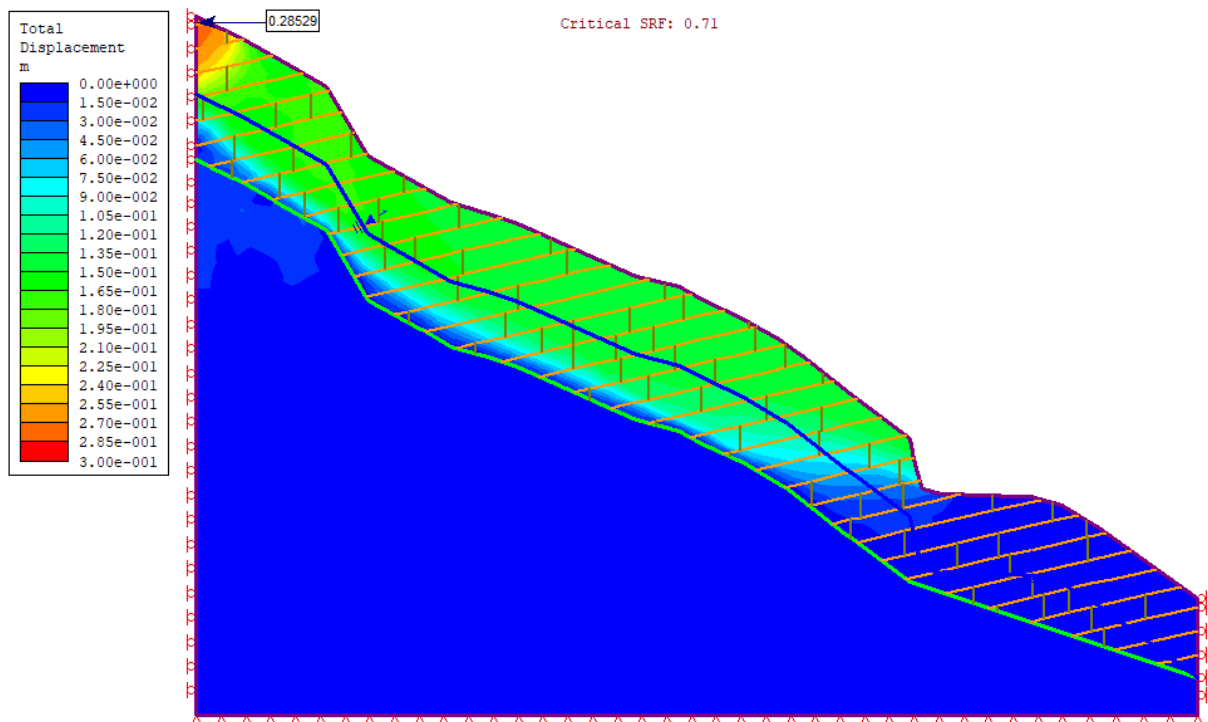
Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



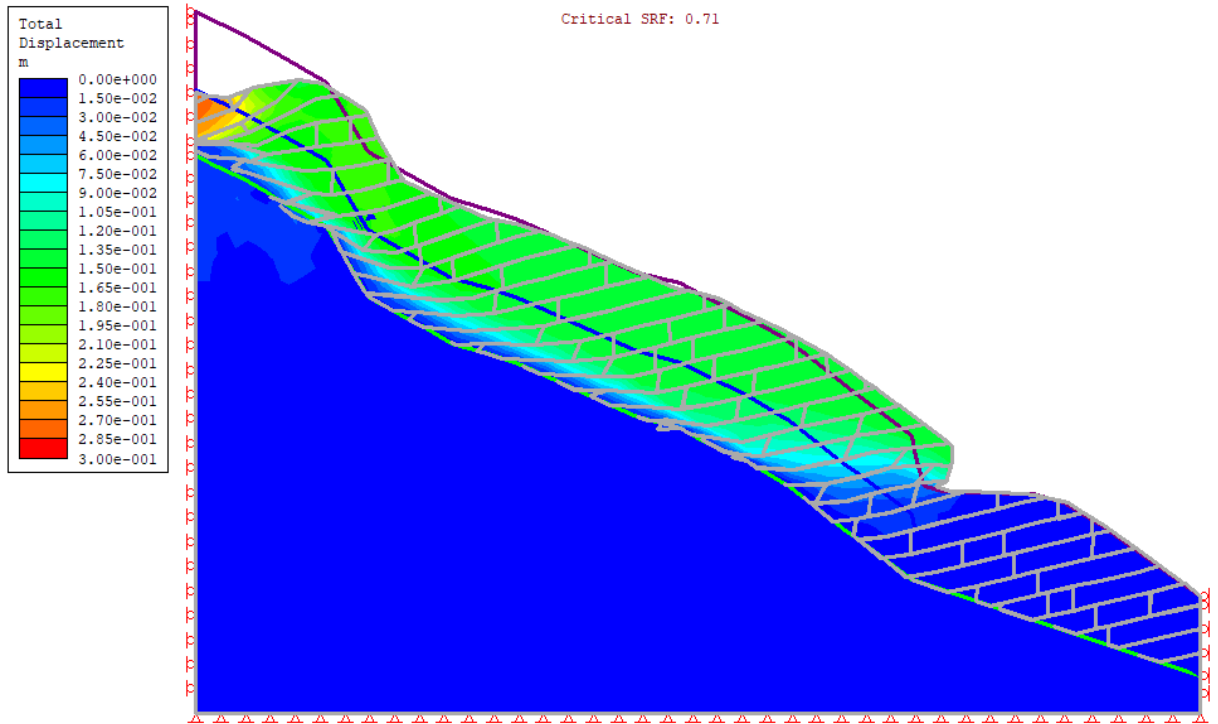
Εικόνα 6-70. Συντελεστής αντοχής

Με την μείωση των παραμέτρων της συνοχής και της γωνίας τριβής κατά 20%, παρατηρείται στις παρακάτω εικόνες (6-71 - 6-72), ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή απομείωσης αντοχής (critical SRF) ισούται με 0.71 (αστάθεια πρανούς) και η μέγιστη μετατόπιση ισούται με 0.3m στην κεφαλή του πρανούς.

Total displacements

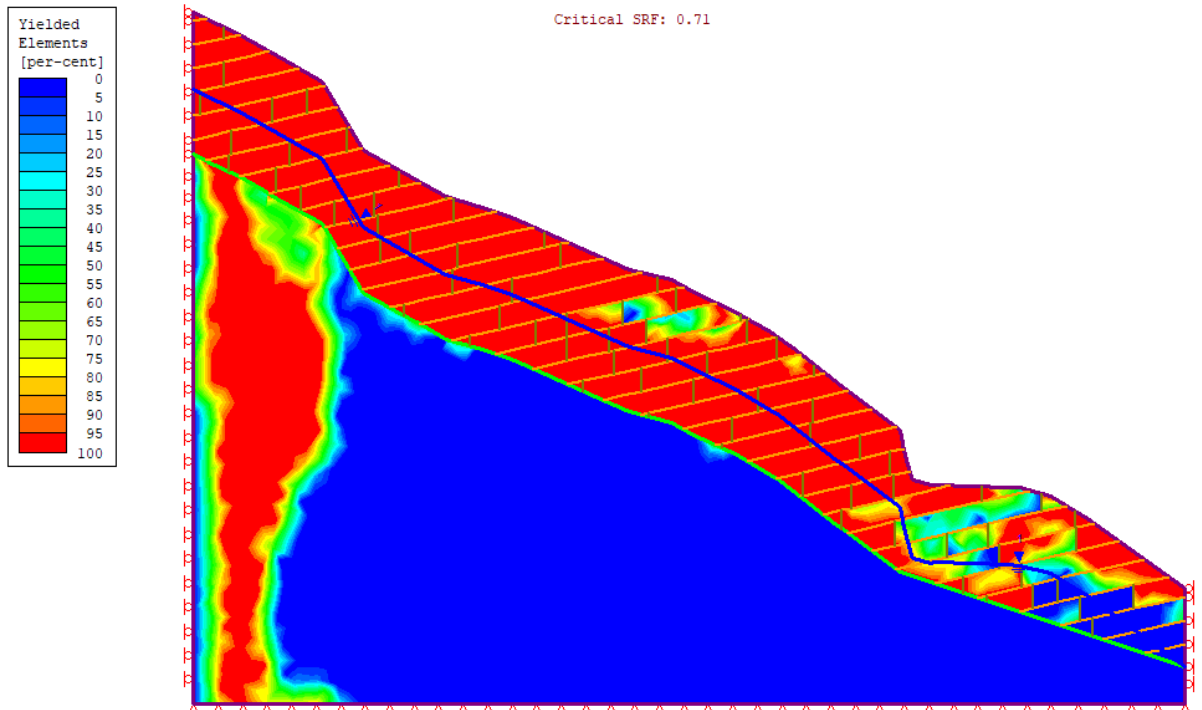


Εικόνα 6-71. Διάγραμμα των ολικών μετατοπίσεων και εύρεση μέγιστης τιμής 0.28529m.



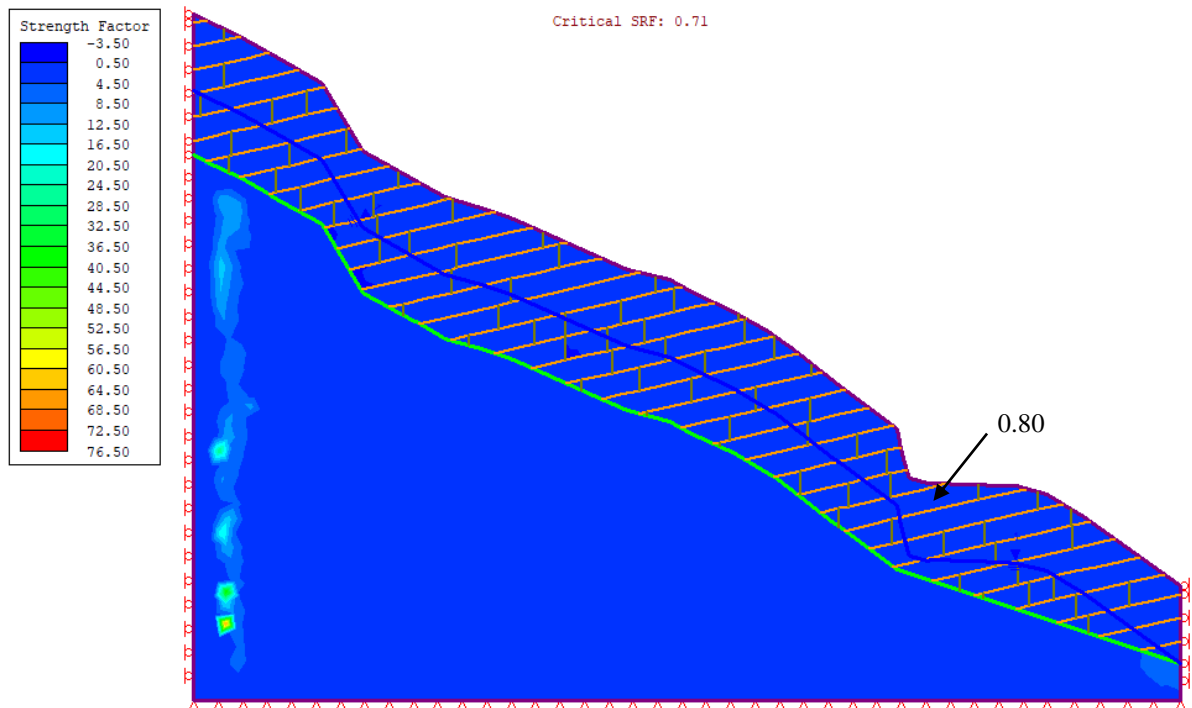
Εικόνα 6-72. Παρουσίαση των παραμορφωμένων ορίων του εξεταζόμενου πρανούς.

Yielded Elements



Εικόνα 6-73. Στοιχεία που έχουν διαρρεύσει.

Συντελεστής Αντοχής – Strength Factor



Εικόνα 6-74. Συντελεστής αντοχής.

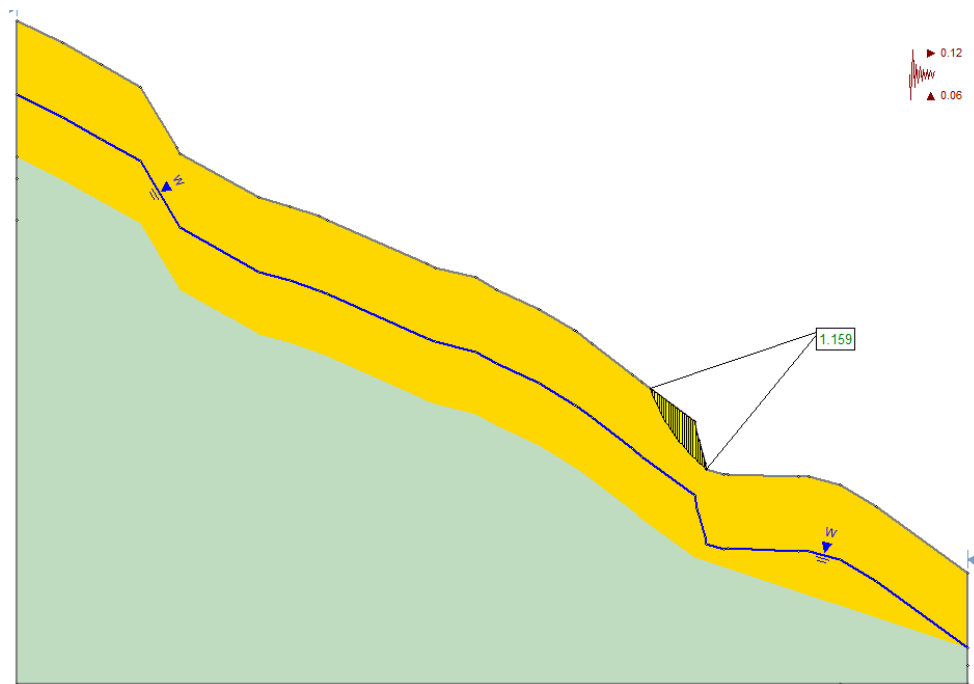
6.4 Συντελεστές Ασφαλείας

Η ανάλυση ευαισθησίας στο πρόγραμμα Slide γίνεται για τις δυσμενέστερες των περιπτώσεων, δηλ. των μοντέλων με ύπαρξη νερού και σεισμικής φόρτισης 1 και 2.

Για την σεισμική φόρτιση 1 και αύξηση 20% της συνοχής και γωνίας τριβής ισχύουν οι συντελεστές ασφαλείας που αναγράφονται στον Πίνακα 6-5.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	1.159
Janbu	1.155
Spencer	1.157
GLE	1.156

Πίνακας 6-5. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1

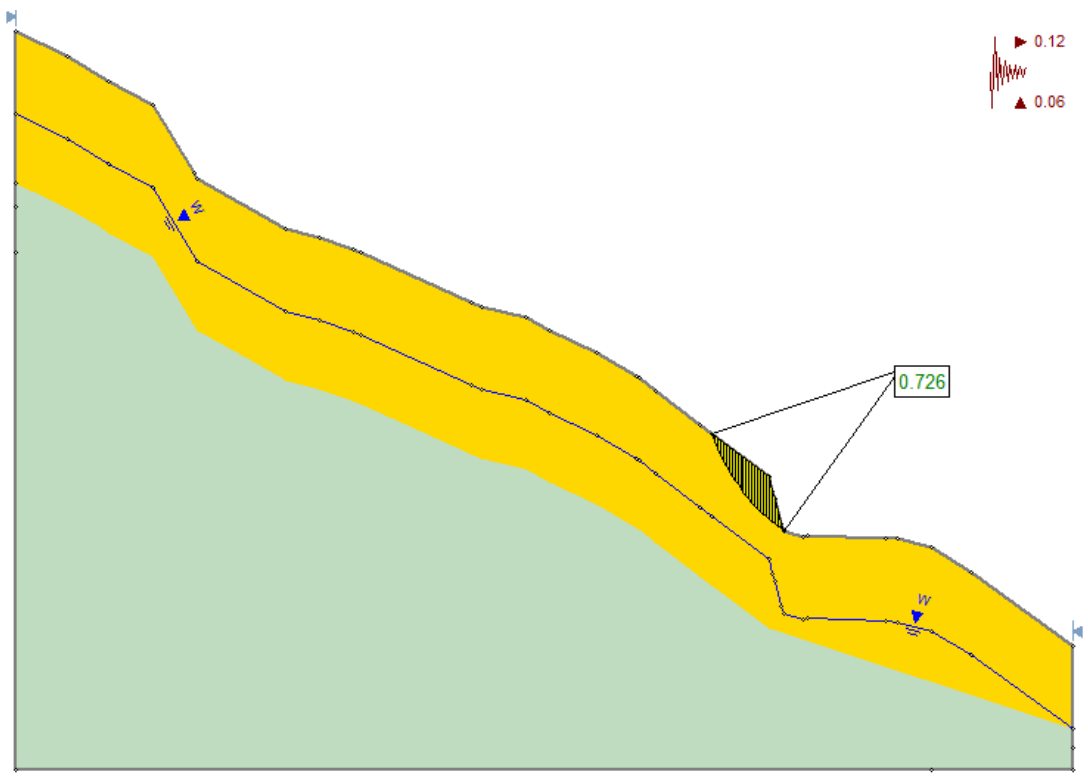


Εικόνα 6-75.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop

Για την σεισμική φόρτιση 1 και μείωση 20% της συνοχής και γωνίας τριβής ισχύουν οι συντελεστές ασφαλείας που αποτυπώνονται στον Πίνακα 6-6.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	0.726
Janbu	0.722
Spencer	0.724
GLE	0.726

Πίνακας 6-6. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 1

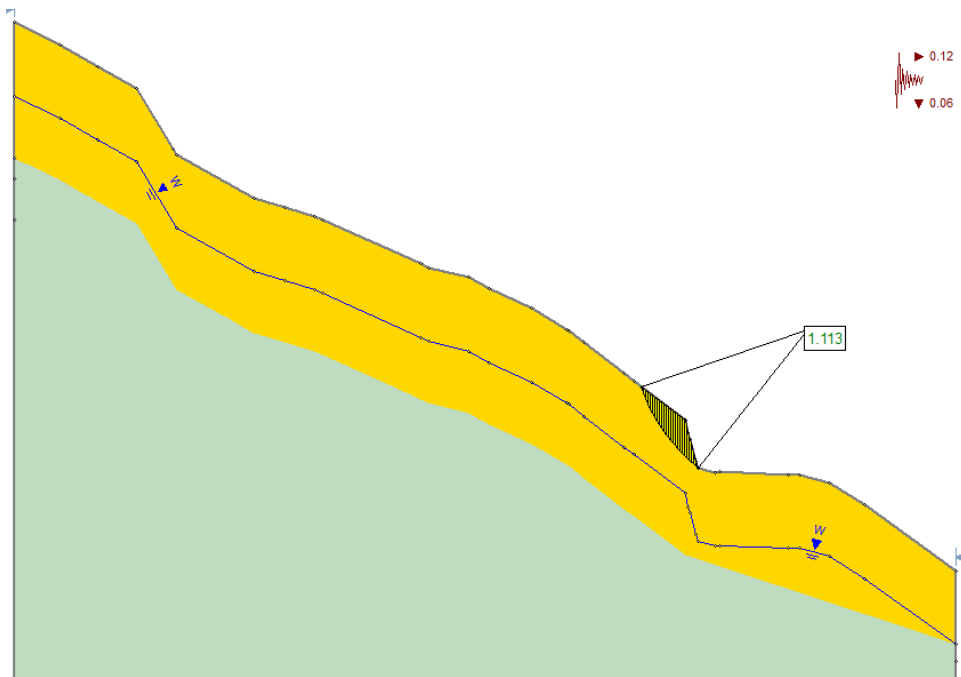


Εικόνα 6-76.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.

Για την σεισμική φόρτιση 2 και αύξηση 20% της συνοχής και γωνίας τριβής και ανάλογα με την επιλεγόμενη μέθοδο, η ανάλυση δίνει του συντελεστές ασφαλείας του Πίνακα 6-7.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	1.115
Janbu	1.113
Spencer	1.112
GLE	1.112

Πίνακας 6-7. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2

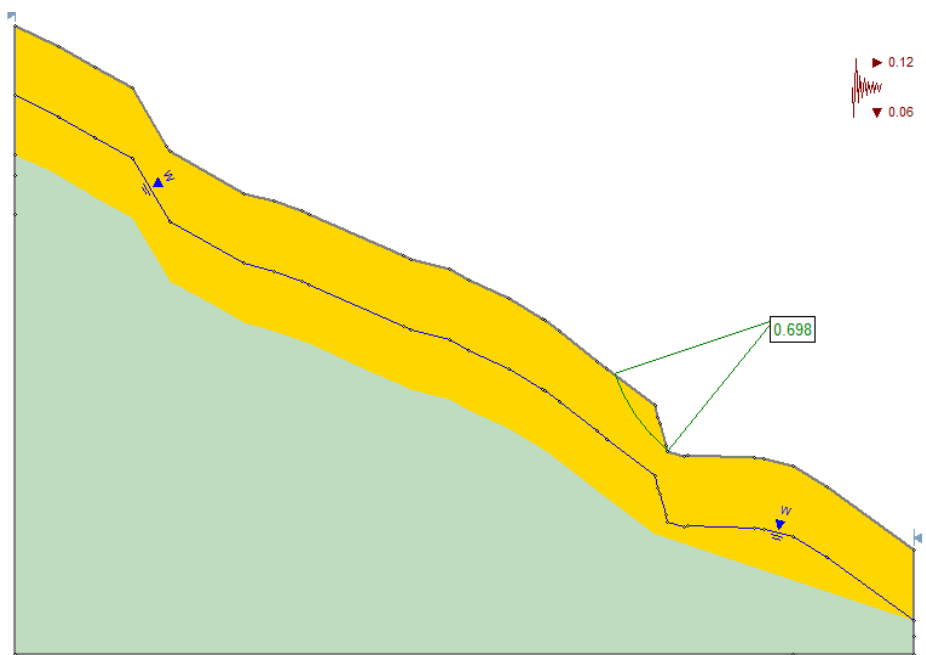


Εικόνα 6-77.Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Janbu.

Για την σεισμική φόρτιση 2 και μείωση 20% της συνοχής και γωνίας τριβής ισχύουν η ανάλυση δίνει τους συντελεστές ασφαλείας του Πίνακα 6-8.

Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	0.698
Janbu	0.697
Spencer	0.695
GLE	0.696

Πίνακας 6-8. Σ.Α για μοντέλο με νερό και σεισμό τύπου 2



Εικόνα 6-78. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop.

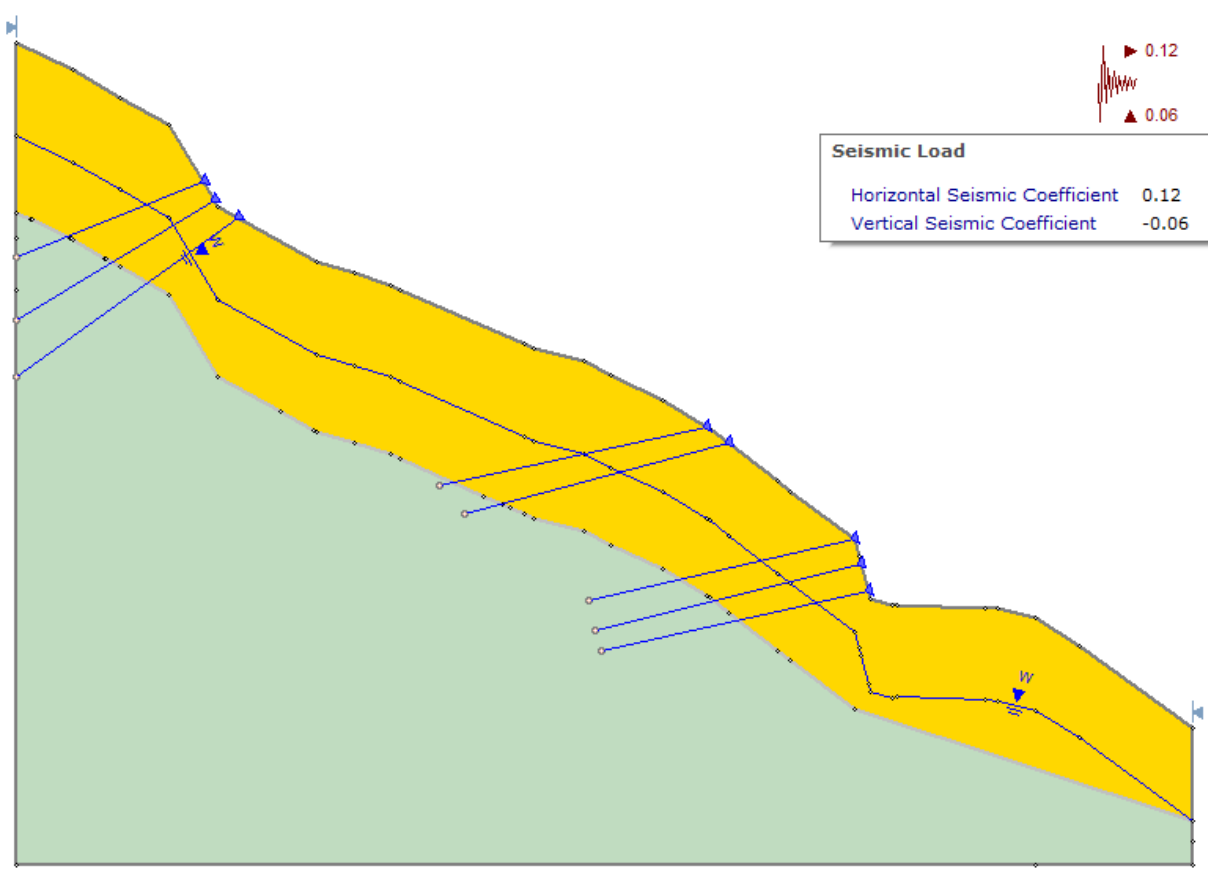
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για μείωση των παραμέτρων c , ϕ , κατά 20% προκύπτει συντελεστής ασφαλείας κάτω από την μονάδα ενώ για αύξηση των παραμέτρων c , ϕ κατά 20% οι υπολογιζόμενοι συντελεστές ασφαλείας είναι πάνω από την μονάδα, σε όλες τις μεθόδους.

Κεφάλαιο 7 Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης

Στο παρόν κεφάλαιο προτείνονται μέτρα υποστήριξης (αγκυρώσεις) για τις περιπτώσεις όπου προέκυψε αστάθεια του εξεταζόμενου πρανού. Τα αγκύρια είναι κατασκευαστικά στοιχεία, ικανά να ασκήσουν μία ελκτική (εφελκυστική) δύναμη σε βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους. Τα αγκύρια διαχωρίζονται σε προσωρινά και μόνιμα με βάση το χρόνο ζωής τους, καθώς και σε ενεργά (προεντεταμένα) και παθητικά (απλές ηλώσεις) [7]. Η σαφής γνώση της στρωματογραφίας του υπεδάφους, των ιδιοτήτων των βραχωδών και εδαφικών υλικών, αλλά και της ύπαρξης νερού, αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία του αγκυρίου.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται η προσομοίωση ενός μοντέλου ασταθούς πρανού (που έχει παρουσιαστεί στα προηγούμενα κεφάλαια), το οποίο έχει υποστηριχθεί με αγκυρώσεις. Επιλέχθηκαν αγκύρια φορτίου 500KN και μήκους 10 μέτρων, τα οποία είναι πρόσφυσης άκρου και συνήθως διαστελλόμενης κεφαλής. Η ανάλυση πραγματοποιείται στο πρόγραμμα Slide με σκοπό να υπολογιστούν άμεσα οι συντελεστές ασφαλείας.

7.1 Ανάλυση με τα μέτρα υποστήριξης



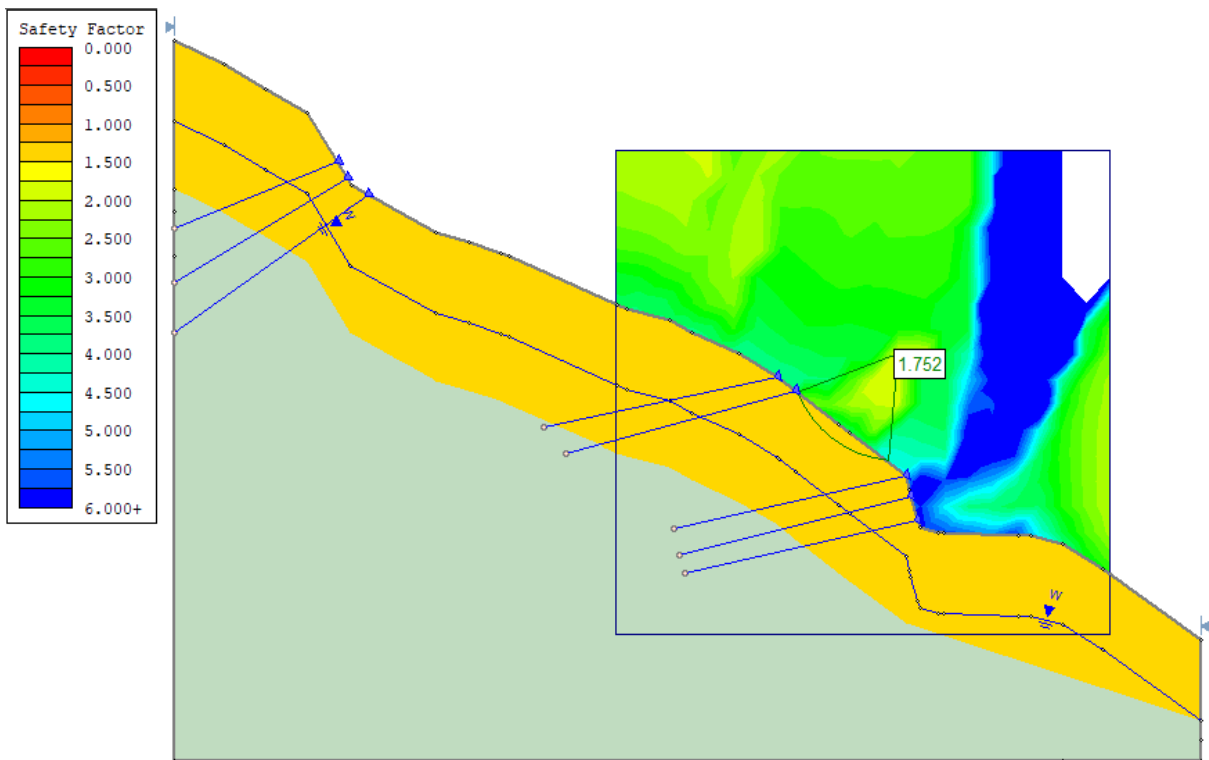
Εικόνα 7-1. Μοντέλο με εισαγωγή ασυνεχειών, νερού, σεισμό τύπου 1 και αγκύρια

Θεωρείται μοντέλο με παρουσία νερού και σεισμικής φόρτισης 1. Επιλέχτηκε η εισαγωγή αγκυριών στο συγκεκριμένο μοντέλο επειδή, από τις αναλύσεις ευστάθειας, εμφάνιζε τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις καθώς και τους μικρότερους συντελεστές ασφαλείας.

Με την εφαρμογή των προτεινόμενων μέτρων υποστήριξης οι υπολογιζόμενοι συντελεστές ασφαλείας για τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7-1.

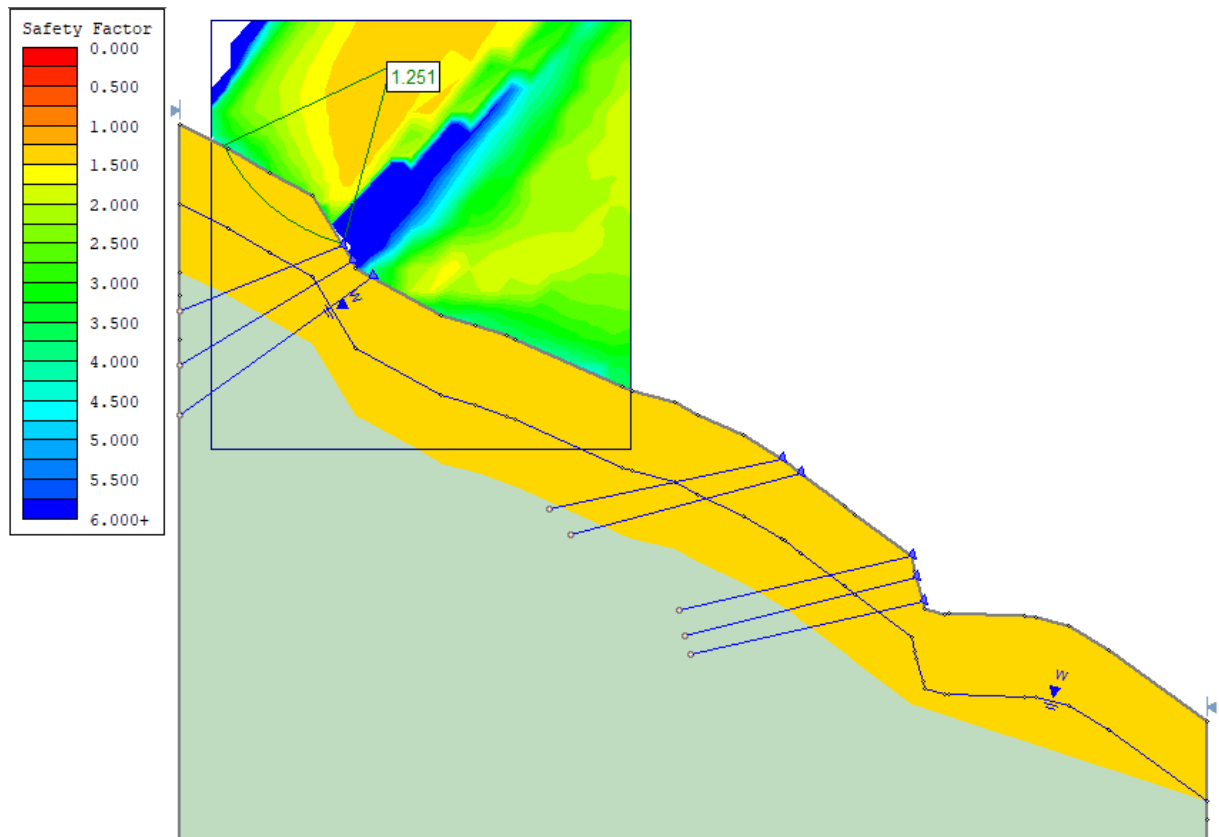
Μέθοδος	Safety factor (circular)
Bishop	1.752
Janbu	1.579
Spencer	1.750
GLE	1.748

Πίνακας 7-1. Σ.Α για μοντέλο με νερό σεισμό τύπου 1 και αγκυρώσεις.



Εικόνα 7-2. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop

Στις εικόνες 7-2 και 7-3 απεικονίζονται οι υπολογιζόμενοι συντελεστές ασφαλείας με τη μέθοδο Bishop στις δύο περιοχές του πρανούς όπου εφαρμόστηκαν οι προτεινόμενες αγκυρώσεις.



Εικόνα 7-3. Εξαγωγή Σ.Α με τη Μέθοδο Bishop

Παρατηρείται ότι, στη περιοχή κοντά στον πόδα του πρανούς (αφορά το επίπεδο του επαρχιακού δρόμου Αγριάς-Δράκειας) (Εικόνα 7-2) οι συντελεστές ασφαλείας που υπολογίστηκαν μέσω του Slide είναι ικανοποιητικοί και έτσι τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης προσδίδουν την απαραίτητη ασφάλεια στο υπό εξέταση πρανές. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι στην κορυφή του πρανούς (Εικόνα 7-3) η τιμή του Σ.Α. είναι αρκετά χαμηλότερη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός των περιορισμένων διαστάσεων του εξεταζόμενου μοντέλου όπου τα αγκύρια δεν μπορούν να αναπτυχθούν πέρα των διαστάσεων του πλέγματος του μοντέλου.

Κεφάλαιο 8 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάστηκε μία περίπτωση κατολίσθησης που συνέβη σε περιοχή του Πηλίου και ειδικότερα στον επαρχιακό δρόμο Αγριάς-Δράκειας, και έγινε παραμετρική διερεύνηση του φαινομένου σχετικά με τη στρωματογραφία της περιοχής, την ύπαρξη ασυνεχειών (ομόρροπων και αντίρροπων με τη κλίση του πρανούς), και την ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, σε στατικές και δυναμικές συνθήκες. Η μηχανική συμπεριφορά των γεωυλικών της εξεταζόμενης περιοχής θεωρήθηκε ελαστοπλαστική και εφαρμόστηκε το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Το ανώτερο στρώμα του πρανούς, το οποίο αποτελείται από δύο στρώσεις (σχιστολιθικά κορήματα και εδαφοποιημένος σχιστόλιθος), έχει πολύ φτωχά μηχανικά χαρακτηριστικά και είναι το στρώμα το οποίο ανάλογα με τις συνθήκες (προσανατολισμός ασυνεχειών, σεισμικά φορτία) κατολισθαίνει, είτε τοπικά (π.χ. μία εντοπισμένη κατολίσθηση μικρού σχετικά μεγέθους ανάντη του επαρχιακού δρόμου Αγριάς-Δράκειας), είτε ενιαία σαν μία μεγάλη κατολισθαίνουσα μάζα, η οποία εκτείνεται από τον επαρχιακό δρόμο Αγριάς-Δράκειας μέχρι την στέψη του πρανούς. Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν στο Phase, είχαν συντελεστή ασφαλείας (<1.2) αρκετά μικρότερο από τον ελάχιστο επιτρεπόμενο, ο οποίος κυμαίνεται από 1,3 έως 1,4. Οι ελάχιστοι συντελεστές ασφαλείας που προέκυψαν από το Slide , είχαν εύρος από 0,7 έως 1 περίπου. Όπως είναι αναμενόμενο η πιθανότητα αστοχίας αυξάνεται με την ύπαρξη ασυνεχειών και ακόμα περισσότερο όταν υπάρχει σεισμική δραστηριότητα. Ο παράγοντας που επηρέασε λιγότερο τους συντελεστές

ασφαλείας, ήταν η ύπαρξη του νερού. Επίσης, μέσω των αναλύσεων ευαισθησίας προέκυψαν η μέση μέγιστη και η μέση ελάχιστη τιμή του συντελεστή ασφαλείας του εξεταζόμενου πρανούς (1.157-0.696). Τέλος, τα μέτρα ενίσχυσης με αγκύρια προσφέρουν μία ικανοποιητική βελτίωση στον συντελεστή ασφαλείας του υπό εξέταση πρανούς. Ως κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα, οι συγγραφείς της εργασίας προτείνουν την εξέταση και άλλων μελετών περιπτώσεων στην περιοχή του Πηλίου με την παρούσα μεθοδολογία και ταξινόμησή τους ανάλογα με το είδος της κατολίσθησης, γεγονός που θα βοηθήσει στην πρόβλεψη και την αντιμετώπιση μελλοντικών κατολισθητικών φαινομένων στην ευρύτερη περιοχή του Πηλίου.

Βιβλιογραφία

- [1] Αντωνίου Α. Α., (2005), «Εφαρμογές τεχνικής γεωλογίας στην επιστήμη του πολιτικού μηχανικού». Πανεπιστημιακές σημειώσεις. Πολυτεχνική σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- [2] Στειακάκης Εμμ., (2010), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- [3] Νομικός Π., (2015) Εισαγωγή στη μηχανική των πετρωμάτων, Αθήνα, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών,
- [4] Κούκης Γ. & Σαμπατακάκης Ν., (2007) «Γεωλογία Τεχνικών Έργων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [5] Μπουκοβάλας Γ., (2006), «Υπολογιστικές μέθοδοι γεωτεχνικής μηχανικής», Σημειώσεις Μαθήματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [6] Αθανάσιος Γ. Καρίνας, (2011), «Μελέτη Πασσαλότοιχου Στη Χ.Θ 4+500 Της Ε.Ο Αγριας – Δρακειας Θέση ‘‘Βαγόني’’», Περιφερειακή Ενότητα Μαγνησίας & Σποράδων. Διεύθυνση Τεχνικών Έργων
- [7] Παπασπύρου Σ., (1985), «Αγκυρώσεις», Αθήνα.
- [8] Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος, (2001) “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός- ΕΑΚ”, Αθήνα.

- [9] Varnes D. J., (1978), Classification of landslides, Springer
- [10] Cruden, D.M. & Varnes, D. J., (1996), “Landslide types and processes”, In: Turner, A.K., & Shuster, R.L., (ed.) Landslides: Investigation and Mitigation, Transp Res Board
- [11] Cruden, D.M., (1978). Discussion of G. Hocking’s paper “A method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges”. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech.
- [12] Popescu, M.E., (2002), “Landslide causal factors and landslide remedial options”, Proc 3rd International Conference on Landslides, slope stability and safety of Infrastructures, Singapore.
- [13] Craig R., (2004), Soil Mechanics, Seventh Edition, Spon Press
- [14] Bowles J. E, (1996), “Foundation Analysis and Design”, 5th Edition, McGraw-Hill
- [15] Naval Facilities Engineering Command, (2012), Foundations and Earth Structures: NAVFAC DM 7.02, vulcanhammer.net
- [16] Rocscience Inc, (2018), Slide και Phase Tutorials.
- [17] Goodman, R.E., & Bray, J. W., (1976), “Toppling of Rock Slopes”, In : Proceedings Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes, American Society of Civil Engineers, Boulder, CO
- [18] WP/WLI (International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory), (1994). A suggested method for describing the causes of a landslide. Bulletin International Association of Engineering Geology, 50: 71-74.

- [19] Turner A. K. & Schuster R. L., (1996), “Landslides: investigation and mitigation”,
Trasn Res Board.
- [20] <https://www.meteoblue.com>
- [21] <https://www.google.gr/maps>
- [22] <https://repository.kallipos.gr>
- [23] Ε. Κολαΐτη, Η. Αλκαλάης, (2006), Μελέτη «Εργασίες γεωτρήσεων στο δρόμο Αγριά –
Δράκεια στη θέση Καστελόβραχο».
- [24] Hoek, E. and Bray, J.W., (1981), «Rock Slope Engineering». Revised 3rd Edition, The
Institution of Mining and Metallurgy, London.
- [25] Χρηστάρας Β. και Μαρίνος Β., (2017), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας /
Κατολισθήσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.