

**Α.Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ**

## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΘΕΜΑ: ΑΙΤΙΑ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ  
ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ  
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ.**

**ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΑΥΡΟΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΕΣ:  
ΒΟΥΤΣΙΩΤΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ  
ΔΙΟΝΥΣΙΑΤΟΥ ΝΙΚΗ - ΕΙΡΗΝΙ**

*Θέλουμε να ευχαριστήσουμε τις βιβλιοθήκες του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, του Πανεπιστήμιου Πατρών, της Δημοτικής βιβλιοθήκης Πατρών καθώς και όλους όσους συνέβαλλαν για την σύνταξη αυτής της πτυχιακής εργασίας.*

*Αφιερώνουμε την παρούσα πτυχιακή εργασία στους καθηγητές μας, στους γονείς μας και σε όλους όσους βρέθηκαν θύματα κατολισθητικών φαινομένων, ελπίζοντας σε πιο αποτελεσματικούς τρόπους αποφυγής τους.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	σελ.7
---------------	-------

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ – Ορισμός κατολισθητικών φαινομένων.....	σελ.8
---	-------

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΕΙΔΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.18
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	σελ.18
2.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.19
2.2.1 Είδος κίνησης – Γεωμετρία .....	σελ.19
2.2.1.1 Πτώσεις.....	σελ.23
2.2.1.2 Ανατροπές.....	σελ.23
2.2.1.3 Ολισθήσεις.....	σελ.24
2.2.1.4 Εξαπλώσεις.....	σελ.25
2.2.1.5 Ροές.....	σελ.26
2.2.2 Υλικό.....	σελ.27
2.2.3 Στάδιο δράσης.....	σελ.28
2.2.4 Ταχύτητα κίνησης.....	σελ.29
2.2.5 Περιεχόμενη υγρασία.....	σελ.30
2.3 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.31
2.3.1 Αρκετές προτάσεις ερευνητών για την ταξινόμηση των κατολισθήσεων.....	σελ.31
2.3.1.1 Ταξινόμηση κατά Penta.....	σελ.31
2.3.1.2 Ταξινόμηση κατά Hoek – Brav.....	σελ.31
Ø Απλές θραύσεις.....	σελ.32
Ø Σύνθετες θραύσεις.....	σελ.32
2.3.1.3 Ταξινόμηση κατά Zaruba – Mencl.....	σελ.33
2.3.1.4 Ταξινόμηση κατά Varnes.....	σελ.34
Ø Καταπτώσεις.....	σελ.34
Ø Ανατροπές.....	σελ.35
Ø Ολισθήσεις.....	σελ.35
Ø Πλευρικές εξαπλώσεις.....	σελ.36
Ø Ροές.....	σελ.36
Ø Σύνθετες κινήσεις.....	σελ.37
2.4 ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.38
2.4.1 Κατολισθήσεις των ανωτέρω στρωμάτων.....	σελ.38
2.4.2 Κατολισθήσεις που οφείλονται στην μεταβολή της συνεκτικότητας του πετρώματος.....	σελ.38
2.4.3 Κατολισθήσεις συνεκτικών εδαφών.....	σελ.40
2.4.3.1 Κατολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης.....	σελ.40
2.5 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΑΡΓΙΛΟΥΧΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ.....	σελ.41
• Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης.....	σελ.41
• Ολισθήσεις κατά μήκος σύνθετων επιφανειών.....	σελ.41
• Μετακίνηση πάνω σε πλαστικά πετρώματα.....	σελ.42

2.6 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΥΜΠΑΓΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	σελ.42
• Ολισθήσεις κατά μήκος προκαθορισμένων ασυνεχειών.....	σελ.42
• Ολισθήσεις βαρύτητας.....	σελ.42
• Πτώσεις βράχων.....	σελ.42
2.7 ΕΙΔΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	σελ.42
2.8 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.43

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....	σελ.45
3.1 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΕΙΡΟΜΗΚΟΥΣ ΠΡΑΝΟΥΣ.....	σελ.45
3.1.1 Εισαγωγή – Εξίσωση διατήρησης της μάζας.....	σελ.45
3.1.2 Κατάστρωση του προβλήματος απειρομήκους πρανούς μεταβλητού ύψους.....	σελ.48
3.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΕΡΙΚΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	σελ.53
3.2.1 Έμμεση εξάρτηση ταχύτητας και ύψους.....	σελ.54
3.2.2 Εξέλιξη κατολισθήσεων κυματοειδούς αρχικής μορφής.....	σελ.55
3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΒΑΘΩΝ ΥΔΑΤΩΝ.....	σελ.57
3.3.1 Δυναμικός συντελεστής ασφάλειας – ταξινόμηση κατολισθήσεων.....	σελ.57
3.3.2 Κατάστρωση του συστήματος των βασικών εξισώσεων.....	σελ.59
3.3.3 Διερεύνηση και ανάλυση γραμμικής ευστάθειας συστήματος βασικών εξισώσεων.....	σελ.62
3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	σελ.68

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΠΙΡΡΕΠΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ.....	σελ.76
4.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	σελ.76
4.2 ΕΥΑΙΣΘΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ.....	σελ.77
4.2.1 Απότομες πλαγιές.....	σελ.77
4.2.2 Βράχοι και όχθες υποσκαμμένες από ρεύματα ή κύματα.....	σελ.77
4.2.3 Περιοχές συγκέντρωσης υδάτων αποχέτευσης και ζώνες απορροής.....	σελ.78
4.2.4 Περιοχές με λοφώδες έδαφος.....	σελ.79
4.2.5 Περιοχές συγκέντρωσης ρωγμών και στρωματοειδών επιπέδων.....	σελ.79
4.2.6 Πρόσφατες κατολισθήσεις.....	σελ.79
4.3 Κατολισθητικά φαινόμενα στην Ελλάδα – Στατικά στοιχεία .....	σελ.80
4.4 Σκιαγράφηση της γεωλογικής δομής.....	σελ.94

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ.....	σελ.96
5.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ.....	σελ.98
5.1.1 Η Δομή του γεωλογικού υπόβαθρου και η τεκτονική της περιοχής.....	σελ.98

5.1.2 Το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της.....σελ.98	σελ.98
5.1.3 Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή.....σελ.99	σελ.99
5.1.4 Η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα καθώς και η κινητικότητα του υπόβαθρου.....σελ.99	σελ.99
5.1.5 Η Γεωδυναμική εξέλιξη που σημειώνεται σε περιοχές με νεοτεκτονική δραστηριότητα.....σελ.100	σελ.100
5.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ.....σελ.100	σελ.100
5.2.1 Εξωγενή αίτια.....σελ.100	σελ.100
5.2.1.1 Αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους.....σελ.100	σελ.100
5.2.1.2 Αύξηση της κλίσεως των πρηνών.....σελ.100	σελ.100
5.2.1.3 Αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου.....σελ.101	σελ.101
5.2.2 Ενδογενής παράγοντες.....σελ.101	σελ.101
5.2.2.1 Αύξηση της ανώσεως.....σελ.101	σελ.101
5.2.2.2 Η αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων.....σελ.102	σελ.102
5.2.2.3 Η ελάττωση της συνοχής.....σελ.102	σελ.102
5.2.2.4 Ελάττωση της τριβής.....σελ.103	σελ.103
5.2.2.5 Αύξηση του ύψους και του πλάτους της εκτομής του εδάφους.....σελ.103	σελ.103
5.3 ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟΙ ΚΑΙ ΜΕΣΟΖΩΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ.....σελ.106	σελ.106
5.4 ΑΙΤΙΑ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ.....σελ.107	σελ.107

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....σελ.112	σελ.112
6.1 Συμπεράσματα.....σελ.112	σελ.112
6.2 Μέτρα προστασίας των πρηνών.....σελ.113	σελ.113

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u> .....σελ.114	σελ.114
----------------------------------	---------

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην διατριβή αυτή μελετάται το θέμα της δυναμικής των κατολισθήσεων και πιο συγκεκριμένα δίνεται έμφαση στην μελέτη της ταχείας ροής συνθριμμάτων (debris flow) δηλαδή στην κατάστρωση του μαθηματικού συστήματος που περιγράφει την κίνηση, την μελέτη της ευστάθειας του και την επίλυση αυτού, κατά τη διάρκεια της ήδη αναπτυγμένης ταχείας ροής των συνθριμμάτων. Επιπλέον μελετάται πειραματικά η συμπεριφορά της κίνησης της γεωμάζας όταν προκαλείται τεχνητή ροή αυτής, η μορφή απόθεσης της κινούμενης γεωμάζας στο τελικό της στάδιο καθώς και οι εξασκούμενες δυνάμεις σε προστατευτικά εμπόδια που τοποθετούνται κάθετα προς την κίνηση του γεωυλικού.

Με τον όρο κατολίσθηση εννοούμε γενικώς μια κίνηση πετρωμάτων με διάφορη ταχύτητα από μία υψηλότερη θέση μιας κλιτύς προς μια χαμηλότερη με την επίδραση της βαρύτητας, αφού έχει διαταραχθεί προηγουμένως η κατάσταση ισορροπίας της κλιτύς. Αν εξετάσουμε τα πρηνή των κλιτύων από γεωλογική άποψη, θα παρατηρήσουμε ότι ποτέ αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν σταθερά. Με την επίδραση της βαρύτητας και των εξωγενών δυνάμεων, δημιουργούνται στις κλιτείς μετακινήσεις πετρωμάτων με διαφορετική μορφή. Οι μετακινήσεις αυτές συνήθως είναι πολύ μικρές και μόλις που μπορούν να παρατηθούν, όμως όταν οι δυνάμεις αυτές εξακολουθούν να δρουν για μεγάλο χρονικό διάστημα, τότε αρχίζουν να γίνονται αρκετά σημαντικές. Απέναντι στις αργές αυτές κινήσεις παρουσιάζονται ξαφνικά κινήσεις μαζών με καταστρεπτικό μέγεθος, ιδιαίτερα όταν αυτή η κίνηση γίνεται πολύ γρήγορα.

Οι κατολισθήσεις παρουσιάζονται τόσο στα χαλαρά πετρώματα (όπως κώνοι κορρημάτων, άμμοι, αργιλικά στρώματα κ.α.) όσο και στα στερεά πετρώματα. Το φαινόμενο μπορεί να λάβει χώρα όχι μόνο στη ξηρά, αλλά και μέσα σε λίμνες, ταμιευτήρες και θάλασσες. Οι μετακινήσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν σαν τα πιο σημαντικά καταστροφικά φαινόμενα. Κοστίζουν οικονομικά στην ανθρωπότητα, περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο μεμονωμένο γεωλογικό φαινόμενο, όπως π.χ. σεισμοί και μεγάλες πλημμύρες. Τις τελευταίες δεκαετίες η ορολογία για τα κατολισθητικά φαινόμενα έχει αλλάξει, καθώς δεν υπάρχει όρος γενικά αποδεκτός για το φαινόμενο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ - Ορισμός κατολισθητικών φαινομένων

Για την καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου της παρούσης εργασίας γίνεται αναφορά καταρχήν στην κλασσική αντιμετώπιση του προβλήματος της ευστάθειας των πρανών που αποτελεί ακόμη και σήμερα αξεπέραστο εργαλείο στα ειδικά γεωτεχνικά έργα.

Τα εδάφη είναι γενικά κοκκώδη υλικά και κρατούν μία ενδιάμεση θέση μεταξύ στερεών και υγρών. Εξ' αιτίας της ικανότητας που έχει το έδαφος να αναλαμβάνει διατμητικές τάσεις είναι δυνατόν κεκλιμένες εδαφικές επιφάνειες, τα λεγόμενα πρανή, να ισορροπούν. Παρόλα αυτά είναι προφανές ότι επειδή συχνά λαμβάνουν χώρα καταστροφικές ή και μικρότερης έκτασης αστοχίες ο μηχανικός σήμερα είναι ακόμη υποχρεωμένος να αντιμετωπίζει σαν πρόβλημα την πρόβλεψη και την βελτίωση της ευστάθειας κυρίως των πρανών, αλλά πολλές φορές και των τεχνητών πρανών. Ο πρώτος που ανέλυσε την ευστάθεια των πρανών ήταν ο COLLIN το 1846 ο οποίος πραγματοποίησε και την πρώτη διατμητική δοκιμή σε άργιλο.

Η αστοχία ενός γεωμετρικά ορισμένου πρανού μπορεί να εκληφθεί σαν το γλίστρημα (ολίσθηση) μίας εδαφικής μάζας πάνω σε συγκεκριμένη επιφάνεια ολίσθησης. Ανάλογα, οι θεωρούμενες επιφάνειες ολίσθησης μπορεί να είναι επίπεδες, κυκλικές και αντίστοιχα ο έλεγχος της ασφάλειας του πρανού επιτυγχάνεται με την σύγκριση του ενεργοποιημένου συντελεστή συνοχής, με τον πραγματικό και της ενεργοποιημένης τριβής με την πραγματική. Στην περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας ολίσθησης ο συντελεστής τριβής ορίζεται αυθαίρετα παίρνοντας μία τιμή μικρότερη από την πραγματική. Ενώ στην περίπτωση των κύκλων ολίσθησης υιοθετείται η ιδέα της κατασκευής του κύκλου τριβής.

Αργότερα ο FELLENIUS, στις αρχές του αιώνα μας μελετώντας πολυάριθμες αστοχίες πρανών εισήγαγε μία μέθοδο ανάλυσης ευστάθειας πρανών που βασίζεται στους κύκλους ολίσθησης με την βοήθεια της υποδιαίρεσης των κυκλικών επιφανειών ολίσθησης σε λωρίδες. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται και σήμερα μαζί με κάποιες πιο σύγχρονες μεθόδους που εισήχθησαν αργότερα από τους BISHOP, JAMBU και άλλους. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου αυτές οι μέθοδοι δεν είναι αποτελεσματικές αφού πολλά πρανή



καταρρέουν με καταστροφικό τρόπο παρόλο που σύμφωνα με την ανάλυση των παραπάνω μεθόδων θα έπρεπε να ισορροπούν. Τέτοια γεγονότα απώλειας της ευστάθειας των πρανών είναι συνήθως καταστροφικές αστοχίες πρανών, πολλές φορές χωρίς καμία προειδοποίηση και χωρίς προφανή αίτια έναρξης του φαινομένου. Η βαθύτερη αιτία του περιορισμένου εύρους εφαρμογής των κλασικών μεθόδων οφείλεται στο γεγονός ότι αυτές βασίζονται σε μία απλουστευτική κατανόηση του φαινομένου της αστοχίας, δηλαδή στην ανικανότητα του κοκκώδους μέσου να αναλάβει τα εξασκούμενα φορτία. Αυτή η ανάλυση οδηγεί κατευθείαν στους COULOMB και MOHR και θεωρεί ότι η αστοχία λαμβάνει χώρα όταν ο λόγος των διατμητικών προς τις ορθές τάσεις λάβει μία κρίσιμη τιμή.

Βιβλιογραφικά μία πρόσφατη προσπάθεια να εξηγηθεί η δυσαρμονία μεταξύ των κλασικών μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας πρανών και της ύπαρξης κατολισθήσεων έγινε από τον SKEMPTON (1985) σύμφωνα με τον οποίο η μείωση της αντοχής του εδάφους από μία μέγιστη τιμή σε μία υπολειπόμενη τιμή υπό συνθήκες συνεχούς παραμόρφωσης, είναι υπεύθυνη για τις αστοχίες των πρανών και τη δημιουργία κατολισθήσεων.

Αν και το θέμα των κατολισθήσεων που συνδέεται με τις καταστροφικές αστοχίες των πρανών αποτελεί σχετικά νέο επιστημονικό πεδίο έχει σημειωθεί πρόοδος στην κατανόηση των αντίστοιχων φαινομένων.

Για παράδειγμα σήμερα είναι γνωστό ότι ο κρίσιμος λόγος διατμητικής – ορθής τάσης δεν είναι μία σταθερά του εδάφους αλλά εξαρτάται από την πυκνότητα, το επίπεδο ενεργών πιέσεων, καθώς και τον τρόπο παραμόρφωσης. Επίσης πλέον στη βιβλιογραφία πέρα από τον κλασικό όρο της διατμητικής αστοχίας βλέπουμε ότι αναφέρονται διάφορα φαινόμενα τα οποία μπορεί πιθανόν να οδηγούν σε καταστροφικές αστοχίες. Αυτά τα φαινόμενα συνδέονται με την ξαφνική απώλεια της ισορροπίας του εδαφικού υλικού και επηρεάζονται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ κόκκων και ρευστού των πόρων, σε πολλές περιπτώσεις δε αυτή η αλληλεπίδραση οδηγεί στην ολική απώλεια της διατμητικής αντοχής πράγμα που είναι γνωστό στην βιβλιογραφία με τον όρο “ρευστοποίηση εδαφών”.

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τις κατολισθήσεις. Ο κυριότερος είναι ο ορισμός του CRUDEN (1991) στο Work Party on Word Landslide Inventory, σύμφωνα με τον οποίο ως κατολίσθηση ορίζεται η κίνηση μάζας πετρώματος ή γαιών ή συνθριμμάτων στην κατωφέρεια ενός πρανούς. Ο Varnes (1978) θεωρεί ότι ο όρος “κίνηση πρανών”: θα ήταν περισσότερο κατανοητός αφού δεν

αναφέρεται σε διαδικασίες. Ο ορισμός του είναι “μία κατηγορική και προς τα πλάγια κίνηση ενός πρανούς και του υλικού του, κάτω από την επίδραση της βαρύτητας”.

Μολονότι η λέξη “κατολίσθηση” είναι η πιο γνωστή έκφραση, Ο BRUNSDEN (1984) προτιμά τον όρο “κίνηση μάζας” και τον ξεχωρίζει από τον όρο “μεταφορά μάζας” αφού οι κατολισθήσεις είναι μία διαδικασία όπου δεν απαιτείται κάποιο μέσο μεταφοράς όπως το νερό, ο αέρας ή ο πάγος.

Ο HUTCHINSON (1988), ο οποίος προετοίμασε ένα πιο ολοκληρωμένο και κατανοητό σχήμα ταξινόμησης, ταξινομεί τις κινήσεις των πρανών σε 8 κατηγορίες οι οποίες περιέχουν πολυάριθμες υποδιαίρεσεις. Αυτή η ταξινόμηση βασίζεται στην μορφολογία, τους μηχανισμούς, τον τύπο του υλικού και τον ρυθμό κίνησης, δηλαδή την ταχύτητα και παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

### **Πίνακας 1: Ταξινόμηση κατολισθήσεων κατά Hutchinson (1988)**

#### **A. Αναπηδήσεις**

Είναι κινήσεις συνδυασμένες με:

1. Εκσκαφές λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας
2. Φυσικά διαβρωμένες κοιλάδες

#### **B. Ερπυστικές κινήσεις**

1. Επιφανειακές, επικρατέστερες, εποχιακές, ερπυστικές, κινήσεις, κεκαλυμμένες, ερπυστικές κινήσεις:

- (α) ερπυσμός του εδάφους, ερπυσμός παλαιών στρωμάτων
- (β) ερπυσμός παγετώνων συμπεριλαμβανομένων κοκκωδών συνθριμμάτων (debris)

2. Συνεχείς ερπυσμός ή ερπυσμός μάζας
3. Ερπυσμός μετά την θραύση

#### **Γ. Καταβύθιση πρανών οροσειρών και βουνών**

- 1) μονή καταβύθιση, δηλαδή μίας πλευράς που συνδέεται κυρίως με το αρχικό στάδιο μίας κατολίσθησης:
  - a) περιστροφικού (κυρίως κυκλικού) τύπου
  - b) σύνθετου τύπου δηλαδή

- i. ληστρικού και
  - ii. διεπίπεδου τύπου
- 2) Διπλή καταβύθιση που συνδέεται κυρίως με το αρχικό στάδιο διπλής κατολίσθησης και οδηγεί στο άπλωμα των πτυχώσεων του ανάγλυφου:
  - a) Περιστροφικού τύπου και
  - b) Σύνθετου τύπου δηλαδή
    - i. Ληστρικού και
    - ii. Διεπίπεδου τύπου
- 3) Καταβύθιση συνδεόμενη με πολλαπλές ανατροπές.

### Δ.Κατολισθήσεις

- 1) Περιορισμένες θραύσεις σε:
  - a) Φυσικά πρηνή και
  - b) σε τεχνητά πρηνή
- 2) Περιστροφικές ολισθήσεις
  - a) Μονές περιστροφικές ολισθήσεις
  - b) Διαδοχικές περιστροφικές ολισθήσεις
  - c) Πολλαπλές περιστροφικές ολισθήσεις
- 3) Σύνθετες ολισθήσεις με ληστρικές ή διεπίπεδες επιφάνειες ολίσθησης:
  - a) Εκδηλώνονται προς τα πίσω λόγω εσωτερικής διάτμησης,
    - i) Σε ολισθαίνουσες μάζες χαμηλής έως μέτριας θραύσης,
    - ii) Σε ολισθαίνουσες μάζες υψηλής θραύσης
  - b) προοδευτικά σύνθετες ολισθήσεις, στις οποίες εμπλέκονται περιστροφικές ολισθήσεις στο πίσω μέρος και μεταγενέστερες παράλληλες μετατοπίσεις προς τα μπρος
- 4) παραλλήλως μετατοπιζόμενες ολισθήσεις:
  - a) Ολισθήσεις λωρίδων
  - b) Πλακοειδείς ολισθήσεις
  - c) Ολισθήσεις γαιανθράκων (τύρφη)
  - d) Ολισθήσεις πετρωμάτων,
    - i) Επίπεδες ολισθήσεις και ολισθήσεις ολόκληρων τμημάτων (block),
    - ii) Κλιμακωτές ή βαθμιδωτές ολισθήσεις,
    - iii) Σφηνοειδείς ολισθήσεις

- e) Ολισθήσεις συνθριμμάτων,
  - i) Χιονοστιβάδες συνθριμμάτων,
  - ii) Ενεργές ολισθήσεις στρωμάτων,
- f) Ξαφνικές ακτινικές θραύσεις

### **E.Κινήσεις συνθριμμάτων (debris) με μορφή ροής**

- 1) Ολισθήσεις λάσπης:
  - a) Λωρίδες
  - b) Λοβοειδείς ολισθήσεις
- 2) Περιπαγετωνικές ολισθήσεις:
  - a) Λωρίδες
  - b) Λοβοειδείς ολισθήσεις
- 3) Ολισθήσεις με μορφή ροής:
  - a) Σε χαλαρά χωρίς συνοχή εδαφικά υλικά
  - b) Σε ελαφρώς συνεκτικές και με υψηλό πορώδες προσχώσεις
  - c) Σε χαλαρά πετρώματα υψηλού πορώδους
- 4) Ροή συνθριμμάτων, ροή υγρών συνθριμμάτων υψηλής έως υπερβολικά υψηλής ταχύτητας, η οποία περιλαμβάνει:
  - a) Συντρίμματα πετρωμάτων,
    - i) Ολισθήσεις συνθριμμάτων σε πρανή λόφων,
    - ii) Ροή συνθριμμάτων υπό μορφή ροής σε κανάλι, ροή λάσπης, ροή μείγματος λάσπης και κροκάλων
  - b) Γαιάνθρακες και ιζήματα
  - c) Πολλές φορές δε, συνδέονται και με την ηφαιστειακή δραστηριότητα και περιλαμβάνουν:
    - i) Θερμά εκκρίματα ηφαιστειών
    - ii) ψυχρά εκκρίματα ηφαιστειών
- 5) Εξαιρετικά γρήγορη ροή ξηρών συνθριμμάτων

### **Z. Ανατροπές**

- 1) Ανατροπές οι οποίες καθορίζονται από προϋπάρχουσες ασυνέχειες:
  - a) Απλές ή μονές ανατροπές
  - b) Πολλαπλές ανατροπές

2) Ανατροπές που πραγματοποιούνται λόγω εφελκυστικής θραύσης όπισθεν της μάζας.

### **Η. Πτώσεις**

- 1) Πρωτογενείς πτώσεις άμεσα αποκολλημένου υλικού: πτώσεις πετρωμάτων ή εδαφών.
- 2) Δευτερογενείς πτώσεις πρόωρα αποκολλημένου χαλαρού υλικού, πτώσεις πετρών.

### **Θ. Σύνθετες κινήσεις πρανών**

- 1) Κύρτωση και διόγκωση κοιλάδων
- 2) Τμηματική (block type) κίνηση πρανών
- 3) Εγκαταλελειμμένοι αργιλικοί γκρεμοί
- 4) Κατολισθήσεις οι οποίες κατά την κίνηση τους προς τα κάτω μετατρέπονται σε ολισθήσεις λάσπης ή ροή λάσπης στον πόδα:
  - a) Κατρακύλιση γεωμάζας
  - b) Πολλαπλώς περιστροφικές αργλικές ολισθήσεις
  - c) Ολισθήσεις ρηγμάτων
- 5) Ολισθήσεις που προκαλούνται από συρτική διάβρωση
- 6) Πολλαπλές ολισθήσεις
- 7) Πολλαπλές ολισθήσεις εδαφικών αποθέσεων

Η παραπάνω ταξινόμηση παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι αποδεικνύει ότι δεν είναι δυνατόν με απόλυτη σαφήνεια να περιγράψουν και να οριστούν τα καταστροφικά φυσικά φαινόμενα. Λόγω της μοναδικότητας με την οποία κάθε φορά εκδηλώνονται, μόνο μέσο παρατήρησης και με τον εμπειρικό συνδυασμό πολλών περιγραφικών επιστημών (όπως ένα μέρος της γεωλογίας) είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται όροι που πολλές φορές δεν παραπέμπουν στην μηχανική είναι όμως απαραίτητοι για την απόκτηση ενός στοιχειώδους κώδικα.

Σύμφωνα με τους **COUSSOT** και **MEUNIER (1996)** η ροή συνθριμμάτων αντιμετωπίζεται σαν υποκατηγορία της ροής εδαφικών μαζών που περιέχουν νερό ή όχι καθώς και ιζήματα, και λαμβάνει χώρα σε απότομα πρανή ορεινών περιοχών.

**Ο TERZAGHI (1950)**, σαν κατολίσθηση, ορίζει την γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος εναπομένουτος εδάφους ή ιζήματος ενός πρηνούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.

**Ο ECKEL (1958)**, χρησιμοποιεί τον όρο κατολίσθηση, για να περιγράψει το φυσικό φαινόμενο που συνιστάται στην μετακίνηση προς τα κάτω και προς τα έξω των υλικών που αποτελούν τα φυσικά ή τεχνητά πρηνή. Δηλαδή των πετρωμάτων, των μεταφερόμενων υλικών πρηνή, ή του συνδυασμού των υλικών αυτών.

**Οι ZARUBA και MENCL (1969)**, ορίζουν την κατολίσθηση σαν μια γρήγορη κίνηση, που πραγματοποιείται λόγω της ολίσθησης πετρωμάτων ενός τμήματος πρηνούς, το οποίο διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια.

**Ο COATES (1977)**, δίνει τους παρακάτω όρους-προϋποθέσεις για την κατάταξη κατολισθήσεων :

- 1) Οι κατολισθήσεις, αποτελούν μία κατηγορία φαινομένων, που υπάγονται στο γενικότερο φαινόμενο της κίνησης μαζών.
- 2) Η βαρύτητα είναι η δύναμη που παίζει πρωτεύοντα ρόλο.
- 3) Η ταχύτητα της κίνησης, πρέπει να είναι σχετικά μεγάλη.
- 4) Η κίνηση, μπορεί να εκδηλώνεται με πτώση, ολίσθηση ή ροή.
- 5) Η ζώνη ή το επίπεδο της κίνησης δεν ταυτίζεται με γεωλογικό ρήγμα.
- 6) Η κίνηση, πρέπει να γίνεται προς τα κάτω και προς τα έξω, με σχηματισμό ελεύθερης επιφάνειας.
- 7) Το μετακινούμενο υλικό, έχει καθορισμένα όρια και συνήθως αποτελεί περιορισμένο τμήμα μίας ορεινής ή λοφώδους έκτασης.
- 8) Το μετακινούμενο υλικό, περιλαμβάνει μέρος του μανδύα αποσάθρωσης των πετρωμάτων ή μέρος του μητρικού πετρώματος ή ακόμα και τα δύο.
- 9) Συνήθως ολισθήσεις, που οφείλονται σε φαινόμενα ψύξης, δεν συμπεριλαμβάνονται στις κατολισθήσεις.

**Ο SCHUSTER (1978)**, περιορίζει τον όρο “κατολίσθηση”, στην ομάδα εκείνη των μετακινήσεων των πρυνών, όπου λαμβάνει χώρα διατμητική θραύση κατά μήκος μίας καθορισμένης επιφάνειας ή κατά μήκος περισσότερων επιφανειών.

Από την συνολική εξέταση της σχετικής βιβλιογραφίας – η οποία στατιστικώς είναι εξαιρετικά πρόσφατη – μπορεί να εισαχθεί χωρίς σφάλμα το συμπέρασμα, ότι γενικά καταστροφικά φαινόμενα όπως οι κατολισθήσεις αλλά και ειδικότερα υποκατηγορίες αυτών όπως η ταχεία ροή συνθριμμάτων (debris) είναι πολύπλοκα φυσικά φαινόμενα που ακόμα δεν είναι γνωστά, και δεν έχουν πλήρως ερμηνευτεί από την επιστήμη της μηχανικής. Για παράδειγμα η έναρξη τους δεν μπορεί ακόμη να προβλεφθεί, τα γεωϊλικά που συμμετέχουν διαφέρουν σημαντικά από την μία ροή στην άλλη, και τα μαθηματικά μοντέλα παρουσιάζουν περιορισμούς και δυσκολίες στις αριθμητικές εφαρμογές τους, κυρίως γιατί τέτοιες ροές έχουν ελεύθερα σύνορα ή ασύμβατες συνοριακές συνθήκες.

Ένα θεμελιώδες άλυτο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι το τι συμβαίνει στο μέτωπο της ροής αφού η κοκκομετρία του υλικού ποικίλει τόσο, ξεκινώντας από αργίλους και φτάνοντας στις τάξεις μεγέθους των κροκκαλών ή και των ογκολίθων όπως φαίνεται και από τις φωτογραφίες 1-4 που προέρχονται από τα αρχεία του US GEOLOGICAL SURVEY.



1. Ροή λάσπης και ξυλείας στο όρος St. Helens (USA) - USGS



2. Απόθεση ογκολίθων εξαιτίας ροής συνθριμμάτων με ογκολίθους- USGS



3. *Sierra Nevada- 1997- USGS*  
*Ροή συνθριμμάτων*



4. *Tahoma-Creek-USA - 1988-USGS*  
*Ροή λάσπης*

Παρόλες τις δυσκολίες της περιγραφής της δυναμικής τέτοιων φαινομένων, με τη βοήθεια της μεθοδολογίας της κατάστροφης μαθηματικών και μικρής κλίμακας πειραματικών μοντέλων καθώς και της αξιολόγησης τους, είναι δυνατή η συμβολή στην περαιτέρω έρευνα. Αυτή η μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία υιοθετώντας την προσέγγιση της θεωρίας αβαθών υδάτων, η οποία συναντάται σε εργασίες των HUTTER και SAVAGE, βασίζεται δε στους βασικούς νόμους της μηχανικής, απαιτεί καταστατικές υποθέσεις για το υλικό και για το περιγραφόμενο σύστημα κίνησης και καταλήγει σε ένα σύστημα εξισώσεων κυματικής μορφής που προσομοιάζουν κινήσεις ρευστών μικρού σχετικά βάθους.

Στη συνέχεια αυτή η θεωρία αξιολογήθηκε πειραματικά και τέλος διαπιστώθηκε η ανάγκη βελτιώσεώς της ώστε τα αριθμητικά αποτελέσματα να είναι σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Αυτό που πρέπει να τονιστεί εδώ είναι ότι σε καμιά περίπτωση τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής δεν αποτελούν λύση και πανάκεια για τέτοιου είδους προβλήματα. Αντίθετα η σημασία τους έγκειται στην προσπάθεια μίας κατά το δυνατόν συστηματικής συμβολής στην μεθοδολογία και στο σημερινό επίπεδο γνώσης που υπάρχει σε αυτόν τον τομέα έρευνας.



Προκειμένου να κατασκευαστεί ένα ευσταθές σύστημα κίνησης αποφασίστηκε η προσέγγιση με τη βοήθεια της λεγόμενης “θεωρίας αβαθών υδάτων” (Shallow Water Theory). Αυτή η θεωρία ανήκει στις θεωρίες που εφαρμόζονται σε προβλήματα μηχανικού γενικά και συνδέεται με την χρήση μέσων όρων του προφίλ της θεωρούμενης γεωμετρίας, αγνοεί δε σκοπίμως λεπτομέρειες οι οποίες μπορεί να μην είναι σημαντικές για την εν γένει συμπεριφορά της κινούμενης γεωμάζας. Επίσης η θεωρία αβαθών υδάτων μπορεί να συναντηθεί υπό διάφορες μορφές σε πρόσφατες εργασίες των SAVAGE και HUTTER καθώς και των συνεργατών τους οι οποίες αναφέρονται και στην παρούσα βιβλιογραφία. Με την εφαρμογή της καταλήγουμε σε ένα σύστημα μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες ομοιάζουν με αυτές που περιγράφουν ένα γνωστό πρόβλημα της ρευστοδυναμικής δηλαδή της ροής σε ανοιχτό κανάλι. Στην συνέχεια από την αριθμητική επίλυση του συστήματος διαπιστώθηκε ότι αυτό το μοντέλο “υποφέρει” από ένα σημαντικό μειονέκτημα: οδηγεί σε τεχνητές αστάθειες που εμφανίζουν κυρίως την μορφή θραυόμενων κυμάτων, οι οποίες δεν παρατηρούνται σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία αναγκαστικά στη φύση.

Προκειμένου να αρθεί το μειονέκτημα αυτό αναπτύσσεται μία νέα θεωρητική προσέγγιση η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί σαν μία κανονικοποίηση της θεωρίας αβαθών υδάτων με την χρήση επιπλέον μέσων όρων ως προς τον χρόνο (χρονική ολοκλήρωση των μεγεθών). Για την αξιολόγηση της νέας θεωρητικής προσέγγισης πέρα από τις αριθμητικές λύσεις πραγματοποιήθηκαν 1g πειραματικές δοκιμές ταχείας ροής συνθριμμάτων σε ιδιοσυσκευή μικρής κλίμακας που κατασκευάστηκε ειδικά για αυτό το σκοπό.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

### ΕΙΔΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

#### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ταξινόμηση της κατολίσθησης των πρανών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα κριτήρια, όπως π.χ. τον τύπο της μετακίνησης, το είδος του υλικού, τον ρυθμό της μετακίνησης, τη γεωμετρία της περιοχής της θραύσης, την ηλικία, τα αιτία της μετακίνησης κ.τ.λ.

Έχει γίνει γενικότερα αποδεκτή η ταξινόμηση σύμφωνα με τον τύπο της μετακίνησης και τον τύπο του υλικού (Vardes in Ecked ed. 1958 και Schuster – Krizek ed 1978) καθώς και εκείνη σύμφωνα με τη φύση του υλικού που μετακινείται (Zaruba – Mencil, 1969 και 1976).

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες ταξινομήσεις των κατολισθήσεων, άλλοτε απλές και άλλοτε σύνθετες, στηριζόμενες σε ποικίλα κριτήρια, αιτία για την οποία τα πιο πολλά συστήματα ταξινόμησης διαφέρουν τελείως μεταξύ τους. Σαν τέτοια κριτήρια έχουν χρησιμοποιηθεί: Το είδος των υλικών, η μορφή της επιφάνειας ολισθήσεως, η ταχύτητα μετακινήσεως, το πάχος της μάζας που κατολίσθησε κ.τ.λ.

Από το 1885 έχουν θεσπιστεί πολλά συστήματα ταξινόμησης, πρώτα από τον Ελβετό A. Heim, στη συνέχεια το 1939 από τον Bay, το 1956 από τον Penta και το 1959 από τον Desio, ο οποίος πρότεινε ένα σύστημα, που θέσπισε και η Διεθνής Επιτροπή για τη Μελέτη Της Υδραυλικής Διευθύνσεως και Προστασίας του Εδάφους (1971).

Παρά το γεγονός ότι οι κατολισθήσεις εμφανίζονται σε μεγάλο αριθμό, στις περισσότερες των περιπτώσεων περιορίζονται μόνο στα ανώτερα στρωματά και δεν επηρεάζουν τη γενικότερη ισορροπία του σχηματισμού στον οποίο εκδηλώνονται. Οι κατηγορίες των κατολισθήσεων που αναφέρονται στη συνέχεια, είναι εκείνες που επικρατούν, στο μεγαλύτερο ποσοστό του συνόλου των κατολισθήσεων και αφορούν στις κινήσεις επιφανειακών αποθέσεων και στρωμάτων. Ανάλογα με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, οι κατολισθήσεις χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, προσθέτοντας ένα συνθετικό στο τελικό όνομα τους. Θα εξεταστούν λοιπόν τα παρακάτω στοιχεία της κατολίσθησης.

## 2.2. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

### 2.2.1 Είδος Κίνησης-Γεωμετρία

Οι τρόποι με τον οποίο κατολισθαίνουν οι πλαγιές, χωρίζονται σε 5 κατηγορίες: πτώσεις (falls), ανατροπές (topples), ολισθήσεις (slides), εξαπλώσεις (spreads) και ροές (flows). Μια έκτη κατηγορία, οι σύνθετες κατολισθήσεις έχει αφαιρεθεί από την επίσημη κατηγοριοποίηση, αν και ο όρος σύνθετη έχει διατηρηθεί σαν περιγραφή του τρόπου δράσης μιας κατολίσθησης.

Πριν εξεταστούν αναλυτικά οι κατηγορίες των κατολισθήσεων είναι απαραίτητο να γίνει εκτενής περιγραφή των διάφορων μερών μιας τυπικής κατολίσθησης, ώστε να εξοικειωθεί ο αναγνώστης με την ορολογία και τη γεωμετρία της.

Ο πίνακας που ακολουθεί, παρουσιάζει τα διάφορα μέρη της κατολίσθησης καθώς και τους ορισμούς τους και δίνει μια ολοκληρωμένη άποψη της.

<b>ΑΡΙΘΜΟΣ</b>	<b>ΟΝΟΜΑ</b>	<b>ΟΡΙΣΜΟΣ</b>
1.	ΣΤΕΨΗ	Σχεδόν αμετακίνητο υλικό, δίπλα στα ψηλότερα σημεία της κλιτύος.
2.	ΚΥΡΙΑ ΤΟΜΗ	Απότομη επιφάνεια στο αμετακίνητο έδαφος, στο πάνω μέρος της κατολίσθησης, η οποία προκαλείται από την κίνηση του μετατιθέμενου υλικού. Είναι ένα ορατό μέρος της επιφάνειας αστοχίας (10).
3.	ΚΟΡΥΦΗ	Το ψηλότερο σημείο επαφής μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής(2).
4.	ΚΕΦΑΛΗ	Το ανώτερο σημείο της κατολίσθησης κατά μήκος της επαφής, μεταξύ του μετατιθέμενου υλικού και της κύριας τομής(2).

5.	ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΤΟΜΗ	Απότομη επιφάνεια στο μετατιθέμενο υλικό, που παράγεται από τις διαφορετικές κινήσεις στο εσωτερικό του.
6.	ΚΥΡΙΟ ΣΩΜΑ	Μέρος του μετατιθέμενου υλικού που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια αστοχίας, μεταξύ της κύριας τομής (2) και του ποδός της επιφάνειας θραύσης (11).
7.	ΠΟΔΙ	Μέρος της κατολίσθησης, το οποίο κινήθηκε μπροστά από το δάχτυλο της επιφάνειας αστοχίας (11) και βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
8.	ΑΙΧΜΗ	Σημείο στο πόδι (9), το οποίο απομακρυσμένο από την κορυφή (3) της κατολίσθησης.
9.	ΔΑΧΤΥΛΟ	Το κατώτερο, πιο απομακρυσμένο από την κύρια τομή (2), ανάγλυφο περιθώριο του μετατοπισμένου υλικού της κατολίσθησης.
10.	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΘΡΑΥΣΗΣ	Επιφάνεια, η οποία σχηματίζει (η έχει σχηματιστεί) από το κατώτερο όριο του μετατιθέμενου υλικού, κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
11.	ΔΑΧΤΥΛΟ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΘΡΑΥΣΗΣ	Η τομή μεταξύ του χαμηλότερου τμήματος της επιφάνειας θραύσης (10) και της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20).
12.	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗΣ	Τμήμα της αρχικής επιφάνειας του εδάφους (20) που υπερκαλύπτεται από το πόδι (7) της κατολίσθησης.

13.	ΜΑΖΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗΣ	Υλικό μετατοπισμένο από την αρχική του θέση στην πλαγιά λόγω της κίνησης. σχηματίζει τόσο την μάζα διόγκωσης (18).
14.	ΖΩΝΗ ΒΥΘΙΣΗΣ	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
15.	ΖΩΝΗ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ	Περιοχή της κατολίσθησης στην οποία το μετατοπισμένο υλικό βρίσκεται πάνω από την αρχική επιφάνεια του εδάφους (20).
16.	ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ	Ο όγκος που ορίζεται μεταξύ της κύριας κατακρήμνισης, της απομειούμενης μάζας και της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
17.	ΑΠΟΜΕΙΟΥΜΕΝΗ ΜΑΖΑ	Τμήμα της κατολισθαίνουσας μάζας που υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
18.	ΣΥΣΣΩΡΕΥΣΗ	Τμήμα της κατολισθαίνουσας μάζας που υπέρκειται της αρχικής επιφάνειας του φυσικού εδάφους.
19.	ΠΛΕΥΡΑ	Η δεξιά η αριστερή πλευρά της κατολίσθησης (όπως φαίνεται από τη στέψη), που είναι προέκταση της κύριας κατακρήμνισης.

Τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά στοιχεία, που πρέπει να αναγράφονται στο φύλλο της έκθεσης είναι τα παρακάτω:

**Μέγιστο μήκος της επιφάνειας ολίσθησης ( $L_r$ ):** Η απόσταση που μετριέται από το δάκτυλο της επιφάνειας ολίσθησης μέχρι τη στέψη.

**Μέγιστο μήκος ολισθαίνουσας μάζας ( $L_d$ ):** Η απόσταση από το άκρο της ολίσθησης μέχρι τη κορυφή της ολίσθησης.

**Ολικό μήκος (I):** Η απόσταση από το άκρο μέχρι τη στέψη.

**Μέγιστο πλάτος (Wr):** και ολισθαίνουσας μάζας (Wd): Οι αποστάσεις των πλευρών της κατολίσθησης και η πλευρική απόσταση της ολισθαίνουσας μάζας αντίστοιχα. Μετρούνται κάθετα στα μήκη  $L_r$  και  $L_d$  αντίστοιχα.

**Μέγιστο βάθος επιφάνειας ολίσθησης (Dr):** η απόσταση της επιφάνειας ολίσθησης από την αρχική επιφάνεια του φυσικού εδάφους (μετρείται κάθετα στην τελευταία επιφάνεια).

**Μέγιστο πάχος ολισθαίνουσας μάζας (Dd):** η απόσταση των επιφανειών ολίσθησης από την επιφάνεια της μετακινούμενης μάζας (κάθετα στην τελευταία).

Η πιο δύσκολα υπολογίσιμη παράμετρος είναι το βάθος της ολίσθησης, για την οποία χρησιμοποιούμε την ενόργανη μέθοδο των απόκλισημετρων.

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. Για παράδειγμα, περιστασιακές πτώσεις από ένα βράχο δίπλα σ'έναν αυτοκινητόδρομο μπορούν να περιοριστούν από ένα φράχτη ή κάτι ανάλογο. Αντιστρόφως, η πτώση βράχων από το πρόσωπο μιας εκσκαφής δείχνει αντίθετα προερχόμενες ασυνέχειες στη βραχώδη μάζα, οι οποίες απαιτούν αγκίστρωση για σταθεροποίηση.

Κάθε κατηγορία κατολίσθησης, από αυτές που αναφέρθηκαν, έχει έναν αριθμό από κοινές μορφές, οι οποίες συχνά συναντώνται στο ύπαιθρο και περιγράφονται σύντομα από σύνθετες κατολισθήσεις, των οποίων οι αρχικές ή τελικές κινήσεις ήταν αυτού του τύπου. Οι περιγραφές αυτές δείχνουν πως εξελίσσονται οι κατολισθήσεις κάθε τύπου. Στη συνέχεια αναφέρονται αναλυτικά οι κατηγορίες των κατολισθήσεων με τα χαρακτηριστικά τους.

#### **2.2.1.1. Πτώσεις (falls)**

Μια πτώση αρχίζει με την αποκόλληση εδάφους ή βράχου από μια απότομη πλαγιά, κατά μήκος μιας επιφάνειας, στην οποία υπάρχει μικρή ή καθόλου διατμητική αντοχή. Το υλικό, στη συνέχεια καθώς κατεβαίνει χτυπά στη πλαγιά και κατακυλάει. Η κίνηση είναι πολύ γρήγορη έως εξαιρετικά γρήγορη. Εκτός από την περίπτωση όπου η μετατιθέμενη μάζα έχει υποσκάψει, προηγείται της πτώσης μικρή

ολίσθηση η ανατροπή, κινήσεις οι οποίες χωρίζουν το υλικό από την ακίνητη μάζα. Η υποσκαφή συνήθως συμβαίνει σε συνεκτικά εδάφη η στον πόδα ενός βράχου, κάτω από την επίδραση κυμάτων η σε όχθες ποταμού υπό διάβρωση.

Παρατηρήσεις δείχνουν ότι η προς τα εμπρός κίνηση των μαζών είναι συχνά αρκετή για ελεύθερη πτώση αν η κλίση των κλιτύων κάτω από τις μάζες υπερβαίνουν τους 76 βαθμούς (1:4). Τα τμήματα που πέφτουν, χτυπούν μια πλαγιά με μικρότερη κλίση και αναπηδούν, διασπώμενα σε μικρότερα μέρη η όχι. Σε μακριές πλαγιές με κλίση μικρότερη των 45 (1:1) τα κομμάτια κατακυλούν. Η σταδιακή αύξηση της κλίσης μπορεί να προκαλέσει αποκολλούμενα μέρη, ξαναρχίζοντας έτσι την ακολουθία της ελεύθερης πτώσης, αναπήδησης και κατακυλήματος.

### **2.2.1.2. Ανατροπές (Topples)**

Η ανατροπή είναι η προς τα εμπρός περιστροφή μιας μάζας εδάφους η βράχου, γύρω από ένα σημείο η άξονα, κάτω από το κέντρο βάρους της μάζας. Μερικές φορές προκαλείται από το βάρος του υλικού, που βρίσκεται στο πάνω μέρος της πλαγιάς ενώ άλλες φορές από το νερό η τον πάγο στις ρωγμές της μάζας. Η ανατροπή μπορεί να οδηγήσει σε πτώσεις η ολισθήσεις, που εξαρτώνται από τη γεωμετρία της κινούμενης μάζας, τη γεωμετρία της επιφάνειας αστοχίας και την προέλευση και το μέγεθος των κινηματικά ενεργών συνεχειών. Οι ανατροπές ποικίλουν από εξαιρετικά αργές σε εξαιρετικά γρήγορες, ενώ Μερικές φορές επιταχύνουν κατά την κίνηση.

Μια μορφή ανατροπής είναι η καμπτόμενη ανατροπή, κατά την οποία συνεχείς στήλες θραύονται καθώς λυγίζουν προς τα εμπρός. Η ολίσθηση και η υποθάλπτουσα διάβρωση του πόδα αφήνει την αστοχία να αρχίσει και να προχωρήσει με βαθιές ρωγμές.

### **2.2.1.3. Ολισθήσεις (slides)**

Μια ολίσθηση είναι μια κίνηση, προς τα κάτω, εδαφικής η βραχώδους μάζας, που συμβαίνει κυρίως κατά επιφάνειες αστοχίας η σε σχετικά λεπτές ζώνες έντονης διατμητικής τάσης. Η κίνηση δεν συμβαίνει αρχικά, αυτομάτως σε όλη την επιφάνεια που καταλήγει τελικά να είναι η επιφάνεια αστοχίας. Συχνά τα πρώτα σημάδια της κίνησης του εδάφους είναι ρωγμές στην αρχική επιφάνεια του εδάφους, κατά μήκος των οποίων σχηματίζεται η κύρια πλαγιά της ολίσθησης. Η μετατιθέμενη μάζα μπορεί να ολισθήσει κάτω από τον πόδα της επιφάνειας αστοχίας,

καλύπτοντας την αρχική επιφάνεια του εδάφους της πλαγιάς, που στη συνέχεια γίνεται η επιφάνεια αποχωρισμού.

Οι διάφορες μορφές της ολίσθησης διακρίνονται σε μεταφορικές και περιστροφικές.

Οι περιστροφικές (rotational) ολισθήσεις κινούνται κατά μήκος μιας επιφάνειας αστοχίας, η οποία είναι κοίλη. Αν το προφίλ της επιφάνειας αστοχίας είναι κυκλικό ή κυκλοειδές, η κινηματική λέει ότι η κινούμενη μάζα θα κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας με πολύ μικρή εσωτερική παραμόρφωση. Το κεφάλι του κινουμένου υλικού μπορεί να κινηθεί σχεδόν κάθετα προς τα κάτω, ενώ η επιφάνεια του γέρνει προς τα πίσω, προς τη πλαγιά. Αν η ολίσθηση εκτείνεται για μεγάλη απόσταση κατά μήκος της πλαγιάς, κάθετα στη διεύθυνση της κύησης, η επιφάνεια αστοχίας είναι μόλις και μετά βίας κυλινδρική. Ο άξονας της κυλινδρικής επιφάνειας είναι παράλληλος με τον άξονα περί τον οποίο περιφέρεται η κατολίσθηση.

Η πλαγιά κάτω από τη στέψη μπορεί να είναι σχεδόν κατακόρυφη και αστήρικτη. Περαιτέρω κινήσεις μπορούν να προκαλέσουν οπισθοδρόμηση της ολίσθησης στη στέψη. Περιστασιακά, τα πλευρικά περιθώρια της επιφάνειας αστοχίας είναι αρκετά ψηλά και απότομα, ώστε να προκαλέσουν την κίνηση των πλευρών, κινηθούν προς τα κάτω και προς τη ζώνη αφαίρεσης της κατολίσθησης. Το νερό των πόρων του υλικού, βρίσκοντας δίοδο προς το κεφάλι της ολίσθησης μπορεί να σχηματίσει μια μικρή λίμνη στο κινούμενο υλικό. Η διακοπή της αποστράγγισης κρατά το υλικό βρεγμένο και διαιωνίζει τις κινήσεις της κλυτίος, μέχρι να σχηματιστεί μια πλαγιά με μικρή κλίση.

Στις μεταφορικές (transnational) ολισθήσεις η μάζα μετατοπίζεται κατά μήκος μιας επίπεδης ή κυματιστής επιφάνειας αστοχίας, ολισθαίνοντας πάνω από την αρχική επιφάνεια εδάφους. Γενικά είναι πιο ρηχές από τις περιστροφικές. Έτσι ο λόγος  $D_r/L_r = \text{βάθος της επιφάνειας αστοχίας} / \text{μήκος της επιφάνειας αστοχίας}$  για εδάφη, είναι τυπικά μικρότερος από 0.1. Ενώ στις περιστροφικές ολισθήσεις η επιστροφή τείνει να εξισορροπήσει τη μετατιθέμενη μάζα, στις στρωματοειδείς η κίνηση μπορεί να συνεχίσει ανεξέλεγκτη, αν η επιφάνεια αποχωρισμού είναι αρκετά κεκλιμένη.

Καθώς η ολίσθηση εξελίσσεται, το μετατιθέμενο υλικό μπορεί να σπάσει, ειδικά αν αυξηθεί η ταχύτητα του ή η ποσότητα του νερού στο εσωτερικό του. Η μάζα στη συνέχεια ρέει, μετατρέποντας την ολίσθηση σε ροή κατάλοιπων. Οι στρωματοειδείς κατολισθήσεις συχνά ακολουθούν ασυνέχειες του εδάφους όπως τα ρήγματα, ενώσεις,



στρωματοειδείς επιφάνειες ή την επαφή μεταξύ βράχου και αποθεμάτων ή μετακινούμενων εδαφών.

Αυτού του είδους οι κατολισθήσεις με μόνες ασυνέχειες σε βραχώδεις μάζες ονομάζονται **ολισθήσεις μεγάλων τεμαχίων** ή **επίπεδες ολισθήσεις (planar slides)**. Όταν η επιφάνεια αστοχίας ακολουθεί μια ασυνέχεια παράλληλη στην πλαγιά, τότε ο πόδας της μετατιθέμενης μάζας μπορεί να σχηματίσει μια σφήνα, η οποία υπερισχύει και οργώνει το αμετακίνητο υλικό, προκαλώντας αναδίπλωση κάτω από τον πόδα της επιφάνειας αστοχίας. Επίσης η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να σχηματιστεί από 2 ασυνέχειες, οι οποίες προκαλούν την μετατόπιση της περιεχόμενης βραχώδους μάζας, κάτω από τη γραμμή της ένωσης των συνεχειών, σχηματίζοντας μια **σφηνοειδή κατολίθηση (wedge slide)**.

Μια βαθμωτή επιφάνεια αστοχίας μπορεί να προκληθεί αν δυο ή περισσότερες ομάδες συνεχειών διαπεράσουν τις βραχώδεις μάζες.

#### **2.2.1.4 Εξαπλώσεις (Spreads)**

Η εξαπλώση ορίζεται ως μια επέκταση ενός συνεκτικού εδάφους μιας βραχώδους μάζας, του συνεκτικού υλικού, μέσα σε μαλακότερο υλικό. Η επιφάνεια αστοχίας δεν είναι μια επιφάνεια έντονης διατμητικής τάσης. Εξαπλώσεις μπορούν να προκληθούν από υγροποίηση ή ροή του μαλακότερου υλικού. Ο Varnes (1978) διαχώρισε τις εξαπλώσεις βράχου, οι οποίες εξελίσσονται, χωρίς να σχηματίζουν μια αναγνωρίσιμη επιφάνεια αστοχίας, από κινήσεις σε συνεκτικά εδάφη που βρίσκονται πάνω από υγροποιημένα υλικά ή υλικά που ρέουν πλαστικά.

Τα συνεκτικά υλικά μπορούν, επίσης να περιστραφούν, να ολισθήσουν, να υποχωρήσουν, να διαλυθούν ή να υγροποιηθούν και να ρέυσουν. Φυσικά αυτές οι κινήσεις είναι σύνθετες αλλά αρκετά κοινές σε συγκεκριμένα υλικά και γεωλογικές καταστάσεις, όπου αξίζει η εξαπλώση να αναγνωριστεί σαν ξεχωριστός τύπος κίνησης.

Στις μορφές των εξαπλώσεων διακρίνονται οι **εξαπλώσεις μεγάλων τεμαχίων ( block spreads )**, όπου ένα παχύ στρώμα βράχου βρίσκεται πάνω από μαλακότερα υλικά. Το σκληρό πάνω στρώμα μπορεί να τεμαχιστεί σε μικρές λωρίδες. Το μαλακό κάτω στρώμα πιέζεται μέσα στις ρωγμές, μεταξύ των λωρίδων, οι οποίες μπορούν να γεμίσουν από το μετατιθέμενο υλικό. Η τυπική ταχύτητα της

κίνησης είναι εξαιρετικά αργή, ενώ τέτοιες κινήσεις εξελίσσονται για πολλά χιλιόμετρα πίσω από τις άκρες των οροπεδίων και γκρεμών.

Οι εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης σχηματίζονται σε ευαίσθητες αργίλους και ύλες, οι οποίες έχουν χάσει την αντοχή τους και έχει καταστραφεί η δομή τους. Η κίνηση είναι μεταφορική και συχνά οπισθοδρομική, αρχίζει από τις όχθες ποταμού ή από ακτογραμμές και απομακρύνεται από αυτές. Παρόλα αυτά, αν το ρέον στρώμα είναι παχύ, τα τεμάχια μπορούν να βυθιστούν μέσα σ' αυτό, σχηματίζοντας κατακρημνίσματα, και μπορεί να συμβεί ροή στον πόδα του μετατιθέμενου υλικού. Η κίνηση ξεκινά ξαφνικά αλλά φτάνει σε πολύ μεγάλες ταχύτητες.

#### **2.2.1.5. Ροές**

Η ροή είναι μια συνεχής κίνηση στον χώρο, στην οποία οι επιφάνειες διάτμησης έχουν μικρή διάρκεια ζωής, είναι κοντά η μια στην άλλη και συνήθως δεν διατηρούνται. Η κατανομή των ταχυτήτων, στο μετατιθέμενο υλικό, μοιάζει με εκείνη ενός παχύρρευστου υγρού. Το κάτω όριο της κινούμενης μάζας μπορεί να είναι μια επιφάνεια κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα διαφορεική κίνηση ή μια παχιά ζώνη με κατανεμημένη διάτμηση. Έτσι υπάρχει μια βαθμιαία μετάβαση από ολισθήσεις σε ροές, που εξαρτάται από το περιεχόμενο του νερού, την κινητικότητα και εξέλιξη της κίνησης. Οι ολισθήσεις χαλασμάτων μπορούν να μετατραπούν σε εξαιρετικά γρήγορες ροές ή στοιβάδες κατάλοιπων, αφού το κινούμενο υλικό χάνει τη συνεκτικότητά του, προσλαμβάνει νερό ή συναντά πιο απότομες πλαγιές.

Όταν ραβδωτά ή γλιστερά πλευρικά περιθώρια ή επιφάνειες αστοχίας είναι ορατές, τότε η κατολίσθηση ονομάζεται ολίσθηση ενώ όταν η μετατιθέμενη μάζα έχει παραμορφωθεί πολύ εσωτερικά, τότε η κατολίσθηση είναι πιθανώς ροή.

Ο όρος επιδερμική ροή περιγράφει μια γρήγορη έως πολύ γρήγορη κίνηση, στην οποία ένα λεπτό στρώμα ή δέρμα τηγμένου εδάφους και βλάστησης, ρέει ή ολισθαίνει πάνω από τον ορίζοντα παγετού. Εποχιακά τηγμένα στρωματά ή ενεργά στρωματά πάχους έως ένα μέτρο, μπορεί να περιέχουν νερό, που αρχικά είχε οδηγηθεί στο παγωμένο μέρος του εδάφους και σχημάτισε πάγο. Το λιώσιμο αυτού του πάγου μπορεί να ξεκινήσει καρτεσιανές πιέσεις των πόρων του νερού, που μειώνουν την αντίσταση του ενεργού στρώματος στην κίνηση.

Διάφορες μορφές ροής είναι η ροή κατάλοιπων ανοιχτής κλιτύος, η οποία σχηματίζει το δικό της μονοπάτι στην κοιλάδα προς πλαγιές με ηπιότερη κλίση. Η καταλοποιημένη ροή ακολουθεί ήδη υπάρχοντα κανάλια. Η ροή κατάλοιπων είναι

συνήθως μεγάλης πυκνότητας, με περισσότερο από 80% κ.μ. σε στερεά υλικά, μπορεί να ξεπεράσει την πυκνότητα του υγρού τσιμέντου και έτσι μπορεί να μετακινήσει μεγάλα κομμάτια, διαμέτρου πολλών μέτρων. Επίσης, οι στοιβάδες κατάλοιπων είναι μεγάλες, εξαιρετικά γρήγορες, συχνά ροές ανοιχτών πλαγιών.

Η ροή υλός στην πλευρά ηφαιστείου κινητοποιεί τις αποθέσεις τέφρας στις κλιτύες του ηφαιστείου. Το νερό για τη ροή προέρχεται είτε από την εκτίναξη των λιμνών του κρατήρα, είτε από την υγροποίηση του ατμού των εκρήξεων, είτε από τα κατακρημνίσματα της βροχής, το λιώσιμο του χιονιού και την επικάθηση του πάγου πάνω σε μια αρκετά ψηλή ηφαιστειακή κορυφή.

### **2.2.2. Υλικό**

Το υλικό που παίρνει μέρος σε μια κατολίσθηση 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 στέρα τεμάχια, συνήθως από ορυκτά και βράχους, τα οποία είτε μεταφέρθηκαν είτε σχηματίστηκαν από την τριβή των βράχων μεταξύ τους. Τα αέρια η υγρά που γεμίζουν τους πόρους του εδάφους, αποτελούν μέρος του.

Το έδαφος χωρίζεται σε χώμα και κατάλοιπα.

Ο όρος χώμα περιγράφει υλικό, στο οποίο το 80% η περισσότερο από τα τεμάχια είναι μικρότερα από 2mm (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 2mm και τα υπόλοιπα μικρότερα από 2mm. Αυτός ο διαχωρισμός των εδαφών είναι χονδρικός, αλλά επιτρέπει την αναγνώριση των υλικών από μια επιτόπια έρευνα.

Οι όροι που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται στο υλικό που μετακινήθηκε πριν την κατολίσθηση. Για παράδειγμα, ο όρος πτώση βράχων υπονοεί πως η μάζα που μετακινήθηκε ήταν μια βραχώδης μάζα κατά την απαρχή της κατολίσθησης. Μετά την κατολίσθηση, η ίδια μάζα μπορεί να μετατραπεί σε κλαστικά υλικά. Αν η κατολίσθηση είναι σύνθετη και ο τύπος της κίνησης αλλάζει καθώς εξελίσσεται, το υλικό πρέπει να περιγράφεται στο ξεκίνημα κάθε διαδοχικής κίνησης. Μια πτώση βράχων, λόγου χάρη, που ακολουθήθηκε από μια ροή του υλικού πρέπει να περιγράφει ως πτώση βράχων-ροή κατάλοιπων.

### 2.2.3 Στάδιο Δράσης

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 επενεργοποιήσεις. Μια κατολίσθηση, η οποία είναι πάλι ενεργός μετά από περίοδο κατά την οποία είναι ανενεργός, ονομάζεται επανενεργοποιημένη. Αυτές οι κατολισθήσεις γενικά κινούνται κατά προϋπάρχουσες επιφάνειες, των οποίων οι παράμετροι αντοχής πλησιάζουν τις παραμένοντες η τελικές τιμές. Οι κατολισθήσεις, οι οποίες έχουν κινηθεί μέσα στο τελευταίο ετήσιο κύκλο των εποχών, αλλά που δεν κινούνται στο παρών, καλούνται αδρανείς.

Οι ανενεργές 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 την κατολίσθηση παραμένουν ορατοί, η κατολίσθηση είναι λανθάνουσα. Αλλά αν το ποτάμι που διαβρώνει τον πόδα της κινούμενης πλαγιάς, αλλάζει πορεία η κατολίσθηση καλείται εγκαταλελειμμένοι. Αν ο πόδας της πλαγιάς έχει προστατευθεί από διάβρωση με ενίσχυση των όχθων η άλλα μέτρα έχουν σταματήσει την κίνηση, η κατολίσθηση περιγράφεται ως σταθεροποιημένη.

Οι κατολισθήσεις συχνά παραμένουν ορατές στο τοπίο για χιλιάδες έτη, αφού κινήθηκαν η σταθεροποιήθηκαν. Αυτές καλούνται αρχαίες η απολιθωμένες, 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 η κλιματικές συνθήκες, ίσως χιλιάδες έτη πριν, λέγονται relict.

### 2.2.4 Ταχύτητα κίνησης

Ένα άλλο κριτήριο για τον διαχωρισμό των κατολισθήσεων είναι η ταχύτητα / ρυθμός της κίνησης.

Η αρχική κλίμακα του ρυθμού της κίνησης, του Varnes (1978) πιθανώς αντιπροσώπευε μια κωδικοποίηση της ανεπίσημης πρακτικής στις Ηνωμένες Πολιτείες, εκείνη την εποχή. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει μια τροποποιημένη κλίμακα των τάξεων της ταχύτητας των κατολισθήσεων. Οι διαιρέσεις της κλίμακας έχουν

προσαρμοστεί να αυξάνονται κατά πολλαπλάσια των 100 με μια ελαφριά αύξηση στο άνω όριο και μια μείωση στο κάτω όριο. Η μετάφραση της κλίμακας αυτής βοηθήθηκε από την αναλογία του Morgenstern (1985) με την αναλογία του Mercalli, η οποία βασίζεται στις περιγραφές από τις τοπικές επιπτώσεις ενός σεισμού, στις κατολισθήσεις μικρές και γρήγορες στοιβάδες μπορούν να προκαλέσουν ολοκληρωτική καταστροφή και απώλεια ζώων. Σε αντίθεση, μια κίνηση μεγάλης πλαγιάς με μέτρια ταχύτητα μπορεί να έχει πολύ λιγότερα άσχημα αποτελέσματα γιατί μπορεί να αποφευχθεί η οι κατασκευές που θα επηρεαστούν, να εκκενωθούν η να ξαναχτιστούν.

**Πίνακας 1 :** Προτεινόμενη κλίμακα ταχύτητας κατολισθήσεων (Varnes, 1978)

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

Ο αναμενόμενος βαθμός απώλειας εξαιτίας των κατολισθήσεων η αλλού φαινομένου, μπορεί να υπολογιστεί ως γινόμενο του κίνδυνου (H) και της ευπάθειας (V). Ο κίνδυνος είναι η πιθανότητα να συμβεί ένα φαινόμενο μέσα σε μια συγκεκριμένη περιοχή ενώ η ευπάθεια είναι ο βαθμός της απώλειας κάποιων στοιχείων όπως : ο πληθυσμός, οι περιούσιες και οι οικονομικές δραστηριότητες. Η ευπάθεια κυμαίνεται από 0 έως 1 και μπορεί να αυξηθεί με τη ταχύτητα αφού αναμένεται ότι γρήγορες κατολισθήσεις θα προκαλέσουν μεγαλύτερες απόλυες από τις αργές.

Ένα πολύ σημαντικό όριο βρίσκεται μεταξύ πολύ γρήγορων κινήσεων, που πλησιάζουν την ταχύτητα ενός ανθρώπου που τρέχει (5m/sec). Άλλο ένα σημαντικό όριο είναι μεταξύ αργών κινήσεων, κάτω από τις οποίες μερικές κατασκευές δεν παθαίνουν ζημιές. Ο τυπικός ερπυσμός είναι μια συνεχής κίνηση, η οποία προχωρά με

μέσο ρυθμό μικρότερου από 30cm ανά δεκαετία. Ο όρος ερπυσμός μπορεί να αντικατασταθεί από κατάλληλες περιγραφές είτε ως πολύ αργή είτε ως εξαιρετικά αργή κίνηση, που δεν ξεπερνά τα 10mm/sec.

### 2.2.5. Περιεχόμενη Υγρασία

Ανάλογα με την ποσότητα του νερού που περιέχεται στους πόρους του υλικού, μπορούν να διαχωριστούν τα εδάφη στις παρακάτω 4 κατηγορίες:

1. ΞΗΡΟ: Δεν υπάρχει ορατή υγρασία.
2. ΥΦΥΓΡΟ: Περιέχει μια ποσότητα νερού αλλά όχι ελεύθερο νερό. Το υλικό μπορεί να συμπεριφέρεται σαν πλαστικό στέρεο αλλά δεν ρέει.
3. ΥΓΡΟ: Περιέχει αρκετό νερό ώστε να συμπεριφέρεται σαν υγρό, το νερό ρέει μέσα από αυτό η υποστηρίζει μεγάλη ποσότητα στάσιμου νερού.
4. ΠΟΛΥ ΥΓΡΟ: Περιέχει αρκετό νερό ώστε να ρέει σαν υγρό κάτω από μικρές κλίσεις εδάφους

Αυτοί οι όροι μπορούν να παρέχουν έναν οδηγό στο να εκτιμηθεί η ποσότητα του νερού στο μετατιθέμενο υλικό όσο αυτό κινείται. Από την άλλη, βραχώδεις η εδαφικές μάζες μπορούν να αποστραγγιστούν γρήγορα κατά τη διάρκεια και μετά από τη μετακίνηση, ώστε ο οδηγός να είναι ποιοτικός και όχι ποσοτικός. Σε μεμονωμένες μάζες βράχου η εδάφους, μπορεί η ποσότητα νερού του κινουμένου υλικού. Για παράδειγμα, ο Hutchinson (1988) παρατήρησε ότι οι κινήσεις λάσπης, γενικά, αποτελούνται από υλικά τα οποία επιδεικνύουν μια υφή, που παρουσιάζει εξογκώματα σε διάφορα μεγέθη μέσα σε μαλακή αργιλώδη βάση. Δείγματα, που λήφθηκαν από διαφορετικά τμήματα του υλικού, είχαν σημαντικές διαφορές στην ποσότητα του νερού, αφού τα εξογκώματα είχαν πολύ λιγότερο νερό από την υπόλοιπη βάση.

## 2.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

**2.3.1** Αρκετές προτάσεις έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές για την ταξινόμηση των κατολισθητικών φαινομένων κατά καιρούς, και τα οποία βασίζονται κυρίως σε έναν ή περισσότερους από τους παράγοντες που ακολουθούν:

1. Τύπος υλικού κατολίσθησης.
  2. Περιεχόμενη υγρασία.
  3. Τύπος κίνησης (κατάπτωση, ολίσθηση, ροή)
  4. Ταχύτητα κίνησης.
  5. Αίτιο κίνησης (σεισμός, πίεση νερού, ανθρώπινος παράγοντας)
  6. Σχέση ολίσθησης και επιφάνεια ολίσθησης (επίπεδη, περιστροφική)
  7. Τοποθεσία ολίσθησης (ξηρά, θάλασσα, Λίμνη)
  8. Γεωμετρία και μορφολογία.
  9. Περιβαντολογικό καθεστώς.
  10. Μέγεθος και σπουδαιότητα.
  11. Σχέση με ενεργότητα (ενεργή κατολίσθηση, ανενεργή, παλιά)
  12. Μηχανισμός ολίσθησης.
  13. Κλιματολογικές συνθήκες.
- Οι πλησιέστερες ταξινομήσεις είναι αυτές, οι οποίες περιλαμβάνουν όσο το δυνατόν περισσότερους παράγοντες. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά ορισμένες από τις ταξινομήσεις οι οποίες θεωρούνται πλησιέστερες.

### **2.3.1.1 Ταξινόμηση κατά Penta**

Ο Penta, διέκρινε τα κατολισθητικά φαινόμενα σε: κατολισθήσεις γαιών, βραχωδών πετρωμάτων και κλαστικών υλικών, σε καταρρεύσεις, σε καθιζήσεις και τέλος σε μικρούς και πολύπλοκους τύπους κατολισθήσεων.

### **2.3.1.2 Ταξινόμηση Hoek-Bray**

Η ταξινόμηση αυτή, αφορά κατολισθήσεις αποκλειστικά σε βραχώδης μάζες, οι οποίες διακρίνονται σε απλές και σύνθετες θραύσεις.

### Ø Απλές θραύσεις

- α) **Επίπεδη θραύση**, η οποία λαμβάνει χώρα, όταν η γεωλογικοί ασυνέχεια (επιφάνεια στρώσης, διάκλαση, ρήγμα κ.λ.π.) έχει κλίση ομόρροπη προς το πρανές και η γωνία κλίσης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία τριβής.
- β) **Σφηνοειδής θραύση**, η οποία λαμβάνει χώρα, όταν υπάρχουν δυο είδη συνεχειών με διαφορετικές διευθύνσεις. Απαραίτητη προϋπόθεση ύπαρξης του τύπου αυτού, είναι η κλίση της γραμμής διάταξης τους να είναι ομόρροπη προς το πρανές και να έχει πολύ μεγαλύτερη κλίση από τη γωνία τριβής.
- γ) **Κυκλική θραύση**, η οποία λαμβάνει χώρα σε ρηγματογενείς και κατακερματισμένες μάζες. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχουν πολλές επιμέρους θραύσεις, οι οποίες τείνουν να ακολουθήσουν μια κυκλική γραμμή.
- δ) **Σάρρες πρανών**, που είναι κατακερματισμένα πετρώματα, τα οποία προέρχονται από την αποσάθρωση των βραχωδών πρανών.
- ε) **Θραύσεις με ανατροπή**, που είναι μετακινήσεις, οι οποίες προέρχονται από ανατροπές ορισμένων τμημάτων πρανών, κατόπιν θραύσης.

### Ø Σύνθετες θραύσεις

- α) **Θραύσεις που ελέγχονται από δύο επιφάνειες**: Στην περίπτωση αυτή, μεσολαβούν δυο θραύσεις σε δυο επιφάνειες, ενώ αναγκαίες προϋποθέσεις για τις θραύσεις αυτές, είναι να διατηρηθούν οι διατμητικές αντοχές στις επιφάνειες αυτές.
- β) **Θραύσεις από διόγκωση**: Πρόκειται για θραύσεις, οι οποίες γίνονται σε σχηματισμούς, όταν επικάθονται πάνω σε πετρώματα, τα οποία είναι δυνατόν να διογκωθούν. Μετά τη θραύση, γίνεται η μετακίνηση της μάζας, η οποία διευκολύνεται από τη πλαστικότητα και τη μικρή γωνία τριβής που έχουν συνήθως τα πετρώματα, που μπορούν να διογκωθούν.
- γ) **Ολίσθηση και ανατροπή**: Πρόκειται για μετακινήσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν αρχικά ολίσθηση μαζών και στη συνέχεια ανατροπή τους.
- δ) **Θραύση από επαγωγικές θραύσεις**: Παρατηρούνται σε περιπτώσεις πρανών, όπου υπάρχουν εναλλαγές πετρωμάτων με τελείως διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες.
- ε) **Προοδευτική θραύση**: Πρόκειται για θραύσεις, οι οποίες γίνονται με πολύ αργό ρυθμό και συνδυάζονται με φαινόμενα ερπυσμού και αποσάθρωσης. Οι προοδευτικές θραύσεις, οδηγούν κάποια χρονική στιγμή σε κατολισθήσεις, οι οποίες είναι συνήθως αρκετά σφοδρές, ανάλογα με το βαθμό κατακερματισμού και τη γεωλογική δομή.



### **2.3.1.3 Ταξινόμηση κατά Zaruba-Mencl**

Οι ZARUBA-MENCL, διακρίνουν τους παρακάτω τύπους κατολισθήσεων, βασιζόμενοι κυρίως στα γεωλογικά χαρακτηριστικά τους (φύση, συνεκτικότητα του υλικού). Η ταξινόμηση αυτή είναι απλή και θεωρείται ότι ανταποκρίνεται στις συνθήκες της χώρας μας (ΚΟΥΚΗΣ, 1980).

#### **Μετακινήσεις επιφανειακών αποθέσεων**

Πρόκειται για μετακινήσεις των επιφανειακών σχηματισμών. Στον τύπο αυτό διακρίνονται:

1. Ερπυσμός κορημάτων και κάμψεις κεφαλών στρωμάτων. Πρόκειται για μετακίνηση κορημάτων πάνω στους υποκείμενους σταθερούς σχηματισμούς, εξαιτίας του βάρους των μεταβολών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα. Επίσης η κάμψη των κεφαλών των στρωμάτων, γίνεται κυρίως εξαιτίας της βαρύτητας η των τάσεων, οι οποίες ασκούνται στα ανώτερα τμήματα των στρωμάτων των σχηματισμών.
2. Ολισθήσεις του μανδύα αποσάθρωσης. Οι ολισθήσεις αυτές, είναι πολύ διαδεδομένες και προσβάλλουν σχηματισμούς σε ένα βάθος ως μερικά μέτρα. Αυτός ο τύπος μετακινήσεων, διευκολύνεται από τη χαμηλή συνοχή των υλικών του μανδύα, την παρουσία νερού και τις ατμοσφαιρικές μεταβολές.
3. Ροές γαιών. Οι ροές αυτές, προκαλούνται σε λεπτομερή υλικά, όταν κορεστούν με νερό κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων. Ιδιαίτερη κατηγορία αποτελούν οι λεγόμενες ροές άμμου, οι οποίες προκαλούνται σε άμμους με μεγάλη ποσότητα νερού.
4. Ροές αποσαθρωμένων κορημάτων. Αναφέρονται σε μετακινήσεις αδρομερών υλικών, οι οποίες οφείλονται στην παρουσία και τη ροή του νερού. Πρόκειται λοιπόν για μεταφορές αδρομερών υλικών κατά τη διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. Στη κατηγορία αυτή, ανήκουν και οι ροές ηφαιστειακής λάσπης, οι οποίες προκαλούνται από τη δράση των ηφαιστειών και από ισχυρές βροχόπτωσης.

#### **2.3.1.4 Ταξινόμηση κατά Varnes**

Ο Varnes πρότεινε ένα σύστημα ταξινόμησης όλων των κινήσεων που θα μπορούσαν να παρατηρηθούν σε πρανή εκτός καθιζήσεων, και μόνο των κατολισθήσεων με τη σημασία. Η ταξινόμηση αυτή στηρίζεται σε δυο κριτήρια, τον τύπο κίνησης και τον τύπο του υλικού που μετακινείται. Η ταξινόμηση κατά Varnes είναι μια από τις πληρέστερες που έχουν προταθεί.

Ανάλογα με τον τύπο κίνησης διακρίνουμε:

- 1) τις καταπτώσεις (falls)
- 2) τις ανατροπές (topples)
- 3) τις ολισθήσεις (slides)
- 4) τις πλευρικές εξαπλώσεις (lateral spreads)
- 5) τις ροές (flows)
- 6) τις σύνθετες κινήσεις (complex)

Ανάλογα με το υλικό που μετακινείται, διακρίνονται οι κινήσεις που εκδηλώνονται στο βραχώδες υπόβαθρο (bedrock) και στα μηχανικά εδάφη (engineering soils), που χωρίζονται στα κορήματα (debris) και στις γαίες (earth).

#### **Ø Καταπτώσεις**

Στον τύπο αυτό των κινήσεων, μάζες διάφορων μεγεθών, αποσπώνται από απότομα πρανή, σχεδόν κατακόρυφα, κατά μήκος μιας επιφάνειας στην οποία δεν εκδηλώνεται σημαντική διατμητική κίνηση. Η μετακίνηση τους γίνεται λόγω βαρύτητας, με τη μορφή ελεύθερης πτώσης, αναπηδήματος και κύλισης. Η κίνηση είναι γρήγορη έως πολύ γρήγορη και αυξάνει προς τα κάτω με τη συμβολή της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Ανάλογα με το είδος της μάζας που κινείται, διακρίνονται σε πτώσεις βράχων, πτώσεις κορημάτων και σε πτώσεις εδάφους.

Στις πτώσεις βράχων η μάζα που μετακινείται είναι μάζα βράχων που αποσπάστηκαν πρόσφατα από μια περιοχή του υποβάθρου.

Στις πτώσεις κορημάτων (αποσαθρωμάτων) η μάζα από κορήματα που αποτελούνται από θραύσματα που δημιουργήθηκαν πριν την εμφάνιση του φαινομένου της μετακίνησης.

Τέλος οι πτώσεις γαιών (ή εδάφους) είναι πολύ σπάνιο φαινόμενο γιατί τα υλικά αυτά κατά κανόνα υπόκεινται στους άλλους τύπους μετακίνησης.

## **Ø Ανατροπές**

Πρόκειται για κινήσεις που χαρακτηρίζονται από μια προς τα έξω περιστροφή του αποσπώμενου τεμάχους. Ουσιαστικά πρόκειται για περιστροφή γύρω από έναν άξονα, ο οποίος ευρίσκεται προς το κάτω μέρος της μετακινούμενης μάζας. Τέτοιου είδους κινήσεις προκαλούνται από τη δράση της βαρύτητας, από υποσκαφές της βάσης (απώλεια στήριξης) και από τη δράση της υδροστατικής πίεσης στις ασυνέχειες, με άμεσο αποτέλεσμα τη δημιουργία πλευρικών ωθήσεων.

## **Ø Ολισθήσεις**

Είναι μετακινήσεις στις οποίες η κίνηση προκαλείται από μια διατμητική παραμόρφωση και μετακίνηση κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανειών. Η κίνηση μπορεί να είναι προοδευτική, δηλαδή να μην αρχίζει ταυτόχρονα σε όλη την επιφάνεια ολίσθησης αλλά να προχωράει προοδευτικά από μια αρχική εστία ή εστίες ολίσθησης. Η μάζα που μετατοπίζεται μπορεί να ολισθήσει πέρα από την αρχική επιφάνεια θραύσης, πάνω στην αρχική επιφάνεια διαχωρισμού. Προκειμένου να αποδοθεί με περισσότερη ακρίβεια ο βαθμός της διάσπασης, συχνά χρησιμοποιείται ο όρος “τέμαχος” ή “άθικτη” ολίσθηση, για ολισθήσεις που αποτελούνται από μια ή λίγες μονάδες και ο όρος “κερματισμένη” στη περίπτωση της ολίσθησης που αποτελείται από πολλές μονάδες. Διακρίνονται δυο τύποι, ολισθήσεων, οι περιστροφικές και οι μεταθετικές ολισθήσεις. Αναλυτικότερα στις περιστροφικές ολισθήσεις υπάρχει μια περιστροφική κίνηση της μάζας, γύρω από ένα νοητό άξονα. Η ολίσθηση αυτή, λαμβάνει χώρα πάνω σε κοίλες ή κυλινδρικές επιφάνειες, σε μικρή παραμόρφωση του τεμάχους που ολισθαίνει. Πολλές φορές, η επιφάνεια ολίσθησης δεν είναι κυκλική σε τομή, αλλά ακολουθεί προϋπάρχουσες γεωλογικές επιφάνειες, όπως στρώσεις, ρήγματα ή κύριες διακλάσεις. Επίσης, το ανώτερο τμήμα της επιφάνειας διάρρηξης είναι σχεδόν κατακόρυφο, με αποτέλεσμα τα ακραία μη μετακινηθέντα τεμάχια να είναι ασταθή, με αποτέλεσμα την δημιουργία νέων θραύσεων. Όσον αφορά τις μεταθετικές ολισθήσεις πρόκειται για ολισθήσεις, οι οποίες γίνονται κατά μήκος μιας επίπεδης ή σχεδόν επίπεδης επιφάνειας, με μετακίνηση της μάζας προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω. Στις μεταθετικές ολισθήσεις η κίνηση ελέγχεται κυρίως, από την ύπαρξη γεωλογικών δομών, όπως είναι η στρώση, τα ρήγματα, η φύλλωση, οι διακλάσεις κ.λ.π. Διακρίνονται σε ολισθήσεις τεμαχίων (block slide), όταν η μάζα είναι μεγάλη, και σε ολισθήσεις κατακερματισμένων τεμαχίων, όταν υπάρχουν πολλές μικρές μονάδες.

### **Ø Πλευρικές εξαπλώσεις**

Πρόκειται για κινήσεις που κυριαρχούν οι πλευρικές επεκτάσεις, με συνοδεία διατμητικών και εφελκυστικών ρωγμών. Σε αυτό το είδος των κινήσεων, δεν μπορεί να καθορισθεί με ακρίβεια το επίπεδο ολίσθησης ή η ζώνη πλαστικής ροής, διότι η κίνηση της μάζας που ολισθαίνει μπορεί να είναι μια επέκταση – εξαπλώση προς κάθε κατεύθυνση. Ολισθήσεις αυτού του είδους παρατηρούνται στις κορυφές των ραχών. Πλευρικές εξαπλώσεις, μπορεί να παρατηρηθούν και με την ολίσθηση βραχωδών σχηματισμών ή συνεκτικών εδαφών πάνω σε πλαστικές αργίλους που ρέουν ή λεπτόκοκκων άμμων και ιλύων ου ρευστοποιούνται. Ο συνεκτικός σχηματισμός διαμελίζεται σε μεγάλα τεμάχια που κινούνται σ'όλες τις κατευθύνσεις, περιστρέφονται, βυθίζονται ή θρυμματίζονται και μεταβάλουν συνήθως την κίνηση τους σε ροή γαιών.

### **Ø Ροές**

Πρόκειται για μετακινήσεις χαλαρών υλικών, διάφορων ταχυτήτων με ή χωρίς την παρουσία υγρής φάσης. Είναι φανερό, ότι η ροή δεν αφορά κίνηση μιας καθορισμένης μάζας πάνω σε κάποιο σταθερό υπόβαθρο, αλλά αναφέρεται στη συνεχή σχετική κίνηση των ίδιων σωματιδίων που αποτελούν την κινούμενη μάζα πάνω σε μια άλλη σταθερή. Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις, όπου οι μετακινήσεις και οι ταχύτητες προσομοιάζουν των μετακινήσεων και των ταχυτήτων των ρευστών σε υψηλό ιξώδες. Αρκετοί ερευνητές αναφέρουν ορισμένους από τους τύπους των ροών και σαν «ερπυσμός», κάτι όμως που δεν περιορίζεται μόνο στις ροές αλλά ισχύει και για μερικά από τα αλλά είδη των κατολισθήσεων. Σε βραχώδης σχηματισμούς, που είναι κερματισμένοι, φυλλώδης, ή λεπτοστρωματώδεις, η ροή μπορεί να εκδηλωθεί με την κίνηση και σε μερικές περιπτώσεις ψευδοπτύχωση, των ανώτερων επιφανειακών στρωμάτων, χωρίς η ζώνη ροής να μπορεί να εντοπισθεί εύκολα. Η ταχύτητα κίνησης είναι εξαιρετικά μικρή. Αντίθετα στους εδαφικούς σχηματισμούς, η ροή μπορεί να εντοπισθεί πολύ πιο εύκολα. Ροή γαιών (άμμου, ιλύως η αργίλου) μπορεί να γίνει κάτω από διάφορες συνθήκες περιεχόμενης υγρασίας και με ταχύτητα από εξαιρετικά μεγάλη μέχρι εξαιρετικά μικρή. Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και στα πλευρικά κορήματα των ορεινών περιοχών.

## Ø Σύνθετες κινήσεις

Περιλαμβάνουν περισσότερους του ενός τύπου κίνησης. Ιδιαίτερα επικίνδυνες είναι οι εξαιρετικά γρήγορες "πτώσεις βράχων-κορημάτων", όπου είναι συνηθισμένες στις ανώμαλες ορεινές περιοχές. Συνήθως, ένας τύπος κίνησης μετατρέπεται τοπικά σε κάποιον άλλον τύπο ή συμβάλλει στη δημιουργία κίνησης διαφορετικού τύπου.

Τέλος ο Varnes ταξινομήσε τις κινήσεις των κατολισθήσεων ανάλογα με την ταχύτητα τους, από εξαιρετικά αργές (ταχύτητα μικρότερη από 0.06 μέτρα το χρόνο), μέχρι εξαιρετικά γρήγορες (ταχύτητα μεγαλύτερη από 3 μέτρα το δευτερόλεπτο). Στον πίνακα δίνεται ο χαρακτηρισμός της κίνησης, με βάση τη μετακίνηση των πρανών. Ας σημειωθεί τέλος ότι οι περισσότερες κατολισθήσεις είναι σύνθετες, δηλαδή συνδυάζουν περισσότερες του ενός τύπου κινήσεις, πλην όμως, σχεδόν πάντοτε ένας τύπος είναι χαρακτηριστικός που επικρατεί.

**Πίνακας 2:** Ταξινόμηση κατολισθήσεων με κριτήρια τον τύπο κίνησης και τον τύπο του υλικού που μετακινείται.

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ (πριν την κίνηση)		
		Υπόβαθρο	Έδαφος	
			Επικρατούν αδρομερή υλικά	Επικρατούν λεπτόκοκκο υλικά
Πτώσεις		Πτώσεις βράχων	Πτώσεις κορημάτων	Πτώσεις γαιών
Ανατροπές		Ανατροπές βράχων	Ανατροπές κορημάτων	Ανατροπές γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Κάθιση βράχων	Κάθιση κορημάτων	Κάθιση γαιών
	Μεταθετικές	Ολίσθηση τεμάχους	Ολίσθηση τεμάχους κορημάτων	Ολίσθηση τεμάχους γαιών
		Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση κορημάτων	Ολίσθηση γαιών
Πλευρικές εκτάσεις		Εκταση βράχων	Εκταση κορημάτων	Εκταση γαιών
Ροές		Ροή βράχων	Ροή κορημάτων	Ροή γαιών
		(Βαθύς ερπυσμός)	(Ερπυσμός εδάφους)	
Σύνθετες		Συνδυασμός δυο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακίνησης		

## 2.4 ΤΥΠΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

### **2.4.1 κατολισθήσεις των ανώτερων στρωμάτων**

Οι κατολισθήσεις αυτές συμβαίνουν κυρίως εξαιτίας της βαρύτητας και δημιουργούνται με την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Εξαιτίας της χημικής και μηχανικής αποσάθρωσης τα διάφορα θραύσματα των πετρωμάτων που βρίσκονται στις κεκλιμένες πλευρές των βράχων αποχωρίζονται και πέφτουν ως μεμονωμένοι βράχοι στη μέση του πρανούς. Αν συνεχιστεί αυτό το φαινόμενο τότε δημιουργούνται στη βάση αυτή του πρανούς χαλαροί σχηματισμοί τους οποίους ονομάζουμε κώνους κορημάτων και οι οποίοι αποτελούνται από μικρά και μεγάλα τεμάχια πετρωμάτων. Η κλίση αυτών των σχηματισμών αντιστοιχεί προς την ικανότητα του υλικού να σταματάει στο πέτρωμα, η οποία πάλι εξαρτάται από την τραχύτητα και τη μορφή της επιφάνειας των τεμαχίων αυτών. Όσο χονδρότερα και ταχύτερα είναι αυτά τα κομμάτια τόσο καλύτερα σταματούν στις απόκρημνες κλιθείς.

Όταν το πρανές των σχηματισμών αυτών δημιουργηθεί μια τομή π.χ. για την κατασκευή ενός δρόμου, τότε θα πρέπει να απομακρυνθεί ολόκληρο το στρώμα από τη βάση της οδού μέχρι το ανώτερο σημείο του κώνου κορημάτων.

### **2.4.2 Κατολισθήσεις που οφείλονται στην μεταβολή της συνεκτικότητας του πετρώματος.**

Ρέουσες άμμοι: Με τον όρο αυτό δεν εννοούμε καμία ιδιαίτερη μορφή πετρώματος, επειδή κάθε χαλαρό πέτρωμα κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις μπορεί να μεταβεί στη ρευστή κατάσταση. Όταν δοθούν αυτές οι προϋποθέσεις, τότε μπορούμε να διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις, κατά τις οποίες εξετάζεται η ρέουσα άμμος από τεχνικής πλευράς:

- Η κίνηση του εδάφους δημιουργείται από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τη ροή του νερού μέσα στην άμμο. Όταν το νερό εισέρχεται στην άμμο θα πρέπει να υπερκινήσει την αντίσταση που αναπτύσσεται στα κενά μεταξύ στους κόκκους. Έτσι ελαττώνεται το πιεζομετρικό ύψος του νερού κατά  $\Delta h$  και η διάφορα της πίεσης μεταφέρεται στους κόκκους της άμμου. Όταν ο δρόμος κατά την διεύθυνση ροής ανέρχεται σε  $\Delta l$ (cm) και η απόλυτα πίεσης στις πιεζομετρικές στάθμες  $\Delta h$ (cm), τότε η μονάδα όγκου του εδάφους υφίσταται μια πίεση ροής  $u=i \cdot \gamma_w$ , όπου  $i = \Delta h / \Delta l$  είναι η υδραυλική κλίση κατά την

διεύθυνση ροής. Από το γεγονός αυτό βγαίνει το συμπέρασμα πως η δύναμη της ροής του νερού σε άμμους γίνεται τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερη είναι η διάφορα της στάθμης του νερού σε μικρή απόσταση.

- Μια ροή μπορεί επίσης να παρουσιαστεί σε άμμους που είναι κορεσμένες από νερό. Αν οι άμμοι αυτοί παρουσιάζουν ένα υψηλό πορώδες (μεγαλύτερο από αυτό που ονομάζουμε κρίσιμο πορώδες, περίπου 40%) και εκτεθούν σε μια ξαφνική ώθηση π.χ. εξαιτίας κραδασμών ή της ροής του νερού, τότε οι κόκκοι τους ανακατανέμονται, η μάζα του γίνεται πυκνότερη και με τον τρόπο αυτό το πορώδες του ελαττώνεται. Το πλεόνασμα νερού εξέρχεται από την άμμο. επειδή όμως αυτό δεν μπορεί να διαφύγει με μια μόνο φορά, γι' αυτό οι κόκκοι δεν ανακατανέμονται ο ένας μετά τον άλλο. Έτσι δημιουργείται στο νερό των πόρων μια πίεση που ελαττώνει την τριβή ανάμεσα στους κόκκους και για βραχύ χρόνο η μάζα αυτή της άμμου μεταβαίνει στην ρευστή κατάσταση. Στην κατηγορία αυτή των κατολισθήσεων ανήκουν μερικές μετακινήσεις εδαφών κοντά στις ακτές της θάλασσας. Συχνότατα όμως οι κατολισθήσεις αυτές παρουσιάζονται σε τεχνητές πλαγιές, όπως σε αμμώδης επιχωματώσεις κατά μήκος του δρόμου σε λεκάνες κατάκλισης φραγμάτων ή στις πλευρές χωμάτινων φραγμάτων προς την πλευρά του νερού.
- Πολύ επικίνδυνες τέλος είναι άμμοι με μεγάλο πορώδες και κολλοειδές ενδιάμεσο υλικό ανάμεσα στους πόρους. Σε πλευρική καταπόνηση τους επέρχεται, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, καταστροφή της εσωτερικής τους δομής, το νερό όμως που πλεονάζει εξέρχεται από την άμμο πολύ αργά.

### **2.4.3 Κατολισθήσεις συνεκτικών εδαφών**

#### **2.4.3.1 Κατολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης.**

Σε συνεκτικά ομογενή πετρώματα δημιουργούνται κατά την διαταραχή της ισορροπίας των πρηνών, βαθιές κατολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών. Στην περίπτωση αυτή, σε διάκριση με αυτές που αναφέραμε μέχρι τώρα, παρουσιάζεται μια διαταραχή της ισορροπίας κυρίως με την αύξηση των δυνάμεων που προκαλούν μετακίνηση τεμαχίων (πλαγιές δυνάμεις=Scherkrafte). Οι άλλοι

παράγοντες εδώ παίζουν μικρότερο ρόλο. Η αύξηση αυτών των δυνάμεων μπορεί να προκληθεί είτε με σκάψιμο της βάσης της κλιτύος, είτε με τη διάβρωση της και πρόσθετη φόρτωση με νέα χρώματα ή οικοδομές.

Στις περιπτώσεις αυτές η κατολίσθηση δεν παρουσιάζεται σε επιφάνειες που προϋπήρχαν, αλλά κατά μήκος νέων επιφανειών ολίσθησης, που πολλές φορές διαιρούν την ολισθαίνουσα μάζα σε περισσότερα επιμέρους τεμάχια. Συνήθως ολόκληρη η ολισθαίνουσα μάζα κινείται ως ενιαία μάζα κατά μήκος μιας ή περισσότερων επιφανιών ολίσθησης. επειδή αυτές οι επιφάνειες ολίσθησης είναι καμπύλες, προκαλείται συνήθως μια κλίση της επιφάνειας της βάσης προς την αντίθετη διεύθυνση της κατολίσθησης. Αν έχουμε π.χ. ένα πέτρωμα με μικρή γωνία εσωτερικής τριβής, τότε η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται κάτω από τη βάση του πρανούς. Μια όμοια περίπτωση παρουσιάζεται, όταν το πέτρωμα κάτω από τη βάση του πρανούς δεν είναι παντού το ίδιο στέρεο. Στη βάση αυτή του πρανούς το πέτρωμα ωθείται προς τα πάνω, έτσι ώστε η πτώση της βάσης κατά μήκος της καμπύλης επιφάνειας ολίσθησης προκαλεί μια κύρτωση της βάσης του πρανούς.

Η πορεία της κατολίσθησης σε συνεκτικά εδάφη κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης είναι χαρακτηριστικό πρόβλημα της στατικής ισορροπίας. Δεχόμαστε ότι το τμήμα της κλιτύος που περιορίζεται μέσα στη κυρτή επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται στην κατάσταση της οριακής ισορροπίας. Για να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς προϋποθέτουμε ότι:

**α)** Να δεχτούμε την κίνηση αυτή ως ομαλή. Η παραδοχή αυτή είναι τελείως σωστή αν το τμήμα της κλιτύος που κατολισθαίνει έχει μεγάλο πλάτος, έτσι ώστε η τριβή και στις δυο πλευρές της κατολίσθησης να μην λαμβάνεται υπόψη.

**β)** Η επιφάνεια ολίσθησης είναι κυλινδρική και σε διατομή φαίνεται ως περιφέρειες κύκλου με ακτίνα  $r$  και κέντρο κύκλου το  $O$ . Η αντίσταση ολίσθησης του πετρώματος αντιστοιχεί ουσιαστικά στην συνοχή του. Για απλοποίηση δεχόμαστε ακόμα ότι η συνοχή του πετρώματος κατά μήκος όλης αυτής της επιφάνειας ολίσθησης παραμένει σταθερή.



## 2.5 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΤΑ ΑΡΓΙΛΟΥΧΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ

Οι μετακινήσεις αυτές, συνοδεύονται από θραύσεις που προκαλούνται σε αργιλικά πετρώματα. Διακρίνονται σε:

- **Ολισθήσεις κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών ολίσθησης.**

Πρόκειται για θραύσεις και ολισθήσεις πάνω σε καμπύλες επιφάνειες, οι οποίες προκαλούνται, όταν ξεπεραστεί η διατμητική αντοχή των υλικών. Η μάζα που μετακινείται, συσσωρεύεται στο πόδι της κατολίσθησης, όταν στο ανώτερο τμήμα της θραύσης παρατηρείται μια “Κάθιση” των μαζών, ενώ οι επιφάνειες διάρρηξης είναι σχεδόν κατακόρυφες. Έτσι νέες ασταθής μάζες σχηματίζονται, με αποτέλεσμα σε ορισμένες περιπτώσεις να παρατηρούνται ανάδρομες κατολισθήσεις σε πολύ μεγάλη έκταση. Το μέγεθος των κατολισθήσεων αυτών, καθώς επίσης και οι μετακινούμενες μάζες, είναι δυνατό να είναι τεράστιες και ελέγχονται άμεσα από τη γεωλογική δομή της περιοχής εκδήλωσης.

- **Ολισθήσεις κατά μήκος σύνθετων επιφανειών.**

Οι ολισθήσεις αυτές δεν γίνονται κατά μήκος κυλινδρικών επιφανειών, αλλά κατά μήκος σύνθετων επιφανειών, οι οποίες ορίζονται συνήθως από τη παρουσία εναλλαγών πετρωμάτων με διαφορετικά γεωμηχανικά χαρακτηριστικά ή από την παρουσία συνεχιών στο υφιστάμενο πρηνές. Η επιφάνεια σε αυτές τις περιπτώσεις, ορίζεται από τις επιφάνειες στρώσεων και μεταξύ στρωμάτων με διαφορετικά περατότητα ή αντοχή (π.χ. κροκαλοπαγή-μάργες) από ρήγματα ή διακλάσεις ή ακόμα και από παλιές επιφάνειες ολισθήσεων. Η ερευνά ευσταθείας των πρηνών σε αυτές τις περιπτώσεις είναι δύσκολη, διότι τα αποτελέσματα των επί τόπου εργαστηριακών δοκίμων είναι εντελώς σημειακά και δεν ανταποκρίνονται σε όλη την έκταση της μάζας, ούτε την αντοχή όλων των επιφανειών ολίσθησης, οι οποίες και θα πρέπει να προσδιοριστούν με λεπτομερή γεωτεχνική, τεκτονική μελέτη.

- **Μετακίνηση πάνω σε πλαστικά πετρώματα.**

Πρόκειται για μετακίνηση τεμαχίων συμπαγών πετρωμάτων, πάνω σε πλαστικά πετρώματα(π.χ. αργίλους). Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν οι ολισθήσεις τεμαχίων, οι οποίες είναι πολλών ανεξάρτητων τεμαχίων.

## 2.6 ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΣΥΜΠΙΑΓΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Πρόκειται για ολίσθηση σαι βραχώδη πρανή, οι οποίες ορίζονται από τις υφιστάμενες ασυνέχειες, που μπορεί να είναι πρωτογενείς (στρώσεις, ασυμφωνίες) ή δευτερογενείς (ρήγματα, διακλάσεις κ.λ.π.) Διακρίνονται σε:

- **Ολισθήσεις κατά μήκος προκαθορισμένων ασυνεχειών.**

Προκαλούνται όταν ξεπεραστεί το όριο διατμητικής αντοχής μιας ασυνέχειας από διάφορες αιτίες, όπως η παρουσία νερού ή πάγου, η πλευρική ώθηση, η αύξηση της γωνίας κλίσης του πρανούς ή αφαίρεση της υποστήριξης, κ.λ.π. Κυρίαρχο ρόλο σε αυτή τη περίπτωση, παίζει η γεωμετρία των συνεχειών σε συνάρτηση με τη γεωμετρία του πρανούς.

- **Ολισθήσεις βαρύτητας.**

Πρόκειται κατά κύριο λόγο για αργές μετακινήσεις, οι οποίες οφείλονται στη βαρύτητα. Παρατηρούνται σε κλασικά πετρώματα και η παραμόρφωση μπορεί να αντιστοιχηθεί με τον ερπυσμό.

- **Πτώσεις βράχων.**

Είναι απότομες μετακινήσεις βραχωδών μαζών, διάφορων μεγεθών από απότομα πρανή, όταν οι μάζες χάνουν την υποστήριξη τους. Η ταχύτητα πτώσεως είναι πολύ μεγάλη. Προκαλούνται συνήθως κατά μήκος απότομων ακτών, λόγω της δράσεως των κυμάτων ή λόγω των σεισμικών κινήσεων.

## 2.7 ΕΙΔΙΚΟΙ ΤΥΠΟΙ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΠΡΑΝΩΝ

Πρόκειται για ειδικές περιπτώσεις μετακινήσεων, όπως:

**Εδαφική ροή:** Είναι μετακίνηση του εδάφους πάνω σε παγωμένο υπόβαθρο.

**Ροή αργίλων** : Είναι μετακινήσεις σε αργίλους, οι οποίες έχουν σχέση με τις διεργασίες και μετατροπές στη δομή των αργιλικών ορυκτών, (η θιξοτροπική ιδιότητα τους τις μετατρέπει σε ρευστό κατά τη διάρκεια μιας δόνησης-σεισμού).

**Ημίγρη ολίσθηση:** Είναι μετακινήσεις στον πυθμένα των θαλασσών και σε ιζήματα τα οποία δεν έχουν ακόμα λιθοποιηθεί. Τα ιζήματα αυτά είναι αργιλούχα ή αμμούχα και η μετακίνηση μπορεί να γίνει από μια ελάχιστη δόνηση.

## 2.8 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Παρά τη μεγάλη ποικιλία των αιτιών που προκαλούν τις κατολισθήσεις σε κάθε μια περίπτωση, αυτές εμφανίζουν σχεδόν πάντοτε τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, πριν από τη μετακίνηση δημιουργούνται εφελκυστικές ρωγμές στο επάνω τμήμα της μάζας του πρανούς, η οποία πρόκειται να κατολισθήσει. Κατά τη διάρκεια της κατολισθήσεων το επάνω μέρος της μετακινούμενης μάζας υποχωρεί, βουλιάζει και το κάτω διογκώνεται. Συνεπώς, αν η αρχική επιφάνεια του πρανούς ήταν επίπεδη και η εδαφική μάζα ομοιογενής, μετά τη κατολίσθηση η τομή της επιφάνειας του εδάφους από ένα κατακόρυφο επίπεδο, κατά μήκος του άξονα της κατολισθήσεως, θα έχει τη μορφή καμπύλης σχήματος S. Υπάρχουν βέβαια περιπτώσεις όπου το κάτω μέρος της μάζας που κατολίσθησε δε διογκώνεται, όπως για παράδειγμα σε περίπτωση λίαν ευαίσθητης αργίλου ή αργίλου που περιέχει θύλακες άμμου, κατά την οποία τα υλικά που κινήθηκαν μπορεί να ρέουν σαν ρευστά.

Το σχήμα της κατολισθήσεως εξαρτάται, μέχρι ενός βαθμού, από τον τύπο του υλικού που μετακινήθηκε. Το μέγεθος μιας κατολισθήσεως εξαρτάται από τις διαστάσεις της επιφάνειας της κλιτούς και από το πάχος της μάζας που αποκολλάται και μετακινείται. Το πάχος αυτό εξαρτάται από το βάθος που η κατολίσθηση έχει προσβάλλει το πέτρωμα ή την εδαφική μάζα, δηλαδή από τη θέση επιφάνειας ολισθήσεως.

Συνήθως το μήκος των κατολισθήσεων είναι μεγαλύτερο του πλάτους των. Υπάρχει όμως και μια σημαντική κατηγορία κατολισθήσεων, που αποτελούν εξαίρεση του γενικού αυτού κανόνα. Πρόκειται για περιπτώσεις που οι γεωλογικές συνθήκες είναι τέτοιες ώστε το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας ολισθήσεως να εμπίπτει εντός στρώσεως χονδρόκοκκης ιλύος ή άμμου, η οποία διαχωρίζει δυο στρώσεις αργίλου. Στην περίπτωση αυτή το πλάτος της κατολισθήσεως μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το μήκος της. Οι κατολισθήσεις αυτού του τύπου οφείλονται συνήθως σε υπερβολική αύξηση των πιέσεων των πόρων της ενδιάμεσης στρώσης άμμου ή ιλύος και σε αντίθεση προς τις κατολισθήσεις άλλων τύπων, δεν παρατηρούνται εμφανείς ενδείξεις για τον επικείμενο κίνδυνο και η θραύση συμβαίνει σχεδόν πάντοτε αιφνίδια.

Σε μια κατολίσθηση παρατηρούνται:

- α) η επιφάνεια αποχωρισμού ή αποκολλήσεως (γνωστή και σαν μέτωπο ή κόγχη αποσπάσεως ή ακόμη και ρίζα),
- β) η επιφάνεια ολισθήσεως,
- γ) το σώμα της κατολισθήσεως,
- δ) ο κώνος ή σωρός των υλικών που κατολίσθησαν (γνωστή και σαν περιοχή καλύψεως ή γλώσσα) και
- ε) ο πόδας της κατολίσθησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

### ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

#### 3.1 ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΑΠΕΙΡΟΜΗΚΟΥΣ ΠΡΑΝΟΥΣ

##### **3.1.1 Εισαγωγή - Εξίσωση διατήρησης της μάζας**

Σε όλες τις περιοχές όπου το έδαφος δεν είναι επίπεδο υπάρχουν δυνάμεις που ενεργούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μετακινήσουν το έδαφος από τα υψηλότερα σημεία. Μη οριζόντιες εδαφικές επιφάνειες σε ισορροπία είναι πιθανές λόγω της ικανότητας του εδάφους να αναλαμβάνει διατμητικές τάσεις. Γενικά στην περίπτωση ενός απειρομήκουσ πρανούς (για μη συνεκτικά υλικά) η ευστάθεια ικανοποιείται εφόσον η γωνία κλίσης του πρανούς είναι μικρότερη από την γωνία τριβής. Κυρίως το πρόβλημα της ευστάθειας πρανών αντιμετωπίζεται στα περισσότερα έργα του μηχανικού – ιδιαίτερα δε στις γεωκατασκευές – και εξετάζεται στα πλαίσια του καθορισμού συντελεστών ασφαλείας. Στις συνήθεις περιπτώσεις η ανάλυση της ευστάθειας πρανών διενεργείται στα πλαίσια της στατικής οριακής ανάλυσης. Σύμφωνα με αυτή, η εξίσωση διατήρησης της ορμής δίνεται από την παρακάτω γενική σχέση:

$$W^{(e)} = W^{(i)} \quad (3.1.1)$$

Σε αυτή την εξίσωση ισορροπίας  $W^{(e)}$  είναι το έργο των εξωτερικών δυνάμεων που δρουν σε ένα ορισμένο όγκο  $V$  και στο σύνορο του  $\Theta V$  και αποτελείται από το έργο των καθολικών δυνάμεων  $f_k = f_k(x_k, t)$ , οι οποίες ασκούνται στα υλικά σημεία του σώματος καθ'όλη την έκταση του, και από το έργο των συνοριακών δυνάμεων  $t_k = t_k(x_k, t)$  που εμφανίζονται στις διατομές της επιφάνειας και ενεργούν στο πεδίο ταχυτήτων  $v_k(x_k, t)$  και αναλυτικά υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$W^{(e)} = \iiint_V f_k v_k dV + \iint_{\partial V} t_k v_k dS = \iiint_V f_k v_k dV + \iint_{\partial V} \sigma_{ik} n_i v_k dS \quad (3.1.2)$$

Στην εξίσωση (3.1.2)  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(X_k, t)$  είναι ο τανυστής των τάσεων Cauchy. Στις καθολικές δυνάμεις περιλαμβάνονται οι δυνάμεις βαρύτητας καθώς και οι συρτικές δυνάμεις. Για εδάφη κεκκορεσμένα ύδατος η ανάλυση γίνεται με όρους ενεργών τάσεων:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + P_w \delta_{ij} \quad (3.1.3)$$

όπου  $P_w > 0$  είναι η πίεση των πόρων.

Αντίστοιχα ο όρος  $W^{(i)}$  στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.1.1) είναι το έργο των εσωτερικών δυνάμεων:

$$W^{(i)} = \iiint_V P dV \quad (3.1.4)$$

Όπου:

$$P = \sigma_{ij} D_{ij} \quad (3.1.5)$$

Και  $D_{ij}$  είναι ο τανυστής του ρυθμού παραμόρφωσης τέτοιος ώστε:

$$D_{ij} = 1/2(\partial_i v_j + \partial_j v_i) \quad (3.1.6)$$

Στα πλαίσια της οριακής ανάλυσης ο τανυστής  $D_{ij}$  αποτελείται από ένα πλαστικό και ένα ελαστικό μέρος:

$$D_{ij} = D_{ij}^e + D_{ij}^p \quad (3.1.7)$$

Για ισοθερμικές διαδικασίες το έργο των τάσεων στον ελαστικό τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης ισούται με το ρυθμό μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας και είναι θετικό σύμφωνα με την σχέση:

$$\rho e = \sigma_{ij} D_{ij}^e > 0 \quad (3.1.8)$$

Όπου  $\rho = \rho(x_k, t) > 0$  είναι η πυκνότητα του γεωϋλικού.

Για την περίπτωση της τέλει πλαστικότητας ή της πλαστικότητας με κράτυνση, ο νόμος συνηρημένης πλαστικότητας απαιτεί το έργο των τάσεων στον πλαστικό τανυστή του ρυθμού παραμόρφωσης να είναι θετικό:

$$P^P = \sigma_{ij} D_{ij}^P > 0 \quad W^{(i)} > \iiint_V P^P dV > 0 \quad (3.1.9)$$

Συνήθως η συνεισφορά της ελαστικής παραμόρφωσης είναι αμελητέα γι' αυτό:

$$P \approx P^P = \sigma_{ij} D_{ij}^P \quad (3.1.10)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η οριακή ισορροπία εκφράζεται από την εξίσωση

$$\iiint_V f_k v_k dV + \iint_{\partial V} t_k v_k dS \approx \iiint_V P^P dV \quad (3.1.11)$$

Έτσι μία γεωκατασκευή καλείται ασφαλείς εάν για κάθε κινηματικά αποδεκτό πεδίο ταχύτητας  $v_k$  η παραπάνω συνθήκη ισχύει με τη μορφή της ανισότητας του παρακάτω τύπου:

$$\iiint_V f_k v_k dV + \iint_{\partial V} t_k v_k dS < \iiint_V P^* dV \quad (3.1.12)$$

Εάν η ανισότητα έχει αντίστροφη φορά

$$\iiint_V f_k v_k dV + \iint_{\partial V} t_k v_k dS > \iiint_V P^* dV \quad (3.1.13)$$

τότε η γεωκατασκευή δεν είναι ασφαλής.

Στην περίπτωση των καταστροφικών κινήσεων γαιωμαζών, δηλαδή των καταστροφικών κατολισθήσεων η ανάλυση στα πλαίσια της οριζοντίως στατικής ισορροπίας δεν είναι ικανοποιητική γι' αυτό χρειάζεται η θεώρηση του καθολικού νόμου της ορμής ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$W^{(e)} - W^{(i)} = K \quad (3.1.14)$$

Όπου  $K$  είναι η κινητική ενέργεια του θεωρούμενου όγκου  $V$

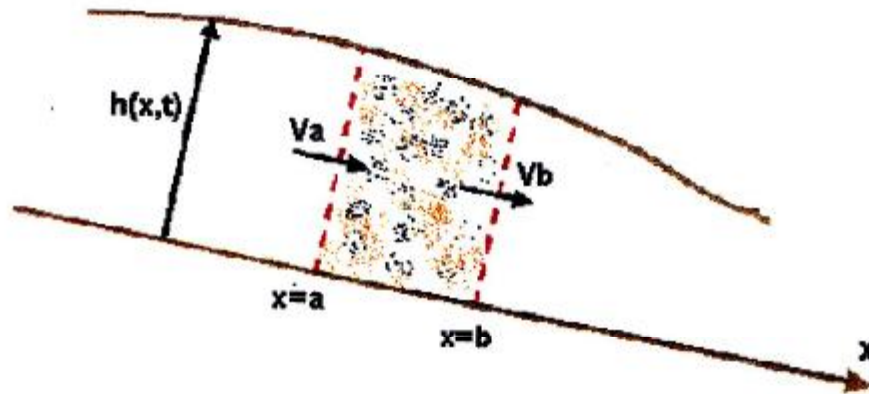
$$K = \iiint_V 1/2 \rho v_k v_k dV \quad (3.1.15)$$

Και σύμφωνα με το θεώρημα μεταφοράς του Reynolds ισχύει:

$$K = \iiint_V \rho v_k v_k dV \quad (3.1.16)$$

### 3.1.2 Κατάστροφη του προβλήματος απειρομήκους πρανούς μεταβλητού ύψους

Με σκοπό την κατάστροφη του προβλήματος της συμπεριφοράς απειρομήκους πρανούς με μεταβλητό ύψος θεωρούμε την γεωμετρία του σχήματος 3.1.2.1



Σχήμα 3.1.2.1 Γεωμετρία απειρομήκους πρανούς

Σαν εφαρμογή του θεωρήματος Reynolds θεωρούμε ένα στοιχειώδη όγκο που ορίζεται από τα σύνορα στις θέσεις  $\chi = a$  και  $\chi = b$ . Τότε η πυκνότητα του μέσου εκφράζει την μάζα που περικλείεται σε αυτόν τον στοιχειώδη όγκο:

$$m = \int_a^b \rho h B dx \quad (3.1.2.1)$$

όπου  $B$  είναι η επέκταση του πρανούς σε διεύθυνση κάθετη στο θεωρούμενο  $(x,z)$  επίπεδο.

Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της μάζας λαμβάνουμε τη σχέση:



$$m=0 \Rightarrow \int_a^b [d/dt(\rho h B) + \rho h B \partial v / \partial x] dx = 0 \quad (3.1.2.2)$$

όπου  $v$  είναι η μέση ταχύτητα των στερεών σωματιδίων του κοκκώδους υλικού, δηλαδή του εδάφους, στην τομή των σταθερών συνόρων του  $X$  ( $X$ = σταθερό).

Υποθέτοντας ότι  $B$  είναι μία σταθερή ποσότητα τότε η εξίσωση διατήρησης της μάζας δίνεται από :

$$\partial / \partial t (\rho h) + \partial / \partial x (\rho h v) = 0 \quad (3.1.2.3)$$

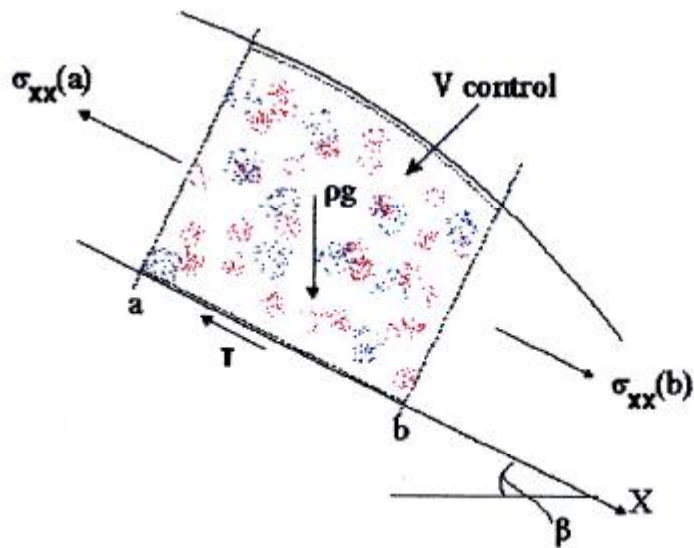
Η “γραμμική” πυκνότητα της κατολίσθησης μπορεί να εκφραστεί ως:

$$s = \rho h \quad (3.1.2.4)$$

και η σχέση (3.1.2.3) μπορεί να πάρει την μορφή:

$$\partial s / \partial t + \partial / \partial x (s v) = 0 \quad (3.1.2.5)$$

Προκειμένου να καταστρωθεί η εξίσωση της ορμής θεωρούμε μία στοιχειώδη μάζα τέτοια ώστε  $dm = s dx$  όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 3.1.2.2** Γεωμετρική ανάλυση της αρχής διατήρησης της ορμής

Οπότε η πυκνότητα της ορμής είναι:

$$i = s \cdot v \cdot B \quad (3.1.2.6)$$

και η “ροή” της ορμής δίνεται απο την έκφραση:

$$κ = s \cdot v^2 \cdot B$$

Σε αυτήν την περίπτωση η συνολική ορμή του θεωρούμενου στοιχειώδους όγκου εκφράζεται απο την σχέση:

$$I = \int_a^b s \cdot v \cdot B \cdot dx \quad (3.1.2.7)$$

Από την εφαρμογή του Νόμου NEWTON και κατ’ επέκταση της αρχής διατήρησης της ορμής η αλλαγή της ορμής στον όγκο αναφοράς ισούται με την συνολική δύναμη που ασκείται στον όγκο αυτό

$$\sum F_x = i \quad (3.1.2.8)$$

Με την εισαγωγή των τάσεων Cauchy  $\sigma_{xx}(x,t)$  στον άξονα  $x$  της θεωρούμενης γεωμετρίας καθώς και της τάσης τριβής  $\tau(x,t)$  η συνολική δύναμη η οποία ασκείται στο γεωδύλικο μεταξύ των διατομών  $x = a$  και  $x = b$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\sum F_x = \sigma_{xx}(b) h(b) B - \sigma_{xx}(a) h(a) B - \int_a^b \tau B dx + \int_a^b p g h \sin \beta B dx \quad (3.1.2.9)$$

Από την άλλη μεριά η αλλαγή της ορμής ή αλλιώς η υλική χρονική παράγωγος της ορμής είναι:

$$dI/dt = d/dt \int_a^b I dx = d/dt \int_a^b s v B dx \quad (3.1.2.10)$$

που σύμφωνα με το θεώρημα μεταφοράς του Reynolds γίνεται:

$$di/dt = \int_a^b \left\{ \partial/\partial t (s v B) + \partial/\partial x (s v^2 B) \right\} \quad (3.1.2.11)$$

Εξισώνοντας τις εκφράσεις (3.1.2.9) και (3.1.2.11) σύμφωνα και με τη σχέση (3.1.2.8) λαμβάνουμε:

$$\int_a^b \left\{ \partial s/\partial t v + s \partial v/\partial t + \partial/\partial x (s v) v + s v \partial v/\partial x \right\} dx = \int_a^b \left\{ p g \sin \beta h - \tau \right\} dx + \int_a^b \partial/\partial x (\sigma_{xx} h) dx$$

⇒

$$\int_a^b \left\{ v (\partial s/\partial t + \partial/\partial x (s v)) + s (\partial v/\partial t + v \partial v/\partial x) \right\} dx = \int_a^b \left\{ \partial/\partial x (h \sigma_{xx}) + p g \sin \beta h - \tau \right\} dx \quad (3.1.2.12)$$

η οποία οδηγεί στην απλοποιημένη έκφραση για την εξίσωση της ορμής

$$\partial/\partial x (h \sigma_{xx}) + p g \sin \beta h - \tau = s dv/dt \quad (3.1.2.13)$$

Εδώ εισάγοντας την καταστατική θεώρηση σύμφωνα με την οποία η τάση τριβής τ είναι ανάλογη με την μέση ορθή τάση  $\sigma_{zz}$  κατά z κατά ένα συντελεστή μ ο οποίος καλείται συντελεστής τριβής, λαμβάνουμε τις σχέσεις

$$(3.1.2.14)$$

$$\tau = |\bar{\sigma}_{zz}| \mu, \quad \text{όπου } \bar{\sigma}_{zz} = -p g h \cos \beta \quad (3.1.2.14)$$

οπότε η διατμητική τάση δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau = \rho g \cos \beta h \mu \quad (3.1.2.15)$$

Εισάγοντας την σχέση (3.1.2.16) στην εξίσωση (3.1.2.14) λαμβάνουμε:

$$\partial \sigma_{xx} / \partial x + 1/h \partial h / \partial x \sigma_{xx} + \rho g \cos \beta (\tan \beta - \mu) = \rho dv/dt \quad (3.1.2.16)$$

Με σκοπό την μείωση του αριθμού των αγνώστων εισάγουμε επίσης έναν ενεργό συντελεστή ώθησης  $K$  ( $K = \text{σταθερός}$ ), τέτοιον ώστε

$$\sigma_{xx} = 1/2 K \sigma_{zz}, \quad 0 < K < 1 \quad (3.1.2.17)$$

Με τις παραπάνω καταστατικές παραδοχές τελικά η εξίσωση της ορμής λαμβάνει την μορφή:

$$-K \partial h / \partial x + \tan \beta - \mu = 1/g_n dv/dt \quad (3.1.2.18)$$

όπου:

$$g_n = g \cos \beta \quad (3.1.2.19)$$

Στην συγκεκριμένη περίπτωση για μεταβλητό ύψος πρανούς οι καταστατικές εξισώσεις ισορροπίας είναι οι ακόλουθες:

$$\partial / \partial t (\rho h) + \partial / \partial x (\rho h v) = 0$$

$$-\partial h / \partial x = 1/K \{ 1/g_n dv/dt - (\tan \beta - \tan \varphi) \} \quad (3.1.2.20)$$

όπου:

$$\tan \varphi = \mu \quad (3.1.2.21)$$

Στο σύστημα των σχέσεων (3.1.2.20) παρατηρούμε ότι έχουμε δύο εξισώσεις με τρεις αγνώστους  $\rho, h, v$ . Εάν κάνουμε την πρόσθετη καταστατική υπόθεση ότι η πυκνότητα του υλικού είναι περίπου σταθερή και ίση με μία κρίσιμη τιμή

$$\rho = \rho_{cr} = \text{const.} \quad (3.1.2.22)$$

τότε το παραπάνω σύστημα των καταστατικών εξισώσεων απλοποιείται περισσότερο και λαμβάνει την μορφή:

$$\partial h / \partial t + \partial / \partial x (h v) = 0$$

$$-\partial h / \partial x = 1/K \left\{ 1/gh \, dv/dt - (\tan \beta - \tan \varphi) \right\} \quad (3.1.2.23)$$

Θεωρώντας τελικά, για μεγαλύτερη απλοποίηση του προβλήματος, ότι ο συντελεστής τριβής ισούται με την κλίση του πρανούς σύμφωνα με την σχέση:

$$\mu = \tan \beta \quad (3.1.2.24)$$

τότε το θεωρούμενο αρχικό μοντέλο απειρομήκους πρανούς με μεταβλητό ύψος περιγράφεται από το ακόλουθο γραμμικό σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για την ταχύτητα  $v = v(x,t)$ , το ύψος  $h = h(x,t)$  και το συντελεστή τριβής  $\mu$ :

$$\partial h / \partial t + v \partial h / \partial x + h \partial v / \partial x = 0$$

$$\partial h / \partial t + v \partial h / \partial x + K_n \partial h / \partial x = b \quad (3.1.2.25)$$

Όπου :

$$K_n = K g n \quad ; \quad b = g n (\tan \beta - \mu) \quad (3.1.2.26)$$

## 3.2. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΜΕΡΙΚΟΥ ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Με την παραδοχή (3.1.2.24) έχουμε ότι  $b = 0$  οπότε το προς λύση πρώτο απλουστευμένο σύστημα καταστατικών εξισώσεων που περιγράφει την κίνηση μίας κατολίσθησης έχει την μορφή:

$$\partial h / \partial t + v \partial h / \partial x + h \partial v / \partial x = 0$$

$$\partial h / \partial t + v \partial h / \partial x + K_n \partial h / \partial x = b \quad (3.2.1)$$

Το παραπάνω ζεύγος εξισώσεων χρησίμευσε για μία πρώτη προσέγγιση καθώς και για την μελέτη του προβλήματος της εξέλιξης, στον χώρο και στον χρόνο, του ύψους και της ταχύτητας μίας κατολίσθησης κάτω από την συγκεκριμένη γεωμετρία και τις αναγκαίες καταστατικές παραδοχές.

### **3.2.1. Έμμεση εξάρτηση ταχύτητας και ύψους**

Εάν υποθέσουμε ότι η εξέλιξη του ύψους της κατολίσθησης περιγράφεται από μία μη γραμμική κυματική εξίσωση της μορφής:

$$\partial h / \partial t + c(h) \partial h / \partial x = 0 \quad (3.2.1.1)$$

όπου  $c(h)$  είναι η ταχύτητα μετάδοσης του κύματος, τότε απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη μίας μοναδικής συναρτησιακής εξάρτησης μεταξύ της ταχύτητας  $v$  και του ύψους  $h$  της κατολίσθησης.

$$v = V(h) \quad (3.2.1.2)$$

Κάτω από την τελευταία καταστατική υπόθεση το σύστημα (3.2.1) λαμβάνει την μορφή:

$$\partial h/\partial t + dq/dh \partial h/\partial x = 0 \quad , \quad Q = hV(h)$$

$$\partial h/\partial t + (V + K_n/V') \partial h/\partial x = 0 \quad , \quad V' = dV/dh \quad (3.2.1.3)$$

Αυτό σημαίνει ότι για την ύπαρξη μίας μοναδικής συνάρτησης  $V(h)$ , οι συντελεστές των χωρικών παραγώγων των εξισώσεων (3.2.1.3) πρέπει να ταυτίζονται με την ταχύτητα μετάδοσης  $c$  του κύματος, στην εξίσωση (3.2.1.1)

$$c = d/dh (hV) = (V + K_n/V') \quad (3.2.1.4)$$

Η τελευταία σχέση είναι μία συνήθης διαφορική εξίσωση της συνάρτησης  $V(h)$ . Από την εξίσωση (3.2.1.4) έχουμε:

$$V' = \pm \sqrt{K_n/h} \quad \Rightarrow \quad v = v_0 \pm 2 (\sqrt{K_n h} - \sqrt{K_n d}) \quad (3.2.1.5)$$

και

$$c = V_0 \pm (3\sqrt{K_n h} - 2\sqrt{K_n d}) \quad (3.2.1.6)$$

Στην σχέση (3.2.1.6) το θετικό πρόσημο + αντιστοιχεί σε κύματα που διαδίδονται προς τα κάτω. Υπενθυμίζεται ότι η παρούσα λύση εισάγει μία εξάρτηση της ταχύτητας από το ύψος της κατολίσθησης. Στην περίπτωση μικρών μεταβολών του ύψους της κατολίσθησης γύρω από μία μέση τιμή  $d$  όπου  $h \approx d$  η ταχύτητα της κατολίσθησης είναι περίπου σταθερή και ίση με  $V_0$ . Σε αυτήν την περίπτωση τα κύματα διαδίδονται σαν γραμμικά κύματα με σταθερή επιτάχυνση

$$cd = V_0 + \sqrt{K_n d} \quad (3.2.1.7)$$

### 3.2.2 Εξέλιξη κατολισθήσεων κυματοειδούς αρχικής μορφής

Στην περίπτωση κυμάτων που κινούνται προς τα εμπρός η επιτάχυνσή τους είναι:

$$c = V_0 + 3\sqrt{Knh} - 2\sqrt{Knd} \quad (3.2.2.1)$$

Σαν εφαρμογή των παραπάνω θεωρούμε μία κυματική μορφή σαν αρχική συνθήκη για το ύψος της κατολίσθησης όπως περιγράφεται από τη σχέση:

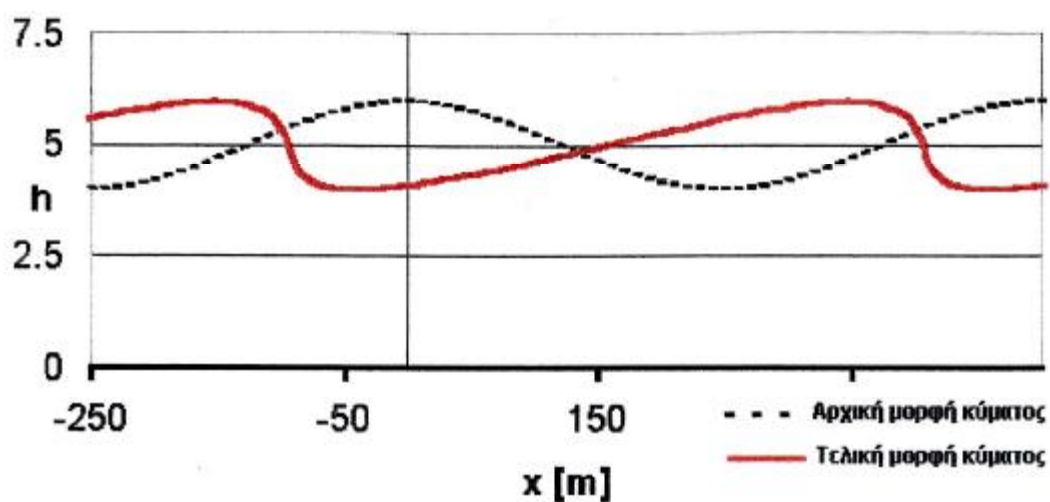
$$h(x,0) = d + a \cos(\pi x/L) \quad (3.2.2.2)$$

Οι αντίστοιχοι υπολογισμοί έγιναν για τις εξής τιμές των παραμέτρων και μεταβλητών

$$\xi \quad \beta = \Phi = 30^\circ, \quad K = 0.5$$

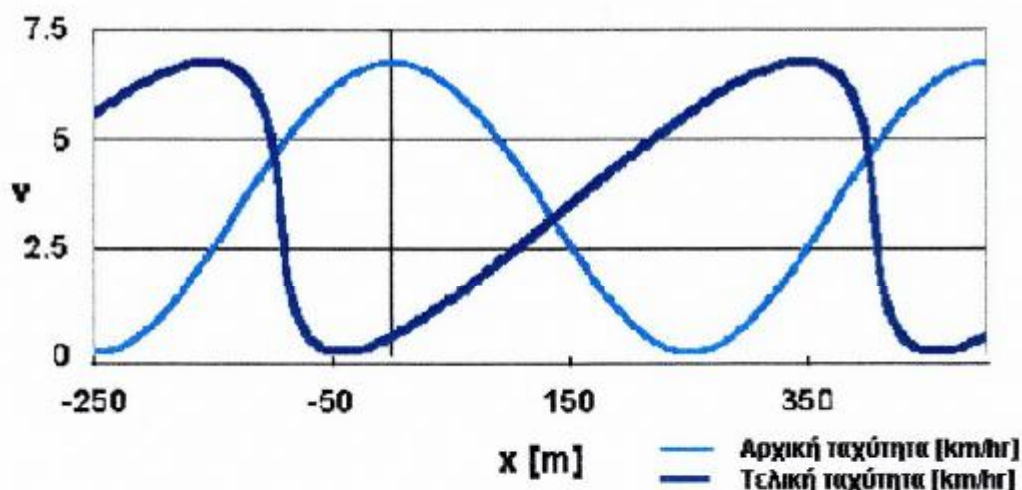
$$\xi \quad V_0 = 1. \text{m/sec} = 3.6 \text{ km/hr}$$

$$\xi \quad d = 5. \text{m}, \quad a = 1. \text{m}, \quad L = 250. \text{m}$$



Εικόνα 3.2.2.1 Εξέλιξη του ύψους της κατολίσθησης μετά από  $t=10 \text{ sec}$





**Εικόνα 3.2.2.1** Εξέλιξη της ταχύτητας της κατολίσθησης μετά από  $t=10$  sec

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται στις παραπάνω εικόνες οι οποίες δείχνουν την εξέλιξη της κατολίσθησης σε χρόνο ακριβώς πριν αρχίσουν να δημιουργούνται αστάθειες με τη μορφή θραυόμενων κυμάτων. Όπως φαίνεται από την λύση αυτού του αριθμητικού παραδείγματος το υλικό συγκεντρώνεται στο μέτωπο όπου και οι ταχύτητες είναι οι μέγιστες.

### 3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗΝ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΒΑΘΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ( shallow – water type theory )

Για σταθερή τοπογραφία δηλαδή για σταθερή κλίση του θεωρούμενου επίπεδου ολίσθησης, μελετήθηκε η δυναμική των κατολισθήσεων στα πλαίσια της συνεχούς θεωρίας των αβαθών υδάτων. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται επίσης στους βασικούς νόμους ισορροπίας της μηχανικής και κάνει χρήση μίας σειράς υποθέσεων οι οποίες απλοποιούν σημαντικά το πρόβλημα.

#### 3.3.1 Δυναμικός συντελεστής ασφάλειας – ταξινόμηση κατολισθήσεων

Γενικά είναι γνωστό ότι οι κατολισθήσεις είναι δυναμικές κινήσεις μαζών στις οποίες οι δυνάμεις βαρύτητας παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο. Επίσης καθόλου σπάνια δεν είναι και η σταδιακή εξέλιξή τους από μία ερπυστική σε μία καθαρά

καταστροφική φάση. Ένας εμπειρικός συντελεστής ο οποίος μπορεί να βοηθήσει σε μία κατά προσέγγιση ταξινόμηση και έλεγχο της εξέλιξης των κατολισθήσεων είναι ένας δυναμικός συντελεστής ασφάλειας, ο οποίος συγκρίνει από την μία τις κινητήριες δυνάμεις και από την άλλη τις δυνάμεις αντίστασης στην κίνηση, και δίνεται από:

$$n = K' \mu_R / \tan\beta - \mu'_F \quad (3.3.1)$$

Όπου :

$\beta$  είναι η γωνία κλίσης του επιπέδου ολίσθησης της κατολίσθησης και  $\mu'_F$  είναι ο ενεργός συντελεστής τριβής τέτοιος ώστε:

$$\mu'_F = \rho' / \rho \quad Mf \approx 1/2 \mu_F \quad (3.3.2)$$

ή

$$\tan\phi' \approx 1/2 \tan\phi \quad (3.3.3)$$

Επίσης ο ενεργός συντελεστής τριβής  $\mu_F = \tan \Phi$  συνδέει τη διατμητική τάση τριβής με την (ενεργό) κύρια τάση

$$\mu_F = \tau_F / \sigma' \quad (3.3.4)$$

Ακόμη  $K' = 1$  είναι ένας ενεργός συντελεστής ώθησης γαιών και

§  $\rho_w$  είναι η πυκνότητα του νερού

§  $\rho$  είναι η ολική πυκνότητα στερεάς – ρευστής μάζας

§  $\rho'$  είναι η ενεργός πυκνότητα της στερεάς μάζας και ισχύει ότι

$$\rho' = \rho - \rho_w \quad (3.3.5)$$

Ακόμη  $\mu_R$  είναι ένας δυναμικός ή αλλιώς τυρβώδης συντελεστής τριβής των κόκκων ο οποίος συνδέει την τυρβώδη διατμητική τάση με την ταχύτητα  $v$  της κατολίσθησης.

$$\tau_R = \rho \mu_R v^2 \quad (3.3.6)$$

Σύμφωνα με τον δυναμικό συντελεστή ασφαλείας μπορεί να γίνει η παρακάτω ταξινόμηση των κατολισθήσεων:

- **Υποκρίσιμες κατολισθήσεις** ( $\eta > 1$ ), οι οποίες χαρακτηρίζονται από την συνθήκη:

$$\tan \varphi' < \tan \beta < \tan \varphi' + \mu_R \quad (3.3.7)$$

Έχουν μία ελεύθερη επιφάνεια κεκλιμένη κατά μία κρίσιμη γωνία ίση με  $\Phi'$ . Κινούνται σε μία σταθερότερη βάση κατά μία γωνία  $\beta$  και προϋποθέτουν ταχύτητες οι οποίες μειώνονται σχεδόν υπερβολικά από την πηγή έναρξης του φαινομένου.

- **Υπερκρίσιμες κατολισθήσεις** ( $1/4 < \eta < 1$ ), οι οποίες χαρακτηρίζονται από την συνθήκη

$$\tan \varphi' + \mu_R < \tan \beta < \tan \varphi' + 4 \mu_R \quad (3.3.8)$$

έχουν μία ελεύθερη επιφάνεια κεκλιμένη κατά μία κρίσιμη γωνία ίση με  $\beta$  και προϋποθέτουν ομοιόμορφο προφίλ σταθερού ύψους και σταθερής ταχύτητας οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$h_{eq} = d \quad , \quad V_{eq} = q l_{eq} / d \quad (3.3.9)$$

$$q l_{eq} = \sqrt{g' d^3 / 2} \quad , \quad g' = K' g \cos \beta$$

- **Καταστροφικές Κατολισθήσεις** ( $0 < \eta < 1/4$ ), οι οποίες χαρακτηρίζονται από την συνθήκη:

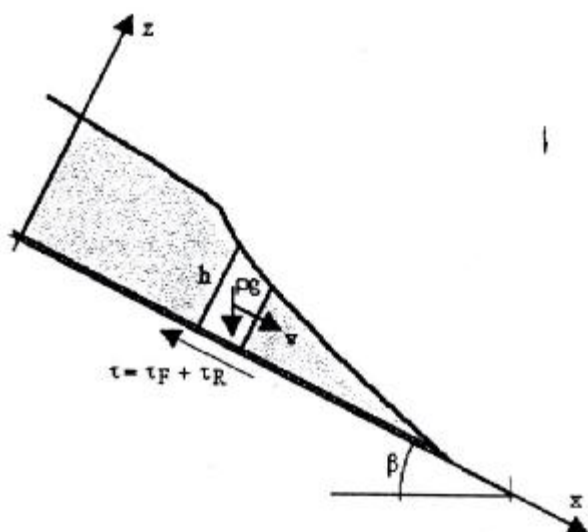
$$\tan \beta > \mu'_F + 4 \mu_R \quad (3.3.10)$$

είναι πολύ ασταθείς με γεωμετρική αύξηση του χρόνου σαν αποτέλεσμα των ακανόνιστων μορφών της αστάθειας.

### 3.3.2 Κατάστροφη του συστήματος των βασικών εξισώσεων

Σύμφωνα με τη θεωρία αβαθών υδάτων το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την ταχεία κίνηση ή ροή κοκκωδών γεωυλικών και συνθριμμάτων (debris flow) αποτελείται από ένα σύστημα δύο μερικών διαφορικών εξισώσεων ως προς το ύψος  $h$  και την ταχύτητα  $v$  της κατολίσθησης για την ακόλουθη γεωμετρία

**Εικόνα 3.3.2.1** Τυπικό γεωμετρικό προφίλ της υπό ολίσθηση γεωμάζας



Συμπερασματικά οι βασικοί νόμοι της μηχανικής (εξίσωση διατήρησης της μάζας και εξίσωση διατήρησης της ορμής) εκφράζονται με τη βοήθεια του ύψους και της ταχύτητας της κατολίσθησης. Στο εξής με τον γενικό όρο ταχύτητα θα εννοείται η μέση τιμή ως προς το ύψος της στρώσης συνιστώσας της ταχύτητας κατά τον άξονα  $x$  και θα συμβολίζεται:

$$\langle \bar{v}_x \rangle = v(x, t) \quad (3.3.1)$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας στην συγκεκριμένη περίπτωση οδηγεί στην γνωστή εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h v) = 0 \quad (3.3.2)$$

Η εξίσωση της ορμής ή εξίσωση κίνησης εκφράζεται ως εξής:

$$-\partial/\partial x (h\langle\sigma_{xx}\rangle) + \rho g h \sin \beta - \tau_F = \rho h (\partial v/\partial t + v \partial v/\partial x) + \tau_R \quad (3.3.3)$$

όπου :

ξ g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

ξ β η κλίση του επιπέδου ολίσθησης

ξ ρ είναι η ολική πυκνότητα της γεωμάζας

Η ολική μέση τάση ως προς το ύψος της κατολίσθησης κατά την διεύθυνση της ροής αποτελείται από δύο όρους. Τον όρο της υδροστατικής πίεσης και τον όρο της ενεργού τάσης

$$\overline{\langle\sigma_{xx}\rangle} = \langle p \rangle + \overline{\langle\sigma_{xx}\rangle} \quad (3.3.4)$$

Για μεγαλύτερη απλοποίηση θεωρούμε γραμμική μεταβολή των ποσοτήτων κατά την διεύθυνση του z οπότε

$$P = \rho_w g h \cos \beta (1 - z/h)$$

$$\sigma'_{xx} = \overline{K\sigma_{zz}}(0) (1 - z/h) \quad (3.3.5)$$

$$\overline{\sigma'_{zz}}(0) = \rho' g h \cos \beta$$

όπου :

ξ ρ<sub>w</sub> είναι η πυκνότητα του νερού

ξ ρ' είναι η ενεργός πυκνότητα της στερεάς μάζας με ρ' = ρ - ρ<sub>w</sub>

ξ K είναι ένας ενεργός συντελεστής ώθησης γαιών για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιείται ο τύπος της ενεργής ώθησης για ένα απειρομήκες πρανές

$$K = \frac{1}{\cos\phi\cos\beta} \approx \frac{1}{\cos^2\phi} \quad (3.3.6)$$

Αντικαθιστώντας κατάλληλα τις σχέσεις (3.3.5) στη σχέση (3.3.4) λαμβάνουμε αντίστοιχα :

$$\langle \bar{\sigma}_x \rangle = 1/2 (\rho_w + K\rho') gh \cos\beta \quad (3.3.7)$$

Στην εξίσωση της κίνησης επίσης ο όρος  $\tau_F$  που είναι όρος διατμητικής τριβής έχει οριστεί σαν

$$\tau_F = \mu_F \sigma'_z(0) \quad (3.3.8)$$

όπου :

$\mu_F = \tan \Phi = \text{const.}$  είναι ένας συντελεστής τριβής τύπου Coulomb που ενεργεί επίσης στη βάση της κατολίσθησης

Επιπλέον ισχύει ο καταστατικός νόμος τύπου Chezy ο οποίος εισάγει την πρόσθετη διατμητική τάση τριβής η οποία είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας σύμφωνα με τη σχέση

$$T_R = R_{XZ}(0) = \rho \mu_R v^2 \quad (3.3.9)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις η εξίσωση κίνησης εκφράζεται:

$$-g' \partial h / \partial x + \gamma = \partial v / \partial t + v \partial v / \partial x + \mu_R v^2 / h \quad (3.3.10)$$

όπου :

$$g' = K' g_n \quad , \quad K' = \rho_w / \rho + \rho' / \rho K \quad (3.3.11)$$

$$\gamma = (\tan \beta - \mu'_F) g_n \quad , \quad \mu'_F = \rho' / \rho \mu_F$$

και

$$g_n = g \cos \beta \quad (3.3.12)$$

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε το τελικό σύστημα των βασικών εξισώσεων είναι:

$$\partial h / \partial t + \partial / \partial x (hv) = 0$$

$$\partial v / \partial t + v \partial v / \partial x + g' \partial h / \partial x = \gamma - \tau_R / \rho h \quad (3.3.13)$$

Οι εξισώσεις (3.3.3.13) αποτελούν ένα υπερβολικό σχεδόν γραμμικό σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της κατολίσθησης και την ταχύτητά της.

### 3.3.3 Διερεύνηση και ανάλυση γραμμικής ευστάθειας του συστήματος βασικών εξισώσεων

Για την διερεύνηση και την ανάλυση γραμμικής ευστάθειας του συστήματος είναι απαραίτητο να μετασχηματίσουμε τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το φαινόμενο υπό μορφή αδιάστατων μεγεθών. Για το σκοπό αυτό οι χωρικές συντεταγμένες συγκρίνονται με ένα χαρακτηριστικό μήκος του προβλήματος  $l_0$ , ενώ ο χρόνος συγκρίνεται με ένα χαρακτηριστικό χρόνο  $t_0$  και η ταχύτητα με μία χαρακτηριστική ταχύτητα  $V_0$ . Το ύψος συγκρίνεται επίσης με ένα χαρακτηριστικό ύψος αναφοράς  $h_0$ .

Με την βοήθεια των παρακάτω χαρακτηριστικών μεγεθών

$h_0$  : χαρακτηριστικό ταχύτητα

$v_0 = \sqrt{g'h_0}$  : χαρακτηριστική ταχύτητα

$q_{10} = v_0 h_0$  : reference discharge

$t_0 = \sqrt{h_0/g'}$  : χαρακτηριστικός χρόνος

εισάγουμε τις παρακάτω ομάδες από αδιάστατες εξαρτημένες και ανεξάρτητες μεταβλητές

#### Ανεξάρτητες μεταβλητές

$x^* = x/h_0$  : αδιάστατη χωρική συνιστώσα

$t^* = t/t_0$  : αδιάστατη χρονική συνιστώσα

#### Εξαρτημένες μεταβλητές

$h^* = h/h_0$  : αδιάστατο ύψος

$v^* = v/v_0$  : αδιάστατη ταχύτητα

Αντικαθιστώντας τις νέες μεταβλητές τις νέες μεταβλητές στις εξισώσεις (3.3.3.13) το αδιάστατο σύστημα των βασικών εξισώσεων γίνεται

$$\frac{\partial h^*}{\partial t^*} + \frac{\partial}{\partial x^*} (h^* v^*) = 0$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + v \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + \frac{\partial h^*}{\partial x^*} = \gamma^* - \mu_R \frac{V^{*2}}{h^*}$$

όπου οι κύριες παράμετροι του προβλήματος είναι:

$\gamma^* = \gamma/g' (\tan \beta - \mu'_F)$ : αδιάστατη δύναμη που οδηγεί στην κίνηση

$\mu_R$  : η δυναμική τριβή

Για λόγους ευκολίας στα επόμενα ο αστερίσκος θα αποφεύγεται θεωρώντας πάντα ότι αναφερόμαστε στο αδιάστατο σύστημα.

Εξετάζοντας το σύστημα (3.3.4.1) διαπιστώνουμε ότι οι παραπάνω εξισώσεις επιτρέπουν ομοιόμορφη λύση εφόσον οι αδιάστατες μεταβλητές ικανοποιούν την συνθήκη:

$$\gamma - \mu_R v^2/h = 0 \quad \Rightarrow \quad v_{eq} = \sqrt{\alpha h_{eq}} \quad (3.3.4.2)$$

όπου :

$$h_{eq} = 1 \quad v_{eq} = \sqrt{\alpha} \quad (3.3.4.3)$$

και

$$\alpha = \frac{\gamma}{\mu_R} = \frac{\tan \beta - \mu'_F}{K'_R} \quad (3.3.4.4)$$

είναι ο αντίστοιχος αριθμός ευστάθειας.



Για την διερεύνηση της πιθανής συμπεριφοράς του συστήματος γραμμικοποιούνται οι δύο βασικές εξισώσεις (στη συγκεκριμένη περίπτωση μόνο η εξίσωση της κίνησης) και εξετάζεται η συμπεριφορά τους για μικρές διαταραχές της ταχύτητας και του ύψους σε σχέση με την ομοιόμορφη κατάσταση. Για τον σκοπό αυτό εισάγουμε στο σύστημα (3.3.4.1) διαταραχές της μορφής

$$v = v_{eq} + v(x,t) \quad , \quad h = h_{eq} + h(x,t) \quad (3.3.4.5)$$

αγνοώντας τα γινόμενα μεταξύ των όρων διαταραχής. Αυτό οδηγεί στην παρακάτω έκφραση

$$\partial h / \partial t + v_{eq} \partial h / \partial x + h_{eq} \partial v / \partial x = 0$$

$$\partial v / \partial t + v_{eq} \partial v / \partial x + \partial h / \partial x + \gamma (2v / v_{eq} - h / h_{eq}) = 0 \quad (3.3.4.6)$$

Αν στην εξίσωση κίνησης εφαρμόσουμε τον συντελεστή  $h_{eq} \partial / \partial x$  που προκύπτει από την εξίσωση συνέχειας μπορεί η  $\omega$  να απαλοισφί. Αυτή η απλοποίηση οδηγεί σε μία μερική διαφορική εξίσωση για την διαταραχή του ύψους τέτοια ώστε:

$$\partial^2 h / \partial t^2 + 2v_{eq} \partial^2 h / \partial x \partial t + (v_{eq}^2 - h_{eq}) \partial^2 h / \partial x^2 + 2\gamma / v_{eq} (\partial h / \partial t + 3/2 v_{eq} \partial h / \partial x) = 0 \quad (3.3.4.7)$$

Για την διευκόλυνση των υπολογισμών αλλάζουμε κλίμακα στο σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με την σχέση  $x = x / \sqrt{h_{eq}}$  και λαμβάνουμε :

$$\partial^2 h / \partial t^2 + 2\sqrt{\alpha} \partial^2 h / \partial x \partial t + (\alpha - 1) \partial^2 h / \partial x^2 + 2\gamma / v_{eq} (\partial h / \partial t + 3/2 \sqrt{\alpha} \partial h / \partial x) = 0 \quad (3.3.4.8)$$

Έχοντας επιλέξει σαν χαρακτηριστικό ύψος το ύψος ισορροπίας έχουμε ότι  $h_{eq} = 1$  ;  $x = x$  .

Η ευστάθεια του συστήματος εξετάζεται πλέον με την αναζήτηση λύσεων της μορφής:

$$h = h_0 e^{ikx + st} \quad (3.3.4.9)$$

Στην έκφραση (3.3.4.9)  $k$  είναι ο κυματικός αριθμός της διαταραχής με διαστάσεις αντίστροφου μήκους και  $(2\pi/k)$  είναι το μήκος κύματος. Το πραγματικό μέρος του  $s$

καλείται ρυθμός ανάπτυξης του κύματος και συμβολίζεται με  $\lambda$  και το φανταστικό μέρος του  $s$  είναι η συχνότητα του κυματισμού και συμβολίζεται με  $\omega$  οπότε ισχύει ότι:

$$s = \lambda + i\omega \quad (3.3.4.10)$$

Αντικαθιστώντας την (3.3.4.10) στην (3.3.4.8) λαμβάνουμε την ακόλουθη εξίσωση διασποράς (**dispersion equation**).

$$s^2 + 2\sqrt{\alpha} iks - (\alpha - 1)k^2 + 2\gamma/\sqrt{\alpha} (s + 3/2 \sqrt{\alpha} ik) = 0 \quad (3.3.4.11)$$

Η εξίσωση διασποράς περιγράφει την σχέση μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης ενός αρμονικού κυματισμού και του κυματικού αριθμού ή αντίστοιχα του μήκους του. Η διασπορά των κυμάτων προέρχεται από το γεγονός ότι κύματα με διαφορετικά μήκη διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες

#### ΔΙΑΚΡΙΝΟΥΜΕ ΔΥΟ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

- **Βραχέα κύματα (k μεγάλο)**

Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση διασποράς καταλήγει στην έκφραση:

$$S^2 \approx (\alpha - 1) k^2 \quad (3.3.4.12)$$

Είναι φανερό ότι η ευστάθεια σε αυτήν την περίπτωση καθορίζεται από το πρόσημο της ποσότητας  $(\alpha - 1)$ . Ανάλογα λογαριθμικού τύπου αστάθειες λαμβάνουν χώρα όταν:

$$s > 0 \Rightarrow \alpha - 1 > 0 \quad (3.3.4.13)$$

Θεωρώντας τη σχέση :

$$\alpha = (\tan\beta - \mu'_F)/(K' \mu_R) \quad (3.3.4.14)$$

σαν τον αριθμό ευστάθειας ο οποίος δεν είναι τίποτα άλλο από τον αντίστροφο του δυναμικού συντελεστή ασφαλείας ή αφού

$$\eta = 1/\alpha = K' \mu_R / (\tan\beta - \mu'_F) \quad (3.3.4.15)$$

Καταλήγουμε στην ακόλουθη συνθήκη

$$A > 1 \Rightarrow \eta < 1 \quad (3.3.4.16)$$

Η οποία συμπεριφορά οδηγεί στην τελική μορφή της συνθήκης ευστάθειας με τη μορφή της ανισότητας ανάμεσα στην γωνία της βάσης ολίσθησης και στο άθροισμα των δύο συντελεστών τριβής

$$\tan \beta > \mu'_F + K' \mu_R \quad (3.3.4.17)$$

- **Μακρά κύματα (μικρός κυματικός αριθμός  $k$ )**

Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση διασποράς μπορεί να λυθεί επαναληπτικά ως εξής:

Θεωρώντας την σχέση (3.3.4.11)

$$s = -3/2 \sqrt{\alpha} ik + \sqrt{\alpha}/2\gamma ((\alpha-1)k^2 - 2\sqrt{\alpha} iks - s^2)$$

λαμβάνουμε μία λύση την οποία και αντικαθιστούμε στην (3.3.4.11) και την λύνουμε οπότε τελικά προκύπτουν οι εξής λύσεις:

$$s^{(0)} = -3/2 \sqrt{\alpha} ik \quad (3.3.4.18)$$

$$s^{(1)} = s^{(0)} + \sqrt{\alpha}/2\gamma (\alpha/4 - 1)k^2$$

Έτσι η ομοιόμορφη ροή θα είναι ασταθείς εφόσον

$$\text{Re}(s) > 0 \quad \Rightarrow \quad \alpha/4 - 1 > 0 \quad (3.3.4.19)$$

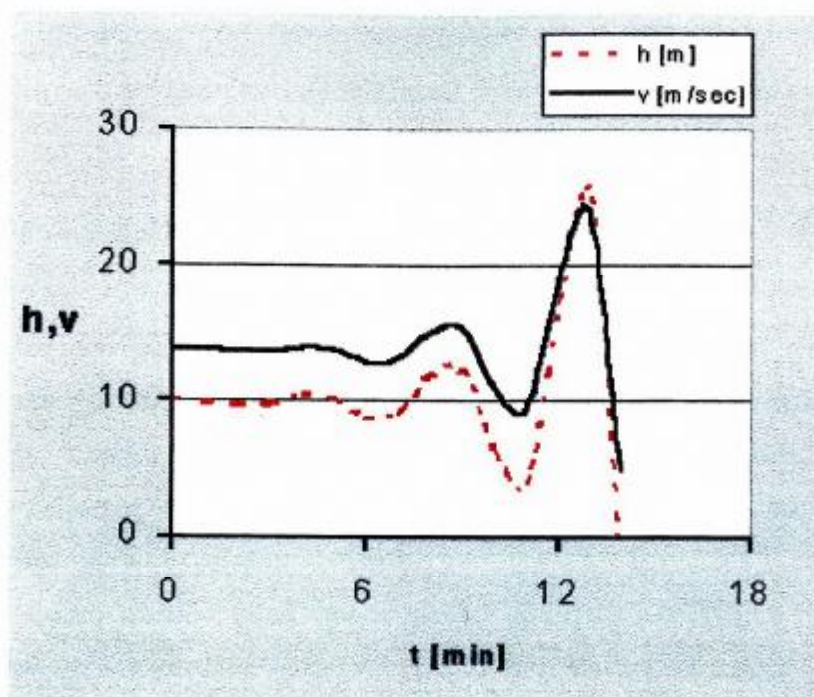
Και πραγματικά οι αστάθειες θα λαμβάνουν χώρα όταν

$$\alpha > 4 \Rightarrow \eta < 1/4$$

ή

$$\tan\beta > \mu_F + 4K\mu_R \quad (3.3.4.20)$$

Οι παραπάνω συνθήκες οδηγούν όπως φαίνεται σε υψηλές αστάθειες που αναπτύσσονται σε περίπου χρονική διάρκεια μόνο 12 sec όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.3.4.1



**Εικόνα 3.3.4.1** Χρονική εξέλιξη εκρηκτικών ασταθειών για μακρά κύματα

### 3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης ευστάθειας του συστήματος για δύο διακριτές περιπτώσεις στις οποίες η κλίση του επιπέδου ολίσθησης της γεωμάζας λαμβάνεται ίση με  $\beta = 20^\circ$  και η γωνία τριβής του υλικού ίση με  $\Phi = 17^\circ$

1. Στην περίπτωση εξέτασης της συμπεριφοράς μακρών κυμάτων (μικρός κυματικός αριθμός  $k$ ) λαμβάνουμε:

1.a. Για την συνθήκη αστάθειας του συστήματος η οποία ικανοποιεί την συνθήκη  $a > 4 \Rightarrow \mu_R < 0.052$

1.b. Για την συνθήκη ευστάθειας του συστήματος η οποία ικανοποιεί την συνθήκη  $a < 4 \Rightarrow \mu_R > 0.052$

2. Στην περίπτωση εξέτασης της συμπεριφοράς βραχέων κυμάτων (μεγάλος κυματικός αριθμός  $k$ ) λαμβάνουμε :

2.a. Για την συνθήκη αστάθειας του συστήματος η οποία ικανοποιεί την συνθήκη  $a > 1 \Rightarrow \mu_R < 0.207$

2.b. Για την συνθήκη ευστάθειας του συστήματος η οποία ικανοποιεί την συνθήκη  $a < 1 \Rightarrow \mu_R > 0.207$

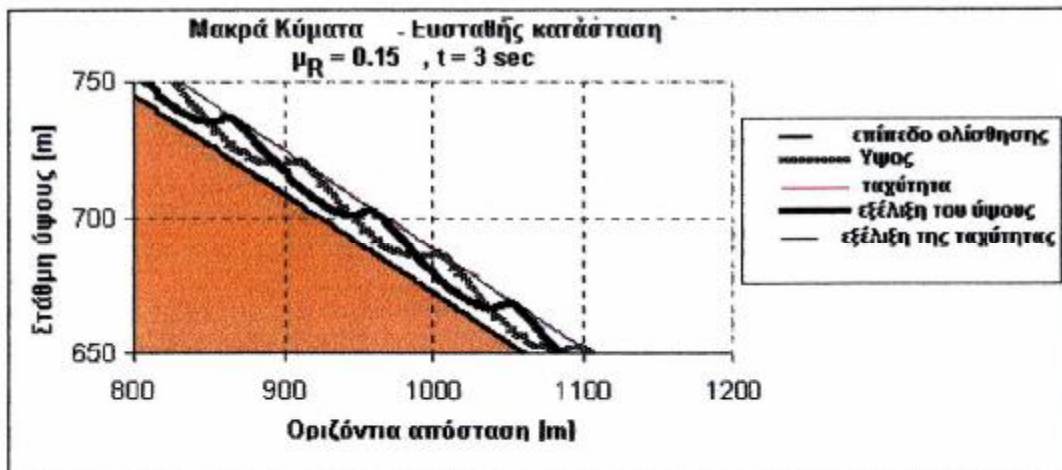
Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι εξής τιμές για τον τυρβώδη συντελεστή τιμές ανά περίπτωση:

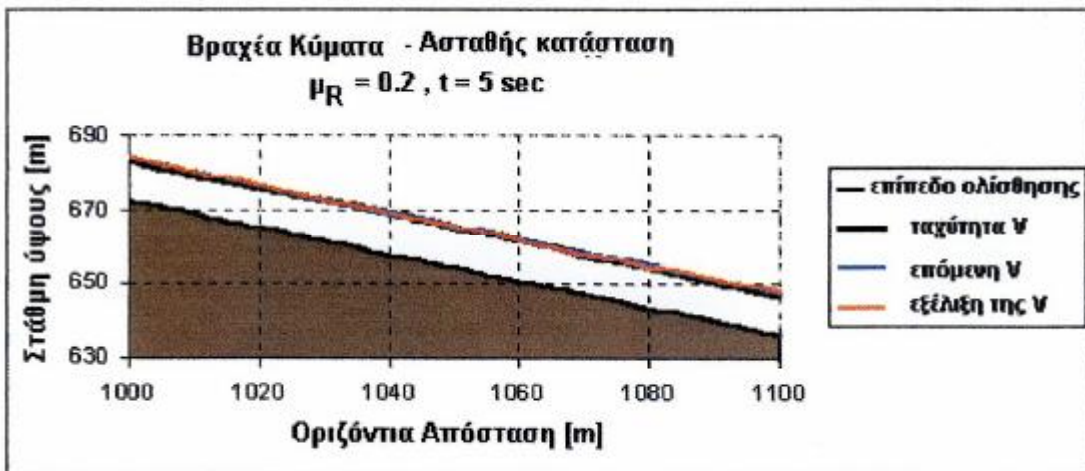
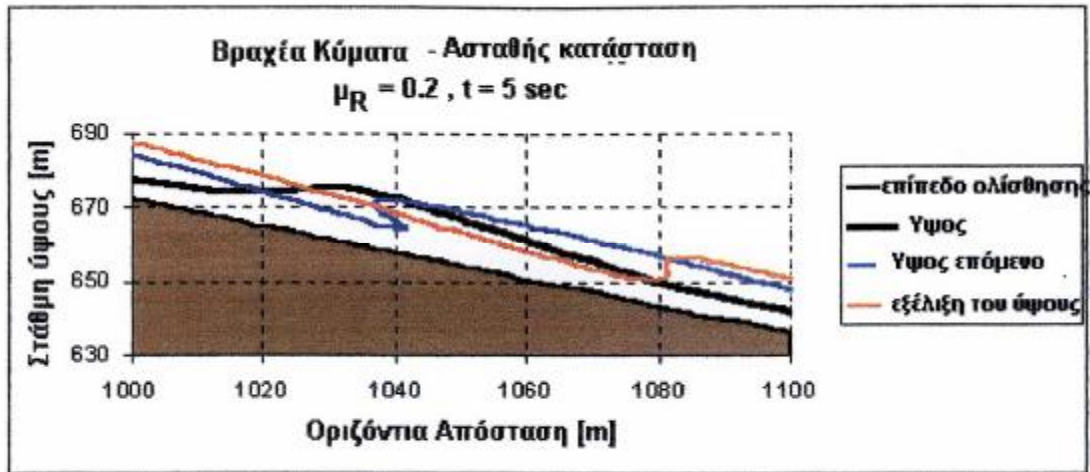
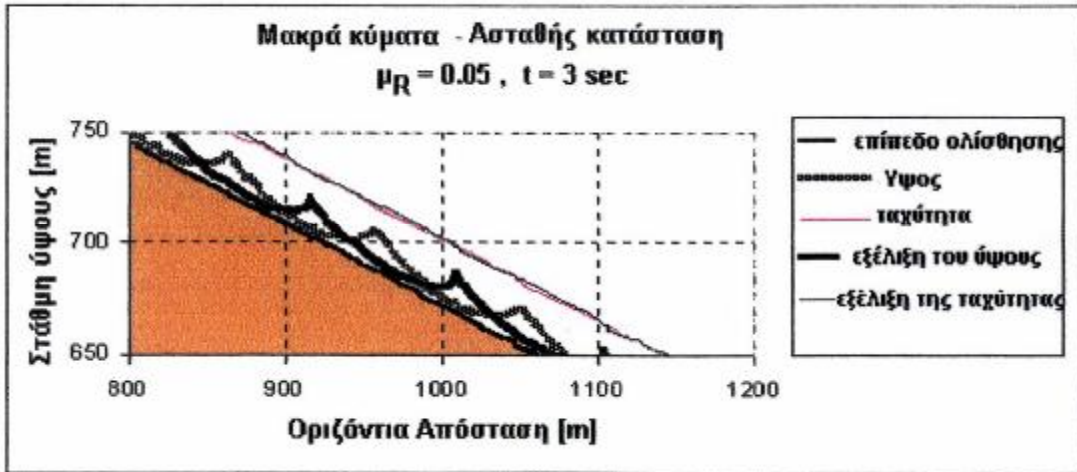
Για την περίπτωση 1.a  $\mu_R = 0.05$

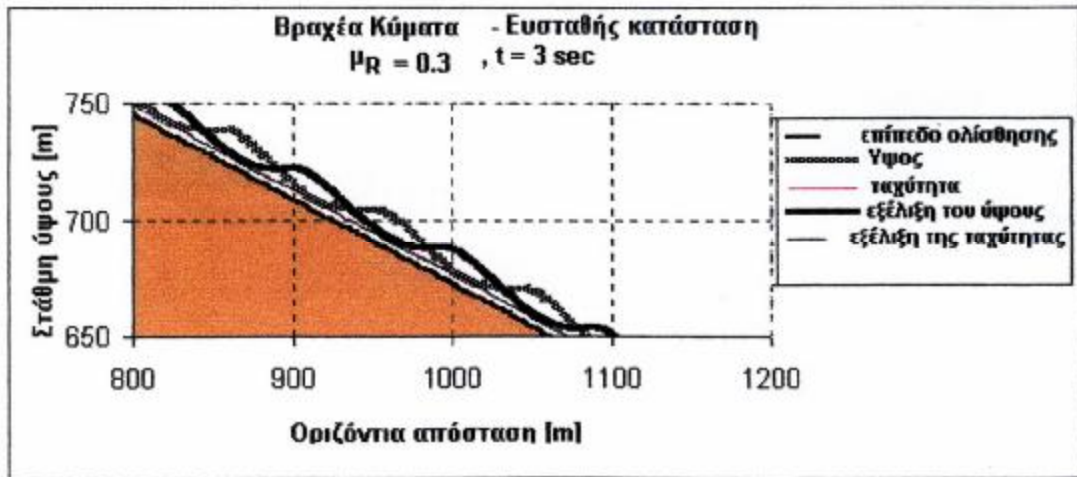
Για την περίπτωση 1.b  $\mu_R = 0.15$

Για την περίπτωση 2.a  $\mu_R = 0.2$

Για την περίπτωση 2.b  $\mu_R = 0.3$







Γενικά η μελέτη της ευστάθειας του συστήματος κίνησης γεωυλικών υπό τη μορφή κατολίσθησης ή αυστηρότερα υπό τη μορφή κίνησης γεωσυνθριμμάτων απέδειξε ότι δύο είναι οι κυριότεροι παράγοντες που την καθορίζουν:

- Ο ενεργός συντελεστής ώθησης γαιών  $K$
- Ο δυναμικός συντελεστής τριβής  $\mu_R$

Όπου  $\tau_R = \rho \mu_R v^2$  (είναι η δυναμική τριβή κατά Reynolds η οποία και ευρέθη ότι αυξάνεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας της κατολίσθησης).

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι 1g πειραματικά μοντέλα που έχουν δημοσιευθεί σχετικά πρόσφατα από τους Ancy et al. Έδειξαν ότι για χαμηλές ταχύτητες ροής (quasi – uniform flow regime) ο δυναμικός συντελεστής τριβής εξαρτάται γραμμικά από το ύψος της προς ολίσθηση μάζας κατά ένα συντελεστή  $\lambda$  σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$\mu_R = \lambda h \quad , \quad \lambda \approx (1/40)^2 1/D_{\text{grain}} \quad (3.3.5.1)$$

όπου  $D_{\text{grain}}$  είναι η μέση διάμετρος του κόκκου.

Από την άλλη για μεγαλύτερες ταχύτητες (splashing flow regime) ο δυναμικός συντελεστής τριβής προϋποθέτει μία σταθερή τιμή που είναι ανεξάρτητη του ύψους τέτοια ώστε  $\mu_R = \text{const.}$

Η γραμμική ανάλυση ευστάθειας του συστήματος των εξισώσεων (3.3.3.13) που διέπουν το πρόβλημα έδειξε ότι στην περιοχή της οριζοντίως ομοιόμορφης ροής (quasi – uniform flow regime ,  $\mu_R = \text{const.}$ ) οι αστάθειες εμφανίζονται πρωτίστως στα βραχέα κύματα ή κύματα στα ρηγά και για τιμές της αδιάστατης σωματιδιακής ταχύτητας (αριθμός Froude) μεγαλύτερες της μονάδος

$$Fr = v/\sqrt{g'h} > 1 \quad (3.3.5.2)$$

$Fr > 2$

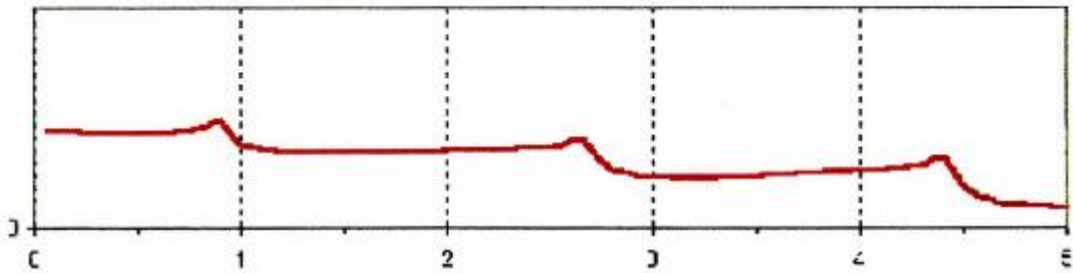
Αυτές οι αστάθειες αναπτύσσονται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα περίπου 12sec και οδηγούν σε μία εκρηκτική μορφή ασταθειών (flutter – type mode) στα μακρά κύματα (Εικόνα 3.4.3.1) καθώς και σε μία κυλιόμενη αστάθεια ως προς το χώρο η οποία χαρακτηρίζεται με τον όρο “Roller type Instability in space” και για τις αρχικές τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 3.5.1

**Πίνακας 3.5.1** Αρχικές τιμές εξαρτημένων μεταβλητών και τιμές των σταθερών παραμέτρων του συστήματος

Αρχικό ύψος : $h_0$
Αρχική Ταχύτητα : $V_0$
Κλίση επιπέδου ολίσθησης : $\beta$
Γωνία τριβής του υλικού : $\Phi$
Δυναμικός συντελεστής τριβής : $\mu_R$
Πυκνότητα μείγματος (γεωϋλικού) : $\rho$

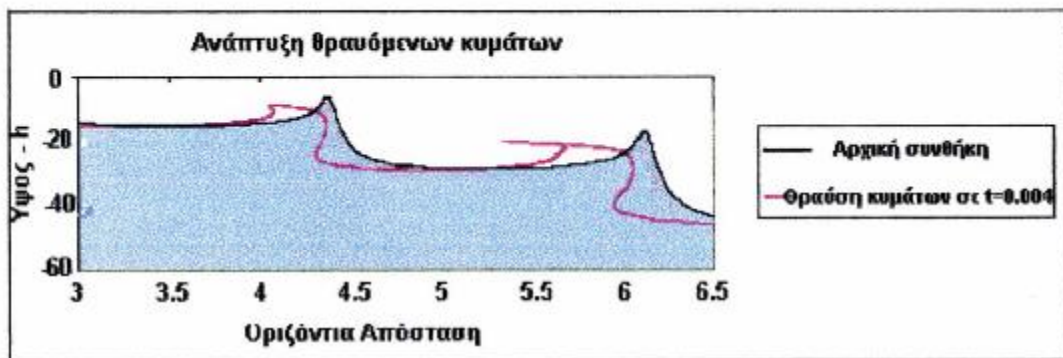
Λαμβάνουμε την αριθμητική λύση με την χαρακτηριστική μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.1





**Σχήμα 3.5.1** Κυλιόμενου τύπου αστάθειες του ύψους που αναπτύσσονται στο χώρο

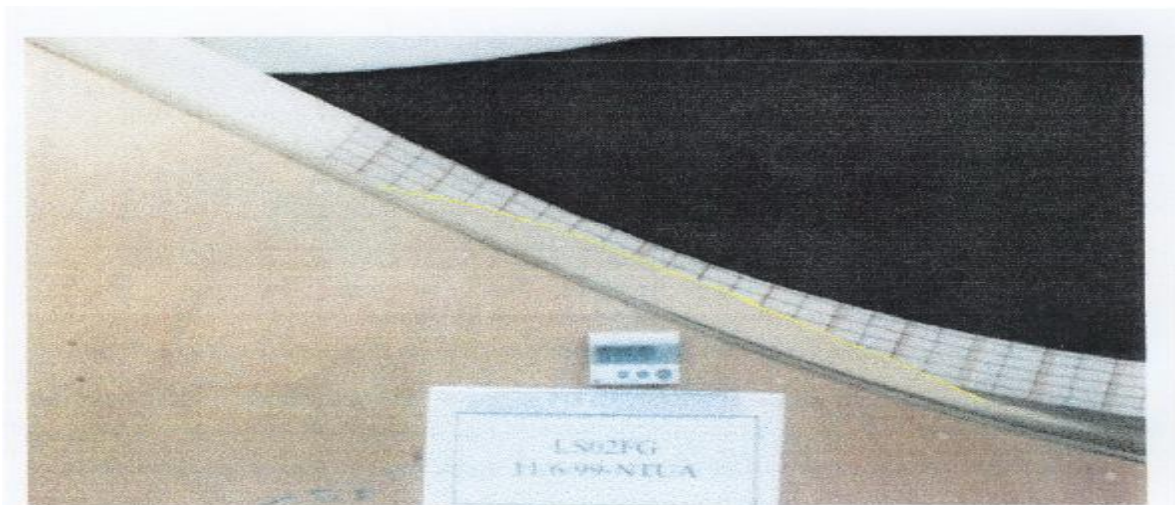
Οι παραπάνω περιγραφείσες αστάθειες (Roller type instabilities) είναι αρκετά σημαντικές για την αξιολόγηση του μοντέλου αφού όταν χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές συνθήκες του ύψους, οδηγούν ακαριαία σε θραυόμενα κύματα, κατά την επίλυση του συστήματος με τη μέθοδο των Χαρακτηριστικών Γραμμών (ΜΧΓ). Το αριθμητικό αποτέλεσμα μίας τέτοιας επίλυσης του προβλήματος απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5.2,



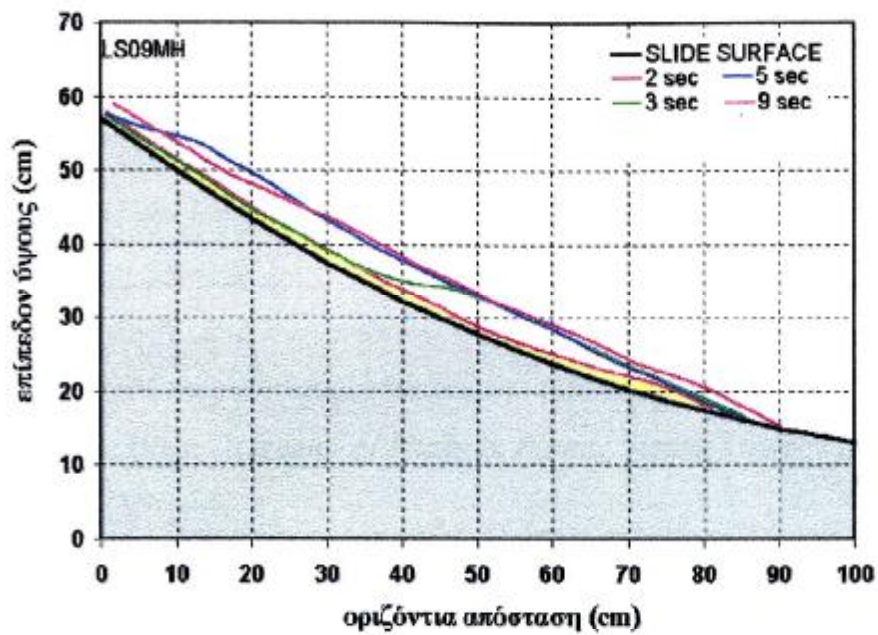
**Σχήμα 3.5.2** Θεωρία Αβαθών Υδάτων : Θραυόμενα κύματα με τη μεθοδο των Χαρακτηριστικών Γραμμών (Μ.Χ.Γ)

Συγκρίνοντας τα αριθμητικά αποτελέσματα που συνολικά οδηγούν στην ανάπτυξη θραυόμενων κυμάτων και ισχυρών ασταθειών η μαθηματική προσομοίωση που στηρίζεται στην θεωρία αβαθών υδάτων κυρίως για την περιγραφή της ροής ξηρών συνθριμμάτων κρίνεται ανεπαρκής. Πολύ δε περισσότερο διότι στην

βιβλιογραφία δεν έχουν περιγραφεί αριθμητικές λύσεις είτε πειραματικά μοντέλα που να επιβεβαιώνουν την ύπαρξη θραυόμενων κυμάτων. Αυτές οι αστάθειες που εμφανίζονται στα προηγούμενα αριθμητικά αποτελέσματα έχουν κυρίως την μορφή μαθηματικών ασταθειών και οφείλονται στην διαδικασία ολοκλήρωσης, ως προς το ύψος της προς ολίσθηση γεωμάζας, που ακολουθείται κατά κανόνα στην προσέγγιση αντίστοιχων προβλημάτων σύμφωνα με τη θεωρία αβαθών υδάτων. Αυτό διαπιστώνεται και πειραματικά στην παρούσα εργασία όπου σε μία σειρά πειραματικών δοκιμών που προσομοιάζουν υπό κλίμακα την ροή των συνθριμμάτων (debris flow), δεν παρατηρήθηκαν μορφές θραυόμενων κυμάτων ή κυλιόμενες αστάθειες παρόμοιες με αυτές της μαθηματικής προσομοίωσης, όπως φαίνεται και στις επόμενες εικόνες 3.5.2 και 3.5.3



**Εικόνα 3.5.2** Φωτογραφία του Προφίλ της ροής κατά τη διάρκεια αυτής σε πειραματικό ολισθητήρα. Το υλικό είναι λεπτόκοκκη άμμος και η επιφάνεια ολίσθησης είναι εντόνως αδρή ώστε να αναπτύσσεται τριβή.



**Εικόνα 3.5.3** Οπτικά αρχεία του προφίλ της ροής κατά τη διάρκεια επιλεγμένων χρονικών στιγμών που αντιστοιχούν σε μία αρχική φάση ( $t=2 \text{ sec}$ ) και σε διαδοχικές φάσεις της ροής κατά τις οποίες η ροή σταματώντας στο μέτωπο διαμορφώνει μία κίνηση προς τα πίσω ανάλογης με το φαινόμενο “backwater”

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

### ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΕΠΙΡΡΕΠΕΙΣ ΣΕ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

#### 4.1 Γενικά

Το είδος της τοπογραφίας κάθε περιοχής παρέχει μία βάση για το διαχωρισμό των εδαφών και συνεπώς την αναγνώριση αυτών που είναι περισσότερο επιρρεπείς στις κατολισθήσεις. Σε αυτό το κεφάλαιο, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των περιοχών χρησιμοποιούνται ως βάση για την αναγνώριση των κατολισθήσεων και των επιρρεπών περιοχών.

Γενικά, κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν σχεδόν σε κάθε περιοχή δεδομένων συγκεκριμένων συνθηκών (απότομες πλαγιές, υψηλό ποσοστό υγρασίας, ανύπαρκτη βλάστηση). Αντίθετα όμως, κατολισθήσεις δε συμβαίνουν πάντα σε όλες τις επιρρεπείς περιοχές, αν δεν τηρούνται συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. αργιλικόι σχιστόλιθοι σε επίπεδες κλιτύες με χαμηλά ποσοστά υγρασίας). Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι κατολισθήσεις είναι συνηθισμένες σε μερικά είδη εδαφών ενώ πολύ σπάνιες σε άλλα. Στον πίνακα 3.1 φαίνονται τα διάφορα είδη εδάφους και η ευαισθησία τους στις κατολισθήσεις. Οι διάφορες υποδιαιρέσεις βασίζονται σε τοπογραφικά χαρακτηριστικά αλλά στην περίπτωση των λοφωδών περιοχών βασίζονται και στις μορφές αποστράγγισης.

<b>Τοπογραφία</b>	<b>Γεωλογικοί σχηματισμοί</b>	<b>Πιθ/τητα Κατολίσθησης</b>
<b>3. Τυχαίες κρυφ/μές ή λόφοι</b>		
<b>α. Δεντροειδής απορροή</b>		
i. Χαμηλοί, στρογγυλοί λόφοι, ελικοειδή ρεύματα	Αργιλικόι σχιστόλιθοι	1
ii. Κυματιστές κορυφ/μές σχετιζόμενες με κωνικούς λόφους, μικρή βλάστηση	Σερπεντινίτης	1
iii. Ομοιόμορφοι στρογγυλοί λόφοι	Γρανίτης	2
iv. Ανώμαλη τοπογραφία (μόνο παγετώδεις περιοχές)	Μάζα εδάφους στους πρόποδες ενός βοθνού	2
<b>III. Επίπεδο ως λοφώδες, στρωματοειδές έδαφος</b>		
A. Απότομες πλαγιές	Κώνοι κορημάτων, κολούβια	1
B. Μέτριες ως επίπεδες πλάγιες	Αλλουβιακά ριπίδια, Δέλτα	3
Γ. Λοφώδης πλαγιές με γκρεμό στη κορυφή	Παλαιά ολίσθηση	1

**Πίνακας 3.** Επικινδυνότητα των περιοχών σε σχέση με την τοπογραφία τους. Οι αριθμοί στην 3<sup>η</sup> στήλη ορίζονται ως εξής: 1= επιρρεπείς στις κατολισθήσεις, 2=

επιρρεπείς στις κατολισθήσεις υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις και 3= όχι επιρρεπείς στις κατολισθήσεις εκτός από τις ευπαθείς περιοχές.

## 4.2 ΕΥΑΙΣΘΗΤΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ

Οι ευαίσθητες περιοχές στις οποίες είναι πιθανό να εκδηλωθεί μία κατολίπηση μπορεί να είναι απότομες πλαγιές, βράχια ή όχθες, οι οποίες έχουν υποσκαφτεί από τη δράση των κυμάτων, περιοχές συγκέντρωσης υδάτων αποχέτευσης και ζώνες διαρροής, περιοχές με λοφώδες έδαφος και περιοχές με ρωγμές και ρήγματα. Όταν εξετάζονται αεροφωτογραφίες των περιοχών αυτών ή πραγματοποιείται επιτόπια έρευνα, πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή. Επίσης περιοχές οι οποίες έχουν ήδη ολισθήσει απαιτούν άμεση και εξονυχιστική έρευνα γιατί μπορούν και πάλι να ολισθήσουν.

### 4.2.1 απότομες πλαγιές

Αν οι πλαγιές είναι αρκετά απότομες, η κίνηση μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε είδος εδάφους. Παρόλα αυτά, και στις περιπτώσεις όπου συντρέχουν και άλλοι παράγοντες υπέρ της κατολίπησης, οι απότομες πλαγιές είναι οι πιο ευαίσθητες τοποθεσίες. Όμως η σύγκριση πρέπει να γίνεται όταν οι πλαγιές αποτελούνται από τα ίδια υλικά. Για παράδειγμα, μια πλαγιά από χώμα δεν πρέπει να συγκριθεί με ένα γειτονικό βράχο. Γενικά οι κλιτύες από στρώσεις βράχων είναι πιο σταθερές, αν και πιο απότομες, από κλιτύες αποτελούμενες από έδαφος σε γειτονικές περιοχές.

Ο πιο κοινός λόγος κατολισθήσεων είναι τα αποθεματικά ή κολλουβιακά εδάφη τα οποία ολισθαίνουν πάνω σε στρωματοειδείς επιφάνειες βράχων. Τα χαλαρά και ασταθή εδάφη δεν μπορούν να διατηρήσουν την κλίση μιας κλιτύς όσο η υπόγεια βραχώδης επιφάνεια και συνεπώς βρίσκονται σε μια ευαίσθητη ισορροπία. Οι παράγοντες που οδηγούν στην εκδήλωση ολίπησης της υπερκείμενης μάζας μπορούν να είναι μια ισχυρή βροχόπτωση ή μια εκσκαφή στον πόδα της κλιτύς.

### 4.2.2 Βράχοι και όχθες υποσκαμμένες από ρεύματα ή κύματα

Οι κατολισθήσεις είναι συνηθισμένες σε βράχους οι οποίοι βρίσκονται υπό την επίδραση ρευμάτων ή κυμάτων. Αν οι όχθες αποτελούνται από έδαφος ή ασταθή υλικά η πιο αδύναμη θέση για κατολίπηση συχνά είναι το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας του ρεύματος, όπου η όχθη δέχεται τη μεγαλύτερη επίδραση από το νερό. Από την άλλη μεριά, όταν προεξέχουν βράχια η όχθη γύρω από το σημείο της

μέγιστης καμπυλότητας είναι συχνά αρκετά σκληρή και δυνατή ώστε τα αδύναμα σημεία βρίσκονται πάνω και κάτω από την περιοχή αυτή.

Πολλές κατολισθήσεις συμβαίνουν κατά μήκος και των ακτών των ωκεανών και λιμνών εξαιτίας της υποσκαφής των κυμάτων. Ο εντοπισμός του πιο επικίνδунου σημείου είναι πολύ πιο δύσκολος και σύνθετος στην περίπτωση αυτή παρά στην περίπτωση των ρευμάτων και αυτό γιατί πρέπει να ληφθούν και άλλοι παράγοντες υπόψη όπως το σχήμα της ακτογραμμής, η διεύθυνση των κυμάτων, η συχνότητα και το μέγεθος των καταιγίδων που παράγουν μεγάλα κύματα.

#### **4.2.3 Περιοχές συγκέντρωσης υδάτων αποχέτευσης και ζώνες απορροής**

Έρευνες έχουν δείξει ότι το νερό είναι ο παράγοντας που οφείλεται για το 95% όλων των κατολισθήσεων. Έτσι η προσεκτική μελέτη του δικτύου αποστράγγισης και περιοχών συγκέντρωσης των όμβριων υδάτων είναι εξαιρετικά σημαντική. Εξονυχιστική έρευνα των ήδη υπαρχόντων κατολισθήσεων, συχνά δείχνει ότι μια γραμμή που συνδέει τα σημάδια τους οδηγεί σε κανάλια σε ψηλότερο έδαφος.

Η απορροή με την ακόλουθη ολίσθηση είναι πιθανό να συμβεί σε περιοχές κάτω από υποβρύχιες λακκούβες, δεξαμενές, κανάλια άρδευσης και κανάλια επιφανειακής παροχέτευσης. Τέτοιες συνθήκες πολλές φορές παραβλέπονται στο έδαφος γιατί οι πηγές του νερού μπορούν να είναι πολύ πάνω από την ίδια την κατολίσθηση ενώ είναι φανερές στις αεροφωτογραφίες. Χρήζει ιδιαίτερης έμφασης και η αναγνώριση του πιθανού κινδύνου σε περιοχές κάτω από παροχευτικές επιφάνειες αποστράγγισης, ειδικά σε σπασμένους και πορώδεις βράχους.

Η αναγνώριση της απορροής μερικές φορές βοηθείται από τα κανάλια, τα οποία βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, τις υγρές περιοχές, τη ψηλή βλάστηση στην πλαγιά και τους μετατοπισμένους ή κατεστραμμένους, γειτονικούς στην πλαγιά δρόμους.

Η σκιαγράφηση του δικτύου αποστράγγισης, ειδικά παρουσία πηγών, είναι ιδιαίτερα

σημαντική για το σχεδιασμό νέας κατασκευής. Πολλά γεμίσματα αυτοκινητοδρόμων έχουν αστοχήσει επειδή η φυσική απορροή εμποδίστηκε από τα γεμίσματα και δελήφθηκε υπόψη η αποστράγγιση.

#### **4.2.4 Περιοχές με λοφώδες έδαφος**

Η παρουσία λοφώδους εδάφους, του οποίου τα χαρακτηριστικά είναι ασυνεχή με αυτά των άλλων κλιτύων, και η παρουσία απότομων βράχων σε ένα μεγαλύτερο υψόμετρο, είναι συχνά ενδείξεις μίας υπάρχουσας κατολίσθησης. Όσο γηραιότερη είναι η κατολίσθηση τόσο περισσότερο έχουν εδραιωθεί η βλάστηση και η απορροή των υδάτων στην ολισθαίνουσα μάζα. Η απορροή και η βλάστηση, λοιπόν βοηθούν στον καθορισμό της σχετικής ηλικίας και της ευστάθειας των κλιτύων.

Όταν αναγνωριστεί μια κατολίσθηση, πρέπει να ληφθεί ως προειδοποίηση ότι η γενικότερη περιοχή ήταν ασταθής στο παρελθόν και νέες αναταράξεις μπορούν να ξεκινήσουν νέες κατολισθήσεις. Παρόλα αυτά, μια τέτοια προειδοποίηση δεν πρέπει να αποτρέπει κάθε είδους κατασκευή γιατί η αστάθεια του παρελθόντος είναι πιθανό να μην εξακολουθεί και στο παρόν, όμως πρέπει να λαμβάνεται ειδική φροντίδα όταν γίνονται κατασκευές πάνω σε παλιές κατολισθήσεις.

#### **4.2.5 Περιοχές συγκέντρωσης ρωγμών και στρωματοειδών επιπέδων**

Οι κινήσεις των κλιτύων μπορούν να ελεγχθούν δομικά από επιφάνειες ή επίπεδα αδυναμιών, όπως ρήγματα, ενώσεις, στρωματοειδή επίπεδα και σχιστότητα. Αυτά τα δομικά χαρακτηριστικά μπορούν να χωρίσουν τη συμπαγή βραχώδη μάζα σε μεγάλο αριθμό ξεχωριστών τεμαχίων, τα οποία δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι λάθος σχεδιασμός της κλιτύος, αφού ο σχεδιαστής θεώρησε το βράχο σαν μια συνεχή μάζα και όχι σαν μια σειρά ξεχωριστών τεμαχίων. Επίσης αυτά τα επίπεδα αδυναμιών παρέχουν μια έξοδο για το νερό και τη βλάστηση, τα οποία αδυνατούν περαιτέρω τα επιμέρους τεμάχια από τη σφηνοειδή δράση, τη δράση του πάγου και τη μείωση της τριβής ολίσθησης. Πρέπει να γίνει μια προσεκτική έρευνα ώστε να αναγνωριστούν οι περιοχές κοντά στα ρήγματα και τις ενώσεις, ειδικά εκεί που διασταυρώνονται και χωρίζουν τη βραχώδη μάζα σε μικρά επιμέρους τεμάχια.

#### **4.2.6 Πρόσφατες κατολισθήσεις**

Η εκδήλωση μιας κατολίσθησης δε σημαίνει απαραίτητα ότι έχουν γίνει οι τελικές ανακατατάξεις στις ασταθείς συνθήκες και έχει τελειώσει κάθε πιθανή κίνηση. Σε



πολλές περιπτώσεις, ιδιαίτερα σε ασταθείς αποθέσεις, τα υλικά που βρίσκονται στο πρόσωπο του βράχου παραμένουν στην ίδια κατάσταση γιατί είναι πάνω σε πολύ απότομη πλαγιά. Το πρόσωπο αυτό κατέρχεται γρήγορα μέχρι να προκύψει μια πιο σταθερή κατάσταση. Έτσι, μια νέα κατολίσθηση πρέπει να ερευνηθεί όσο το δυνατό γρηγορότερα όχι μόνο για να καθοριστούν διορθωτικά μέτρα αλλά και να βρεθούν αποδείξεις για μια πιθανή συνεχιζόμενη κίνηση. Το πιο σημαντικό σημάδι πιθανής αστάθειας είναι η παρουσία ρωγμών στη στέψη της κατολίσθησης.

#### 4.3 ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ – ΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Οι κατολισθητικές κινήσεις στον ελληνικό χώρο, που χαρακτηρίζεται για την πολυσύνθετη δομή των γεωλογικών σχηματισμών, αποτελούν το σοβαρότερο από τα καταστροφικά γεωλογικά φαινόμενα. Τα αποτελέσματά τους έχουν σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η βιωσιμότητα πολλών οικισμών, οι επισφαλείς συνθήκες θεμελίωσης των τεχνικών έργων και ιδιαίτερα οι συχνές καταστροφές στο οδικό δίκτυο, η ακαταλληλότητα πολλών περιοχών για διάφορες χρήσεις ή και η συνεχής απώλεια πολύτιμης γης (Κούκης, 1980).

Τα φαινόμενα αυτά δεν έχουν μέχρι σήμερα αποτιμηθεί οικονομικά, δεδομένου ότι το κόστος θεραπείας εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο της κατασκευής – λειτουργίας των τεχνικών έργων και της αποκατάστασης των οικισμών. Επίσης, η κοινωνική διάσταση του προβλήματος, που είναι εξίσου σημαντική, έχει υποβαθμιστεί. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η παντελής έλλειψη στοιχείων και η αποσπασματική θεώρηση του προβλήματος από τους διάφορους φορείς. Επομένως, το φαινόμενο “κατολισθήσεις” στον ελληνικό χώρο αντιμετωπίζεται επιφανειακά σε ερευνητικό επίπεδο. Φυσική συνέπεια της θεώρησης αυτής, είναι η συστηματική απουσία της πρόληψης και των σοβαρών πλεονεκτημάτων που απορρέουν από αυτή. Στις μέρες μας είναι ακόμη πιο επιτακτική η ανάγκη για πιο ολοκληρωμένη θεώρηση, λόγω των συμφερόντων των εταιρειών για κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων και γενικότερα την παρέμβαση του ανθρώπου στο φυσικό περιβάλλον χωρίς προηγούμενο σχεδιασμό.

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων εμφανίζεται κυρίως στη Δυτική – Κεντρική Ελλάδα, λόγω της συνδυασμένης δράσης πολλών παραγόντων, όπως είναι η



λιθολογία, η στρωματογραφία (stratigraphy), η προέλευση του υπόβαθρου, η μορφολογία, το υψόμετρο, οι βροχοπτώσεις, η σεισμικότητα κ.λ.π. Οι περισσότερες από τις κατολισθήσεις συνήθως επηρεάζουν μικρές περιοχές και συμβαίνουν σε ιζήματα από την Κρητιδική (Cretaceous) έως την Τεταρτογενή (Quaternary) περίοδο. Ειδικότερα, οι πιο σοβαρές κατολισθήσεις σχετίζονται με ασταθείς ζώνες, που βρίσκονται σε περιοχές με απότομες κλιτύες και επηρεάζονται από ισχυρές παραμορφώσεις του παρελθόντος ή σε περιοχές, οι οποίες είναι ακόμη κάτω από την επίδραση γεωδυναμικών διαδικασιών.

Τα στατιστικά στοιχεία που ακολουθούν αναφέρονται σε 1116 περιπτώσεις κατολισθήσεων στον Ελληνικό χώρο, καλύπτουν μια χρονική περίοδο 42 ετών (1949 – 1991) και συλλέχθηκαν από τεχνικές εκθέσεις και μελέτες διαφόρων δημόσιων υπηρεσιών της Ελλάδας. Οι στατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό και την ποσοτική έκφραση των στοιχείων, αναφέρονται στην κλασική στατιστική με την κατανομή συχνοτήτων και κάποιους συσχετισμούς μεταξύ των διαφορετικών παραμέτρων. Για καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αυτές οι παράμετροι κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε ξεχωριστές ομάδες ως εξής:

**1<sup>η</sup> Ομάδα:** Γενικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής (τύπος περιοχής, τοπογραφικό ανάγλυφο, είδος και στάδιο διάβρωσης, βαθμός ανθρώπινης παρέμβασης, υψόμετρο, μέση ετήσια βροχόπτωση κ.λ.π.)

**2<sup>η</sup> Ομάδα:** Λιθολογία και δομή των γεωλογικών σχηματισμών (γεωτεκτονική ζώνη, λιθολογικές μονάδες).

**3<sup>η</sup> Ομάδα:** Κύρια χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων (κλίση κλιτύος, γεωμετρία υποβάθρου και κλιτύος, βάθος, πάχος του φθαρμένου στρώματος, ταχύτητα κίνησης, στάδιο κίνησης και είδος της κατολίσθησης).

**4<sup>η</sup> Ομάδα:** Μηχανισμός των κατολισθήσεων (αιτίες, εναύσματα της κίνησης).

**5<sup>η</sup> Ομάδα:** Κοινωνικός αντίκτυπος. Δραστικά μέτρα.

Βασισμένοι σε αυτή τη στατιστική προσέγγιση, τα αποτελέσματα των ομάδων 1 έως 3 συνοψίζονται στους ακόλουθους πίνακες καθώς επίσης και στα ιστογράμματα κατανομής συχνοτήτων.

Τοπογραφία	Γεωλογικοί σχηματισμοί	Πιθ/τητα Κατολίσθησης
<b>I.Επίπεδο έδαφος</b>		
A.Χωρίς υψόμετρο	Πεδιάδα	3
B.Με υψόμετρο		
1.Ομοιόμορφοι τόνοι	Πεζούλια, στρώμα λίμνης	2
2.Ανώμαλες επιφάνειες, απότομοι βράχοι	Βασαλτικό οροπέδιο	1
3.Πορώδη στρώματα πάνω από αδιαπέρατα στρώματα	Στρώμα λίμνης, παράκτια πεδιάδα, ιζηματογενή οροπέδια	1
<b>II.Λοφώδης έδαφος</b>		
A.Η επιφάνεια απορροής δεν είναι ενοποιημένη		
1.Διακοπτόμενη απορροή	Ασβεστόλιθος	3
2.Διαταραγμένη απορροή σχετιζόμενη με λίμνες και βάλτους	Μάζα εδάφους στους πρόποδες ενός βουνού	2
B.Ενοποιημένη επιφάνεια απορροής		
1.Παράλληλες κορυφογραμμές		
α.Παράλληλη απορροή, σκούροι τόνοι	Βασαλτικοί λόφοι	1
β.Δικτυωτή απορροή, τοπογραφία κορυφογραμμής - κοιλάδας	Τηγμένοι ιζηματογενείς βράχοι	1
γ.Εμποδισμένη απορροή, κατακόρυφα χαντάκια	Χώμα από εναπόθεση άμμου	2
2.Διακλαδωτές κορυφογραμμές, κορυφές με μέτριο ύψος		
α.Εμποδισμένη απορροή, κατακόρυφα χαντάκια	Χώμα από εναπόθεση άμμου	2
β.Δεντροειδής απορροή		
i.Banding on slope	Επίπεδοι ιζημ/νείς βράχοι	2
ii.No banding on slope		
(a)Μέτρια ως υψηλή ανατομή κορυφ/μων, ομοιόμορφες πλαγιές	Αργιλικοί ασβεστόλιθοι	1
(b)Χαμηλές κορυφ/μές σχετιζόμενες με ακτές	Διαμελισμένη Παράκτια πεδιάδα	1
(c)Κυματιστές κορυφ/μές σχετιζόμενες με κωνικούς λόφους, μικρή βλάστηση	Σερπεντινίτης	1

Τοπογραφία	Γεωλογικοί σχηματισμοί	Πιθ/τητα Κατολίσθησης
3. Τυχαίες κρυφ/μές ή λόφοι		
α. Δεντροειδής απορροή		
i. Χαμηλοί, στρογγυλοί λόφοι, ελικοειδή ρεύματα	Αργίλιοι σχιστόλιθοι	1
ii. Κυματιστές κορυφ/μές σχετιζόμενες με κωνικούς λόφους, μικρή βλάστηση	Σερπεντινίτης	1
iii. Ομοιόμορφοι στρογγυλοί λόφοι	Γρανίτης	2
iv. Ανώμαλη τοπογραφία (μόνο παγετώδεις περιοχές)	Μάζα εδάφους στους πρόποδες ενός βουνού	2
<b>III. Επίπεδο ως λοφώδες, στρωματοειδές έδαφος</b>		
A. Απότομες πλαγιές	Κώνοι κορημάτων, κολούβια	1
B. Μέτριες ως επίπεδες πλαγιές	Αλλουβιακά ριπίδια, Δέλτα	3
Γ. Λοφώδης πλαγιές με γκρεμό στη κορυφή	Παλαιά ολίσθηση	1

**Πίνακας 3.1 :** Κατανομή των συχνοτήτων των κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο σε σχέση με τα γενικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής.

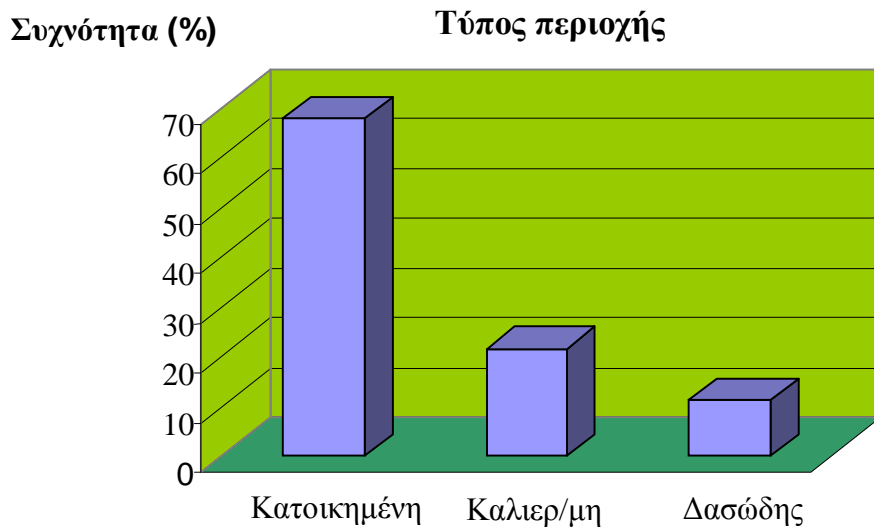
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΧΝ/ΤΑ ΚΑΤΟΛ/ΩΝ (%)	ΕΜΒΑΔΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (%)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝ/ΤΑ
Τύπος περιοχής	Κατοικημένη	67.71		
	Καλλιεργήσιμη	21.50		
	Δασώδης	11.09		
Τοπογραφικό ανάγλυφο	Έντονο	61.03		
	Μέτριο	33.52		
	Ήπιο	5.44		
Τύπος - Στάδιο Διάβρωσης	Αρχική	6.77		
	Επιφ/κή	93.03		
	Προχωρημένη	0.20		
	Τελική			
	Αρχική	17.56		
	Χειμαρρώδης	82.01		
	Προχ/νη	0.44		
	Τελική			
	Αρχική	5.88		
Βαθιά Προχ/νη	91.76			
Τελική	2.35			

Υψόμετρο	0-200m(επίπεδο)	20.79	34.58	13.97
	200-600m(λοφώδες)	41.17	34.83	27.80
	600-1000m(ημι- ορ/νό)	31.32	19.61	37.12
	1000-1600m(ορεινό)	6.14	6.93	20.59
	>1600m(πολύορεινό)	0.10	4.00	0.52
Μέση ετήσια βροχόπτωση	<400mm	1.44	1.72	7.94
	400-600mm	10.05	21.76	4.38
	600-800mm	18.85	32.74	5.45
	800-1000mm	20.02	17.84	10.64
	1000-1400mm	26.66	22.32	11.33
	>1400	22.98	3.62	60.24

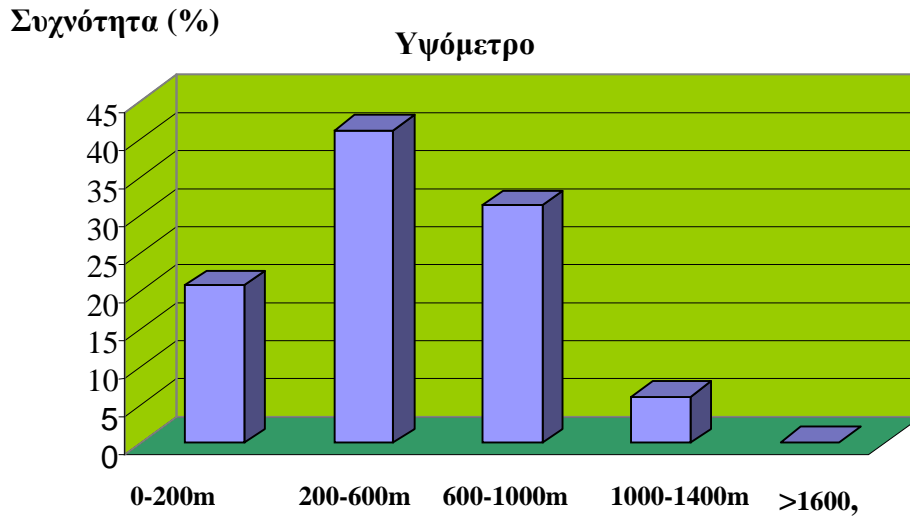
**Πίνακας 3.2 :** Κατανομή συχνοτήτων των κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο σε σχέση με τη λιθολογία.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ	ΣΥΧΝ/ΓΑ ΚΑΤΟΛΙΣΘ/ΩΝ (%)	ΕΜΒΑΔΟ ΠΕΡΙΟΧΗΣ (%)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
Γεωτεκτονική Ζώνη	Ροδόπη	3,00		
	Σερβομακεδονία	0,33		
	Περιοδοπική	0,00		
	Αξιός	2,66		
	Πελαγονία	41,67		
	Παρνασσός	4,00		
	Πίνδος	36,67		
	Γάρβοβο ιονία	4,33 5,00		
	Πάξος	2,33		
	Λιθολογικός τύπος	Πρόσφατα- χαλαρά	20,65	15,87
Νεογενή		28,20	24	11,74
Φλύσχης		30,35	8,48	35,75
Σχιστόλιθοι		3,62	1,22	29,64
Ασβεστόλιθοι- Μάρμαρα		4,85	19,5	2,48
Μεταμορφικά		9,32	18,35	5,07
Ηφαιστειακά		3,00	12,58	2,37

**Πίνακας 3.3:** Κατανομή συχνοτήτων των κατολισθήσεων στον ελληνικό χώρο σε σχέση με τη Δομή.



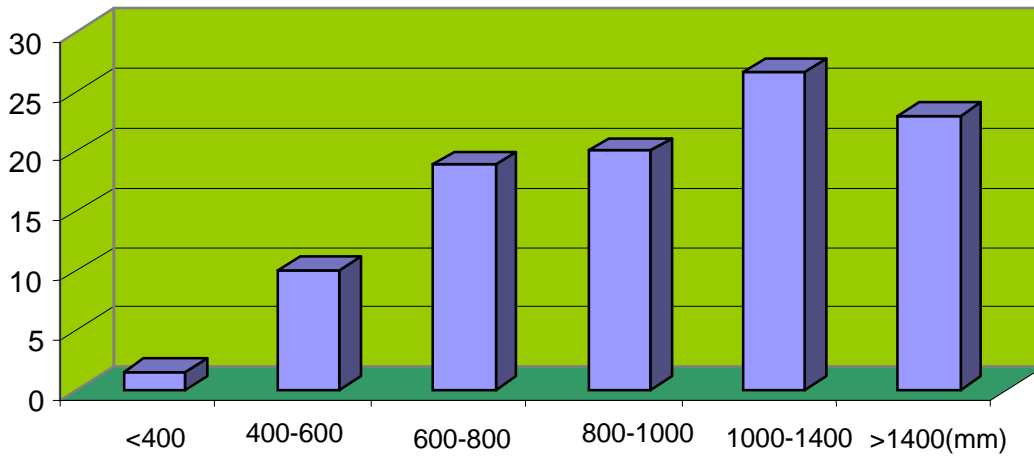
**Εικόνα 3-1:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τον τύπο της περιοχής.



**Εικόνα 3-2:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το υψόμετρο της περιοχής.

Συχνότητα (%)

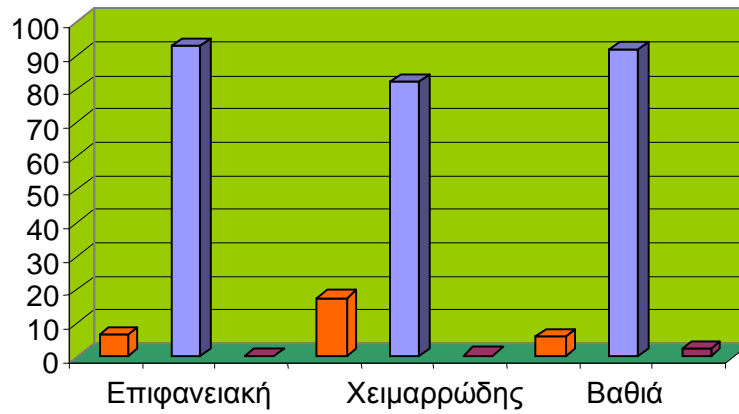
### Μέση Ετήσια Βροχόπτωση



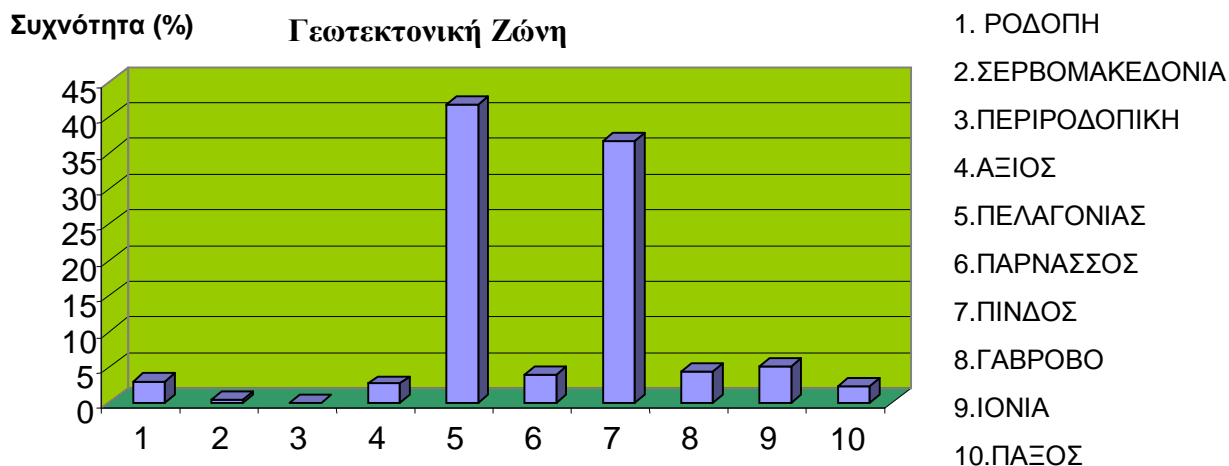
**Εικόνα 3-3 :** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τη μέση ετήσια βροχόπτωση.

Συχνότητα (%)

### Τύπος-Στάδιο Διάβρωσης



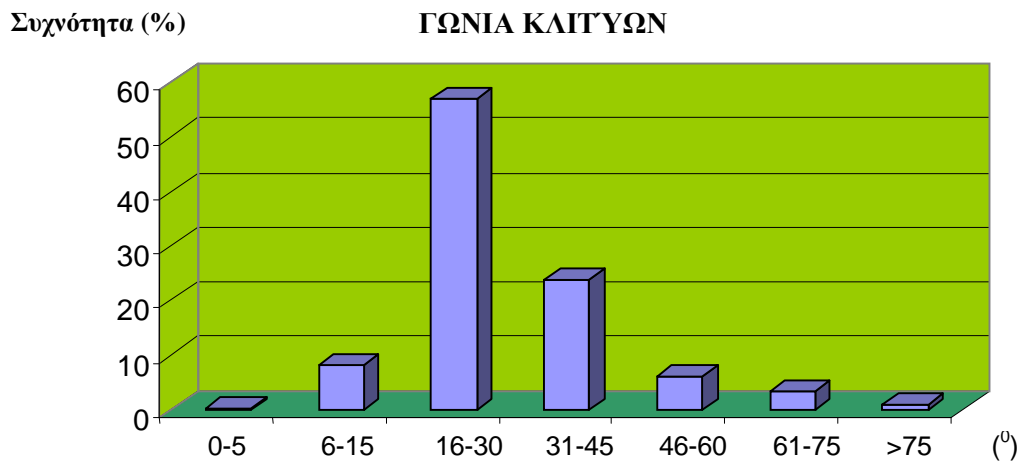
**Εικόνα 3-4:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τον τύπο και το στάδιο διάβρωσης της περιοχής.



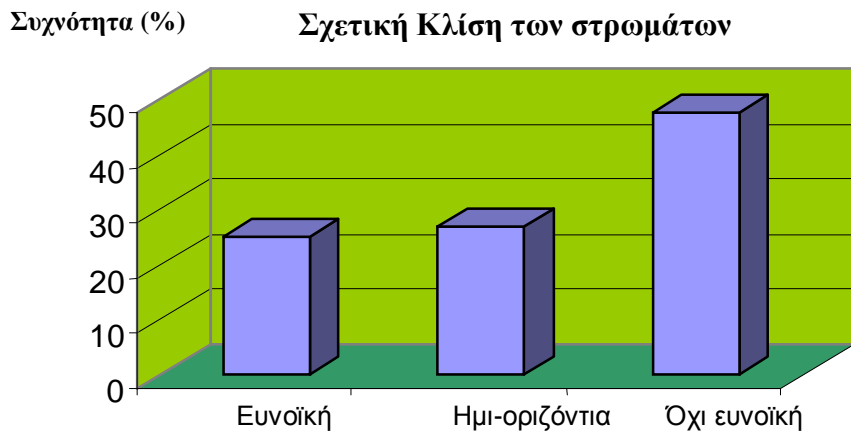
**Εικόνα 3-5:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τις γεωτεκτονικές ζώνες.



**Εικόνα 3-6:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το λιθολογικό τύπο.

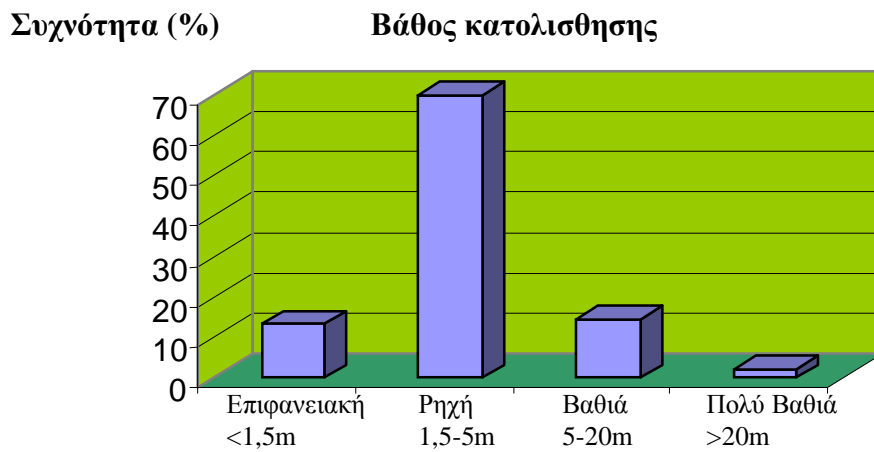


**Εικόνα 3-7:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τη γωνία κλίσης των πρανών.

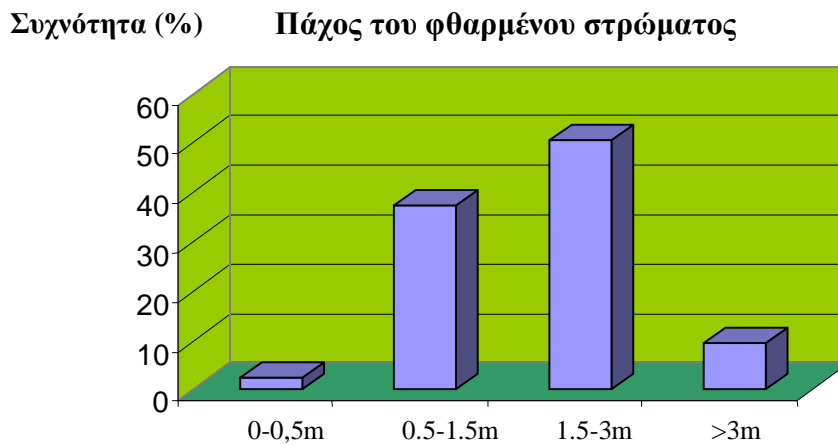


**Εικόνα 3-8:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με τη σχετική κλίση των στρωμάτων της περιοχής.

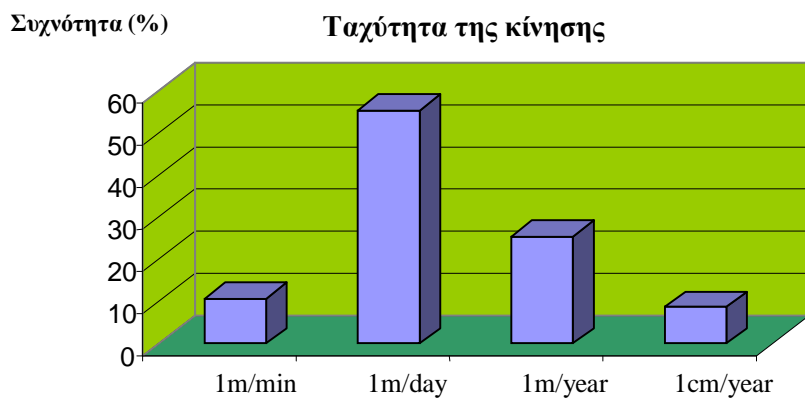




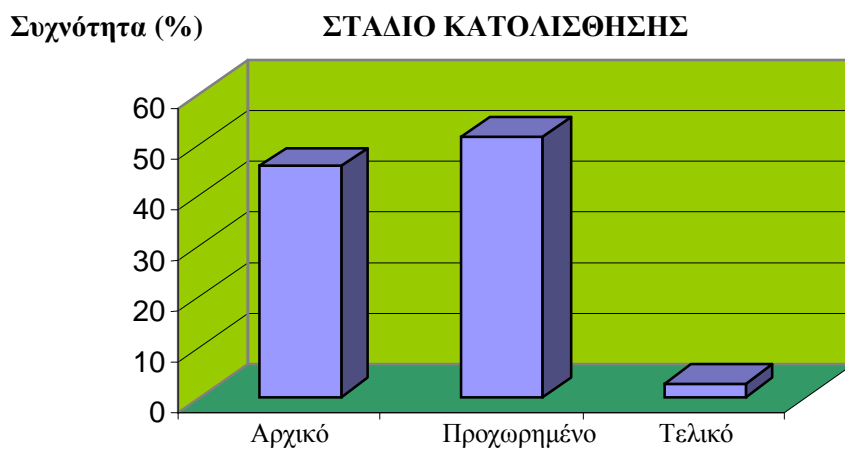
**Εικόνα 3-9:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το βάθος της κατολίσησης.



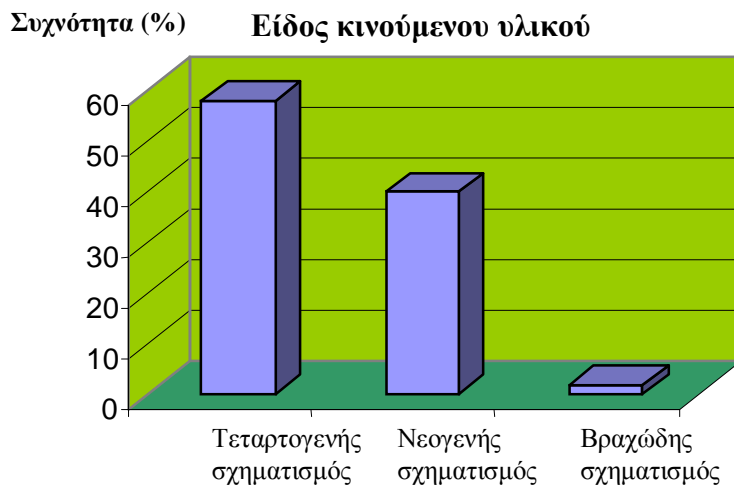
**Εικόνα 3-10:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το πάχος του φθαρμένου στρώματος.



**Εικόνα 3-11:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με την ταχύτητα της κίνησης.

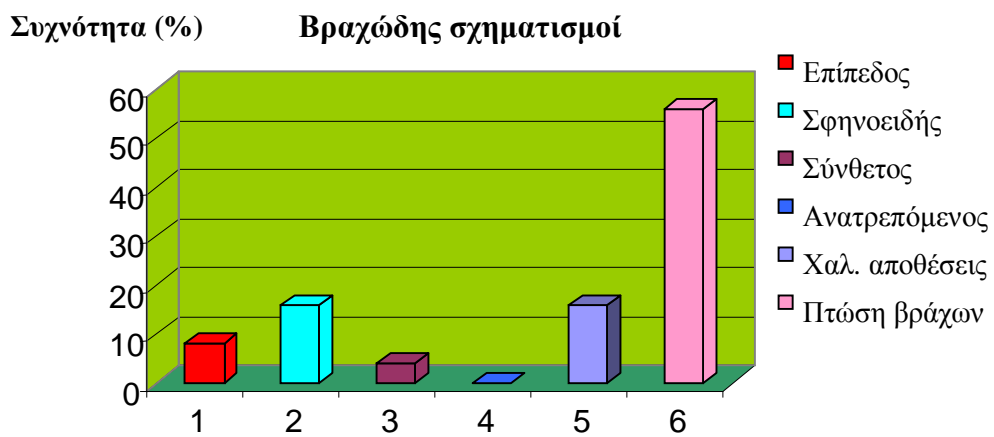
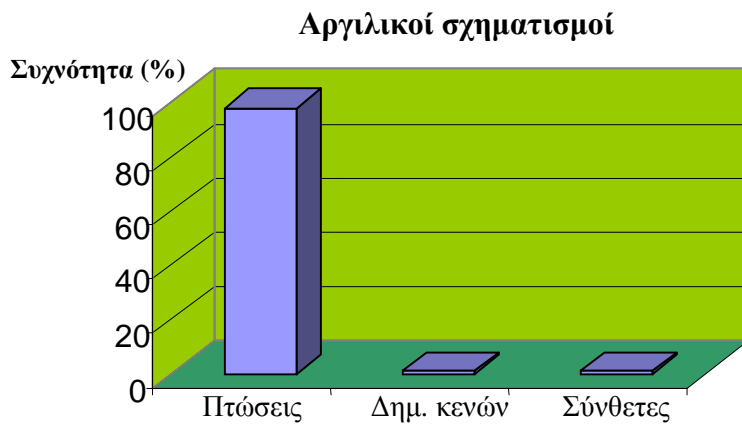


**Εικόνα 3-12:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το στάδιο της κατολίσθησης.



**Εικόνα 3-13:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το είδος του κινούμενου υλικού.





**Εικόνα 3-14:** Ιστόγραμμα συχνότητας κατολισθήσεων στην Ελλάδα ανάλογα με το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1 το μεγαλύτερο ποσοστό των κινήσεων έχει παρατηρηθεί σε κατοικημένες περιοχές με έντονο προς μέτριο ανάγλυφο, που παρουσιάζει ένα προχωρημένο στάδιο διάβρωσης, σε υψόμετρο από 200 ως 1000 m και με μέση ετήσια βροχόπτωση μεγαλύτερη από 1000 mm. Στον πίνακα 3.1 αν ληφθεί υπόψη η σχετική συχνότητα των κατολισθήσεων υπολογίζοντας την γεωγραφική περιοχή που αναφέρεται σε διαφορετικούς διαχωρισμούς του υψομέτρου και του μέσου ετήσιου ύψους βροχόπτωσης, τότε οι υψηλότερες τιμές της κατανομής των κατολισθήσεων παρατηρούνται σε ημι-ορεινές περιοχές και με μέσο ύψος ετήσιας βροχόπτωσης μεγαλύτερο από 1400mm.

Ανάλογα με το είδος των ιζημάτων που παρατηρούνται στις κατολισθητικές κινήσεις, τα μεγαλύτερα ποσοστά παρουσιάζουν οι σχηματισμοί από φλύσχη. Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική συχνότητα που επηρεάζεται από το ποσοστό της περιοχής που καλύπτεται από κάθε λιθολογικό είδος, οι μεγαλύτερες τιμές αναφέρονται στους σχηματισμούς από φλύσχη και ακολουθούνται από νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Οι γεωτεκτονικές ζώνες με τη μεγαλύτερη συχνότητα σε κατολισθήσεις είναι οι ζώνες της Πελαγονίας και της Πίνδου.

Όσον αφορά στο είδος των κατολισθήσεων, οι συχνότεροι τύποι των χαλαρών τεταρτογενών αποθέσεων και φθαρμένων ζωνών είναι: ερπυσμός, ροή χώματος, ροή καταλοίπων και αποφλοιώση. Οι αργιλικοί σχηματισμοί νεογενείς αποθέσεις και φλύσχης παρουσιάζουν κυρίως καταρακυλήματα, ενώ οι πτώσεις βράχων είναι ο κύριος τύπος κινήσεων σε βραχώδεις σχηματισμούς ( πίνακας 3.3 ).

Σύμφωνα με τον πίνακα 3.3, οι περισσότερες κατολισθήσεις συμβαίνουν σε κλιτύες με κλίση  $16^{\circ}$  έως  $45^{\circ}$  και με μη ευνοϊκή διεύθυνση των στρωμάτων (σχεδόν με την ίδια διεύθυνση βύθισης με αυτή της πλαγιάς). Όσον αφορά στο βάθος και την ταχύτητα της κατολίθησης το μεγαλύτερο ποσοστό ανήκει στο ρηχό τύπο με υψηλή ταχύτητα (m/day), στο αρχικό και πολύ ενεργό στάδιο.

**Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που προκαλούν τις κατολισθήσεις είναι:** Η αύξηση της πίεσης των πόρων, η λιθολογία, η φθορά και η υφή των υλικών, η παρουσία εναλλασσόμενων “μαλακών” και “σκληρών” ή διαπερατών και αδιαπέραστων στρωμάτων, η διεύθυνση της πλαγιάς και οι βροχοπτώσεις. Επιπλέον, οι κυρίαρχοι λόγοι που ευθύνονται για το έναυσμα της κίνησης είναι: έντονη διάβρωση, ανθρώπινη δραστηριότητα, ισχυρές βροχοπτώσεις και σεισμική δραστηριότητα.

Τέλος, από τις περιπτώσεις, που έχουν αναγραφεί, το μεγαλύτερο ποσοστό των κατολισθήσεων έχει επηρεάσει κατοικημένες περιοχές. Οι πιο σοβαρές επιπτώσεις αναφέρονται σε: ρωγμές σε τοίχους, καταστροφή κτιρίων, εδαφικές αστοχίες, προβλήματα στη θεμελίωση κτιρίων και τεχνικών έργων, καταστροφή ή ζημιές στο οδικό δίκτυο. Τα προτεινόμενα μέτρα αναφέρονται σε: επιφάνεια και υποεπιφάνεια απορροής, κατασκευή έργων στήριξης και δενδροφύτευση των επιφανειών των κλιτύων.

#### 4.4 ΣΚΙΑΓΡΑΦΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ

Στη γεωλογική δομή του Ελληνικού χώρου συμμετέχουν εννέα ισοπικές ζώνες, οι λιθοστρωματογραφικές ενότητες των οποίων αποκαλύπτουν την παλαιογεωγραφική και τεκτονική εξέλιξη των Ελληνίδων κατά τη διάρκεια του Αλπικού κύκλου ορογένεσης. Οι ζώνες αυτές, με γενική διάταξη ΒΒΔ – ΝΝΔ, διακρίνονται σε δύο ομάδες, τις εσωτερικές και τις εξωτερικές, κατά τη διεύθυνση εξέλιξης των γεωτεκτονικών συμβάντων (από ανατολικά προς δυτικά).

Οι εξωτερικές ζώνες, οι περισσότερες από τις οποίες συμμετέχουν στη δομή της Πελοποννήσου, είναι οι ακόλουθες :

**1. Ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας:** Αναπτύσσεται κυρίως στη Στερεά Ελλάδα και Ανατολική Πελοπόννησο.

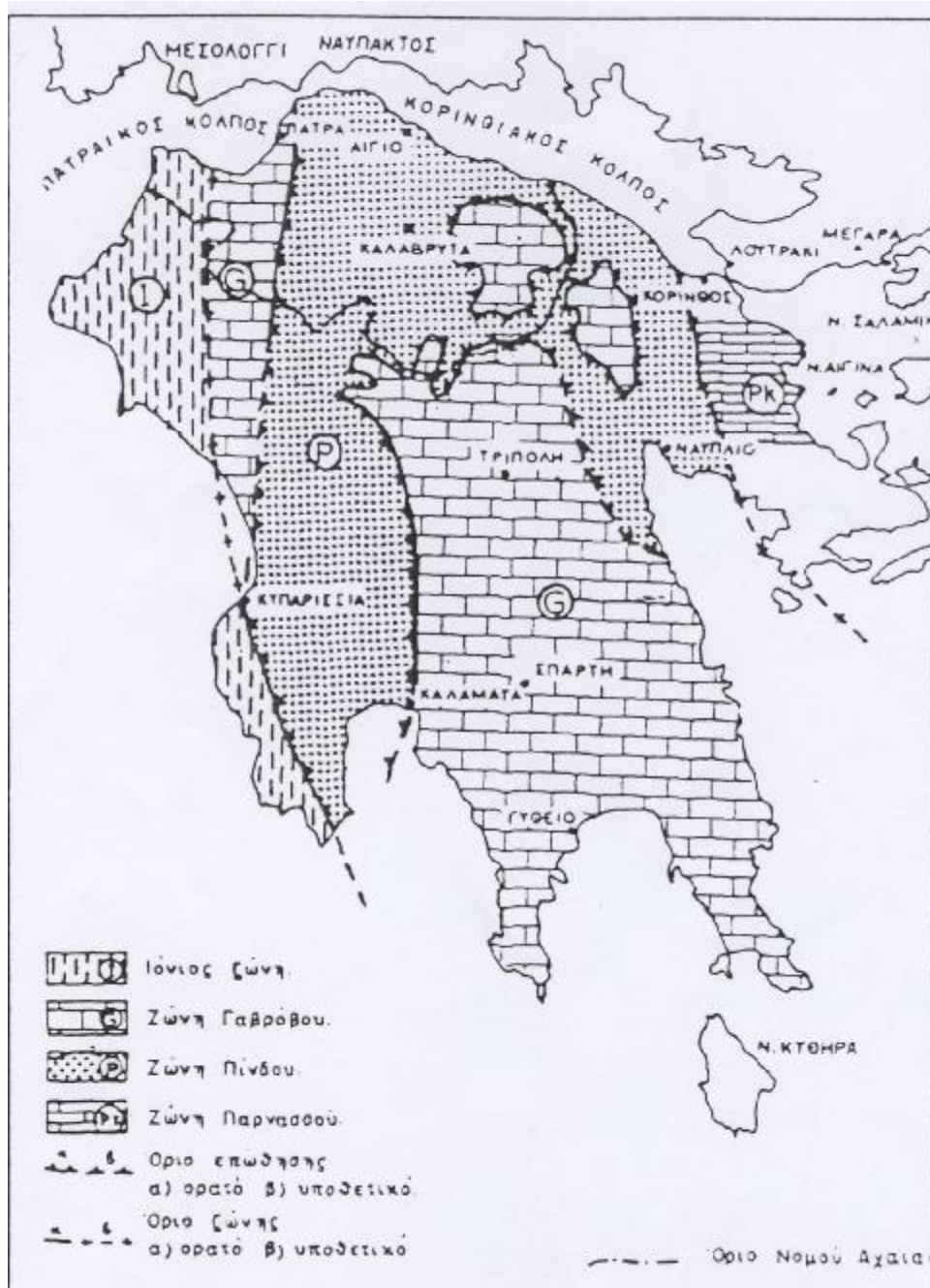
**2. Ζώνη Ωλονού – Πίνδου:** Επεκτείνεται από τα Αλβανικά σύνορα μέχρι την Κρήτη.

**3. Ζώνη Γαβρόβου – Τριπόλεως:** Εντοπίζεται στην Ήπειρο, Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησο και Κρήτη.

**4. Ζώνη Ιόνιος ή Ανδριατικοϊόνιος:** Εμφανίζεται στη Δυτική Ελλάδα και Ήπειρο μέχρι Πελοπόννησο και Κρήτη.

**5. Ζώνη Παξών ή Προαπούλιος:** Καλύπτει μέρος των Ιονίων νησιών.

**Χάρτης 3 – 1 :** Σκαρίφημα των Ισοπικών ζωνών των Ελληνίδων οι οποίες συμμετέχουν στη δομή της Πελοποννήσου και η τεκτονική τους σχέση.



Ο χάρτης 3.1 δίνει τα οριογραφικά σύνορα των ζωνών εκείνων που δομούν την Πελοπόννησο. Έτσι φαίνεται ότι στη γεωλογική δομή του νομού Αχαΐας συμμετέχουν σχηματισμοί από τρεις ζώνες : Ωλονού – Πίνδου, Γαβρόβου – Τριπόλεως και Ιόνιο ή Αδριατικοϊόνιο ζώνη, που κατά θέσεις καλύπτονται ασύμφωνα από Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

### ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝ ΤΙΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

Το γεωλογικό 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 ταράξουν την ισορροπία μιας φυσικής κλιτύος ή ενός τεχνητού πρανού, πρέπει να απαριθμηθούν μεταξύ των αιτιών των κατολισθήσεων. Μερικοί από τους παράγοντες προϋπάρχουν και δρουν για μεγάλο ή μικρό χρονικό διάστημα, ενώ άλλοι παράγοντες είναι παροδικοί ή περιοδικοί και παρέχουν την αφορμή για την εκδήλωση του φαινομένου. Συνεπώς, άλλοι παράγοντες αποτελούν την αιτία των κατολισθήσεων και άλλοι την αφορμή.

Ένας άλλος διαχωρισμός των παραγόντων είναι εκείνος, ο οποίος τα διακρίνει σε **πρωτογενή** και **δευτερογενή**. Στα μεν πρωτογενή ανήκουν όλοι εκείνοι οι παράγοντες που δημιουργούν την προδιάθεση ολίσθησης ενός σχηματισμού, στα δε δευτερογενή αίτια, εκείνοι που προκαλούν άμεσα την κατολίσθηση. Τα πρωτογενή αίτια αφορούν στη γεωτεκτονική της περιοχής και στο κλίμα, ενώ τα δευτερογενή στις τοπικές και παροδικές συνθήκες, καθώς και στην επίδραση του ανθρώπου.

Στην συνέχεια παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας όλων των παραγόντων, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό μια κατολίσθηση.

### **ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

1. Αδύνατα υλικά
2. Ευαίσθητα υλικά
3. Φθαρμένα από τον καιρό υλικά
4. Απογυμνωμένα υλικά
5. Ενωμένα υλικά ή υλικά με ρωγμές
6. Δυσμενείς ασυνέχειες μαζών (Στρωματοποίηση, σχιστότητα)
7. Δυσμενείς ασυνέχειες στη δομή (ρήγματα, ανομοιογένειες, κ.λ.π.)
8. Διαφορές των υλικών στη διείδυση του νερού
9. Διαφορές των υλικών στη σκληρότητα των υλικών (σκληρό, πυκνό υλικό πάνω από πλαστικά υλικά)



## **ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

1. Τεκτονική ή ηφαιστειακή ανύψωση
2. Παγετώδες υπόβαθρο
3. Ποτάμια διάβρωση του ποδός της κλιτύος
4. Διάβρωση λόγω κυματισμού του ποδός της κλιτύος
5. Διάβρωση λόγω παγετού του ποδός της κλιτύος
6. Διάβρωση των πλευρικών περιθωρίων
7. Υπόγεια διάβρωση (διάλυμα, σωλήνωση)
8. Εναπόθεση υλικών στην πλαγιά ή στην κορυφογραμμή
9. Αφαίρεση βλάστησης (πυρκαγιά, υγρασία)

## **ΦΥΣΙΚΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

1. Έντονη βροχόπτωση
2. Γρήγορο λιώσιμο του χιονιού
3. Παρατεταμένα κατακρημνίσματα μεγάλου βαθμού
4. Γρήγορη αποστράγγιση των νερών (από πλημμύρες και παλίρροιες)
5. Σεισμός
6. Ηφαιστειακή έκρηξη
7. Τήξη νερού
8. Εξασθένηση του υλικού λόγω πήξης και τήξης του νερού των πόρων
9. Εξασθένηση του υλικού λόγω συστολής και διαστολής

## **ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ**

1. Εκσκαφή της κλιτύος ή του ποδός της
2. Επιφόρτιση της κλιτύος ή της κορυφογραμμής
3. Αποστράγγιση των υπόγειων υδάτων
4. Αποδάσωση
5. Άρδευση
6. Εξόρυξη
7. Τεχνητή δόνηση
8. Διαρροή νερού από διάφορες εγκαταστάσεις

Στη συνέχεια γίνεται μια αναφορά στα κυριότερα αίτια των κατολισθήσεων

## 5.1 ΠΡΩΤΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ

### **5.1.1 Η δομή του γεωλογικού υπόβαθρου και η τεκτονική της περιοχής.**

Η δομή του γεωλογικού υπόβαθρου αφορά τη θέση των στρωμάτων στο υπέδαφος καθώς και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά. Στο σημείο αυτό γίνεται φανερό ότι ένα έδαφος που αποτελείται από πολλά και ετερογενή στρώματα 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.

### **5.1.2 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. Πιο λεπτομερειακά, μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις κατηγορίες πετρωμάτων, σε κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχούν διάφορες συνθήκες.

1. **Συνεκτικά:** Τα πετρώματα αυτά άσχετα από συνθήκες κορεσμού παραμένουν συνεκτικά. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα συμπαγή βραχώδη πετρώματα που δεν έχουν διαρρήξεις (σπάνια κατολισθαίνουν).
2. **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 ιλύς και όλα τα πετρώματα που η συνδετική τους ύλη είναι αργιλική ή ιλυούχος (σε υγρά κλίματα κατολισθαίνουν πολύ συχνά).
3. **Ημισυνεκτικά:** Εδώ ανήκουν πετρώματα που η συνδετική τους ύλη (συνήθως ασβεστολιθική) είναι είτε κακής ποιότητας είτε ελλιπείς, όπως οι μολάσσες και τα πολύ εξαλλοιωμένα πετρώματα που η συνδετική τους ύλη (συνήθως

ασβεστολιθική) είναι είτε κακής ποιότητας είτε ελλιπείς, όπως οι μολλάσες και τα πολύ εξαλλοιωμένα πετρώματα όπως π.χ. εξαλλοιωμένοι: ψαμμίτες, τόφοι, γρανίτες, σερπεντινίτες κ.α., τα κατακερατισμένα συνεκτικά πετρώματα, τα πλούσια σε λεπτοκλαστικά υλικά και τα σχιστολιθικά

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

Θα πρέπει να προστεθεί ότι στη φύση είναι συνηθισμένο να εναλλάσσονται διάφοροι τύποι πετρωμάτων, π.χ. συνεκτικά με μη συνεκτικά, συνεκτικά με ψευδοσυνεκτικά κ.τ.λ. Σ'αυτές τις περιπτώσεις οι συνθήκες ευστάθειας του εδάφους καθορίζονται από τα πετρώματα με τη μεγαλύτερη κατολισθητικότητα.

### **5.1.3 Οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή**

Το ύψος του νερού που πέφτει στην περιοχή, με τη μορφή βροχόπτωσης ή χιονόπτωσης μπορεί να δώσει το έναυσμα της κατολίσθησης είτε μειώνοντας την αντοχή του εδάφους, είτε αυξάνοντας την εσωτερική εντασή του. Η επίδραση του νερού συνίσταται είτε στο γεγονός ότι αυξάνεται η ποσότητα του 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.

### **5.1.4 Η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς 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 πολλές φορές και στα πρανή ρηγμάτων, όταν αυτά ενεργοποιούνται μετά από μια σεισμική δόνηση.

### **5.1.5 Η γεωδυναμική εξέλιξη που σημειώνεται σε περιοχές με νεοτεκτονική δραστηριότητα.**

Μέσω αυτών των εξελίξεων μπορούν να ανυψωθούν και να τοποθετηθούν με κλίση εδαφικά στρώματα. Οι μεταβολές αυτές είναι δυνατό να ταραξουν οριακές ισορροπίες ώστε να προκληθεί κατολίσθηση.

## **5.2 ΔΕΥΤΕΡΟΓΕΝΗ ΑΙΤΙΑ**

Τα δευτερογενή αίτια μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα **εξωγενή** αίτια, τα οποία συμβάλουν στην αύξηση της διατμητικής τάσης και τα **ενδογενή** αίτια, τα οποία μειώνουν την εσωτερική αντοχή του εδάφους.

### **5.2.1 Εξωγενή Αίτια**

#### **5.2.1.1 Αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους**

Αύξηση του φαινομένου ειδικού βάρους ή βάρους του όγκου των υλικών (στερεά + υγρή + αέρια φύση) μπορεί να πραγματοποιηθεί με προσθήκη νερού μέσα σ' αυτά, από διείδυση, πλευρική διήθηση ή τριχοειδή ανύψωση. Έτσι αν ένα πρανές έχει γωνία κλίσεως που πλησιάζει τη γωνία ηρεμίας, η προσρόφηση νερού ακόμη και σε μικρή ποσότητα μπορεί να αποτελέσει την αιτία για την εκδήλωση κατολίσθησης.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αύξηση του βάρους λόγω της προσθήκης νερού μέσα στους πόρους των υλικών, υπάρχει μόνο για όσα από αυτά βρίσκονται ψηλότερα από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Κάτω από αυτόν τα υλικά υφίστανται την άνωση και το βάρος τους γίνεται μικρότερο.

#### **5.2.1.2 Αύξηση της κλίσεως των πρανών**

Αύξηση της κλίσεως των πρανών μπορεί να γίνει είτε από φυσικούς παράγοντες, είτε από ανθρώπινη επέμβαση.

Ο κύριος φυσικός παράγοντας είναι η διάβρωση των πετρωμάτων η προκαλούμενη από τη ροή νερού ή την ενέργεια των κυμάτων (θάλασσας ή λίμνης). Με τη διεργασία της διαβρώσεως π.χ. ενός χειμάρρου, η κλίση των πλευρών του μεγαλώνει, με συνέπεια να εκδηλωθεί κατολίσθηση, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κατολισθητικότητας των υλικών που τις συνθέτουν.

Ανθρώπινες επεμβάσεις, που προκαλούν αυξήσεις των κλίσεων των κλιτύων, είναι οι πάσης φύσεως εκχωματώσεις, όπως αυτές που γίνονται στις ανοικτές εκσκαφές μεταλλευτικών εκμεταλλεύσεων, στις κατασκευές συγκοινωνιακών έργων, στις κατασκευές διωρύγων, ορυγμάτων, εκσκαφών, θεμελίων κ.τ.λ.

Είναι λοιπόν φανερό ότι κατά τις εκχωματώσεις και κατά τις κατασκευές επιχωμάτων, η κλίση που πρέπει να δίνεται στα πρανή πρέπει να είναι αισθητά κατώτερη από τη γωνία ηρεμίας των υλικών, αν ληφθεί υπ' όψη ότι η γωνία αυτή μεταβάλλεται για το ίδιο υλικό ανάλογα με την ποσότητα του νερού που περιέχεται μέσα σε αυτό.

### **5.2.1.3 Αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου**

Αύξηση του βάρους από επιβολή φορτίου μπορεί να γίνει είτε από φυσικές διεργασίες είτε από τεχνητές παρεμβάσεις.

Στις φυσικές διεργασίες περιλαμβάνεται η μετακίνηση υλικών και η εκ νέου απόθεσή τους σε νέες θέσεις. Τέτοιες διεργασίες μπορούν να γίνουν είτε από τα νερά της βροχής, είτε από κατακρημνίσεις βράχων και καταπτώσεις απότομων κλιτύων. Μεγάλη αύξηση του βάρους μπορεί να γίνει επίσης από τη συσσώρευση χιονιού σε ορισμένες θέσεις.

Η επιβολή φορτίων που οφείλονται σε επέμβαση του ανθρώπου, με κατασκευές έργων πάνω σε κλιτύες ή σε επιχωματώσεις, αποτελεί την τεχνητή αύξηση του βάρους και οι συνέπειες απ' αυτή μπορεί να είναι καταστροφικές αν δε ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα.

## **5.2.2 Ενδογενείς παράγοντες**

### **5.2.2.1 Αύξηση της ανώσεως**

Αύξηση της ανώσεως που εξασκείται σε μία μάζα από τα υπόγεια νερά, μπορεί να προκληθεί από την άνοδο της πιεζομετρικής επιφάνειας. Έτσι σε περιπτώσεις που ένα τμήμα του υπεδάφους είναι στεγνό και με την άνοδο της στάθμης των υπογείων νερών βρεθεί κάτω από την πιεζομετρική επιφάνεια, το τμήμα αυτό της μάζας υφίσταται άνωση. Η επίδραση της πρέπει να ληφθεί υπόψη στον υπολογισμό της ευστάθειας του πρανούς, γιατί έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση της διατμητικής αντοχής ( $\tau$ ) των υλικών. Στην εξίσωση του Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

όπου :  $c$  = συνοχή

$\sigma$  = κατακόρυφη φόρτιση

$\varphi$  = γωνία εσωτερικής τριβής

η  $\sigma$  πρέπει να μειωθεί εξαιτίας της αντίθετης δράσης της άνωσης ( $u_w$ ) και η εξίσωση να τροποποιηθεί σε:

$$\tau = c + (\sigma - u_w) \tan \varphi$$

Αυτό δείχνει ότι κι αν ακόμη η παρουσία υπόγειου δεν ελαττώσει τη συνοχή και τη γωνία εσωτερικής τριβής, η δράση της άνωσης και μόνο μειώνει τη διατμητική αντοχή του εδάφους.

Στην περίπτωση ισορροπίας των υπογείων νερών , η συνισταμένη της ανώσεως είναι κατακόρυφη και αντίθετη προς τη διεύθυνση της βαρύτητας (υδροστατική πίεση), αν όμως υπάρχει κίνηση των υπογείων νερών τότε η άνωση περιλαμβάνει και μια οριζόντια συνιστώσα με φορά ομόρροπη προς αυτή της υπόγειας ροής.

#### **5.2.2.1 Η αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων**

Η αύξηση της πίεσεως του νερού των πόρων, γνωστή και σαν ουδέτερη τάση ( $u_w$ ), προκαλεί αντίστοιχη ελάττωση της ενεργού τάσεως και επομένως οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής. Καθώς αυξάνεται, λοιπόν η πίεση των πόρων, ευνοούνται αντίστοιχα και οι εκδηλώσεις κατολισθήσεων. Σε μία αύξηση πού προκαλείται όταν για παράδειγμα, ένα υλικό με πολύ μικρή υδροπερατότητα, υποβληθεί σε γρήγορη συμπίεση (συνθήκες κακής αποστραγγίσεως), το αποτέλεσμα είναι να εξασκείται πίεση, η οποία αντισταθμίζεται με κατανάλωση μέρους της ορθής τάσης δηλαδή μείωση της ενεργού τάσης και επομένως ελάττωση της διατμητικής αντοχής.

#### **5.2.2.3 Η ελάττωση της συνοχής**

Η ελάττωση της συνοχής προκαλείται συνήθως από τις επιδράσεις των υπόγειων νερών. Οι επιδράσεις αυτές μπορεί να είναι η χημική αποσάθρωση, η απομάκρυνση λεπτόκοκκων υλικών που πραγματοποιείται από τη ροή των υπόγειων νερών, η χαλάρωση εξ' αιτίας της διαδοχικής τήξης και πήξης του νερού των πόρων των πετρωμάτων και η διόγκωση των αργιλικών ορυκτών. Ελάττωση της συνοχής

μπορεί να προκληθεί επίσης από κραδασμούς υψηλής συχνότητας, δημιουργούμενους από σεισμούς ή εκρήξεις.

Σε ελάχιστες μόνο περιπτώσεις π.χ. σε μία λεπτόκοκκη άμμο, η μικρή περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη μικρής συνοχής, η οποία οφείλεται στις επιφανειακές τάσεις των μηνίσκων του νερού των τριχοειδών. Όταν όμως το υλικό κορεστεί η συνοχή μηδενίζεται. Στην περίπτωση ορυκτών πλούσιων σε άργιλο, η πλήρης ξήρανσή τους δημιουργεί συρρίκνωση και εξ'αιτίας αυτής σχισμές πολυγωνικής όψεως, άρα κατάτμηση της μάζας και ελάττωση της συνοχής της. Αυτή η περίπτωση είναι και η μόνη στην οποία η ξήρανση προκαλεί μείωση της συνοχής.

#### **5.2.2.4 Ελάττωση της τριβής**

Ελάττωση της τριβής προκαλείται κυρίως από την παρουσία νερού, είτε με τη μορφή της υπόγειας διάβρωσης, που εκτός από τη μείωση της συνοχής μειώνει και την τριβή αφού με την απομάκρυνση του λεπτόκοκκου υλικού μειώνονται οι επιφανειακές τάσεις καθώς και οι τριβόμενες επιφάνειες. Με όμοιο τρόπο, η παρουσία υπόγειου νερού στην επαφή ενός αργλικού και ενός υπερκείμενου υδροπερατού πετρώματος, μειώνει έντονα την μεταξύ τους τριβή, εξ'αιτίας της μετατροπής της αργίλου σε πλαστικό υλικό, που παίζει το ρόλο λιπαντικού.

#### **5.2.2.5 Αύξηση του ύψους και του πλάτους της εκτομής του εδάφους**

Αύξηση του ύψους και του πλάτους της εκτομής του εδάφους προκαλείται είτε με την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα είτε με τη δράση της διάβρωσης. Μια κοιλάδα για παράδειγμα, μπορεί να βαθαινει λόγω της διάβρωσης και να μεγαλώνει το ύψος των κλιτύων χωρίς να αυξάνεται και η κλίση τους. Όταν με την εκβάθυνση ξεπεραστεί το κρίσιμο ύψος πάνω από το οποίο καταστρέφεται η ισορροπία του, τότε η κλιτύς κατολισθαίνει.

Για το μηχανικό γεωλόγο έχει μεγάλη σημασία να μπορέσει να διαγνώσει τις αιτίες που μπορούν να επιφέρουν μία κατολίσθηση και ενδεχόμενα να προτείνει ή να προβεί σε διάφορα μέτρα προστασίας και απότρευσης αυτών των φαινομένων. Οι παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν μία κατολίσθηση είναι:

- **Μεταβολή της κλίσης ή του ύψους ενός πρανούς:**

Αυτή μπορεί να προκληθεί με έκπλυση και αφαίρεση υλικών από τη βάση του πρανούς εξ' αιτίας φαινομένων διάβρωσης ή με τη δράση ηπειρογενετικών τεκτονικών κινήσεων. Τεχνητός αυτές μπορούν να προκληθούν με εκχωμάτωση της βάσης του πρανούς ή με διάφορες άλλες κατασκευαστικές εργασίες (μεταλλεία κ.λ.π.). Μία τέτοια αύξηση της κλίσης επιφέρει μεταβολή στην ισορροπία των τάσεων του πετρώματος και προκαλεί αύξηση των δυνάμεων που προκαλούν μετατόπιση τεμαχίων.

- **Μεταβολή του βάρους του πετρώματος:**

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να προκληθεί εξ' αιτίας διαφόρων φαινομένων αποσάθρωσης και μεταβολές της περιεκτικότητας σε νερό των διαφόρων συνεκτικών πετρωμάτων, Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται καινούριες κατατμήσεις, και η συνοχή του πετρώματος ελαττώνεται και τα διάφορα φαινόμενα απογύμνωσης επιταχύνονται.

- **Ξαφνική πρόσθετη επιφόρτιση:**

Αυτή προκαλεί μία αύξηση της δύναμης μετατόπισης τεμαχίων και αύξηση της τάσης του νερού στους πόρους συνεκτικών εδαφών, οπότε ελαττώνεται η γωνία εσωτερικής τριβής.

- **Δονήσεις:**

Σε σεισμογενείς περιοχές δημιουργούνται εξ' αιτίας των σεισμών διάφοροι κραδασμοί και ταλαντώσεις των πετρωμάτων με διαφορετική συχνότητα. Ανάλογες δράσεις μπορούν να προκαλέσουν εκρήξεις με μεγάλη περιεκτικότητα εκρηκτικών και μηχανές επίσης που προκαλούν κραδασμούς. Σε κάθε πέτρωμα δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο εφήμερες μεταβολές των τάσεων, που διακόπτουν την ισορροπία των πρανών.

- **Μεταβολή της περιεκτικότητας νερού των πετρωμάτων:**

Το νερό της βροχής και του χιονιού εισέρχεται στις κατατμήσεις, όπου δημιουργείται μία υδροστατική πίεση και στα χαλαρά πετρώματα αυξάνεται η υδροστατική πίεση των πόρων. Το φαινόμενο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να



ελαττώνεται η συνοχή του πετρώματος και η εσωτερική τριβή. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου τα αργιλικά πετρώματα συμπυκνώνονται, και δημιουργούνται βαθιές ρωγμές.

- **Ταχείες μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού:**

Αυτές δίνουν αφορμή να μεγαλώσουν οι κόκκοι, ιδιαίτερα σε λεπτούς άμμους και πηλούς. Η ξαφνική άνοδος της υδροστατικής πίεσης των πόρων μπορεί να προκαλέσει μία απότομη ροή του πετρώματος.

- **Το υπόγειο νερό:**

Š Το υπόγειο νερό που κινείται επιφέρει πάνω στα τεμαχίδια του εδάφους μία πίεση. Εξαιτίας αυτής της πίεσης ελαττώνεται η σταθερότητα του πρανούς.

Š Το υπόγειο νερό μπορεί να παρασύρει το ευδιάλυτο συνδετικό υλικό των πετρωμάτων. Το φαινόμενο αυτό ελαττώνει την εσωτερική σύνδεση των μορίων και τη συνοχή και κατεβάζει το συντελεστή της εσωτερικής τριβής.

Š Η υπό πίεση στάθμη του υπόγειου επιδρά στα αδιαπέραστα στρώματα του πρανούς ως άνωση.

Š Επιπλέον το δραστικό υπόγειο νερό (εμπλουτισμένο με  $\text{HCO}_3$ ) μπορεί να προκαλέσει διάλυση του συνδετικού υλικού ή τμημάτων των στερεών πετρωμάτων ή να μεταβάλει τέλος την στερεότητά τους.

- **Η επίδραση του παγετού:**

Με τον παγετό μεγαλώνει ο όγκος του υπόγειου νερού μέσα στις κατατμήσεις. Οι παλιές κατατμήσεις μεγεθύνονται και δημιουργούνται καινούριες. Στα κατατμημένα πλέον πετρώματα ελαττώνεται η συνοχή τους.

- **Η αποσάθρωση:**

Η μηχανική και χημική αποσάθρωση ελαττώνουν συνεχώς τη συνοχή του πετρώματος. Σε μερικές περιπτώσεις κατολισθήσεων φαίνονται καθαρά ίχνη, έτσι ώστε, να θεωρούνται ως ένας παραπάνω παράγοντας των χημικών μεταβολών του πετρώματος που προκαλούνται από το νερό που εισέρχεται από τα γειτονικά χημικώς ενεργά πετρώματα.

- **Μεταβολή της βλάστησης:**

Σε περιοχές όπου παρατηρείται μεταβολή της βλάστησης των πρανών που μπορεί να συμβεί από διάφορες αιτίες π.χ. πυρκαγιές ή εκχερσώσεις εδαφών, προκαλείται ελάττωση της συνοχής των πρανών, καθότι οι ρίζες προκαλούν σταθεροποίηση του εδάφους.

- **Στρωματοειδής κατολισθήσεις:**

Εμφανίζονται στις θέσεις όπου το πέτρωμα βρίσκεται σε κατάσταση κερματισμού και αποσαθρώσεως ή εκεί όπου αναπτύσσονται σημαντικού πάχους κορήματα.

- **Ολισθήσεις βραχωδών μαζών:**

Στην εκδήλωση αυτών συμβάλλουν οι ομόρροπες προς το πρανές επιφάνειες ασυνέχειας (διακλάσεις, ρήγματα) και η ύπαρξη πυκνού δικτύου αλληλοτεμνόμενων διαρρήξεων, σε συνδυασμό με τους παράγοντες αποσαθρώσεως, την ισχυρή πτύχωση, την ανομοιογένεια στη λιθολογική σύσταση.

- **Καταπτώσεις βράχων:**

Η έντονη τεκτονική διατάραξη και οι κλιματολογικές συνθήκες, με τους διαβρωσιγενείς παράγοντες που δρουν εκλεκτικά κατά μήκος των επιφανειών ασυνέχειας, καθιστούν πολύ συχνή την εκδήλωση των καταπτώσεων αυτών.

- **Ερπυσμός και ροή εδαφών:**

Είναι πολύ συνήθη φαινόμενα στο μεγάλο πάχος μανδύα των σχιστοκερατόλιθων.

### 5.3 ΠΑΛΑΙΟΖΩΙΚΟΙ ΚΑΙ ΜΕΣΟΖΩΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ

Στους σχηματισμούς αυτούς οι κατολισθητικές κινήσεις δεν είναι συχνές και αναφέρονται σε ολισθήσεις βραχωδών μαζών και καταπτώσεις βράχων. Εντούτοις, αν οι τεχνικογεωλογικές συνθήκες συνηγορούν στην εκδήλωση μίας κατολισθήσεως στους σχηματισμούς αυτούς, τότε τα φαινόμενα είναι σοβαρά, επηρεάζουν

εκτεταμένη περιοχή και δημιουργούν προβλήματα στις κατασκευές, η αντιμετώπιση των οποίων είναι δύσκολη και δαπανηρή.

#### 5.4 ΑΙΤΙΑ ΕΚΔΗΛΩΣΗΣ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΩΝ

Οι κατολισθήσεις δεν είναι μονοσήμαντα φαινόμενα, αλλά συνιστούν αποτέλεσμα της συνεπίδρασης πολλών παραγόντων και αυτό διότι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στο πρόβλημα είναι πολλοί και αλληλοεξαρτώμενοι. Η ακριβής εκτίμηση των παραγόντων αυτών, προσδιορίζει το μέγεθος του κινδύνου και καθιστά δυνατή τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων.

Παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο είναι η λιθολογία και η τεκτονική, οι μετεωρολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο της κάθε περιοχής, οι κλίσεις των πρανών, η κατανομή των πετρωμάτων η διάρρηξη και η παράταξη των στρωμάτων, η διάβρωση και η αποσάθρωση, η κατάσταση των τάσεων που επικρατούν, η βλάστηση και τέλος οι ανθρώπινες δραστηριότητες. Το έναυσμα για την ενεργοποίηση παλαιών ή την εμφάνιση νέων κατολισθητικών φαινομένων είναι συνήθως οι βροχοπτώσεις, οι σεισμικές κινήσεις και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις.

Τα κυριότερα αίτια που οδηγούν στην εκδήλωση κατολισθήσεων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

**§ Σε αυτά που αυξάνουν την επικρατούσα τάση και**

**§ Σε αυτά που ελαττώνουν τη διατμητική αντοχή των πετρωμάτων.**

##### **1. Αύξηση της διατμητικής τάσης**

Αύξηση της διατμητικής τάσης σε ένα πρανές μπορεί να μεταβληθεί με διάφορους τρόπους, όπως είναι :

α) Παροδικές γήινες τάσεις (σεισμικές δονήσεις, εκρήξεις, κυκλοφορία βαρέων οχημάτων)

β) Η αφαίρεση της πλευρικής υποστήριξης λόγω ανύψωσης, διάβρωσης και απόθεση ιζημάτων (αργές μεταβολές) είτε από ανθρώπινη παρέμβαση είτε όχι (ηφαιστειακή δραστηριότητα)

γ) Η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού (εποχιακές μεταβολές).

Λίγο πιο αναλυτικά αναφέρουμε ότι οι σεισμικές δονήσεις έχουν προκαλέσει πολλές μετακινήσεις πρηνών. Κατά τη σεισμική φόρτιση προκαλείται μείωση της διατμητικής αντοχής λόγω μείωσης της συνοχής των υλικών αφού μεταβάλλεται σημαντικά το καθεστώς των τάσεων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εμφάνιση μη ανατρέψιμων μεταβολών στις πιέσεις του νερού των πόρων που επηρεάζουν την αντοχή του εδάφους. Οι σεισμοί επιδρούν επίσης στο υδρογεωλογικό καθεστώς και στη σύσταση των υπόγειων νερών. Παρόμοιες επιδράσεις έχουν στα πετρώματα και διάφορες τεχνητές δονήσεις. Η αφαίρεση της πλευρικής υποστήριξης προκαλείται από διάβρωση στον πόδα του πρηνούς από υδρορεύματα, από διάβρωση από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα., από τις παλίρροιες, τα κύματα κ.α. Κατά τη δράση

Της διάβρωσης προκαλείται διάλυση και αποκόμιση υλικών. Όταν αυτό συμβεί στον πόδα του πρηνούς τότε αφαιρείται η υποστήριξη των υπερκειμένων στρωμάτων και αυτά κατολισθαίνουν. Επιπλέον το νερό που κινείται μέσα στη μάζα του πετρώματος διαλύει διάφορα υλικά και παράλληλα τα απομακρύνει (ανθρακικά πετρώματα, εβαπορίτες). Έτσι το πέτρωμα χάνει τη συνοχή του και ελαττώνεται η αντοχή του. Επίσης αφαίρεση της υποστήριξης προκαλούν μεταλλευτικές δραστηριότητες ή άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως υποσκαφή για κατασκευή δρόμων ή άλλων τεχνικών έργων. Επίσης η δημιουργία λιμνών ή ταμιευτήρων με τις κατακόρυφες διακυμάνσεις της στάθμης του νερού δημιουργούν ασταθείς συνθήκες στα γύρω πρηνή. Η δημιουργία νέων πρηνών από προηγούμενες μετακινήσεις μαζών, όπως ολισθήσεις και από διαρρήξεις μεγάλης κλίμακας, ευνοούν την εκδήλωση κατολισθήσεων όταν τα νέα αυτά πρηνή είναι ασταθή. Η ευστάθεια οφείλεται στη μη έγκαιρη και σωστή αντιμετώπιση των παλαιότερων φαινομένων.

Η επιφόρτιση των πρηνών οφείλεται τόσο στη φυσική όσο στην ανθρώπινη δράση και είναι τόσο πιο επικίνδυνη όσο πιο απότομα εφαρμόζεται. Με τη φυσική δράση τα πρηνή επιφορτίζονται με το βάρος του νερού των βροχοπτώσεων και της απορροής. Η συγκέντρωση επίσης πλευρικών κορημάτων επάνω σε μία μάζα επιρρεπή προς κατολίσθηση υποβοηθά την μετακίνηση. Άλλος τρόπος επιβάρυνσης είναι η βλάστηση. Ο ρόλος της βλάστησης είναι αρνητικός στην περίπτωση π.χ. ενός απότομου πρηνούς με ημισυνεκτικά πετρώματα οπότε προκαλείται αύξηση του βάρους και κατά συνέπεια αύξηση της διατμητικής τάσεως. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες επιβαρύνουν το πρηνές με την κατασκευή επιχωμάτων, τη συγκέντρωση μεταλλευμάτων και λατομικών προϊόντων, τους σκουπιδότοπους, το

βάρος των κτιρίων. Επίσης το νερό που προέρχεται από απώλειες αγωγών και δεξαμενών ή από την καλλιέργεια και άρδευση του πρανού συμβάλει στην ενεργοποίηση των ασταθών μαζών, με την αύξηση του βάρους και με τη χαλάρωση των επιφανειακών τμημάτων του εδάφους. Η πλευρική πίεση μπορεί να προκληθεί από την παρουσία του νερού σε ρωγμές και κοιλότητες. Επίσης από το πάγωμα του νερού στις ρωγμές με αποτέλεσμα, εξαιτίας του μεγαλύτερου όγκου του πάγου έναντι του νερού, κατά την ψύξη του τελευταίου να αναπτύσσονται πλευρικές πιέσεις που οδηγούν στη συνεχή διάνοιξη των ρωγμών και στη χαλάρωση του πετρώματος. Παρόμοια φαινόμενα παρουσιάζονται και κατά την ενυδάτωση των αργίλων ή του ανυδρίτη τα οποία διογκώνονται και αυξάνουν τις πλευρικές πιέσεις, οι σεισμικές δονήσεις, η οικοδομική δραστηριότητα, οι εκσκαφές (γρήγορες μεταβολές).

## 2. Μείωση της διατμητικής αντοχής

Παράγοντες που συμβάλλουν στη μείωση της διατμητικής αντοχής είναι:

- α) Η αποσάθρωση και διάφορες φυσικοχημικές διαδικασίες, η αρχική κατάσταση του πετρώματος,
- β) Οι μεταβολές των ενεργών τάσεων λόγω περιεκτικότητας νερού στους πόρους,
- γ) Οι μεταβολές στη δομή των πετρωμάτων,
- δ) Ο προοδευτικός ερπυσμός, καθώς επίσης και
- ε) Η δράση του ριζικού συστήματος των δέντρων και η δράση των ζώων που σκάβουν το υπέδαφος.

Πιο αναλυτικά η αποσάθρωση των πετρωμάτων οδηγεί στην αποσύνθεση των κατακερματισμένων αργίλων, στη φυσική αποσύνθεση των κοκκωδών πετρωμάτων κάτω από τη δράση του παγετού και επίσης οδηγεί στην ενυδάτωση των αργιλικών ορυκτών. Με την τελευταία διαδικασία αυξάνεται η περιεκτικότητα σε νερό, ελαττώνεται η συνοχή των αργιλικών πετρωμάτων και επέρχεται χαλάρωση που οδηγεί σε αστάθεια του πετρώματος. Άλλα φαινόμενα που μπορεί να προκαλέσει η αποσάθρωση είναι η ξήρανση των αργίλων και των σχιστόλιθων, καθώς και η διάλυση του συνδετικού υλικού. **Οι παράγοντες μείωσης της διατμητικής αντοχής που οφείλονται στην αρχική κατάσταση του πετρώματος είναι η λιθολογική σύσταση, η υφή των υλικών, η δομή αυτών και η γεωμετρία του πρανού.** Η δομή των υλικών επηρεάζει σημαντικά την ευστάθεια αφού περιλαμβάνει τις ασυνέχειες, τα ρήγματα, τα επίπεδα στρώσης, τη σχιστότητα, τις ζώνες τεκτονικού κερματισμού, την

περίπτωση συμπαγών επάνω σε ασθενή πλαστικά, την εναλλαγή διαπερατών και ημιπερατών στρωμάτων.

Ένα πέτρωμα θεωρείται μικρής αντοχής είτε πρωτογενώς, είτε δευτερογενώς, λόγω μεταβολής της περιεκτικότητας σε νερό ή άλλων μεταβολών. Τέτοια υλικά που λόγω της λιθολογικής τους σύστασης μειώνεται η αντοχή τους είναι τα οργανικά υλικά, οι ιζηματογενείς σχιστόλιθοι, οι άργιλοι, τα αποσαθρωμένα πετρώματα, καθώς και τα υλικά που αποτελούνται κυρίως από φυλλώδη ορυκτά. Η υφή ορισμένων υλικών, δηλαδή η δομή και η διάταξη μεμονωμένων σωματιδίων, γίνεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ευνοείται η ελάττωση της διατμητικής αντοχής. Τέτοια υλικά με χαλαρή δομή είναι οι άργιλοι, οι μάργες, οι άμμοι μικρής πυκνότητας. Η σφαιρικότητα και η αποστρογγύλωση των κόκκων των υλικών επηρεάζουν την αντοχή τους, ενώ η συμπίεστικότητα και η εσωτερική τριβή αυξάνουν όταν η διαμόρφωση των υλικών γίνεται με γωνιώδη τρόπο. Οι ασυνέχειες, ρήγματα, ζώνες τεκτονικού κερματισμού επιδρούν αρνητικά στην ευστάθεια του πρανούς, όταν οι κλίσεις τους είναι δυσμενείς σε σχέση με αυτή του πρανούς. Κλίσεις ασυνεχειών ομόρροπες προς το πρανές με μικρότερες όμως τιμές και με ταυτόχρονη υπερκίνηση των δυνάμεων τριβής, οδηγούν σε υπερκείμενων στρωμάτων κατά μήκος του επιπέδου της ασυνέχειας. Η παρουσία συμπαγών στρωμάτων επάνω σε ασυνεχή πλαστικά είναι περίπτωση ευνοϊκή για την εκδήλωση κατολισθήσεων. Όταν πετρώματα συμπαγή, χαμηλής διάβρωσης, ανθεκτικά στη διατμητική αντοχή, βρίσκονται πλαστικά, επάνω από πετρώματα μικρής αντοχής, ευαποσάθρωτα και αδιαπέραστα, τότε μειώνεται η διατμητική αντοχή των υποκειμένων πετρωμάτων και δημιουργούνται επισφαλείς συνθήκες. Παρόμοιες συνθήκες δημιουργούνται και στις περιπτώσεις εναλλαγής διαπερατών και αδιαπέραστων στρωμάτων. Συχνό είναι το φαινόμενο αυτό στα στρώματα του φλύσχη στα οποία εναλλάσσονται ψαμμιτικές και αργιλικές φάσεις. Όταν ο ψαμμίτης υπέρκειται των αργιλικών σχιστόλιθων, τότε μπορεί αυτός να κατολισθήσει λόγω της έντονης αποσάθρωσης των σχιστόλιθων και της αφαίρεσης της υποστήριξης. Ένα επιπλέον στοιχείο είναι η διαφορά υδροπερατότητας, έτσι το νερό που φθάνει στον ψαμμίτη κατεισδύει μέσω αυτού και στην επαφή με τους αργιλικούς σχιστόλιθους, μη μπορώντας να συνεχίσει την πορεία του προς τα κάτω, κινείται κατά μήκος αυτής. Έτσι μειώνονται οι δυνάμεις τριβής και όταν οι κλίσεις είναι δυσμενείς, τότε σαν επιφάνεια δρα η επιφάνεια επαφής ολισθήσεως. Η περιεκτικότητα του νερού των πόρων των πετρωμάτων και η πίεση

πολλές φορές που ασκεί το νερό προκαλούν μεταβολές στις ενεργές τάσεις και ρωγμές. Η ενεργός τάση ελαττώνει την τριβή και καταστρέφεται κατά τον κορεσμό λόγω τριχοειδών φαινομένων στα υγρά εδάφη. Οι μεταβολές που προκαλούνται οφείλονται σε φυσική δράση, όπως βροχοπτώσεις και λιώσιμο χιονιού, και σε ανθρώπινες δραστηριότητες όπως δημιουργία δρόμων, εκτροπής ταμιευτήρων, άρδευση και αποψίλωση. Συχνά συμβαίνουν μεταβολές της δομής των πετρωμάτων λόγω ρηγμάτωσης των σχιστόλιθων και των προστερεοποιημένων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

#### **6.1 συμπεράσματα**

Το πρόβλημα των κατολισθήσεων είναι ιδιαίτερος σύνθετο και πολύπλοκο ώστε προκειμένου να δοθεί μια τελική απάντηση σχετικά με τους παράγοντες που το προκαλούν και το ποσοστό με το οποίο αυτοί συμβάλουν, είναι αναγκαία η ανάλυση του από διάφορες σκοπιές. Σε αυτή την εργασία έγινε μια προσπάθεια να εξεταστούν όλοι οι παράγοντες έτσι ώστε ο αναγνώστης να έχει μια ολοκληρωμένη αντίληψη επί του θέματος.

Τα κατολισθητικά φαινόμενα ταξινομούνται με βάση το είδος κίνησης και την γεωμετρία, που εκεί συναντάμε τις πτώσεις, τις ανατροπές, τις ολισθήσεις, τις εξαπλώσεις, τις ροές, το υλικό, το στάδιο δράσης, την ταχύτητα κίνησης και την περιεχόμενη υγρασία.

Αρκετές προτάσεις έχουν γίνει για την ταξινόμηση των κατολισθήσεων, σύμφωνα με ερευνητές, όπως οι: Penta, Hoek - Brav, Zaruba – Mencl και Varnes.

Οι διάφοροι τύποι κατολισθήσεων, ορίζονται σύμφωνα με την συνεκτικότητα των πετρωμάτων και τις μετακινήσεις των πετρωμάτων και των πρηνών.

Η μελέτη της δυναμικής των κατολισθήσεων είναι η επιστήμη με την οποία μετά από μία σειρά πειραματικών δοκιμών μπορούν να υπολογισθούν χαρακτηριστικές τιμές, όπως η πυκνότητα, η ταχύτητα και το ύψος της κατολίσθησης.

Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά των κατολισθήσεων χρησιμοποιούνται ως βάση για την αναγνώριση των κατολισθήσεων και των επιρρεπών περιοχών.

Κατολισθήσεις μπορούν να συμβούν σχεδόν σε όλες τις περιοχές υπό ορισμένες συνθήκες. Ως ευαίσθητες περιοχές μπορούν να χαρακτηριστούν οι απότομες πλαγιές, τα βράχια, η όχθες και οι περιοχές με λοφώδες έδαφος.

Η συχνότητα κατολισθητικών φαινομένων στον Ελλαδικό χώρο εξαρτάται από τον τύπο της περιοχής, το τοπογραφικό ανάγλυφο, τον τύπο και τα στάδια διάβρωσης, το υψόμετρο και την μέση ημερήσια βροχόπτωση.

Οι παράγοντες εμφάνισης κατολισθητικών φαινομένων, διακρίνονται σε φυσικούς και ανθρώπινους παράγοντες. Ως φυσικοί παράγοντες θεωρούνται οι



βροχοπτώσεις, το γρήγορο λιώσιμο του χιονιού, ο σεισμός κ.α. Ως ανθρώπινοι παράγοντες θεωρούνται οι εκσκαφές, η αποδάσωση, η άρδευση κ.α.

## 6.2 ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Τα μέτρα προστασίας εμποδίζουν την άφιξη των υλικών που έχουν αρχίσει να μετακινούνται, στο τεχνικό χώρο ή την κατασκευή ή τη θέση που προστατεύονται. Αρκετές φορές τα μέτρα προστασίας συνδυάζονται με τα μέτρα προειδοποίησης.

### 1. Τοίχοι συγκράτησης

Αποτελεί αρκετά δαπανηρή κατασκευή και η επιλογή του μέτρου αυτού επιβάλλεται από την έλλειψη χώρου για την ανάπτυξη άλλων έργων εξυγίανσης του πρανούς. Τα χαρακτηριστικά της κατασκευής τους καθορίζονται από το είδος του πρανούς, το ύψος του και τα ενδεχόμενα φορτία που θα δεχθεί. Σκοπός τους είναι α) η προστασία από θραύση ογκολίθων β) η προστασία του πρανούς από την αποσάθρωση.

### 2. Απομάκρυνση επικίνδυνων για κατάπτωση όγκων

Αυτό το μέτρο προστασίας – πρόληψης βρίσκει εφαρμογή σε απότομα βραχώδη πρανή τεχνητά ή φυσικά τα οποία βρίσκονται κατά μήκος οδικών αξόνων ή κοντά σε μεγάλα τεχνικά έργα. Ο τρόπος απομάκρυνσης του είναι είτε μηχανικός είτε απαιτείται χρήση εκρηκτικών.

### 3. Φρεζάρισμα απολέπισης

Αποτελεί ένα σύνηθες μέτρο προστασίας – πρόληψης. Οι εργασίες γίνονται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και κυρίως μετά από μεγάλες περιόδους βροχοπτώσεων, χιονοπτώσεων και περιλαμβάνουν απολέπιση ασταθών, χαλαρών επικρεμάμενων βραχωδών τεμαχίων.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Στην βιβλιογραφία περιέχονται όλα τα βιβλία που αναφέρονται στο κείμενο, όχι όμως οι πηγές που χρησιμοποιήσαμε για την συγγραφή της εργασίας.

Brunsdon, D., and Prior, DB., 1984 :Slope Instability. Wiley, Chichester

Campbell, C.S., 1993: Boundary interactions for two- dimensional granular flows.  
Part I. Flat boundaries, asymmetric stresses and couple stresses, J. Fluid. Mech.

Chou, C.S., 1997: Interface between Fluid-like and Solid-like behavior in rapid  
Granular flows down bumpy inclines, Int. J. For Num. And Analytical  
Methods in Geomechanics.

Coussot, P., Meunier, M., 1996: Recognition, classification and mechanical  
Description of debris flows.

Cruden, D.M., 1991 : A simple definition of a landslide, Bulletin Int. Ass. For  
Engineering Geology.

Drake, T.G., 1991 : Granular flow : physical experiments and their implications for  
microstructural theory, J. Fluid Mech.

Dikau, R., Brunsdon, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996 : Landslide Recognition,  
John Wiley & Sons

Goodman, M.A., Cowin, S.C., 1971 : Two problems in the gravity flow of  
granular materials, J Fluid Mech.

Gray, J.M.N.T., und Hutter, K., 1998 : Physik granularer Lawinen , Phys. Bl. 54  
Nr.I

Hutchinson, J.N., 1988 : Morphological and geotechnical parameters of landslides  
In relation to geology and hydrology, General Report. In Landslides, Proc. 5<sup>th</sup>

- Int. Symp. On Landslides (Ed. C. Bonnard).
- Hutter, K., 1996 : Avalanche dynamics, Hydrology of Disasters-Kluwer Academic Publ.
- Hutter, K., Rajagopal, K.R., 1994 : On flows of granular materials, Continuum Mech. Thermodyn.
- Hutter, K., Svendsen, B., Rickenmann, D., 1996: Debris flow modelling : A Review, Continuum Mechanics and Thermodynamics.
- Hutter, K., and Rajagopal, K.R., 1994: On flows of granular materials, Continuum Mechanics and Thermodynamics.
- Hutter, K., Koch, T., Pluss, C., Savage, S.B., 1995: The dynamics of avalanches Of granular materials from initiation to runout. Part II: Experiments, Acta Mech.
- Jaeger, H., Nagel, S., 1997: Dynamics of Granular Material, American Scientist, Vol 85
- Koch, T., Greve, R., Hutter, K., 1994: Unconfined flow of granular avalanches Along a partly curved surface. I. Theory, Proc. Royal soc. London.
- Koch, T., Greve, R., Hutter, K., 1994: Unconfined flow of granular avalanches Along a partly curved surface. II. Experiments and numerical computations, Proc. Royal soc. London.
- Lang, R.M., Leo, B.R., Hutter, K., 1989: Flow characteristics of an Unconstrained, non-cohesive, granular medium down an inclined, curved surface: Preliminary experimental results, Annals of Glaciology,13, Int. Glaciological Soc.
- Muhlhaus, H.B., Vardoulakis, I., 1987: The thickness of shear bands in granular Materials, Geotechnique.

Savage, S.B., 1979: Gravity Flows of Cohesionless Granular Materials in Chutes And Channels, J. Of Fluid Mech.

Savage, S.B., 1984: The Mechanics of Rapid Granular Flows, Adv. Appl. Mech.

Savage, S.B., Hutter, K., 1989: The motion of a finite mass of granular material Down a rough incline, J. of Fluid Mech.

Savage, S.B., Hutter, K., 1991: The dynamics of avalanches of granular Materials from initiation to runout. Part I: Analysis, Acta Mech.

Skempton, A.W., 1985: Residual strength of clays in landslides, folded strata and The laboratory. Geotechnique.

Skopek, P., Morgenstern, N.R., Robertson, P.K., Sego, D.C., 1994: Collapse of Dry sand. Can. Geotech. Journal.

Svendsen, B., Hutter, K., 1995: On the thermodynamics of a mixture of isotropic Granular materials. Cont. Mech. Thermodyn.

Takahashi, T., 1991: Debris flow, IAHR-AIRH, Monograph series. A.A. Balkema

Vardoulakis, I., Sulem, J., 1995: Bifurcation Analysis in Geomechanics, Blackie Academic and Professional.

Vardoulakis, I., 2000: Catastrophic landslides due to frictional heating of the Failure plane. Mech. Coh.-Frict. Material

Varnes, D.J., 1978: Slope movements: type and processes, Landslides Analysis and control, Ed. E.B. Eckel, Transp. Res. Board, Spec. Rep.

- Ames, W.F. 1992: Numerical Methods for Partial Differential Equations,  
Computer Science and Scientific Computing, Academic Press.
- Ancey, C., Coussot, P. and Evesque, P. (1996). Examination of the possibility  
Of a fluid-mechanics treatment of dense granular flows. Mech. Coh.-Frict. Mat.
- Bassanou B. and Vardoulakis, I. (1999): Dynamic landslide motion. – 3<sup>rd</sup> Conf.  
Int. on Computational Mechanics – GRACM, Vol.1.
- Bear, J. 1988: Dynamics of Fluids In Porous Media, Dover Publication, New  
York City.
- Carnahan, B., Luther. H.A., Wilkes, J.O 1969: Applied Numerical Methods,  
John Wiley & Sons.
- Greve, R., Koch., T and Hutter K. (1994). Unconfined flow of granular  
Avalanches along partially curved surved. I. Theory. Proc. R. Soc. Lond.
- Jylien, P.Y. (1998). Erosion and Sedimentation, Cambridge Univ. Press  
Di Prisco C., Imposimato S. and Vardoulakis, I. (2000). Mechanical  
modeling of drained creep triaxial tests on loose sand. Geotechnique
- Roberts, A.J. 1994: A Once-Dimensional Introduction to Continuum Mechanics,  
World Scientific Publishing Co.
- Savage, S.B. and K. Hutter (1989). The motion of a finite mass of granular  
Material down a rough incline. J. Fluid Mech.
- Taylor. D.W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons.
- Vardoulakis, I. (1999). Εισαγωγή στην Μηχανική του Συνεχούς , Εκδόσεις  
Συμμετρία
- Vardoulakis, I. (2000). Catastrophic landslides due to frictional heating of the

Failure plane. Mech. Coh. – Frict. Mat.

Vardoulakis, I. (2000). Dynamic thermo-poro-mechanical instability of rapid Shear of frictional material. Submitted

Whitham, G.B. (1974). Linear and Nonlinear Waves , John Wiley & Sons, 1974.

Coussot, P., Meunier, M., 1996: Recognition, classification mechanical description of debris flows.

Drake, T.G., 1991: Granular flow: physical experiments and their implications For microstructural theories, J. Fluid Mech.

Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M.L., 1996: Landslide Recognition, John Wiley & Sons.

Hutter, K., 1996: Avalanche dynamics, Hydrology of Disasters-kluwer Academic Publ.

Hytter, K., Rajagopal, K.R., 1994: On flows of granular materials continuum Mech. Thermodyn.

Hutter, K., Svendsen, B., Rickenmann, D., 1996: Debris flow modelling: A Review , continuum Mechanics and Thermodynamics.

Hutter, K., and Rajagopal, K.R., 1994: On flows of granular materials, continuum Mechanics and Thermodynamics

Hytter, K., Koch, T., Pluss, C., Savage, S.B., 1995: The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part II : Experiments, Acta Mech.



