

*Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τεχνολογικής Εκπαίδευσης*

**Μελέτη ροής συνθριμμάτων από κατολισθήσεις και  
επιρροή της γεωμετρίας του μετώπου και της  
κατανομής κόκκων στο σχεδιασμό στιβαρών  
στοιχείων ανάσχεσής της**  
**Διπλωματική Εργασία**

*Χριστίνα Περπινιά*

*Επόπτης καθηγητής: Δρ. Εμμανουήλ Βαϊρακτάρης*

**Δεκέμβριος 2016**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία είναι χωρισμένη σε δύο ενότητες: η πρώτη ενότητα αφορά την μελέτη δοκιμίων που προσομοιώνουν ροή και πρόσκρουση συνθριμμάτων με την χρήση του προγράμματος PFC3D<sup>®</sup> και η δεύτερη αφορά την μελέτη συμπεριφοράς υποστρωμάτων λόγω ροής συνθριμμάτων. Η πρώτη ενότητα περιλαμβάνει τα πρώτα τρία στάδια εργασίας μετά την εισαγωγή, ενώ η δεύτερη ενότητα περιλαμβάνει τα υπόλοιπα τρία.

Το πρώτο στάδιο της εργασίας που είναι η Εισαγωγή αφορά την κατανόηση του πρώτου θέματος της εργασίας και την άντληση πληροφοριών από την πρόσφατη βιβλιογραφία. Για τον σκοπό αυτό μελετήθηκαν κυρίως ξένα αλλά και ελληνικά επιστημονικά άρθρα και παρόμοιες διπλωματικές εργασίες για το φαινόμενο των κατολισθήσεων και συγκεκριμένα για τις ροές συνθριμμάτων.

Το δεύτερο στάδιο ήταν η γνωριμία και η κατανόηση του προγράμματος PFC3D<sup>®</sup>. Μελετήθηκε το εγχειρίδιο του προγράμματος καθώς και μια αντίστοιχη διπλωματική εργασία [8] η οποία έκανε χρήση του προγράμματος αυτού. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα δοκίμιο-παράδειγμα για την καλύτερη κατανόηση των εντολών και της λογικής του προγράμματος. Τα δοκίμια του προγράμματος παρουσιάζουν το αποτέλεσμα μιας κατολίθησης λίγο πριν, κατά την διάρκεια και στο τέλος της πρόσκρουσης σε δύσκαμπτο στοιχείο, η οποία προσομοιώνεται με μια μάζα δύσκαμπτων σωματιδίων η οποία προσκρούει σε ένα δύσκαμπτο στοιχείο. Με την χρήση της μεθόδου των Διακριτών Στοιχείων είναι εφικτή η μελέτη όλων των δυνάμεων, πιέσεων, ταχυτήτων και άλλων στοιχείων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της.

Το τρίτο στάδιο ήταν η δημιουργία των δοκιμίων που θα προσομοιωθούν με το πρόγραμμα. Μελετήθηκαν όλα τα επιστημονικά άρθρα που αναφέρονταν στο πρόγραμμα PFC3D<sup>®</sup> και την μέθοδο DEM. Για την δημιουργία των επιθυμούμενων δοκιμίων έγινε χρήση ενός έτοιμου δοκιμίου-παραδείγματος, στο οποίο εισήχθηκαν συγκεκριμένες κοινές ιδιότητες για όλα τα δοκίμια προς εξέταση και τα στοιχεία ως προς τα οποία εξετάστηκαν. Αυτό το έτοιμο δοκίμιο αποτελούταν από τέσσερα αρχεία σε γλώσσα FISH, όπου το καθένα αφορά συγκεκριμένο στοιχείο στην προσομοίωση: η μάζα των σωματιδίων, το κανάλι μέσα στο οποίο θα κινηθεί η μάζα, ο άκαμπτος τοίχος με τον οποίο θα συγκρουστούν τα σωματίδια και ένα ακόμα αρχείο το οποίο θέτει σε κίνηση την προσομοίωση και εμφανίζει στο πέρας της ένα διάγραμμα χρόνου-δύναμης. Οι διαφορές των δοκιμίων που εξετάστηκαν εντοπίζονται στην μέση διάμετρο των κόκκων και την κλίση του μετώπου της κατολισθαίνουσας μάζας, αφού η επιρροή των υπόλοιπων παραμέτρων έχει ήδη εξεταστεί σε άλλη εργασία [8] και υπάρχουν και στην βιβλιογραφία.

Το τέταρτο στάδιο αφορά την συλλογή αποτελεσμάτων και την επεξήγησή τους. Παρατηρήθηκαν προσεκτικά οι προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν και συλλέχθηκαν σε αντίστοιχο πίνακα τα αριθμητικά αποτελέσματα. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση αυτών μεταξύ τους και παρουσιάστηκαν σε διαγράμματα.

Το πέμπτο στάδιο αφορά την κατανόηση του δεύτερου ζητήματος της εργασίας. Για το λόγο αυτόν μελετήθηκαν ξένα επιστημονικά άρθρα και κανονισμοί που σχετίζονται με την αντοχή υποστυλωμάτων σε κατολισθητικά φαινόμενα. Κατανοήθηκαν πλήρως οι μηχανισμοί αστοχίας των υποστυλωμάτων λόγω κατολισθήσεων και στην συνέχεια μελετήθηκαν οι διαφορετικές μέθοδοι υπολογισμού της δύναμης των βράχων και της πίεσης που ασκείται από την ροή σε δύσκαμπτα στοιχεία.

Το έκτο στάδιο αφορά τον υπολογισμό μεγεθών για τον σχεδιασμό υποστυλωμάτων σε κτιριακά έργα που αναμένεται να προσβληθούν από κατολισθητικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα θα υπολογιστούν οι μέγιστες ακτίνες βράχων για τις οποίες δεν αστοχούν τυποποιημένα υποστυλώματα που έχουν επιλεγεί να εξετασθούν. Πρόκειται για την μελέτη πέντε διαφορετικών υποστυλωμάτων, για τρεις περιπτώσεις αστοχίας με έξι διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης. Αρχικά επιλέχθηκαν οι τύποι που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της δύναμης των βράχων και της πίεσης του πολτού της ροής. Στην συνέχεια υπολογίστηκαν οι ροπές και οι τέμνουσες που δημιουργούν οι διαφορετικές φορτίσεις. Σε αυτές οι φορτίσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με τις παραμέτρους των δυνάμεων και πιέσεων, σύμφωνα με την ισχύουσα βιβλιογραφία και τους γεωτεχνικούς κώδικες ανά την υφήλιο. Ειδικότερα επιλέχθηκαν τιμές συντελεστών που αναφέρονται στους κανονισμούς κατολισθήσεων στο Χονγκ Κόνγκ και στην Ταϊβάν και τιμές που υπολογίστηκαν από σχετικά διαγράμματα. Τέλος, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον αντίστοιχο Ευρωκώδικα οι τιμές των αντοχών σε ροπή και τέμνουσα των υποστυλωμάτων.

Τέλος, το έβδομο στάδιο αφορά την συλλογή, σύγκριση και ερμηνεία των αριθμητικών αποτελεσμάτων των προαναφερθέντων υπολογισμών. Παρουσιάζονται σε εννέα πίνακες οι μέγιστες ακτίνες βράχων που αντέχει το κάθε υποστύλωμα για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, οι αντίστοιχες δυνάμεις βράχων και πιέσεις πολτού των ροών, ενώ πραγματοποιείται και επεξήγηση των σχετικών αποτελεσμάτων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ~ ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	6
1.1 Ορισμός και ταξινόμηση κατολισθήσεων.....	6
1.2 Ροή συνθριμμμάτων (debris flow) .....	8
1.2.1 Κατηγορίες .....	9
1.2.2 Μηχανισμοί.....	10
1.2.3 Η δύναμη πρόσκρουσης.....	10
1.2.3.1 Επιρροή της κοκκομετρίας στην δύναμη πρόσκρουσης .....	10
1.2.3.2 Επιρροή της γεωμετρίας του μετώπου στην δύναμη πρόσκρουσης.....	11
1.2.4 Συνέπειες – Κίνδυνοι .....	11
1.3 Περιγραφή της εργασίας.....	12
1.3.1 Σύνδεση με άλλες εργασίες επί του θέματος.....	13
1.3.2 Δομή της εργασίας.....	14
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ~ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ PFC3D®</b> .....	16
2.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα PFC3D® .....	16
2.2 Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (DEM Discrete Element Method).....	16
2.3 Πρόγραμμα PFC3D® .....	17
2.3.1 Ονοματολογία.....	20
2.3.2 Σύμβαση εννοιών .....	22
2.4 Μηχανική του PFC3D® .....	23
2.4.1 Κύκλος υπολογισμών .....	23
2.4.2 Επαφές .....	25
2.4.3 Μηχανική απόσβεση.....	26
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ~ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ</b> .....	27
3.1 Εισαγωγή.....	27
3.2 Γεωμετρία του προβλήματος.....	27
3.3 Μοντέλα προσομοίωσης .....	28
3.4 Δημιουργία μοντέλων.....	28
3.4.1 Στάδιο 1: Γεωμετρία υλικών, συντονισμός και ιδιότητες.....	29
3.4.2 Στάδιο 2: Προβολή γεωμετρίας και αρχική κατάσταση.....	30
3.4.3 Στάδιο 3: Προβολή της προσομοίωσης και λήψη δεδομένων.....	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ~ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....	33
4.1 Στάδια ροής προσομοιώσεων .....	33
4.2 Συλλογή αποτελεσμάτων.....	35

4.3 Παρατηρήσεις.....	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ~ ΠΛΑΣΤΙΜΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>38</b>
5.1 Τυπολόγιο.....	38
5.2 Παρουσίαση προβλήματος.....	43
5.2.1 Μελέτη περίπτωσης Α': Μηχανισμός δυο πλαστικών αρθρώσεων.....	45
5.2.2 Μελέτη περίπτωσης Β': Μηχανισμός τριών πλαστικών αρθρώσεων .....	46
5.2.3 Μελέτη περίπτωσης Γ': Μηχανισμός με διατμητική αστοχία .....	47
5.3 Σχολιασμοί .....	48
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>50</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ~ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Ορισμός και ταξινόμηση κατολισθήσεων

Γενικά ως κατολίσθηση θεωρούμε την αποκόλληση, κατά μία επίπεδη ή καμπύλη επιφάνεια, και ολίσθηση μιας χαλαρής μάζας σε ένα πρανές με την βαρύτητα [1].

Έχουν διατυπωθεί πολλοί ορισμοί για το φαινόμενο της κατολίσθησης, όπως:

...μια γρήγορη κίνηση μάζας πετρώματος, υπολειμματικού εδάφους ή ιζήματος ενός πρανούς, της οποίας το κέντρο βάρους μετακινείται προς τα κάτω και προς τα έξω.  
*Terzaghi, 1950 [2]*

...μια γρήγορη κίνηση πετρωμάτων που οφείλεται στην ολίσθηση ενός τμήματος πρανούς που διαχωρίζεται από το υπόλοιπο σταθερό τμήμα με μια καλά καθορισμένη επιφάνεια.  
*Zaruba & Mencl, 1969 [2]*

...η ομάδα εκείνη των μετακινήσεων πρανών όπου λαμβάνει χώρα διατμητική θραύση κατά μήκος μιας καθορισμένης επιφάνειας ή κατά μήκος πολλών επιφανειών.  
*Schuster, 1978 [7]*

...κίνηση μιας μάζας βράχου, εδάφους ή κορημάτων προς τα κατόντη ενός πρανούς.  
*Cruden-WP/WLI, 1991 [2]*

Κάθε κατολίσθηση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σύμφωνα με τον Varnes (1978) [4] ανάλογα με:

- την ταχύτητα κίνησης
- τον τύπο μετακίνησης
- τον τύπο του μετακινούμενου υλικού

ΤΑΞΗ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ (mm/sec)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ
7	εξαιρετικά γρήγορη	$> 50 \cdot 10^{-3}$	$> 5$ m/sec
6	πολύ γρήγορη	50	3 m/min
5	γρήγορη	$5 \cdot 10^{-1}$	1,8 m/hr
4	μέτρια	$5 \cdot 10^{-3}$	1,8 m/hr
3	αργή	$5 \cdot 10^{-5}$	1,8 m/hr
2	πολύ αργή	$5 \cdot 10^{-7}$	1,8 m/hr
1	εξαιρετικά αργή	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$> 50 \cdot 10^{-3}$

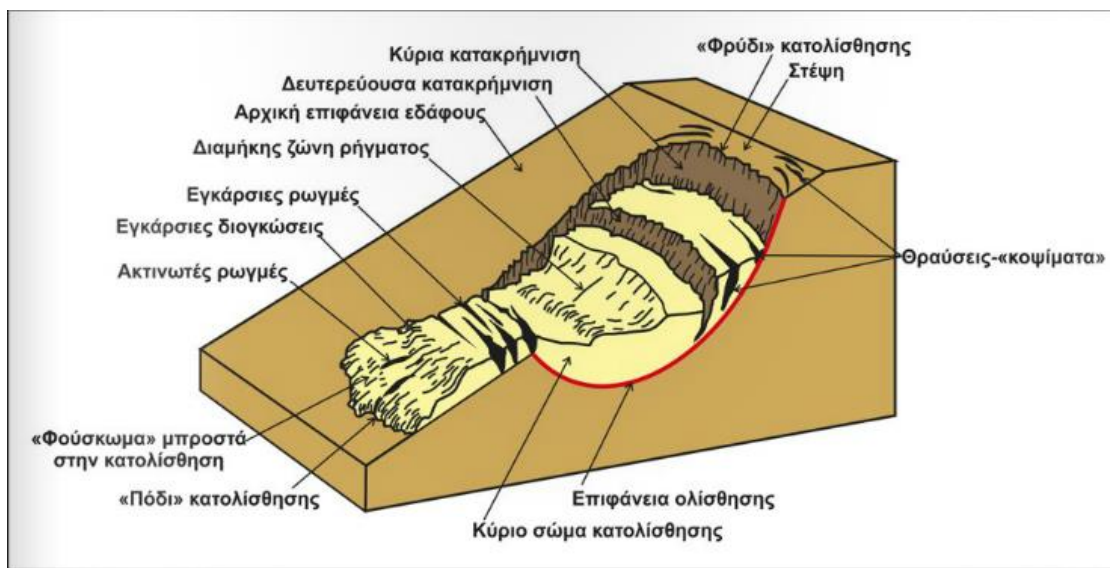
*Πίνακας 1.1α: Κατηγοριοποίηση κατολίσθησης ανάλογα με την ταχύτητα κίνησης κατά Varnes [6]*

ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ		ΤΥΠΟΣ ΜΕΤΑΚΙΝΟΥΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ		
		ΒΡΑΧΟΙ	ΚΟΡΗΜΑΤΑ	ΓΑΙΕΣ
ΚΑΤΑΠΤΩΣΗ		κατάπτωση βράχων	κατάπτωση κορημάτων	κατάπτωση γαιών
ΑΝΑΤΡΟΠΗ		ανατροπή βράχων	ανατροπή κορημάτων	ανατροπή γαιών
ΟΛΙΣΘΗΣΗ	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ	περιστροφική ολίσθηση βράχων	περιστροφική ολίσθηση κορημάτων	περιστροφική ολίσθηση γαιών
	ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ	μεταθετική ολίσθηση βράχων	μεταθετική ολίσθηση κορημάτων	μεταθετική ολίσθηση γαιών
ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗ		πλευρική εξάπλωση βράχων	πλευρική εξάπλωση κορημάτων	πλευρική εξάπλωση γαιών
ΡΟΗ		ροή βράχων	ροή κορημάτων	ροή γαιών
ΣΥΝΘΕΤΗ		συνδυασμός δύο ή περισσότερων κατηγοριών		

Πίνακας 1.1β: Κατηγοριοποίηση κατολίσθησης ανάλογα με τον τύπο μετακίνησης και τον τύπο του μετακινούμενου υλικού κατά Varnes [4]

- Βράχος: μια σκληρή και σταθερή μάζα που ήταν άθικτη στην φυσική της θέση πριν από την έναρξη της μετακίνησης. [4]
- Κορήματα ή συνθρίσματα: περιέχουν ένα σημαντικό ποσοστό χονδρόκοκκων, το 20%-80% αυτών είναι μεγαλύτερα από 2mm και το υπόλοιπο είναι μικρότερο από 2mm. [4]
- Γαίες: το υλικό στο οποίο το 80% ή περισσότερο των κόκκων του είναι μικρότερο από 2mm δηλαδή το ανώτερο όριο κόκκων άμμου. [4]
- Κατάπτωση: απότομη μετακίνηση μαζών γεωλογικών υλικών, όπως πέτρες και ογκόλιθοι, που αποσπάστηκαν από απότομες πλαγιές ή βράχια. [4]
- Ανατροπή: πραγματοποιείται μια προς τα έξω περιστροφή της αποσπώμενης μάζας γύρω από ένα σημείο ή άξονα περιστροφής το οποίο βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο βάρους της μετακινούμενης μάζας. Προκαλείται κυρίως από την βαρύτητα καθώς και από δυνάμεις που ασκούνται από τα γειτονικά τεμάχια ή την επίδραση του νερού που γεμίζει τις ασυνέχειες. [5]
- Περιστροφική ολίσθηση: γίνεται κατά μήκος κοίλων προς τα επάνω επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο εσωτερικό της μετακινούμενης μάζας. [5]
- Μεταθετική ολίσθηση: γίνεται κατά μήκος μιας κατά προσέγγιση επίπεδης ή ομαλής-κυματοειδούς επιφάνειας, με την μετακινούμενη μάζα να κινείται προς τα έξω ή προς τα κάτω και έξω και πολύ μικρή ή καθόλου περιστροφή ή κάμψη. [5]
- Πλευρική εξάπλωση: χαρακτηρίζεται από πλευρική διάσταση ενός συνεκτικού πετρώματος ή μιας συμπαγούς μάζας εδάφους που υπέρκειται πλαστικών και μαλακών υλικών και διευκολύνεται από διατμητικές ή εφελκυστικές ρωγμές. [5]

- Ροή: αποτελεί μία μη αναστρέψιμη παραμόρφωση υλικών, κυρίως χαλαρών, που συμβαίνει ως αντίσταση σε ασκούμενη πίεση. Οι ροές μπορεί να είναι γρήγορες ή αργές, ξηρές ή υγρές. [5]
- Ροές κορημάτων: οι επιφάνειες ολίσθησης δεν είναι ορατές ενώ η παραμόρφωση στο σώμα της μετακινούμενης μάζας είναι πολύ μεγάλη. Όταν η μετακίνηση γίνεται πιο γρήγορη λόγω της παρουσίας χαλαρών υλικών, η περιεκτικότητα σε νερό είναι μεγάλη και τα πρηνή έχουν μεγάλη κλίση τότε μετατρέπεται στη λεγόμενη «χιονοστιβάδα κορημάτων» (debris avalanche). [5]



Εικόνα 1.1: Στοιχεία μιας κατολίσθησης

## 1.2 Ροή συνθριμμάτων (debris flow)

Στην εργασία αυτή θα ασχοληθούμε, όπως προαναφέρθηκε, με τις ροές κορημάτων ή αλλιώς συνθριμμάτων. Οι ροές κορημάτων είναι ιδιαίτερα ρευστοποιημένες κατολισθήσεις που περιέχουν μια ποικιλία υλικού από λεπτά σωματίδια έως μεγάλες πέτρες και κλαδιά δέντρων. Προκαλούνται από διάφορους λόγους. Η πιθανότητα των ροών κορημάτων αυξάνεται όταν η βλάστηση και άλλα μέτρα προστασίας της επιφάνειας έχουν αφαιρεθεί από ευπαθείς πλαγιές, ίσως λόγω πυρκαγιάς ή εκκαθάρισης. [17]



### 1.2.1 Κατηγορίες

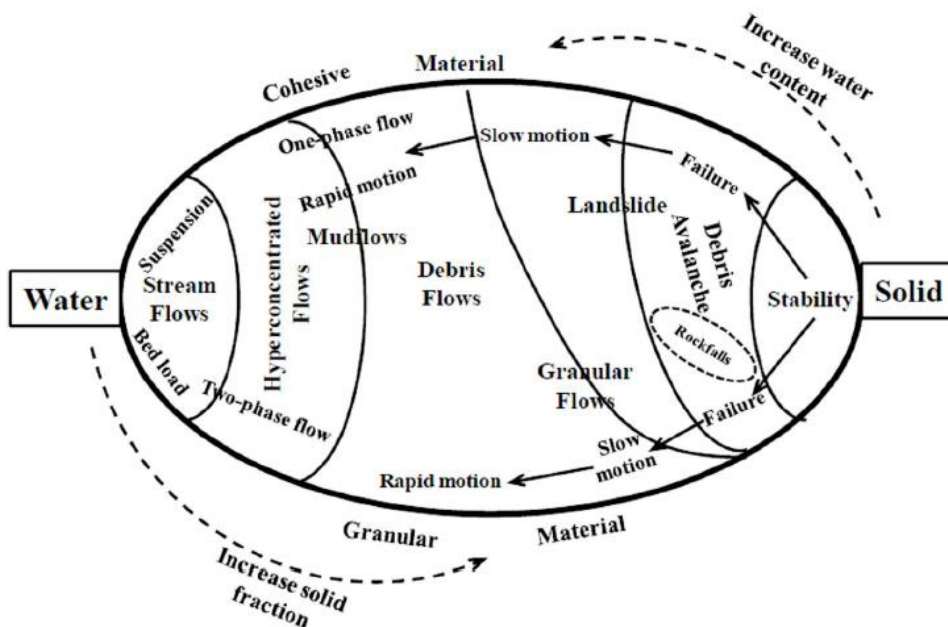
Υπάρχουν δύο κατηγορίες ροών συνθριμμάτων σύμφωνα με τους Coussot και Meunier [8], ανάλογα με την σύστασή τους:

Η λασπώδης ροή συνθριμμάτων (*muddy debris flow*) χαρακτηρίζεται από:

- ευρεία κατανομή μεγέθους κόκκων με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο (>10%) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό (>50%)
- μικρή διατμητική αντοχή
- υψηλές ταχύτητες
- χαμηλή πυκνότητα, περίπου  $1,8\text{t/m}^3$

Η κοκκώδης ροή συνθριμμάτων (*granular debris flow*) χαρακτηρίζεται από:

- ευρεία κατανομή κόκκων, η περιεκτικότητα σε άργιλο και νερό είναι μικρότερη από την λασπώδη ροή κορημάτων και κυριαρχούν χονδρόκοκκα υλικά
- χαμηλή ταχύτητα
- υψηλή πυκνότητα, περίπου  $2\text{t/m}^3 - 2,4\text{t/m}^3$



Εικόνα 1.2: Κατηγοριοποίηση ροών ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε νερό [8]

## 1.2.2 Μηχανισμοί

Οι ροές συνθριμμάτων προκαλούνται από αλλαγές στην ενεργό τάση, λόγω διακυμάνσεων της εξωτερικής δύναμης ή της πίεσης των πόρων. Η βαρύτητα αποτελεί κύρια κινητήρια δύναμη του φαινομένου [12].

Η ταχύτητα των ροών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την κλίση της πλαγιάς και από την επαφή της γωνίας τριβής με την πλαγιά. Γενικά η μπροστινή ταχύτητα αυξάνει σταδιακά σε σχέση με την απόσταση που έχει διανύσει η ροή συνθριμμάτων [11].

Η τάχιστη κοκκώδης ροή κορημάτων (rapid granular debris flow) δημιουργείται λόγω ρευστοποίησης και μηχανικής διαστολής [11]. Όσο αφορά την ρευστοποίηση:

- σε ένα πολύ λεπτό στρώμα, ακριβώς πάνω από την επιφάνεια ολίσθησης, η έντονη διάτμηση προκαλεί αυξημένη σύγκρουση των σωματιδίων, οδηγώντας σε αύξηση της μέσης απόστασης των σωματιδίων και έτσι να μειωθεί η πραγματική γωνία τριβής,
- η ανοδική κίνηση ενός τμήματος της ρευστής υποστήριξης του βάρους ιζήματος, μπορεί να προκαλέσει την μείωση της ενεργού τάσης και της τριβής μεταξύ των σωματιδίων,
- το νερό που έχει παραμείνει στους κόκκους του εδάφους είναι σημαντικός παράγοντας και επηρεάζει την κινητικότητα του.

## 1.2.3 Η δύναμη πρόσκρουσης

Η δύναμη πρόσκρουσης εξαρτάται από την ταχύτητα της ροής, την κοκκομετρία, την γεωμετρία του μετώπου, την τριβή με το έδαφος και την περιεκτικότητα σε νερό.

### 1.2.3.1 Επιρροή της κοκκομετρίας στην δύναμη πρόσκρουσης

Η δύναμη πρόσκρουσης αποτελείται από:

1. την δυναμική πίεση που ασκείται από τον πολτό της ροής κορημάτων, δηλαδή λεπτόκοκκα υλικά και νερό
2. την δύναμη πρόσκρουσης των χονδρόκοκκων υλικών
3. την δύναμη πρόσκρουσης των βράχων

Σύμφωνα με μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε [9], όσο μεγαλύτερο βάρος και μέγεθος έχει το κάθε υλικό της ροής τόσο η ταχύτητά του ξεχωριστά αυξάνεται, άρα και η συνολική ταχύτητα και δύναμη πρόσκρουσης. Συγκεκριμένα έδειξε ότι η δύναμη

πρόσκρουσης του βράχου είναι περίπου 30 φορές μεγαλύτερη από την δύναμη του πολτού της ροής και περίπου 10 φορές μεγαλύτερη της δύναμης των χονδρόκοκκων υλικών. Η δύναμη των χονδρόκοκκων υλικών είναι μόνο 3 φορές μεγαλύτερη της δύναμης του πολτού. Επομένως, ο σχεδιασμός των στοιχείων ανάσχεσης ροής κορημάτων πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη και της τρεις παραμέτρους αλλά κυρίως τους περιεχόμενους βράχους, καθώς αυτοί μεταφέρουν το περισσότερο φορτίο.

Σύμφωνα με τον Iverson (1997) [11], όταν το μέγεθος της ροής αυξάνεται τότε η σημασία των ιξωδών τάσεων μειώνεται και η πίεση του νερού των πόρων αυξάνεται αρκετά. Μια φυσική ροή συνθριμμάτων περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μεγεθών σωματιδίων μεταξύ  $10^{-5}$  – 10 m.

### 1.2.3.2 Επιρροή της γεωμετρίας του μετώπου στην δύναμη πρόσκρουσης

Η γεωμετρία του μετώπου εξαρτάται από:

- την τριβή με το εδάφος. Σε λεία επιφάνεια η τελική απόθεση του υλικού αποκτά μια χαρακτηριστική «φακοειδή» μορφή, δηλαδή τα υλικά συσσωρεύονται μπροστά. Αντίθετα σε αδρή επιφάνεια η τελική μορφή ολίσθησης είναι περισσότερο επιμήκης και παρουσιάζει το σχήμα σταγόνας, δηλαδή τα υλικά «απλώνουν» [13].
- την περιεκτικότητα σε νερό. Σε μια κοκκώδης ροή συνθριμμάτων (μικρή τιμή πορώδους) αναπτύσσεται μεγαλύτερη δύναμη πρόσκρουσης από ότι σε μια λασπώδης ροή (μεγάλη τιμή πορώδους).
- το μέγεθος των υλικών του μετώπου. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η δύναμη πρόσκρουσης των βράχων είναι μεγαλύτερη από την δύναμη πρόσκρουσης του πολτού της ροής.

### 1.2.4 Συνέπειες – Κίνδυνοι

Η ροή συνθριμμάτων είναι επικίνδυνη καθώς συμβαίνει ξαφνικά χωρίς προειδοποίηση, αναπτύσσει υψηλές ταχύτητες (πίνακας 1.1α), ο όγκος της και το πλάτος της ποικίλει ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής, καλύπτει μεγάλη απόσταση εκκεντρότητας και οι δυνάμεις πρόσκρουσης είναι μεγάλες.

Οι ροές συνθριμμάτων έχουν σοβαρές κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές συνέπειες, σε ορεινό περιβάλλον. Συγκεκριμένα η ροή προκαλεί ζημιές με τρεις τρόπους: εναπόθεση, παράσυρση, σύγκρουση. Η πρόσκρουση είναι το κύριο αίτιο που προκαλεί δομικές καταστροφές [9]. Επιπλέον, οι ζημιές ποικίλουν και εξαρτώνται από το μέγεθος της ροής συνθριμμάτων, όσο μικρότερος είναι ο όγκος της ροή τόσο περιορισμένη είναι η ζημιά.

ΤΑΞΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ	ΟΓΚΟΣ (m <sup>3</sup> )	ΠΙΘΑΝΕΣ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ
1	< 10 <sup>2</sup>	πολύ περιορισμένη καταστροφή: έχουν σκοτωθεί δασεργάτες σε μικρές ρεματιές, ζημιά σε μικρά κτίρια
2	10 <sup>2</sup> ~ 10 <sup>3</sup>	να θάψει αυτοκίνητα, να καταστρέψει ένα μικρό ξύλινο κτίριο, να σπάσει δέντρα, να μπλοκάρει οχετούς, να εκτροχιάσει τρένα
3	10 <sup>3</sup> ~ 10 <sup>4</sup>	να καταστρέψει μεγαλύτερα κτίρια, ζημιά σε τσιμεντένιες αποβάθρες γεφυρών, μπλοκ και ζημιές σε δρόμους και αγωγούς
4	10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>5</sup>	να καταστρέψει τμήματα χωριών, να καταστρέψει τμήματα υποδομής, να μπλοκάρει ρυάκια
5	10 <sup>5</sup> ~ 10 <sup>6</sup>	να καταστρέψει τμήματα πόλεων, να καταστρέψει δάση αρκετών τετραγωνικών χιλιομέτρων, να μπλοκάρει μικρά ποτάμια
6	10 <sup>6</sup> ~ 10 <sup>7</sup>	να καταστρέψει πόλεις, να εξαλείψει πεδιάδες αρκετών δεκάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων, να φράξει ποτάμια
7	10 <sup>7</sup> ~ 10 <sup>8</sup>	να καταστρέψει τμήματα μεγάλων πόλεων, να καταστρέψει δάση αρκετών τετραγωνικών χιλιομέτρων, να φράξει μεγάλα ποτάμια
8	10 <sup>8</sup> ~ 10 <sup>9</sup>	να καταστρέψει μεγάλες πόλεις, να πλημμυρίσει μεγάλες πεδιάδες μέχρι 100 τετραγωνικά χιλιόμετρα
9	10 <sup>9</sup> ~ 10 <sup>10</sup>	τεράστια και ολοσχερή καταστροφή πάνω από εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα
10	> 10 <sup>10</sup>	τεράστια και ολοσχερή καταστροφή πάνω από εκατοντάδες τετραγωνικά χιλιόμετρα

Πίνακας 1.2: Ταξινόμηση ροών συνθριμμάτων ανάλογα τις συνέπειες τους[12]

### 1.3 Περιγραφή της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο ακριβής Γεωτεχνικός και Δομοστατικός Σχεδιασμός για την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία τεχνικών έργων ανάσχεσης της ροής συνθριμμάτων από κατολισθητικά φαινόμενα σε σεισμογενείς περιοχές.

Το φαινόμενο των κατολισθήσεων είναι εξ' ορισμού πολυμεταβλητό, καθότι πληθώρα παραμέτρων συμβάλλουν με διαφορετικό τρόπο ανά περίπτωση στην τελική εκδήλωση του φαινομένου, πράγμα που δεν λαμβάνεται υπόψη στους ισχύοντες κανονισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο. Συχνά επιφέρει σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις (μεταφορές οικισμών, επισφαλείς συνθήκες θεμελίωσης, δυσλειτουργία δημόσιων, έργων, απώλεια πολύτιμης γης, κ.α.), ενώ η πρόοδος στη γνώση, ανάλυση, πρόβλεψη και αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων συνδέεται άμεσα με την πρόοδο της Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Γενικά μια κατολίπηση, η οποία εκφράζει το αποτέλεσμα της αναζήτησης μιας νέας κατάστασης ισορροπίας του εδάφους, μπορεί να είναι μεγάλη ή μικρή, με ρήξη ή όχι της συνέχειας της πλαγιάς, αργή ή ξαφνική. Οι παράμετροι που συμβάλλουν στο φαινόμενο της κατολίπησης είναι α) η δομή του γεωλογικού υπόβαθρου και η τεκτονική της

περιοχής, β) η σεισμικότητα και η ηφαιστειακή δραστηριότητα, καθώς και η κινητικότητα του υποβάθρου, γ) το είδος των πετρωμάτων και εδαφών της περιοχής, δ) οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και ε) οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες [3].

Για την αντιμετώπιση των κατολισθητικών φαινομένων απαιτείται πολύ καλή γνώση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών της περιοχής, των αιτιών και του μηχανισμού γένεσης των κατολισθήσεων, καθώς και των υπεδαφικών συνθηκών. Παρόλα αυτά, στην παρούσα εργασία το ενδιαφέρον στην αποτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται σε στιβαρά στοιχεία ανάσχεσης της ροής συνθριμμάτων εντοπίζεται στην γεωμετρία του μετώπου και στην κατανομή της κοκκομετρίας των συνθριμμάτων.

Για την εκτίμηση των δυνάμεων που προαναφέρθηκαν θα γίνει προσομοίωση της κατάστασης με το πρόγραμμα PFC3D®, με τη βοήθεια της μεθόδου διακριτών στοιχείων (DEM). Ειδικότερα, η μελετούμενη ροή θα προσομοιωθεί με μια ομάδα σφαιρών η οποία θα προσκρούει σε ένα άκαμπτο στοιχείο.

Για την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία των σχεδιαζόμενων έργων ανάσχεσης των κατολισθήσεων, απαιτείται και ακριβής δομοστατικός σχεδιασμός που στοχεύει στον έλεγχο δυνατότητας κατασκευής σε συνάρτηση με τις επικρατούσες υπεδαφικές συνθήκες, τον υπολογισμό των δομικών στοιχείων κλπ.

### 1.3.1 Σύνδεση με άλλες εργασίες επί του θέματος

Οι εμπειρικές μέθοδοι (υδροστατικά HS και υδροδυναμικά HD μοντέλα, πρόσκρουση βράχων ΒΙ κ.ά.), που χρησιμοποιούνται δεν εξετάζουν σημαντικές παραμέτρους όπως η μπροστινή γωνία της ροής και το πορώδες [18].

Σε μια αντίστοιχη διπλωματική εργασία (Γουρνοπάνος, 2013)[8] μελετήθηκαν με την μέθοδο DEM και το πρόγραμμα PFC3D®:

- η διακύμανση των τιμών των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κατά την προσομοίωση
- ο απαιτούμενος χρόνος ώστε η δύναμη πρόσκρουσης να φτάσει την μέγιστη τιμή της
- η μέγιστη δύναμη πρόσκρουσης των σωματιδίων στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης
- η τιμή της παραμένουσας δύναμης
- το ποσοστό των σωματιδίων που περνά πάνω από το δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης μετά το πέρας της προσομοίωσης

Δημιουργήθηκαν αριθμητικά μοντέλα ορίζοντας σε κάθε προσομοίωση διαφορετικές γεωμετρικές και μηχανικές παραμέτρους[8]. Τέτοιες παράμετροι ήταν:

- η κλίση του μετώπου της μάζας
- το μήκος της μάζας
- το ύψος της μάζας
- ο συντελεστής τριβής των σφαιρών
- η κλίση του εδάφους

Καταλήγοντας στα ακόλουθα συμπεράσματα [8] :

- Το μέγεθος της δύναμης που ασκείται στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης εξαρτάται από: (α) τον συντελεστή τριβής, (β) την κλίση του εδάφους και (γ) το πορώδες.
- Ο συντελεστής τριβής και η κλίση του εδάφους καθορίζει το ποσό των σωματιδίων που περνούν πάνω από το δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης.
- Η μορφή της τριβής διέπει το μπροστινό τμήμα και το κατώτερο τμήμα της ροής .
- Όταν οι δυνάμεις επαφής διαλύονται, η μάζα είναι πιο πιθανό να διασταλεί.
- Η ταχύτητα της φόρτισης επηρεάζεται από: (α) την μπροστινή κλίση της ροής και (β) το ύψος της ροής.

Ως συνέχεια της παραπάνω διπλωματικής εργασίας θα μελετηθούν:

- α) η μέγιστη δύναμη πρόσκρουσης των σωματιδίων στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης και
- β) η αντίστοιχη μέγιστη πίεση της ροής που ασκείται στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης

Με την δημιουργία αριθμητικών μοντέλων με κοινό πορώδες και διαφορετικές παραμέτρους, όπως:

- η γωνία πρόσκρουσης και
- η μέση ακτίνα των σωματιδίων της ροής

### 1.3.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία είναι χωρισμένη σε πέντε κεφάλαια και συνοδεύεται από πίνακες, διαγράμματα και εικόνες.

Το πρώτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει το φαινόμενο των κατολισθήσεων. Αναφέρονται οι τύποι των κατολισθήσεων, οι μηχανισμοί, οι συνέπειες τους και το πώς επηρεάζεται η

δύναμη πρόσκρουσης από την κοκκομετρία της ροής συνθριμμάτων και από την γεωμετρία του μετώπου της. Τέλος, αναφέρεται επιγραμματικά τι έχει μελετηθεί σε αντίστοιχη διπλωματική εργασία.

Το δεύτερο κεφάλαιο, περιλαμβάνει λεπτομέρειες για τον τρόπο λειτουργίας του προγράμματος PFC3D®. Συγκεκριμένα αναφέρονται πληροφορίες για τη μέθοδο DEM, το περιβάλλον και οι μηχανικές του προγράμματος.

Το τρίτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει την δημιουργία των μοντέλων στο πρόγραμμα PFC3D®. Τίθεται το πρόβλημα και δίνονται τα δεδομένα για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων.

Το τέταρτο κεφάλαιο, περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις χωρίζονται σε χρονικά στάδια και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αριθμητικά, γραφικά καθώς και με εικόνες για την κατανόηση της πορείας της προσομοίωσης.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων και αναφέρονται οι τρεις μηχανισμούς αστοχίας υποστυλωμάτων λόγω κατολισθητικών φαινομένων. Πραγματοποιείται ο έλεγχος πέντε υποστυλωμάτων ως προς την αντοχή τους σε ροπή και τέμνουσα, για διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης και αστοχίας.

## 2.1 Εισαγωγή στο πρόγραμμα PFC3D®

---

Το πρόγραμμα PFC3D® (Particle Flow Code 3D) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων άμεσης προσέγγισης. Πρόκειται για έναν αριθμητικό κώδικα που προσομοιώνει την κίνηση και τις αλληλεπιδράσεις των σφαιρικών σωματιδίων με βάση τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων (DEM) σε ένα περιβάλλον τριών διαστάσεων. [14]

## 2.2 Μέθοδος Διακριτών Στοιχείων (DEM Discrete Element Method)

---

Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων παρουσιάστηκε από τον Cundall (1971) [16] για την ανάλυση των ζητημάτων στην βραχομηχανική και αργότερα χρησιμοποιήθηκε και στην εδαφομηχανική από τους Cundall και Strack (1979) [15]. Είναι μια αριθμητική μέθοδος προσομοίωσης, όπου το δοκιμαζόμενο υλικό αναπαριστάται ως ένα σύστημα αλληλεπιδρώντων διακριτών άκαμπτων στοιχείων, που υπόκεινται σε μακροσκοπική κίνηση. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το μέσο θεωρείται ασυνεχές και δίνεται έμφαση στις επαφές και στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του μέσου.

Οι υπολογισμοί κατά την διάρκεια των αριθμητικών λύσεων πραγματοποιούνται με σειρά μεταξύ του 2<sup>ου</sup> νόμου Νεύτωνα, που εφαρμόζεται στα διακριτά σωματίδια, και ενός ποσοστού δύναμης-μετατόπισης που εφαρμόζεται στην επαφή των σωματιδίων. Κάθε σωματίδιο εκτελεί μια περιστροφική κίνηση λόγω της δράσης των δυνάμεων που ασκούνται στην επαφή από γειτονικά σωματίδια, σε εξωτερικές δυνάμεις όσο ασκούνται οι βαρυτικές δυνάμεις. Για την περιγραφή αυτής της κίνησης χρειάζεται ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα. Συνεπώς το ποσοστό της δύναμης-μετατόπισης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ασκούμενων δυνάμεων στις επαφές των σωματιδίων είναι αποτέλεσμα της εφαπτόμενης κίνησης σωματιδίων.

Οι δυναμικές εξισώσεις κίνησης που προκύπτουν επιλύονται με αριθμητικούς υπολογισμούς σε χρονικά βήματα (time steps). Σε κάθε time step:

1. υπολογίζονται οι δυνάμεις των επαφών και οι εφαπτομενικές μετατοπίσεις των σωματιδίων που εμφανίζονται από την διάδοση διαταραχών μέσω του συστήματος των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται
2. οι επιταχύνσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων θεωρούνται σταθερές, όπως σε συνθήκες ισορροπίας



## 2.3 Πρόγραμμα PFC3D®

---

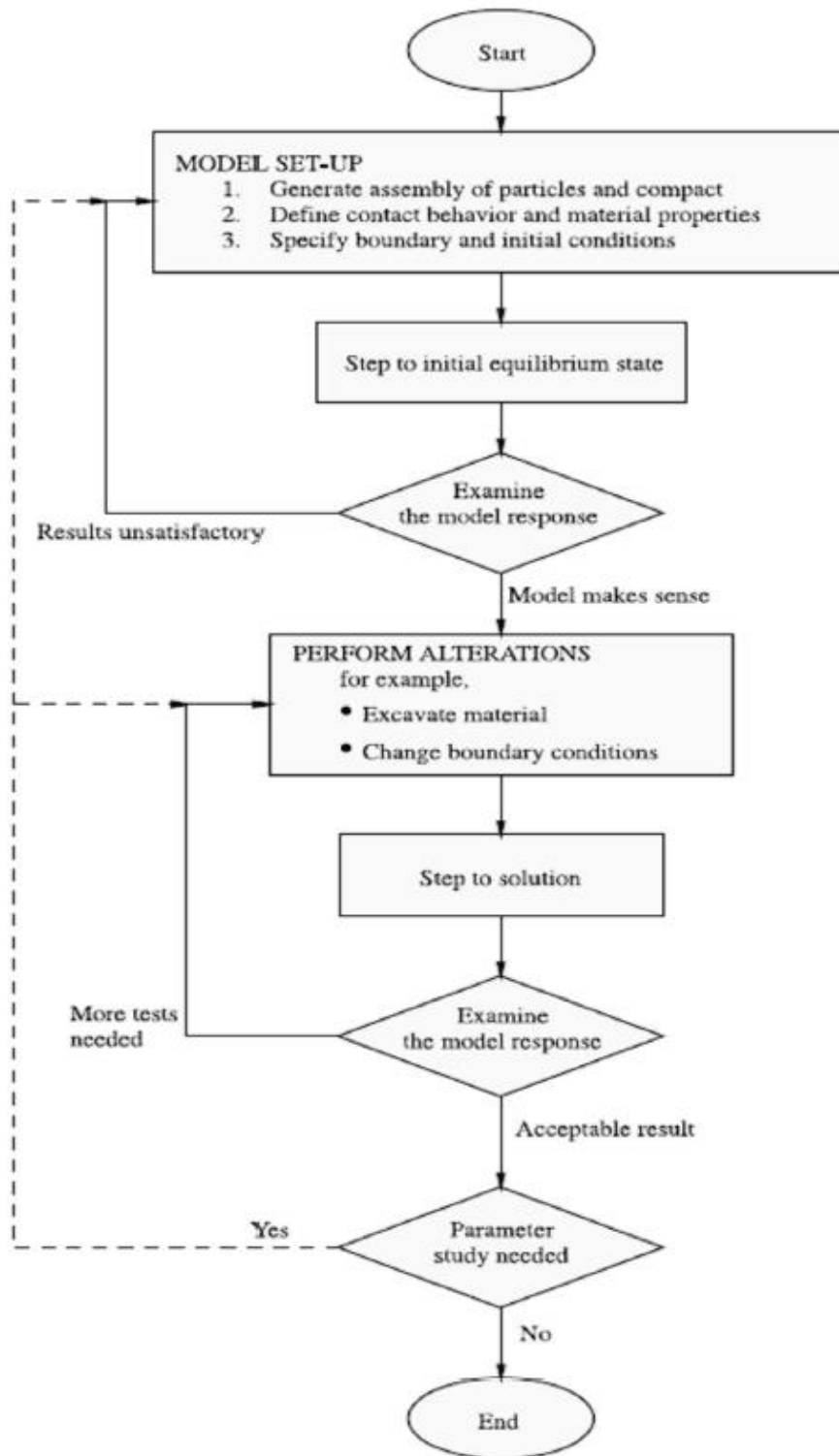
Το PFC3D® μοντελοποιεί την μετακίνηση και την αλληλεπίδραση των σφαιρικών σωματιδίων, σύμφωνα με την μέθοδο DEM. Η μέθοδος αυτή βοήθησε στην έρευνα για τη συμπεριφορά ενός κοκκώδους υλικού. Έτσι το PFC3D® έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων στην εδαφομηχανική και στην κοκκώδη ροή.

Σε τέτοιες εφαρμογές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα αριθμητικό μοντέλο ώστε οι κύριοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την συμπεριφορά να μπορούν να κατανοηθούν ώστε οι απλοί υπολογισμοί να αναπτυχθούν για μια σχεδιαστική διαδικασία. Το πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα στον σχεδιασμό, αν το υλικό έχει κατανοηθεί και υπάρχουν επαρκή στοιχεία.

Για την εκτέλεση μιας προσομοίωσης στο PFC3D®, πρέπει να καθορίζονται:

1. Η διάταξη των σωματιδίων, αποτελείται από τον συντονισμό και το μέγεθος των σωματιδίων.
2. Η συμπεριφορά επαφής και οι ιδιότητες των υλικών, υπαγορεύουν το αποτέλεσμα του μοντέλου μετά από την διαταραχή.
3. Οι οριακές και αρχικές συνθήκες, καθορίζουν την κατάσταση της διάταξης αμέσως πριν την διαταραχή.

Στην συνέχεια υπολογίζεται η λύση του προβλήματος, μετά από μια σειρά χρονικών βημάτων (time steps). Η ποσότητα των βημάτων ορίζεται από τον χρήστη και ποικίλλει ανάλογα την περίπτωση. Οι βασικές εντολές περιγράφονται παρακάτω (σχήμα 2.1) :



Σχήμα 2.1: Διαδικασία γενικής λύσης [14]

Για την συγκεκριμένη μελέτη τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν είναι τα εξής:

- Δημιουργία σωματιδίων (particle generation). Ο στόχος στη συγκεκριμένη μελέτη είναι να τοποθετηθούν τα σωματίδια σε αυθαίρετες θέσεις (ακανόνιστη διάταξη) σε έναν περικλειστο όγκο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη εσωτερικές δυνάμεις και καταπονήσεις.
- Αρχικές και οριακές συνθήκες (initial and boundary conditions). Στις αρχικές συνθήκες επιτυγχάνεται η επιθυμητή αρχική κατάσταση τάσης της διάταξης. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να ελέγχονται ή να προσαρμόζονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ή να παραμένουν σταθερές σε όλη την διάρκεια.
- Μοντέλο επαφής (contact model). Ο όρος «επαφή» υποδηλώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων και τις αλληλεπιδράσεις αυτών με τα τοιχώματα, μέσω των δυνάμεων που αναπτύσσονται. Ο τύπος της επαφής θα μπορούσε να αφορά α) την ελαστική σχέση της δύναμης επαφής και τη σχετική μετατόπιση, β) τα σωματίδια που δεν είναι συνδεδεμένα με επαφή αλλά με παράλληλη επαφή και γ) την ολίσθηση ή την απόσπαση των σωματιδίων ανάλογα με το μέγεθος της δύναμης εφελκυσμού που εφαρμόζεται στην επαφή του σωματιδίου.
- Ιδιότητες υλικού (material properties). Οι ιδιότητες υλικού που εισάγονται αφορούν τις ιδιότητες και την σχέση σωματιδίων-τοιχών. Με το PFC3D® προσομοιώνεται η συμπεριφορά ενός υλικού με βάση την συμπεριφορά της μικροδομής του σε συνδυασμό με κάθε υλικό. Αν οι ιδιότητες του υλικού δεν είναι γνωστές τότε η επιλογή του είναι δύσκολη.
- Φόρτιση, επίλυση και διαδοχική μοντελοποίηση (loading, solution and sequential modeling). Υπάρχουν δύο τύποι φόρτισης, η παθητική και η ενεργητική φόρτιση. Στην παθητική φόρτιση κάθε τροποποίηση μοντέλου προκαλεί το φορτίο να μεταφερθεί μέσα στο ίδιο το μοντέλο, ενώ η ενεργητική φόρτιση (δυνάμεις-ταχύτητες) ασκείται εξωτερικά. Με την χρήση του όρου «επίλυση» εννοούμε τους κύκλους υπολογισμών και τα βήματα που εκτελεί το πρόγραμμα, ώστε να ρυθμιστεί το μοντέλο σε κατάσταση ισορροπίας. Η επίλυση μπορεί να είναι στατική ή δυναμική και η κύρια διαφορά αυτών των δύο είναι η διαδικασία απόσβεσης. Η DEM είναι δυναμική μέθοδος και μερικές φορές η απόσβεση είναι απαραίτητη για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας. Οι δυναμικές επιλύσεις απαιτούνται για προβλήματα που αφορούν φορτία μεγάλης και σύντομης διάρκειας. Στην στατική επίλυση το σύστημα φτάνει στην κατάσταση ισορροπίας χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό βημάτων υπολογισμού.
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (interpretation of results). Το PFC3D® προσομοιώνει ένα μη γραμμικό σύστημα από διακριτά στοιχεία, με αποτέλεσμα η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποτελεί ένα δύσκολο έργο. Έτσι η ορθή ερμηνεία πρέπει να πραγματοποιηθεί με ανάλυση των διαγραμμάτων των αποτελεσμάτων.

### 2.3.1 Ονοματολογία

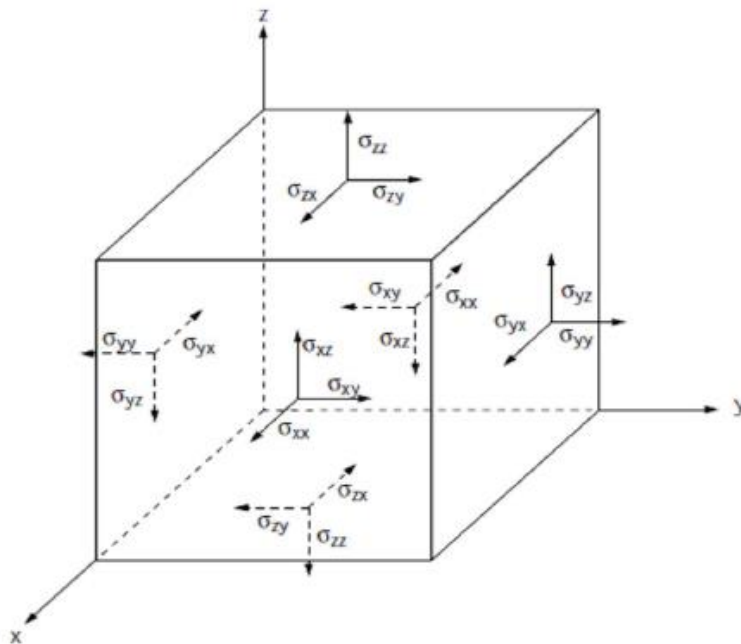
- Μοντέλο PFC3D® : Το μοντέλο PFC3D® δημιουργείται από το χρήστη για την προσομοίωση ενός φυσικού προβλήματος. Ο όρος «μοντέλο PFC3D®» δηλώνει την ακολουθία εντολών του PFC3D® που καθορίζει τις συνθήκες του προβλήματος για αριθμητική λύση.
- Μπάλα (ball) : Μια σφαιρική μπάλα είναι η θεμελιώδης γεωμετρική οντότητα για τον υπολογισμό διακριτών στοιχείων. Το μοντέλο PFC3D® δημιουργείται με τη δημιουργία μιας διάταξης μπαλών μέσα στην φυσική περιοχή που αναλύεται. Οι μπάλες αντιμετωπίζονται ως σφαίρες. Ένας άλλος όρος για την μπάλα είναι «σωματίδιο» (particle).
- Τοίχος (wall) : Υπάρχουν δύο είδη τοίχων, ο κανονικός (standard) και ο γενικός (general) τοίχος. Ο κανονικός τοίχος είναι ένα επίπεδο που έχει αυθαίρετα καθορισμένες ιδιότητες επαφής για την αλληλεπίδραση με τα σωματίδια. Ο γενικός τοίχος διαφέρει από τον κανονικό στο γεωμετρικό του σχήμα, και οι δύο πλευρές του είναι «ενεργές». Υπάρχουν δύο τύποι τοίχων, οι άπειροι (infinite) και οι πεπερασμένοι (finite) τοίχοι. Οι άπειροι τοίχοι είναι επίπεδα που τα όρια τους τείνουν στο άπειρο, ενώ οι πεπερασμένοι τοίχοι είναι επίπεδα πολύγωνα. Οι δεύτεροι μπορούν να συνδεθούν. Ο κάθε τοίχος έχει μια «ενεργή» πλευρά που μπορεί να αλληλεπιδράσει με τα σωματίδια.
- Επαφή (contact) : Τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με άλλα σωματίδια ή με τους τοίχους στα σημεία επαφής. Οι δυνάμεις που δημιουργούνται μεταξύ δύο σωματιδίων ή σωματιδίου και τοίχου, ενεργούν στο σημείο επαφής. Οι επαφές που δημιουργούνται όταν δύο σφαίρες ή μια σφαίρα και ένας τοίχος επικαλύπτονται, αυτό αντιστοιχεί σε φυσική παραμόρφωση.
- Όριο μοντέλου (model boundary) : Το όριο του μοντέλου είναι η περιφέρεια του μοντέλου PFC3D®. Ένας τοίχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει ένα όριο μοντέλου ή μπορεί να ανατεθεί μια σειρά από σφαίρες με προκαθορισμένες ταχύτητες.
- Αρχικές συνθήκες (initial conditions) : Αυτή είναι η αρχική κατάσταση όλων των μεταβλητών στο μοντέλο (πχ δυνάμεις επαφής) πριν από οποιαδήποτε αλλαγή φόρτισης ή διαταραχή. Η αρχική κατάσταση υπολογίζεται συνήθως σε δύο στάδια. Πρώτα είναι η συμπιεσμένη κατάσταση, στην οποία πρέπει η διάταξη των σωματιδίων να αποκτήσει το επιθυμητό πορώδες και κλειδωμένο σε κατάσταση ισχύος. Στην συνέχεια, εφαρμόζονται δυνάμεις ή ταχύτητες για την επίτευξη μιάς ισορροπημένης κατάστασης, η οποία είναι αντιπροσωπευτική του προβλήματος στην αρχική του κατάσταση.
- Οριακή συνθήκη (boundary condition) : Μια οριακή συνθήκη είναι η συνταγή ενός περιορισμού ή ελεγχόμενο κατάσταση κατά μήκος ενός ορίου μοντέλου.
- Εμβέλεια (range) : Η εμβέλεια στο PFC3D® είναι μια περιγραφή της έκτασης των ορίων μιας μεταβλητής. Η λογική της εμβέλειας επιτρέπει σε κάποιον να δώσει

συγκεκριμένες εντολές σε ένα περιορισμένο σύνολο αντικειμένων, όπως σωματίδια, επαφές.

- Κύκλος ή Βήμα (cycle or step) : Η λύση σε ένα πρόβλημα στο PFC3D® απαιτεί μια σειρά από υπολογιστικά βήματα. Κατά την διάρκεια της εκτέλεσης των βημάτων, οι πληροφορίες που σχετίζονται με το φαινόμενο υπό εξέταση διαδίδονται κατά μήκος των σωματιδίων του μοντέλου, μέσω των επαφών. Απαιτείται ένας ορισμένος αριθμός βημάτων ώστε να καταλήξουμε σε μια κατάσταση ισορροπίας για μια στατική λύση.
- Πορώδες (porosity) : Το πορώδες είναι ο λόγος του όγκου των κενών μεταξύ των σωματιδίων και μαζών σε μια δεδομένη ογκομετρική περιοχή ενός μοντέλου με τον συνολικό όγκο της συγκεκριμένης περιοχής. Το πορώδες σχετίζεται με την συμπιεσμένη κατάσταση του μοντέλου. Επίσης μπορεί να μετρηθεί σε ένα μοντέλο με μια σφαίρα μέτρησης. Η επικάλυψη μεταξύ των σφαιρών παίζει ρόλο στον υπολογισμό του πορώδους.
- Μη ισορροπημένη δύναμη (unbalanced force) : Η μη ισορροπημένη δύναμη δείχνει πότε μια μηχανική κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται για μια στατική ανάλυση. Ένα μοντέλο είναι στην ακριβή ισορροπία, αν το διάνυσμα της δύναμης σε κάθε κεντρικό σωματίδιο είναι μηδέν. Τα μέγιστα και μέσα μη ισορροπημένα διανύσματα δύναμης παρακολουθούνται στο PFC3D® και εμφανίζονται στην οθόνη με την εντολή **CYCLE** ή **STEP**. Η μέγιστη μη ισορροπημένη δύναμη δεν θα φτάσει ποτέ ακριβώς μηδέν για μια αριθμητική ανάλυση. Το μοντέλο θεωρείται πως είναι σε ισορροπία, όταν η μέγιστη (ή ο μέσος όρος) μη ισορροπημένη δύναμη είναι μικρή σε σχέση με την μέγιστη (ή το μέσο όρο) δύναμη επαφής στο μοντέλο, για μια συγκεκριμένη διάταξη σωματιδίων. Αν η μη ισορροπημένη δύναμη προσεγγίζει μια σταθερή μη μηδενική τιμή, αυτό δείχνει ότι στο μοντέλο υπάρχει αστοχία και κοκκώδης ροή.
- Δυναμική λύση (dynamic solution) : Για μια δυναμική λύση (προεπιλεγμένη συμπεριφορά) οι πλήρες εξισώσεις κίνησης επιλύονται, η παραγωγή και η διάχυση της κινητικής ενέργειας επηρεάζουν άμεσα την επίλυσή τους. Οι δυναμικές λύσεις που απαιτούνται για προβλήματα που αφορούν υψηλή συχνότητα και μικρής διάρκειας φόρτισης, πχ καταπτώσεις, εκρηκτικό φορτίο.
- Στατική λύση (static solution) : Μια στατική ή οιονεί-στατική λύση επιτυγχάνεται στο PFC3D® όταν ο ρυθμός μεταβολής της κινητικής ενέργειας σε ένα μοντέλο τείνει αμελητέα ποσότητα, το οποίο επιτυγχάνεται με απόσβεση των εξισώσεων κίνησης. Στο στατικό στάδιο, το μοντέλο είτε θα είναι σε κατάσταση εξαναγκασμένης ισορροπίας είτε σε μια κατάσταση σταθερής ροής του υλικού, αν ένα τμήμα ή το σύνολο του μοντέλου αστοχεί υπό τις εφαρμοζόμενες συνθήκες φόρτισης.

### 2.3.2 Σύμβαση εννοιών

- Διατμητική τάση (Shear stress): Μια θετική διατμητική τάση δείχνει προς την θετική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων του δεύτερου τεταρτημόριου. Αντίθετα, αν η προς τα έξω κανονική της επιφάνειας είναι αρνητική, τότε η διατμητική τάση δείχνει προς την αρνητική διεύθυνση του άξονα συντεταγμένων του δεύτερου τεταρτημορίου.
- Άμεση τάση (Direct stress): Οι θετικές τάσεις δείχνουν τον εφελκυσμό και οι αρνητικές τάσεις την θλίψη.



Σχήμα 2.2: Θετικές συνιστώσες τάσεων

- Δυνάμεις επαφής (Contact forces): Κάθε διάνυσμα δύναμης επαφής μπορεί να αναλυθεί σε κανονικές και διατμητικές συνιστώσες ως προς το επίπεδο επαφής. Οι κανονικές δυνάμεις επαφής δρουν κανονικά στο επίπεδο επαφής, ενώ οι διατμητικές δυνάμεις επαφής δρουν μέσα στο επίπεδο επαφής. Οι θετικές κανονικές δυνάμεις επαφής δείχνουν θλίψη και οι αρνητικές εφελκυσμό.

	ΔΙΕΘΝΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑ (SI)			
ΜΗΚΟΣ	m	m	m	cm
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> kg/m <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> g/cm <sup>3</sup>
ΔΥΝΑΜΗ	N	kN	MN	Mdynes
ΤΑΣΗ	Pa	kPa	Mpa	bar
ΒΑΡΥΤΗΤΑ	m/sec <sup>2</sup>	m/sec <sup>2</sup>	m/sec <sup>2</sup>	cm/sec <sup>2</sup>
ΑΚΑΜΨΙΑ ΜΠΑΛΑΣ	N/m	kN/m	MN/m	Mdynes/cm
ΑΚΑΜΨΙΑ ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ	Pa/m	kPa/m	Mpa/m	bar/cm

Πίνακας 2.1: Σύστημα μονάδων - μηχανικές παράμετροι [15]

## 2.4 Μηχανική του PFC3D<sup>®</sup>

Ένα μοντέλο γενικής ροής σωματιδίων προσομοιώνει την μηχανική συμπεριφορά του υλικού που πρέπει να εξεταστεί. Το σύστημα αποτελείται από διακριτά σωματίδια που εκτοπίζονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και αλληλεπιδρούν στην επαφή ή στις διεπαφές μεταξύ των σωματιδίων.

Το PFC3D<sup>®</sup> λειτουργεί με βάση τις παρακάτω υποθέσεις:

- Τα σωματίδια θεωρούνται ως άκαμπτα σώματα.
- Όλα τα σωματίδια είναι σφαιρικά.
- Το μέγεθος της επικάλυψης είναι σχετικό με την δύναμη επαφής μέσω του νόμου της δύναμης-μετατόπισης, και όλες οι επικαλύψεις είναι μικρές σε σχέση με τα μεγέθη των σωματιδίων.
- Οι επαφές γίνονται σε ένα πολύ μικρό σημείο.
- Στις επαφές μεταξύ των σωματιδίων μπορεί να υπάρχουν σύνδεσμοι.
- Η συμπεριφορά στις επαφές χρησιμοποιεί μια μαλακή-επαφή προσέγγιση, όπου τα άκαμπτα σωματίδια επιτρέπεται να επικαλύπτονται μεταξύ τους στα σημεία επαφής.

### 2.4.1 Κύκλος υπολογισμών

Ο κύκλος υπολογισμών στο PFC3D<sup>®</sup> είναι ένας αλγόριθμος με χρονικά βήματα. Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα ισχύει για κάθε σωματίδιο, ο νόμος της δύναμης-μετατόπισης ισχύει στις επαφές και μια συνεχής ανανέωση των θέσεων του τοίχου ώστε να κλείσει την επανάληψη. Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Νεύτωνα καθορίζει την κίνηση των σωματιδίων και δεν εφαρμόζεται στους τοίχους, αφού ο χρήστης καθορίζει την κίνησή του. Ο νόμος της

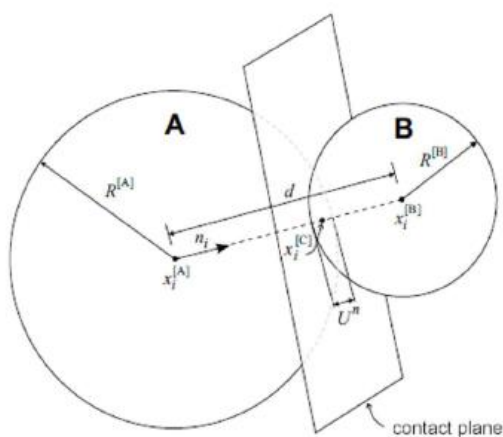
δύναμης-μετατόπισης ενημερώνει τις δυνάμεις επαφής που δημιουργούνται από την κίνηση σε κάθε επαφή.

> *Νόμος Δύναμης-Μετατόπισης*

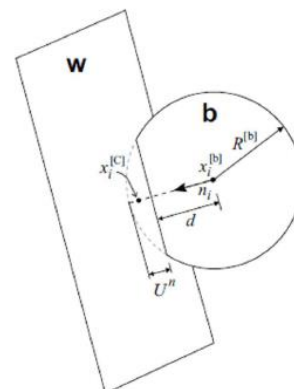
Ο νόμος αφορά τη σχετική μετατόπιση μεταξύ δύο οντοτήτων σε επαφή με τη δύναμη επαφής που ενεργεί στις οντότητες. Στις επαφές μπάλα-μπάλα και μπάλα-τοίχο, η δύναμη επαφής προκύπτει από την επαφή που δημιουργείται σε εκείνο το σημείο. Στην επαφή μπάλα-μπάλα μια επιπλέον δύναμη και ροπή αναπτύσσονται από την παραμόρφωση των υλικών.

Ο νόμος λειτουργεί σε μια επαφή και μπορεί να περιγραφεί ως ένα σημείο επαφής  $x_i^{[c]}$ , που βρίσκεται σε ένα επίπεδο επαφής που ορίζεται από μια κανονική μονάδα  $\mathbf{n}_i$ . Το σημείο επαφής είναι εντός του όγκου αλληλεπικάλυψης των δύο οντοτήτων. Για επαφή μπάλα-μπάλα, το κανονικό διάνυσμα έχει κατεύθυνση κατά μήκος της γραμμής μεταξύ των δυο κέντρων των μπαλών, ενώ για επαφή μπάλα-τοίχος το διάνυσμα έχει κατεύθυνση κατά μήκος της γραμμής της πιο μικρής απόστασης από το κέντρο της μπάλας μέχρι τον τοίχο. Η δύναμη επαφής αναλύεται σε μια κανονική συνιστώσα που ενεργεί κατά τη διεύθυνση του αρχικού διανύσματος και μια συνιστώσα διάτμησης που ενεργεί στο επίπεδο επαφής. Επομένως, ο νόμος δύναμης-μετατόπισης αφορά τις δυο συνιστώσες της δύναμης και τις αντίστοιχες συνιστώσες της σχετικής μετατόπισης μέσω της κανονικής και διατμητικής ακαμψίας στην επαφή.

Ο νόμος περιγράφεται και για τις δυο επαφές (μπάλα-μπάλα, μπάλα-τοίχος). Για μπάλα-μπάλα επαφή, οι σχετικές εξισώσεις που παρουσιάζονται στην περίπτωση δυο σφαιρικών σωματιδίων, επισημαίνονται με **A** και **B** στο σχήμα 2.3. Για μπάλα-τοίχο επαφή, οι σχετικές εξισώσεις που παρουσιάζονται στην περίπτωση ενός σφαιρικού σωματιδίου και ενός τοίχου, επισημαίνονται με **b** και **w** αντίστοιχα στο σχήμα 2.4. Και στις δυο περιπτώσεις το  $\mathbf{U}^n$  υποδηλώνει επικάλυψη.



Σχήμα 2.3: Επαφή μπάλα-μπάλα [14]



Σχήμα 2.4: Επαφή μπάλα-τοίχος [14]



## 2.4.2 Επαφές

Η συστατική συμπεριφορά ενός υλικού προσομοιώνεται στο PFC3D® συσχετίζοντας ένα μοντέλο επαφής με κάθε επαφή. Η συμπεριφορά του στοιχείου αποτελείται από ολίσθηση, δυσκαμψία και συνδέσμων.

Η συμπεριφορά ολίσθησης παρέχεται με την επιβολή μιας σχέσης μεταξύ διάτμησης και κανονικής δύναμης, έτσι ώστε οι δύο σε επαφή οντότητες να γλιστρήσουν η μία ως προς την άλλη. Η συμπεριφορά ολίσθησης είναι ενεργή δεδομένου ότι σε αυτό το έργο δεν υπάρχουν σύνδεσμοι επαφής. Το γραμμικό μοντέλο περιγράφει τη συμπεριφορά της δύναμης-μετατόπισης για την επαφή των σωματιδίων που συμβαίνει σε ένα σημείο.

Το γραμμικό μοντέλο παρέχει συμπεριφορά ολίσθησης. Η ακαμψία επαφής ορίζεται από την κανονική δυσκαμψία  $k^n$  και τη διατμητική δυσκαμψία  $k^s$  και των δύο οντοτήτων που βρίσκονται σε επαφή (μπάλα-μπάλα ή μπάλα-τοίχος).

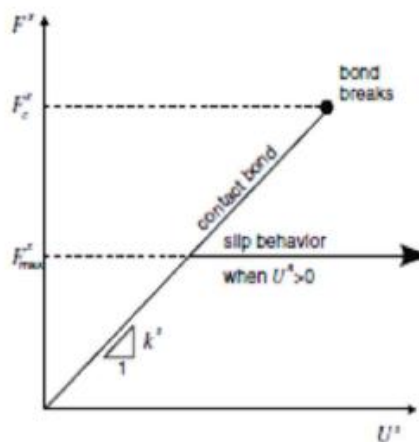
Η επαφή κανονικής ακαμψίας δίνεται από τον τύπο:

$$K^n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (2.1)$$

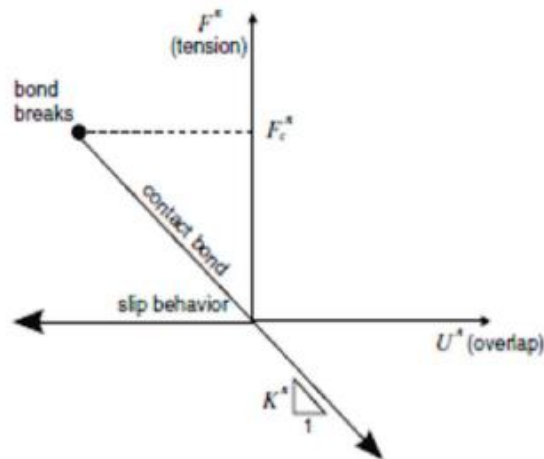
Η επαφή διατμητικής εφαπτόμενης ακαμψίας δίνεται από τον τύπο:

$$k^s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (2.2)$$

Οι εκθέτες **[A]** και **[B]** υποδηλώνουν τις δύο οντότητες σε επαφή. Για το γραμμικό μοντέλο η κανονική τέμνουσα δυσκαμψίας  $k^n$  ισούται με την κανονική εφαπτόμενη ακαμψία.



Σχήμα 2.5: Κανονικές συνιστώσες δύναμης επαφής [14]



Σχήμα 2.6: Διατμητικές συνιστώσες δύναμης επαφής [14]

### 2.4.3 Μηχανική απόσβεση

Η τοπική και ιξώδης απόσβεση είναι διαθέσιμη στο PFC3D® για να διαχέεται η κινητική ενέργεια, ώστε το μοντέλο να μπορεί να φτάσει σε μια σταθερή κατάσταση σε έναν λογικό αριθμό κύκλων. Η τοπική απόσβεση δρα σε κάθε μπάλα και εφαρμόζει δύναμη απόσβεσης με μέγεθος ανάλογο με τη μη ισορροπημένη δύναμη, ενώ η ιξώδης απόσβεση δρα σε κάθε επαφή προσθέτοντας κανονικούς και διατμητικούς μειωτές κρούσεων σε κάθε επαφή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ~ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

### 3.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την εργασία, η μάζα της κατολίσθησης προσομοιώθηκε με ένα σύνολο από τυχαία κατανομημένα άκαμπτα σωματίδια με συγκεκριμένο πλάτος και το δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης με τη μορφή ενός άκαμπτου τοίχου. Με τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν θα μελετηθεί πως επηρεάζεται η μέγιστη δύναμη που εφαρμόζεται στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης, από την αλλαγή στη μέση ακτίνα κόκκων και την γωνία πρόσκρουσης της μάζας.

Οι προσομοιώσεις παράχθηκαν χρησιμοποιώντας την demo έκδοση του προγράμματος PFC3D<sup>®</sup>. Η δοκιμαστική έκδοση έχει ένα περιορισμό όσον αφορά τον αριθμό των σωματιδίων που μπορούν να δημιουργηθούν στο μοντέλο. Ο μέγιστος αριθμός αυτών είναι 1500.

Τα μοντέλα λαμβάνουν χώρα σε ένα 3D περιβάλλον του προγράμματος PFC3D<sup>®</sup>. Τα σωματίδια και οι τοίχοι συντονίζονται σε ένα καρτεσιανό σύστημα για τρισδιάστατο χώρο. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει το μήκος, ο άξονας z το ύψος και ο άξονας y το βάθος.

### 3.2 Γεωμετρία του προβλήματος

Η προσομοίωση πραγματοποιείται σε συνθήκες επίπεδης καταπόνησης αποφεύγοντας κάθε πλευρική απώλεια της μάζας στο σημείο που θα επιτευχθεί ισορροπία και στην συνέχεια της προσομοίωσης. Το έδαφος και το δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης μοντελοποιούνται ως άκαμπτες επιφάνειες.

Διαφορές στις γεωμετρικές ιδιότητες της ροής (μήκος, ύψος) οδηγούν σε διαφορετικό αριθμό των σωματιδίων και μάζας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το πορώδες των μοντέλων επιλέγεται να είναι το χαμηλότερο δυνατό που θα ικανοποιεί ισορροπία στην αρχική κατάσταση της μάζας του εδάφους ακριβώς πριν από την προσομοίωση. Οι τυπικές ιδιότητες των μοντέλων παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες:

ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ			ΡΟΗ	
Μέση ακτίνα	Πορώδες	Λόγος μικρότερης - μεγαλύτερης ακτίνας	Πλάτος <sup>1</sup> & Ύψος <sup>1</sup>	Εμπρός κλίση
0,15	0,55	2,4	2,4	30°, 60°, 90°
0,35			5,6	
0,55			8,8	

*Πίνακας 3.1: Δεδομένα σωματιδίων*

<sup>1</sup> Οι τιμές αυτές εξαρτώνται από την αντίστοιχη μέση ακτίνα επί σταθερό συντελεστή.

Ύψος [m]	Κλίση	Συντελεστής τριβής
12	90°	0,60

Πίνακας 3.2: Δεδομένα δύσκαμπτου στοιχείου ανάσχεσης

Μήκος [m]	Ύψος [m]	Πλάτος <sup>1</sup> [m]	Συντελεστής τριβής
35	12	2,4	0,15
		5,6	
		8,8	

Πίνακας 3.3: Δεδομένα καναλιού.

### 3.3 Μοντέλα προσομοίωσης

Δημιουργήθηκαν εννέα διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης με τα ακόλουθα στοιχεία:

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	ΓΩΝΙΑ	ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ [m]
$\Delta 30_{015}$	30°	0,15
$\Delta 30_{035}$		0,35
$\Delta 30_{055}$		0,55
$\Delta 60_{015}$	60°	0,15
$\Delta 60_{035}$		0,35
$\Delta 60_{055}$		0,55
$\Delta 90_{015}$	90°	0,15
$\Delta 90_{035}$		0,35
$\Delta 90_{055}$		0,55

Πίνακας 3.4: Ονομασία μοντέλων

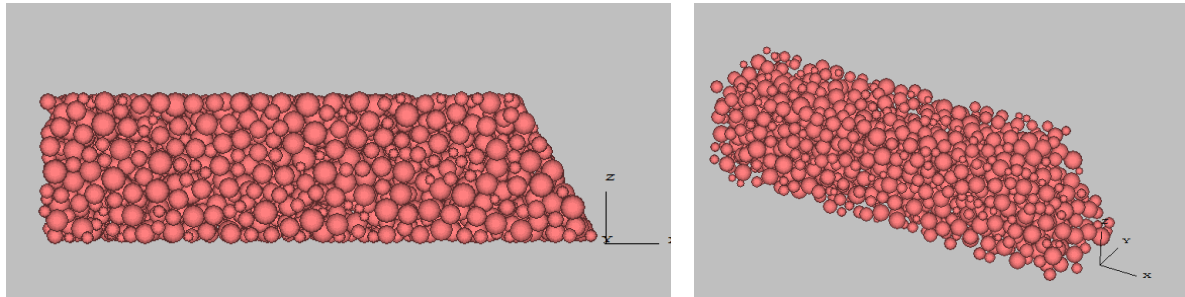
### 3.4 Δημιουργία μοντέλων

Η δημιουργία των μοντέλων έγινε με την FISH, είτε με την χρήση εντολών απευθείας στο πρόγραμμα είτε με την εισαγωγή αρχείων που περιέχουν κώδικα που περιγράφει το κάθε στοιχείο ή κατάσταση.

Ο προγραμματισμός πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια, με χρήση κυρίως αρχείων κώδικα.

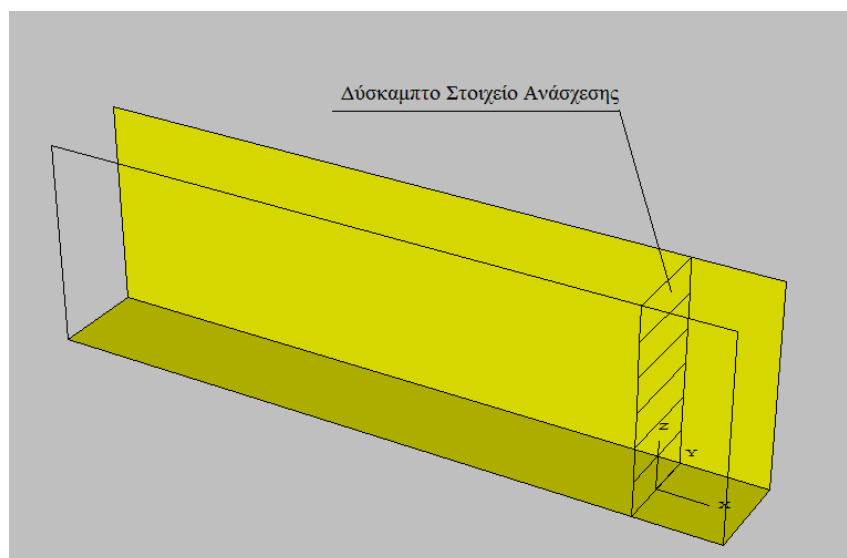
### 3.4.1 Στάδιο 1: Γεωμετρία υλικών, συντονισμός και ιδιότητες

- **Σωματίδια.** Αρχικά ορίζεται η πυκνότητα των σωματιδίων και το επιθυμητό πορώδες. Η ροή περιλαμβάνει μια ευρεία ποικιλία μεγεθών σωματιδίων και έτσι ορίζονται η μέση ακτίνα και ο λόγος μεταξύ μικρότερης και μεγαλύτερης ακτίνας.



Εικόνα 3.1: Σωματίδια σε κατάσταση ισορροπίας

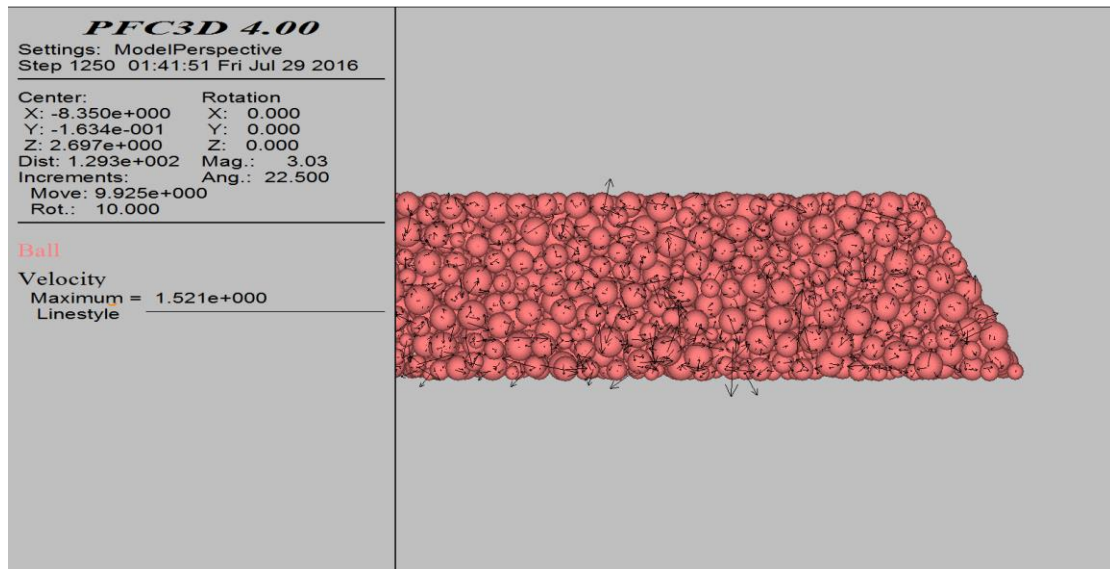
- **Κανάλι.** Ορίζονται οι συντεταγμένες του ώστε τα σωματίδια να βρίσκονται εντός του περιβλήματος και τοποθετημένα στην επιθυμητή θέση.
- **Δύσκαμπτο στοιχείο ανάλυσης.** Δημιουργείται ένας τοίχος που αντιπροσωπεύει το δύσκαμπτο στοιχείο ανάλυσης. Ορίζονται οι γεωμετρικές ή μηχανικές του ιδιότητες και οι συντεταγμένες του.



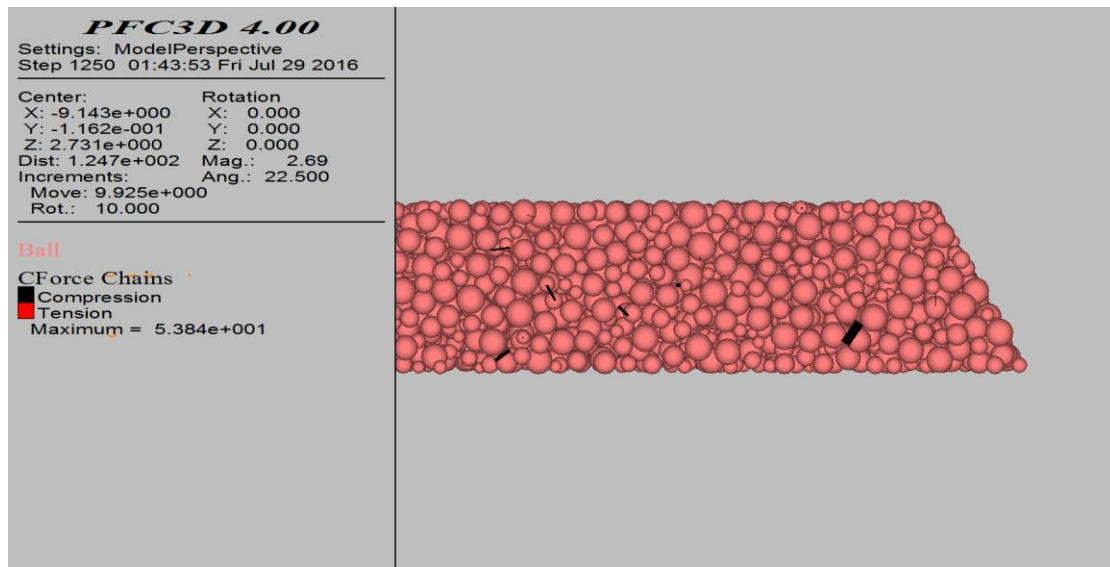
Εικόνα 3.2: Κανάλι και δύσκαμπτο στοιχείο ανάλυσης

### 3.4.2 Στάδιο 2: Προβολή γεωμετρίας και αρχική κατάσταση

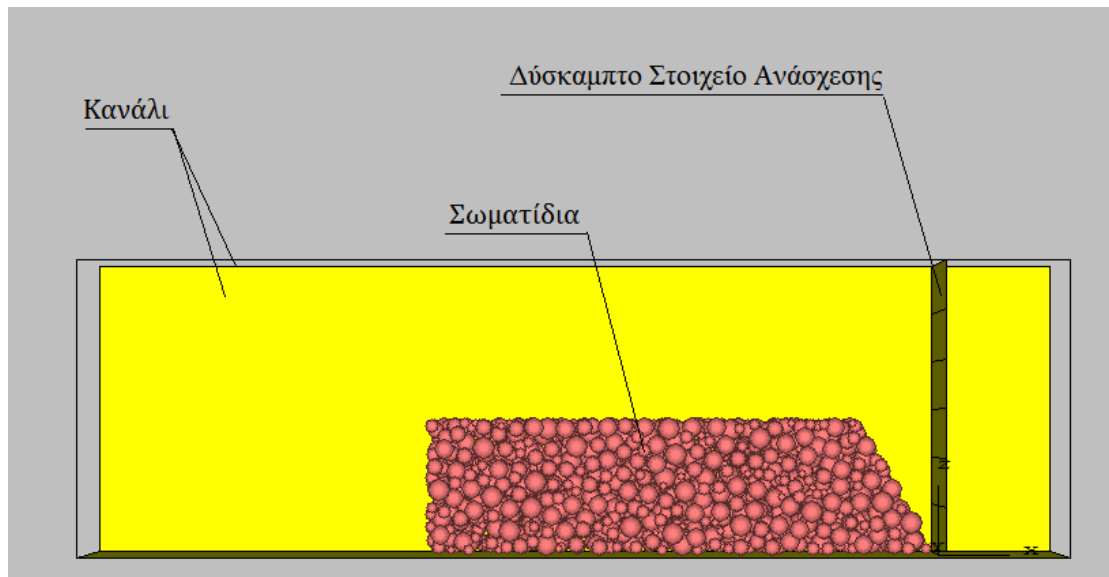
- **Προβολή γεωμετρίας.** Σε αυτό το σημείο οι προηγούμενες εντολές μετατρέπονται σε τρισδιάστατη εικόνα. Επίσης εμφανίζονται παράθυρα που απεικονίζουν την πρόοδο της ταχύτητας των σωματιδίων, τις δυνάμεις επαφής και την πρόοδο της ροής. Υπάρχουν επιλογές απεικόνισης ώστε τα στοιχεία να είναι διακριτά.



Εικόνα 3.3: Ταχύτητες σωματιδίων



Εικόνα 3.4: Δυνάμεις επαφής μεταξύ σωματιδίων



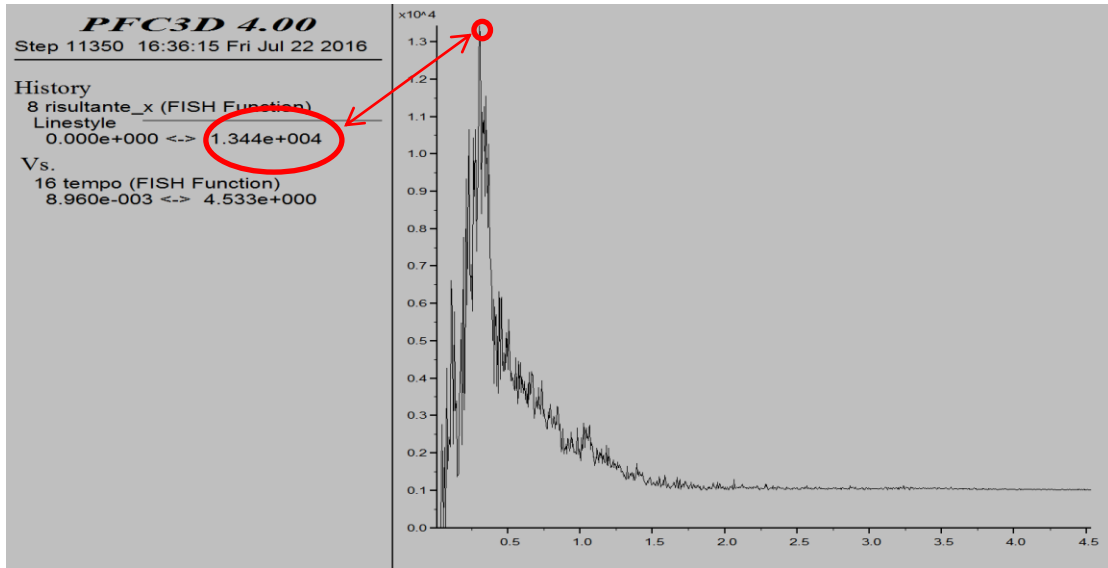
Εικόνα 3.5: Διάταξη σε κατάσταση ισορροπίας πριν την προσομοίωση

- **Αρχική κατάσταση.** Σε αυτό το σημείο όλο το σύστημα θα πρέπει να βρεθεί σε κατάσταση πλήρης ισορροπίας, δηλαδή να μηδενιστούν οι γωνιακές ταχύτητες και τελικά οι δυνάμεις επαφής των σωματιδίων. Αυτό επιτυγχάνεται με μια επαναλαμβανόμενη εντολή που εισάγουμε στο πρόγραμμα.

### 3.4.3 Στάδιο 3: Προβολή της προσομοίωσης και λήψη δεδομένων

- **Προβολή προσομοίωσης.** Εφόσον όλο το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, η προσομοίωση είναι έτοιμη να πραγματοποιηθεί. Καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης το πρόγραμμα μας δείχνει συνεχώς την κίνηση της ροής και την διακύμανση των ταχυτήτων και των δυνάμεων επαφής των σωματιδίων.
- **Λήψη δεδομένων.** Μετά τον προκαθορισμένο αριθμό χρονικών βημάτων (10000 time steps) η προσομοίωση έρχεται στο τέλος. Εμφανίζεται στην οθόνη το διάγραμμα της δύναμης σε συνάρτηση με το χρόνο, από το οποίο επιλέγουμε την μέγιστη τιμή της δύναμης.

Για παράδειγμα, στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 3.6) η μέγιστη τιμή της δύναμης ισούται με  $1,344 \cdot 10^4$  kN :



Εικόνα 3.6: Διάγραμμα δύναμης - χρόνου



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ~ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ

### 4.1 Στάδια ροής προσομοιώσεων

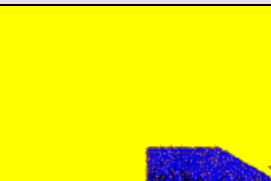
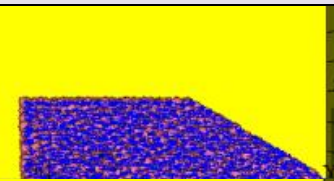
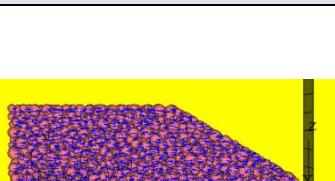
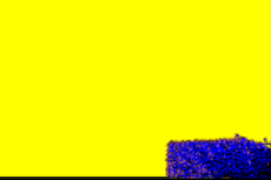
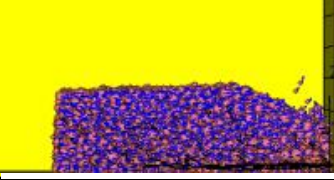
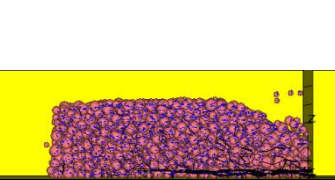

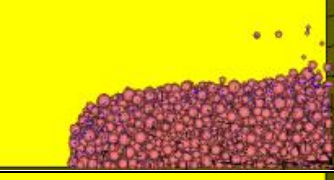
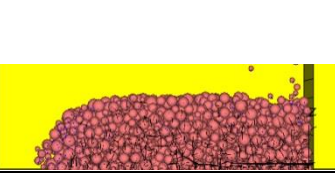
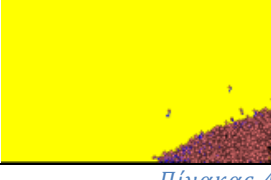
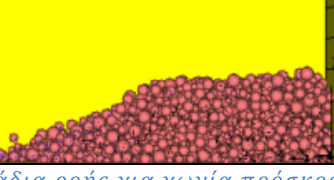
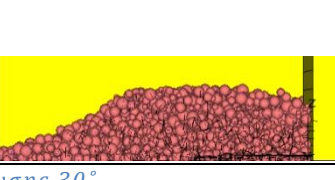
Παρακάτω βρίσκονται οι πίνακες 4.1, 4.2 και 4.3 στους οποίους καταγράφονται με εικόνες τα στάδια των ροών που προσομοιώθηκαν, για όλες τις γωνίες και μέσες ακτίνες που μελετήθηκαν. Στην κάθε εικόνα προβάλλονται οι ταχύτητες και οι δυνάμεις επαφής, με χρώματα μπλε και μαύρο αντίστοιχα.

Ως ΣΤΑΔΙΟ 1, ορίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία μόλις ξεκίνα η προσομοίωση.

Ως ΣΤΑΔΙΟ 2, ορίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία τα σωματίδια έρχονται σε επαφή με το δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης (1000 time steps από ΣΤΑΔΙΟ 1).

Ως ΣΤΑΔΙΟ 3, ορίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία όλη η ροή προσκρούει στο δύσκαμπτο στοιχείο ανάσχεσης. (3000 time steps από ΣΤΑΔΙΟ 1).

Ως ΣΤΑΔΙΟ 4, ορίζεται το τέλος της προσομοίωσης (10000 time steps συνολικά).

	<b>ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ 30°</b>		
	<b>ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,15</b>	<b>ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,35</b>	<b>ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,55</b>
<b>ΣΤΑΔΙΟ 1</b>			
<b>ΣΤΑΔΙΟ 2</b>			
<b>ΣΤΑΔΙΟ 3</b>			
<b>ΣΤΑΔΙΟ 4</b>			

*Πίνακας 4.1: Στάδια ροής για γωνία πρόσκρουσης 30°*

		ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ 60°		
		ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,15	ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,35	ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,55
ΣΤΑΔΙΟ 1				
ΣΤΑΔΙΟ 2				
ΣΤΑΔΙΟ 3				
ΣΤΑΔΙΟ 4				

Πίνακας 4.2: Στάδια ροής για γωνία πρόσκρουσης 60°

		ΓΩΝΙΑ ΠΡΟΣΚΡΟΥΣΗΣ 90°		
		ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,15	ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,35	ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ 0,55
ΣΤΑΔΙΟ 1				
ΣΤΑΔΙΟ 2				
ΣΤΑΔΙΟ 3				
ΣΤΑΔΙΟ 4				

Πίνακας 4.3: Στάδια ροής για γωνία πρόσκρουσης 90°

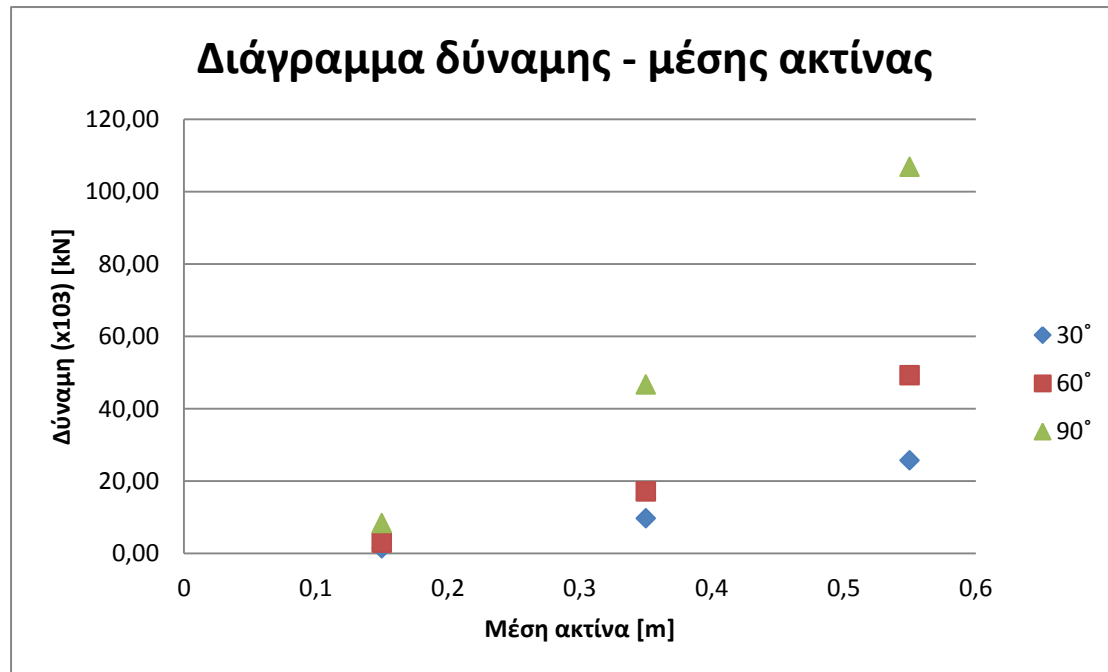
## 4.2 Συλλογή αποτελεσμάτων

Από τα διαγράμματα δύναμης - χρόνου καταλήξαμε στις μέγιστες τιμές των δυνάμεων πρόσκρουσης (πίνακας 4.4α) :

ΟΝΟΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	Δ30_015	Δ30_035	Δ30_055	Δ60_015	Δ60_035	Δ60_055	Δ90_015	Δ90_035	Δ90_055
ΜΕΣΗ ΑΚΤΙΝΑ [m]	0,15	0,35	0,55	0,15	0,35	0,55	0,15	0,35	0,55
ΓΩΝΙΑ	30°			60°			90°		
ΠΟΡΩΔΕΣ	0,55			0,55			0,55		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ	1459			1485			1485		
ΔΥΝΑΜΗ (x10 <sup>3</sup> ) [kN]	1,4	9,7	25,7	3,0	17,1	49,2	8,4	46,7	106,8

Πίνακας 4.4α: Αποτελέσματα δοκιμών

Από τον πίνακα αποτελεσμάτων (πίνακας 4.4) προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.1) :

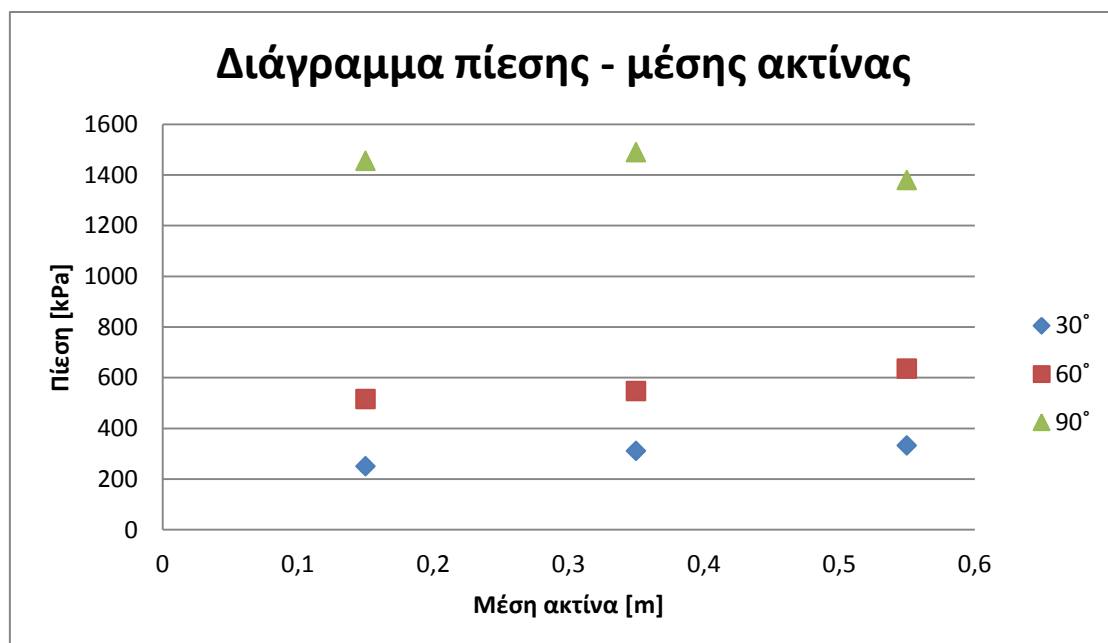


Εικόνα 4.1: Διάγραμμα δύναμης - μέσης ακτίνας για γωνίες 30°, 60°, 90°

Κατόπιν υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες πιέσεις της ροής (πίνακας 4.4β) και προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.2) :

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	Δ30_015	Δ30_035	Δ30_055	Δ60_015	Δ60_035	Δ60_055	Δ90_015	Δ90_035	Δ90_055
ΥΨΟΣ ΡΟΗΣ [m]	2,4	5,6	8,8	2,4	5,6	8,8	2,4	5,6	8,8
ΠΛΑΤΟΣ ΡΟΗΣ [m]	2,4	5,6	8,8	2,4	5,6	8,8	2,4	5,6	8,8
ΕΜΒΑΔΟΝ [m <sup>2</sup> ]	5,8	31,4	77,4	5,8	31,4	77,4	5,8	31,4	77,4
ΔΥΝΑΜΗ (x10 <sup>3</sup> ) [kN]	1,4	9,7	25,7	3,0	17,1	49,2	8,4	46,7	106,8
ΠΙΕΣΗ (kPa)	249	310	332	516	546	636	1455	1489	1379

Πίνακας 4.4β: Πίεση ροής



Εικόνα 4.2: Διάγραμμα πίεσης - μέσης ακτίνας για γωνίες 30°, 60°, 90°

### 4.3 Παρατηρήσεις

---

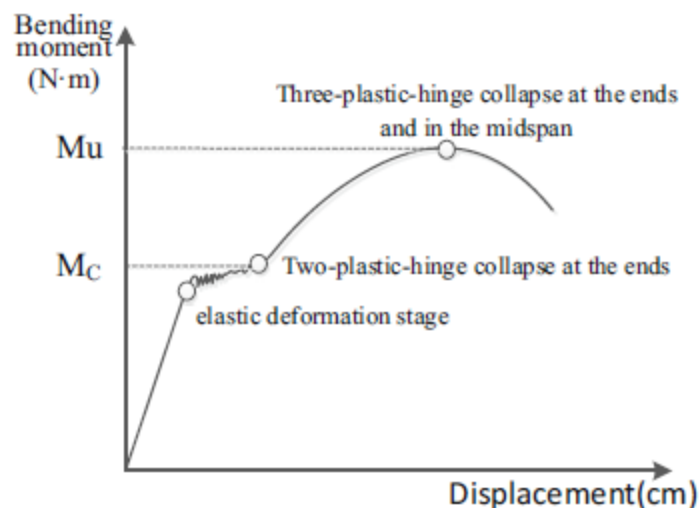
- Στο πρώτο διάγραμμα (εικόνα 4.1), διακρίνεται πως όσο αυξάνονται η γωνία πρόσκρουσης και η μέση ακτίνα τόσο αυξάνεται και η δύναμη πρόσκρουσης.
- Στο δεύτερο διάγραμμα (εικόνα 4.2), διακρίνεται πως όσο αυξάνεται η γωνία πρόσκρουσης αυξάνεται και η πίεση της ροής. Επίσης παρατηρείται πως η πίεση είναι ανεξάρτητη της διαμέτρου των κόκκων, εφόσον οι τιμές τη πίεσης για διαφορετικές ακτίνες κόκκων βρίσκονται πολύ κοντά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ~ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ

### 5.1 Τυπολόγιο

Τα κτίρια αποτελούν την μεγαλύτερη ανησυχία όσον αφορά τις καταστροφές των ρών κορημάτων, αυτό οφείλεται στην αστοχία των τοίχων και των υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η κρίσιμη αντοχή τους περιγράφεται με την δημιουργία αρθρώσεων (μηχανισμός) κατά μήκος των υποστυλωμάτων και διατμητική αστοχία εντός του υποστυλώματος [10].

- Αν το φορτίο πρόσκρουσης της ροής είναι μικρό, το υποστύλωμα παρουσιάζει ελαστική παραμόρφωση.
- Αν αυξηθεί η ροπή της ροής και φτάσει την ροπή διαρροής του υποστυλώματος ( $M_C$ ), τότε αυτό παρουσιάζει πλαστική παραμόρφωση και δημιουργείται πλαστική ζώνη στο ακίνητο άκρο του.
- Αν η ροπή συνεχίσει να αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη ροπή αντοχής του υποστυλώματος ( $M_u$ ), τότε η πλαστική ζώνη συνεχίζει να παραμορφώνεται και δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα του. Αν το υποστύλωμα αποτελεί μη φέροντα οργανισμό, τότε οι αρθρώσεις θα συνεχίσουν να μεταφέρουν την εξωτερική ροπή μέχρι την στιγμή που θα σχηματιστεί νέα άρθρωση στο μέσον του.



Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροπής-μετατόπισης για αστοχία υποστυλώματος [10]

- Μηχανισμός δυο πλαστικών αρθρώσεων (Περίπτωση Α') :

Τα υποστυλώματα του ισογείου προσομοιώνονται με κύληση πάνω και άρθρωση κάτω. Η αστοχία ξεκινά με την δημιουργία δυο πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα του υποστυλώματος, όπου οι ροπές ισούται με την μέγιστη ροπή αντοχής ( $M_u$ ).

Όπου:

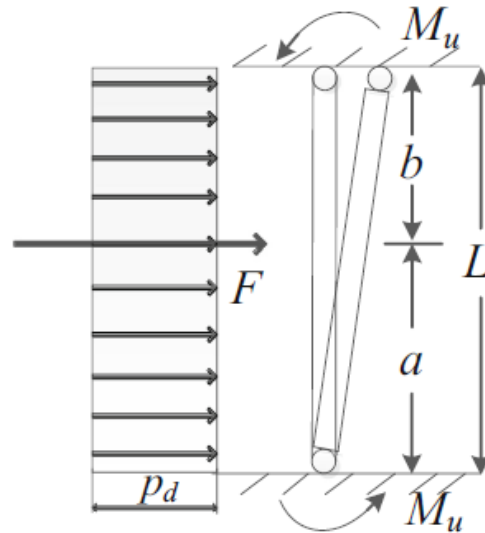
**F**: η δύναμη πρόσκρουσης μεγάλων βράχων

**P<sub>d</sub>**: η μέγιστη πίεση ροής κορημάτων

**M<sub>u</sub>**: η μέγιστη πλαστική ροπή αστοχίας

**a, b**: η απόσταση της F από τα άκρα

**L**: το ύψος υποστυλώματος



Εικόνα 5.2: Μηχανισμός δύο πλαστικών αρθρώσεων [10]

- Δίνεται η σχέση (1) που ενώνει τα παραπάνω μεγέθη :

$$\frac{1}{2} \cdot F \cdot \alpha + \frac{1}{4} \cdot P_d \cdot L^2 = M_u \quad (\text{kNm}) \quad (1)$$

- Η μέγιστη πίεση ροής κορημάτων ( $P_d$ ) σε Pa, υπολογίζεται από τη σχέση (2) :

$$P_d = \alpha_d \cdot \rho \cdot u_o^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (2)$$

Όπου: **α<sub>d</sub>**: εμπειρική σταθερά (εικόνα 5.3)

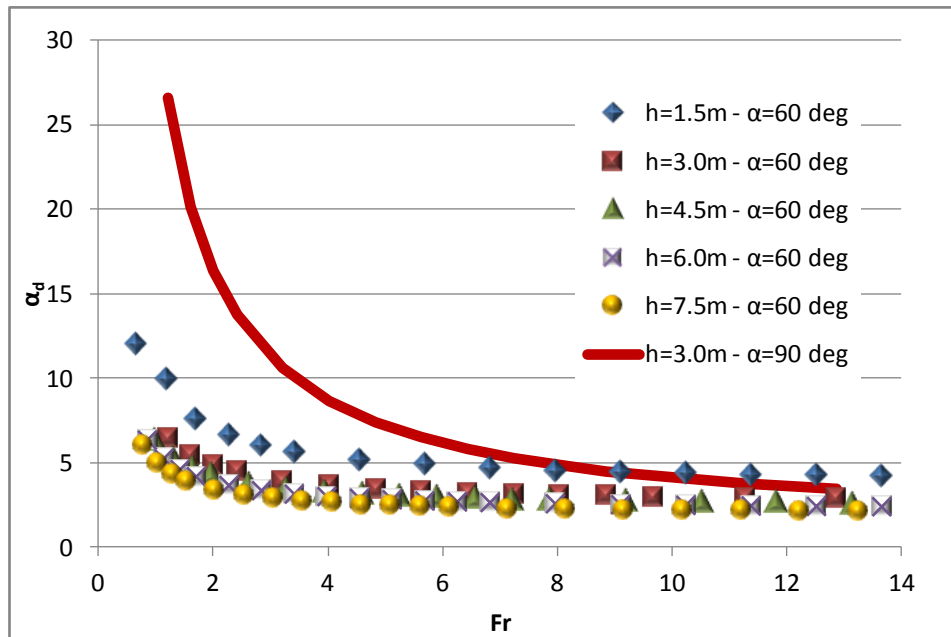
**ρ**: η πυκνότητα της ροής (kg/m<sup>3</sup>)

**u<sub>o</sub>**: η ταχύτητα της ροής (m/s)

- Ο υπολογισμός της εμπειρικής σταθεράς ( $\alpha_d$ ) πραγματοποιείται με την χρήση του παρακάτω διαγράμματος (εικόνα 5.3), με την χρήση του αριθμού Froude ( $F_r$ )[18] της ροής, του ύψους της ροής (h) και της γωνίας πρόσκρουσης ( $\alpha$ ).

$$Fr = \frac{u_o}{\sqrt{gh}} \quad (3)$$

Όπου:  $u_0$ : η ταχύτητα της ροής (m/s)  
 $g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)  
 $h$ : το ύψος της ροής (m)



Εικόνα 5.3: Εμπειρική σταθερά  $\alpha^4$  για μοντέλα της μεθόδου DEM [18]

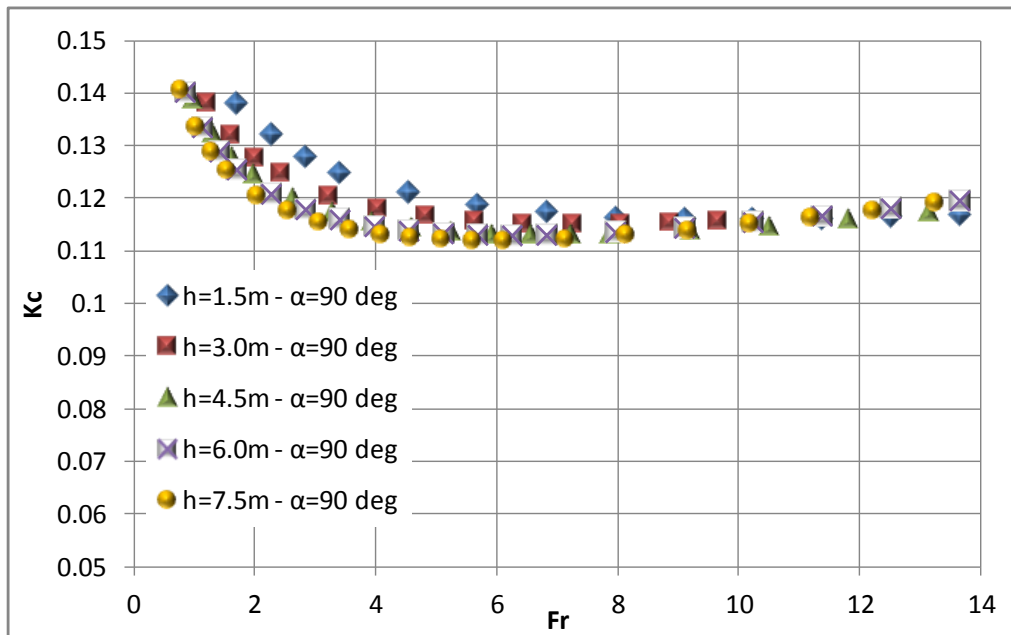
- Η δύναμη πρόσκρουσης μεγάλων βράχων ( $F$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με την απλοϊκή μορφή της εξίσωση Hertz [19] (4) :

$$F = 4000 \cdot K_c \cdot v_b^{1.2} \cdot r_b^2 \quad (\text{kN}) \quad (4)$$

Όπου:  $K_c$ : αδιάστατος μειωτικός συντελεστής φόρτισης (εικόνα 5.7)  
 $v_b$ : η ταχύτητα των βράχων (m/s)  
 $r_b$ : η ακτίνα των βράχων (m)

- Ο υπολογισμός του μειωτικού συντελεστή φόρτισης ( $K_c$ ) πραγματοποιείται με το διάγραμμα (εικόνα 5.7), με τη χρήση του αριθμού Froude ( $Fr$ ) από τον τύπο (3), το ύψος της ροής ( $h$ ) και την γωνία πρόσκρουσης ( $\alpha$ ):





Εικόνα 5.4: Μειωτικός συντελεστής φόρτισης  $K_c$  για τα μοντέλα της μεθόδου DEM [18]

- Μηχανισμός τριών πλαστικών αρθρώσεων (Περίπτωση Β'):

Τα υποστυλώματα προσομοιώνονται με πάκτωση κάτω και άρθρωση πάνω. Η αστοχία ξεκινά με την δημιουργία τριών πλαστικών αρθρώσεων στα άκρα και στο μέσον του υποστυλώματος, όπου οι ροπές ισούται με την μέγιστη ροπή αντοχής ( $M_u$ ).

Όπου:

**F**: η δύναμη πρόσκρουσης μεγάλων βράχων

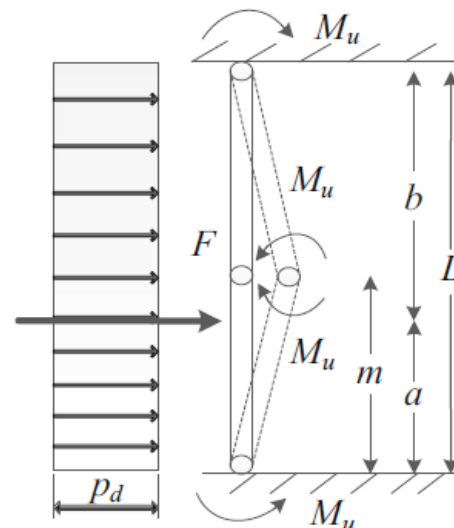
**P<sub>d</sub>**: η μέγιστη πίεση ροής κορημάτων

**M<sub>u</sub>**: η μέγιστη ροπή αστοχίας

**a, b**: η απόσταση της F από τα άκρα

**L**: το ύψος υποστυλώματος

**m**: η απόσταση μεταξύ των αρθρώσεων ( $a \leq m \leq \frac{1}{2}L$ )



Εικόνα 5.5: Μηχανισμός τριών πλαστικών αρθρώσεων [10]

- Δίνεται η σχέση (5) που ενώνει τα παραπάνω μεγέθη:

$$\frac{1}{2} \cdot F \cdot a \cdot (1 - m/L) + \frac{1}{4} \cdot P_d \cdot (L \cdot m - m^2) = M_u \quad (\text{kNm}) \quad (5)$$

- Μηχανισμός διατμητικής αστοχίας (Περίπτωση Γ') :

Η διατμητική αστοχία υποστυλωμάτων σχετίζεται με περιπτώσεις που η ζημιά είναι συγκεντρωμένη σε ένα τμήμα ενός υποστυλώματος που έχει δεχτεί άμεσα την πρόσκρουση με την ροή κορημάτων. Η αστοχία αυτή προκαλείται λόγω καταστροφών που έχουν υποστεί το σκυρόδεμα ή και οι οπλισμοί.

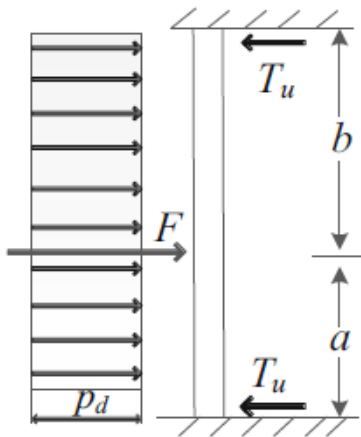
Όπου:

**F:** η δύναμη πρόσκρουσης μεγάλων βράχων

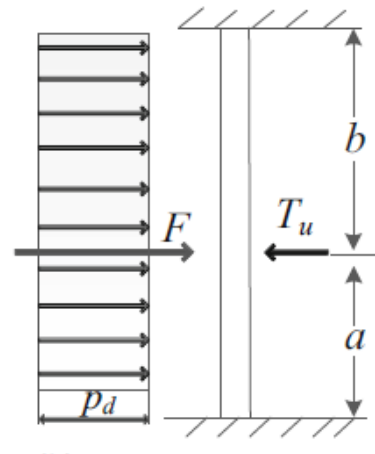
**P<sub>d</sub>:** η μέγιστη πίεση ροής κορημάτων

**a, b:** η απόσταση της F από τα άκρα

**T<sub>u</sub>:** η μέγιστη διατμητική αντοχή



Εικόνα 5.6α: Μηχανισμός διατμητικής αστοχίας. Η ζημιά δημιουργείται στα άκρα του υποστυλώματος. [10]



Εικόνα 5.6β: Μηχανισμός διατμητικής αστοχίας. Η ζημιά δημιουργείται στο τμήμα που δέχεται απευθείας το φορτίο από τους βράχους. [10]

➤ Δίνεται η σχέση (6) που ενώνει τα παραπάνω μεγέθη:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot P_d \cdot L + b^2 / L^2 \cdot (1 + 2\alpha / L) \cdot F = T_u & , \quad \text{αν } R \leq R' \\ F = T_u & , \quad \text{αν } R > R' \end{cases} \quad (6)$$

Η κρίσιμη τιμή της διαμέτρου των σωματιδίων της ροής ( $R'$ ) καθορίζει την θέση της ζημιάς στο υποστυλώμα. Αν το μέγεθος κόκκων των βράχων δεν υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή ( $R'$ ), τότε η ζημιά θα εντοπιστεί στα άκρα του υποστυλώματος (εικόνα 5.6α). Στην αντίθετη περίπτωση το τμήμα του υποστυλώματος που θα υποστεί ζημιά είναι ακριβώς στο σημείο το οποίο θα έρθει σε επαφή με τους βράχους (εικόνα 5.6β). Πραγματοποιείται χρήση του πρώτου τύπου, οπότε θεωρείται πως το μέγεθος κόκκων των βράχων δεν υπερβαίνει την κρίσιμη τιμή ( $R'$ ).

Η μέγιστη διατμητική αντοχή ( $T_u$ ) του υποστυλώματος υπολογίζεται από τον τύπο (7) σύμφωνα με τον Ευρώκώδικα 2 [20] :

$$V_{RD} = T_u = (A_{sw} / s) \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

Όπου:  $A_{sw}$ : το εμβαδόν διατομής των συνδετήρων που διασχίζουν τη ρωγμή ( $\text{m}^2$ )

$s$ : η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων (mm)

$z$ : ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, προσεγγιστικά  $0,9d$  (όπου  $d$  το στατικό ύψος)

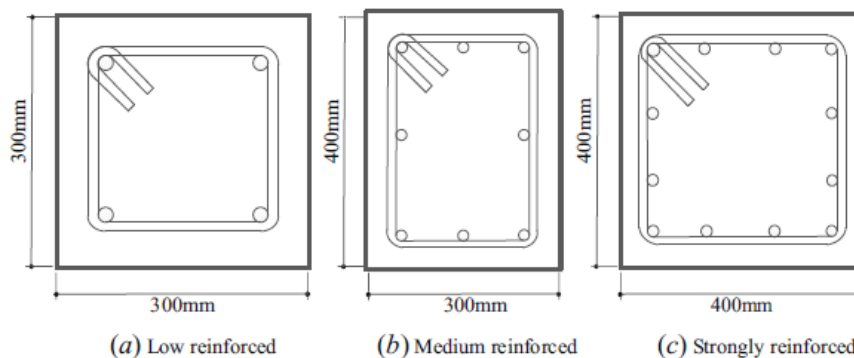
$f_{ywd}$ : η αντοχή σχεδιασμού του οπλισμού διάτμησης

$\theta$ : η γωνία διάτμησης, συνήθως  $45^\circ$

## 5.2 Παρουσίαση προβλήματος

Θα μελετηθούν υποστυλώματα διατομών 30x30, 30x40, 40x40 (εικόνα 5.7) και δύο 60x60 (πίνακας 5.1α και 5.1β). Η μελέτη των πέντε υποστυλωμάτων θα πραγματοποιηθεί για τις τρεις περιπτώσεις αστοχίας και επιμέρους για έξι διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης (Πίνακας 5.2), στις οποίες αλλάζουν οι συντελεστές  $K_c$  και  $\alpha_d$ . Οι περιπτώσεις 5 και 6 διαφοροποιούνται, διότι στην πρώτη εξετάζεται μόνο η δύναμη βράχων και στην δεύτερη μόνο η πίεση της ροής. Επιλέγεται σταθερή ταχύτητα  $u_o = 8,8 \text{ m/sec}$  και αναζητείται η κρίσιμη ακτίνα  $R$  (m) για την οποία θα αντέξει το υποστυλωμα στην κάθε περίπτωση αστοχίας ξεχωριστά. Επίσης σημειώνονται η μέγιστη δύναμη βράχων και μέγιστη πίεση ροής για την κάθε κρίσιμη ακτίνα αντίστοιχα.

Υπολογίζονται η ροπή και η τέμνουσα, σύμφωνα με τις σχέσεις (1), (5) και (6), που προκύπτουν από την δύναμη των βράχων ή/και την πίεση της ροής και ελέγχονται αν υπερβαίνουν την ροπή αντοχής και την αντοχή σε τέμνουσα του κάθε υποστυλώματος. Έτσι προκύπτουν οι πίνακες 5.3<sub>α-γ</sub>, 5.4<sub>α-γ</sub>, και 5.5<sub>α-γ</sub>.



Εικόνα 5.7: Διατομές υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. (a) ελάχιστα οπλισμένο, (b) μέτρια οπλισμένο, (c) ισχυρά οπλισμένο [10]

Υποστυλώματα 60x60		
Οπλισμός	8Φ16	12Φ20
Συνδετήρες	Φ8/10 δίτμητοι	Φ8/10 τετράτμητοι
$A_{sw}$ (cm <sup>2</sup> )	1,01	2,01
s (cm)	10	10
Επικάλυψη c (cm)	5	5
Στατικό Ύψος d (m)	0,55	0,55
z = 0,9d (m)	0,495	0,495
$f_{ywd}$ (MPa)	500 / 1,15	500 / 1,15
$\theta$ (°)	45	45
$V_{RD}$ ή $T_u$ (kN)	216,36	432,72
$M_u$ (kNm)	343	557

Πίνακας 5.1α: Στοιχεία υποστυλωμάτων 60x60

Διατομή	Δ1	Δ2	Δ3	Δ4	Δ5
Τύπος Υποστυλωμάτων	ελάχιστο οπλισμένο	μέτρια οπλισμένο	ισχυρά οπλισμένο	ελάχιστο οπλισμένο	μέτρια οπλισμένο
Διαστάσεις Υποστυλωμάτων (cm)	30x30	30x40	40x40	60x60	60x60
Ποσοστό Οπλισμών (%)	0,68	1,03	1,54	0,4	1,04
Αξονικό Φορτίο (kN)	300	500	880	948	934
Μέγιστη Ροπή Αντοχής (kNm)	70	163	235	343	557
Μέγιστη Διατμητική Αντοχή (kN)	145	204	253	216	433

Πίνακας 5.1β: Στοιχεία υποστυλωμάτων [10]

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ	ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ					
	1	2	3	4	5	6
$K_c$	0,10	0,20	0,10	0,132	0,10	0,00
$\alpha_d$	2,50	1,00	5,00	5,00	0,00	2,50
ΠΗΓΕΣ	Hong-Kong	Taiwan	Hong-Kong	Εικόνα 5.4	Hong-Kong	
			Εικόνα 5.3	Εικόνα 5.3		

Πίνακας 5.2: Στοιχεία περιπτώσεων [18]

### 5.2.1 Μελέτη περίπτωσης Α': Μηχανισμός δυο πλαστικών αρθρώσεων

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Α'					
Κρίσιμη Ακτίνα R [m]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	0,12	0,19	0,23	0,27	0,35
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	0,09	0,14	0,16	0,20	0,25
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	0,12	0,19	0,22	0,26	0,34
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	0,11	0,16	0,20	0,23	0,30
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	0,13	0,19	0,24	0,28	0,36
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	0,64	0,99	1,03	1,01	1,29

Πίνακας 5.3α: Μέγιστη κρίσιμη ακτίνα για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Α'					
F [kN]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	78,307	196,312	287,670	396,430	666,155
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	88,096	213,170	278,426	435,040	679,750
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	78,307	196,312	263,199	367,609	628,633
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	86,856	183,761	287,126	379,725	646,034
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	91,902	196,312	313,229	426,339	704,765
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	-	-	-	-	-

Πίνακας 5.3β: Μέγιστη δύναμη βράχων για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Α'					
P <sub>d</sub> [kPa]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	1,063	2,664	5,205	10,760	18,080
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	0,239	0,579	1,008	2,361	3,690
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	2,125	5,328	9,525	19,955	34,123
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	1,786	3,778	7,872	15,615	26,567
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	-	-	-	-	-
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	30,227	72,328	104,388	150,559	245,609

Πίνακας 5.3γ: Μέγιστη πίεση ροής για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

### 5.2.2 Μελέτη περίπτωσης Β': Μηχανισμός τριών πλαστικών αρθρώσεων

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Β'					
Κρίσιμη Ακτίνα R [m]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	0,27	0,41	0,49	0,58	0,75
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	0,19	0,29	0,35	0,43	0,54
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	0,26	0,40	0,48	0,56	0,72
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	0,23	0,35	0,42	0,50	0,63
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	0,27	0,42	0,50	0,61	0,78
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	1,29	1,98	2,06	2,03	2,59

Πίνακας 5.4α: Μέγιστη κρίσιμη ακτίνα για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Β'					
F [kN]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	396,430	914,128	1305,664	1829,343	3058,875
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	392,624	914,672	1332,310	2010,972	3171,442
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	367,609	870,080	1252,915	1705,357	2819,059
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	379,725	879,325	1266,227	1794,540	2849,012
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	396,430	959,263	1359,500	2023,480	3308,479
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	-	-	-	-	-

Πίνακας 5.4β: Μέγιστη δύναμη βράχων για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Β'					
P <sub>a</sub> [kPa]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	5,380	12,405	23,625	49,650	83,021
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	1,066	2,483	4,821	10,916	17,215
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	9,977	23,615	45,341	92,570	153,024
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	7,808	18,080	34,714	73,796	117,159
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	-	-	-	-	-
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	122,805	289,312	417,55	608,215	990,068

Πίνακας 5.4γ: Μέγιστη πίεση ροής για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

### 5.2.3 Μελέτη περίπτωσης Γ': Μηχανισμός με διατμητική αστοχία

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Γ'					
Κρίσιμη Ακτίνα R [m]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	0,22	0,26	0,29	0,27	0,38
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	0,16	0,19	0,21	0,19	0,27
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	0,22	0,26	0,28	0,26	0,37
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	0,19	0,23	0,25	0,23	0,32
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	0,23	0,27	0,30	0,28	0,39
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	1,14	1,35	1,30	0,98	1,39

Πίνακας 5.5α: Μέγιστη κρίσιμη ακτίνα για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Γ'					
F [kN]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	263,199	367,609	457,336	396,430	785,247
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	278,426	392,624	479,632	392,624	792,860
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	263,199	367,609	426,339	367,609	744,462
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	259,132	379,725	448,635	379,725	735,044
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	287,670	396,430	483,420	426,339	827,12
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	-	-	-	-	-

Πίνακας 5.5β: Μέγιστη δύναμη βράχων για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ Γ'					
P <sub>a</sub> [kPa]	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1	3,572	4,989	8,275	10,760	21,312
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2	0,756	1,066	1,736	2,131	4,304
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 3	7,143	9,977	15,428	19,955	40,411
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 4	5,328	7,808	12,299	15,615	30,227
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 5	-	-	-	-	-
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 6	95,906	134,494	166,288	141,748	285,164

Πίνακας 5.5γ: Μέγιστη πίεση ροής για την οποία αντέχει το κάθε υποστύλωμα

### 5.3 Σχολιασμοί

- Στην περίπτωση Α' για τις περιπτώσεις 1-4 παρατηρείται ένα εύρος κρίσιμων ακτινών από 0,09m - 0,35m. Στην περίπτωση 5 το εύρος τιμών κυμαίνεται μεταξύ 0,13m - 0,36m και στην περίπτωση 6 αυξάνεται αρκετά και εντοπίζεται από 0,64m - 1,29m.
- Στην περίπτωση Β' για τις περιπτώσεις 1-4 παρατηρείται ένα εύρος κρίσιμων ακτινών από 0,19m - 0,75m. Στην περίπτωση 5 το εύρος τιμών κυμαίνεται μεταξύ 0,27m - 0,78m και στην περίπτωση 6 αυξάνεται αρκετά και εντοπίζεται από 1,29m - 2,59m.
- Στην περίπτωση Γ' για τις περιπτώσεις 1-4 παρατηρείται ένα εύρος κρίσιμων ακτινών από 0,16m - 0,38m. Στην περίπτωση 5 το εύρος τιμών κυμαίνεται μεταξύ 0,23m - 0,39m και στην περίπτωση 6 αυξάνεται αρκετά και εντοπίζεται από 1,14m - 1,39m.
- Η περίπτωση 2 (κανονισμός Ταϊβάν) παρουσιάζει τις δυσμενέστερες τιμές (μικρότερες ακτίνες βράχων) σε κάθε περίπτωση αστοχίας. Η αμέσως επόμενη είναι η περίπτωση 4 (τιμές από διαγράμματα) και μετά ακολουθούν οι περιπτώσεις 1 (κανονισμός Χονγκ Κονγκ) και 3 (συνδυασμός) οι οποίες παρουσιάζουν σχεδόν ίδιες τιμές για τις κρίσιμες ακτίνες.
- Για τις υποπεριπτώσεις 1-4 υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των κρίσιμων ακτινών κατά διατομή υποστυλώματος:

Μέσοι Όροι Κρίσιμων Ακτινών (m)						
Διατομές	Δ1 30x30	Δ2 30x40	Δ3 40x40	Δ4 60x60	Δ5 60x60	Συνολικός Μέσος Όρος
Περίπτωση 1	0,20	0,29	0,34	0,37	0,49	0,34
Περίπτωση 2	0,15	0,21	0,24	0,27	0,35	0,24
Περίπτωση 3	0,20	0,28	0,33	0,36	0,48	0,33
Περίπτωση 4	0,18	0,25	0,29	0,32	0,42	0,29

Πίνακας 5.6: Μέσοι όροι κρίσιμων ακτινών για περιπτώσεις 1-4

- Περίπτωση 1 (Hong-Kong) Σ.Μ.Ο. = 0,34m

- Περίπτωση 2 (Taiwan) Σ.Μ.Ο. = 0,24m

Ο μέσος όρος των παραπάνω τιμών ισούται με 0,29m δηλαδή όσο είναι και ο μέσος όρος στην περίπτωση 4. Επομένως, βρέθηκε με τους συντελεστές που υπολογίστηκαν από τα διαγράμματα [18] μια μέση τιμή μεταξύ των κανονισμών του Χονγκ Κονγκ και της Ταϊβάν.



Όσον αφορά την περίπτωση 3 στην οποία χρησιμοποιήθηκε  $K_c = 0,10$  (Χονγκ Κονγκ) και  $\alpha_d = 5,00$  το οποίο υπολογίστηκε από το διάγραμμα [18] και είναι το διπλάσιο από την τιμή του ίδιου κανονισμού ( $\alpha_d = 2,50$ ), οι τιμές θεωρούνται ίδιες με την περίπτωση 1. Άρα αν διπλασιάσουμε την πίεση της ροής δεν μεταβάλλεται η ακτίνα για την οποία θα αντέξει το υποστύλωμα.

Αντίθετα στην περίπτωση 4 που  $\alpha_d = 5,00$  και αυξάνεται κατά 0,032 το  $K_c$  από τον κανονισμό του Χονγκ Κονγκ ( $K_c = 0,10$ ) οι μέσοι όροι είναι διαφορετικοί και μικρότεροι από τους μέσους όρους της περίπτωσης 3. Άρα αν αυξήσουμε έστω και λίγο την δύναμη των βράχων μικραίνει η ακτίνα για την οποία θα αντέξει το υποστύλωμα.

- Στην περίπτωση 5 που εξετάστηκε η αντοχή μόνο στην δύναμη βράχων, απαιτείται μικρότερη ακτίνα ώστε να μην αστοχήσει το υποστύλωμα, ενώ στην περίπτωση 6 που εξετάστηκε η αντοχή μόνο στην πίεση ροής, απαιτείται μεγαλύτερη ακτίνα. Συγκεκριμένα ο λόγος των ακτινών για κάθε υποστύλωμα περιγράφεται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 5.7):

Λόγος ακτίνας περίπτωσης 6 (μόνο $P_d$ ) προς ακτίνα περίπτωσης 5 (μόνο $F$ )					
Περιπτώσεις Αστοχίας	$\Delta 1$ 30x30	$\Delta 2$ 30x40	$\Delta 3$ 40x40	$\Delta 4$ 60x60	$\Delta 5$ 60x60
A'	4,9	5,2	4,3	3,6	3,6
B'	4,8	4,7	4,1	3,3	3,3
Γ'	5,0	5,0	4,3	3,5	3,6

Πίνακας 5.7: Λόγος ακτίνας περιπτώσεων 5 και 6

Κατά μέσο όρο η κρίσιμη ακτίνα που απαιτήθηκε ώστε να αντέξει το υποστύλωμα την ροπή και τέμνουσα που δημιούργησε μόνο η πίεση ροής είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από την κρίσιμη ακτίνα που θα άντεχε το υποστύλωμα μόνο από την δύναμη βράχων.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] **Δ. Ι. Παπανικολάου, ΧΡ. Ι. Σιδεράς (2012)**. Γεωλογία η επιστήμη της Γης. Εκδόσεις ΠΑΤΑΚΗ

[2] **Κ. Λουμπασάκης (2013-2014)**. Σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος Τεχνική Γεωλογία Ι, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ

<http://www.legah.metal.ntua.gr/pdf/tex1/2013/09%20%CE%A4%CE%B5%CF%87%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE%CF%82%20%CE%93%CE%B5%CF%89%CE%B%CE%BF%CE%B3%CE%AF%CE%B1%CF%82%20%CE%99%20%20%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%83%CE%B8%CE%AE%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82%20II.pdf>

[3] **Γ. Βαβάσης (2012)**. Γεωλογία και Τεχνικά Έργα, Σημειώσεις διαλέξεων μαθήματος Τεχνική Γεωλογία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ, ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ

[4] **Jan Novotný (2013)**. Varnes' Landslide Classification (1978), Faculty of Science, Charles University of Prague

[http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2\\_Varnes\\_landslide\\_classification.pdf](http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf)

[5] **Ζ. Μισύρη (2014)**. Μελέτη της κατολισθαίνουσας ζώνης της Παναγοπούλας Ν. Αχαΐας με την εγκατάσταση αποκλισιομέτρων, Διατριβή μεταπτυχιακού, Τμήμα Βιολογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών

[http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8398/1/nhmerths\(1\).pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/8398/1/nhmerths(1).pdf)

[6] **Γ. Τόλιος, Γ. Παρασκευόπουλος**. Είδη, αίτια και τρόποι αντιμετώπισης κατολισθήσεων, Πτυχιακή εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΤΕ, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης

[7] **Δρ. Ε. Λυκούδη (2005)**. Σημειώσεις διαλέξεων για κατολισθήσεις, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ

[8] **K. Gournopoulos (2013)**. Design of Landslide Mitigation Measures in the Ionian Islands, Thesis, Department of Structural Engineering, Piraeus University of Applied Sciences

[9] **S. He, W. Liu, X. Li (2016)**. Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles, Environmental Earth Sciences, 75: 298, 1-8

[10] **Chao Zeng, Peng Cui, Zhiman Su, Yu Lei, Rong Chen (2014)**. Failure modes of reinforced concrete columns of buildings under debris flow impact, Landslides 12: 561-571

[11] **ZHOU Gongdan (2010)**. The mechanisms of debris flow. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Hong Kong University of Science and Technology, ch: 1 & 6, pp 1-152

[12] **Xiaobo Wang (2008)**. Geotechnical Analysis of Flow Slides, Debris Flows, and Related Phenomena. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Alberta

[13] **Μαρία Ε. Μπασάνου (2000)**. Δυναμική των κατολισθήσεων: Μαθηματική και πειραματική προσομοίωση ταχέων κινήσεων συνθριμμάτων, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, ΕΜΠ

[14] **ITASCA user's guide**

[15] **Cundall and Strack (1979) P.A. Cundall and O.D.L. Strack (1979)**. A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp 47-65

[16] **Cundall (1971) Cundall, P.A., (1971)**. A computer model for simulating progressive large scale movements in block rock systems. Symp. Intl. Society of Rock Mechanics, Nauncy, France

[17] <http://www.maccaferri.com/gr/λυσεις/φράχτες-ανάσχεσης-ροής-κορημάτων/>

[18] **F. Calvetti, C.G. di Prisco, E. G. Vairaktaris (2016)**. Debris flow impact forces on rigid barriers: existing practice versus DEM numerical results, Conference: 1st International Conference on Natural Hazards & Infrastructure (ICONHIC 2016), At Chania, Greece, Volume: 1

[19] **J.S.H. Kwan (2012)**. Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-resisting Barriers, GEO Report No. 270, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department, ch: 3, eq: 3.1

[20] **EN 1992-1-1 (2004)**. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.