



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΥΕΤΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ
ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΖΑΧΑΡΩΣ - ΡΕΜΑ ΖΑΧΑΡΑΪΪΚΟ



Παναγιωτοπούλου Μαρία

Επιβλέπων: Σακελλαρίου Μιχαήλ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι φυσικές καταστροφές επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη σύγχρονη κοινωνία. Πολλοί χαρακτηρίζουν το φαινόμενο σαν ένα γεγονός στο χώρο και στο χρόνο που απειλεί την κοινωνία ή κάποιο τμήμα της με σοβαρές ακούσιες επιπτώσεις, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της ανεπάρκειας προφυλάξεων που μέχρι τότε θεωρούνταν επαρκείς. Ένα από τα πιο επικίνδυνα γεωλογικά φαινόμενα με ποικίλες επιπτώσεις στο οικονομικό και κοινωνικό σύστημα είναι οι αστοχίες των πρανών. Στον Ελληνικό χώρο, οι κατολισθήσεις ενεργοποιούνται υπό την επίδραση διαφόρων παραγόντων και κυρίως της βροχόπτωσης και της πυρκαγιάς. Παρ' όλη την ανάγκη για σχεδιασμό και λήψη άμεσων μέτρων πρόληψης και αντιμετώπισης κατολισθητικών φαινομένων στη χώρα μας, συχνά κρίνεται ανεπαρκής η αντιμετώπισή τους και ελλειπής η σχετική ερευνητική προσπάθεια.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να συμβάλει στην οποιαδήποτε επιστημονική προσπάθεια για διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πρανών υπό την επίδραση βροχής και φαινομένων πυρκαγιάς. Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας Μιχάλη Σακελλαρίου, ο οποίος με μύησε στον τομέα της εδαφομηχανικής και με βοήθησε με εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές να αντιμετωπίσω ολοκληρωμένα τη μελέτη.

Ιδιαίτερα χρήσιμη ήταν η συμβολή του Επίκουρου Καθηγητή ΕΜΠ Ιωάννη Ναλμπάντη τόσο στην επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων, όσο και στη γενικότερη εκπόνηση της έρευνας. Στο γεωλογικό κομμάτι της εργασίας, οι παρατηρήσεις του Επίκουρου Καθηγητή ΕΜΠ Δημήτριου Ρόζου καθώς και η διάθεση της εργασίας για τη μελέτη του Δήμου Ζαχάρος της ερευνητικής ομάδας 'Α' του ΕΜΠ, συνέβαλαν στην ομαλή διεξαγωγή του θέματος. Χρήσιμη ήταν και η βοήθεια που προσέφεραν η Δρ. Γεωλόγος Μαρία Φερεντίνου και ο υποψήφιος Δρ. Βασίλης Μάτζιαρης, όποτε αυτή τους ζητήθηκε.

Ευχαριστώ την καλή μου φίλη και συνεργάτιδα Άννα Αντωνού, με την οποία εργαζόμασταν παράλληλα για τη διερεύνηση του θέματος και η οποία αποτέλεσε συνοδοιπόρος, σύμβουλος και βοηθός μου καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	xvii
ABSTRACT	xx
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xxiii
1. Βασικοί Ορισμοί.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Έδαφος.....	1
1.3 Δείκτες	3
1.4 Κορεσμένα – ακόρεστα εδάφη, ο μηχανισμός της μύζησης.....	5
1.5 Κατείσδυση (<i>infiltration</i>).....	12
1.6 Διήθηση (<i>seepage</i>).....	16
1.7 Η έννοια της τάσης	20
1.8 Η αντοχή του εδάφους- βασικές παράμετροι	21
2. Πρανή.....	24
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Αστοχία πρανών – Κατολισθήσεις	25
2.3 Γενικά χαρακτηριστικά κατολισθήσεων.....	26
2.4 Υλικό κατολισθήσεων	28
2.5 Παράγοντες που προκαλούν τις κατολισθήσεις.....	29
2.5.2 Πρωτογενείς παράγοντες	29
2.5.3 Δευτερογενείς παράγοντες.....	30
2.6 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων.....	31
2.6.1 Είδος κίνησης – Γεωμετρία.....	32
2.6.2 Στάδιο δράσης.....	34
2.6.3 Ταχύτητα κίνησης.....	34
2.6.4 Ρηχές κατολισθήσεις (Shallow landslides).....	35

2.7	Κατολισθητικά φαινόμενα	36
2.7.1	Εισαγωγικά	36
2.7.2	Το φαινόμενο της κατολίθησης στην Ελλάδα	38
2.8	Μέτρα πρόληψης και αναχαίτισης.....	39
2.9	Ανάλυση ευστάθειας.....	41
2.9.1	Διατμητική αντοχή κορεσμένου και μη κορεσμένου εδάφους.....	41
2.9.2	Ανάλυση ευστάθειας – Συντελεστής ασφαλείας	44
2.9.1	Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για κυκλικές μορφές αστοχίας.....	47
3.	Η διάβρωση ως μηχανισμός ενεργοποίησης των κατολισθήσεων ..	52
3.1	Εισαγωγή.....	52
3.2	Η έννοια της διάβρωσης	52
3.2.1	Κατηγορίες διάβρωσης	53
3.2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση	54
3.2.3	Η βροχόπτωση ως παράγοντας διάβρωσης.....	57
4.	Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένης λεκάνης απορροής	62
5.	Δασικές πυρκαγιές	68
5.1	Εισαγωγή.....	68
5.2	Η επίδραση της φωτιάς στο έδαφος.....	69
5.3	Η διάβρωση ως αποτέλεσμα πυρκαγιάς	74
6.	Υδρολογικά μοντέλα κατολισθήσεων	80
6.1	Εισαγωγή.....	80
6.2	Συνδυαστικό μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρηνών – CHASM (Combined Hydrological and Stability Model)	81
6.2.1	Υδρολογικό μοντέλο.....	82
6.2.2	Ανάλυση ευστάθειας.....	84
6.2.3	Μοντέλο βλάστησης	85

6.2.4	Μετατόπιση της μάζας ολίσθησης.....	87
6.3	Το λογισμικό Phase2 6.0.....	88
6.3.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	88
6.3.2	Phase2 v6.0	91
7.	Περιοχή μελέτης – Δήμος Ζαχάρως	94
7.1	Εισαγωγή.....	94
7.2	Αναγνώριση – Οριοθέτηση περιοχής μελέτης.....	95
7.3	Γεωμορφολογία – Γεωλογική Δομή	97
7.4	Μετεωρολογικά στοιχεία	97
7.4.1	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα	98
7.4.2	Θερμοκρασία αέρα.....	103
7.4.3	Σχετική υγρασία – Άνεμος.....	104
7.4.4	Ηλιοφάνεια.....	105
7.5	Τρωτότητα περιοχής μελέτης.....	105
7.5.1	Η έννοια της τρωτότητας (Vulnerability)	105
7.5.2	Τρωτότητα στην ευρύτερη περιοχή της Ζαχάρως	106
8.	Επιλογή τομών εδάφους προς μελέτη	110
9.	Προσομοίωση πρανών- τομή Β-Β’	114
9.1	Εισαγωγή.....	114
9.2	Εντοπισμός της περιοχής προς μελέτη	115
9.2.1	Εντοπισμός της κρίσιμης περιοχής με τη χρήση του Phase 2 v6.0	115
9.2.2	Έλεγχος σε επιφανειακή ολίσθηση.....	121
9.3	Σχεδιασμός πρανούς στο CHASM	122
9.4	Προσομοίωση πρανούς πριν από το ενδεχόμενο πυρκαγιάς	126
9.4.1	Μελέτη 1 ^{ου} Σεναρίου	126
9.4.2	Μελέτη 2 ^{ου} Σεναρίου	140
9.4.3	Μελέτη 3 ^{ου} Σεναρίου	145
9.5	Προσομοίωση πρανούς μετά από πυρκαγιά	151

9.5.1	Μελέτη 1 ^{ου} Σεναρίου	151
9.5.2	Μελέτη 2 ^{ου} Σεναρίου	158
9.5.3	Μελέτη 3 ^{ου} Σεναρίου	162
9.6	Ανακεφαλαίωση – Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά από την πυρκαγιά 166	
10.	Μελέτη τομής Γ-Γ' με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων.....	172
11.	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων	180
12.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	186

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Τυπικές καμπύλες υδραυλικής αγωγιμότητας – matric μύζησης για έδαφος αργίλου και άμμου.....	6
Διάγραμμα 1.2: Σχέση μεταξύ υγρασίας και ολικής μύζησης.....	9
Διάγραμμα 1.3: Θεωρητική συσχέτιση μεταξύ τριχοειδούς αναρροφήσεως και βαθμού κορεσμού σε ένα μερικώς κορεσμένο υλικό Schneebeli σε τετραγωνική συσκευασία ...	11
Διάγραμμα 1.4: Εμπειρική συσχέτιση μεταξύ τριχοειδούς αναρροφήσεως και σχετικής υγρασίας (Handbook of Tables for Applied Sciences, Bolz & Tuve, 2004).....	11
Διάγραμμα 1.5: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους.....	12
Διάγραμμα 1.6: Διαδικασίες κατεΐσδυσης.....	14
Διάγραμμα 2.1: Περιβάλλουσα Mohr- Coulomb για κορεσμένο έδαφος.....	42
Διάγραμμα 2.2: Επεκτεταμένη περιβάλλουσα για μη κορεσμένα εδάφη.....	44
Διάγραμμα 2.3: Μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του χρόνου	47
Διάγραμμα 3.1: Διαδικασία της διάβρωσης	53
Διάγραμμα 6.1 Παρουσίαση γεωμετρίας και διαδικασίας του CHASM.....	83
Διάγραμμα 6.2: Δομή του μοντέλου του πρανούς.....	84
Διάγραμμα 6.3: Επίδραση της διανομής της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας σε πρανές ύψους 12 m, με κορεσμένη αγωγιμότητα $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$	87
Διάγραμμα 7.1: Καμπύλη μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας.....	105
Διάγραμμα 9.1: Σχέση SRF και μέγιστης ολικής μετακίνησης υλικών- Περιοχή σύγκλισης.....	121
Διάγραμμα 9.2: Θέση κέντρου του κρίσιμου κύκλου.....	125
Διάγραμμα 9.3: Σχέση μεταξύ μεγέθους μύζησης, ύψους μύζησης και μεγέθους πόρων	131
Διάγραμμα 9.4: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	138
Διάγραμμα 9.5: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m	139
Διάγραμμα 9.6: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	140
Διάγραμμα 9.7: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	144

Διάγραμμα 9.8: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m	144
Διάγραμμα 9.9: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	145
Διάγραμμα 9.10: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	150
Διάγραμμα 9.11: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2,5 m	150
Διάγραμμα 9.12: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	151
Διάγραμμα 9.13: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	156
Διάγραμμα 9.14: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m	157
Διάγραμμα 9.15: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	157
Διάγραμμα 9.16: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	160
Διάγραμμα 9.17: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m	161
Διάγραμμα 9.18: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	161
Διάγραμμα 9.19: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m	164
Διάγραμμα 9.20: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2,5 m	165
Διάγραμμα 9.21: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης	165
Διάγραμμα 9.22: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 1 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2	166
Διάγραμμα 9.23: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 2 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2	167
Διάγραμμα 9.24: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 3 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2	168

Διάγραμμα 9.25: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 1 ^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (<i>Περίπτωση 1</i>)	169
Διάγραμμα 9.26: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 2 ^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (<i>Περίπτωση 1</i>)	170
Διάγραμμα 9.27: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 3 ^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (<i>Περίπτωση 1</i>)	170

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Η εκδήλωση του φαινομένου της κατείσδυσης του νερού	15
Εικόνα 1.2: Η ροή του νερού διαμέσου κορεσμένου εδάφους κάτω από υδραυλική κατασκευή- εξέταση στοιχειώδους κομματιού εδάφους	17
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης και διατμητικής αντοχής.....	24
Εικόνα 2.2: Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθητικών φαινομένων (Eurokinissi, 2003). ...	41
Εικόνα 9.1: Γεωμετρία του υπό μελέτη πρηνούς.....	115
Εικόνα 9.2: Αρχικές συνθήκες- Ανάλυση τάσεων	116
Εικόνα 9.3: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους (πλειο- πλειστοκαινικοί σχηματισμοί)	117
Εικόνα 9.4: Καθορισμός παραμέτρων βράχου	118
Εικόνα 9.5: Καθορισμός πλέγματος- mesh.....	118
Εικόνα 9.6: Υπολογισμός- Compute	119
Εικόνα 9.7: Ερμηνεία – Interpret, Μέγιστη Διατμητική Παραμόρφωση	119
Εικόνα 9.8: Ερμηνεία – Interpret, Ολική μεταφορά φερτών υλικών	120
Εικόνα 9.9: Παράθυρο διαλόγου CHASM	122
Εικόνα 9.10: Εισαγωγή δεδομένων για τα κελιά	123
Εικόνα 9.11: Διερεύνηση επιφάνειας ολίσθησης κατά Bishop	124
Εικόνα 9.12: Υδρολογικές παράμετροι πρηνούς.....	126
Εικόνα 9.13: Δεδομένα βροχόπτωσης	127
Εικόνα 9.14: Ιδιότητες εδάφους.....	129
Εικόνα 9.15: Προσδιορισμός της βλάστησης.....	130
Εικόνα 9.16: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 1	131
Εικόνα 9.17: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 2	131
Εικόνα 9.18: Συνοριακές συνθήκες	132
Εικόνα 9.19: Κύκλος ολίσθησης κατά την πρώτη ώρα προσομοίωσης	133
Εικόνα 9.20: Κύκλος ολίσθησης κατά την τελευταία ώρα προσομοίωσης.....	133
Εικόνα 9.21: Υδρολογία κατά την 1 ^η ώρα, 7 ^ο κελί.....	134
Εικόνα 9.22: Υδρολογία κατά την 1 ^η ώρα, 6 ^ο κελί.....	134
Εικόνα 9.23: Υδρολογία κατά τη 12 ^η ώρα, 7 ^ο κελί.....	135

Εικόνα 9.24: Υδρολογία κατά τη 12 ^η ώρα, 6 ^ο κελί.....	135
Εικόνα 9.25: Μετατόπιση μάζας ολίσθησης την 1 ^η ώρα.....	136
Εικόνα 9.26: Μετατόπιση μάζας ολίσθησης τη 12 ^η ώρα.....	136
Εικόνα 9.27: Υδρολογία κατά την 1 ^η και 12 ^η ώρα	142
Εικόνα 9.28: Συνοριακές συνθήκες	146
Εικόνα 9.29: Υδρολογία κατά την 1 ^η και 12 ^η ώρα	149
Εικόνα 9.30: Απενεργοποίηση μοντέλου βλάστησης.....	152
Εικόνα 9.31: Κύκλος ολίσθησης κατά την πρώτη και τελευταία ώρα προσομοίωσης ..	154
Εικόνα 9.32: Υδρολογία την 1 ^η και 12 ^η ώρα της προσομοίωσης.....	154
Εικόνα 10.1: Διαμόρφωση ορίων μοντέλου	174
Εικόνα 10.2: Αρχικές συνθήκες- Ανάλυση τάσεων	175
Εικόνα 10.3: Καθορισμός παραμέτρων στρώματος αποσάθρωσης	176
Εικόνα 10.4: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους.....	176
Εικόνα 10.5: Καθορισμός πλέγματος- mesh.....	177
Εικόνα 10.6: Υπολογισμός- Compute	177
Εικόνα 10.7: Ερμηνεία – Interpret, Μέγιστη Διατμητική Παραμόρφωση	178
Εικόνα 10.8 : Ερμηνεία – interpret, Ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση.....	179

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Κύμανση του συντελεστή υδροπερατότητας (σε cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών.....	5
Πίνακας 2.1: Τύποι ολισθήσεων ανάλογα με το είδος του υλικού και τον τύπο ολίσθησης	33
Πίνακας 2.2: Κλίμακα κατολισθήσεων ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης.....	35
Πίνακας 2.3: Προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας	45
Πίνακας 4.1: Συγκράτηση υγρασίας από διάφορες κατηγορίες εδαφών	64
Πίνακας 5.1: Διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροή μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας από ισχυρή βροχή (Μπαλούτσος)	73
Πίνακας 7.1: Συνοπτική καταγραφή των απωλειών κατά την πυρκαγιά του Αυγούστου	94
Πίνακας 7.2: Μέση μηνιαία βροχόπτωση.....	100
Πίνακας 7.3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα.....	103
Πίνακας 7.4: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία	104
Πίνακας 9.1: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 1 ^ο	129
Πίνακας 9.2: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές.....	132
Πίνακας 9.3: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές.....	137
Πίνακας 9.4: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 1 ^ο	138
Πίνακας 9.5: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 2 ^ο	140
Πίνακας 9.6: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής.....	141
Πίνακας 9.7: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής.....	142
Πίνακας 9.8: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 2 ^ο	143
Πίνακας 9.9: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 3 ^ο	146
Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές.....	147
Πίνακας 9.11: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής.....	148
Πίνακας 9.12: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 3 ^ο	149
Πίνακας 9.13: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής	153
Πίνακας 9.14: Αποτελέσματα για καμένο πρανές	155
Πίνακας 9.15: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 1 ^ο	156

Πίνακας 9.16: Αποτελέσματα για καμένο πρανές	158
Πίνακας 9.17: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής	159
Πίνακας 9.18: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 2 ^ο	160
Πίνακας 9.19: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής	162
Πίνακας 9.20: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής	163
Πίνακας 9.21: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 3 ^ο	163

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Παράδειγμα των στιβάδων (ορίζοντες) του εδάφους και της κύριας σύστασης που χαρακτηρίζει τους διάφορους εδαφικούς ορίζοντες	2
Σχήμα 1.2: Διάγραμμα φάσεων	3
Σχήμα 1.3: Διανομή της υγρασίας, κορεσμένη και μη κορεσμένη ζώνη	7
Σχήμα 1.4: Μέθοδοι για την επίλυση εξισώσεων Laplace στην ανάλυση της διήθησης .	18
Σχήμα 1.5: Δομή εδάφους και μετάδοση δυνάμεων μεταξύ των κόκκων του εδάφους...	20
Σχήμα 1.6: Μηχανισμός μετακίνησης κόκκων και τρόπος παραμόρφωσης εδάφους.....	21
Σχήμα 2.1: Διαφορετικά στάδια μετακίνησης πρηνών.....	26
Σχήμα 2.2: Μέρη μιας τυπικής κατολίσθησης.....	28
Σχήμα 4.1: Υδρολογικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή στο στόμιο μιας δασωμένης λεκάνης απορροής	66
Σχήμα 5.1: Ο υδρολογικός κύκλος	74
Σχήμα 5.2: Παράδειγμα πρηνούς – Συμπεριφορά δασωμένης και μη περιοχής	76
Σχήμα 6.1: Σύγκριση CHASM- Phase.....	92
Σχήμα 7.1: Διακύμανση μέσων μηνιαίων τιμών υετού, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο μετεωρολογικό σταθμό Πύργου.....	98
Σχήμα 7.2: Υετογράμματα για δωδεκάωρα φαινόμενα βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς Πύργο, Μεγαλόπολη και Πόρτες	102
Σχήμα 7.3: Από το έναυσμα στην καταστροφή.....	106
Σχήμα 9.1: Ευστάθεια απείρου μήκους πρηνούς- Στρωματοειδείς κατολισθήσεις.....	121
Σχήμα 10.1: Ευστάθεια απείρου μήκους πρηνούς- Στρωματοειδείς κατολισθήσεις.....	172

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 7.1: Περιοχή μελέτης- Ζαχάρω.....	96
Χάρτης 7.2: Επικινδυνότητα σε ολισθήσεις εδάφους στην Ελλάδα (Κούκης, 2005). Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στη Δυτική Ελλάδα- Νομός Ηλείας- όπως έχει επισημανθεί στο χάρτη.	107
Χάρτης 9.1: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας.....	128

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης του υετού στην ευστάθεια των πρυνών, μετά από φαινόμενα πυρκαγιάς. Μάλιστα, εξετάζεται γι' αυτό το σκοπό, η πληγείσα από τις πυρκαγιές του 2007 περιοχή της Ζαχάρως όπου επελέχθηκαν δύο τομές στην υδρολογική λεκάνη του Ζαχαραιΐκου ποταμού.

Η δράση του κλίματος, οδηγεί στον κατακερματισμό των βράχων και στην παραγωγή χαλαρών υλικών, που καλούνται εδάφη. Οι δυνάμεις που επενεργούν στο έδαφος προκαλούν την παραμόρφωσή του, ενώ αν ξεπεράσουν κάποιο όριο, το οποίο εξαρτάται από το υλικό του εδάφους, προκαλούν την αστοχία του υπό τη μορφή θραύσης ή πολύ μεγάλων παραμορφώσεων. Σε πρώτη φάση, λοιπόν, κρίθηκε αναγκαία η καταγραφή βασικών εννοιών εδαφομηχανικής και υδρολογίας. Ειδικότερα, διακρίνονται τα κορεσμένα και μη κορεσμένα εδάφη και ο μηχανισμός της μύζησης, της αρνητικής δηλαδή πίεσης που συγκρατεί το νερό στο έδαφος. Επιπλέον, αναλύονται οι διαδικασίες της κατείσδυσης και της διήθησης του νερού στο έδαφος ώστε να γίνει αντιληπτή η πορεία του νερού της βροχής. Αναφέρεται ακόμη η έννοια της τάσης καθώς και των βασικών παραμέτρων του εδάφους, της συνοχής και της γωνίας τριβής (Κεφάλαιο 1).

Οι εδαφικές ή βραχώδεις μάζες που βρίσκονται κάτω από το πρυνές, μπορούν να υποστούν διατάραξη της ισορροπίας τους προκαλώντας αστοχίες, ύστερα από ορισμένες εσωτερικές ή εξωτερικές μεταβολές, όπως είναι η βροχόπτωση. Σκόπιμη είναι, λοιπόν, η παρουσίαση των γενικών χαρακτηριστικών και των παραγόντων που προκαλούν τις κατολισθήσεις καθώς και η ανάλυση της ευστάθειας σε συνδυασμό με την έννοια του συντελεστή ασφαλείας (Κεφάλαιο 2).

Στην υποβάθμιση του εδάφους συντελεί και η διάβρωση του, διεργασία που περιλαμβάνει τόσο την απόσπαση εδάφους και θραυσμάτων από πετρώματα, όσο και τη μεταφορά του υλικού αυτού από φυσικούς παράγοντες (νερό, άνεμος, παγετώνες, βαρύτητα) και την απόθεσή του σε νέες θέσεις ως κλαστικό ίζημα. Το κεφάλαιο 3 φανερώνει τη διαβρωτική ικανότητα της βροχής, με το νερό που απορρέει επιφανειακά

να διαβρώνει και να υποσκάπτει τον πόδα των πρανών κατά μήκος ποταμών και χειμάρρων, ενώ αυτό που κατεισδύει να αυξάνει την πίεση των πόρων, προκαλεί εσωτερική διάβρωση.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η συμπεριφορά μιας δασωμένης λεκάνης απορροής, επισημαίνοντας το ρόλο της βλάστησης στην ευστάθεια των πρανών (Κεφάλαιο 4). Από την άλλη το επόμενο εδάφιο- Κεφάλαιο 5- δείχνει την επίδραση της πυρκαγιάς στο έδαφος και το είδος της διάβρωσης που μπορεί αυτή να προκαλέσει.

Τα μοντέλα ευστάθειας χρησιμοποιούνται συχνά στις μέρες μας προκειμένου να γίνει προσομοίωση ολισθήσεων σε πραγματικές ή υποθετικές συνθήκες και τέλος όπου υπάρχει ανάγκη να εξεταστούν μελλοντικά σενάρια σχετικά με αλλαγές στο περιβάλλον. Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιείται αρχικά το CHASM 4.0 (Combined Hydrological and Stability Model) το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο, υπολογίζει τις χωρο-χρονικές μεταβολές της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς. Ακολούθως, παρουσιάζεται το πρόγραμμα Phase2 V6.0 της εταιρίας Rocscience που χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού της επιφάνειας αστοχίας, σε αντίθεση με τις υποθετικές επιφάνειες αστοχίας που υπολογίζει το CHASM.

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στο Δήμο Ζαχάρως, στη λεκάνη του Ζαχαραϊτικού ποταμού (Κεφάλαιο 8). Ανάλογα με τη μεταβολή του βαθμού τρωτότητας πριν και μετά την πυρκαγιά του 2007, επιλέγεται η μελέτη δύο τομών Β-Β' και Γ-Γ'. Η τομή Β- Β' βρίσκεται στο Ζαχαραϊκό ρέμα, σε περιοχή που πριν από τις πυρκαγιές του 2007 θεωρείτο τρωτή στη διάβρωση και με το πέρασ της φωτιάς έγινε ακόμη πιο τρωτή. Από την άλλη, η τομή Γ-Γ' βρίσκεται στο ρέμα Ακίδα, κοντά στον οικισμό της Αρήνης, σε περιοχή που αρχικά δεν ήταν ιδιαίτερα τρωτή, όμως, μετά από τις πυρκαγιές έγινε ιδιαίτερα τρωτή στη διάβρωση.

Το κεφάλαιο 9 περιλαμβάνει την προσομοίωση της τομής B-B'. Σε πρώτη φάση γίνεται εντοπισμός της κρίσιμης επιφάνειας αστοχίας του εν λόγω πρανούς με τη χρήση του προγράμματος Phase καθώς και έλεγχος σε επιφανειακή ολίσθηση. Στη συνέχεια η τομή σχεδιάζεται στο CHASM όπου εκτελείται δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης. Μελετάται εδώ, η επίδραση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα, κατασκευάζοντας τρία σενάρια όπου το ύψος φτάνει στο 75%, 50% και 25% του ύψους του πρανούς. Οι εδαφικές παράμετροι καθορίζονται σε κάθε σενάριο με κριτήριο την ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού. Επιπλέον, διεραυνάται η επίδραση του ύψους μύζησης στη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας, εξετάζοντας δύο περιπτώσεις. Στην *Περίπτωση 1* γίνεται υπόθεση για ύψος μύζησης στα 5 m, ενώ στην *περίπτωση 2* θεωρώντας μια περίοδο σχετικής ανομβρίας, επιλέγεται μικρότερο ύψος στα 2.5 m από την ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα. Στο Κεφάλαιο 10, στο πρόγραμμα Phase μελετάται η ευστάθεια του πρανούς της τομής Γ-Γ', υπό φυσιολογικές συνθήκες, εξετάζοντας το ενδεχόμενο επιφανειακής ολίσθησης .

Τέλος, τα συμπεράσματα της μελέτης που πραγματοποιήθηκε καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα του θέματος, παρουσιάζονται στα κεφάλαια 11 και 12 αντίστοιχα.

ABSTRACT

The object of this research is the investigation of rainfall effect on slope stability followed by wildfire occurrences. Our area of study lies in the municipality of Zaharw, which suffered from a catastrophic wildfire in 2007. In particular, two profiles located in the drainage basin of 'Zaharaiiko' river have been chosen.

The climate activity leads to the bedrock fragmentation and the production of smooth materials called soil. The forces acting on soil result in its deformation. Whereas, if they exceed specific limits, failure occurs in a way of havoc or great deformations. At a primary stage, fundamental conceptions of soil mechanics and hydrology are introduced. Particularly, a distinction between saturated and unsaturated soil is presented, as well as the articulation of the process of suction, which is the negative water pressure of soil. Furthermore, the procedure of infiltration and seepage are analyzed in order to perceive the hydrological circle. There is also a definition of strain and basic soil parameters; cohesion and friction angle (Chapter 1).

The bedrock that lies under the slope, can disrupt the balance causing failure as a result of internal or external changes, such as rainfall. The presentation of general characteristics and main triggers of landslides is useful, as well as the stability analysis and the concept of safety factor – F.S. (Chapter 2).

The erosion contributes to soil degradation and includes removal of soil and transportation of debris through water, wind, gravity etc. Chapter 3 illustrates the erosive ability of rain. The transient water which flows across the surface erodes and corrodes the slope's foot, while infiltrating water can cause an increase in pore pressure and internal erosion.

Additionally, the response of a basin covered by vegetation is presented, so as to indicate the role of vegetation at slope stability (Chapter 4). Conversely, the next chapter remarks the impact of fire on soil and the type of erosion that fire can cause.

In our days, several stability models are frequently utilized in order to simulate slides in real or hypothetical conditions and whenever a need to examine future plans appears. In this Diploma Thesis, CHASM 4 is firstly used. This software calculates the chorochronic changes of the water content in soils and a minimum factor of safety of a slope. Afterwards, Phase 2 v6.0 of Rocscience company is presented, which uses finite elements. This program provides us with the specific slip surface while CHASM calculates hypothetical surfaces.

The area of study lies in the municipality of Zaharw, in the basin of 'Zaxaraiiko' stream (Chapter 8). According to the change of vulnerability rate before and after the wildfire in 2007, two slope profiles are chosen, B-B' and Γ-Γ'. The first one rests along the Zaxaraiiko stream, in a region which had been considered quite vulnerable before the fire, and after that became even more vulnerable. On the other hand, the second profile is located along the 'Akidas' stream, near the dorp of Arini, in a region with low rate of vulnerability before the fire, whereas after that, became highly sensitive to erosion.

Chapter 9 contains the simulation of slope B-B'. At first, the detection of the critical slip failure takes place in Phase environment, as well as possibility of shallow slide. Then, the profile is designed at CHASM and a twelfth hour simulation of rainfall occurs. The effect of the water table's height is also studied by creating three scenarios, where the height can reach 75%, 50% and 25% of the slope's height. The soil parameters are defined for each scenario according to the slope stability towards earthquake. Furthermore, we test the impact of capillary- suction height on factor of safety fluctuation, by introducing two cases. In the first case, we make an assumption about the capillary height at 5 m, while in the second case we assume a dry period and we choose a lower capillary height at 2.5 m above the water table's surface. Chapter 10 analyses Phase examining the stability of profile Γ-Γ' under normal conditions and the potential of swallow landslide.

Finally, chapters 11 and 12 present the results of this Diploma Thesis and the suggestions made for further investigation.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες με όλο και αυξανόμενη συχνότητα η παγκόσμια κοινή γνώμη απασχολείται και παράλληλα ανησυχεί από τις καταστροφές που προκαλούνται από φυσικά φαινόμενα όπως πλημμύρες, κατολισθήσεις, σεισμοί. Στον Ελληνικό χώρο, οι κατολισθητικές κινήσεις αποτελούν ιδιαίτερα σοβαρό καταστροφικό γεωλογικό φαινόμενο, με ποικίλες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζεται στη διερεύνηση της επίδρασης του νετού στην ευστάθεια των πρανών και την ενδεχόμενη εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Ειδικότερα, εξετάζεται σε επεισόδιο βροχόπτωσης, η μεταβολή της τρωτότητας (*vulnerability*) εδαφών που έχουν πληγεί από πυρκαγιές, υπογραμμίζοντας έτσι τη συμβολή της βλάστησης στην ευστάθεια καθώς και τη διατάραξη του υδρολογικού κύκλου.

Στην περίπτωση δασωμένης λεκάνης απορροής, η φυτοκάλυψη του πρανούς συγκρατεί το νερό της βροχής από την κόμη, τη φυλλάδα και το χούμο, ενώ παράλληλα συντελεί στη διήθηση του νερού στο έδαφος και σε ομαλές συνθήκες δημιουργίας επιφανειακής και υπεδάφιας απορροής. Επιπλέον, το έδαφος συγκρατεί την υγρασία και αποφεύγεται η διάβρωση του εδάφους και η περαιτέρω υποβάθμιση του οικοσυστήματος. Η χώρα μας όμως, υποφέρει από μεγάλης έντασης πυρκαγιές- *wildfires*- οι οποίες αλλοιώνουν την οργανική ουσία του εδάφους και οδηγούν στο σχηματισμό ενός λεπτού αδιαπέρατου από το νερό στρώματος, στην επιφάνεια του εδάφους. Οι διεργασίες αυτές έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής απορροής, τη διάβρωση και παράσυρση κορημάτων προς τα κατόντη.

Σκόπιμη κρίθηκε η μελέτη μιας πληγείσας από τις πυρκαγιές περιοχής, για την πληρέστερη αντιμετώπιση του θέματος. Επιλέγεται, λοιπόν, ο Δήμος της Ζαχάρως και συγκεκριμένα η λεκάνη του Ζαχαραϊϊκού ποταμού, ενώ παράλληλα διακρίνονται δύο τομές προς μελέτη, Β-Β' και Γ-Γ'. Κριτήριο της επιλογής των τομών είναι η μεταβολή της τρωτότητας των εδαφών μετά το πέρας της πυρκαγιάς, όπως εκείνη αποτυπώνεται

στους χάρτες αλλαγής τρωτότητας που συνέταξε η ερευνητική ομάδα 'Α' του ΕΜΠ για τις πυρόπληκτες περιοχές.

Η διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών πριν και μετά από την πυρκαγιά πραγματοποιείται στην παρούσα μελέτη με την εφαρμογή δύο μοντέλων ευστάθειας πρανών, CHASM 4 και Phase2 v6.0. Καθώς τα διαθέσιμα στοιχεία για την περιοχή μελέτης είναι περιορισμένα, ακολουθήθηκε παραμετρική αντιμετώπιση του ζητήματος για ποικίλες παραμέτρους- ύψος υδροφόρου ορίζοντα, ύψος μύζησης, συνοχή, γωνία τριβής. Η χρησιμοποίηση των παραπάνω λογισμικών αποσκοπεί κυρίως στον καθορισμό των επιρρεπών προς κατολίσθηση περιοχών για συγκεκριμένες τιμές εδαφικών, υδρογεωολογικών, υδρολογικών και τοπογραφικών παραμέτρων. Διακρίνονται έτσι, οι τιμές αυτών των παραμέτρων για τις οποίες η πιθανότητα για κατολίσθηση ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται. Συνδυάζοντας και αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν κάθε φορά, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την αντοχή των πρανών.

1. Βασικοί Ορισμοί

1.1 Εισαγωγή

Η δράση του κλίματος, δηλαδή του παγετού, της θερμοκρασίας, του ανέμου, της βροχής, αλλά και η δράση της χημικής αποσάθρωσης έχουν ως αποτέλεσμα τον κατακερματισμό των βράχων και την παραγωγή χαλαρών υλικών, τα οποία ονομάζονται εδάφη. Οι δυνάμεις που επενεργούν στο έδαφος προκαλούν την παραμόρφωσή του, ενώ αν ξεπεράσουν κάποιο όριο, το οποίο εξαρτάται από το υλικό του εδάφους, προκαλούν την αστοχία του υπό τη μορφή θραύσης ή πολύ μεγάλων παραμορφώσεων.

1.2 Έδαφος

Τα στρώματα που διακρίνονται σε κάποιο δείγμα εδαφικού υλικού είναι:

- Επιφανειακό έδαφος

Αποτελεί την καλλιεργήσιμη γη, εμπεριέχει οργανικά υλικά και έχει πάχος περί τα 500 mm.

- Υπέδαφος

Είναι το τμήμα του εδάφους που βρίσκεται κάτω από την καλλιεργήσιμη γη και επάνω από το μη διαβρωμένο έδαφος.

- Κρούστα

Σε υγρά κλίματα, το νερό της βροχής δημιουργεί οξείδια, τα οποία παρασύρουν τα οξείδια του σιδήρου και του αργίλου, που υπάρχουν στο χώμα και σχηματίζουν μια σκληρή μάζα σαν κρούστα. Συνήθως βρίσκεται μεταξύ του επιφανειακού εδάφους και του υπεδάφους.

- Έδαφος

Θεωρείται το μαλακό γεωλογικό υλικό το οποίο βρίσκεται μεταξύ υπεδάφους και βράχου. Τα εδάφη αποτελούνται συνήθως από χαλαρά και ασύνδετα μεταξύ τους υλικά. Έδαφος που έχει ένα είδος ισχυρής κόλλας μεταξύ των κόκκων χαρακτηρίζεται ως βράχος.

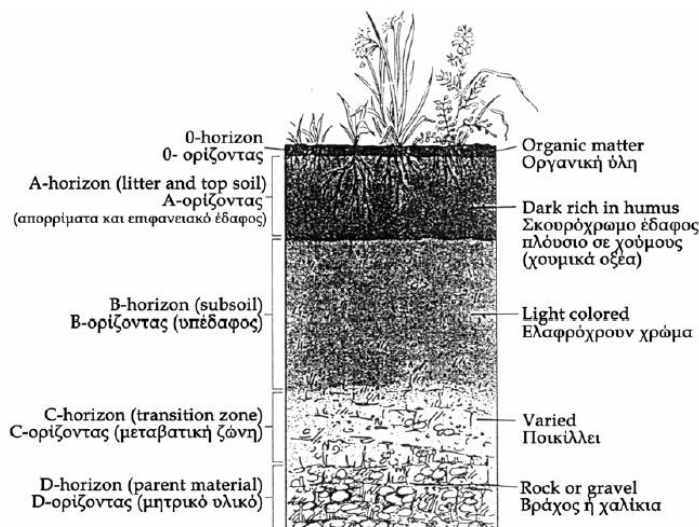
- Υπόγειο νερό

Πρόκειται για δεξαμενή υπόγειου νερού. Η άνω επιφάνεια του υπόγειου νερού ή Στάθμη Υπόγειων Υδάτων (Σ.Υ.Υ.) όπως ονομάζεται, μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε βάθος.

Πιο συγκεκριμένα, το επιφανειακό έδαφος είναι ένα σύμπλοκο μίγμα ανόργανων υλικών, οργανικής ύλης που αποσυντίθεται ή σχηματίζει σύμπλοκα χουμικά οξέα, νερού, αέρα και ζωντανών μικροοργανισμών και διαμορφώνονται σε στιβάδες που καλούνται ορίζοντες (*horizons*), οι οποίοι έχουν διαφορετική υφή και σύσταση. Το σχήμα 1.1 παρουσιάζει ένα παράδειγμα των στιβάδων του εδάφους (Βαλαβανίδης, 2007). Χαρακτηριστικοί ορίζοντες είναι οι ακόλουθοι:

- O-ορίζοντας: ανώτατο στρώμα εδάφους με φυτά, οργανικά υπολείμματα, πεσμένα φύλλα δένδρων και μερικώς αποσυντιθέμενη οργανική ύλη.
- A-ορίζοντας: τα πρώτα 30-50 εκατοστά του μέτρου εδάφους (topsoil) με χουμικά οξέα, μερικά ανόργανα ορυκτά, ζωντανούς οργανισμούς, οργανική ύλη, με τη μεγαλύτερη βιολογική δραστηριότητα από όλες τις άλλες στιβάδες.
- E-ορίζοντας: η ζώνη που διαχωρίζει το επιφανειακό έδαφος από το υπέδαφος. Η διαλυμένη ή αιωρούμενη ύλη κινείται προς τη στιβάδα αυτή και γι' αυτό καλείται η ζώνη αποπλυμάτων (leaching zone).
- B-ορίζοντας: το υπέδαφος είναι ορίζοντας εμπλουτισμού όπου συγκεντρώνονται τα χουμικά οξέα, η άργιλος (πηλός), σίδηρος και αργίλιο μετά το στράγγισμα από τις επάνω ζώνες.
- C-ορίζοντας: ελαφρά διαβρωμένο βραχώδες έδαφος που περιέχει τα ορυκτά συστατικά του κυρίου εδάφους
- R: βραχώδες έδαφος (*bedrock*) που δεν επηρεάζεται από διάβρωση.

Κεφάλαιο 1: Βασικοί Ορισμοί



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα των στιβάδων (ορίζοντες) του εδάφους και της κύριας σύστασης που χαρακτηρίζει τους διάφορους εδαφικούς ορίζοντες (Βαλαβανίδης, 2007)

Η σύσταση των εδαφών είναι αποτέλεσμα του μίγματος των ανόργανων και οργανικών υλικών, του μεγέθους των σωματιδίων, της οργανικής ύλης που ενσωματώθηκε με τη βιοαποικοδόμηση, του αέρα και του νερού που έχει εγκλωβισθεί στο έδαφος. Τα εδάφη συνήθως αποτελούνται από μίγματα αργίλου, λάσπης (ύλης) και άμμου και η υφή τους χαρακτηρίζεται από τα μεγέθη των σωματιδίων των τριών αυτών υλικών. Απαρτίζονται, λοιπόν, από κόκκους, ενώ το μέγεθος των κόκκων διαφοροποιεί τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των εδαφών. Η καταγραφή των κόκκων που συνθέτουν ένα συγκεκριμένο εδαφικό σχηματισμό, ονομάζεται κοκκομετρική ανάλυση και αποτελεί βασική μέθοδο ταξινόμησης των εδαφών.

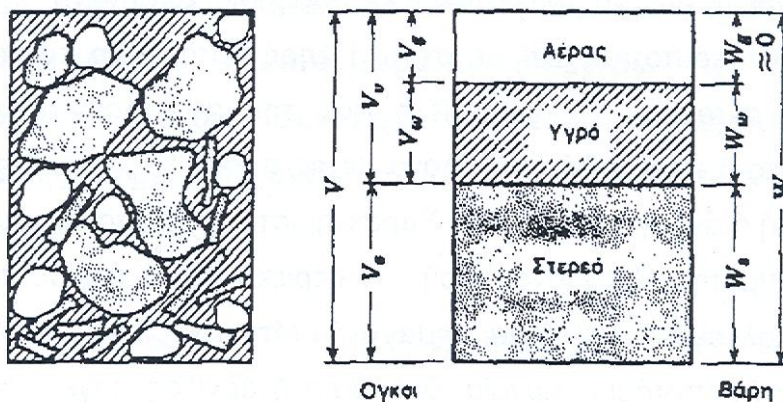
Ένα από τα πλέον παραγωγικά εδάφη είναι το παχύ αμμο-αργιλώδες χώμα (κοπρογή, loam) που αποτελείται από 40% λάσπη, 40% άμμο και 20% άργιλο. Τα κυριότερα στοιχεία στο επιφανειακό έδαφος είναι τα στοιχεία: οξυγόνο (υπό μορφή οξειδίων), πυρίτιο, αργίλιο, σίδηρος, ασβέστιο, νάτριο, κάλιο και μαγνήσιο. Μερικά από τα κλασικά οξείδια του εδάφους είναι: SiO_2 , Fe_3O_4 , MnO_2 , F_2O_3 , και τα ορυκτά KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, CaCO_3 , MgCO_3 .

1.3 Δείκτες

Τα κενά μεταξύ των κόκκων είναι δυνατόν να περιέχουν αέρα ή νερό, και έτσι διακρίνουμε τρεις φάσεις στο έδαφος, τη στερεή, την αέρια και την υγρή. Προκειμένου να συσχετιστούν ποσοτικά οι τρεις φάσεις, εισάγουμε τους ακόλουθους δείκτες:

- Λόγος κενών, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών και συμβολίζεται με e , δηλαδή $e = V_v/V_s$,
- Πορώδες, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο (κενά και στερεά) και συμβολίζεται με το n , δηλαδή $n = V_v/V$,
- Βαθμός κορεσμού, που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του περιεχόμενου νερού προς τον όγκο των κενών και συμβολίζεται με S , δηλαδή $S = V_w/V_v$,
- Περιεχόμενη υγρασία, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του περιεχόμενου νερού προς το βάρος των στερεών συμβολιζόμενη με w , δηλαδή $w = W_w/W_s$.

Από την ιδεατή συγκέντρωση του συνόλου του όγκου των κενών με αέρα, των κενών που περιέχουν νερό και του όγκου που καταλαμβάνεται από τη στερεή φάση, προκύπτει το διάγραμμα φάσεων σε ένα δείγμα του εδάφους (σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2: Διάγραμμα φάσεων

Ακόμη ορίζονται τα ειδικά βάρη:

- Ειδικό βάρος κόκκων $\varepsilon = \frac{W_s}{V_s}$, με τιμές από 26.5 έως 27 kN/m³

- Ξηρό φαινόμενο βάρος $\gamma_{\xi} = \frac{W_s}{V}$, που αναφέρεται σε ξηρό δείγμα εδάφους,
- Υγρό φαινόμενο βάρος $\gamma_v = \frac{W}{V}$, που αναφέρεται σε υγρό δείγμα εδάφους,
- Κορεσμένο φαινόμενο βάρος $\gamma_s = \frac{W}{V}$, για την ειδική περίπτωση κορεσμένου εδάφους,
- Βυθισμένο ή υπό άνωση φαινόμενο βάρος $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$ όπου γ_w το ειδικό βάρος του νερού ίσο προς 9.81 kN/m^3 .

Μεταξύ των παραπάνω δεικτών ισχύουν οι σχέσεις που ακολουθούν:

- $Se = wG_s$, όπου $G_s = \frac{\varepsilon}{\gamma_w}$,
- $\gamma_{\xi} = \frac{\varepsilon}{(1+e)}$,
- $\gamma_v = \gamma_{\xi}(1+w)$,
- $\gamma' = \gamma_{\xi} - \gamma_w \frac{\gamma_w}{(1+e)}$

Ακόμη ορίζεται ο λόγος πίεσης νερού $r_u = \frac{h_w \cdot \gamma_w}{h \cdot \gamma}$, όπου h_w το ύψος του νερού στο

πρανές και h το ύψος του πρανούς. Στην περίπτωση του κορεσμένου πρανούς και μόνο,

όπου ισχύει $h = h_w$, η εξίσωση γίνεται $r_u = \frac{\gamma_w}{\gamma}$ και επειδή συνήθως $\gamma = 2 \cdot \gamma_w$, προκύπτει

ότι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος των πόρων του νερού είναι $r_u = 0.5$ για κορεσμένο πρανές. Επιπλέον ισχύει, $u = h_w \cdot \gamma_w$.

Κατά Bishop και Morgenstern, 1960 ο λόγος πίεσης σε πολλές λωρίδες ορίζεται ως:

$r_u = \frac{u_w}{g \cdot \sum \rho_i h_i}$, όπου h_i το πάχος της λωρίδας του εδάφους, ρ_i η πυκνότητα της κάθε

λωρίδας του εδάφους. Γενικά ο συντελεστής της πίεσης των πόρων του νερού έχει θετική

τιμή, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραστήσει την αρνητική πίεση των πόρων και την πίεση των πόρων του αέρα.

1.4 Κορεσμένα – ακόρεστα εδάφη, ο μηχανισμός της μύζησης (*suction*)

Το νερό συναντάται στο έδαφος ως στερεό, υγρό ή αέριο. Η υγρή μορφή του εδαφικού νερού αποτελεί την εδαφική υγρασία. Μετά από επαρκή βροχή ή άρδευση, το μεγαλύτερο ποσοστό του εδαφικού αέρα εκτοπίζεται από την εδαφική ζώνη, με αποτέλεσμα όλοι οι πόροι να γεμίσουν από νερό. Τότε το έδαφος από άποψη υγρασίας έχει φτάσει στον κορεσμό (*saturation*, θ_s). Ο κορεσμός, λοιπόν, εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να υπάρξει σε μια εδαφική ζώνη. Ο νόμος του Darcy, όπως μελετήθηκε από τον ίδιο τον Darcy, περιγράφει τη ροή σε πορώδη μέσα κορεσμένα με νερό. Ωστόσο, το 1907 ο Buckingham (Selker, 1999) παρατήρησε ότι ο νόμος αυτός μπορεί να επεκταθεί ώστε να περιγράψει τη ροή σε ακόρεστα με νερό πορώδη μέσα.

Ο νόμος του Darcy γράφεται συναρτήσει της ειδικής παροχής:

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{k_f}{\rho_f \cdot g} \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) \quad (1.1)$$

Η ποσότητα k_f καλείται συντελεστής διαπερατότητας του πορώδους μέσου στο συγκεκριμένο ρευστό που το διαρρέει. Σε τυπικά εδάφη ο συντελεστής διαπερατότητας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1: Κύμανση του συντελεστή υδροπερατότητας (σε cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών (Bear, Bulletin of IAEG, 1979)

100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
Καθαρά χαλίκια	Καθαρές άμμοι & αμμοχαλίκια		Πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ιλύες & φυλλώδεις αργιλο-ιλύες.		Μη ρωγματομένες άργιλοι & αργιλοϊλύες (με άργιλο >20%)		Συνεκτικές άργιλοι & χωρίς ρωγμάτωση			
Βραχομάζα πορώδων και σπηλαιωδών βασάλτων ή και σπηλαιωδών ανθρακικών πετρωμάτων		Βραχομάζα ψαμιτιτών και κερματισμένων εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων		Βραχομάζα αργιολίθων, ιλυολιθικών σχιστολίθων		Μαζώδη σχιστολιθικών & γρανιτικών πετρωμάτων				
Σχηματισμοί πολύ υψηλής έως υψηλής υδροπερατότητας				Σχηματισμοί υδροπερατότητας		πτωχής		Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί		

Η κύρια διαφορά μεταξύ της ροής νερού σε κορεσμένα και μη εδάφη είναι ότι η διαπερατότητα θεωρείται σταθερή για κορεσμένα, ενώ για τα ακορεστα ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της υγρασίας ή matric μύζησης (Maosong Huang & Cang-Qin Jia, 2006).

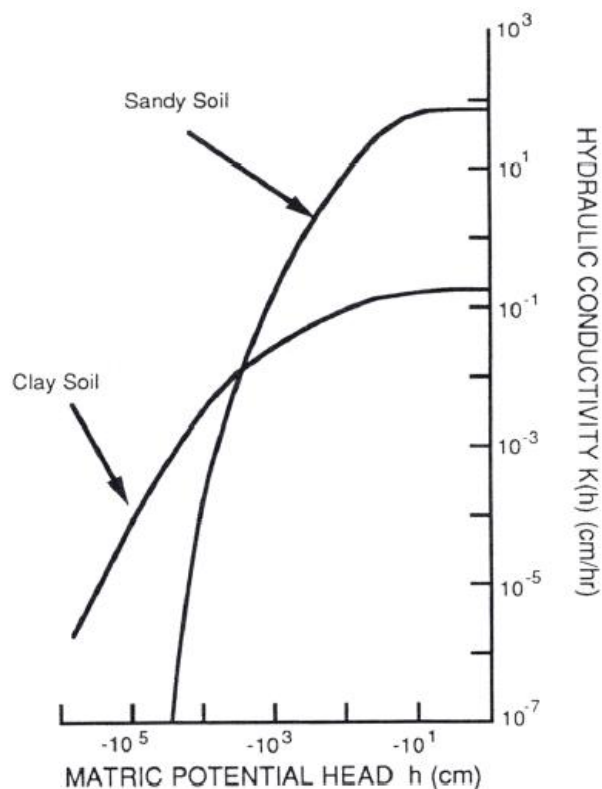
Η ροή, λοιπόν, στην περίπτωση της κορεσμένης ροής:

$$q = -K_{sat} \frac{dH}{dz} = -K_{sat} \frac{d(h+z)}{dz}, \text{ με } K = K_{sat} \quad h > 0 \quad (1.2)$$

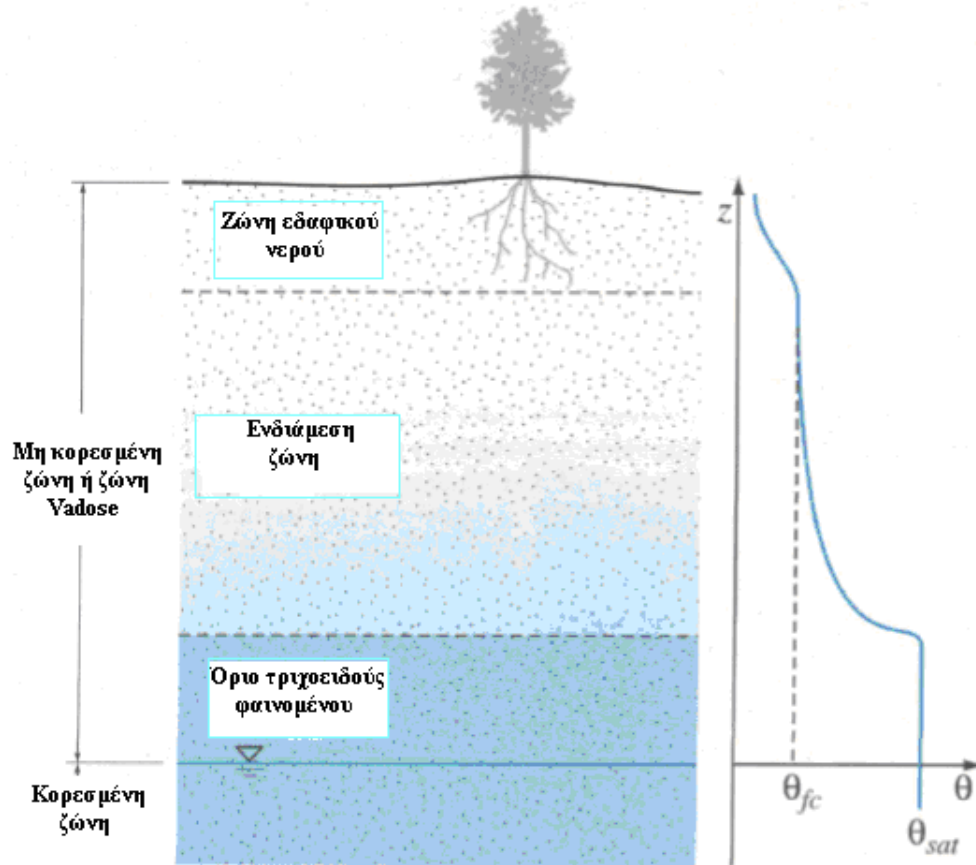
Ενώ σε μη κορεσμένη ροή:

$$q = -K(h) \frac{dH}{dz} = -K(h) \frac{d(h+z)}{dz}, \text{ με } K = K(h), \quad h < 0 \quad (1.3)$$

Το ακόλουθο διάγραμμα 1.1 παρουσιάζει τις τυπικές καμπύλες που φανερώνουν τη σχέση μεταξύ υδραυλικής αγωγιμότητας και matric μύζησης για έδαφος αργίλου και άμμου.



Διάγραμμα 1.1: Τυπικές καμπύλες υδραυλικής αγωγιμότητας – matric μύζησης για έδαφος αργίλου και άμμου (Jury et al., 1991)



Σχήμα 1.3: Διανομή της υγρασίας, κορεσμένη και μη κορεσμένη ζώνη (Hendrickx, 2007)

Στο παραπάνω σχήμα 1.3 παρουσιάζεται η κατανομή της υγρασίας στη μη κορεσμένη ζώνη (Meinzer, 1923). Το νερό κοντά στην επιφάνεια είναι διαθέσιμο για να ληφθεί από τις ρίζες των φυτών (ζώνη εδαφικού νερού- *soil water zone*). Μετά από κάποιες μέρες καλού καιρού, η υγρασία σε αυτή τη ζώνη μειώνεται εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής. Ακριβώς κάτω από τη ζώνη αυτή, η υγρασία τείνει να παραμένει σταθερή σε βάθος ενός μέτρου ή και περισσότερο (ενδιάμεση ζώνη- *intermediate zone*). Αυτή η σταθερή τιμή αναφέρεται ως η ικανότητα του εδάφους. Κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα, οι πόροι του εδάφους λειτουργούν ως τριχοειδείς αγωγοί και παραμένουν κορεσμένοι ακόμα και εάν η πίεση του νερού είναι αρνητική. Αυτή η κορεσμένη ζώνη πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα αποτελεί το όριο του τριχοειδούς φαινομένου (*capillary fringe*).

Το θεωρητικό υπόβαθρο της μύζησης του εδάφους έχει αναπτυχθεί στην εδαφομηχανική από τις αρχές του 1900 ([Buckingham,1907], [Gardner and Widtsoe,1921], [Richards,1928], [Schofield,1935], [Edlefsen and Anderson,1943], [Childs and Collis-George,1948], [Bolt and Miller,1958], [Corey and Kemper, 1961], [Corey et al.,1967]). Καλούμε μύζηση τη διαφορά μεταξύ πίεσης πόρων αέρα και πίεσης πόρων νερού (Popescu, 2002). Η μύζηση συχνά αναφέρεται ως το επίπεδο ελεύθερης ενέργειας του νερού του εδάφους (Edlefsen and Anderson, 1943). Η ελεύθερη ενέργεια μπορεί να μετρηθεί σε όρους της μερικής εξάτμισης πίεσης του εδάφους νερού (Richards,1965). Η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της μύζησης και της μερικής πίεσης των πόρων του νερού μπορεί να γραφεί ως ακόλουθα:

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_{wo}\omega_v} \ln\left(\frac{\overline{u_v}}{u_{v_o}}\right) \quad (1.4)$$

Όπου:

ψ : η εδαφική ή ολική μύζηση [kPa]

R: η παγκόσμια σταθερά αερίων [8.31432 J/ (mol K)]

T: η απόλυτη θερμοκρασία [T= (273.16 + t) (K)]

t: η θερμοκρασία (°C)

ν_{wo} : ειδικός όρος του νερού ή το αντίστροφο της πυκνότητας του νερού [$1/\rho_w$ (m³/kg)]

ρ_w : η πυκνότητα του νερού [998kg/m³ σε t= 20°C]

ω_u : μοριακή μάζα των ατμών του νερού [18.016 kg/kmol]

u_u : η μερική πίεση των ατμών του νερού των πόρων [kPa]

u_{v_o} : η πίεση κορεσμού των ατμών του νερού πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια καθαρού νερού με την ίδια θερμοκρασία [kPa]

Ο όρος $\frac{\overline{u_v}}{u_{v_o}}$ καλείται σχετική υγρασία RH (%) και όταν είναι ίση με 100%, η μύζηση

μηδενίζεται. Η εδαφική μύζηση συχνά καλείται ολική μύζηση και περιλαμβάνει δύο μέρη την *matric* και το οσμωτικό.

$$\Delta\eta\lambda\alpha\delta\acute{\eta}: \psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1.5)$$

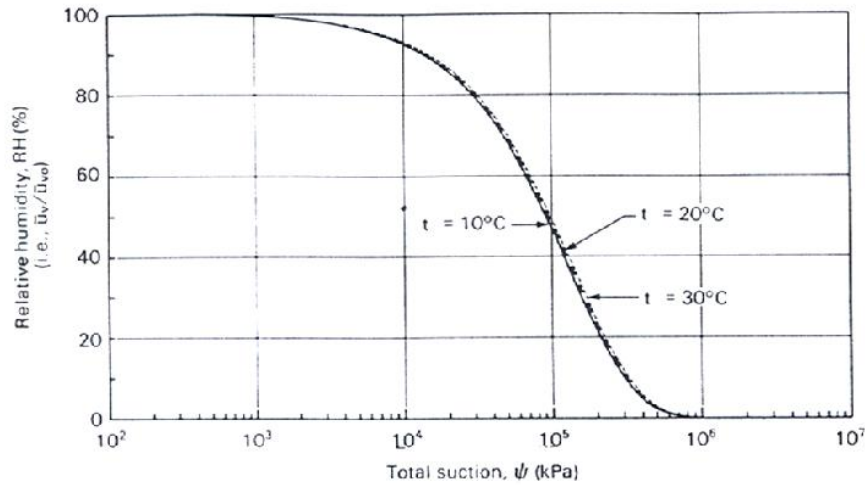
Όπου: $(u_a - u_w)$: η matric μύζηση

u_a : η πίεση πόρων του αέρα

u_w : η πίεση των πόρων του νερού

π : η οσμωτική συνάρτηση

Το διάγραμμα 1.2 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ σχετικής υγρασίας και ολικής μύζησης.



Διάγραμμα 1.2: Σχέση μεταξύ υγρασίας και ολικής μύζησης (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Η δύναμη της βαρύτητας είναι πάντα παρούσα και αποκτά κυρίαρχο ρόλο όταν οι πόροι του εδάφους κορεστούν από νερό. Δεν είναι όμως και η μοναδική δύναμη όταν οι εδαφικοί πόροι είναι μερικώς κορεσμένοι από νερό και αέρα. Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή, στην ακόρεστη ροή, αναπτύσσονται οι δυνάμεις μύζησης (*suction*) στο εδαφικό νερό, που ισοδυναμούν με αρνητική πίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική και έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση του νερού στο έδαφος. Χωρίς την παρουσία τους, τα εδάφη θα στραγγίζονταν υπό την επίδραση της βαρύτητας, ενώ εκείνα πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα θα ήταν άδεια από νερό. Σε χαμηλό βαθμό κορεσμού, οι πιέσεις των πόρων του νερού μπορούν να είναι πολύ αρνητικές, με τιμές μικρές όπως -7000 kPa (Olson & Langfelder, 1965). Σε αυτή την περίπτωση, οι δυνάμεις μεταξύ των κομματιών του εδάφους θεωρείται ότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των μεγάλων αρνητικών πιέσεων στα εδάφη.

Οι κύριες δυνάμεις αυτού του τύπου οφείλονται στους μηχανισμούς προσρόφησης, τριχοειδών και ώσμωσης (Ward & Robinson 1990). Ο μηχανισμός προσρόφησης του νερού στην επιφάνεια των εδαφικών κόκκων δημιουργείται από ηλεκτροστατικές δυνάμεις (λόγω της πολικότητας των μορίων του νερού). Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες της ολικής επιφάνειας των σωματιδίων ανά μονάδα όγκου των εδαφών και γι' αυτό η ποσότητα του υγροσκοπικού νερού αυξάνεται με τη μείωση της διαμέτρου των εδαφικών κόκκων. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, των αμμωδών εδαφών η συνολική ποσότητα υγροσκοπικού νερού είναι μικρή και δε μεταβάλλει σημαντικά τη διάμετρο των τριχοειδών της αέριας φάσης, δηλαδή το πορώδες του εδάφους.

Οι δυνάμεις ωσμωτικής πίεσης εμφανίζονται όταν υπάρχουν διαφορές συγκέντρωσης μιας διαλυμένης ουσίας (διαλυμένα άλατα) εκατέρωθεν μιας ημιπερατής μεμβράνης. Στα εδάφη, το ρόλο των μεμβρανών μπορεί να παίζουν οι ίδιοι οι εδαφικοί πόροι. Όταν επιτρέπουν την κίνηση μέσω αυτού του νερού, αλλά όχι της διαλυμένης ουσίας (Ward & Robinson, 1990).

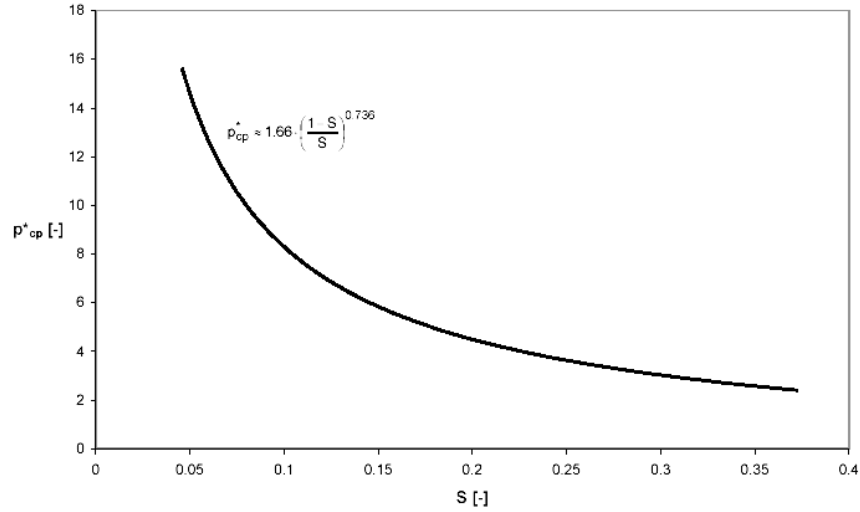
Αναπτύσσεται ακόμα, η παραμετρική σχέση μεταξύ της αδιάστατης τριχοειδούς μύζησης p_{cp} και του κορεσμού S και έτσι προκύπτει μια καταστατική σχέση της μορφής (Βαρδουλάκης, 2003):

$$p_{cp} = f_1(\phi)f_2(S)\frac{T_s}{D_g} \quad (1.6)$$

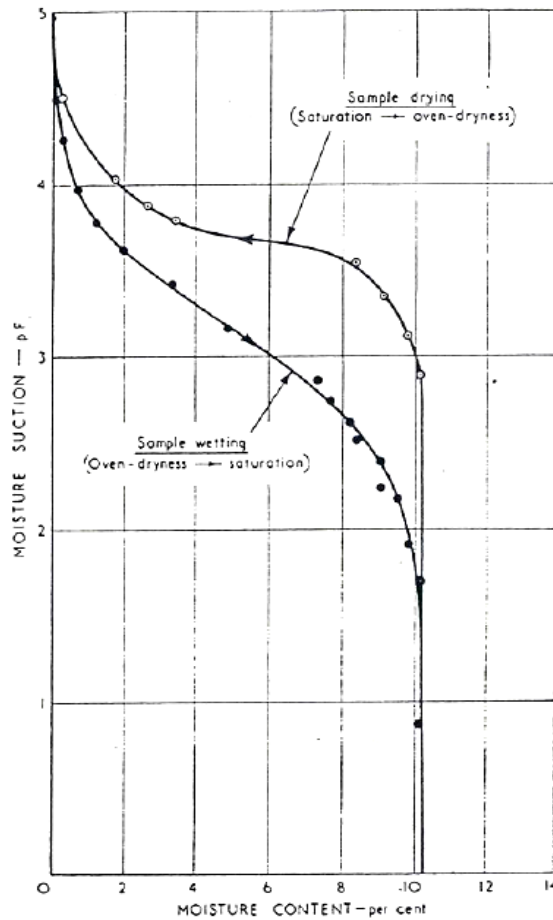
Όπου: D_g η χαρακτηριστική διάσταση των κόκκων του εδάφους, T_s δυνάμεις επιφανειακής τάσεως κατά μήκος των γραμμών επαφής στη διεπιφάνεια μεταξύ νερού και αέρα. Μετρήσεις επιβεβαιώνουν ότι για ένα δεδομένο έδαφος ή πέτρωμα η τριχοειδής μύζηση είναι μία φθίνουσα συνάρτηση του βαθμού κορεσμού (Διάγραμμα 1.3). Ακόμη, εάν θεωρηθεί το υδραυλικό ύψος υποπίεσεως μετρούμενο σε cm στήλης ύδατος:

$$h_{cp} = \frac{p_{cp}}{\rho_w g} \quad (1.7)$$

Κεφάλαιο 1: Βασικοί Ορισμοί

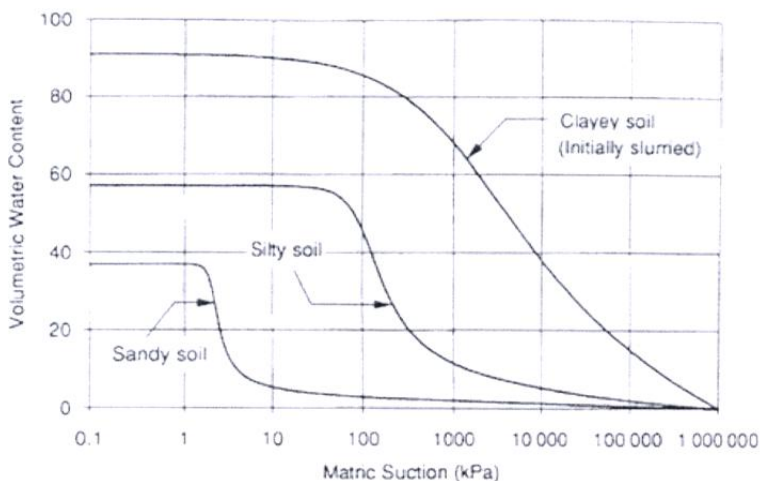


Διάγραμμα 1.3: Θεωρητική συσχέτιση μεταξύ τριχοειδούς αναρροφήσεως και βαθμού κορεσμού σε ένα μερικώς κορεσμένο υλικό Schneebeli σε τετραγωνική συσκευασία (Βαρδουλάκης, 2003)



Διάγραμμα 1.4: Εμπειρική συσχέτιση μεταξύ τριχοειδούς αναρροφήσεως και σχετικής υγρασίας (Handbook of Tables for Applied Engineering Sciences, Bolz, 2004)

Το διάγραμμα που ακολουθεί (Διάγραμμα 1.5) παρουσιάζει τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους - νερού για εδάφη που αποτελούνται από άμμο, άργιλο και ιλύ. Οι καμπύλες αυτές καταδεικνύουν τη σχέση μεταξύ matric μύζησης και περιεχόμενου ποσοστού νερού.



Διάγραμμα 1.5: Τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους (Fredlund, 1994)

1.5 Κατείσδυση (*infiltration*)

Με τον όρο κατείσδυση εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών με τις οποίες το νερό της βροχής διεισδύει στο έδαφος και εν συνεχεία διηθείται προς βαθύτερα στρώματα αναπληρώνοντας έτσι τη φυσική υγρασία ή προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό που προστίθεται στους υδροφόρους καλείται ενεργή κατείσδυση και έχει τη μεγαλύτερη σημασία στην υδρογεωλογία. Ένα ποσοστό του νερού της κατείσδυσης είναι δυνατό να επιστρέψει στην επιφάνεια μιας λεκάνης μέσα από τις πηγές, όταν οι γεωλογικές συνθήκες και η τοπογραφία το επιτρέπουν (Μιγκίρος).

Οι παράγοντες που αφορούν την κατείσδυση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η μια αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά της περιοχής και η άλλη κατηγορία σχετίζεται με τους κλιματικούς παράγοντες που επηρεάζουν την περιοχή, που όπως είναι γνωστό μεταβάλλονται, ανάλογα με την εποχή και το έτος που συμβαίνουν.

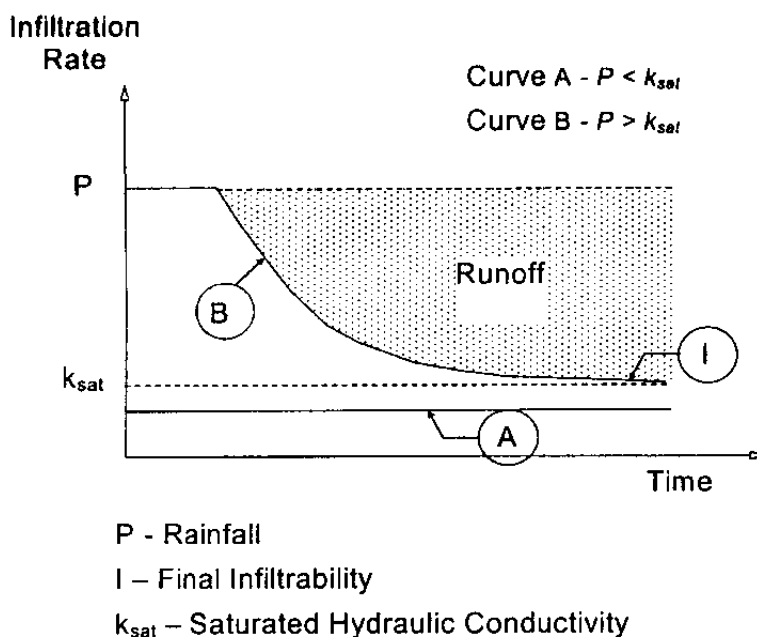
Συγκεκριμένα, ένας από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την κατείδυση είναι η μορφολογική κλίση που παρουσιάζει μια λεκάνη απορροής σε μια περιοχή. Σε πρανές με μεγάλη κλίση, μικρή ποσότητα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων κατείδυουν στο έδαφος αφού ο χρόνος που παραμένουν σε αυτό είναι πολύ μικρός, ενώ η επιφανειακή απορροή συνήθως είναι μεγάλη. Αντίθετα, σε περιοχές με μικρή μορφολογική κλίση, τα ποσοστά κατείδυσης είναι υψηλά. Την κατείδυση επίσης, επηρεάζει και η λιθολογική σύσταση της περιοχής. Τα διαπερατά πετρώματα επιτρέπουν μεγάλα ποσοστά κατείδυσης έναντι των αδιαπέρατων που επιτρέπουν πολύ μικρά ποσοστά. Επιπλέον, η φυτοκάλυψη του πρανούς, βοηθά την κατείδυση. Η ύπαρξη μικρής εντάσεως βροχής και μεγάλης διάρκειας αλλά και γενικά η υγρασία του εδάφους, ευνοούν την κατείδυση. Όσο πιο πολλή υγρασία υπάρχει στο έδαφος, τόσο πιο μικρή ποσότητα νερού χρειάζεται η επιφάνειά του, με αποτέλεσμα την κατείδυση μεγαλύτερης ποσότητας νερού στους υδροφόρους. Τέλος, οι ιδανικές συνθήκες παρουσίας μεγάλων ποσοστών κατείδυσης εμφανίζονται το φθινόπωρο, το χειμώνα και στην αρχή της άνοιξης αφού τότε σημειώνονται οι περισσότερες βροχοπτώσεις μεγάλης χρονικής διάρκειας (Καρυμπάλης, 2004).

Στην αρχή της καταιγίδας, οι εδαφικοί πόροι γεμίζουν με νερό μειώνοντας έτσι τις τριχοειδείς δυνάμεις. Το χώμα υγραίνει, ενώ παράλληλα τα μόρια αργίλου διογκώνονται και μειώνουν το μέγεθος των πόρων. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτή η μείωση της ταχύτητας κατείδυσης στην αρχή της βροχόπτωσης και η σταθεροποίησή της, μετά από αρκετές ώρες βροχόπτωσης.

Η κατείδυση της βροχής έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση του επιπέδου του υδροφόρου ορίζοντα και την αύξηση της πίεσης του νερού ή τη μείωση της matric μύζησης των ακόρεστων εδαφών. Η matric μύζηση βρέθηκε να είναι απόλυτα κρίσιμη για την ευστάθεια των πρανών (Fredlund & Rahardjo, 1993). Η αύξηση στην πίεση του νερού και η μείωση στην matric μύζηση προκαλεί μείωση στη διατμητική αντοχή των εδαφών με συνέπεια αστοχίες στα πρανή.

Το ποσοστό κατείδυσης περιορίζεται από την ικανότητα κατείδυσης (Ortigao & Sayao, 2004). Στην περίπτωση που το ποσοστό του νερού που προσφέρεται στην

επιφάνεια είναι μικρότερο από την ικανότητα του εδάφους να το απορροφήσει, το νερό συνεχίζει να κατείσδύει (καμπύλη A, διάγραμμα 1.6). Όταν, όμως, το ποσοστό αυτό υπερβεί το όριο, κάποια ποσότητα νερού ρέει στην επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας επιφανειακή απορροή. Η καμπύλη B στο διάγραμμα 1.6 δείχνει σε αρχικό στάδιο, ότι το νερό ρέει συνεχώς διαμέσου της επιφάνειας από ένα αρχικά μη κορεσμένο έδαφος μέχρι που η πάνω περιοχή φτάνει σε επίπεδο πλήρους κορεσμού. Μετά από αυτό το στάδιο, η διαπερατότητα του εδάφους τείνει να μειωθεί ασυμπτωτικά σε ένα σταθερό ποσό ίσο με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα. Η μείωση στη διαπερατότητα κατά τη διάρκεια της κατείσδυσης γίνεται εξαιτίας της μείωσης της matric μύζησης. Αυτή η απόκριση όμως, μπορεί να βοηθηθεί και από τη σταδιακή υποβάθμιση της δομής του εδάφους (Hillel 1971).



Διάγραμμα 1.6: Διαδικασίες κατείσδυσης (Gerscovich, 1994)

Τα εδάφη που είναι πιο χονδροειδή, έχουν μεγαλύτερους πόρους και σχισμές σε σχέση με τα λεπτόκοκκα και επιτρέπουν περισσότερη κίνηση νερού. Το μέγεθος των πόρων και σχισμών που βρίσκονται στα εδάφη επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες. Για παράδειγμα, το μέγεθος και ο αριθμός των μακροκαναλιών και μικροκαναλιών στο χώμα

μπορεί να αυξηθεί εξαιτίας κάποιων οργανισμών (π.χ. σκουλήκια) ή και διείσδυσης των ριζών. Η εικόνα 1.1 παρουσιάζει παραδείγματα εκδήλωσης κατείσδυσης.

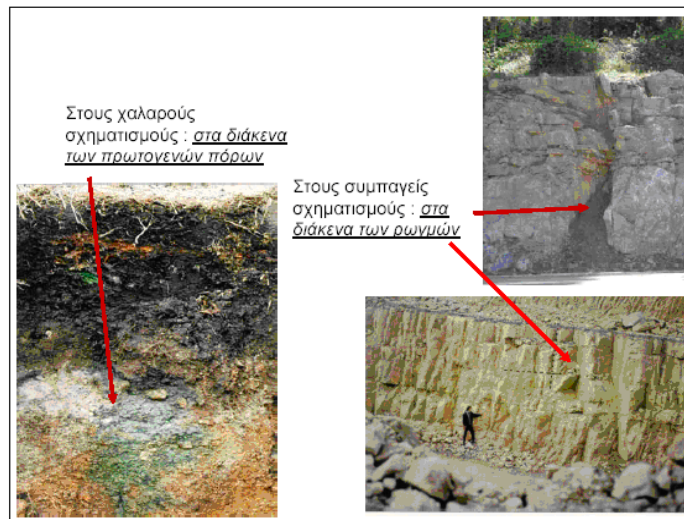
Το φαινόμενο της κατείσδυσης αφορά ακόρεστη ροή και περιγράφεται από την εξίσωση Richards (1.8) με γραμμική λύση του Inverson (1.9). Η επίλυση αυτή περιλαμβάνει σταθερές και προσωρινές συνιστώσες. Η σταθερή συνιστώσα επιτρέπει τη ροή σε αυθαίρετη κατεύθυνση που καθορίζεται από την τιμή της κατείσδυσης και τη γωνία του πρανούς. Η προσωρινή συνιστώσα υποθέτει μια ροή κατακόρυφη, προς τα κάτω σε μία διάσταση.

Η εξίσωση Richards:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin a \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_L(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos a \right) \right] \quad (1.8)$$

Η γραμμική λύση του Inverson:

$$\phi(Z, t) = [Z - d]\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_Z} \left[H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{1/2}} \right] \right] - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_Z} \left[H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{1/2}} \right] \right] \quad (1.9)$$



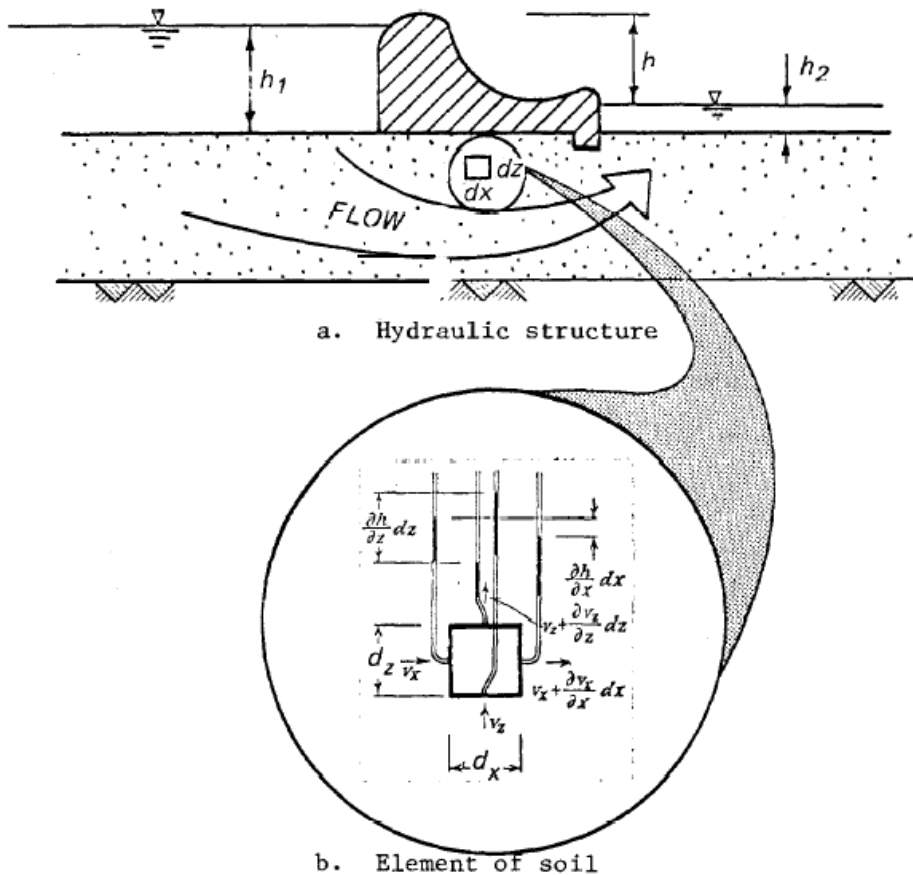
Εικόνα 1.1: Η εκδήλωση του φαινομένου της κατείσδυσης του νερού (Μιγκίρος)

1.6 Διήθηση (*seepage*)

Η διήθηση αποτελεί τη φυσική διεργασία της εισχώρησης στο έδαφος νερού που διέρχεται από βροχόπτωση, τήξη χιονιού ή άρδευση (Rawls et al. 1993). Η διεργασία αυτή συνδέεται με την κίνηση νερού στο έδαφος (από ένα σημείο σε ένα άλλο) με τέτοιο τρόπο ώστε ο ρυθμός διήθησης να εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα νερού για διήθηση, όσο και από τις ιδιότητες του εδάφους ως προς τη δυνατότητα κίνησης του νερού σε αυτό. Η διήθηση και η κίνηση του νερού στο έδαφος παίζουν σημαντικό υδρολογικό ρόλο και επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή, την εξατμισοδιαπνοή (άρα και στο βιολογικό κύκλο των φυτών), την επαναφόρτιση των υδροφορέων, αλλά και τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών στο έδαφος.

Ποσοτικά ο ρυθμός διήθησης είναι προφανώς μεταβλητός, όχι μόνο χωρικά, αλλά και χρονικά. Εξαρτάται από παράγοντες που εκτιμώνται δύσκολα όπως, ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων, φυσικές ιδιότητες του εδάφους, κατάσταση του επιφανειακού καλύμματος και απουσία ή όχι γλωρίδας, περιεκτικότητα σε υγρασία του επιφανειακού εδάφους στην αρχή της βροχής, θερμοκρασία, ποιότητα του βρόχινου νερού.

Το φαινόμενο της διήθησης έχει διερευνηθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Συνήθως για τη μελέτη του φαινομένου θεωρείται ότι το έδαφος είναι ομοιόμορφο (ή στην καλύτερη περίπτωση ότι το έδαφος αποτελείται από ομοιόμορφες στρώσεις). Είναι ευρύτατα γνωστό ότι η ικανότητα του εδάφους στη διήθηση ή διηθητικότητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και τείνει να πλησιάζει μια σταθερή τιμή, την τελική διηθητικότητα. Η διήθηση, σε αντίθεση με την κατείσδυση, αφορά κορεσμένα εδάφη και περιγράφεται με τη βοήθεια των εξισώσεων Laplace.



Εικόνα 1.2: Η ροή του νερού διαμέσου κορεσμένου εδάφους κάτω από υδραυλική κατασκευή- εξέταση στοιχειώδους κομματιού εδάφους (John Wiley & Sons)

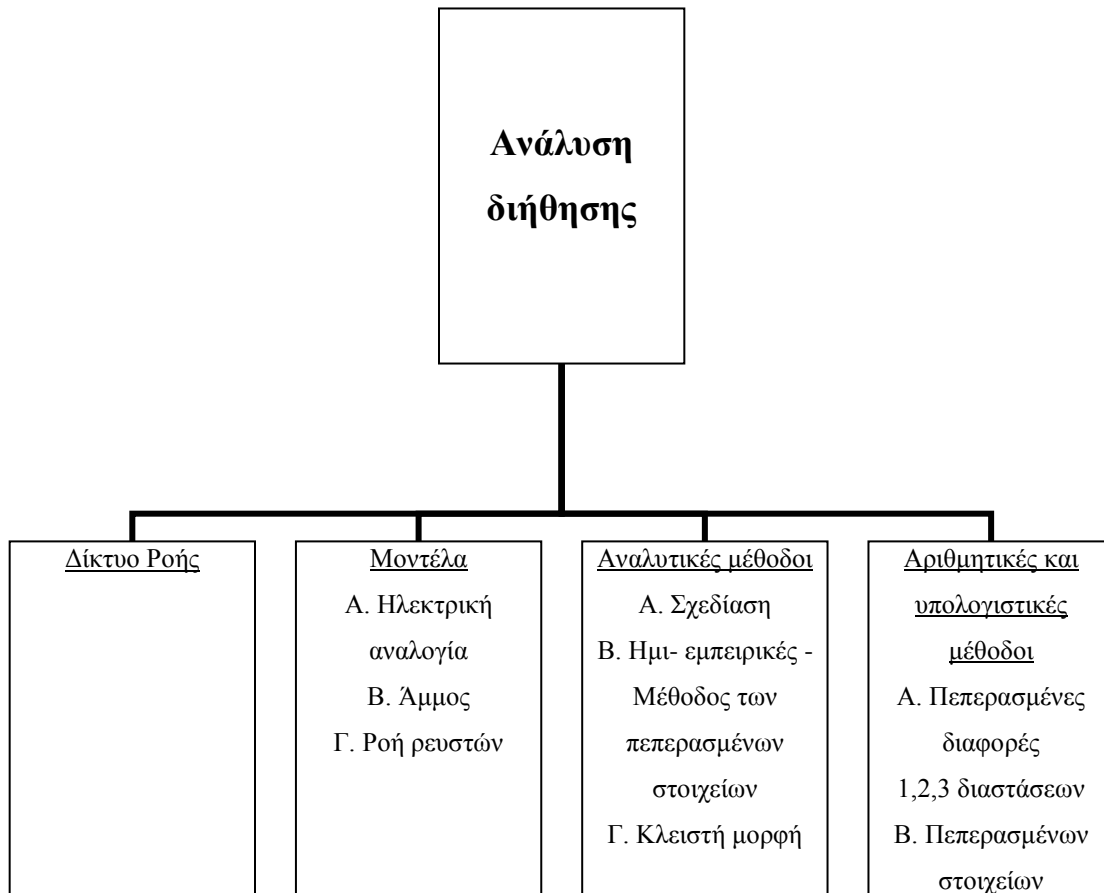
Η εικόνα 1.2 δείχνει μια γενική συνθήκη διήθησης, όπου έχει επιλεγεί ένα στοιχειώδες κομμάτι εδάφους. Η ανάπτυξη της εξίσωσης βασίζεται σε 6 παραδοχές:

1. Τα ύψη h_1 , h_2 είναι σταθερά και έτσι η ροή είναι σταθερή
2. Το νερό είναι ασυμπίεστο
3. Το δυναμικό δεν αλλάζει- το έδαφος είναι ασυμπίεστο
4. Η ροή ακολουθεί τον νόμο του Darcy
5. Το στοιχειώδες αυτό κομμάτι έχει διάσταση dy στο σχέδιο της εικόνας, το οποίο δίνει ένα δυναμικό, αλλά καμία ροή δε λαμβάνει χώρα κάθετα στο σχέδιο της εικόνας. Π.χ. η ροή είναι διδιάστατη
6. Το κορεσμένο διαπερατό έδαφος είναι ομογενές.

Για διδιάστατη ροή σε ομογενές, ισοτροπικό, πορώδες μέσο η εξίσωση Laplace σχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.10)$$

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4 υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επίλυση των εξισώσεων Laplace.



Σχήμα 1.4: Μέθοδοι για την επίλυση εξισώσεων Laplace στην ανάλυση της διήθησης

Μετά την έναρξη μιας βροχής μετά από μακρά περίοδο ξηρασίας, τα εδάφη δέχονται το νερό κατά την ακόλουθη φαινομενολογική σειρά: Αρχικά πραγματοποιείται η υγροσκοπική διαβροχή υπό την επίδραση των δυνάμεων προσρόφησης. Μετά την κάλυψη των αναγκών σε υγροσκοπικό νερό, το διηθούμενο νερό κινείται υπό την επίδραση δύο κυρίως πεδίων δυνάμεων, της βαρύτητας και των τριχοειδών, τα οποία στη

φάση αυτή δρουν προσθετικά: Το νερό κατέρχεται στο έδαφος λόγω του βάρους του και ταυτόχρονα αναρροφάται από τις ελκτικές τάσεις που αναπτύσσει το τριχοειδές της αέριας φάσης. Αυτή η διπλή επίδραση, οδηγεί σε υψηλή αρχική τιμή του ρυθμού διήθησης, η οποία με την πάροδο του χρόνου μειώνεται, αφού το πεδίο των τριχοειδών, από προσθετικό στην αρχή της βροχής, μηδενίζεται με τον κορεσμό του εδάφους.

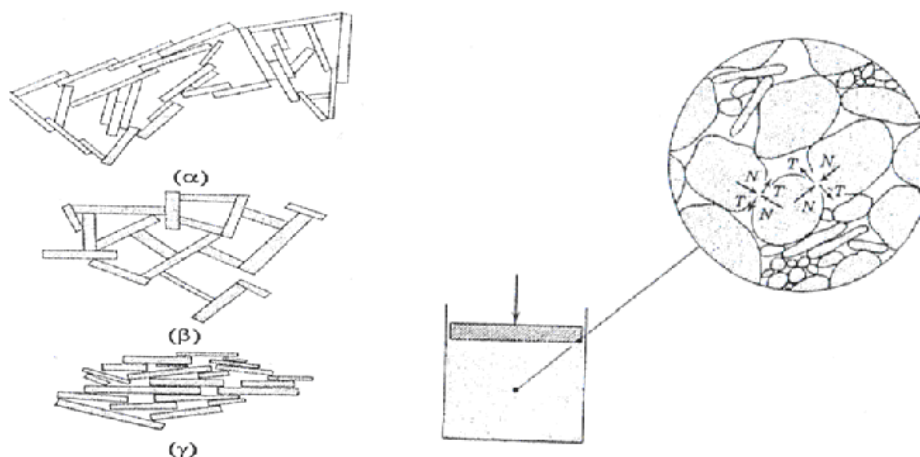
Στην περίπτωση που η ένταση της βροχής είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να υπερβαίνει τη διηθητική ικανότητα του εδάφους, μετά την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος τέτοιου ώστε να κατακλυστεί με νερό η επιφάνεια του εδάφους, ένα λεπτό στρώμα εδάφους της τάξης του 1 cm κοντά στην επιφάνεια γίνεται κορεσμένο (ζώνη κορεσμού), ενώ σε μια ζώνη κάτω από αυτό, η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται έντονα (μεταβατική ζώνη). Μια άλλη κατώτερη ζώνη (ζώνη μεταφοράς) χαρακτηρίζεται από σταθερή περιεκτικότητα σε νερό ενώ ακόμη πιο κάτω υπάρχει η τελευταία ζώνη (ζώνη διαβροχής) που καταλήγει στο λεγόμενο μέτωπο διαβροχής (Ward & Robinson, 1990). Το μέτωπο διαβροχής προχωρεί διεισδύοντας όλο και πιο βαθιά με την πάροδο του χρόνου, μέχρι, μετά από ορισμένο βάθος, να συναντήσει είτε ένα αδιαπέρατο στρώμα, είτε ένα υπόγειο υδροφόρο στρώμα, με δεδομένες συνθήκες παροχетеυτικότητας. Αν η ένταση της βροχής είναι μικρότερη από τη διηθητική ικανότητα του εδάφους, τότε σε κανένα σημείο δε δημιουργούνται συνθήκες κορεσμού, αλλά και πάλι σχηματίζεται το χαρακτηριστικό μέτωπο διαβροχής που προχωρεί προς τα κάτω.

Μετά το τέλος της βροχόπτωσης, η διήθηση στην επιφάνεια του εδάφους σταματά, και η κίνηση του νερού, που οδηγείται από τη βαρύτητα, επιβραδύνεται. Εξ' άλλου, ένα τμήμα της εδαφικής υγρασίας του ανώτερου εδαφικού στρώματος εξατμίζεται ή διαπνέεται μέσω των φυτών, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα την αντιστροφή του προφίλ της περιεκτικότητας σε νερό του εδάφους, με μικρότερες τιμές προς τα πάνω και μεγαλύτερες προς τα κάτω. Κατά συνέπεια, οι δυνάμεις τριχοειδών αλλάζουν φορά και κατευθύνονται προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα μια ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης του νερού και πάνω από αυτή μια ζώνη υγροσκοπικής διαβροχής. Η συνεχής μείωση της σχετικής υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργεί μια συνεχή ανοδική μεταφορά νερού από τη ζώνη τριχοειδούς

ανύψωσης προς την υγροσκοπική ζώνη για να αποκαθίσταται η υγροσκοπική ισορροπία. Με αυτό το μηχανισμό, το υδροφόρο στρώμα καλύπτει εν μέρει τις απώλειες εξάτμισης στην επιφάνεια του εδάφους. Η τριχοειδής ανύψωση νερού μπορεί να φτάσει σε μικρά μόνο ύψη πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους.

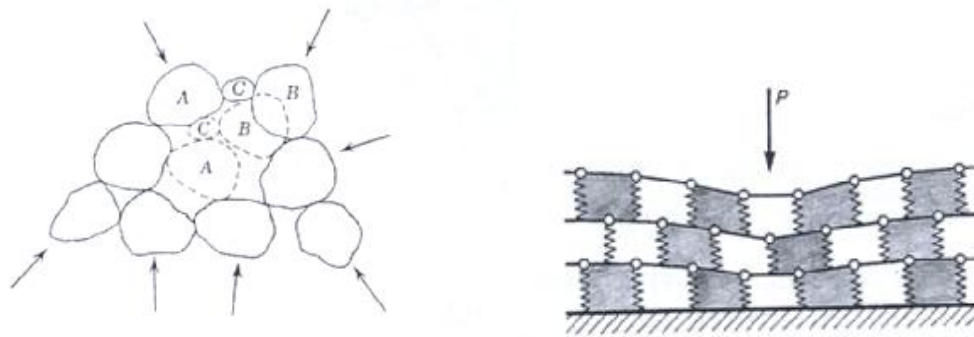
1.7 Η έννοια της τάσης

Οι σχετικές κινήσεις των κόκκων προκαλούν την παραμόρφωση ή την αστοχία όπως ονομάζεται η καταστροφή του σκελετού του εδάφους. Το σχήμα 1.5 παρουσιάζει τους διάφορους τρόπους διάταξης (δομής) των σωματιδίων λεπτόκοκκου εδάφους και τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται δυνάμεις μεταξύ των κόκκων του εδάφους.



Σχήμα 1.5: Δομή εδάφους και μετάδοση δυνάμεων μεταξύ των κόκκων του εδάφους (Σακελλαρίου, 2003)

Στο σχήμα 1.6 παρατηρούμε τον τρόπο με τον οποίο επέρχεται η καταστροφή της δομής του εδάφους, καθώς οι κόκκοι A, B, C μετακινούνται σε άλλη θέση. Κατά την επέκταση αυτής της μετακίνησης στη μάζα του εδάφους, εκδηλώνεται η αστοχία του εδάφους. Οι δυνάμεις που προέρχονται από μια κατασκευή ονομάζονται φορτία. Συνήθως χρησιμοποιείται το μέγεθος της τάσης που εκφράζει τη διανομή ενός φορτίου σε μια επιφάνεια, και έτσι ορίζεται ως ο λόγος του φορτίου προς την επιφάνεια στην οποία ενεργεί. Ο τρόπος με τον οποίο παραμορφώνεται το έδαφος όταν δέχεται κάποιο φορτίο P παρουσιάζεται στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6: Μηχανισμός μετακίνησης κόκκων και τρόπος παραμόρφωσης εδάφους (Σακελλαρίου, 2003)

1.8 Η αντοχή του εδάφους- βασικές παράμετροι

Η αντοχή του εδάφους, δηλαδή η μέγιστη πίεση (τάση) που μπορεί να δεχτεί το έδαφος καθορίζονται από δύο βασικές παραμέτρους, τη γωνία τριβής ϕ και τη συνοχή c .

- Γωνία τριβής ϕ

Η έννοια της γωνίας τριβής μπορεί να προσδιοριστεί, πραγματοποιώντας ένα απλό πείραμα. Συγκεκριμένα, αποθέτουμε μια ποσότητα άμμου με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί μια πλαγιά, ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η μέγιστη γωνία τριβής αυτού του επιπέδου είναι ίση με τη γωνία τριβής. Αν δοκιμάσουμε να σχηματίσουμε κεκλιμένο επίπεδο με μεγαλύτερη κλίση, τότε η άμμος θα αρχίσει να ολισθαίνει προς τα κάτω μέχρι να μειωθεί η κλίση της και να γίνει ίση με τη γωνία τριβής. Οι κάθετες στην επιφάνεια των κόκκων δυνάμεις, προκαλούν την ανάπτυξη δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής κόκκου με κόκκο, οι οποίες εμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση των κόκκων. Αν το έδαφος δεχτεί φορτία που υπερβαίνουν την αντίσταση που παρέχουν οι δυνάμεις τριβής, τότε εκδηλώνεται ολίσθηση, δηλαδή αστοχία. Η γωνία τριβής αποτελεί την παράμετρο εκείνη που καθορίζει την αντοχή των μη συνεκτικών εδαφών, όπως η άμμος και τα χαλίκια.

- Συνοχή c

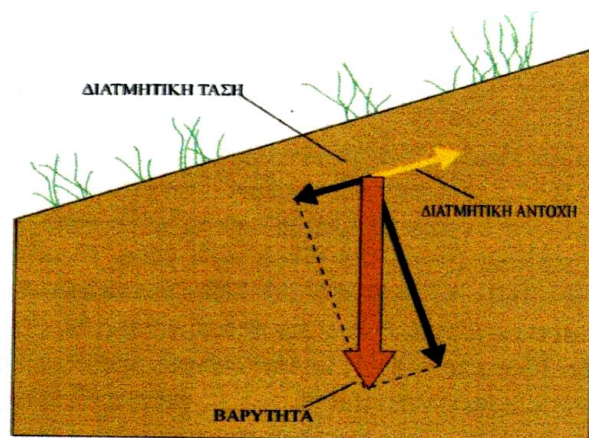
Το φυσικό νόημα της συνοχής γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας ότι μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις που συγκρατούν μεταξύ τους, τους κόκκους, όπως συμβαίνει με τη δράση της κόλλας. Έδαφος που διαθέτει συνοχή, όπως η άργιλος, μπορεί να σκαφτεί με κατακόρυφα ορύγματα αλλά και να διατηρήσει το σχήμα του. Αντίθετα, έδαφος μη συνεκτικό, όπως η άμμος, δε μπορεί να διατηρήσει το σχήμα του.

Ο προσδιορισμός της γωνίας τριβής και της συνοχής εδάφους, μπορεί να γίνει με δοκιμές επί τόπου, αλλά και στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας τριαξονική συσκευή (Σακελλαρίου, 2003).

2. Πρανή

2.1 Εισαγωγή

Τα πρανή ορίζονται ως οι 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 τη σειρά τους διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό τους που τείνουν να μετακινήσουν τη μάζα τους ούτως ώστε να εξομαλύνουν το έδαφος. Στις τάσεις αυτές αντιτίθεται η διατμητική αντοχή του εδάφους και στην περίπτωση που αυτές την υπερβούν, τότε οδηγούν σε θραύση του πρανού και κατολίσθηση (εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ διατμητικής τάσης και αντοχής.

Ένα φυσικό πρανές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, γεωτεκτονικών ή φυσικών παραγόντων. Φαινόμενα όπως η διάβρωση, ο παγετός, η μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα και οι σεισμοί μπορούν να προκαλέσουν την αστοχία, δηλαδή την κατάρρευση κυρίως εδαφικής μάζας ενός φυσικού πρανού. Αστοχία μπορεί να προκληθεί και λόγω επέμβασης του ανθρώπου στη φύση με την κατασκευή τεχνικών έργων (εκσκαφές ορυγμάτων, υποσκαφές, επιφορτίσεις κ.ά.).

Τα τεχνητά πρανή διαμορφώνονται κατά την κατασκευή διάφορων τεχνικών έργων και προκύπτουν από την εκσκαφή του φυσικού εδάφους ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού.

2.2 Αστοχία πρανών – Κατολισθήσεις

Όπως αναφέρθηκε, εδαφικές ή βραχώδεις μάζες που βρίσκονται πίσω από κεκλιμένη επιφάνεια (πρανές), μπορούν να υποστούν διατάραξη της ισορροπίας τους, ύστερα από ορισμένες εσωτερικές ή εξωτερικές μεταβολές. Εξετάζοντας από κινηματική άποψη το σύνολο των μεταβολών αυτών, διακρίνουμε δύο συνιστώσες κίνησης, μια οριζόντια και μια κατακόρυφη. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο κατακόρυφη μετακίνηση προς τα κάτω, το φαινόμενο καλείται *καθίζηση* ή *κατάρρευση*. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου εκτός από την κατακόρυφη προς τα κάτω συνιστώσα, υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα κίνησης, το φαινόμενο καλείται κατολίσθηση με την ευρύτερη έννοια του όρου.

Οι παραπάνω δύο βασικές συνιστώσες κίνησης, συνδέονται δυναμικά με την ανάπτυξη ορθής ή διατμητικής τάσης. Έτσι, εάν δρα ορθή τάση σε οριζόντιο επίπεδο, σε περίπτωση μετακίνησης της μάζας υπάρχει κατακόρυφη κίνηση, δηλαδή καθίζηση. Αν συνυπάρχει και διατμητική τάση, η οποία μάλιστα υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους ή ασυνέχεια βραχομάζας, θα υπάρχει και οριζόντια συνιστώσα στην κίνηση, δηλαδή κατολίσθηση.

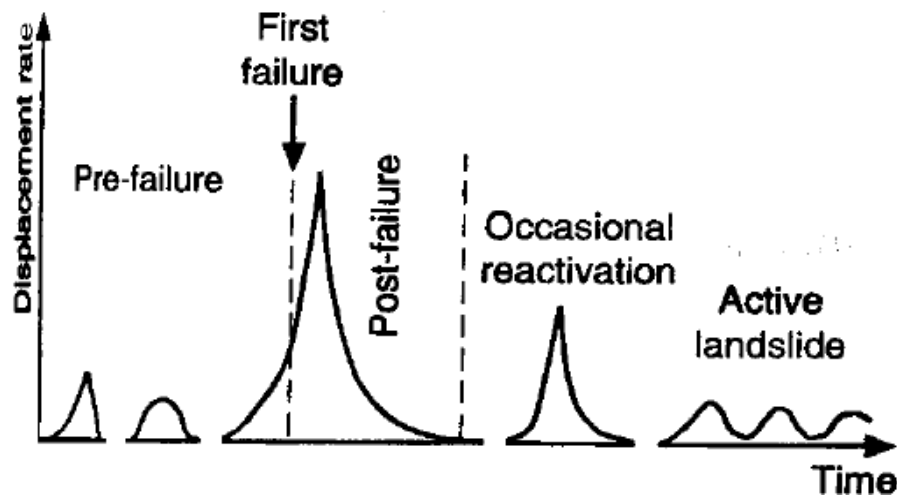
Έχει επικρατήσει μεταξύ των γεωλόγων και των μηχανικών η χρήση του όρου κατολίσθηση για την περιγραφή του φαινομένου που συνίσταται στην προς τα κάτω κίνηση τμήματος βραχομάζας ή αποσαθρωμάτων κατά μήκος μιας εδαφικής επιφάνειας πρανούς. Ο Schuster το 1978 περιόρισε τον όρο στην ομάδα εκείνη των μετακινήσεων πρανών όπου λαμβάνει χώρα διατμητική θραύση κατά μήκος μιας καθορισμένης επιφάνειας ή κατά μήκος πολλών επιφανειών.

Κατά τον Κουμαντάκη (Κεφάλαια τεχνικής γεωλογίας, 1984), οι οποιοσδήποτε μετακινήσεις εδαφικών μαζών και πετρωμάτων ασχέτως τη μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτιών, που λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις

και σε πρανή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα και με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα, φέρονται με το γενικό όρο κατολισθήσεις.

2.3 Γενικά χαρακτηριστικά κατολισθήσεων

Παρά τη μεγάλη ποικιλία αιτιών που προκαλούν τις κατολισθήσεις σε κάθε μια περίπτωση, αυτές εμφανίζουν σχεδόν πάντοτε τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, πριν από την αστοχία λαμβάνουν χώρα παραμορφώσεις σχετιζόμενες με μεταβολές των τάσεων, βισκώδεις μετατοπίσεις και τροπές και μετατοπίσεις που σχετίζονται με σταδιακή αστοχία, ενώ στην έναρξη της αστοχίας σχηματίζεται συνεχής διατμητική επιφάνεια που διασχίζει όλη την εδαφοβραχομάζα ή διαχωρίζεται μια ασταθής μάζα πετρώματος από το πρανές. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το ποσοστό μετακίνησης των κορημάτων σε κάθε στάδιο αστοχίας. Το στάδιο μετά την αστοχία (post-failure) περιλαμβάνει μετακίνηση της εδαφοβραχομάζας που υπεισέρχεται στην κατολίσθηση μέχρι να σταματήσει ενώ κατά το στάδιο επανεργοποίησης (reactivation), η εδαφοβραχομάζα ολισθαίνει επί μιας ή πολλών διατμητικών επιφανειών.



Σχήμα 2.1: Διαφορετικά στάδια μετακίνησης πρανών

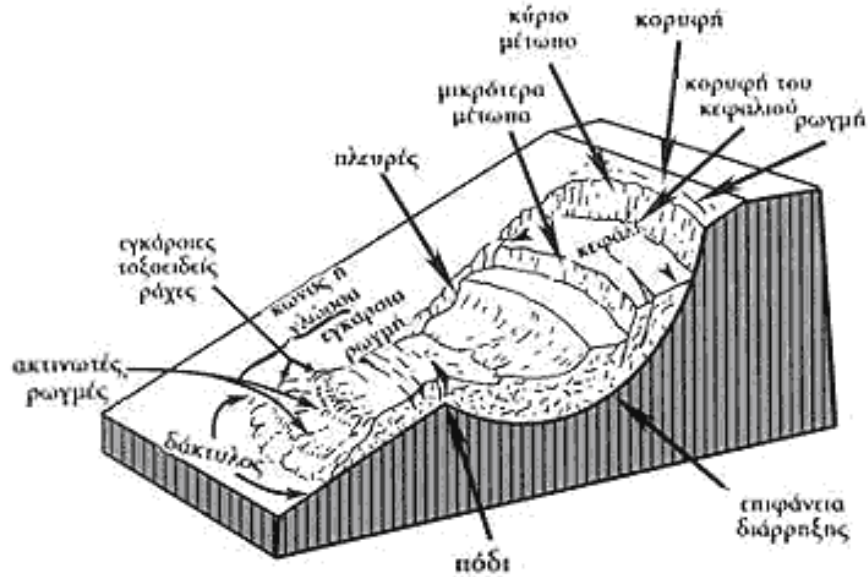
Το σχήμα της κατολίσθησης εξαρτάται μέχρι ενός βαθμού, από τον τύπο του υλικού που μετακινήθηκε. Το μέγεθος, εξαρτάται από τις διαστάσεις της επιφάνειας της κλιτύος και

από το πάχος της μάζας που αποκολλάται και μετακινείται. Το πάχος αυτό εξαρτάται από τη θέση της επιφάνειας ολισθήσεως.

Συνήθως το μήκος των κατολισθήσεων είναι μεγαλύτερο από το πλάτος τους. Σε περίπτωση, όμως, που το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας ολισθήσεως εμπίπτει εντός στρώσεως χονδρόκοκκης ιλύος ή άμμου η οποία διαχωρίζει δύο στρώματα αργίλου, το πλάτος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μήκος της κατολίσθησης.

Τα διάφορα μέρη που διακρίνονται σε μια τυπική κατολίσθηση παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2 και είναι:

- Η επιφάνεια αποχωρισμού ή αποκολλήσεως, γνωστή και ως μέτωπο ή κόγχη αποσπάσεως ή ακόμη και ρίζα. Αποτελεί την εκτομή της κλιτύος από την οποία διαχωρίστηκε η μάζα που κατολίσθησε από το σταθερό τμήμα,
- Η επιφάνεια ολισθήσεως, είναι εκείνη πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα η μετακίνηση των μαζών που κατολίσθησαν,
- Το σώμα της κατολίσθησης, αποτελεί τη μάζα των υλικών που μετακινήθηκαν,
- Ο κώνος ή σωρός των υλικών που κατολίσθησαν, γνωστή και ως περιοχή καλύψεως ή γλώσσα. Σχηματίζεται από τη συσσώρευση των υλικών, τα οποία αφού μετακινήθηκαν κατά μια διαδρομή, σταμάτησαν και συγκεντρώθηκαν στη θέση όπου η κινητική τους ενέργεια μηδενίστηκε,
- Ο πόδας της κατολίσθησης, είναι το ακραίο, χαμηλότερο συνήθως τμήμα του κώνου.



Σχήμα 2.2: Μέρη μιας τυπικής κατολίσθησης

Στο παράρτημα στο σχήμα 2.1 και στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται η κάτοψη περιστροφικής ολίσθησης και τα μέρη της κατολίσθησης (IAEG Commission of Landslides, 1990).

2.4 Υλικό κατολισθήσεων

Το υλικό που παίρνει μέρος σε μια κατολίσθηση μπορεί να είναι είτε βράχος – μια σκληρή μάζα, άθικτη και στην αρχική της θέση από την αρχή της κίνησης, είτε έδαφος – μια συνάθροιση από στερεά τεμάχια τα οποία είτε μεταφέρθηκαν, είτε σχηματίστηκαν από την τριβή των βράχων μεταξύ τους. Τα αέρια ή υγρά που γεμίζουν τους πόρους του εδάφους, αποτελούν μέρος του (βλ. Εδάφιο 1.21.2). Το έδαφος χωρίζεται σε χώμα και κατάλοιπα. Το χώμα αποτελεί το υλικό με το μεγαλύτερο ποσοστό τεμαχίων να είναι μικρότερα από 2 mm. Τα κατάλοιπα περιέχουν μια σημαντική ποσότητα από τραχύ υλικό, 20%-80% από τα τεμάχια είναι μεγαλύτερα από 2 mm και τα υπόλοιπα μικρότερα από 2 mm.

Ανάλογα με την ποσότητα του νερού που περιέχεται στους πόρους του υλικού, τα εδάφη χωρίζονται σε:

- Ξηρά, τα οποία δεν έχουν ορατή υγρασία
- Ύφουρα, που περιέχουν μια ποσότητα νερού αλλά όχι ελεύθερο νερό

- Υγρά, που περιέχουν αρκετή ποσότητα νερού ώστε να συμπεριφέρονται ως υγρά
- Πολύ υγρά, τα οποία περιέχουν αρκετή ποσότητα νερού ώστε να ρέουν σαν υγρά κάτω από μικρές κλίσεις εδάφους.

2.5 Παράγοντες που προκαλούν τις κατολισθήσεις

Το γεωλογικό φαινόμενο των κατολισθήσεων προκαλείται από τη συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Μερικοί από αυτούς προϋπάρχουν και δρουν για μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι είναι παροδικοί ή περιοδικοί και παρέχουν την αφορμή για την εκδήλωση του φαινομένου.

Οι παράγοντες πρόκλησης των κατολισθήσεων μπορούν να διαχωριστούν σε πρωτογενείς και δευτερογενείς. Στους πρώτους ανήκουν εκείνοι που δημιουργούν την προδιάθεση ολίσθησης ενός σχηματισμού, ενώ οι δεύτεροι προκαλούν άμεσα την κατολίπηση.

2.5.2 Πρωτογενείς παράγοντες

Σύμφωνα με το UNESCO Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI 1990, δεν ενδείκνυται η χρήση του όρου αίτια κατολισθήσεων αλλά συνήθως ορίζονται ως συνθήκες και διεργασίες που οδηγούν στην αλλαγή του καθεστώτος ισορροπίας του πρανούς. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι συνθήκες εδάφους, οι γεωμορφολογικές διαδικασίες, οι φυσικές διεργασίες, οι ανθρωπογενείς παράγοντες (Popescu M. 1996).

Αναλυτικότερα:

- Η δομή του γεωλογικού υπόβαθρου και η τεκτονική της περιοχής. Ένα έδαφος που αποτελείται από εναλλαγές πολλών ετερογενών στρωμάτων, είναι πιθανότερο να παρουσιάσει κατολισθητικά φαινόμενα, λόγω των πολλών πιθανών επιφανειών ολίσθησης, από ένα άλλο έδαφος το οποίο αποτελείται από ένα μόνο στρώμα. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο παίζει επίσης και η κλίση των στρωμάτων. Όταν έχει την ίδια φορά με το πρανές μπορεί να επηρεάσει περισσότερο την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων

- Το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της περιοχής. Υπάρχουν πετρώματα, τα οποία είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθήσεις, όπως ο φλύσχης και τα αργιλικά εδάφη
- Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το ύψος του νερού που πέφτει στην περιοχή, με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης μπορεί να οδηγήσει σε κατολίσθηση, είτε μειώνοντας την αντοχή του εδάφους είτε αυξάνοντας την εσωτερική έντασή του. Η επίδραση του νερού συνίσταται στο γεγονός ότι αυξάνεται η ποσότητα του νερού στους πόρους του υλικού, με αποτέλεσμα είτε να αυξάνονται οι τάσεις στο εσωτερικό των εδαφών, είτε να παρασύρονται κόκκοι υλικού από την επιφάνεια και με τη μορφή ροής να εγκαθίσταται και πάλι σε περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο
- Η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς και η κινητικότητα του υποβάθρου. Οι σεισμικές δονήσεις μπορούν πολλές φορές να αποτελέσουν την αφορμή για την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, προσθέτοντας στις ήδη ασταθείς μάζες την επιπλέον δυναμική φόρτιση, που τις ωθεί στην ολίσθηση
- Η γεωδυναμική εξέλιξη που σημειώνεται σε περιοχές με νεοτεκτονική δραστηριότητα. Μέσω αυτών των εξελίξεων μπορούν να ανυψωθούν και να τοποθετηθούν με κλίση εδαφικά στρώματα.

2.5.3 Δευτερογενείς παράγοντες

Οι δευτερογενείς παράγοντες ή μηχανισμοί ενεργοποίησης διακρίνονται σε εκείνους που οφείλονται σε εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες. Συγκεκριμένα:

- Μηχανισμοί ενεργοποίησης που οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες και συντελούν στην αύξηση της διατμητικής τάσης όπως:
 - Αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους, ή βάρους του όγκου των υλικών, λόγω της προσθήκης νερού μέσα σ' αυτά, από διείδυση, πλευρική διήθηση ή τριχοειδή ανύψωση
 - Αύξηση της κλίσεως των πρανών μπορεί να γίνει είτε από φυσικούς παράγοντες (π.χ. διάβρωση), είτε από ανθρώπινη επέμβαση
 - Αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου.

- Μηχανισμοί ενεργοποίησης, οι οποίοι οφείλονται σε ενδογενείς παράγοντες και συντελούν στην μείωση της διατμητικής αντοχής όπως:
 - Αύξηση της ανώσεως που εξασκείται σε μια μάζα από τα υπόγεια νερά, η οποία μπορεί να προκληθεί από την άνοδο της πιεζομετρικής επιφάνειας
 - Η αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, γνωστή και ως ουδέτερη τάση u_w . Η ουδέτερη τάση προκαλεί αντίστοιχη ελάττωση της ενεργού τάσεως και επομένως μείωση της διατμητικής αντοχής. Για παράδειγμα, όταν ένα υλικό με πολύ μικρή υδροπερατότητα υποβληθεί σε γρήγορη συμπίεση, εξασκείται πίεση. Η πίεση αυτή, αντισταθμίζεται με κατανάλωση μέρους της ορθής τάσης, δηλαδή μείωση της ενεργού τάσης και επομένως ελάττωση της διατμητικής αντοχής
 - Η ελάττωση της συνοχής προκαλείται συνήθως από τις επιδράσεις των υπόγειων νερών
 - Ελάττωση της τριβής προκαλείται κυρίως από την παρουσία νερού
 - Αύξηση του ύψους και του πλάτους της τομής του εδάφους.

2.6 Ταξινόμηση Κατολισθήσεων

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, πρώτα από τον Heim (1885), στη συνέχεια τον Bay (1939), το 1956 από τον Penta και το 1959 από τον Desio. Τα δύο γνωστότερα συστήματα ταξινόμησης είναι αυτά που προτάθηκαν από τον Sharpe (1939) και Varnes (1958), έχοντας ως βασικές παραμέτρους τον τύπο του υλικού κατολίσθησης, την περιεχόμενη υγρασία, τον τύπο κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή), την ταχύτητα κίνησης.

Ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, οι κατολισθήσεις χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, προσθέτοντας ένα συνθετικό στο όνομά τους (Σακελλαρίου 2005).

2.6.1 Είδος κίνησης – Γεωμετρία

Οι τρόποι με τους οποίους κατολισθαίνουν οι πλαγιές χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες:

- **πτώσεις** (falls). Μια πτώση ξεκινά με την αποκόλληση εδάφους ή βράχου από μια απότομη πλαγιά, κατά μήκος μιας επιφάνειας, ενώ καθώς κατεβαίνει χτυπά στην πλαγιά και κατακυλά.
- **ανατροπές** (topples). Η ανατροπή αποτελεί την προς τα εμπρός περιστροφή μιας μάζας βράχου, γύρω από ένα σημείο ή άξονα, κάτω από το κέντρο βάρους της μάζας. Μερικές φορές προκαλείται από το βάρος του υλικού που βρίσκεται στο πάνω μέρος της πλαγιάς, ενώ άλλες φορές από το νερό ή τον πάγο στις ρωγμές της μάζας. Μπορεί να οδηγήσει σε πτώσεις ή ολισθήσεις.
- **ολισθήσεις** (slides). Η ολίσθηση είναι η προς τα κάτω κίνηση εδαφικής ή βραχώδους μάζας που συμβαίνει κυρίως κατά επιφάνειες αστοχίας ή σε σχετικά λεπτές ζώνες έντονης διατμητικής τάσης. Τα πρώτα σημάδια της κίνησης του εδάφους είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος των οποίων σχηματίζεται η κύρια πλαγιά της ολίσθησης. Οι ολισθήσεις διακρίνονται σε: περιστροφικές που κινούνται κατά μήκος μιας επιφάνειας αστοχίας που είναι κοίλη, και μεταφορικές όπου η μάζα μετατοπίζεται κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματιστής επιφάνειας αστοχίας ολισθαίνοντας πάνω στην αρχική επιφάνεια εδάφους.
- **εξαπλώσεις** (spreads). Ορίζεται ως μια επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους ή μιας βραχώδους μάζας συνδυασμένης με γενική υποχώρηση της τεμαχισμένης μάζας, του συνεκτικού υλικού, μέσα σε μαλακότερο υλικό. Μπορεί να προκληθούν από υδροποίηση ή ροή του μαλακότερου υλικού.
- **ροές** (flows). Η ροή αποτελεί μια συνεχή κίνηση στον χώρο, στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης είναι η μία κοντά στην άλλη και συνήθως δε διατηρούνται. Η κατανομή δε των ταχυτήτων στο μετατιθέμενο υλικό μοιάζει με εκείνη ενός παχύρευστου υγρού. Διάφορες μορφές ροών είναι η *ροή καταλοίπων ανοιχτής κλιτύς* η οποία σχηματίζει το δικό της μονοπάτι στην

κοιλάδα προς πλαγιές με ηπιότερη κλίση. Ακόμη αναφέρεται η *καναλοποιημένη ροή* που ακολουθεί τα ήδη υπάρχοντα κανάλια. Η *ροή ιλύος* στην πλευρά ηφαιστείου κινητοποιεί τις αποθέσεις τέφρας στις κλιτύες του ηφαιστείου. Ροή δε μπορεί να δημιουργηθεί όταν το επίπεδο κορεσμού είναι πολύ μικρότερο από ένα κατώφλι, το έδαφος δε δέχεται υγροποίηση και τα υγρά περνούν πολύ εύκολα στο έδαφος (Picarelli 1998). Θεωρούνται οι πιο επικίνδυνες κατολισθήσεις εξαιτίας της μεγάλης ταχύτητας και του μεγάλου μήκους της επιφάνειας στην οποία λαμβάνει χώρα η κίνηση των καταλοίπων.

- ➔ Οι **σύνθετες** κατολισθήσεις δε χρησιμοποιούνται στην επίσημη κατηγοριοποίηση.

Στο παράρτημα, το σχήμα 1.2 παρουσιάζει συνοπτικά την ταξινόμηση των κατολισθήσεων κατά Varnes (1996). Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τους τύπους ολισθήσεων κατά Cruden & Varnes (1996) ανάλογα με το είδος του υλικού που λαμβάνει μέρος στην ολίσθηση και τον τύπο ολίσθησης.

Πίνακας 2.1: Τύποι ολισθήσεων ανάλογα με το είδος του υλικού και τον τύπο ολίσθησης (Cruden & Varnes, 1996)

ΤΥΠΟΙ ΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ		
		Βραχώδης μάζα	Εδάφη	
			Χονδρόκοκκα	Λεπτόκοκκα
Πτώσεις		Πτώση βράχων	Πτώση φερτών υλικών	Πτώση εδάφους
Ανατροπές		Ανατροπή βράχων	Ανατροπή φερτών υλικών	Ανατροπή εδάφους
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση φερτών υλικών	Ολίσθηση εδάφους
	Μεταφορικές			
Εξάπλωσεις		Εξάπλωση βράχων	Εξάπλωση φερτών υλικών	Εξάπλωση εδάφους
Ροές		Ροή βράχων	Ροή φερτών υλικών	Ροή εδάφους
Σύνθετες				

2.6.2 Στάδιο δράσης

Ανάλογα με την ενέργεια που περιέχει κάθε κατολίσθηση διακρίνονται ορισμένες κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- ✦ Ενεργές κατολισθήσεις είναι εκείνες που ενεργούν πρόσφατα. Περιλαμβάνουν κινήσεις πρώτης φοράς και επανεργοποιήσεις. Μια κατολίσθηση η οποία είναι πάλι ενεργός μετά από μια περίοδο κατά την οποία είναι ανενεργός, ονομάζεται επανεργοποιημένη. Οι κατολισθήσεις οι οποίες έχουν κινηθεί μέσα στον τελευταίο ετήσιο κύκλο των εποχών, αλλά που δεν κινούνται στο παρόν, καλούνται αδρανείς.
- ✦ Ανενεργές είναι εκείνες οι κατολισθήσεις οι οποίες κινήθηκαν για τελευταία φορά πριν από περισσότερο από έναν ετήσιο κύκλο εποχών. Αν οι λόγοι που προκαλούν την κατολίσθηση είναι ορατοί, τότε πρόκειται για λανθάνουσα κατολίσθηση. Στην περίπτωση που το ποτάμι που διαβρώνει τον πόδα της κινούμενης πλαγιάς, αλλάζει πορεία η κατολίσθηση καλείται εγκαταλελειμμένη. Αν ο πόδας της πλαγιάς έχει προστατευθεί από διάβρωση με ενίσχυση των όχθων ή άλλα μέτρα έχουν σταματήσει την κίνηση, η κατολίσθηση περιγράφεται ως σταθεροποιημένη.
- ✦ Αρχαίες ή απολιθωμένες καλούνται οι κατολισθήσεις που παραμένουν ορατές για χιλιάδες έτη αφού κινήθηκαν ή σταθεροποιήθηκαν. Όταν οι κατολισθήσεις καλυφθούν από άλλες αποθέσεις αναφέρονται σαν θαμμένες, ενώ εκείνες που έχουν δημιουργηθεί καθαρά κάτω από διαφορετικές γεωμορφικές ή κλιματικές συνθήκες καλούνται relict.

2.6.3 Ταχύτητα κίνησης

Η ταχύτητα ή ρυθμός κίνησης αποτελεί ένα άλλο κριτήριο για το διαχωρισμό των κατολισθήσεων. Στις κατολισθήσεις, μικρές και γρήγορες στοιβάδες μπορούν να προκαλέσουν ολοκληρωτική καταστροφή και απώλεια ζωών. Σε αντίθεση, μια κίνηση μεγάλης πλαγιάς με μέτρια ταχύτητα μπορεί να έχει πολύ λιγότερα άσχημα αποτελέσματα γιατί μπορεί να αποφευχθεί, ή οι κατασκευές που θα επηρεαστούν, να

εκκενωθούν ή να ξαναχτιστούν. Στο όριο μεταξύ αργών και πολύ αργών κινήσεων, μερικές κατασκευές δεν παθαίνουν ζημιές, ενώ το όριο μεταξύ αργής και εξαιρετικά αργής κίνησης που δεν ξεπερνά τα 10^{-6} mm/sec δηλώνει ερπυσμό, δηλαδή συνεχή κίνηση που προχωρά με μέσο ρυθμό μικρότερου από 30 cm ανά δεκαετία. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζεται η προτεινόμενη κλίμακα ταχύτητας κατολισθήσεων κατά Varnes (1978).

Πίνακας 2.2: Κλίμακα κατολισθήσεων ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης (Varnes, 1978)

<i>ΤΑΞΗ</i>	<i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</i>	<i>ΤΑΧΥΤΗΤΑ (mm/s)</i>	<i>ΤΥΠΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ</i>
1	Εξαιρετικά αργή	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$> 50 \cdot 10^{-3}$
2	Πολύ αργή	$5 \cdot 10^{-7}$	1.8 m/h
3	Αργή	$5 \cdot 10^{-5}$	1.8 m/h
4	Μέτρια	$5 \cdot 10^{-3}$	1.8 m/h
5	Γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1}$	1.8 m/h
6	Πολύ γρήγορη	50	3 m/min
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 50 \cdot 10^{-3}$	> 5 m/s

2.6.4 Ρηχές κατολισθήσεις (Shallow landslides)

Ένας από τους πιο επικίνδυνους τύπους κατολισθήσεων είναι οι ροές εδαφών, κορημάτων και λάσπης, λόγω της υψηλής ταχύτητας με την οποία κινούνται τα μεταφερόμενα υλικά προς τα κατόντη (από μερικά m/h έως και 200 km/h). Οι εν λόγω κατολισθήσεις ανήκουν στις λεγόμενες ρηχές κατολισθήσεις (shallow landslides). Ο όρος ρηχή κατολίσθηση περιγράφει την περίπτωση όπου το μήκος της αστοχίας σε ένα πρανές είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος της επιφάνειας αστοχίας που θεωρείται παράλληλο με την πλαγιά. Η επιφάνεια αστοχίας – διάρρηξης, λοιπόν, βρίσκεται σε μικρό βάθος (από 0 έως 3 m) από την επιφάνεια του εδάφους, χωρίς να επηρεάζεται το γεωλογικό υπόβαθρο και συγκεκριμένα το μητρικό πέτρωμα. Με άλλα λόγια, οι ρηχές κατολισθήσεις αφορούν τους υπερκείμενους εδαφικούς μανδύες αποσάθρωσης και γενικά χαλαρά υλικά, όπως είναι τα αλλούβια, τα κορήματα κλπ.

Τα υλικά αυτά είναι κοκκώδους υφής και παρουσιάζουν περατότητα. Παράγοντες όπως οι σεισμικές δονήσεις ή η εκτέλεση έργων μπορούν να κινητοποιήσουν τέτοιου είδους γεωυλικά, αλλά, σε παγκόσμια κλίμακα, ο κύριος παράγοντας (triggering factor) παραμένει η βροχόπτωση. Σε υγρά κλίματα (στην Ελλάδα βλέπε κυρίως τις ελληνικές οροσειρές, όπως η Πίνδος), με έντονες βροχοπτώσεις για μεγάλα χρονικά διαστήματα, τα υλικά αυτά τείνουν να κορεστούν από νερό και η πίεση του νερού των πόρων τους αυξάνεται συνεχώς ελαττώνοντας τη διατμητική τους αντοχή. Μ' αυτόν τον τρόπο μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα παρουσιάζεται η αστοχία και εκδηλώνεται το φαινόμενο.

Διακρίνονται τρία στάδια στην εξέλιξη του φαινομένου της ρηχής κατολίσθησης (Hungri et al., 2001). Το εναυσματικό στάδιο (Triggering Stage) κατά το οποίο αυξάνεται η πίεση του νερού των πόρων ώστε οι αντιδρώσες δυνάμεις να εξισωθούν με τις δρώσες ($FS > 1$ και τελικά $FS = 1$), το στάδιο μετά την αστοχία (Post – failure Stage), όπου ελαττώνεται περαιτέρω η διατμητική αντοχή ($FS < 1$) και το στάδιο της εξάπλωσης των υλικών της κατολίσθησης στα κατάντη (Propagation Stage). Τα τρία στάδια συμβαίνουν σχεδόν ταυτόχρονα και διαδοχικά (με τη σειρά που περιγράφηκαν).

2.7 Κατολισθητικά φαινόμενα

2.7.1 Εισαγωγικά

Σύμφωνα με τους Reickenbach P. et al (2001), σε πολλές χώρες οι κατολισθήσεις και οι ροές εδάφους προκαλούν τις μεγαλύτερες ανθρώπινες και υλικές απώλειες από κάθε άλλη φυσική καταστροφή. Κατολισθήσεις και πλημμύρες είναι συνηθέστερες στις αναπτυσσόμενες χώρες. Οι οικονομικές απώλειες είναι πιο έντονες στις βιομηχανικές περιοχές. Οι μετακινήσεις εδαφών στις ΗΠΑ, προκαλούν υλικές ζημιές της τάξης του ενός έως δύο δισεκατομμυρίων δολαρίων το χρόνο (Highland & Brown, 1996). Παρόμοια και στις αναπτυσσόμενες χώρες, οι κατολισθήσεις έχουν ένα πολύ υψηλό ετήσιο κόστος. Οι κατολισθήσεις και οι μετακινήσεις γαιωδών υλικών προκαλούν προβλήματα στην συγκοινωνία, βλάβες σε φράγματα, οικολογικά και περιβαλλοντικά προβλήματα, αλλαγές στις φυσικές ή τεχνητές οδούς παροχέτευσης των νερών.

Έκθεση του ΟΗΕ (1999) σχετικά με τις παγκόσμιες καταστροφές εκτιμά ότι κατά την περίοδο 1988-1997 μόνο οι κατολισθήσεις κόστισαν 9000 θανάτους και συνολικές υλικές ζημιές της τάξης των 450 εκατ. δολλαρίων.

Τα φαινόμενα αυτά είναι συχνά στο Μεσογειακό περιβάλλον με το ορεινό ανάγλυφο και τα πολλά υδατορεύματα μόνιμης ή διαλείπουσας ροής. Η ανάλυση των καταστροφικών φαινομένων δείχνει ότι συμβαίνουν με μεγαλύτερη συχνότητα από την ικανότητα των βιομηχανικών και αναπτυσσόμενων χωρών να επανακάμψουν από το προηγούμενο γεγονός (ή να ανταπεξέλθουν στο κόστος του προηγούμενου φυσικού καταστροφικού φαινομένου).

Λόγω του υψηλού κόστους των μέτρων προστασίας του εδάφους και των επανορθωτικών μέτρων, πολλές χώρες προσανατολίζουν την έρευνά τους σε συστήματα προειδοποίησης (warning systems) και νομοθετικές ρυθμίσεις για τις χρήσεις γης, με σκοπό να ελαχιστοποιήσουν τους κινδύνους και τις πιθανές απώλειες (International Decade of Natural Hazard Reduction 1987, United Nations Disasters Relief Organization).

Ειδικότερα στην Ευρώπη ο κίνδυνος πλημμυρών, κατά συνέπεια και μετακινήσεων εδαφών, αυξήθηκε κατά τις τελευταίες δεκαετίες σαν αποτέλεσμα ανθρωπογενών επεμβάσεων και περιβαλλοντικών μεταβολών. Τα Ευρωπαϊκά Προγράμματα προσανατολίζονται στην έρευνα για τη μείωση και διαχείριση του κινδύνου των πλημμυρών. Δυσκολίες πάντως υπάρχουν στην κατανόηση και προσομοίωση του κύκλου του νερού (βροχόπτωση, εξάτμιση, κυκλοφορία υπογείων νερών), κυρίως αν ληφθεί υπόψη ότι οι οποιεσδήποτε κλιματικές αλλαγές επηρεάζουν τις υδρολογικές συνθήκες. Πρόσφατα προγράμματα της Ε.Ε. επικεντρώνονται στην εξέταση παραγόντων όπως η διάβρωση, βλάστηση, βροχόπτωση, οι κλιματικές αλλαγές και η σεισμικότητα.

Συνδυαστικά υδρολογικά μοντέλα και μοντέλα ευστάθειας πρανών, αναπτύχθηκαν για διάφορους τύπους κατολισθήσεων και έδωσαν ενδιαφέροντα αποτελέσματα για την πρόβλεψη του κινδύνου από εδαφικές μετακινήσεις. Σημαντική πρόοδος έχει γίνει στη μοντελοποίηση της κυκλοφορίας νερού μέσα στο σώμα της κατολίθησης. Η άνοδος

του υδροφόρου ορίζοντα και οι προειδοποιητικές μικρομετακινήσεις μπορούν να αποτελέσουν ενδείξεις για επικείμενη κατολίσθηση.

2.7.2 Το φαινόμενο της κατολίσθησης στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα εκδηλώνονται πολυάριθμα κατολισθητικά φαινόμενα, ορισμένα από τα οποία προκαλούν ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις τόσο οικονομικές όσο και κοινωνικές. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα μερικών κατολισθήσεων είναι:

- (i) στο Μικρό Χωριό Καρπενησίου, που συνέβη το 1963 και προκάλεσε το θάνατο 13 ανθρώπων και την ολική καταστροφή του χωριού
- (ii) κατά μήκος της εθνικής οδού Αθηνών – Λαμίας στο ύψος της Μαλακάσας, το 1995, που δυσχέρανε τις οδικές μεταφορές, προκαλώντας ζημιά στην εθνική οικονομία της τάξης άνω του 1 δις δρχ.
- (iii) κατά μήκος της εθνικής οδού Αθηνών – Πατρών στο ύψος της Παναγοπούλας και του Διακοφτού (λασπορές), το Σεπτέμβρη του 2006 μετά από έντονες βροχοπτώσεις
- (iv) η μεγάλη κατολίσθηση (συνδυασμός τυπικής περιστροφικής κατολίσθησης και μετέπειτα ροής) που συνέβη το Φεβρουάριο του 2003 στην περιοχή της Τσακώνας Αρκαδίας καταστρέφοντας ολοσχερώς μεγάλο τμήμα της νέας εθνικής οδού Μεγαλόπολης – Καλαμάτας, σε συνδυασμό με καθιζήσεις στη νέα εθνική οδό Κορίνθου – Τρίπολης στο ύψος της Νεμέας.



Γενικά, ο ελληνικός χώρος χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο, πολυσύνθετη γεωλογική δομή και ενεργό τεκτονισμό, που σε συνδυασμό με το υγρό κλίμα της Δυτικής Ελλάδας και τα έντονα καιρικά φαινόμενα των τελευταίων χρόνων, καθώς και την

ανεξέλεγκτη επέμβαση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον, ευνοούν την εκδήλωση κατολισθήσεων παντός τύπου.

Τα περισσότερα κατολισθητικά φαινόμενα εκδηλώνονται σε λοφώδεις και ημιορεινές περιοχές και σε βάθος 0,5-3 μέτρα, δηλαδή «μέσα» στο μανδύα αποσάθρωσης. Οι περισσότερες κατολισθήσεις σημειώνονται στη Δυτική Ελλάδα όπου παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα ύψη βροχής καθώς και λιθολογικοί σχηματισμοί ευνοϊκοί ως προς τα φαινόμενα ολίσθησης (φλύσσης).

Οι σημαντικότερες περιπτώσεις κατολισθήσεων εντοπίζονται στη Ζώνη Ωλονού – Πίνδου σε φλύσσιους και μολασσικούς σχηματισμούς (Κούκης Γ.,1990) εξ' αιτίας της πλαστικότητας, της αποσάθρωσης και της συσσώρευσης τάσεων λόγω του ενεργού τεκτονισμού. Συνήθως πρόκειται για μετακινήσεις μικρού βάθους αν και η ρηχή κατολίπηση δεν αποκλείει την ύπαρξη, παράλληλα, πιθανής επιφάνειας ολίσθησης σε μεγαλύτερο βάθος.

Σαν κυριότεροι εναυσματικοί παράγοντες καταγράφονται η διάβρωση της βάσης των πρανών από υδατορεύματα, η υποσκαφή, οι διαρρήξεις μεγάλης κλίμακας, η αύξηση της πίεσης των πόρων, η φυσική αποσάθρωση, η ενυδάτωση αργίλου, η μεγάλη κλίση πρανούς, οι εναλλαγές περατών και αδιαπέρατων στρωμάτων και, σπανιότερα, οι σεισμικές δονήσεις και το βάρος της βλάστησης.

2.8 Μέτρα πρόληψης και αναχαίτισης

Για την αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων, απαιτείται πλήρης γνώση της γεωλογικής δομής και εξέλιξης της ευρύτερης περιοχής, στην οποία εκδηλώθηκε το φαινόμενο. Επίσης απαιτείται πλήρης γνώση των υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών συνθηκών, καθώς και ακριβής χαρτογράφηση (σε κλίμακες 1:1000 έως 1:10000) και παρακολούθηση των διαφόρων τμημάτων μιας κατολίπησης.

Σχεδόν σε κάθε περίπτωση, αρκετά πρόδρομα φαινόμενα προηγούνται της κατολίσθησης, όπως οι εφελκυστικές ρωγμές ημισεληνοειδούς μορφής, οι μικρές ρωγμές σε τεχνικά έργα κάθε είδους, η εξόγκωση τμημάτων των πρανών, η πτώση βραχωδών όγκων και η αντίληψη μικροδομήσεων και κραδασμών.

Τα πρόδρομα φαινόμενα σε συνδυασμό με την πλήρη γνώση της γεωλογίας, με την ευρύτερη έννοια, μιας περιοχής βοηθούν στο να προλάβουμε τις κατολισθήσεις εν τη γενέσει τους ή έστω να περιορίσουμε τις συνέπειες τους στο περιβάλλον (φυσικό και ανθρωπογενές).

Η επιλογή των μέτρων, εξαρτάται από το είδος της κατολίσθησης και κυρίως για το αν πρόκειται για μετακινήσεις εδαφών ή βραχομάζας. Τα μέτρα διακρίνονται σε προληπτικά -πριν ή κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός τεχνικού έργου- και αναχαίτισης -μετά την εκδήλωση του φαινομένου. Γενικά τα μέτρα αποσκοπούν στην επιφανειακή και υπόγεια αποστράγγιση των γεωλογικών σχηματισμών, ώστε να εξαλειφθούν οι αρνητικές επιδράσεις του νερού στη διατμητική αντοχή (μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, αποφυγή επιφανειακής και υπόγειας διάβρωσης, φόρτισης του σχηματισμού υπό το βάρος επιφανειακά συγκεντρωμένων υδάτων).

Άλλα μέτρα περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση του πρανούς όπως ο περιορισμός κλίσεων, η ελάφρυνση ανώτερου τμήματος κατολισθαίνουσας μάζας και η ταυτόχρονη φόρτιση του πόδα της. Η φυτοκάλυψη με τις ρίζες προστατεύει τις επιφανειακές μάζες και με τα φύλλα της εμποδίζει την αποσάθρωση – διάβρωσή τους από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Τέλος υπάρχει και μια σειρά από έργα όπως τσιμεντενέσεις, πασσαλώσεις, τοίχοι αντιστήριξης και συγκράτησης, συρμάτινα δίκτυα (εικόνα 2.2), φράκτες, αγκυρώσεις και τεχνικά σκέπαστρα – σήραγγες, που έχουν σα στόχο την ακινητοποίηση της κατολισθαίνουσας μάζας και την προστασία των μεταφορικών και οικιστικών δικτύων, από αυτήν.



Εικόνα 2.2: Μέτρα αντιμετώπισης κατολισθητικών φαινομένων (Eurokinissi, 2003).

2.9 Ανάλυση ευστάθειας

2.9.1 Διατμητική αντοχή κορεσμένου και μη κορεσμένου εδάφους

Η διατμητική αντοχή κορεσμένου εδάφους περιγράφεται χρησιμοποιώντας το κριτήριο αστοχίας του Mohr-Coulomb και την έννοια της ενεργούς ορθής τάσης (Terzaghi, 1936).

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \quad (2.1)$$

Όπου:

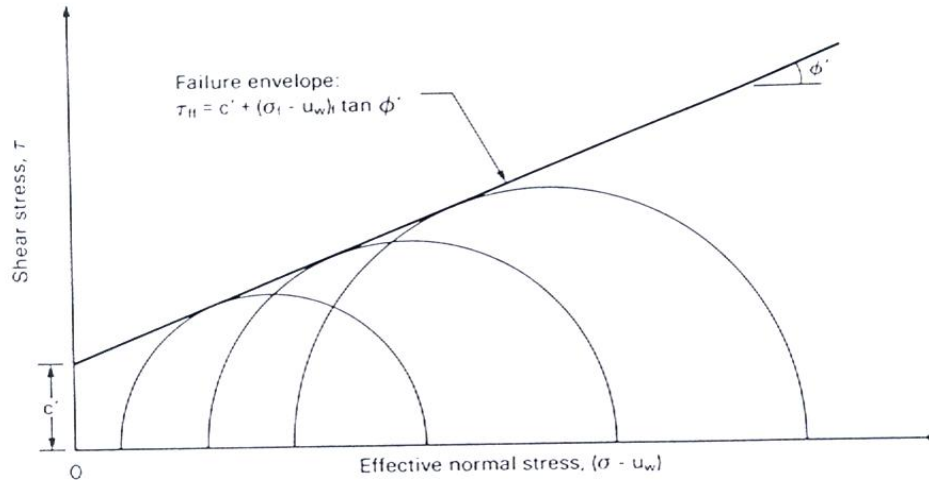
τ_{ff} : η διατμητική αντοχή του εδάφους στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία

c' : η ενεργός συνοχή, που είναι η διατμητική αντοχή όταν η ενεργός ορθή τάση ισούται με το μηδέν

$(\sigma_f - u_w)_f$: η συνολική ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία

u_w : η πίεση των πόρων του νερού κατά την αστοχία

ϕ' : η ενεργός γωνία τριβής



Διάγραμμα 2.1: Περιβάλλουσα Mohr- Coulomb για κορεσμένο έδαφος (Fredlund, 1977)

Η εξίσωση 2.1 αντιστοιχεί σε μια γραμμή όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.1. Η γραμμή αυτή συνήθως αναφέρεται ως περιβάλλουσα. Η περιβάλλουσα, λοιπόν, δείχνει τους πιθανούς συνδυασμούς της διατμητικής αντοχής και της ενεργούς ορθής τάσης στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία. Η διατμητική τάση που περιγράφεται από την περιβάλλουσα αστοχίας, δείχνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους για κάθε ενεργή ορθή τάση. Η περιβάλλουσα αστοχίας προκύπτει, σχεδιάζοντας μια γραμμή εφαπτόμενη σε μια σειρά κύκλων του Mohr που αναπαριστούν συνθήκες αστοχίας. Η κλίση της γραμμής δίνει την ενεργό γωνία τριβής ϕ' , και η τομή στην τεταγμένη καλείται ως η ενεργός συνοχή c' . Το σημείο επαφής στον κύκλο του Mohr κατά την αστοχία φανερώνει το επίπεδο τάσης στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία.

Η διατμητική αντοχή ενός μη κορεσμένου εδάφους μπορεί να περιγραφεί με όρους ανεξάρτητων μεταβλητών τάσης, μέθοδο που υιοθέτησαν οι Cai and Ugai και προτάθηκε από τον Bishop. Οι μεταβλητές τάσης $(\sigma - u_a)$ και $(u_a - u_w)$ έχουν αποδειχθεί ότι αποτελούν τον συνδυασμό με τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα για την πράξη και έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εξίσωση της διατμητικής αντοχής.. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, η εξίσωση διατμητικής αντοχής γράφεται ως:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (2.2)$$

όπου:

c' : η τομή του "επεκτεταμένης" περιβάλλουσας αστοχίας του Mohr- Coulomb στον άξονα της διατμητικής τάσης όπου η νετ ορθή τάση και η matric μύζηση στην αστοχία είναι ίσες με το μηδέν, καλείται ως ενεργός συνοχή.

$(\sigma_f - u_a)_f$: Η ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία

u_a : Η πίεση των πόρων του αέρα στην αστοχία

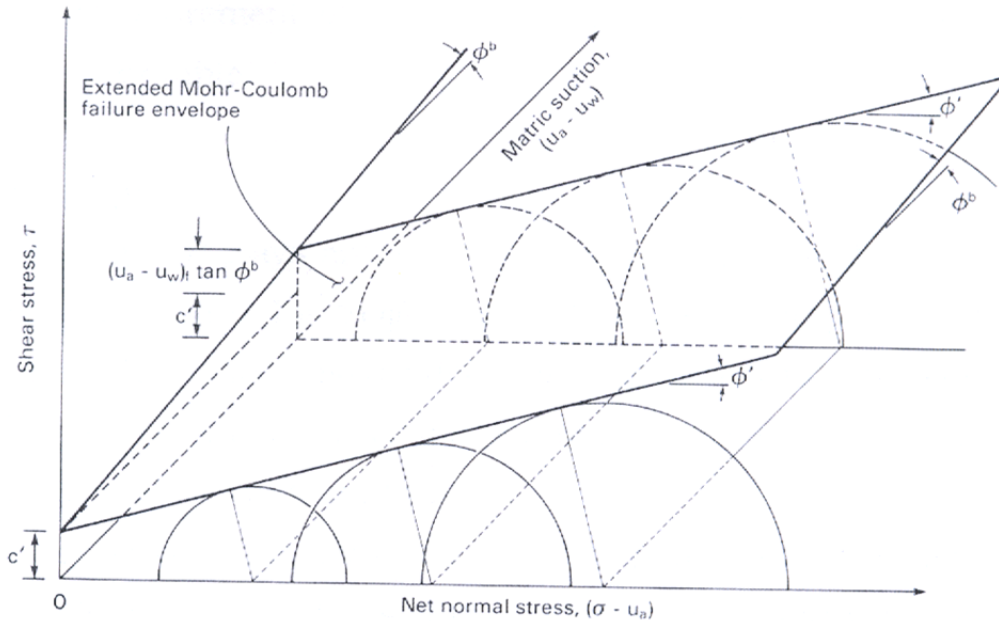
φ' : Η γωνία τριβής που αφορά την ορθή τάση $(\sigma_f - u_a)_f$

$(u_a - u_w)_f$: η matric μύζηση στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία

φ^b : η γωνία που δείχνει το ποσοστό αύξησης της διατμητικής αντοχής σε σχέση με τη matric μύζηση $(u_a - u_w)_f$

Μια σύγκριση των εξ. 2.1 και 2.2 φανερώνει ότι η εξίσωση της διατμητικής αντοχής για μη κορεσμένα εδάφη είναι μια επέκταση της αντίστοιχης για κορεσμένα. Για ένα μη κορεσμένο έδαφος, χρησιμοποιούνται δύο μεταβλητές τάσης για να περιγράψουν τη διατμητική αντοχή $(\sigma_f - u_a)_f$ και $(u_a - u_w)_f$, ενώ μόνο μία ($(\sigma_f - u_w)_f$ η ενεργός ορθή τάση) απαιτείται για ένα κορεσμένο.

Στην περίπτωση ενός μη κορεσμένου εδάφους, οι κύκλοι του Mohr που απαντούν σε συνθήκες αστοχίας μπορούν να σχεδιαστούν σε τρεις διαστάσεις (διάγραμμα 2.2). Το τρισδιάστατο σύστημα έχει ως τεταγμένη τη διατμητική τάση τ , και τις δύο μεταβλητές τάσης $(\sigma_f - u_a)$ και $(u_a - u_w)$ ως τετμημένες. Η επιφάνεια του μετώπου αντιπροσωπεύει ένα κορεσμένο έδαφος όπου η matric μύζηση είναι μηδέν. Στην επιφάνεια αυτή, ο $(\sigma - u_a)$ άξονας μετατρέπεται σε $(\sigma - u_w)$ άξονα αφού η πίεση των πόρων του αέρα γίνεται ισοδύναμη με την πίεση των πόρων του νερού σε κορεσμό. Η επεκτεταμένη περιβάλλουσα μπορεί να είναι μια επίπεδη επιφάνεια ή καμπύλη. Εδώ, θεωρείται ότι είναι επίπεδη και περιγράφεται από την εξ. 2.2. Μια καμπύλη περιβάλλουσα μπορεί να περιγραφεί από τη 2.2 για πολύ μικρές αλλαγές στις μεταβλητές τάσης.



Διάγραμμα 2.2: Επεκτεταμένη περιβάλλουσα για μη κορεσμένα εδάφη (Gallipoli, 2004)

2.9.2 Ανάλυση ευστάθειας – Συντελεστής ασφαλείας

Οι μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας των πρανών βασίζονται στην παραδοχή κάποιας μορφής αστοχίας και ακολουθείται ανάλυση με μεθόδους οριακής ισορροπίας απ' όπου και προκύπτει κάποιος συντελεστής ασφαλείας. Ο συντελεστής αυτός, εκφράζει το βαθμό ασφαλείας ή την αντοχή του πετρώματος έναντι θραύσης ή κατολίστεσης και συμβολίζεται με F (εναλλακτικά $F.S.$ - safety factor). Καθορίζεται δε από το λόγο του συνόλου των δυνάμεων ή των ροπών που ανθίστανται στην ολίσθηση ή περιστροφή και που οφείλονται στην διατμητική αντοχή του εδάφους, προς τις αντίστοιχες δυνάμεις ή ροπές που συνεισφέρουν στην αστάθεια του πρανούς, προκαλώντας την ολίσθησή ή περιστροφή του αντίστοιχα (εξίσωση 2.3).

$$FS = \frac{\Delta \text{δυνάμεις} - \text{Ροπές} \cdot \text{Αντιδράσεις}}{\Delta \text{δυνάμεις} - \text{Ροπές} \cdot \text{Δράσεις}} \quad (2.3)$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με τη μονάδα $FS=1$, τότε αναφερόμαστε σε οριακή ισορροπία – ευστάθεια του πρανούς. Συντελεστής μικρότερος από τη μονάδα, σημαίνει ότι το πρανές είναι ασταθές και η εκδήλωση κάποιας κατολίστεσης είναι πιθανή. Παρ' όλα αυτά, είναι δυνατό να υπάρξει ασταθές πρανές με

συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο από τη μονάδα, εξαιτίας ανακρίβειας των μεθόδων ανάλυσης και αβεβαιότητας, ή διασποράς στις παραμέτρους αντοχής του εδάφους (Ortigao & Sayao, 2004).

Κατά το σχεδιασμό τεχνικών έργων με διαμόρφωση πρανών, ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να έχει κάποια ελάχιστη τιμή η οποία να είναι εναρμονισμένη με τις ισχύουσες προδιαγραφές (κανονισμός). Προτείνοντας κάποια αποδεκτή τιμή του συντελεστή ασφαλείας, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι υλικές ζημιές αλλά και ο κίνδυνος των ανθρώπινων ζώων (πίνακας 2.3).

Πίνακας 2.3: Προτεινόμενοι συντελεστές ασφαλείας (GEO 1984)

Επιτρεπόμενος	F.S.	Κίνδυνος Ανθρώπινων Ζωών		
		Μικρός	Μεσαίος	Μεγάλος
Κίνδυνος Οικονομικών Καταστροφών	Μικρός	1.1	1.2	1.4
	Μεσαίος	1.2	1.3	1.4
	Μεγάλος	1.4	1.4	1.5

Οι παραπάνω συντελεστές ισχύουν για περίοδο επαναφοράς 10 ετών, ενώ για μεγαλύτερους κινδύνους και για συνθήκες μαλακού εδάφους, αυξάνεται κατά 10%. Γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές του πίνακα 2.4, αποτελούν μόνο προτάσεις και ότι ο γεωτεχνικός μηχανικός θα πρέπει να λάβει υπόψη και τις τρέχουσες συνθήκες του πρανού και τις ενδεχόμενες μελλοντικές αλλαγές.

Κατά τους Morgan & Rickson (1995), χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διατμητικής αντοχής ο συντελεστής ασφαλείας χωρίς τη βλάστηση μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (2.4)$$

όπου:

c' : ενεργή συνοχή εδάφους (kPa)

γ : ειδικό βάρος εδάφους (kN/m^3)

z : κατακόρυφο ύψος εδάφους κάτω από την επιφάνεια αστοχίας (m)

β : γωνία πρανούς ($^{\circ}$)

γ_w : ειδικό βάρος νερού (9.8kN/m^3)

h_w : κατακόρυφο ύψος υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια αστοχίας(m)

ϕ' : ενεργός γωνία τριβής του εδαφικού υλικού ($^{\circ}$)

Επιπλέον, στην περίπτωση που λαμβάνεται υπ' όψη φυτοκάλυψη, ο συντελεστής ασφαλείας γίνεται:

$$F = \frac{(c' + c'_R) + \{[(\gamma z - \gamma_w h_w) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta\} \tan \phi' + T \cos \theta}{[(\gamma z + W) \sin \beta + D] \cos \beta} \quad (2.5)$$

όπου:

c' : συνοχή εδάφους (kPa)

c'_R : ενισχυμένη συνοχή εδάφους λόγω των ριζών (kPa)

W : επιπλέον τάση εξαιτίας του βάρους της βλάστησης (kN/m^2)

γ_w : ειδικό βάρος νερού (9.8 kN/m^3)

γ : ειδικό βάρος εδάφους (kN/m^3)

z : κατακόρυφο ύψος εδάφους κάτω από την επιφάνεια αστοχίας (m)

h_w : κατακόρυφο ύψος υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια αστοχίας με βλάστηση (m)

T : δύναμη των ριζών που επιδρά στη βάση της επιφάνειας ολίσθησης (kN/m)

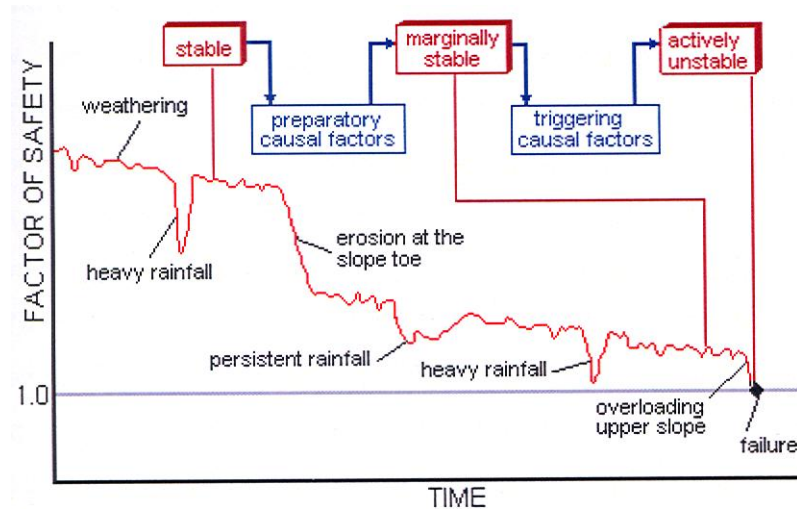
D : δύναμη του ανέμου παράλληλη στο πρανές (kN/m)

β : γωνία πρανούς ($^{\circ}$)

θ : γωνία μεταξύ ριζών και επιφάνειας ολίσθησης ($^{\circ}$)

ϕ' : ενεργός γωνία τριβής του εδαφικού υλικού ($^{\circ}$)

Το διάγραμμα 2.3.παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ συντελεστή ασφαλείας και χρόνου κατά την επίδραση ποικίλων παραγόντων που προκαλούν αστοχίες



Διάγραμμα 2.3: Μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του χρόνου (Popescu, 2000)

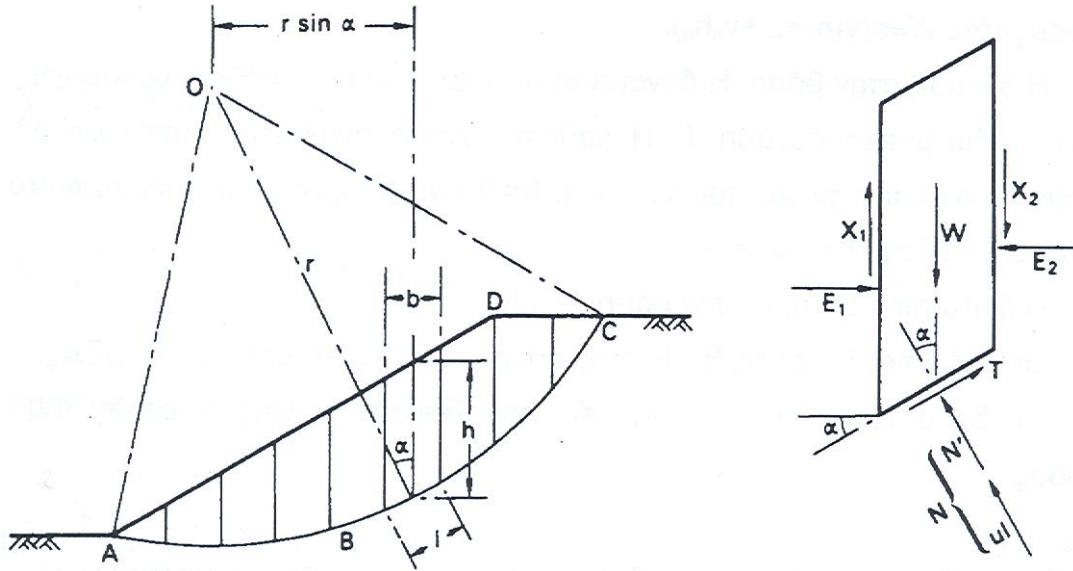
Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται με τις μεθόδους:

- Μέθοδος Culmann
- Μέθοδος του κύκλου τριβής
- Μέθοδος των λωρίδων
- Νομογραφήματα Hook & Bray

2.9.1 Υπολογισμός συντελεστή ασφαλείας για κυκλικές μορφές αστοχίας

- **Μέθοδος Λωρίδων**

Η συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας, είναι η μέθοδος των λωρίδων. Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 2.1) βλέπουμε ένα πρανές με μια κυκλική μορφή αστοχίας. Ο όγκος που αστοχεί χωρίζεται σε λωρίδες ώστε να γίνουν πιο εύκολοι οι υπολογισμοί.



Σχήμα 2.1: Μέθοδος των λωρίδων

Κάθε λωρίδα τείνει να είναι ασταθής λόγω του βάρους της. Το βάρος της λωρίδας (W) δίνει ροπή ως προς το σημείο O με μοχλοβραχίονα $r \sin \alpha$, ροπή που τείνει να προκαλέσει ολίσθηση του πρανούς αν το κέντρο βάρους της λωρίδας είναι δεξιότερα από το O . Αν το κέντρο βάρους της λωρίδας είναι αριστερά του O , τότε η ροπή που δίνει το βάρος της λωρίδας μειώνει την συνολική ροπή ολίσθησης. Έτσι η γωνία α χρησιμοποιείται προσημασμένη ώστε το $\sin \alpha$ να έχει το πρόσημο της γωνίας.

Ενάντια στις δυνάμεις ολίσθησης δρουν οι δυνάμεις τριβής και συνοχής (διατμητική αντοχή του εδάφους). Στην λωρίδα που εξετάζουμε ενάντια στην ολίσθηση δρα η δύναμη T . Η δύναμη T δίνει ροπή ευστάθειας ως προς το σημείο O με μοχλοβραχίονα r . Η διατμητική αντοχή μειώνεται στην περίπτωση που υπάρχουν υπόγεια ύδατα τα οποία δίνουν υδροστατική πίεση u στην επιφάνεια ολίσθησης.

Εξετάζοντας την ισορροπία κάθε λωρίδας παρατηρούμε ότι ασκούνται οι εξής δυνάμεις:

1. το βάρος της λωρίδας, $W = \gamma \cdot b \cdot h$ (γ_s στην περίπτωση κορεσμένου εδάφους).
Στην περίπτωση που λωρίδα περιέχει διαφορετικά στρώματα εδάφους τότε $W = b \cdot (\gamma_1 \cdot h + \dots + \gamma_n \cdot h_n)$.
2. η δύναμη στη βάση, η οποία αναλύεται στην κάθετη δύναμη N και στην διατμητική δύναμη T . Η κάθετη δύναμη αναλύεται σε ενεργή N' και στην άνοση

του νερού U . Ισχύει: $N = N' + U$ και $U = ul$, όπου u η πίεση των πόρων στη βάση της λωρίδας.

3. η διατμητική δύναμη στη βάση $T = \tau_m l$
4. οι οριζόντιες δυνάμεις E_1, E_2 που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας.
5. οι διατμητικές δυνάμεις X_1, X_2 που ασκούνται στις πλευρές της λωρίδας.

Η επίλυση όλων των δυνάμεων E, X, T, N είναι εν γένει ένα υπερστατικό πρόβλημα και ως συνήθως γίνονται κάποιες παραδοχές για την επίλυση.

Εξετάζοντας την ισορροπία όλου του ολισθαίνοντος τμήματος $A-B-C-D$ λαμβάνουμε ροπές ως προς το σημείο O :

$$\sum Tr = \sum Wr \sin a \quad (2.6)$$

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί από την ασκούμενη διατμητική τάση στο τόξο $A-B-C$ (τ_m) και τη διατμητική αντοχή που μπορεί να ενεργοποιηθεί σε αυτό το τόξο (τ_f).

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης είναι λοιπόν: $F = \tau_m / \tau_f$ (2.7)

Η πιο πάνω σχέση γίνεται: $T = \tau_m l = (\tau_f / F) l$ (2.8)

όπου l , το συνολικό μήκος του τόξου $A-B-C$

Χρησιμοποιώντας τις διακριτές λωρίδες εφαρμόζουμε τη σχέση (2.6) στη σχέση (2.8):

$$\sum \frac{\tau_f}{F} l = \sum W \sin a \quad (2.9)$$

οπότε:

$$F = \frac{\sum \tau_f l}{\sum W \sin a} \quad (2.10)$$

Χρησιμοποιώντας τις ενεργές τάσεις: $F = \frac{c' L_{AC} + \sum (N - ul) \tan \phi'}{\sum W \sin a}$ (2.11)

- **Προσεγγίσεις του Bishop**

Ο Bishop δίνει μια ακριβέστερη λύση για τον συντελεστή ασφαλείας ευστάθειας πρανούς, καταλήγοντας στο ότι η αστοχία γίνεται από περιστροφή ενός μπλοκ εδάφους σε μια κυλινδρική επιφάνεια ολίσθησης με κέντρο το θ . Η μέθοδος είναι ιδανική για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με ηλεκτρονικό υπολογιστή και χρησιμοποιείται ευρύτατα. Ο υπολογισμός γίνεται με επαναληπτικές μεθόδους, θέτοντας κάποιον αρχικό συντελεστή ασφαλείας.

Οι προσεγγίσεις του Bishop είναι δύο, η απλοποιημένη και η ακριβής. Αποδεικνύεται ότι με την ακριβή θεώρηση έχουμε μία βελτίωση στην ακρίβεια του συντελεστή ασφαλείας κατά 1%. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιούμε πάντα την απλοποιημένη προσέγγιση την οποία αναπτύσσουμε παρακάτω.

Με τις προσεγγίσεις του Bishop το σφάλμα του υπολογισμένου συντελεστή ασφαλείας σε σχέση με τον πραγματικό σπάνια ξεπερνά το 7% ενώ εν γένει είναι μικρότερο του 2% πάντα υπέρ της ασφάλειας (η μέθοδος Bishop υποτιμά τον συντελεστή ασφαλείας).

Η προσέγγιση αυτή εκφράζει το συντελεστή ασφαλείας ως:

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left\{ [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi' / F)} \right\} \quad (2.12)$$

Ενώ εισάγοντας την έννοια του λόγου πίεσης πόρων r_u :

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \left\{ [c'b + W(1 - r_u) \tan \phi'] \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi' / F)} \right\} \quad (2.13)$$

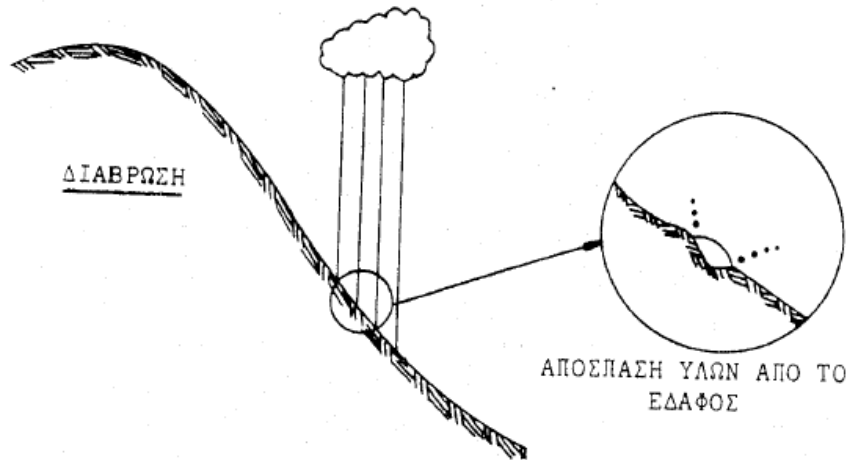
3. Η διάβρωση ως μηχανισμός ενεργοποίησης των κατολισθήσεων

3.1 Εισαγωγή

Η διάβρωση των ορεινών δασικών εδαφών επηρεάζει όχι μόνο τις επιφάνειες από τις οποίες αποσπώνται και μεταφέρονται εδαφικά υλικά, αλλά και τα χαμηλότερα σημεία και τις κοιλάδες επίσης όπου, τα εδάφη καλύπτονται με φερτά υλικά, τα κανάλια φράσσονται με αποθέσεις και οι ταμιευτήρες νερού και οι λίμνες πληρώνονται με λάσπη και άλλα υλικά. Η διάβρωση υποβαθμίζει το έδαφος, οδηγώντας συχνά σε κατολισθητικά φαινόμενα. Από τα στοιχεία των γαιών της Ελλάδας, προκύπτει ότι ποσοστό 46.2% των εκτάσεων της χώρας υποφέρει από κάποια μορφή μέτριας διάβρωσης. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι το φαινόμενο της διάβρωσης είναι έντονο στη χώρα μας και χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και αντιμετώπισης.

3.2 Η έννοια της διάβρωσης

Διάβρωση του εδάφους καλείται η απόσπαση και μεταφορά εδαφικού υλικού με τη δράση κυρίως του νερού και του ανέμου (Kirkby και Morgan, 1980). Αποτελεί σύνολο διεργασιών μηχανικού κυρίως χαρακτήρα, που περιλαμβάνει τόσο την απόσπαση από το γήινο φλοιό εδάφους και θραυσμάτων από πετρώματα, όσο και τη μεταφορά του υλικού αυτού από φυσικούς παράγοντες (νερά, άνεμο, παγετώνες, βαρύτητα) και την απόθεσή του σε νέες θέσεις ως κλαστικό ίζημα.



Διάγραμμα 3.1: Διαδικασία της διάβρωσης
(Μιμίκου, 1994)

Έχει εκτιμηθεί ότι από τα συνολικά στερεά που μπαίνουν στα ποτάμια και τους ταμιευτήρες, το 50% περίπου προέρχεται από διάβρωση αγροτικών περιοχών και το άλλο 50% από αστικές περιοχές κατασκευών (U.S. Dept of Agriculture, 1963, Μιμίκου, 1994). Ο κύριος αποδέκτης των μεταφερόμενων από τη διάβρωση υλικών είναι η θάλασσα. Κάθε χρόνο λόγω της διάβρωσης μεταφέρονται στη θάλασσα 9 δισεκ. τόνοι εδάφους (WWF UK, 1994).

Αποτέλεσμα της διάβρωσης είναι η υποβάθμιση της ποιότητας του εδάφους, που συνεπάγεται τη μείωση της γονιμότητάς του και την αύξηση των δαπανών για τη διατήρηση της παραγωγικότητάς του. Η σοβαρότητα δε του φαινομένου αυτού, εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού που αποσπάται και την ικανότητα των διαβρωτικών μέσων να το μεταφέρουν, διαφέρει μάλιστα κατά χώρο και χρόνο.

3.2.1 Κατηγορίες διάβρωσης

Κατά τους Οικονόμου και Νάκο (1990), η διάβρωση του εδάφους διακρίνεται σε γεωλογική ή κανονική ή φυσική και σε ακανόνιστη ή επιταχυνόμενη. Η πρώτη συμβαίνει σε συνθήκες περιβάλλοντος και οι απώλειες του εδάφους είναι σχετικά μικρές της τάξης

των 50kg/έτος/ha. Η δεύτερη κατηγορία, είναι αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων και σε μερικές περιπτώσεις ζωικών. Οφείλεται, λοιπόν, κυρίως στην υποβάθμιση των δασών από τις πυρκαγιές, βοσκή, υλοτομίες, εκχερσώσεις. Οι απώλειες εδαφικού υλικού, στη δεύτερη αυτή περίπτωση, είναι γρηγορότερες και ποσοτικά μεγαλύτερες. Οι πιο σημαντικοί τύποι επιταχυνόμενης διάβρωσης είναι:

- Επιφανειακή διάβρωση, όπου απομακρύνεται το επιφανειακό στρώμα εδάφους σχεδόν ομοιόμορφα από όλη την έκταση μιας επιφάνειας. Είναι αποτέλεσμα της ενέργειας της βροχής και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητάς της επιφανειακής απορροής.
- Αυλακωτή διάβρωση, όπου στην επιφάνεια του εδάφους παρουσιάζονται πολυάριθμα αυλάκια βάθους λίγων μέχρι 50 cm περίπου.

3.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση

Η διάβρωση είναι το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης δύο βασικών παραμέτρων, της βροχής και του εδάφους. Η βασική αιτία απώλειας του εδάφους είναι το νερό της βροχής που ενεργεί επί του εδάφους, το δε μέγεθός της εξαρτάται από την ικανότητα (δύναμη) του νερού να προκαλεί διάβρωση αφ' ενός και την ευαισθησία (τρωτότητα) του εδάφους να υφίσταται διάβρωση αφ' ετέρου.

Η διάβρωση του εδάφους από το νερό της βροχής μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα κυρίως πέντε παραγόντων:

- Η *διαβρωτικότητα* της βροχής, που είναι το αποτέλεσμα της έντασης και διάρκειάς της, όπως επίσης και της μάζας, διαμέτρου και ταχύτητας των σταγόνων του (Morgan, 1986, Οικονόμου, Νάκος 1990).
- Η *διαβρωσιμότητα* του εδάφους, που δηλώνει την αντίσταση του εδάφους στην απόσπαση και μεταφορά του. Αντανακλά στο γεγονός ότι διαφορετικά εδάφη διαβρώνονται κατά διαφορετικό ποσοστό όταν οι άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωσή του παραμένουν σταθεροί. Η διαβρωσιμότητα του

εδάφους εξαρτάται κυρίως από την υφή και δομή του εδάφους, τη σταθερότητα των συσσωμάτων, την υδατοπερότητα, την περιεκτικότητα σε οργανική ουσία και τις χημικές ιδιότητες.

- Η υδατοϊκανότητα των εδαφών έχει υπολογισθεί κατά μέσο όρο στο 33% του όγκου τους, ωστόσο υπάρχουν εδάφη με υδατοϊκανότητα ψηλότερη του 50% (Αλεξανδρής, 1990). Ανάλογα, λοιπόν, με το ποσό του νερού που μπορεί να αποθηκεύσει το έδαφος, αντιστέκεται στη διάβρωση, ώσπου το νερό φτάσει στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας. Για παράδειγμα, όσο μεγαλύτερη είναι η διηθητική ικανότητα του εδάφους, τόσο λιγότερο νερό απορρέει επιφανειακά και κατά συνέπεια λιγότερο έδαφος παρασύρεται και χάνεται. Κατά την είσοδο του νερού στο έδαφος, η διήθηση εξαρτάται κυρίως από την κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους, την ύπαρξη ή όχι βλάστησης, τη σύσταση και το πορώδες του εδάφους και την ποσότητα του οργανικού υλικού (Baker, 1988). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις χημικές ιδιότητες του εδάφους, υψηλή αναλογία διοξειδίου του πυριτίου προς τα τριοξείδια του σιδήρου και του αργιλίου προκαλεί πλαστική μορφή στην άργιλο και συνεπώς τα εδάφη αυτά διαβρώνονται εύκολα.

Ακόμη, ο Κατακουζινός (1960) δέχεται ότι ισχυρώς όξινα εδάφη με pH κάτω του 6 και ισχυρά αλκαλικά με $pH > 8.5$ είναι ευπαθή στη διάβρωση, όπως επίσης παρατηρείται και για τα εδάφη με μειωμένη γονιμότητα. Από την άλλη, η υδατοϊκανότητα επηρεάζεται και από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Αβαθή εδάφη παρουσιάζουν έντονη διάβρωση αλλά και δυσχέρειες στην κατασκευή αντιδιαβρωτικών έργων. Χονδρόκοκκα εδάφη απορροφούν εύκολα μεγάλες ποσότητες νερού, αλλά όταν κορεστούν και ξεκινήσει η επιφανειακή απορροή, τα χαλαρά υλικά παρασύρονται πολύ εύκολα. Τα λεπτόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν επίσης έντονη διάβρωση λόγω της περιορισμένης διήθησης, ενώ εκείνα με ενδιάμεση υφή παρουσιάζουν την καλύτερη ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Επιπλέον, εδάφη χωρίς δομή ή αδύνατη πλακοειδή δομή, υπόκεινται σε έντονη διάβρωση σε αντίθεση με τα ισχυρές, χονδρές

σφαιροειδούς δομής που παρουσιάζουν ισχυρή αντίσταση (Κατακουζινός 1960). Τέλος, σημειώνεται ότι τα υγρά εδάφη αντιδρούν περισσότερο στην παρασυρτική δύναμη του νερού, με αποτέλεσμα να είναι περισσότερο ανθεκτικά.

- Το μήκος και η κλίση της πλαγιάς. Γνωρίζουμε ότι όσο αυξάνεται η κλίση, αυξάνεται και η ταχύτητα απορροής και συνεπώς και ο κίνδυνος διάβρωσης. Θεωρητικά, διπλασιασμός της ταχύτητας νερού, τετραπλασιάζει τη διαβρωτική του ικανότητα και επιτρέπει να μεταφέρει 32 φορές περισσότερο υλικό. Επιπλέον, το μήκος της πλαγιάς επηρεάζει το ποσό της επιφανειακής απορροής. Καθώς το νερό ρέει προς τα κατόντη, περισσότερο έδαφος χάνεται από τα χαμηλότερα σημεία της πλαγιάς παρά από τα ψηλότερα (Μακρής, Μαντούδη, 1997).
- Η φυτοκάλυψη, που ουσιαστικά αντανακλά την προστατευτική επίδραση του τύπου και του ποσοστού κάλυψης. Κατά τους Οικονόμου, Νάκο 1990 η διάβρωση μειώνεται κατά κανόνα ως εξής: Πολυώροφο μικτό κλειστό δάσος → πυκνή θαμνώδης βλάστηση → πυκνή φυσική ποώδης βλάστηση → πυκνά ψυχανθή και ποώδη καλλιεργούμενα φυτά → σιτηρά → καλαμπόκι → πατάτες.
- Η ανθρώπινη επίδραση. Εξετάζεται εάν ο άνθρωπος έχει μεταβάλει το ανάγλυφο και σε τι βαθμό, λαμβάνοντας έτσι υπ' όψη την πυκνότητα του πληθυσμού και τις χρήσεις γης στην περιοχή μελέτης (π.χ. τύποι καλλιεργειών). Η υποβάθμιση των δασών και των δασικών εκτάσεων αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες που συντελούν στη μεγιστοποίηση της διάβρωσης του εδάφους. Προέρχεται κυρίως από παρεμβάσεις του ανθρώπου στο περιβάλλον, όπως εκχερσώσεις λόγω υπερβόσκησης, ληστρικής υλοτομίας, γεωργικής χρήσης, αστικής επέκτασης και επέκτασης λατομείων, ρύπανση του αέρα. Οι περισσότεροι όμως, ερευνητές, καταλήγουν ότι οι πλέον σημαντικοί παράγοντες είναι η πυρκαγιά και η υπερβόσκηση και η συνδυασμένη δράση τους.

Πολύχρονη εμπειρία και έρευνες δείχνουν ότι οι απώλειες εδάφους λόγω διάβρωσης από το νερό της βροχής σε γεωργικά κυρίως εδάφη μπορούν να υπολογιστούν από την Παγκόσμια Εξίσωση Εδαφικής Απώλειας (Universal Soil Loss Equation) (Kirkby και Morgan, 1980):

$$A = 0.224 \cdot R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Όπου A = Εδαφική απώλεια σε $\text{kg/m}^2\text{s}$

R = Συντελεστής Διαβρωτικότητας Βροχής (Rainfall Erosivity Factor)

K = Συντελεστής Διαβρωσιμότητας Εδάφους (Soil Erodibility Factor)

L = Συντελεστής Μήκους Κλιτύος (Slope Length Factor)

S = Συντελεστής Κλίσης Κλιτύος (Slope Gradient Factor)

C = Συντελεστής Διαχείρισης της Φυτοκάλυψης (Cropping Management Factor)

P = Συντελεστής Ελέγχου Διάβρωσης (Erosion Control Practice Factor)

3.2.3 Η βροχόπτωση ως παράγοντας διάβρωσης

Είναι γεγονός ότι το νερό αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα εδαφικής διάβρωσης: μέσω της ποτάμιας κυκλοφορίας του μεταφέρονται υλικά που αποσπώνται από υψηλότερα υψόμετρα ενώ επιδρά απ' ευθείας σε πρανή είτε επιφανειακά είτε με την κατεισδυση προκαλώντας μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων. Γενικότερα, η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και νερού είναι θεμελιώδης όσον αφορά τη διαδικασία της διάβρωσης (Δεβενέ, 2004).

Το νερό που απορρέει επιφανειακά διαβρώνει και υποσκάπτει τον πόδα των πρανών κατά μήκος ποταμών και χειμάρρων, ενώ αυτό που κατεισδύει αυξάνει την πίεση των πόρων, προκαλεί εσωτερική διάβρωση, διόγκωση αργιλικών ορυκτών, επιπλέον δε φορτίζει με το βάρος του την ασταθή μάζα. Σε πιθανές επιφάνειες ολίσθησης λειτουργεί και ως λιπαντικό.

Γίνεται αντιληπτή η σημασία της βροχόπτωσης και η ανάγκη για μελέτη αυτής. Η βροχόπτωση, λοιπόν, αναφέρεται ως μέση ετήσια, μηνιαία, ημερήσια μετρούμενη από τις 8:00 το πρωί μέχρι και την ίδια ώρα της επόμενης ημέρας.

Η ένταση (ωριαία μέτρηση) είναι σημαντική ως προς την κατανόηση της κινητικής ενέργειας. Η ένταση της βροχόπτωσης και η απορρόφηση από το έδαφος καθορίζουν την υδρολογική συμπεριφορά των πρανών και το βαθμό διάβρωσης. Διάφορα ποσοστά του μετεωρικού νερού εξατμίζονται (*evaporation*) ή αποδίδονται στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής των φυτών (*transpiration*), ρέουν επιφανειακά, διηθούνται στο έδαφος, κυκλοφορούν στο υπέδαφος ή και κατεισδύουν κάτω από το επίπεδο του μόνιμου υδροφόρου ορίζοντα.

Οι δύο κυριότεροι παράγοντες που ελέγχουν την τιμή της φυσικής υγρασίας του εδάφους είναι το συνολικό ύψος βροχής και ο συνδυασμός εξάτμισης και διαπνοής, γνωστός και ως εξατμισοδιαπνοή (*evapotranspiration, ET*). Η αποστράγγιση και η υπόγεια κατεΐσδυση είναι σχετικά μικρές μέχρι να συντελεστεί ο κορεσμός του εδάφους.

Η εξατμισοδιαπνοή είναι ο συνδυασμός της άμεσης εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους και της διαπνοής μέσω των φύλλων των φυτών. Όπως περιγράφεται από τους Thorthwaite και Mather (1955), η δυναμική εξατμισοδιαπνοή ελέγχεται κυρίως από δύο παράγοντες: τη θερμοκρασία αέρα και τη διάρκεια της ημέρας με την οποία συνδέεται άμεσα η διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Και οι δύο παράγοντες αγγίζουν μία μέγιστη τιμή το καλοκαίρι και μια ελάχιστη το χειμώνα. Αντίστοιχα, τις ίδιες εποχές, παρατηρούνται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της εξατμισοδιαπνοής.

Ένα αθροιστικό έλλειμμα φυσικής υγρασίας δημιουργείται τις εποχές που η εξατμισοδιαπνοή υπερβαίνει τη βροχόπτωση. Αντίθετα, ένα πλεόνασμα υγρασίας παρατηρείται όταν η εξατμισοδιαπνοή υπολείπεται της βροχόπτωσης και αφ' ότου η φυσική υγρασία έχει φτάσει σε μια κατάσταση ισορροπίας.

Κατά τους ξηρούς μήνες υπάρχει σημαντική απώλεια φυσικής υγρασίας μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Έτσι το έδαφος χάνει την υγρασία του και μέχρι την έναρξη της υγρής περιόδου έχει δημιουργηθεί ένα έλλειμμα υγρασίας (αρνητική πίεση πόρων). Οι πρώτες βροχοπτώσεις απορροφώνται από το έδαφος. Μέχρι να κορεστεί το έδαφος, οι πρώτες φθινοπωρινές βροχές δεν επηρεάζουν τη σταθερότητα των πρανών και η εκδήλωση κατολισθήσεων είναι μάλλον απίθανη. Στην αρχή της χειμερινής περιόδου, οι βροχοπτώσεις αλλά και οι καταιγίδες γίνονται περισσότερο συχνές ενώ παράλληλα η εξατμισοδιαπνοή μειώνεται. Εάν οι χειμερινές βροχοπτώσεις είναι αρκετές, το έλλειμμα υγρασίας αναπληρώνεται και όταν ξεπεραστεί η τιμή κατωφλίου δημιουργείται μια περίσσεια φυσικής υγρασίας και σημαντικές θετικές πιέσεις πόρων οι οποίες μειώνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους με συνέπεια τις εδαφικές ροές ή άλλες μορφές κατολίσθησης.

Τα βασικότερα κριτήρια για το χαρακτηρισμό ενός κλίματος κατά τον Thornwaite είναι ο δείκτης υγρασίας *IM* (*moisture index*) και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή *PE* (*Potential Evapotranspiration*). Έτσι εάν οι βροχοπτώσεις υπερτερούν της εξατμισοδιαπνοής τότε το κλίμα είναι υγρό, σε ισοτιμία των δύο παραγόντων ημί-υγρο κλπ.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή συχνά εμφανίζεται υπερεκτιμημένη σε σύγκριση με την πραγματική. Η πραγματική μπορεί να υπολογιστεί από τη δυνητική επί το λόγο της παραμένουσας υγρασίας προς την υγρασία σε κατάσταση ισορροπίας. Έτσι, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή πλησιάζει τη δυνητική όταν η φυσική υγρασία του εδάφους είναι τέτοια ώστε να μην παρατηρούνται αρνητικές πιέσεις πόρων. Σύμφωνα με τα παραπάνω ενώ η δυνητική εξατμισοδιαπνοή παρουσιάζει το μέγιστο κατά το μέσον του καλοκαιριού, η πραγματική παρουσιάζει μέγιστη τιμή συνήθως στα τέλη της άνοιξης.

Το νερό συγκεντρώνεται σε επαφές οριζόντων ή μέσα στον ίδιο ορίζοντα όταν αλλάζουν οι ιδιότητες του εδάφους, σε ρωγματώσεις ή εκεί όπου μειώνεται η κλίση των πρανών. Η προϋπάρχουσα υγρασία αποτελεί επίσης σημαντικό παράγοντα για τη συμπεριφορά του εδάφους.

Η διαβρωτική διαδικασία τελικά πραγματοποιείται είτε μέσω της άμεσης απόσπασης τεμαχίων από το έδαφος, είτε με την απόπλυση και απομάκρυνση μικροσκοπικών τεμαχιδίων, είτε με απότομη θραύση σε συγκεκριμένη επιφάνεια και ολίσθηση/κατάπτωση. Σε κάθε περίπτωση η ισορροπία μεταξύ της δυνατότητας απορρόφησης και της έντασης της βροχόπτωσης καθορίζει και τη συμπεριφορά του πρανούς.

Ο Horton ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια της απορρόφησης. Σύμφωνα με αυτήν απορροή παρατηρείται όταν η ένταση της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη από τη ικανότητα απορρόφησης του εδάφους. Οι ρυθμοί απορρόφησης φθίνουν κατά τη διάρκεια καταιγίδων λόγω συμπύκνωσης του εδάφους, απόπλυσης τεμαχιδίων και απόθεσής τους σε κενά καθώς και διόγκωσης αργιλικών υλικών μέσω της προσρόφησης νερού.

Η μείωση της απορρόφησης εξαρτάται από την πλήρωση των πόρων του εδάφους καθώς συνεχίζεται η βροχόπτωση (Philip, 1957), ενώ από τη στιγμή που θα πληρωθούν όλοι οι πόροι αυξάνεται η διαβροχή και ο κορεσμός (saturation). Και εδώ, σημαντικός παράγοντας είναι το προϋπάρχον ποσοστό φυσικής υγρασίας αν και δεν υπεισέρχεται στη θεωρία του Horton.

Οι Gonghui Wang και Kyoji Sassa (2002), βασιζόμενοι σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, συμπέραναν ότι το μέγεθος κόκκου και το ποσοστό των λεπτόκοκκων στη σύσταση του εδάφους έχει μεγάλη επίδραση στην κινητικότητα της κατολισθαίνουσας λόγω βροχόπτωσης μάζας.

Η δασική φυτοκάλυψη είναι σημαντική στη διαμόρφωση του υδρολογικού καθεστώτος σε υγρές ορεινές περιοχές. Το δασικό περιβάλλον δημιουργεί μακροπόρους που οφείλονται είτε στην ανάπτυξη των ριζών είτε σε δράσεις της πανίδας που ενδημεί στα δάση. Γενικά, παρατηρείται υψηλή αλλά ετερογενής διαπερατότητα. Σε τέτοια περιβάλλοντα δεν υπάρχει μεγάλο ποσοστό νερού διαθέσιμο για επιφανειακή απορροή γιατί είναι περισσότερο πιθανό να απορροφηθεί ενώ έχει διανύσει μικρή απόσταση κατά την πορεία του προς χαμηλότερα υψόμετρα.

Εάν η κατεύθυνση ροής μέσα στη ζώνη κορεσμού προσομοιωθεί με μία κεκλιμένη τομή τότε η ποσότητα της απορροφώμενης βροχόπτωσης Z εξαρτάται άμεσα από το πάχος της ζώνης κορεσμού H_w . Η ποσότητα Z είναι το γινόμενο του H_w επί το ενεργό πορώδες πριν τη βροχόπτωση n_{ef} :

$$Z = H_w \cdot n_{ef}$$

Είναι ευρέως παραδεκτό ότι υπάρχει ένα κρίσιμο πάχος κορεσμένης ζώνης για το οποίο ένα πρανές μεταπίπτει στην ασταθή κατάσταση. Η κρίσιμη αυτή τιμή εξαρτάται από την κλίση του πρανούς, τη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών που το δομούν και τη γεωμετρία της ροής μέσα στη ζώνη κορεσμού. Για λόγους απλούστευσης, λαμβάνεται υπ' όψη ολόκληρη η ζώνη των αλλουβίων και το H_w εκφράζει την κάθετη διάσταση, δηλ. το συνολικό πάχος. Τα πρανή που είναι επιρρεπή σε κατολίσθηση χαρακτηρίζονται συνήθως από υψηλή ζώνη απορρόφησης (Δεβενέ, 2004).

4. Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένης λεκάνης απορροής

Η λεκάνη απορροής ως σύστημα μετασχηματισμού των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή (Τσακίρης, 2001), έχει την ιδιότητα να συλλέγει όλες τις σταγόνες βροχής που πέφτουν στο εσωτερικό της και να εμπεριέχει όλη την κατοπινή πορεία τους προς το έδαφος, τα ρυάκια, τα υδατορεύματα, τα ποτάμια. Τα εσωτερικά χαρακτηριστικά της λεκάνης εμπλουτίζονται με την ύπαρξη δάσους, η οποία προσφέρει σημαντικές επιπρόσθετες ευεργετικές επιδράσεις. Ένα μέρος του νερού της βροχής κατεισδύει μέσα στους πόρους του εδάφους, ένα άλλο κατακρατείται από την φυτοκάλυψη και ένα τρίτο ακολουθεί μια επιφανειακή πορεία (επιφανειακή απορροή). Σε δάση της μορφής της Πάρνηθας, ο συντελεστής απορροής- το ποσοστό δηλαδή του ποσού της βροχής που πέφτει σε μια περιοχή και απορρέει επιφανειακά- κυμαίνεται από 2,5-10%. Τα άλλα 30% συγκρατούνται από την κομοστέγη του δάσους, 15% καταναλώνονται για τις ανάγκες του και το υπόλοιπο διηθείται στο έδαφος και συγκρατείται στο πλούσιο σύστημα πόρων του εδάφους. Το δασικό έδαφος, λοιπόν, δρα ως μια τεράστια ρυθμιστική δεξαμενή που συγκρατεί τα νερά κατά τη διάρκεια των βροχών και τα αποδίδει κατά την ξηρή περίοδο εφοδιάζοντας τις επιφανειακές πηγές και τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα.

Αντιλαμβανόμαστε ότι η δασική βλάστηση μιας λεκάνης απορροής συμβάλλει τόσο στη συγκράτηση και αποθήκευση σημαντικού ποσοστού βροχής ενός επεισοδίου, όσο και στην προστασία του εδάφους από τη διάβρωση. Κατά συνέπεια, ο κίνδυνος πλημμύρας εξαλείφεται ή περιορίζεται σημαντικά από μικρά έως μέτρια και από μεγάλα επεισόδια βροχής αντίστοιχα. Η επίδραση της βλάστησης στις πλημμύρες σήμερα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την αριθμητική έκφραση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας βροχής. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν την υδατοσυγκράτηση από τη δασική βλάστηση, τη φυλλάδα και το χούμο, τη διήθηση της βροχής στο έδαφος, τη δημιουργία επιφανειακής και υπεδάφιας απορροής, τη μόνιμη και παροδική συγκράτηση ενός μέρους της βροχής από το έδαφος υπό μορφή υγρασίας, καθώς και τη διάβρωση του εδάφους. Οι υδρολογικές αυτές διεργασίες παρουσιάζονται

στο σχήμα 4.1 και οι αριθμητικές τους τιμές παρουσιάζουν ένα εύρος από περιοχή σε περιοχή, που εξαρτάται από το δασικό είδος, τον τύπο του εδάφους, την τοπογραφία και γεωμορφολογία της λεκάνης, τα χαρακτηριστικά των κατακρημνισμάτων κλπ. Ειδικότερα:

➤ Υδατοσυγκράτηση από την κόμη, τη φυλλάδα και το χούμο

Η υδατοσυγκράτηση από ένα δάσος πλατύφυλλων και κωνοφόρων μπορεί να ανέλθει σε 15-20 και σε 20-35 mm βροχής ανά επεισόδιο, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, από τη βροχή που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους ένα μέρος συγκρατείται από τη δασική φυλλάδα και το χούμο και αυτό μπορεί να ανέλθει σε 2 mm περίπου ανά ένα εκατοστό βάθους φυλλάδας και χούμου. Επομένως η ποσότητα αυτή κυμαίνεται από 5-20 mm βροχής, ανάλογα με το πάχος/ βάθος των στρωμάτων αυτών.

➤ Διήθηση της βροχής στο έδαφος και συνθήκες δημιουργίας επιφανειακής και υπεδάφιας απορροής

Η δασική βλάστηση με τις ρίζες και την αποσύνθεση των φύλλων και κλάδων, επηρεάζει ευνοϊκότερα τη δομή του εδάφους και δημιουργεί πολύ μεγάλες ταχύτητες διήθησης της βροχής, που σπάνια ξεπερνούν τις εντάσεις τις βροχής. Κατά συνέπεια η βροχή διηθείται και κινείται υπό τη μορφή υπεδάφιας απορροής. Μάλιστα, λόγω της αφθονίας χουμικών ουσιών και έντονης βιολογικής δραστηριότητας στα δασικά εδάφη, οι κόκκοι του εδάφους είναι συγκολλημένοι μεταξύ τους με ισχυρούς ηλεκτρικούς δεσμούς (αργιλοχουμικά σύμπλοκα) και έτσι δυσχεραίνεται η απόσπαση και παράσυρσή τους προς τα κάτω με την απορροή. Ο υδρογεωλογικός αυτός μηχανισμός καθιστά το δάσος το μεγαλύτερο και σταθερότερο προστάτη του εδάφους και τον κύριο αποταμιευτή και μεσολαβητή νερού προς εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων (Αλεξανδρή, 1990). Επισημαίνεται ότι οι θέσεις όπου παρατηρείται επιφανειακή απορροή σε δασωμένες λεκάνες απορροής είναι το κατάστρωμα και τα πρηνή των δρόμων, τα μονοπάτια, οι σύρτες μετατόπισης ξυλείας, οι επιφάνειες βράχων, τα πολύ αβαθή εδάφη, οι παραρεμάτιες ζώνες κ.ά. Η απορροή από τις θέσεις αυτές είναι εκείνη που μετατρέπεται σε πλημμυρική στην κοίτη του υδατορεύματος.

➤ Συγκράτηση υγρασίας από το έδαφος

Η ποσότητα υγρασίας που συγκρατεί το έδαφος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και μεταξύ αυτών είναι το βάθος του, η υφή και η δομή, η αρχική του υγρασιακή κατάσταση, το ύψος και η διάρκεια της βροχής κλπ. Στον πίνακα παρουσιάζεται σε τρεις κατηγορίες η μέγιστη ποσότητα υγρασίας που μπορούν να συγκρατήσουν οι διάφορες κατηγορίες εδαφών σε mm/1cm βάθους αδιαπέρατου στρώματος.

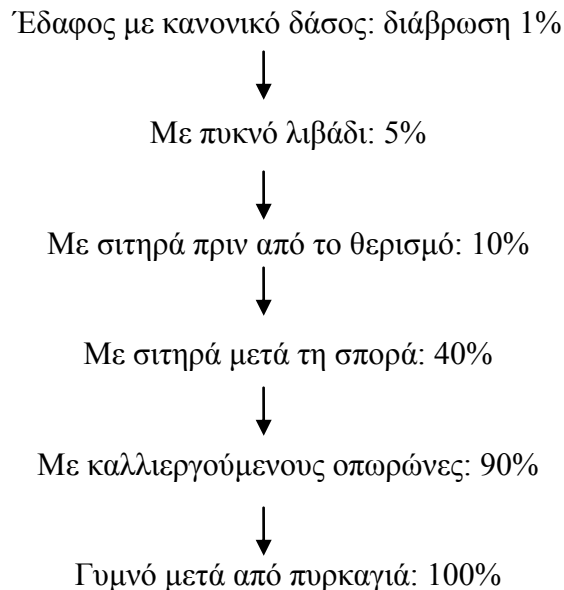
Πίνακας 4.1: Συγκράτηση υγρασίας από διάφορες κατηγορίες εδαφών

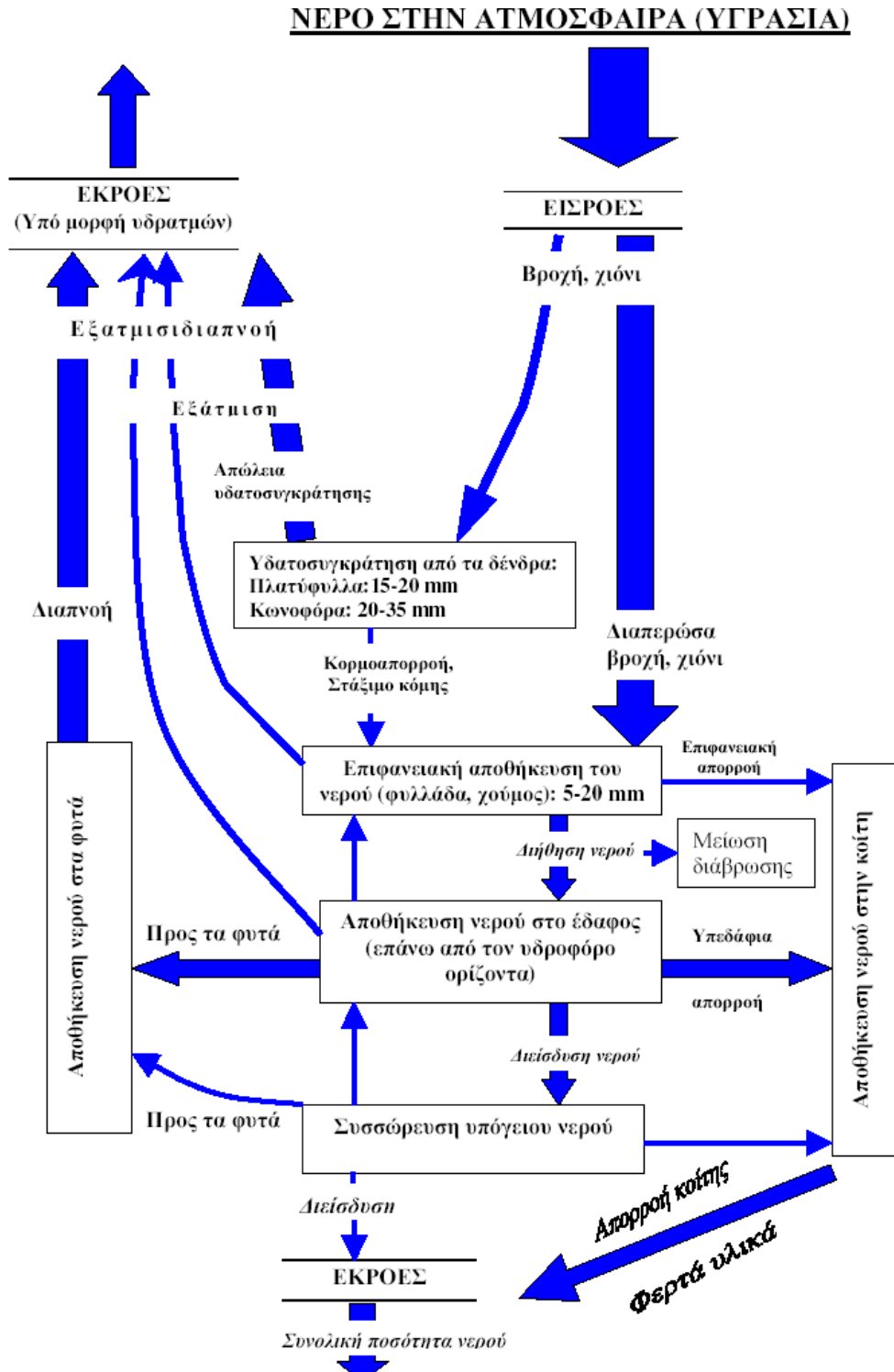
Είδος εδαφών	Πορόδες εδάφους (αναλογία κατ' όγκο)	Συγκράτηση υγρασίας (mm/1cm βάθος)		
		Μέχρι το σημείο μόνιμου μαρασμού	Μεταξύ του σημείου μόνιμου μαρασμού και της υδατοχωρητικότητας	Χώρος μακροπόρων
1	2	3	4	5
Εδάφη λεπτής άμμου	0.41	0.6	0.5	3.0
Αμμοπηλώδη	0.42	0.6	0.8	2.8
Αμμοπηλώδη λεπτής γης	0.44	0.7	1.2	2.5
Πηλώδη	0.46	1.0	1.4	2.2
Ψλοπηλώδη	0.47	1.3	1.5	1.9
Ελαφρά αργιλοπηλώδη	0.48	1.5	1.5	1.8
Αργιλοπηλώδη	0.49	1.7	1.5	1.7
Βαριά αργιλοπηλώδη	0.50	2.0	1.3	1.7
Αργιλώδη	0.52	2.3	1.2	1.7

Από τις κατηγορίες αυτές, η πρώτη αναφέρεται στην ποσότητα υγρασίας που συγκροτεί το έδαφος μέχρι το σημείο μαρασμού (στήλη 3), η δεύτερη μεταξύ αυτού και της υδατοχωρητικότητας και η τρίτη μέχρι πλήρους κάλυψης όλων των μακροπόρων του. Οι τιμές αυτές εκτιμήθηκαν από μεγάλο αριθμό μετρήσεων εδαφικών δειγμάτων στην Αμερική και μπορεί να υποστηριχθεί πώς ισχύουν, κατά μεγάλη προσέγγιση, για τις ίδιες κατηγορίες ελληνικών εδαφών. Διευκρινίζεται ακόμη ότι ενώ υγρασία συγκρατούν και τα γεωργικά εδάφη, τα δασικά έχουν πάντοτε τη δυνατότητα να συγκρατούν μεγαλύτερη ποσότητα, εξαιτίας του μεγαλύτερου κατά κανόνα βάθους διήθησης της βροχής σε αυτά και του διαθέσιμου χώρου από τη συνεχή μετακίνηση του νερού και τη μεγάλη διαπνοή των δασικών ειδών.

➤ Διάβρωση του εδάφους και φερτές ύλες σε δασωμένες λεκάνες απορροής

Η επίδραση της διάβρωσης του εδάφους, θα μπορούσε να θεωρηθεί ως έμμεση, αφού με την ύπαρξη μεγάλων ταχυτήτων διήθησης της βροχής σε δασωμένες λεκάνες, αποφεύγεται η δημιουργία επιφανειακής απορροής και κατά συνέπεια η διάβρωση του εδάφους. Εμπειρικά μοντέλα καταδεικνύουν μια αρνητική εκθετική σχέση ανάμεσα στο ποσοστό διάβρωσης του εδάφους και στην κάλυψη με βλάστηση (Elwell and Stocking, 1976). Μάλιστα τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν σε μοντέλα διάβρωσης δείχνουν ότι η επικάλυψη παρέχει αντίσταση στις διαβρωτικές δυνάμεις ανεξάρτητα από το είδος της κάλυψης (Emmerich, 1994, Hakonson, 1999). Επομένως η απορροή και οι παροχές αιχμής των υδατορευμάτων είναι σημαντικά μειωμένες, λόγω και της μικρής ποσότητας φερτών υλικών που περιέχουν. Είναι γενικά αποδεκτό ότι σημαντική μείωση της δασοκάλυψης μιας λεκάνης, αυξάνει την ποσότητα των φερτών υλικών, τουλάχιστον στο εκατονταπλάσιο εκείνης πριν την αποδάσωση. Επιπλέον, για επίπεδο κάλυψης βλάστησης κάτω από το 30%, τα φυτά είναι δυνατόν να μη μπορέσουν να αποκτήσουν ξανά τα αρχικά συστατικά του εδάφους και σαν αποτέλεσμα να επέλθει υποβάθμιση του συστήματος των φυτών (Thornes, 1987). Η δασική βλάστηση παρέχει κατά τον Αλεξανδρή (1990) την αποτελεσματικότερη προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, ακολουθούν κατά φθίνουσα σειρά αποτελεσματικότητας προστασίας το πυκνό λιβάδι και στη συνέχεια οι διάφορες γεωργικές καλλιέργειες με τις κατωτέρω αναλογίες:





Σχήμα 4.1: Υδρολογικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή στο στόμιο μιας δασωμένης λεκάνης απορροής (Μπαλούτσος, 2001)

5. Δασικές πυρκαγιές

5.1 Εισαγωγή

Η φωτιά αποτελεί μια ταχύτατη οξειδωση που την αντιλαμβανόμαστε ως φλόγα, είναι δε φαινόμενο το οποίο χρήζει μελέτης μέχρι και στις μέρες μας. Οι Frinston, Westenburg (1965), και Καϊλίδης (1990), δηλώνουν ότι και η παραμικρή φλόγα περιλαμβάνει μερικές συνεχόμενες χημικές αντιδράσεις, στις οποίες υπεισέρχονται και η αεροδυναμική, η θερμοαγωγιμότητα και η μοριακή διασπορά.

Στην περιοχή της Μεσογείου η φωτιά είναι το σημαντικότερο πρόβλημα του χερσαίου φυσικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η αύξηση τόσο του αριθμού των πυρκαγιών όσο και των καμένων δασικών εκτάσεων κατά την τελευταία εικοσαετία λόγω κλιματικών αλλαγών και ανθρωπογενών επιδράσεων απασχολεί έντονα την Ευρωπαϊκή Ένωση που έχει λάβει μια σειρά θεσμικών μέτρων για την αντιμετώπισή τους. Παρ' όλα αυτά, οι πυρκαγιές εξακολουθούν να αποτελούν συχνό φαινόμενο, ενώ φαίνεται πως οι περιοχές που έχουν πληγεί, πιθανότατα θα καούν ξανά ([Naveh, 1974], [Trabaud et al., 1985], [Thanos et al., 1989] και [Thanos & Marcou, 1991]).

Στην Ελλάδα υπάρχει σχεδόν εκθετική αύξηση του αριθμού των δασικών πυρκαγιών και των καμένων δασικών εκτάσεων από τη δεκαετία του '80 και μετά. Από το διάγραμμα των επίσημων στατιστικών στοιχείων δασικών πυρκαγιών της Ελλάδας παρατηρείται μεγάλη αύξηση τα τελευταία 25 χρόνια, ιδίως σε περιόδους ξηρασίας ή πολιτικών δραστηριοτήτων (1981, 1985, 1988, 1998, 2000), όπου οι ετησίως καμένες εκτάσεις ξεπέρασαν το 1.000.000 στρέμματα. Οι δασικές πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2000 ξεπέρασαν κάθε προηγούμενο, τόσο σε καμένες εκτάσεις όσο και σε αξία των δασών που κάηκαν. Τη χρονιά αυτή χάθηκαν δάση «μνημεία» για τη χώρα μας, όπως είναι μέρος των δασικών συμπλεγμάτων της Βορείου Πίνδου, του Μαινάλου, της Σάμου και του Εθνικού Δρυμού Πρεσπών. Παρατηρείται ότι οι καμένες εκτάσεις της τελευταίας

δεκαετίας είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές της προηγούμενης. Είναι χαρακτηριστικό, πως μόνο το 2000 κήκαν όσες εκτάσεις είχαν καεί συνολικά στη δεκαετία του 1970. Το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών πολλές χρονιές λαμβάνει διαστάσεις εθνικής καταστροφής, παρά τη βελτίωση των πυροσβεστικών μέσων που διαθέτει η χώρα. Η περίοδος 2001-2006 παρουσίασε μεγάλη ύφεση με περίπου 100.000 στρέμματα καμένων δασικών εκτάσεων κατά μέσο όρο ετησίως, αλλά το 2007 υπήρξε η χειρότερη χρονιά για την Ελλάδα από άποψη δασικών πυρκαγιών: κήκαν περίπου 2.000.000 στρέμματα ενώ χάθηκαν 67 ανθρώπινες ζωές στις μεγάλες δασικές πυρκαγιές της Πελοποννήσου και της Ευβοίας.

Η Ελλάδα έχει πρόβλημα μεγάλων δασικών πυρκαγιών (wildfires). Οι πυρκαγιές που ξεφεύγουν από την αρχική επέμβαση των δασοπυροσβεστικών δυνάμεων και καταστρέφουν μεγάλες εκτάσεις (>10.000 στρέμματα ανά πυρκαγιά) αντιπροσωπεύουν μόνο 4% του συνόλου των πυρκαγιών αλλά είναι υπεύθυνες για περισσότερο από 75% των συνολικά καμένων εκτάσεων. Κατά τη διάρκεια μεγάλων δασικών πυρκαγιών παρατηρούνται οι περισσότερες απώλειες ανθρώπινων ζωών και καταστροφής περιουσιακών στοιχείων. Μακροπρόθεσμα οι πυρκαγιές συντελούν στην υποβάθμιση του οικοσυστήματος, και σε συνδυασμό με την υπερβόσκηση οδηγούν ένα μεγάλο μέρος της χώρας σε διάφορα στάδια ερημοποίησης (περίπου το 30% της συνολικής επιφάνειας).

5.2 Η επίδραση της φωτιάς στο έδαφος

Η φωτιά όταν προκαλείται από φυσικά αίτια (αυταναφλέξεις, κεραυνούς κλπ.) αποτελεί για το δάσος οικολογικό παράγοντα του οποίου η επίδραση μπορεί να είναι ευμενής ή δυσμενής. Αυτό εξαρτάται από τη μορφή, την ένταση και τη συχνότητα εμφάνισης της φωτιάς, καθώς και από τη σύνθεση της βλάστησης την οποία καίει. Υπάρχουν δασικά φυτικά είδη τα οποία είναι πολύ ευάλωτα στη φωτιά και άλλα που καίγονται δύσκολα. Μερικά είδη έχουν αναπτύξει μηχανισμούς προσαρμογής στον παράγοντα της φωτιάς οπότε η επιβίωση και η διασπορά τους ευνοείται από τη φωτιά, π.χ. για να φυτρώσουν οι σπόροι τους έχουν ανάγκη από υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται με τη φωτιά.

Οι δασικές πυρκαγιές στη φυσική τους συχνότητα θεωρούνται μια φυσική διεργασία για τα οικοσυστήματα. Μάλιστα, τα νιτρικά που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της φωτιάς και εισάγονται στο έδαφος σε μορφή αμμωνίας, συχνά δίνουν μια διατροφική ενίσχυση και βοηθούν την εγκατάσταση βλάστησης μετά την πυρκαγιά (Dennis 1988). Συνεπώς, η πυρκαγιά είναι δυνατόν να είναι και επωφελής αφού βοηθά στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών του εδάφους, βελτιώνει τις συνθήκες φυσικής αναγέννησης του δάσους επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη διάνοιξη και αποκαλύπτοντας το ορυκτό έδαφος και μειώνει την αφύσικη συσσώρευση της νεκρής καύσιμης ύλης.

Ακόμη, η έλλειψη ανταγωνισμού που δημιουργείται με την εξαφάνιση της υπόλοιπης βλάστησης μετά το πέρασμα της φωτιάς επιτρέπει να εγκατασταθούν στην καμένη περιοχή είδη τα οποία θα ήταν αδύνατο να εγκατασταθούν σε συνθήκες ανταγωνισμού.

Σε ένα δασικό έδαφος, οι ζώντες οργανισμοί και η οργανική ουσία είναι συγκεντρωμένα επάνω ή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και ελαττώνονται γεωμετρικώς με το βάθος. Επομένως η οργανική ουσία που είναι πολύ διαδεδομένη στα δασικά οικοσυστήματα, είναι άμεσα εκτεθειμένη στη φωτιά και συνήθως καταστρέφεται εντελώς. Κατά συνέπεια, όλες οι φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες- που συνδέονται με την οργανική ουσία στα δασικά εδάφη- επηρεάζονται από τις δασικές πυρκαγιές. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τη δομή, την εναλλακτική ικανότητα, πολλά διαθέσιμα και ολικά θρεπτικά στοιχεία και τη μικροβιολογική δραστηριότητα.

Η οργανική ουσία αρχίζει να αλλοιώνεται όταν η θερμοκρασία αγγίζει τους 200 °C και καταστρέφεται σχεδόν τελείως στους 450 °C. Στις μεγάλης εντάσεως θερινές πυρκαγιές στη χώρα μας, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του εδάφους δύναται να υπερβεί σε πολλές θέσεις, τους 900 °C. Πολύ μεγάλες θερμοκρασίες παρατηρούνται στα 5 πρώτα εκατοστά, ενώ μπορεί να φτάσουν σε επικίνδυνα -για τους ζωντανούς οργανισμούς- επίπεδα στο πρώτο εκατοστό από την επιφάνεια του εδάφους. Από την άλλη, η υγρασία του εδάφους είναι εκείνη που επηρεάζει τις επιδράσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους. Για παράδειγμα, παρά το ότι οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούνται σε στεγνά

εδάφη, βρεγμένο έδαφος οδηγεί σε γρήγορη αύξηση θερμοκρασίας και μάλιστα σε επικίνδυνα επίπεδα.

Όσον αφορά τα οργανικά εδάφη, μετά την καύση της οργανικής ουσίας το οικοσύστημα καταρρέει πλήρως, οπότε οι περιοχές αυτές μεταπίπτουν σε ελώδεις εκτάσεις. Επομένως, αποθέματα συσσώρευσης τύρφης εκατομμυρίων ετών καταστρέφονται με το πέρασμα μιας φωτιάς και οι εκτάσεις αυτές ουσιαστικά εξαιρούνται από τις δασικές παραγωγικές εκτάσεις, αφού αντί εδάφους παραμένει κάποιο σκελετικό, αδρανές εδαφικό υλικό.

Καθώς, λοιπόν, η οργανική ουσία της βλάστησης –φύλλα, μικρά κλαδιά, χλόη- που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους καίγεται, το μεγαλύτερο ποσοστό από εκείνη (σχεδόν 90%), διαφεύγει στην ατμόσφαιρα υπό τη μορφή καπνού, απελευθερώνοντας έτσι διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και διάφορους στερεούς ρύπους. Το υπόλοιπο ποσοστό (περίπου 10%) της εξατμισμένης οργανικής ουσίας διεισδύει σε βάθος 3- 5 εκατοστά εντός του εδάφους. Καθώς το αέριο εισέρχεται σε βαθύτερα και ψυχρότερα στρώματα, συμπυκνώνεται και δημιουργεί ένα αδιαπέρατο από το νερό στρώμα πάχους 5-6 mm, γνωστό ως υδρόφοβο στρώμα (Wells et al. 1979). Μελέτες δείχνουν ότι υδροφοβικά εδάφη δε δημιουργούνται πάντα. Μεταξύ των γεγονότων που συμβάλλουν στην ανάπτυξή τους είναι η ύπαρξη ενός μεγάλου πάχους στρώματος από υπολείμματα πριν τη φωτιά, μια σοβαρή, αργά μεταδιδόμενη πυρκαγιά, ή σκληροτράχηλα εδάφη όπως εκείνα της άμμου και του κατεστραμμένου γρανίτη. Επιπλέον, ο βαθμός της επερχόμενης υδροφοβικότητας εξαρτάται από την δριμύτητα της πυρκαγιάς, δηλαδή οι περισσότεροι σοβαρές πυρκαγιές, θεωρείται ότι προκαλούν πιο ανθεκτικά υδροφοβικά στρώματα (DeBano, 1981). Οι Σιδηρόπουλος – Λουκάς καταλήγουν στο ότι, ενώ απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για την ανάπτυξή της, η υδροφοβικότητα υποχωρεί ή και αναιρείται σε ακόμη υψηλότερες. Συνεπώς, σε μια δασική πυρκαγιά η τελική υδροφοβικότητα εξαρτάται μεταξύ άλλων και από την τυχόν προϋπάρχουσα.

Το νερό μιας μεγάλης σε ένταση βροχής, διηθείται στο στρώμα της στάχτης, κινείται πάνω από το υδρόφοβο στρώμα και ρέει επιφανειακά. Αν και είναι δυνατό να περάσει μικρή ποσότητα νερού από το στρώμα αυτό μέσα από μικρά ρυάκια (Wieczorek, Jager 1996), κατά κανόνα το υδρόφοβο στρώμα εμποδίζει τη διήθηση, ευνοώντας έτσι την αύξηση της επιφανειακής απορροής. Το άφθονο νερό που συγκεντρώνεται στο έδαφος πάνω από το αδιάβροχο στρώμα, πολτοποιεί αυτό το τμήμα του εδάφους, το οποίο στη συνέχεια μετακινείται προς τα κατόντι υπό την επίδραση της κλίσης του πρανούς. Έτσι εξηγείται η αθρόα μεταφορά στερεών υλικών, στα πεδινά και στις θάλασσες μετά από δασικές πυρκαγιές (Barnes et al., 1992).

Επιπλέον στο θερμαινόμενο εδαφικό στρώμα με την επίδραση των σταγόνων της βροχής, πραγματοποιείται διάσπαση των συσσωματωμάτων σε μικρότερα μόρια του εδάφους και μετακίνηση των μορίων του εδάφους που σφραγίζουν τους επιφανειακούς πόρους αυτού. Συνεπάγεται, λοιπόν, η μέχρι μηδενισμού μείωση της διείσδυσης του νερού της βροχής στο έδαφος και κατ' επέκταση η απότομη αύξηση της επιφανειακής απορροής.

Η φωτιά, λοιπόν, καταναλώνει τη βλάστηση και την οργανική ύλη του εδάφους, και μπορεί να φέρει ανισορροπία στην επιφάνεια του εδάφους σε απότομες πλαγιές/ πρανή (Shakesby and Doerr, 2006). Αμέσως μετά τη φωτιά και κατά τη διάρκεια των επόμενων μηνών, η διήθηση μειώνεται σημαντικά, ενώ παράλληλα αυξάνεται η διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους αφού το γυμνό έδαφος είναι εκτεθειμένο στην επίδραση της βροχόπτωσης και της επιφανειακής απορροής (Inbar et al., 1998 και Giovannini et al., 2001).

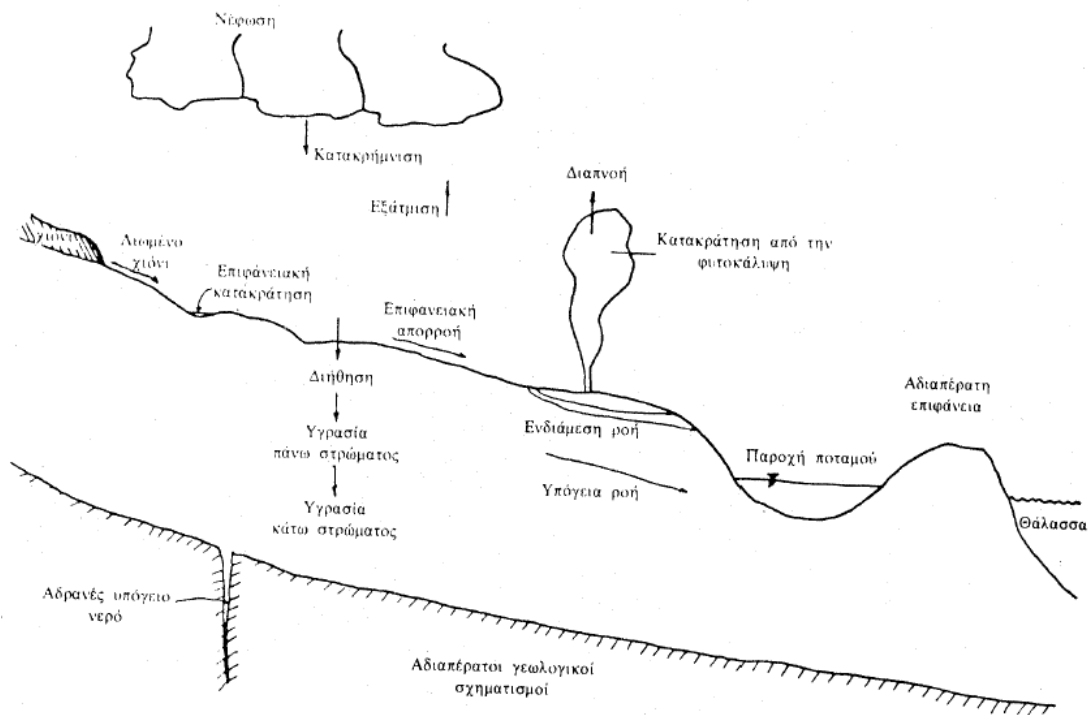
Ο πίνακας 5.1 παρουσιάζει συνοπτικά τις διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροή μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας από ισχυρή βροχή.

Πίνακας 5.1: Διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροή μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας από ισχυρή βροχή (Μπαλούτσος, 2001)

<p>Δημιουργία υδρόφοβου στρώματος εντός του εδάφους μετά την πυρκαγιά από καύση οργανικής ουσίας και διείδυση χημικών ενώσεων εντός αυτού. Συντελεί στην αύξηση της επιφανειακής απορροής και σε πλάγια κίνηση της υπεδάφιας απορροής</p> <p style="text-align: right;">1</p>	<p>Πτώση μεγαλύτερου ύψους βροχής στην επιφάνεια της λεκάνης λόγω έλλειψης βλάστησης - υδατοσυγκράτησης.</p> <p style="text-align: right;">2</p>
<p>Συγκράτηση λιγότερης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της καύσης των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων (φυλλάδας, χούμου, κλπ.)</p> <p style="text-align: right;">3</p>	<p>Κατακερματισμός των εδαφικών συσσωμάτων λόγω μεγαλύτερης ενέργειας των σταγόνων της βροχής.</p> <p style="text-align: right;">4</p>
<p>Μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής στο έδαφος λόγω απόφραξης των πόρων του.</p> <p style="text-align: right;">5</p>	<p>Δημιουργία επιφανειακής απορροής στις πλαγιές της λεκάνης.</p> <p style="text-align: right;">6</p>
<p>Μείωση της αντίστασης του εδάφους στην παράσυρση από την επιφανειακή απορροή, λόγω έλλειψης βλάστησης.</p> <p style="text-align: right;">7</p>	<p>Διάβρωση και παράσυρση του εδάφους από τις πλαγιές της λεκάνης προς τα κατάντη και τις κοίτες των υδατορευμάτων.</p> <p style="text-align: right;">8</p>
<p>Σημαντική και απότομη αύξηση της υδατοστερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων.</p> <p style="text-align: right;">9</p>	<p>Διάβρωση του πυθμένα και των πρανών της κοίτης των υδατορευμάτων και μεταφορά των υλικών προς τα κατάντη.</p> <p style="text-align: right;">10</p>
<p>Υπερχείλιση της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος και επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση ύπαρξης ανθρώπινων παρεμβάσεων.</p> <p style="text-align: right;">11</p>	<p>Δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στην πεδινή γεωργική και κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.</p> <p style="text-align: right;">12</p>

5.3 Η διάβρωση ως αποτέλεσμα πυρκαγιάς

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, μια από τις σημαντικότερες υπηρεσίες που προσφέρει το δάσος και οι δασικές εκτάσεις γενικότερα, είναι η αντιδιαβρωτική προστασία τους στα δασικά εδάφη και στο γεωλογικό απόθεμα των λεκανών απορροής καθώς και ο ρυθμιστικός ρόλος στο υδατικό ισοζύγιο μιας περιοχής. Ο υδρολογικός κύκλος παρουσιάζεται και στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 5.2)

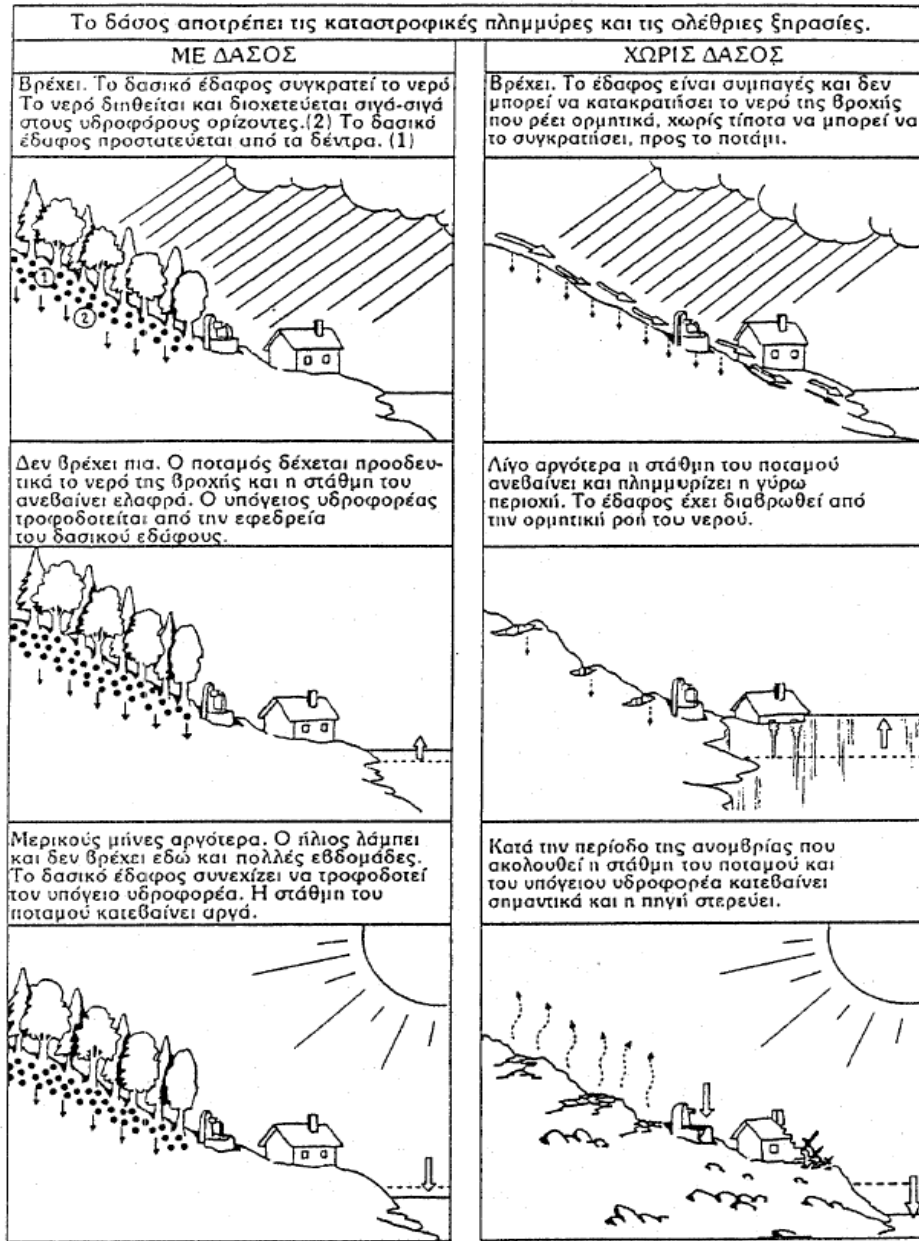


Σχήμα 5.1: Ο υδρολογικός κύκλος (Μιμίκου, 1994)

Η εναπομένουσα προς απορροή ποσότητα νερού παραλαμβάνεται από μικρά στην αρχή ρεύματα, μεγαλύτερα στη συνέχεια, χείμαρρους, χειμαρροποτάμους, ποταμούς και εκχύνεται σε λίμνες ή στη θάλασσα. Ο τρόπος και η διαδικασία κίνησης του απορρέοντος νερού εξαρτάται από τέσσερις βασικούς παράγοντες οι οποίοι δημιουργούν για κάθε υδρογραφική μονάδα ή ευρύτερη περιοχή ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (Kotoulas 1972, Στεφανίδης 1991).

Οι παράγοντες αυτοί περιλαμβάνουν το κλίμα, το ανάγλυφο, η βλάστηση και το γεωλογικό απόθεμα. Τα κατακρημνίσματα αποτελούν τον παράγοντα επίθεσης πάνω στο γεωλογικό υπόθεμα, το ανάγλυφο ασκεί ρυθμιστική επίδραση και το γεωυπόθεμα των λεκανών απορροής διαμορφώνεται από τα πετρώματα που το συγκροτούν. Η βλάστηση που παρεμβάλλεται μεταξύ των κατακρημνισμάτων και του γεωυποθέματος μπορεί να διαχειριστεί κατάλληλα όπου υπάρχει, να επανεγκατασταθεί με αναδασώσεις απ' όπου εξέλιπε και να προστατευθεί, έτσι ώστε να ασκεί τις υδρολογικές και προστατευτικές της επιδράσεις.

Οι δασικές πυρκαγιές όμως προκαλούν δραστική μείωση της διείσδυσης και διήθησης του νερού στο έδαφος. Το γεγονός αυτό, έχει σαν άμεση συνέπεια τη συγκέντρωση και ταχεία απομάκρυνση του νερού των βροχών, με αποτέλεσμα την απώλεια νερού και γόνιμου επιφανειακού εδάφους λόγω διάβρωσης και τις μεγάλες καταστροφές στα πεδινά τμήματα με τις πλημμύρες και τις φερτές ύλες. Το ακόλουθο σχήμα φανερώνει τη σημασία ύπαρξης βλάστησης σε μια πλαγιά για την προστασία από πλημμυρικά φαινόμενα (σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα πρανούς – Συμπεριφορά δασωμένης και μη περιοχής (WWF, 1995)

Οι σταγόνες, λοιπόν, της βροχής δεν αναχαιτίζονται πλέον από την προστατευτική ασπίδα της δασικής βλάστησης, προσκρούουν με δύναμη πάνω στο έδαφος, αποσπών και παρασέρνουν πολύτιμο δασικό έδαφος, το οποίο διαμέσου των ρεμάτων το μεταφέρουν και το αποθέτουν στις πεδινές περιοχές. Είναι φανερό ότι ο μηχανισμός της διάβρωσης είναι εξαιρετικά πολύπλοκος και εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων, που κατά τον Κοτρωνάρο (1996) είναι:

➤ Το είδος της πυρκαγιάς

Ο παράγοντας αυτός καθορίζει ουσιαστικά πόσο καταστρέφεται η βλάστηση. Για παράδειγμα, στην περίπτωση μικτής πυρκαγιάς (επικόρυφη και εδάφους) η βλάστηση καταστρέφεται ολοσχερώς, οπότε το καμένο έδαφος παραμένει τελείως ακάλυπτο και διαβρώνεται σε μεγάλο βαθμό από τις επακόλουθες βροχοπτώσεις.

➤ Η συχνότητα της πυρκαγιάς

Σε περίπτωση επαναλαμβανόμενης πυρκαγιάς σε λεκάνη απορροής που δεν είχε αποκατασταθεί η βλάστηση, το έδαφος προφανώς και διαβρώνεται πιο εύκολα και σε μεγαλύτερο βαθμό.

➤ Η τοπογραφία της λεκάνης και οι τύποι του εδάφους.

Λεκάνες απορροής με πλαγιές μεγάλου μήκους και απότομες κλίσεις διαβρώνονται πολύ πιο εύκολα και περισσότερο από λεκάνες με μικρού μήκους πλαγιές και ήπιες κλίσεις. Επίσης, αμμώδη, ασβεστολιθικά και οριζόντια εδάφη εμφανίζονται πιο ανθεκτικά στη διάβρωση.

➤ Η γεωλογία της λεκάνης

Η ύπαρξη αδιαπέρατων πετρωμάτων, όπως φλύσχη, σχίστη, σε αντίθεση με ασβεστόλιθο εμποδίζει τη διείσδυση της βροχής και σε περίπτωση αβαθούς εδάφους δημιουργείται εύκολα κορεσμένη επιφανειακή απορροή που στη συνέχεια συμβάλλει στη διάβρωση του εδάφους.

➤ Οι καιρικές συνθήκες μετά από την πυρκαγιά

Η διάβρωση του εδάφους είναι μεγάλη όταν αμέσως μετά από μια έντονη πυρκαγιά που καταστρέφει ολόκληρη την προστατευτική βλάστηση και τον δασικό τάπητα, παρατηρηθεί μεγάλης εντάσεως βροχή. Στην περίπτωση αυτή η βροχή βρίσκει το έδαφος εντελώς απροστάτευτο και το επιφανειακό έδαφος χαλαρό και εύκολα παρασυρόμενο. Αντίθετα, οι ζημιές από τη διάβρωση είναι μικρότερες, όταν μετά από την πυρκαγιά επακολουθήσουν μικρής εντάσεως και συχνά επαναλαμβανόμενες βροχές, οι οποίες ιδιαίτερα βοηθούν να αρχίσει η αναχλόαση του εδάφους. Η επίπτωση της βροχής διαφοροποιείται ανάλογα με την περιεκτικότητα και τη φυσική κατάσταση της υγρασίας

στο έδαφος. Η εξάτμιση, η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, την πνοή ξηρών ανέμων, τις υψηλές θερμοκρασίες, τη μεσημβρινή έκθεση, τη γειννίαση με λίμνες και τη βλάστηση είναι ο καθοριστικός παράγοντας της περιεκτικότητας σε υγρασία. Η πήξη του εδαφικού νερού που προκαλείται σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι ένας αναχαιτιστικός μηχανισμός κατά της διαβρωτικής δραστηριότητας της βροχής (Αλεξανδρής, 1990).

➔ Οι δραστηριότητες στη λεκάνη απορροής μετά από την πυρκαγιά

Στην περίπτωση που η πυρκαγιά συνδυαστεί με άλλου είδους διαταραχές όπως η βοσκή, κοπή και μεταφορά καμένων δέντρων, παράνομες καταλήψεις εδαφών και οικοδόμηση σε αυτές, καλλιέργεια κλπ. , συντελεί στην αναμόχλευση του εδάφους και στη διάβρωση αυτού από τις βροχοπτώσεις που ακολουθούν.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι η απορροή και η διάβρωση των πρηνών πριν και μετά από τη φωτιά, εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, που περιλαμβάνουν τις ιδιότητες του εδάφους, την κλίση της πλαγιάς, ένταση της βροχόπτωσης και της πυρκαγιάς, μέγεθος και σύσταση της περιοχής μελέτης (Johansen 2001). Για παράδειγμα, ο συνδυασμός μεγάλου μεγέθους και έντασης βροχής αμέσως μετά τη φωτιά, αναμένεται να επιφέρει μεγαλύτερη διάβρωση σε σχέση με την αντίστοιχη κατά τη διάρκεια μιας μεσαίας έντασης βροχής (Prosser and Williams, 1998). Μάλιστα, σε μελέτη στην περιοχή της Μεσογείου (O. González-Pelayo, 2006) η κατανομή της βροχής υποδεικνύει την ύπαρξη δύο περιόδων. Μία περίοδος χαρακτηρίζεται από μέση ένταση και χαμηλή διάρκεια την άνοιξη και το καλοκαίρι και μια άλλη, το χειμώνα, με βροχές μεγάλης διάρκειας και χαμηλής έντασης. Παρατηρούνται, λοιπόν, σημαντικές αλλαγές στην απορροή μεταξύ των δύο περιόδων, που φτάνουν το 20% σε μη καμένες περιοχές και το 60% στις καμένες.

Ο χρόνος και το μέγεθος της διάβρωσης εξαρτάται όπως αναφέρθηκε, από μια σειρά παραγόντων. Έρευνες όμως έχουν δείξει ότι στην περιοχή της Μεσογείου η μεγαλύτερη αύξηση σε απορροή και η μεγαλύτερη απώλεια εδάφους συντελούνται 1-2 χρόνια μετά την πυρκαγιά ([Helvey, 1980], [Robichaud & Waldrup, 1994], [Inbar et al., 1998]). Οι Andreu et al. (2001) υποστηρίζουν ότι οι απώλειες του εδάφους είναι μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια των 4-6 πρώτων μηνών μετά από τη φωτιά και οι Cerdà et al. (1995)

σημειώνουν μια μεγάλη μείωση στο ποσοστό της διάβρωσης δύο χρόνια μετά τη φωτιά. Μάλιστα, οι Pausas et al. (1999) αναφέρουν ότι απαιτούνται 1-3 χρόνια για να επανέλθει το 50-60% της καμένης περιοχής, ενώ σχεδόν όλες οι μελέτες έχουν δείξει ότι τα ποσοστά της εδαφικής διάβρωσης επιστέφουν στα παλιά επίπεδα μέσα σε 3-9 έτη μετά από τη φωτιά (Robichaud et al., 2000).

6. Υδρολογικά μοντέλα κατολισθήσεων

6.1 Εισαγωγή

Η μοντελοποίηση υδρολογικών παραμέτρων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στις κατολισθήσεις έγινε αποδεκτή σχετικά αργά, παρά την ευκολία που εκείνη προσφέρει (Anderson & Richards, 1987). Η αναπαράσταση της υδρολογίας στα μοντέλα ευστάθειας πραγματοποιείται κυρίως σε τρεις περιπτώσεις: όπου οι παράμετροι των υδάτων δε μπορούν να παρατηρηθούν, όπου πρέπει να γίνει προσομοίωση ολισθήσεων σε πραγματικές ή υποθετικές συνθήκες και τέλος όπου υπάρχει ανάγκη να εξεταστούν μελλοντικά σενάρια σχετικά με αλλαγές στο περιβάλλον. Η διαδικασία της μοντελοποίησης αφορά στην προσομοίωση της πίεσης των πόρων και των προβλημάτων που προκύπτουν από αρνητικές πιέσεις, της απορρόφησης και της ανταπόκρισης των συστημάτων ρηχών κατολισθήσεων (Anderson & Kemp 1987, Collinson 1996).

Σε συνδυαστικό θεματικό επίπεδο επικινδυνότητας καταλήγει το μοντέλο PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Δασών του Όρεγκον των ΗΠΑ (Brundsten 1999). Ακόμη, συχνά γίνεται λόγος για τα μοντέλα που βασίζονται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών (FE/FD). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία ή τις πεπερασμένες διαφορές προκειμένου να λύσουν εξισώσεις κορεσμένης ή ακόρεστης ροής σε μια διδιάστατη ή τριδιάστατη «φέτα» κατολίσησης. Προσομοιώνεται η ανακατανομή του νερού και έτσι είναι δυνατή η χωρική και χρονική μελέτη της κατανομής της πίεσης των πόρων και η σύνδεσή της με την ευστάθεια του πρανούς. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων είναι: HYSWASOR (van Genuchten 1980), MODFLOW (McDonald & Harbaugh 1988), SEEP/W (GEOSLOPE 1994), HILLFLOW (Bronstert 1994), GWFLACT v.2.0 (Terlien 1996).

Μάλιστα, κάποια υδρολογικά μοντέλα μπορούν να συνδεθούν με μοντέλα ευστάθειας πρανών ώστε να αναπαραστήσουν δυναμικές συνθήκες. Το SEEP/W –GEOSLOPE μπορεί να αναλύσει διαφορετικούς τύπους γεωμετρίας με την απλοποιημένη μέθοδο Jambu, με δεδομένες συγκεκριμένες γεωτεχνικές ιδιότητες εδάφους σε διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες. Έτσι καταλήγει στην επιφάνεια με το μικρότερο συντελεστή ασφαλείας, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας υπολογίζεται για όλες τις πιθανές επιφάνειες ολίσθησης. Άλλο παράδειγμα αποτελεί το Συνδυαστικό Μοντέλο Υδρολογίας και Ευστάθειας (CHASM) του Πανεπιστημίου του Bristol το οποίο συνδέει ένα υδρολογικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με το μοντέλο περιστροφικής ευστάθειας Bishop.

6.2 Συνδυαστικό μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών – CHASM (Combined Hydrological and Stability Model)

Το CHASM αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο, υπολογίζει τις χωρο-χρονικές μεταβολές της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται για το τέλος κάθε ώρας ισχυρής βροχόπτωσης. Αρχικά, εκτιμώνται για κάθε ώρα, οι μεταβολές της πίεσης των πόρων και της συνοχής που προσδίδει το νερό και οι τιμές αυτές μεταφέρονται στο μοντέλο ευστάθειας ως πιεζομετρικά δεδομένα (piezometric heads). Μέσα στη ζώνη που δεν έχει κορεστεί καθορίζεται μια μέγιστη τάση με τη μέθοδο Bishop, 1955.

Τα στοιχεία που απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου είναι: η γεωμετρία του πρανού, μια προσομοίωση της βροχόπτωσης σε διάρκεια και ένταση, ο καθορισμός της βλάστησης, η ποσότητα που απορροφάται από το έδαφος και η μέγιστη εξάτμιση και τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών όπως η περατότητα, το υγρό φαινόμενο βάρος, η φυσική υγρασία σε συνθήκες κορεσμού, η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής, η προαιρετικά παραμένουσα γωνία τριβής και το βάθος μύζησης. Το CHASM, λοιπόν, δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών συνθηκών βροχόπτωσης, φυτοκάλυψης, κλίσεων πρανών και ιδιοτήτων εδαφικών υλικών, ακόμα και σεισμού.

6.2.1 Υδρολογικό μοντέλο

Το μοντέλο εστιάζει στη δυναμική του εδάφους που δεν έχει κορεστεί, στη διαφοροποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και της περιεκτικότητας σε υγρασία καθώς και στις αρνητικές πιέσεις πόρων. Αποτελεί ένα διδιάστατο μοντέλο, που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και στηρίζεται στο νόμο του Darcy. Για τον υπολογισμό της μη κορεσμένης υδραυλικής αγωγιμότητας εφαρμόζεται η μέθοδος Millington- Quirk, 1959. Η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους μεταβάλλεται όταν υπάρχει φυτοκάλυψη, μέσα στη ζώνη όπου εξαπλώνεται το ριζικό σύστημα των φυτών και η μεταβολή αυτή εξαρτάται από το είδος της βλάστησης.

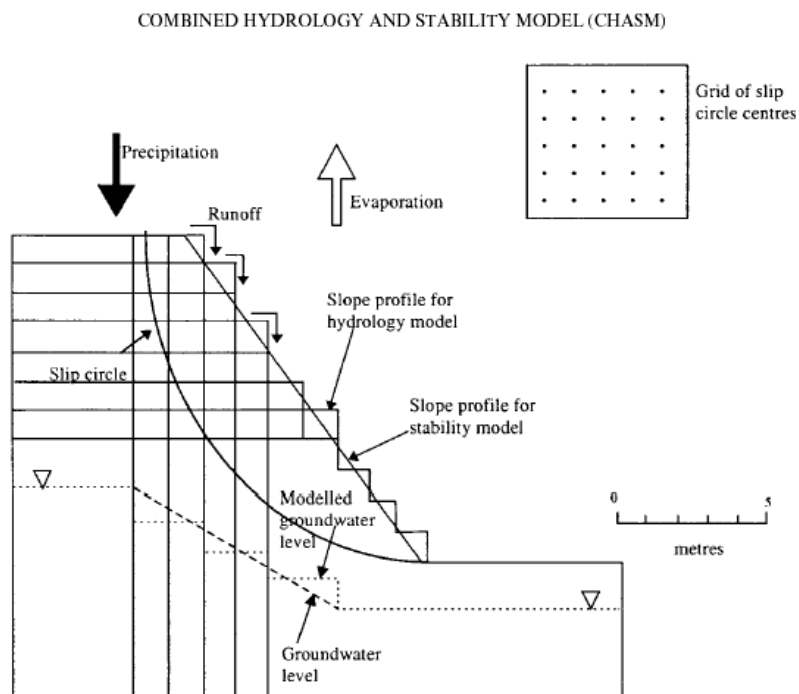
Το πρηνές χωρίζεται σε μια σειρά ορθογώνιων στηλών και η κάθε μια στήλη σε επιμέρους κανονικά κελιά έτσι το μοντέλο προσομοιώνει τη ροή διαμέσου του πρηνούς, με το νερό να κινείται μεταξύ των γειτονικών κελιών. Στα δεδομένα εισόδου περιλαμβάνονται η διάρκεια και η ένταση της βροχόπτωσης. Η βροχόπτωση εφαρμόζεται στην κορυφή κάθε στήλης και η απορρόφηση υπολογίζεται με την εξίσωση Richards όπου η μη κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα προκύπτει από τη διαδικασία Millington- Quirk (1959). Στην ακόρεστη ζώνη η ροή είναι κατακόρυφη ενώ στην κορεσμένη μπορεί να είναι είτε κατακόρυφη είτε πλευρική. Έτσι στο διδιάστατο σύστημα τόσο η κατακόρυφη όσο και η πλευρική ροή μπορούν να υπολογιστούν. Επιπλέον, το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής δευτερεύουσας απορροής π.χ. από πηγές .

Παραδοσιακές προσεγγίσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται παράλληλος στην επιφάνεια του πρηνούς και είτε είναι ταυτόσημος με την πιθανή επιφάνεια ολίσθησης είτε πάνω από αυτήν, ξεπεράστηκαν. Περιοδικοί υδροφόροι μπορούν να δημιουργούνται επιφανειακά, ενώ ακόμη συμπεριλαμβάνεται και η διακύμανση σε βαθείς υδροφόρους. Κάτω από τη δυναμική θεώρηση των υδρολογικών συνθηκών ο υδροφόρος μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις ενώ άλλοι προσωρινοί υδροφόροι σχηματίζονται, ειδικά όταν το νερό που κατεισδύει συναντά εδάφη με χαμηλή περατότητα.

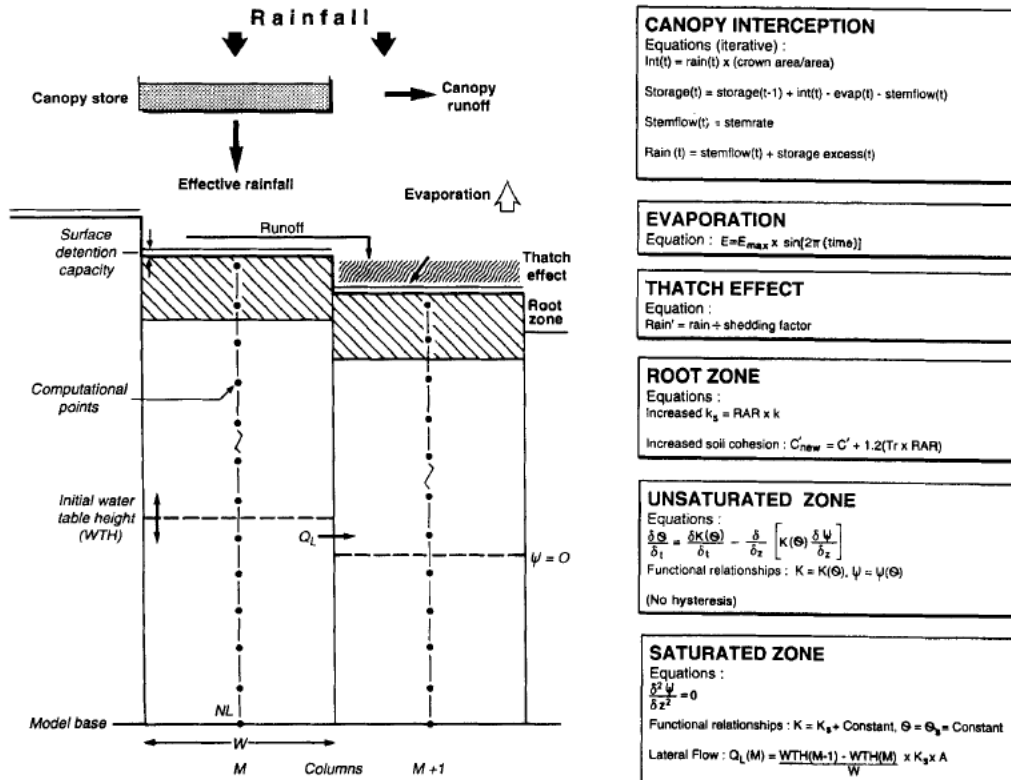
Το μοντέλο ακόμη επιτρέπει χωρική ανάλυση σε εκατοστά και χρονική ανάλυση σε δευτερόλεπτα. Αυτή η δυνατότητα καθιστά δυνατή την προσομοίωση κάθε λεπτομερούς

διαφοροποίησης στη βροχόπτωση αλλά και την αναπαράσταση πολύ λεπτών εδαφικών στρωμάτων.

Οι δυναμικές αλλαγές των αρνητικών πιέσεων πόρων ελέγχουν την ευστάθεια ενός πρανούς και αυτό ακριβώς προσομοιώνεται με το πρόγραμμα. Οι αρνητικές πιέσεις αυξάνουν την αντοχή ενώ η αντοχή μειώνεται όσο επικρατούν θετικές πιέσεις. Το ενδεχόμενο ολίσθησης εξαρτάται από τις πιέσεις των πόρων, τη συνοχή, τη γωνία τριβής και τις δυνάμεις που επιδρούν στο πρανές.



Διάγραμμα 6.1 Παρουσίαση γεωμετρίας και διαδικασίας του CHASM (Anderson, 2000)



Διάγραμμα 6.2: Δομή του μοντέλου του πρανούς (Anderson, 2000)

6.2.2 Ανάλυση ευστάθειας

Η ευστάθεια καθορίζεται με τη χρήση τεχνικών που εκτελούν στατική ανάλυση βασιζόμενες στις αντιστάσεις του εδάφους και στη δύναμη της βαρύτητας που ενεργεί στο πρανές. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι η απλοποιημένη κυκλική μέθοδος του Bishop (Bishop, 1955) και η μη γραμμική μέθοδος του Janbu (Janbu, 1954), και οι οποίες καθορίζουν την ενεργό τάση στην επιφάνεια αστοχίας, τη διατμητική δύναμη κάτω από το πρανές και την αναλογία μεταξύ αυτών των δύο. Ο λόγος αυτός, οδηγεί στον ορισμό ενός συντελεστή ασφαλείας που δίνει ένα μέτρο για την ευστάθεια του πρανούς.

Για κάθε ώρα της προσομοίωσης της υδρολογίας του πρανούς, χρησιμοποιείται το μοντέλο ανάλυσης της ευστάθειας. Στο συνδυασμένο μοντέλο η μέθοδος ανάλυσης χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η ευστάθεια του πρανούς. Το μοντέλο ευστάθειας αξιολογεί τις επιδράσεις από τις θετικές και αρνητικές πιέσεις νερού στο έδαφος κατά τη

διάρκεια της ανάλυσης. Οι αναρροφήσεις του εδάφους χρησιμοποιούνται απ' ευθείας στην εξίσωση Mohr-Coulomb για τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης του εδάφους και κάθε διόγκωση της δύναμης ελαχιστοποιείται με τον καθορισμό μιας μέγιστης αρνητικής δύναμης των 20 kPa στην ανάλυση της ευστάθειας.

Όσο οι συνθήκες υγρασίας αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου ως αποτέλεσμα της διήθησης, τόσο αναμένεται να αλλάξει ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας στην επιφάνεια ολίσθησης. Στην ανάλυση της ευστάθειας λαμβάνει χώρα μια διαδικασία αναζήτησης του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας στην επιφάνεια ολίσθησης. Καθορίζεται ένας κλίμακος που αντιπροσωπεύει τα κέντρα των κυκλικών επιφανειών ολίσθησης και μιας αυξανόμενης ακτίνας, επιτρέποντας έτσι την ανάλυση όλων των επιφανειών ολίσθησης και του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας της επιφάνειας ολίσθησης.

Οι απαραίτητες παράμετροι που απαιτούνται για τη λειτουργία του συνδυασμένου μοντέλου είναι η εξάτμιση, η βροχοπτώση, οι αρχικές επιφανειακές συνθήκες εδάφους ύδατος, το ύψος του πρηνούς, ο αρχικός υδροφόρος ορίζοντας εκφρασμένος σε ποσοστό του ύψους του πρηνούς, η γωνία του πρηνούς, η διαπερατότητα του εδάφους, η αντίσταση του εδάφους. Όσον αφορά στη βροχοπτώση, θεωρείται χρήσιμος ο χωρισμός σε περιόδους σχεδιασμού, π.χ. 1 ώρα, 10 χρόνια περίοδος επαναφοράς.

6.2.3 Μοντέλο βλάστησης

Όπως παρουσιάστηκε στο εδάφιο 4 ο ρόλος της βλάστησης στην ευστάθεια των πρηνών είναι πολύ σημαντικός. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα επιλογής αγρότησης ή χρήσης βλάστησης, καθώς και του είδους αυτής. Στην περίπτωση που ορίζεται κάποιο είδος βλάστησης για την υπό μελέτη περιοχή, παρουσιάζεται η επίδρασή της εξαιτίας της απορρόφησης και απορροής από το φύλλωμα, της αυξημένης ικανότητας κατείσδυσης, της αυξημένης αντοχής του εδάφους.

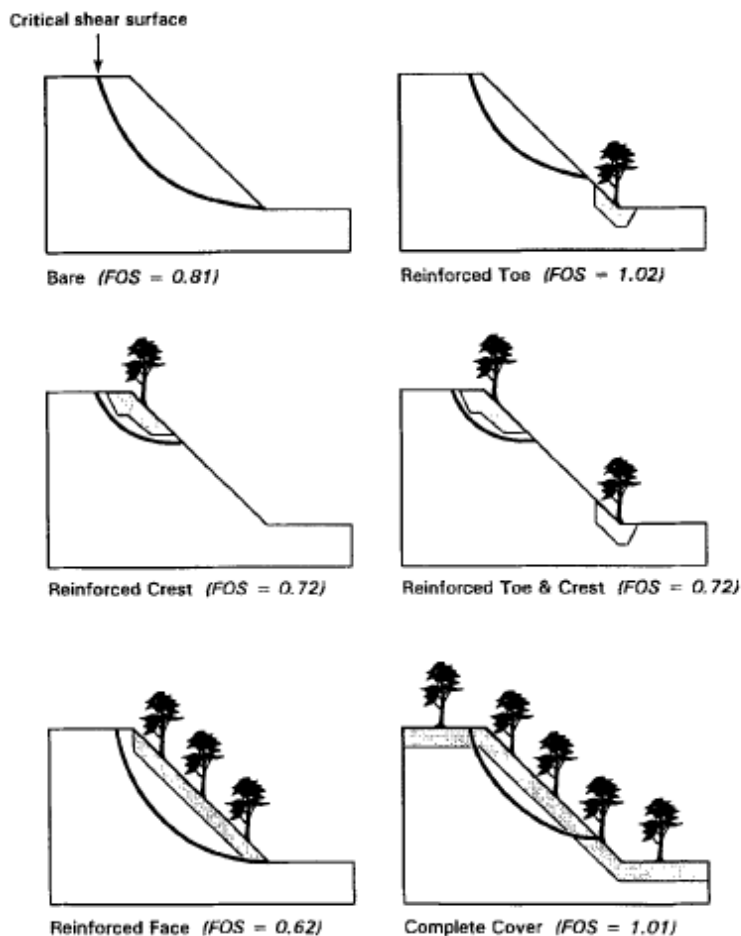
Για την ανάλυση μέσω των δέντρων, η κατανομή της κάλυψης περιγράφεται με έναν άμεσο συντελεστή, την ικανότητα κάλυψης αποθήκευσης (Rutter et al., 1971, Valente et

al., 1997). Το μοντέλο εκτιμά άμεσα, την ανάσχεση που χάνεται από την εισαγωγή των στοιχείων της βροχόπτωσης και των μετεωρολογικών δεδομένων. Ακόμη, επικεντρώνεται στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και αναρρόφησης του νερού, με την εξίσωση Penman- Monteith για την εξατμισοδιαπνοή (Monteith, 1973).

Το μοντέλο υπολογίζει τις νέες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και την αύξηση της διατμητικής αντοχής λόγω της συνεισφοράς των ριζών. Για παράδειγμα, ένα πυκνό και ινώδες σύστημα ριζών προσφέρει μεγάλη ενίσχυση στο έδαφος και βοηθά στην προστασία από τη διάβρωση (Margolin, 1985). Σε περιπτώσεις σταθεροποίησης, λοιπόν, σε ρηχές κατολισθήσεις, είναι προτιμότερο το γρασίδι, το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ριζών, σε σχέση με τα μεγάλα δέντρα. Μάλιστα, σε πρανές όπου παρατηρούνται διάφορα είδη φυτοκάλυψης, είναι δυνατός ο ορισμός της βλάστησης σε κάθε κελί ξεχωριστά.

Ακόμη, χρησιμοποιούνται ο λόγος ριζών (root area ratio %) που αποτελεί το λόγο μήκους προς διάμετρο ριζών καθώς και η τυπική αντοχή (typical tensile strength MPa). Γενικά, οι λεύκες είναι ισχυρότερες από τις σημύδες, ακολουθούν οι βελανιδιές, οι φιλύρες, τα έλατα και οι κέδροι. Συγκεκριμένα, οι τυπικές αντοχές της σημύδας είναι 22-46 MPa, του πεύκου 43-60 MPa, της ακακίας 11-28 MPa, ενώ ο λόγος ριζών κυμαίνεται συνήθως από 0.1- 0.95% (Endo&Tsuruta, 1962, Cherubinio&Waldron, 1977, Gray&Leiser, 1982 και Sidle et al., 1985).

Η επιρροή της βλάστησης εξαρτάται και από την αντοχή του εδάφους και το ύψος του πρανούς. Έτσι, υψηλές αντοχές εδάφους ή αυξημένο ύψος πρανούς, μειώνουν την επίδραση της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας. Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί ότι οι επιδράσεις στην υδρολογία (συνήθως αρνητικές) παρατηρούνται σε ύψη μέχρι και 24 m, ενώ εκείνες στη μηχανική (συνήθως θετικές) σε ύψη γύρω στα 18 m. Η εικόνα 6.3 παρουσιάζει την επίδραση της διανομής της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας σε πρανές ύψους 12 m, με κορεσμένη αγωγιμότητα $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. Παρατηρούμε ότι η πλήρης κάλυψη του πρανούς με βλάστηση, επιφέρει σημαντική αύξηση του συντελεστή ασφαλείας από 0.81 σε 1.01 (Collison & Anderson, 1995).



Διάγραμμα 6.3: Επίδραση της διανομής της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας σε πρανές ύψους 12 m, με κορεσμένη αγωγιμότητα $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$

6.2.4 Μετατόπιση της μάζας ολίσθησης

Η απόσταση μετακίνησης είναι πολύ σημαντική στο σχεδιασμό των έργων αλλά και των μέτρων αντιμετώπισης μιας ολίσθησης. Το CHASM περιλαμβάνει μια μεθοδολογία εκτίμησης του βάθους και της απόστασης που διανύει το υλικό που κατολισθαίνει.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται, είναι εμπειρικό και προέρχεται από την έρευνα των Finlay et al. (1999) οι οποίοι εργάστηκαν με δεδομένα κατολισθήσεων του Hong Kong. Επρόκειτο για 1100 κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν κατά τα έτη 1984-93 σε πρανή αποσαθρωμένου γρανίτη και άλλων μεταμορφωμένων τα οποία είχαν υποστεί την ανθρώπινη επέμβαση. Αναπτύχθηκαν μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης για την

πρόγνωση της μετακίνησης της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος οριζόντιων επιφανειών στη βάση των πρανών, με αναπαράσταση της γεωμετρίας της αστοχίας.

Ως ανεξάρτητες μεταβλητές περιλαμβάνονται η κλίση του πρανού $\tan\alpha$, το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης D και το ύψος του πρανού H . Ως εξαρτημένες, θεωρούνται ο λογάριθμος $\log L$ και το βάθος των κορημάτων H_4 ή γενικότερα των υλικών που ολίσθησαν στη βάση του πρανού. Ως αποτέλεσμα εξάγεται η απόσταση μετακίνησης R για κάθε ώρα του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης.

6.3 Το λογισμικό Phase2 V6.0

6.3.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Ο Ziwnkiewicz το 1967 έδωσε τον εξής ορισμό για τα πεπερασμένα στοιχεία: «Τα προβλήματα που λύνονται με τη μοντελοποίησή τους και την διακριτοποίησή τους σε έναν πεπερασμένο αριθμό καλώς ορισμένων κύριων συστατικών τους ονομάζονται διακριτά. Η ύπαρξη ενός συνολικού τρόπου αντιμετώπισης των 'τυποποιημένων διακριτών προβλημάτων' μας οδηγεί σε έναν πρώτο ορισμό της τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων ως μέθοδος προσέγγισης συνεχών προβλημάτων όπως:

1. Ο συνεχής χώρος χωρίζεται σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων (elements), η συμπεριφορά των οποίων καθορίζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό παραμέτρων και
2. Η επίλυση ενός πλήρους συστήματος ως αποτέλεσμα συναρμολόγησης των επιμέρους στοιχείων του ακολουθεί ακριβώς τους ίδιους κανόνες που εφαρμόζονται στα τυποποιημένα διακριτά προβλήματα.

Σύμφωνα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κατασκευή (ο χώρος) υποδιαιρείται σε στοιχεία (elements) δημιουργώντας ταυτόχρονα ένα πλέγμα (mesh). Τα στοιχεία είναι τμήματα της κατασκευής (του χώρου) που αποκόπτονται από αυτήν με ιδεατές επιφάνειες και επειδή έχουν πεπερασμένο μέγεθος ονομάζονται πεπερασμένα

στοιχεία. Τα στοιχεία εξακολουθούν να είναι από το ίδιο υλικό, αλλά η μεταξύ τους σύνδεση γίνεται σε έναν αριθμό διακριτών σημείων, τους κόμβους.

Μια ισχυρή εναλλακτική προσέγγιση στην ανάλυση ευστάθειας πρανών αποτελεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Elements Analysis FEM*). Η μέθοδος αυτή είναι ακριβής, με πολλαπλή χρησιμότητα και απαιτεί ειδικά σε ό,τι αφορά το μηχανισμό αστοχίας (Griffiths, 1999). Σε αντίθεση με ό,τι ισχύει στις μεθόδους οριακής ισορροπίας όπου θα πρέπει να γίνουν α priori υποθέσεις που αφορούν το σχήμα ή τη θέση εκδήλωσης της επιφάνειας αστοχίας του πρανούς, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κρίσιμη επιφάνεια εμφανίζεται 'φυσικά' στις ζώνες στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι μικρότερη των διατμητικών τάσεων που ασκούνται σε αυτό. Μάλιστα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης και άλλων κριτηρίων αστοχίας εκτός από αυτό του Mohr- Coulomb.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται αναφέρεται ως μεθοδολογία μείωσης της διατμητικής αντοχής (*Shear Strength Reduction Method*, Matsui & San, 1992). Σύμφωνα με αυτή, αρχικά οι μηχανικές ιδιότητες του πρανούς ελαττώνονται κατά ένα συντελεστή, τον αποκαλούμενο συντελεστή μείωσης της αντοχής (*Strength Reduction Factor SRF*) και στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση ευστάθειας του πρανούς με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές του SRF. Όταν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δε συγκλίνουν, μετά από ένα προκαθορισμένο από το χρήστη αριθμό επαναλήψεων, γεγονός που σημαίνει ότι δεν υπάρχει τέτοια κατανομή τάσεων ώστε να ικανοποιούνται ταυτόχρονα τόσο το κριτήριο Mohr-Coulomb, όσο και η ισορροπία όλου του πρανούς, τότε επέρχεται αστοχία του πρανούς. Αυτή η διαδικασία καθορίζει τον κρίσιμο συντελεστή μείωσης της αντοχής (*Critical SRF*) ή αλλιώς το συντελεστή ασφαλείας του πρανούς F .

Η αστοχία του πρανούς και η μη σύγκλιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου εμφανίζονται ταυτόχρονα και συνοδεύονται από δραματική αύξηση των μετατοπίσεων στους κόμβους του πλέγματος (*mesh*). Στην περίπτωση που η τιμή του συντελεστή είναι

μεγαλύτερη από τη μονάδα, τότε το πρανές ισορροπεί, ενώ εάν είναι μικρότερη τότε το πρανές είναι ασταθές και είναι πιθανή η εκδήλωση κατολίσθησης.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται ευρύτατα και συχνά θεωρείται ότι πλεονεκτεί έναντι των μεθόδων οριακής ισορροπίας αφού:

- ✍ Δε χρειάζεται να γίνουν a priori υποθέσεις που αφορούν το σχήμα ή τη θέση εκδήλωσης της επιφάνειας αστοχίας του πρανούς, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων η κρίσιμη επιφάνεια εμφανίζεται 'φυσικά' στις ζώνες στις οποίες η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι μικρότερη των διατμητικών τάσεων που ασκούνται σε αυτό, δεν υπάρχει η έννοια των λωρίδων, δε χρειάζεται να γίνουν παραδοχές για τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ αυτών. Η ισορροπία ολόκληρου του πρανούς διατηρείται έως ότου επέλθει η αστοχία.
- ✍ Μοντελοποιούνται περίπλοκες συνθήκες με υψηλό βαθμό ρεαλισμού, συμπεριλαμβανομένου και περιπτώσεων συμπεριφοράς μη γραμμικής έντασης-παραμόρφωσης, μη ομογενών συνθηκών καθώς και αλλαγών της γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της ανάλυσης
- ✍ Όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ρεαλιστικής εδαφικής συμπίεστος, οι λύσεις που προκύπτουν παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις παραμορφώσεις στα διάφορα επίπεδα λειτουργίας
- ✍ Υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής της προοδευτικής εξέλιξης της αστοχίας, της διατμητικής παραμόρφωσης, της ολικής μετατόπισης.

Από την άλλη, η μέθοδος δε θεωρείται τόσο γνωστή όσο οι μέθοδοι οριακών εξισώσεων, ενώ παράλληλα απαιτούνται περισσότερα δεδομένα όπως μεγέθη, ακαμψία, παραμέτρους πλαστικότητας, οριακές συνθήκες κλπ. Επιπλέον, τα μοντέλα υλικών είναι αριθμητικά πιο σύνθετα, και συχνά πιο αργά καταναλώνοντας συνήθως πολύ χρόνο. Τέλος, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι επιρρεπή στη σύγκλιση, ισορροπία και σε θέματα αριθμητικής αστάθειας.

6.3.2 Phase2 v6.0

Στα πλαίσια της παρούσας εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 v6.0 της εταιρίας Rocscience. Αποτελείται από τρία διαμορφώματα-στάδια (*modules*) τα οποία αναφέρονται ως: MODEL, COMPUTE, INTERPRET.

Το model (μοντέλο, προσομοίωμα) αποτελεί το διαμόρφωμα της προ- επεξεργασίας, το οποίο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή και διαμόρφωση των ορίων (boundaries) του μοντέλου, των επιτόπου τάσεων, των συνοριακών συνθηκών, των εδαφικών παραμέτρων και τέλος της δημιουργίας του πλέγματος (*mesh*) των πεπερασμένων στοιχείων.

Το compute (υπολογισμός) αποτελεί το διαμόρφωμα του προγράμματος όπου γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, των μετατοπίσεων αυτού, καθώς και διαφόρων άλλων παραμέτρων.

Το interpret (ερμηνεία) αποτελεί το διαμόρφωμα εκείνο του προγράμματος το οποίο οπτικοποιεί τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κομματιού και βοηθάει το χρήστη στην ερμηνεία αυτών.

Το πρόγραμμα Phase2 v6 επιτρέπει την πραγματοποίηση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και ευστάθειας πρανούς. Η εφαρμοζόμενη μέθοδος μείωσης της διατμητικής τάσης (Shear Strength Reduction (SSR)), χρησιμοποιείται ευρύτατα για να καθορίσει το συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος απλά μειώνει τη διατμητική αντοχή του υλικού μέχρι τη στιγμή που το μοντέλο γίνεται ασταθές. Το σημείο της αστάθειας θεωρείται ως ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Στο σχήμα 6.1 που ακολουθεί συνοψίζονται συγκριτικά οι λειτουργίες- κομβικά σημεία στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, των δύο λογισμικών CHASM και Phase.

CHASM

PHASE

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. χρειάζεται να γίνουν a priori υποθέσεις που να αφορούν το σχήμα και τη θέση εμφάνισης της επιφάνειας αστοχίας.2. μέθοδος των λωρίδων (Bishop) → παραδοχές για τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ αυτών.3. δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων συνθηκών με υψηλό βαθμό ρεαλισμού4. δυνατότητα εισαγωγής μοντέλου Βλάστησης5. εισαγωγή Υετογράμματος Βροχόπτωσης6. μη δυνατότητα καταγραφής προοδευτικής εξέλιξης της αστοχίας | <ol style="list-style-type: none">1. δε χρειάζεται → Η επιφάνεια αστοχίας εμφανίζεται 'φυσικά'.2. διατηρείται η ισορροπία ολόκληρου του πρσανούς έως ότου επέλθει η αστοχία.3. δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων συνθηκών με υψηλό βαθμό ρεαλισμού4. δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα5. εισαγωγή μεγέθους κατεΐσδυσης → Βροχόπτωση – Εξατμισοδιαπνοή6. δυνατότητα καταγραφής της προοδευτικής εξέλιξης της αστοχίας και της γενικής διατμητικής αστοχίας |
|---|---|

Σχήμα 6.1: Σύγκριση CHASM- Phase

7. Περιοχή μελέτης – Δήμος Ζαχάρωσ

7.1 Εισαγωγή

Μία από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές στην ιστορία της σύγχρονης Ελλάδας συγκλόνισε ολόκληρο τον κόσμο τον Αύγουστο του 2007, με επίκεντρο το Δήμο Ζαχάρωσ στο νομό Ηλείας. Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε τις πρωινές ώρες της 24^{ης} Αυγούστου στο Δημοτικό Διαμέρισμα της Μακίστου και γρήγορα εξαπλώθηκε και στον υπόλοιπο δήμο. Συγκεκριμένα, από τα 19 Δημοτικά Διαμερίσματα του Δήμου, τα 13 υπέστησαν πολύ σοβαρές καταστροφές, με την πυρκαγιά να έχει κάψει δασικές εκτάσεις, αγροτικές καλλιέργειες και κτηνοτροφικές μονάδες, αλλά και κατοικημένες περιοχές μετρώντας έτσι απώλειες και σε ανθρώπινες ζωές (πίνακας 7.1).

Πίνακας 7.1: Συνοπτική καταγραφή των απωλειών κατά την πυρκαγιά του Αυγούστου στο Δήμο Ζαχάρωσ (Δήμος Ζαχάρωσ, 2007)

ΔΗΜΟΤΙΚΟ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ	ΝΕΚΡΟΙ	ΚΑΜΕΝΑ ΣΠΙΤΙΑ	ΚΑΜΕΝΑ ΑΥΤ/ΤΑ	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΖΩΑ	ΚΑΤΕΣΤΡΑΜΜΕΝΕΣ ΕΛΙΕΣ	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΣΕ ΔΗΜΟΣΙΑ ΚΤΗΡΙΑ
ΑΓ. ΗΛΙΑΣ				70%	80%	
ΑΝΗΛΙΟ	1	4		5%	75%	1 ΕΚΚΛΗΣΙΑ
ΑΡΗΝΗ		9				
ΑΡΤΕΜΙΔΑ	17	28	3	95%	100%	4 ΚΤΗΡΙΑ, 1 ΕΚΚΛΗΣΙΑ, 1 ΚΟΙΝ. ΓΡΑΦΕΙΟ, ΤΟ ΙΑΤΡΕΙΟ, ΤΟ ΚΑΦΕΝΕΙΟ
ΓΙΑΝΝΙΤΣΟΧΩΡΙ					40%	
ΚΑΛΙΔΟΝΑ	1	15		20%	100%	
ΛΕΠΡΕΟ		8		40%	90%	
ΜΑΚΙΣΤΟΣ	7	73	2	100%	100%	2 ΕΚΚΛΗΣΙΕΣ
ΜΗΛΕΑ		4	2	100%	100%	2 ΕΚΚΛΗΣΙΕΣ
ΜΙΝΘΗ	2	10		30%	100%	
ΝΕΟΧΩΡΙ					100%	
ΞΗΡΟΧΩΡΙ	3	15	3	30%	90%	
ΠΡΑΣΙΔΑΚΙ			1		95%	
ΡΟΔΙΝΑ		11	6	5%	100%	
ΣΜΕΡΝΑ	2	14	3		100%	
ΣΧΙΝΟΙ	1			5%	100%	
ΤΑΞΙΑΡΧΕΣ			2	80%	100%	
ΧΡΥΣΟΧΩΡΙ		42		30%	100%	
ΚΑΚΟΒΑΤΟΣ					100%	

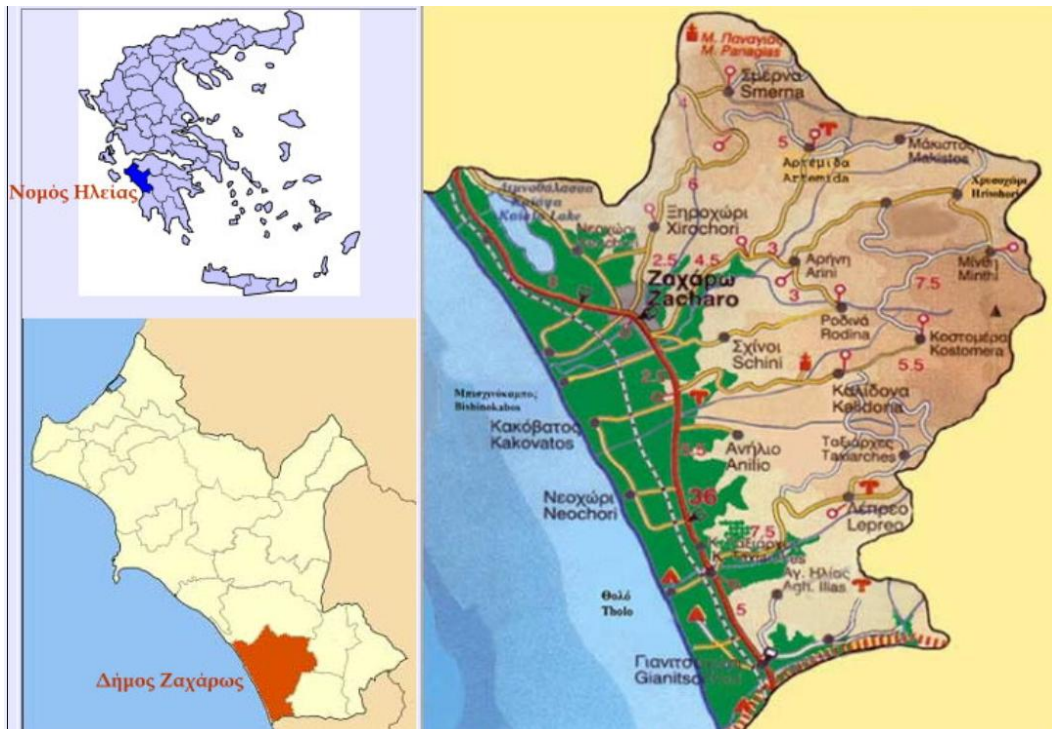
Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με τη σύσταση της ομάδας έρευνας ‘Α’ της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων και Μεταλλουργών συνέβαλε στη διαμόρφωση συγκεκριμένων προτάσεων για άξονες δράσης με στόχο την αντιμετώπιση των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της πυρκαγιάς. Συγκεκριμένα, είναι αντιληπτό ότι οι βροχοπτώσεις της χειμερινής περιόδου προκαλούν αυξημένες επιφανειακές απορροές, φαινόμενα διάβρωσης και κατολισθήσεων. Προς αυτή λοιπόν την κατεύθυνση προσανατολίστηκε και η παρούσα εργασία, επιλέγοντας ως περιοχή μελέτης αστοχιών πρανών υπό την επίδραση βροχοπτώσεων, την κρίσιμη περιοχή της Ζαχάρως.

7.2 Αναγνώριση – Οριοθέτηση περιοχής μελέτης

Ο Δήμος Ζαχάρως όπως παρουσιάζεται στο χάρτη 7.1, βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της επαρχίας Ολυμπίας του νομού Ηλείας. Με την εφαρμογή του νόμου Καποδίστρια, λειτουργεί ο Νέος Διευρυμένος Δήμος με έδρα τη Ζαχάρω, περιλαμβάνει είκοσι δημοτικά διαμερίσματα και έχει συνολικό πληθυσμό 12.910 κατοίκους. Ακολούθως παρουσιάζονται τα δημοτικά διαμερίσματα του δήμου.

1. Δ.Δ. Ζαχάρως [6.739]: η Ζαχάρω [5407], ο Άγιος Νικόλαος [1.067], ο Καϊάφας [114], το Κάτω Ξηροχώρι [151]
2. Δ.Δ. Αγίου Ηλία [34]: ο Άγιος Ηλίας [34]
3. Δ.Δ. Ανηλίου [315]: το Ανήλιον [260], το Κοτρωνάκι [29], ο Μπούρμπουλας [26]
4. Δ.Δ. Αρήνης [313]: η Αρήνη [286], η Κάτω Αρήνη [27]
5. Δ.Δ. Αρτέμιδας (τ. Κουμουθέκρα) [306]: η Αρτέμιδα (τ. Κουμουθέκρας) [306]
6. Δ.Δ. Γιαννιτσοχωρίου [517]: το Γιαννιτσοχώριον (Γιαννιτσοχώρι) [517]
7. Δ.Δ. Κακοβάτου [444]: ο Κακόβατος [444]
8. Δ.Δ. Καλιδόνας [378]: η Καλιδόνα [250], ο Κάμπος [128], η Κοστομέρα [0].
9. Δ.Δ. Λεπρέου [532]: το Λέπρεον [329], η Αγραπιδιά [23], ο Δράκος [75], οι Παναγιές [50], τα Ρεβελαίικα [19], ο Σκουπάς [36].
10. Δ.Δ. Μακίστου [161]: ο Μάκιστος [161].
11. Δ.Δ. Μηλέας[137]: η Μηλέα [137].

12. Δ.Δ. Μίνθης [221]: η Μίνθη [144], το Κοτρώνιον [77].
13. Δ.Δ. Νεοχωρίου [401]: το Νεοχώριον (Νεοχώρι)[401].
14. Δ.Δ. Ξηροχωρίου [669]: το Ξηροχώριον [482], το Κοτρώνι [25], ο Μάραθος [6], το Νεοχώριον [91], η Παναγιά [65].
15. Δ.Δ. Πρασιδακίου [113]:το Πρασιδάκιον (Πρασιδάκι) [104], το Παλιό Πρασιδάκι [1], η Τρανή Λάκα [8].
16. Δ.Δ. Ροδινών [158]: τα Ροδινά [158].
17. Δ.Δ. Σμέρνας [321]: η Σμέρνα [287], η Παναγιά [34].
18. Δ.Δ. Σχίνων [733]: οι Σχίνοι [484], το Πανόραμα [249].
19. Δ.Δ. Ταξιάρχων [314]: οι Κάτω Ταξιάρχες [108], το Θολόν [86], το Λογγάκι [55], οι Ταξιάρχες [65].
20. Δ.Δ. Χρυσοχωρίου (Τρυπών) [104]: το Χρυσοχώρι [78], το Παλαιοχώριον [26].



Χάρτης 7.1: Περιοχή μελέτης- Ζαχάρω

7.3 Γεωμορφολογία – Γεωλογική Δομή

Η περιοχή έρευνας μορφολογικά εντάσσεται στο τεκτονικό βύθισμα της Ζαχάρως, με πολυσύνθετη εξέλιξη λόγω της γειτονίας της με την Ιόνια τάφρο. Σήμερα στην περιοχή κυριαρχούν τα υψώματα των ορεινών όγκων Λάπιθας προς βορρά και Μίνθης προς τα ανατολικά, με μεγαλύτερο υψόμετρο αυτό του όρους Βουνούκα (1.221μ.), ενώ δυτικά αναπτύσσεται η πεδινή (παράκτια) ζώνη που παρουσιάζει μικρές μορφολογικές εξάρσεις λόγω της παρουσίας των θινών κατά μήκος της ακτής. Κυρίαρχο μορφολογικό στοιχείο αποτελεί η λίμνη του Καϊάφα, βόρεια της πόλης της Ζαχάρως, με τις ιαματικές πηγές της.

Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας (96.0 km²) χαρακτηρίζεται από ήπιες έως μεγάλες μορφολογικές κλίσεις της τάξης των 12-35%. Μορφολογικές κλίσεις μικρότερες του 12% παρατηρούνται σε ένα σημαντικό τμήμα της περιοχής έρευνας (66.5 km²) και κλίσεις μεγαλύτερες του 35% παρατηρούνται σε μικρότερο τμήμα αυτής (43.0 km²).

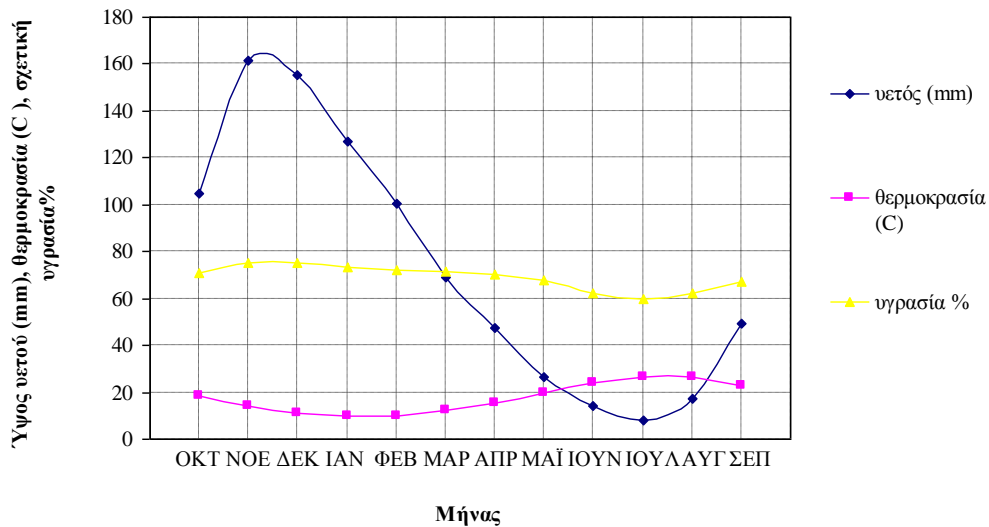
Τα υδρογραφικά δίκτυα των υδρολογικών λεκανών της περιοχής έρευνας είναι σχετικά πυκνά κυρίως στο νότιο (βόρειοι κλάδοι π. Νέδα) και ανατολικό (Γκρεμισμένης ρ.) τμήμα της.

Η ευρύτερη περιοχή έρευνας δομείται από αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς. Αναφορικά με τους αλπικούς σχηματισμούς, αυτοί ανήκουν κυρίως στις γεωτεκτονικές ζώνες Πίνδου και Γαβρόβου, ενώ συμμετέχει και η Ιόνιος ζώνη με μια μικρή εμφάνιση στην περιοχή της λίμνης Καϊάφα.

7.4 Μετεωρολογικά στοιχεία

Για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής του Δήμου Ζαχάρως αξιοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα του πλησιέστερου στην περιοχή έρευνας μετρητικού σταθμού του Πύργου. Ο σταθμός αυτός, που διαχειρίζεται η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (EMY) και λειτουργεί από το 1975, εντοπίζεται βόρεια της περιοχής έρευνας και είναι εγκατεστημένος σε υψόμετρο 12 m. Τα παρεχόμενα στοιχεία,

λοιπόν, από την ΕΜΥ για το σταθμό του Πύργου είναι το μηνιαίο ύψος υετού σε χιλιοστά για τη χρονική περίοδο 1931-2007 καθώς και το μέγιστο μηνιαίο ύψος υετού για μετρήσεις διάρκειας 5λεπτων, 10λεπτων, 15λεπτων, 30λεπτων, 1 ώρας, 2 ωρών, 6 ωρών, 12 ωρών, 24 ωρών. Ακόμη, είναι γνωστές οι τιμές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας και μέσης σχετικής υγρασίας για τα έτη 1975- 2001, μηνιαίας ηλιοφάνειας (σε ώρες) για τη χρονική περίοδο 1977- 2003 και μηνιαίας συχνότητας ανά διεύθυνση και ένταση ανέμου σε κλίμακα Beaufort την περίοδο 1980-2002.



Σχήμα 7.1: Διακύμανση μέσω μηνιαίων τιμών υετού, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο μετεωρολογικό σταθμό Πύργου (ΕΜΥ 1932-2007)

Το σχήμα 7.1 παρουσιάζει τη διακύμανση των μέσων μηνιαίων τιμών του υετού, της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας όπως μετρήθηκαν στο μετεωρολογικό σταθμό του Πύργου.

7.4.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Ανάμεσα στα διάφορα υδρολογικά μεγέθη, η βροχόπτωση είναι ένα μέγεθος που δύσκολα μπορεί να αποτυπωθεί και να αναλυθεί. Η αντιπροσωπευτική καταγραφή της βροχής γίνεται με τη χρήση του βροχογράφου που παράγει μια αθροιστική καμπύλη, από την οποία προκύπτει ένας πίνακας τιμών έντασης και ύψους βροχής για κάθε χρονικό βήμα που επιλέγεται. Στο πλαίσιο όμως αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν ήταν

δυνατή η ίδρυση βροχογράφου στην περιοχή της Ζαχάρως και η καταγραφή των δεδομένων αυτού. Περιοριζόμαστε στη χρήση στοιχείων από βροχομετρικά όργανα σε Μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στην υπό μελέτη περιοχή, ώστε οι αποκλίσεις από την πραγματικότητα να είναι οι ελάχιστες.

Το ύψος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και η κατανομή αυτών στη διάρκεια του υδρολογικού έτους, σε συνδυασμό με το θερμοκρασιακό καθεστώς και τη φύση των πετρωμάτων που δομούν γεωλογικά την περιοχή έρευνας, αποτελούν τον καθοριστικότερο παράγοντα για την τροφοδοσία των υπόγειων υδροφόρων που διαμορφώνονται σε αυτά. Επιπλέον, αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην εκδήλωση γεωλογικών αστοχιών σε γεωλογικούς σχηματισμούς με μειωμένες τιμές γεωμηχανικών χαρακτηριστικών. Από επεξεργασία των δεδομένων του Μ.Σ. Πύργου προκύπτει ότι το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται στα 881.7 mm για τη χρονική περίοδο 1931-2007 (πίνακας 7.2). Ακόμη, την περίοδο από τον Οκτώβριο μέχρι το Φεβρουάριο τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής ξεπερνούν τα 100 mm και σημειώνεται το 74% του μέσου ετήσιου ύψους βροχής.

Παρατηρείται επίσης, ότι ο μήνας με τα περισσότερα επεισόδια βροχής είναι ο Νοέμβριος με μέση μηνιαία τιμή 161.5 mm, ακολουθούν ο Δεκέμβριος με 155.6 mm και ο Ιανουάριος με 126.9 mm. Από την άλλη, το καλοκαίρι είναι κυρίως άνυδρο αφού σημειώνεται μόλις το 5% του μέσου ετήσιου ύψους των βροχοπτώσεων, ενώ ο Ιούλιος φαίνεται ως ο ξηρότερος μήνας με μέσο ύψος βροχής στα 8.1 mm.

Πίνακας 7.2: Μέση μηνιαία βροχόπτωση (ΕΜΥ, 1931-2007)

Μήνας	Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση 1931-1997 (σε mm)
ΟΚΤ	104.6
ΝΟΕ	155.6
ΔΕΚ	161.5
ΙΑΝ	126.9
ΦΕΒ	100.5
ΜΑΡ	69.3
ΑΠΡ	47.7
ΜΑΙ	26.4
ΙΟΥΝ	14.3
ΙΟΥΛ	8.1
ΑΥΓ	17.4
ΣΕΠ	49.3
Μ. Ετήσιο Ύψος	881.6

Με βάση αυτά τα πρωτογενή βροχομετρικά δεδομένα καταρτίστηκε όμβρια καμπύλη σημειακής βροχόπτωσης για τον βροχομετρικό σταθμό του Πύργου της ΕΜΥ. Λόγω του εξαιρετικά μικρού πλήθους στοιχείων, αναζητήθηκε και άλλη βροχομετρική πληροφορία από την περιοχή υπό μορφή έτοιμων όμβριων καμπυλών από παλιότερες μελέτες. Οι πιο πρόσφορες από αυτές τις καμπύλες εντοπίστηκαν στους σταθμούς Πόρτες και Μεγαλόπολη.

Συγκεκριμένα, ακολούθως παρουσιάζεται η όμβρια καμπύλη στις Πόρτες¹ (για τη σημειακή βροχόπτωση) (Κουτσογιάννης, 2008),

$$i = \frac{1}{0.121} \left(\frac{2.596 - \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)}{d^{0.72}} \right) \quad (7.1)$$

¹ Κουτσογιάννης, Δ., 2008, *Όμβριες καμπύλες στην περιοχή της βόρειας Πελοποννήσου*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αδημοσίευτο, Αθήνα.

όπου i = ένταση βροχόπτωσης (mm/h), T = περίοδος επαναφοράς, d = διάρκεια βροχόπτωσης (h).

Ακόμη, είναι διαθέσιμη και η όμβρια καμπύλη σταθμού ΔΕΗ Μεγαλόπολης² (για τη σημειακή βροχόπτωση) (Γιακουμάκης, 2004),

$$i = \frac{208.96 \cdot T^{2.268}}{t^{0.635}} \quad (7.2)$$

όπου:

i = ένταση βροχόπτωσης (mm/h), T = περίοδος επαναφοράς (έτη), t = ο χρόνος (h)

Οι εναλλακτικές όμβριες καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση υετογραμμάτων σχεδιασμού³ για τυπικές περιόδους επαναφοράς (π.χ., 50 έτη) και διάρκειες κατάλληλες για μικρού και μεσαίου μεγέθους λεκάνες των ρεμάτων της περιοχής μελέτης. Η κατάρτιση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των εναλλασσόμενων μπλοκ βροχής.

Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν ιδιαίτερα απλό τρόπο παραγωγής ενός «εικονικού» υετογραφήματος με διαθέσιμη την όμβρια καμπύλη. Το υετόγραμμα σχεδιασμού που παράγεται με αυτή τη μέθοδο ορίζει το ύψος βροχόπτωσης που συμβαίνει σε n διαδοχικά χρονικά διαστήματα διάρκειας Δt σε μια ολική διάρκεια $d = n \cdot \Delta t$. Μετά την επιλογή της περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού, η ένταση υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες για κάθε μια από τις διάρκειες $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots, n\Delta t$ και το αντίστοιχο ύψος βροχόπτωσης υπολογίζεται ως το γινόμενο της έντασης βροχόπτωσης και της διάρκειας. Λαμβάνοντας διαφορές μεταξύ διαδοχικών τιμών υψών βροχόπτωσης, εντοπίζεται το ποσό της βροχόπτωσης που πρέπει να προστεθεί σε κάθε επιπρόσθετη μονάδα χρόνου Δt . Τα μπλοκ βροχόπτωσης που προκύπτουν, καταγράφονται σε πρώτη φάση σε φθίνουσα σειρά. Στη συνέχεια, ανακατανέμονται έτσι ώστε το μέγιστο ύψος να τοποθετείται στο

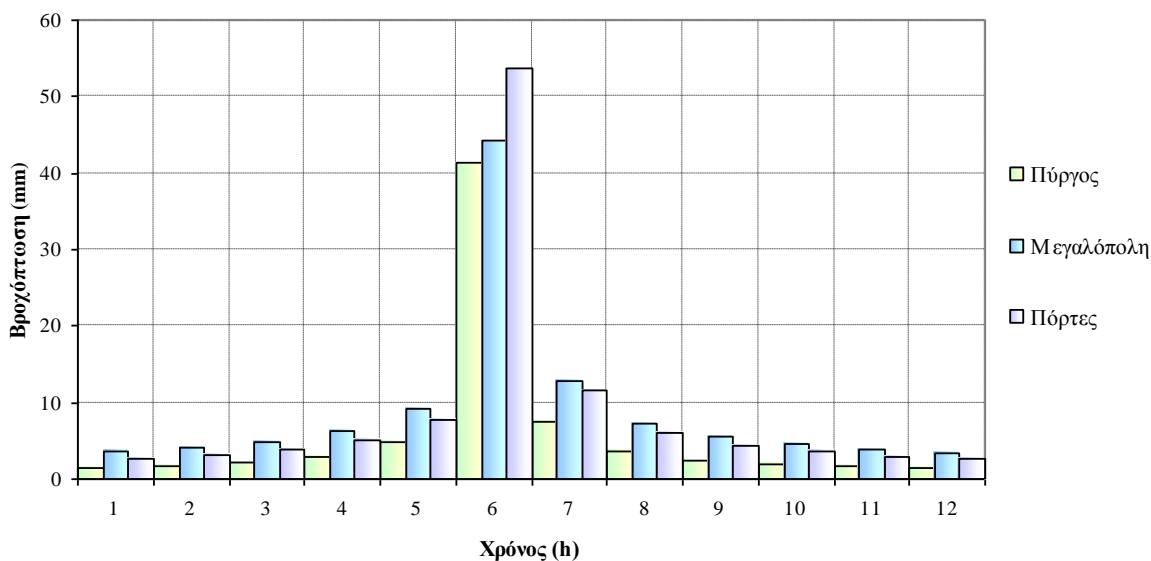
² Γιακουμάκης, Σ., 2004. Όμβριες καμπύλες στην περιοχή της κεντρικής Πελοποννήσου (Σταθμός ΔΕΗ Μεγαλόπολης), Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Δημοσίευτο, Αθήνα.

³ Ναλμπάντης, Ι., 2008. Κατάρτιση συνθετικών υετογραμμάτων σχεδιασμού στην περιοχή της Ζαχάρω Δ. Πελοποννήσου, Εσωτερική έκθεση, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.

κεντρικό μπλοκ, τα εναπομείναντα μπλοκ να τοποθετούνται σε φθίνουσα σειρά και με εναλλαγή εκατέρωθεν του κεντρικού μπλοκ, σχηματίζοντας έτσι το υετόγραμμα σχεδιασμού (Chow, 1988, Βασιλείου, 2008).

Η συνήθης πρακτική στην υδρολογία υπαγορεύει την εφαρμογή δωδεκάωρης προσομοίωσης σε περιπτώσεις μικρών λεκανών απορροής της τάξης των 20 km². Εφόσον η περιοχή μελέτης εντάσσεται σε μικρή λεκάνη απορροής, επιφάνειας κατά προσέγγιση 12 km², η εφαρμογή δωδεκάωρου επεισοδίου βροχόπτωσης αποτελεί την ενδεδειγμένη και επαρκή τιμή.

Το σχήμα 7.2 παρουσιάζει τα υετογράμματα για δωδεκάωρα επεισόδια βροχόπτωσης στους σταθμούς Πύργο, Πόρτες και Μεγαλόπολη για τον κρίσιμο μήνα Νοέμβριο. Μετά από επεξεργασία αυτών, φαίνεται ότι ο σταθμός στις Πόρτες παρουσιάζει τις πιο κρίσιμες τιμές βροχόπτωσης για την περίπτωση της λεκάνης που εξετάζεται και έτσι επιλέγεται η χρήση αυτών των τιμών βροχόπτωσης στην ανάλυση.



Σχήμα 7.2: Υετογράμματα για δωδεκάωρα φαινόμενα βροχόπτωσης στους μετεωρολογικούς σταθμούς Πύργο, Μεγαλόπολη και Πόρτες

7.4.2 Θερμοκρασία αέρα

Οι ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του αέρα σε συνδυασμό με τις διαφορές υγρασίας, επιφέρουν χαλάρωση της συνοχής των πετρωμάτων και αποσάθρωση των συστατικών τους. Συνεπώς, η γνώση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα είναι σημαντική και συμβάλλει στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο *Penman* (Παράρτημα, Πίνακας 2, 3). Από την επεξεργασία λοιπόν, των διαθέσιμων δεδομένων θερμοκρασίας αέρα στο σταθμό Πύργου, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα (πίνακας 7.3).

Πίνακας 7.3: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (EMY, 1975-2001)

Μήνας	Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία αέρα (°C) 1975-2001
ΟΚΤ	18.7
ΝΟΕ	14.1
ΔΕΚ	11.0
ΙΑΝ	9.6
ΦΕΒ	10.1
ΜΑΡ	12.2
ΑΠΡ	15.2
ΜΑΙ	19.7
ΙΟΥΝ	23.9
ΙΟΥΛ	26.4
ΑΥΓ	26.3
ΣΕΠ	23.0
Μέση Ετήσια Θερμοκρασία	17.5

- ✘ Η μέση ετήσια θερμοκρασία για τις περιόδους 1975 - 2001, ανέρχεται σε 17.5 °C.
- ✘ Ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση μηνιαία θερμοκρασία 9.6 °C, ακολουθεί ο Φεβρουάριος με 10.1 °C, ο Δεκέμβριος με 11.0 °C και ο Μάρτιος με 12.2 °C.
- ✘ Θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος με μέση μηνιαία θερμοκρασία 26.3 °C, ακολουθεί ο Αύγουστος με 26.1 °C και ο Ιούνιος με 23.8 °C.

Οι σχετικά υψηλές τιμές της παραμέτρου αυτής σε όλη την έκταση του νομού, διευκολύνουν την αποσάθρωση των πετρωμάτων με μικρή θερμοχωρητικότητα, όπως οι αργιλικής σύστασης σχηματισμοί.

7.4.3 Σχετική υγρασία – Άνεμος

Η ατμοσφαιρική υγρασία ασκεί αποφασιστική επίδραση στην πορεία του υδρολογικού κύκλου, γιατί αποτελεί την πηγή τροφοδοσίας όλων των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, ενώ παράλληλα επιδρά στην εξάτμιση και τη διαπνοή των φυτών.

Πίνακας 7.4: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία
(ΕΜΥ, 1975-2001)

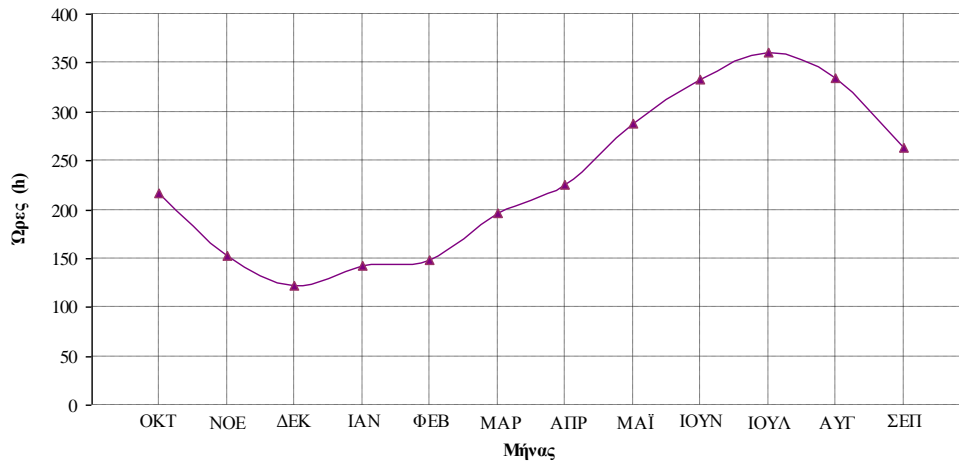
Μήνας	Μέση Μηνιαία Σχετική Υγρασία (%) 1975-2001
ΟΚΤ	71,0
ΝΟΕ	75,2
ΔΕΚ	75,5
ΙΑΝ	73,6
ΦΕΒ	72,2
ΜΑΡ	71,2
ΑΠΡ	70,5
ΜΑΙ	67,9
ΙΟΥΝ	62,4
ΙΟΥΛ	59,5
ΑΥΓ	62,1
ΣΕΠ	67,1
Μέση Ετήσια Σχετική Υγρασία	69,0

Με τη βοήθεια του πίνακα 7.4, γίνεται αντιληπτό ότι η μέση ετήσια σχετική υγρασία στο σταθμό Πύργου είναι υψηλή και ανέρχεται σε 69%. Οι μέσες μηνιαίες τιμές της θερινής περιόδου υπερβαίνουν το 60%, ενώ τους μήνες Μάιο και Σεπτέμβριο ανέρχεται στο 67%. Την υπόλοιπη περίοδο, από τον Οκτώβριο έως και τον Απρίλιο υπερβαίνει το 70%.

Η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων με βάση τα δεδομένα του σταθμού του Πύργου όλο το χρόνο, είναι η βορειο-δυτική.

7.4.4 Ηλιοφάνεια

Η καμπύλη της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας παρουσιάζεται στο διάγραμμα 7.1. Στην κορυφή βρίσκεται ο μήνας Ιούλιος με τις περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας του έτους - 361 h ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες οι ώρες ηλιοφάνειας μειώνονται με το Δεκέμβριο να εμφανίζει τις λιγότερες - 122 h.



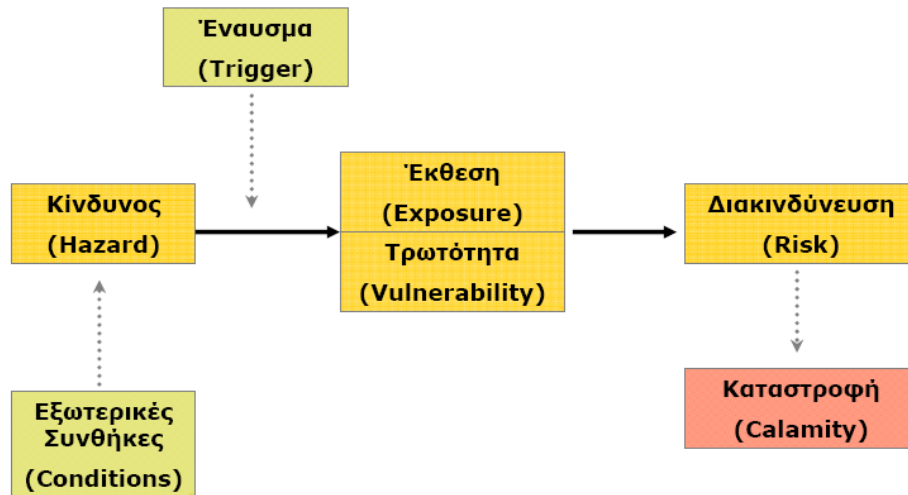
Διάγραμμα 7.1: Καμπύλη μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας (EMY 1977-2001)

7.5 Τρωτότητα περιοχής μελέτης

7.5.1 Η έννοια της τρωτότητας (Vulnerability)

Η τρωτότητα ορίζεται ως ο βαθμός στον οποίο τα ανθρώπινα και περιβαλλοντικά συστήματα είναι πιθανό να υποστούν κάποια καταστροφή εξαιτίας μιας αναστάτωσης ή έντασης – έναυσμα ([Clark et al (2000)], [Kates et al. (2001)], [Kasperson and Kasperson (2001)]). Το σχήμα 7.3 φανερώνει τα βήματα που οδηγούν από το έναυσμα στην καταστροφή όπου και παρατηρείται η ουσιώδης θέση της τρωτότητας. Επικεντρώνοντας την προσοχή στους μηχανισμούς που διευκολύνουν ή υποχρεώνουν την ικανότητα ενός συστήματος να ανταπεξέλθει, να προσαρμοστεί ή να ξεπεράσει

διάφορες δυνάμεις πίεσης, οι εκτιμήσεις της τρωτότητας σκοπεύουν όχι μόνο στην αναγνώριση των συστημάτων που κινδυνεύουν περισσότερο αλλά και στην κατανόηση των αιτιών.



Σχήμα 7.3: Από το έναυσμα στην καταστροφή (Τσακίρης)

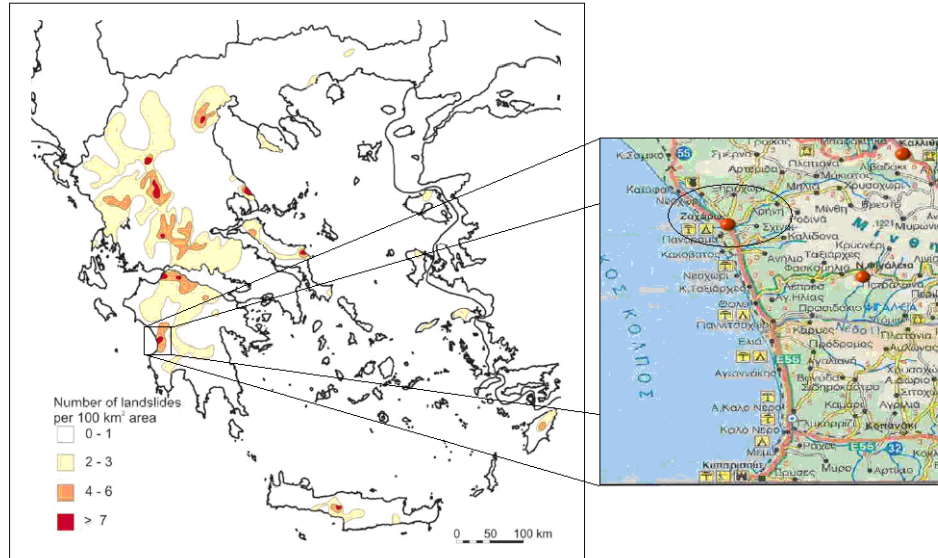
Η ανάπτυξη μέτρων τρωτότητας είναι περίπλοκη εξαιτίας της έλλειψης κοινής αντίληψης του ακριβούς ορισμού του όρου, της περιπλοκότητας του συστήματος που αναλύεται και του γεγονότος ότι η τρωτότητα δεν είναι ένα άμεσα παρατηρούμενο φαινόμενο.

Για να χρησιμοποιηθεί η έννοια της τρωτότητας σε έρευνες, οι ερευνητές θα πρέπει να είναι ικανοί να την ποσοτικοποιήσουν. Όμως η τρωτότητα δεν είναι ένα άμεσα οπτικό φαινόμενο επομένως είναι δύσκολο χωρίς κάποια κριτήρια, να αναγνωρίσουν ποια συστήματα είναι περισσότερο ή λιγότερο τρωτά. Σε ορισμένες μελέτες, ανάλογα με τον τύπο της έντασης και τα αποτελέσματα, οι επιδράσεις των τάσεων σε μια περιοχή θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αντικειμενικά μέτρα τρωτότητας.

7.5.2 Τρωτότητα στην ευρύτερη περιοχή της Ζαχάρως

Ο βαθμός τρωτότητας του εδάφους εκφράζει στην ουσία τον βαθμό επικινδυνότητας του στις κατολισθήσεις. Η εκτίμηση της τρωτότητας των σχηματισμών βοηθά σε έναν ευρύτερο διαχειριστικό σχεδιασμό και δίνει την δυνατότητα περιορισμού των

οικονομικών και κοινωνικών συνεπειών που προκαλεί η εδαφική διάβρωση στην περιοχή. Ο χάρτης 7.2 παρουσιάζει την επικινδυνότητα σε ολισθήσεις εδάφους - τρωτότητα- στην Ελλάδα. Σημειώνεται ότι στην περιοχή της Ζαχάρως η τρωτότητα του εδάφους είναι υψηλή, με τον αριθμό των ολισθήσεων να ξεπερνά τις επτά ανά 100 km².



Χάρτης 7.2: Επικινδυνότητα σε ολισθήσεις εδάφους στην Ελλάδα (Κούκης, 2005). Η περιοχή μελέτης τοποθετείται στη Δυτική Ελλάδα- Νομός Ηλείας- όπως έχει επισημανθεί στο χάρτη.

Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο συνέβαλε στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της περιοχής μετά από τις πυρκαγιές με τη σύσταση της ερευνητικής ομάδας ‘Α’ και τελικά την καταγραφή της μελέτης ‘Εκτίμηση της εδαφικής απώλειας των λεκανών απορροής του Δήμου Ζαχάρως - Ν. Ηλείας’. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η χωρική εκτίμηση της εδαφικής απώλειας των σχηματισμών της περιοχής έρευνας με τη χρήση ενός απλοποιημένου μοντέλου (Μαρίνος, κ.ά., 1998, Αλεξούλη -Λειβαδίτη, κ.ά. 2002, Λυκούδη, κ.ά. 2004). Η βροχόπτωση δεν συναξιολογείται στο συγκεκριμένο μοντέλο, θεωρώντας ότι παραμένει ίδια για ολόκληρη την περιοχή έρευνας και ότι συμπεριλαμβάνεται έμμεσα στην υδρογραφική υφή.

Η χωρική εκτίμηση της τρωτότητας των σχηματισμών, δηλαδή η πρόβλεψη περιοχών υψηλού κινδύνου εδαφικής απώλειας στις λεκάνες απορροής του Δ. Ζαχάρως, παρουσιάζεται σε δύο θεματικούς χάρτες - της ερευνητικής ομάδας ‘Α’, όπου

παρουσιάζονται οι ζώνες επικινδυνότητας ως προς την εδαφική διάβρωση πριν και μετά τις πυρκαγιές και οι οποίοι παρουσιάζονται στο παράρτημα (Παράρτημα, Εικόνα 1, Εικόνα 2, Χάρτης 2). Οι χάρτες αυτοί βοηθούν στην κατανόηση του προβλήματος που αντιμετώπιζε η περιοχή πριν τις πυρκαγιές από πλευράς τρωτότητας σχηματισμών και το πώς η κατάσταση αυτή τροποποιήθηκε μετά τις καταστροφές του προηγούμενου καλοκαιριού.

Ο βαθμός τρωτότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή έρευνας πριν από τις πυρκαγιές, προέκυψε από την συναξιολόγηση τεσσάρων μεταβλητών, από τις οποίες εξαρτάται είτε άμεσα είτε έμμεσα η εδαφική διάβρωση και δύνανται να απεικονιστούν χωρικά με τη δημιουργία των εξής θεματικών χαρτών (Παράρτημα, Εικόνα 1).

- ☞ «Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών επιδεικτικών στη διάβρωση και σε αστοχίες, L», παρέχει τη γεωλογική, υδρογεωλογική και υδρολιθολογική (διηθητικότητα, διαπερατότητα) πληροφόρηση και αποτελεί το χάρτη περιοχών με λιθολογική σύσταση επιρρεπή στη διάβρωση (L)
- ☞ «Χάρτης υδρογραφικής υφής, Y». Προκειμένου να συνταχθεί ο χάρτης της υδρογραφικής υφής, χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες υδρογραφικής πυκνότητας (D) και υδρογραφικής συχνότητας (F) των υδρογραφικών δικτύων
- ☞ «Χάρτης μορφολογικών κλίσεων, S», περιέχει τις κλίσεις της περιοχής
- ☞ «Χάρτης χρήσεων γης, V», καταγράφει τις χρήσεις γης .

Ο βαθμός τρωτότητας των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή έρευνας, μετά από τις πυρκαγιές, προέκυψε από την επεξεργασία των τριών πρώτων μεταβλητών, ενώ η τελευταία μεταβλητή δηλαδή αυτή των «χρήσεων γης» έχει αντικατασταθεί από τις «καμένες εκτάσεις» (Παράρτημα, Εικόνα 2). Επομένως η τρωτότητα των σχηματισμών μετά τις πυρκαγιές δύναται να απεικονιστεί χωρικά με τη συναξιολόγηση των παρακάτω τεσσάρων θεματικών χαρτών:

- ↗ «Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών επιδεικτικών στη διάβρωση και σε αστοχίες, L»
- ↗ «Χάρτης μορφολογικών κλίσεων, S»
- ↗ «Χάρτης υδρογραφικής υφής, Y»
- ↗ «Χάρτης καμένων εκτάσεων με βάση το βαθμό απανθράκωσης, B».

8. Επιλογή τομών εδάφους προς μελέτη

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στην εξέταση μιας περιοχής στο βόρειο τμήμα του δήμου Ζαχάρως, στη λεκάνη του Ζαχαραϊτικού ποταμού ο οποίος διασχίζει τον οικισμό της Ζαχάρως επηρεάζοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό τη ζωή των κατοίκων. Χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους τοπογραφικούς χάρτες της περιοχής, κλίμακας 1:50000 (ΓΥΣ), επελέχθησαν δύο τομές εδάφους Β- Β' και Γ- Γ' όπως παρουσιάζονται στο παράρτημα (Παράρτημα, Χάρτης 3, Τομή Β-Β' και Τομή Γ-Γ'). Η επιλογή των δύο τομών έγινε με γνώμονα την τρωτότητά τους πριν και μετά την πυρκαγιά του 2007, όπως αυτή παρουσιάζεται στη μελέτη που διενήργησε η σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του ΕΜΠ με αντικείμενο την εκτίμηση της εδαφικής απώλειας των λεκανών απορροής του δήμου Ζαχάρως – νομού Ηλείας.

Η τομή Β- Β' βρίσκεται στο Ζαχαραϊκό ρέμα, σε περιοχή που πριν από τις πυρκαγιές του 2007 θεωρείτο τρωτή στη διάβρωση έχοντας σημειώσει πολλά κατολισθητικά φαινόμενα και με το πέρας της φωτιάς έγινε ακόμη πιο τρωτή. Οι σχηματισμοί στην περιοχή είναι μεταλπικοί και αποτελούνται κυρίως από πλειο- πλειστοκαινικούς (Ανώτερο Πλειόκαινο- Μέσο Πλειστόκαινο). Οι υπερκείμενοι ορίζοντες αποτελούνται από άρρυθμες εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών και ψαμμούχων μαργών και αργιλομαργών με αραιές κροκάλες στη μάζα τους, ενώ σημειώνονται και παρεμβολές πολύμικτων κροκαλοπαγών, που τοπικά αυξάνουν σε συχνότητα στους ανώτερους ορίζοντες. Το χρώμα τους είναι κίτρινο έως καστανο-κίτρινο και κατά θέσεις γκρι έως πράσινο. Στους κατώτερους ορίζοντες σημειώνονται και λιγνίτες σε εκμεταλλεύσιμες ποσότητες. Η λεκάνη έχει πληρωθεί κυρίως με λιμναία και λιμνοθαλάσσια ιζήματα που περιέχουν λιγνίτες στο ανατολικό τμήμα, ενώ στο δυτικό τμήμα η λεκάνη έχει πληρωθεί με θαλάσσια ιζήματα. Τα στρώματα του σχηματισμού είναι έντονα παραμορφωμένα και διελαύνονται από πολλά ρήγματα, με αποτέλεσμα τις συχνές μεταβολές στις κλίσεις. Πάντως κυριαρχούν οι προς βορρά κλίσεις και δευτερευόντως οι προς δυσμάς. Τα ρήγματα δεν κόβουν πάντα όλη τη λιθοστρωματογραφική ακολουθία, αλλά συνήθως τμήμα αυτής, δηλαδή πρόκειται για συνιζηματογενή τεκτονισμό (Φουντούλης, 2000).

Οι εν λόγω σχηματισμοί καλύπτονται από ποικίλου πάχους μανδύα αποσάθρωσης. Τα υλικά αυτά λόγω της χαμηλής μηχανικής συνοχής, του μεγάλου ολικού πορώδους και της υψηλής υδροαπορροφητικότητας, εμφανίζουν πλήρη κορεσμό τη χειμερινή περίοδο ακόμα και με μικρό ύψος βροχόπτωσης, με αποτέλεσμα την εκδήλωση αστοχιών με τη μορφή ερπυστικών κινήσεων ή και ολισθήσεων.

Ως σύνολο οι σχηματισμοί του Νεογενούς χαρακτηρίζονται από μικρής υδροπερατότητας έως ημιπερατοί, λόγω της ποικιλίας των ιζημάτων που τους αποτελούν. Αυξημένη υδροπερατότητα παρουσιάζουν οι ενστρώσεις των ψαμμιτών και κροκαλοπαγών, ενώ η δυναμικότητα της υδροφορίας που αναπτύσσεται στη μάζα τους εξαρτάται από τη σχετική τους θέση με τις ζώνες τροφοδοσίας (επιφανειακή εξάπλωση, ανάπτυξη στις κοίτες των ρεμάτων, υδραυλική επικοινωνία με καρστικούς υδροφόρους στα περιθώρια της λεκάνης).

Η τομή Γ-Γ' βρίσκεται στο ρέμα Ακίδα, κοντά στον οικισμό της Αρήνης, σε περιοχή που σύμφωνα με τη μελέτη, αρχικά δεν ήταν ιδιαίτερα τρωτή, μετά όμως από τις πυρκαγιές έγινε ιδιαίτερα τρωτή στη διάβρωση. Η περιοχή αυτή αποτελείται από αλπικούς σχηματισμούς της ζώνης της Πίνδου. Συγκεκριμένα στο Ανώτερο Ιουρασικό παρατηρείται η σχιστοκερατολιθική σειρά (J- K, sch) που περιλαμβάνει ραδιολαρίτες με εναλλαγές μικριτικών ασβεστολίθων, ενώ είναι πολύ συχνές οι παρεμβολές ψαμμιτών, κροκαλοπαγών και μαργών. Προς τα πάνω επικρατούν ερυθρές, συμπαγείς, σκληρές μάργες οι οποίες εναλλάσσονται με ψαμμίτες και ωολιθικούς ασβεστόλιθους (Ι.Γ.Μ.Ε., Λαλεχός, 1974). Οι ραδιολαρίτες αυτής της ηλικίας, έχουν χρώμα ερυθρό ή πράσινο, ενώ οι κερατολιθικές ενδιαστρώσεις των μεταβατικών στρωμάτων προς τον τυπικό φλύσχη, έχουν χρώμα μαύρο. Το πάχος ποικίλει από μερικά μέτρα έως 350m (Φουντούλης, 2000).

Στο Ανώτερο Κρητιδικό παρουσιάζονται ανθρακικά (Ks.k) που αποτελούνται από πολύχρωμους λεπτο- μέσο- τοπικά παχυστρωματώδεις ασβεστολίθους στους οποίους παρεμβάλλονται ερυθρές ή κίτρινες μάργες. Κατά θέσεις εμφανίζονται λατυποπαγείς λεπτο- μεσο- τοπικά παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι και καρστικοποιημένοι. Αρκετά συχνά οι πλακώδεις ασβεστόλιθοι περιέχουν διαστρώσεις, φακούς και κονδύλους πολύχρωμων κερατολίθων. Το πάχος τους δεν είναι σταθερό, αλλά διαφέρει από θέση σε θέση από 150 έως 400 m (Ι.Γ.Μ.Ε., Κατσαβριάς, 1979). Όσον

αφορά στην υδατοπερατότητα, οι ανθρακικοί σχηματισμοί λόγω έντονου κερματισμού και καρστικοποίησης εμφανίζουν μέτρια έως υψηλή διαπερατότητα. Η έντονη λεπίωση που έχουν υποστεί, εμποδίζει την ανάπτυξη εκτεταμένου και ενιαίου καρστικού υδροφόρου στη μάζα τους, καθώς οι ανθρακικοί σχηματισμοί εναλλάσσονται διαδοχικά, τόσο επιφανειακά, όσο και στην υπόγεια συνέχειά τους με πρακτικά υδατοστεγανά πετρώματα (ραδιολαρίτες και κλαστικοί σχηματισμοί).

Η πρώτη τομή B-B', όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από σχηματισμούς ποικίλης λιθολογικής σύστασης που εναλλάσσονται τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση και αποτελούνται από μάργες και ψαμμίτες, που κυριαρχούν, αλλά και άμμους, αμμοχάλικα, ιλύες, αργιλομάργες και σπανιότερα κροκαλοπαγή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αναμένονται βαθιές αστοχίες υπό την έκθεσή τους σε διάφορα ακραία και μη καιρικά φαινόμενα.

Το λογισμικό επεξεργασίας της συγκεκριμένης τομής είναι το Συνδυαστικό Μοντέλο Υδρολογίας και Ευστάθειας Πρανών – CHASM 4.0 (Combined Hydrological and Stability Model) που αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο, υπολογίζει τις χωρο-χρονικές μεταβολές της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ενός πρανού. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται για το τέλος κάθε ώρας ισχυρής βροχόπτωσης. Η ανάλυση ευστάθειας σε κυκλική αστοχία γίνεται με τη μέθοδο Bishop, με μια αυτοματοποιημένη διερεύνηση της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης, η οποία με άλλα λόγια πραγματοποιεί υποθετικές επιφάνειες αστοχίας, χωρίς να εντοπίζει με ακρίβεια τη θέση της αστοχίας. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι η εισαγωγή οποιουδήποτε τύπου βλάστησης, βλέποντας έτσι άμεσα την ευεργετική επίδρασή της στην αντοχή των πρανών.

Στη δεύτερη τομή Γ-Γ', συναντώνται κυρίως σχιστοκερατόλιθοι. Όπως καταλαβαίνουμε, λοιπόν, η συγκεκριμένη τομή αποτελείται από μια ζώνη αποσάθρωσης βάθους 1-3 μέτρων κατά προσέγγιση, η οποία ακολουθείται από τη ζώνη κερματισμού πάνω από το μητρικό πέτρωμα. Συνεπώς, σε αντίθεση με την τομή B-B', εδώ αναμένεται ένα είδος επιφανειακής αστοχίας στη ζώνη αποσάθρωσης.

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την επεξεργασία της συγκεκριμένης τομής είναι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 6.0 της εταιρίας Rocscience. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσομοίωση της γεωμετρίας του πρανούς, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, των γεωλογικών του σχηματισμών, την προσομοίωση του τασικού πεδίου και γενικότερα την παραμετροποίηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες θα γίνει η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς. Μάλιστα το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού της επιφάνειας αστοχίας, σε αντίθεση με τις υποθετικές επιφάνειες αστοχίας που παρέχει το CHASM.

Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται η επίδραση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια του πρανούς, γι' αυτό και στην παρούσα φάση κρίνεται σκόπιμη η μελέτη αυτής, αφού φαίνεται πως επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις υδρολογικές συνθήκες στην περιοχή. Επιλέγονται, λοιπόν, τρία εναλλακτικά σενάρια καθένα από τα οποία αποτελεί μία ειδική περίπτωση που χρήζει μελέτης. Συγκεκριμένα, το 1^ο σενάριο υποθέτει ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα φτάνει ψηλά - στο 75% του ύψους του πρανούς, δηλώνοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος κορεσμένης περιοχής στο πρανές. Στο 2^ο σενάριο επιλέγεται μία μέση στάθμη υδροφόρου που ίσως να αποτελεί και πιο συνήθη περίπτωση, με τον υδροφόρο να βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς. Τέλος, το 3^ο σενάριο περιλαμβάνει την περίπτωση εκείνη, που η κορεσμένη ζώνη είναι μικρή στο πρανές, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να πλησιάζει το 25% του ύψους του πρανούς, μετρημένη από τον πυθμένα αυτού.

Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση των αρχικών συνθηκών, δηλαδή της πίεσης των πόρων του νερού σε συνδυασμό με το όριο της αρνητικής πίεσης (μύζηση). Ειδικότερα, λαμβάνονται δύο περιπτώσεις, στη μεν πρώτη – *Περίπτωση 1*- γίνεται θεώρηση ύψους μύζησης στα 5 m από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ στη δεύτερη- *Περίπτωση 2*- ακολουθείται μια πιο συντηρητική υπόθεση ύψους 2.5 m περίπτωση που αναμένεται έπειτα από περίοδο σχετικής ανομβρίας.

9. Προσομοίωση πρανών- τομή B-B'

9.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο η επιλογή της τομής B-B' έγινε με βάση την τρωτότητά της πριν και μετά την πυρκαγιά. Η συγκεκριμένη, λοιπόν, τομή βρίσκεται σε περιοχή η οποία έγινε ακόμα πιο τρωτή μετά την πυρκαγιά. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν στην περιοχή είναι οι τεταρτογενείς και αναμένεται έτσι η εμφάνιση βαθιών αστοχιών στην περιοχή. Μάλιστα, στο συμπέρασμα αυτό οδηγεί και ο έλεγχος εμφάνισης ρηχής, επιφανειακής αστοχίας που πραγματοποιείται ακολούθως.

Η εισαγωγή στο CHASM ολόκληρου του πρανού δεν είναι εφικτή και εύκολα υπολογίσιμη, γι' αυτό και η μελέτη προσανατολίστηκε σε ένα τμήμα του πρανού που φαίνεται πιο επιρρεπές σε αστοχία. Αρχικά, λοιπόν, σχεδιάστηκε το πρανές στο πρόγραμμα Phase για μία μακροσκοπική παρατήρηση του, προκειμένου να εντοπιστούν οι κρίσιμες περιοχές, εκείνες δηλαδή που πιθανότατα θα αστοχήσουν. Ο σχεδιασμός αυτού του τμήματος του πρανού στο CHASM και η περαιτέρω ανάλυσή του, οδήγησε στη συνέχεια στον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας.

Το CHASM απαιτεί ως βασικά δεδομένα εισόδου τη γεωμετρία του πρανού, οι τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών καθώς και ο καθορισμός της βλάστησης που τυχόν υπάρχει στο πρανές. Όσον αφορά την υδρολογία, προσομοιώνεται ένα επεισόδιο βροχόπτωσης για το οποίο είναι γνωστά η διάρκεια και ένταση ενώ παράλληλα χρειάζονται τιμές μύζησης και εξατμισοδιαπνοής.

Οι υπολογισμοί αφορούν την συγκεκριμένη κάθε φορά γεωμετρία του πρανού. Η κατολίσθηση μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια αλλά και κάποιες ώρες μετά την έντονη βροχόπτωση. Όταν η επιφάνεια ολίσθησης είναι ρηχή, η κατολίσθηση συμβαίνει σχεδόν αμέσως ενώ παρατηρούνται πιο γρήγορες αλλαγές στην πίεση των πόρων του νερού. Η μεγάλης διάρκειας και μικρής έντασης βροχή μειώνει συνήθως το συντελεστή ασφαλείας.

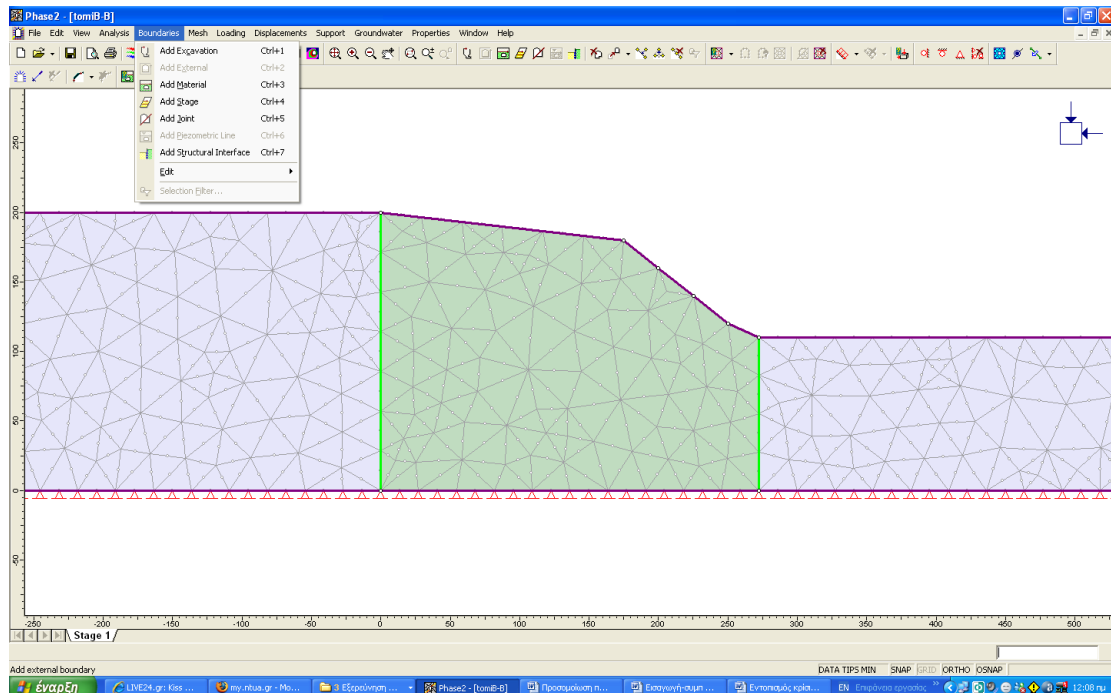
9.2 Εντοπισμός της περιοχής προς μελέτη

9.2.1 Εντοπισμός της κρίσιμης περιοχής με τη χρήση του Phase 2 v6.0

Σε πρώτη φάση, έγινε η εισαγωγή του πρανούς στο πρόγραμμα Phase2 v6.0 για μία μακροσκοπική παρατήρηση του, προκειμένου να εντοπιστούν οι κρίσιμες περιοχές, εκείνες δηλαδή που είναι πιο επιρρεπείς σε αστοχία. Το λογισμικό αυτό περιλαμβάνει τρία διαμορφώματα – στάδια (modules) τα οποία αναφέρονται ως: MODEL, COMPUTE και INTERPRET.

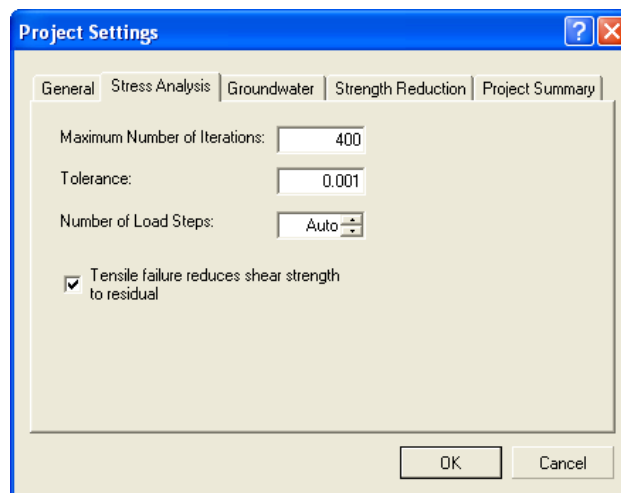
Στο model (μοντέλο, προσομοίωμα) πραγματοποιείται η εισαγωγή και διαμόρφωση:

- των ορίων (*boundaries*) του υπό εξέταση πρανούς. Το πρόγραμμα εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας της γεωμετρίας με την εισαγωγή συντεταγμένων, δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής της γεωμετρίας είτε με τη μορφή αρχείων DXF, είτε με τη μορφή αρχείων Slide. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε η εισαγωγή συντεταγμένων σημείων των τομών που σχεδιάστηκαν για την περιοχή μελέτης. Στην εικόνα 9.1 φαίνεται η γεωμετρία του υπό μελέτη πρανούς.



Εικόνα 9.1: Γεωμετρία του υπό μελέτη πρανούς

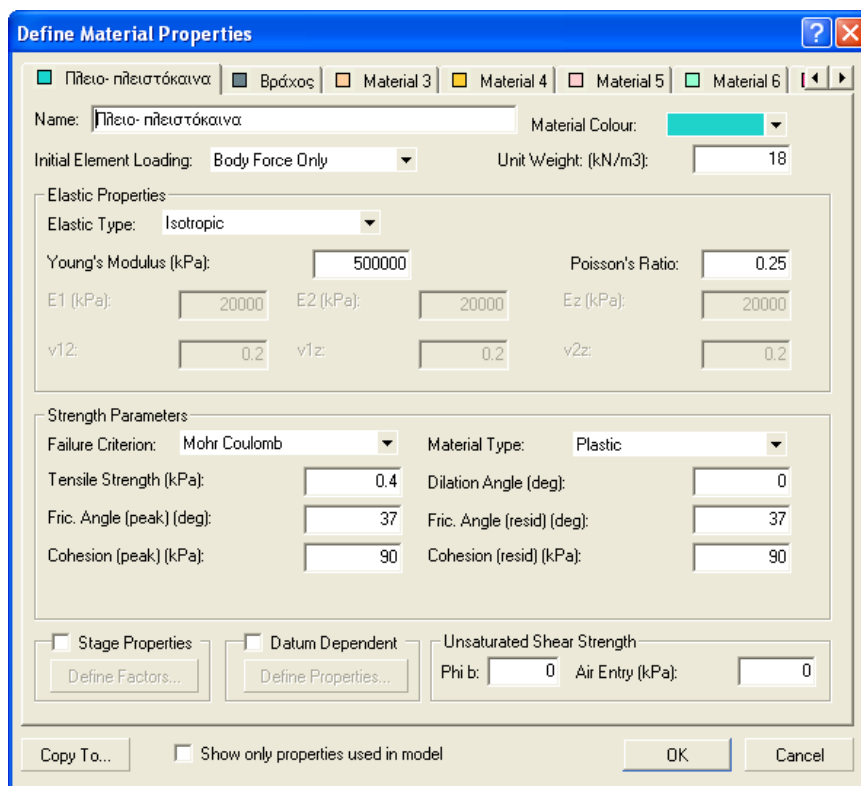
- των επιτόπου τάσεων. Οι συνθήκες που καθορίζουν την ανάλυση των τάσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum number of iterations), η ανοχή (tolerance) και ο αριθμός των βημάτων φόρτισης (number of load steps), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9.2.
 - ↳ Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων καθορίζει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για κάθε βήμα φόρτισης. Η τιμή που προτείνεται και χρησιμοποιείται είναι 400 επαναλήψεις
 - ↳ Η τιμή της ανοχής ελέγχει την επιτρεπτή μη ισορροπούσα κομβική δύναμη σε κάθε κόμβο χωριστά. Για μοντέλα όπου όλα τα υλικά χαρακτηρίζονται ως ελαστικά η ανοχή δεν έχει καμία χρησιμότητα καθώς η λύση είναι ακριβής. Για περιπτώσεις όπου έχουμε και πλαστικά εδάφη η τιμή της ανοχής είναι σχετική και κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 0.001, ανάλογα με το πρόβλημα. Μετά από κάποιες δοκιμές επιλέχθηκε η 0.001.
 - ↳ Ο αριθμός των βημάτων φόρτισης αφορά το κάθε στάδιο ανάλυσης και συνίσταται η επιλογή του αυτόματου.



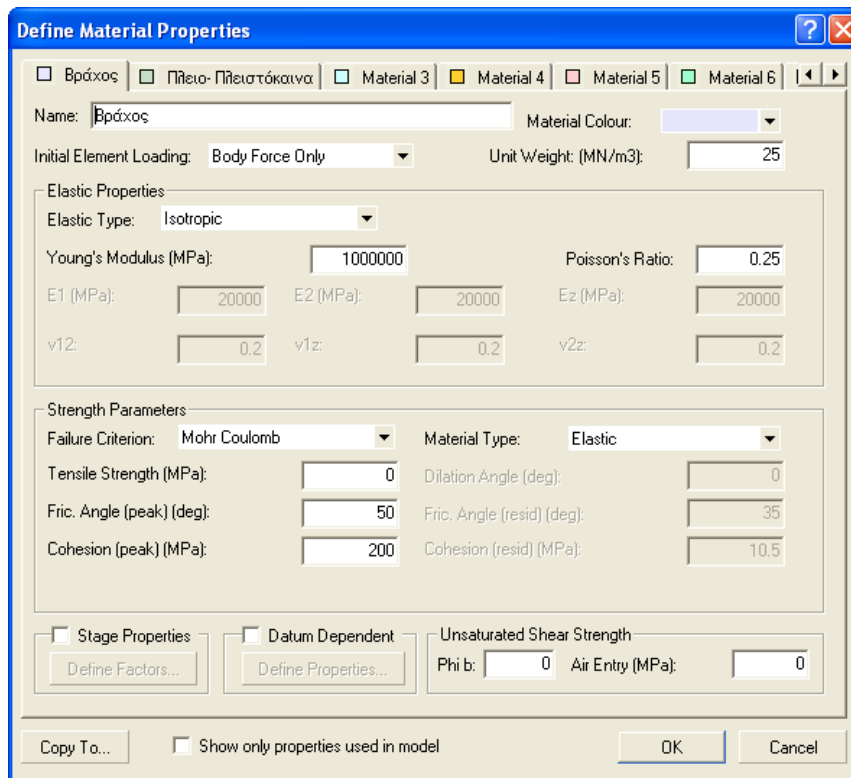
Εικόνα 9.2: Αρχικές συνθήκες- Ανάλυση τάσεων

- των συνοριακών συνθηκών και εδαφικών παραμέτρων. Το επόμενο βήμα ήταν να προσδιορίσουμε τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού που απαντάται στο συγκεκριμένο πρανές ξεχωριστά. Στις εικόνες 9.3 και 9.4 φαίνονται όλες οι εδαφικές παράμετροι που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο πρανές. Όπως αναφέρθηκε η εν λόγω τομή περιλαμβάνει

κατά το πλείστον πλειο- πλειστοκαινικά πετρώματα. Σε αυτή τη φάση, για αυτό το σχηματισμό θεωρήθηκαν οι ακόλουθες τιμές παραμέτρων: ειδικό βάρος $\gamma = 25 \text{ MN/ m}^3$, λόγος Poisson = 0.25, συνοχή $c = 90 \text{ kPa}$ και γωνία τριβής $\varphi = 37^\circ$. Ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται το κριτήριο Mohr-Coulomb. Για την καλύτερη επεξεργασία και απεικόνιση του πρανούς στο πρόγραμμα, επιλέχθηκε η εισαγωγή βράχου ως συνοριακή συνθήκη. Γι' αυτό το έδαφος ελαστικού τύπου, εισήχθησαν ειδικό βάρος $\gamma = 25 \text{ MN/ m}^3$, λόγος Poisson = 0.25, συνοχή $c = 200 \text{ kPa}$ και γωνία τριβής $\varphi = 50^\circ$. Ως κριτήριο αστοχίας χρησιμοποιείται και εδώ το κριτήριο Mohr- Coulomb.

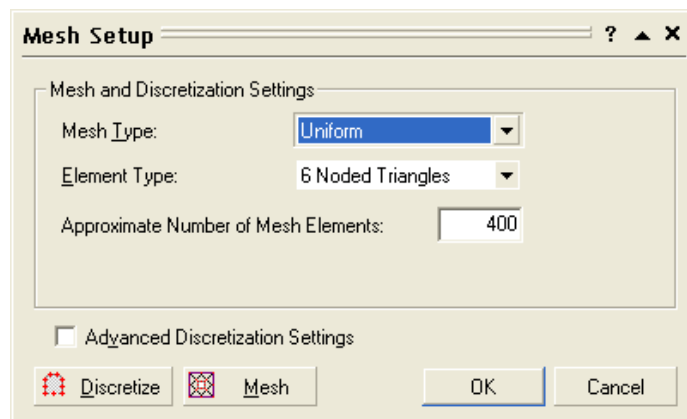


Εικόνα 9.3: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους (πλειο- πλειστοκαινικοί σχηματισμοί)



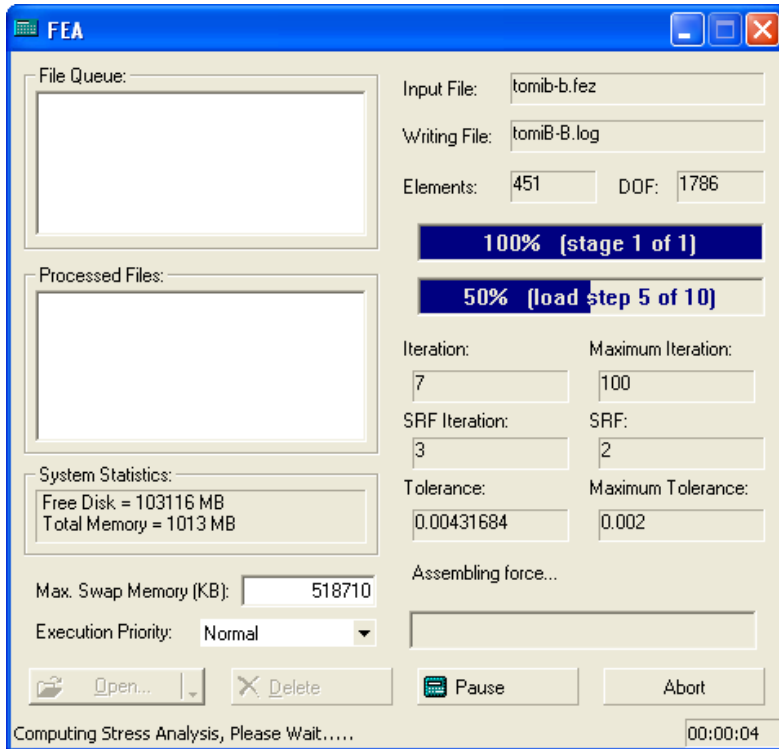
Εικόνα 9.4: Καθορισμός παραμέτρων βράχου

- της δημιουργίας του πλέγματος (*mesh*) των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων τόσο αυξάνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά και ο χρόνος εκτέλεσης της εφαρμογής και η απαιτούμενη μνήμη υπολογιστή. Η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων σε αυτό (εικόνα 9.5)



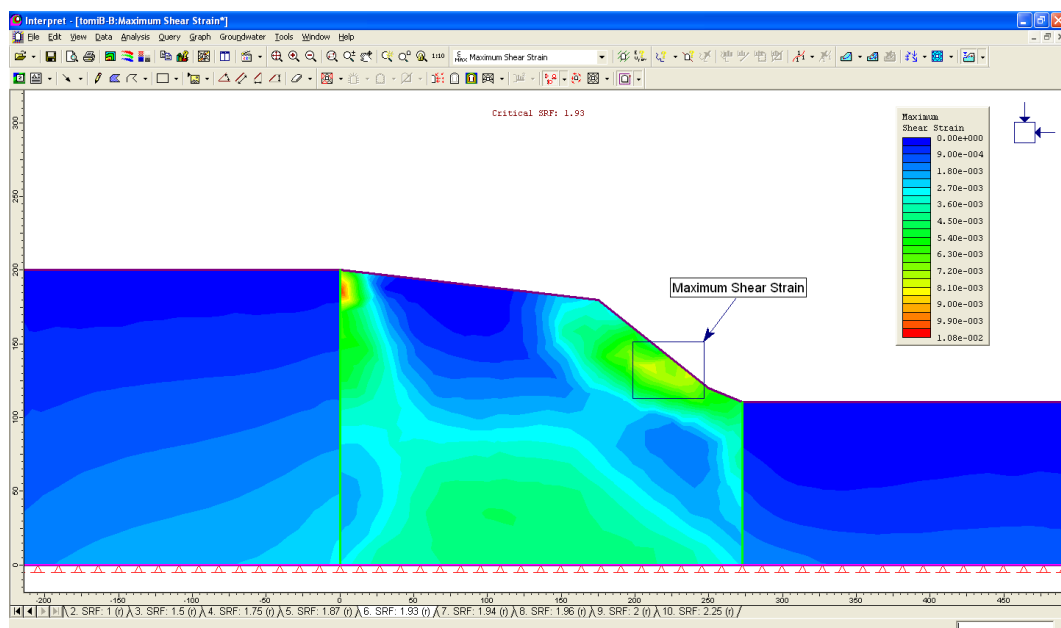
Εικόνα 9.5: Καθορισμός πλέγματος- mesh

Το compute (υπολογισμός) αποτελεί το στάδιο του προγράμματος όπου γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, των μετατοπίσεων αυτού και τελικά της αστοχίας (Εικόνα 9.6).



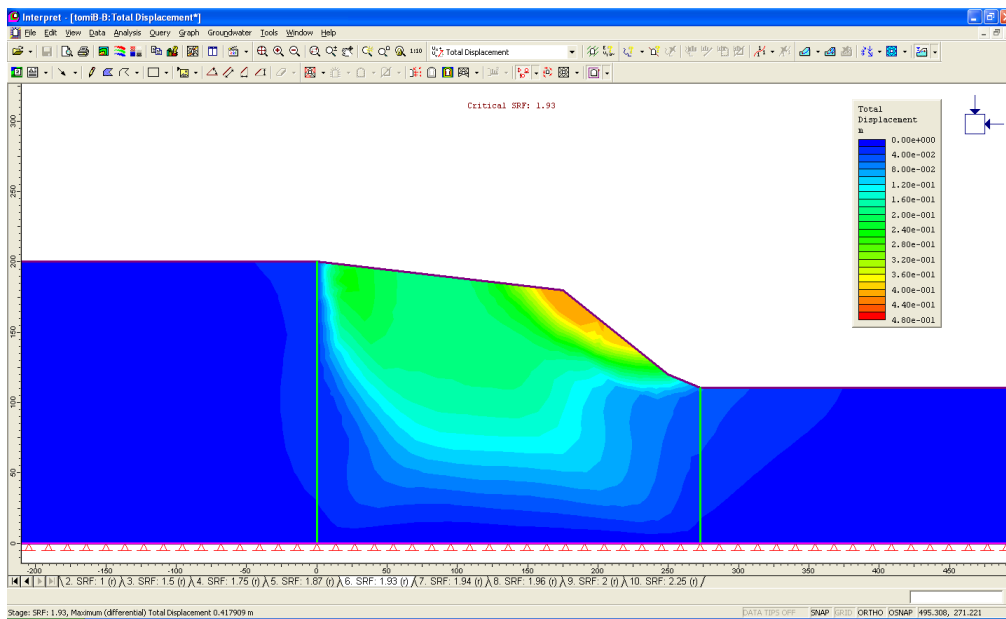
Εικόνα 9.6: Υπολογισμός- Compute

Το στάδιο όπου οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα του υπολογιστικού μέρους βοηθώντας το χρήστη στην ερμηνεία αυτών είναι το interpret (ερμηνεία). Ακολούθως, παρουσιάζεται η κατανομή της διατμητικής παραμόρφωσης του πρανούς και ο εντοπισμός της περιοχής με τη μέγιστη διατμητική παραμόρφωση. Με βάση αυτή την κατανομή τάσεων, απομονώθηκε ένα τμήμα του πρανούς, το οποίο αποτέλεσε το αντικείμενο επεξεργασίας του λογισμικού CHASM.



Εικόνα 9.7: Ερμηνεία – Interpret, Μέγιστη Διατμητική Παραμόρφωση

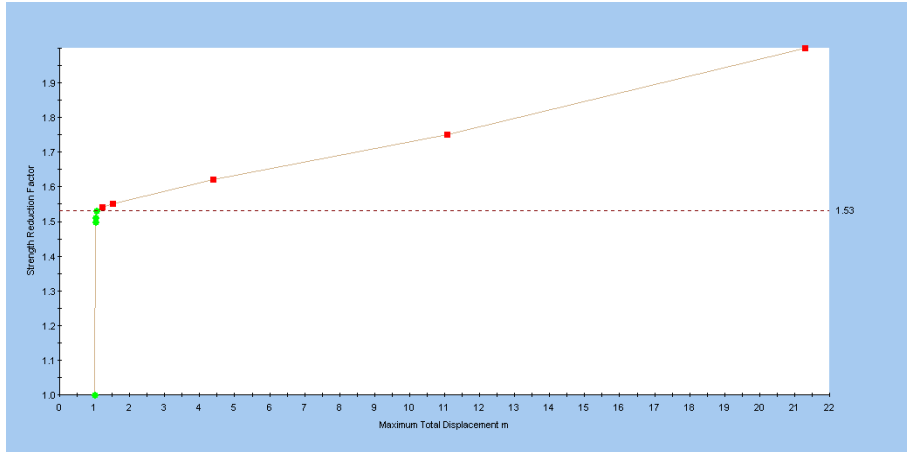
Συγκεκριμένα, η εικόνα 9.7 παρουσιάζει και την κρίσιμη τιμή του συντελεστή μείωσης αντοχής SRF, της τιμής δηλαδή που το πρανές γίνεται πιο ασταθές. Εδώ, η τιμή προσδιορίζεται στα 1.93, γεγονός που δηλώνει την ευστάθεια του πρανού υπό φυσιολογικές συνθήκες. Στα τελευταία 50 m του πρανού παρατηρείται η μέγιστη διατμητική τάση (κίτρινο στο σχήμα), όπου η ευστάθεια μειώνεται σε ενδεχόμενα φαινόμενα σεισμού ή βροχόπτωσης. Με άλλα λόγια, θεωρούμε ότι πρόκειται για την κρίσιμη περιοχή, όπου επικεντρώνεται η μελέτη στο CHASM.



Εικόνα 9.8: Ερμηνεία – Interpret, Ολική μεταφορά φερτών υλικών

Ακόμη για τον κρίσιμο SRF είναι δυνατή η εμφάνιση της ολικής μετακίνησης κορημάτων. Σε περίπτωση, λοιπόν, που το πρανές δεχτεί κάποιο εξωτερικό παράγοντα ικανό να προκαλέσει την αστοχία του, θα ολισθήσει και θα μετακινηθεί μια μάζα εδάφους. Η θέση αυτού του εδάφους παρουσιάζεται με το πορτοκαλί χρώμα στην εικόνα 9.8.

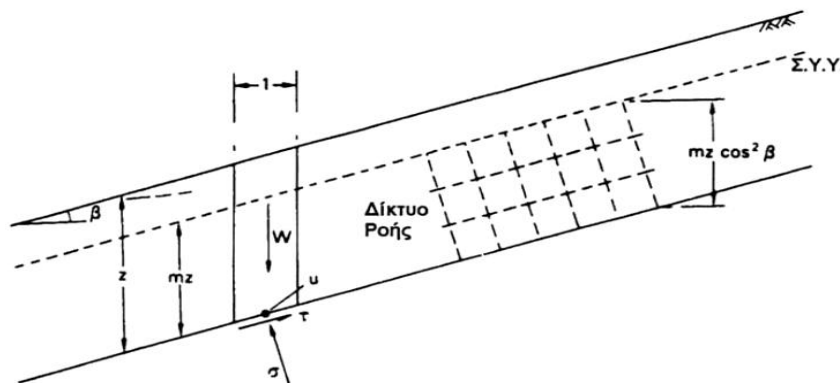
Καθώς ο SRF αυξάνεται, οι ιδιότητες των εδαφών μειώνονται. Στο ίδιο σημείο, το πρανές θα πέσει και οι μετακινήσεις θα αυξηθούν πολύ γρήγορα και η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων δε θα συγκλίνει. Αυτό το σημείο της μη σύγκλισης είναι που καθορίζει τον κρίσιμο SRF. Παρατηρούμε στο διάγραμμα 9.1 την επίδραση στις μετακινήσεις και το σημείο στο οποίο δεν υπάρχει σύγκλιση.



Διάγραμμα 9.1: Σχέση SRF και μέγιστης ολικής μετακίνησης υλικών- Περιοχή σύγκλισης

9.2.2 Έλεγχος σε επιφανειακή ολίσθηση

Η τομή B-B', περιλαμβάνει πλειο- πλειστοκαινικούς σχηματισμούς και αναμένουμε την εκδήλωση αστοχίας στην περιοχή με την απότομη κλίση του πρανούς (κρίσιμη περιοχή). Εξετάζεται το ενδεχόμενο επιφανειακής αστοχίας σε αυτό το πρανές θεωρώντας ως εδαφικές παραμέτρους: συνοχή $c = 90 \text{ kPa}$ και γωνία τριβής $\phi = 37^\circ$.



Σχήμα 9.1: Ευστάθεια απείρου μήκους πρανούς- Στρωματοειδείς κατολισθήσεις

Σύμφωνα με τη θεωρία για ευστάθεια απείρου μήκους πρανούς στην περίπτωση των στρωματοειδών ολισθήσεων ο συντελεστής ασφαλείας F είναι:

$$F = \tau_f / \tau \quad (9.1)$$

Το έδαφος στο επίπεδο αστοχίας ανθίσταται με τη διατμητική αντοχή του τ_f που είναι:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (9.2)$$

$$\sigma = [(1 - m)\gamma + m\gamma_s]z \cos^2 \beta$$

$$\tau = [(1 - m)\gamma + m\gamma_s]z \sin \beta \cos \beta$$

$$u = m\gamma_w z \cos^2 \beta$$

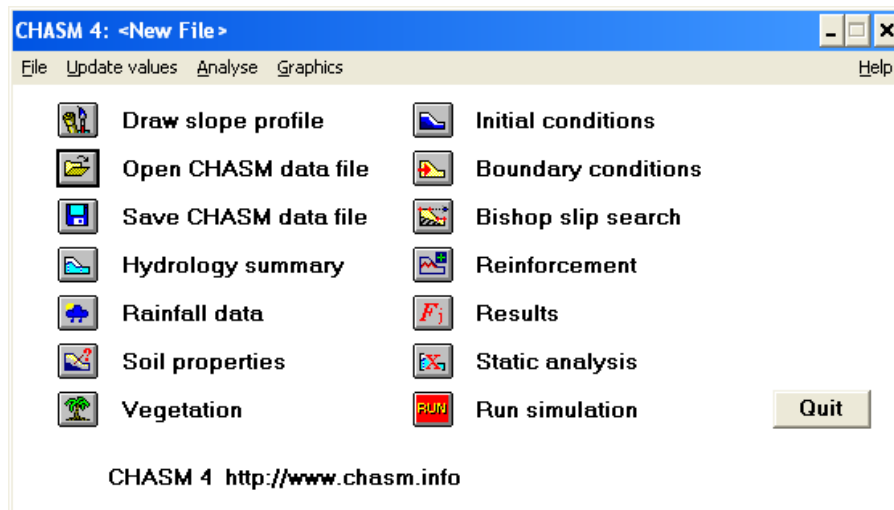
Όπου γ το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους πάνω από τον Υ.Ο., γ_s το κορεσμένο φαινόμενο ειδικό βάρος και γ_w το ειδικό βάρος του νερού.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία με αγνόηση του υδροφόρου ορίζοντα ($m=0$), προκύπτει $F=1.6 > 1$. Η τιμή αυτού του συντελεστή δηλώνει ότι το πρανές δεν κινδυνεύει από επιφανειακή αστοχία και έτσι προσανατολιζόμαστε στην εξέταση βαθιάς αστοχίας με τη βοήθεια του CHASM.

9.3 Σχεδιασμός πρανούς στο CHASM

Σε πρώτη φάση εξετάζεται η ευστάθεια του υπό μελέτη πρανούς σε φυσιολογικές συνθήκες πριν από την πυρκαγιά και υπό την επίδραση του νερού της βροχής.

Η εφαρμογή του CHASM ξεκινά με το κύριο παράθυρο διαλόγου του προγράμματος όπως φαίνεται στην εικόνα 9.9. Σε αυτό παρουσιάζονται όλες οι δυνατότητες επεξεργασίας στο CHASM.



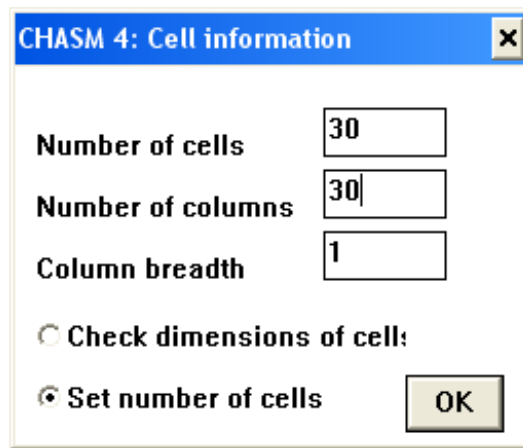
Εικόνα 9.9: Παράθυρο διαλόγου CHASM

Αρχικά επιλέγεται ο σχεδιασμός της τομής του πρανούς με την επιλογή:

 Draw slope profile

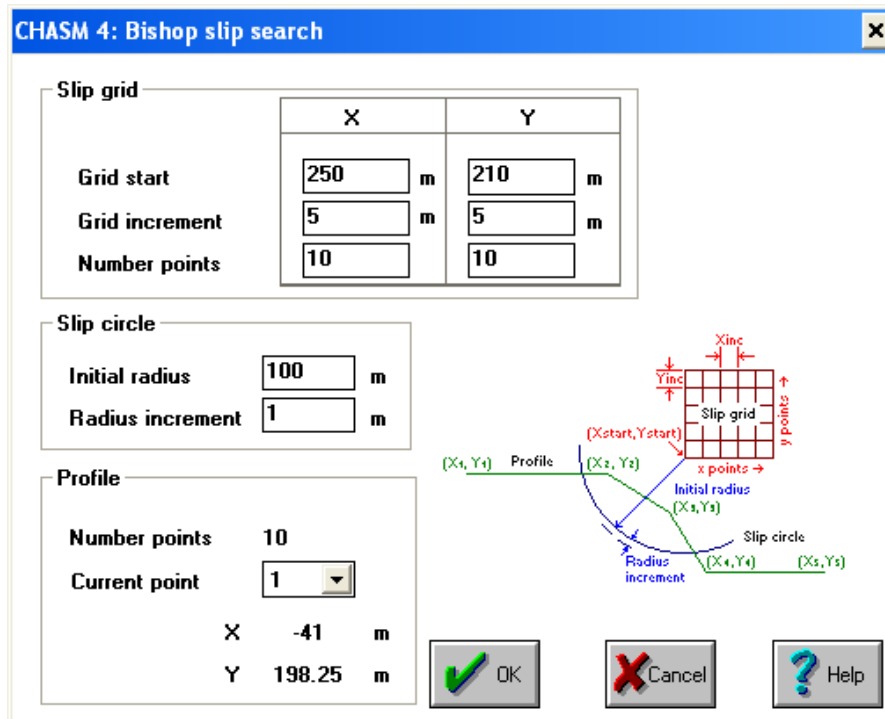
Στο παράθυρο που εμφανίζεται, σχεδιάζεται η γεωμετρία του πρανούς επιλέγοντας τις συντεταγμένες, με βάση την τομή που έχει σχεδιαστεί στο Auto Cad. Σημειώνεται ότι το CHASM δεν παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής ακριβούς ζεύγους συντεταγμένων (σε αντίθεση με το Phase) και έτσι δικαιολογούνται τυχόν αποκλίσεις της τομής που σχεδιάστηκε εδώ με την αντίστοιχη στο AutoCad.

Το διδιάστατο μοντέλο χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και έτσι το πρανές χωρίζεται σε μια σειρά ορθογώνιων στηλών και η κάθε στήλη σε επιμέρους κανονικά κελιά με την εντολή Hydrology -> Draw cells. Είναι δυνατή η αλλαγή του αριθμού των κελιών και των στηλών όπως φαίνεται στην εικόνα 9.10.



Εικόνα 9.10: Εισαγωγή δεδομένων για τα κελιά

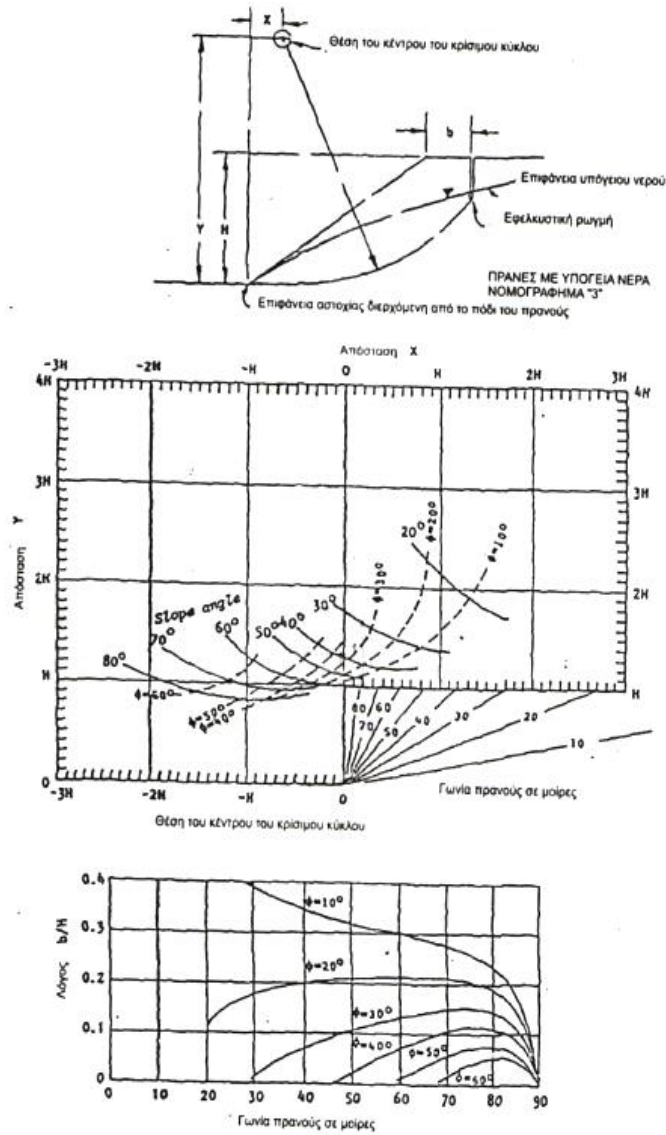
Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το CHASM 4.0 είναι η ανάλυση ευστάθειας σε κυκλική αστοχία με τη μέθοδο Bishop, με μια αυτοματοποιημένη διερεύνηση της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης. Στη συνέχεια ορίζεται ο κύκλος ολίσθησης επιλέγοντας την αρχική ακτίνα του κύκλου και την προσαύξηση αυτής. Η αυτόματη διαδικασία διερεύνησης του ελάχιστου συντελεστή ασφαλείας περιλαμβάνει διάφορα βήματα στο σχηματιζόμενο κάρναβο ολίσθησης και αλλαγές στην ακτίνα του κύκλου ολίσθησης.



Εικόνα 9.11: Διερεύνηση επιφάνειας ολίσθησης κατά Bishop

Ο ορισμός των συντεταγμένων του κύκλου ολίσθησης γίνεται με τη βοήθεια του διαγράμματος 9.2 (Μ. Σακελλαρίου, 2005) από το οποίο προκύπτει η θέση του κέντρου του κρίσιμου κύκλου. Στη συγκεκριμένη τομή, οι συντεταγμένες αρχής του καννάβου ολίσθησης προσδιορίζονται σε $X= 250\ m$ και $Y= 210\ m$. Θεωρούμε επίσης ότι η αρχική ακτίνα είναι $100\ m$ και αυξάνεται κάθε φορά κατά ένα μέτρο.

Κεφάλαιο 9: Προσομοίωση πρανών- τομή B-B'



Διάγραμμα 9.2: Θέση κέντρου του κρίσιμου κύκλου (Hoek & Bray, 1975)

Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα με την εντολή Hydrology -> Water table. Στην περίπτωση που εξετάζεται, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την επακριβή θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Συνεπώς θεωρούμε ότι η επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα ακολουθεί την κατεύθυνση του πρανού ενώ το ύψος του εξετάζεται σε τρεις πιθανές θέσεις στα 25% , 50% και 75% του ύψους του πρανού. Όσον αφορά στη θέση, ο μόνος περιορισμός του προγράμματος είναι ότι ο υδροφόρος πρέπει να τέμνει το πόδι του πρανού και όχι την επιφάνεια αυτού.

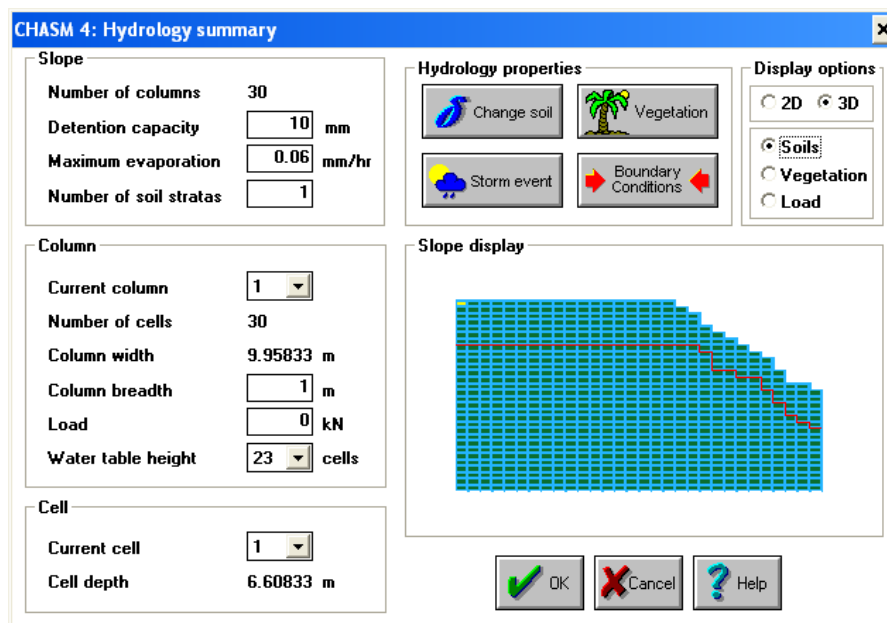
9.4 Προσομοίωση πρανούς πριν από το ενδεχόμενο πυρκαγιάς

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο η επιλογή της τομής B-B' έγινε με βάση την τρωτότητα της πριν και μετά την πυρκαγιά. Η συγκεκριμένη, λοιπόν, τομή βρίσκεται σε περιοχή η οποία παρουσίασε υψηλότερη τρωτότητα μετά την πυρκαγιά. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν στην περιοχή είναι οι πλειοπλειστοκαινικοί και με τη βοήθεια του προγράμματος CHASM εξετάζεται το ενδεχόμενο παρουσίας βαθιών αστοχιών στην τομή. Ακολούθως, εξετάζονται τρία σενάρια για την επιλογή των τελικών εδαφικών παραμέτρων, με βάση το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και την ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού.

9.4.1 Μελέτη 1^ο Σεναρίου

9.4.1.1 Καθορισμός παραμέτρων

Σε δεύτερη φάση, ορίζονται οι παράμετροι υδρολογίας του πρανούς στο παράθυρο διαλόγου Hydrology Summary (εικόνα 9.12).



Εικόνα 9.12: Υδρολογικές παράμετροι πρανούς

Η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή του πρανούς υπολογίζεται σύμφωνα με τη μέθοδο Penman (1948), η διαδικασία της οποίας παρουσιάζεται στο Παράρτημα, Πίνακας 2, Πίνακας 3. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα

από την EMY, όπως η μηνιαία θερμοκρασία του αέρα, η μηνιαία σχετική υγρασία αέρα, η μηνιαία ηλιοφάνεια και η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου (Εδάφιο 7.4). Τελικά προκύπτει ως μέγιστη εξατμισοδιαπνοή 0.06 mm/hr. Στην εικόνα 9.12 φαίνεται τρισδιάστατα το πρανές αλλά και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα όπως αυτό επιλέγεται κάθε φορά.

Ακολούθως ορίζονται οι παράμετροι της προσομοίωσης της βροχόπτωσης (εικόνα 9.13) Διαθέτουμε το υετόγραμμα βροχόπτωσης για δώδεκα ώρες στο βροχομετρικό σταθμό στις Πόρτες, που θεωρείται επαρκές για να περιγράψει το επεισόδιο βροχής στη λεκάνη απορροής που εξετάζεται (Εδάφιο 7.4.1, σχήμα 7.2).

Time		Rainfall	
Length of simulation	12 hrs	Precipitation	2.592 mm/hr
Iteration period	60 secs	Effective ppt (grass)	0.99785 mm/hr
Storm start time	1 hrs	Effective ppt (tree)	1.64082 mm/hr
Storm stop time	12 hrs		
Storm Hour	12		

Εικόνα 9.13: Δεδομένα βροχόπτωσης

Στη συνέχεια, ορίζονται οι ιδιότητες του εδάφους. Η τομή βρίσκεται σε περιοχή με νεογενείς σχηματισμούς. Εδώ θεωρούμε ότι το έδαφος έχει περιεχόμενη υγρασία σε κορεσμό 42.11% και σχετικά μέτρια διαπερατότητα της τάξης του 10^{-5} m/s (Εδάφιο 1.4, Πίνακας 1.1). Επιπλέον ορίζονται το κορεσμένο και μη, ειδικό βάρος στα 19 και 18 kN/m³ αντίστοιχα. Όσον αφορά στη συνοχή και στη γωνία τριβής, οι τιμές κυμαίνονται για τα υπό μελέτη εδάφη σε ένα εύρος 35-100 kPa και (30-39)^ο αντίστοιχα.

Κριτήριο επιλογής του τελικού ζεύγους συνοχής και γωνίας τριβής (c, ϕ) αποτελεί η τιμή του τελικού συντελεστή ασφαλείας. Συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται στο χάρτη 9.1 σεισμικής επικινδυνότητας, ανήκει στη ζώνη II με κρίσιμη

επιτάχυνση $a_h = 0.24$. Συνεπώς, για να υπάρχει ευστάθεια έναντι σεισμού στην περιοχή θα πρέπει $k_{cr} = a_h$.

Αντικαθιστώντας στον ακόλουθο τύπο 9.3 (Σακελλαρίου & Φερεντίνου, 2006), προκύπτει συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.6.

$$k_{cr} = \frac{F - 1.0}{1.18 + \frac{0.66}{\tan \beta}} \quad (9.3)$$

όπου: F = συντελεστής ασφαλείας

β = γωνία κλίσης του πρανούς

Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι το πρανές είναι σταθερό και δεν αστοχεί υπό την επίδραση του σεισμού, όταν ο συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος ή ίσος από 1.6. Επομένως, το ζεύγος (c, φ) που οδηγεί σε συντελεστή μεγαλύτερο του κρίσιμου θεωρείται το ιδανικότερο για την περιοχή.



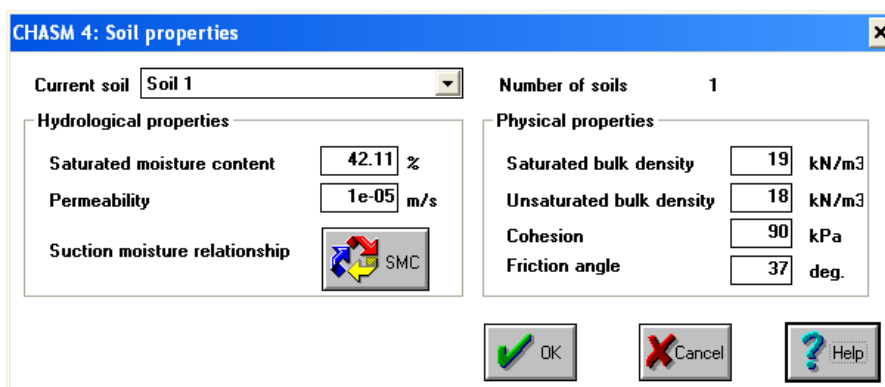
Χάρτης 9.1: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας

Σε αυτή την περίπτωση- σενάριο 1^ο - αναζητούνται εκείνες οι τιμές συνοχής και γωνίας τριβής που θα συντελέσουν σε επαρκή ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού,

όταν το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται ψηλά- στο 75% του ύψους του πρανούς. Ακολούθως, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον πίνακα 9.1 οι τελικές παράμετροι εδάφους και το αντίστοιχο παράθυρο διαλόγου στο CHASM (εικόνα 9.14).

Πίνακας 9.1: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 1^ο

Εδαφική παράμετρος	Τιμή
c	90 kPa
φ	37°
γ _s	19 KN/m ³
γ _v	18 KN/m ³
k	10 ⁻⁵ m/sec
w	42.11%



Εικόνα 9.14: Ιδιότητες εδάφους

Το πρανές πριν από την πυρκαγιά καλυπτόταν από βλάστηση και συγκεκριμένα από ελαιώνες και τμήματα γης που χρησιμοποιούνται γενικά για καλλιέργειες. Στο παράθυρο της εικόνας 9.15 ορίζουμε στο πρανές σε όλες τις στήλες και για βάθος 1 κελιού μια τυπική βλάστηση ακακίας, όπου το πρόγραμμα δίνει αυτόματα τιμές αντοχής ριζών 30 kPa και λόγο ριζών 6%.

CHASM 4: Vegetation

Entire slope

Detention capacity mm

Maximum evaporation mm/hr

No vegetation model

Using vegetation model

Properties of vegetation cover

Column Depth cells

Cover type

Effective precipitation from Thatch effect

Storm start 1 hr Storm stop 12 hr

Current hour

Precipitation per hour 2.768 mm

Effective precipitation 1.75223 mm

Strength parameters

Root tensile strength kPa

Root area ratio %

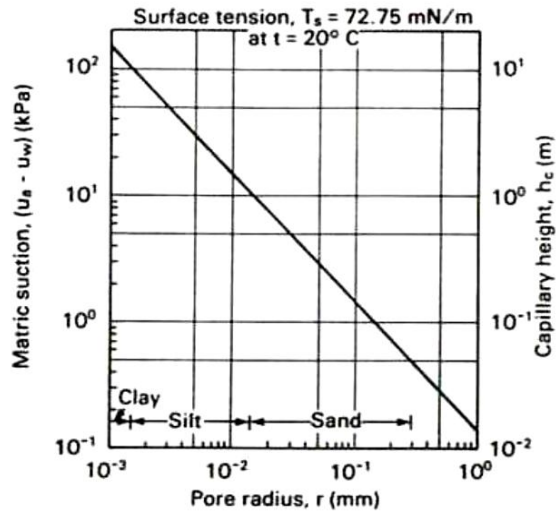
Effective cohesion 92.07 kPa

Friction angle 37 deg.

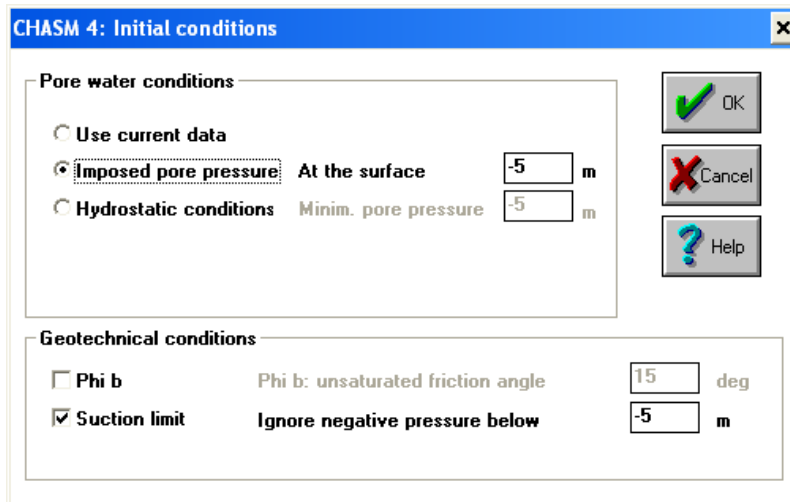
Εικόνα 9.15: Προσδιορισμός της βλάστησης

Το CHASM συνδέει την υδρολογική ανάλυση και την ανάλυση ευστάθειας, καθιστώντας σημαντικό τον ορισμό των ορίων της σχέσης και αλληλεπίδρασης των υδρολογικών συνθηκών στην ανάλυση ευστάθειας.

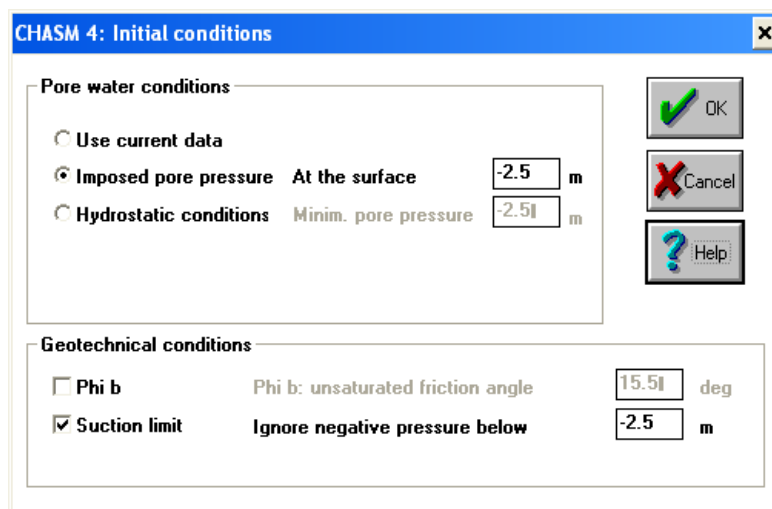
Στο διάγραμμα 9.3 φαίνεται η σχέση μεταξύ μεγέθους μύζησης, ύψους μύζησης και μεγέθους πόρων. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του ύψους της μύζησης κυμαίνονται μεταξύ 0.01 m και 10 m. Υποθέτοντας ότι το μέγεθος των πόρων του εδάφους που εξετάζεται είναι σχετικά μικρό, επιλέγονται δύο περιπτώσεις όσον αφορά το όριο της μύζησης, δηλαδή το ύψος εκείνο μέχρι το οποίο δεχόμαστε ότι υπάρχει αρνητική πίεση. Αρχικά, ορίζεται ως μέγιστο ύψος για τη μύζηση τα 5 m (εικόνα 9.16- Περίπτωση 1). Η υπόθεση αυτή, γίνεται με βάση το διαχωρισμό του πρανούς σε κελιά, αφού το ύψος του κελιού έχει οριστεί στα 5 m κατά προσέγγιση. Σημειώνεται ότι το πρόγραμμα μπορεί να αναπτύξει μεγάλες τιμές μύζησης κατά τη διάρκεια παρατεταμένης απορροής αλλά χρησιμοποιώντας τέτοιες τιμές στην εξίσωση του Bishop θα αυξανόταν αφύσικα ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Αντιλαμβανόμαστε πως η παραπάνω τιμή σπάνια συναντάται και γι' αυτό θεωρείται στη συγκεκριμένη μελέτη ως κρίσιμη. Θεωρώντας μια περίοδο σχετικής ανομβρίας το ύψος της αρνητικής πίεσης μειώνεται και φτάνει μέχρι τα 2.5 m από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα (εικόνα 9.17 - Περίπτωση 2).



Διάγραμμα 9.3: Σχέση μεταξύ μεγέθους μύζησης, ύψους μύζησης και μεγέθους πόρων (Fredlund & Rahardjo, 1993)

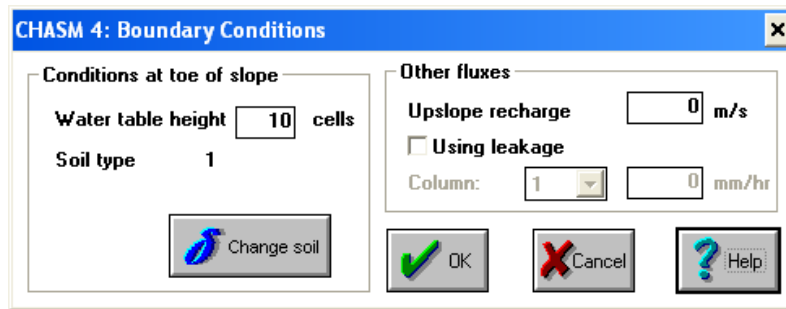


Εικόνα 9.16: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 1



Εικόνα 9.17: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 2

Τέλος, στις οριακές συνθήκες στο πόδι του πρανούς (εικόνα 9.18), τοποθετείται ο υδροφόρος ορίζοντας σε ύψος 10 κελιών.



Εικόνα 9.18: Συνοριακές συνθήκες

9.4.1.2 Αποτελέσματα

Αφού, λοιπόν, έχουν οριστεί όλες οι παράμετροι καθώς και οι αρχικές και οριακές συνθήκες για το πρανές, εκτελούμε το πρόγραμμα ώστε να προκύψει ο συντελεστής ασφαλείας για δωδεκάωρη προσομοίωση βροχής, για μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 και -2.5 m (Περίπτωση 1&2).

➤ *Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m*

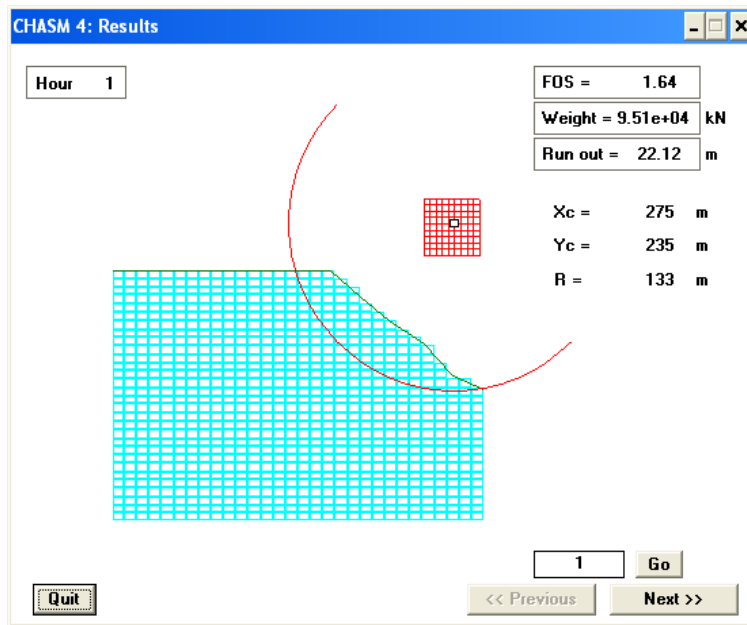
Αρχικά, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.2: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές

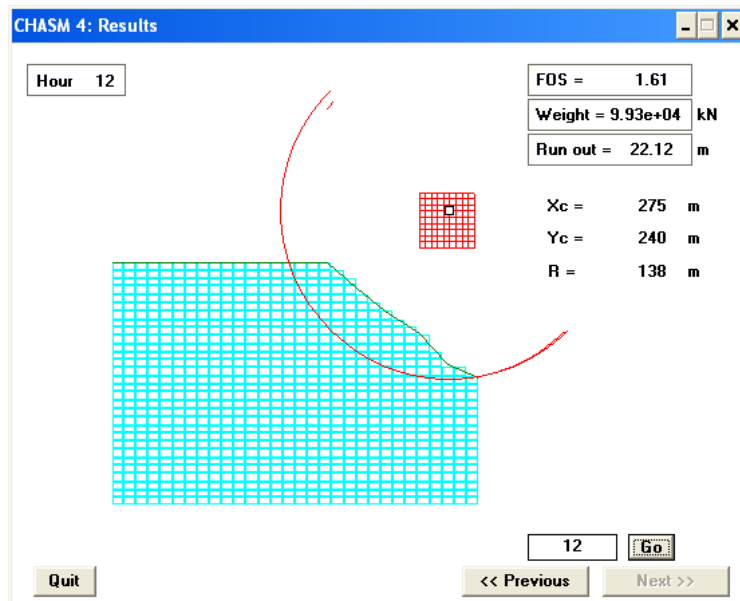
Output						
File						
Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: on		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.64	275	235	133	9.51e+04	22.12
2	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
3	1.6	275	235	133	9.53e+04	22.12
4	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
5	1.62	275	235	133	9.51e+04	22.12
6	1.59	275	240	138	9.93e+04	22.12
7	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
8	1.6	275	240	138	9.93e+04	22.12
9	1.59	275	240	138	9.93e+04	22.12
10	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
11	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
12	1.61	275	240	138	9.93e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Παρατηρούμε στον πίνακα 9.2 ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται στις τιμές 1.64 και 1.59, καταλήγοντας στο 1.61 τη δωδέκατη ώρα. Οι εικόνες 9.19 και 9.20

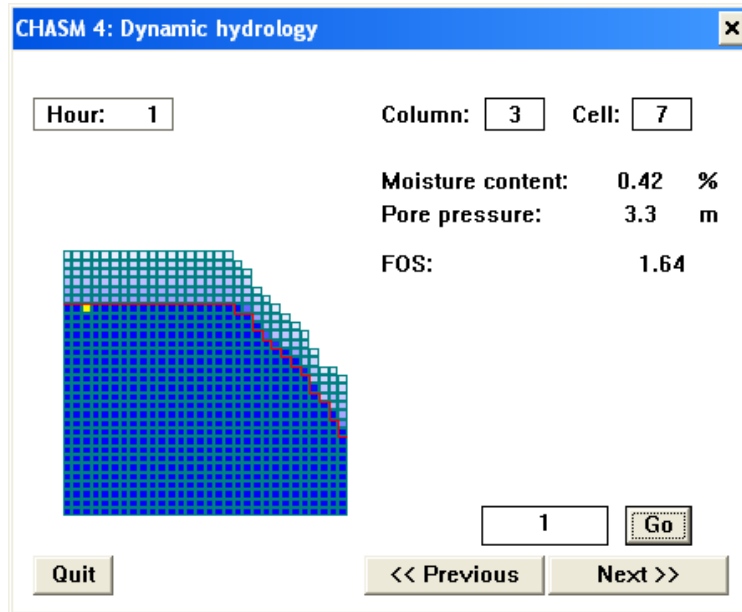
παρουσιάζουν μια βαθιά αστοχία και δείχνουν ότι το κέντρο του κύκλου ολίσθησης έχει συντεταγμένες (275,235) m, κατά την πρώτη ώρα της προσομοίωσης, ενώ την τελευταία ώρα οι συντεταγμένες μεταβάλλονται ελάχιστα (275, 240) m. Η ακτίνα του κύκλου παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και εντοπίζεται στα 133 m. Παρατηρούμε ότι η πιθανή θέση αστοχίας προσδιορίζεται στα τελευταία 30 m του πρανούς, όπου και η κλίση γίνεται πιο απότομη. Αντιλαμβανόμαστε ακόμη, ότι το πρανές δεν αστοχεί αφού $1.61 > 1$ και επιπλέον είναι οριακά ευσταθές και έναντι σεισμού εφόσον $1.61 > 1.6$.



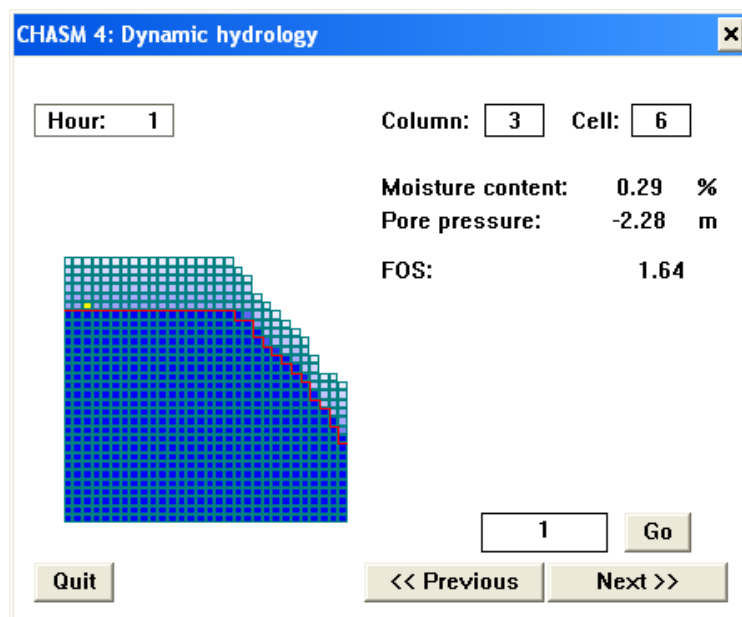
Εικόνα 9.19: Κύκλος ολίσθησης κατά την πρώτη ώρα προσομοίωσης



Εικόνα 9.20: Κύκλος ολίσθησης κατά την τελευταία ώρα προσομοίωσης

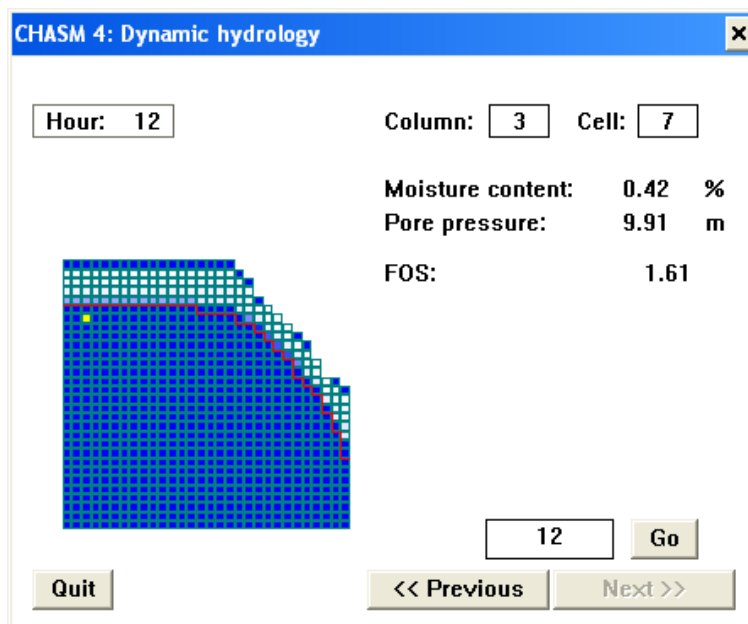


Εικόνα 9.21: Υδρολογία κατά την 1^η ώρα, 7^ο κελί

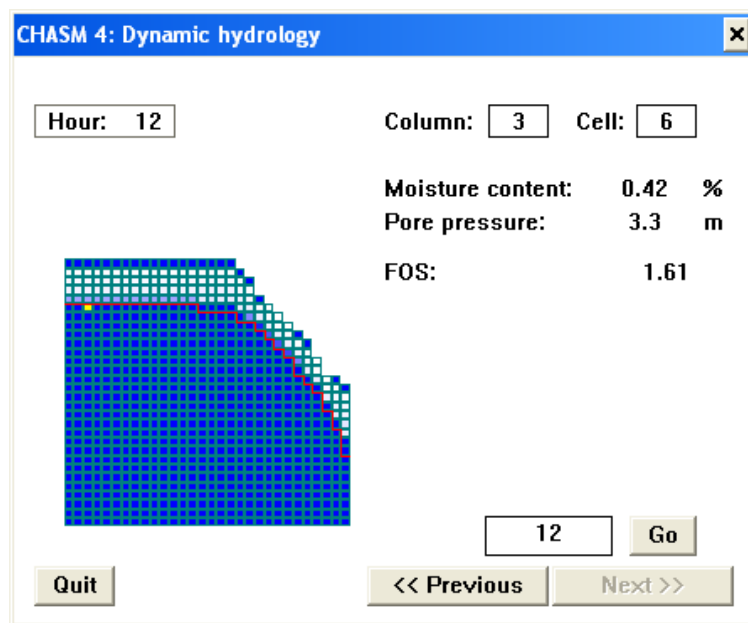


Εικόνα 9.22: Υδρολογία κατά την 1^η ώρα, 6^ο κελί

Στις εικόνες 9.21 και 9.22, παρατηρούμε την αναμενόμενη διαφορά της περιεχόμενης υγρασίας και πίεσης πόρων πάνω και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα κατά την 1^η ώρα. Για παράδειγμα, στην 3^η στήλη, το 6^ο κελί που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, έχει 29% υγρασία και αρνητική πίεση πόρων – που δηλώνει τη μύζηση- -2.28 m, ενώ στην ίδια στήλη το 7^ο κελί κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεχόμενη υγρασία 42% και θετική πίεση πόρων 3.3 m.

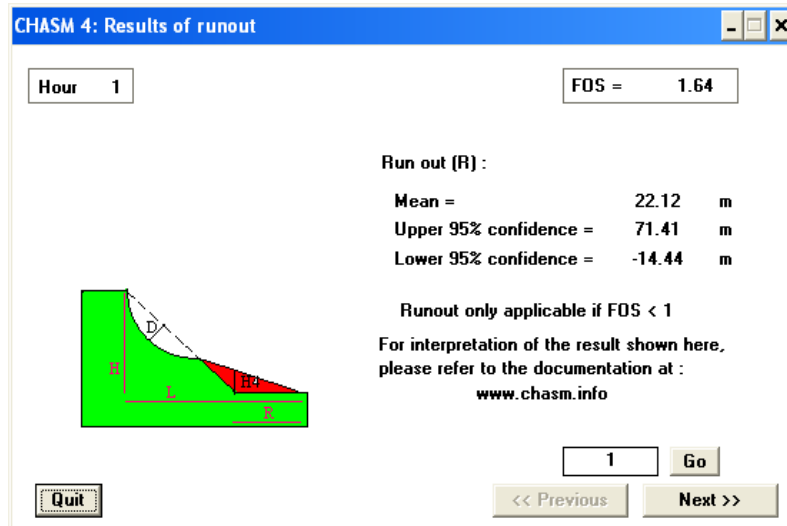


Εικόνα 9.23: Υδρολογία κατά τη 12^η ώρα, 7^ο κελί

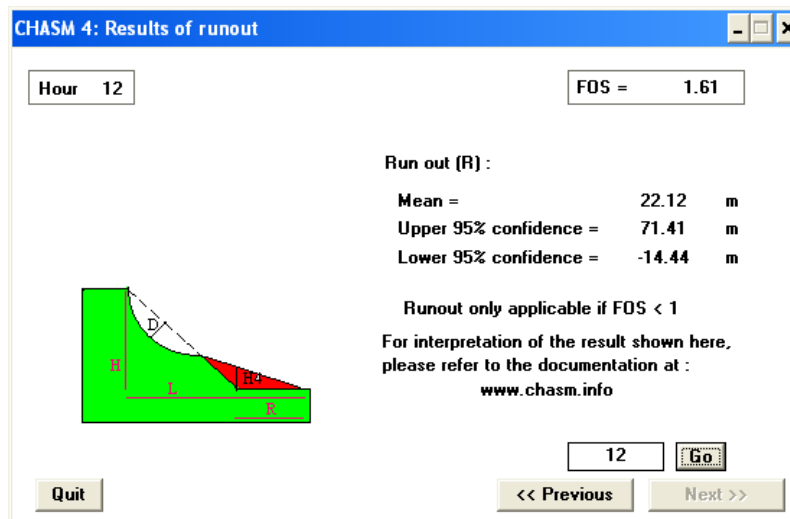


Εικόνα 9.24: Υδρολογία κατά τη 12^η ώρα, 6^ο κελί

Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα οπτικοποίησης της αλλαγής του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Εδώ, το κελί 6 στη στήλη 3 βρίσκεται πλέον κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα με 42% περιεχόμενη υγρασία και 3.3 m πίεση πόρων. Παράλληλα, το κελί 7 της ίδιας στήλης εξακολουθεί να βρίσκεται σε κορεσμό με τριπλάσια πλέον πίεση πόρων.



Εικόνα 9.25: Μετατόπιση μάζας ολίσθησης την 1^η ώρα



Εικόνα 9.26: Μετατόπιση μάζας ολίσθησης τη 12^η ώρα

Στις εικόνες 9.25 και 9.26, γίνεται αντιληπτός ο μηχανισμός ολίσθησης και εκτιμάται η απόσταση που διανύει το υλικό που ολισθαίνει. Η μέση τιμή της απόστασης αυτής είναι στα 22.12 μέτρα από την αστοχία για κάθε ώρα. Εν προκειμένω, ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα $FOS > 1$, φανερώνοντας ότι το πρανές είναι σταθερό, δεν αστοχεί και συνεπώς δεν έχει νόημα η μελέτη της μάζας που ολισθαίνει.

Έπειτα, μελετάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο μέσο -50%- και 25% του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 90 \text{ kPa}$ και $\phi = 37^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

➤ Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m

Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.3: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές

Output						
File						
Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: on		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.54	280	240	137	8.71e+04	22.12
2	1.45	280	240	137	8.75e+04	22.12
3	1.46	280	240	137	8.75e+04	22.12
4	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
5	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
6	1.43	280	245	142	9.15e+04	22.12
7	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
8	1.43	280	245	142	9.15e+04	22.12
9	1.43	280	245	142	9.15e+04	22.12
10	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
11	1.44	280	240	137	8.75e+04	22.12
12	1.47	280	240	137	8.74e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας αποκτά μέγιστη τιμή 1.54 την πρώτη ώρα της βροχόπτωσης, ελαχιστοποιείται στο 1.43 κατά τη διάρκεια της έκτης, όγδοης και ένατης ώρας, ενώ τελικά αποκτά λίγο μεγαλύτερη τιμή από την ελάχιστη, 1.47. Ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει μεγαλύτερος από τη μονάδα δηλώνοντας έτσι την ευστάθειά του στο ενδεχόμενο της 12ωρης βροχόπτωσης. Παρ' όλα αυτά η τιμή του είναι μικρότερη από την απαιτούμενη για ευστάθεια έναντι σεισμού $FOS = 1.47 < 1.6$.

Επιπλέον, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο μέσο -50%- και 25% του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 90 \text{ kPa}$ και $\phi = 37^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας. (Παράρτημα, Πίνακας 1).

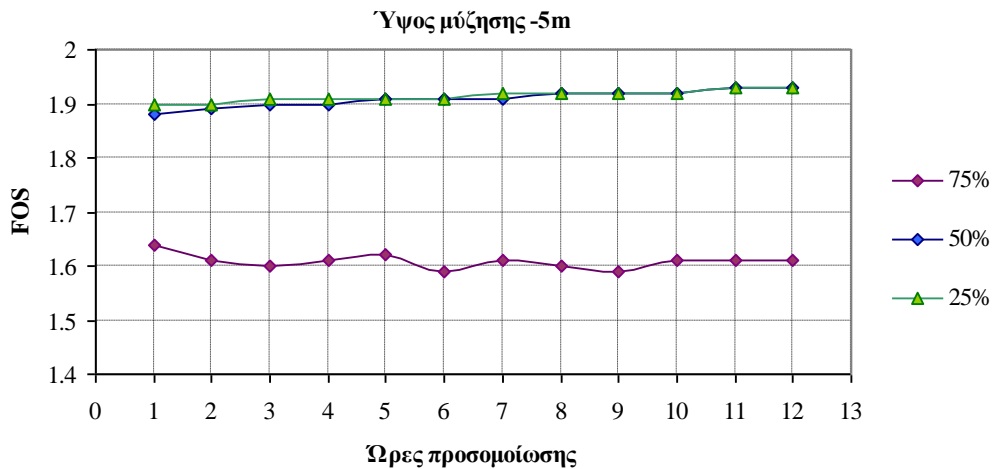
9.4.1.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

Ο πίνακας 9.4 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 1^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

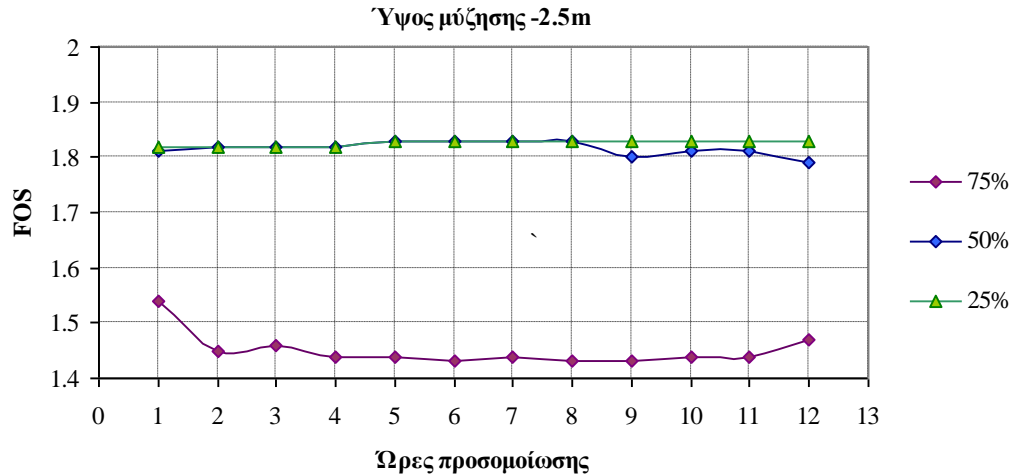
Πίνακας 9.4: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 1^ο

Ύψος μύζησης= -5m				Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Ώρες	FOS	FOS	FOS	Ώρες	FOS	FOS	FOS
1	1.64	1.88	1.9	1	1.54	1.81	1.82
2	1.61	1.89	1.9	2	1.45	1.82	1.82
3	1.6	1.9	1.91	3	1.46	1.82	1.82
4	1.61	1.9	1.91	4	1.44	1.82	1.82
5	1.62	1.91	1.91	5	1.44	1.83	1.83
6	1.59	1.91	1.91	6	1.43	1.83	1.83
7	1.61	1.91	1.92	7	1.44	1.83	1.83
8	1.6	1.92	1.92	8	1.43	1.83	1.83
9	1.59	1.92	1.92	9	1.43	1.8	1.83
10	1.61	1.92	1.92	10	1.44	1.81	1.83
11	1.61	1.93	1.93	11	1.44	1.81	1.83
12	1.61	1.93	1.93	12	1.47	1.79	1.83

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.4 & 9.5) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.



Διάγραμμα 9.4: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m

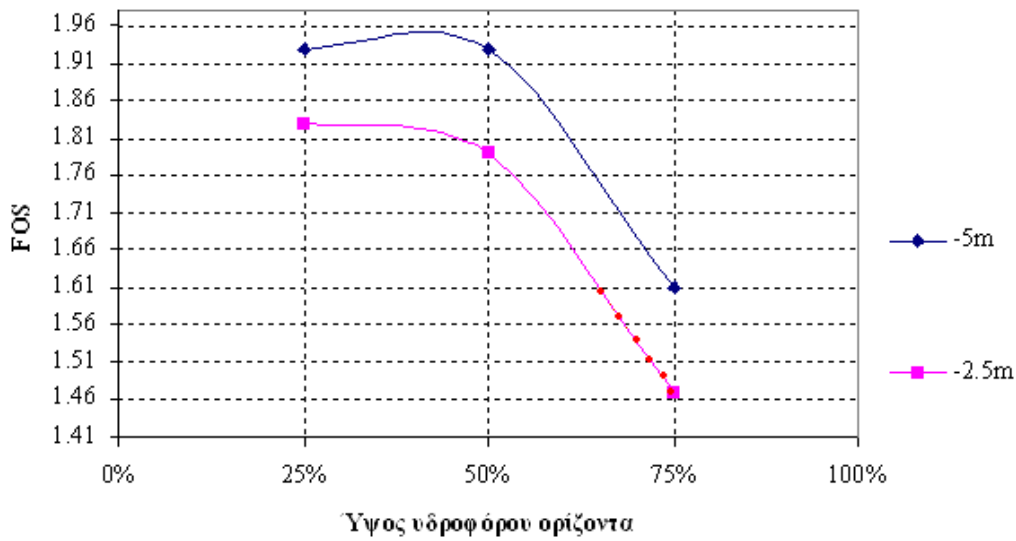


Διάγραμμα 9.5: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m

Σε πρώτη φάση, παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις (1&2), ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται στα ίδια, υψηλά επίπεδα όταν το ύψος του υδροφόρου θεωρηθεί χαμηλά στο 25 ή και 50% του ύψους του πρανούς. Αντίθετα, υποθέτοντας ότι η στάθμη του ανεβαίνει στο 75%, αυξάνεται η πίεση των πόρων και πλέον είναι εμφανής η πτώση του συντελεστή μέχρι και κατά 25%. Συνοψίζοντας, λοιπόν, γίνεται αντιληπτό ότι ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα καθώς αυτό επηρεάζει τις υδραυλικές συνθήκες στο έδαφος.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, διαπιστώνεται ότι όταν το ύψος μύζησης είναι μεγάλο δηλαδή στα 5 m, η διακύμανση του συντελεστή φαίνεται πιο ομαλή σε σχέση με εκείνη σε μεγαλύτερο ύψος μύζησης (πίνακας 9.4). Μάλιστα, στη δεύτερη περίπτωση, χαρακτηριστική είναι η πτώση του συντελεστή από την πρώτη στη δεύτερη ώρα κατά ένα δέκατο.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι η ενδεχόμενη ξηρασία και κατά συνέπεια μείωση του ύψους της αρνητικής πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τη γενικότερη μείωση του συντελεστή ασφαλείας κατά 9%. Το διάγραμμα 9.6 παρουσιάζει ευκρινέστερα τη διαφοροποίηση των τιμών του FOS σε σχέση με το ύψος της μύζησης για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα. Η διαφορά αυτή παρουσιάζεται και στις τρεις περιπτώσεις (25, 50, 75%), αλλά είναι πιο αισθητή σε μεγαλύτερα ύψη υδροφόρου ορίζοντα (75%), οδηγώντας εν προκειμένω και σε αλλαγή του χαρακτηρισμού του πρανούς από ευσταθές έναντι σεισμού σε ασταθές (κόκκινη περιοχή στο διάγραμμα 9.6).



Διάγραμμα 9.6: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου οριζοντα και μύζησης

9.4.2 Μελέτη 2^ο Σεναρίου

9.4.2.1 Καθορισμός παραμέτρων

Σε αυτό το σενάριο αναζητούνται εκείνες οι τιμές συνοχής και γωνίας τριβής που θα συντελέσουν σε επαρκή ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού, όταν το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται στο μέσο (50%) του ύψους του πρανούς. Ο πίνακας 9.5 παρουσιάζει τις τιμές των εδαφικών παραμέτρων.

Πίνακας 9.5: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 2^ο

Εδαφική παράμετρος	Τιμή
c	60 KPa
ϕ	35°
γ_s	19 KN/m ³
γ_b	18 KN/m ³
k	10 ⁻⁵ m/sec
w	42.11%

9.4.2.2 Αποτελέσματα

- Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m

Πίνακας 9.6: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

Output						
File						
Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: on		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.62	295	255	147	5.52e+04	22.12
2	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
3	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
4	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
5	1.65	295	255	147	5.52e+04	22.12
6	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
7	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
8	1.66	295	255	148	5.82e+04	22.12
9	1.66	295	255	148	5.82e+04	22.12
10	1.66	295	255	147	5.52e+04	22.12
11	1.66	295	255	146	5.22e+04	22.12
12	1.66	295	255	146	5.22e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή ασφαλείας ποικίλει στις τιμές 1.62 και 1.66 όπου και καταλήγει τη δωδέκατη ώρα. Αντιλαμβανόμαστε ακόμη, ότι το πρανές δεν αστοχεί αφού $1.62 > 1$ και επιπλέον είναι ευσταθές και έναντι σεισμού εφόσον $1.62 > 1.6$.

Στη συνέχεια, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση, αλλά και μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% και 25% αντίστοιχα, του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 60 \text{ kPa}$ και $\phi = 35^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

➤ *Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m*

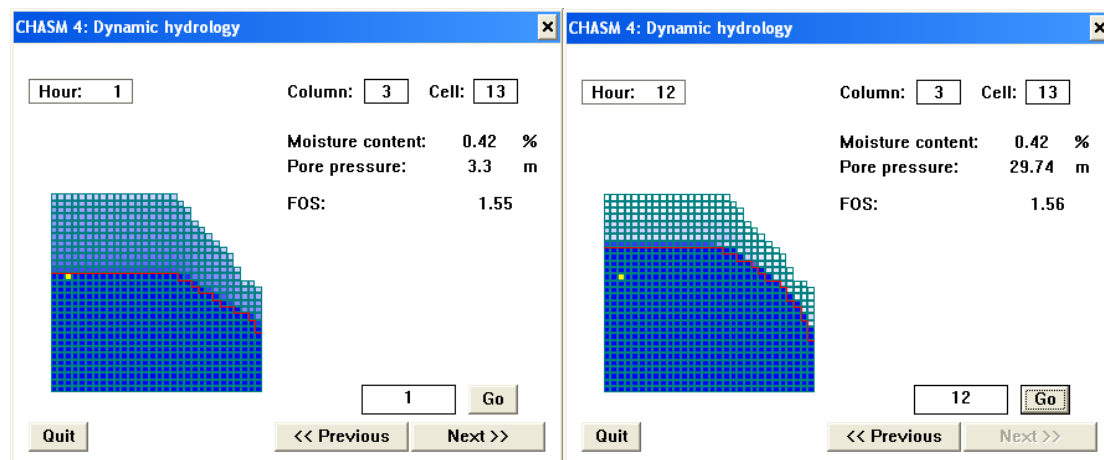
Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 50% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.7: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

Output						
Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: on		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
2	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
3	1.56	295	255	145	4.93e+04	22.12
4	1.56	295	255	145	4.93e+04	22.12
5	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
6	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
7	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
8	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
9	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
10	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
11	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
12	1.56	280	240	137	8.6e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ασφαλείας δε μεταβάλλεται σημαντικά, αφού κυμαίνεται στις τιμές 1.55 και 1.56 όπου και σταθεροποιείται ήδη από την τρίτη ώρα. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι το πρανές δεν αστοχεί υπό την επίδραση της βροχόπτωσης, αφού $1.55 > 1$. Σε περίπτωση όμως σεισμού είναι πιθανή η εκδήλωση κάποιας μορφής αστοχίας εφόσον $1.55 < 1.6$.

Μελετώντας τα αποτελέσματα της υδρολογίας (εικόνα 9.27), αξιοσημείωτη είναι η μεγάλη αύξηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι και 20 m, με αποτέλεσμα κόκκοι εδάφους που βρίσκονταν στην ακόρεστη περιοχή, τώρα πλέον, έχουν πλήρως κορεστεί.



Εικόνα 9.27: Υδρολογία κατά την 1^η και 12^η ώρα

Όπως και στην περίπτωση 1, έτσι και εδώ ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση, αλλά και μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% και 25% αντίστοιχα, του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 60 \text{ kPa}$ και $\varphi = 35^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

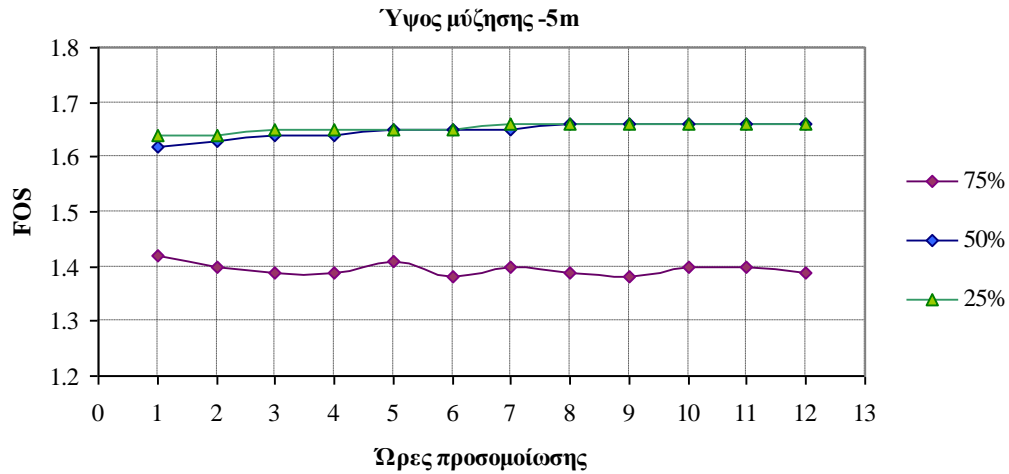
9.4.2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

Ο πίνακας 9.8 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 2^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

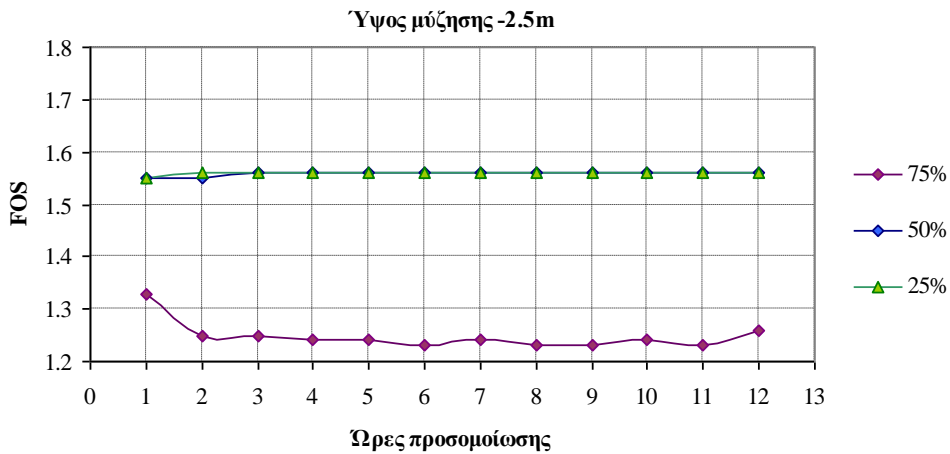
Πίνακας 9.8: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 2^ο

Ύψος μύζησης= -5m				Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Όρες	FOS	FOS	FOS	Όρες	FOS	FOS	FOS
1	1.42	1.62	1.64	1	1.33	1.55	1.55
2	1.4	1.63	1.64	2	1.25	1.55	1.56
3	1.39	1.64	1.65	3	1.25	1.56	1.56
4	1.39	1.64	1.65	4	1.24	1.56	1.56
5	1.41	1.65	1.65	5	1.24	1.56	1.56
6	1.38	1.65	1.65	6	1.23	1.56	1.56
7	1.4	1.65	1.66	7	1.24	1.56	1.56
8	1.39	1.66	1.66	8	1.23	1.56	1.56
9	1.38	1.66	1.66	9	1.23	1.56	1.56
10	1.4	1.66	1.66	10	1.24	1.56	1.56
11	1.4	1.66	1.66	11	1.23	1.56	1.56
12	1.39	1.66	1.66	12	1.26	1.56	1.56

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.7 & 9.8) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.



Διάγραμμα 9.7: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m

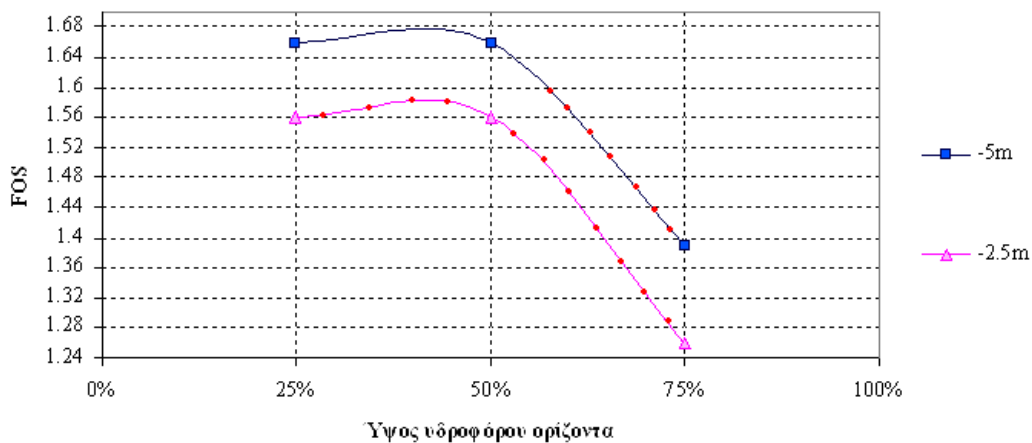


Διάγραμμα 9.8: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m

Το σενάριο που εξετάζεται υποθέτει τέτοιες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής, έτσι ώστε να υπάρχει ευστάθεια έναντι σεισμού στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς. Παρατηρούμε, λοιπόν, στον πίνακα 9.8 ότι οι επιλεγθείσες τιμές δίνουν ευστάθεια και στην περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται ακόμη χαμηλότερα, στο 25% του ύψους του πρανούς. Μάλιστα ο συντελεστής ασφαλείας ακολουθεί τη διακύμανση του αντίστοιχου στην υπόθεση για ύψος στο 50%, δηλώνοντας έτσι την παρόμοια συμπεριφορά του πρανούς όταν ο υδροφόρος κυμαίνεται στα 25-50% του ύψους του. Η τάση αυτή για ομαλοποίηση είναι εμφανής και στις δύο περιπτώσεις ύψους μύζησης, γεγονός που δηλώνει τη μικρή επίδραση του χαμηλού υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια, ανεξάρτητα από άλλες υδρολογικές παραμέτρους.

Στην περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται ψηλότερα, ο συντελεστής παρουσιάζει αισθητή μείωση ήδη από την πρώτη ώρα της προσομοίωσης σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές σε χαμηλότερα ύψη. Ειδικότερα, στην περίπτωση ύψους μύζησης - 2.5 m η σχετική αυτή μείωση φτάνει μέχρι και το 21%. Από την άλλη, για ύψος υδροφόρου στο 75% και στις δύο περιπτώσεις, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται κατά τη διάρκεια του δωδεκαώρου μέχρι και 10%, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την ομαλή διακύμανση που παρατηρήθηκε σε χαμηλότερα ύψη.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, διαπιστώνεται ότι μια ενδεχόμενη ανομβρία και κατ' επέκταση μείωση του ύψους της αρνητικής πίεσης στο -2.5 m έχει ως αποτέλεσμα τη γενικότερη μείωση του συντελεστή ασφαλείας μέχρι και κατά 10%. Το διάγραμμα 9.9 παρουσιάζει ευκρινέστερα τη διαφοροποίηση των τιμών του FOS τη δωδέκατη ώρα σε σχέση με το ύψος της μύζησης για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα. Εδώ, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας επαρκεί για ευστάθεια έναντι σεισμού μόνο στην περίπτωση που το ύψος μύζησης φτάνει τα 5 m και το ύψος του υδροφόρου δεν ξεπερνά το 50% του ύψους του πρανούς. Σε μικρότερα ύψη μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται καθιστώντας το πρανές επιρρεπές σε αστοχία σε ενδεχόμενο σεισμού (κόκκινη περιοχή, διάγραμμα 9.9).



Διάγραμμα 9.9: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης

9.4.3 Μελέτη 3^{ου} Σεναρίου

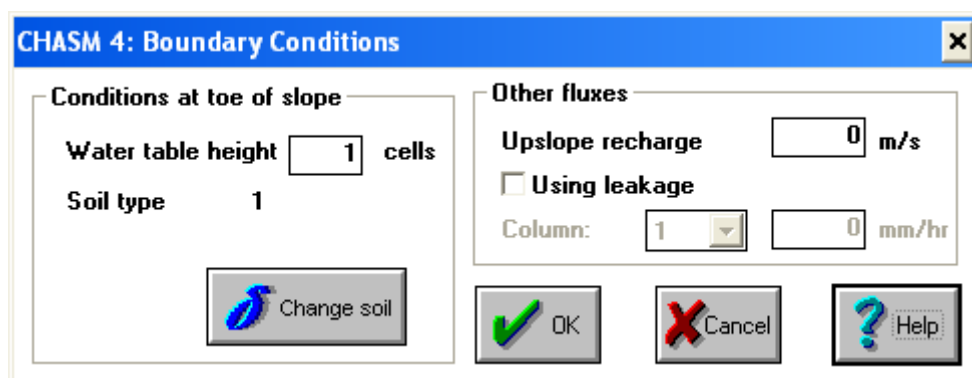
Σε αυτή την περίπτωση αναζητούνται εκείνες οι τιμές συνοχής και γωνίας τριβής που θα συντελέσουν σε επαρκή ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού, όταν το ύψος του

υδροφόρου βρίσκεται μόλις στο 25% του ύψους του πρανού. Ακολούθως, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα σε πίνακα οι τελικές παράμετροι εδάφους.

Πίνακας 9.9: Εδαφικές παράμετροι- σενάριο 3^ο

Εδαφική παράμετρος	Τιμή
c	58 KPa
ϕ	35°
γ_s	19 KN/m ³
γ_v	18 KN/m ³
k	10 ⁻⁵ m/sec
w	42.11%

Πλέον, στις οριακές συνθήκες στο πόδι του πρανού, τοποθετείται ο υδροφόρος ορίζοντας σε ύψος 1 κελιού.



Εικόνα 9.28: Συνοριακές συνθήκες

9.4.3.1 Αποτελέσματα

➤ *Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m*

Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές

CHASM 4 for Windows Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: on		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.63	295	255	146	5.22e+04	22.12
2	1.63	295	255	146	5.22e+04	22.12
3	1.63	295	255	146	5.22e+04	22.12
4	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
5	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
6	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
7	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
8	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
9	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12
10	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12
11	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12
12	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται στις τιμές 1.63 και 1.65 όπου και καταλήγει τη δωδέκατη ώρα, ενώ παράλληλα φαίνεται ότι αυξάνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επιπλέον, φαίνεται ότι το πρανές δεν αστοχεί αφού $1.63 > 1$ και επιπλέον είναι ευσταθές και έναντι σεισμού εφόσον $1.63 > 1.6$. Ανάλογη ευστάθεια παρατηρήθηκε και στα προηγούμενα σενάρια (1&2) στην περίπτωση μεγάλου ύψους μύζησης στα 5 m.

Επιπλέον, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 50% και 75% του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 58 \text{ kPa}$ και $\phi = 35^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

➤ *Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m*

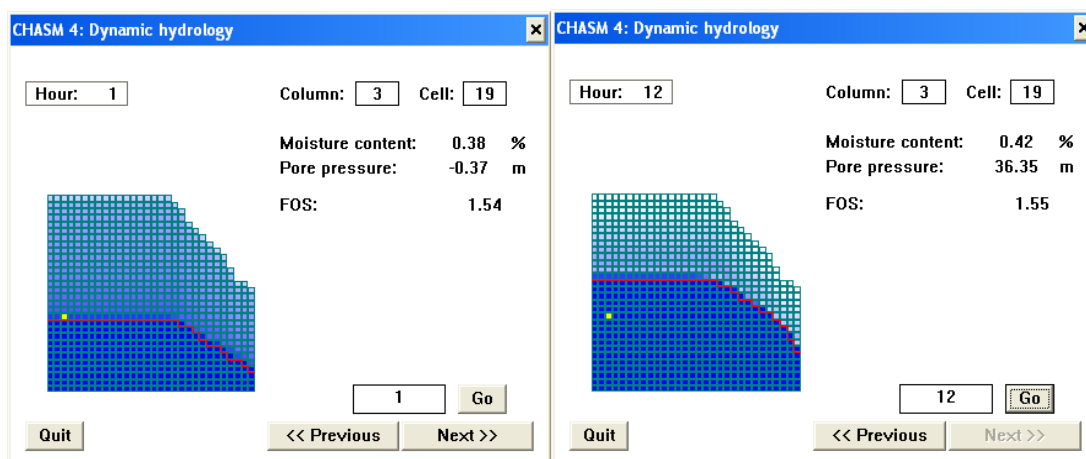
Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 25% του ύψους του πρανούς. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στον πίνακα 9.11.

Πίνακας 9.11: Αποτελέσματα για μη καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.54	295	255	144	4.65e+04	22.12
2	1.54	295	255	144	4.65e+04	22.12
3	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
4	1.55	295	255	145	4.93e+04	22.12
5	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
6	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
7	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
8	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
9	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
10	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
11	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
12	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12

Εδώ ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται στις τιμές 1.54 και 1.55 όπου και σταθεροποιείται ήδη από την τρίτη ώρα. Σημειώνεται ότι παρόμοια σταθεροποίηση σημειώθηκε και στο 2^ο σενάριο στην περίπτωση 2. Ακόμη, το πρανές δεν αστοχεί υπό την επίδραση της βροχόπτωσης αφού $1.54 > 1$, αλλά είναι πιθανό να παρουσιαστεί κάποια μορφή αστοχίας σε ενδεχόμενο σεισμού ($1.54 < 1.6$).

Μελετώντας τα αποτελέσματα της υδρολογίας (εικόνα 9.29) παρατηρείται ότι το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνεται περισσότερο από 25 m σημειώνοντας έτσι τη μεγαλύτερη αύξηση στάθμης σε σχέση τις αντίστοιχες των προηγούμενων σεναρίων.



Εικόνα 9.29: Υδρολογία κατά την 1^η και 12^η ώρα

Όπως και στην περίπτωση 1, έτσι και εδώ ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% και 50% αντίστοιχα, του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 58 \text{ kPa}$ και $\phi = 35^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

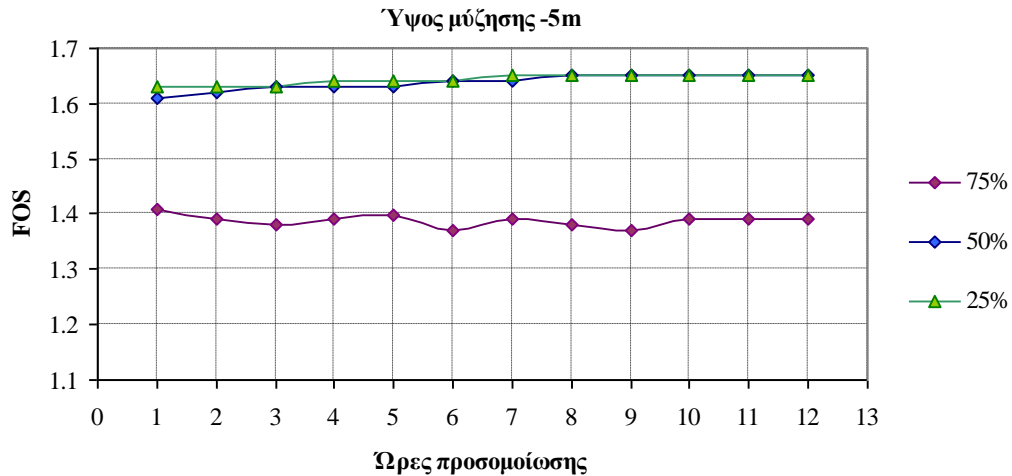
9.4.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

Ο πίνακας 9.12 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 2^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

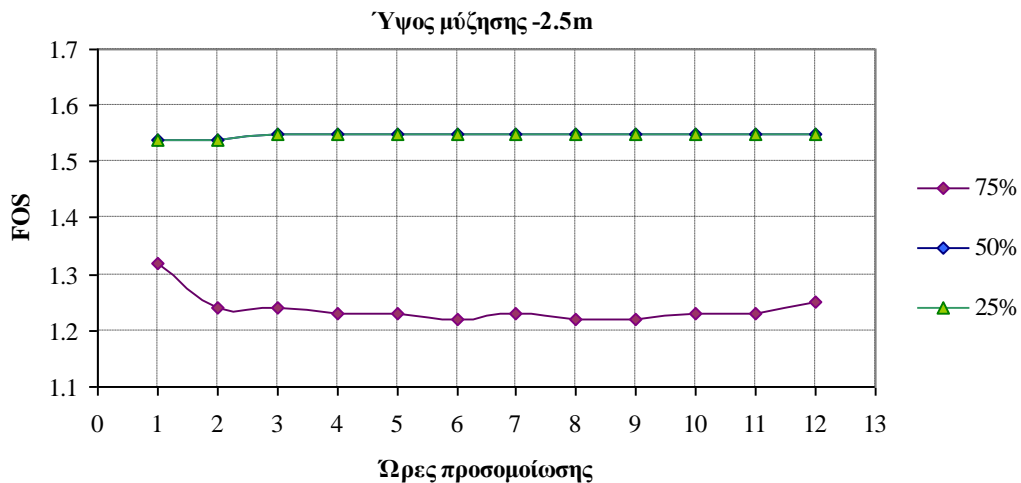
Πίνακας 9.12: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 3^ο

	Ύψος μύζησης= -5m			Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%	75%	50%	25%	
Ώρες	FOS	FOS	FOS	Ώρες	FOS	FOS	FOS
1	1.41	1.61	1.63	1	1.32	1.54	1.54
2	1.39	1.62	1.63	2	1.24	1.54	1.54
3	1.38	1.63	1.63	3	1.24	1.55	1.55
4	1.39	1.63	1.64	4	1.23	1.55	1.55
5	1.4	1.63	1.64	5	1.23	1.55	1.55
6	1.37	1.64	1.64	6	1.22	1.55	1.55
7	1.39	1.64	1.65	7	1.23	1.55	1.55
8	1.38	1.65	1.65	8	1.22	1.55	1.55
9	1.37	1.65	1.65	9	1.22	1.55	1.55
10	1.39	1.65	1.65	10	1.23	1.55	1.55
11	1.39	1.65	1.65	11	1.23	1.55	1.55
12	1.39	1.65	1.65	12	1.25	1.55	1.55

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.10 & 9.11) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχοπτώσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.



Διάγραμμα 9.10: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m

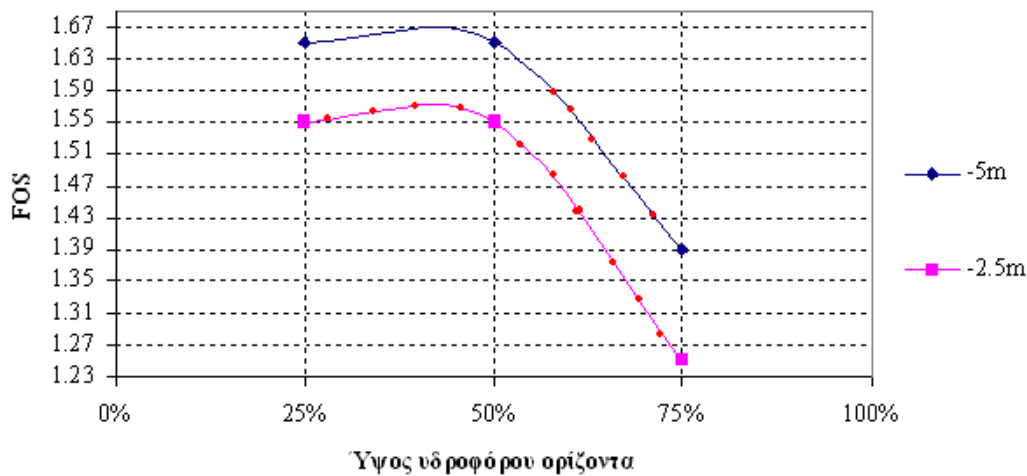


Διάγραμμα 9.11: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2,5 m

Το σενάριο που εξετάζεται υποθέτει τέτοιες τιμές συνοχής και γωνίας τριβής, έτσι ώστε να υπάρχει ευστάθεια έναντι σεισμού στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στο 25% του ύψους του πρανούς. Παρατηρούμε, λοιπόν, στα διαγράμματα 8.39 και 8.40, ότι οι επιλεχθείσες τιμές δίνουν ευστάθεια και στην περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται λίγο ψηλότερα στο 50% του ύψους του πρανούς. Μάλιστα, διαπιστώνουμε ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας για αυτά τα δύο ύψη υδροφόρου συμπίπτουν τις περισσότερες ώρες της προσομοίωσης για

κάθε περίπτωση. Αντίθετα, όταν ο υδροφόρος βρίσκεται ψηλότερα, ο συντελεστής παρουσιάζει αισθητή μείωση σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές σε χαμηλότερα ύψη. Ειδικότερα, στην περίπτωση ύψους μύζησης -2.5 m η σχετική αυτή μείωση φτάνει μέχρι και το 21%.

Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, διαπιστώνεται ότι μια ενδεχόμενη μείωση του ύψους της αρνητικής πίεσης στα -2.5 m έχει ως αποτέλεσμα τη γενικότερη μείωση του συντελεστή ασφαλείας μέχρι και κατά 10%. Το διάγραμμα 9.12 παρουσιάζει ευκρινέστερα τη διαφοροποίηση των τιμών του FOS τη δωδέκατη ώρα σε σχέση με το ύψος της μύζησης για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα. Όμοια με το προηγούμενο σενάριο, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας επαρκεί για ευστάθεια έναντι σεισμού μόνο στην περίπτωση που το ύψος μύζησης φτάνει τα 5 m και το ύψος του υδροφόρου δεν ξεπερνά το 50% του ύψους του πρανούς. Σε μικρότερα ύψη μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται καθιστώντας το πρανές επιρρεπές σε αστοχία σε ενδεχόμενο σεισμού (κόκκινη περιοχή, διάγραμμα 9.12).



Διάγραμμα 9.12: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης

9.5 Προσομοίωση πρανούς μετά από πυρκαγιά

9.5.1 Μελέτη 1^{ου} Σεναρίου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί (εδάφιο 5), κατά την πυρκαγιά καίγεται η οργανική ουσία του εδάφους και παραμένει αντί για αυτό κάποιο σκελετικό, αδρανές εδαφικό υλικό.

Μάλιστα, καθώς καίγεται η οργανική ουσία της βλάστησης ένα ποσοστό της εξατμισμένης αυτής ουσίας διεισδύει σε βαθύτερα στρώματα όπου και ψύχεται, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αδιαπέρατου από το νερό στρώματος εδάφους (Wells et al. 1979). Η εισαγωγή όμως ενός στρώματος εδάφους τόσο μικρού πάχους σε σχέση με το πρανές στο CHASM δεν οδήγησε σε αντιληπτά συμπεράσματα, με αποτέλεσμα να οδηγηθούμε στην αγνόησή του για λόγους κλίμακας. Επομένως, όλες οι εδαφικές παράμετροι στην παρούσα φάση παραμένουν ίδιες. Και εδώ, θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις ύψους μύζησης στα 5 και 2.5 m.

Σε αυτή την περίπτωση, αναπαρίσταται το έδαφος μετά την πυρκαγιά με την αγνόηση της βλάστησης, δυνατότητα που παρέχει το πρόγραμμα (εικόνα 9.30).

CHASM 4: Vegetation

Entire slope

Detention capacity: 10 mm

Maximum evaporation: 0.06 mm/hr

No vegetation model

Using vegetation model

Properties of vegetation cover

Column: 1 Depth: 1 cells

Cover type: Acacia

Effective precipitation from Thatch effect

Storm start: 1 hr Storm stop: 12 hr

Current hour: 1

Precipitation per hour: 2.768 mm

Effective precipitation: 2.768 mm

Strength parameters

Root tensile strength: 30 kPa

Root area ratio: 6 %

Effective cohesion: 90 kPa

Friction angle: 35 deg.

OK Cancel Help

Εικόνα 9.30: Απενεργοποίηση μοντέλου βλάστησης

9.5.1.1 Αποτελέσματα

Αφού, λοιπόν, έχουν οριστεί όλες οι παράμετροι καθώς και οι αρχικές και οριακές συνθήκες για το πρανές, εκτελούμε το πρόγραμμα ώστε να προκύψει ο συντελεστής ασφαλείας για δωδεκάωρη προσομοίωση βροχής, για μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 και -2.5 m (Περίπτωση 1&2).

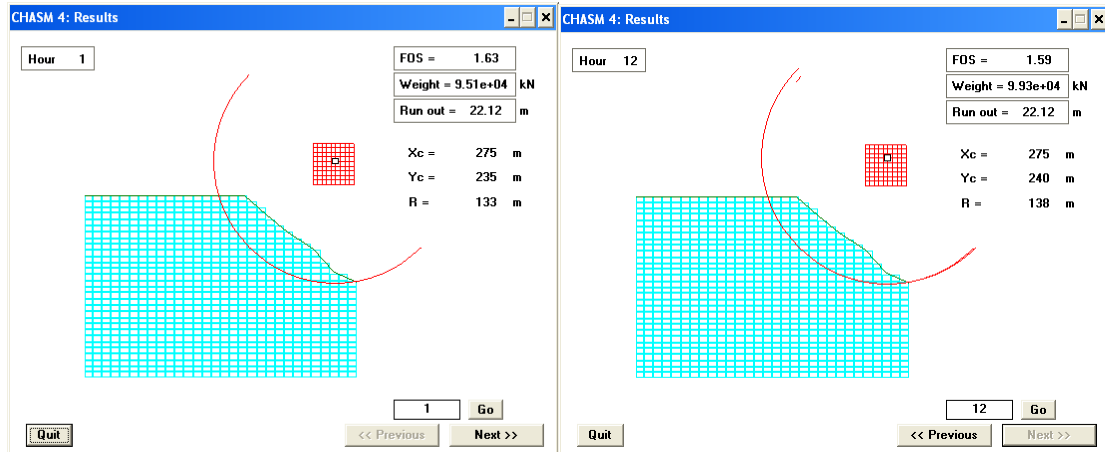
➤ *Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m*

Αρχικά, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.13: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

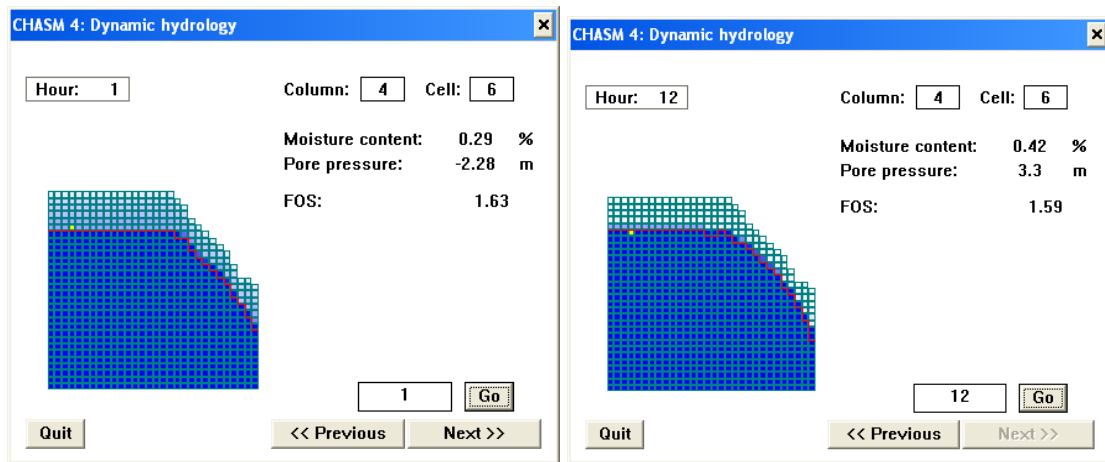
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.63	275	235	133	9.51e+04	22.12
2	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
3	1.6	275	235	133	9.53e+04	22.12
4	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
5	1.62	275	235	133	9.51e+04	22.12
6	1.6	275	240	138	9.93e+04	22.12
7	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
8	1.6	275	240	138	9.93e+04	22.12
9	1.59	275	240	138	9.93e+04	22.12
10	1.61	275	235	133	9.52e+04	22.12
11	1.6	275	235	133	9.53e+04	22.12
12	1.59	275	240	138	9.93e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Ο παραπάνω πίνακας 9.13 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος όταν έχει αφαιρεθεί η βλάστηση και έτσι θεωρείται ότι πρόκειται για καμένο έδαφος. Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.63 και 1.59, τιμές οι οποίες είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες για το πρανές πριν την πυρκαγιά. Μάλιστα, η τελευταία ώρα της προσομοίωσης δηλώνει μεταβολή της κατάστασης του πρανούς σε ασταθές έναντι σεισμού. Με μία πρώτη ματιά, λοιπόν, είναι φανερό η υποβάθμιση του πρανούς εξαιτίας της απουσίας της ευεργετικής επίδρασης της φυτοκάλυψης.



Εικόνα 9.31: Κύκλος ολίσθησης κατά την πρώτη και τελευταία ώρα προσομοίωσης

Στην εικόνα 9.31 παρουσιάζεται ο κύκλος ολίσθησης την 1^η και τελευταία ώρα της προσομοίωσης, όπου βλέπουμε ότι το κέντρο του εντοπίζεται στα (275, 240) m και η ακτίνα του στα 138 m. Ακόμη, παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης αυξάνεται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, και κατά συνέπεια αυξάνονται η πίεση των πόρων και η περιεχόμενη υγρασία του εδάφους όπως φαίνεται στην εικόνα 9.32.



Εικόνα 9.32: Υδρολογία την 1^η και 12^η ώρα της προσομοίωσης

Ακόμη, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο μέσο -50%- και 25% του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 90$ kPa και $\phi = 37^\circ$ και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

➤ *Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m*

Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.14: Αποτελέσματα για καμένο πρανές

Output						
File						
CHASM 4 for Windows Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: off		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.54	280	240	137	8.71e+04	22.12
2	1.45	280	240	137	8.75e+04	22.12
3	1.45	280	240	137	8.75e+04	22.12
4	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
5	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
6	1.44	280	245	142	9.14e+04	22.12
7	1.41	280	245	142	9.15e+04	22.12
8	1.44	280	240	137	8.76e+04	22.12
9	1.43	280	245	142	9.15e+04	22.12
10	1.43	275	235	133	9.6e+04	22.12
11	1.46	280	240	137	8.75e+04	22.12
12	1.43	280	245	142	9.15e+04	22.12

Ο πίνακας 9.14 παρουσιάζει τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση της βροχόπτωσης. Όπως στην περίπτωση 1, έτσι και εδώ σημειώνεται αισθητή μείωση του συντελεστή ασφαλείας για το καμένο πρανές. Ειδικότερα, ο συντελεστής την τελευταία ώρα μειώνεται από 1.47 για το μη καμένο πρανές στο 1.43 για το καμένο. Επιπλέον, αξιοσημείωτη είναι και η μείωση του συντελεστή σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν στην περίπτωση 1. Η μείωση του ύψους μύζησης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του συντελεστή έως και 20% την 7^η ώρα της προσομοίωσης.

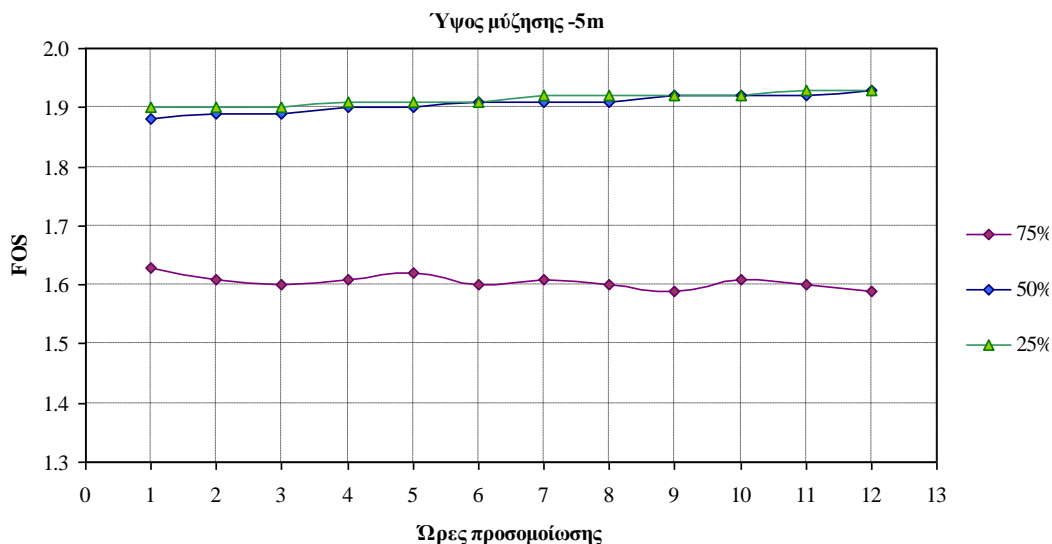
9.5.1.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

Ο πίνακας 9.15 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 1^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

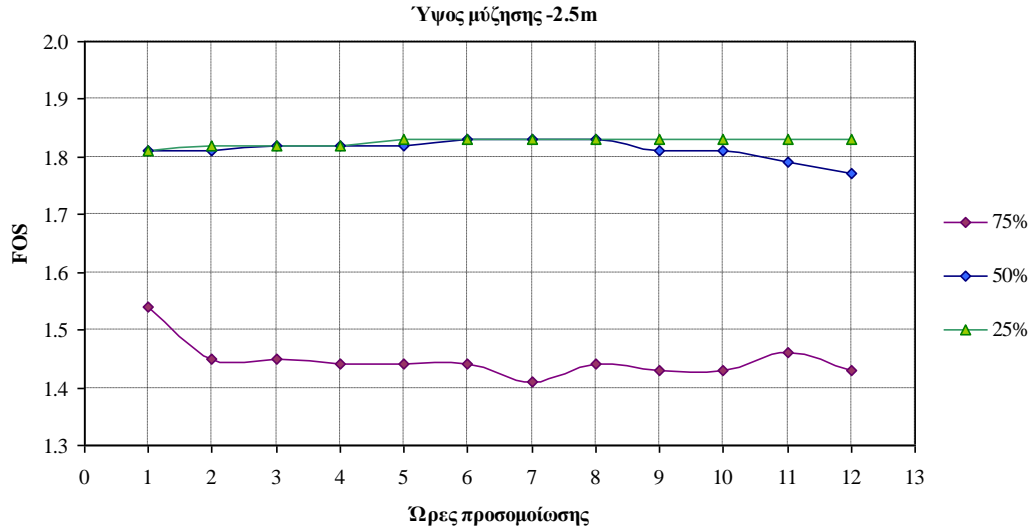
Πίνακας 9.15: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 1^ο

Ύψος μύζησης= -5m				Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Ώρες	FOS	FOS	FOS	Ώρες	FOS	FOS	FOS
1	1.63	1.88	1.9	1	1.54	1.81	1.81
2	1.61	1.89	1.9	2	1.45	1.81	1.82
3	1.6	1.89	1.9	3	1.45	1.82	1.82
4	1.61	1.9	1.91	4	1.44	1.82	1.82
5	1.62	1.9	1.91	5	1.44	1.82	1.83
6	1.6	1.91	1.91	6	1.44	1.83	1.83
7	1.61	1.91	1.92	7	1.41	1.83	1.83
8	1.6	1.91	1.92	8	1.44	1.83	1.83
9	1.59	1.92	1.92	9	1.43	1.81	1.83
10	1.61	1.92	1.92	10	1.43	1.81	1.83
11	1.6	1.92	1.93	11	1.46	1.79	1.83
12	1.59	1.93	1.93	12	1.43	1.77	1.83

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.13 & 9.14) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.

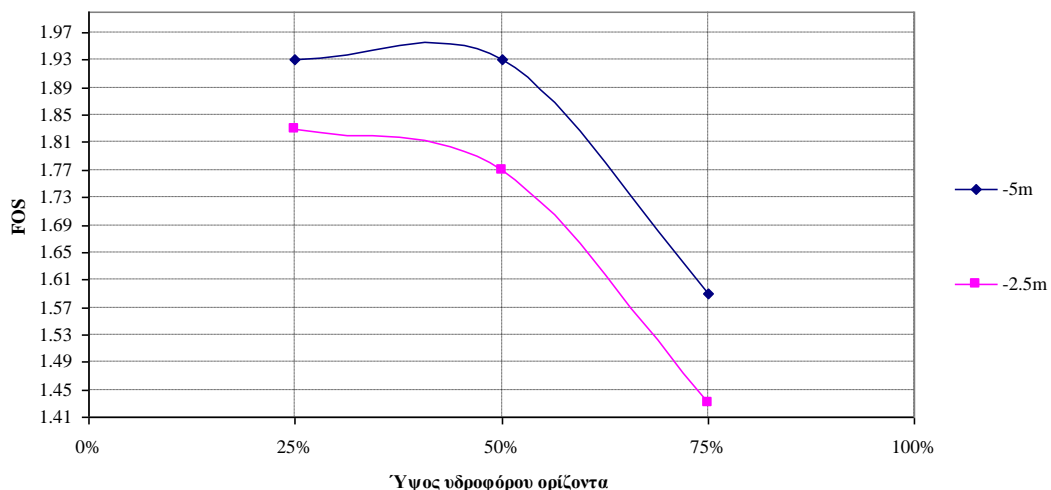


Διάγραμμα 9.13: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m



Διάγραμμα 9.14: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m

Όπως και πριν από την πυρκαγιά, φαίνεται ότι η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο συντελεστή ασφαλείας γίνεται αισθητή σε μεγάλα ύψη αυτού. Μάλιστα, όταν το ύψος φτάνει στο 75% του ύψους του πρανού, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται μέχρι και 20%. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι όσο μειώνεται το ύψος μύζησης τόσο μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας. Μάλιστα, σημειώνεται η πτώση του συντελεστή κάτω από το όριο για ευστάθεια σε σεισμό στην περίπτωση ύψους υδροφόρου στο 75% του ύψους του πρανού.



Διάγραμμα 9.15: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης

9.5.2 Μελέτη 2^ο Σεναρίου

Εργαζόμαστε με όμοιο τρόπο όπως στο σενάριο 1, θεωρώντας όλες τις εδαφικές παραμέτρους ίδιες και εξετάζοντας δύο περιπτώσεις ύψους μύζησης στα 5 και 2.5 m. Όμοια, αναπαρίσταται το έδαφος μετά από την πυρκαγιά με την αγνόηση της βλάστησης.

9.5.2.1 Αποτελέσματα

Έχοντας ορίσει όλες τις παραμέτρους καθώς και τις αρχικές και οριακές συνθήκες για το πρανές, εκτελούμε το πρόγραμμα ώστε να προκύψει ο συντελεστής ασφαλείας για δωδεκάωρη προσομοίωση βροχής, για μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 και -2.5 m (Περίπτωση 1&2).

➤ *Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m*

Πίνακας 9.16: Αποτελέσματα για καμένο πρανές

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.62	295	255	147	5.52e+04	22.12
2	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
3	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
4	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
5	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
6	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
7	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
8	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
9	1.66	295	255	148	5.82e+04	22.12
10	1.66	295	255	147	5.52e+04	22.12
11	1.66	295	255	147	5.52e+04	22.12
12	1.66	295	255	147	5.52e+04	22.12

End of simulation
Runout only applicable if FOS < 1

Ο παραπάνω πίνακας 9.16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προγράμματος όταν έχει αφαιρεθεί η βλάστηση και έτσι θεωρείται ότι πρόκειται για καμένο έδαφος. Ο συντελεστής ασφαλείας εδώ κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.62 και 1.66, τιμές οι οποίες είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες για το πρανές πριν την πυρκαγιά. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι ο συνδυασμός ενός σχετικά χαμηλού ύψους υδροφόρου ορίζοντα και ενός μεγάλου ύψους μύζησης, ελαχιστοποιεί την επίδραση της φυτοκάλυψης στην ευστάθεια του πρανούς.

➤ *Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m*

Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 50% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.17: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

CHASM 4 for Windows Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: off		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
2	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
3	1.56	295	255	145	4.93e+04	22.12
4	1.56	295	255	145	4.93e+04	22.12
5	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
6	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
7	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
8	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
9	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
10	1.56	295	255	144	4.65e+04	22.12
11	1.56	280	240	137	8.6e+04	22.12
12	1.54	280	240	137	8.6e+04	22.12

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για το πρανές πριν την πυρκαγιά και πλέον κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.54 και 1.56. Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι αυτό το ύψος μύζησης επιτρέπει την ευεργετική δράση της βλάστησης στο πρανές σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση (περίπτωση 1).

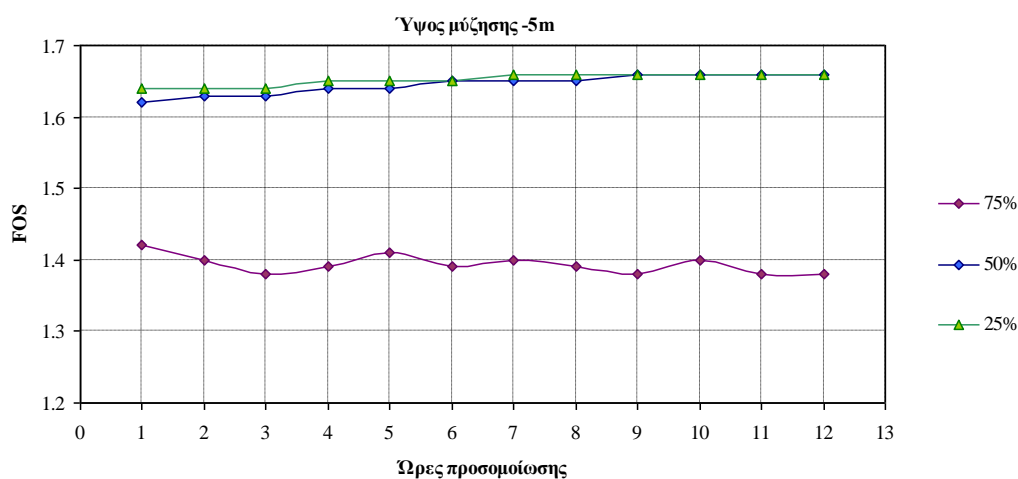
9.5.2.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

Ο πίνακας 9.18 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 2^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

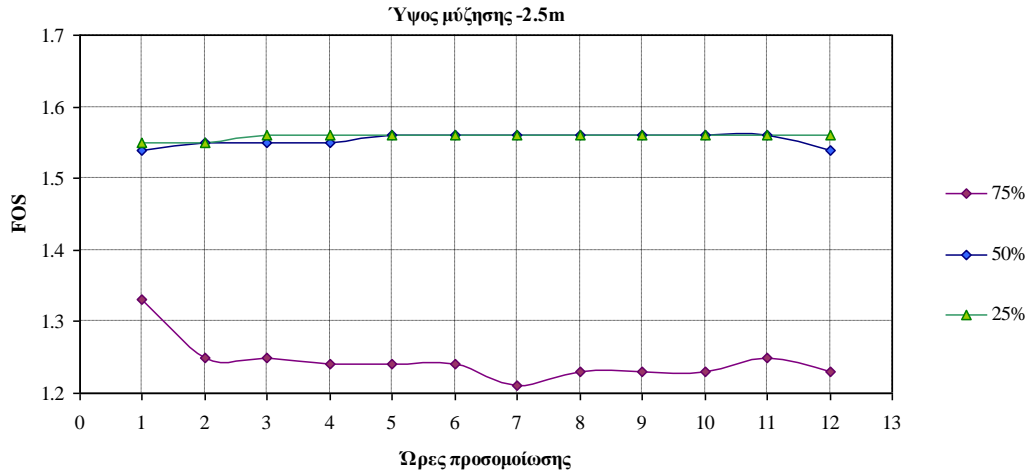
Πίνακας 9.18: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 2^ο

Ύψος μύζησης= -5m				Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Ώρες	FOS	FOS	FOS	Ώρες	FOS	FOS	FOS
1	1.42	1.62	1.64	1	1.33	1.55	1.55
2	1.4	1.63	1.64	2	1.25	1.55	1.55
3	1.38	1.63	1.64	3	1.25	1.56	1.56
4	1.39	1.64	1.65	4	1.24	1.56	1.56
5	1.41	1.64	1.65	5	1.24	1.56	1.56
6	1.39	1.65	1.65	6	1.24	1.56	1.56
7	1.4	1.65	1.66	7	1.21	1.56	1.56
8	1.39	1.65	1.66	8	1.23	1.56	1.56
9	1.38	1.66	1.66	9	1.23	1.56	1.56
10	1.4	1.66	1.66	10	1.23	1.56	1.56
11	1.38	1.66	1.66	11	1.25	1.56	1.56
12	1.38	1.66	1.66	12	1.23	1.54	1.56

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.16 & 9.17) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.

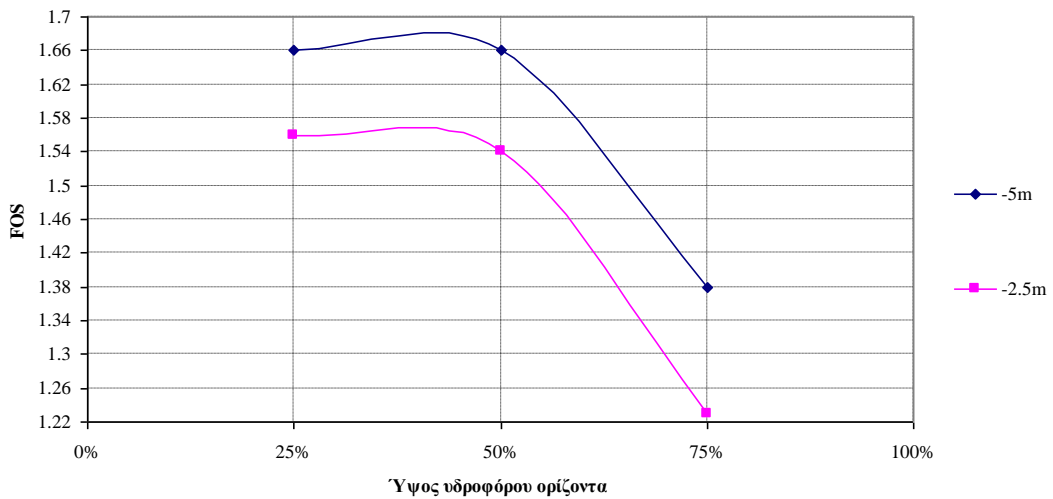


Διάγραμμα 9.16: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m



Διάγραμμα 9.17: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2.5 m

Όπως και πριν από την πυρκαγιά, φαίνεται ότι η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο συντελεστή ασφαλείας γίνεται αισθητή σε μεγάλα ύψη αυτού. Μάλιστα, όταν το ύψος φτάνει στο 75% του ύψους του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται μέχρι και 20%. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι όσο μειώνεται το ύψος μύζησης τόσο μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας. Μάλιστα, σημειώνεται η πτώση του συντελεστή κάτω από το όριο για ευστάθεια σε σεισμό στην περίπτωση ύψους μύζησης 2.5 m.



Διάγραμμα 9.18: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης

9.5.3 Μελέτη 3^{ου} Σεναρίου

Εργαζόμαστε με όμοιο τρόπο όπως στα προηγούμενα σενάρια, θεωρώντας όλες τις εδαφικές παραμέτρους ίδιες και εξετάζοντας δύο περιπτώσεις ύψους μύζησης στα 5 και 2.5 m.

9.5.3.1 Αποτελέσματα

Έχοντας ορίσει όλες τις παραμέτρους καθώς και τις αρχικές και οριακές συνθήκες για το πρανές, εκτελούμε το πρόγραμμα ώστε να προκύψει ο συντελεστής ασφαλείας για δωδεκάωρη προσομοίωση βροχής, για μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 και -2.5 m (Περίπτωση 1&2).

➤ *Περίπτωση 1: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -5 m*

➤

Πίνακας 9.19: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.63	295	255	146	5.22e+04	22.12
2	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
3	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
4	1.63	295	255	147	5.52e+04	22.12
5	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
6	1.64	295	255	147	5.52e+04	22.12
7	1.64	295	255	148	5.82e+04	22.12
8	1.65	295	255	148	5.82e+04	22.12
9	1.65	295	255	147	5.52e+04	22.12
10	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12
11	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12
12	1.65	295	255	146	5.22e+04	22.12

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εδώ παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.63 και 1.65, χωρίς να διαφοροποιείται ιδιαίτερα με τις αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν για το πρανές πριν από την πυρκαγιά. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν ότι η επίδραση της βλάστησης όταν το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα είναι μικρό και παράλληλα για μεγάλο ύψος μύζησης δεν είναι αισθητή.

Ακόμη, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 50% και 75% του ύψους του πρανούς. Με όμοια διαδικασία

υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας, θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους $c = 58 \text{ kPa}$ και $\phi = 35^\circ$.

➤ *Περίπτωση 2: Μέγιστο ύψος μύζησης στα -2.5 m*

Στη συνέχεια, προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 2.5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 25% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.20: Αποτελέσματα για καμένο πρανές, υπό την επίδραση βροχής

Version 4.1 (build 413)						
Vegetation: off		Total duration: 12 hours				
Reinforcement: off		Storm start: 1 hours				
Leakage: off		Storm end: 12 hours				
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.54	295	255	144	4.65e+04	22.12
2	1.54	295	255	144	4.65e+04	22.12
3	1.55	295	255	145	4.93e+04	22.12
4	1.55	295	255	145	4.93e+04	22.12
5	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
6	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
7	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
8	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
9	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
10	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
11	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
12	1.55	295	255	144	4.65e+04	22.12
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Όπως στην περίπτωση 1, παρατηρούμε και εδώ ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας παραμένουν ίδιες τόσο πριν όσο και μετά από την πυρκαγιά. Η επιλογή, λοιπόν, του συνδιασμού χαμηλού ύψους υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης δεν επιτρέπει την εμφάνιση της ευεργετικής δράσης της φυτοκάλυψης στην εν λόγω προσομοίωση.

9.5.3.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων- συμπεράσματα

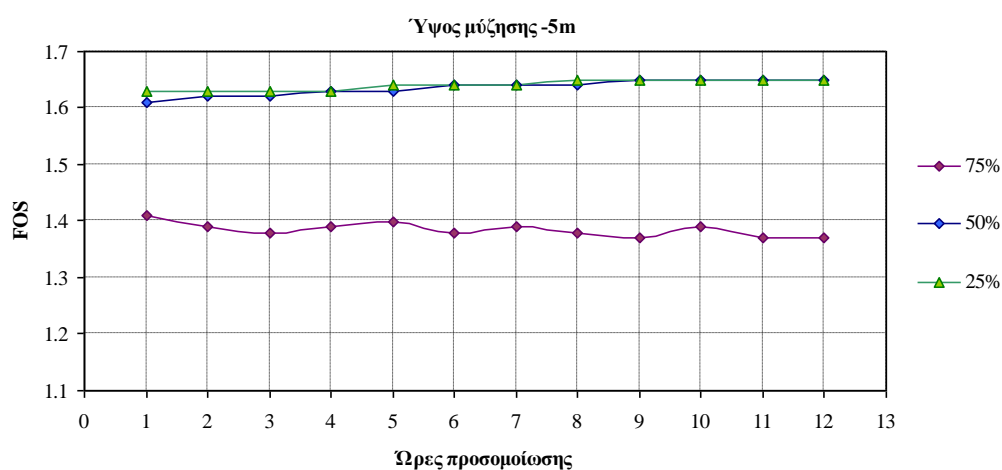
Ο πίνακας 9.21 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές του συντελεστή ασφαλείας που προέκυψαν στο 2^ο σενάριο για ύψη μύζησης στα -5 m και -2.5 m (περίπτωση 1&2).

Πίνακας 9.21: Συντελεστές ασφαλείας - σενάριο 3^ο

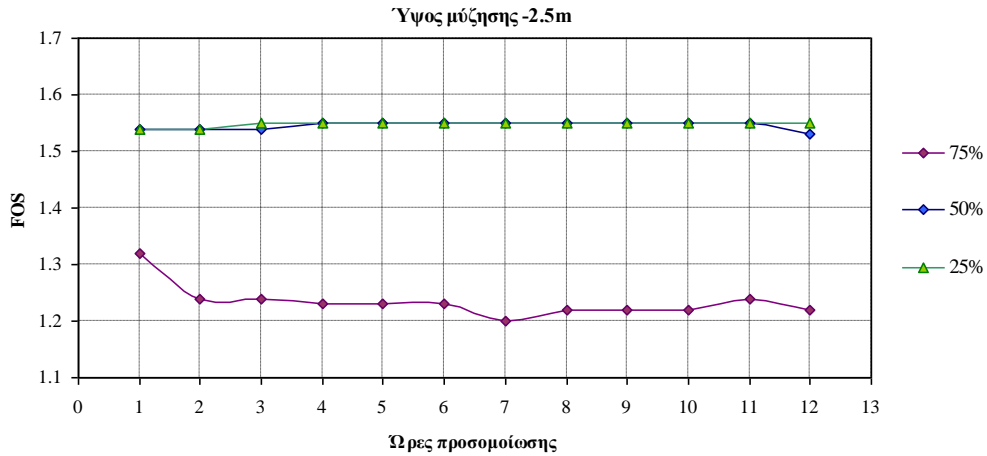
Κεφάλαιο 9: Προσομοίωση πρανών- τομή Β-Β'

Ύψος μύζησης= -5m				Ύψος μύζησης= -2.5m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Ώρες	FOS	FOS	FOS	Ώρες	FOS	FOS	FOS
1	1.41	1.61	1.63	1	1.32	1.54	1.54
2	1.39	1.62	1.63	2	1.24	1.54	1.54
3	1.38	1.62	1.63	3	1.24	1.54	1.55
4	1.39	1.63	1.63	4	1.23	1.55	1.55
5	1.4	1.63	1.64	5	1.23	1.55	1.55
6	1.38	1.64	1.64	6	1.23	1.55	1.55
7	1.39	1.64	1.64	7	1.2	1.55	1.55
8	1.38	1.64	1.65	8	1.22	1.55	1.55
9	1.37	1.65	1.65	9	1.22	1.55	1.55
10	1.39	1.65	1.65	10	1.22	1.55	1.55
11	1.37	1.65	1.65	11	1.24	1.55	1.55
12	1.37	1.65	1.65	12	1.22	1.53	1.55

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διαγράμματα 9.19 & 9.20) παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης εάν θεωρηθεί ως ύψος μύζησης τα 5 m και τα 2.5 m.

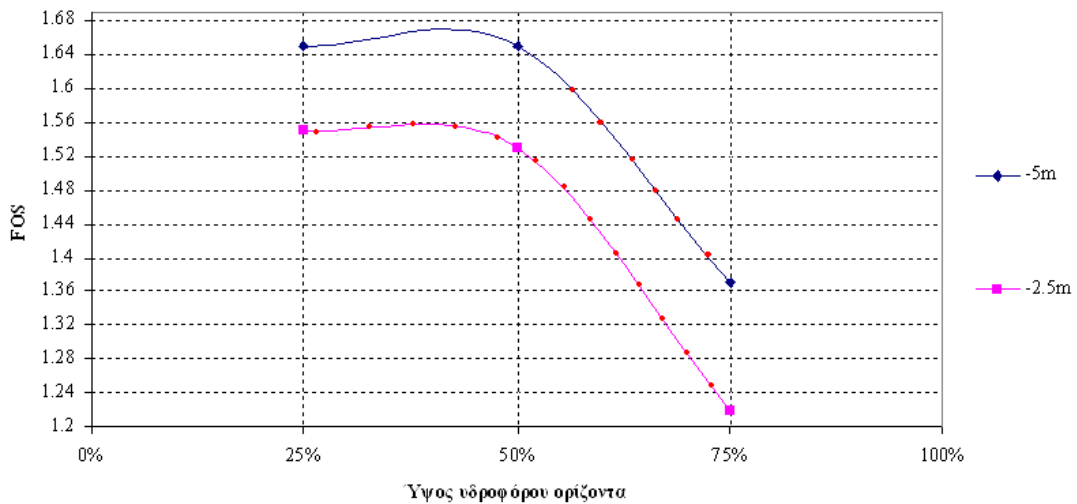


Διάγραμμα 9.19: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 1, ύψους μύζησης στα 5 m



Διάγραμμα 9.20: Διακύμανση του FOS για την περίπτωση 2, ύψους μύζησης στα 2,5 m

Όπως και πριν από την πυρκαγιά, φαίνεται ότι η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο συντελεστή ασφαλείας γίνεται αισθητή σε μεγάλα ύψη αυτού. Μάλιστα, όταν το ύψος φτάνει στο 75% του ύψους του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται μέχρι και 20% καθιστώντας το πρανές επιρρεπές σε αστοχία έναντι σεισμού. Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι όσο μειώνεται το ύψος μύζησης τόσο μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας. Μάλιστα, σημειώνεται η πτώση του συντελεστή κάτω από το όριο για ευστάθεια σε σεισμό στην περίπτωση ύψους μύζησης 2.5 m.

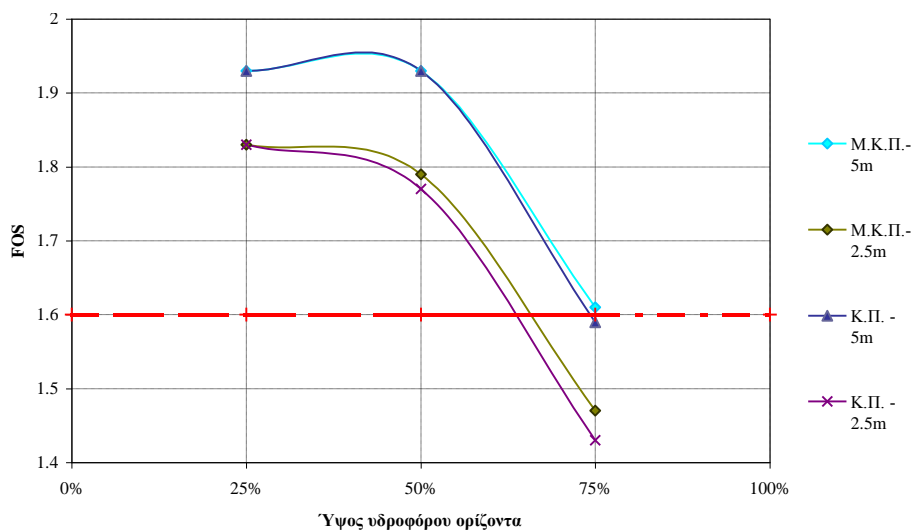


Διάγραμμα 9.21: Διακύμανση του FOS για κάθε ύψος υδροφόρου ορίζοντα και μύζησης

9.6 Ανακεφαλαίωση – Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά από την πυρκαγιά

▪ Δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης

Η επεξεργασία που ακολουθήθηκε στα προηγούμενα εδάφια για δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης, οδηγεί στη σύγκριση της συμπεριφοράς του πρανούς πριν και μετά την πυρκαγιά. Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, στην παρούσα ανάλυση, θεωρείται ότι το έδαφος μετά την πυρκαγιά είναι γυμνό, απουσιάζει δηλαδή κάθε είδος φυτοκάλυψης.

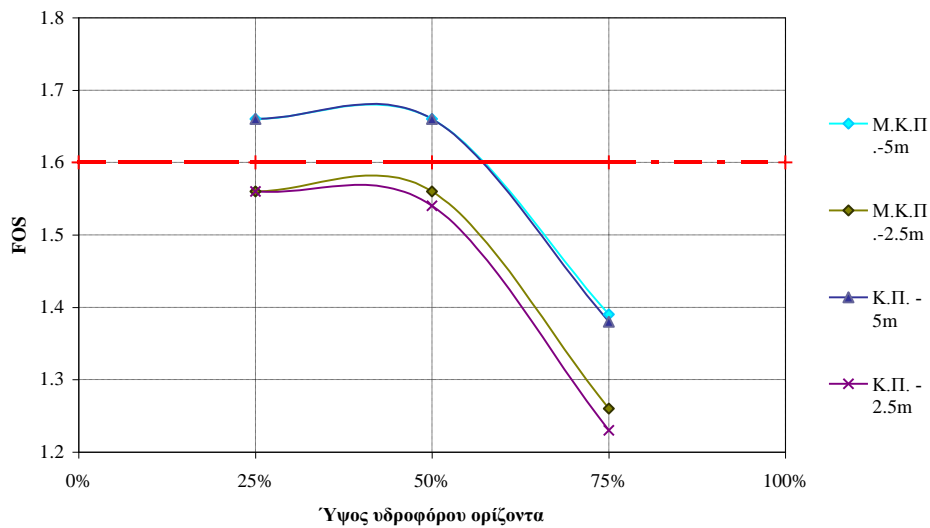


Διάγραμμα 9.22: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 1 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2

Το διάγραμμα 9.22 παρουσιάζει τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 1 για το καμένο και μη πρανές. Οι εδαφικές παράμετροι που προσδιορίστηκαν εδώ είναι: η συνοχή $c = 90\text{kPa}$ και η γωνία τριβής $\varphi = 37^\circ$, τιμές οι οποίες κρίνονται επαρκείς για τη δυσμενή περίπτωση μεγάλου ύψους του υδροφόρου, στο 75% του ύψους του πρανούς. Διαπιστώνεται ότι η συμπεριφορά του πρανούς μεταβάλλεται μετά την πυρκαγιά και ειδικότερα σημειώνεται μείωση του συντελεστή ασφαλείας. Το γεγονός αυτό, ενισχύει τις αρχικές υποθέσεις για ευεργετική επίδραση της βλάστησης στην ευστάθεια των πρανών.

Ειδικότερα, στην περίπτωση 2, όπου θεωρείται μικρό ύψος μύζησης στα 2.5 m, διακρίνεται μεγάλη αλλαγή του FOS σε κάθε πιθανή μεταβολή του υδροφόρου ορίζοντα (στα 25%, 50% του ύψους του πρανούς). Μάλιστα, όταν ο υδροφόρος

ορίζοντας βρίσκεται ψηλά (στο 75%), το καμένο πρανές φαίνεται ότι δεν είναι πλέον ευσταθές σε ενδεχόμενο σεισμό, αφού η τιμή του συντελεστή ασφαλείας πέφτει κάτω από το επιτρεπόμενο όριο ($F= 1.6$). Από την άλλη, στην περίπτωση 1, όπου το ύψος μύζησης είναι μεγαλύτερο (στα 5 m), φαίνεται πως η απουσία βλάστησης μειώνει την ευστάθεια του πρανούς κυρίως για πολύ μεγάλα ύψη υδροφόρου. Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, ότι η παρουσία του τριχοειδούς φαινομένου, συμβάλλει στην αντοχή του πρανούς, ακόμα και μετά από την πλήρη καταστροφή βλάστησης. Σημειώνουμε ότι ομοίως στα παραπάνω συμπεράσματα καταλήγουμε έπειτα από παρατήρηση και των υπόλοιπων σεναρίων.

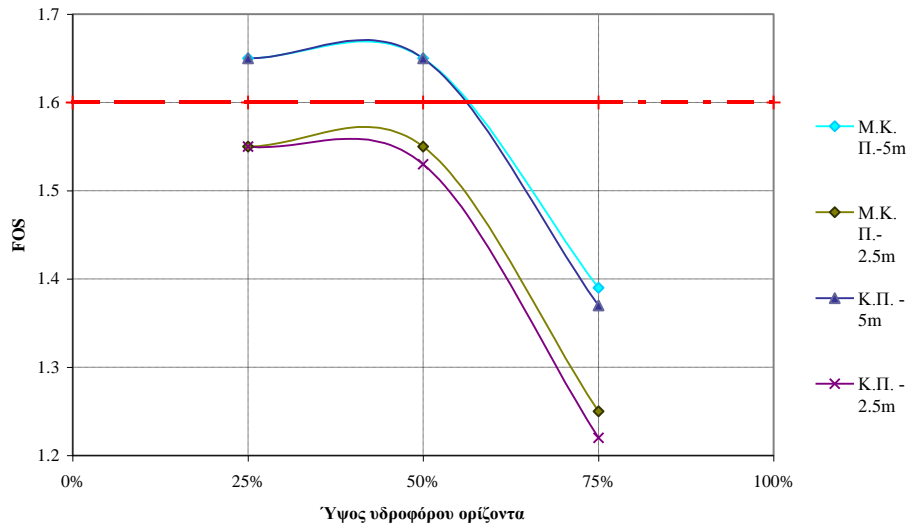


Διάγραμμα 9.23: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 2 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2

Στο 2^ο σενάριο (Διάγραμμα 9.23), οι εδαφικές παράμετροι που επελέχθησαν προσδίδουν ευστάθεια έναντι σεισμού στο καμένο και μη πρανές, στην περίπτωση 1, όπου το ύψος μύζησης θεωρείται μεγάλο και για ύψος υδροφόρου ορίζοντα στο 50% και χαμηλότερα στο 25%. Σε ενδεχόμενη αύξηση του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% του ύψους του πρανούς, η επίδραση του νερού στην αντοχή του πρανούς είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα το πρανές να γίνεται επιρρεπές σε ενδεχόμενο σεισμού.

Στην περίπτωση 2, όπου το ύψος μύζησης είναι μικρότερο, το πρανές φαίνεται να αστοχεί υπό την επίδραση σεισμού τόσο πριν, όσο και μετά από την πυρκαγιά. Παρ' όλα αυτά το μη καμένο πρανές παρουσιάζει μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας σε σχέση με το καμένο, σε περιπτώσεις μεγάλου υδροφόρου ορίζοντα. Αντίθετα, όταν ο

υδροφόρος βρίσκεται χαμηλά, η επίδραση της βροχόπτωσης στην ευστάθεια του πρανούς φαίνεται ότι είναι ίδια στο καμένο και μη έδαφος.



Διάγραμμα 9.24: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας στο σενάριο 3 για το καμένο (Κ.Π.) και μη πρανές (Μ.Κ.Π.) για τις περιπτώσεις 1&2

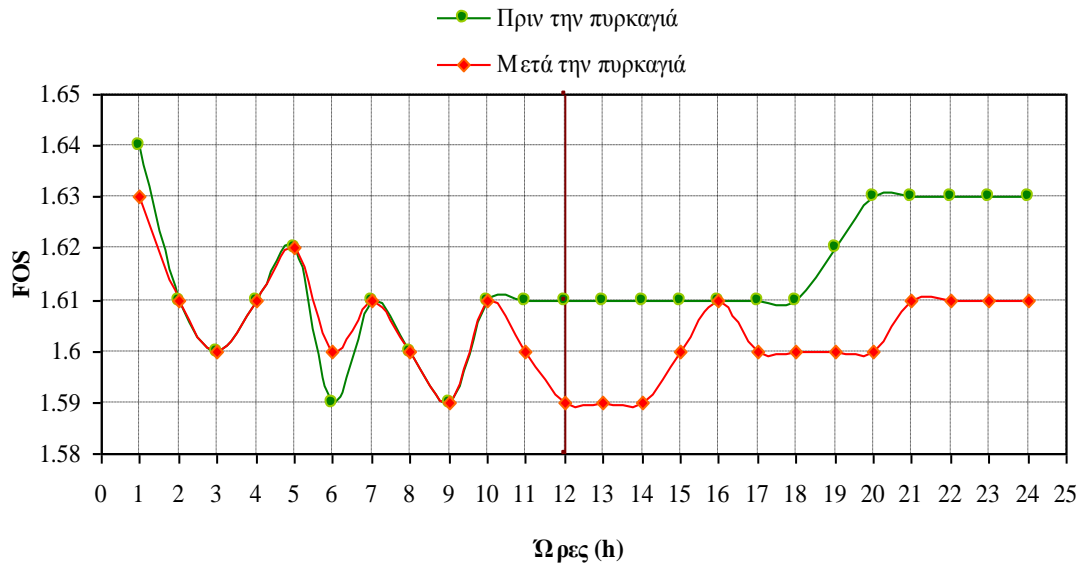
Σε όμοια συμπεράσματα καταλήγουμε και κατά την εξέταση του τρίτου σεναρίου (Διάγραμμα 9.24). Παρατηρείται, λοιπόν, ότι καθώς αυξάνεται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, αυξάνεται και η επίδραση της βροχής στην ευστάθεια του πρανούς τόσο πριν όσο και μετά. Έτσι, όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται μόλις στο 25% του ύψους του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας προκύπτει ίδιος στο καμένο και μη έδαφος.

Ακόμη, καθώς μειώνεται το ύψος μύζησης, μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Επιπλέον η μείωση αυτή του ύψους μύζησης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της επίδρασης της βροχής στην αντοχή του εδάφους. Έτσι, για ύψος μύζησης στα -2.5 m, το καμένο πρανές παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε σχέση με το μη καμένο, διαφορά η οποία δεν είναι αισθητή σε μεγαλύτερα ύψη μύζησης.

- *Μετά το πέρας της βροχόπτωσης*

Στη μελέτη που προηγήθηκε, χρησιμοποιήθηκε δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης και έτσι η ανάλυση που ακολούθησε στηρίχτηκε σε αυτή την επιλογή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως έχει και η διερεύνηση της επίδρασης του νερού μετά το πέρας της βροχόπτωσης και η συμπεριφορά του πρανούς στην περίπτωση αυτή. Για

το σκοπό αυτό, μελετήθηκε η συμπεριφορά του πρηνούς σε εικοσιτετράωρη βάση, με δώδεκα ώρες προσομοίωση βροχόπτωσης.



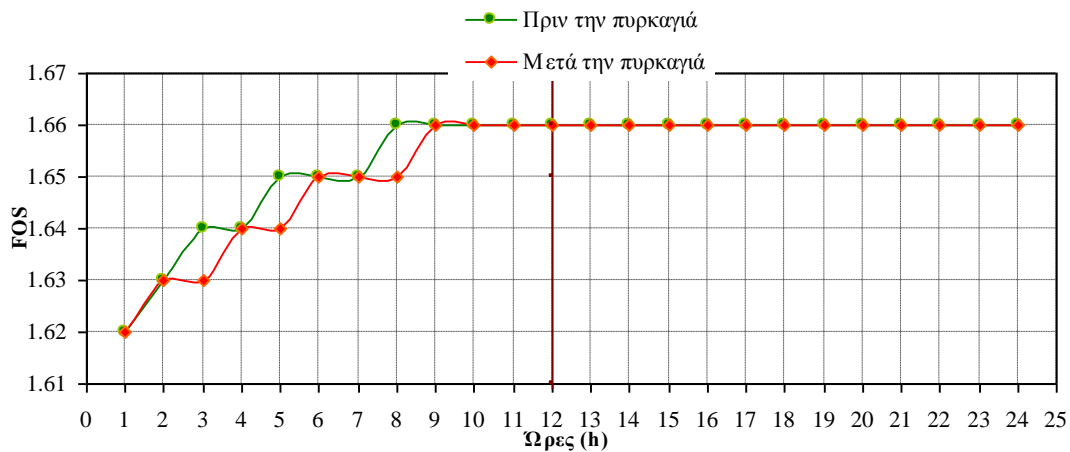
Διάγραμμα 9.25: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 1^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (Περίπτωση 1)

Το διάγραμμα 9.25 παρουσιάζει τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας όπως αυτή προκύπτει κατά τη διάρκεια εικοσιτετράωρου, στο 1^ο σενάριο και για ύψος μύζησης στα 5 m. Στην περίπτωση που το πρηνές δεν έχει καεί, παρατηρείται μία σταθεροποίηση της τιμής του συντελεστή από το τέλος της βροχόπτωσης μέχρι και τη 18^η ώρα της μελέτης. Στη συνέχεια, σημειώνεται αύξηση και μάλιστα ήδη από την 20^η ώρα ο FOS πλησιάζει την αρχική τιμή που είχε την 1^η ώρα της προσομοίωσης. Μετά το πέρασμα της πυρκαγιάς, η τιμή του συντελεστή παρουσιάζει διακύμανση μέχρι και την 21^η ώρα, οπότε και σταθεροποιείται σε τιμή που πλησιάζει την αρχική.

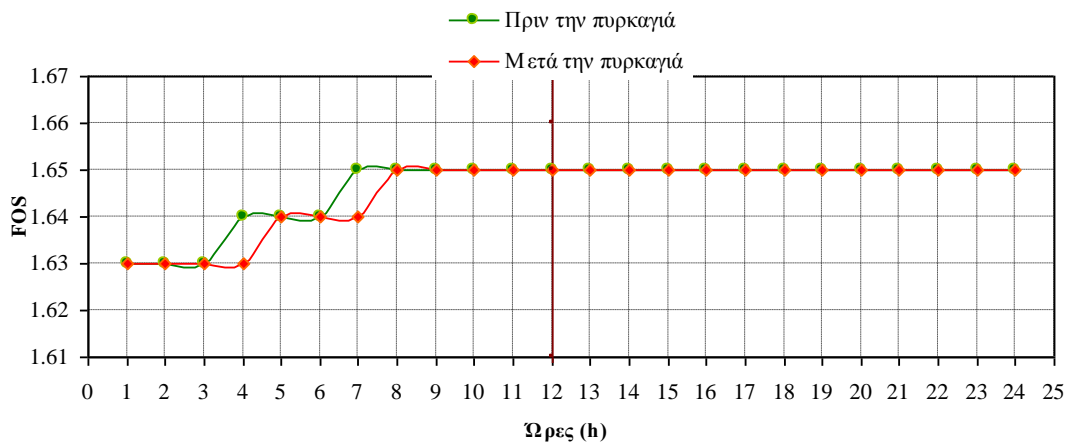
Από την παραπάνω επεξεργασία, γίνεται αντιληπτή η τάση για επαναφορά της τιμής του συντελεστή και έτσι της αντοχής του πρηνούς στις αρχικές τιμές του κατά την 1^η ώρα της προσομοίωσης, τόσο πριν όσο και μετά από την πυρκαγιά. Σημειώνεται ακόμη, ότι το καμένο έδαφος αποκτά την αρχική αντοχή του λίγο δυσκολότερα σε σχέση με το μη καμένο. Διαπιστώνεται έτσι, ότι μετά την πυρκαγιά η απουσία της βλάστησης σε συνδυασμό με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του εδάφους οδηγούν σε μείωση της αντοχής του εδάφους ακόμα και μετά το τέλος του επεισοδίου της βροχόπτωσης. Η επίδραση, λοιπόν, του νερού της βροχής στην αντοχή του

πρανούς φαίνεται ότι είναι μεγαλύτερη για το καμένο έδαφος συγκριτικά με εκείνο υπό φυσιολογικές συνθήκες.

Τα διαγράμματα 9.26 και 9.27 παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας όπως αυτή προκύπτει κατά τη διάρκεια εικοσιτετραώρου, για ύψος μύζησης στα 5 m στο 1^ο και 2^ο σενάριο αντίστοιχα. Παρατηρείται σταθεροποίηση της τιμής του συντελεστή ασφαλείας μετά τη δωδέκατη ώρα, τόσο πριν όσο και μετά την πυρκαγιά και για τα δύο σενάρια. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι για μικρά ύψη υδροφόρου ορίζοντα, η επίδραση του νερού της βροχής φαίνεται ότι είναι μόνιμη είτε το έδαφος είναι καμένο, είτε βρίσκεται υπό φυσιολογικές συνθήκες.



Διάγραμμα 9.26: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 2^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (Περίπτωση 1)



Διάγραμμα 9.27: Διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη διάρκεια 24ώρου, στο 3^ο σενάριο, για ύψος μύζησης στα 5 m (Περίπτωση 1)

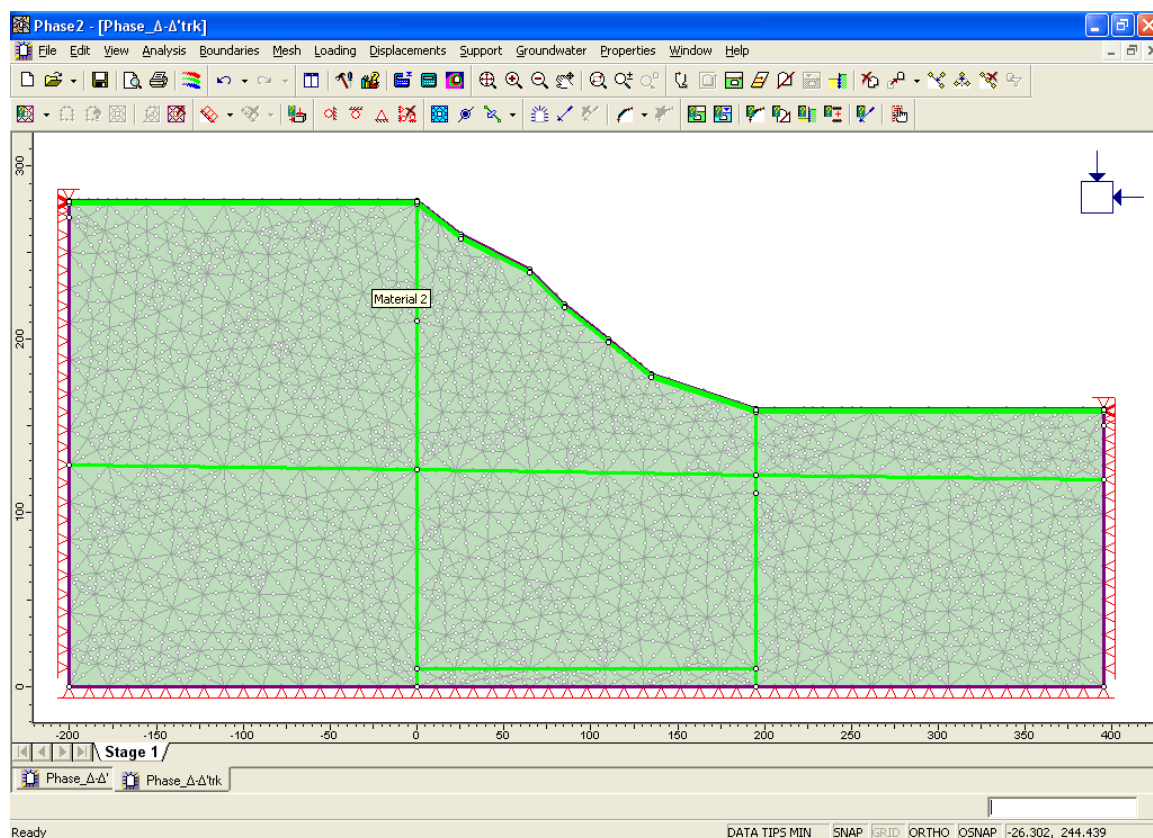
Όπου γ το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους πάνω από τον Υ.Ο., γ_s το κορεσμένο φαινόμενο ειδικό βάρος και γ_w το ειδικό βάρος του νερού.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, προκύπτει $F=1.05 > 1$. Η τιμή αυτού του συντελεστή δηλώνει την πιθανή εκδήλωση επιφανειακής αστοχίας του πρανούς.

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την επεξεργασία της συγκεκριμένης τομής είναι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 v6.0 της εταιρίας Rocscience. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσομοίωση της γεωμετρίας του πρανούς, των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, των γεωλογικών του σχηματισμών, την προσομοίωση του τασικού πεδίου και γενικότερα την παραμετροποίηση των συνθηκών κάτω από τις οποίες θα γίνει η ανάλυση της ευστάθειας του πρανούς, με απώτερο στόχο τον καθορισμό του συντελεστή ασφαλείας και της μετατόπισης που μπορεί να επιφέρει σε αυτά ένα πιθανό επεισόδιο βροχόπτωσης. Μάλιστα το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς εντοπισμού της επιφάνειας αστοχίας, σε αντίθεση με τις υποθετικές επιφάνειες αστοχίας που παρέχει το CHASM.

Στο **model** (μοντέλο, προσομοίωμα) πραγματοποιείται η εισαγωγή και διαμόρφωση:

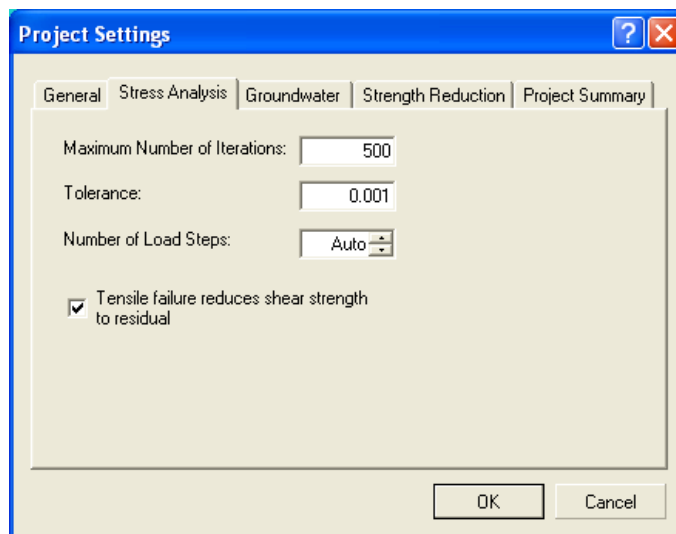
- των ορίων (*boundaries*) του υπό εξέταση πρανούς. Το πρόγραμμα πέρα από τη δυνατότητα δημιουργίας της γεωμετρίας με την εισαγωγή συντεταγμένων, δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής της γεωμετρίας είτε με τη μορφή αρχείων DXF, είτε με τη μορφή αρχείων Slide. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκε η εισαγωγή συντεταγμένων, οι οποίες προήλθαν από τη δημιουργία εγκάρσιων τομών στην περιοχή μελέτης. Στην εικόνα 1 φαίνεται η τομή από την οποία προέκυψε η γεωμετρία του πρανούς που μελετήθηκε.



Εικόνα 10.1: Διαμόρφωση ορίων μοντέλου

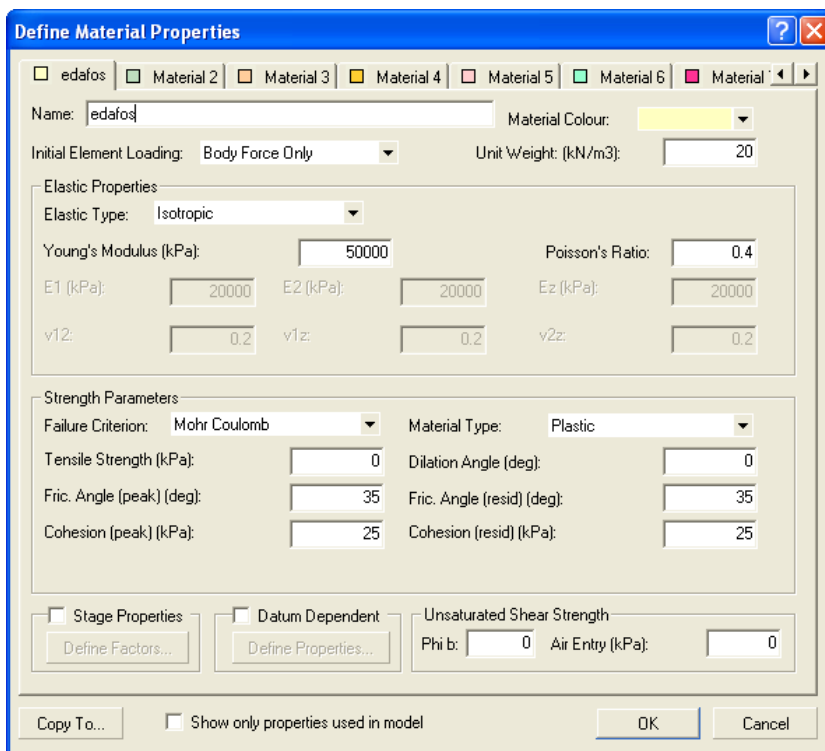
- των επιτόπου τάσεων. Οι συνθήκες που καθορίζουν την ανάλυση των τάσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως φαίνεται και στην εικόνα, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum number of iterations), η ανοχή (tolerance) και ο αριθμός των βημάτων φόρτισης (number of load steps).
 - ↳ Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων καθορίζει τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων για κάθε βήμα φόρτισης. Η τιμή που προτείνεται είναι 500 επαναλήψεις και είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε.
 - ↳ Η τιμή της ανοχής ελέγχει την επιτρεπτή μη ισορροπούσα κομβική δύναμη σε κάθε κόμβο χωριστά. Για μοντέλα όπου όλα τα υλικά χαρακτηρίζονται ως ελαστικά η ανοχή δεν έχει καμία χρησιμότητα καθώς η λύση είναι ακριβής. Για περιπτώσεις όπου έχουμε και πλαστικά εδάφη η τιμή της ανοχής είναι σχετική και κυμαίνεται μεταξύ 0.01 και 0.001, ανάλογα με το πρόβλημα. Μετά από κάποιες δοκιμές επιλέχθηκε η 0.001.

- ↪ Ο αριθμός των βημάτων φόρτισης αφορά το κάθε στάδιο ανάλυσης και συνίσταται η επιλογή του αυτόματου.

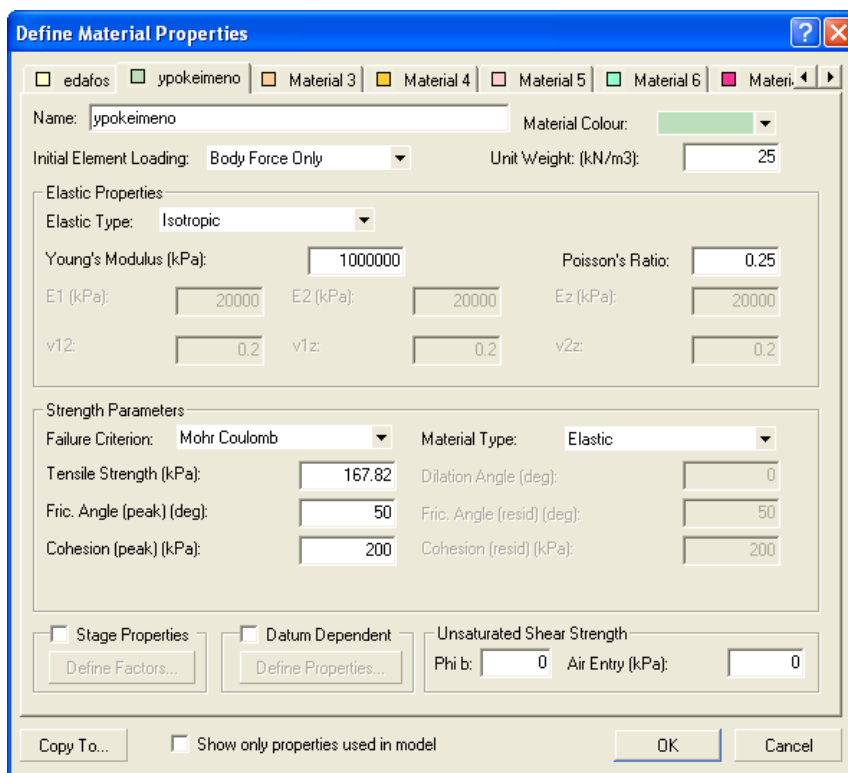


Εικόνα 10.2: Αρχικές συνθήκες- Ανάλυση τάσεων

- των συνοριακών συνθηκών και εδαφικών παραμέτρων. Το επόμενο βήμα ήταν ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του κάθε σχηματισμού που απαντάται στο συγκεκριμένο πρηνές. Συγκεκριμένα, η τομή αποτελείται κυρίως από σχιστοκερατολιθικά πετρώματα που σχηματίζουν μία ζώνη αποσάθρωσης βάθους, κατά προσέγγιση, ενός μέτρου. Για το έδαφος αυτής της ζώνης χρησιμοποιήθηκαν εδαφικές παράμετροι συνοχής $c = 25 \text{ kPa}$ και γωνίας τριβής $\varphi = 35^\circ$, ενώ για το βράχο επελέχθηκαν μεγαλύτερες τιμές, με τη συνοχή να φτάνει τα 200 kPa και τη γωνία τριβής τις 50° . Επιπλέον, το πάνω στρώμα ορίστηκε ως πλαστικό, σε αντίθεση με το υποκείμενο που θεωρήθηκε ελαστικό, ενώ και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο Mohr- Coulomb ως κριτήριο αστοχίας. Στην εικόνα φαίνονται όλες οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο πρηνές.



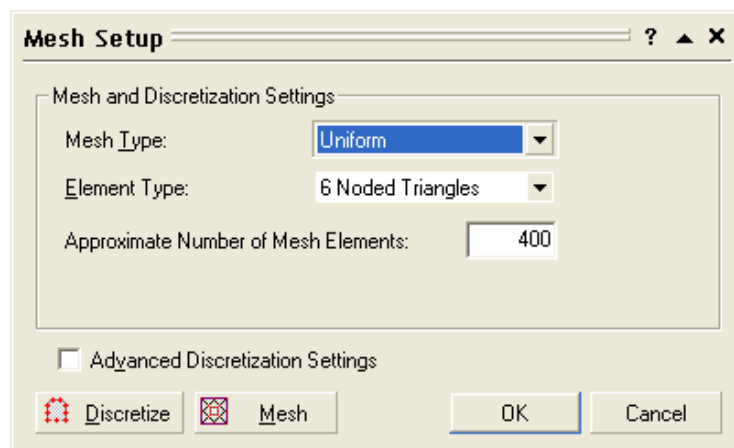
Εικόνα 10.3: Καθορισμός παραμέτρων στρώματος αποσάθρωσης



Εικόνα 10.4: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους

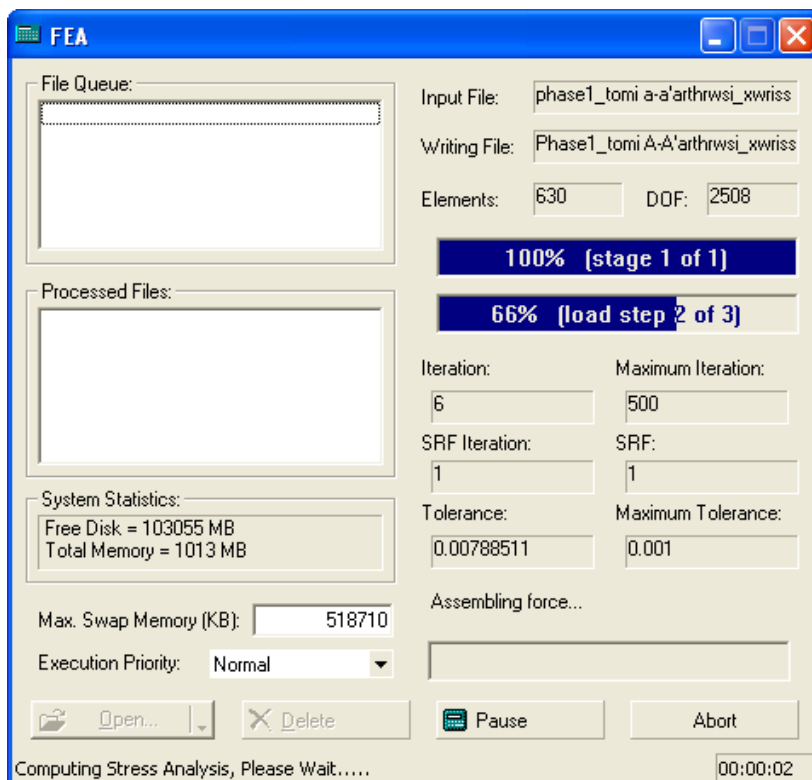
- και τέλος της δημιουργίας του πλέγματος (mesh) των πεπερασμένων στοιχείων. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων τόσο αυξάνεται η ακρίβεια

των αποτελεσμάτων, αλλά και ο χρόνος εκτέλεσης της εφαρμογής και η απαιτούμενη μνήμη υπολογιστή. Η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων σε αυτό.



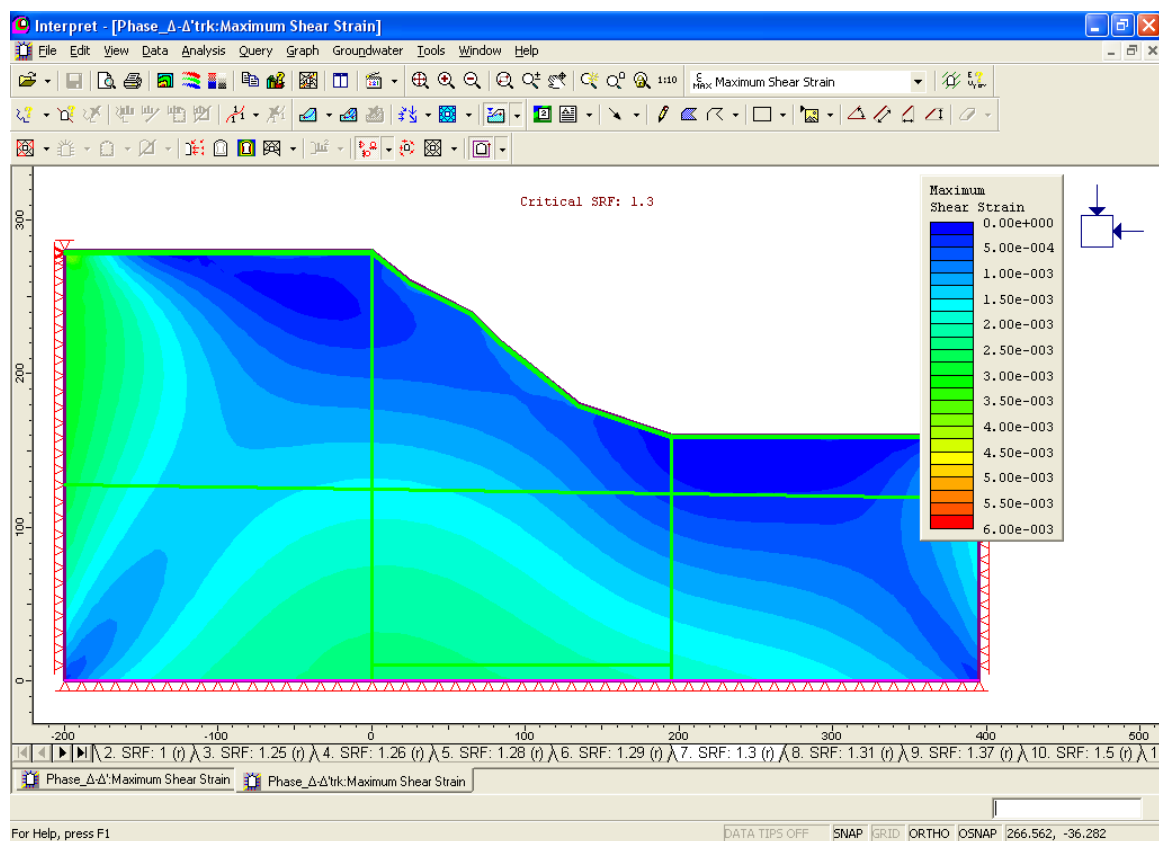
Εικόνα 10.5: Καθορισμός πλέγματος- mesh

Το **compute** (υπολογισμός) αποτελεί το διαμόρφωμα του προγράμματος όπου γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς, των μετατοπίσεων αυτού, καθώς και διαφόρων άλλων παραμέτρων.



Εικόνα 10.6: Υπολογισμός- Compute

Το **interpret** (ερμηνεία) αποτελεί το διαμόρφωμα εκείνο του προγράμματος το οποίο οπτικοποιεί τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κομματιού και βοηθάει το χρήστη στην ερμηνεία αυτών. Ακολούθως, παρουσιάζεται η κατανομή της διατμητικής αντοχής του πρανούς.

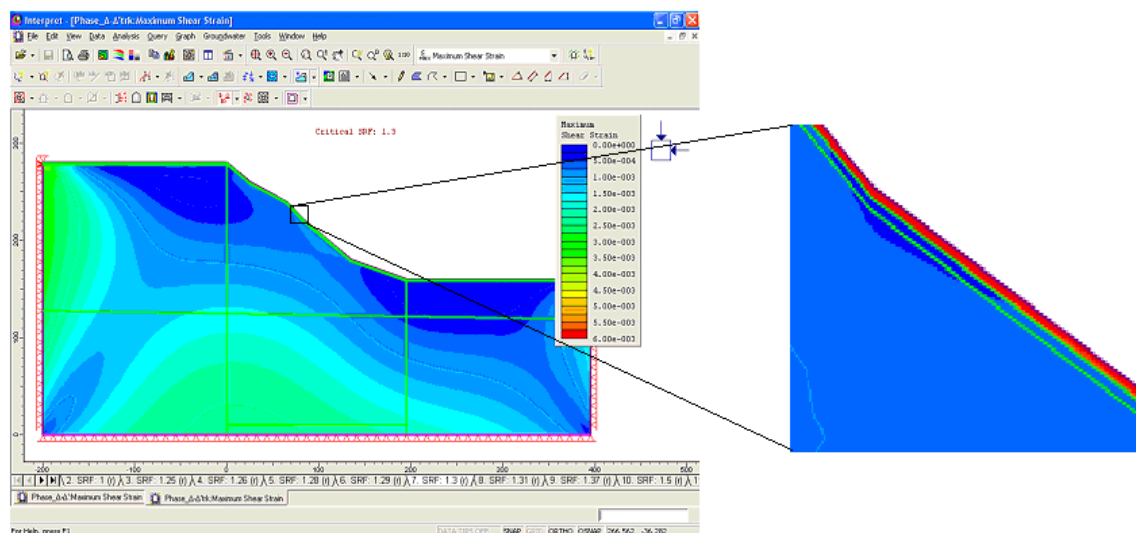


Εικόνα 10.7: Ερμηνεία – Interpret, Μέγιστη Διατμητική Παραμόρφωση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας του πρανούς F χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία μείωσης της διατμητικής αντοχής (Shear Strength Reduction Method) (Matsui & San, 1992). Η διατμητική αντοχή των γεωλογικών σχηματισμών του πρανούς ελαττώνονται κατά το συντελεστή μείωσης της αντοχής (SRF: Strength Reduction Factor). Η αρχική τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή ορίστηκε ίση με τη μονάδα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για διάφορες τιμές του SRF έως ότου προσδιοριστεί αυτή η τιμή του SRF για την οποία δεν ικανοποιούνται ταυτόχρονα το κριτήριο Mohr-Coulomb και το ισοζύγιο ισορροπίας ολόκληρου του πρανούς. Αυτή η διαδικασία καθορίζει τον κρίσιμο συντελεστή ασφαλείας F του πρανούς. Για μεγαλύτερες τιμές του SRF πέραν της

κρίσιμης, δηλαδή για μεγαλύτερη μείωση της διατμητικής αντοχής των σχηματισμών του πρανούς, αυτό αστοχεί.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, διαπιστώνουμε ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 1.3, τιμή που δηλώνει την ευστάθεια του πρανούς. Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει ένα τμήμα του πρανούς σε μεγέθυνση, τονίζοντας την κατανομή της ανηγμένης διατμητικής παραμόρφωσης στη ζώνη αποσάθρωσης. Εδώ, λοιπόν, είναι φανερό ότι η μεγαλύτερη τιμή της παραμόρφωσης εντοπίζεται στο επιφανειακό στρώμα (ζώνη αποσάθρωσης). Άλλωστε, το αποτέλεσμα αυτό είχε προκύψει και από τη θεωρία για ευστάθεια απείρου μήκους στην περίπτωση των στρωματοειδών ολισθήσεων όπου ο συντελεστής επιφανειακής ολίσθησης πλησίαζε την κατάσταση οριακής ισορροπίας, $F=1.05\approx 1$.



Εικόνα 10.8 : Ερμηνεία – interpret, Ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση

Η τομή Γ-Γ' μελετήθηκε θεωρώντας μηδενική την τιμή της βροχόπτωσης και ταυτόχρονα αγνοώντας την ύπαρξη υδροφόρου ορίζοντα. Η θεώρηση αυτών των ευνοϊκών συνθηκών όμως, δεν ήταν επαρκής για την ευστάθεια του πρανούς. Μάλιστα, φαίνεται ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες το πρανές θα αστοχήσει, ολισθαίνοντας επιφανειακά. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι υπό την επίδραση δυσμενών παραγόντων, όπως η βροχόπτωση, η εκδήλωση της αστοχίας στο επιφανειακό στρώμα, πιθανώς θα είναι ταχύτερη.

11. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων

Κύριος στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης του νερού της βροχής σε πρανή που βρίσκονται υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά και σε εκείνα που έχουν υποστεί το πέρασμα μιας πυρκαγιάς. Για την καλύτερη αντιμετώπιση του θέματος, μελετήθηκαν ενδεικτικά δύο τομές στη Ζαχάρω Ηλείας που βρίσκονται σε πλειο- πλειστοκαινικούς και σχιστοκερατολιθικούς σχηματισμούς αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της μελέτης συνοψίζονται ακολούθως:

- ✎ Η έλλειψη μιας λεπτομερούς βάσης δεδομένων αναφορικά με τις τιμές των
 - ↳ εδαφικών παραμέτρων όπως: η συνοχή c , η γωνία εσωτερικής τριβής φ , το κορεσμένο ειδικό βάρος γ_s και το υγρό φαινόμενο γ_v ,
 - ↳ υδρολογικών παραμέτρων όπως η ακριβής ένταση i και διάρκεια βροχόπτωσης t για αναμενόμενη περίοδο επανάληψης T ,
 - ↳ και υδρογεωλογικών παραμέτρων όπως το αρχικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, η κορεσμένη υδροπερατότητα k ,συναρτήσει της γεωγραφικής θέσης, επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα του λογισμικού πακέτου CHASM, οδηγώντας την έρευνα σε αναγκαίες υποθέσεις και διερεύνηση παραμέτρων.
- ✎ Ακόμη, η έλλειψη λεπτομερών μετρήσεων των τιμών των εν λόγω παραμέτρων είτε επί τόπου (in situ), είτε στο εργαστήριο, μας αναγκάζει να προβούμε σε εκτίμηση αυτών με τη βοήθεια στοιχείων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχει μια απόκλιση μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών των παραμέτρων, που επιδρά αρνητικά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
- ✎ Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο τομών, B-B' και Γ-Γ', αντιλαμβανόμαστε τη διαφορετική μηχανική συμπεριφορά τους. Διαπιστώνεται ότι η δεύτερη τομή Γ-Γ' ολισθαίνει επιφανειακά ακόμη και χωρίς την επίδραση της βροχόπτωσης. Από την άλλη, η πρώτη τομή B-B' αστοχεί υπό προϋποθέσεις, αφού η αντοχή της επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι τιμές των εδαφικών και υδρολογικών παραμέτρων όπως φαίνεται ακολούθως.

- ✎ Ο συντελεστής ασφαλείας για την πρώτη τομή B-B' παρουσίασε διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης οι οποίες οφείλονται τόσο σε παράγοντες που χαρακτηρίζονται από σταθερότητα όπως γεωμετρία, γεωλογία, ιδιότητες λιθολογικών στρωμάτων και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά όπως συνοχή, ύψος υδροφόρου ορίζοντα, όσο και σε περιοδικούς ή ευμετάβλητους παράγοντες όπως η βλάστηση και τα διάφορα καιρικά φαινόμενα.
- ✎ Γεγονός είναι ότι η βροχόπτωση επιδρά εναυσματικά ή επιταχυντικά στην αστοχία του πρανούς. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του πρανούς μετά την πυρκαγιά, η πίεση των πόρων στο τέλος της προσομοίωσης αυξήθηκε κατά μέσο όρο 60% της αντίστοιχης την πρώτη ώρα. Ακόμη, παρατηρείται αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας της τάξης του 20%. Συνεπώς, η βροχόπτωση επιφέρει αύξηση τόσο της πίεσης του νερού των πόρων όσο και της υγρασίας.

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, το έδαφος αποκτά μεγαλύτερη υγρασία η οποία αυξάνει το βάρος του, καθώς το νερό καταλαμβάνει τα φυσικά κενά που υπάρχουν σε αυτό. Το μεγαλύτερο βάρος προκαλεί με τη σειρά του αύξηση της τριβής μεταξύ εδάφους και υποβάθρου εάν η σταθερά τριβής παραμένει σταθερή. Επιπλέον, η αύξηση της υγρασίας του εδάφους επιφέρει μείωση στη συνοχή των κόκκων του εδάφους και επακόλουθα στη δύναμη τριβής κατά μήκος της πιθανής επιφάνειας ολίσθησης. Συνεπώς, το υπερκείμενο υλικό δεν είναι πια ικανό να αντισταθεί σε μία μετατόπιση κάτω από την επίδραση της κατακόρυφης συνιστώσας της βαρύτητας.

Συμπερασματικά, η επίδραση των υδρολογικών συνθηκών συνίσταται στη μείωση της διατμητικής αντοχής στην επιφάνεια ολίσθησης. Το βάθος εκδήλωσης του φαινομένου ελέγχεται συχνά από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με την κλίση. Ο κορεσμός από την επιφάνεια έως την πιθανή επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να προκαλέσει την αστοχία.

- ✎ Όπως έχει αναφερθεί, δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για την επακριβή θέση του υδροφόρου ορίζοντα στη συγκεκριμένη περιοχή. Συνεπώς θεωρείται ότι η επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα ακολουθεί την κατεύθυνση του πρανούς

ενώ το ύψος του εξετάζεται σε τρεις πιθανές θέσεις στα 75% (Σενάριο 1), 50% (Σενάριο 2) και 25% (Σενάριο 3) του ύψους του πρανούς.

Όπως διαπιστώθηκε στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όταν το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα φτάνει ψηλά, στο 75% του ύψους του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του, σε σχέση με τους αντίστοιχους των υπόλοιπων σεναρίων για το καμένο και μη πρανές. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τον κορεσμό του 75% του εδάφους, που συντελεί στη μείωση της συνοχής των κόκκων του εδάφους και της διατμητικής αντοχής του και κατ' επέκταση σε πιθανή αστοχία. Αντιλαμβανόμαστε, ότι η λειτουργία της βροχόπτωσης σε κορεσμένο έδαφος έχει ως αποτέλεσμα την πιθανότητα ταχύτερης και βαθιάς αστοχίας. Από την άλλη, όταν η ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται χαμηλά, τόσο στο 50% όσο και στο 25%, και έτσι το έδαφος παρουσιάζει χαμηλό κορεσμό, η βροχόπτωση δεν επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ευστάθεια του πρανούς.

- Όσον αφορά στο ύψος μύζησης, συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις, διαπιστώνεται ότι όταν το ύψος αυτό είναι μεγάλο δηλαδή στα 5 m, η διακύμανση του συντελεστή φαίνεται ομαλότερη σε σχέση με εκείνη για μικρότερο ύψος μύζησης στα 2.5 m από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Επιπλέον, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ενδεχόμενη ξηρασία και κατά συνέπεια μείωση του ύψους της αρνητικής πίεσης στα 2.5 m οδηγεί στη γενικότερη μείωση του συντελεστή ασφαλείας κατά 9% . Μάλιστα, παρατηρήθηκε ότι για μικρό ύψος μύζησης συχνά ο συντελεστής ασφαλείας δεν επαρκεί έναντι σεισμού. Η διαφοροποίηση αυτή των τιμών του συντελεστή ασφαλείας, και κατ' επέκταση της αντοχής του πρανούς, για μικρό και μεγάλο ύψος μύζησης, γίνεται περισσότερο αισθητή όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται ψηλά στο πρανές. Ακόμα και μετά από την πλήρη καταστροφή βλάστησης, η παρουσία του τριχοειδούς φαινομένου, φαίνεται ότι συμβάλλει στην αντοχή του πρανούς,

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση 2, μικρού ύψους μύζησης, φαίνεται ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα την τελευταία ώρα της

προσομοίωσης ανεβαίνει μέχρι και 25 m, αύξηση που είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη για μεγαλύτερο ύψος μύζησης (Περίπτωση 1).

- ✎ Από την προηγηθείσα επεξεργασία επιβεβαιώνεται ο γνωστός ρόλος της βλάστησης στην ευστάθεια των πρανών. Η απουσία της βλάστησης μετά την πυρκαγιά οδήγησε το συντελεστή ασφαλείας σε μείωση της τάξης του εκατοστού. Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι ρίζες των δέντρων φαίνεται ότι έχουν θετική συμβολή στην αύξηση της αντοχής του εδάφους. Η βλάστηση προφανώς, επιφέρει μεταβολές στις υδρολογικές παραμέτρους του εδάφους αυξάνοντας για παράδειγμα την υδραυλική αγωγιμότητα των επιφανειακών σχηματισμών, αλλά το βάθος επιρροής σχετίζεται άμεσα με το βάθος ριζών. Σε περίπτωση φυτοκάλυψης, περισσότερο νερό απορροφάται από το έδαφος και λιγότερο ρέει επιφανειακά. Τα ποσοστά νερού που απορροφούνται ή απορρέουν εξαρτώνται από την πυκνότητα του ριζικού συστήματος, αφού οι πιο πυκνές προσφέρουν μεγαλύτερη ενίσχυση από τις αραιότερες και οι μεγάλες ρίζες ενισχύουν καλύτερα το έδαφος σε σχέση με τις μικρότερες. Στη συγκεκριμένη μελέτη, ο ρόλος της βλάστησης στην αντοχή του πρανούς δεν επιφέρει πολύ μεγάλες αλλαγές στις τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Το γεγονός αυτό μπορεί εν μέρει να δικαιολογηθεί από την εισαγωγή στο CHASM ενός πρανούς μεγάλων διαστάσεων και την ενδεχόμενη δυσκολία αντιμετώπισης πρανών τέτοιας κλίμακας από πλευράς λογισμικού.
- ✎ Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει και η επίδραση του νερού της βροχόπτωσης μετά το πέρας αυτής κατά τη διάρκεια ενός δεύτερου δωδεκαώρου. Για μεγάλο ύψος υδροφόρου ορίζοντα (Σενάριο 1), στην περίπτωση που το πρανές δεν έχει καεί, παρατηρείται μία σταθεροποίηση της τιμής του συντελεστή από το τέλος της βροχόπτωσης μέχρι και τη 18^η ώρα της μελέτης. Στη συνέχεια, σημειώνεται αύξηση και μάλιστα ήδη από την 20^η ώρα ο FOS πλησιάζει την αρχική τιμή που είχε την 1^η ώρα της προσομοίωσης. Μετά το πέρασμα της πυρκαγιάς, η τιμή του συντελεστή παρουσιάζει διακύμανση μέχρι και την 21^η ώρα, οπότε και σταθεροποιείται σε τιμή που πλησιάζει την αρχική.

Από την παραπάνω επεξεργασία, γίνεται αντιληπτή η τάση για επαναφορά της τιμής του συντελεστή και έτσι της αντοχής του πρανούς στις αρχικές τιμές του

κατά την 1^η ώρα της προσομοίωσης, τόσο πριν όσο και μετά από την πυρκαγιά. Σημειώνεται ακόμη, ότι το καμένο έδαφος αποκτά την αρχική αντοχή του λίγο δυσκολότερα σε σχέση με το μη καμένο. Διαπιστώνεται έτσι, ότι μετά την πυρκαγιά η απουσία της βλάστησης σε συνδυασμό με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του εδάφους οδηγούν σε μείωση της αντοχής του εδάφους ακόμα και μετά το τέλος του επεισοδίου της βροχόπτωσης. Η επίδραση, λοιπόν, του νερού της βροχής στην αντοχή του πρανούς φαίνεται ότι είναι μεγαλύτερη για το καμένο έδαφος συγκριτικά με εκείνο υπό φυσιολογικές συνθήκες.

Για μικρότερα ύψη υδροφόρου ορίζοντα φαίνεται ότι ο συντελεστής ασφαλείας μετά το τέλος της βροχόπτωσης σταθεροποιείται στην τιμή που απέκτησε κατά την τελευταία ώρα του επεισοδίου τόσο πριν, όσο και μετά την πυρκαγιά.

- ✎ Επιπλέον, παρατηρείται ότι στο 1^ο σενάριο, όπου ο υδροφόρος βρίσκεται ψηλά, οι εδαφικές παράμετροι που απαιτούνται για ευστάθεια έναντι σεισμού είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα υπόλοιπα σενάρια. Ειδικότερα, η συνοχή στο 1^ο σενάριο επιλέγεται στα 90 kPa, ενώ στο 2^ο σενάριο στα 60 kPa και στο τρίτο ακόμη μικρότερη στα 58 kPa. Επιπρόσθετα, η γωνία τριβής προσδιορίζεται στις 37° για το πρώτο σενάριο, ενώ στα υπόλοιπα επαρκεί μια τιμή περί των 35°.

12. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Έπειτα από τη μελέτη του συγκεκριμένου θέματος, τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων και τις δυσκολίες που συναντήσαμε, έχουμε τη δυνατότητα να συνοψίσουμε τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα στις εξής:

- Πύκνωση των αρχικών δεδομένων του πρανούς και των γεωλογικών φαινομένων κατά τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας ώστε να καλύπτονται περισσότερο τα πραγματικά πρανή και οι γενικότερες συνθήκες που μελετώνται. Συγκεκριμένα, η πύκνωση αυτή θα μπορούσε να διεξαχθεί στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας που θα χρησιμοποιούσε ως αρχικά δεδομένα τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης. Βασιζόμενη, λοιπόν, σε αυτά, ενδιαφέρον θα είχε η περαιτέρω μελέτη της ευστάθειας των πρανών λαμβάνοντας υπ' όψη εδαφικές παραμέτρους που προκύπτουν από εργαστηριακή ανάλυση δείγματος εδάφους της περιοχής.
- Συνέχιση αυτής της διπλωματικής εργασίας, ελέγχοντας τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την προσομοίωση του πρανούς που όμως δε μπορούν να εξηγηθούν πλήρως με βάση τη θεωρία που χρησιμοποιήθηκε. Για παράδειγμα, η αυξομείωση του συντελεστή ασφαλείας και όχι η σταθερή μείωσή του υπό την επίδραση της βροχής θα μπορούσε να διερευνηθεί περαιτέρω.
- Πιο ακριβής απεικόνιση της επίδρασης της φωτιάς στο έδαφος, λαμβάνοντας υπ' όψη στο σχεδιασμό του πρανούς το λεπτό υδρόφοβο στρώμα που δημιουργείται με το πέρας της πυρκαγιάς. Σκόπιμη κρίνεται η εργαστηριακή ανάλυση δείγματος καμένου εδάφους, ώστε να προσδιοριστούν ποσοτικά οι ακριβείς αλλαγές των παραμέτρων.
- Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας για αντιδιαβρωτική προστασία ειδικών υλικών που σκοπεύουν στη μείωση του κινδύνου ολίσθησης. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα ενίσχυσης του εδάφους με τη χρήση γεωϋφασμάτων (*geotextiles*) και νυχιών ενίσχυσης εδάφους (*earth nails*).

- Εφαρμογή βροχόπτωσης στο πρόγραμμα Phase 2 V6.0. Δεδομένου ότι το πρόγραμμα αυτό αποτελεί ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων αξιολογής προσέγγισης γεωτεχνικών προβλημάτων, και εφόσον στην παρούσα μελέτη δεν εντοπίστηκε ο κατάλληλος συνδυασμός κατείσδυσης και υδρολογικών παραμέτρων του πρσανούς, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου με το εν λόγω πρόγραμμα.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Anagnostopoulos, C., and Georgiades, M., Analysis of rainfall data and correlation to landslides, *IAEG, Engineering Geology and the Environment*, 2 , 483-488, 1997.

Anderson, M., Kemp, M.J., and Lloyd, D.M., Applications of soil water finite models to slope stability problems, *5th International Symposium on Landslide*, Lausanne, Balkema 1990.

Au, S.W.C., Rain- induced slope stability in Hong-Kong., *Eng. Geology*, 51, 151-168,1998.

Anneke de Rouw, *Effect of fire on soil, rice, weeds and forest regrowth in a rain forest zone (Crte d'Ivoire)*, Department of Vegetation Science, Agricultural University, Netherlands, *Catena*, 22, 133-152,1994.

Anderson, M. G., and Kemp, M. J., *Earth surface processes and landforms on the use of resistance envelopes to identify the controls on slope stability in the tropics*, Department of Geography, University of Bristol., 1986.

Ayonghe, S. N., Mafany, G. T., et al., Seismically Activated Swarm of Landslides, Tension Cracks and a Rockfall after Heavy Rainfall in Bafaka Cameroon, *Natural Hazards*, 19, 13–27,1999.

Bache, D., *Vegetation in civil and landscape engineering*, Bache D. and MacAskill A., 1984.

Beeson, P.C., Martens, S.N. and Breshears, D.D. *Simulating overland flow following wildfire: mapping vulnerability to landscape disturbance*, Los Alamos, USA .

Bolz, R., *Handbook of Tables for Applied Engineering Science*, 2004

Collison, A.J.C., and Anderson, M.G., Using a combined slope hydrology/stability model to identify suitable conditions for landslide prevention by vegetation in the humid tropics, *Hydrological processes*, 15, 3025–3038, Bristol, 1995.

Cruden, D.M., A Simple Definition of a Landslide, *Bull. of the Int. Ass. Of engineering Geology*, 43, 27-29,1991.

Day, R.W., *Geotechnical engineer' s portable handbook*, Day Robert.

Fredlund, D. G., and Rahardjo, H., *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, 1993.

Gallipoli, D., Picarelli, L., et al., *The BIONICS embankment: a case study (climate change & civil engineering)*, 3rd MUSE School Naples, 2007.

Guzzetti, F., Rossi, M., and Stark, C. P., Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe, *The, Meteorological Atmospheric Physics*, 98, 239–267, Netherlands, 2007.

Hervaaas, J., *Lessons learnt from landslide disasters in Europe*, European Communities, 2003.

Jan, M.H., *Vadose zone hydrology & more*, Hendrickx, 2007.

Johnson, E.A., and Miyanishi, K., *Forest Fires: Behaviour and Ecological Effects*, *Academic Press*, 61, 2001.

Jones, R., Kirkby M.J., Kosmas C. et al., Indicators for pan-European assessment and monitoring of soil erosion by water, *Environmental Science & Policy*, 7, 25–38, 2004.

Koukis, G., Koutsoyannis, D., Development in Earth surface, *Processes in Greece- Geomorphological Hazard of Europe*, C. Embleton- Hamann, 1997.

Levin, A., and Indelman, P., *Analytical Solutions of Advective Transport by Infiltration–Redistribution Gravitational Flow*, Springer, Israel, 2006.

Martin, D. A. and Moody, J. A., *Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds*, USA.

Margolin, M., *The earth manual- How to work on wild land without taming it*, Heyday Books, Berkeley, 1985.

Matziaris, V. G., *Slope Stability and Earthquake- Induced Displacement Analysis in GIS Environment*, 2004.

Matziaris, V.G., Ferentinou, M.D. and Sakellariou, M.G., *Slope stability assessment in unsaturated soils under rainfall conditions*, Centre for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens .

Matziaris, V.G., Ferentinou, M.D. and Sakellariou, M.G., Slope stability assessment in unsaturated soils under rainfall conditions, *International Workshop in Geoenvironment and Geotechnics (GEOENV2005)*, 91-97, Agioutantis & Komnitsas, Milos, 2005.

Matziaris, V., and Sakellariou, M., *Modeling the effect of rainfall in unsaturated, slopes*, Center for the Assessment of Natural Hazards and Proactive Planning, School of Rural and Surveying Engineering, National Technical University of Athens, Athens

Meyer, G. A., Pierce, J. L., et al., *Fire, storms, and erosional events in the Idaho batholith*, Department of Earth and Planetary Sciences, University of New Mexico, Albuquerque, USA.

Morgan, R.P.C., and Rickson, R.J., *Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach*, E & FN SPON, 1995

Ortigao, J.A.R., and Sayao, A.S.F.J., *Handbook of slope stabilisation*, 54, Springer, 2004.

Panizza, M., *Environmental Geomorphology*, Elsevier, 1996.

Pierson, F.B., Robichaud, P.R. and Spaeth, K.E., *Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed*, USA.

Richard, M., *Landslide triggering by rain infiltration*, Iverson, 36, 1897–1910, Washington, 2000.

Reddi, L., *Seepage in soils: Principles and applications*, Reddi L.

Rutqvist, J. and Stephansson, O., The Role of Hydromechanical Coupling in Fractured Rock Engineering, *Hydrogeology Journal*, 2002.

Scott D.F., The contrasting effects of wildfire and clearfelling on the hydrology of a small catchment., *Hydrological Processes*, 11, 543-555, 1997.

Soler, M. and Sala, M., Effects of Fire and of Clearing in a Mediterranean Quercus ilex Woodland: An Experimental Approach, *Catena*, 19, 321- 332, 1992.

Solorio, J. B. and MacDonald, L.H., *Post-fire runoff and erosion from simulated rainfall on small plots, Colorado Front Range*, Department of Earth Resources, Colorado State University, USA.

Thomas, M., Landscape sensitivity in time and space- an introduction, *Catena*, 83-98, 42, 2001.

Varnes, D. J., *Slope movement types and processes, Landslides- Analysis and Control*, National Academy of Sciences, 1978.

Wieczorek, G.F., Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope movement processes in the Yosemite Valley, California, *Geomorphology*, 15, 17-31, 1996.

Wilkinson, P.L., Brooks, S.M. and Anderson, M.G., *Design and application of an automated non-circular slip surface search within a combined hydrology and stability model (CHASM)*, School of Geographical Sciences, University of Bristol.

Yang, W., Shuren., W.U., et al., Research on Formation Mechanism of the Debris Flow on Slope Induced by Rainfall, *Earth Science Frontiers*, 14, 2007.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αριανούτσου, Μ., *Δείκτες μεταπτυρικής φυσικής αναγέννησης στα Μεσογειακά οικοσυστήματα*, Έκδοση Τμήμα Βιολογίας Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004.

Βαλαβανίδης, Α., *Ερευνητική Μεθοδολογία και Εκτίμηση Οικολογικού Κινδύνου από Επικίνδυνες Χημικές Ουσίες*, Έκδοση Τμήμα Χημείας Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2007.

Βαρδουλάκης, Ι., *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*, Αθήνα, 2003

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, *Μελέτη Αποκατάστασης & Ανάπτυξης του Αγροτικού Τομέα - των δασών & της προστασίας του περιβάλλοντος στις πυρόπληκτες περιοχές*, Αθήνα, 2007.

Γιακουμάκης, Σ., *Όμβριες καμπύλες στην περιοχή της κεντρικής Πελοποννήσου (Σταθμός ΔΕΗ Μεγαλόπολης)*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Αδημοσίευτο, Αθήνα, 2004.

Δεβενέ, Σ., *Διερεύνηση του παράγοντα των βροχοπτώσεων ως αίτιο κατολισθήσεων*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004, (Διπλωματική εργασία).

Ερευνητική ομάδα "Α" ΕΜΠ για τις πυρόπληκτες περιοχές, *Εκτίμηση εδαφικής απώλειας των λεκανών απορροής του δήμου Ζαχάρως νομού Ηλείας*, Αθήνα, 2008

Κιούσης, Γ., *Διερεύνηση του φαινομένου των κατολισθήσεων στην περιοχή της Κερασιάς, νομού Καρδίτσας, με χρήση λογισμικού, τύπου GIS.*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2007 (Διπλωματική εργασία)

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος, Θ., *Τεχνική Υδρολογία* (Έκδοση 3), ΕΜΠ, Αθήνα, 1999

Κουμαντάκης Ι., *Κεφάλαια Υδρογεωλογίας*, ΕΜΠ, 1984.

Κωστοπούλου, Σ., *Η Επίδραση της Βιολογικής Γεωργίας στη Δομή και στις Φυσικές Ιδιότητες του Εδάφους*, Τμήμα Γεωπονίας, Αθήνα.

Λέκκας, Ε., *Φυσικές και τεχνολογικές καταστροφές- Β' έκδοση*, Αθήνα, 2000.

Μακρής, Α., Μαντούδη, Α., *Πυρκαγιές και εδαφική διάβρωση. Η περίπτωση της Πεντέλης*, ΕΜΠ, Ιούλιος, 1997, (διπλωματική εργασία).

Ναλμπάντης, Ι., *Ζήτηση νερού για άρδευση, Τυπολόγιο μαθήματος «Προστασία και Διαχείριση Υδατικών Πόρων»*, ΕΜΠ, 2007

Ναλμπάντης, Ι., *Κατάρτιση συνθετικών υετογραμμάτων σχεδιασμού στην περιοχή της Ζαχάρας Δ. Πελοποννήσου*, Εσωτερική έκθεση, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα, 2008 .

Νάνου- Γιάνναρου Α., *Εισαγωγή στα υπόγεια νερά*, ΕΜΠ, 2006.

Οικονόμου, Α., και Μπαλούτσος, Γ., *Ο κίνδυνος πλημμύρας σε λεκάνες απορροής μετά από πυρκαγιά. Ανάλυση του προβλήματος και άμεσα μέτρα μείωσης των επιπτώσεων*, Αθήνα, 2001.

Παπασπηλιωπούλου, Φ., *Διερεύνηση της επιρροής του υετού και του σεισμού στην ευστάθεια των πρανών- Εφαρμογή στο Ν. Αχαΐας*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2004, (διπλωματική εργασία).

Ραδόγλου, Κ., *Αποτελεσματικότητα της φυσικής αναγέννησης στην αποκατάσταση οικοσυστημάτων Μεσογειακών Πεύκων μετά από πυρκαγιά*, Κ. ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, 2000.

Ροζος, Δ., *Τεχνική γεωλογία II*, Αθήνα, 2007.

Σακελλάριου, Μ., *Σημειώσεις εδαφομηχανικής – Θεμελιώσεων*, Αθήνα, 2003.

Σακελλάριου, Μ., *Γεωτεχνική Μηχανική*, Αθήνα, 2003.

Σουπιός, Π., *Σημειώσεις εργαστηρίου Υδρογεωλογίας - Τμήμα φυσικών πόρων και περιβάλλοντος*, Χανιά 2003-2004.

Τσακίρης, Γ. (υπεύθυνος έκδοσης), *Υδατικοί πόροι*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 1995.

Δικτυακοί τόποι

Dennis N., *The Effects of Fire on Watersheds: A Summary*, *Forest Service Gen. Technical Report*, 1989. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr109/psw_gtr109_92.pdf

Ferentinou, M.D., and Sakellariou, M.G., *Computational intelligence tools for the prediction of slope performance*, School of Rural and Surveying Engineering, Laboratory of Structural Mechanics, National Technical University of Athens, Athens, 2007. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.sciencedirect.com

Gern, F.H., *Liquid silicon infiltration: description of infiltration dynamics and silicon carbide formation*, Virginia Polytechnic Institute, Department of Engineering Science and Mechanics, College of Engineering, 1979. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.sciencedirect.com

Kirkby, M., Jones, R., et al., *Pan-european soil erosion risk assessment- the pesera map version 2003*. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: http://eussoils.jrc.it/ESDB_Archive/eussoils_docs/esb_rr/n16_ThePeseraMapBkLet52.pdf

Kirkby M.J., Jones R, et al, *Pan-european soil erosion, risk assessment: the pesera map*, version 1 october 2003, Special Publication Ispra, 2004. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: eussoils.jrc.ec.europa.eu/esbn/Plenary_esbn_2005/3rdDay/ESBpublications.ppt

Zhi-Liang, W., Wangb, J.G., Shenc, R.F., *The application of a meshless method to consolidation analysis of saturated soils with anisotropic damage*, Computers & Geosciences, 34, 849–859, 2007. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.sciencedirect.com

“*Seepage principles*”, 4, 1986. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1901/c-4.pdf,

Turner, B. L., Kaspersonb, R. E., et al., *A framework for vulnerability analysis in sustainability science*, 2003. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.pnas.org/ycgi/doi/10.1073/pnas.1231335100

Vivoni, E.R., *Hydrological Theory and Field Methods*, Erth 440, 2007. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση: www.ees.nmt.edu/vivoni/hydro/labs/erth440-lab2.pdf

Wiley, J., *Seepage Principles*, Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.usace.army.mil/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1901/c-4.pdf

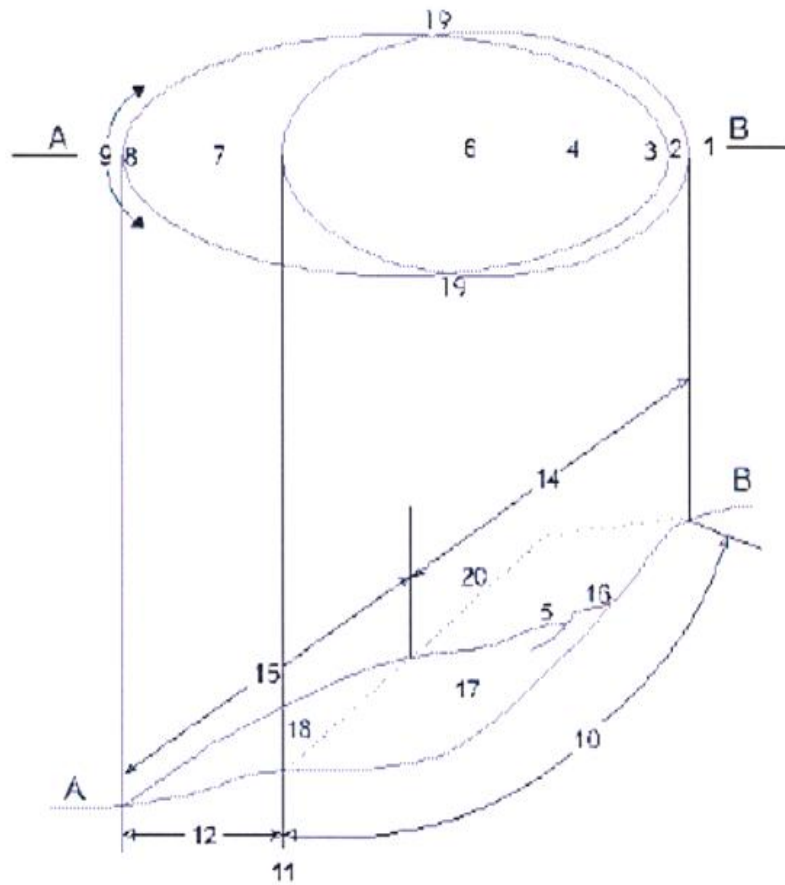
World Wide Fund for Nature (WWF), Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.wwf.gr

Τσακίρης, Γ., *Κέντρο εκτίμησης φυσικών κινδύνων και προληπτικού σχεδιασμού*, ΕΜΠ. Διαθέσιμο στο Διαδίκτυο στη διεύθυνση:

www.ntua.gr/temp_announce/170/parousiaseis170/files170/SYNEDRIA%20I/1101_presentation.pdf

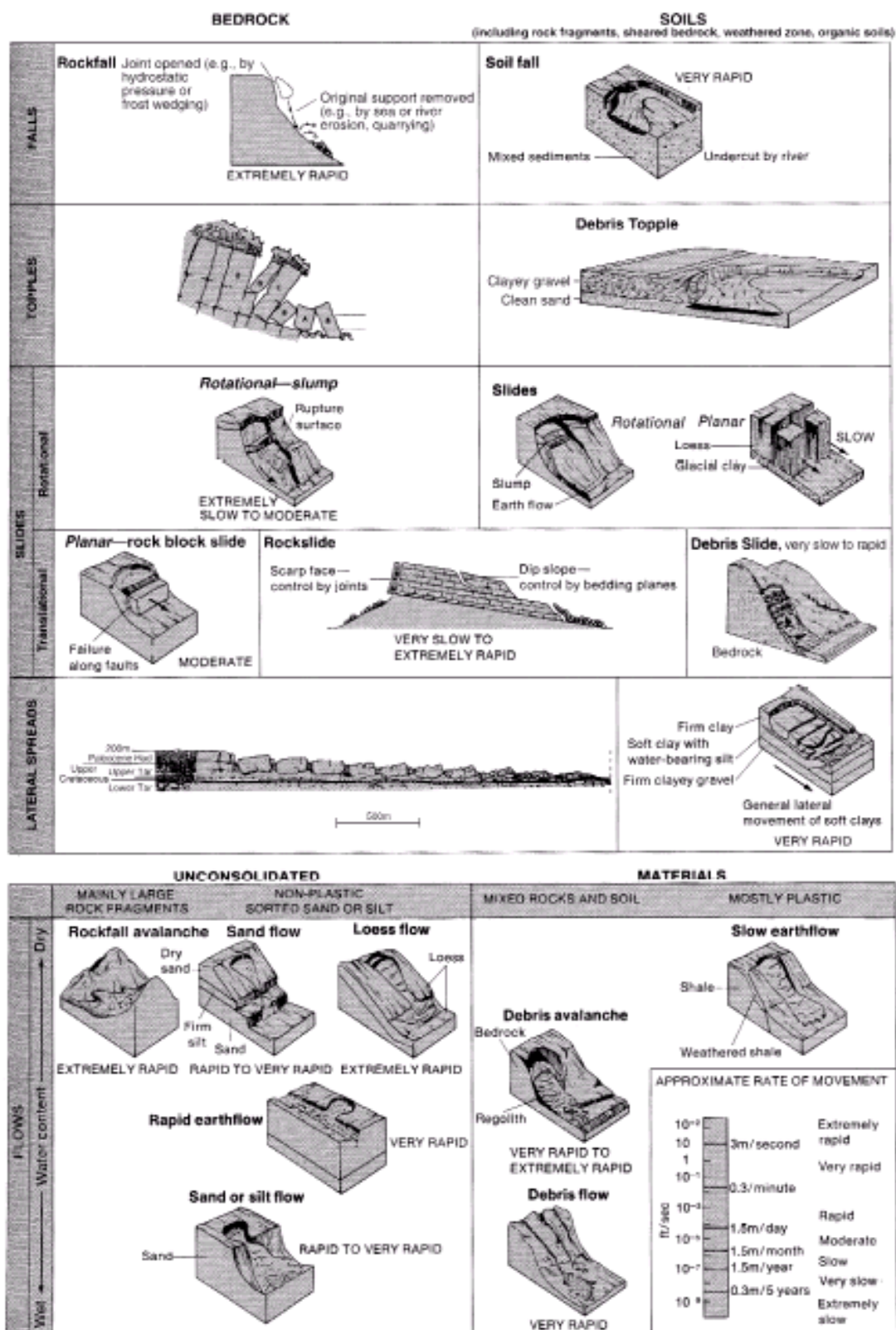
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχήμα 2: Κάτοψη περιστροφικής ολίσθησης. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το ίχνος της επιφάνειας αστοχίας στην αρχική επιφάνεια του εδάφους. Τα μέρη της κατολίσθησης παρουσιάζονται με το αντίστοιχο νούμερο στον πίνακα 2.1
(IAEG Commission of Landslides, 1990)

Πίνακας 22: Ορισμός των χαρακτηριστικών μιας κατολίσθησης
(IAEG Commission of Landslides, 1990)

ΑΡΙΘΜΟΣ	ΟΝΟΜΑ	ΟΡΙΣΜΟΣ
1	Στέψη	Σχεδόν αμετακίνητο υλικό, δίπλα στα ψηλότερα σημεία της κύριας κλιτύος.
2	Κύρια Τομή	Απότομη επιφάνεια στο αμετακίνητο έδαφος, στο επάνω μέρος της κατολίσθησης, η οποία προκαλείται από την κίνηση του μετατιθέμενου υλικού. Είναι το ορατό μέρος της επιφάνειας αστοχίας (10).
3	Κορυφή	Το ψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής (2).
4	Κεφαλή	Το ανώτερο μέρος της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής (2).
5	Δευτερεύουσα Τομή	Απότομη επιφάνεια στο μετατιθέμενο υλικό που παράγεται από τις διαφορικές κινήσεις στο εσωτερικό του.
6	Κύριο Σώμα	Μέρος του μετατιθέμενου υλικού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, μεταξύ της κύριας τομής (2) και του ποδός της επιφάνειας θραύσης (11).
7	Πόδι	Μέρος της κατολίσθησης, το οποίο κινήθηκε μπροστά από το δάκτυλο της επιφάνειας αστοχίας (11) και βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
8	Αιχμή	Σημείο στο πόδι (9), το πιο απομακρυσμένο από την κορυφή (3) της κατολίσθησης.
9	Δάκτυλο	Το κατώτερο, πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή (2), ανάγλυφο περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού της κατολίσθησης.
10	Επιφάνεια Θραύσης	Επιφάνεια, η οποία σχηματίζει (ή έχει σχηματιστεί από) το κατώτερο όριο του μετατιθέμενου υλικού, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
11	Δάκτυλο της Επιφάνειας Θραύσης	Η τομή μεταξύ του χαμηλότερου τμήματος της επιφάνειας θραύσης (10) και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20).
12	Επιφάνεια Αποκόλλησης	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20) που καλύπτεται από το πόδι (7) της κατολίσθησης.
13	Μάζα Κατολίσθησης	Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στο πρηνές λόγω της κίνησης. Σχηματίζει τόσο την μάζα βύθισης (17) όσο και την μάζα διόγκωσης (18).
14	Ζώνη Κάθισης	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
15	Ζώνη Διόγκωσης	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
16	Κάθιση	Όγκος που περιορίζεται από την κύρια τομή (2), την μάζα βύθισης (17) και την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
17	Μάζα Βύθισης	Όγκος του μετατοπισμένου υλικού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας (10), αλλά κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
18	Διόγκωση	Όγκος του μετατοπισμένου υλικού (13), που βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
19	Πτερύγια	Αμετακίνητο υλικό, δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης (20). Για την περιγραφή των πτερυγίων προτιμώνται οι ενδείξεις της πυξίδας, διαφορετικά περιγράφονται ως δεξί ή αριστερό έχοντας ως στάση τη στέψη (1).
20	Αρχική Επιφάνεια Εδάφους	Επιφάνεια της πλαγιάς που υπήρχε, πριν αρχίσει η κατολίσθηση.



Μέθοδος Penman (Ναλμπάντης, 2007)

Για τη μέθοδο Penman (1948) υπολογίζονται τα παρακάτω:

- ✦ Πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa)

$$e_* = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{237.3 + T_a}\right)$$

όπου T_a = θερμοκρασία αέρα σε °C

Πίεση υδρατμών (kPa)

$$e = \frac{U}{100} e_* \quad \text{όπου } U = \text{σχετική υγρασία αέρα } \%$$

Έλλειμα κορεσμού υδρατμών (kPa)

$$D = e_* - e$$

- ✦ Κλίση καμπύλης κορεσμού (kPa/K)

$$\Delta = \frac{4098e_*}{(237.3 + T_a)^2}$$

- ✦ Ηλιακή απόκλιση (rad)

$$\delta = -0.409 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} + 0.16\right), \text{ όπου } J \text{ ο αριθμός ημέρας}$$

- ✦ Γωνία ώρας δύσης (rad)

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta), \text{ όπου } \phi = \text{γεωγραφικό πλάτος σε rad}$$

- ✦ Αστρονομική διάρκεια ημέρας (h) (ακριβής εκτίμηση)

$$N = \frac{24\omega_s}{\pi}$$

- ✦ Εκκεντρότητα (rad)

$$d_r = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi J}{365} - 0.05\right)$$

- ✦ Εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m²d) (ακριβής εκτίμηση)

$$S_o = \left(\frac{86.4}{\pi}\right) \cdot I_s \cdot d_r \cdot (\omega_s \cdot \sin \phi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \phi \cos \delta), \quad \text{όπου } \text{ηλιακή}$$

σταθερά $I_s = 1.367 \text{ kw/m}^2$

- ⊕ Συντελεστής απορρόφησης ατμόσφαιρας

$$f_s = 0.22 + 0.52 \cdot \frac{n}{N}, \text{ όπου } n = \text{ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας, } N = \text{ώρες}$$

δυνατής ηλιοφάνειας (αστρονομική διάρκεια μέρας* αριθμός ημερών)

- ⊕ Καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (MJ/m²d)

$$S_n = S_o \cdot f_s \cdot (1 - a), \text{ όπου } a = 0.08 \text{ λευκαύγεια}$$

- ⊕ Ικανότητα καθαρής εκπομπής $e_n = 0.34 - 0.14\sqrt{e}$

- ⊕ Συντελεστής επίδρασης νέφωσης $f_L = 0.10 + 0.90\left(\frac{n}{N}\right)$

- ⊕ Καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων (MJ/m²d)

$$L_n = \varepsilon_n f_L \sigma (273T_a)^4, \text{ όπου } \sigma \text{ σταθερά Stefan-Boltzman} = 4.910^{-9} \text{ MJ/m}^2 \text{dK}^4$$

- ⊕ Καθαρή ακτινοβολία (MJ/m²d) $R_n = S_n - L_n$

- ⊕ Συνάρτηση ανέμου (kg / kPa m² d)

$$F(u) = \frac{436}{(273 + T_a)} u, \text{ όπου } u \text{ μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου m/s}$$

- ⊕ Εξίσωση Penman για εξάτμιση από ελεύθερη επιφάνεια νερού (mm/d)

$$E' = \frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma \lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D, \text{ όπου } \gamma = 0.067 \text{ kPa/K ψυχομετρικός}$$

συντελεστής, $\lambda = 2.45 \text{ MJ/kg}$ λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

$$\text{Εξάτμιση από ελεύθερη επιφάνεια νερού σε mm } E = E' \cdot N_d$$

Πίνακας 23: Υπολογισμός εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού- Μέθοδος Penman (1)

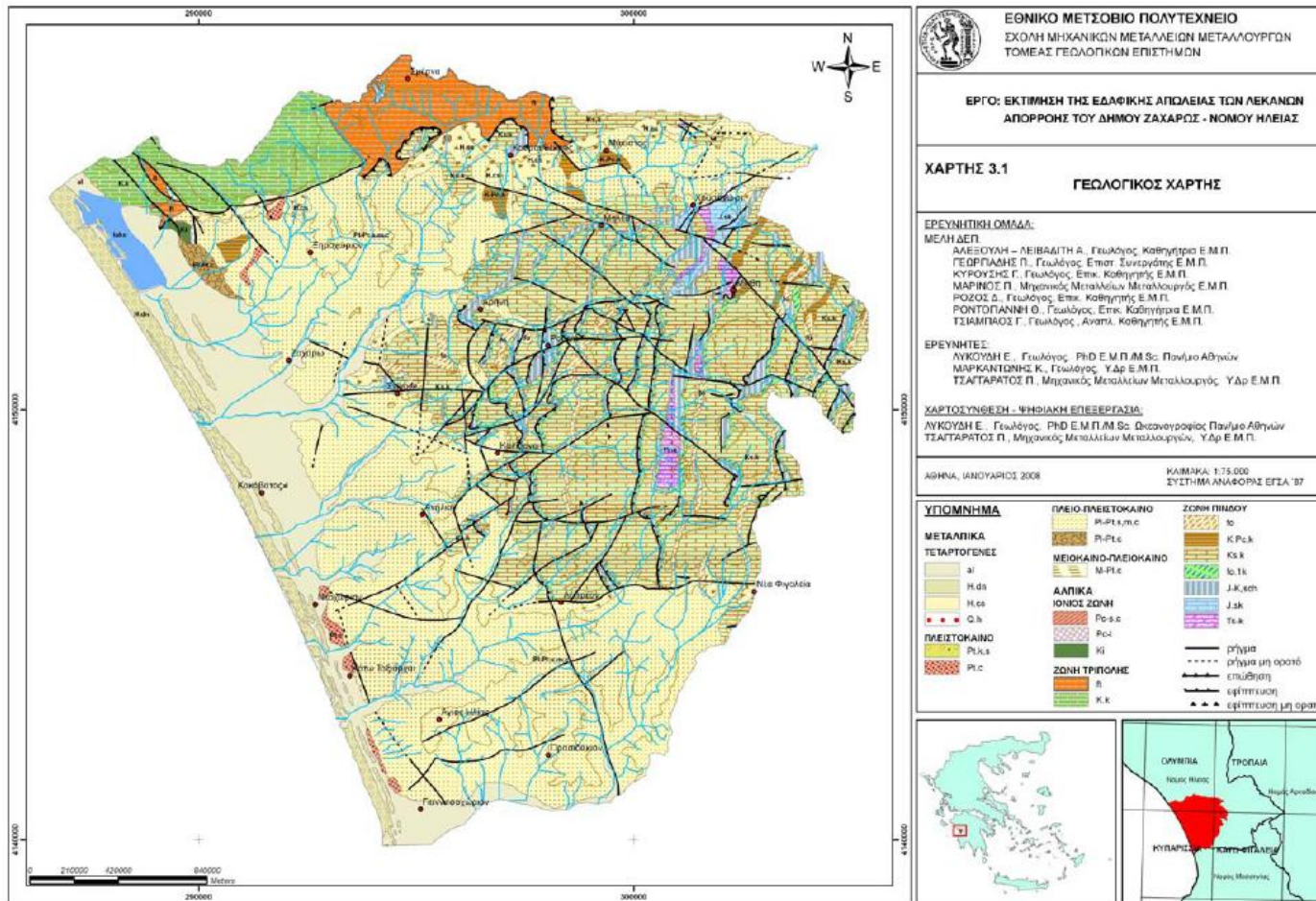
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ

ΥΔΡ. ΕΤΟΣ	T_a	e^*	e	Δ	D	γ	λ	J	δ	ω_s	N	f_s	S_n	ϵ_n	f_L	L_n	R_n	$F(u)$	E'	$E(mm)$
1975 - 1976	14.0	1.599	1.255	0.104	0.344	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.491	8.175	0.183	0.569	3.466	4.709	3.646	1.660	49.794
1976 - 1977	13.8	1.578	1.226	0.103	0.352	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.572	9.515	0.185	0.709	4.345	5.170	3.649	1.784	53.521
1977 - 1978	16.1	1.831	1.393	0.117	0.437	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.433	7.204	0.175	0.468	2.801	4.403	4.223	1.815	54.464
1978 - 1979	12.6	1.460	0.992	0.096	0.467	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.512	8.530	0.201	0.606	3.963	4.567	2.595	1.596	47.875
1979 - 1980	13.8	1.578	1.247	0.103	0.331	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.497	8.276	0.184	0.580	3.530	4.746	1.672	1.391	41.726
1980 - 1981	15.5	1.762	1.348	0.113	0.414	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.493	8.212	0.177	0.573	3.453	4.760	1.965	1.522	45.667
1981 - 1982	11.3	1.340	1.031	0.089	0.308	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.379	6.303	0.198	0.375	2.372	3.931	2.607	1.260	37.798
1982 - 1983	12.5	1.450	1.085	0.095	0.365	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.502	8.363	0.194	0.589	3.722	4.640	2.291	1.457	43.725
1983 - 1984	14.2	1.620	1.278	0.105	0.342	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.464	7.721	0.182	0.522	3.163	4.559	1.974	1.399	41.956
1984 - 1985	14.5	1.652	1.207	0.107	0.444	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.603	10.044	0.186	0.764	4.759	5.285	1.820	1.637	49.117
1985 - 1986	15.7	1.784	1.404	0.114	0.380	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.450	7.487	0.174	0.498	2.950	4.538	1.963	1.443	43.298
1986 - 1987	12.9	1.488	0.991	0.097	0.497	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.464	7.718	0.201	0.522	3.427	4.292	1.983	1.440	43.187
1987 - 1988	14.3	1.631	1.247	0.106	0.383	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.505	8.406	0.184	0.593	3.637	4.769	1.973	1.484	44.527
1988 - 1989	11.9	1.394	1.050	0.092	0.344	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.464	7.715	0.197	0.521	3.309	4.406	1.989	1.329	39.876
1989 - 1990	13.6	1.558	1.197	0.101	0.361	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.515	8.565	0.187	0.610	3.767	4.798	1.978	1.464	43.912
1990 - 1991	15.8	1.796	1.368	0.115	0.427	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.516	8.588	0.176	0.612	3.677	4.911	1.963	1.575	47.249

ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ

ΥΔΡ. ΕΤΟΣ	T_a	e*	e	Δ	D	γ	λ	J	δ	ω_s	N	f_s	S_n	ε_n	f_L	L_n	R_n	F(u)	E'	E(mm)	
1991 - 1992	14.1	1.610	1.183	0.104	0.427	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.532	8.862	0.188	0.641	4.004	4.858	1.974	1.537	46.106	
1992 - 1993	14.3	1.631	1.221	0.106	0.409	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.552	9.192	0.185	0.675	4.175	5.017	1.973	1.566	46.983	
1993 - 1994	14.4	1.641	1.196	0.106	0.445	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.445	7.415	0.187	0.490	3.062	4.353	1.972	1.429	42.856	
1994 - 1995	13.7	1.568	1.131	0.102	0.438	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.508	8.461	0.191	0.599	3.790	4.671	1.977	1.494	44.809	
1995 - 1996	12.1	1.412	1.062	0.093	0.350	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.430	7.164	0.196	0.464	2.940	4.223	1.988	1.294	38.809	
1996 - 1997	14.1	1.610	1.239	0.104	0.370	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.454	7.565	0.184	0.506	3.101	4.464	1.974	1.395	41.864	
1997 - 1998	15.2	1.728	1.303	0.111	0.425	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.414	6.886	0.180	0.435	2.651	4.235	1.967	1.393	41.783	
1998 - 1999	14.2	1.620	1.238	0.105	0.382	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.515	8.576	0.184	0.611	3.753	4.824	1.974	1.496	44.871	
1999 - 2000	14.9	1.695	1.246	0.109	0.449	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.468	7.794	0.184	0.530	3.276	4.518	1.969	1.479	44.373	
2000 - 2001	15.8	1.796	1.376	0.115	0.420	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.475	7.900	0.176	0.541	3.240	4.660	1.963	1.505	45.158	
Μέσος όρος																					44.819

Πίνακας 24:Υπολογισμός εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού- Μέθοδος Penman (2)



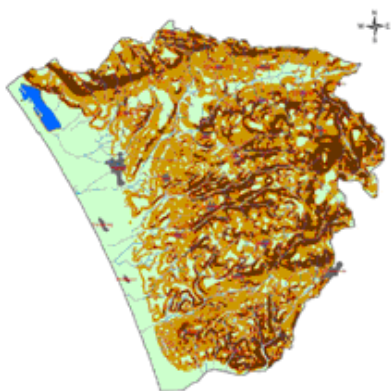
Χάρτης 2: Γεωλογικός χάρτης του Δήμου Ζαχάρως (Ερευνητική ομάδα 'Α' ΕΜΠ)



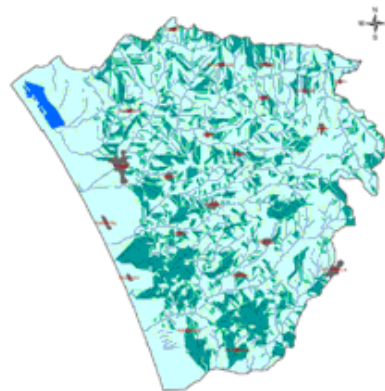
Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών
επιδεικτικών στη διάβρωση και σε αστοχίες, L



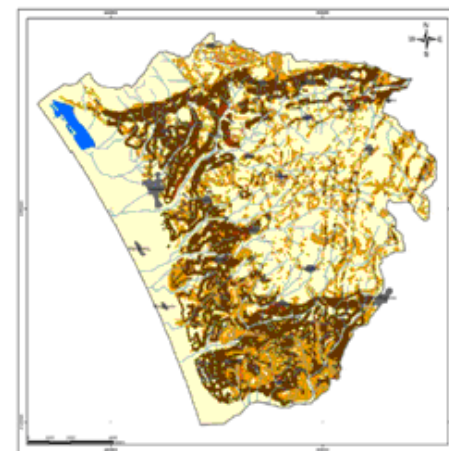
Χάρτης χρήσεων γης, V



Χάρτης μορφολογικών κλίσεων, S

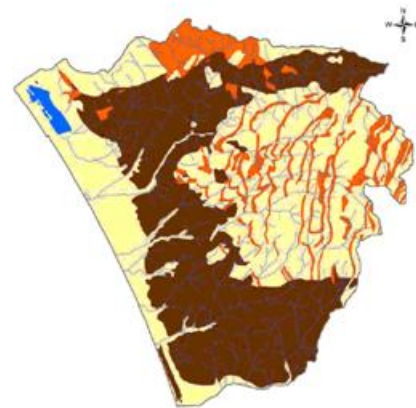


Χάρτης υδρογραφικών δικτύων

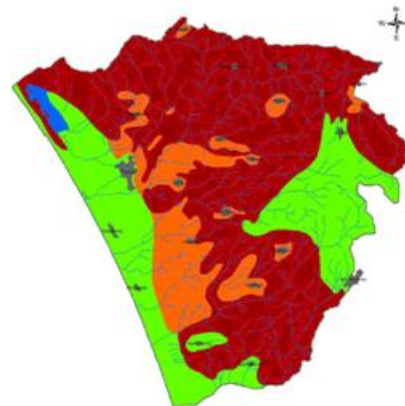


Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας ως προς την εδαφική
διάβρωση πριν τις πυρκαγιές

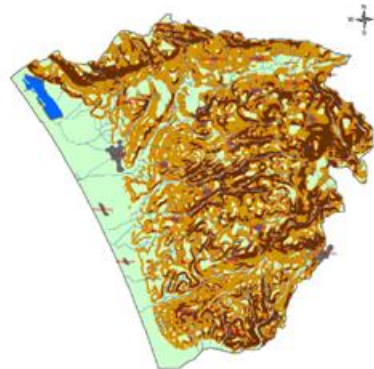
Εικόνα 9: Βαθμός τρωτότητας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας πριν από τις πυρκαγιές, όπως προέκυψε από την συναξιολόγηση τεσσάρων μεταβλητών (επεξεργασία χαρτών Ερευνητικής ομάδας 'Α' ΕΜΠ, 2008)



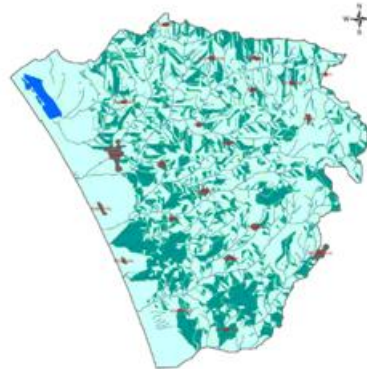
Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών
επιδεικτικών στη διάβρωση και σε αστοχίες, L



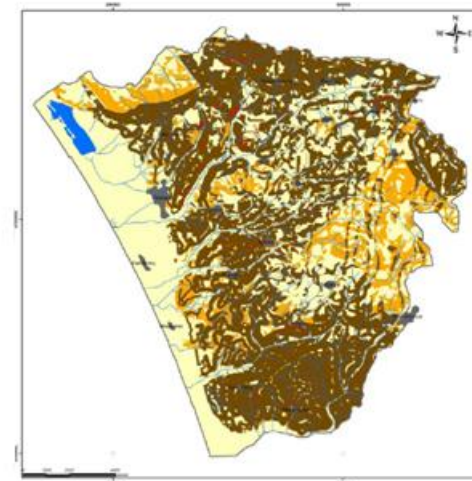
Χάρτης καμένων εκτάσεων με βάση το βαθμό
απενθράκωσης, B



Χάρτης μορφολογικών κλίσεων, S

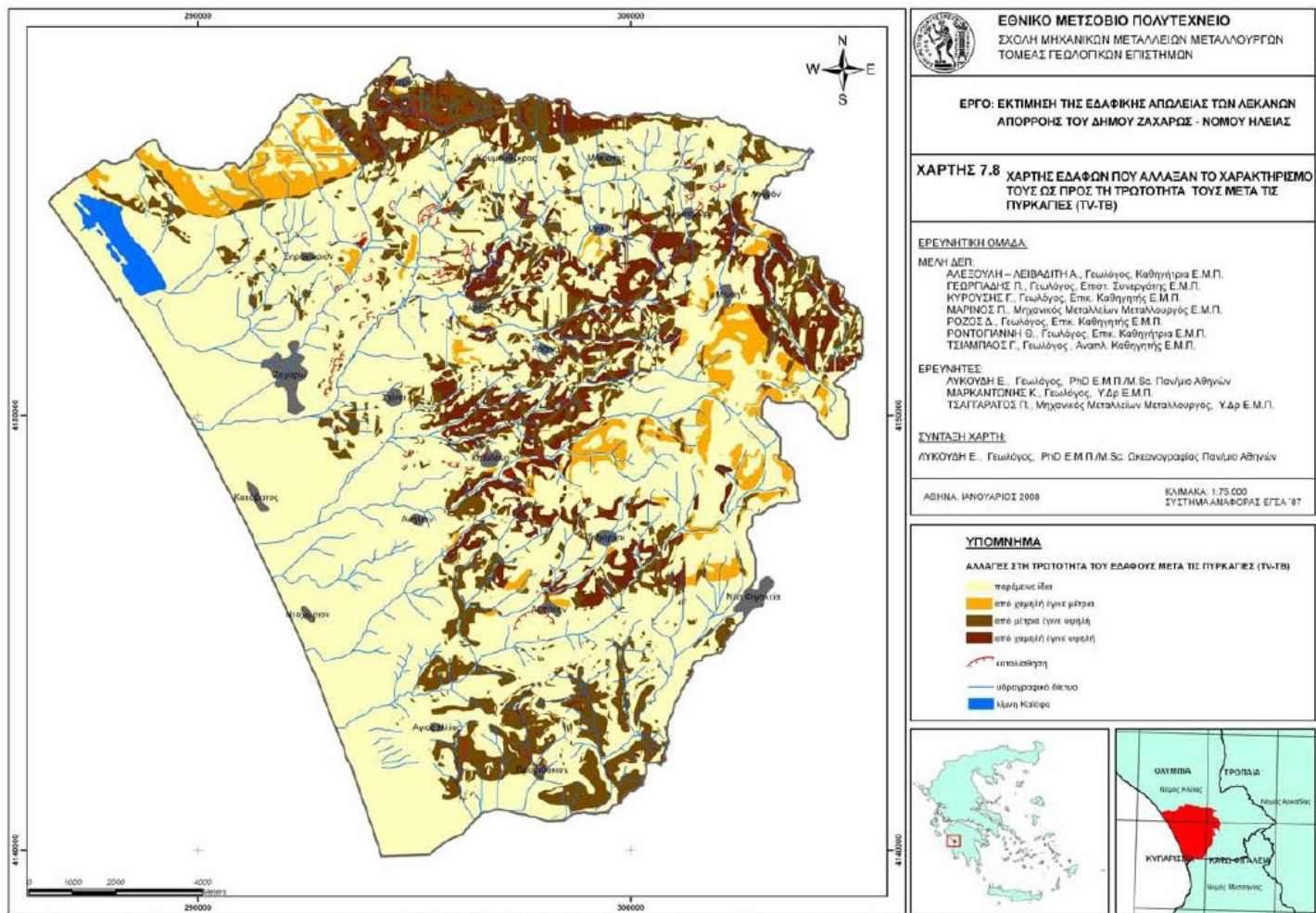


Χάρτης υδρογραφικών δικτύων



Χάρτης εδαφικής επικινδυνότητας ως προς την εδαφική
διάβρωση μετά πυρκαγιές

Εικόνα 10: Βαθμός τρωτότητας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής έρευνας μετά από τις πυρκαγιές, όπως προέκυψε από την συναξιολόγηση τεσσάρων μεταβλητών (επεξεργασία χαρτών Ερευνητικής ομάδας 'Α' ΕΜΠ, 2008)



Χάρτης 3: Εκτάσεις που άλλαξαν το χαρακτηρισμό τους ως προς την τρωτότητα τους μετά τις πυρκαγιές (Ερευνητική ομάδα 'Α' ΕΜΠ, 2007)



Φωτογραφία 1: Η πυρκαγιά στη Ζαχάρω
(<http://www.skai.gr/photos/200808/m19-162700fotiakali2.jpg>)



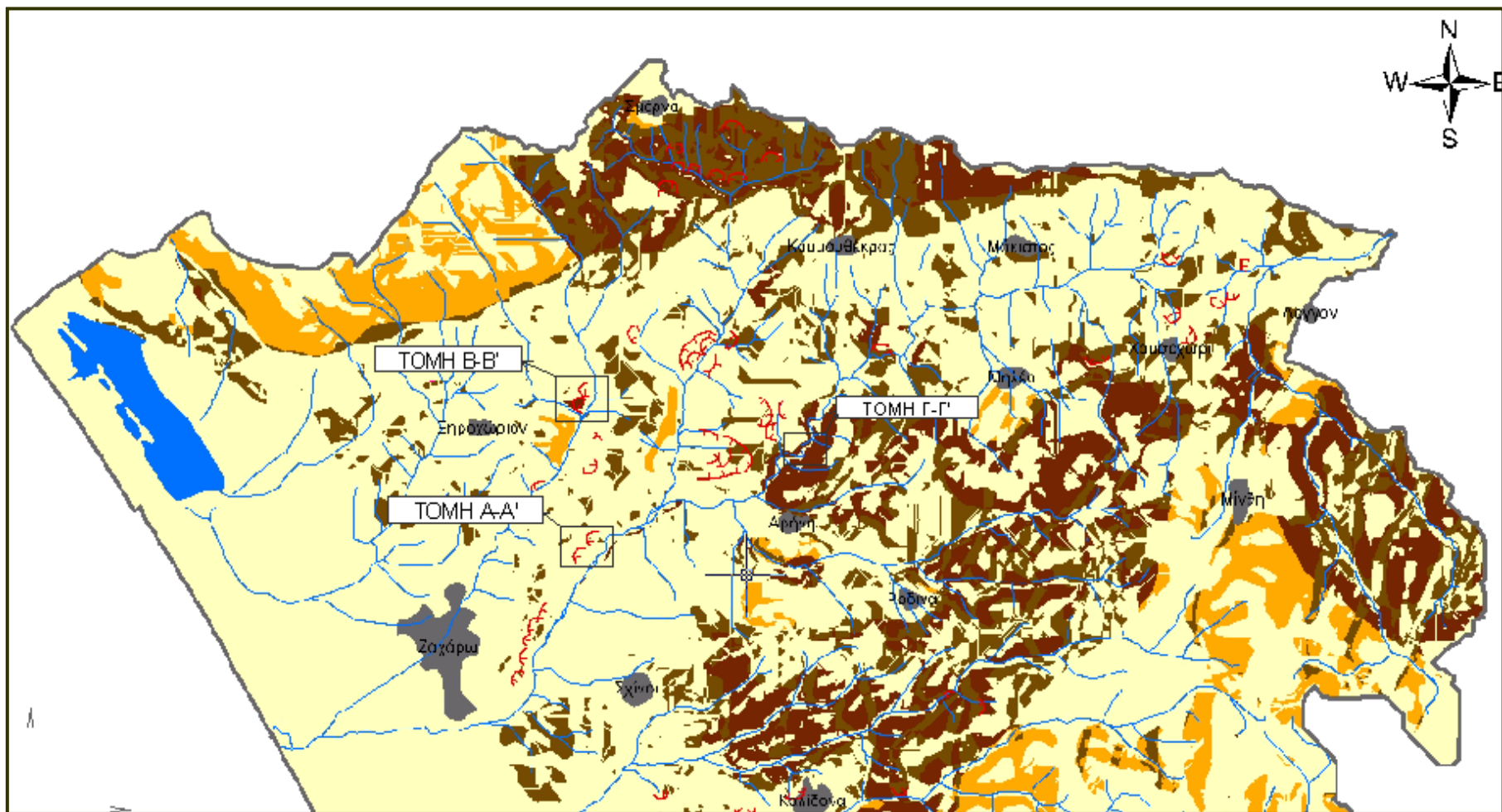
Φωτογραφία 2: Άποψη καμένης περιοχής
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)



Φωτογραφία 3: Καμένο πρυνές στη Ζαχάρω
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)



Φωτογραφία 4: Καμένο πρυνές- Κατολισθητικό φαινόμενο
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)



Χάρτης 4: Απόσπασμα χάρτη εκτάσεων που άλλαξαν το χαρακτηρισμό τους ως προς την τρωτότητα τους μετά τις πυρκαγιές- Τομές εδάφους (επεξεργασία χάρτη Ερευνητικής ομάδας 'Α' ΕΜΠ, 2008)