



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

---

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΥΕΤΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΩΝ**  
**ΠΡΑΝΩΝ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ.**

**ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΗΜΟ ΖΑΧΑΡΩΣ- ΡΕΜΑ ΑΚΙΔΑ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αντωνού Άννα**

**Επιβλέπων: Σακελλαρίου Μιχαήλ**

**Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ 2008**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με θέμα:

«Διερεύνηση της επίδρασης του Υετού στην ευστάθεια των πρανών μετά από πυρκαγιά.

Εφαρμογή στο Δήμο Ζαχάρως-

Ρέμα Ακίδα »

Η μελέτη αυτή, πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη, τις υποδείξεις και την υποστήριξη του Καθηγητή μας κ. Μ. Σακελλαρίου καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Χάρη στη δική του, θερμή συμπαράσταση και συνεχή καθοδήγηση σε κάθε στάδιο της επιστημονικής έρευνας, ολοκληρώθηκε επιτυχώς η παρούσα εργασία.

Σημαντική ήταν η βοήθεια που μας προσέφερε ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Ι. Ναλμπάντης παρέχοντας την επεξεργασία των υδρομετεωρολογικών δεδομένων. Εξ' ίσου σημαντική ήταν η συνδρομή του Καθηγητή Δ. Ρόζου για τις υποδείξεις που μας έκανε όπου αυτές ήταν αναγκαίες.

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, ιδιαίτερα χρήσιμες κρίνονται οι παρατηρήσεις των: Μαρία Φερεντίνου, Δρ. Γεωλόγο και Βασίλη Μάτζιαρη, Γεωλόγο και υποψήφιο Διδάκτορα της ΣΑΤΜ.

Η ενασχόληση μου με το συγκεκριμένο αντικείμενο προέκυψε έπειτα από την παρότρυνση της Αικατερίνη Καψαμπέλη, Μεταλλειολόγο- Τοπογράφο Μηχανικό, Msc και υποψήφια διδάκτορα της ΣΑΤΜ. Κομβικής σημασίας ήταν επίσης η βοήθεια που μου προσέφερε σε ποικίλες φάσεις της διεξαγωγής του θέματος.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, γιατί χάρη στη δική τους αγάπη και συμπαράσταση πραγματοποιείται ένας μεγάλος στόχος μου, καθώς και την καλή μου φίλη Μαρία, που περάσαμε μαζί όλη αυτή την 'εμπειρία' της διπλωματικής εργασίας κάνοντας τη διεξαγωγή της πολύ πιο παραγωγική και ευχάριστη.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XV</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>XVII</b>
<b>1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ .....	1
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ.....	2
1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΜΥΖΗΣΗΣ (SUCTION).....	4
1.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ (INFILTRATION).....	7
1.5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ (SEEPAGE) .....	11
1.6 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΣΙΑΣ 14	
1.7 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ (VULNERABILITY) ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	16
1.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΗ ΕΔΑΦΗ .....	18
<b>2. ΠΡΑΝΗ</b> .....	<b>25</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	25
2.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΑΝΩΝ .....	25
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ .....	29
<b>3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ</b> .....	<b>33</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	33
3.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	34
3.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	38
3.4 ΥΛΙΚΟ- ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	39
3.5 ΣΤΑΔΙΟ ΔΡΑΣΗΣ .....	40
3.6 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ .....	41
3.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΟΙ ΟΠΟΙΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ .....	42
3.8 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ .....	44
3.9 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΠΙΡΡΕΠΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ .....	45
3.10 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	46
3.11 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ.....	47
<b>4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>51</b>
4.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ .....	51
4.1.1 Κατηγορίες διάβρωσης.....	52
4.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των εδαφών.....	53
4.2 Η ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ .....	57
<b>5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....</b>	<b>63</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	63
5.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ Η ΕΥΕΡΓΕΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ .....	64
5.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ.....	70
5.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ .....	75
<b>6. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ .....</b>	<b>79</b>

6.1	ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ } CHASM v4.0 (COMBINED HYDROLOGICAL AND STABILITY MODEL).....	79
6.1.1	Υδρολογικό μοντέλο .....	80
6.1.2	Μοντέλο βλάστησης.....	82
6.1.3	Ανάλυση ευστάθειας.....	83
6.1.4	Μετατόπιση μάζας.....	85
6.1.5	Σεισμικότητα .....	86
6.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PHASE 2 V6.0.....	86
6.2.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	86
6.2.2	Το λογισμικό Phase 2 V6.0 .....	88
6.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	89
6.4	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ CHASM ΚΑΙ PHASE .....	90
<b>7.</b>	<b>Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΖΑΧΑΡΩ .....</b>	<b>91</b>
7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ .....	91
7.2	ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ .....	92
7.3	ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....	93
7.4	ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ .....	94
7.5	ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	95
7.5.1	Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.....	97
7.5.2	Θερμοκρασία αέρα.....	100
7.5.3	Σχετική υγρασία – Άνεμος.....	102
7.5.4	Ηλιοφάνεια.....	103
<b>8.</b>	<b>ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΕΓΚΑΡΣΙΕΣ ΤΟΜΕΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΖΑΧΑΡΩΣ .....</b>	<b>105</b>
<b>9.</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΜΗΣ Α-Α´- CHASM V4.0 .....</b>	<b>109</b>
9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	109
9.2	ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ } PHASE 2 v6.0 .....	110
9.2.1	Έλεγχος σε επιφανειακή ολίσθηση.....	116
9.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕ ΤΟ CHASM.....	117
9.4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ.....	121
9.4.1	Μελέτη 1 <sup>ov</sup> Σεναρίου.....	121
9.4.1.1	Καθορισμός παραμέτρων.....	121
9.4.1.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	128
9.4.1.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	134
9.4.2	Μελέτη 2 <sup>ov</sup> Σεναρίου.....	138
9.4.2.1	Καθορισμός παραμέτρων.....	138
9.4.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	139
9.4.2.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	141
9.4.3	Μελέτη 3 <sup>ov</sup> Σεναρίου.....	144
9.4.3.1	Καθορισμός παραμέτρων.....	144
9.4.3.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	146
9.4.3.3	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	147
9.5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ .....	150
9.5.1	Μελέτη 1 <sup>ov</sup> Σεναρίου.....	151
9.5.1.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	151
9.5.1.2	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	155
9.5.1.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά.....	157
9.5.2	Μελέτη 2 <sup>ov</sup> Σεναρίου.....	158

9.5.2.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	158
9.5.2.2	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	160
9.5.2.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά.....	162
9.5.3	<i>Μελέτη 3<sup>ου</sup> Σεναρίου.....</i>	<i>163</i>
9.5.3.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	163
9.5.3.2	Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	165
9.5.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά.....	168
<b>10.</b>	<b>ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΜΗΣ Γ-Γ' - PHASE 2 V6.0.....</b>	<b>171</b>
<b>11.</b>	<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ .....</b>	<b>181</b>
<b>12.</b>	<b>ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>187</b>

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Μηχανισμός μετακίνησης κόκκων .....	1
Εικόνα 1.2: Μετάδοση των δυνάμεων μεταξύ των κόκκων του εδάφους.....	2
Εικόνα 1.3: Διάγραμμα φάσεων .....	3
Εικόνα 1.4: Το φαινόμενο της κατείσδυσης (Μιγγίρος, 2006) .....	8
Εικόνα 1.5: Φαινόμενο Laplace (John Wiley & Sons).....	13
Εικόνα 1.6: Διανομή υγρασίας .....	23
Εικόνα 2.1: Σύνθετες μορφές αστοχίας .....	28
Εικόνα 2.2: Σφηνοειδή μορφή ολίσθησης .....	29
Εικόνα 2.3: Μέθοδος λωρίδων .....	29
Εικόνα 3.1: Ιδεατή σύνθετη ολίσθηση– ροή χόματος (Varnes, 1978).....	36
Εικόνα 3.2: Κάτοψη μιας τυπικής κατολίσθησης- Οι αριθμοί αναφέρονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί (IAEG Commission of Landslides, 1990).....	36
Εικόνα 3.3: Μετάθεση κατολίσθησης σε διαφορετικές φάσεις της δράσης.....	41
Εικόνα 3.4: Καταστροφή οδικού δικτύου από κατολίσθηση στη Νεμέα Κορινθίας (Eurokinissi, 2003).....	46
Εικόνα 3.5: Συρματοκιβώτια, Τοίχος αντιστήριξης και σύρματα, Συρμάτινος φράχτης, Τεχνικό σκέπαστρο .....	49
Εικόνα 4.1: Διαδικασία της διάβρωσης (Μιμίκου, 1994) .....	51
Εικόνα 4.2: Απλοποιημένη αναπαράσταση υδρολογικού συστήματος πρανούς .....	60
Εικόνα 5.1: Διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας από ισχυρή βροχή.....	74
Εικόνα 5.2: Η ευεργετική παρουσία του δάσους (WWF Ελλάς, 1995) .....	78
Εικόνα 6.1: Γεωμετρική παρουσίαση του πρανούς στο Chasm 4 .....	81
Εικόνα 6.2:Εξισώσεις που διέπουν το υδρολογικό μοντέλο .....	82
Εικόνα 6.3:Ο ρόλος της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας.....	83
Εικόνα 6.4: Μέθοδος Jambu’s .....	85
Εικόνα 9.1: Διαμόρφωση ορίων μοντέλου .....	110



Εικόνα 9.2: Ανάλυση τάσεων .....	111
Εικόνα 9.3: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους.....	112
Εικόνα 9.4: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων.....	113
Εικόνα 9.5: Παράθυρο υπολογισμού του προγράμματος (Compute).....	113
Εικόνα 9.6: Interpret-(ερμηνεία), μέγιστης διατμητικής τάσης- εντοπισμός κρίσιμης περιοχής .....	114
Εικόνα 9.7: Interpret (ερμηνεία)-ολική διατμητική αντοχή .....	115
Εικόνα 9.8: Ευστάθεια απείρου πρανούς- στρωματοειδής ολισθήσεις .....	116
Εικόνα 9.9: Παράθυρο διαλόγου CHASM 4 .....	117
Εικόνα 9.10: Εισαγωγή δεδομένων για τα κελιά .....	118
Εικόνα 9.11: Διερεύνηση επιφάνειας ολίσθησης κατά Bishop .....	119
Εικόνα 9.12: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής.....	123
Εικόνα 9.13: Δεδομένα βροχόπτωσης .....	123
Εικόνα 9.14: Παράμετροι εδάφους.....	125
Εικόνα 9.15: Προσδιορισμός της βλάστησης.....	126
Εικόνα 9.16: Αρχικές συνθήκες- <i>Περίπτωση 1</i> .....	127
Εικόνα 9.17: Αρχικές συνθήκες- <i>Περίπτωση 2</i> .....	127
Εικόνα 9.18: Οριακές συνθήκες .....	128
Εικόνα 9.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	128
Εικόνα 9.20: Κύκλος ολίσθησης κατά την 1 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης .....	129
Εικόνα 9.21: Κύκλος ολίσθησης κατά τη 12 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης.....	130
Εικόνα 9.22: Υδρολογία κελιών κατά την 1 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης.....	131
Εικόνα 9.23: Υδρολογία κελιών κατά τη 12 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης.....	132
Εικόνα 9.24: Γεωμετρία της αστοχίας σε εγκάρσια τομή την 1 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης... 133	
Εικόνα 9.25: Γεωμετρία της αστοχίας σε εγκάρσια τομή τη 12 <sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης.. 133	
Εικόνα 9.26: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	134
Εικόνα 9.27: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής.....	138
Εικόνα 9.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	140
Εικόνα 9.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	141
Εικόνα 9.30: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής.....	145
Εικόνα 9.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	146

Εικόνα 9.32: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	147
Εικόνα 9.33: Μοντέλο βλάστησης.....	151
Εικόνα 9.34: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	151
Εικόνα 9.35: Κύκλος ολίσθησης κατά την 1 <sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης.....	152
Εικόνα 9.36: Κύκλος ολίσθησης κατά τη 12 <sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης.....	153
Εικόνα 9.37: Υδρολογία πρανούς κατά την 1 <sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης .....	153
Εικόνα 9.38: Υδρολογία πρανούς κατά την 12 <sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης .....	154
Εικόνα 9.39: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	154
Εικόνα 9.40: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	159
Εικόνα 9.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	159
Εικόνα 9.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 1</i> .....	164
Εικόνα 9.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης- <i>Περίπτωση 2</i> .....	165
Εικόνα 10.1:Ευστάθεια απείρου πρανούς- στρωματοειδής ολισθήσεις.....	171
Εικόνα 10.2: Διαμόρφωση ορίων μοντέλου .....	173
Εικόνα 10.3: Ανάλυση τάσεων .....	174
Εικόνα 10.4: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους .....	175
Εικόνα 10.5: Καθορισμός παραμέτρων βράχου .....	175
Εικόνα 10.6: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων.....	176
Εικόνα 10.7: Παράθυρο υπολογισμού του προγράμματος (Compute).....	176
Εικόνα 10.8: Interpret (ερμηνεία)- μέγιστη διατμητική τάση .....	177
Εικόνα 10.8: Μετάφραση (interpret)- Ανοιγμένη διατμητική παραμόρφωση .....	178

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Σχέση υγρασίας– ολικής μύζησης .....	5
Διάγραμμα 1.2: Γραφική παράσταση μύζησης – υγρασίας.....	7
Διάγραμμα 1.3: Διαδικασίες κατείδυσης (Gerscovich, 1994).....	9
Διάγραμμα 1.4: Σχέση μεταξύ πάχους ταινιών εδαφολογικού ύδατος και έντασης υγρασίας.....	10
Διάγραμμα 1.5: Από το έναυσμα στην καταστροφή (Τσακίρης, 1995) .....	17
Διάγραμμα 1.6: Κριτήριο αστοχίας κορεσμένου εδάφους .....	19
Διάγραμμα 1.7: Σχέση μύζησης – υδραυλικής αγωγιμότητας, για άμμο και άργιλο .....	21
Διάγραμμα 1.8: Κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb για μη κορεσμένα εδάφη .....	22
Διάγραμμα 2.1: Γραφική παράσταση συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του χρόνου... ..	26
Διάγραμμα 3.1: Διαφορετικά στάδια μετακίνησης πρηνών .....	35
Διάγραμμα 5.1: Υδρολογικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή στο στόμιο μιας δασωμένης λεκάνης απορροής.....	68
Διάγραμμα 5.2: Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένης λεκάνης απορροής .....	70
Διάγραμμα 5.3: Υδρολογική συμπεριφορά λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά.....	75
Διάγραμμα 7.1: Διακύμανση μέσω μηνιαίων τιμών υετού, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο μετεωρολογικό σταθμό Πύργου .....	96
Διάγραμμα 7.2: Υετόγραμματα σχεδιασμού με βάση τις όμβριες καμπύλες των βροχομετρικών σταθμών στο Πύργο, στη Μεγαλόπολη και στις Πόρτες για T = 50έτη και συνολική διάρκεια επεισοδίου 12 h.....	99
Διάγραμμα 7.3: Μέση μηνιαία ηλιοφάνεια σταθμού Πύργου (EMY, 1997-2001).....	103
Διάγραμμα 9.1: Σχέση συντελεστή ασφαλείας- ολικής μετακίνησης .....	115
Διάγραμμα 9.2: Θέση κέντρου του κρίσιμου κύκλου.....	120
Διάγραμμα 9.3: Σχέση μεταξύ μεγέθους μύζησης, ύψους μύζησης και μεγέθους πόρων .....	126
Διάγραμμα 9.4: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας-Περίπτωση 1 & 2 .....	135
Διάγραμμα 9.5: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	136
Διάγραμμα 9.6: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	137
Διάγραμμα 9.7: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1 & 2 .....	142

Διάγραμμα 9.8: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	143
Διάγραμμα 9.9: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	143
Διάγραμμα 9.10: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1& 2 .....	148
Διάγραμμα 9.11: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	149
Διάγραμμα 9.12: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	149
Διάγραμμα 9.13: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	156
Διάγραμμα 9.14: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	156
Διάγραμμα 9.15: Διακύμανση συντελεστών για 12 <sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1.....	157
Διάγραμμα 9.16: Διακύμανση συντελεστών για 24 <sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1.....	158
Διάγραμμα 9.17: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	161
Διάγραμμα 9.18: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	161
Διάγραμμα 9.19: Διακύμανση συντελεστή για 12 <sup>h</sup> προσομοίωση - Περίπτωση 1.....	162
Διάγραμμα 9.20: Διακύμανση συντελεστή για 24 <sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1.....	163
Διάγραμμα 9.21: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1.....	167
Διάγραμμα 9.22: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2.....	167
Διάγραμμα 9.23: Διακύμανση συντελεστή για 12 <sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1.....	168
Διάγραμμα 9.24: Διακύμανση συντελεστή για 24 <sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1.....	169
Διάγραμμα 10.1: Διάγραμμα σύγκλισης συντελεστή ασφαλείας.....	179

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Ορισμοί των χαρακτηριστικών κατολίσθησης.....	37
Πίνακας 3.2: Προτεινόμενη κλίμακα ταχύτητας κατολισθήσεων .....	42
Πίνακας 7.1: Μέση μηνιαία βροχόπτωση.....	97
Πίνακας 7.2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα .....	101
Πίνακας 7.3: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία αέρα.....	102
Πίνακας 9.1: Τυπικές τιμές συντελεστών υδροπερατότητας.....	124
Πίνακας 9.2: Τιμές εδαφικών παραμέτρων .....	125
Πίνακας 9.3: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	135
Πίνακας 9.4: Τιμές εδαφικών παραμέτρων .....	139
Πίνακας 9.5: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	141
Πίνακας 9.6: Τιμές εδαφικών παραμέτρων .....	145
Πίνακας 9.7: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	147
Πίνακας 9.8: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	155
Πίνακας 9.9: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	160
Πίνακας 9.10: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης.....	166

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 7.1: Χάρτης Νομού Ηλείας- Ζαχάρω .....	91
Χάρτης 8.1: Εντοπισμός περιοχής μελέτης στο χάρτη τρωτότητας της Ελλάδος (Κούκης, 2005). .....	105
Χάρτης 9.1: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (ΕΑΚ, 2003).....	122



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί απόρροια ελλιπούς ευστάθειας των πρανών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων. Τα τεχνικά έργα και οι κατολισθήσεις συνδέονται πολλές φορές με σχέση αιτίου- αποτελέσματος. Επομένως, για τους μελετητές και τους κατασκευαστές Μηχανικούς, οι κατολισθήσεις αποτελούν φαινόμενα εξαιρετικού ενδιαφέροντος, δεδομένου ότι οι συνέπειές τους μπορεί να είναι καταστρεπτικές για τα υπάρχοντα ή για τα υπό εκτέλεση τεχνικά έργα.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, ο σημαντικότερος παράγοντας εκδήλωσης κατολισθητικών φαινομένων είναι η βροχοπτώση. Το νερό της βροχής που ενεργεί επί του εδάφους οδηγεί σε απώλεια αυτού. Το δε μέγεθος της απώλειας αυτής εξαρτάται από την ικανότητα (δύναμη) του νερού να προκαλεί διάβρωση αφ' ενός και την ευαισθησία (τρωτότητα) του εδάφους να υφίσταται διάβρωση αφ' ετέρου.

Είναι γνωστό ότι η παρουσία της βλάστησης συντελεί στη μείωση της δράσης του νερού με αποτέλεσμα την προστασία της περιοχής από ενδεχόμενο πυρκαγιάς. Κατά συνέπεια, ο κίνδυνος πλημμύρας περιορίζεται σημαντικά, τόσο από μικρά όσο και από μεγάλα επεισόδια βροχής. Αμέσως μετά τη φωτιά και κατά τη διάρκεια των επόμενων μηνών, η διήθηση μειώνεται σημαντικά, αυξάνοντας τη διάβρωση της επιφάνειας του εδάφους, αφού οι σταγόνες της βροχής δεν αναχαιτίζονται πλέον από την προστατευτική ασπίδα της βλάστησης, προσκρούουν με δύναμη πάνω στο έδαφος, αποσπούν και παρασέρνουν πολύτιμο μέρος του.

Ως περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, επιλέχθηκε ο δήμος της Ζαχάρω, όπου διερευνάται η συμπεριφορά πρανών στην περιοχή του ρέματος Ακίδα, τα οποία έχουν παρουσιάσει αλλαγή στην τρωτότητά τους μετά την πυρκαγιά. Οι τομές στις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι παραμετρικές αναλύσεις είναι οι **A-A'** και **Γ-Γ'**.

Τα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των τομών είναι το συνδυαστικό μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών– CHASM 4 (Combined

Hydrological and Stability Model) και το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 V6.0 της εταιρίας Rocscience.

Όσον αφορά στην τομή A-A' που επιλέχθηκε, βρίσκεται κοντά στον οικισμό της Ζαχάρως σε έδαφος που επικρατούν Μεταλλικοί σχηματισμοί δηλαδή πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα. Η περιοχή αυτή πριν από την πυρκαγιά, είχε εκδηλώσει υψηλό βαθμό κατολισθήσεων. Δεδομένης λοιπόν και της δυσμενούς επίδρασης της πυρκαγιάς, αναμένεται βαθιά αστοχία του πρανούς υπό την έκθεσή του σε διάφορα ακραία και μη καιρικά φαινόμενα.

Στα πλαίσια των παραμετρικών αναλύσεων που διενεργήθηκαν για την τομή A-A' στο πρόγραμμα CHASM V4.0 εξετάστηκαν:

- η θέση του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς παίζει πολύ σημαντικό ρόλο σε θέματα ευστάθειας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία για τον επακριβή ορισμό του, γι' αυτό εξετάζονται τρεις πιθανές θέσεις στα 75%, 50% και 25% του ύψους του πρανούς (3 εναλλακτικά σενάρια).
- και 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 θα μπορούσε να εμφανιστεί έπειτα από περίοδο σχετικής ανομβρίας.

Από την άλλη, η τομή Γ-Γ' περιλαμβάνει εναλλαγή σκληρών και μαλακών σχηματισμών όπως είναι οι σχιστοκερατόλιθοι. Η εν λόγω περιοχή έγινε πιο επιρρεπής σε αστοχία μετά την πυρκαγιά, με αποτέλεσμα ο βαθμός τρωτότητάς της να χαρακτηρίζεται πλέον ως 'υψηλός'. Δεδομένης, λοιπόν, της γεωλογίας στη περιοχή, συμπεραίνουμε ότι οι ενδεχόμενες αστοχίες θα είναι επιφανειακές, εμφανιζόμενες στη ζώνη αποσάθρωσης και κερματισμού. Συνεπώς, σε αντίθεση με την προηγούμενη (βαθιά αστοχία), για την



επεξεργασία της συγκεκριμένης τομής, επιλέχθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 V6.0.

Τέλος, ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω μελέτη της περιοχής της Ζαχάρως, καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



## ABSTRACT

Landslide events rest in the stability of slopes between static and seismic charges. Technical works and landslides are associated many times with a cause and effect relationship. Therefore, landslides are of utmost importance for both researchers and construction engineers, considering the detrimental consequences they may have on finalized or under construction technical works.

According to national bibliography the main trigger of landslides is rainfall. Fluid induced from rainfall results in the infiltration and subsequent loss of soil. The degree of soil loss depends on the ability of the fluid to produce erosion and the respective sensitivity of the soil to bear erosion.

The only way to decrease the water's effect is the vegetation and its protection from the wildfires. As a result, the risk of a flood is erased or limited remarkably. Right after the fire and during the next months, the seepage is considerably reduced. At the same time the erosion rates are increased as the bare soil is exposed to the rain effect. The rain drops are not stopped by the protection of vegetation, instead they fall in a great force on the soil, remove and transfer debris.

Our area of study lies in the municipality of Zaharw, researching the reaction of the slopes that are located in dam Akida and have shown a shift in their vulnerability in the aftermath of a mass fire.

The software used in order to study the selected profiles is the Combined Hydrological and Stability Model- CHASM and the Phase2 v6.0 which is a product of Rocscience.

The first profile A-A', is near the municipality of Zaharw and consists of Pleio-pleistocene sediments. Before fire, many landslides had occurred in this region. After the wildfire the vulnerability has remained the same. In this case, we expect that a deep landslide will take place if extreme weather conditions occur. the program which is used here is CHASM 4.

In order to decide which parameters of soil will be used for the first slope A-A' in CHASM, we examined:

- the place of water table, as it plays an important role on stability issues. But, in this case, there is not any available information about the water table. As a result, we suppose that the water table's surface follows the direction of the slope and its height is then studied in three potential locations, at the 75%, 50% and 25% of the slope's height (3 scenarios).
- as well as the effect of the initial conditions- the pore pressure and the suction limit- is examined. Specifically, two cases are studied. In the first one- Case 1- we suppose that the capillary height is 5 m above the water table's surface, while in the second one- Case 2- we assume that the capillary height is 2.5 m. The last case could appear after a dry period.

On the other hand, the profile  $\Gamma-\Gamma'$  contains rough as well as smooth formations such as J-K, schists. This area was quite vulnerable before the fires, but after them the vulnerability rate increased significantly. This profile and its surface forms a three metre decay zone. As a result, in contrast to the previous profile, in this case we expect a narrow landslide in the decay and fragmentation zones. The last one lies under the decay zone and above the bedrock. For this reason, we decided to look into this area with the help of Phase2 V6.0.

Finally, both the results of this Diploma Thesis and the proposals for further investigation are presented.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης του νετού στην ευστάθεια των πρανών, υπό την επίδραση της πυρκαγιάς. Σκοπός της είναι η συνοπτική, θεωρητική ανάλυση του φαινομένου των κατολισθήσεων και ιδιαίτερα εκείνων που είναι περισσότερο καταστρεπτικές και έχουν ως κύριο αίτιο εκδήλωσής τους, τη βροχόπτωση. Συγκεκριμένα εξετάστηκε η δυσμενής επίδραση της βροχόπτωσης επί του φαινομένου των κατολισθήσεων δεδομένου ότι η συγκέντρωση νερού στους εδαφικούς μανδύες αποσάθρωσης, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και τη μείωση της διατμητικής αντοχής του εδάφους.

Η περιοχή που εξετάστηκε, ήταν η πληγείσα περιοχή της Ζαχάρως στο νομό Ηλείας. Κριτήριο επιλογής των εγκάρσιων τομών που μελετήθηκαν στην περιοχή, ήταν η μεταβολή της τρωτότητας του εδάφους μετά την πυρκαγιά όπως εκείνη παρουσιάζεται στους χάρτες αλλαγής τρωτότητας της μελέτης της ερευνητικής ομάδας "Α" του ΕΜΠ για τις πυρόπληκτες περιοχές.

Τα λογισμικά πακέτα που χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των τόμων αυτών, είναι το Συνδυαστικό μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρανών- CHASM 4 καθώς και το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase2 V6.0 της εταιρίας Rocscience. Οι τομές αυτές μελετηθήκαν διεξοδικά τόσο πριν, όσο και μετά το πέρας της πυρκαγιάς καταλήγοντας σε σύγκριση της συμπεριφοράς των καμένων και μη εδάφων .

Εξαιτίας της έλλειψης λεπτομερών και ακριβών στοιχείων για τις τιμές των εδαφικών, υδρολογικών και υδρογεωλογικών παραμέτρων της περιοχής, διενεργήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις καθορίζοντας τις εδαφικές παραμέτρους, με κριτήριο την ευστάθεια των πρανών έναντι σεισμού.

Πιο συγκεκριμένα, η χρήση των παραπάνω λογισμικών γίνεται προκειμένου να εντοπιστούν οι επιρρεπείς προς κατολίπηση περιοχές, για συγκεκριμένες τιμές εδαφικών, υδρογεωλογικών, υδρολογικών και τοπογραφικών παραμέτρων, καθώς και για να υπολογιστούν οι τιμές αυτών των παραμέτρων για τις οποίες η πιθανότητα για κατολίπηση ελαχιστοποιείται ή μεγιστοποιείται. Ακολούθως μετά την ολοκλήρωση

των παραμετρικών αναλύσεων γίνεται και συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

---

## 1. ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ

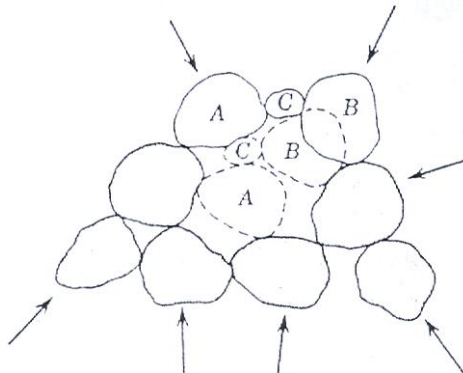
---

### ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Προτού ξεκινήσουμε την ανάλυση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική, θα ήταν χρήσιμο να ορίσουμε κάποιες βασικές έννοιες και παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της.

#### 1.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι δυνάμεις που ενεργούν σε ένα σώμα προκαλούν την παραμόρφωση του, ενώ αν ξεπεράσουν κάποιο όριο, το οποίο εξαρτάται από το υλικό του σώματος, προκαλούν την αστοχία του υπό μορφή θραύσης ή πολύ μεγάλων παραμορφώσεων. Στην περίπτωση του εδάφους, οι σχετικές κινήσεις των κόκκων (Εικ.1.1) είναι αυτές που προκαλούν την καταστροφή του σκελετού του όταν δέχεται κάποιο φορτίο.



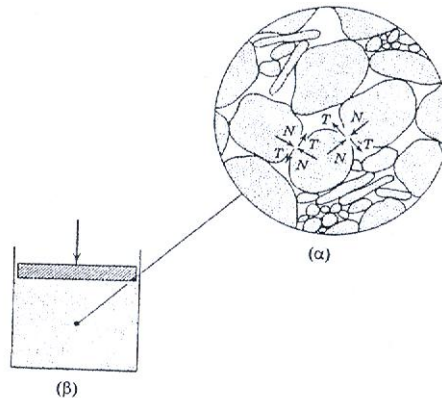
Εικόνα 1.1: Μηχανισμός μετακίνησης κόκκων

Η αντοχή του εδάφους, δηλαδή η μέγιστη πίεση (τάση) που μπορεί να δεχτεί το έδαφος, καθορίζεται από δύο βασικές παραμέτρους:

- **τη γωνία τριβής  $\phi$** : μέσω ενός απλού πειράματος μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος της γωνίας τριβής. Αποθέτουμε μία ποσότητα άμμου με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματιστεί μία πλαγιά, ένα κεκλιμένο επίπεδο. Η μέγιστη γωνία κλίσης αυτού του επιπέδου είναι ίση με τη γωνία τριβής. Αν επιχειρηθεί να σχηματιστεί 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 δυνάμεις στην επιφάνεια των κόκκων, 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 είναι η παράμετρος που καθορίζει την αντοχή των μη συνεκτικών εδαφών, όπως η άμμος και τα χαλίκια.

- **τη συνοχή c:** η συνοχή είναι μια ιδιότητα που μοιάζει με τη δράση της κόλλας. Μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται ελκτικές δυνάμεις που συγκρατούν μεταξύ τους, τους κόκκους. Ως φυσικό μέγεθος η συνοχή είναι του ίδιου είδους με την τάση και έχει μονάδες πίεσης. Σε ένα έδαφος που διαθέτει συνοχή, όπως η άργιλος, μπορεί να διατηρηθεί το σχήμα του ή εκεί να σκαφτεί όρυγμα με κατακόρυφα τοιχώματα. Αντίθετα, ένα έδαφος χωρίς συνοχή όπως η άμμος, δεν μπορεί να διατηρήσει το σχήμα του.



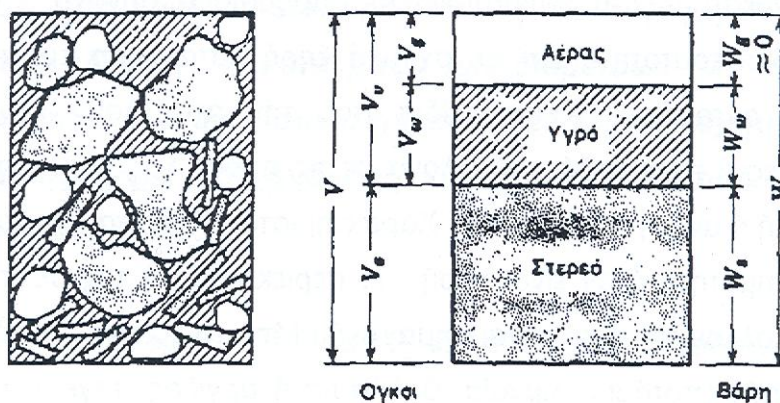
Εικόνα 1.2: Μετάδοση των δυνάμεων μεταξύ των κόκκων του εδάφους

## 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΕΙΚΤΩΝ

Στο έδαφος είναι δυνατόν να διακρίνουμε τρεις φάσεις, τη στερεή, την αέρια και την υγρή και αυτό γιατί τα κενά μεταξύ των κόκκων του είναι δυνατόν να περιέχουν αέρα ή νερό. Προκειμένου λοιπόν, να συσχετιστούν ποσοτικά οι τρεις αυτές φάσεις, εισάγουμε τους ακόλουθους δείκτες:



- a) **λόγος κενών**, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών και συμβολίζεται με  $e$ , δηλαδή  $e = \frac{V_v}{V_s}$
- b) **πορώδες**, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο (κενά και στερεά) και συμβολίζεται με το  $n$ , δηλαδή  $n = \frac{V_v}{V}$
- c) **βαθμός κορεσμού**, που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του περιεχόμενου νερού προς τον όγκο των κενών και συμβολίζεται με  $S$ , δηλαδή  $S = \frac{V_w}{V_v}$
- d) **περιεχόμενη υγρασία**, η οποία ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του περιεχόμενου νερού προς το βάρος των στερεών συμβολιζόμενη με  $w$ , δηλαδή  $w = \frac{W_w}{W_s}$



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα φάσεων

Εκτός από αυτούς τους δείκτες, ορίζονται επίσης και τα ειδικά βάρη για τις εξής περιπτώσεις:

1. **ειδικό βάρος κόκκων**  $\varepsilon = \frac{W_s}{V_s}$ , με τιμές από 26.5 έως 27 kN/m<sup>3</sup>
2. **ξηρό φαινόμενο βάρος**  $\gamma_\xi = \frac{W_s}{V}$ , που αναφέρεται σε ξηρό δείγμα εδάφους
3. **υγρό φαινόμενο βάρος**  $\gamma_v = \frac{W}{V}$ , που αναφέρεται σε υγρό δείγμα εδάφους
4. **κορεσμένο φαινόμενο βάρος**  $\gamma_s = \frac{W}{V}$ , για την ειδική περίπτωση κορεσμένου εδάφους και

5. **βυθισμένο ή υπό άνωση φαινόμενο βάρος**  $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$ , όπου  $\gamma_w$  το ειδικό βάρος του νερού ίσο προς  $9,81 \text{ kN/m}^3$

### 1.3 ΘΕΩΡΙΑ ΜΥΖΗΣΗΣ (SUCTION)

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). Η θεωρία αναπτύχθηκε κυρίως σε σχέση με το σύστημα έδαφος - νερό- βλάστηση. Η σημασία της, στην εξήγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που αφορούν προβλήματα μηχανικής παρατηρήθηκε πρώτη φορά, από το Road Research Laboratory στην Αγγλία (1950).

Η μύζηση συχνά αναφέρεται ως το επίπεδο ελεύθερης ενέργειας του νερού του εδάφους (Edlefsen and Anderson, 1943). Η ελεύθερη ενέργεια αυτή μπορεί να μετρηθεί ως η μερική πίεση των ατμών του νερού του εδάφους (Richards, 1965). Η θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της μύζησης και της μερικής πίεσης των ατμών του νερού γράφεται ως εξής:

$$\psi = -\frac{RT}{\nu_{wo}\omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{u_{vo}}\right) \quad (1.1)$$

όπου:

$\psi$ : η μύζηση του εδάφους ή ολική αναρρόφηση (kPa)

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

$T$ : απόλυτη θερμοκρασία [ $T=(273.16 + t^\circ)$  (K)]

$t^\circ$ : θερμοκρασία ( $^\circ\text{C}$ )

$\nu_{wo}$ : ειδικός όγκος νερού ή το αντίστροφο της πυκνότητας του νερού [ $1/\rho_w(\text{m}^3/\text{kg})$ ]

$\rho_w$ : πυκνότητα του νερού [ $998 \text{ kg/m}^3$  σε  $t^\circ = 20^\circ\text{C}$ ]

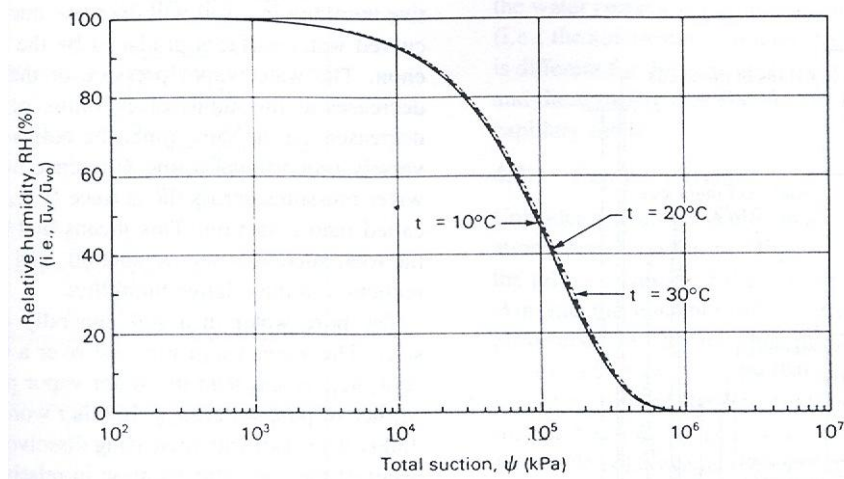
$\omega_v$ : μοριακή μάζα των ατμών του νερού των πόρων (kPa)

$u_v$ : μερική πίεση των ατμών του νερού των πόρων (kPa)

$u_{vo}$ : πίεση κορεσμού των ατμών του νερού πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια καθαρού νερού στην ίδια θερμοκρασία (kPa)

Η εξίσωση 1.1 δείχνει ότι το επίπεδο αναφοράς για την ποσοτικοποίηση των συστατικών της ελεύθερης μύζησης, είναι η αέρια πίεση πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια καθαρού νερού (π.χ. νερού χωρίς αλάτι).

Όταν ο όρος  $\frac{\bar{u}_v}{u_{vo}}$ , ο οποίος ονομάζεται σχετική υγρασία RH (%), είναι 100% η αναρρόφηση  $\Psi$  είναι ίση με το μηδέν. Μια σχετική υγρασία μικρότερη από 100% θα μπορούσε να δείξει την ύπαρξη μύζησης στο έδαφος.



Διάγραμμα 1.1: Σχέση υγρασίας –ολικής μύζησης

Η ολική μύζηση περιλαμβάνει δύο μέρη την **matric** και το **οσμωτικό**. Η εξίσωση της μύζησης μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (1.2)$$

όπου:

$(u_a - u_w)$  : η matric μύζηση.

$u_a$  : η πίεση πόρων του αέρα

$u_w$  : η πίεση των πόρων του νερού

$\pi$ : η οσμωτική συνάρτηση

Η **matric** (ή τριχοειδής σύσταση ελεύθερης ενέργειας) είναι η ισοδύναμη αναρρόφηση που προέρχεται από τη μέτρηση της μερικής πίεσης των ατμών του νερού σε ισορροπία με το νερό του εδάφους. Οι δυνάμεις του τριχοειδούς προκαλούνται από την επιφανειακή τάση στη διεπιφάνεια μεταξύ νερού και αέρα, μέσα στους τριχοειδείς σωληνίσκους που σχηματίζουν οι πόροι του εδάφους. Όμοια, οι δυνάμεις αυτές αυξάνονται με τη μείωση του μεγέθους των πόρων, άρα και του μεγέθους των κόκκων.

Σε εδάφη, οι πόροι με μικρή ακτίνα δρουν ως τριχοειδή κανάλια που προκαλούν το νερό του εδάφους να κινείται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το νερό αυτό έχει αρνητική πίεση σε σχέση με την πίεση του αέρα που είναι συνήθως η ατμοσφαιρική στο πεδίο, ίσο με μηδέν (=0).

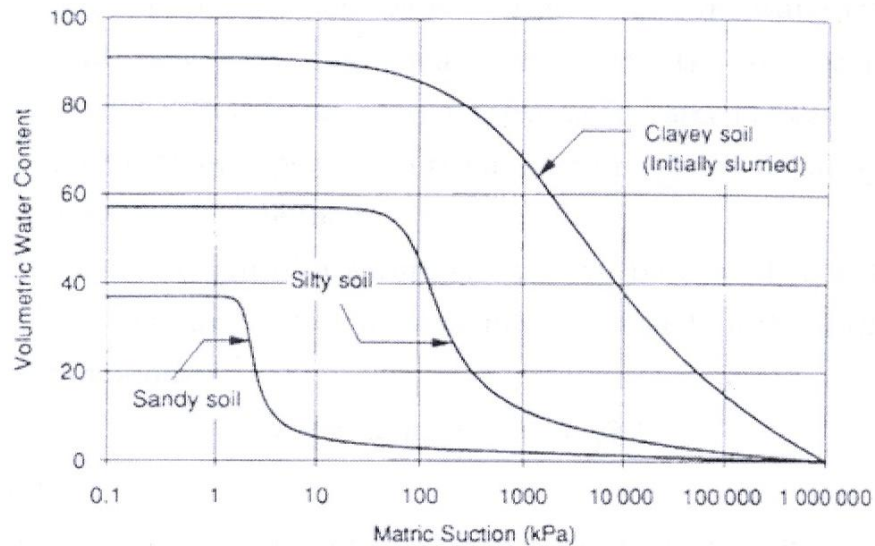
Σε χαμηλό βαθμό κορεσμού, οι πιέσεις των πόρων του νερού μπορούν να είναι πολύ αρνητικές, με τιμές μικρές όπως -7000 kPa (Olson and Langfelder, 1965). Σε αυτή την περίπτωση, οι δυνάμεις μεταξύ των κομματιών του εδάφους θεωρείται ότι παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην διατήρηση των μεγάλων αρνητικών πιέσεων στα εδάφη.

Το νερό των πόρων σε ένα έδαφος γενικά περιλαμβάνει διαλυμένα άλατα. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την πίεση του αέρα του νερού πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια ( $u_{t1}$ ) η οποία είναι μικρότερη από την αντίστοιχη σε καθαρό νερό ( $u_{t0}$ ), μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η σχετική υγρασία, μειώνεται με τα αυξανόμενα διαλυμένα άλατα στο νερό των πόρων του εδάφους. Η μείωση αυτή χαρακτηρίζεται ως **οσμωτική μύζηση, π.**

Οι δυνάμεις οσμωτικής 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).

Συγκεντρωτικά λοιπόν, μπορούμε να πούμε ότι η μύζηση, έχει σαν αποτέλεσμα τη συγκράτηση του νερού στο έδαφος. Χωρίς την παρουσία της τα εδάφη θα στραγγίζονταν

υπό την επίδραση της βαρύτητας, ενώ εκείνα πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα θα ήταν άδεια από νερό.



Διάγραμμα 1.2: Γραφική παράσταση μύζησης – υγρασίας (Fredlund, 1994)

#### 1.4 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΕΙΣΔΥΣΗΣ (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 τα βαθύτερα στρώματα του υπεδάφους, αναπληρώνοντας έτσι την φυσική υγρασία ή προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό που προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες αποτελεί την **ενεργή κατείσδυση** η οποία έχει και την μεγαλύτερη σημασία στην υδρολογία. Ένα ποσοστό της κατείσδυσης είναι δυνατόν να επιστρέψει στην επιφάνεια μιας λεκάνης μέσα από πηγές, όταν οι γεωλογικές συνθήκες και η τοπογραφία της περιοχής το επιτρέπουν. (Μιγγίρος, 2006)



Εικόνα 1.4: Το φαινόμενο της κατείδυσης (Μιγγίρος, 2006)

Η ταχύτητα αυτής της κίνησης λέγεται ταχύτητα κατείδυσης. Εάν η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα κατείδυσης τότε το νερό θα συσσωρευτεί στην επιφάνεια και θα αρχίσει η απορροή.

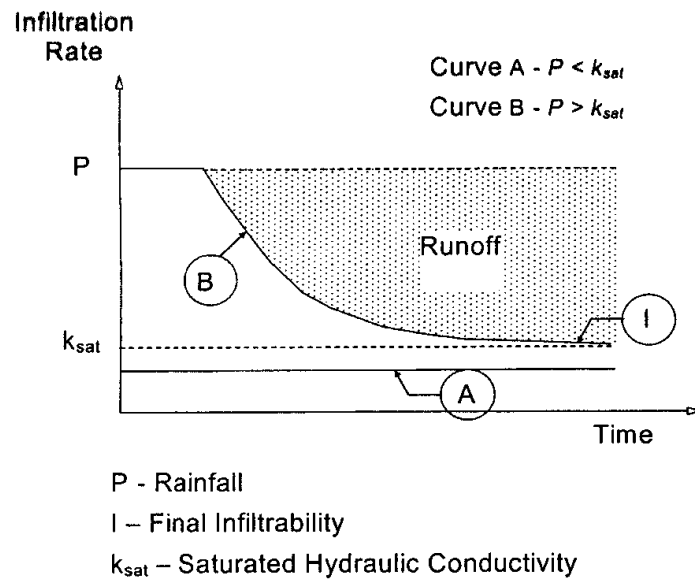
Η μετακίνηση του ύδατος στο έδαφος ελέγχεται από

- ✓ τη βαρύτητα
- ✓ τη δράση του τριχοειδούς
- ✓ το πορώδες του εδάφους.

Από αυτούς τους παράγοντες το πορώδες του εδάφους είναι ο σημαντικότερος και ελέγχεται από τη σύσταση, τη δομή και το οργανικό περιεχόμενο του. Το ποσοστό κατείδυσης, που ορίζεται ως η ροή που περνά μέσα από την επιφάνεια, περιορίζεται στην ικανότητα κατείδυσης.

Η ταχύτητα κατείδυσης μειώνεται γρήγορα στην αρχή της καταιγίδας και φτάνει σε μια σταθερή τιμή μετά από αρκετές ώρες βροχόπτωσης. Για τα φαινόμενα αυτά είναι αρμόδιοι διάφοροι παράγοντες που περιλαμβάνουν :

- Η πλήρωση των λεπτών εδαφολογικών πόρων με νερό μειώνει τις τριχοειδείς δυνάμεις.
- Καθώς το χώμα απορροφά νερό, τα μόρια αργίλου διογκώνονται και μειώνουν το μέγεθος των πόρων.
- Οι σταγόνες βροχής χωρίζουν τις εδαφολογικές μάζες διαβρέχοντας τα λεπτά μόρια στους πόρους.



Διάγραμμα 1.3: Διαδικασίες κατείδυσης (Gerscovich, 1994)

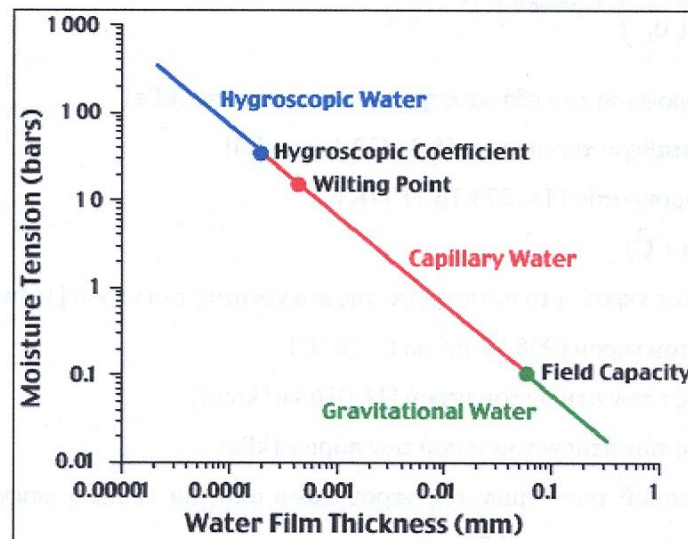
Στην περίπτωση που το ποσοστό του νερού που προσφέρεται στην επιφάνεια είναι μικρότερο από την ικανότητα του εδάφους να το απορροφήσει, το νερό συνεχίζει να κατεισδύει – **καμπύλη Α**. Όταν, όμως, το ποσοστό αυτό υπερβεί το όριο, κάποια ποσότητα νερού ρέει στην επιφάνεια του εδάφους, δημιουργώντας επιφανειακή απορροή. Η **καμπύλη Β** δείχνει σε αρχικά στάδια, 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. (Hillel 1971).

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

Ο μηχανισμός αστοχίας αυτών των κατολισθήσεων περιλαμβάνει ρηχές και μεγάλου βάθους αστοχίες ενώ εξαρτάται κυρίως από τη λεπτότητα των εδαφών που παραμένουν, τις χαλαρές επιχώσεις και τις ιδιότητες της βροχόπτωσης. Συνεχείς και μεγάλης διάρκειας παρατηρήσεις βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς της πίεσης πόρων για πρηνή υπό συνθήκες βροχόπτωσης.

Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί η πιο επικίνδυνη βροχόπτωση και οι παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα που οφείλεται στην κατείδυση της βροχόπτωσης μόνο με μεγάλης διάρκειας παρατήρηση.

Μέσα στο έδαφος η αποθήκευση του ύδατος επηρεάζεται από διάφορες δυνάμεις. Η ισχυρότερη δύναμη είναι η μοριακή δύναμη των στοιχείων και των ενώσεων που βρίσκονται στην επιφάνεια των εδαφολογικών μεταλλευμάτων. Το νερό που συγκρατείται από αυτή τη δύναμη ονομάζεται υγροσκοπικό νερό και αποτελείται από το νερό που συγκρατείται μέσα σε 0.0002 mm από την επιφάνεια του εδάφους. Το μέγιστο όριο αυτού του ύδατος, περίπου ένα εδαφολογικό μόριο, είναι γνωστό ως υγροσκοπικός συντελεστής. Το υγροσκοπικό νερό είναι ουσιαστικά μη κινητό και μπορεί να αφαιρεθεί από το χώμα μέσω θέρμανσης.



Διάγραμμα 1.4: Σχέση μεταξύ πάχους ταινιών εδαφολογικού ύδατος και έντασης υγρασίας



Η εξίσωση κατείσδυσης της βροχόπτωσης, βασίζεται στη γραμμική επίλυση της **εξίσωσης Richards** :

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{d\theta}{d\psi} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial x} - \sin a \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_L(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos a \right) \right] \quad (1.2)$$

Η επίλυση αυτή αποτελείται από έναν σταθερό και έναν αμετάβλητο συντελεστή. Ο σταθερός συντελεστής επιτρέπει τη ροή σε μια αυθαίρετη διεύθυνση που καθορίζεται από τη σταθερή ταχύτητα κατείσδυσης και τη γωνία του πρανούς. Ο μεταβλητός συντελεστής προϋποθέτει μονοδιάστατη, κατακόρυφη ροή προς τα κάτω με μια απλά χρονομεταβλητή ροή ορισμένης διάρκειας και έντασης στην επιφάνεια του εδάφους.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι εξισώσεις κατείσδυσης εφαρμόζονται σε κορεσμένες ή αρχικές συνθήκες κορεσμένων τάσεων έτσι ώστε η ροή να είναι στο γραμμικό εύρος για το νόμο του Darcy. Γενικεύτηκε η αρχική λύση του Inversion (2000) για την περίπτωση της χρονο-μεταβλητής σειράς των επιφανειακών ροών διαφορετικών εντάσεων και διαρκειών. Η γενική λύση:

$$\begin{aligned} \phi(Z, t) = & [Z - d]\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_Z} \left[ H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[ \frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{1/2}} \right] \right] - \\ & - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_Z} \left[ H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{1/2} \operatorname{ierfc} \left[ \frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{1/2}} \right] \right] \end{aligned} \quad (1.3)$$

## 1.5 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ (SEEPAGE)

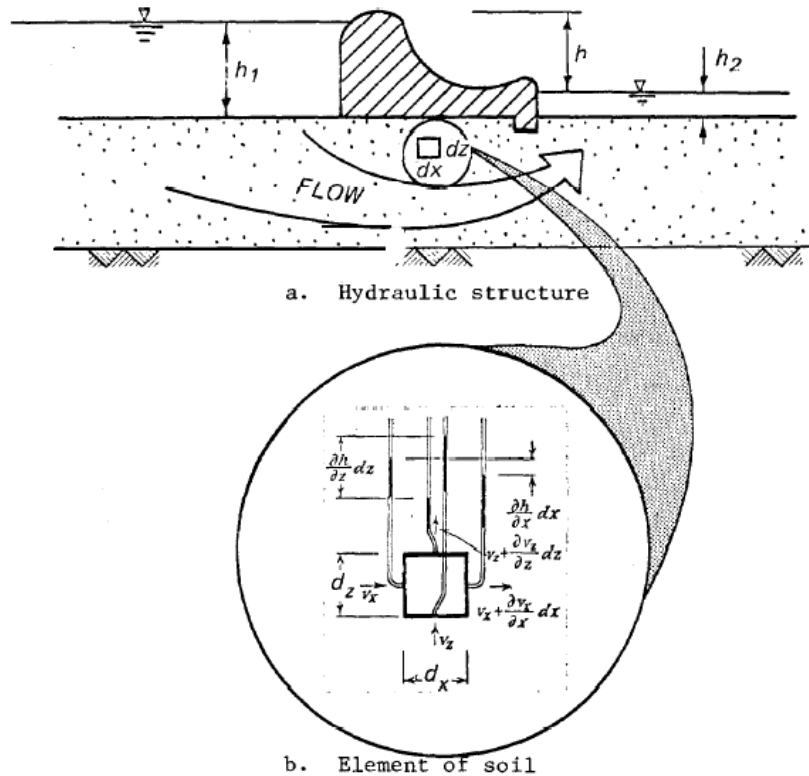
Διήθηση καλείται η φυσική διεργασία της εισχώρησης στο έδαφος νερού που προέρχεται από βροχόπτωση, τήξη χιονιού ή άρδευση (Rawls et al., 1993). Η διεργασία αυτή συναρτάται άμεσα με την κίνηση του νερού στο έδαφος, σε τρόπο ώστε ο ρυθμός διήθησης να εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα νερού για διήθηση, 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 διαδραματίζουν σημαντικό υδρολογικό ρόλο και

επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή, την εξατμισοδιαπνοή, 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 κατά σειρά σπουδαιότητας, από την ένταση και διάρκεια των βροχοπτώσεων, τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, την κατάσταση του επιφανειακού εδαφικού καλύμματος και την παρουσία ή όχι χλωρίδας, την περιεκτικότητα σε υγρασία του επιφανειακού εδάφους στην αρχή της βροχής, τη θερμοκρασία, την ποιότητα του βρόχινου νερού κτλ, παράγοντες που εκτιμώνται δύσκολα.

Η επιφάνεια απ' όπου συντελείται η διήθηση λέγεται επιφάνεια διήθησης και μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη. Μπορεί να είναι ο πυθμένας και τα πρανή μιας τάφρου ή ενός αυλακιού, μπορεί να είναι η φυσική επιφάνεια του εδάφους ή μέρος αυτής, μπορεί ακόμη να συναντιέται και σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

Η διήθηση, σε αντίθεση με την κατείσδυση, αφορά κορεσμένα εδάφη και περιγράφεται με τη βοήθεια των εξισώσεων Laplace.



Εικόνα 1.5: Φαινόμενο Laplace (John Wiley & Sons)

Η εικόνα 1.5 δείχνει μια γενική συνθήκη διήθησης, όπου ένα κομμάτι έχει απομονωθεί.

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 κάθετη στο σχέδιο της εικόνας..
6. Το κορεσμένο διαπερατό έδαφος είναι ομογενές.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.4)$$

↳ Εξίσωση Laplace για 2Δ ροή σε ομογενές, ιστροπικό, πορώδες μέσο

Το φαινόμενο της διήθησης αποτελεί μια σημαντική υδρολογική διεργασία στα πλαίσια μελέτης του υδατικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής λεκάνης. Έτσι αν γνωρίζεις κανείς το

ρυθμό με τον οποίο το νερό διηθείται στο έδαφος θα μπορεί να εκτιμήσει το χρόνο έναρξης της επιφανειακής απορροής σε μια βροχή ή καταιγίδα, ή τον όγκο του νερού που είναι δυνατόν να συλλέγει ένας επιφανειακός ταμιευτήρας, μια λιμνοδεξαμενή ή ένα φράγμα.

Μια εξίσου σημαντική πλευρά του φαινομένου της διήθησης, είναι αυτή που αναφέρεται στη μεταφορά των διαλυτών ουσιών στο έδαφος και στους υπόγειους υδροφόρους σχηματισμούς με όλες τις αρνητικές (ή θετικές καμία φορά) επιδράσεις στην ποιότητα των εδαφών και των υπόγειων νερών.

Η διηθητική ικανότητα από την πλευρά της είναι αρκετά σημαντική. Όσο μεγαλύτερη είναι η διηθητική ικανότητα τόσο λιγότερο νερό απορρέει επιφανειακά και κατά συνέπεια λιγότερο έδαφος παρασύρεται και χάνεται. Ακόμη, επηρεάζεται από το μέγεθος των πόρων, τη σταθερότητα αυτών και τη μορφή του εδαφικού προφίλ. Όπου οι ιδιότητες του εδάφους διαφέρουν με το βάθος του προφίλ ο ορίζοντας με τη μικρότερη διηθητική ικανότητα είναι ο κρίσιμος. Στην περίπτωση αμμωδών εδαφών ο κρίσιμος ορίζοντας είναι συχνά ο επιφανειακός, όπου μια κρούστα 0.2-2 mm μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα απορροής.

## **1.6 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΛΟΓΙΚΗ ΣΕΙΡΑ ΕΠΕΙΣΟΔΙΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΕΡΙΟΔΟ ΞΗΡΑΣΙΑΣ**

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 συγχρόνως αναρροφάται από τις ελκτικές τάσεις που αναπτύσσει το τριχοειδές της αέριας φάσης (μύζηση). Η διπλή αυτή επίδραση οδηγεί σε υψηλή 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, αλλά η κίνηση του νερού κάτω από αυτή εξακολουθεί για μακρό διάστημα. Η καθοδική κίνηση του νερού, που οδηγείται από τη βαρύτητα, επιβραδύνεται. Ένα τμήμα της εδαφικής υγρασίας του ανώτερου εδαφικού στρώματος εξατμίζεται ή διαπνέεται μέσω των φυτών, πράγμα που έχει 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 μεταφορά νερού από τη ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης προς την υγροσκοπική ζώνη για να αποκαθίσταται η υγροσκοπική ισορροπία. Με το μηχανισμό αυτό, το υδροφόρο στρώμα καλύπτει εν μέρει τις απώλειες εξάτμισης στην επιφάνεια του εδάφους. Βεβαίως, η τριχοειδής ανύψωση νερού μπορεί να φτάσει σε μικρά μόνο ύψη πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα.

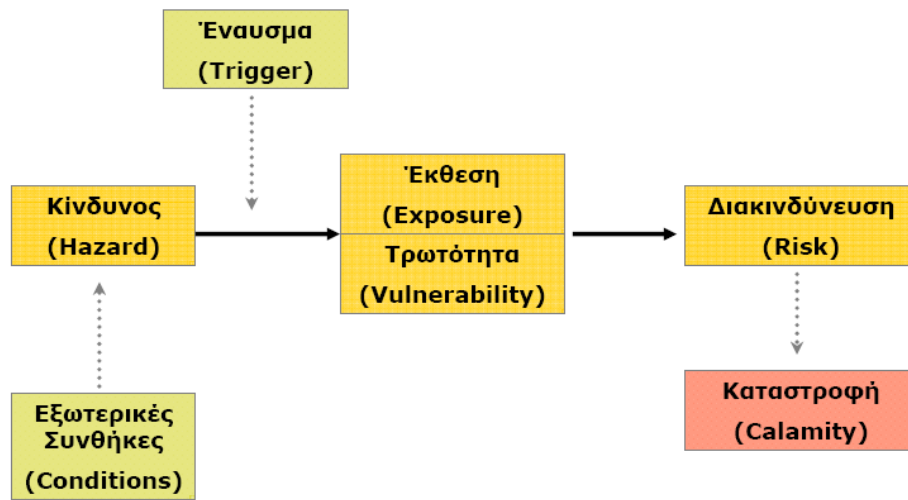
## **1.7 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ (VULNERABILITY) ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ**

Ως τρωτότητα χαρακτηρίζεται ο βαθμός στον οποίο τα ανθρώπινα και περιβαλλοντικά συστήματα είναι πιθανό να υποστούν κάποια καταστροφή εξαιτίας μιας αναστάτωσης ή έντασης ( [Clark et al (2000)], [IHDP (International Human Dimensions Program) Update (2001)], [IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001)], [Kates et al. (2001)], [Kasperson and Kasperson (2001)]). 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 στο να αναγνωρίσουν ποια συστήματα είναι περισσότερο σε κίνδυνο αλλά και στο να καταλάβουν το γιατί. Αυτή η πληροφορία είναι κρίσιμη για εκείνους που παίρνουν αποφάσεις και συχνά θα πρέπει να δώσουν προτεραιότητα σε περιορισμένες πηγές, στο σχεδιασμό επεμβάσεων μείωσης τρωτότητας.

Παρόλο που η έρευνα της τρωτότητας έχει σαν αποτέλεσμα μια ενδεδεγμένη και επεκτεινόμενη βιβλιογραφία στις κοινωνικές και αλλαγής του περιβάλλοντος επιστήμες, η υιοθέτηση της ιδέας σε εκτιμήσεις είναι περιορισμένη από μια έλλειψη εύρωστων μέτρων του μοντέλου και μέτρησης της τρωτότητας μέσω των συστημάτων.

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 μετρήσουν. Όμως η τρωτότητα δεν είναι ένα άμεσα οπτικό φαινόμενο επομένως είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο 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.



Διάγραμμα 1.5: Από το έναυσμα στην καταστροφή (Τσακίρης, 1995)

Πιο συγκεκριμένα για την περίπτωση μας ο **βαθμός τρωτότητας του εδάφους**, εκφράζει στην ουσία τον βαθμό επικινδυνότητάς του στις κατολισθήσεις. Το πόσο δηλαδή κινδυνεύει το έδαφος να αστοχήσει. 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.

Η χωρική εκτίμηση της τρωτότητας των σχηματισμών, δηλαδή η πρόβλεψη περιοχών υψηλού κινδύνου εδαφικής απώλειας, σε μικρότερη κλίμακα, στις λεκάνες απορροής του Δ. Ζαχάρως, αντλήθηκε από δύο θεματικούς χάρτες της **ερευνητικής ομάδας "Α" του ΕΜΠ**. Στους χάρτες αυτούς παρουσιάζονται οι ζώνες επικινδυνότητας ως προς την εδαφική διάβρωση πριν και μετά τις πυρκαγιές, οι οποίοι παρατίθενται στο παράρτημα.

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 διαφοροποιήθηκε 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:

- ☞ **«Χάρτης υδρογραφικής υφής, Υ».** Προκειμένου να συνταχθεί ο χάρτης της υδρογραφικής υφής, χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες υδρογραφικής πυκνότητας (D) και υδρογραφικής συχνότητας (F) των υδρογραφικών δικτύων.
  - ☞ **«Χάρτης γεωλογικών σχηματισμών επιδεικτικών στη διάβρωση και σε αστοχίες, L»**, παρέχει τη γεωλογική, υδρογεωλογική και υδρολιθολογική (διηθιτικότητα, διαπερατότητα) πληροφόρηση και αποτελεί το χάρτη περιοχών με λιθολογική σύσταση επιρρεπή στη διάβρωση (L).
  - ☞ **«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». 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, Υ»** και
  - ☞ **«Χάρτης καμένων εκτάσεων με βάση το βαθμό απανθράκωσης, B»**

## 1.8 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΚΑΙ ΜΗ ΕΛΑΦΗ

### ➤ Κορεσμένα εδάφη

Ο κορεσμός, εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να υπάρξει σε μια εδαφική ζώνη. Η διατμητική αντοχή ενός κορεσμένου εδάφους περιγράφεται χρησιμοποιώντας το



κριτήριο αστοχίας των Mohr- Coulomb και την έννοια της ενεργούς τάσης (Terzaghi, 1936).

$$T_{ff} = c' + (\sigma_f - u_w)_f \tan \phi' \quad (1.5)$$

όπου:

$T_{ff}$ : η διατμητική αντοχή στην επιφάνεια αστοχίας

$c'$ : η ενεργός συνοχή, (η οποία είναι η διατμητική αντοχή όταν η ενεργός ορθή τάση ισούται με το μηδέν)

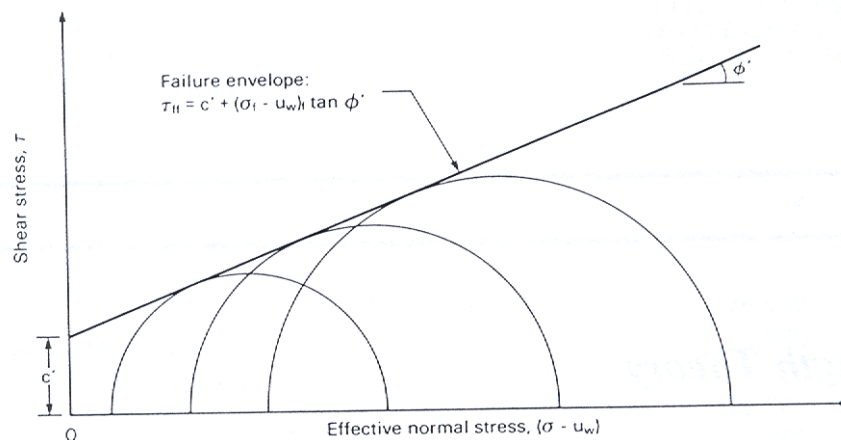
$(\sigma_f - u_w)_f$ : ενεργός ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία

$\sigma_{ff}$ : ολική ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας

$u_{wf}$ : πίεση του νερού των πόρων κατά την αστοχία

$\phi'$ : ενεργός γωνία εσωτερικής τριβής

Η εξίσωση 1.5 απεικονίζεται γραφικά στο διάγραμμα 1.6.



**Διάγραμμα 1.6: Κριτήριο αστοχίας κορεσμένου εδάφους**

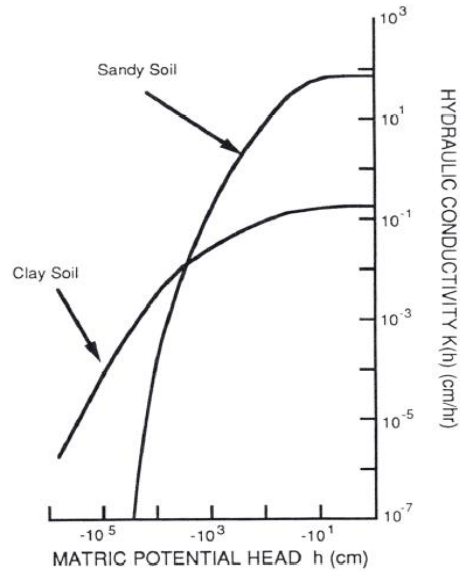
Η γραμμή αυτή συνήθως αναφέρεται ως περιβάλλουσα. Η περιβάλλουσα δείχνει τους πιθανούς συνδυασμούς της διατμητικής αντοχής και της ενεργούς ορθής τάσης στην επιφάνεια αστοχίας κατά την αστοχία. Η διατμητική και ορθή τάση στην εξίσωση 1.5 δίνονται με δείκτη  $f$ . Ο δείκτης αυτός μέσα στις παρενθέσεις αναφέρεται στην επιφάνεια αστοχίας και εκείνος εκτός, δείχνει την κατάσταση της τάσης της αστοχίας. Ένας ακόμη τέτοιος δείκτης δίνεται και στην πίεση των πόρων του νερού για να δείξει την κατάσταση αστοχίας. Η πίεση των πόρων του νερού δρα ισοδύναμα σε όλες τις επιφάνειες

(ισοτροπικό). 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  $\varphi'$  και η τομή στην τεταγμένη καλείται ως η ενεργός συνοχή  $c'$ .

Η διεύθυνση της επιφάνειας αστοχίας στο έδαφος γίνεται ενώνοντας το σημείο του πόλου με το σημείο επαφής μεταξύ του κύκλου του Mohr και της περιβάλλουσας. Το σημείο επαφής στον κύκλο του Mohr κατά την αστοχία, φανερώνει το επίπεδο τάσης στην επιφάνεια αστοχίας.

Η χρήση των ενεργών τάσεων με το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb αποδεικνύεται χρήσιμο στη μηχανική πρακτική σε κορεσμένα εδάφη. Παρόμοιες προσπάθειες έχουν γίνει για να βρεθεί ενεργός αντοχή με μια μεταβλητή για μη κορεσμένα εδάφη. Εάν αυτό ήταν ικανό, μια παρόμοια εξίσωση διατμητικής αντοχής θα μπορούσε να προταθεί και για τα μη κορεσμένα εδάφη. Όμως, αυξημένες αποδείξεις υποστηρίζουν τη χρήση δύο ανεξάρτητων μεταβλητών τάσης για να εντοπιστεί το επίπεδο τάσης για ένα μη κορεσμένο έδαφος και συνεπώς η διατμητική αντοχή (Matyas and Radhakrishna, 1968, Fredlund and Morgenstern, 1977).

Η κύρια διαφορά μεταξύ της ροής νερού σε κορεσμένα και μη εδάφη είναι ότι η διαπερατότητα θεωρείται σταθερή για κορεσμένα, ενώ για τα μη ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της υγρασίας ή matric μύζησης (Maosong Huang & Cang-Qin Jia, 2006). Το ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζει τις τυπικές καμπύλες που φανερώνουν τη σχέση μεταξύ υδραυλικής αγωγιμότητας και matric (μύζηση), για έδαφος αργίλου και άμμου.



Διάγραμμα 1.7: Σχέση μύξης - υδραυλικής αγωγιμότητας, για άμμο και άργιλο (Jury et al. 1991)

➤ **Μη κορεσμένα εδάφη**

Η διατμητική αντοχή ενός **μη κορεσμένου** εδάφους μπορεί να εκφραστεί με όρους ανεξάρτητων μεταβλητών τάσης. Κάθε δύο από τις τρεις πιθανές μεταβλητές τάσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξίσωση της διατμητικής αντοχής. Οι μεταβλητές τάσης  $(\sigma - u_a)$  και  $(u_a - u_w)$  έχει αποδειχθεί ότι αποτελούν τον συνδυασμό με τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα για την πράξη. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους, η εξίσωση διατμητικής αντοχής γράφεται ως εξής:

$$T_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (1.6)$$

όπου:

$T_{ff}$ : η διατμητική αντοχή στην επιφάνεια αστοχίας

$c'$ : η ενεργός συνοχή, (η όποια είναι η διατμητική αντοχή όταν η ενεργός ορθή τάση ισούται με το μηδέν)

$(\sigma_f - u_a)_f$ : καθαρή ορθή τάση στην επιφάνεια αστοχίας

$(u_a - u_w)_f$ : matric αναρρόφηση στην επιφάνεια αστοχίας

$u_{a,f}$ : πίεση του αέρα των πόρων κατά την αστοχία

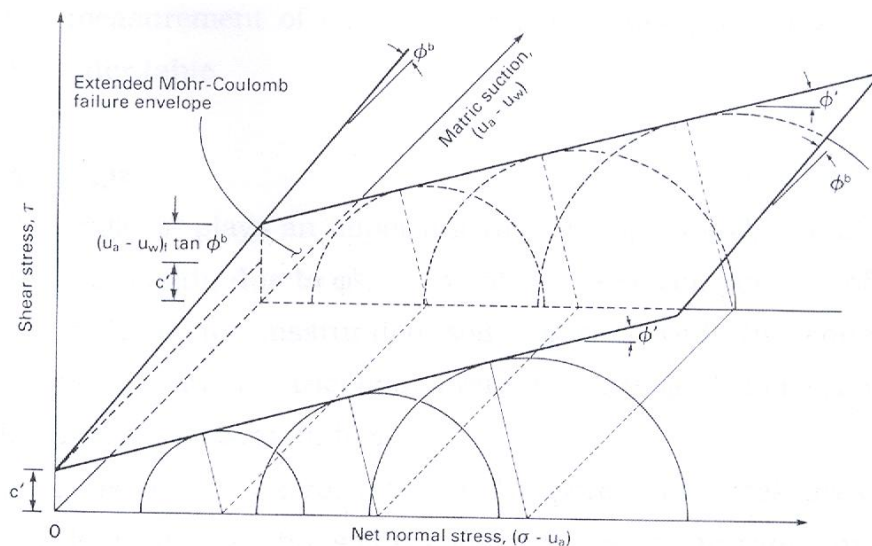
$\phi'$ : γωνία εσωτερικής τριβής σχετική με τη μεταβλητή  $(\sigma_f - u_a)_f$

$\phi^b$ : γωνία που δείχνει το ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής σχετική με την matric αναρρόφηση  $(u_a - u_w)_f$

Μια σύγκριση λοιπόν, των εξισώσεων 1.5 και 1.6 φανερώνει ότι η εξίσωση της διατμητικής αντοχής για μη κορεσμένα εδάφη είναι μια επέκταση της αντίστοιχης για κορεσμένα. Για ένα μη κορεσμένο έδαφος, δύο μεταβλητές τάσης χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τη διατμητική αντοχή, ενώ μόνο μία  $((\sigma_f - u_a)_f$ , η ενεργός ορθή τάση) απαιτείται για ένα κορεσμένο έδαφος.

Η εξίσωση διατμητικής αντοχής για ένα μη κορεσμένο έδαφος φανερώνει μια ομαλή μεταφορά στην εξίσωση διατμητικής αντοχής για ένα κορεσμένο. Καθώς το έδαφος πλησιάζει στον κορεσμό, η πίεση των πόρων του νερού  $u_w$  πλησιάζει την πίεση των πόρων του αέρα  $u_a$  και η αναρρόφηση  $(u_a - u_w)$  πλησιάζει το μηδέν. Το μέρος της αναρρόφησης χάνεται και η 1.6 μετατρέπεται στην εξίσωση για τα κορεσμένα εδάφη.

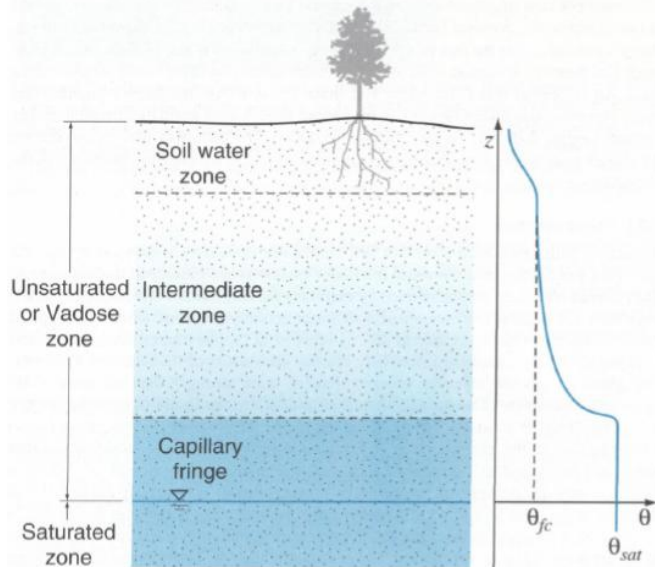
Οι κύκλοι του Mohr για ένα **μη κορεσμένο έδαφος** σχεδιάζονται σε σχέση με τον άξονα της ορθής τάσης  $(\sigma - u_a)$ , όπως σχεδιάζονται για τα κορεσμένα σε σχέση με τον άξονα της ενεργούς τάσης  $(\sigma - u_w)$ . Παρόλα αυτά, η τοποθέτηση του κύκλου του Mohr στην τρίτη διάσταση είναι μια συνάρτηση της αναρρόφησης. Η επιφάνεια που εφάπτεται στους κύκλους του Mohr σε αστοχία αναφέρεται ως η επέκταση της περιβάλλουσας M-C για μη κορεσμένα εδάφη.



**Διάγραμμα 1.8: Κριτήριο αστοχίας Mohr- Coulomb για μη κορεσμένα εδάφη (Gallipoli, 2004)**

Το διάγραμμα 1.8 δείχνει μια επίπεδη περιβάλλουσα αστοχίας που τέμνει τον άξονα της διατμητικής τάσης δίνοντας μια συνοχή  $c'$ . Η περιβάλλουσα έχει γωνίες κλίσης  $\phi'$  και  $\phi^b$  σε σχέση με τους  $(\sigma - u_a)$  και  $(u_a - u_w)$  άξονες αντίστοιχα. Και οι δύο οι γωνίες υποθέτουμε ότι είναι σταθερές. Η συνοχή  $c'$  και οι γωνίες κλίσης είναι οι παράμετροι αντοχής που χρησιμοποιούνται για να συσχετίσουν τη διατμητική αντοχή με τις μεταβλητές τάσης. Η μηχανική συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου εδάφους επηρεάζεται διαφορετικά από τις αλλαγές σε ορθές τάσεις παρά από τις αλλαγές στη *matrix*. Η αύξηση στην διατμητική αντοχή εξαιτίας μιας αύξησης στη ορθή τάση χαρακτηρίζεται από τη γωνία τριβής  $\phi'$ . Από την άλλη, η αύξηση στη διατμητική αντοχή που προκαλείται από αύξηση της *matrix*, χαρακτηρίζεται από τη γωνία  $\phi^b$ . Η γωνία αυτή είναι συνεχώς ίση ή μικρότερη της  $\phi'$ .

Η εικόνα 1.6 που ακολουθεί απεικονίζει τη διανομή της υγρασίας στη μη κορεσμένη ζώνη και την κατάταξη των νερών. Το νερό κοντά στην επιφάνεια είναι διαθέσιμο για να ληφθεί από τις ρίζες των φυτών. Μετά από κάποιες μέρες καλού καιρού, η υγρασία σε αυτή τη ζώνη μειώνεται εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής.



**Εικόνα 1.6: Διανομή υγρασίας στη μη κορεσμένη ζώνη- κατάταξη νερών (Hendrickx, 2007)**

Ακριβώς κάτω από τη ζώνη αυτή, η υγρασία τείνει να παραμένει σταθερή σε βάθος ενός μέτρου ή και περισσότερο. 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. Σ' αυτή την κορεσμένη ζώνη πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα λαμβάνει χώρα το τριχοειδές φαινόμενο.



---

## 2. ΠΡΑΝΗ

---

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρανή ονομάζονται κεκλιμένοι φυσικοί ή τεχνητοί σχηματισμοί εδάφους ή βράχου. Η κλίση τους αυτή τα καθιστά «ασταθή» σε σχέση με έναν οριζόντιο σχηματισμό εδάφους λόγω παρουσίας διατμητικών τάσεων 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.

Σε ένα φυσικό πρανές η ευστάθεια δεν είναι πάντοτε εξασφαλισμένη. Το 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 του. Στην περίπτωση που η αστοχία ενός φυσικού πρανού έχει επιπτώσεις στο κοινωνικό σύνολο, τότε το πρανές πρέπει να προστατευτεί και να ενισχυθεί.

Τα τεχνητά πρανή διαμορφώνονται κατά την κατασκευή διάφορων τεχνικών έργων όπως φράγματα, έργα οδοποιίας, λιμενικά και παράκτια έργα καθώς και υδραυλικά έργα. Προκύπτουν από την εκσκαφή του φυσικού εδάφους ή από την εναπόθεση εδαφικού υλικού. Η ευστάθεια ενός τεχνητού πρανού εξασφαλίζεται με την χρησιμοποίηση έργων αντιστήριξης.

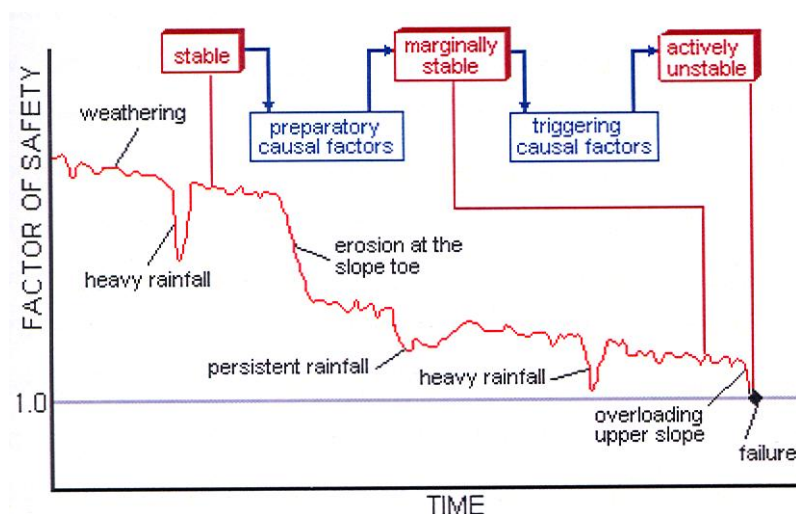
### 2.2 ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ευστάθεια των πρανών διακρίνονται από τον Chandler (1987) σε :

- ↳ **εξωτερικούς**, όπως είναι η διάβρωση, η βροχόπτωση, ο σεισμός και η διαμορφωμένη κλίση

↳ **εσωτερικούς**, όπως είναι η εσωτερική διάβρωση λόγω κυκλοφορίας του νερού, ο υπόγειος υδροφόρος, το είδος του εδάφους και η τεκτονική δομή.

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 κατολίσθησης και συμβολίζεται με F (F.O.S.-Factor of Safety).



Διάγραμμα 2.1: Γραφική παράσταση συντελεστή ασφαλείας συναρτήσει του χρόνου

Με άλλα λόγια, ο συντελεστής ασφαλείας ενός πρανού, κατά μήκος μιας εν δυνάμει επιφάνειας διάρρηξης, είναι το πηλίκο των αντιδρώντων δυνάμεων (Resisting Forces ή  $F_r$ ) προς τις δρώσες δυνάμεις (Driving Forces ή  $F_d$ ). Οι αντιδρώσες δυνάμεις εξαρτώνται από τη συνολικά αναπτυσσόμενη τριβή κατά μήκος της υποψήφιας προς διάρρηξη επιφάνειας, η οποία εξαρτάται από τη συνοχή  $c$ , τη γωνία εσωτερικής τριβής  $\phi$  και την πίεση του νερού των πόρων  $u_w$ .

$$F = \frac{\Delta \text{υνάμεις} - \text{Ροπές} \cdot \text{Αντιδρώσες}}{\Delta \text{υνάμεις} - \text{Ροπές} \cdot \text{Δρώσες}} \quad (2.1)$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται με τις μεθόδους:

- Μέθοδος Culmann
- Μέθοδος του κύκλου τριβής



- Μέθοδος των λωρίδων
- Νομογραφήματα Hook & Bray.

**Με την επίδραση της βλάστησης, ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:**

$$F = \frac{(c' + c'_R) + \{[(\gamma z - \gamma_w h_w) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta\} \tan \phi' + T \cos \theta}{[(\gamma z + W) \sin \beta + D] \cos \beta} \quad (2.2)$$

όπου:

$c'$ : συνοχή εδάφους (kPa)

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

$W$ : επιπλέον τάση εξαιτίας του βάρους της βλάστησης (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$ : ειδικό βάρος νερού (9.8 kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma$ : ειδικό βάρος εδάφους (kN/m<sup>3</sup>)

$z$ : 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)

$\beta$ : γωνία πρανούς (°)

$\theta$ : γωνία μεταξύ ριζών και επιφάνειας ολίσθησης (°)

$\phi'$ : ενεργός γωνία τριβής του εδαφικού υλικού (°)

**Χωρίς την επίδραση της βλάστησης ο συντελεστής ασφαλείας δίνεται από τον τύπο:**

$$F = \frac{c' + (\gamma z - \gamma_w h_w) \cos^2 \beta \tan \phi'}{\gamma z \sin \beta \cos \beta} \quad (2.3)$$

όπου:

$c'$ : ενεργή συνοχή εδάφους (kPa)

$\gamma$ : ειδικό βάρος εδάφους (kN/m<sup>3</sup>)

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

$\beta$ : γωνία πρανούς (°)

$\gamma_w$ : ειδικό βάρος νερού (9.8 kN/m<sup>3</sup>)

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

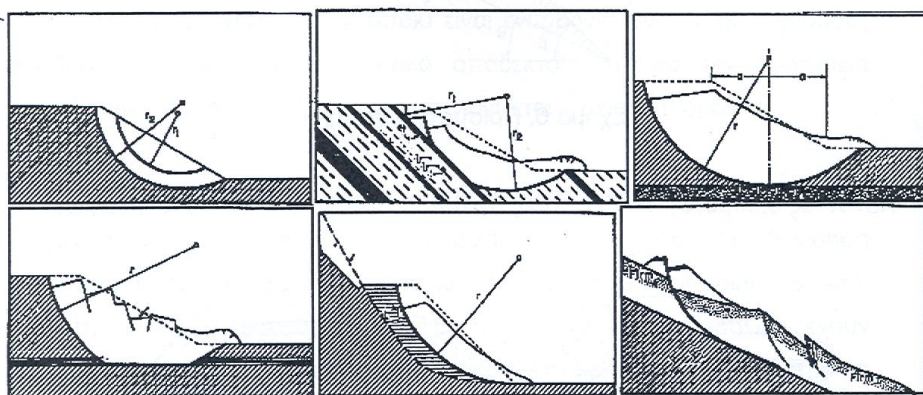
$\phi'$ : ενεργός γωνία τριβής του εδαφικού υλικού (°)

Στην περίπτωση που ο **συντελεστής ασφαλείας** είναι  $F=1.0$  τότε μιλάμε για οριακή ισορροπία- ευστάθεια πρανούς. Συντελεστής μικρότερος του 1.0 σημαίνει ότι το πρανές δεν είναι ευσταθές και η εκδήλωση κάποιας κατολίσθησης είναι δυνατή. Ένα φυσικό πρανές δεν μπορεί να έχει συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1.0, αυτό θα σήμαινε

ότι το πρανές θα είχε ήδη κατολισθήσει για να φτάσει σε μια μορφή που θα είχε συντελεστή ασφαλείας μεγαλύτερο ή ίσο του 1.0. κατά τον σχεδιασμό των τεχνικών έργων με διαμόρφωση πρανών ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να έχει κάποια ελάχιστη τιμή η οποία είναι εναρμονισμένη με τις ισχύουσες προδιαγραφές/κανονισμούς. Γενικά αποδεκτοί συντελεστές ασφαλείας για την ευστάθεια των πρανών είναι 1.4-1.5 και 1.0 αν υπολογίζεται η σεισμική δράση.

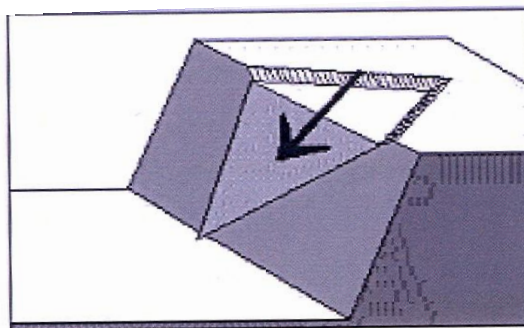
Οι συνήθειες μέθοδοι υπολογισμού βασίζονται σε μία κυλινδρική-πρισματική επιφάνεια ολίσθησης θεωρώντας ουσιαστικά άπειρο μήκος. Η θεώρηση αυτή ονομάζεται «κατάσταση επίπεδων παραμορφώσεων». Στην πραγματικότητα οι αστοχίες φυσικών και τεχνητών πρανών έχουν περιορισμένο μήκος. Έτσι υπάρχει μια πρόσθετη διατμητική αντοχή από τα άκρα της επιφάνειας ολίσθησης η οποία αμελείται στους διδιάστατους υπολογισμούς και αυξάνει τον πραγματικό συντελεστή ασφαλείας του πρανούς.

Η κυκλική και μη κυκλική μορφή αστοχίας εντάσσονται στις κυλινδρικές αστοχίες ή περιστροφικές κατολισθήσεις. Είναι οι πιο συνηθισμένες μορφές κατολίσθησης του εδάφους όταν δεν παρουσιάζονται ασυνέχειες ή έντονη διαστρωμάτωση. Οι κυκλικές μορφές εμφανίζονται σε ομογενή εδάφη ενώ οι μη κυκλικές σε μη ομογενή.



Εικόνα 2.1: Σύνθετες μορφές αστοχίας

Οι σύνθετες μορφές όπως και οι στρωματοειδείς ολισθήσεις παρουσιάζονται όταν η ολίσθηση επηρεάζεται από κάποιο υποκείμενο στρώμα αυξημένης αντοχής ή από κάποια άλλη ασυνέχεια.

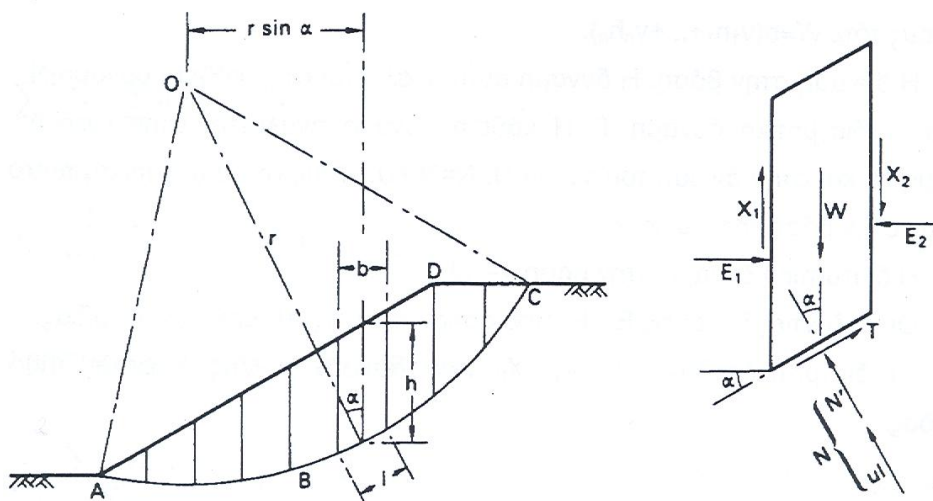


Εικόνα 2.2: Σφηνοειδή μορφή ολίσθησης

Πρισματική μορφή αστοχίας παρουσιάζεται σε σχεδόν κατακόρυφα πρανή τα οποία διαθέτουν συνοχή και είναι εν γένει βραχώδη. Η πρισματική μορφή αστοχίας μπορεί να παρουσιαστεί υπό τη μορφή σφήνας κυρίως σε βραχώδη πρανή ειδικά όταν προϋπάρχουν ασυνέχειες στο βράχο.

### 2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.

Η συνηθέστερη μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας, είναι η **μέθοδος των λωρίδων**. Στην εικόνα 2.3 που ακολουθεί βλέπουμε ένα πρανές με μια κυκλική μορφή αστοχίας. Ο όγκος που αστοχεί χωρίζεται σε λωρίδες ώστε να γίνουν πιο εύκολοι οι υπολογισμοί.



Εικόνα 2.3: Μέθοδος 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  $\alpha$  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,  $W = \gamma \cdot b \cdot h$  ( $\gamma_s$  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 άνωση του νερού  $U$ ,  $N = N' + U$ ,  $U = ul$ , 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  $O$ :

$$\sum Tr = \sum Wr \sin \alpha \quad (2.4)$$

Ο συντελεστή ασφαλείας έναντι ολίσθησης μπορεί να υπολογιστεί από την ασκούμενη διατμητική τάση στο τόξο **A-B-C** ( $\tau_m$ ) και τη διατμητική αντοχή που μπορεί να ενεργοποιηθεί σε αυτό το τόξο ( $\tau_f$ ).

Ο συντελεστής ασφαλείας έναντι ολίσθησης είναι λοιπόν:  $F = \tau_m / \tau_f$  (2.5)

Η πιο πάνω σχέση γίνεται:  $T = \tau_m l = \left( \tau_f / F \right) l$  (2.6)

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

Χρησιμοποιώντας τις διακριτές λωρίδες εφαρμόζουμε τη σχέση (1.8) στη σχέση (1.10):

$$\sum \frac{\tau_f}{F} l = \sum W \sin a \quad (2.7)$$

οπότε:  $F = \frac{\sum \tau_f l}{\sum W \sin a}$  (2.8)

Χρησιμοποιώντας τις ενεργές τάσεις:  $F = \frac{c' L_{AC} + \sum (N - ul) \tan \phi'}{\sum W \sin a}$  (2.9)

Επειδή με την παραπάνω προσέγγιση γίνονται κάποιες παραδοχές ώστε να αρθεί η υπερστατικότητα, αναζητείται μια πιο ακριβής λύση. Μια είναι η λύση του Fellenius (Σουηδική μέθοδος) και μία άλλη η λύση του Bishop (ακριβής και προσεγγιστική) η οποία χρησιμοποιείται συνήθως.

### ↳ Μέθοδος 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 0. 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 προς τη μέρια της ασφάλειας. (η μέθοδος Bishop υποτιμά τον συντελεστή ασφαλείας). Σύμφωνα με την εικόνα 2.3 για να ικανοποιείται η ισορροπία, οι διατμητικές δυνάμεις στη βάση σε σχέση με τη διατμητική αντοχή είναι:

$$T = \frac{1}{F}(c'l + N \tan \phi') \quad (2.10)$$

Θεωρούμε εξίσωση ισορροπίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ώστε να μην συμμετέχουν οι οριζόντιες δυνάμεις  $E_1, E_2$ .

$$W = N' \cos a + ul \cos a + \frac{c'l}{F} \sin a + \frac{N'}{F} \tan \phi' \sin a \quad (2.11)$$

οπότε 
$$N' = \frac{W - \frac{c'l}{F} \sin a - ul \cos a}{\cos a + \frac{\tan \phi' \sin a}{F}} \quad (2.12)$$

Αντικαθιστώντας το  $l$  με  $b \sec a$  και χρησιμοποιώντας την σχέση (2.9) καταλήγουμε στην ακόλουθη έκφραση του συντελεστή ασφαλείας:

$$F = \frac{1}{\sum W \sin a} \sum [(c'b + (W - ub) \tan \phi')] \frac{\sec a}{1 + \frac{\tan a \tan \phi'}{F}} \quad (2.13)$$

Εισάγοντας την έννοια του «λόγου πίεσης πόρων»  $r_u$ :

$$F = \frac{1}{\sum W \sin a} \sum [(c'b + W(1 - r_u) \tan \phi')] \frac{\sec a}{1 + \frac{\tan a \tan \phi'}{F}} \quad (2.14)$$

Η μέθοδος Bishop είναι ιδανική για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας με H.Y. και χρησιμοποιείται ευρύτατα.

---

### 3. ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

---

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον όρο **Κατολισθήσεις** ονομάζουμε τις «μετακινήσεις εδαφικών μαζών και βραχωδών μαζών ασχέτως μορφής, εκτάσεως και γενεσιουργών αιτίων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε φυσικές επιφάνειες με απότομες κλίσεις και σε πρηνή ορυγμάτων, υπό την επίδραση της βαρύτητας, άλλοτε απότομα με καταστροφικές συνέπειες και άλλοτε με μικρή ταχύτητα» (Ι. Κουμαντάκης, 1984). Ο Cruden (1991), όρισε την κατολίσθηση ως «την προς τα κάτω και έξω κίνηση μιας μάζας βράχου, κορημάτων ή γαιών σε ένα πρηνές».

Η εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων αποτελεί απόρροια ελλιπούς ευστάθειας των πρηνών έναντι στατικών και σεισμικών φορτίων. Ένα πρηνές μπορεί να αστοχήσει υπό την επίδραση γεωλογικών, μορφολογικών, φυσικών ή ανθρωπογενών παραγόντων, έχοντας συχνά δυσμενείς επιπτώσεις στην οικονομία μιας περιοχής εξαιτίας της πρόκλησης καταστροφών σε οικισμούς καθώς και σε τεχνικά έργα. Το παρελθόν είναι πλούσιο από περιπτώσεις όπου οικισμοί καταστράφηκαν ολοσχερώς, λόγω αστοχίας της πλαγιάς στην οποία βρίσκονταν κτισμένοι, μετά από μια ισχυρή βροχόπτωση ή ένα σεισμό, με συνέπεια ακόμα και την απώλεια ανθρώπινων ζώων. Επιπλέον, αστοχία σε τεχνικό έργο ορύγματος ή επιχώματος ενδέχεται να προκαλέσει διακοπή της κυκλοφορίας σ' ένα οδικό δίκτυο, με συνέπεια τη διαίρεση ενός νομού στα δύο.

Αν η διατμητική αντοχή των πετρωμάτων εξισορροπεί την τάση προς κατολίσθηση των εδαφικών μαζών που βρίσκονται πίσω από φυσικές κλιτύες ή τεχνητά πρηνή, τότε το πρηνές ή η κλιτύς διατηρούνται σταθερά, διαφορετικά κατολισθαίνουν. Οι μόνες μετακινήσεις εδαφικών μαζών που δεν υπάγονται στις κατολισθήσεις είναι οι καθιζήσεις. Αυτές οφείλονται είτε σε συμπύκνωση πετρωμάτων λόγω επιδράσεως εξωτερικών φορτίων, είτε σε αφαίρεση από το υπέδαφος μέρους των συστατικών του δια διαλύσεως (π.χ. της γύψου), είτε δι' αφαιρέσεως νερού και πετρελαίου, με αντλήσεις .

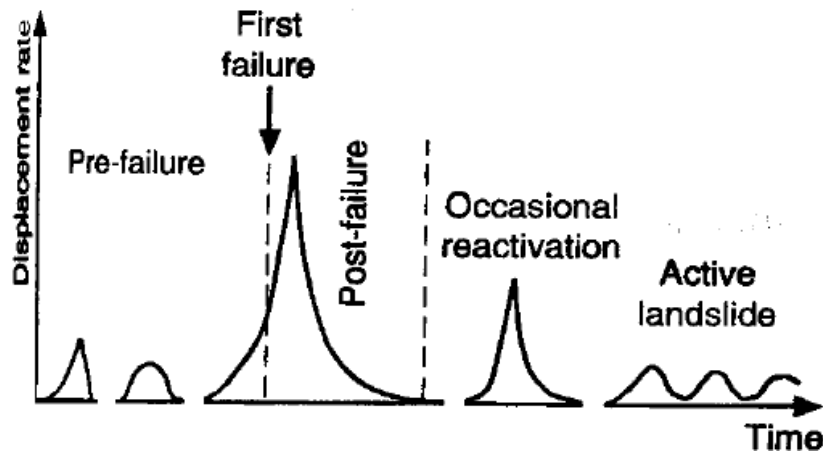
Στις καθιζήσεις η κίνηση είναι κατακόρυφη, ενώ στις κατολισθήσεις η μετακίνηση αναλύεται σε δύο συνιστώσες, κατακόρυφη και οριζόντια. Συνήθως η πλάγια μετατόπιση στις κατολισθήσεις είναι σημαντική και το μέγεθος της εξαρτάται αφενός από τη φυσική κατάσταση των μετακινούμενων υλικών και αφετέρου από την κλίση των επιφανειών από τις οποίες γίνεται η απόσπαση.

Οι κατολισθήσεις επειδή προκαλούν ανακατατάξεις γεωλογικών μαζών και μεταβολές της μορφολογίας της γήινης επιφάνειας, αποτελούν γεωλογικά φαινόμενα, ακόμη και όταν στην εκδήλωσή τους έχει σταθεί αφορμή η ανθρώπινη επενέργεια. Τα τεχνικά έργα λοιπόν, και οι κατολισθήσεις συνδέονται πολλές φορές με σχέση αιτίου προς αποτέλεσμα. Επομένως, για τους μελετητές και τους κατασκευαστές Μηχανικούς οι κατολισθήσεις αποτελούν φαινόμενα εξαιρετικού ενδιαφέροντος, δεδομένου ότι οι συνέπειες τους μπορεί να είναι καταστρεπτικές για τα υπάρχοντα ή για τα υπό εκτέλεση τεχνικά έργα.

### **3.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ**

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, 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 πρηνές. Το στάδιο μετά την αστοχία περιλαμβάνει μετακίνηση της εδαφοβραχομάζας που υπεισέρχεται στην κατολίσθηση μέχρι να σταματήσει και κατά το στάδιο επανενεργοποίησης, η εδαφοβραχομάζα ολισθαίνει επί μιας ή πολλών διατμητικών επιφανειών (Διάγραμμα 3.1).





Διάγραμμα 3.1: 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 κλιτύς και από το πάχος της μάζας που αποκολλάται και μετακινείται. Το πάχος αυτό εξαρτάται από τη θέση της επιφάνειας ολισθήσεως.

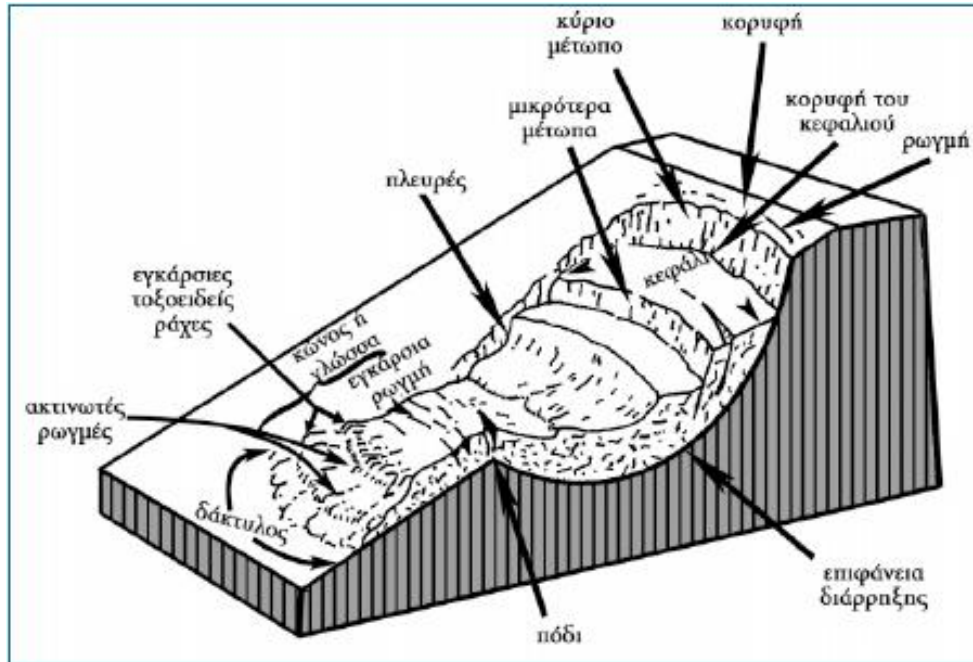
Συνήθως το μήκος των κατολισθήσεων είναι μεγαλύτερο από το πλάτος τους. Σε περίπτωση, όμως, που το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας ολισθήσεως εμπίπτει εντός στρώσεως χονδρόκοκκης ιλύος ή άμμου η οποία διαχωρίζει δύο στρώματα αργίλου, το πλάτος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μήκος της κατολίσθησης.

Τα διάφορα μέρη που διακρίνονται σε μια τυπική κατολίσθηση είναι:

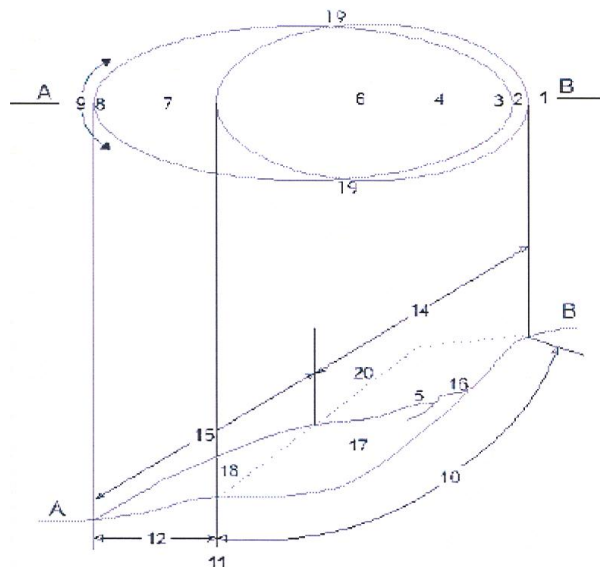
- **κόγχη ή ρίζα**, αποτελεί την εκτομή της κλιτύς από την οποία διαχωρίστηκε η μάζα που κατολίσθησε από το σταθερό τμήμα
- **επιφάνεια ολισθήσεως**, είναι εκείνη πάνω στην οποία λαμβάνει χώρα η μετακίνηση των μαζών που κατολίσθησαν
- **σώμα της κατολίσθησης**, αποτελεί τη μάζα των υλικών που μετακινήθηκαν
- **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

- **πόδας της κατολίσθησης**, είναι το ακραίο, χαμηλότερο συνήθως τμήμα του κώνου.

Τα παρακάτω σχήματα και ο πίνακας που ακολουθούν, παρουσιάζουν τα διάφορα μέρη της κατολίσθησης και τους ορισμούς τους και δίνουν μια ολοκληρωμένη άποψή της.



Εικόνα 3.1: Ιδεατή σύνθετη ολίσθηση- ροή χώματος (Varnes, 1978)



Εικόνα 3.2: Κάτοψη μιας τυπικής κατολίσθησης- Οι αριθμοί αναφέρονται στον πίνακα 3.1 που ακολουθεί (IAEG Commission of Landslides, 1990)

**Πίνακας 3.1: Ορισμοί των χαρακτηριστικών κατολίσθησης**

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 πρανές 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	Πτερόγια	Αμετακίνητο υλικό, δίπλα στις πλευρές της επιφάνειας θραύσης (20). Για την περιγραφή των πτερυγίων προτιμώνται οι ενδείξεις της πυξίδας, διαφορετικά περιγράφονται ως δεξιά ή αριστερά έχοντας ως στάση τη στέψη (1).
20	Αρχική Επιφάνεια Εδάφους	Επιφάνεια της πλαγιάς που υπήρχε, πριν αρχίσει η κατολίσθηση.

**Πηγή: IAEG Commission of Landslides, 1990**

Η κινηματική μιας κατολίσθησης, πως δηλαδή η κίνηση διανέμεται μέσα στη μετατιθέμενη μάζα, είναι ένα από τα κύρια κριτήρια για την κατηγοριοποίηση των κατολισθήσεων. Παρόλα αυτά, ίδιας σημασίας είναι και η χρήση της σαν κύριο κριτήριο προσδιορισμού της καταλληλότερης αντιμετώπισης.

Κάθε κατηγορία από αυτές που αναφέρθηκαν έχει έναν αριθμό από κοινές μορφές, οι οποίες συχνά συναντώνται στην ύπαιθρο και περιγράφονται σύντομα από σύνθετες κατολισθήσεις, των οποίων οι αρχικές ή οι τελικές κινήσεις ήταν αυτού του τύπου. Οι περιγραφές αυτές δείχνουν πώς εξελίσσονται οι κατολισθήσεις κάθε τύπου.

### 3.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Για την ταξινόμηση των κατολισθήσεων, έχουν γίνει από πολλούς ερευνητές –κατά καιρούς- διάφορες προτάσεις, οι οποίες θεωρήθηκε ότι ήταν απαραίτητες στην περιγραφή, στην έρευνα και στην αντιμετώπιση των φαινομένων, αλλά και γενικότερα στην ευχερέστερη επικοινωνία μεταξύ των ασχολουμένων με το αντικείμενο. Σε κάθε μία περίπτωση ταξινόμησης, δίδεται ιδιαίτερη σημασία και έμφαση σε κάποιον ή κάποιους από τους παράγοντες της κατολίσθησης, όπως στον τύπο, την ταχύτητα, την ηλικία και τους λόγους μετακίνησης, στο είδος των υλικών, στη γεωμετρία του φαινομένου σε σχέση ή όχι με τη γεωλογική δομή και τη μορφολογία. Όπως είναι φυσικό, οι πληρέστερες ταξινομήσεις είναι αυτές, οι οποίες περιλαμβάνουν όσο το δυνατό περισσότερους παράγοντες και γι' αυτό το λόγω έχουν διατηρηθεί και επικρατήσει τόσο στη διεθνή βιβλιογραφία όσο και στην καθημερινή πρακτική.

Το πρώτο σύστημα ταξινόμησης, ήρθε το 1885 από τον Ελβετό A Heim, στη συνέχεια το 1939 από τον Bay, το 1956 από τον Penta, το 1959 από τον Desio, ο οποίος πρότεινε ένα σύστημα, που θέσπισε και η Διεθνής Επιτροπή για τη Μελέτη της Υδραυλικής Διευθετήσεως και Προστασίας του Εδάφους (1971) και το 1978 από τον Varnes.

Η ταξινόμηση κατά **VARNES** θεωρείται μία από τις πληρέστερες ταξινομήσεις που έχουν προταθεί. Στην ταξινόμηση αυτή, λαμβάνονται υπόψη αρκετοί παράγοντες όπως,

το είδος της κίνησης, το είδος των υλικών που μετασχηματίστηκαν, η μορφή της κίνησης.

Σύμφωνα με αυτήν λοιπόν, οι κατολισθήσεις διαχωρίζονται σε 5 κατηγορίες:

- **τις καταπτώσεις (falls)**, πρόκειται για αποσπάσεις μαζών διαφόρων μεγεθών από απότομα πρανή και στη συνέχεια μετακίνηση λόγω βαρύτητας με τη μορφή ελεύθερης πτώσης, αναπηδήματος και κύλισης.
- **ανατροπές (topples)**, πρόκειται για πτώσεις μαζών, στις οποίες η αρχική κίνηση περιλαμβάνει μια ανατροπή, δηλαδή μια περιστροφή γύρω από έναν άξονα, ο οποίος ευρίσκεται κάτω ή στο κάτω μέρος της μάζας.
- **ολισθήσεις (slides)**, μια ολίσθηση είναι μια κίνηση, προς τα κάτω, εδαφικής ή βραχώδους μάζας, που συμβαίνει κυρίως κατά επιφάνειες αστοχίας ή σε σχετικά λεπτές ζώνες έντονης διατμητικής τάσης.
- **εξαπλώσεις (spreads)**, η εξάπλωση ορίζεται ως μια επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους ή μιας βραχώδους μάζας συνδυασμένης με μια γενική υποχώρηση της τεμαχισμένης μάζας, του συνεκτικού υλικού, μέσα σε μαλακότερο υλικό.
- **ροές (flows)**, η ροή είναι μια συνεχής κίνηση στον χώρο, στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης έχουν μικρή διάρκεια ζωής, είναι κοντά η μία στην άλλη και συνήθως δεν διατηρούνται (Μ.Σακελλαρίου, 2005).

Σύμφωνα με τον Dikau (1996), όλες οι κατολισθήσεις περιλαμβάνουν περισσότερους από έναν τύπους κινήσεων οι οποίοι είτε δρουν ταυτόχρονα, σε διαφορετικά τμήματα της επιφάνειας θραύσης, είτε εξελίσσονται προς τα κάτω, είτε με τον χρόνο, εξελίσσονται σε διαφορετικές διαδικασίες.

### 3.4 ΥΛΙΚΟ- ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Το υλικό που παίρνει μέρος στις κατολισθήσεις μπορεί να είναι είτε βράχος-μια σκληρή μάζα, η οποία ήταν άθικτη και στην αρχική της θέση, πριν από την αρχή της κίνησης- είτε έδαφος- μια συνάθροιση από στερεά τεμάχια, συνήθως από ορυκτά και βράχους, 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.

Το έδαφος χωρίζεται σε **χώμα (earth)** και **κατάλοιπα (debris)**:

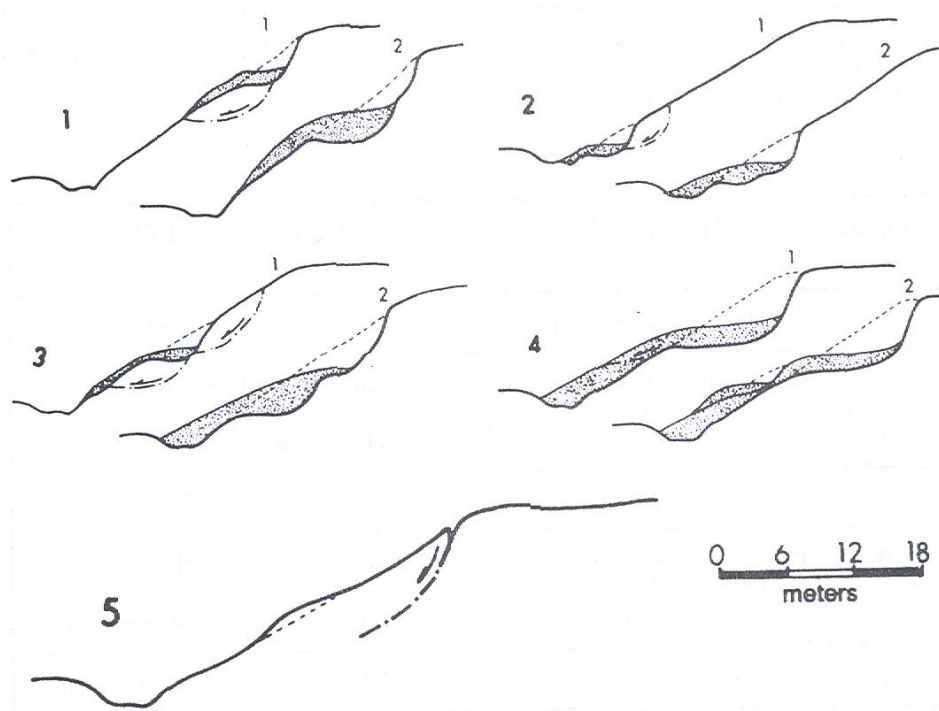
- Ο όρος **χώμα** περιγράφει υλικό στο οποίο το 80% ή περισσότερο από τα τεμάχια είναι μικρότερα από 2 mm (το άνω όριο των υλικών, που αναγνωρίζονται ως άμμος).
- Τα **κατάλοιπα** περιέχουν μια σημαντική ποσότητα από τραχύ υλικό: 20%-80% από τα τεμάχια είναι μεγαλύτερα από 2 mm και τα υπόλοιπα μικρότερα από 2 mm. Αυτός ο διαχωρισμός των εδαφών είναι χονδρικός, αλλά επιτρέπει την αναγνώριση των υλικών από μία επιτόπια έρευνα.

### 3.5 ΣΤΑΔΙΟ ΔΡΑΣΗΣ

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

- **Ενεργές κατολισθήσεις** είναι εκείνες οι οποίες δρουν πρόσφατα. Περιλαμβάνουν κινήσεις πρώτης φοράς και επανενεργοποιήσεις. Μία κατολίσθηση, η οποία είναι πάλι ενεργός μετά από περίοδο κατά την οποία είναι ανενεργός, ονομάζεται **επανενεργοποιημένη**. Αυτές οι κατολισθήσεις γενικά κινούνται κατά προύπαρχουσες επιφάνειες, των οποίων οι παράμετροι αντοχής πλησιάζουν τις παραμένοντες ή τελικές τιμές. Οι κατολισθήσεις, οι οποίες έχουν κινηθεί μέσα στον τελευταίο ετήσιο κύκλο των εποχών, αλλά που δεν κινούνται στο παρόν, καλούνται **αδρανείς**.
- **Ανεργές κατολισθήσεις** είναι εκείνες οι οποίες κινήθηκαν για τελευταία φορά, πριν από περισσότερο από έναν ετήσιο κύκλο εποχών. Αυτή η κατάσταση μπορεί να διαιρεθεί σε επί μέρους κατηγορίες. Αν οι λόγοι που προκαλούν κατολίσθηση παραμένουν ορατοί, η κατολίσθηση είναι **λανθάνουσα**. Αλλά αν 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 οχθών ή άλλα μέτρα έχουν σταματήσει την κίνηση, η κατολίσθηση περιγράφεται ως **σταθεροποιημένη**.

- **Αρχαίες ή απολιθωμένες**, καλούνται οι κατολισθήσεις που παραμένουν ορατές στο τοπίο για χιλιάδες έτη, αφού κινήθηκαν ή σταθεροποιήθηκαν. Ίσως γιατί αποτελούν τους σκελετούς των κάποτε ενεργών κινήσεων. Όταν οι κατολισθήσεις καλυφθούν από άλλες αποθέσεις, αναφέρονται σαν **θαμμένες**, ενώ εκείνες οι οποίες έχουν δημιουργηθεί καθαρά κάτω από διαφορετικές γεωμορφικές ή κλιματικές συνθήκες, ίσως χιλιάδες έτη πριν, λέγονται **relief**.



Εικόνα 3.3: Μετάθεση κατολίσθησης σε διαφορετικές φάσεις της δράσης

### 3.6 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ

Η ταχύτητα κίνησης αποτελεί ένα επιπλέον κριτήριο για τον διαχωρισμό των κατολισθήσεων, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί μια σημαντική παράμετρο της καταστροφικότητας των κατολισθήσεων.

Ο Varnes το 1978 ήταν ο πρώτος που πρότεινε μια κλίμακα του ρυθμού κίνησης των κατολισθήσεων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τροποποιημένη της



αρχικής πρότασης του Varnes. Η συγκεκριμένη κλίμακα έχει επτά τάξεις ταχύτητας, ενώ τα διαστήματα της αυξάνονται σε πολλαπλάσια του 100 από mm/year έως κάποια m/s.

Πίνακας 3.2: Προτεινόμενη κλίμακα ταχύτητας κατολισθήσεων

<i>ΤΑΞΗ</i>	<i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ</i>	<i>ΤΑΧΥΤΗΤΑ (mm/s)</i>	<i>ΤΥΠΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ</i>
<i>1</i>	Εξαιρετικά αργή	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$> 16 \text{ mm} \cdot \text{year}$
<i>2</i>	Πολύ αργή	$5 \cdot 10^{-7}$	16 mm/year
<i>3</i>	Αργή	$5 \cdot 10^{-5}$	1.6 m/year
<i>4</i>	Μέτρια	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/month
<i>5</i>	Γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1}$	1.8 m/h
<i>6</i>	Πολύ γρήγορη	50	3 m/min
<i>7</i>	Εξαιρετικά γρήγορη	$> 50 \cdot 10^{-3}$	$> 5 \text{ m/s}$

Πηγή: Varnes, 1978

### 3.7 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΟΙ ΟΠΟΙΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥΝ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων προκαλείται από την συνδυασμένη δράση πολλών και διαφορετικών μεταξύ τους παραγόντων. Όλες οι φυσικές διεργασίες καθώς και οι ανθρώπινες ενέργειες που μπορούν να ταραξούν την ισορροπία μιας φυσικής κλιτύος ή ενός τεχνητού πρανού, πρέπει να απαριθμηστούν μεταξύ των αιτιών των κατολισθήσεων. Μερικοί από τους παράγοντες επιδρούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι επιδρούν περιοδικά και αποτελούν το έναυσμα για την εκδήλωση του φαινομένου. Συμφωνά με το UNESCO Working Party on World Landslide Inventory WP/WLI 1990, δεν είναι σωστή η χρήση του όρου αίτια κατολισθήσεων αλλά συνθήκες και διεργασίες οι οποίες οδηγούν στην αλλαγή του καθεστώτος ισορροπίας του πρανού.

Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- οι συνθήκες εδάφους
- οι γεωμορφολογικές διαδικασίες
- οι φυσικές διεργασίες
- οι ανθρωπογενείς παράγοντες (Popescu M. 1996)

Αναλυτικότερα οι παράγοντες ελέγχου του φαινομένου είναι οι εξής:



### **1. Η δομή του γεωλογικού υποβάθρου και η τεκτονική της περιοχής.**

Η δομή του γεωλογικού υποβάθρου αφορά τη θέση των στρωμάτων στο υπέδαφος καθώς και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Στο σημείο αυτό γίνεται φανερό ότι 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 πρηνές μπορεί να επηρεάσει περισσότερο την εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων.

### **2. Το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της περιοχής.**

Η επίδραση αυτού του παράγοντα στις κατολισθήσεις οφείλεται στο γεγονός ότι μερικά είδη εδαφών είναι περισσότερο επιρρεπή σε κατολισθήσεις, όπως ο φλύσχης με στοιχεία αργίλου ή τα αργιλικά εδάφη.

Μια πρώτη λιθολογική διάκριση των πετρωμάτων από την άποψη της ευκολίας ή της δυσκολίας στο να κατολισθήσουν, θα τα ταξινομούσε σε πετρώματα μη συνεκτικά και συνεκτικά. Πιο λεπτομερειακά, μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις κατηγορίες πετρωμάτων, σε κάθε μια από τις οποίες αντιστοιχούν διάφορες συνθήκες.

**α) Συνεκτικά:** Τα πετρώματα αυτά άσχετα από συνθήκες κορεσμού παραμένουν συνεκτικά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα συμπαγή βραχώδη πετρώματα που δεν έχουν διαρρήξεις.

**β) Ψευδοσυνεκτικά:** Σ' αυτά ο βαθμός συνεκτικότητας εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό. Είναι συνεκτικά όταν είναι στεγνά ή με μικρή περιεκτικότητα υγρασίας, αλλά όταν διαποτιστούν με νερό μεταπίπτουν σε μη συνεκτικά πετρώματα. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται η άργιλος, η ίλυς και όλα τα πετρώματα που η συνδετική τους ύλη είναι αργιλική ή ιλυούχος.

**γ) Ημισυνεκτικά:** Εδώ ανήκουν πετρώματα που η συνδετική τους ύλη είναι είτε κακής ποιότητας είτε ελλιπής, όπως οι μολάσσεις και τα πολύ εξαλλοιωμένα πετρώματα.

**δ) Μη συνεκτικά:** Πετρώματα αποτελούμενα από ελεύθερα και ασύνδετα στοιχεία, συσσωρευμένα το ένα πάνω στο άλλο, όπως οι χάλικες, οι κροκάλες, οι άμμοι.

### **3. 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 ένταση του. Η επίδραση του νερού συνίσταται είτε στο γεγονός ότι αυξάνεται η ποσότητα νερού στους πόρους του υλικού, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τάσεις στο εσωτερικό των εδαφών, είτε να παρασύρονται κόκκοι υλικού από την επιφάνεια και με τη μορφή ροής να εγκαθίστανται και πάλι σε περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο.

### **4. Η σεισμικότητα, η ηφαιστειακή δραστηριότητα και η κινητικότητα του υπόβαθρου.**

Είναι εύκολα κατανοητό ότι οι σεισμικές δονήσεις μπορούν πολλές φορές να αποτελέσουν την αφορμή για την εκδήλωση μιας κατολίσθησης, προσθέτοντας στις ήδη ασταθείς μάζες την επιπλέον φόρτιση που τις ωθεί στην ολίσθηση. Κατολισθήσεις συμβαίνουν πολύ συχνά και στα πρανή ρηγμάτων, όταν αυτά ενεργοποιούνται μετά από μια σεισμική δόνηση. Επίσης θα πρέπει να αναφερθούμε στην επικινδυνότητα που επιδεικνύουν περιοχές με νεοτεκτονική δραστηριότητα. Μέσω αυτών των εξελίξεων μπορούν να ανυψωθούν και να τοποθετηθούν με κλίση εδαφικά στρώματα. Οι μεταβολές αυτές είναι δυνατό να ταράζουν οριακές ισορροπίες ώστε να προκληθεί κατολίσθηση.

## **3.8 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ**

Όσον αφορά στους μηχανισμούς ενεργοποίησης των κατολισθητικών φαινομένων χωρίζονται σε :

**A) Μηχανισμούς ενεργοποίησης, οι οποίοι 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 βροχόπτωσης (επιρροή του κλίματος).

- ✓ **Αύξηση της κλίσεως των πρανών** μπορεί να γίνει είτε από φυσικούς παράγοντες, είτε από ανθρώπινη επέμβαση.
- ✓ **Αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου**, η οποία μπορεί να γίνει είτε από φυσικές διεργασίες είτε από τεχνικές παρεμβάσεις..

**B) Μηχανισμούς 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 αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων**, γνωστή και ως ουδέτερη τάση  $u_w$
- ✓ **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 εκτομής του πρανούς**

### **3.9 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΠΙΡΡΕΠΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ**

Το είδος της τοπογραφίας κάθε περιοχής παρέχει μια βάση για το διαχωρισμό των εδαφών και συνεπώς την αναγνώριση αυτών που είναι περισσότερο επιρρεπείς στις κατολισθήσεις.

Τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών χρησιμεύουν στην ανίχνευση σημείων ή περιοχών οι οποίες επιδεικνύουν επιδεκτικότητα σε κατολισθητικά φαινόμενα. Τυπικές περιοχές για την εκδήλωση κατολισθήσεων αποτελούν οι απότομες πλαγιές, γκρεμοί και βράχια απότομα τα οποία βρίσκονται κάτω από το καθεστώς της διάβρωσης και της αποσάθρωσης, περιοχές συγκέντρωσης νερού, καθώς και ρηξιγενείς ζώνες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατολισθήσεις δε συμβαίνουν πάντα σε επιρρεπείς περιοχές, αν δεν επικρατούν συγκεκριμένες συνθήκες.

Οι κατολισθήσεις είναι συνηθισμένες σε συγκεκριμένα είδη εδαφών όπως σε μανδύες αποσάθρωσης των πετρωμάτων, στα κορήματα και στα προϊόντα διάβρωσης από το νερό ή τον άνεμο ενώ είναι πολύ σπάνιες σε άλλα. Οι διαφορές υποδιαιρέσεις βασίζονται σε

τοπογραφικά χαρακτηριστικά αλλά στην περίπτωση των λοφωδών περιοχών βασίζονται και στις μορφές αποστράγγισης.

### 3.10 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

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) η κατολίσθηση στο Μικρό Χωριό Καρπενησίου, που συνέβη το 1963 και προκάλεσε το θάνατο 13 ανθρώπων και την ολική καταστροφή του χωριού,
- (ii) η κατολίσθηση που συνέβη το 1995 κατά μήκος της εθνικής οδού Αθηνών–Λαμίας στο ύψος της Μαλακάσας, που δυσχέρανε τις οδικές μεταφορές, προκαλώντας ζημιά στην εθνική οικονομία της τάξης άνω του 1 δις δρχ,
- (iii) 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,



Εικόνα 3.4: Καταστροφή οδικού δικτύου από κατολίσθηση στη Νεμέα Κορινθίας (Eurokinissi, 2003).

- (iv) οι κατολισθήσεις (λασποροές) που συνέβησαν το Σεπτέμβριο του 2006 κατά μήκος της εθνικής οδού Αθηνών – Πατρών στο ύψος της Παναγοπούλας και του Διακοφτού, μετά από έντονες βροχοπτώσεις.

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 (φλύσχης).

### **3.11 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΧΑΙΤΙΣΗΣ**

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 κατολίσθησης.

Σχεδόν σε κάθε περίπτωση, της κατολίσθησης προηγούνται αρκετά πρόδρομα φαινόμενα όπως είναι 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 μικροδονήσεων 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 από 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 (π.χ. μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, αποφυγή επιφανειακής και υπόγειας διάβρωσης, φόρτισης του σχηματισμού υπό το βάρος επιφανειακά συγκεντρωμένων υδάτων κλπ).

Άλλα μέτρα περιλαμβάνουν τη διαμόρφωση του πρανούς (π.χ περιορισμός κλίσεων, ελάφρυνση ανώτερου τμήματος κατολισθαίνουσας μάζας και 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, 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 3.5: Συρματοκιβώτια, Τοίχος αντιστήριξης και σύρματα, Συρμάτινος φράχτης, Τεχνικό σκελεπαστρο**





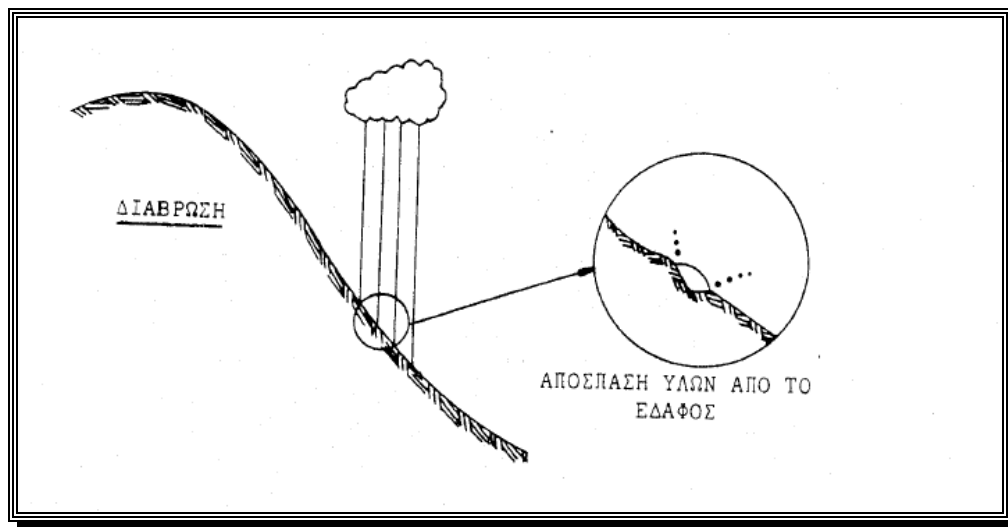
---

## 4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

---

### 4.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

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. Προκαλεί την υποβάθμιση του εδάφους και την μερική ή ολική απώλεια της παραγωγικότητας του.



Εικόνα 4.1: Διαδικασία της διάβρωσης (Μιμίκου, 1994)

Έχει εκτιμηθεί ότι από τα συνολικά στερεά που μπαίνουν στα ποτάμια και τους ταμειυτήρες, 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 δισ. τόνοι εδάφους (WWF UK, 1994). Ο ρυθμός αυτός της μεταφοράς είναι φυσιολογικός αφού το έδαφος που χάνεται αντικαθίσταται με τη δημιουργία νέου εδάφους με τις εδαφογενετικές διεργασίες.

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 (λιπάνσεις).

Η σοβαρότητα δε του φαινομένου αυτού, εξαρτάται από την ποσότητα του υλικού που αποσπάται και την ικανότητα των διαθρωτικών μέσων να το μεταφέρουν, διαφέρει μάλιστα κατά χώρο και χρόνο. Η παραγωγή ιζήματος ως αποτέλεσμα ενός συγκεκριμένου καιρικού επεισοδίου εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, το έδαφος και τις συνθήκες χρήσης γης του συγκεκριμένου χώρου.

#### **4.1.1 Κατηγορίες διάβρωσης**

Το έδαφος είναι μια ανανεώσιμη πλουτοπαραγωγική πηγή, απαραίτητη και αναντικατάστατη για την επιβίωση και την ανάπτυξη της Χώρας μας. Η διάβρωση προκαλεί την υποβάθμιση του εδάφους, την μερική δηλαδή ή ολική απώλεια της παραγωγικότητάς του. Σύμφωνα με τους Οικονόμου και Νάκο (1990), η διάβρωση του εδάφους διακρίνεται σε:

. **Γεωλογική, κανονική ή φυσική:** η οποία συμβαίνει σε φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος (κλίματος βλάστησης, κλπ χωρίς ανθρώπινη επέμβαση) και οι απώλειες του εδάφους είναι σχετικά μικρές, της τάξης των 50 kg/έτος/ha.

. **Σε ακανόνιστη ή επιταχυνόμενη:** η οποία είναι αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων και σε μερικές περιπτώσεις ζωικών. Οφείλεται κυρίως, στην υποβάθμιση των δασών από τις πυρκαγιές, βοσκή, υλοτομίες, εκχερσώσεις. Οι απώλειες

εδαφικού υλικού, σε αυτήν την περίπτωση, είναι πιο γρήγορες και ποσοτικά μεγαλύτερες από τις προηγούμενες.

Οι πιο σημαντικοί τύποι επιταχυνόμενης διάβρωσης, κατά Οικονόμου και Νάκο (1990) είναι:

- ↳ **Η επιφανειακή διάβρωση:** η οποία αποκρίνει το επιφανειακό στρώμα εδάφους σχεδόν ομοιόμορφα από όλη την έκταση της επιφάνειας. Είναι αποτέλεσμα της ενέργειας της βροχής και της διαβρωτικής και μεταφορικής ικανότητάς της επιφανειακής απορροής.
- ↳ **Η αυλακωτή διάβρωση:** η οποία δημιουργεί στην επιφάνεια του εδάφους πολυάριθμα αυλάκια βάθους λίγων μέχρι 50 cm περίπου.
- ↳ **Η χαραδρώτη διάβρωση:** η οποία δημιουργείται όταν ικανές ποσότητες νερού συγκεντρώνονται σε μικρό χρονικό διάστημα σε στενά αυλάκια οδηγούν στο βάθεμα και πλάτεμά τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία χαραδρώσεων των οποίων το βάθος μπορεί να ποικίλει από 50 cm μέχρι > 30 m.

#### 4.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των εδαφών

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 πέντε κυρίως παραγόντων, οι οποίοι είναι οι εξής:

##### ➤ **Η διαβρωτικότητα (erosivity) της βροχής**

Η ένταση, η διάρκεια και η κατανομή είναι τα χαρακτηριστικά της βροχής που παίζουν καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της διάβρωσης καθώς επίσης και η μάζα, η διάμετρος και ταχύτητα των σταγόνων της. Η μεγαλύτερη ένταση, η μεγαλύτερη

διάρκεια και η άνιση διαχρονικά κατανομή της βροχής, ειδικά μετά από μεγάλες περιόδους ξηρασίας, αυξάνουν την απορροή και επομένως τη διάβρωση. Η πτώση της ίδιας ποσότητας βροχής προκαλεί μεγαλύτερη ζημιά όταν αυτή πέφτει σε μικρότερο χρονικό διάστημα. 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 γεινίαση με λίμνες και τη βλάστηση, είναι ο καθοριστικός παράγοντας της περιεκτικότητας σε υγρασία.

➤ **Το κλίμα της Ελλάδας**

Τυπικό μεσογειακό με πλούσιες βροχοπτώσεις τη χειμερινή περίοδο, με ξηρή θερινή περίοδο και ενδιάμεση κατάσταση το φθινόπωρο και την άνοιξη. Το ύψος των βροχοπτώσεων ελαττώνεται αισθητά από δυσμάς προς ανατολές με ιδιαίτερη έμφαση του φαινομένου στα νότια. Η ραγδαιότητα και το σημαντικό ύψος βροχόπτωσης σε ορισμένες εποχές, που χαρακτηρίζουν τις Ελληνικές συνθήκες, δημιουργούν περιβάλλον έντονα ευνοϊκό για τις διαβρωτικές διαδικασίες.

➤ **Η διαβρωσιμότητα (erodibility) του εδάφους**

Ορίζεται ως η αντίσταση του εδάφους στην απόσπαση και μεταφορά του. 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 και διηθητικότητα των εδαφών**

Η **υδατοϊκανότητα** των εδαφών έχει υπολογισθεί κατά μέσο όρο στο 33% του όγκου τους, ωστόσο υπάρχουν εδάφη με υδατοϊκανότητα υψηλότερη του 50%. Ανάλογα, λοιπόν, με το ποσό του νερού που μπορεί να αποθηκεύσει το έδαφος αντιστέκεται στη διάβρωση, ώσπου το νερό φτάσει στο επίπεδο της υδατοϊκανότητας. Όσο ταχύτερα διηθείται το νερό στο έδαφος τόσο περισσότερο αντιστέκεται στη διάβρωση. 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).

➤ **Το μήκος και η κλίση της πλαγιάς**

Όπως είναι γνωστό, όσο αυξάνεται η κλίση του εδάφους, αυξάνεται και η ταχύτητα απορροής και συνεπώς και ο κίνδυνος διάβρωσης. Σε επίπεδες επιφάνειες η διάβρωση είναι αμελητέα. Εκεί το πρόβλημα είναι οι αποθέσεις.

Σε θεωρητικό επίπεδο, διπλασιασμός της ταχύτητας νερού, τετραπλασιάζει τη διαβρωτική του ικανότητα και επιτρέπει τη μεταφορά 32 φορές περισσότερου υλικού. Η επιφανειακή κατακράτηση νερού μειώνεται καθώς η κλίση αυξάνεται. 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 πλαγιά παρά από τα ψηλότερα (Μακρής, Μαντούδη, 1997).

➤ **Ανάγλυφο**

Ο αποφασιστικότερος παράγοντας για τη διάβρωση στη χώρα μας είναι η τοπογραφική διαμόρφωση (ανάγλυφο). Κατεξοχήν ορεινή χώρα (2/3 της επιφάνειας της), υπόκειται σε έντονη διάβρωση. Επιπλέον, η μορφή του ανάγλυφου, οι απότομες κλίσεις και η συνεχής διαδοχή των κλίσεων αυτών (πτυχώσεις), δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για τη δημιουργία χειμάρρων, ιδίως σε περιοχές όπου επεμβαίνει ο άνθρωπος, είτε αυτές βρίσκονται στην κοίτη των χειμάρρων, είτε στον ευρύτερο χώρο της λεκάνης απορροής.

➤ **Η φυτοκάλυψη**

Ο παράγοντας βλάστηση είναι καθοριστικός για τη διαβρωση του εδάφους. Η απομάκρυνση της φυτικής κάλυψης πάντοτε οδηγεί σε έντονα προβλήματα διάβρωσης. Με την εξαφάνιση της δασικής βλάστησης, κυρίως λόγω πυρκαγιών, όχι μόνο ανακόπτεται ο εδαφοσχηματισμός, αλλά και εξαφανίζεται, με τη διάβρωση, το ώριμο έδαφος. Ο παράγοντας αυτός αντανακλά την προστατευτική επίδραση του

τύπου και του ποσοστού φυτοκάλυψης. Κατά τους Οικονόμου, Νάκο (1990), ο βαθμός προστασίας από τη διάβρωση μειώνεται κατά κανόνα ως εξής:

*Πολυόροφο μικτό κλειστό δάσος > πυκνή θαμνώδης βλάστηση > πυκνή φυσική ποώδης βλάστηση > πυκνά ψυχανθή και ποώδη καλλιεργούμενα φυτά > σιτηρά > καλαμπόκι > πατάτες.*

#### ➤ Η ανθρώπινη επίδραση

Η επίδραση αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στη διάβρωση, είναι πολύπλοκη, όχι πλήρως καταληπτή, ούτε εύκολα ποσοτικοποιούμενη. Θα μπορούσε κατά κάποιο τρόπο να αποδοθεί λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα του πληθυσμού και τους τύπους της γεωργίας που ασκείται σε μια περιοχή.

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, γεωργική χρήση, 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):

$$A = 0.224 * R * K * L * S * C * P \quad (4.1)$$

όπου:

A= Εδαφική απώλεια σε kg/m<sup>2</sup>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)

#### 4.2 Η ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ ΩΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Τόσο η επιφανειακή διάβρωση όσο και η υπόγεια μέσω κατείδυσης, συνδέονται άμεσα με τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. Στη σχέση τους αυτή παίζουν ρόλο οι υφιστάμενες κλίσεις πρανών, η παρουσία βλάστησης καθώς και το είδος της. Οι σημαντικότεροι παράγοντες για τη διαδικασία της διάβρωσης είναι το νερό, μετεωρικό και υπόγειο, ο άνεμος και ο πάγος.

Ανάλογα με το κλίμα, τροπικό, ξηρό ή ηπειρωτικό, ένας από τους προαναφερθέντες παράγοντες έχει προεξέχοντα ρόλο έναντι των άλλων. Γεγονός είναι ότι το νερό αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα διάβρωσης. Μέσω της ποτάμιας κυκλοφορίας του, μεταφέρονται υλικά που αποσπώνται από υψηλότερα υψόμετρα ενώ επιδρά απ' ευθείας σε πρανή είτε επιφανειακά είτε με την κατείδυση προκαλώντας μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων.

Γενικότερα, η αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και νερού είναι θεμελιώδης όσον αφορά τη διαδικασία της διάβρωσης. Το νερό που απορρέει επιφανειακά διαβρώνει και υποσκάπτει τον πόδα των πρανών κατά μήκος ποταμών και χειμάρρων, ενώ αυτό που κατείδυει αυξάνει την πίεση των πόρων, προκαλεί εσωτερική διάβρωση ή/ και διόγκωση αργιλικών ορυκτών, επιπλέον δε, φορτίζει με το βάρος του την ασταθή μάζα. Παίζει επίσης το ρόλο «λιπαντικού» σε πιθανές επιφάνειες ολίσθησης.

Η ένταση είναι σημαντική ως προς την κατανόηση της κινητικής ενέργειας, καθώς και της συμπεριφοράς των πρανών και το βαθμό διάβρωσης. Για να γίνει πλήρως κατανοητή η αλληλεπίδραση μεταξύ βροχόπτωσης και κατολισθήσεων πρέπει να εξεταστεί η εποχική διακύμανση της υγρασίας εδάφους σε μια περιοχή μελέτης. Οι δύο κυριότεροι παράγοντες που ελέγχουν την τιμή της φυσικής υγρασίας εδάφους είναι το συνολικό ύψος βροχής και ο συνδυασμός εξάτμισης και διαπνοής. Η αποστράγγιση και η υπόγεια κατείδυση είναι σχετικά μικρές μέχρι να συντελεστεί ο κορεσμός του εδάφους.

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

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. Όταν ξεπεραστεί η τιμή κατωφλίου δημιουργείται μία περίσσεια φυσικής υγρασίας και σημαντικές θετικές πιέσεις πόρων οι οποίες μειώνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους με συνέπεια τις εδαφικές ροές ή άλλες μορφές κατολίστεσης.

Η διαθρωτική διαδικασία τελικά πραγματοποιείται είτε μέσω 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 (1933) ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τη θεωρία της απορρόφησης. Σύμφωνα με αυτήν, απορροή παρατηρείται όταν η ένταση της βροχόπτωσης είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα απορρόφησης του εδάφους. Οι ρυθμοί απορρόφησης φθίνουν κατά τη διάρκεια καταιγίδων λόγω συμπύκνωσης του εδάφους, απόπλυση τεμαχιδίων και απόθεση τους σε κενά, 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.

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

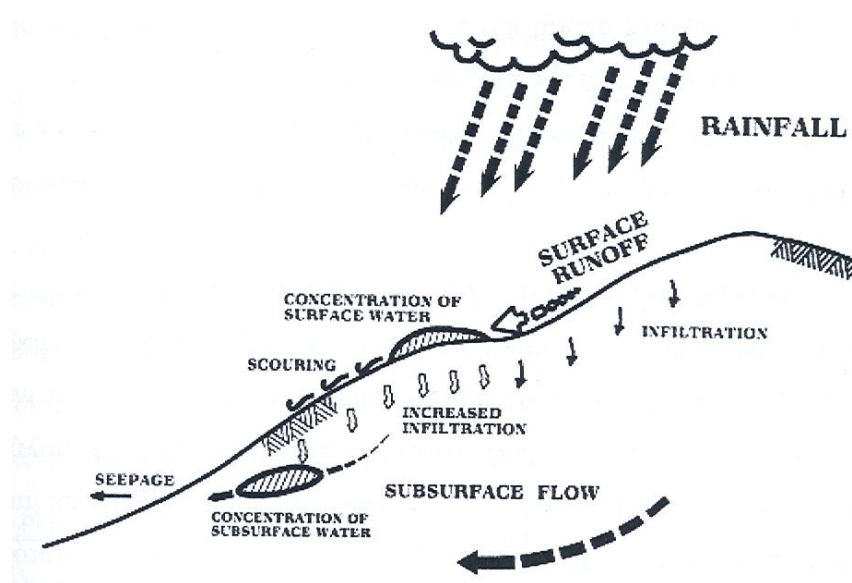
Άλλες έρευνες έχουν δείξει ότι κατά την έναρξη της ολίσθησης μετά από έντονη βροχόπτωση, η μετακίνηση προκαλεί κρούσεις μεταξύ των κόκκων με επακόλουθο τη ρευστοποίηση πάνω στη επιφάνεια ολίσθησης. Η ρευστοποίηση χαρακτηρίζεται από υψηλές ταχύτητες και μεγάλη απόσταση μετακίνησης των υλικών. Εξαρτάται δε, από την αρχική πυκνότητα του υλικού και από το πάχος των εδαφικών στρωμάτων. Συνήθως παρατηρείται σε λεπτόκοκκες άμμους οι οποίες χαρακτηρίζονται γενικά από χαμηλότερη διαπερατότητα σε σύγκριση με τις πιο χονδρόκοκκες, στις οποίες παρατηρείται γενικά μικρότερη αύξηση της πίεσης των πόρων.

Πιο συγκεκριμένα, ο Wieczorek συμπέρανε ότι βαθιές ολισθήσεις σε εδάφη προκαλούνται συνήθως εξ αιτίας μεγάλης διάρκειας και μέτριας έντασης καταγίδας ενώ σε ρηχές ολισθήσεις εδάφους πάνω από βράχο προκαλούνται για σύντομης διάρκειας και υψηλής έντασης βροχόπτωση. Οι συσχετίσεις αυτές βροχοπτώσεων και κατολισθήσεων συγκεντρώνονται σε αστοχίες φυσικών πρανών.

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 ροή γιατί είναι περισσότερο πιθανό να απορροφηθεί ενώ έχει διανύσει μικρή απόσταση κατά την πορεία του προς χαμηλότερα υψόμετρα.

Επίσης θεωρείται ότι η **κρίσιμη βροχόπτωση**, η ποσότητα δηλαδή της βροχής που προκαλεί κατάρρευση ενός συγκεκριμένου πρανούς, αποτελεί το κλειδί για την πρόβλεψη κατολισθήσεων. Για να υπολογιστεί η κρίσιμη βροχόπτωση, πρέπει να καθοριστούν αρχικές συνθήκες. Κατά συνέπεια πρέπει να μετρηθεί η αναρρόφηση από τη μάζα του ακόρεστου εδάφους. Επιπλέον συμπεραίνεται ότι η εξέλιξη της αναρρόφησης προχώρησε πιο γρήγορα στα σημεία που βρίσκονται πιο ρηγά εξ αιτίας της ταχύτερης απώλειας υγρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Η βροχόπτωση υψηλής έντασης αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα που συμβάλει στη δημιουργία κατολισθήσεων στην περίπτωση που επέλθει κορεσμός του εδάφους ή ανύψωση του υδροφόρου. Οι έντονες καταιγίδες, ακόμη και μικρής διάρκειας, μπορούν να επαναδραστηριοποιήσουν τις κατολισθήσεις. Υπάρχουν και άλλοι παράγοντες, όπως ο αρχικός υδροφόρος ορίζοντας και η διάρκεια της προηγούμενης βροχόπτωσης, που είναι επίσης σημαντικοί.



Εικόνα 4.2: Απλοποιημένη αναπαράσταση υδρολογικού συστήματος πρανούς

Με την προηγούμενη βροχόπτωση αυξάνεται η φυσική υγρασία του εδάφους και δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την αύξηση της πίεσης των πόρων. Έτσι μπορεί να προκληθεί κατολίθση σε συνθήκες μικρότερης έντασης βροχόπτωσης από εκείνη που απαιτείται κανονικά για την εκδήλωση του φαινομένου. Ο ρόλος που διαδραματίζει η βροχόπτωση που έχει προηγηθεί, εξαρτάται και από τις συνθήκες της κάθε περιοχής

όπως η περατότητα του εδάφους. Γενικά θεωρείται ότι οι προηγηθείσες βροχοπτώσεις είναι σημαντικές για τις βαθιές κατολισθήσεις ενώ οι ρηχές κατολισθήσεις σχετίζονται περισσότερο με μεμονωμένες καταιγίδες μεγάλης έντασης (Morgenstern, 1992).

Συμπερασματικά, όταν η διάρκεια βροχόπτωσης επιμηκύνεται, απορροφάται περισσότερο νερό με αποτέλεσμα τη δημιουργία υπόγειων συγκεντρώσεων. Επιπλέον με την αύξηση της διάρκειας της, επέρχεται μείωση της επίδρασης της στην πίεση πόρων, η οποία συνεχίζει να μειώνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Στην περίπτωση όπου η βροχόπτωση είναι σύντομη αλλά έχει μεγάλο ύψος βροχής προκαλεί μεγαλύτερες συγκεντρώσεις νερού και υψηλότερους ρυθμούς επιφανειακής απορροής. Άρα δημιουργεί δυσμενέστερες συνθήκες από μία βροχόπτωση μεγαλύτερης διάρκειας. Η ένταση της βροχής επηρεάζει περισσότερο την αύξηση των τιμών ενώ η διάρκεια δεν συνδέεται ιδιαίτερα με την αύξηση της πίεσης των πόρων.



---

## 5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

---

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

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. Παρόλα 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] and [Thanos and Marcou, 1991]).

Η Ελλάδα έχει πρόβλημα μεγάλων δασικών πυρκαγιών οι οποίες είναι πλέον γνωστές με την ονομασία **wildfires**. Η ονομασία αυτή αναφέρεται σε πυρκαγιές ‘άγριες’, οι οποίες ξεφεύγουν από την αρχική επέμβαση των δασοπροσβεστικών 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).

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 κάηκαν 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: κάηκαν περίπου 2.000.000 στρέμματα ενώ χάθηκαν 67 ανθρώπινες ζωές στις μεγάλες δασικές πυρκαγιές της Πελοποννήσου και της Ευβοίας.

## **5.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΚΑΙ Η ΕΥΕΡΓΕΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΥΣ**

Με τον όρο λεκάνη απορροής, νοείται το τμήμα της επιφάνειας του εδάφους όπου τα νερά των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων αποστραγγίζονται μέσω ενός υδρογραφικού δικτύου. Πέραν της κύριας λεκάνης απορροής υπάρχουν και υπολεκάνες που δημιουργούνται από τους παραποτάμους και γενικότερα από τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου.

Κατά την υδρολογική προσέγγιση η λεκάνη απορροής συνιστά ένα «φίλτρο», το οποίο δέχεται τη βροχόπτωση ως «διέγερση» και αποδίδει την απορροή και την κίνηση φερτών υλών ως «απόκριση». Τα εσωτερικά χαρακτηριστικά του φίλτρου αυτού εμπλουτίζονται με την ύπαρξη δάσους, η οποία προσφέρει σημαντικές επιπρόσθετες ευεργετικές επιδράσεις:

- ✎ Ο χρόνος απόκρισης της λεκάνης απορροής γίνεται μεγαλύτερος και οι πλημμυρικές αιχμές μικρότερες σε σχέση με αντίστοιχες σε μη δασικές λεκάνες.
- ✎ Ενισχύεται η επιφανειακή κατακράτηση του νερού της βροχής και έτσι αυξάνεται και η ποσότητα του νερού που απαιτείται για την έναρξη των ροών που επακολουθούν με τελικό αποτέλεσμα λιγότερες πλημμύρες.
- ✎ Προς το ίδιο αποτέλεσμα κατατείνει και η αυξημένη εξατμισοδιαπνοή που λαμβάνει χώρα χάρη στην ύπαρξη δασικής έκτασης, όπως επίσης και η κατανάλωση νερού στην περιοχή του ριζοστρώματος των φυτών

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.

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.

Κατά τον Αλεξανδρή (1990), η δασική βλάστηση παρέχει 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:

- ☞ Έδαφος με κανονικό δάσος: διάβρωση 1%
- ☞ Με πυκνό λιβάδι: 5%
- ☞ Με σιτηρά πριν από το θερισμό: 10%

- ☞ Με σιτηρά μετά τη σπορά: 40%
- ☞ Με καλλιεργούμενους οπωρώνες: 90%
- ☞ Γυμνό μετά από πυρκαγιά: 100%

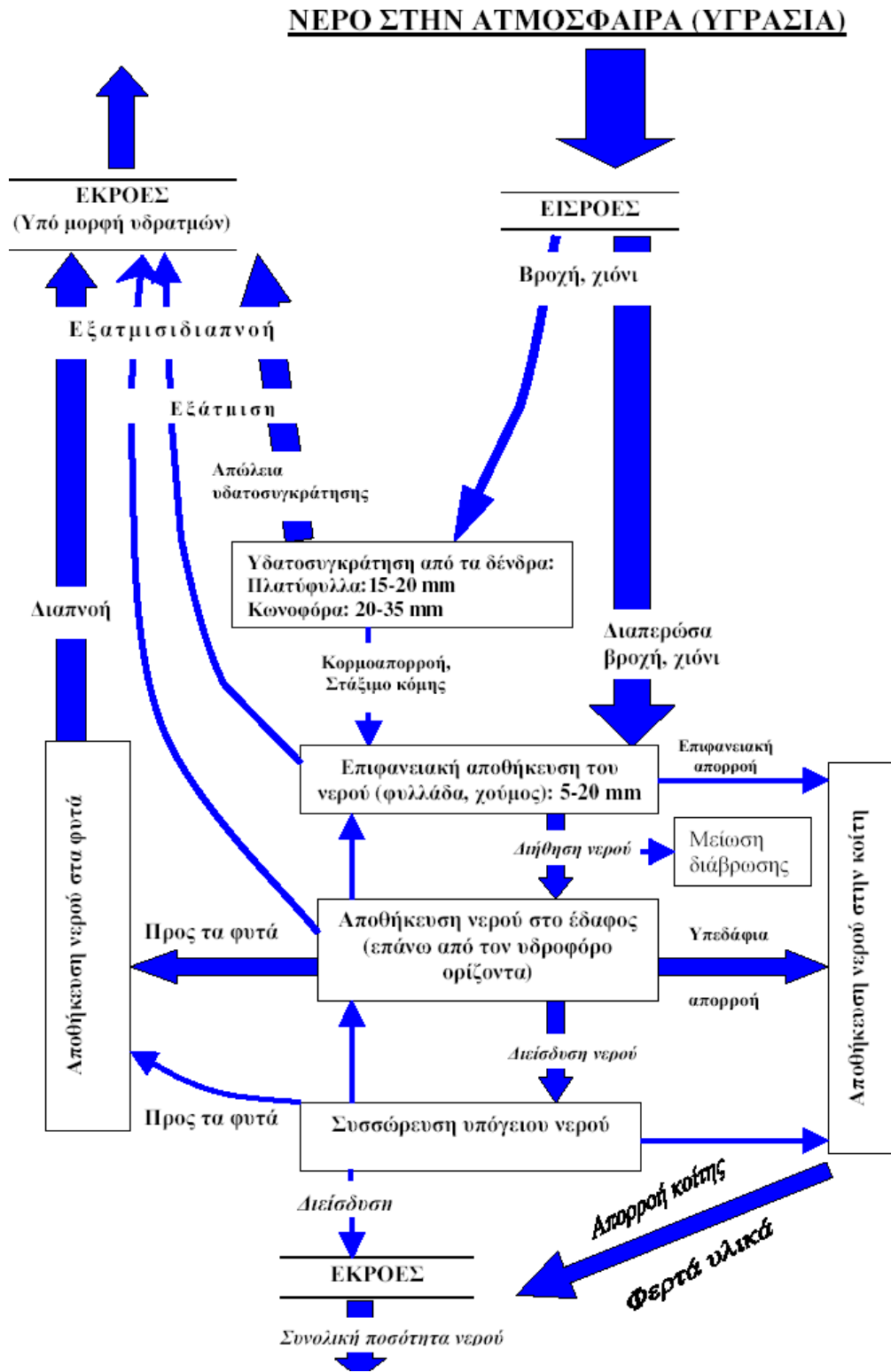
Η επίδραση της βλάστησης στις πλημμύρες σήμερα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με την αριθμητική έκφραση των υδρολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μιας βροχής. Οι διεργασίες αυτές περιλαμβάνουν την υδατοσυγκράτηση από τη δασική βλάστηση, τη φυλλάδα και το χούμο, τη διήθηση της βροχής στο 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 διάγραμμα 5.1 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

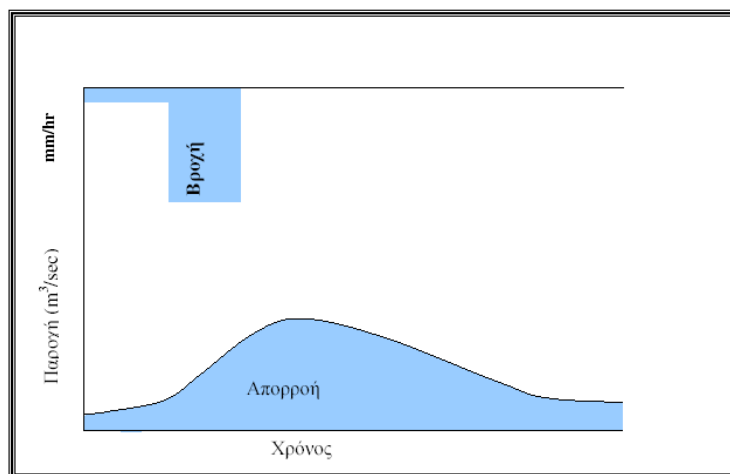


χουμικών ουσιών και έντονης βιολογικής δραστηριότητας στα δασικά εδάφη, οι κόκκοι του εδάφους είναι συγκολλημένοι μεταξύ τους με ισχυρούς ηλεκτρικούς δεσμούς (αργιλοχουμικά σύμπλοκα) και έτσι δυσχεραίνεται η απόσπαση και παράσυρσή τους προς τα κάτω με την απορροή. Ο υδρογεωνομικός αυτός μηχανισμός καθιστά το δάσος το μεγαλύτερο και σταθερότερο προστάτη του εδάφους και τον κύριο αποταμιευτή και μεσολαβητή νερού προς εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων (Αλεξανδρής, 1990). Επισημαίνεται ότι οι θέσεις που 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 μετατρέπεται σε πλημμυρική στην κοίτη του υδατορεύματος.



Διάγραμμα 5.1: Υδρολογικές διεργασίες μετατροπής της βροχής σε απορροή στο στόμιο μιας δασωμένης λεκάνης απορροής (Μπαλούτσος, 1996)

- **Συγκράτηση υγρασίας από το έδαφος:** Η δυνατότητα του εδάφους μιας υδρολογικής λεκάνης να συγκρατεί πάντοτε μια ορισμένη ποσότητα βροχής από κάθε επεισόδιο, υπό μορφή υγρασίας, καθορίζει μέχρι ενός σημείου το μέγεθος της απορροής και παροχής που δημιουργούνται στο στόμιο αυτής και στη συνέχεια είναι δυνατόν να δημιουργήσουν πλημμυρικά φαινόμενα στις χαμηλότερες περιοχές. 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. 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). 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).



Διάγραμμα 5.2: Υδρολογική συμπεριφορά δασωμένης λεκάνης απορροής

### 5.3 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Η φωτιά είναι μια ταχύτατη οξείδωση που την αντιλαμβανόμαστε ως φλόγα, η οποία καταναλώνει τη βλάστηση και το οργανικό επίπεδο του εδάφους, και πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει σε ανισορροπία στην επιφάνεια του εδάφους σε απότομες πλαγιές/πρανή (Shakesby and Doerr, 2006). Οι Frinston, Westenburg (1965), Καϊλίδης (1990), δηλώνουν ότι και η παραμικρή φλόγα περιλαμβάνει μερικές συνεχόμενες χημικές αντιδράσεις, στις οποίες υπεισέρχονται, η αεροδυναμική, η θερμοαγωγιμότητα και η μοριακή διασπορά και αποτελεί φαινόμενο το οποίο χρήζει μελέτης μέχρι και στις μέρες μας.

Αμέσως μετά τη φωτιά και κατά τη διάρκεια των επόμενων μηνών, η διήθηση μειώνεται σημαντικά, καθώς 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] and [Giovannini et al., 2001]).

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.

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.

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.

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. Βρεγμένο έδαφος οδηγεί σε γρήγορη αύξηση θερμοκρασίας και μάλιστα σε επικίνδυνα επίπεδα. Παρόλα αυτά, μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούνται σε στεγνά εδάφη (π.χ. Καλιφόρνια).

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 cm 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). 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.

Μελέτες δείχνουν ότι υδροφοβικά εδάφη δε δημιουργούνται πάντα. Μεταξύ των γεγονότων που συμβάλλουν στην ανάπτυξή τους είναι τα έξης:

- ✓ η ύπαρξη ενός μεγάλου πάχους στρώματος από υπολείμματα πριν τη φωτιά
- ✓ μια σοβαρή, αργά μεταδιδόμενη πυρκαγιά
- ✓ σκληροτράχηλα εδάφη όπως εκείνα της άμμου και του κατεστραμμένου γρανίτη.

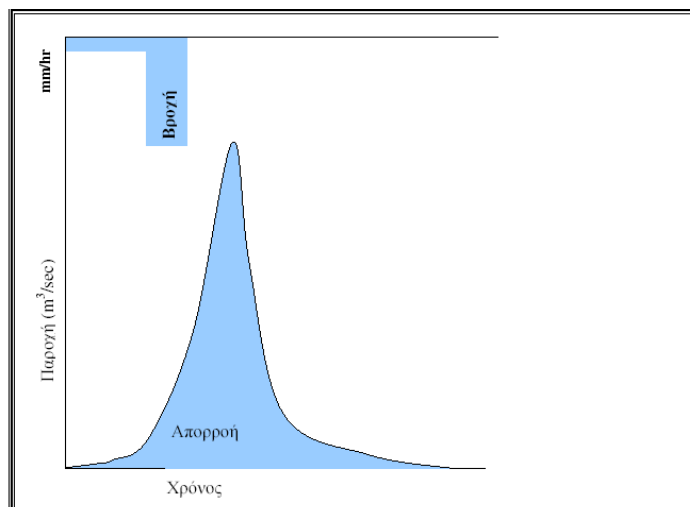
Το νερό μιας μεγάλης σε ένταση βροχής, διηθείται στο στρώμα της στάχτης, κινείται πάνω από το υδρόφοβο στρώμα και ρέει επιφανειακά. Αν και είναι δυνατό να περάσει μικρή ποσότητα νερού από το στρώμα αυτό μέσα από μικρά ρυάκια (Wieczorek, Jager 1996), κατά κανόνα το υδρόφοβο στρώμα εμποδίζει τη διήθηση, 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.

<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;"><b>1</b></p>	<p>Πτώση μεγαλύτερου ύψους βροχής στην επιφάνεια της λεκάνης λόγω έλλειψης βλάστησης - υδατοσυγκράτησης.</p> <p style="text-align: right;"><b>2</b></p>
<p>Συγκράτηση λιγότερης υγρασίας στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της καύσης των επιφανειακών φυτικών υπολειμμάτων (φυλλάδα, χούμου, κλπ.)</p> <p style="text-align: right;"><b>3</b></p>	<p>Κατακερματισμός των εδαφικών συσσωμάτων λόγω μεγαλύτερης ενέργειας των σταγόνων της βροχής.</p> <p style="text-align: right;"><b>4</b></p>
<p>Μείωση της ταχύτητας διήθησης της βροχής στο έδαφος λόγω απόφραξης των πόρων του.</p> <p style="text-align: right;"><b>5</b></p>	<p>Δημιουργία επιφανειακής απορροής στις πλαγιές της λεκάνης.</p> <p style="text-align: right;"><b>6</b></p>
<p>Μείωση της αντίστασης του εδάφους στην παράσυρση από την επιφανειακή απορροή, λόγω έλλειψης βλάστησης.</p> <p style="text-align: right;"><b>7</b></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;"><b>8</b></p>
<p>Σημαντική και απότομη αύξηση της υδατοστερεοπαροχής στην κοίτη των υδατορευμάτων.</p> <p style="text-align: right;"><b>9</b></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;"><b>10</b></p>
<p>Υπερχείλιση της πεδινής κοίτης του υδατορεύματος και επιδείνωση της κατάστασης σε περίπτωση ύπαρξης ανθρώπινων παρεμβάσεων.</p> <p style="text-align: right;"><b>11</b></p>	<p>Δημιουργία πλημμυρικών φαινομένων στην πεδινή γεωργική και κατοικημένη περιοχή της λεκάνης με πληθώρα δυσμενών επιπτώσεων.</p> <p style="text-align: right;"><b>12</b></p>

**Εικόνα 5.1: Διαχρονικές μεταβολές χαρακτηριστικών λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά, διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και δημιουργίας πλημμύρας από ισχυρή βροχή.**





Διάγραμμα 5.3: Υδρολογική συμπεριφορά λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά

#### 5.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Οι σταγόνες 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.

Ο μηχανισμός διάβρωσης του εδάφους είναι πολύπλοκος και εξαρτάται από ένα σύνολο παραγόντων. Για το λόγο αυτό δε μπορούμε να γνωρίζουμε από πριν πόσο διαβρώνεται το έδαφος μιας λεκάνης απορροής μετά από πυρκαγιά χωρίς μετρήσεις στη συγκεκριμένη λεκάνη. Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που επιδρούν στη διάβρωση μιας λεκάνης μετά από πυρκαγιά είναι οι εξής ( Κοτρωνάρου, 1996):

- ✎ **Το είδος της πυρκαγιάς:** Ο παράγοντας αυτός είναι πολύ σημαντικός για το βαθμό διάβρωσης του εδάφους αφού το είδος της πυρκαγιάς καθορίζει το πόσο καταστρέφεται η βλάστηση. 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.

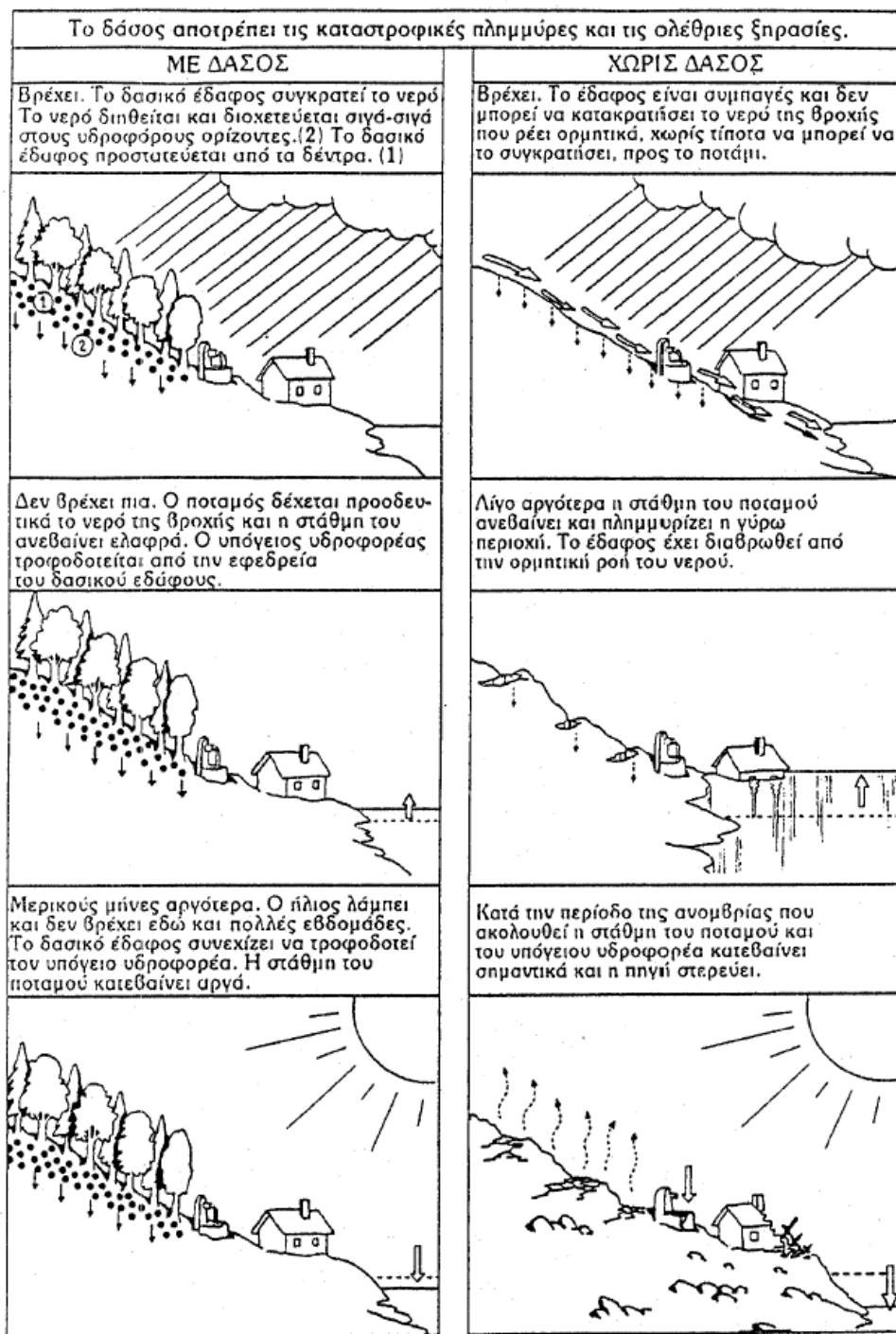
- ✎ **Η συχνότητα της πυρκαγιάς:** Αν σε μια λεκάνη απορροής δεν έχει προλάβει να αποκατασταθεί η βλάστηση μετά από πυρκαγιά και ξανακαεί, τότε είναι προφανές ότι το έδαφος θα διαβρωθεί πιο εύκολα και σε μεγαλύτερο βαθμό.
- ✎ **Η τοπογραφία της λεκάνης και οι τύποι του εδάφους:** Λεκάνες απορροής με 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 κλπ. 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, συμβεί να 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.
- ✎ **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 πρανών 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 χαρακτηρίζεται από μέση ένταση και χαμηλή διάρκεια την άνοιξη και το καλοκαίρι και μια άλλη,
- ✓ το χειμώνα, με βροχές μεγάλης διάρκειας και χαμηλής έντασης (I30).

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 and 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).



Εικόνα 5.2: Η ενεργητική παρουσία του δάσους (WWF Ελλάς, 1995)

---

## 6. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

---

### 6.1 ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΔΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ }CHASM V4.0 (COMBINED HYDROLOGICAL AND STABILITY MODEL)

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις στον τρόπο εκτίμησης της επικινδυνότητας του γεωγραφικού χώρου ως προς τις κατολισθήσεις. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές περιλαμβάνουν:

- (i) τον έλεγχο στο ύπαιθρο, όπου χρησιμοποιείται μια λίστα ελέγχου για τον καθορισμό των επικίνδυνων περιοχών (π.χ. Neely and Rice, 1990),
- (ii) το σχεδιασμό μελλοντικών μοντέλων αστάθειας από την ανάλυση των υπαρχουσών κατολισθήσεων (π.χ. Degraff and Canutti, 1988),
- (iii) την πολυμεταβλητή ανάλυση των παραγόντων που χαρακτηρίζουν τα παρατηρούμενα ασταθή πρανή (π.χ. Mark, 1992),
- (iv) την ομαδοποίηση σε κατηγορίες ευστάθειας βασισμένη σε κριτήρια όπως είναι η κλίση των πρανών, η λιθολογία, η χρήσεις γης, η γεωλογική δομή κλπ (π.χ. Montgomery et al., 1991) και
- (v) την ανάλυση της πιθανότητας αστοχίας βασισμένη σε μοντέλα ευστάθειας με στοχαστικές υδρολογικές προσομοιώσεις (π.χ. Slidle, 1992).

Κάθε μια από αυτές τις προσεγγίσεις είναι πολύτιμη για συγκεκριμένες εφαρμογές, αλλά καμιά εξ' αυτών δεν εκμεταλλεύεται πλήρως ένα επεισόδιο βροχόπτωσης παρατηρώντας την επίδραση του στο συντελεστή ασφαλείας και την δράση της βλάστησης στην αντόχη του πρανούς. Αυτό το κενό έρχεται να καλύψει το λογισμικό πακέτο του Chasm.

Το Chasm (Combined Hydrological and Stability Model) είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα υδρολογίας και ευστάθειας πρανών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο υπολογίζει τις χωροχρονικές μεταβολές της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ενός πρανούς. Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας γίνεται στο τέλος κάθε ώρας ισχυρής βροχόπτωσης. Κατ' αρχήν εκτιμώνται,

για κάθε ώρα οι μεταβολές της πίεσης πόρων και της συνοχής που προσδίδει το νερό και οι τιμές αυτές μεταφέρονται στο μοντέλο ευστάθειας ως πιεζομετρικά δεδομένα. Μέσα στη ζώνη που δεν έχει κορεστεί καθορίζεται μία μέγιστη τάση με την μέθοδο Bishop, 1995. Το CHASM δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών συνθηκών βροχόπτωσης, φυτοκάλυψης, κλίσεων πρανών και ιδιοτήτων εδαφικών υλικών.

Το μοντέλο του συγκεκριμένου λογισμικού επιλύει την προσομοίωση χρησιμοποιώντας **πεπερασμένες διαφορές**. Στόχος της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, είναι να μετατραπεί η διαφορική εξίσωση σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή αλγεβρική, πράγμα που επιτυγχάνεται με την προσέγγιση των μερικών παραγώγων με όρους διαφορών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και σε προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων. Γενικά όμως δεν θεωρείται η καλύτερη, εξαιτίας της δέσμευσης από τον κánaβο που πρέπει να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις, από τη δυσκολία στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων.

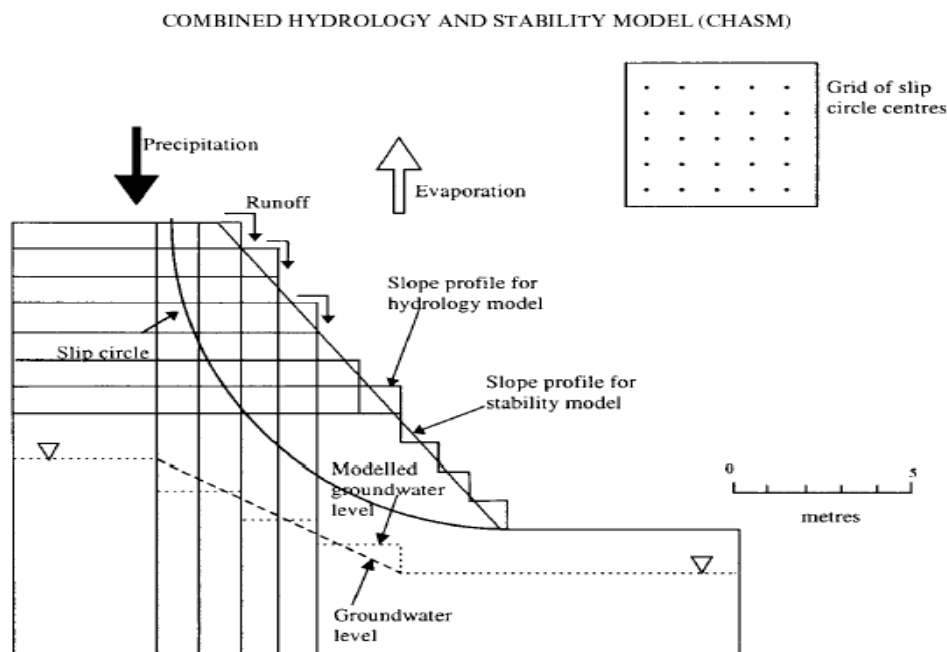
### **6.1.1 Υδρολογικό μοντέλο**

Παρόλο που το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και οι πιεζομετρικές αλλαγές είναι πολύ σημαντικά στοιχεία για τις λύσεις που βασίζονται στις ενεργές τάσεις, η μοντελοποίηση των υδρολογικών παραγόντων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στις κατολισθήσεις, έγιναν αποδεκτοί σχετικά αργά (Anderson & Richards 1987).

Το υδρολογικό μοντέλο είναι διδιάστατο και μοντελοποιεί την ροή υγρασίας του εδάφους με μια τομή από οποιοδήποτε πρανές. Οι δυναμικές υδρολογικές συνθήκες, για την κατάσταση κορεσμού ή μη σε ένα πρανές, μοντελοποιούνται με χρήση πεπερασμένων διαφορών. Έτσι το πρανές χωρίζεται σε μια σειρά ορθογώνιων στηλών και κάθε μια χωρίζεται σε επιμέρους κανονικά κελιά. Το κέντρο του κάθε κελιού σχηματίζει το σημείο υπολογισμού (σχήμα 6.1).

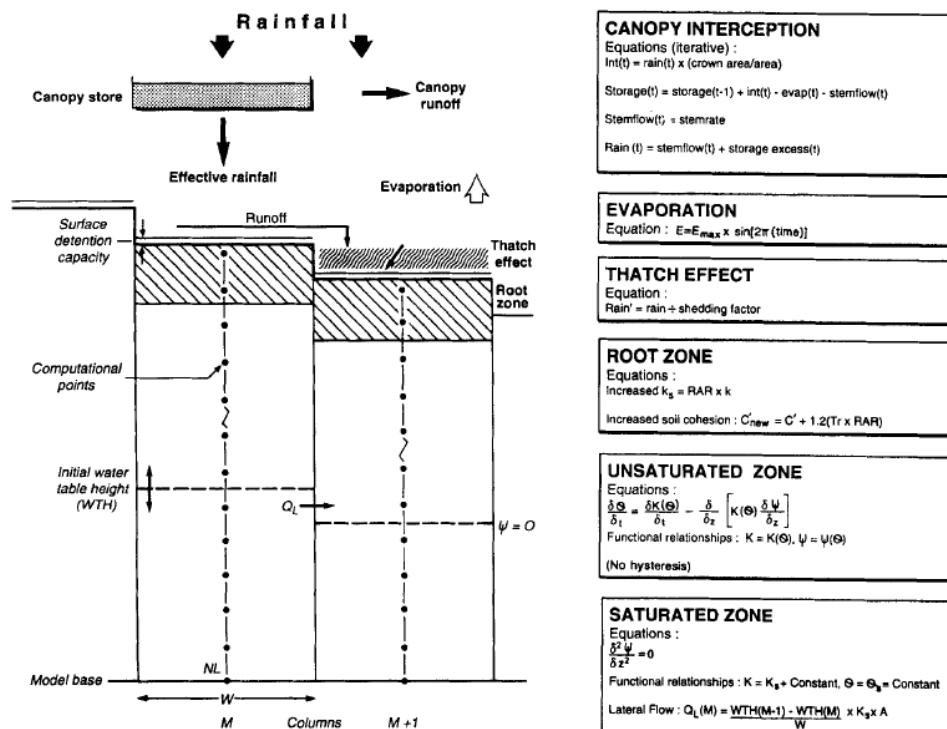
Επίσης προσομοιώνει την επίδραση, στις συνθήκες υγρασίας του εδάφους, από την διήθηση της βροχής, την εξάτμιση και την επιφανειακή κατακράτηση ύδατος. Η εισροή του νερού από την πάνω μεριά του πρανούς έως το κάτω όριο μπορεί να συμπεριληφθεί

στην προσομοίωση. Η ροή στην ακόρεστη ζώνη, υποτίθεται ότι είναι κάθετη και ότι ακολουθεί το νόμο του Darcy, η υδραυλική αγωγιμότητα έχει καθοριστεί από τη διαδικασία του Millington Quirk. Η πλευρική ροή μοντελοποιείται ως γεγονός στην κορυφή της κορεσμένης ζώνης κάθε λωρίδας, με την ροή να ακολουθεί το νόμο του Darcy.



Εικόνα 6.1: Γεωμετρική παρουσίαση του πρανούς στο Chasm 4

Η κατακόρυφη ροή διαμέσου κάθε στήλης στη μη κορεσμένη ζώνη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Richards. 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. Η ροή συνεχίζει από την κορυφή έως το τέλος κάθε στήλης μέχρι να φτάσει στον υδροφόρο.



Εικόνα 6.2:Εξισώσεις που διέπουν το υδρολογικό μοντέλο

### 6.1.2 Μοντέλο βλάστησης

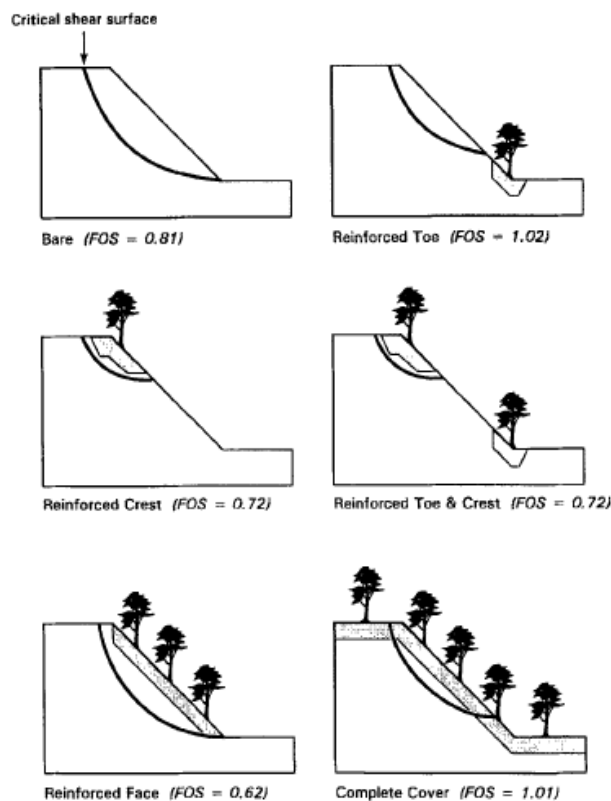
Ο ρόλος της βλάστησης στη ευστάθεια των πρανών είναι πολύ σημαντικός, όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι ρίζες των δένδρων έχουν πολύ θετική συμβολή στην αύξηση της αντοχής ενός εδάφους. Σε περίπτωση φυτοκάλυψης, περισσότερο νερό απορροφάται από το έδαφος και λιγότερο ρέει επιφανειακά. Τα ποσοστά νερού που απορροφώνται ή απορρέουν εξαρτώνται από την πυκνότητα του ριζικού συστήματος.

Το μοντέλο υπολογίζει τις νέες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας και την αύξηση της διατμητικής αντοχής λόγω της συνεισφοράς των ριζών. Γενικά οι μεγάλες ρίζες προσφέρουν μεγαλύτερη ενίσχυση από τις μικρότερες και οι πιο πυκνές μεγαλύτερη ενίσχυση από τις αραιότερες. Γι' αυτό το λόγο σε κάποιες περιπτώσεις σταθεροποίησης, κυρίως σε ρηχές κατολισθήσεις, είναι προτιμότερο το γρασίδι που έχει μεγάλη πυκνότητα ριζών παρά η φύτευση μεγάλων δέντρων παρόλο που οι ρίζες τους είναι 1,5 έως 3 φορές ισχυρότερες από το γρασίδι με την ίδια διάμετρο ριζών. 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.



Εικόνα 6.3: Ο ρόλος της βλάστησης στο συντελεστή ασφαλείας

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.

### 6.1.3 Ανάλυση ευστάθειας

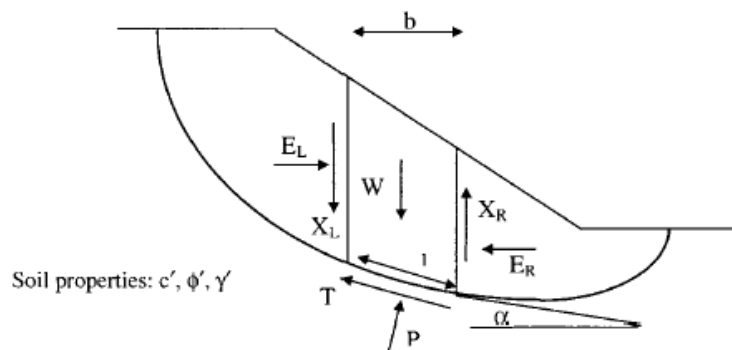
Η ανάλυση ευστάθειας γίνεται με τη γραμμική μέθοδο Jambu και με την απλοποιημένη κυκλική μέθοδο του Bishop σε περιβάλλον UNIX και μόνο με Bishop, σε περιβάλλον

Windows. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν την ενεργό τάση στην επιφάνεια αστοχίας, τη διατμητική τάση κάτω από το πρανές και την αναλογία μεταξύ των δύο. Τελικά, ορίζοντας τον συντελεστή ασφαλείας, εξασφαλίζεται ένα μέτρο σύγκρισης 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.

Στο Chasm, η μέθοδος του Bishop στην ανάλυση της ευστάθειας χρησιμοποιείται τώρα σε μια διαδικασία μελέτης της ολισθαίνουσας επιφάνειας για να εντοπίσει την κυκλική επιφάνεια, παράγοντας ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας. Παρόλα αυτά οι απλοποιημένες μέθοδοι του Janbu, που συχνά είναι πιο κατάλληλες για μη κυκλικές διατμητικές επιφάνειες, δεν έχουν σχέση με μια αυτοματοποιημένη διαδικασία έρευνας ολίσθησης. Λαμβάνοντας υπόψη και τις κατακόρυφες και τις παράλληλες δυνάμεις στη βάση της ολίσθησης (εικόνα 6.4) είναι δυνατή η έκφραση για τον συντελεστή ασφαλείας



Εικόνα 6.4: Μέθοδος Jambu's

Γενικά, εάν ένα πρανές συντίθεται από ομογενές υλικό, τότε η διαδικασία μη κυκλικής αστοχίας φαίνεται ότι παράγει αποτελέσματα που είναι παρόμοια με εκείνα που προέρχονται από τη μέθοδο Bishop. Σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες όμως, όπου υπάρχει ποικιλία στα γεωτεχνικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά η έρευνα μη κυκλικής ολίσθησης αναγνωρίζει μια πιο κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης σε σχέση με τη μέθοδο του Bishop. Αυτό είναι εξαιτίας των περιορισμών της κυκλικής μεθόδου. Συνεπώς, η μέθοδο του Bishop υπερεκτιμά το συντελεστή ασφαλείας τέτοιων πρανών και μπορεί να μην προβλέπει αστάθεια σε πρανή που τελικά θα αστοχήσουν.

#### 6.1.4 Μετατόπιση μάζας

Η απόσταση μετακίνησης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των έργων και των μέτρων αντιμετώπισης μίας ολίσθησης. Η έρευνα είναι σύνθετη γιατί λαμβάνει υπόψη τόσο τη θεωρία των ρευστών όσο και τις παραμέτρους του εδάφους. Το Chasm περιλαμβάνει μία μεθοδολογία εκτίμησης του βάθους και της απόστασης που διανύει το κατολισθαίνον υλικό.

Το μοντέλο που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι εμπειρικό και προέρχεται από την έρευνα των Finlay et al. (1999) οι οποίοι εργάστηκαν με δεδομένα κατολισθήσεων του Hong Kong (1100 κατολισθήσεις που εκδηλώθηκαν κατά τα έτη 1984-93 σε πρανή αποσαθρωμένου γρανίτη και άλλων μεταμορφωμένων και τα οποία είχαν υποστεί κάποιες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις). Μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης

αναπτύχθηκαν για την πρόγνωση της μετακίνησης της ολισθαίνουσας μάζας κατά μήκος οριζοντίων επιφανειών στη βάση των πρηνών.

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

### 6.1.5 Σεισμικότητα

Ένας άλλος παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη από την τελευταία έκδοση του προγράμματος είναι και η **σεισμικότητα** της περιοχής, αφού πολλές περιοχές είναι ιδιαίτερα σεισμογενείς και οι σεισμοί αποτελούν έναν εναυσματικό παράγοντα κατολισθήσεων. Οι έρευνες επικεντρώνονται στην απαιτούμενη επιτάχυνση για εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων. Το πρόγραμμα Chasm περιλαμβάνει παραδείγματα και τιμές σεισμικής επιτάχυνσης που προκάλεσαν ολισθήσεις σε διάφορες χώρες, με διαφορετικές δηλαδή τοπικές συνθήκες.

## 6.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ PHASE 2 V6.0

### 6.2.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Ο Zienkiewicz το 1967 έδωσε τον εξής ορισμό για τα πεπερασμένα στοιχεία: «Τα προβλήματα που λύνονται με τη μοντελοποίηση τους και τη 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:

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

Προκύπτει ότι όσο οι περισσότερες από τις κλασσικές μαθηματικές προσεγγιστικές μεθόδους, όσο και οι ποικίλες άμεσες προσεγγίσεις που γίνονται από τους μηχανικούς εμπίπτουν στην παραπάνω κατηγορία. Για το λόγο αυτό υπάρχει δυσκολία να προσδιοριστεί η προέλευση της μεθόδου και η ακριβής χρονική στιγμή επινοήσης της.

#### ➤ **Ανάλυση ευστάθειας πρανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**

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 η σύνδεση όμως μεταξύ τους γίνεται σ' έναν αριθμό διακριτών σημείων, τους κόμβους.

Μια ισχυρή εναλλακτική προσέγγιση στην ανάλυση ευστάθειας των πρανών αποτελεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements analysis FEM). Η μέθοδος αυτή είναι ακριβής, με πολλαπλή χρησιμότητα και απαιτεί λιγότερες εκ των προτέρων υποθέσεις σε σχέση με τις μεθόδους οριακής ισορροπίας, ειδικά σε ότι αφορά το μηχανισμό αστοχίας (Griffiths,1999).

Σε αντίθεση με ότι ισχύει στις μεθόδους οριακής ισορροπίας όπου θα πρέπει 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. Με τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης και άλλων κριτηρίων αστοχίας εκτός από αυτό του Mohr- Coulomb.

### 6.2.2 Το λογισμικό Phase 2 V6.0

Το πρόγραμμα Phase2 V6 είναι ένα διδιάστατο πρόγραμμα πρανών που παράγεται από τη Rocscience και έχει τη δυνατότητα εισαγωγής αρχείων του Slide V5. Αυτό επιτρέπει την πραγματοποίηση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και ευστάθειας πρανούς σε ένα μοντέλο Slide, χρησιμοποιώντας το Phase. Προσπαθεί μ' αυτόν τον τρόπο να αποσπάσει την πολυπλοκότητα καθορισμού ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με την εισαγωγή απευθείας ενός αρχείου Slide, αυτόματα να εντοπίζει τα επίπεδα τάσεων, τις οριακές συνθήκες και τα μοντέλα υλικών.

Η 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.

Στον κρίσιμο SRF μπορούμε να επιλέξουμε να δούμε την ολική και τη μέγιστη μετακίνηση, σε σχέση με τον SRF. 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.

Στο λογισμικό αυτό η υπολογιστική διαδικασία διεξάγεται σε τρία στάδια:

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 πρανού, 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.

### 6.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα πλεονεκτήματα που έχει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων όταν εφαρμόζεται στην ανάλυση ευστάθειας πρανών έναντι των μεθόδων οριακής ισορροπίας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- ↪ Δεν χρειάζεται να γίνουν a priori υποθέσεις που να αφορούν το σχήμα και τη θέση εμφάνισης της επιφάνειας αστοχίας. Η επιφάνεια αστοχίας εμφανίζεται ‘φυσικά’ στις ζώνες όπου η διατμητική αντοχή του εδάφους είναι μικρότερη των διατμητικών τάσεων που ασκούνται σε αυτό.
- ↪ Εφόσον στην προσέγγιση που γίνεται εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δεν υπάρχει η έννοια των λωρίδων, δεν χρειάζεται να γίνουν παραδοχές για τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ αυτών. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων διατηρείται η ισορροπία ολόκληρου του πρανού έως ότου επέλθει η αστοχία.
- ↪ Δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων συνθηκών 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.
- ↪ Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ρεαλιστικής εδαφικής συμπίεστότητας, οι λύσεις που προκύπτουν από τη μέθοδο των πεπερασμένων

στοιχείων παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις παραμορφώσεις στα διάφορα επίπεδα λειτουργίας.

- ☞ Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει τη δυνατότητα να καταγράψει την προοδευτική εξέλιξη της αστοχίας συμπεριλαμβανομένης και της γενικής διατμητικής αστοχίας.
- ☞ Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι επιρρεπή στη σύγκλιση, στην ισορροπία και σε θέματα αριθμητικής αστάθειας.
- ☞ Είναι πιο αργά και καταναλώνουν συνήθως πολύ χρόνο.

#### 6.4 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΛΟΓΙΣΜΙΚΩΝ CHASM ΚΑΙ PHASE

##### Σύγκριση μεθόδων

CHASM	PHASE
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ χρειάζεται να γίνουν a priori υποθέσεις που να αφορούν το σχήμα και τη θέση εμφάνισης της επιφάνειας αστοχίας.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δε χρειάζεται → Η επιφάνεια αστοχίας εμφανίζεται 'φυσικά'.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ μέθοδος των λωρίδων (Bishop) → παραδοχές για τις πλευρικές δυνάμεις μεταξύ αυτών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ διατηρείται η ισορροπία ολόκληρου του πρανούς έως ότου επέλθει η αστοχία.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων συνθηκών με υψηλό βαθμό ρεαλισμού</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δίνει τη δυνατότητα μοντελοποίησης περίπλοκων συνθηκών με υψηλό βαθμό ρεαλισμού</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δυνατότητα εισαγωγής μοντέλου Βλάστησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δεν υπάρχει τέτοια δυνατότητα</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ εισαγωγή Υετογράμματος Βροχόπτωσης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ εισαγωγή μεγέθους καείσδυσης → <b>Βροχόπτωση – Εξατμισοδιαπνοή</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ μη δυνατότητα καταγραφής προοδευτικής εξέλιξης της αστοχίας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ δυνατότητα καταγραφής της προοδευτικής εξέλιξης της αστοχίας και της γενικής διατμητικής αστοχίας</li> </ul>



---

## 7. Η ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΖΑΧΑΡΩ

---

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

Το περσινό καλοκαίρι, Αύγουστο του 2007, θα μείνει ως ένα από τα χειρότερα για τη χώρα μας. Οι κλιματικές συνθήκες, με τον θερμό και άνυδρο χειμώνα και τις ασυνήθιστα παρατεταμένες, πλην όμως αναμενόμενες περιόδους καύσωνα το καλοκαίρι, δημιούργησαν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για τις δασικές πυρκαγιές, η αδικαιολόγητη απουσία οποιασδήποτε προετοιμασίας και η πλήρης αδυναμία του κράτους να ανταποκριθεί, ήταν που έδωσαν την αφορμή για τη μεγάλη οικολογική καταστροφή.

Τα ξερά κλαδιά, τα λογής εύφλεκτα αντικείμενα και τα σκουπίδια που ήταν σκορπισμένα παντού στα δάση λειτούργησαν ως εύκολο προσάναμμα. Η έλλειψη αντιπυρικών ζωνών προστασίας και η μη έγκαιρη διάνοιξη δασικών δρόμων για εύκολη πρόσβαση από την άλλη, διευκόλυναν τη γρήγορη μετάδοση της φωτιάς και δυσχέραναν την άμεση κατάσβεσή της. Το πλέον σοβαρό και με απώλειες ζώων χτύπημα από αυτή τη μεγάλη καταστροφή, αναφέρεται στο Δήμο Ζαχάρως (Χάρτης 7.1).



Χάρτης 7.1: Χάρτης Νομού Ηλείας- Ζαχάρω

Η φωτιά εκδηλώθηκε τις πρωινές ώρες της 24<sup>ης</sup> Αυγούστου, στο δημοτικό διαμέρισμα της Μάκιστου. Το πύρινο μέτωπο εξαπλώθηκε γρήγορα και στις υπόλοιπες εδαφικές εκτάσεις του Δήμου. Από τα 19 δημοτικά διαμερίσματα, που ανήκουν στο Δήμο Ζαχάρως, τα 13 ορεινά υπέστησαν πολύ σοβαρές καταστροφές. Κατά κύριο λόγο κάηκαν δασικές εκτάσεις, αγροτικές καλλιέργειες και κτηνοτροφικές μονάδες, ενώ η καταστροφή επεκτάθηκε και σε κατοικημένες περιοχές, με αποτέλεσμα την απώλεια και ανθρώπινων ζώων.

## **7.2 ΟΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΗΣ ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΗΣ**

Η έκταση της οικολογικής καταστροφής πήρε διαστάσεις που δεν έχουν προηγούμενο, χάθηκε ένα σημαντικό, όσο και αναντικατάστατο κομμάτι της φυσικής κληρονομιάς. Διαταράχτηκε η οικολογική ισορροπία και δέχτηκε ένα ισχυρό πλήγμα η βιοποικιλότητα. Για την αποκατάσταση της μεγάλης απώλειας, ακόμη κι αν οι περί αναδάσωσης υποσχέσεις τηρηθούν στο ακέραιο, θα χρειαστούν πολλές δεκαετίες. Εν τω μεταξύ, πέραν της οικολογικής καταστροφής, υπάρχουν μια σειρά από σημαντικές παράπλευρες απώλειες. Η διάβρωση κι η επαπειλούμενη ερημοποίηση των εδαφών θα επιδεινωθούν στις περιοχές των πυρκαγιών, ενώ οι πλημμυρικές απορροές θα απειλήσουν σοβαρά τις κατάντη των καμένων κατοικημένες περιοχές. Ο κίνδυνος της λειψυδρίας θα αυξηθεί σοβαρά, καθώς θα μειωθεί η δυνατότητα του εδάφους να συγκρατεί το νερό των βροχών. Θα υπάρξουν ακόμη σοβαρές συνέπειες για το μικροκλίμα στις περιοχές των καμένων, αφού ο εξισορροπητικός για τις θερμοκρασίες ρόλος του δάσους θα εκλείψει.

Τέλος, οι εκτεταμένες καταστροφές του φετινού καλοκαιριού θα συμβάλουν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, επιδεινώνοντας τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα έχουν αυξηθεί σημαντικά, λόγω της εκπομπής μεγάλων ποσοτήτων αερίων της καύσης κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών, ενώ ταυτόχρονα έχει μειωθεί και η δυνατότητα κατακράτησης των θερμοκηπιακών αερίων, λόγω της μείωσης της έκτασης των δασών και συνεπώς και του περιορισμού του ρόλου τους ως φυσικών πνευμόνων της χώρας

**Πιο αναλυτικά η πυρκαγιά στην Ζαχάρω είχε σαν αποτέλεσμα :**

- Την απώλεια 41 ανθρώπινων ζώων. Στην Αρτέμιδα έχασαν τη ζωή τους κάτοικοι, ανάμεσα τους 7 παιδιά. Στην ίδια περιοχή και κατά την προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς, κάηκαν ο αντιδήμαρχος της Ζαχάρως Α. Κρέσπης, πυροσβέστες, ένας δασοφύλακας από τη Ζαχάρω, καθώς και ένας δημότης του, γεγονός που ανεβάζει τον αριθμό των νεκρών στην Αρτέμιδα στους 22.
- Από τα 180.000 στρέμματα που ανήκουν στο Δήμο Ζαχάρως κάηκε ολοσχερώς το 90%. Εξ' αυτών τα 32.000 στρέμματα αναφέρονται σε ελαιοκαλλιέργειες (70% των κατοίκων της περιοχής είναι ελαιοπαραγωγοί) και τα υπόλοιπα αφορούν σε άλλες αγροτικές καλλιέργειες και δασικές εκτάσεις. Σύμφωνα με στοιχεία του WWF, από το δάσος του Καϊάφα κάηκε το 22,5% της προστατευόμενης περιοχής (7.577 στρέμματα). Επισημαίνεται τέλος ότι τα περισσότερα στρέμματα των δασικών εκτάσεων βρίσκονται σε περιοχές του Δικτύου Natura 2000.
- Η σπάνια βιοποικιλότητα της περιοχής επλήγη σε μεγάλο βαθμό. Τόσο τα μικά είδη της χλωρίδας όσο και της πανίδας υπέστησαν σοβαρό πλήγμα.

### **7.3 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ**

Ο Δήμος Ζαχάρως έχει πληθυσμό 12.910 κατοίκους. Με την εφαρμογή του Νόμου Καποδίστρια (μεταρρύθμιση στη Τ.Α του 1998) λειτουργεί με έδρα τη Ζαχάρω ο Νέος Διευρυμένος Δήμος, που περιλαμβάνει 19 πρώην Κοινότητες πρώην Δήμου Αρήνης με συνολικό πληθυσμό 11.041 κατοίκους. Τα Δημοτικά διαμερίσματα του Νέου Δήμου Ζαχάρως, καθώς και οι οικίσκοι που περιλαμβάνουν με τον πληθυσμό τους, έχουν ως εξής:

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 Ρεβελαιίκα [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. Ταξιαρχών [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].

#### 7.4 ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

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 (1.221m), 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 **ανάγλυφο** της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται ορεινό στο ανατολικό και βόρειο τμήμα της (600 έως 1220 m), ημιορεινό έως λοφώδες στη ζώνη των 100 έως 600 m και πεδινό στη παραλιακή ζώνη καθώς και στις κοιλάδες των ποταμών. (0 έως 100 m).

Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας (96.0 km<sup>2</sup>) 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 km<sup>2</sup>) και κλίσεις μεγαλύτερες του 35% παρατηρούνται σε μικρότερο τμήμα αυτής (43.0 km<sup>2</sup>).

Από **γεωλογικής** απόψεως οι σχηματισμοί του Νεογενούς καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης της περιοχής. Αποτελούνται από εναλλαγές και πλευρικές μεταβάσεις αργιλομαργών, ψαμμιτών και κροκαλοπαγών. Σε ζώνες με μικρές μορφολογικές κλίσεις 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).

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 και έχουν σύνθετη μορφή. Ο τύπος των υδρογραφικών δικτύων είναι γενικά επιμήκης δενδριτικός αλλά δεν απουσιάζει σε κάποιες περιπτώσεις και ο ορθογώνιος, εξαιτίας του ρηξιγενούς και πτυχογόνου τεκτονισμού. Επίσης παρατηρείται ασυμμετρία στις λεκάνες απορροής, η οποία οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στη νεοτεκτονική δομή της περιοχής.

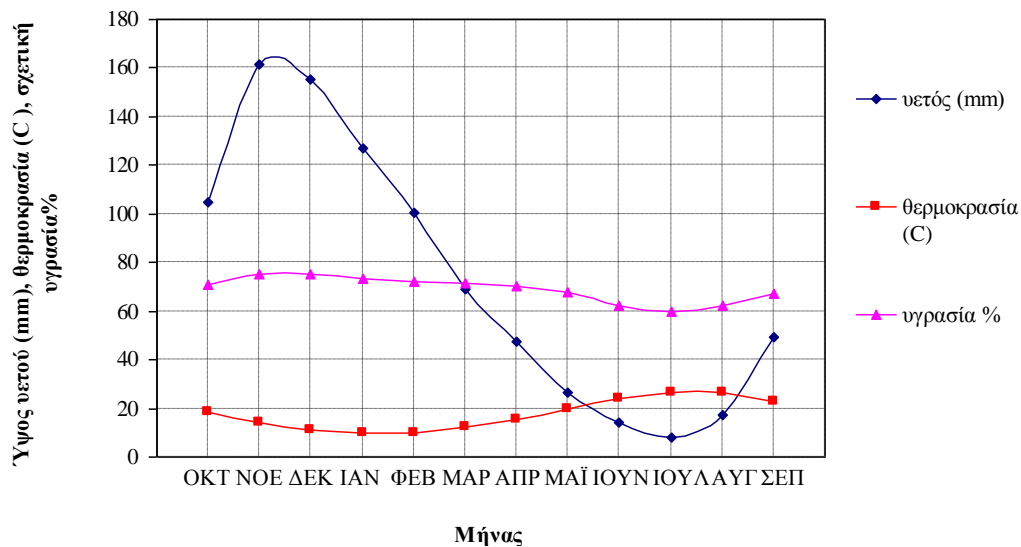
## **7.5 ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

Μέσα στις κυριότερες παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος που επηρεάζουν τους τεχνικογεωλογικούς χαρακτήρες των γεωλογικών ενοτήτων μιας περιοχής, αλλά και παρεμβαίνουν στη διαμόρφωση της σχέσης εδάφους θεμελίωσης- κατασκευής, περιλαμβάνονται και οι υδρομετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασιακές μεταβολές, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, ηλιοφάνεια, σχετική υγρασία). Έτσι κρίθηκε αναγκαίο

να γίνει η σκιαγράφηση των βασικών κλιματολογικών παραμέτρων στο νομό Ηλείας, που συμβάλουν στη χαλάρωση των σχηματισμών, στις διαβρωτικές- αποσθρωτικές διεργασίες και στην εκδήλωση κατολισθητικών φαινομένων .

Για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής του Δήμου Ζαχάρως αξιοποιήθηκαν τα διαθέσιμα δεδομένα του πλησιέστερου στην περιοχή έρευνας μετρητικού σταθμού.

Πρόκειται για το σταθμό του Πύργου που διαχειρίζεται η Ε.Μ.Υ. Ο σταθμός αυτός εντοπίζεται βόρεια της περιοχής έρευνας και είναι εγκατεστημένος σε υψόμετρο 12 m. Τα δεδομένα του μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για την πεδινή ζώνη της περιοχής μελέτης. Στις υψηλότερα υψομετρικά ζώνες αναμένεται μεγαλύτερο ύψος βροχής και χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ο σταθμός λειτουργεί από το 1975 και τα διαθέσιμα δεδομένα είναι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασιών, βροχόπτωσης, σχετικής υγρασίας και επικρατούσας διεύθυνσης ανέμου.



Διάγραμμα 7.1: Διακύμανση μέσω μηνιαίων τιμών υετού, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στο μετεωρολογικό σταθμό Πύργου ( ΕΜΥ,1975-2001)

### 7.5.1 Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

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 μελέτης, αποτελούν τον καθοριστικότερο παράγοντα για την τροφοδοσία των υπογείων υδροφόρων που διαμορφώνονται σε αυτά. Επίσης αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στην εκδήλωση γεωλογικών αστοχιών σε γεωλογικούς σχηματισμούς με μειωμένες τιμές γεωμηχανικών χαρακτηριστικών.

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 βήμα χρόνου που επιλέγεται. Στο πλαίσιο, όμως αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν ήταν δυνατή η ίδρυση βροχογράφου στην περιοχή της Ζαχάρας 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.

Τα βροχομέτρικα δεδομένα του σταθμού στον Πύργο θεωρούνται σε μεγάλο βαθμό αντιπροσωπευτικά για την πεδινή έκταση της περιφέρειας του Δήμου της Ζαχάρας. Στις υψηλότερες ζώνες αναμένεται αύξηση του ετησίου ύψους των βροχοπτώσεων.

**Πίνακας 7.1: Μέση μηνιαία βροχόπτωση**

<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (σε mm)</b>
<b>ΟΚΤΩΒ</b>	<b>104.6</b>
<b>ΝΟΕΜ</b>	<b>155.6</b>
<b>ΔΕΚ</b>	<b>161.5</b>
<b>ΙΑΝ</b>	<b>126.9</b>
<b>ΦΕΒΡ</b>	<b>100.5</b>
<b>ΜΑΡΤ</b>	69.3
<b>ΑΠΡ</b>	47.7

<b>ΜΑΙΟΣ</b>	26.4
<b>ΙΟΥΝ</b>	14.3
<b>ΙΟΥΛΙ</b>	8.1
<b>ΑΥΓ</b>	17.4
<b>ΣΕΠΤ</b>	49.3
<b>Μ. ΕΤΗΣΙΟ ΥΨΟΣ</b>	881.6

Πηγή: EMY, 1931-2007

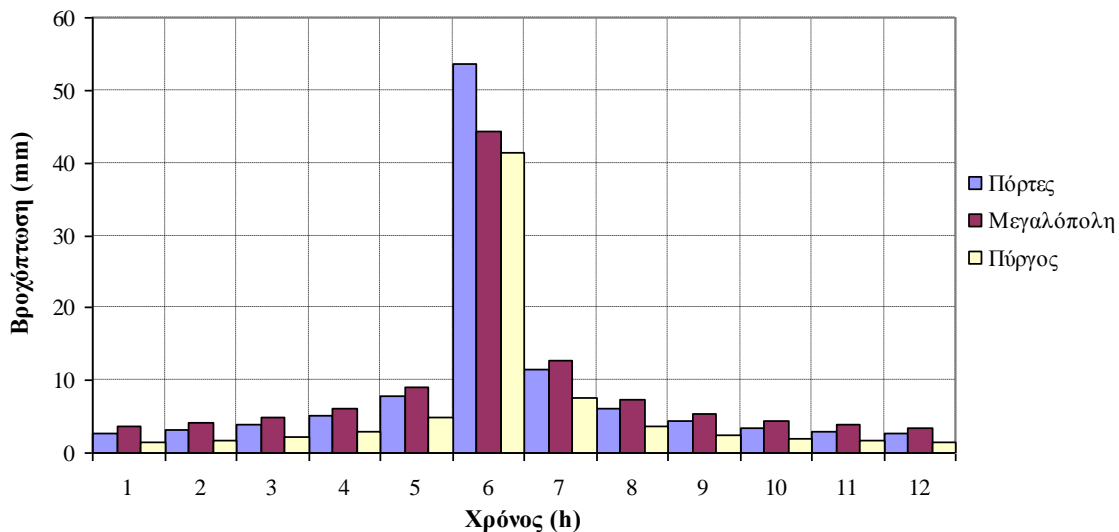
- Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης της περιόδου 1931 – 2007 είναι υψηλό και ανέρχεται στα 881.6 mm.
- Η περίοδος από τον Οκτώβριο έως και τον Φεβρουάριο, σημειώνει το 74% περίπου, του μέσου ετήσιου ύψους των βροχοπτώσεων, με τα μέσα μηνιαία ύψη βροχής να ξεπερνούν τα 100 mm.
- Βροχερότερος μήνας του έτους είναι ο Νοέμβριος με μέση μηνιαία τιμή 161.5 mm και ακολουθούν ο Δεκέμβριος με 155.6 mm, ο Ιανουάριος με 126.9 mm, ο Φεβρουάριος με 100.5mm και ο Οκτώβριος με 104.6 mm.

Με βάση αυτά τα πρωτογενή βροχομετρικά δεδομένα καταρτίστηκε όμβρια καμπύλη σημειακής βροχόπτωσης για τον βροχομετρικό σταθμό του Πύργου της EMY. Λόγω του εξαιρετικά μικρού πλήθους στοιχείων, αναζητήθηκε και άλλη βροχομετρική πληροφορία από την περιοχή υπό μορφή έτοιμων όμβριων καμπύλων από παλιότερες μελέτες. Οι πιο πρόσφορες από αυτές τις καμπύλες εντοπίστηκαν στους σταθμούς Πόρτες και Μεγαλόπολη. Οι διάφορες εναλλακτικές όμβριες καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν για την κατάρτιση υετογραμμάτων σχεδιασμού<sup>1</sup> 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** (alternating blocks).

<sup>1</sup> Ναλμπάντης, Ι., 2008. Κατάρτιση συνθετικών υετογραμμάτων σχεδιασμού στην περιοχή της Ζαχάρας Δ. Πελοποννήσου, Εσωτερική έκθεση, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, ΕΜΠ, Αθήνα.



Πρόκειται για έναν απλό τρόπο παραγωγής ενός «εικονικού» υετογραφήματος με διαθέσιμη την όμβρια καμπύλη. Το υετόγραμμα σχεδιασμού που παράγεται από αυτή τη μέθοδο ορίζει το ύψος βροχόπτωσης που συμβαίνει σε  $n$  διαδοχικά χρονικά διαστήματα διάρκειας  $\Delta t$  σε μια ολική διάρκεια  $d=n\Delta t$ . Μετά την επιλογή της περιόδου επαναφοράς σχεδιασμού, η ένταση υπολογίζεται από τις όμβριες καμπύλες για κάθε μια από τις διάρκειες  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ , ...,  $n\Delta t$  και το αντίστοιχο ύψος βροχόπτωσης βρίσκεται σαν γινόμενο της έντασης βροχόπτωσης και της διάρκειας. Παίρνοντας διαφορές μεταξύ διαδοχικών τιμών υψών βροχόπτωσης, βρίσκεται το ποσό της βροχόπτωσης που είναι να προστεθεί για κάθε επιπρόσθετη μονάδα χρόνου  $\Delta t$ . Τα προκύπτοντα μπλοκ βροχόπτωσης καταγράφονται καταρχάς με φθίνουσα σειρά από το μεγαλύτερο προς το μικρότερο. Μετά ανακατανέμονται ώστε το μέγιστο ύψος να τοποθετείται στο κεντρικό μπλοκ και τα εναπομείναντα μπλοκ με φθίνουσα σειρά και με εναλλαγή μια στα δεξιά και μια στα αριστερά του κεντρικού μπλοκ σχηματίζοντας έτσι το υετόγραμμα σχεδιασμού (Chow, 1988).



**Διάγραμμα 7.2: Υετόγραμματα σχεδιασμού με βάση τις όμβριες καμπύλες των βροχομετρικών σταθμών στο Πύργο, στη Μεγαλόπολη και στις Πόρτες για  $T = 50$ έτη και συνολική διάρκεια επεισοδίου 12 h**

**Όμβρια καμπύλη σταθμού Πόρτες<sup>2</sup>**

Όμβρια καμπύλη (για τη σημειακή βροχόπτωση) (Κουτσογιάννης, 2008)

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

όπου:

$i$  = ένταση βροχόπτωσης (mm/h)

$T$  = περίοδος επαναφοράς (έτη)

$d$  = διάρκεια βροχόπτωσης (h)

**Όμβρια καμπύλη σταθμού ΔΕΗ Μεγαλόπολης<sup>3</sup>**

Όμβρια καμπύλη (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 σε (min)

**7.5.2 Θερμοκρασία αέρα**

Όπως είναι γνωστό 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 (λόγω διόγκωσης και συρρίκνωσης των ορυκτολογικών μονάδων με επαναλαμβανόμενο ρυθμό). Συνεπώς η γνώση της διακύμανσης της θερμοκρασίας του αέρα είναι σημαντική και μας βοηθάει και στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής με τη μέθοδο Penman που θα γίνει σε επόμενο βήμα.

<sup>2</sup> Κουτσογιάννης, Δ., 2008. *Όμβριες καμπύλες στην περιοχή της βόρειας Πελοποννήσου*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Αδημοσίευτο, Αθήνα

<sup>3</sup> Γιακουμάκης, Σ., 2004. *Όμβριες καμπύλες στην περιοχή της κεντρικής Πελοποννήσου (Σταθμός ΔΕΗ Μεγαλόπολης)*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, Αδημοσίευτο, Αθήνα.

Από την επεξεργασία λοιπόν, των διαθέσιμων δεδομένων θερμοκρασίας αέρα στο σταθμό Πύργου, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

**Πίνακας 7.2: Μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα σταθμού Πύργου**

ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ (°C)
ΟΚΤΩΒ	18.7
ΝΟΕΜ	14.1
ΔΕΚ	11.0
ΙΑΝ	9.6
ΦΕΒΡ	10.1
ΜΑΡΤ	12.2
ΑΠΡ	15.2
ΜΑΙΟΣ	19.7
ΙΟΥΝ	23.9
ΙΟΥΛΙ	26.4
ΑΥΓ	26.3
ΣΕΠ	23.0
<b>Μ. ΕΤΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚ.</b>	<b>17.5</b>

Πηγή: ΕΜΥ, 1975-2001

- ✘ Η μέση ετήσια θερμοκρασία για τις περιόδους 1931-2001, 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.

### 7.5.3 Σχετική υγρασία – Άνεμος

Η υγρασία αέρα ασκεί αποφασιστική επίδραση στην πορεία του υδρολογικού κύκλου, γιατί αποτελεί την πηγή τροφοδοσίας όλων των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Επιπλέον επιδρά στην εξάτμιση και τη διαπνοή των φυτών. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές της σχετικής υγρασίας αέρα στο σταθμό του Πύργου.

**Πίνακας 7.3: Μέση μηνιαία σχετική υγρασία αέρα**

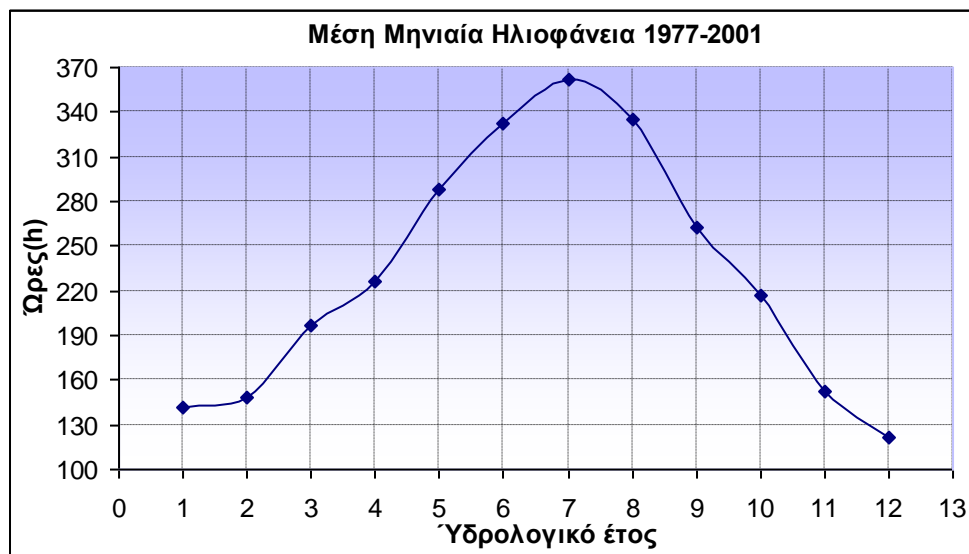
ΜΗΝΑΣ	ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ %
ΟΚΤΩΒ	71.0
ΝΟΕΜ	75.2
ΔΕΚ	75.5
ΙΑΝ	73.6
ΦΕΒΡ	72.2
ΜΑΡΤ	71.2
ΑΠΡ	70.5
ΜΑΙΟΣ	67.9
ΙΟΥΝ	62.4
ΙΟΥΛΙ	59.5
ΑΥΓ	62.1
ΣΕΠ	67.1
<b>Μ.ΕΤΗΣΙΑ ΣΧ.ΥΓΡΑΣΙΑ</b>	<b>69.0</b>

Πηγή: ΕΜΥ, 1975-2001- Σταθμός Πύργου

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 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.

### 7.5.4 Ηλιοφάνεια

Η καμπύλη της μέσης μηνιαίας ηλιοφάνειας έχει τη μορφή της κανονικής κατανομής (βλ. Διάγραμμα 7.3). Στην κορυφή βρίσκεται ο μήνας Ιούλιος με τις περισσότερες ώρες ηλιοφάνειας του έτους 361 h και κατεβαίνουν ομαλά προς τα κάτω οι υπόλοιποι μήνες, αφήνοντας τελευταίο τον Δεκέμβριο με τις λιγότερες ώρες 122 h.

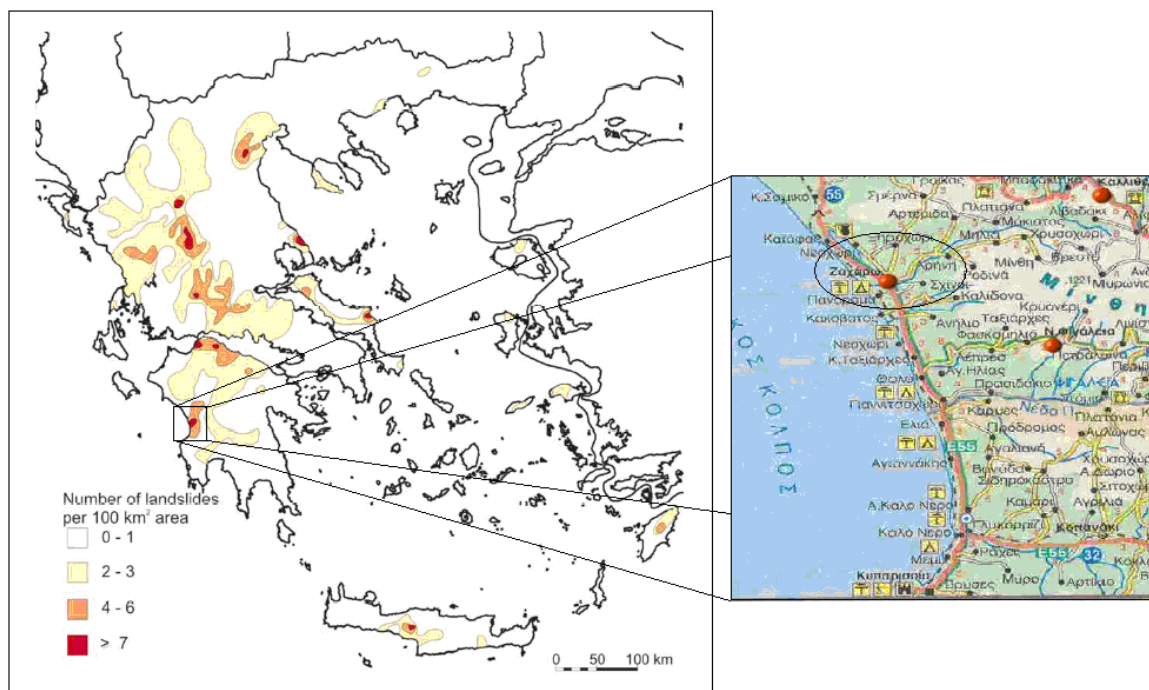


Διάγραμμα 7.3: Μέση μηνιαία ηλιοφάνεια σταθμού Πύργου (ΕΜΥ, 1997-2001)



## 8. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕΛΕΤΗΣ- ΕΓΚΑΡΣΙΕΣ ΤΟΜΕΣ ΕΛΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΖΑΧΑΡΩΣ

Η παρούσα μελέτη εστιάζεται στην ευστάθεια των πρανών υπό την επίδραση της βροχοπτώσης πριν και μετά από πυρκαγιά. Γι' αυτό το σκοπό επιλέχθηκε η πληγείσα περιοχή της Ζαχάρως στο νομό Ηλείας. Προμηθευτήκαμε από την ΓΥΣ τοπογραφικούς χάρτες της περιοχής, κλίμακας 1:5000, προκειμένου να πάρουμε εγκάρσιες τομές κατά μήκος των ποταμών Ακίδα και Ζαχαραιϊκό, που διασχίζουν τον οικισμό της Ζαχάρως και επηρεάζουν τη ζωή των κατοίκων της περιοχής με τον ένα ή τον άλλο τρόπο.



Χάρτης 8.1: Εντοπισμός περιοχής μελέτης στο χάρτη τρωτότητας της Ελλάδος (Κούκις, 2005).

Το κριτήριο επιλογής των τομών ήταν η μεταβολή της τρωτότητας του εδάφους μετά την πυρκαγιά. Η επιλογή αυτή έγινε με τη χρήση των χαρτών αλλαγής τρωτότητας της μελέτης της ερευνητικής ομάδας "Α" του ΕΜΠ για τις πυρόπληκτες περιοχές.

Η πρώτη **τομή A-A'**, λοιπόν, που διαλέξαμε βρίσκεται κατά μήκος του ποταμού Ακίδα, κοντά στον οικισμό της Ζαχάρως σε έδαφος που επικρατούν Μεταλπικοί σχηματισμοί δηλαδή πλειο-πλειστοκαινικά ιζήματα. Πρόκειται για 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. Το χρώμα τους είναι κίτρινο έως καστανό-κίτρινο και κατά θέσεις γκρι έως πράσινο (Φουντούλης, I., 2000). Η περιοχή αυτή πριν από την πυρκαγιά είχε εμφανίσει υψηλό βαθμό κατολισθήσεων και μετά από αυτήν ο **βαθμός τρωτότητας παρέμεινε ίδιος (μέτριος)**.

Η δεύτερη **τομή Γ-Γ'**, βρίσκεται κατά μήκος του ρέματος Ακίδα κοντά στον οικισμό της Αρήνης σε περιοχή όπου επικρατούν οι Αλπικοί σχηματισμοί της ζώνης Πίνδου. Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή εμφανίζονται μόνο ανθρακικά πετρώματα από την κατηγορία των ανώτερων Κρητιδικών. Πρόκειται για πολύχρωμους ασβεστολίθους και σχιστοκερατόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται ερυθρές ή κίτρινες μάργες. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί εμφανίζουν μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα, λόγω έντονου κερματισμού και καρστικοποίησης. 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. Η περιοχή δεν ήταν ιδιαίτερα τρωτή πριν από την πυρκαγιά, ενώ μετά από αυτή ο **βαθμός τρωτότητας έγινε υψηλός**.

Η πρώτη **τομή A-A'**, όπως αναφέρθηκε, βρίσκεται σε 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 πρानών – CHASM 4 (Combined Hydrological and Stability Model) που αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υδρολογίας και ευστάθειας πρानών. Το συνδυαστικό αυτό μοντέλο, υπολογίζει τις χωρο-χρονικές μεταβολές της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό και τον ελάχιστο συντελεστή ασφαλείας ενός πρानού. 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 πρानών.

Η δεύτερη **τομή Γ-Γ'**, τοποθετείται σε ανθρακικά εδάφη με ασβεστόλιθους και σχιστοκερατόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται ερυθρές ή κίτρινες μάργες. Όπως καταλαβαίνουμε, λοιπόν, η συγκεκριμένη τομή βρίσκεται πάνω σε εναλλαγή σκληρών και μαλακών σχηματισμών όπως είναι οι σχιστοκερατόλιθοι, έχοντας στην επιφάνεια τους μία ζώνη αποσάθρωσης με βάθος που μπορεί να φτάσει και τα τρία μέτρα. Συνεπώς, σε αντίθεση με τις άλλες δύο τομές, εδώ αναμένεται ένα είδος επιφανειακής αστοχίας στη ζώνη αποσάθρωσης και στη ζώνη κερματισμού η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από τη ζώνη αποσάθρωσης. Η ζώνη κερματισμού αποτελεί το στάδιο πριν τη μετάβαση στο καθαρό πέτρωμα.

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 πρानού, 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 πρानού, 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.

Στην παρούσα φάση, κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της επίδρασης του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια του πρανούς, 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<sup>ο</sup> 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<sup>ο</sup> 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<sup>ο</sup> σενάριο περιλαμβάνει εκείνη την περίπτωση που η κορεσμένη ζώνη είναι μικρή στο πρανές, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να πλησιάζει το 25% του ύψους του πρανούς- μετρώντας από τη βάση του.

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 θα μπορούσε να εμφανιστεί έπειτα από περίοδο σχετικής ανομβρίας.

---

## 9. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΜΗΣ Α-Α΄- CHASM V4.0

---

### 9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο η επιλογή της **τομής Α-Α΄** έγινε με βάση την τρωτότητά της πριν και μετά την πυρκαγιά. Η συγκεκριμένη, λοιπόν, τομή βρίσκεται σε περιοχή η οποία διατήρησε στο μέτριο την τρωτότητά της μετά την πυρκαγιά. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν στην περιοχή είναι οι νεογενείς και με τη βοήθεια του Υδρολογικού προγράμματος CHASM V4.0 εξετάζεται το ενδεχόμενο παρουσίας βαθιών αστοχιών στην τομή.

Επειδή στο πρόγραμμα CHASM, που θέλουμε να εργαστούμε, δεν είναι δυνατόν να εισαγάγουμε ολόκληρη την έκταση του πρανούς, ακολουθήσαμε πρώτα την παρακάτω διαδικασία:

- ✓ εισαγάγαμε το πρανές στο πρόγραμμα Phase για μία μακροσκοπική παρατήρηση του, προκειμένου να εντοπίσουμε τις κρίσιμες περιοχές, εκείνες δηλαδή που θα αστοχήσουν
- ✓ και για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας, επεξεργαστήκαμε τις περιοχές αυτές στο υδρολογικό πρόγραμμα, CHASM.

Τα στοιχεία που απαιτούνται σαν δεδομένα εισόδου του τελευταίου είναι :

- η γεωμετρία του πρανούς
- μία προσομοίωση της βροχόπτωσης σε διάρκεια και ένταση
- ο καθορισμός της βλάστησης
- η ποσότητα που απορροφάται από το έδαφος και η μέγιστη εξάτμιση
- τιμές γεωτεχνικών χαρακτηριστικών

Οι υπολογισμοί αφορούν την συγκεκριμένη κάθε φορά γεωμετρία του πρανούς. Η κατολίσθηση μπορεί να συμβεί κατά τη διάρκεια αλλά και κάποιες ώρες μετά την έντονη βροχόπτωση. Η μεγάλης διάρκειας και μικρής έντασης βροχή μειώνει συνήθως το

συντελεστή ασφαλείας ενώ η αποψίλωση προκαλεί μία απότομη μείωση στην τιμή κατωφλίου της κρίσιμης βροχόπτωσης.

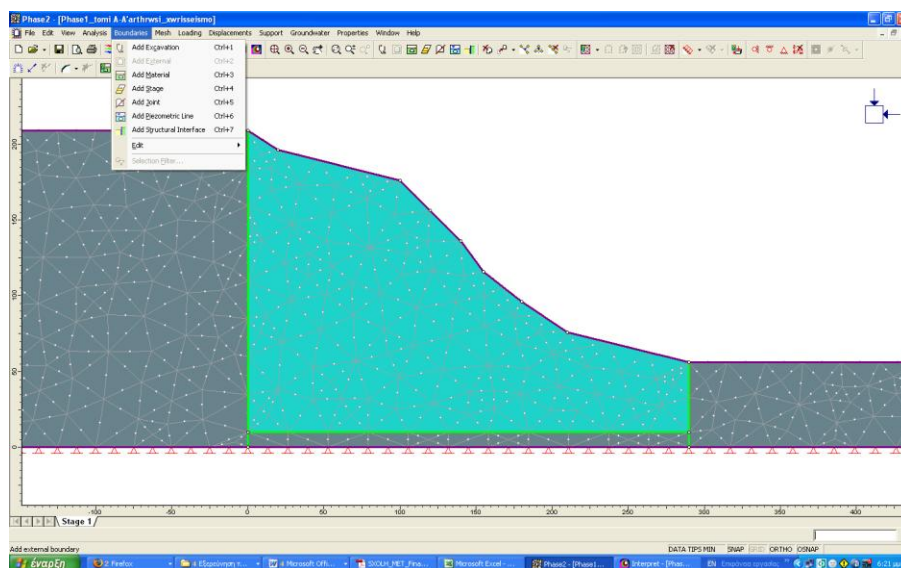
## 9.2 ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ- PHASE 2 V6.0

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. Στο λογισμικό αυτό η υπολογιστική διαδικασία διεξάγεται σε τρία στάδια:

MODEL  
COMPUTE  
INTERPRET

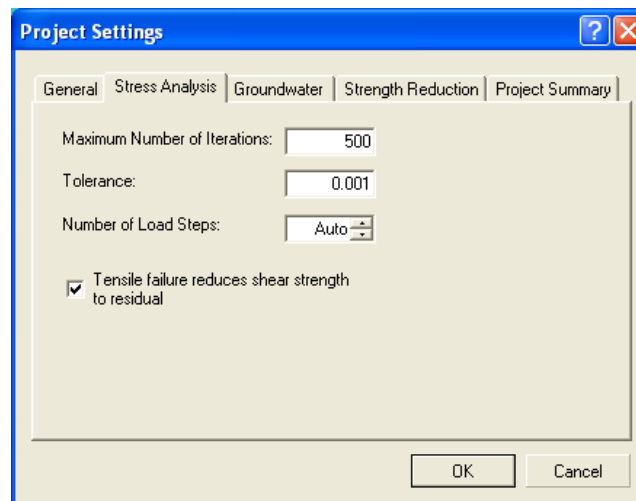
Στο **model** (μοντέλο, προσομοίωμα) πραγματοποιείται η εισαγωγή και διαμόρφωση :

- 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 9.1 φαίνεται η τομή από την οποία προέκυψε η γεωμετρία του πρανούς που μελετήθηκε.



Εικόνα 9.1: Διαμόρφωση ορίων μοντέλου

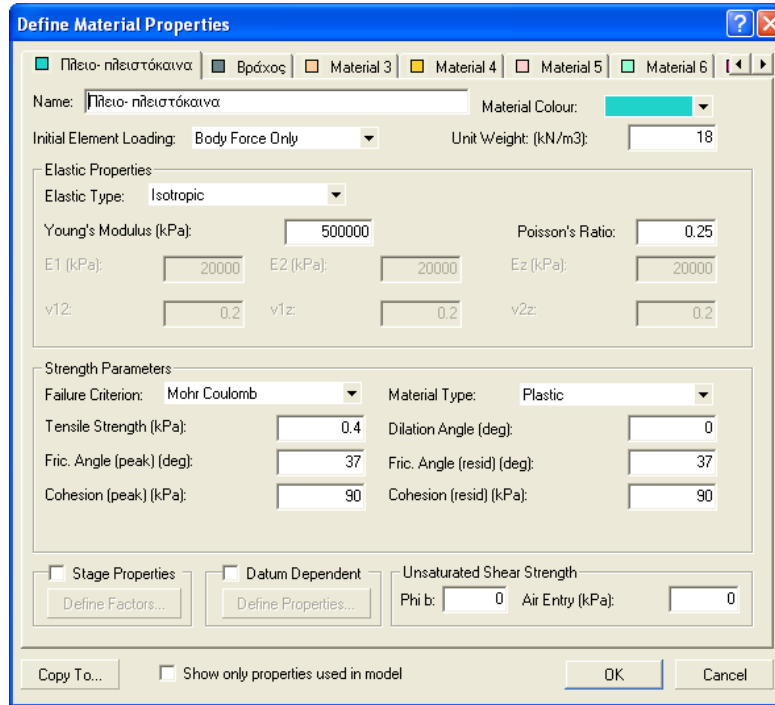
- των επιτόπου τάσεων. Οι συνθήκες που καθορίζουν την ανάλυση των τάσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως φαίνεται και στην εικόνα, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (maximum number of iterations), η ανοχή (tolerance) και ο αριθμός των βημάτων φόρτισης (number of load steps).
  - ↪ Ο 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 9.2: Ανάλυση τάσεων**

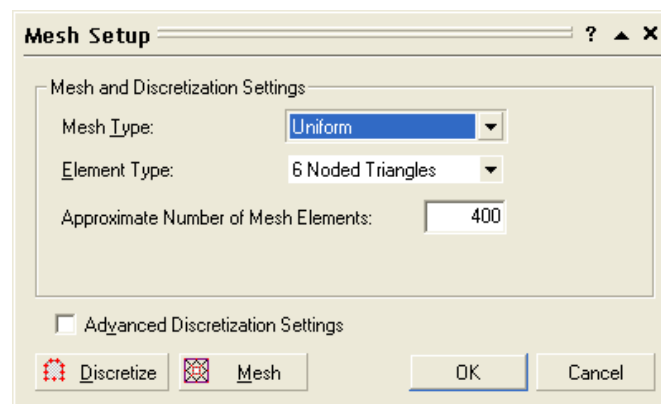
- των συνοριακών συνθηκών και εδαφικών παραμέτρων. Το επόμενο βήμα ήταν να προσδιορίσουμε τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κάθε σχηματισμού

που απαντάται στο συγκεκριμένο πρανές ξεχωριστά. Στην εικόνα φαίνονται όλες οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο πρανές.



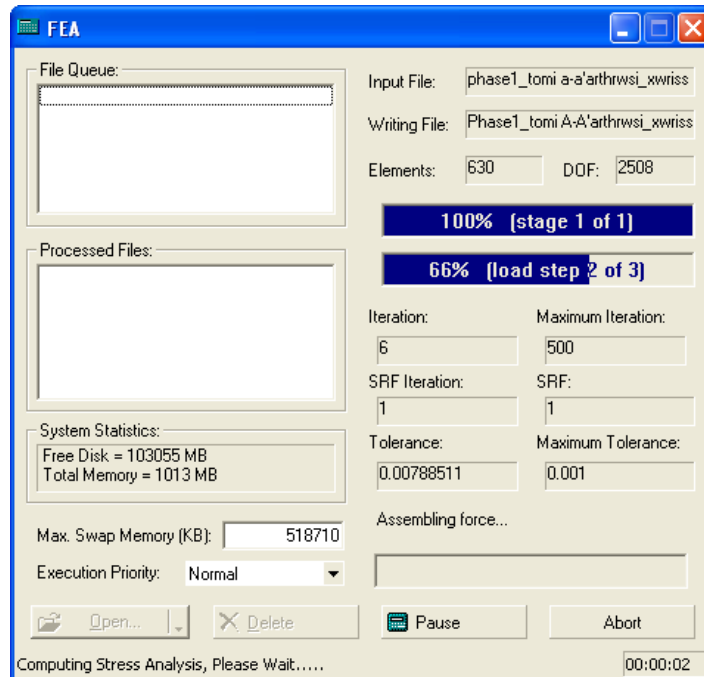
Εικόνα 9.3: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους

- 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.



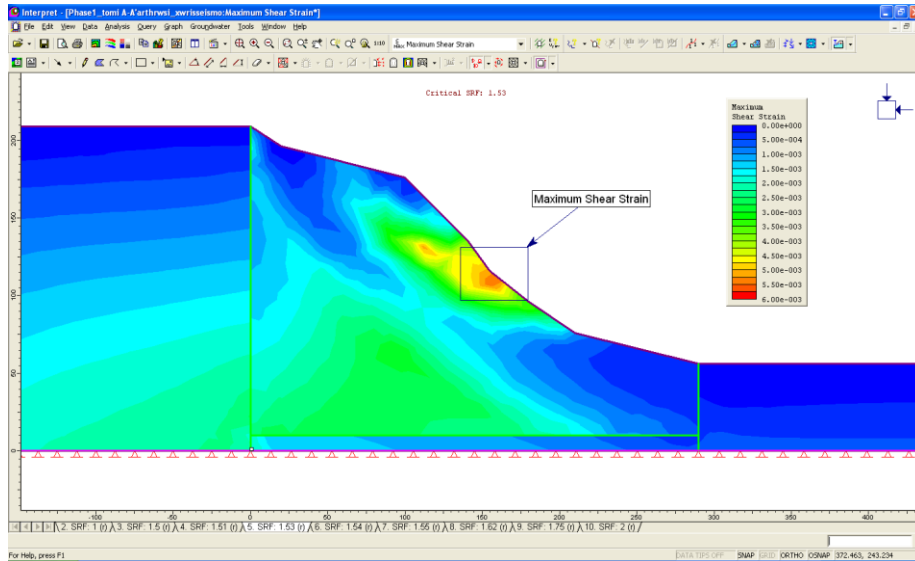
Εικόνα 9.4: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων

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.



Εικόνα 9.5: Παράθυρο υπολογισμού του προγράμματος (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. Ακολουθώς, παρουσιάζεται η κατανομή της διατμητικής αντοχής του πρανούς και ο εντοπισμός της περιοχής με τη μέγιστη διατμητική αντοχή (εικόνα 9.6). Με βάση αυτή την κατανομή τάσεων, απομονώθηκε ένα τμήμα του πρανούς, το οποίο αποτέλεσε το αντικείμενο επεξεργασίας του λογισμικού CHASM.



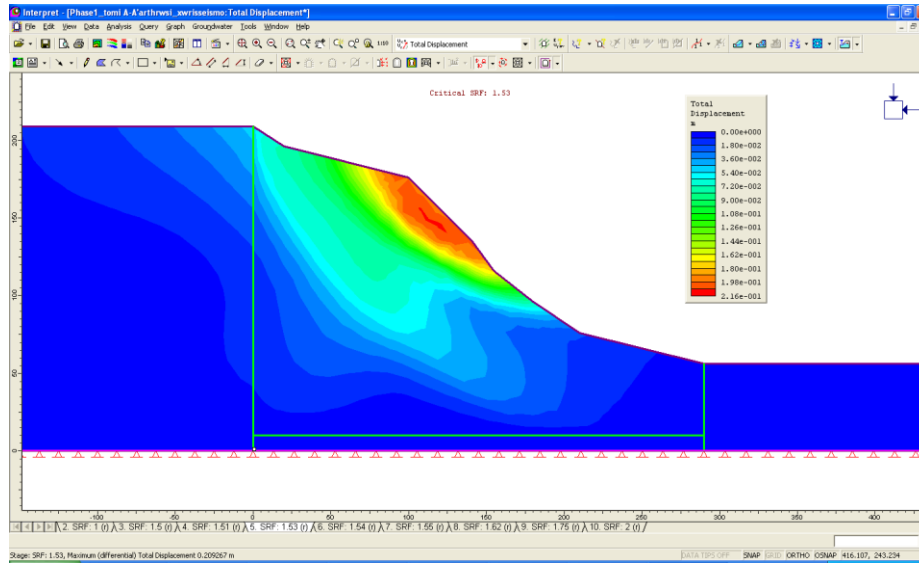
**Εικόνα 9.6: Interpret-(ερμηνεία), μέγιστης διατμητικής τάσης- εντοπισμός κρίσιμης περιοχής**

Η εικόνα 9.6 παρουσιάζει την κρίσιμη τιμή του συντελεστή μείωσης αντοχής SRF, της τιμής δηλαδή που το πρανές γίνεται πιο ασταθές. Εδώ, η τιμή προσδιορίζεται στα 1.53, γεγονός που δηλώνει την ευστάθεια του πρανούς υπό φυσιολογικές συνθήκες. Η κρίσιμη περιοχή εντοπίζεται στην κόκκινη περιοχή η οποία έχει επισημανθεί με τετραγωνάκι και στην εικόνα.

Η κρίσιμη τιμή του SRF αντιπροσωπεύει το συντελεστή μείωσης της αντοχής στον οποίο το πρανές γίνεται πιο ασταθές. Αρχικά το πρόγραμμα δίνει απευθείας τον κρίσιμο συντελεστή μείωσης αντοχής SRF. Ακόμα για μεγάλες τιμές του SRF, η μέγιστη διατμητική τάση που διατίθεται, εμφανίζει ουσιαστικά το που γίνεται η κατολίσθηση.

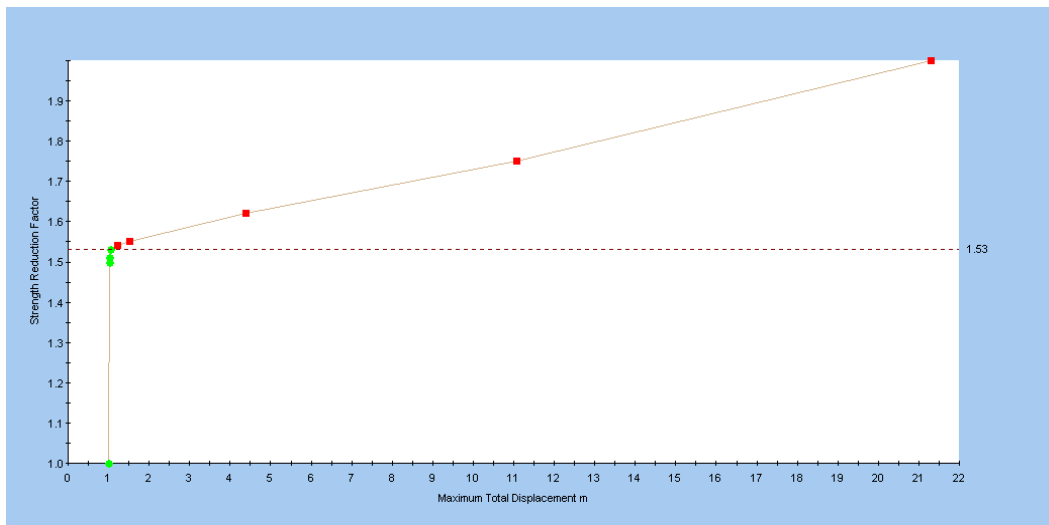
Στην εικόνα 9.7 απεικονίζεται η ολική διατμητική αντοχή του πρανούς, με την κόκκινη περιοχή να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα καθώς η περιοχή αυτή του πρανούς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη κλίση και είναι πιο επιρρεπής σε αστοχία.





Εικόνα 9.7: Interpret (ερμηνεία)-ολική διατμητική αντοχή

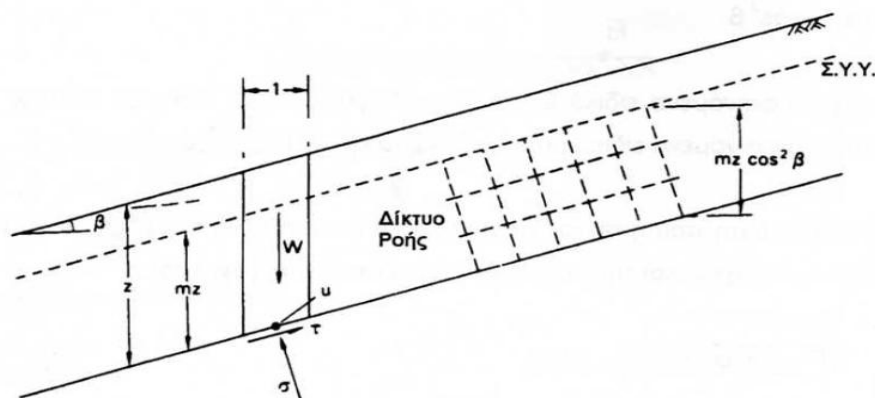
Ακόμη για τον κρίσιμο SRF είναι δυνατή η εμφάνιση της ολικής μετακίνησης. Καθώς ο SRF αυξάνεται, οι ιδιότητες των εδαφών μειώνονται. Στο ίδιο σημείο, το πρηνές θα αστοχήσει και οι μετακινήσεις θα αυξηθούν πολύ γρήγορα και η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων δε θα συγκλίνει. Αυτό το σημείο της μη σύγκλισης 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 συντελεστή ασφαλείας- ολικής μετακίνησης

### 9.2.1 Έλεγχος σε επιφανειακή ολίσθηση

Η τομή A-A', τοποθετείται σε πλειο- πλειστόκαινους σχηματισμούς, όπου 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  $c=90$  kPa και γωνία τριβής  $\phi=37^\circ$ .



Εικόνα 9.8:Ευστάθεια απείρου πρανούς- στρωματοειδείς ολισθήσεις

Σύμφωνα με τη θεωρία για ευστάθεια πρανούς απείρου μήκους στην περίπτωση των στρωματοειδών ολισθήσεων (εικόνα 9.8), ο συντελεστής ασφαλείας είναι:

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

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

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

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

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

$$u = mz\gamma_w \cos^2 \beta$$

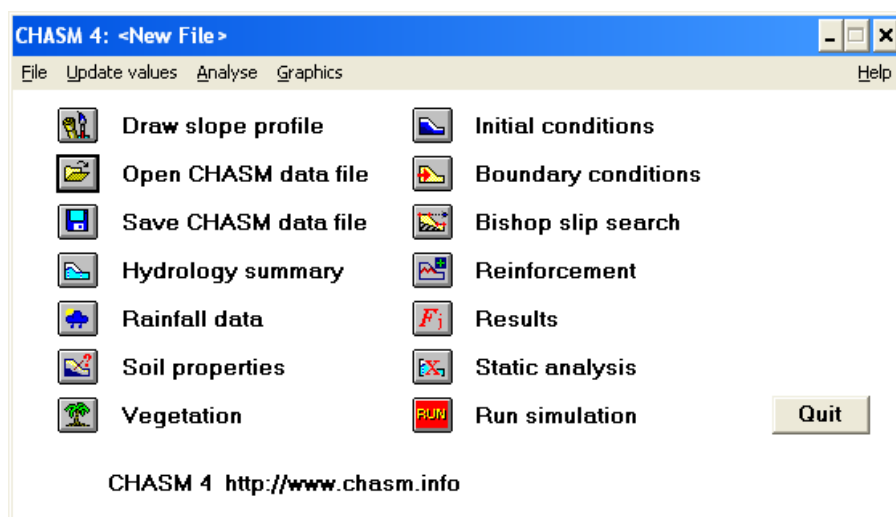
Όπου  $\gamma$  το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους πάνω από τον Υ.Ο.,  $\gamma_s$  το κορεσμένο φαινόμενο ειδικό βάρος και  $\gamma_w$  το ειδικό βάρος του νερού.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία με αγνόηση του υδροφόρου ορίζοντα ( $m=0$ ), προκύπτει  $F=1.5 > 1$ . 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 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕ ΤΟ CHASM

Η κρίσιμη περιοχή της τομής A-A' του πρανού, όπως προέκυψε από την επεξεργασία του προγράμματος Phase, σχεδιάστηκε με την επιλογή **Draw slope profile**, όπως βλέπουμε στο παρακάτω παράθυρο διαλόγου, στο οποίο φαίνονται όλες οι επιλογές του προγράμματος.



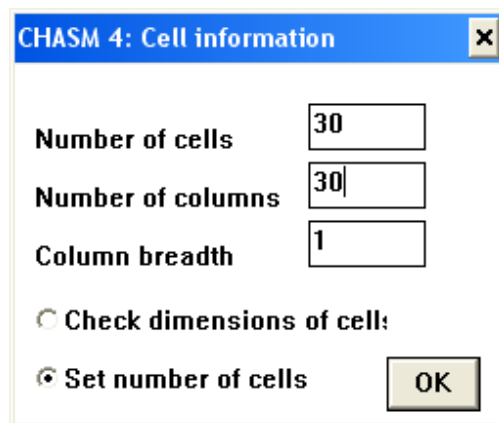
Εικόνα 9.9: Παράθυρο διαλόγου CHASM 4

Στο παράθυρο Define Grid που εμφανίζεται, σχεδιάζεται η γεωμετρία του πρανού επιλέγοντας τις συντεταγμένες, με βάση την τομή που έχει σχεδιαστεί στο AutoCad. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο Chasm δεν μπορούμε να εισάγουμε ακριβή ζεύγη συντεταγμένων και έτσι δικαιολογούνται τυχόν αποκλίσεις της τομής με το AutoCad.

Το μοντέλο του συγκεκριμένου λογισμικού επιλύει την προσομοίωση χρησιμοποιώντας **πεπερασμένες διαφορές**. Στόχος της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, είναι να μετατραπεί η διαφορική εξίσωση σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή αλγεβρική, πράγμα που επιτυγχάνεται με την προσέγγιση των μερικών παραγώγων με όρους διαφορών. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία και σε προβλήματα δύο ή τριών

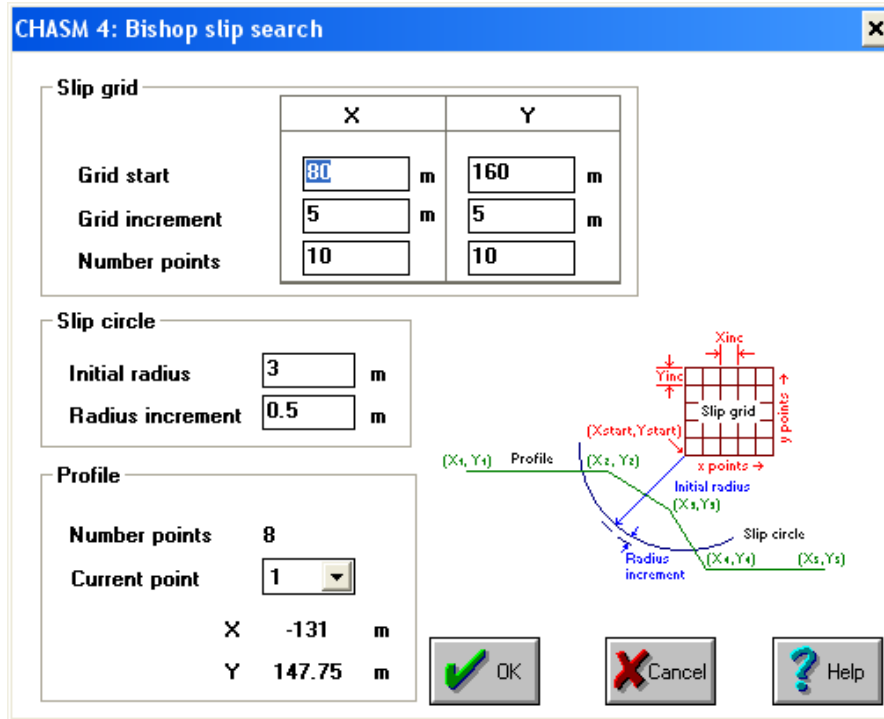
διαστάσεων. Γενικά όμως δεν θεωρείται η καλύτερη, εξαιτίας της δέσμευσης από τον κানাβο που πρέπει να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις, από τη δυσκολία στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων.

Έτσι το πρηνές χωρίζεται σε επιμέρους κανονικά κελιά με την εντολή Hydrology → Draw cells. Στο παράθυρο που εμφανίζεται είναι δυνατή η αλλαγή του αριθμού των κελιών και των στηλών όπως φαίνεται στην εικόνα 9.10.



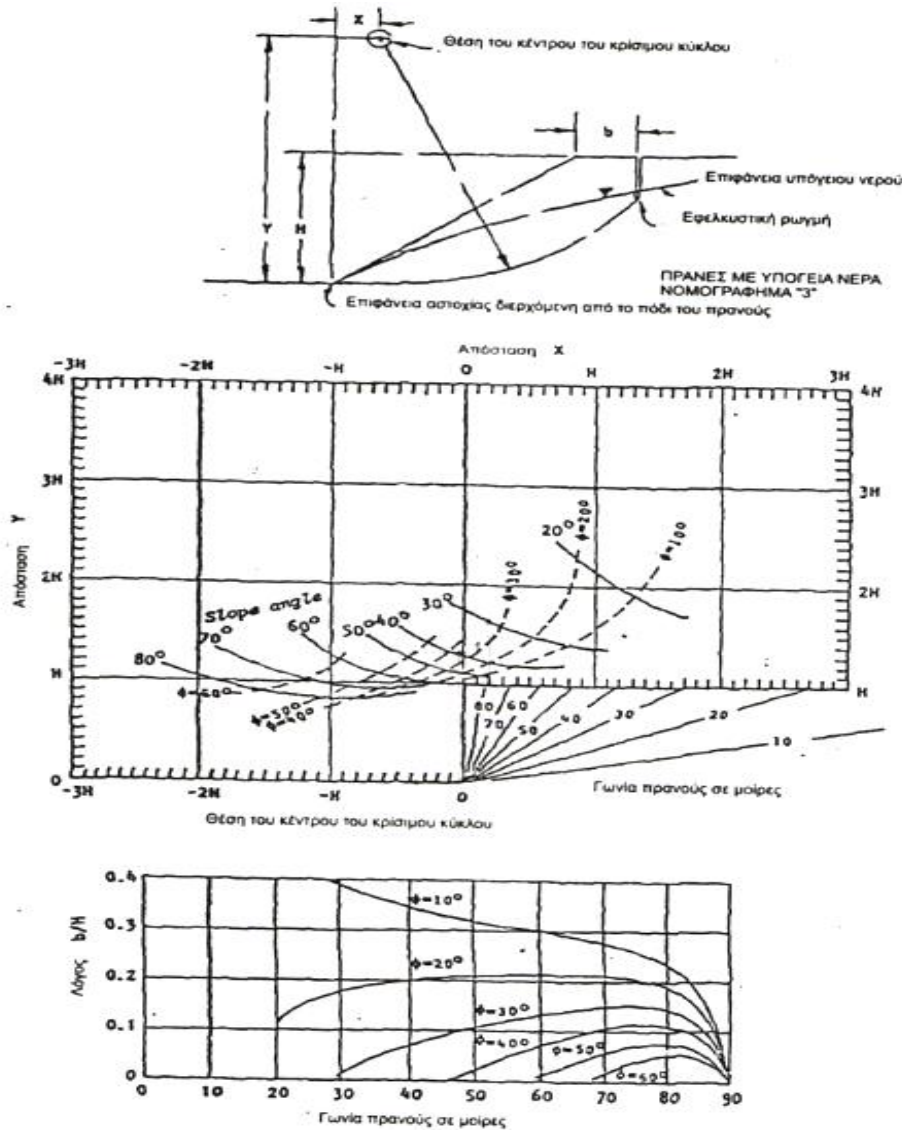
Εικόνα 9.10: Εισαγωγή δεδομένων για τα κελιά

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί το CHASM 4 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 κানাβο 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 (Hoek & Bray, 1975) από το οποίο προκύπτει η θέση του κέντρου του κρίσιμου κύκλου. Στη συγκεκριμένη τομή για ύψος πρανούς περίπου 200 m και γωνία κλίσης του  $40^\circ$ , οι συντεταγμένες αρχής του κανάβου ολίσθησης προσδιορίζονται σε  $X=80$  m και  $Y=160$  m. Θεωρούμε επίσης ότι η αρχική ακτίνα είναι 5 m και αυξάνεται κάθε φορά κατά μισό μέτρο.



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

Στη συνέχεια, γίνεται η 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 πρανούς ενώ το ύψος του εξετάζεται σε τρεις πιθανές θέσεις στα 25% , 50% και 75% του ύψους του πρανούς. Όσον αφορά στη θέση, ο μόνος περιορισμός του προγράμματος είναι ότι ο υδροφόρος πρέπει να τέμνει το πόδι του πρανούς και όχι την επιφάνεια αυτού.

## 9.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ

### 9.4.1 Μελέτη 1<sup>ο</sup> Σεναρίου

Το 1<sup>ο</sup> 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.

#### 9.4.1.1 Καθορισμός παραμέτρων

Δυστυχώς, η απουσία λεπτομερών στοιχείων για τις πραγματικές, επί τόπου, τιμές των εδαφικών παραμέτρων, μας αναγκάζει να χρησιμοποιήσουμε στοιχεία από τη βιβλιογραφία, σε συνδυασμό με πραγματικά δεδομένα από παρατηρήσεις, εκτελώντας το CHASM 4 παραμετρικά.

Προσπαθούμε δηλαδή με τις παραμέτρους που θα επιλέξουμε, για τη δυσμενέστερη περίπτωση που το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται στο 75% του ύψους του πρανούς, να πετύχουμε ευστάθεια έναντι σεισμού. Το ενδεχόμενο μπορεί να είναι ακραίο αλλά δεν είναι απίθανο. Ο υδροφόρος μπορεί να ανεβεί σε τέτοιο επίπεδο καθώς επικρατούν νεογενείς σχηματισμοί. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την καταγραφή πολλών κατολισθητικών φαινομένων στην περιοχή, οδηγεί στην εξέταση της ακραίας αυτής περίπτωσης.

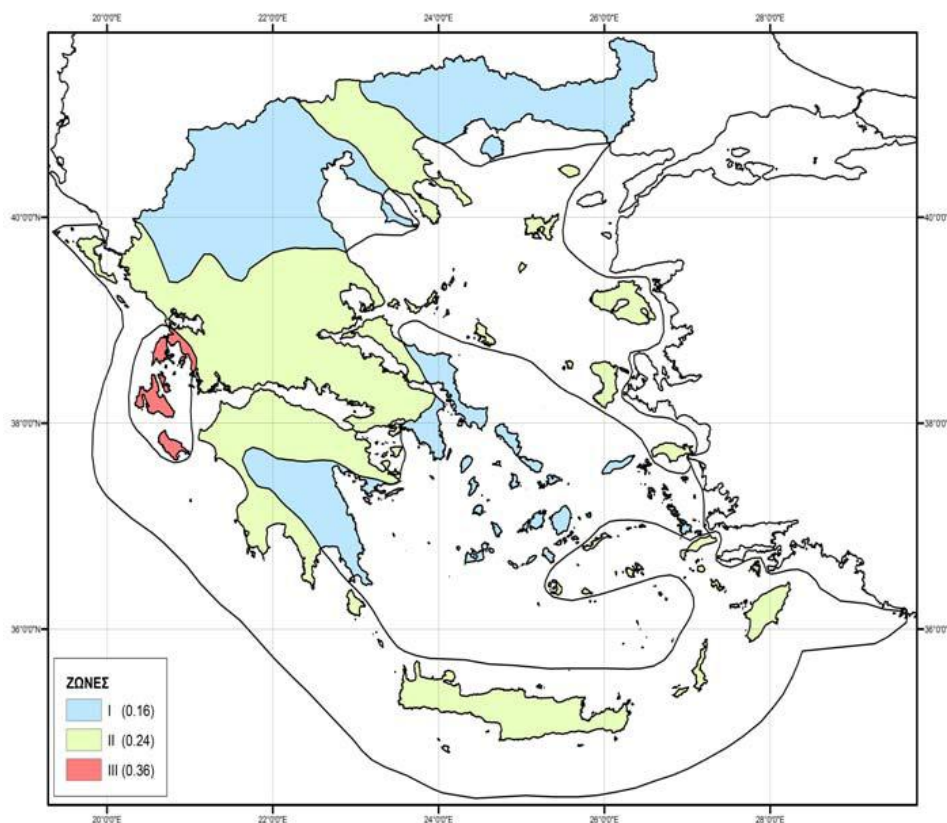
Η περιοχή μελέτης, όπως βλέπουμε και στον χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας που ακολουθεί, ανήκει στη **ζώνη II** με κρίσιμη επιτάχυνση  $a_h=0.24$ . Στην περίπτωση μας απαιτούμε  $k_{cr}=a_h$ . Αντικαθιστώντας λοιπόν, στον παρακάτω τύπο:

$$k_{cr} = \frac{F-1.0}{1.18 + \frac{0.66}{\tan \beta}} \quad (\text{Σακελλαρίου \& Φερεντίνου, 2006})$$

όπου: F= συντελεστής ασφαλείας

$\beta$ = γωνία κλίσης του πρανούς

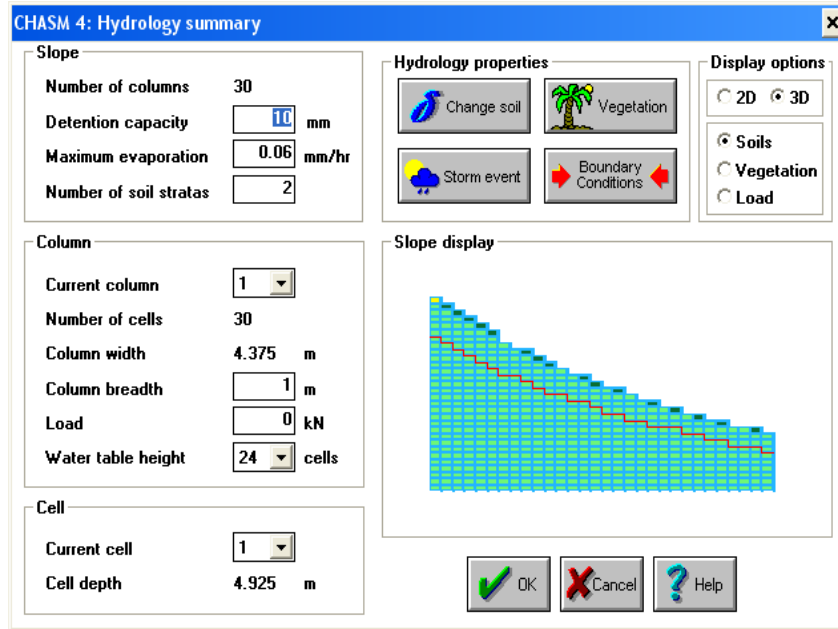
Προκύπτει συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.42 γεγονός που υποδεικνύει ότι για να έχω ευστάθεια στο πρανές μου πρέπει να έχω ένα συντελεστή μεγαλύτερο του 1.42. Επιλέγουμε λοιπόν, εκείνες τις παραμέτρους που θα μου δώσουν σαν αποτέλεσμα έναν συντελεστή μεγαλύτερο ή ίσο του 1.42.



Χάρτης 9.1: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (ΕΑΚ, 2003)

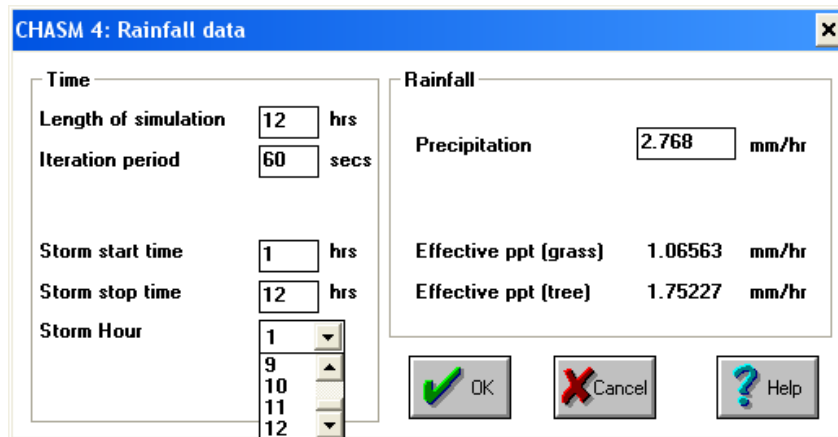
Στο παράθυρο Hydrology Summary, που ακολουθεί, γίνεται ο καθορισμός των υδρολογικών παραμέτρων. Απεικονίζεται η γεωμετρία του πρανούς καθώς και ο υδροφόρος ορίζοντάς του, με κόκκινο χρώμα. Η μέγιστη εξάτμιση του εδάφους υπολογίστηκε στα **0.06 mm/hr** με τη μέθοδο του Penman, σύμφωνα με τα στοιχεία που δόθηκαν από την ΕΜΥ για το σταθμό του Πύργου όπως, η μηνιαία θερμοκρασία του αέρα, η μηνιαία ηλιοφάνεια, η μέση μηνιαία ταχύτητα του ανέμου και η μηνιαία σχετική υγρασία του αέρα. Ο αναλυτικός πίνακας υπολογισμού της μεθόδου παρατίθεται στο παράρτημα.





Εικόνα 9.12: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής

Ακολουθούν τα στοιχεία προσομοίωσης της βροχόπτωσης. Σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές συνθήκες η διάρκεια προσομοίωσης μικρών λεκανών απορροής τάξης  $15 \text{ km}^2$  περίπου, είναι δώδεκα ώρες. Εν προκειμένω, η λεκάνη που μελετάται έχει έκταση  $12 \text{ km}^2$  περίπου, συνεπώς η επιλογή της δωδεκάωρης προσομοίωσης κρίνεται επαρκής. Η καταιγίδα ξεκινάει την 1<sup>η</sup> ώρα και τελειώνει τη 12<sup>η</sup>. Το νετόγραμμα βροχόπτωσης για δώδεκα ώρες που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση, προήλθε έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων της ΕΜΥ, για το μήνα Νοέμβριο, που θεωρείται ο μήνας με τις περισσότερες βροχοπτώσεις (Ι. Ναλμπάντης).



Εικόνα 9.13: Δεδομένα βροχόπτωσης

Παρακάτω έχουμε την καταγραφή των τιμών, της περιεχόμενης κορεσμένης υγρασίας του εδάφους, της διαπερατότητάς του, του κορεσμένου φαινόμενου και του υγρού ειδικού βάρους, της συνοχής καθώς και της γωνίας εσωτερικής τριβής του.

Η τομή βρίσκεται σε περιοχή με νεογενείς σχηματισμούς. Έτσι θεωρούμε ένα στρώμα εδάφους με κορεσμένη περιεχόμενη υγρασία  $w$  περίπου 42%. Το κορεσμένο φαινόμενο βάρος  $\gamma_s$  και το υγρό ειδικό βάρος  $\gamma_b$ , ορίζεται στα 19 και 18 kN/m<sup>3</sup> αντίστοιχα, η συνοχή  $c$  σε ένα εύρος 80-100 kPa και η γωνία τριβής  $\varphi$  στις 30°-40°.

Για το συντελεστή υδροπερατότητας / διαπερατότητας / υδραυλικής αγωγιμότητας  $k$ , οι Terzaghi και Peck δίνουν τον πιο κάτω πίνακα:

**Πίνακας 9.1: Τυπικές τιμές συντελεστών υδροπερατότητας**

<i>Κατηγορία</i>	<i>k (m / sec)</i>	<i>Τύπος εδάφους</i>
<i>Υψηλή</i>	$> 10^{-3}$	Καθαρά χαλίκια, αμμώδη χαλίκια
<i>Μέση</i>	$10^{-3} - 10^{-5}$	Καθαρές άμμοι, αμμοχάλικα
<i>Χαμηλή</i>	$10^{-5} - 10^{-7}$	Λεπτόκοκκες άμμοι, αμμώδεις ιλύες, ιλύες
<i>Πολύ Χαμηλή</i>	$10^{-7} - 10^{-9}$	Ιλυώδεις άργιλοι, αργιλοϊλύες
<i>Πρακτικά αδιαπέρατο</i>	$< 10^{-9}$	Άργιλοι

Πηγή: Terzaghi και Peck, 1967

Στην περίπτωση μας η σύσταση του εδάφους μας τοποθετεί στη δεύτερη (μέση) και τρίτη (χαμηλή) κατηγορία. Γι' αυτό το λόγο θεωρούμε ότι η τιμή του  $k$  κυμαίνεται μεταξύ των τιμών  $10^{-3} - 10^{-7}$  m/s με μέσο όρο την τιμή των  $10^{-5}$  m/s.

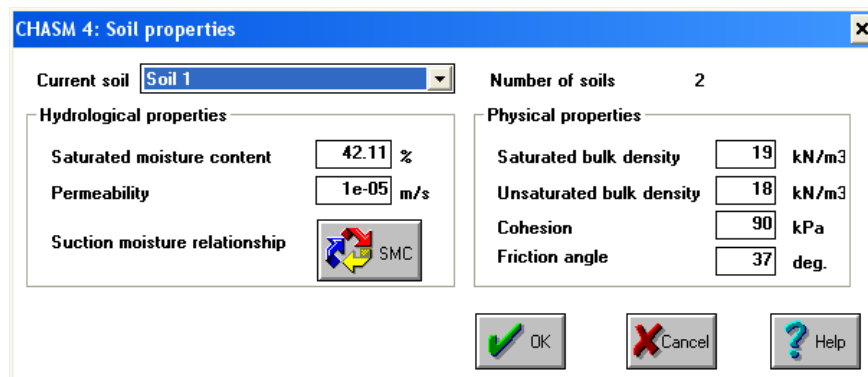
Σε αυτή την περίπτωση αναζητούνται εκείνες οι τιμές συνοχής και γωνίας τριβής που θα συντελέσουν σε επαρκή ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού, όταν το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται στο 75% του ύψους του πρανούς.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται συνοπτικά οι επιλεγέντες τιμές των εδαφικών παραμέτρων.

**Πίνακας 9.2: Τιμές εδαφικών παραμέτρων**

<i>Εδαφική παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
$c$	90 kPa
$\varphi$	$37^\circ$
$\gamma_s$	$19 \text{ kN/m}^3$
$\gamma_b$	$18 \text{ kN/m}^3$
$k$	$10^{-5} \text{ m/s}$

Κριτήριο επιλογής του τελικού ζεύγους συνοχής και γωνίας τριβής ( $c, \varphi$ ), όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αποτελεί η τιμή του τελικού συντελεστή ασφαλείας ο οποίος θα πρέπει να μας παρέχει ευστάθεια έναντι σεισμού. Επομένως, το ζεύγος ( $c, \varphi$ ) που οδηγεί σε συντελεστή μεγαλύτερο του κρίσιμου, θεωρείται το ιδανικότερο για την περιοχή.

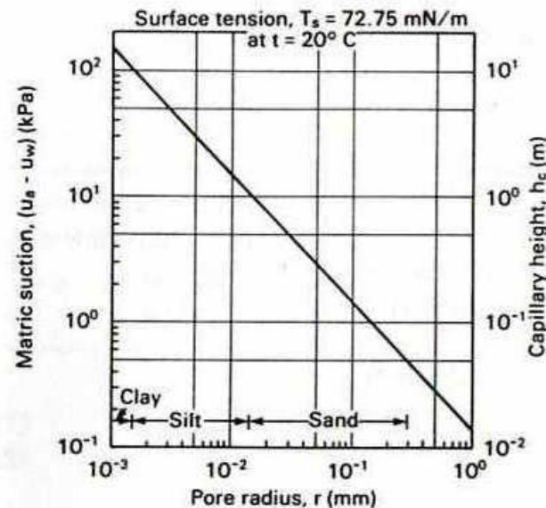


**Εικόνα 9.14: Παράμετροι εδάφους**

Συνεχίζουμε με τον καθορισμό της υπερκείμενης βλάστησης. Η τιμή της μέγιστης εξάτμιση **0.06 mm/hr** υπολογίστηκε από βιβλιογραφικές αναφορές σχετικές με την εξάτμιση στην περιοχή της δυτικής Ελλάδας και τα ποσοστά απορρόφησης των κατακρημνισμάτων από τους διάφορους εδαφικούς σχηματισμούς. Η περιοχή καλυπτόταν κυρίως από ελαιώνες. Έτσι, ορίζουμε στο πρανές σε όλες τις στήλες και για βάθος 1 κελιού (περίπου 5 m) μια τυπική βλάστηση alfalfa, η οποία παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές αντοχής ριζών στα 55 kPa και λόγο ριζών στα 3%, όπου το πρόγραμμα τις δίνει αυτόματα.

Εικόνα 9.15: Προσδιορισμός της βλάστησης

Παράλληλα, επειδή το Chasm συνδέει την υδρολογική ανάλυση και την ανάλυση ευστάθειας, είναι σημαντικό να οριστούν τα όρια της σχέσης και αλληλεπίδρασης των υδρολογικών συνθηκών στην ανάλυση ευστάθειας.



Διάγραμμα 9.3: Σχέση μεταξύ μεγέθους μύζησης, ύψους μύζησης και μεγέθους πόρων

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, επιλέγουμε δύο περιπτώσεις όσον αφορά το όριο της μύζησης, δηλαδή το ύψος εκείνο μέχρι το οποίο δεχόμαστε ότι υπάρχει αρνητική πίεση, οι οποίες είναι οι εξής:

- ↪ *Περίπτωση 1:* Επιλέγεται ως μέγιστο ύψος για τη μύζηση τα -5 m. Η υπόθεση αυτή, γίνεται με βάση το διαχωρισμό του πρανού σε κελιά, αφού το ύψος του κελιού έχει οριστεί στα 5 m περίπου (δηλαδή την αγνόηση της αρνητικής πίεσης κάτω από τα 5 m).

CHASM 4: Initial conditions

**Pore water conditions**

Use current data

**Imposed pore pressure** At the surface  m

Hydrostatic conditions Minim. pore pressure  m

**Geotechnical conditions**

Phi b Phi b: unsaturated friction angle  deg

Suction limit Ignore negative pressure below  m

OK Cancel Help

Εικόνα 9.16: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 1

- ↪ *Περίπτωση 2:* Θεωρούμε μια περίοδο σχετικής ανομβρίας στην οποία το ύψος της αρνητικής πίεσης μειώνεται και φτάνει μέχρι τα -2.5 m από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα.

CHASM 4: Initial conditions

**Pore water conditions**

Use current data

**Imposed pore pressure** At the surface  m

Hydrostatic conditions Minim. pore pressure  m

**Geotechnical conditions**

Phi b Phi b: unsaturated friction angle  deg

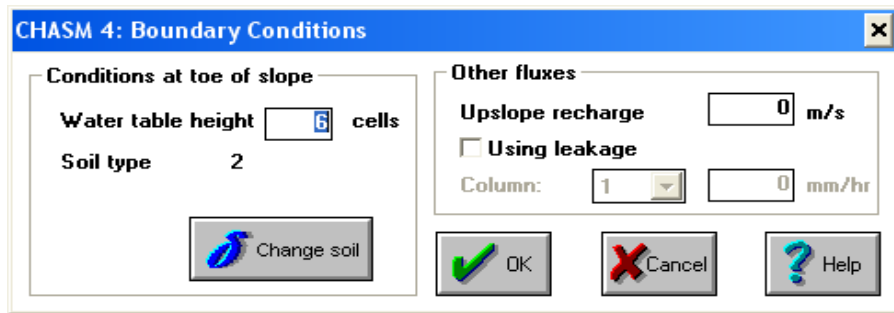
Suction limit Ignore negative pressure below  m

OK Cancel Help

Εικόνα 9.17: Αρχικές συνθήκες- Περίπτωση 2

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, με αποτέλεσμα να μην οδηγούμαστε σε σωστά συμπεράσματα.

Τέλος, έχουμε τον ορισμό των οριακών συνθηκών στο πόδι του πρανούς, με το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα να φτάνει στο 6<sup>ο</sup> κελί.



Εικόνα 9.18: Οριακές συνθήκες

#### 9.4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

➤ *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.

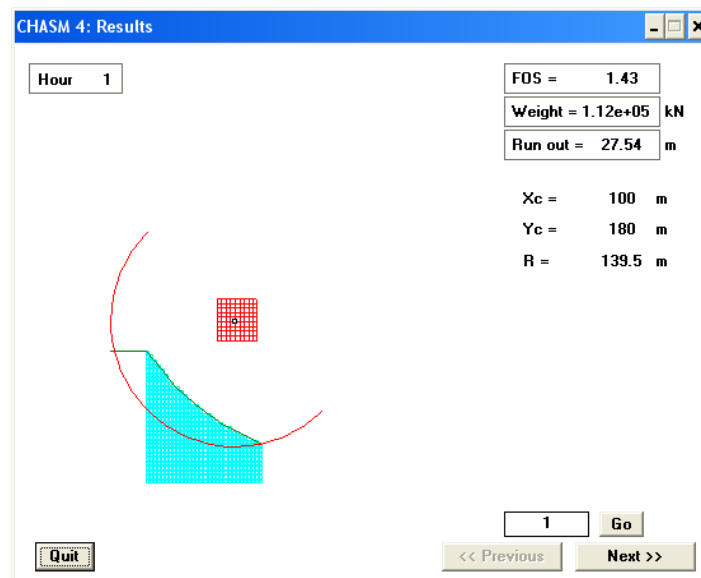
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.43	100	180	139.5	1.12e+05	27.54
2	1.42	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
3	1.39	100	180	139.5	1.12e+05	27.54
4	1.41	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
5	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
6	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
7	1.39	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
8	1.39	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
9	1.41	105	180	138.5	9.9e+04	27.54
10	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
11	1.41	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
12	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

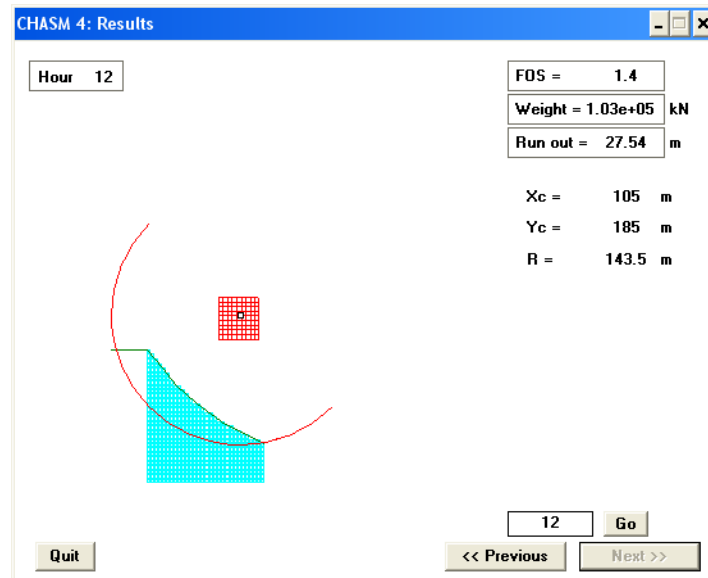
Εικόνα 9.19: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με το πέρασμα των ωρών και την αύξηση της βροχόπτωσης. Η πρώτη ώρα ξεκινάει με συντελεστή 1.43 ακολουθεί μια μικρή αυξομείωση και καταλήγει σε συντελεστή 1.4 τη δωδέκατη ώρα.

Τα σχήματα που ακολουθούν δείχνουν τον κύκλο ολίσθησης στο τέλος της πρώτης και της δωδέκατης ώρας προσομοίωσης, με τις συντεταγμένες του κέντρου την πρώτη ώρα να διαμορφώνονται στα (100,180)m και την ακτίνα του στα 139.5 m. Στο τέλος της 12<sup>ης</sup> ώρας, ο κύκλος ολίσθησης δε διαφέρει και πολύ από αυτόν της πρώτης ώρας. Οι συντεταγμένες κέντρου του παρουσιάζουν μια μικρή αλλαγή στα (105,185)m και η ακτίνα του επίσης στα 143.5 m. Αλλαγή παρατηρείται επίσης, στο συντελεστή ασφαλείας που από 1.43 γίνεται 1.4. Η πτώση αυτή του συντελεστή θεωρείται μικρή γι' αυτό δε βλέπουμε και κάποια αλλαγή στον κύκλο της ολίσθησης.



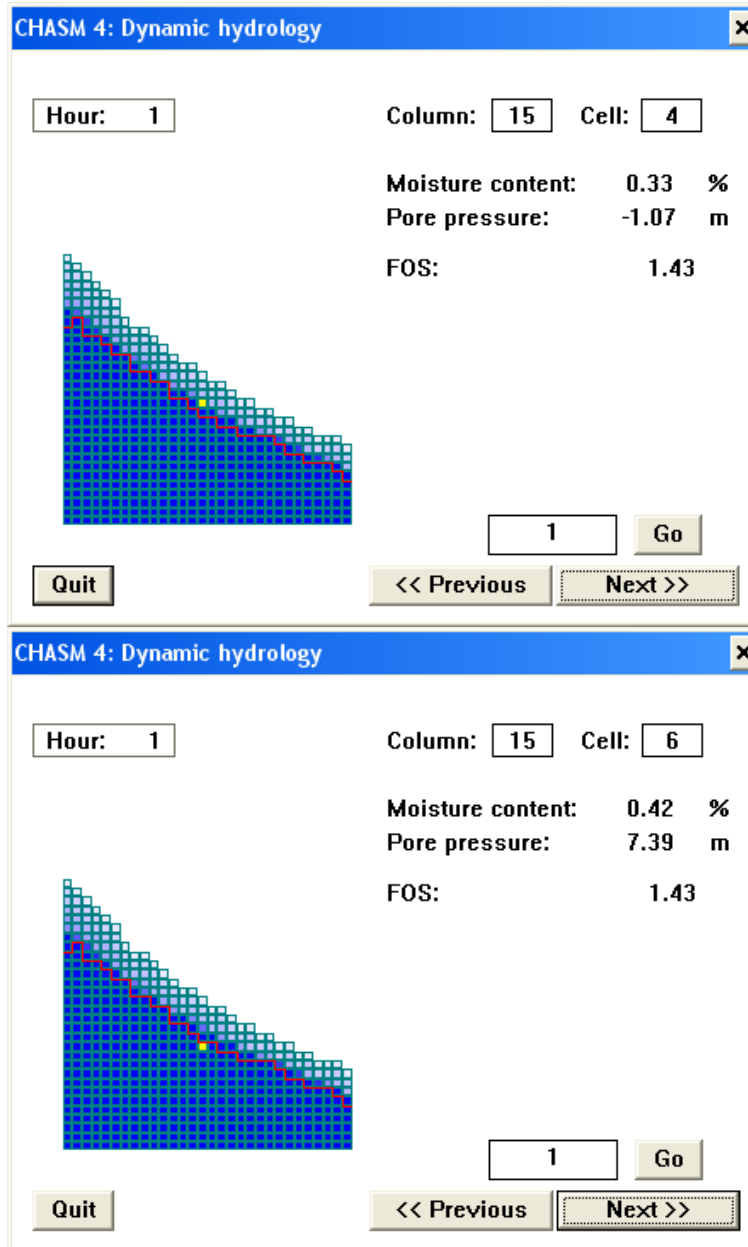
Εικόνα 9.20: Κύκλος ολίσθησης κατά την 1<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης



Εικόνα 9.21: Κύκλος ολίσθησης κατά τη 12<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης

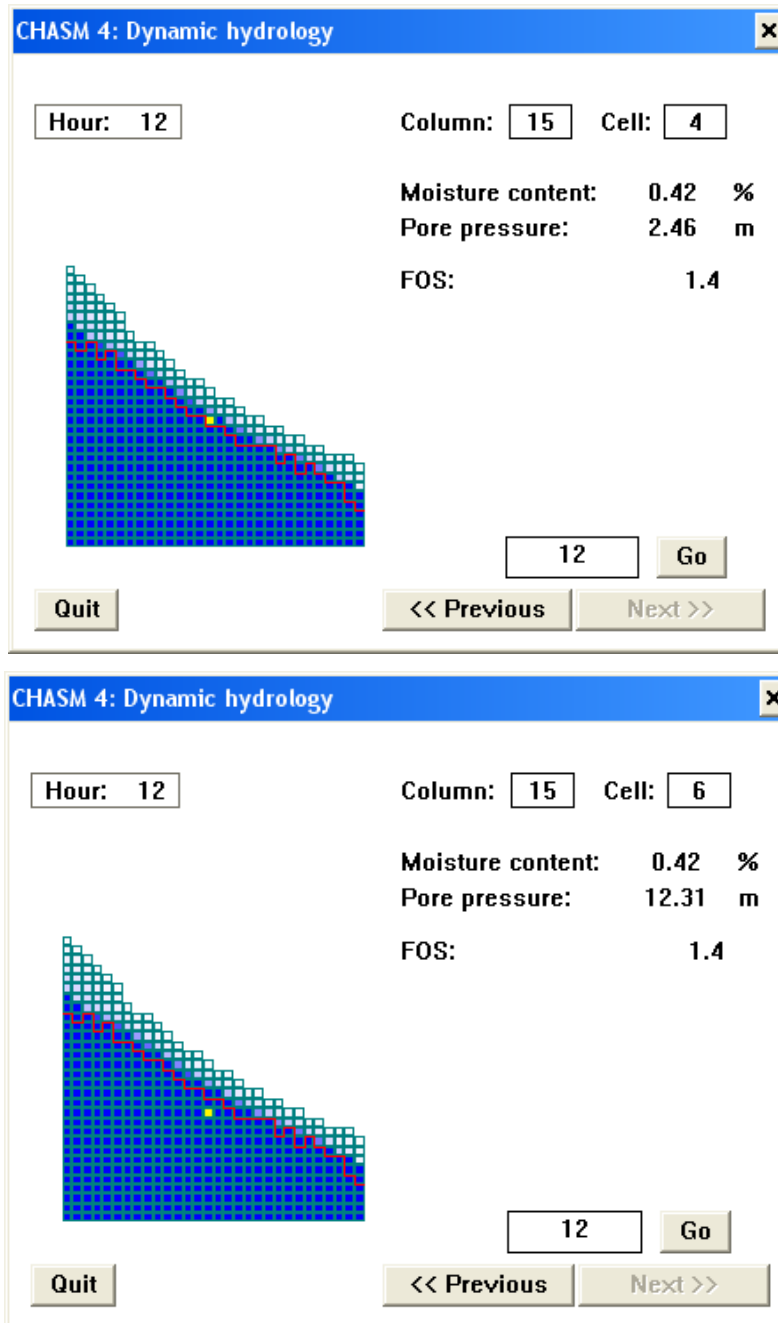
Στην εικόνα 9.22 παρατηρούμε την αναμενόμενη διαφορά της περιεχόμενης υγρασίας και πίεσης πόρων πάνω και κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα κατά την 1<sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης. Για παράδειγμα, στην 15<sup>η</sup> στήλη, το 4<sup>ο</sup> κελί έχει 33% υγρασία και αρνητική πίεση πόρων -1.07 m, που δηλώνει τη μύζηση, ενώ στην ίδια στήλη το 6<sup>ο</sup> κελί κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεχόμενη υγρασία που ανέρχεται στα 42% και θετική πίεση πόρων 7.39 m.





Εικόνα 9.22: Υδρολογία κελιών κατά την 1<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης

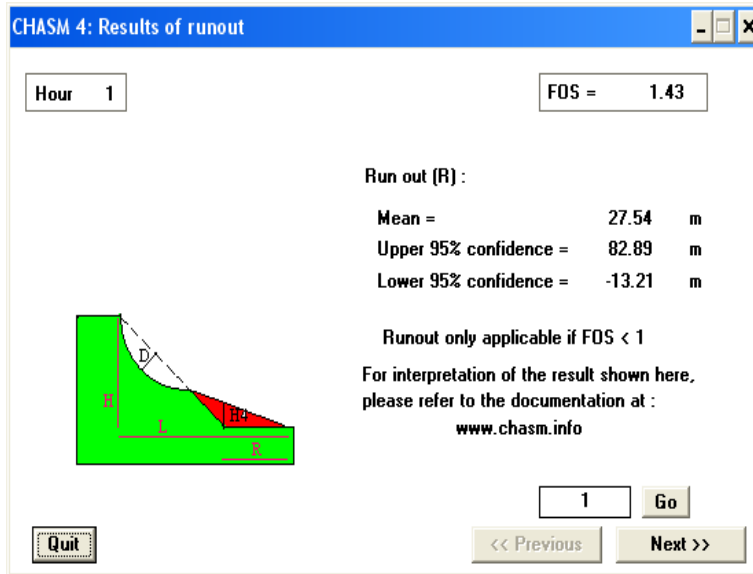
Το πρόγραμμα παρέχει επίσης τη δυνατότητα οπτικοποίησης της αλλαγής του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης. Εδώ, το κελί 4 στη στήλη 15 βρίσκεται πλέον με 42% περιεχόμενη υγρασία και με πίεση πόρων να έχει ανέβει στα 2.46 m. Ενώ το κελί που βρισκόταν κάτω από τον υδροφόρο ανέβασε την πίεση πόρων του στα 12.31 m (εικόνα 9.23).



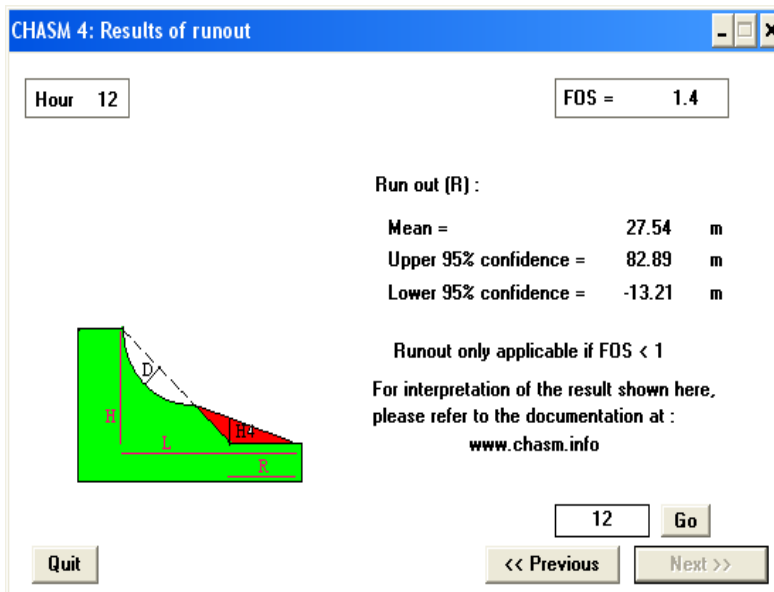
Εικόνα 9.23: Υδρολογία κελιών κατά τη 12<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γεωμετρία της αστοχίας σε εγκάρσια τομή την πρώτη και την τελευταία ώρα προσομοίωσης καθώς και τα αποτελέσματα του Run out (R). Το πόσο δηλαδή απομακρύνεται η επιφάνεια ολίσθησης κατά μήκος του πρανούς (υλικό που κατολισθαίνει), για επίπεδο εμπιστοσύνης χαμηλότερο και υψηλότερο του 95%. Βέβαια

το Run out (R), όπως σημειώνεται και στο σχήμα, έχει πρακτική σημασία μόνο όταν ο FOS είναι <1, όταν δηλαδή έχουμε κάποιου είδους αστοχία.



Εικόνα 9.24: Γεωμετρία της αστοχίας σε εγκάρσια τομή την 1<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης



Εικόνα 9.25: Γεωμετρία της αστοχίας σε εγκάρσια τομή τη 12<sup>η</sup> ώρα προσομοίωσης

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

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.

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.36	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
2	1.33	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
3	1.28	105	185	143.5	1.04e+05	27.54
4	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
5	1.3	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
6	1.3	105	185	143.5	1.04e+05	27.54
7	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
8	1.29	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
9	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
10	1.3	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
11	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
12	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.26: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας την πρώτη ώρα μειώνεται στο 1.36 από 1.43 που ήταν με ύψος μύζησης στα -5 m και έπειτα από μια μικρή αυξομείωση καταλήγει σε συντελεστή 1.29 από 1.4. Η αλλαγή αυτή επιτρέπει να εξαγάγουμε ένα πρώτο συμπέρασμα για την επίδραση του ύψους μύζησης στην αντοχή του εδάφους και να υπογραμμίσουμε ότι όσο μειώνονται το ύψος μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας γεγονός που φανερώνει την αλληλεξάρτησή τους.

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  $c = 90$  kPa και  $\phi = 37^\circ$  και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

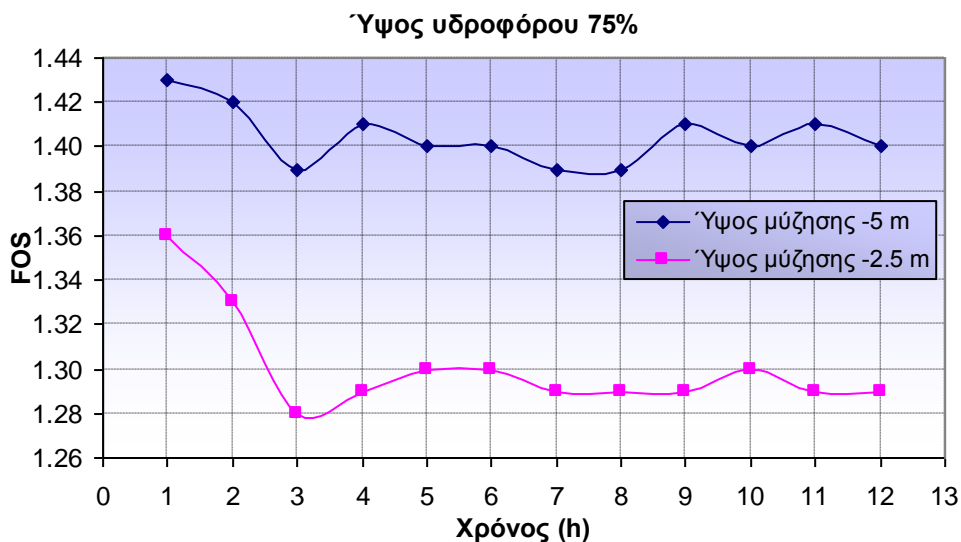
#### 9.4.1.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

Πίνακας 9.3: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης

Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.43	1.76	1.79	1	1.36	1.70	1.71
2	1.42	1.75	1.79	2	1.33	1.65	1.71
3	1.39	1.74	1.80	3	1.28	1.61	1.71
4	1.41	1.73	1.80	4	1.29	1.59	1.72
5	1.40	1.73	1.80	5	1.30	1.59	1.72
6	1.40	1.72	1.81	6	1.30	1.56	1.72
7	1.39	1.71	1.81	7	1.29	1.56	1.72
8	1.39	1.71	1.81	8	1.29	1.55	1.72
9	1.41	1.70	1.81	9	1.29	1.54	1.72
10	1.40	1.69	1.82	10	1.30	1.52	1.72
11	1.41	1.69	1.82	11	1.29	1.53	1.73
12	1.40	1.70	1.82	12	1.29	1.52	1.73

Σε πρώτη φάση ελέγχουμε τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης για ύψος υδροφόρου 75%.



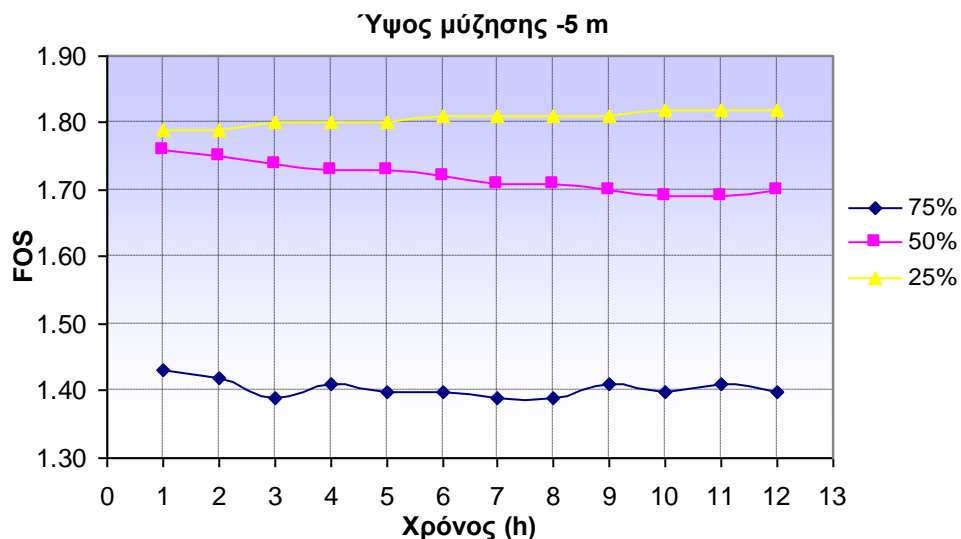
Διάγραμμα 9.4: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας-Περιπτώσεις 1& 2

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το ύψος μύζησης μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Έχοντας το ύψος μύζησης στα -5 m, ο FOS ξεκινάει από το 1.44 και καταλήγει στο 1.40, ενώ με μείωσή του στα -2.5 m, ο FOS ξεκινάει από το 1.36 και

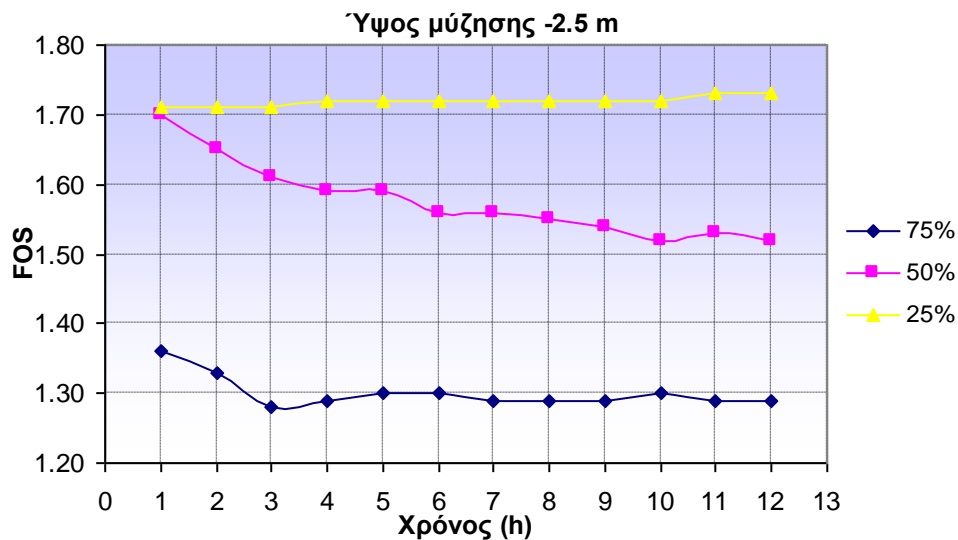
καταλήγει στο 1.29. Εντύπωση προκαλεί και η απότομη πτώση του συντελεστή ασφαλείας, στην *Περίπτωση 2*, από το 1.36 την πρώτη ώρα στο 1.28 την τρίτη ώρα. Η μείωση είναι της τάξης του 8%- διπλάσια από την αντίστοιχη της *Περίπτωσης 1*.

Σημειώνουμε ακόμη, ότι όσο περνούν οι ώρες και η ποσότητα διείσδυσης του νερού μεγαλώνει τόσο πιο 'ευαίσθητο', στις μεταβολές των ιδιοτήτων του, γίνεται το έδαφος και συνεπώς τόσο πιο μικρός γίνεται ο συντελεστής ασφαλείας του, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αντοχή του εδάφους. Γι' αυτό και στις δύο περιπτώσεις ξεκινάμε με ένα μεγάλο συντελεστή και καταλήγουμε σε ένα μικρότερο.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα με τους συντελεστές ασφαλείας του πρανούς για στάθμη υδροφόρου 75%, 50% και 25%. Τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων περιπτώσεων προέκυψαν με εφαρμογή των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για τη δυσμενέστερη περίπτωση του 75%.



**Διάγραμμα 9.5: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1**



**Διάγραμμα 9.6: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2**

Ο συντελεστής ασφαλείας (και στις δύο περιπτώσεις) κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα όταν το ύψος του υδροφόρου τοποθετείται στο 25% ή στο 50% του ύψους του πρανούς, ενώ όταν η στάθμη του ανεβαίνει στο 75%, παρατηρείται η εμφανής πτώση του συντελεστή. Τα αποτελέσματα αυτά μας τονίζουν ότι ο συντελεστής ασφαλείας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα καθώς αυτό επηρεάζει τις υδραυλικές συνθήκες του έδαφους.

Υπογραμμίζεται ακόμη η δράση της βροχόπτωσης στο έδαφος. Διαφορετική επίδραση έχει η βροχόπτωση σ' ένα πρανές που είναι κορεσμένο από ένα μη κορεσμένο καθώς ο συντελεστής ασφαλείας στην πρώτη περίπτωση είναι πολύ μικρότερος. Έτσι για την καλύτερη ευστάθεια των πρανών, προτείνεται **η επιφανειακή και η υπόγεια αποστράγγιση** των γεωλογικών σχηματισμών, ώστε να εξαλειφθούν οι αρνητικές επιδράσεις του νερού στη διατμητική αντοχή όπως η μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, η αποφυγή επιφανειακής και υπόγεια διάβρωσης, η φόρτιση του σχηματισμού υπό το βάρος επιφανειακά συγκεντρωμένων υδάτων.

## 9.4.2 Μελέτη 2<sup>ου</sup> Σεναρίου

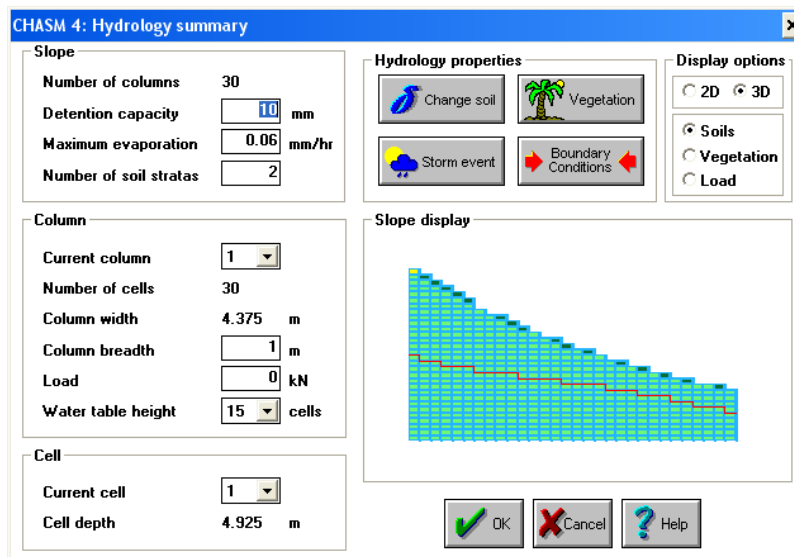
Στο 2<sup>ο</sup> σενάριο επιλέγεται μία μέση στάθμη υδροφόρου ορίζοντα που ίσως να αποτελεί και πιο συνήθη περίπτωση, με τον υδροφόρο να βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς.

### 9.4.2.1 Καθορισμός παραμέτρων

Στο συγκεκριμένο σενάριο προσδιορίζονται οι τιμές εκείνες της συνοχής και της γωνίας τριβής που θα συντελέσουν στην ευστάθεια του πρανούς έναντι σεισμού, όταν το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς.

Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν ίδιες με το πρώτο σενάριο καθώς και οι δύο υποθέσεις για το ύψος μύζησης, με την πρώτη να υποθέτει σχετικά μεγάλο ύψος που φτάνει μέχρι τα -5 m και τη δεύτερη με μικρότερο, που φτάνει στα -2.5 m. Το ύψος αυτό του υδροφόρου, είναι πιο πιθανό να συναντηθεί σε ένα φυσικό πρανές από ότι το προηγούμενο, 75%, το οποίο αποτελεί μια ακραία περίπτωση που χρήζει μελέτης.

Στο παράθυρο Hydrology Summary, που ακολουθεί, γίνεται ο καθορισμός των υδρολογικών παραμέτρων. Απεικονίζεται η γεωμετρία του πρανούς καθώς και ο υδροφόρος ορίζοντάς στο 50% του ύψους του πρανούς, με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 9.27: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής



Παρακάτω έχουμε την καταγραφή των τιμών, της περιεχόμενης κορεσμένης υγρασίας του εδάφους, της διαπερατότητας του, του φαινόμενου κορεσμένου και μη ειδικού βάρους, της συνοχής καθώς και της γωνίας εσωτερικής τριβής του. Η τομή βρίσκεται σε περιοχή με τεταρτογενείς σχηματισμούς. Έτσι θεωρούμε ένα στρώμα εδάφους με κορεσμένη περιεχόμενη υγρασία  $w$  περίπου 42%. Το κορεσμένο φαινόμενο  $\gamma_s$  και υγρό ειδικό βάρος  $\gamma_b$  ορίζεται στα 19 και 18 kN/m<sup>3</sup> αντίστοιχα, η συνοχή  $c$  σε ένα εύρος 60-80 kPa και η γωνία τριβής  $\varphi$  στις 30°-40°.

**Πίνακας 9.4: Τιμές εδαφικών παραμέτρων**

<i>Εδαφικές παράμετροι</i>	<i>Τιμές</i>
$c$	60 kPa
$\varphi$	34°
$\gamma_s$	19 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_b$	18 kN/m <sup>3</sup>
$k$	10 <sup>-5</sup> m/s

Κριτήριο επιλογής του τελικού ζεύγους συνοχής και γωνίας τριβής ( $c, \varphi$ ), όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αποτελεί η τιμή του τελικού συντελεστή ασφαλείας ο οποίος θα πρέπει να μας παρέχει ευστάθεια έναντι σεισμού. Επομένως, το ζεύγος ( $c, \varphi$ ) που οδηγεί σε συντελεστή μεγαλύτερο του κρίσιμου, θεωρείται το ιδανικότερο για την περιοχή.

#### 9.4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

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

Προσομοιώνεται το πρανές θεωρώντας ότι το μέγιστο ύψος μύζησης φτάνει τα 5 m και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στο 50% του ύψους του πρανούς.

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	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
2	1.47	100	195	130	4.11e+04	27.54
3	1.47	105	185	143.5	1.01e+05	27.54
4	1.46	110	190	147.5	9.29e+04	27.54
5	1.46	115	195	152	8.57e+04	27.54
6	1.46	105	185	143.5	1.01e+05	27.54
7	1.44	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
8	1.45	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
9	1.44	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
10	1.44	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
11	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
12	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54

End of simulation      Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται με το πέρασμα των ωρών και την αύξηση της βροχόπτωσης. Η πρώτη ώρα ξεκινάει με συντελεστή 1.46 ακολουθεί μια μικρή αυξομείωση και καταλήγει σε συντελεστή 1.43 τη δωδέκατη ώρα.

Επιπλέον, 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  $c = 60$  kPa και  $\phi = 34^\circ$  και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

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

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.

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	1.4	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
2	1.39	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
3	1.36	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
4	1.34	105	180	138.5	9.8e+04	27.54
5	1.33	105	180	138.5	9.8e+04	27.54
6	1.32	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
7	1.31	105	180	138.5	9.81e+04	27.54
8	1.3	105	180	138.5	9.82e+04	27.54
9	1.29	105	180	138.5	9.82e+04	27.54
10	1.28	105	180	138.5	9.83e+04	27.54
11	1.28	105	180	138.5	9.83e+04	27.54
12	1.27	105	180	138.5	9.84e+04	27.54
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Εικόνα 9.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας την πρώτη ώρα μειώνεται στο 1.4 από 1.46 που ήταν με ύψος μύζησης -5m και έπειτα από μια μικρή αυξομείωση καταλήγει σε συντελεστή 1.27 από 1.43.

Όπως και στην *Περίπτωση 1*, έτσι και εδώ ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση, αλλά και μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα κατά 25%, του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους  $c = 60$  kPa και  $\phi = 34^\circ$  και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

#### 9.4.2.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

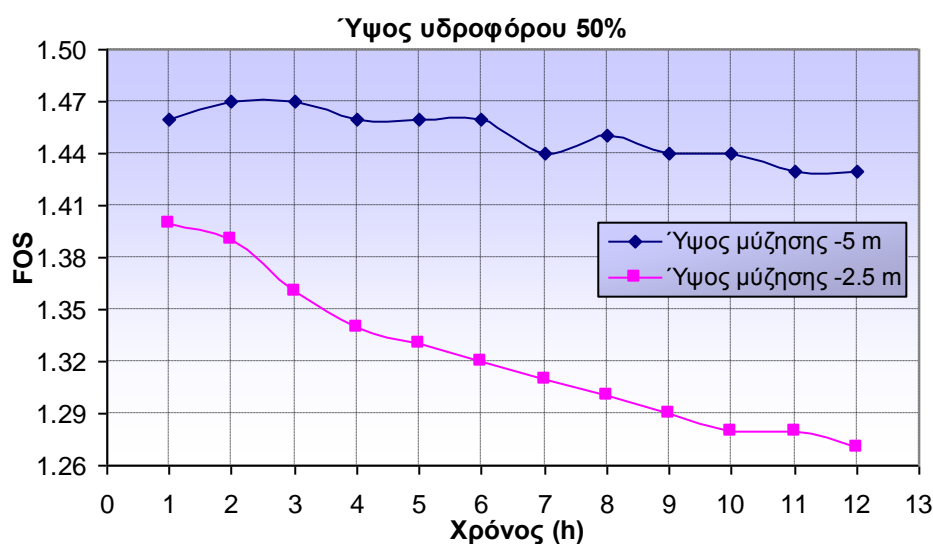
Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

Πίνακας 9.5: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης

Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.20	1.46	1.48	1	1.14	1.4	1.41
2	1.19	1.47	1.49	2	1.11	1.39	1.41
3	1.16	1.47	1.49	3	1.06	1.36	1.41
4	1.18	1.46	1.50	4	1.07	1.34	1.41
5	1.17	1.46	1.50	5	1.07	1.33	1.41
6	1.17	1.46	1.50	6	1.07	1.32	1.42

7	1.16	1.44	1.50	7	1.07	1.31	1.42
8	1.16	1.45	1.51	8	1.07	1.30	1.42
9	1.17	1.44	1.51	9	1.07	1.29	1.42
10	1.17	1.44	1.51	10	1.08	1.28	1.42
11	1.17	1.43	1.51	11	1.07	1.28	1.42
12	1.17	1.43	1.51	12	1.07	1.27	1.42

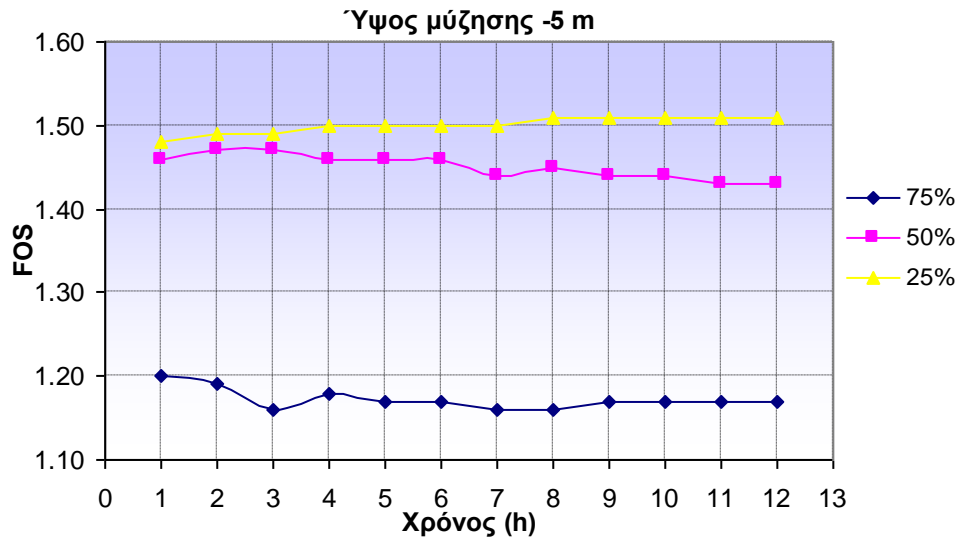
Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης με το ύψος μύζησης στα -5 m και στα -2.5 m.



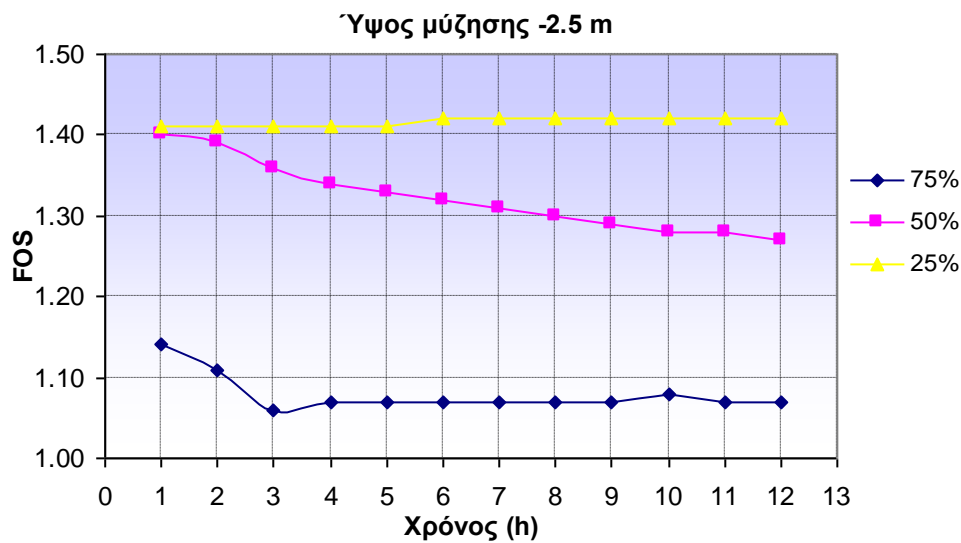
**Διάγραμμα 9.7:** Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1& 2

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται το ύψος μύζησης μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς γεγονός που αναδεικνύει την αλληλεξάρτησή τους. Έχοντας το ύψος μύζησης στα -5 m, ο FOS ξεκινάει από το 1.46 και καταλήγει στο 1.43, ενώ με μείωσή του στα -2.5 m, ο FOS ξεκινάει από το 1.4 και καταλήγει στο 1.27, σημειώνοντας πτώση 13%- σχεδόν πενταπλάσια από εκείνη της *Περίπτωσης 1*.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα με τους συντελεστές ασφαλείας του πρανούς για στάθμη υδροφόρου 75%, 50% και 25%. Τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων περιπτώσεων προέκυψαν με εφαρμογή των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για την περίπτωση του 50%, ύψους υδροφόρου.



Διάγραμμα 9.8: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1



Διάγραμμα 9.9: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2

Στο σενάριο αυτό επιλέγονται τέτοιες τιμές παραμέτρων, ώστε να υπάρχει ευστάθεια έναντι σεισμού στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς. Στο διάγραμμα, λοιπόν, αποτυπώνεται ότι οι επιλεγθείσες παράμετροι δίνουν ευστάθεια και στην περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται κατά 25% χαμηλότερα. Δεν ισχύει όμως το ίδιο στην περίπτωση που το ύψος μύζησης πέφτει στα -2.5 m καθώς ο συντελεστής ασφαλείας καταλήγει σε  $1.28 < 1.42$ .

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 20% περίπου.

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 κατά 10% και τη μη ευστάθεια έναντι σεισμού καθώς  $1.28 < 1.42$ .

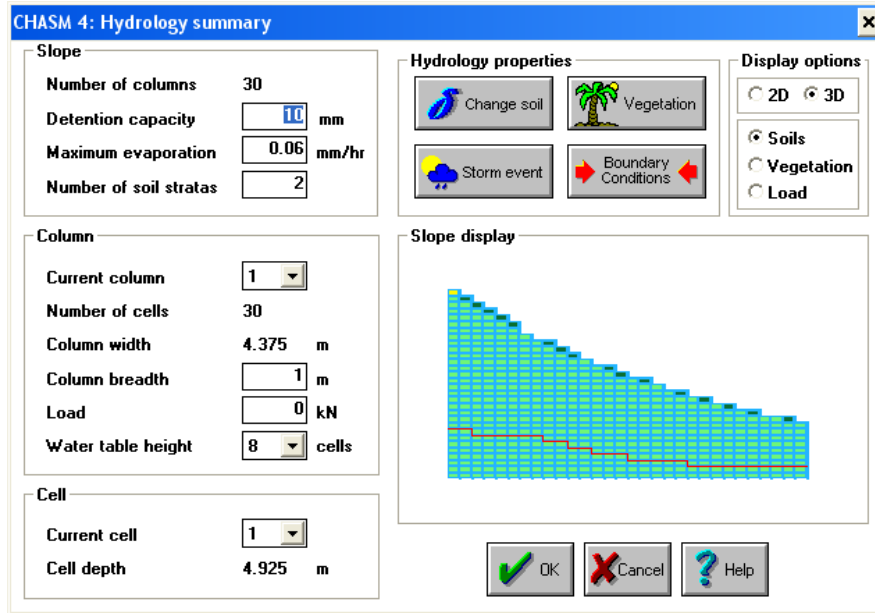
### **9.4.3 Μελέτη 3<sup>ου</sup> Σεναρίου**

Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει εκείνη την περίπτωση που η κορεσμένη ζώνη είναι μικρή στο πρανές, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα να πλησιάζει το 25% του ύψους του πρανούς- μετρώντας από τη βάση του.

#### **9.4.3.1 Καθορισμός παραμέτρων**

Στη συγκεκριμένη 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 στο 25% του ύψους του πρανούς. Το ύψος αυτό κρίνεται ιδιαίτερα χαμηλό και συναντιέται δύσκολα, παράλληλα όμως αποτελεί μια δυσμενή περίπτωση που χρήζει μελέτης.

Στο παράθυρο Hydrology Summary, που ακολουθεί, γίνεται ο καθορισμός των υδρολογικών παραμέτρων. Απεικονίζεται η γεωμετρία του πρανούς καθώς και ο υδροφόρος ορίζοντάς στο 25% του ύψους του πρανούς, με κόκκινο χρώμα.



Εικόνα 9.30: Υδρολογικά στοιχεία περιοχής

Παρακάτω έχουμε την καταγραφή των τιμών, της περιεχόμενης κορεσμένης υγρασίας του εδάφους, της διαπερατότητας του, του φαινόμενου κορεσμένου και μη ειδικού βάρους, της συνοχής καθώς και της γωνίας εσωτερικής τριβής του.

Η τομή βρίσκεται σε περιοχή με νεογενείς σχηματισμούς. Έτσι θεωρούμε ένα στρώμα εδάφους με κορεσμένη περιεχόμενη υγρασία  $w$  περίπου 42%. Το κορεσμένο και μη φαινόμενο ειδικό βάρος  $\gamma$  ορίζεται στα 19 και 18 kN/m<sup>3</sup> αντίστοιχα, η συνοχή  $c$  σε ένα εύρος 50-70 kPa και η γωνία τριβής  $\phi$  στις 30°-40°.

Πίνακας 9.6: Τιμές εδαφικών παραμέτρων

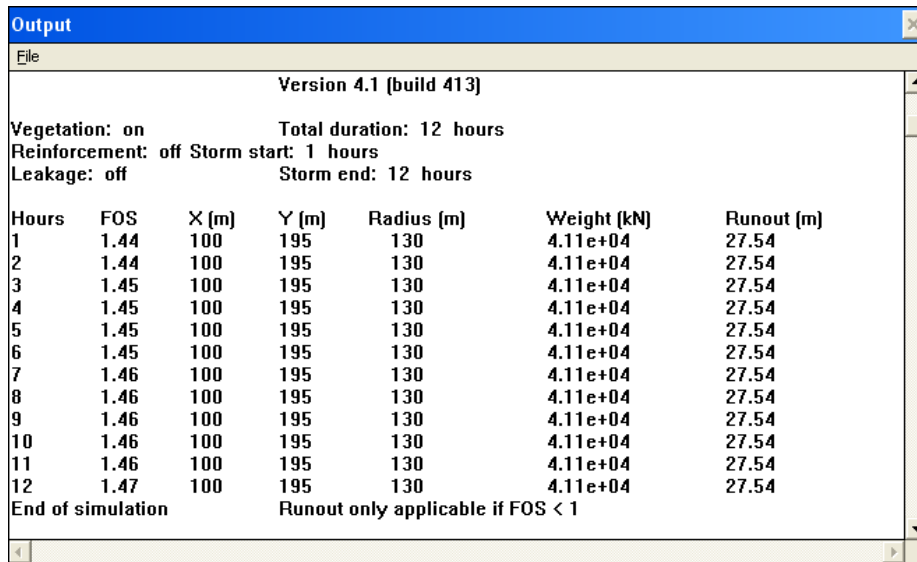
<i>Εδαφική παράμετρος</i>	<i>Τιμή</i>
$c$	52 kPa
$\phi$	34°
$\gamma_s$	19 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_v$	18 kN/m <sup>3</sup>
$k$	10 <sup>-5</sup> m/s

Κριτήριο επιλογής του τελικού ζεύγους συνοχής και γωνίας τριβής ( $c, \phi$ ), όπως ειπώθηκε και παραπάνω, αποτελεί η τιμή του τελικού συντελεστή ασφαλείας ο οποίος θα πρέπει να

μας παρέχει ευστάθεια έναντι σεισμού. Επομένως, το ζεύγος (c,φ) που οδηγεί σε συντελεστή μεγαλύτερο του κρίσιμου, θεωρείται το ιδανικότερο για την περιοχή.

#### 9.4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

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



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	1.44	100	195	130	4.11e+04	27.54
2	1.44	100	195	130	4.11e+04	27.54
3	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
4	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
5	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
6	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
7	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
8	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
9	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
10	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
11	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
12	1.47	100	195	130	4.11e+04	27.54
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Εικόνα 9.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται με το πέρασμα των ωρών και την αύξηση της βροχόπτωσης. Η πρώτη ώρα ξεκινάει με συντελεστή 1.44 ακολουθεί μια μικρή αύξηση και καταλήγει σε συντελεστή 1.47 τη δωδέκατη ώρα. Η αύξηση αυτή πιθανόν να οφείλεται στις διάφορες υδραυλικές συνθήκες που διαμορφώνονται στο έδαφος.

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  $c = 52 \text{ kPa}$  και  $\phi = 34^\circ$  και με όμοια διαδικασία υπολογίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές ασφαλείας.

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



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	1.36	110	205	141	3.5e+04	27.54
2	1.36	110	205	141	3.5e+04	27.54
3	1.36	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
4	1.36	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
5	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
6	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
7	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
8	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
9	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
10	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
11	1.37	110	205	141	3.5e+04	27.54
12	1.37	110	205	141	3.5e+04	27.54
End of simulation			Runout only applicable if FOS < 1			

Εικόνα 9.32: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2

Εδώ ο συντελεστής ασφαλείας την πρώτη ώρα μειώνεται στο 1.36 από 1.44 που ήταν στην προηγούμενη περίπτωση με ύψος μύζησης -5 m και έπειτα από μια μικρή αύξηση καταλήγει σε συντελεστή 1.37 από 1.47.

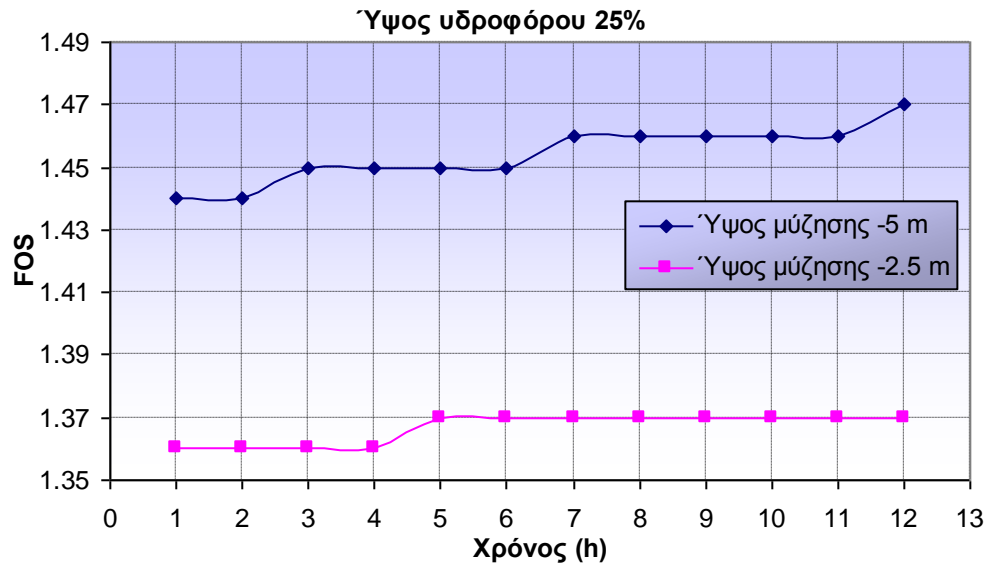
#### 9.4.3.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

Πίνακας 9.7: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης

Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.16	1.42	1.44	1	1.1	1.35	1.36
2	1.16	1.42	1.44	2	1.07	1.35	1.36
3	1.13	1.43	1.45	3	1.03	1.32	1.36
4	1.15	1.43	1.45	4	1.04	1.3	1.36
5	1.14	1.42	1.45	5	1.04	1.3	1.37
6	1.14	1.42	1.45	6	1.04	1.28	1.37
7	1.13	1.41	1.46	7	1.04	1.28	1.37
8	1.13	1.41	1.46	8	1.04	1.26	1.37
9	1.14	1.4	1.46	9	1.03	1.26	1.37
10	1.13	1.41	1.46	10	1.04	1.25	1.37
11	1.14	1.4	1.46	11	1.04	1.25	1.37
12	1.14	1.4	1.47	12	1.03	1.24	1.37

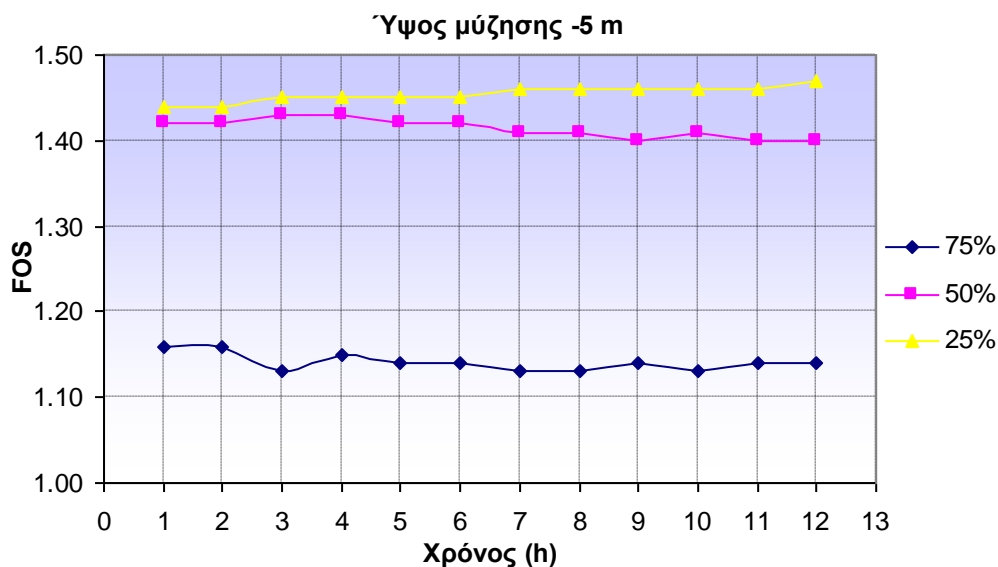
Ελέγχουμε τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας κατά τη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης για ύψος υδροφόρου 25%.



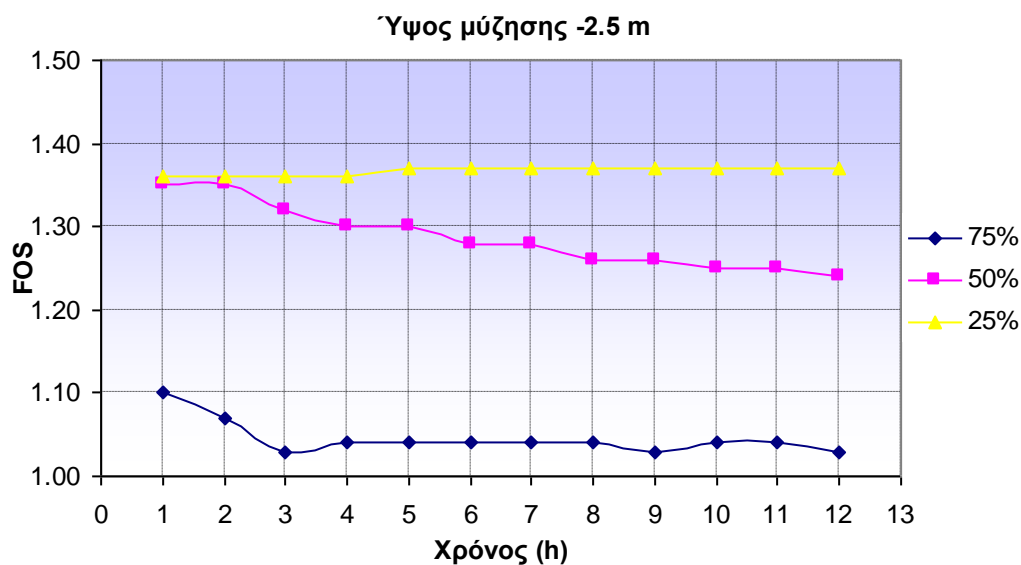
**Διάγραμμα 9.10: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1 & 2**

Παρατηρούμε ότι όσο μειώνονται οι τιμές της πίεσης πόρων μειώνεται και ο συντελεστής ασφαλείας γεγονός που επιβεβαιώνει την αλληλεξάρτησή τους. Με ύψος μύζησης τα -5 m, ο FOS ξεκινάει με 1.44 και καταλήγει σε 1.47, ενώ με μια πτώση στα -2.5 m ξεκινάει με 1.36 και καταλήγει σε 1.37. Η μεταβολή στη δεύτερη περίπτωση είναι της τάξης του 1% ενώ στην πρώτη περίπτωση της τάξης του 3%. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η μεταβολή αυτή μικραίνει με την πτώση του ύψους της μύζησης.

Ακολουθούν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα με τους συντελεστές ασφαλείας του πρανούς, για στάθμη υδροφόρου 25%, 50% και 75%. Τα αποτελέσματα των δύο τελευταίων περιπτώσεων προέκυψαν με εφαρμογή των παραμέτρων που επιλέχθηκαν για τη περίπτωση του 25%.



Διάγραμμα 9.11: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1



Διάγραμμα 9.12: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2

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, στο διάγραμμα ότι οι επιλεγθείσες τιμές δίνουν ευστάθεια και στην περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται λίγο ψηλότερα από το 50% του ύψους του πρανούς.

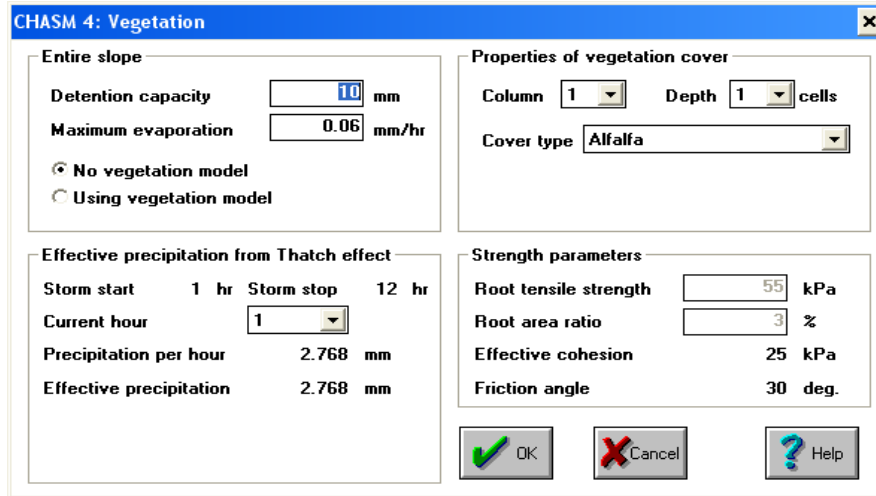
Εδώ, παρατηρούμε ότι ο συντελεστής ασφαλείας επαρκεί για ευστάθεια έναντι σεισμού μόνο στην περίπτωση που το ύψος μύζησης φτάνει τα -5 m και το ύψος του υδροφόρου δεν ξεπερνά το 50% του ύψους του πρανούς. Σε μικρότερα ύψη μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται καθιστώντας το πρανές επιρρεπές σε αστοχία σε ενδεχόμενο σεισμού, για ύψος υδροφόρου μεγαλύτερο του 50%.

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 10%.

## **9.5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΡΑΝΟΥΣ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΠΥΡΚΑΓΙΑ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, 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.

Την επίδραση της πυρκαγιάς στο πρανές την λαμβάνουμε υπόψη μας μόνο με την απενεργοποίηση του μοντέλου της βλάστησης (εικόνα 9.33). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι θεωρούνται ακριβώς ίδιοι χωρίς καμία αλλαγή. Ισχύουν δηλαδή όσα ειπώθηκαν παραπάνω για την προσομοίωση, χωρίς το ενδεχόμενο της πυρκαγιάς.



Εικόνα 9.33: Μοντέλο βλάστησης

Απενεργοποιούμε λοιπόν το μοντέλο της βλάστησης και "τρέχουμε" το πρόγραμμα για να δούμε την επίδραση που θα έχει στο συντελεστή ασφαλείας.

### 9.5.1 Μελέτη 1<sup>00</sup> Σεναρίου

#### 9.5.1.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

➤ *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.

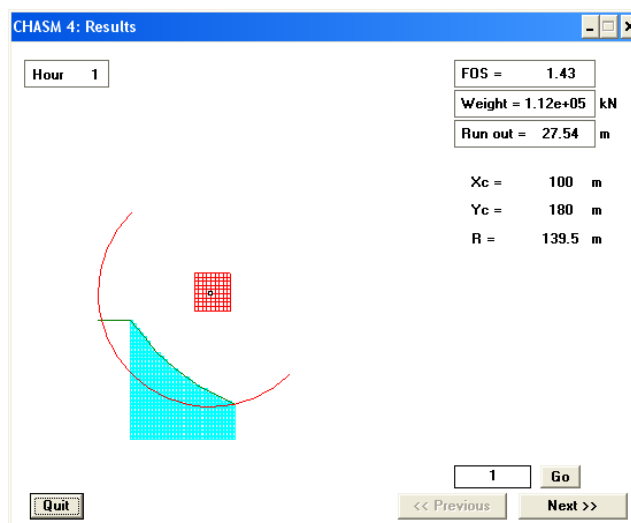
Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.43	100	180	139.5	1.12e+05	27.54
2	1.42	100	175	135	1.09e+05	27.54
3	1.38	100	180	139.5	1.12e+05	27.54
4	1.41	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
5	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
6	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
7	1.39	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
8	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
9	1.41	105	180	138.5	9.9e+04	27.54
10	1.4	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
11	1.41	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
12	1.39	105	185	143.5	1.03e+05	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

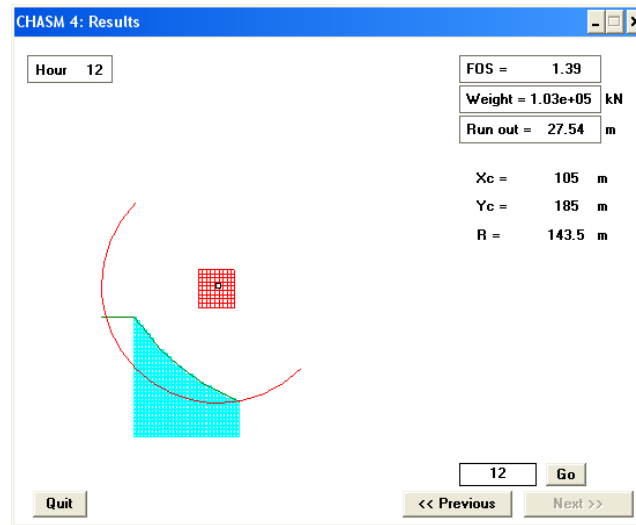
Εικόνα 9.34: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

Παραπάνω (εικόνα 9.34) παρουσιάζονται 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 1.43 και 1.39, τιμές οι οποίες είναι μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες για το πρηνές πριν την πυρκαγιά. Μάλιστα, η τελευταία ώρα της προσομοίωσης δηλώνει μεταβολή της κατάστασης του πρηνούς σε ασταθές έναντι σεισμού. Με μία πρώτη ματιά, λοιπόν, είναι φανερή η υποβάθμιση του πρηνούς εξαιτίας της απουσίας της επίδρασης της φυτοκάλυψης.

Ακολουθούν οι κύκλοι ολίσθησης στο τέλος της πρώτης και της δωδέκατης ώρας προσομοίωσης, με τις συντεταγμένες του κέντρου την πρώτη ώρα να διαμορφώνονται στα (100,180)m και την ακτίνα του στα 139.5 m. Ενώ τη δωδέκατη ώρα αυξάνει λίγο στα (105,185)m, με ακτίνα 143.5 m. Διαφορά παρουσιάζεται και στο συντελεστή ασφαλείας που από 1.43 γίνεται 1.39. Η πτώση αυτή του συντελεστή θεωρείται μικρή γι' αυτό δε βλέπουμε και κάποια αλλαγή στον κύκλο της ολίσθησης,

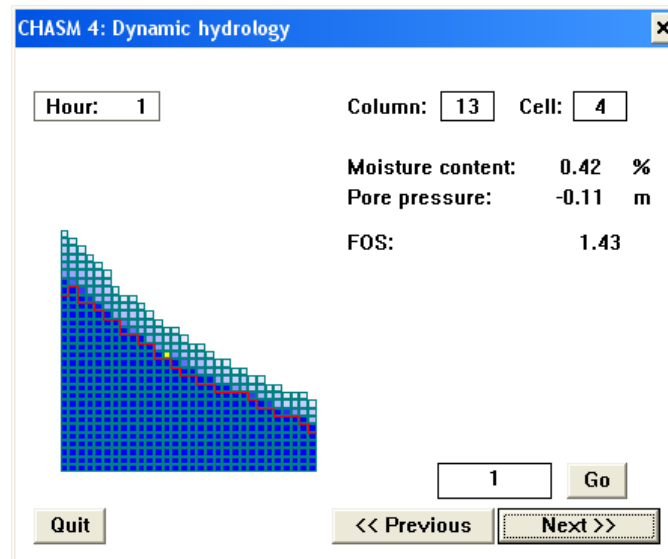


Εικόνα 9.35: Κύκλος ολίσθησης κατά την 1<sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης

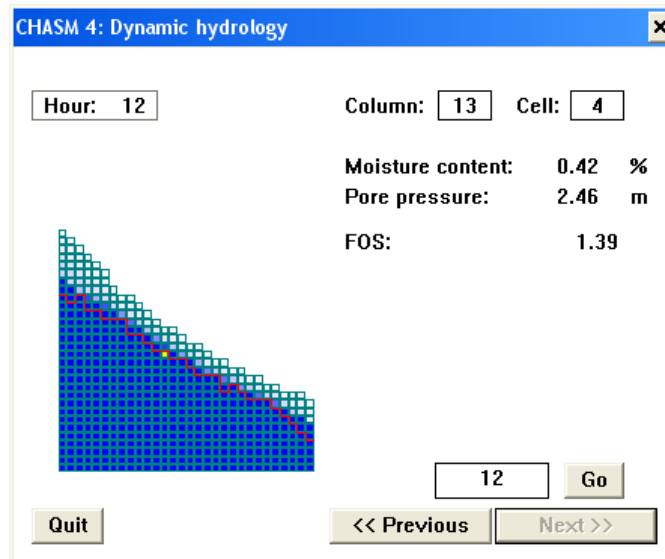


Εικόνα 9.36: Κύκλος ολίσθησης κατά τη 12<sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης

Ακόμη, παρατηρούμε ότι κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης αυξάνεται το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και κατά συνέπεια αυξάνεται και η πίεση των πόρων του εδάφους όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 9.37: Υδρολογία πρανούς κατά την 1<sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης



Εικόνα 9.38: Υδρολογία πρανούς κατά την 12<sup>η</sup> ώρα της προσομοίωσης

Ακόμη, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο μέσο 50% και στο 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.

Output						
File						
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	1.36	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
2	1.33	105	185	143.5	1.03e+05	27.54
3	1.28	105	185	143.5	1.04e+05	27.54
4	1.3	105	185	143.5	1.04e+05	27.54
5	1.29	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
6	1.3	105	185	143.5	1.04e+05	27.54
7	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
8	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
9	1.29	105	180	138.5	9.96e+04	27.54
10	1.3	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
11	1.3	105	180	138.5	9.95e+04	27.54
12	1.31	105	180	138.5	9.94e+04	27.54
End of simulation		Runout only applicable if FOS < 1				

Εικόνα 9.39: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2



Όπως στην *Περίπτωση 1*, έτσι και εδώ σημειώνεται αισθητή μείωση του συντελεστή ασφαλείας για το καμένο έδαφος. 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*.

### 9.5.1.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

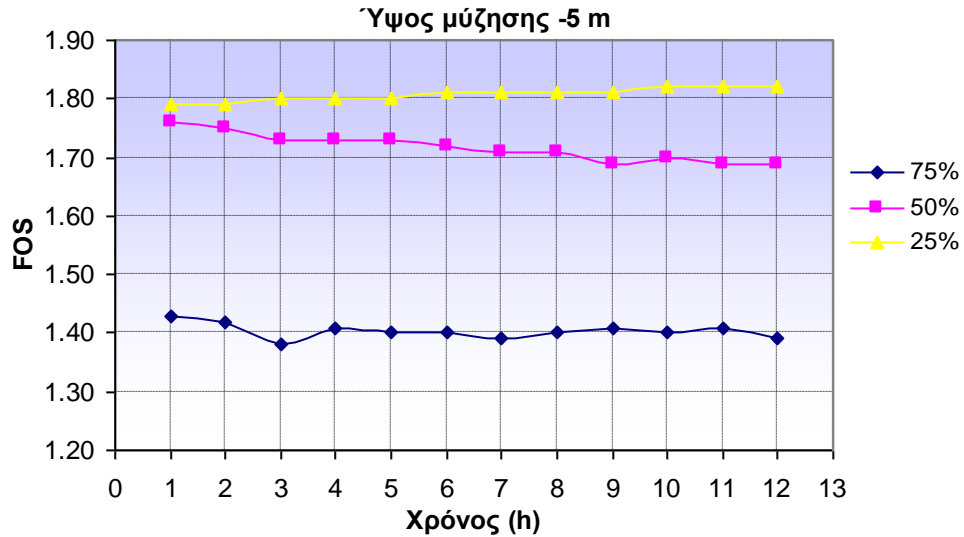
Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

**Πίνακας 9.8: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης**

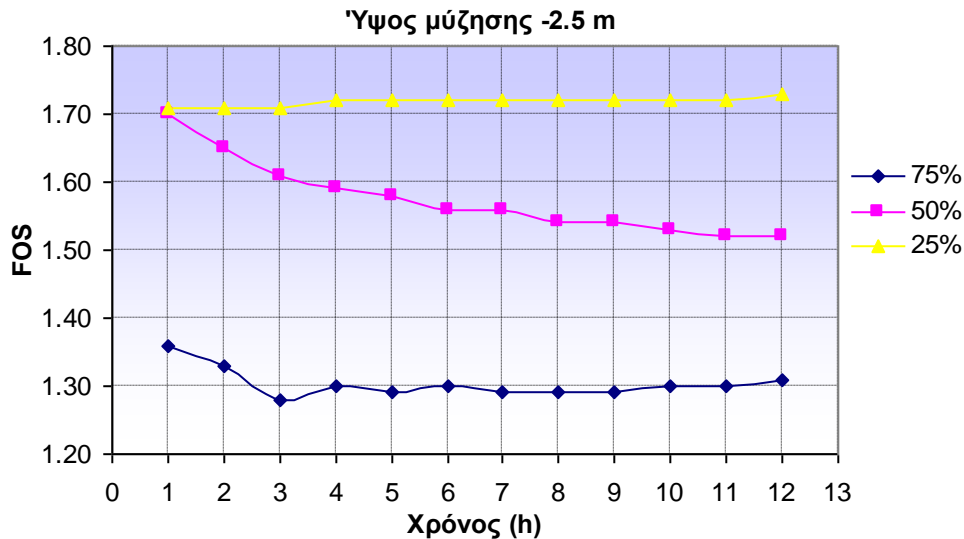
Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.43	1.76	1.79	1	1.36	1.70	1.71
2	1.42	1.75	1.79	2	1.33	1.65	1.71
3	1.38	1.73	1.80	3	1.28	1.61	1.71
4	1.41	1.73	1.80	4	1.30	1.59	1.72
5	1.40	1.73	1.80	5	1.29	1.58	1.72
6	1.40	1.72	1.81	6	1.30	1.56	1.72
7	1.39	1.71	1.81	7	1.29	1.56	1.72
8	1.40	1.71	1.81	8	1.29	1.54	1.72
9	1.41	1.69	1.81	9	1.29	1.54	1.72
10	1.40	1.70	1.82	10	1.30	1.53	1.72
11	1.41	1.69	1.82	11	1.30	1.52	1.72
12	1.39	1.69	1.82	12	1.31	1.52	1.73

Τα διαγράμματα που ακολουθούν (9.13-9.14), παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας με το πέρασμα των ωρών και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Παρατηρούμε, για την περίπτωση 1, ότι στο 75% ο συντελεστής ασφαλείας ξεκινάει με 1.43 και καταλήγει στο τέλος της 12<sup>ης</sup> ώρας στο 1.39. Με μια μείωση 25% του ύψους, φτάνουμε στο 50% του πρανούς και ο FOS με το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας γίνεται 1.69, ενώ με μια μείωση της τάξης του 50%, φτάνει στο 1.82. Μια αντίστοιχη διακύμανση έχουμε

και στην περίπτωση 2, μονό που εδώ η διαφορά μεταξύ των συντελεστών της 12<sup>ης</sup> ώρας για τα ύψη 25% και 50% παρουσιάζει μια αύξηση της τάξης του 15%- σχεδόν διπλάσια από την περίπτωση 1.



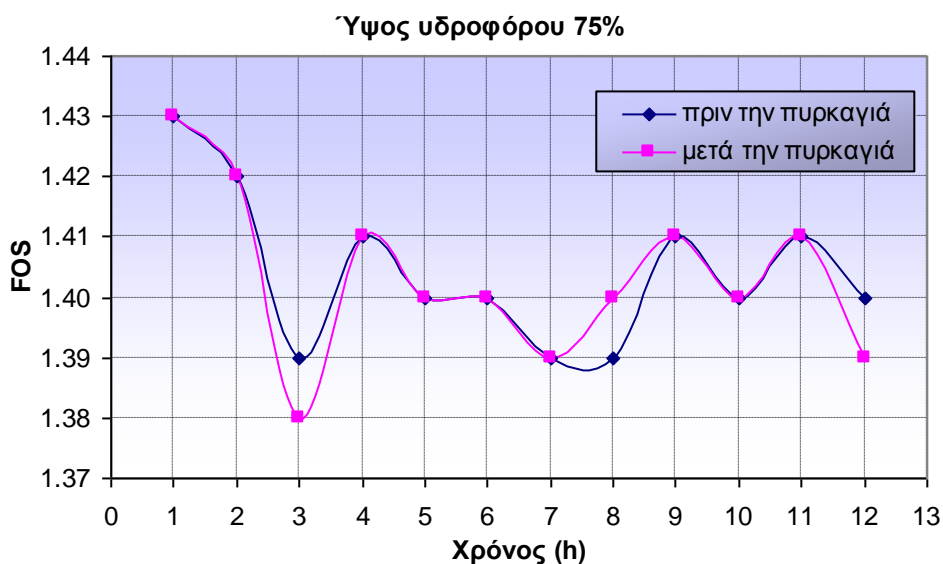
Διάγραμμα 9.13: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1



Διάγραμμα 9.14: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2

### 9.5.1.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά

Σε πρώτη φάση ελέγχουμε τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας, στη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης **πριν και μετά την πυρκαγιά** για ύψος υδροφόρου 75% και ύψος μύζησης -5 m. Παρόλο που η αλλαγή είναι σχετικά μικρή μπορούμε να κάνουμε μια πρώτη διαπίστωση για την επίδραση της βλάστησης στην αντοχή του εδάφους καθώς του προσδίδει μια συνοχή και εμποδίζει έτσι την επιφανειακή διάβρωσή του.



**Διάγραμμα 9.15: Διακύμανση συντελεστών για 12<sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1**

Ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς πριν την πυρκαγιά ξεκινάει με 1.43, φτάνει σ' ένα ελάχιστο 1.39 και καταλήγει σε 1.40, εν αντιθέσει με το μετά την πυρκαγιά, που ξεκινάει από το 1.43 και καταλήγει στο 1.39, έχοντας παρουσιάσει ελάχιστο την 3<sup>η</sup> ώρα στο 1.38. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο εν λόγω πρανές, όλοι οι συντελεστές που έχουν προκύψει είναι μεγαλύτεροι από τη μονάδα γεγονός που δηλώνει την ευστάθεια του πρανούς και την πολύ μικρή πιθανότητα εκδήλωσης κάποιας μορφής βαθιάς αστοχίας.

Ακολουθεί η διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας για 24h προσομοίωση η οποία πραγματοποιήθηκε για την παρατήρηση του συντελεστή μετά το τέλος της βροχόπτωσης τη 12<sup>η</sup> ώρα.



Διάγραμμα 9.16: Διακύμανση συντελεστών για 24<sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα ο συντελεστής ασφαλείας για το πρανές μετά την πυρκαγιά τη δέκατη-τρίτη ώρα αυξάνεται από 1.39 σε 1.41. Παρόμοια είναι η διακύμανση του συντελεστή κατά τη διάρκεια του δεύτερου δωδεκαώρου, με το συντελεστή να καταλήγει την 24<sup>η</sup> ώρα στο 1.43 για το καμένο και μη πρανές. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής έπειτα από μια αυξομείωση, συγκλίνει στην τιμή που είχε την πρώτη ώρα της προσομοίωσης, δηλώνοντας έτσι την εξασθένιση της επίδρασης της βροχόπτωσης και την επαναφορά του εδάφους στα αρχικά επίπεδα αντοχής.

## 9.5.2 Μελέτη 2<sup>ου</sup> Σεναρίου

### 9.5.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

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

Στη συγκεκριμένη περίπτωση που το ύψος του υδροφόρου βρίσκεται στο 50% του ύψους του πρανούς, ο συντελεστής ασφαλείας ξεκινάει την πρώτη ώρα με 1.46 και έπειτα από μια μικρή αυξομείωση καταλήγει στο 1.43 που ήταν και πριν την πυρκαγιά. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι η επίδραση της βλάστησης, στο συγκεκριμένο πρανές, όταν ο υδροφόρος είναι στο 50% του ύψους του πρανούς, είναι σχεδόν αμελητέα.

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
2	1.47	100	195	130	4.11e+04	27.54
3	1.46	105	185	143.5	1.01e+05	27.54
4	1.46	110	190	147.5	9.29e+04	27.54
5	1.46	110	190	147.5	9.29e+04	27.54
6	1.46	105	185	143.5	1.01e+05	27.54
7	1.44	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
8	1.45	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
9	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
10	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
11	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
12	1.43	105	185	143.5	1.02e+05	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.40: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

Ακόμη, ερευνάται η ευστάθεια σε ενδεχόμενη αύξηση και μείωση του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα στο 75% και 25% αντίστοιχα του ύψους του πρανούς. Θεωρώντας σταθερές τις εδαφικές παραμέτρους  $c = 58 \text{ kPa}$  και  $\phi = 34^\circ$  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

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.4	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
2	1.39	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
3	1.36	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
4	1.34	105	180	138.5	9.8e+04	27.54
5	1.33	105	180	138.5	9.8e+04	27.54
6	1.31	105	185	143.5	1.02e+05	27.54
7	1.31	105	180	138.5	9.81e+04	27.54
8	1.29	105	180	138.5	9.82e+04	27.54
9	1.29	110	185	143	9.12e+04	27.54
10	1.28	105	180	138.5	9.83e+04	27.54
11	1.28	105	180	138.5	9.83e+04	27.54
12	1.27	105	180	138.5	9.83e+04	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2

Ο συντελεστής ασφαλείας ξεκινάει την πρώτη ώρα με 1.4 και έπειτα από μια μικρή αυξομείωση καταλήγει στο 1.27 που ήταν και πριν την πυρκαγιά. Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι αυτό το ύψος μύζησης δεν επιτρέπει τη δράση της βλάστησης στο πρανάς σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο.

### 9.5.2.2 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

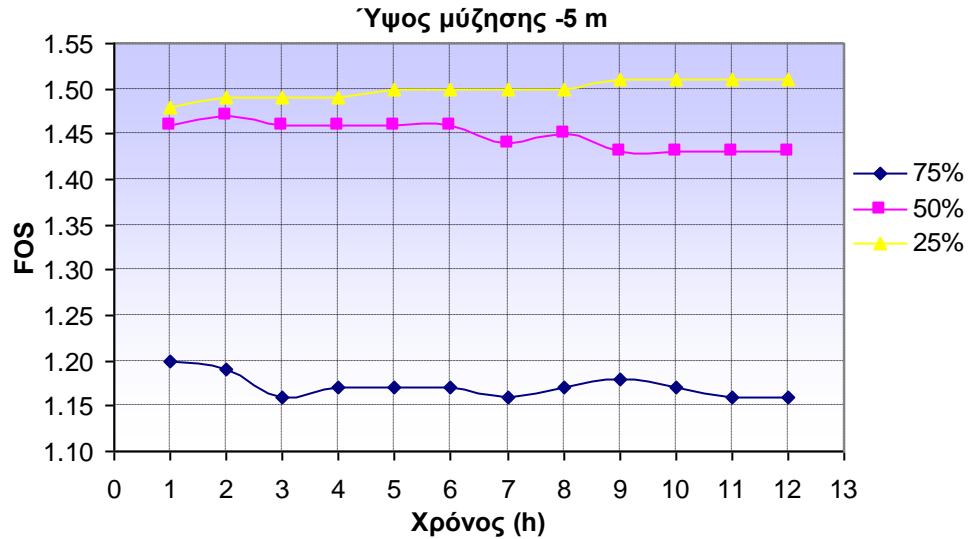
**Πίνακας 9.9: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης**

Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.20	1.46	1.48	1	1.14	1.40	1.40
2	1.19	1.47	1.49	2	1.11	1.39	1.41
3	1.16	1.46	1.49	3	1.06	1.36	1.41
4	1.17	1.46	1.49	4	1.08	1.34	1.41
5	1.17	1.46	1.50	5	1.07	1.33	1.41
6	1.17	1.46	1.50	6	1.08	1.31	1.42
7	1.16	1.44	1.50	7	1.07	1.31	1.42
8	1.17	1.45	1.50	8	1.07	1.29	1.42
9	1.18	1.43	1.51	9	1.08	1.29	1.42
10	1.17	1.43	1.51	10	1.06	1.28	1.42
11	1.16	1.43	1.51	11	1.07	1.28	1.42
12	1.16	1.43	1.51	12	1.07	1.27	1.42

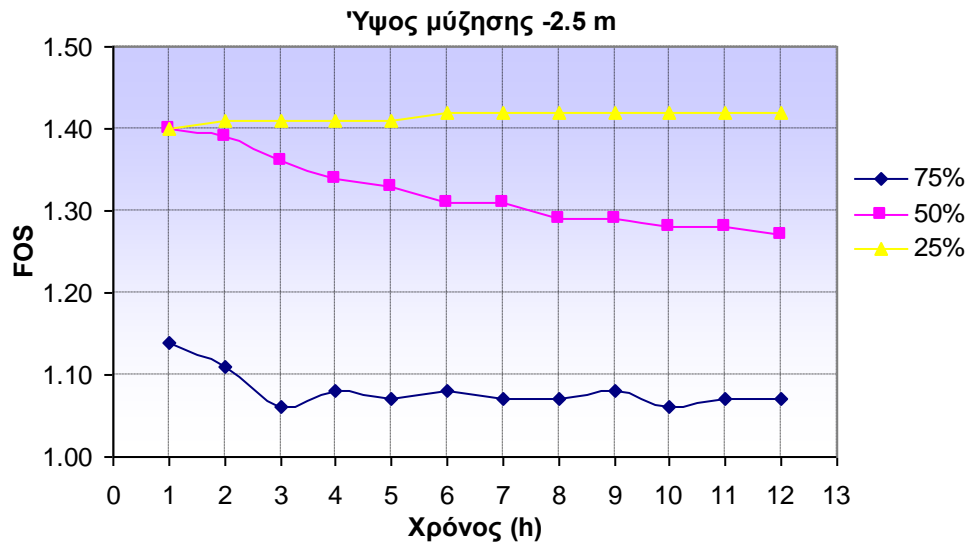
Παρατηρούμε ότι στο 50%- της *Περίπτωσης 1*-, ο συντελεστής ασφαλείας ξεκινάει με 1.46 και καταλήγει στο τέλος της 12<sup>ης</sup> ώρας στο 1.43. Με μια μείωση 25% του ύψους, φτάνουμε στο 25% του πρανούς και ο FOS με το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας γίνεται 1.51, ενώ με μια αύξηση της τάξης του 25%, κατεβαίνει στο 1.17. Ενώ λοιπόν κατεβαίνει ο υδροφόρος ορίζοντας, ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται γεγονός που υποδεικνύει την αντιστρόφως ανάλογη σχέση τους και τη λειτουργία της βροχόπτωσης σε κορεσμένο και μη έδαφος. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και στην *Περίπτωση 2*, μονό που εδώ η διαφορά μεταξύ των συντελεστών της 12<sup>ης</sup> ώρας για τα ύψη 25% και 50% παρουσιάζει μια

αύξηση της τάξης του 10%- σχεδόν διπλάσια από την περίπτωση 1 (και σ' αυτό το σενάριο).

Οπτικοποιούμε τα παραπάνω αποτελέσματα δημιουργώντας τα ακόλουθα διαγράμματα, τα οποία παρουσιάζουν τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας με το πέρασμα των ωρών και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα.



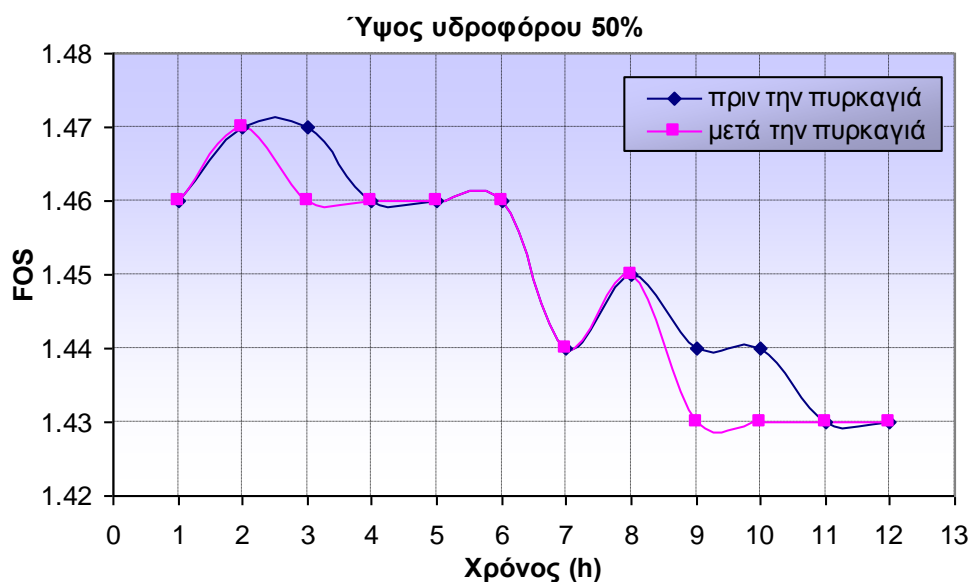
Διάγραμμα 9.17: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1



Διάγραμμα 9.18: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2

### 9.5.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά

Σε αυτή τη φάση ακολουθεί ο έλεγχος της μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας, στη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης **πριν και μετά την πυρκαγιά** για ύψος υδροφόρου 50% και ύψος μύζησης -5 m. Ουσιαστική αλλαγή στο συντελεστή ασφαλείας μπορεί να μην υπάρχει, ωστόσο παρατηρούμε κάποιες μικρές διαφορές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στις οποίες οι συντελεστές πριν την πυρκαγιά είναι μεγαλύτεροι κατά 10%.

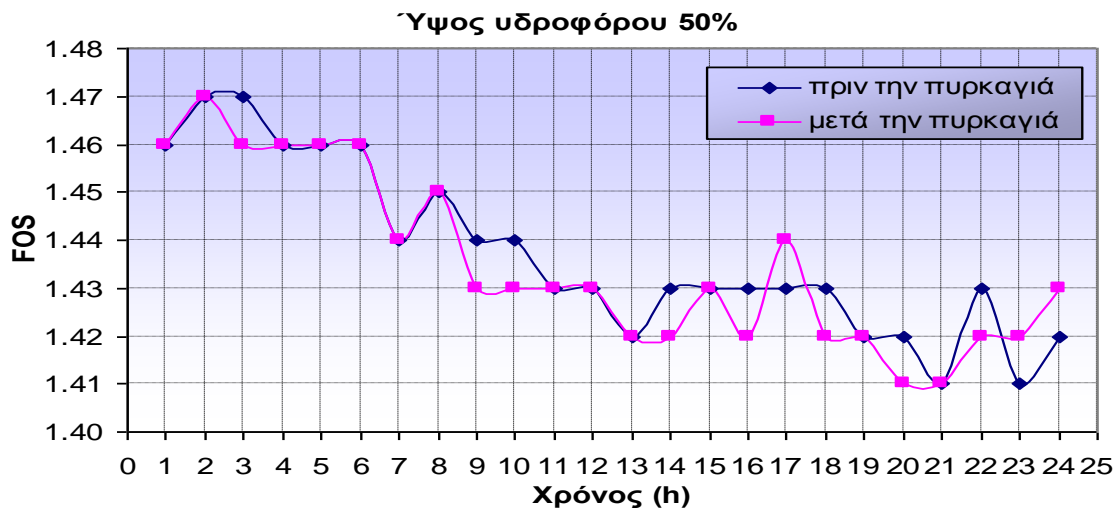


Διάγραμμα 9.19: Διακύμανση συντελεστή για 12<sup>h</sup> προσομοίωση - Περίπτωση 1

Ο συντελεστής ασφαλείας του πρανούς πριν και μετά την πυρκαγιά ξεκινάει με μια τιμή της τάξης του 1.46, ακολουθεί κάποιες αυξομειώσεις και φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή 1.43. Εκείνο που παρατηρούμε είναι ότι την 3<sup>η</sup>, την 9<sup>η</sup> και τη 10<sup>η</sup> ώρα, οι συντελεστές πριν την πυρκαγιά παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές, γεγονός που αποτυπώνει το ρόλο της βλάστησης στην αντοχή του πρανούς.

Ακολουθεί η διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας για 24<sup>h</sup> προσομοίωση η οποία πραγματοποιήθηκε για την παρατήρηση του συντελεστή ασφαλείας μετά το τέλος της βροχόπτωσης και το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας.





Διάγραμμα 9.20: Διακύμανση συντελεστή για 24<sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1

Παρατηρούμε από τα παραπάνω αποτελέσματα ότι ο συντελεστής ασφαλείας για το πρανές πριν την πυρκαγιά τη δέκατη-τρίτη ώρα μειώνεται από 1.43 σε 1.42, στη συνέχεια μέχρι τη 18<sup>η</sup> ώρα σταθεροποιείται στο 1.43 και έπειτα από μια μικρή πτώση καταλήγει στο 1.42. Όσον αφορά στο μετά την πυρκαγιά, μετά το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας παρουσιάζεται μια πτώση της τάξης του εκατοστού για τις επόμενες δύο ώρες και ο σ.α από 1.43 πάει στο 1.42, τιμή στην οποία καταλήγει εν τέλει και στο τέλος της 24<sup>ης</sup> ώρας. Σημειώνεται ότι ο συντελεστής μετά την πυρκαγιά καταλήγει σε τιμή αντίστοιχη με τη δωδεκάτη ώρα ενώ ο συντελεστής πριν την πυρκαγιά σε τιμή μικρότερη από εκείνη της 12<sup>ης</sup> ώρας.

### 9.5.3 Μελέτη 3<sup>ου</sup> Σεναρίου

#### 9.5.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

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

Με ύψος υδροφόρου 25%, ο συντελεστής ασφαλείας παρουσιάζει μια μικρή αύξηση. Ξεκινώντας με 1.44 την πρώτη ώρα καταλήγει σε 1.46 τη δωδεκάτη. Η διαφορά με τους συντελεστές πριν την πυρκαγιά είναι μηδενική. Ένα συμπέρασμα λοιπόν που προκύπτει

είναι ότι η βλάστηση παίζει καθοριστικότερο ρόλο μόνο στη δυσμενέστερη περίπτωση που ο υδροφόρος βρίσκεται στο 75% του ύψους του πρανούς.

The screenshot shows the 'Output' window of the CHASM V 4.0 software. It displays simulation parameters and a table of results for Case 1. The parameters include: Vegetation: off, Reinforcement: off, Leakage: off, Total duration: 12 hours, Storm start: 1 hours, and Storm end: 12 hours. The results table has columns for Hours, FOS, X (m), Y (m), Radius (m), Weight (kN), and Runout (m). The FOS values range from 1.44 to 1.46, and the Runout values are consistently 27.54 m. The simulation ends at 12 hours with the note 'Runout only applicable if FOS < 1'.

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.44	100	195	130	4.11e+04	27.54
2	1.44	100	195	130	4.11e+04	27.54
3	1.44	100	195	130	4.11e+04	27.54
4	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
5	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
6	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
7	1.45	100	195	130	4.11e+04	27.54
8	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
9	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
10	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
11	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54
12	1.46	100	195	130	4.11e+04	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 1

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  $c = 52 \text{ kPa}$  και  $\phi = 34^\circ$ .

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

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

Hours	FOS	X (m)	Y (m)	Radius (m)	Weight (kN)	Runout (m)
1	1.35	110	205	141	3.5e+04	27.54
2	1.36	110	205	141	3.5e+04	27.54
3	1.36	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
4	1.36	110	205	141	3.5e+04	27.54
5	1.36	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
6	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
7	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
8	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
9	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
10	1.37	105	200	135.5	3.81e+04	27.54
11	1.37	110	205	141	3.5e+04	27.54
12	1.37	110	205	141	3.5e+04	27.54

End of simulation Runout only applicable if FOS < 1

Εικόνα 9.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης- Περίπτωση 2

Παρατηρούμε ότι και εδώ ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας παραμένουν ίδιες τόσο πριν όσο και μετά από την πυρκαγιά. Η επιλογή, λοιπόν, του 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

Ακολουθούν οι συγκεντρωτικοί πίνακες με τους συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υδροφόρου ορίζοντα και στις δύο περιπτώσεις του ύψους μύζησης.

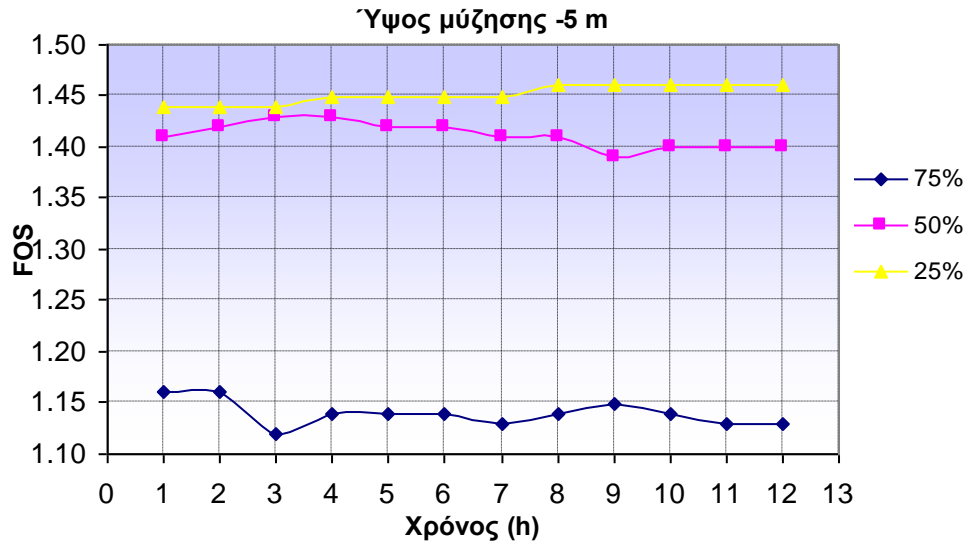
Οι τιμές για τα ύψη υδροφόρων 50% και 75%, προέκυψαν ‘τρέχοντας’ το πρόγραμμα με τις τιμές των παραμέτρων που είχαν επιλεγεί για το 3<sup>ο</sup> σενάριο δηλαδή για ύψος υδροφόρου 25% του ύψους του πρανούς.

Πίνακας 9.10: Συντελεστές ασφαλείας ανάλογα με το ύψος του υδροφόρου και το ύψος μύζησης

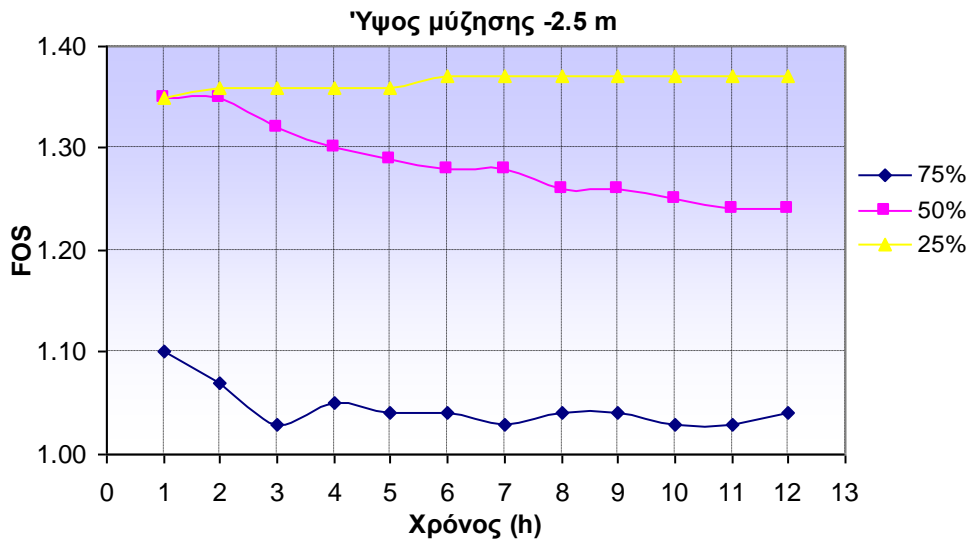
Ύψος μύζησης -5 m				Ύψος μύζησης -2.5 m			
	75%	50%	25%		75%	50%	25%
Hours	FOS	FOS	FOS	Hours	FOS	FOS	FOS
1	1.16	1.41	1.44	1	1.1	1.35	1.35
2	1.16	1.42	1.44	2	1.07	1.35	1.36
3	1.12	1.43	1.44	3	1.03	1.32	1.36
4	1.14	1.43	1.45	4	1.05	1.3	1.36
5	1.14	1.42	1.45	5	1.04	1.29	1.36
6	1.14	1.42	1.45	6	1.04	1.28	1.37
7	1.13	1.41	1.45	7	1.03	1.28	1.37
8	1.14	1.41	1.46	8	1.04	1.26	1.37
9	1.15	1.39	1.46	9	1.04	1.26	1.37
10	1.14	1.4	1.46	10	1.03	1.25	1.37
11	1.13	1.4	1.46	11	1.03	1.24	1.37
12	1.13	1.4	1.46	12	1.04	1.24	1.37

Παρατηρούμε ότι στο 25% και για ύψος υδροφόρου -5 m, ο συντελεστής ασφαλείας ξεκινάει με 1.44 και καταλήγει στο τέλος της 12<sup>ης</sup> ώρας στο 1.46. Με μια αύξηση 25% του ύψους, φτάνουμε στο 50% του πρηνούς και ο FOS με το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας γίνεται 1.4, ενώ με μια αύξηση της τάξης του 50%, κατεβαίνει στο 1.13. Ενώ λοιπόν ανεβαίνει ο υδροφόρος ορίζοντας, ο συντελεστής ασφαλείας μειώνεται, γεγονός που υποδεικνύει την αντιστρόφως ανάλογη σχέση τους και τη λειτουργία της βροχόπτωσης σε κορεσμένο και μη έδαφος. Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα και για ύψος υδροφόρου -2.5 m.

Οπτικοποιούμε τα παραπάνω αποτελέσματα δημιουργώντας το ακόλουθο διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει τη διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας με το πέρας των ωρών και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα.



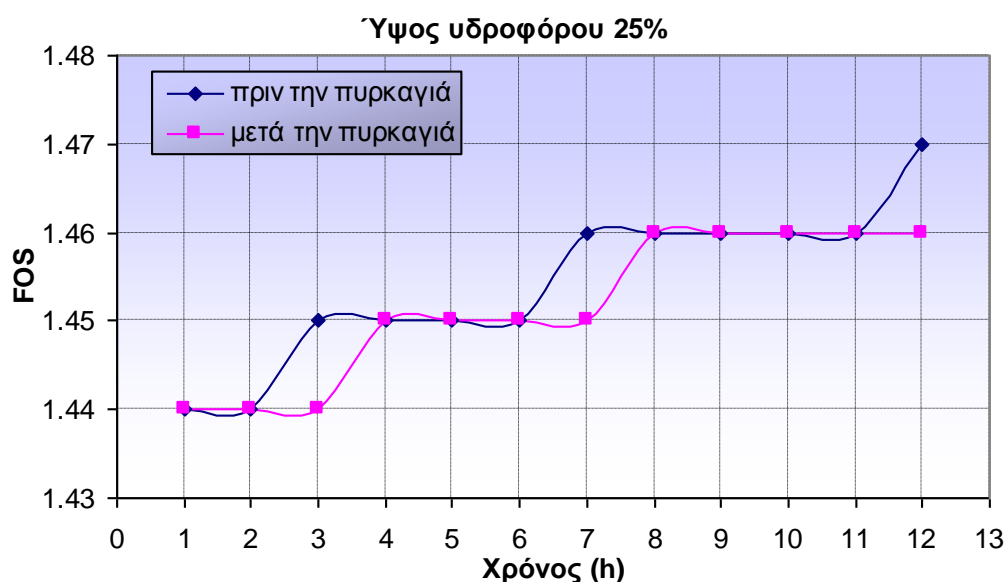
Διάγραμμα 9.21: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 1



Διάγραμμα 9.22: Διακύμανση συντελεστή ασφαλείας- Περίπτωση 2

### 9.5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την πυρκαγιά

Ελέγχουμε τη μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας, στη δωδεκάωρη προσομοίωση βροχόπτωσης **πριν και μετά την πυρκαγιά** για ύψος υδροφόρου 25% και ύψος μύζησης -5 m . Η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι σχετικά μικρή, της τάξης του εκατοστού, όμως μας επιβεβαιώνει το ρόλο της βλάστησης στην αντοχή του εδάφους, προσδίδοντας του μια συνοχή εμποδίζοντας έτσι την επιφανειακή διάβρωσή του.



Διάγραμμα 9.23: Διακύμανση συντελεστή για 12<sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1

Ο συντελεστής ασφαλείας του πρηνούς ξεκινάει με μια τιμή της τάξης του 1.44 και έχοντας ανοδική πορεία φτάνει το 1.47 πριν την πυρκαγιά και το 1.46 μετά από αυτήν. Μια πιθανή εξήγηση της ανοδικής τάσης του συντελεστή μπορεί να δοθεί λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές συνθήκες που διαμορφώνονται στο έδαφος.

Ακολουθεί η διακύμανση του συντελεστή ασφαλείας για 24<sup>h</sup> προσομοίωση η οποία πραγματοποιήθηκε για την παρατήρηση του συντελεστή ασφαλείας μετά το τέλος της βροχόπτωσης και το πέρας της 12<sup>ης</sup> ώρας.



Διάγραμμα 9.24: Διακύμανση συντελεστή για 24<sup>h</sup> προσομοίωση- Περίπτωση 1

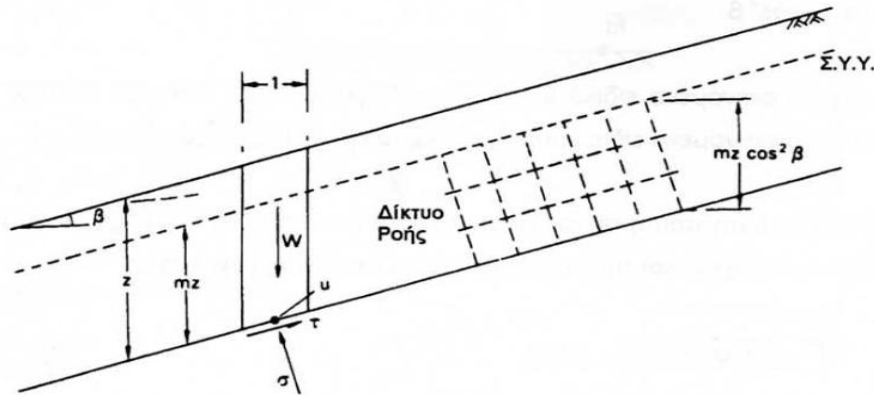
Όπως παρατηρούμε λοιπόν, ο συντελεστής ασφαλείας τόσο μετά όσο και πριν την πυρκαγιά, λαμβάνει τις ίδιες τιμές με εκείνες της 12<sup>ης</sup> ώρας χωρίς να παρουσιάζεται κάποια διακύμανση. Διαπιστώνουμε έτσι, ότι το χαμηλό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα συμβάλει στη σταθεροποίηση του συντελεστή ασφαλείας στην τιμή της τελευταίας ώρας της βροχόπτωσης.





## 10. ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΜΗΣ Γ-Γ' - PHASE 2 V6.0

Η τομή Γ-Γ', τοποθετείται σε ανθρακικά εδάφη με πολύχρωμους παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους στους οποίους παρεμβάλλονται ερυθρές ή κίτρινες μάργες. Όπως καταλαβαίνουμε, λοιπόν, η συγκεκριμένη τομή βρίσκεται πάνω σε βράχο, έχοντας στην επιφάνεια του μία ζώνη αποσάθρωσης βάθους ενός περίπου μέτρου με συνοχή  $c=25$  kPa. Συνεπώς, σε αντίθεση με τις άλλες δύο τομές, εδώ αναμένεται ένα είδος επιφανειακής αστοχίας στη ζώνη αποσάθρωσης.



**Εικόνα 10.1:Ευστάθεια απείρου πρανούς- στρωματοειδής ολισθήσεις**

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

$$F = \tau_f / \tau$$

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

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

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

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

$$u = mz\gamma_w \cos^2 \beta$$

Όπου  $\gamma$  το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους πάνω από τον Υ.Ο.,  $\gamma_s$  το κορεσμένο φαινόμενο ειδικό βάρος και  $\gamma_w$  το ειδικό βάρος του νερού.

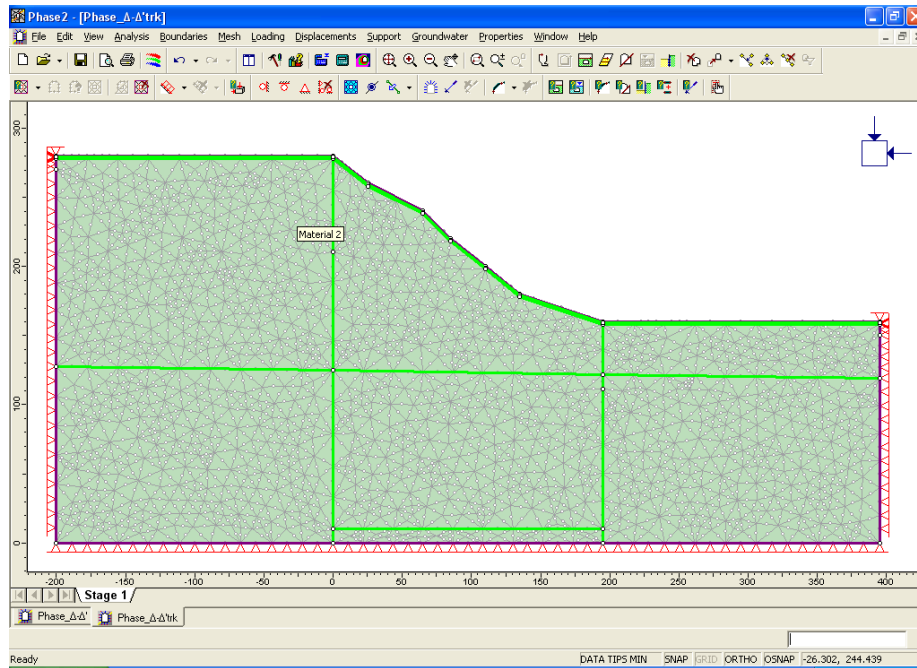
Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, προκύπτει  $F= 1.05 > 1$ . Η τιμή αυτού του συντελεστή δηλώνει την πιθανή εκδήλωση επιφανειακής αστοχίας του πρανούς.

Στην συγκεκριμένη τομή

Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την επεξεργασία της συγκεκριμένης τομής είναι το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Phase 2 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.

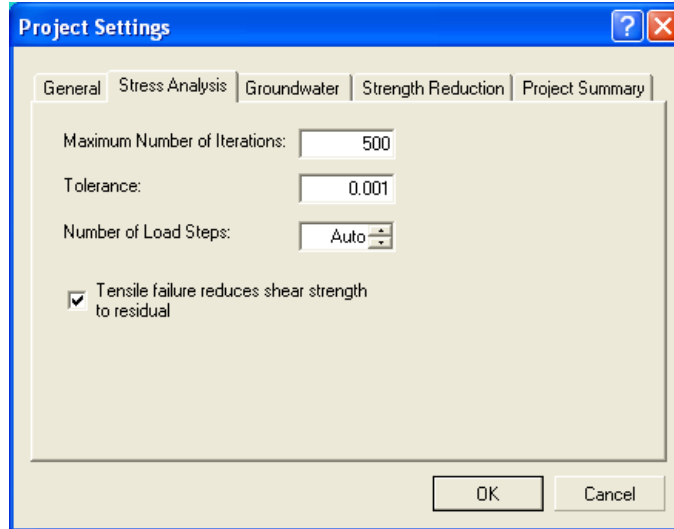
Στο **model** (μοντέλο, προσομοίωμα) πραγματοποιείται η εισαγωγή και διαμόρφωση:

- 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 10.2 φαίνεται η τομή από την οποία προέκυψε η γεωμετρία του πρανούς που μελετήθηκε.



Εικόνα 10.2: 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 10.3: 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 πρηνές ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, η τομή αποτελείται κυρίως από ανθρακικά 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  $\phi = 35^\circ$ , ενώ για το βράχο επιλέχθηκαν μεγαλύτερες τιμές, με τη συνοχή να φτάνει τα  $200 \text{ kPa}$  και τη γωνία τριβής τις  $50^\circ$ . 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.

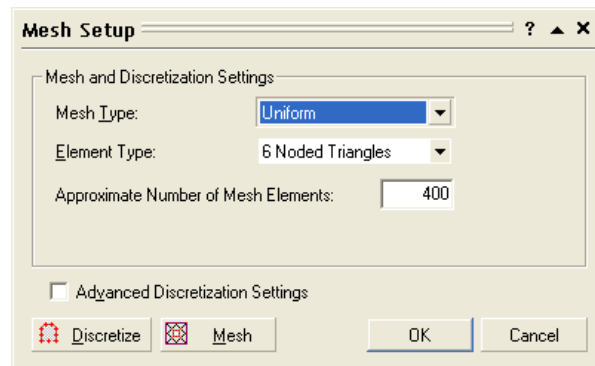
The dialog box 'Define Material Properties' is shown for the material 'Ζώνη αποσάθρωσης'. The 'Material Colour' is yellow. The 'Initial Element Loading' is set to 'Body Force Only' and the 'Unit Weight' is 20 kN/m<sup>3</sup>. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus' is 500000 kPa, and 'Poisson's Ratio' is 0.25. The directional moduli (E1, E2, E3) and Poisson's ratios (ν12, ν13, ν23) are all 20000 and 0.2 respectively. Under 'Strength Parameters', the 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb' and 'Material Type' is 'Plastic'. 'Tensile Strength' is 20 kPa, 'Dilation Angle' is 0 degrees, 'Fric. Angle (peak)' is 20 degrees, 'Fric. Angle (resid)' is 20 degrees, 'Cohesion (peak)' is 5 kPa, and 'Cohesion (resid)' is 5 kPa. There are buttons for 'Stage Properties' and 'Datum Dependent' with sub-buttons 'Define Factors...' and 'Define Properties...'. 'Unsaturated Shear Strength' parameters are Phi b: 0 and Air Entry: 0 kPa. At the bottom, there are 'Copy To...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Εικόνα 10.4: Καθορισμός παραμέτρων εδάφους

The dialog box 'Define Material Properties' is shown for the material 'Βράχος'. The 'Material Colour' is green. The 'Initial Element Loading' is set to 'Body Force Only' and the 'Unit Weight' is 25 kN/m<sup>3</sup>. Under 'Elastic Properties', the 'Elastic Type' is 'Isotropic', 'Young's Modulus' is 1000000 kPa, and 'Poisson's Ratio' is 0.25. The directional moduli (E1, E2, E3) and Poisson's ratios (ν12, ν13, ν23) are all 20000 and 0.2 respectively. Under 'Strength Parameters', the 'Failure Criterion' is 'Mohr Coulomb' and 'Material Type' is 'Elastic'. 'Tensile Strength' is 167.82 kPa, 'Dilation Angle' is 0 degrees, 'Fric. Angle (peak)' is 50 degrees, 'Fric. Angle (resid)' is 50 degrees, 'Cohesion (peak)' is 200 kPa, and 'Cohesion (resid)' is 200 kPa. There are buttons for 'Stage Properties' and 'Datum Dependent' with sub-buttons 'Define Factors...' and 'Define Properties...'. 'Unsaturated Shear Strength' parameters are Phi b: 0 and Air Entry: 0 kPa. At the bottom, there are 'Copy To...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel' buttons.

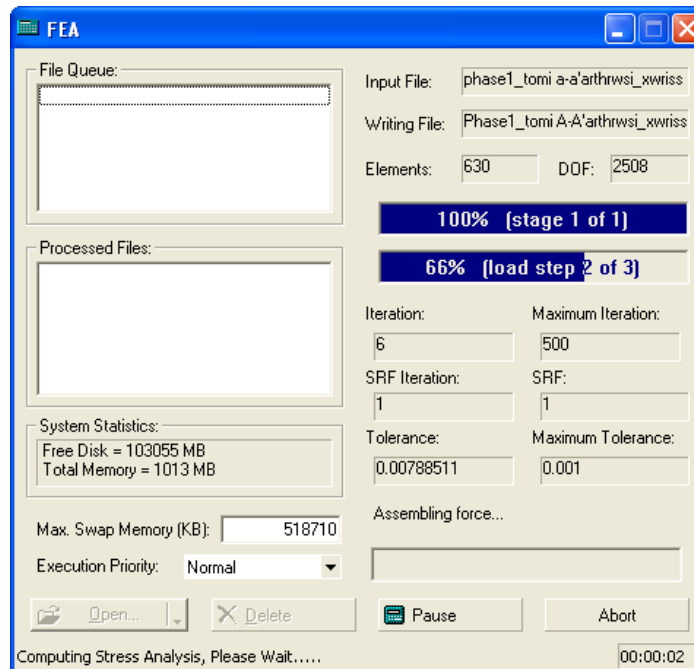
Εικόνα 10.5: Καθορισμός παραμέτρων βράχου

- 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.



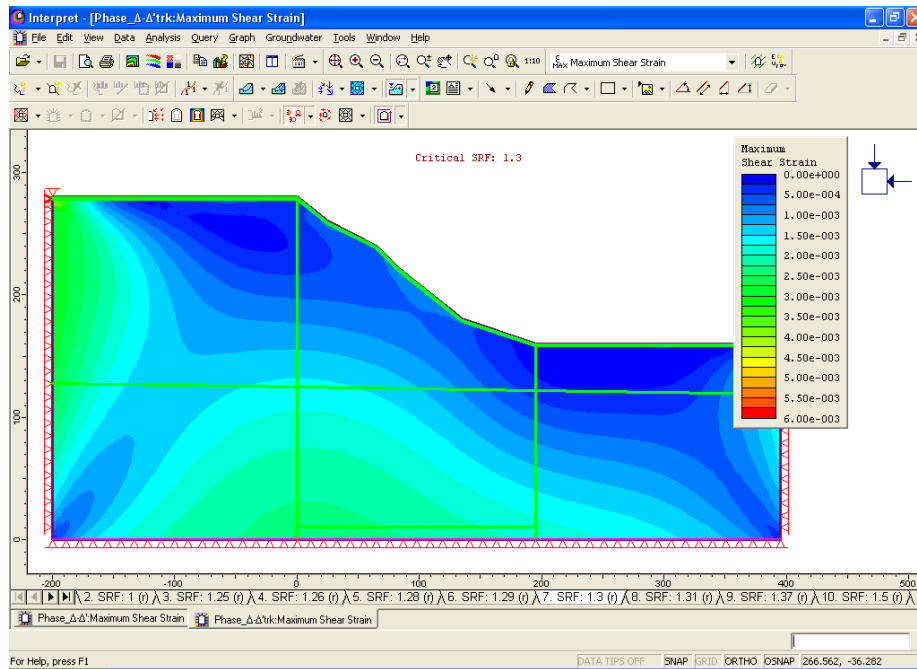
Εικόνα 10.6: Δημιουργία πεπερασμένων στοιχείων

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.



Εικόνα 10.7: Παράθυρο υπολογισμού του προγράμματος (Compute)

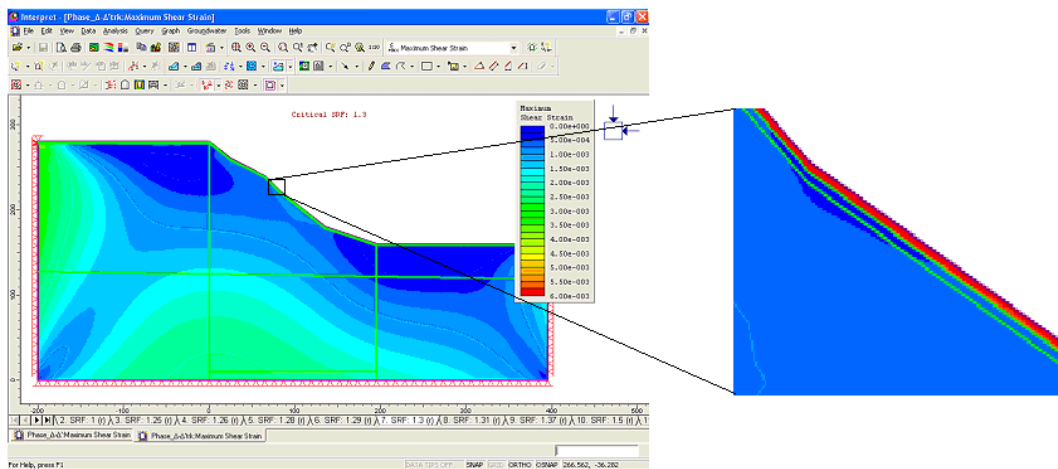
Το **interpret** (ερμηνεία) αποτελεί το διαμόρφωμα εκείνο του προγράμματος το οποίο οπτικοποιεί τα αποτελέσματα του υπολογιστικού κομματιού και βοηθάει το χρήστη στην ερμηνεία αυτών. Ακολουθώς, παρουσιάζεται η κατανομή της διατμητικής αντοχής του πρανούς.



Εικόνα 10.8: Interpret (ερμηνεία)- μέγιστη διατμητική τάση

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.

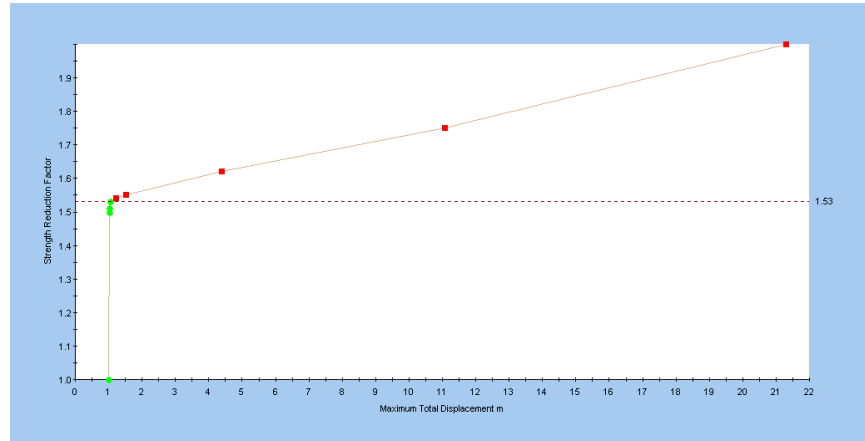
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, διαπιστώνουμε ότι η κρίσιμη τιμή του συντελεστή ασφαλείας είναι 1.3, τιμή που δηλώνει την ευστάθεια του πρανούς. Το ακόλουθο σχήμα παρουσιάζει ένα τμήμα του πρανούς σε μεγέθυνση, τονίζοντας την κατανομή της ανοιγμένης διατμητικής παραμόρφωσης στη ζώνη αποσάθρωσης. Εδώ, λοιπόν, 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 10.9: Μετάφραση (interpret)- Ανοιγμένη διατμητική παραμόρφωση**

Ακόμη για τον κρίσιμο SRF είναι δυνατή η εμφάνιση της ολικής μετακίνησης. 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 10.1 που ακολουθεί, την επίδραση στις μετακινήσεις και το σημείο στο οποίο δεν υπάρχει σύγκλιση.





**Διάγραμμα 10.1: Διάγραμμα σύγκλισης συντελεστή ασφαλείας**



---

## 11. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

---

Κύριος στόχος της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί η μελέτη της επίδρασης του νερού της βροχής σε πρανή που βρίσκονται υπό φυσιολογικές συνθήκες, αλλά και στην περίπτωση που έχουν υποστεί το πέρασμα μιας πυρκαγιάς. Για την καλύτερη αντιμετώπιση του θέματος, μελετήθηκαν ενδεικτικά δύο τομές στη Ζαχάρω Ηλείας που βρίσκονται σε πλειο- πλειστόκαινους 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  $\varphi$ , το κορεσμένο ειδικό βάρος  $\gamma_s$  και το υγρό φαινόμενο  $\gamma_v$ ,
  - ↳ υδρολογικών παραμέτρων όπως η ακριβής ένταση  $i$  και διάρκεια βροχόπτωσης  $t$  για αναμενόμενη περίοδο επανάλληψης  $T$ ,
  - ↳ και υδρογεωλογικών παραμέτρων όπως το αρχικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα, η κορεσμένη υδροπερατότητα  $k$ ,συναρτήσει της γεωγραφικής θέσης, επηρεάζει αρνητικά τ' αποτελέσματα του λογισμικού πακέτου CHASM.
  
- ✎ Ακόμη, η έλλειψη λεπτομερών μετρήσεων των τιμών των εν λόγω παραμέτρων είτε επί τόπου (in situ), είτε στο εργαστήριο, μας αναγκάζει να προβούμε σ' 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, A-A' 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 A-A' αστοχεί υπό προϋποθέσεις, αφού η αντοχή της επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι τιμές των εδαφικών και υδρολογικών παραμέτρων όπως φαίνεται ακολούθως.

- ✗ Ο συντελεστής ασφαλείας 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 εδάφους 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 απορροφώνται 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, κατά τη διάρκεια του δεύτερου δωδεκαώρου, που έχουμε μηδενίσει τις τιμές της βροχόπτωσης. Για μεγάλο ύψος υδροφόρου ορίζοντα (Σενάριο 1), παρατηρείται μία επαναφορά της τιμής του συντελεστή στην τιμή που είχε την 1<sup>η</sup> ώρα της

προσομοίωσης. Για μέτριο ύψος υδροφόρου (Σενάριο 2), η τιμή του συντελεστή έπειτα από μια αυξομείωση σταθεροποιείται στην τιμή της  $12^{15}$  ώρας και για χαμηλό ύψος υδροφόρου (Σενάριο 3), ο συντελεστής δεν παρουσιάζει καμιά μεταβολή μετά το πέρας της  $12^{15}$  ώρας.

Γίνεται λοιπόν, αντιληπτή η τάση για επαναφορά της αντοχής του πρανούς στις αρχικές τιμές του, 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. Επομένως η επίδραση 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<sup>ο</sup> 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<sup>ο</sup> σενάριο επιλέγεται στα 90 kPa, ενώ στο 2<sup>ο</sup> σενάριο στα 60 kPa και στο τρίτο ακόμη μικρότερη στα 52 kPa. Επιπρόσθετα, η γωνία τριβής προσδιορίζεται στις 37° για το πρώτο σενάριο, ενώ στα υπόλοιπα επαρκεί μια τιμή περί των 34°.





---

## 12. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

---

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 ελέγχοντας τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρήθηκαν κατά την προσομοίωση του πρανούς που όμως δε μπορούν να εξηγηθούν πλήρως με βάση τη θεωρία που χρησιμοποιήθηκε. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι η αυξομείωση του συντελεστή ασφαλείας και όχι η σταθερή μείωσή του εξαιτίας του φαινομένου της βροχής.
- Αντιμετώπιση του φαινομένου της πυρκαγιάς, 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 ακριβώς οι αλλαγές των παραμέτρων.
- Εισαγωγή της λύσης της αντιδιαβρωτικής προστασίας από ειδικά υλικά ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της κατεΐσδυσης στους πόρους του εδάφους, μειώνοντας τον κίνδυνο κατολίσθησης. Το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα

- ενίσχυσης του πρανούς με τη χρήση γεωϋφασμάτων (geotextiles) και νυχιών ενίσχυσης εδάφους (earth nails).
- Τέλος, δεδομένου ότι στο πρόγραμμα Phase 2 V6.0, δεν εντοπίστηκε ο κατάλληλος συνδυασμός κατεΐσδυσης και υδρολογικών παραμέτρων του πρανούς, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη του αντικειμένου με το συγκεκριμένο πρόγραμμα, καθώς πρόκειται για ένα αξιόπιστο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων το οποίο παρέχει τη δυνατότητα αξιολογής προσέγγισης γεωτεχνικών προβλημάτων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Αριανούτσου Μ., «Δείκτες μεταπυρικής φυσικής αναγέννησης στα Μεσογειακά οικοσυστήματα», Έκδοση Τμήμα Βιολογίας Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2004

Βαρδουλάκης Ι., «Σημειώσεις Εδαφομηχανικής», Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2004

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

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)

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

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 νετού 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

Σακελλαρίου Μ., «Σημειώσεις εδαφομηχανικής – Θεμελιώσεων», Αθήνα, 2003

Σακελλαρίου Μ., «Γεωτεχνική Μηχανική», Αθήνα, 2005

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

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

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

Κουμαντάκης Ι., «Κεφάλαια Υδρογεωλογίας», ΕΜΠ, 1984

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

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

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

Anderson M., Kemp M.J., Lloyd D.M., «*Applications of soil water finite models to slope stability problems*», 5<sup>th</sup> International Symposium on Landslide, Lausanne, 1988, Balkema 1990,

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

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, 1994, p.133-152

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, 1999, p. 13–27

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

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, Bristol, 1995, p. 3025–3038

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

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*», Printed in The Meteorological Atmospheric Physics, 98, Netherlands, 2007, p. 239–267

Hervaas Javier, «*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, 2001, p.61

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, 2004, p. 25–38

Koukis G., Koutsoyannis D., «*Develpomenta in Earth surface*», Processes 3Q 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, Malcolm, 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), Agioutantis & Komnitsas (eds.), Milos 2005, p. 91-97

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

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

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, Washington, 2000, p. 1897–1910

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, 1997, p. 543-555

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

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 sensivity in time and space- an introduction*», Catena, 42, 2001, p. 83-98

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 slopovement processes in the Yosemite Valley*», California, Geomorphology, 15, 1996, p. 17-31

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 Weimin, WU Shuren, et al., «*Research on Formation Mechanism of the Debris Flow on Slope Induced by Rainfall*», Earth Science Frontiers, 14, 2007



## ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

Dennis N., «*The Effects of Fire on Watersheds: A Summary*», Forest Service Gen. Technical Report, 1989,  
[www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr109/psw\\_gtr109\\_92.pdf](http://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, [www.sciencedirect.com](http://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, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Kirkby M., Jones R., et al., «*Pan-european soil erosion risk assessment- the pesera map version 2003*»,  
[http://eusoils.jrc.it/ESDB\\_Archive/eusoils\\_docs/esb\\_rr/n16\\_ThePeseraMapBkLet52.pdf](http://eusoils.jrc.it/ESDB_Archive/eusoils_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,  
[eusoils.jrc.ec.europa.eu/esbn/Plenary\\_esbn\\_2005/3rdDay/ESBpublications.ppt](http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esbn/Plenary_esbn_2005/3rdDay/ESBpublications.ppt)

Zhi-Liang Wanga, Wangb J.G., Shenc R.F., «*The application of a meshless method to consolidation analysis of saturated soils with anisotropic damage*», Computers & Geosciences, 34, 2007, p.849–859, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

«*Seepage principles*», 4, 1986, [www.usace.army.mil/usace-docs/engineering-manuals/em1110-2-1901/c-4.pdf](http://www.usace.army.mil/usace-docs/engineering-manuals/em1110-2-1901/c-4.pdf)

Turner B. L., Kaspersonb R. E., et al., «*A framework for vulnerability analysis in sustainability science*», 2003, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1231335100](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1231335100)

Vivoni E.R., «*Hydrological Theory and Field Methods*», Erth 440, 2007,  
[www.ees.nmt.edu/vivoni/hydro/labs/erth440-lab2.pdf](http://www.ees.nmt.edu/vivoni/hydro/labs/erth440-lab2.pdf)

Τσακίρης Γ., «*Κέντρο εκτίμησης φυσικών κινδύνων και προληπτικού σχεδιασμού*», ΕΜΠ  
[http://www.ntua.gr/temp\\_announce/170/parousiaseis170/files170/SYNEDRIA%20I/1101\\_presentation.pdf](http://www.ntua.gr/temp_announce/170/parousiaseis170/files170/SYNEDRIA%20I/1101_presentation.pdf)

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

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

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

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

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

## ΜΕΘΟΔΟΣ PENMAN

Για τον υπολογισμό της εξάτμισης χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο Penman. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόσαμε μία σειρά υπολογισμών, οι οποίοι ακολουθούν παρακάτω, μέσω των οποίων εκτιμήσαμε την εξάτμιση από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού σε mm, για τα έτη 1975-2001 που έχουμε επαρκή δεδομένα.

➤ πίεση κορεσμένων υδρατμών (kPa)  $e=0.611\exp(17.27T/(237.3+T))$

όπου: T= θερμοκρασία αέρα (°C)

➤ πίεση υδρατμών (kPa)  $e^*=Ue^*/100$

όπου: U=σχετική υγρασία αέρα %, στην περίπτωση μας επειδή δεν έχουμε τιμές για όλα τα χρόνια που μελετάμε, πήραμε το μέσο όρο των τιμών που μας δόθηκαν για κάθε μήνα.

➤ κλίση καμπύλης κορεσμού υδρατμών (kPa/K)  $\Delta=(4098e^*)/(237.3+T)^2$

➤ έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (kPa)  $D=e^*-e$

➤ ψυχομετρικός συντελεστής (kPa/K)  $\gamma=0.067$

➤ λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (MJ/Kg)  $\lambda=2.45$

➤ αριθμός ημέρας J

➤ ηλιακή απόκλιση (rad)  $\delta=-0.409\cos[(2\pi J/365)+0.16]$

➤ γωνία ώρα δύσης (rad)  $\omega_s=\arccos(-\tan\phi\tan\delta)$

όπου  $\phi$ = γεωγραφικό πλάτος σε rad. για τον Άγιο Δημήτριο είναι  $\phi=38^\circ40'$

➤ αστρονομική διάρκεια ημέρας (h), ακριβής εκτίμηση  $N=24\omega_s/\pi$

➤ ηλιακή σταθερά (kW/m<sup>2</sup>)  $I_s=1.367$

➤ εκκεντρότητα (rad)  $dr=1+0.034\cos[(2J\pi/365)-0.05]$

➤ εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (MJ/m<sup>2</sup>d) ακριβής εκτίμηση

$$S_o=86.4I_sdr (\omega_s\sin\phi\sin\delta+\sin\omega_s\cos\phi\cos\delta)$$

➤ συντελεστής απορρόφησης της ατμόσφαιρας  $f_s=0.22+0.52(n/N)$  όπου, η=ώρες πραγματικής ηλιοφάνειας, στην περίπτωση μας επειδή δεν έχουμε τιμές για όλα τα χρόνια που μελετάμε, παίρνουμε το μέσο όρο των τιμών που μας δόθηκαν για κάθε μήνα. Και N= αστρονομική διάρκεια ημέρας/αριθμός ημερών

➤ λευκαύγεια νερού  $a=0.08$

➤ καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων (MJ/m<sup>2</sup>d)  $S_n=S_o f_s(1-a)$

➤ ικανότητα καθαρής εκπομπής  $\epsilon_n=0.34-0.14\sqrt{e}$

- συντελεστής επίδρασης νέφωσης  $f_L=0.10+0.90(n/N)$
- καθαρή ακτινοβολία μακρών κυμάτων (MJ/m<sup>2</sup>d)  $L_n=\varepsilon_n f_L \sigma (273+T)^4$  όπου  $\sigma=4.910^{-9} \text{ MJ/m}^2 \text{dK}^4$
- καθαρή ακτινοβολία (MJ/m<sup>2</sup>d)  $R_n=S_n-L_n$
- συνάρτηση ανέμου (kg/kPam<sup>2</sup>d)  $F(u)=436u/(273+T)$  όπου  $u$ =μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου (m/s)
- εξίσωση Penman για εξάτμιση από ελεύθερη επιφάνεια νερού (mm/d)  

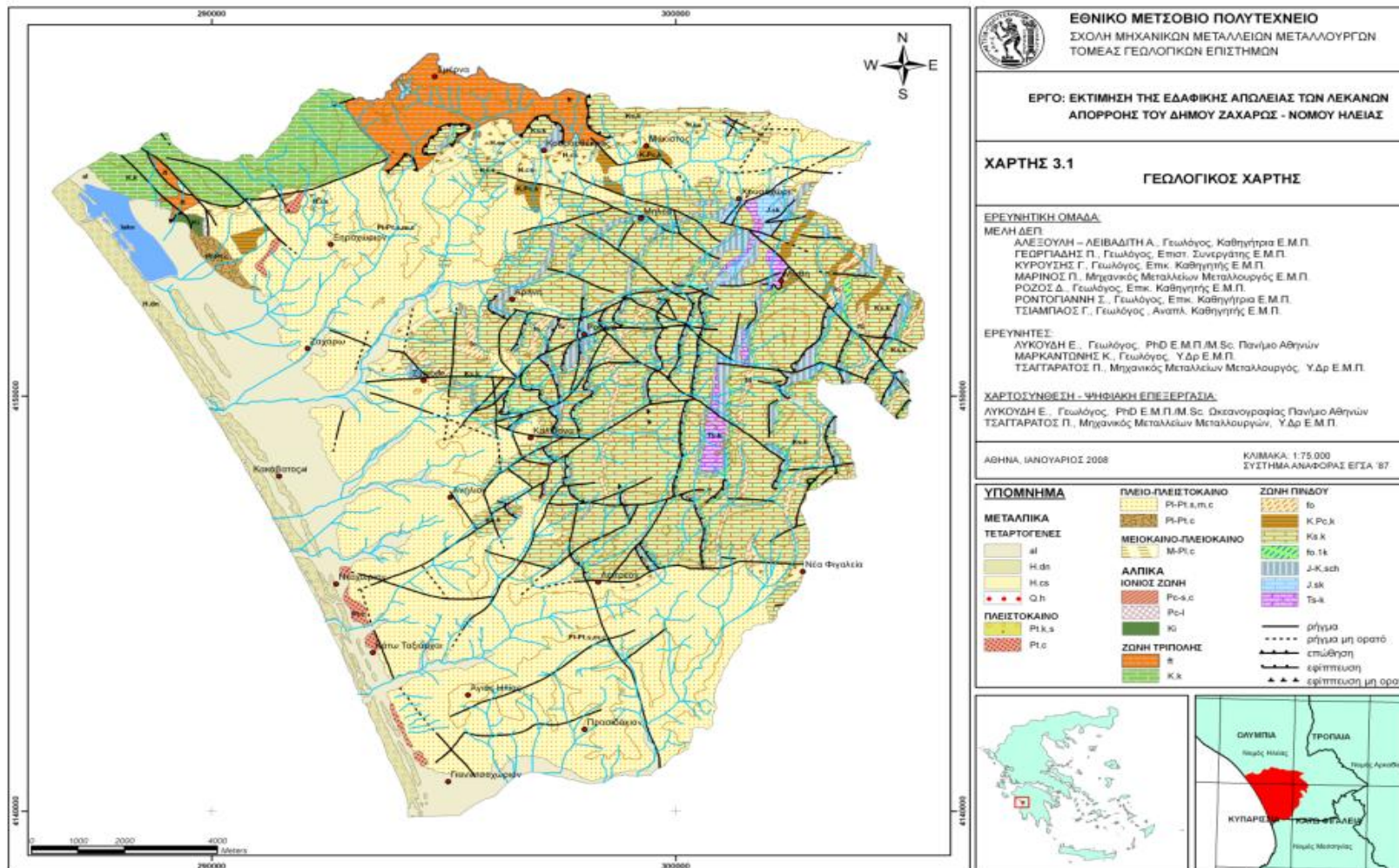
$$E'=[\Delta R_n/(\Delta+\gamma)]+[\gamma F(u)D/(\Delta+\gamma)]$$
- εξάτμιση από ελεύθερη επιφάνεια νερού (mm)  $E =E'N_d$  όπου  $N_d$ =αριθμός ημερών του εξεταζόμενου μήνα

Τη διαδικασία αυτή την κάναμε 12 φορές, μία για κάθε μήνα και βρήκαμε με τον τρόπο αυτό την εξάτμιση  $E$  της υδάτινης επιφάνειας ξεχωριστά για κάθε μήνα. Για το μήνα Φεβρουάριο θεωρήσαμε ως δίσεκτα τα έτη 1976, 1980, 1984, 1988, 1992, 1996, 2000.

**NOEMBPIOΣ**

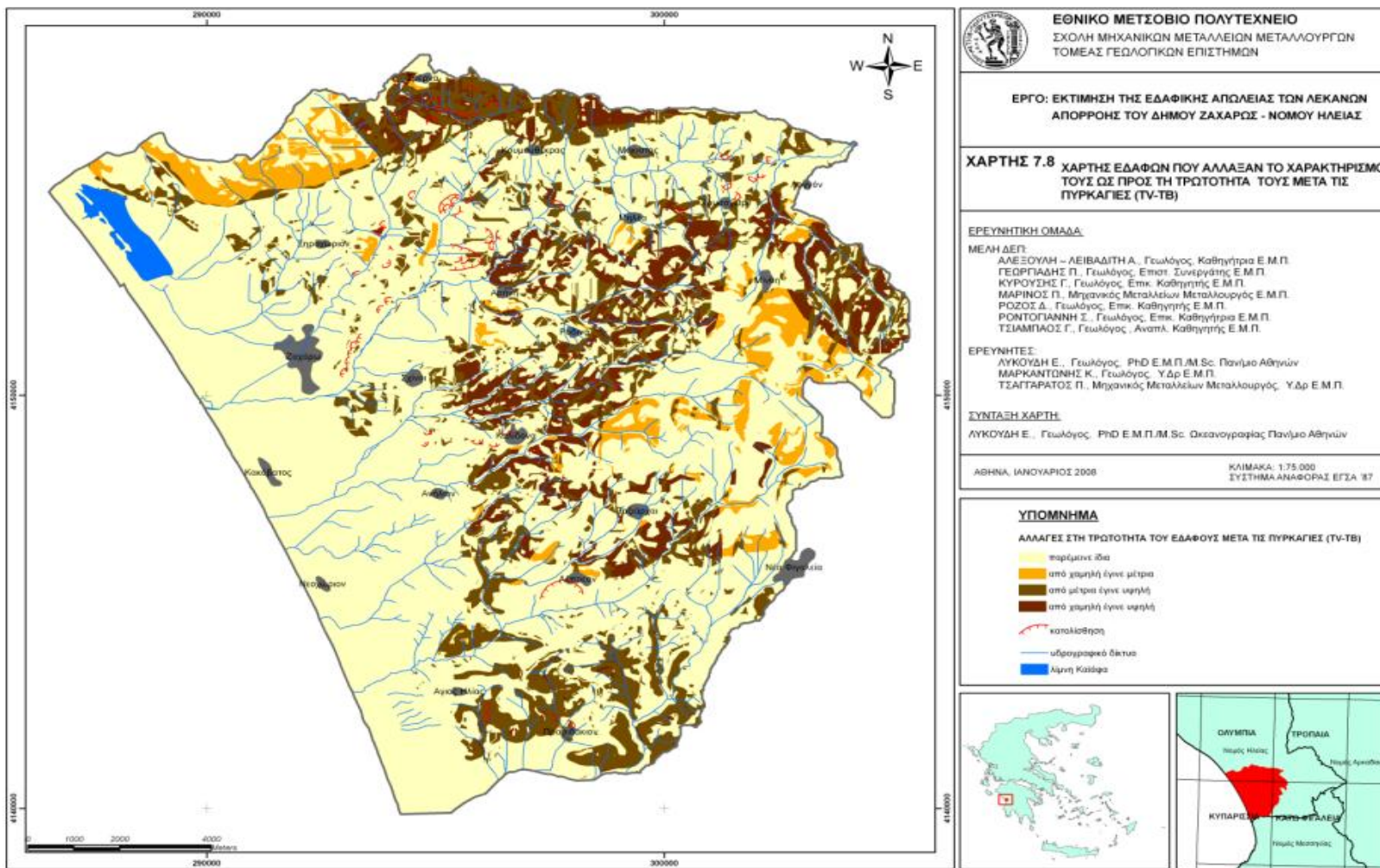
ΥΑΡ. ΕΤΟΣ	$T_a$	$e^*$	$e$	$\Delta$	$D$	$\gamma$	$\lambda$	$J$	$\delta$	$\omega s$	$N$	$f_s$	$S_n$	$\epsilon_n$	$f_L$	$L_n$	$R_n$	$F_u$	$E'$	$E(mm)$
<b>1975 - 1976</b>	14.0	1.599	1.255	0.104	0.344	0.067	2.5	319	-0.330	1.307	9.987	0.491	8.175	0.183	0.569	3.466	4.709	3.646	1.660	<b>49.794</b>
<b>1976 - 1977</b>	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	<b>53.521</b>
<b>1977 - 1978</b>	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	<b>54.464</b>
<b>1978 - 1979</b>	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	<b>47.875</b>
<b>1979 - 1980</b>	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	<b>41.726</b>
<b>1980 - 1981</b>	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	<b>45.667</b>
<b>1981 - 1982</b>	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	<b>37.798</b>
<b>1982 - 1983</b>	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	<b>43.725</b>
<b>1983 - 1984</b>	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	<b>41.956</b>
<b>1984 - 1985</b>	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	<b>49.117</b>
<b>1985 - 1986</b>	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	<b>43.298</b>
<b>1986 - 1987</b>	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	<b>43.187</b>
<b>1987 - 1988</b>	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	<b>44.527</b>
<b>1988 - 1989</b>	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	<b>39.876</b>
<b>1989 - 1990</b>	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	<b>43.912</b>

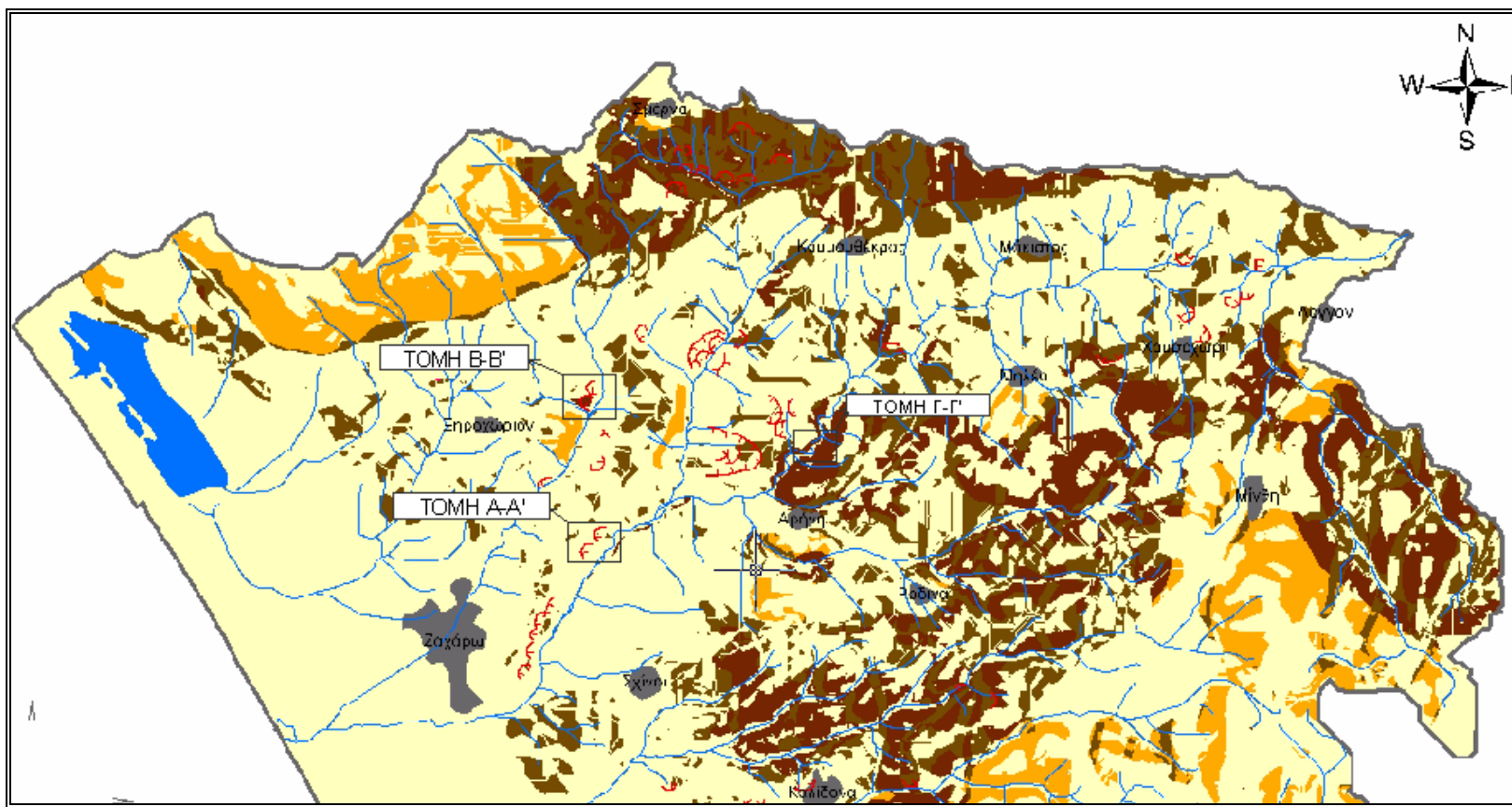




**Χάρτης 2: Γεωλογικός Χάρτης της περιοχής της Ζαχάρως (Ερευνητική ομάδα 'Α' του ΕΜΠ)**







Χάρτης 4: Εντοπισμός τομών στο χάρτη αλλαγής τρωτότητας, μετά τις πυρκαγιές



Φωτογραφία 1: Καμένη περιοχή στη Ζαχάρω  
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)



Φωτογραφία 2: Καμένη περιοχή στη Ζαχάρω  
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)





Φωτογραφία 3: Καμένο πρυνές στη Ζαχάρω  
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)



Φωτογραφία 4: Καμένο πρυνές στη Ζαχάρω  
(Διάθεση φωτογραφικού υλικού: Σακελλαρίου Μ.)

